



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
ΜΕ ΗΜΙΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ:
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
HEC-HMS ΚΑΙ AFFDEF**

Παναγιωτοπούλου Μαρία

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη &
Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

**Επιβλέπων:
Ναλμπάντης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
ΜΕ ΗΜΙΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ:
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ
ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ HEC-HMS ΚΑΙ AFFDEF**

Παναγιωτοπούλου Μαρία

Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Επιβλέπων:

Ναλμπάντης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής

Αντί προλόγου

Η πλημμύρα αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κοινωνία σε όλες τις χρονικές περιόδους του ανθρώπινου πολιτισμού. Μάλιστα, σε πολλούς πολιτισμούς, συχνός ήταν ο μύθος του κατακλυσμού ή ο μύθος της πλημμύρας κατά τον οποίο μία θεότητα τιμωρεί τον πολιτισμό στέλνοντας πλημμύρα για να τον καταστρέψει. Από την αρχαιότητα, λοιπόν, ο άνθρωπος προσπαθεί να προστατευτεί από τις επιδράσεις του φαινομένου. Στη σύγχρονη εποχή η διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου στοχεύει στο σκοπό αυτό, με την εφαρμογή μαθηματικών υδρολογικών μοντέλων.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην επιστημονική προσπάθεια για διερεύνηση, με υδρολογικά μοντέλα, της επίδρασης της χωρικής διαμέρισης στην εκτίμηση της απορροής πλημμύρας. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας κ. Ιωάννη Ναλμπάντη, ο οποίος πρωτίστως μου καλλιέργησε το ενδιαφέρον για την υδρολογική έρευνα. Παράλληλα, με οδήγησε με εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές να αντιμετωπίσω ολοκληρωμένα την παρούσα μελέτη.

Ιδιαίτερα χρήσιμη ήταν η γνώση που απέκτησα παρακολουθώντας τα μαθήματα του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων Ε.Μ.Π.» αφού αυτή με βοήθησε να ολοκληρώσω τη φοίτησή μου στο εν λόγω πρόγραμμα με τη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Όσον αφορά στα δεδομένα της περιοχής μελέτης, ευχαριστώ τον κ. Α. Κουκουβίνο της ερευνητικής ομάδας «ΙΤΙΑ», για τη διάθεση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους στη λεκάνη απορροής του Πηνειού που εξέτασα, καθώς και των εδαφολογικών τύπων σε ψηφιακή μορφή της λεκάνης αυτής. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή Α. Montanari και τη Διδάκτορα G. Morreti για την προσπάθειά τους να με βοηθήσουν να επιλύσω προβλήματα κατά την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου AFFDEF. Απαραίτητη για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας ήταν η συμβολή της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας των υδρολόγων στο διαδίκτυο, που με δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και όχι μόνο, λειτουργεί επικουρικά και ενισχύει τη μελέτη κάθε ερευνητή.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου που έμπρακτα στήριξαν την επιλογή μου να παρακολουθήσω το ΔΠΜΣ και να εκπονήσω αυτή την εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|------------|
| Αντί προλόγου | i |
| Περίληψη | vii |
| Extended abstract | ix |
| Κατάλογος συμβόλων | xv |
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος..... | 1 |
| 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας..... | 1 |
| 2 Εκτίμηση απορροής με υδρολογικά μοντέλα | 3 |
| 2.1 Υδρολογικά μοντέλα | 3 |
| 2.2 Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της απορροής..... | 4 |
| 3 Υδρολογικά Μοντέλα | 7 |
| 3.1 Το HEC-GeoHMS | 7 |
| 3.2 Το υδρολογικό μοντέλο HEC – HMS | 8 |
| 3.2.1 Εισαγωγή..... | 8 |
| 3.2.2 Υδρολογικός κύκλος στο HEC – HMS..... | 8 |
| 3.2.3 Φυσική περιγραφή λεκάνης απορροής – Μετεωρολογικό μοντέλο..... | 10 |
| 3.2.4 Προσομοίωση..... | 13 |
| 3.2.5 Βελτιστοποίηση παραμέτρων..... | 13 |
| 3.3 Το υδρολογικό μοντέλο AFFDEF | 14 |
| 3.3.1 Εισαγωγή..... | 14 |
| 3.3.2 Περιγραφή του μοντέλου | 15 |
| 3.3.3 Καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου..... | 16 |
| 3.3.4 Προσομοίωση βροχής – απορροής | 18 |
| 3.3.5 Κύριο αρχείο εισόδου | 19 |
| 3.3.6 Λίστα ρουτινών | 22 |
| 3.4 Σύγκριση των δύο μοντέλων | 25 |
| 4 Εφαρμογή στη Λεκάνη Απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας | 29 |
| 4.1 Εισαγωγή | 29 |
| 4.2 Δεδομένα Περιοχής Μελέτης | 30 |
| 4.2.1 Υδρολογικά Δεδομένα | 30 |
| 4.2.2 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους | 30 |
| 4.2.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά λεκάνης | 33 |
| 4.2.4 Χρήσεις Γης Λεκάνης Μελέτης..... | 34 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2.5 | Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (n) | 36 |
| 4.2.6 | Αριθμός καμπύλης (CN) | 38 |
| 4.3 | Εισαγωγή δεδομένων στο HEC - GeoHMS | 40 |
| 4.3.1 | Προεπεξεργασία Εδάφους – Terrain Preprocessing..... | 40 |
| 4.3.2 | Ρύθμιση νέας εργασίας στο HEC-HMS | 43 |
| 4.3.3 | Υπολογισμός χαρακτηριστικών ρεμάτων και υπολεκανών | 45 |
| 4.3.4 | Εκτίμηση Υδρολογικών παραμέτρων | 45 |
| 4.3.5 | Δημιουργία αρχείων εισόδου στο HMS..... | 45 |
| 4.4 | Εισαγωγή δεδομένων στο HEC - HMS..... | 47 |
| 4.4.1 | Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model) | 48 |
| 4.4.2 | Μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorologic Model) και Συνθήκες ελέγχου (Control Specifications) | 50 |
| 4.5 | Διερεύνηση της επίδρασης του πλήθους των υπολεκανών | 51 |
| 4.5.1 | Εισαγωγή..... | 52 |
| 4.5.2 | Εξέταση επεισοδίου 13 ^{ης} Απριλίου 1965 | 53 |
| 4.5.3 | Εξέταση επεισοδίου 7 ^{ης} Δεκεμβρίου 1966..... | 56 |
| 4.5.4 | Εξέταση επεισοδίου 14 ^{ης} Δεκεμβρίου 1966..... | 58 |
| 4.5.5 | Εξέταση επεισοδίου 13 ^{ης} Νοεμβρίου 1968 | 62 |
| 4.6 | Αξιολόγηση αποτελεσμάτων | 68 |
| 5 | Εικονική Λεκάνη Απορροής | 83 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 83 |
| 5.1.1 | Δεδομένα βροχόπτωσης..... | 83 |
| 5.1.2 | Τοπογραφικά δεδομένα..... | 84 |
| 5.1.3 | Ικανότητα διήθησης | 85 |
| 5.1.4 | Δεδομένα τραχύτητας εδάφους..... | 86 |
| 5.2 | Εφαρμογή στο AFFDEF..... | 86 |
| 5.2.1 | Εισαγωγή..... | 86 |
| 5.2.2 | Εκτέλεση AFFDEF για μεμονωμένο γεγονός βροχόπτωσης..... | 87 |
| 5.3 | Εκτίμηση πλημμύρας Εικονικής λεκάνης απορροής στο HEC - HMS | 92 |
| 5.3.1 | Εισαγωγή..... | 92 |
| 5.3.2 | Εξέταση επεισοδίου πλημμύρας | 93 |
| 5.3.3 | Εξέταση επεισοδίου πλημμύρας μετά από ενιαία μεταβολή παραμέτρων | 102 |
| 5.4 | Αξιολόγηση αποτελεσμάτων | 105 |
| 6 | Σύνοψη - Συμπεράσματα | 109 |
| 7 | Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα | 113 |
| | Αναφορές | 115 |
| | Στην ελληνική γλώσσα | 115 |
| | Ξενόγλωσσες | 115 |
| | Διαδικτυακοί τόποι | 119 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| Παράρτημα Α | 121 |
| Παράρτημα Β: Σχήματα | 129 |

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής με μαθηματικά υδρολογικά μοντέλα. Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται η επίδραση της χωρικής διαμέρισης της εξεταζόμενης κάθε φορά λεκάνης απορροής στην εκτίμηση του όγκου και της αιχμής της πλημμύρας. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται επικουρικά τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών για τη δημιουργία αρχείων εισόδου στα χρησιμοποιούμενα υδρολογικά μοντέλα.

Εξετάζονται δύο λεκάνες απορροής: η λεκάνη απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας από το υδρολογικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, καθώς και μία εικονική λεκάνη μελέτης. Στην περίπτωση της πρώτης λεκάνης επιχειρείται η εκτίμηση της παροχής αιχμής και του όγκου πλημμύρας, διαθέτοντας δεδομένα βροχόπτωσης για τέσσερα επεισόδια. Για τα επεισόδια αυτά διαθέτονται δεδομένα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Σε πρώτη φάση εισάγονται τα εδαφολογικά και υδρολογικά δεδομένα σε ΣΓΠ για επεξεργασία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το λογισμικό ArcMap 9.1 της ESRI, όπου γεωαναφέρονται και υφίστανται επεξεργασία τα δεδομένα που αφορούν τη γήινη επιφάνεια (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, Εδαφικοί τύποι, Χρήσεις Γης). Μετά την οπτικοποίηση της χωρικής πληροφορίας, εφαρμόζεται ένα εργαλείο-πρόσθετο στο ArcMap, το HEC-GeoHMS και παράγονται με αυτό τα απαραίτητα αρχεία εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο βροχής-απορροής. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο κάρναβος διευθύνσεων ροής και συμβάλλουσας περιοχής, καθορίζεται το υδρογραφικό δίκτυο καθώς και οι υπολεκάνες που θα εξεταστούν.

Με τον ορισμό των κατάλληλων τιμών κατωφλίου για τη δημιουργία ροής, σχεδιάζονται μία λεκάνη απορροής, καθώς και τρεις, πέντε και εννιά υπολεκάνες. Κάθε μία περίπτωση χωρικής ανάλυσης (ή, διαμέρισης) αποτελεί και ένα ξεχωριστό σενάριο που εξετάζεται ακολούθως στο HEC-HMS. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων προσομοιώνεται η λεκάνη στο μοντέλο και αξιολογούνται οι εκτιμήσεις όγκου και παροχής αιχμής συγκριτικά με τις πραγματικές τιμές (από μετρήσεις). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος (αριθμός καμπύλης CN, χρόνος υστέρησης, συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, χρονικό βήμα προσομοίωσης και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας), με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση των απορροών. Η χειροκίνητη αυτή βελτιστοποίηση γίνεται σε ποσοστιαία κλίμακα και αρχικά είναι διαφορετική από επεισόδιο σε επεισόδιο για κάθε σενάριο. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται και ενιαία βελτιστοποίηση των παραμέτρων, ταυτόχρονα σε όλα τα επεισόδια, αλλά διαφορετική σε κάθε σενάριο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία αξιολογούνται ώστε, τελικά, να εξαχθούν τα σενάρια μελέτης που αποδίδουν πιο πιστά την παρατηρημένη πλημμύρα.

Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και στην εικονική λεκάνη απορροής, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται ως δεδομένα αναφοράς απορροής, τα εξαγόμενα της προσομοίωσης με το καταναμημένο μοντέλο AFFDEF. Κατά την επεξεργασία της λεκάνης στο HEC-HMS οι εκτιμημένες τιμές απορροής και όγκου συγκρίνονται με τις αντίστοιχες από το AFFDEF. Έπειτα, καταλήγουμε στα σενάρια μελέτης αριθμού υπολεκανών που φαίνεται ότι εκτιμούν πιο ορθά τον όγκο και την αιχμή της πλημμύρας.

Από την επεξεργασία των δεδομένων φαίνεται ότι πιθανότατα να μην υπάρχει 'κανόνας' όσον αφορά την επιλογή του αριθμού υπολεκανών. Η τελική επιλογή θα πρέπει να προκύπτει

μετά από ενδελεχή μελέτη και βελτιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου μοντέλου προσομοίωσης, στην οποία θα λαμβάνονται υπόψη τόσο το μέγεθος και η ποικιλομορφία της κάθε λεκάνης απορροής, όσο και τα παρατηρημένα πλημμυρικά γεγονότα.

Extended abstract

Flood is usually defined as “the temporary covering by water of land not normally covered by water” (Directive 2007/60/EC). According to the Emergency Disaster Database (EM-DAT), the number of serious floods located in Southern Europe, in 2010-2011, is about twenty. During these floods, sixty-eight people have lost their lives, while the estimated damage has been over €1.59 billion (EM-DAT, 2012).

As flood is an extreme instance of physical phenomena or hazard, it cannot be “controlled” in any real sense. However, the damage caused, could be predicted and reduced through human intervention. The spatial scale used for these interventions is the watershed where the prediction of discharge at its outlet takes place. For this reason, a number of mathematical hydrological models have been developed. Hydrological simulation models can be classified according to a wide range of characteristics. For watershed analysis, the major categories of interest include physically based or conceptual or stochastic or black-box models. Also, there are event and continuous models, as well as lumped and distributed ones. The last two categories are characterized by spatial analysis of the studied watershed. Practically, lumped models describe physical processes and mechanisms in the same way in the entire basin, while semi-distributed models create subbasins with different hydrological and geological characteristics. On the other hand, fully distributed models divide the watershed into a large number of cells.

In literature it is not clear which is the preferable hydrologic model, concerning spatial analysis. One would expect from the distributed models to produce more accurate results than the lumped ones, as the former take into consideration the spatial variety of hydrological variables and parameters in a basin. But this assumption is not fully supported in related projects (Smith et.al., 2004).

The objective of this research is to estimate flood discharges and investigate the spatial analysis effect on these. For this purpose two watersheds are studied; the first one is part of the upstream basin of Pinios river with its outlet located at Sarakina town, while the other is an experimental or virtual basin. With respect to the Sarakina Basin, hourly rainfall data are available from two raingauges for four flood events, together with hourly discharge data from Sarakina Basin outlet.

At an initial stage hydrological data, DEM, and data for land uses and geology of the region are entered in a GIS for further elaboration. In this thesis, ArcMap 9.1 from ESRI is used. Following the visualization of the data, another hydrology toolkit is introduced. This is HEC-GeoHMS which uses ArcView and the Spatial Analyst extension to develop a number of inputs for the hydrological modelling system. Analyzing digital terrain data, HEC-GeoHMS transforms the drainage paths and watershed boundaries into a data structure that represents the drainage network. HEC-GeoHMS defines streams within a basin by selecting a threshold and after that subbasins are created. Four different thresholds are entered in order to produce one basin, as well as three, five and nine subbasins. Each of these, represent another scenario which is further examined with the aid of HEC-HMS.

HEC-HMS is the main hydrological model used for this study, where the files created in HEC-GeoHMS, as well as precipitation time series are used as inputs. After each simulation, computed results are compared with observations. Better estimations in peak discharge and flood volume require changing several parameters, such as the Runoff Curve Number, the lag time, the Manning's Roughness Coefficient, the simulation time interval and the percentage of impermeable areas. This manual optimization is different for every flood event and each scenario. Figure 1 represents an observed hyetograph for one flood event and the related estimated ones for each scenario.

Flood event: 14th December 1966

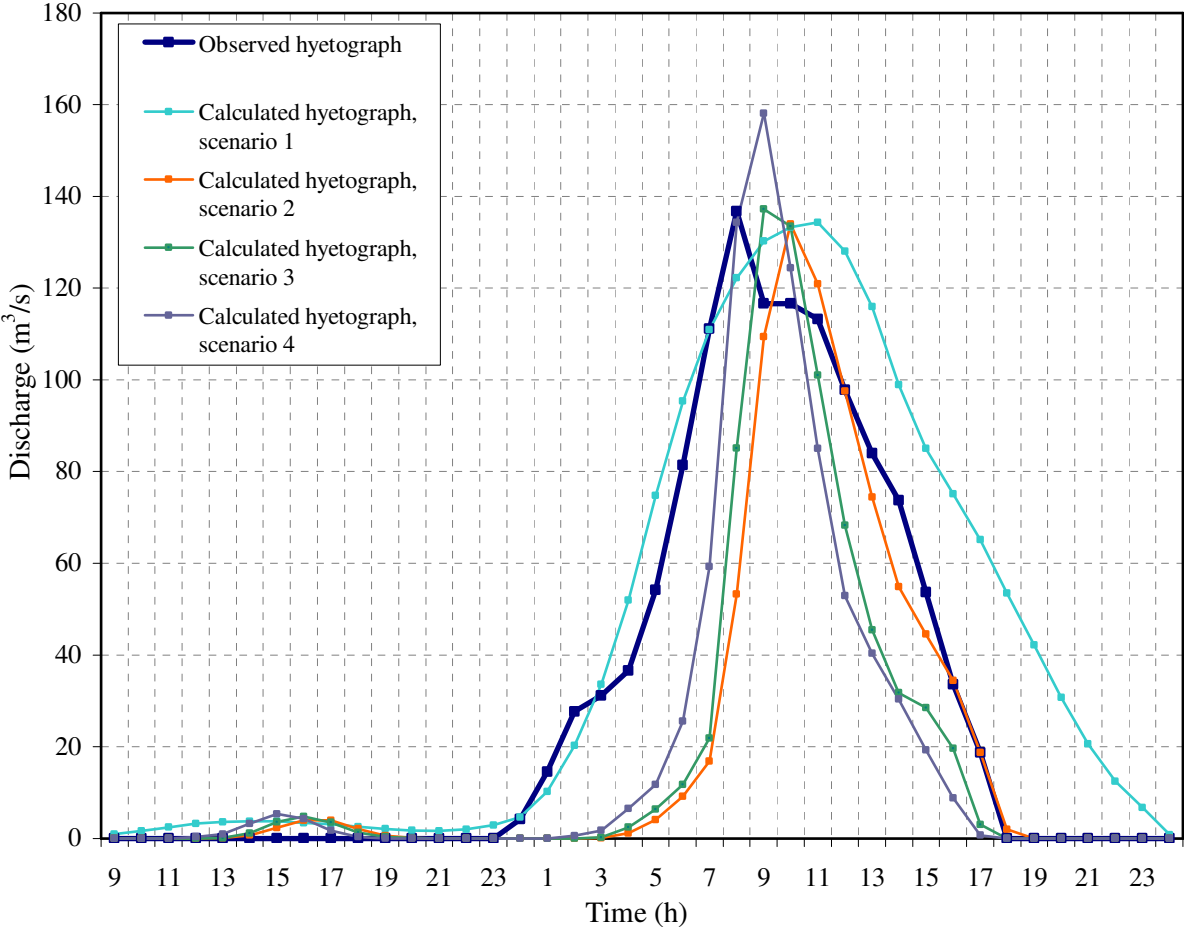


Figure 1: Observed and estimated hyetographs for the flood event of 14-12-1966

The next two more diagrams (Figure 2 and 3) show the percentage error of estimating peak discharge and flood volume for each scenario.

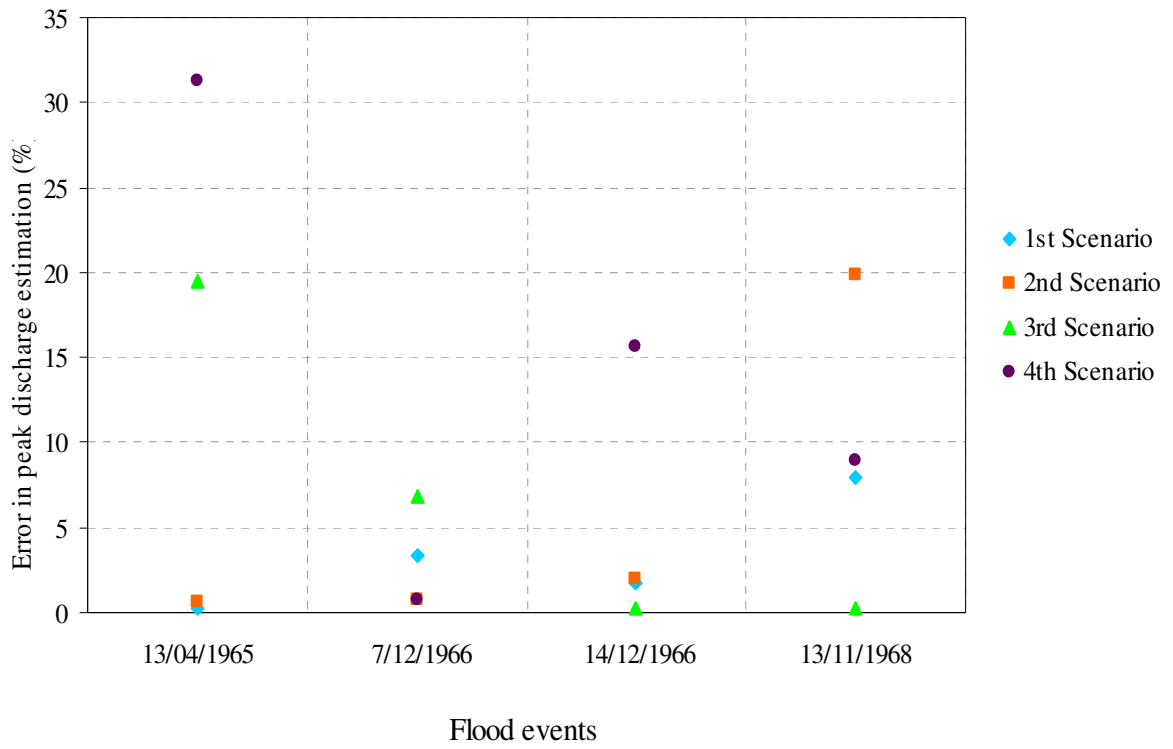


Figure 2: Percentage error of estimating peak discharge of all the flood events.

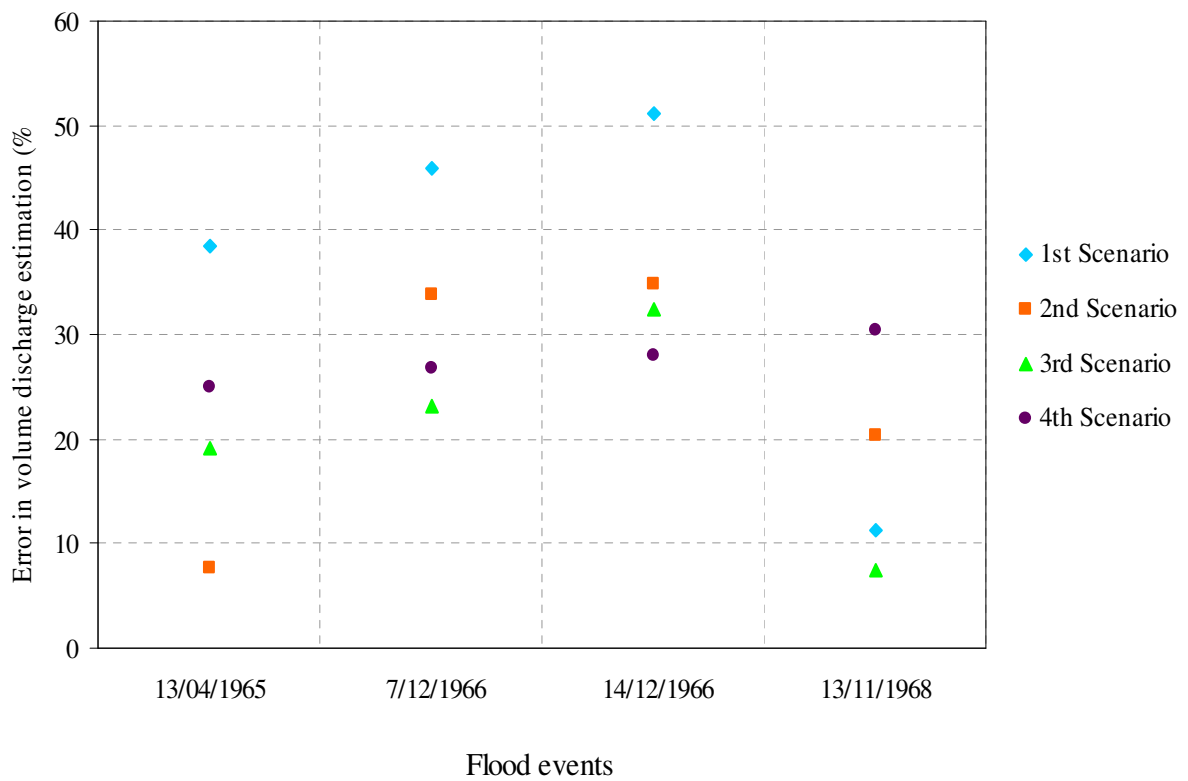


Figure 3: Percentage error of estimating total flood volume of all the flood events.

Simulation is repeated, with mean values of the best estimated parameters of every flood event used. The new calculated values of peak discharge and total flood volume result in larger errors. However, all optimization trials show that the third scenario induces a percentage error of estimation of the peak discharge less than 10% in three flood events. The error of estimating total flood volume is also less than 10% in two flood events, which represents the best estimation in flood volume among the four scenarios.

In the case of the virtual basin, simulation via AFFDEF is carried out. AFFDEF is a distributed model running in Windows Command Line, datasets represent grids and have been entered in the program as .txt files. Following this, files are modified in order to be entered in ArcGIS and follow the procedure described above. The simulated peak discharge and flood volume through HEC-HMS are now compared with the ones derived from AFFDEF modelling. Figure 4 describes the observed hyetographs for each scenario, produced by AFFDEF and HEC-HMS.

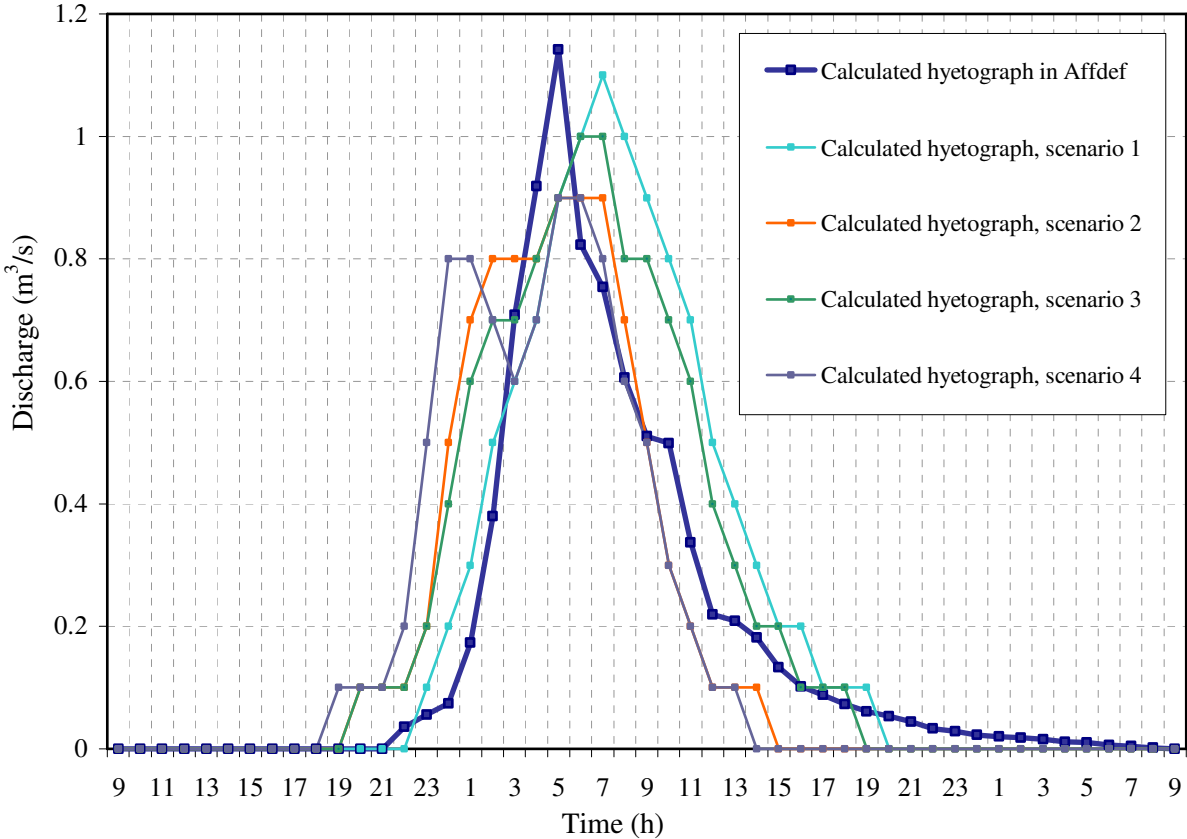


Figure 4: Observed hyetographs for the virtual basin

A new optimization where mean values of the best estimated parameters of every scenario are then used. Obviously, this change resulted in bigger errors. However, it was found out that in all optimization trials, use of one watershed, as well as nine subbasins result in estimation errors less than 10%.

Summary and Conclusions

Through this postgraduate thesis a methodology for the evaluation of the spatial analysis effect on flood estimation was developed. The most important conclusions drawn from the research are the following:

- The simulation of the Sarakina Basin showed that the best estimation of peak discharge and flood volume is accomplished in the third scenario which includes five subbasins. Following this conviction, scenario first, second and fourth qualify as best with respect to peak discharge and flood volume.
- Having only one basin implies the use of a lumped model which obviously simplifies the problem, since mean values for parameters are used. However, the variety in land uses and characteristics results in significant errors. That is why in Sarakina basin, outputs are overestimated.
- On the other hand, this overestimation could be acceptable in the planning and construction phases of a hydraulic work, when high return periods are used. Furthermore, lumped modelling contributes in easier management of the system and less time consuming procedures such as Preprocessing, Processing data and Evaluating simulations results.
- One would expect that using more subbasins results in better estimations. However, simulations in the Sarakina basin showed that the scenario with nine basins calculated the discharge with significant errors. Probably this implies that there should be more optimizations trials for estimating parameter values. Unfortunately, this could not easily be realized since large number of subbasins implies a large number of parameters to optimize. Performing a large number of optimization trials is practically prohibited in manual optimization.
- Research with the virtual basin concludes that the first and fourth scenarios came with the lowest errors.
- The evaluation of the peak discharge seems more accurate than the evaluation of the total flood volume in all cases. In most cases, the volume is underestimated. It is usually affected by volume of precipitation and the spatial distribution of rainfall. Any errors in precipitation data are automatically transferred in the estimates of the discharge. Also, one of the two available raingauges in the Sarakina basin is located outside the basin, which implies larger errors in spatial averages through the Thiessen method.

Κατάλογος συμβόλων

| Σύμβολο | Ερμηνεία |
|------------|---|
| Δx | Απόσταση μεταξύ των δύο διατομών για τις οποίες γίνεται η διόδευση (χωρικό βήμα) |
| ΣΓΠ | Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών |
| ΜΥΓ | Μοναδιαίο Υδρογράφημα |
| ΨΜΕ | Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους |
| A | Εμβαδό της λεκάνης απορροής |
| A_0 | Κρίσιμη περιοχή στήριξης |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange, Αμερικανικός Πρότυπος Κώδικας για Ανταλλαγή Πληροφοριών |
| c | Ταχύτητα μεταδόσεως κύματος |
| CN | Αριθμός καμπύλης απορροής μεθόδου SCS |
| DEM | Digital Elevation Model |
| GIS | Geographic Information System |
| HEC | Hydrologic Engineering Center |
| GeoHMS | Geospatial Hydrologic Modeling Extension |
| HMS | Hydrologic Modeling System |
| h_r | Ύψος βροχόπτωσης |
| h_R | Ύψος του περισσεύματος βροχής (ή άμεση απορροή) |
| I | Εισροή στον υδρολογικό κύκλο |
| K | Συντελεστής με διαστάσεις χρόνου στη μέθοδο διόδευσης |
| Q | Εκροή στον υδρολογικό κύκλο |
| q_0 | Ειδική παροχή (παροχή ανά μονάδα πλάτους του αγωγού) |
| Q_p | Παροχή αιχμής |
| S | Μέγιστο θεωρητικό ύψος απωλειών |
| S_0 | Κλίση του πυθμένα του καναλιού |
| SCS | Soil Conservation Service |
| T_p | Χρόνος ανόδου |
| x | Αδιάστατος αριθμός για τη μέθοδο διόδευσης |

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η υπέρβαση της διοχετευτικής ικανότητας του υδατορεύματος από τη συνολική παροχή, που έχει ως αποτέλεσμα την κατάκλυση των γύρω περιοχών αποτελεί το φαινόμενο της πλημμύρας. Σύμφωνα με τη Βάση Δεδομένων Φυσικών Καταστροφών (Emergency Disaster Database) ο εκτιμώμενος αριθμός πλημμυρών μεγάλης κλίμακας κατά τα έτη 2010-2011, μόνο στη Νότια Ευρώπη, αγγίζει τα είκοσι γεγονότα. Σε αυτά τα πλημμυρικά επεισόδια, εξηνταοκτώ άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους, ενώ η οικονομική ζημιά για τα κράτη ανέρχεται στα 1.59 δισ. €.

Αιτίες των πλημμυρών αποτελούν φυσικά φαινόμενα τα οποία δε δύναται να ελεγχθούν από τον άνθρωπο. Παρ' όλα αυτά το μέγεθος της ζημιάς που επιφέρουν μπορεί να προβλεφθεί αλλά και να περιοριστεί από ανθρώπινες δράσεις. Αυτές, συχνά, αναφέρονται ως οι έξι άξονες διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας και περιλαμβάνουν την πρόληψη με εφαρμογή μη κατασκευαστικών μέτρων, την προστασία με κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων, την ετοιμότητα για συντονισμένη αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, τη μετρίαση με δράσεις έναντι επερχόμενης πλημμύρας, την αντιμετώπιση από τον κρατικό μηχανισμό αμέσως μετά την πλημμύρα και την αποκατάσταση όπου ανασυγκροτούνται οι υποδομές.

Μάλιστα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση ακολουθείται η Οδηγία 2007/60 με σκοπό «τη θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα» (Μαμάσης, 2012).

Στο πλαίσιο των δράσεων έναντι της πλημμύρας, η χωρική κλίμακα που ενδιαφέρει είναι η κλίμακα της λεκάνης απορροής όπου σε πρώτη φάση εκτιμάται η απορροή στην έξοδό της. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα με διαφορετικούς χειρισμούς της χωρικής κατανομής των φυσικών διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή εντός της εξεταζόμενης λεκάνης. Εισάγεται έτσι η σημασία της χωρικής ανάλυσης του συστήματος στην τελικά εκτιμώμενη απορροή. Η έννοια της χωρικής ανάλυσης είναι στενά συνδεδεμένη με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, αφού αυτά αποτελούν εργαλεία με τα οποία αναλύεται η δομή του χώρου και οι αλληλεξαρτήσεις των στοιχείων του.

Στη βιβλιογραφία η έρευνα της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της πλημμύρας δεν καταλήγει σε ένα ξεκάθαρο αποτέλεσμα, αφού υποστηρίζεται τόσο η αδρομερή αντιμετώπιση της λεκάνης απορροής, όσο και η πιο λεπτομερής, με το διαχωρισμό της σε υπολεκάνες ή και φατνία. Η διερεύνηση αυτού του θέματος αποτελεί πρόκληση στο πεδίο εκτίμησης πλημμυρικών απορροών μιας και συμβάλλει στην διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, με το πρώτο (1) Κεφάλαιο να χρησιμοποιείται για να εισάγει τον αναγνώστη στο θέμα που εξετάζεται. Στο δεύτερο (2)

Κεφάλαιο γίνεται λόγος για τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στον υδρολογικό σχεδιασμό, την κατάταξή τους ανάλογα με τη μαθηματική δομή, τη χρονική διακριτότητα και τη χωρική κλίμακα, καθώς και τα σφάλματα που συνήθως παρουσιάζουν. Επιπλέον, παρουσιάζονται εργασίες από την ξένη βιβλιογραφία που διερευνούν την επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της απορροής με διάφορα μοντέλα. Το επόμενο Κεφάλαιο (3) παρουσιάζει τα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην εν λόγω μελέτη. Συγκεκριμένα, περιγράφονται το ημικατανεμημένο HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) και οι διεργασίες που αυτό λαμβάνει υπόψη, καθώς και το πρόσθετο σε περιβάλλον GIS, το HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension). Ακόμη, παρουσιάζεται το κατανεμημένο μοντέλο βροχής- απορροής AFFDEF που έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο της Μπολόνια (Moretti and Montanari, 2004).

Το Κεφάλαιο 4 αφορά στην περιοχή μελέτης, που είναι η λεκάνη απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας. Αναφέρονται η πηγή και ο τρόπος δημιουργίας των δεδομένων εισόδου (βροχόπτωση, ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χρήσεις γης, εδαφολογικοί τύποι, αριθμός καμπύλης CN και συντελεστής τραχύτητας κατά Manning). Ακόμη, παρουσιάζεται η επεξεργασία των δεδομένων στο HEC-GeoHMS και η δημιουργία των τελικών αρχείων εισόδου στο μοντέλο HEC-HMS. Στη συνέχεια, στο υποκεφάλαιο 4.4 περιλαμβάνεται η προσομοίωση της λεκάνης στο HEC-HMS και η εξέταση διαφορετικού αριθμού υπολεκανών. Εδώ, διερευνάται κατά πόσο επηρεάζει το συνολικό όγκο και την αιχμή της απορροής που εκτιμώνται, η εφαρμογή διαφορετικού αριθμού υπολεκανών. Στο εδάφιο 4.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Το επόμενο Κεφάλαιο (5) μελετά την περίπτωση μιας εικονικής λεκάνης απορροής εφαρμόζοντας δύο υδρολογικά μοντέλα, το AFFDEF και το προηγούμενα χρησιμοποιημένο HEC-HMS. Και εδώ διερευνάται η επιρροή της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση των απορροών μιας υποθετικής πλημμύρας.

Τέλος, στα Κεφάλαια 6 και 7 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της λεκάνης απορροής του Πηνειού και από την εικονική λεκάνη, καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Εκτίμηση απορροής με υδρολογικά μοντέλα

2.1 Υδρολογικά μοντέλα

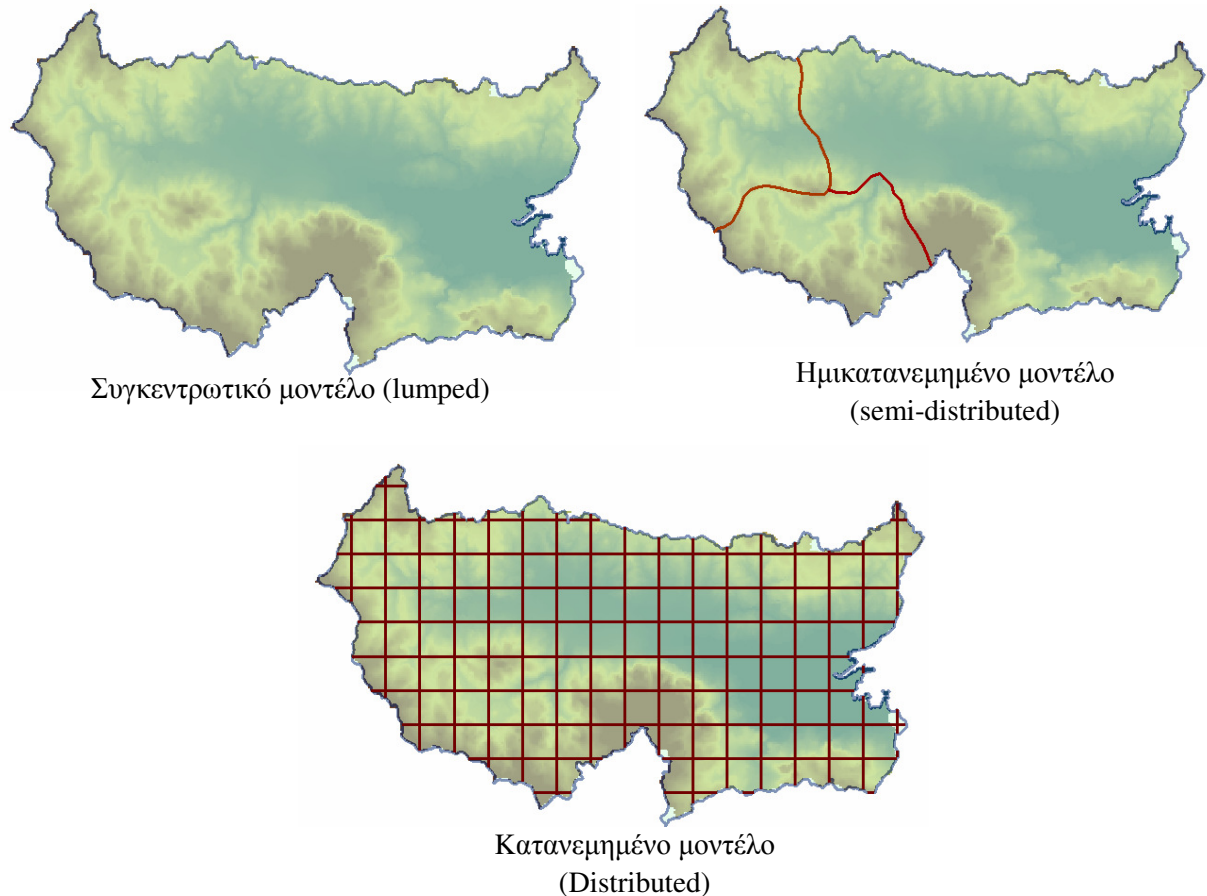
Ως μοντέλο θεωρείται η αναπαραγωγή της συμπεριφοράς και απόκρισης ενός φυσικού συστήματος. Στην περίπτωση του υδρολογικού μοντέλου νοείται ένα σύνολο μαθηματικών μετασχηματισμών με εισροές δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις και εκροές την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών. Η ποσότητα και ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα στις μελέτες μέσω μοντέλων. Η ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων εμποδίζει τη χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης και κατά συνέπεια την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας (Μαμάσης, 2009).

Τα μοντέλα διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη μαθηματική δομή, τη χρονική διακριτότητα και τη χωρική κλίμακα. Όσον αφορά στη μαθηματική δομή, περιλαμβάνονται τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically based) που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας βασισμένα σε φυσικούς νόμους και ημιεμπειρικές σχέσεις. Ακόμη, διακρίνονται τα εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα που χρησιμοποιούν μαθηματικά ανάλογα για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών, όπου και διατυπώνουν τις παραμετρικές σχέσεις. Από την άλλη, τα στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα προσεγγίζουν πιθανοτικά τις υδρολογικές διεργασίες. Τέλος, τα μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box) αναπτύσσουν δομή και παραμέτρους που δεν έχουν φυσική ερμηνεία αλλά προκύπτουν από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία.

Μεγάλης χρονικής διακριτότητας μοντέλα χρησιμοποιούνται εν γένει για διαχειριστικούς σκοπούς πλημμυρών λαμβάνοντας μηνιαία ή ημερήσια κλίμακα. Αντίθετα, τα μοντέλα με μικρή χρονική διακριτότητα νοούνται εκείνα που χρησιμοποιούν ωριαίου ή και μικρότερου βήματος χρονοσειρές.

Η χωρική κλίμακα περιλαμβάνει την έκταση του χώρου όπου εκτυλίσσονται σχέσεις και αλληλεπιδράσεις, αλλά και τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων. Ανάλογα, λοιπόν, με τη χωρική κλίμακα τα μοντέλα διακρίνονται σε αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά (lumped), ημικατανεμημένα (semi-distributed), ημιαδιαμέριστα (semi-lumped) και κατανεμημένα (distributed).

Ειδικότερα, στα συγκεντρωτικά μοντέλα αναπαριστάται το υδατικό ισοζύγιο σε μία ενιαία λεκάνη απορροής για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της. Σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης θεωρούνται ενιαίες παράμετροι και χρονοσειρές φόρτισης. Παραδείγματα συγκεντρωτικών μοντέλων αποτελούν τα μοναδιαία υδρογραφήματα κατά Snyder και Clark. Στα ημικατανεμημένα μοντέλα η λεκάνη απορροής διαιρείται σε υπολεκάνες, όπου κάθε μία υπολεκάνη παρουσιάζει διαφορετικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Τελικά, η απορροή στην έξοδο της λεκάνης υπολογίζεται εφαρμόζοντας μεθόδους διόδευσης. Ανάμεσα στα συγκεντρωτικά και ημικατανεμημένα μοντέλα θεωρούνται τα ημιαδιαμέριστα. Σε αυτά, εφαρμόζονται διακριτές χωρικές ενότητες με διαφορετικές φορτίσεις. Η διαίρεση της λεκάνης απορροής σε μικρές ενότητες ή φατνία οδηγεί στη θεώρηση των κατανεμημένων μοντέλων όπως το κινηματικό κύμα. Σε κάθε φατνίο εφαρμόζεται διαφορετική φόρτιση και κατά κανόνα διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει παραδείγματα μοντέλων που θα εφαρμοστούν και στην παρούσα μελέτη.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα εφαρμογής διαφορετικών μοντέλων σε μία λεκάνη απορροής.

Τα στάδια ανάπτυξης κάθε υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνουν την επιλογή των διεργασιών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση, τη διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων, την κωδικοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας, τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων καθώς και την αποτίμηση της συνέπειας και ακρίβειας του μοντέλου. Τελικά, κάθε μοντέλο που συντάσσεται, εμφανίζει σφάλματα εκτίμησης των πραγματικών τιμών των υπό εξέταση μεγεθών. Αυτά μπορεί να οφείλονται στη δομή του μοντέλου, όπως είναι η αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών αδρώς ή αντίθετα υπερβολικά λεπτομερώς. Σημαντικά είναι και τα σφάλματα που προέρχονται από τις μετρήσεις των δεδομένων εισόδου αλλά και τη χωροχρονική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης (Μαμάσης, 2009).

2.2 Η επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της απορροής

Η εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από κριτήρια όπως ο σκοπός της μελέτης, η επιστημονική εγκυρότητα του μοντέλου, οι απαιτήσεις σε δεδομένα, οι ικανότητες των χρηστών, το κόστος εφαρμογής, η χωροχρονική ανάλυση. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται μεταξύ άλλων, η επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση κρίσιμων μεγεθών ενός πλημμυρικού επεισοδίου.

Τα συγκεντρωτικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν για περισσότερα από πενήντα χρόνια ως υδρολογικά εργαλεία εκτίμησης απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή απαιτεί πολλές υποθέσεις που συχνά στρεβλώνουν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Για παράδειγμα, υποθέτουν όμοιους εδαφικούς τύπους, χρήσεις γης σε όλη την έκταση της λεκάνης, με αποτέλεσμα οι μέσοι όροι των παραμέτρων αυτών να μην αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές.

Τα κατανεμημένα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη χωρική ποικιλία των υδρολογικών παραμέτρων σε μια λεκάνη αλλά και την υδρολογική απόκριση περιοχών με ελλειπίς μετρήσεις στη λεκάνη (Smith et al., 2004). Αναμένεται συχνά από τα μοντέλα αυτά να εκτιμούν πιο πιστά τις απορροές πλημμυρικών γεγονότων. Η υπόθεση όμως ότι τα ημικατανεμημένα και κατανεμημένα μοντέλα, που έχουν μεγαλύτερη χωρική ανάλυση, είναι πιο ακριβή σε σχέση με τα συγκεντρωτικά δεν έχει στοιχειοθετηθεί στη βιβλιογραφία, καθώς ελάχιστες μελέτες φανερώνουν την υπεροχή τους (Smith et al., 2004).

Ο διαμερισμός σε χωρικές ενότητες αυξάνει αυτόματα και τον αριθμό των υδρολογικών παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν. Η τυχόν έλλειψη δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση ή βελτιστοποίηση παραμέτρων σε μια μελέτη, προκαλεί ασάφεια για το εάν τελικά υπήρξε όφελος από το διαχωρισμό σε υπολεκάνες. Στην περίπτωση των ημικατανεμημένων μοντέλων το πρόβλημα καθορισμού των παραμέτρων (και της βελτιστοποίησής τους) παραμένει κάθε φορά που χωρίζεται η λεκάνη σε ακόμα μικρότερα τμήματα. Ερευνητές όπως οι Sorooshian (1981), Gupta και Sorooshian (1983), Sorooshian και Gupta (1983), Gupta και Sorooshian (1985), Hornberger κ.ά. (1985), Loague και Freeze (1985), Jakeman και Hornberger (1993), καταλήγουν στο «Ξυράφι του Όκαμ» ήτοι «το απλούστερο είναι και το καλύτερο».

Ο Hromadka (1986), στο πλαίσιο του υδρολογικού σχεδιασμού στο San Bernardino County, κατέληξε στο ότι ο αυθαίρετος διαχωρισμός σε υπολεκάνες θα πρέπει να αποφεύγεται. Σύμφωνα με τον Hromadka μια αύξηση στον αριθμό των υπολεκανών δεν αυξάνει απαραίτητα την ακρίβεια του μοντέλου, καθώς είναι άγνωστη η αξιοπιστία των ποικίλων μοντέλων διόδευσης ροής που χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν μεταξύ τους οι υποπεριοχές. Οι Wood et al. (1988) εξέτασαν τη σχέση μεταξύ της κλίμακας της λεκάνης και της απορροής λεκανών στη Νότια Καρολίνα. Συμπέραναν ότι σε λεκάνες με έκταση μικρότερη από 0.4 τετραγωνικά μίλια, η υδρολογική απόκριση ποικίλει κατά πολύ. Ωστόσο, σε λεκάνες μεγαλύτερου εμβαδού, η αύξηση των υπολεκανών επηρέασε, αν και σε μικρότερο βαθμό, τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Κατά τους Norris and Haan (1993) ο διαχωρισμός σε υπολεκάνες έχει σαφή επίδραση στην εκτίμηση της παροχής αιχμής. Η αλλαγή από μία ενιαία λεκάνη σε πέντε υπολεκάνες, είχε ως αποτέλεσμα αύξηση στην παροχή αιχμής περί το 30%. Η χρήση δεκαπέντε υπολεκανών αύξησε τη διαφορά στο 40%. Παρ' όλα αυτά, σημειώνεται ότι η επίδραση της αυξημένης διαμέρισης μειωνόταν καθώς αυξάνονταν οι υπολεκάνες. Οι Mamillapalli et al. (1996) κατέληξαν ότι αυξάνοντας το επίπεδο διακριτοποίησης και αύξησης των συνδυασμών εδάφους και χρήσεων γης, αυξάνεται και το επίπεδο ακρίβειας. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους όμως, φανερώνουν ότι υπάρχει ένα επίπεδο πάνω από το οποίο η ακρίβεια δε μπορεί να βελτιωθεί, δείχνοντας, έτσι, ότι η περισσότερο λεπτομερής προσομοίωση δεν οδηγεί πάντα σε πιο ακριβή αποτελέσματα.

Οι Bingner et al. (1997) καθώς και οι FitzHugh and Mackay (2000) συμπέραναν ότι το μέγεθος της εκτιμημένης απορροής δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του διαχωρισμού σε υπολεκάνες, σε αντίθεση, όμως, με την εκτίμηση τη ποσότητας φερτών

υλικών. Οι Jha et al. (2004) έδειξαν ότι η απορροή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την μείωση των υπολεκανών, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να σταθεροποιούνται περί τις 9 λεκάνες. Ωστόσο, τα μοντέλα εκτίμησης φερτών φαίνεται να εξαρτώνται περισσότερο από την κλίμακα της υποδιαίρεσης, απαιτώντας 40-50 χωρικές ενότητες για σταθεροποίηση των τιμών.

Οι Tripathi et al. (2006) παρατήρησαν μια διαφορά 35% στην εκτίμηση της παροχής αιχμής στην περίπτωση μίας μεμονωμένης λεκάνης σε σχέση με τις περιπτώσεις τριών και έξι λεκανών. Και εκείνοι κατέληξαν στο ότι, μετά από ένα επίπεδο, κάθε περαιτέρω διαχωρισμός προκαλεί μικρή διαφορά στην απόκριση. Οι Thompson and Cleveland (2009) διερεύνησαν την επίδραση του διαχωρισμού σε υπολεκάνες στην περιοχή του Τέξας. Κατέληξαν στο ότι, εν γένει, ο διαχωρισμός σε περισσότερες υπολεκάνες από πέντε με επτά, δεν οδηγεί σε βελτιώσεις των εκτιμήσεων, ενώ, μάλιστα, παρατήρησαν ελάχιστη ή και μηδενική αλλαγή στην παροχή αιχμής. Παράλληλα, σημειώνουν ότι η εφαρμογή της ημικατανεμημένης μοντελοποίησης είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, χωρίς να είναι ξεκάθαρο το τεχνικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης.

Στην περίπτωση των κατανεμημένων μοντέλων εισάγονται παρόμοιοι προβληματισμοί όσον αφορά στη χωρική ανάλυση. Οι Burian et al. (2002) σύγκριναν διαφορετικά σύνολα δεδομένων χρήσεων γης για διαφορετικές χωρικές αναλύσεις καννάβου σε τρεις λεκάνες απορροής στις Η.Π.Α. με σκοπό τη διερεύνηση της διαφοροποίησης στις ετήσιες απορροές. Παρατήρησαν, λοιπόν, ότι τα σφάλματα εκτίμησης ποίκιλλαν από 8% μέχρι 14%. Οι Yang et al. (2001) ερεύνησαν την ευαισθησία της χωρικής ανάλυσης δεκαπέντε λεκανών στην Ιαπωνία με εκτάσεις από 464 μέχρι 3049 km², βασιζόμενοι σε κατώφλι εμβαδού περιοχών για τον καθορισμό του υδρολογικού δικτύου. Κατέληξαν στο ότι το υδρογραφικό δίκτυο που προέρχεται από μεγάλο κατώφλι τείνει να χάνει τη λεπτομερή χωρική πληροφορία του ΨΜΕ. Ακόμη, το μεγαλύτερο μέγεθος φατνίου φάνηκε να οδηγεί σε μια τάση μείωσης του συνολικού όγκου απορροής. Η μελέτη των Eid et al. (2006) έδειξε ότι στην περίπτωση χωρικής ανάλυσης 200 ως 300 m, το σφάλμα επιλογής του καννάβου μπορεί να είναι λιγότερο σημαντικό από το σφάλμα ορθού καθορισμού των ορίων των υπολεκανών.

3 Υδρολογικά Μοντέλα

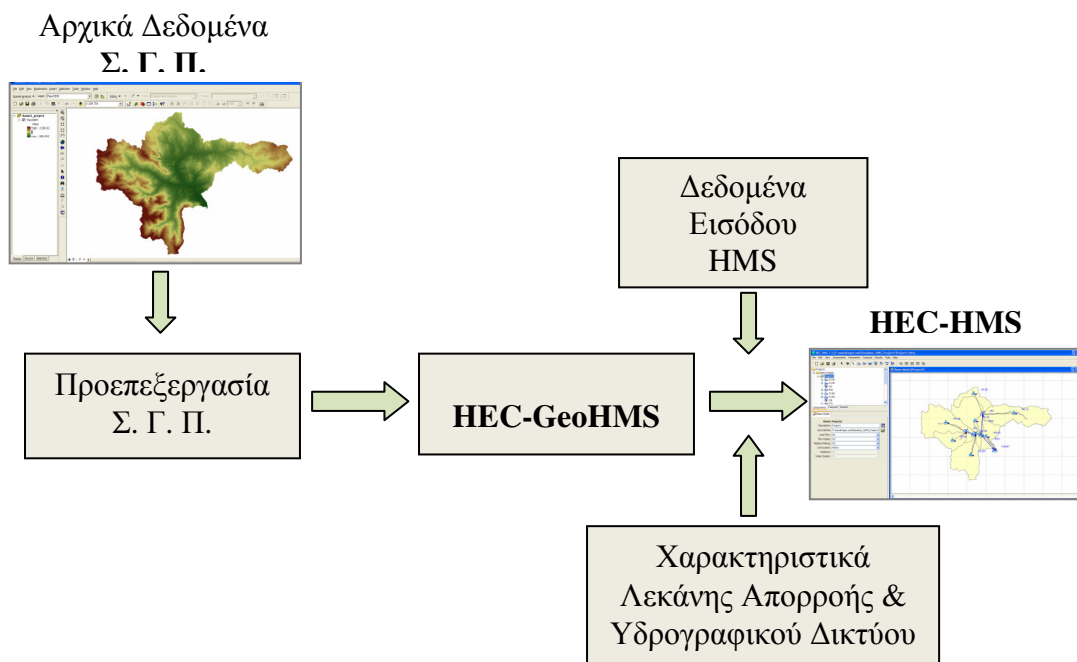
3.1 Το HEC-GeoHMS

Το HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) αναπτύχθηκε ως ένα εργαλείο- πρόσθετο του GIS που παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, να καθορίζει υπολεκάνες και ρέματα και να δημιουργεί τα απαραίτητα αρχεία εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα όπως το HEC HMS, για περαιτέρω ανάλυση.

Τα βήματα εργασίας του HEC-GeoHMS περιλαμβάνουν την οργάνωση των δεδομένων (Data Management), την προεπεξεργασία της γήινης επιφάνειας (Terrain Preprocessing), την επεξεργασία της λεκάνης απορροής (Basin Processing), τον καθορισμό των υδρολογικών παραμέτρων (Hydrologic Parameter Estimation) καθώς και την παραγωγή αρχείων εισόδου στο HMS (HMS Model Support).

Η σχέση μεταξύ GIS, HEC-GeoHMS και HEC-HMS παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Όπως γίνεται αντιληπτό, το HEC-GeoHMS παρέχει τη σύνδεση για μετάφραση της χωρικής πληροφορίας του GIS σε αρχεία για είσοδο στο HEC-HMS.

Τα τελικά παράγωγα του GIS είναι μια χωρική βάση δεδομένων υδρολογικού ενδιαφέροντος που αποτελείται από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης και την κατανομή της βροχομετρικής πληροφορίας. Το HEC-GeoHMS χρησιμοποιεί το ΨΜΕ για να εξάγει τις υπολεκάνες και ένα πλήθος αρχείων εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο τα οποία τελικά παραλαμβάνονται και χρησιμοποιούνται από το HEC-HMS.



Σχήμα 3.1: Σχέση μεταξύ ΣΓΠ, HEC-GeoHMS και HEC-HMS

Τα πακέτα εγκατάστασης για το πρόγραμμα είναι διαθέσιμα από το διαδικτυακό τόπο του Υδρολογικού Κέντρου Μηχανικής- HEC (<http://www.hec.usace.army.mil/>). Η έκδοση που χρησιμοποιείται εδώ είναι η HEC-GeoHMS 5.0 που είναι συμβατή με την έκδοση του ArcGIS 9.3 της ESRI.

3.2 Το υδρολογικό μοντέλο HEC – HMS

3.2.1 Εισαγωγή

Το HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) αναπτύχθηκε από τον Οργανισμό του Ειδικού Σώματος Μηχανικών του Στρατού του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων ΗΠΑ για την προσομοίωση των διεργασιών κατακρήμνισης- απορροής σε λεκάνες δενδριτικού τύπου. Αποτελεί ένα συγκεντρωτικό (lumped) ή ημιαδιαμέριστο (semi-lumped), ή ημικαταναμεμημένο (semi-distributed) μοντέλο, στο οποίο η υπό μελέτη λεκάνη χωρίζεται σε μικρότερες και παρέχεται η δυνατότητα για εναλλακτικές επιλογές μοντελοποίησης των διεργασιών.

Στο HEC-HMS ο υδρολογικός κύκλος επιμερίζεται σε διαχειρίσιμα μέρη και η λεκάνη απορροής οριοθετείται, δημιουργώντας έτσι ένα μοντέλο της λεκάνης. Παρέχεται η δυνατότητα αναπαράστασης κάθε τμήματος του υδρολογικού κύκλου με περισσότερα από ένα μαθηματικά μοντέλα, κατάλληλα για κάθε εφαρμογή. Η σωστή επιλογή των εκάστοτε μοντέλων προφανώς προϋποθέτει τη γνώση του σκοπού της υδρολογικής μελέτης, της υπό μελέτη λεκάνης και την ανάλογη εμπειρία του μελετητή.

Τα πακέτα εγκατάστασης για το πρόγραμμα είναι διαθέσιμα από το διαδικτυακό τόπο του Υδρολογικού Κέντρου Μηχανικής- HEC (<http://www.hec.usace.army.mil/>) και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση HEC-HMS 3.5.

Το HEC HMS έχει δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας ως γλώσσα προγραμματισμού την Java, με τα επιμέρους προγράμματα να διαβάζονται σχεδόν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα. Κάποιες βιβλιοθήκες που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι ακόμα στη Fortran και είναι διαθέσιμες σε Microsoft Windows, Sun Microsystems Solaris, και Linux λειτουργικά συστήματα.

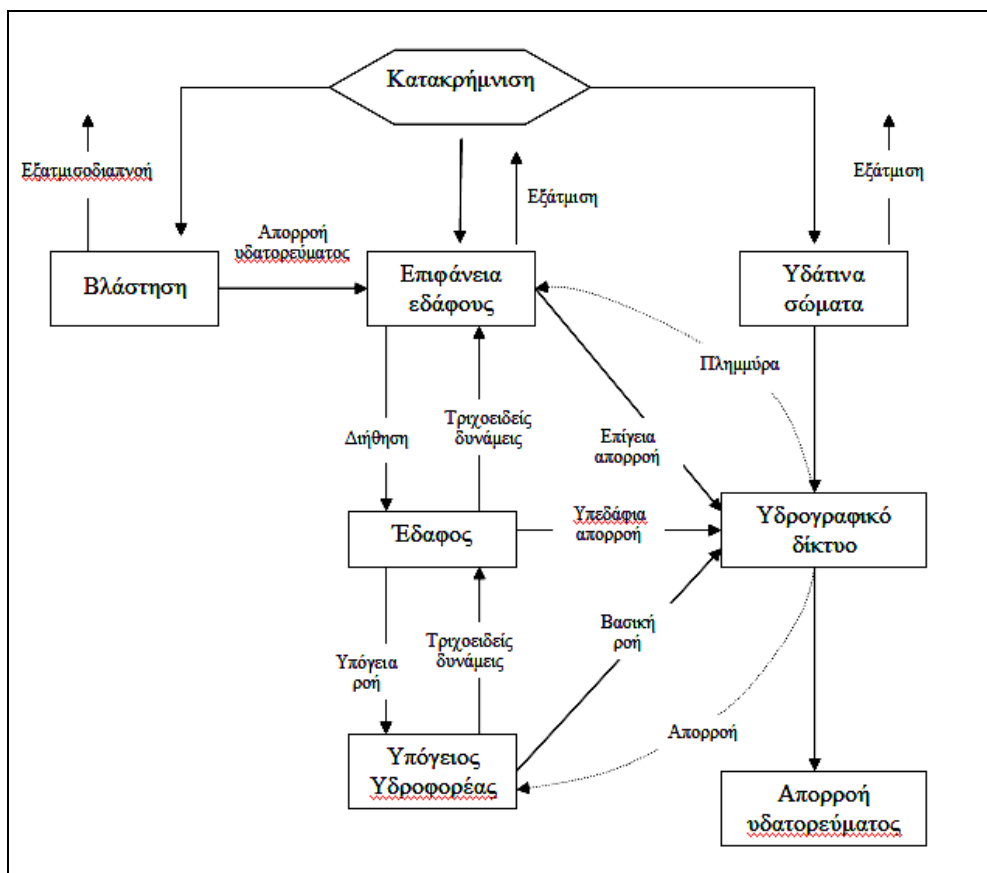
Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα είναι διαθέσιμο για Windows XP, Windows Vista και 7 (32-Bit & 64-Bit), Solaris (64-Bit SPARC), Linux (32-Bit x86). Ο τυπικός εξοπλισμός hardware για Windows, όπου και εγκαταστάθηκε, περιλαμβάνει: IntelPentiumIII/800 MHz ή μεγαλύτερη, 512 MB ελάχιστης μνήμης, 1 GB προτεινόμενης μνήμης, 120 MB διαθέσιμης μνήμης σκληρού δίσκου για την εγκατάσταση και 1024x768 ελάχιστης οπτικής ανάλυσης (Scharffenberg and Fleming, 2010).

3.2.2 Υδρολογικός κύκλος στο HEC – HMS

Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει τις διαδικασίες απορροής της λεκάνης όπως έχουν μοντελοποιηθεί στο HEC-HMS. Οι διαδικασίες που φαίνονται, ξεκινούν με τη βροχόπτωση (precipitation) που μπορεί να πέσει στη βλάστηση της λεκάνης, στην επιφάνεια του εδάφους και στα υδάτινα σώματα (ρέματα και λίμνες). Σε ένα φυσικό υδρολογικό σύστημα, μεγάλο μέρος του νερού που κατακρημνίζεται, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα από τη βλάστηση, τις επιφάνειες του εδάφους, τα υδάτινα σώματα μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας όμως, η εξατμισοδιαπνοή είναι περιορισμένη.

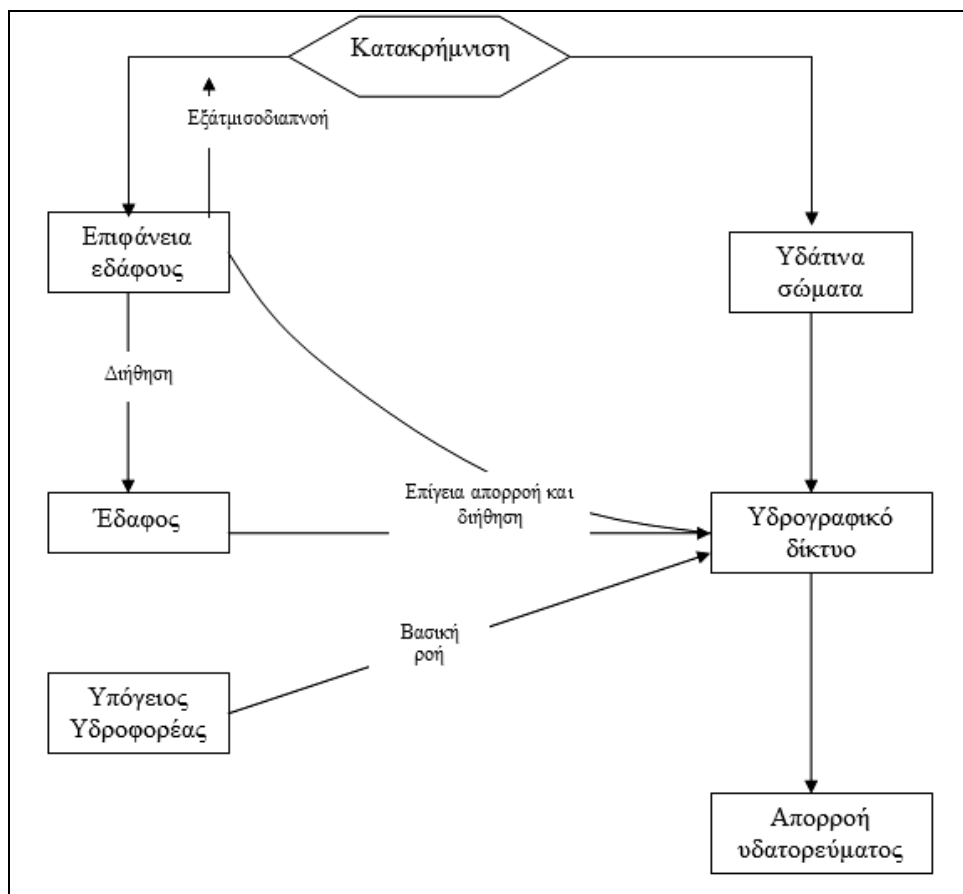
Ποσοστό της κατακρήμνισης, πέφτει μέσω των φύλλων ή κατεβαίνει από τον κορμό, και τα κλαδιά και οδηγείται στην επιφάνεια του εδάφους, όπου ενώνεται με την κατακρήμνιση που πέφτει απ' ευθείας στο έδαφος. Το νερό που διηθείται, αποθηκεύεται προσωρινά στα άνω, μερικώς κορεσμένα επίπεδα του εδάφους, απ' όπου ανεβαίνει ξανά στην επιφάνεια του εδάφους μέσω των τριχοειδών δυνάμεων, κινείται οριζόντια ακριβώς κάτω από την επιφάνεια, ή φιλτράρεται προς τα κάτω στον υπόγειο υδροφορέα κάτω από τη λεκάνη. Η ροή αυτή (interflow) οδηγείται στο υδρογραφικό δίκτυο, ενώ το νερό στον υδροφορέα που κινείται αργά, επιστρέφει μερικώς στο δίκτυο ως βασική ροή (baseflow).

Το νερό που δε λιμνάζει ούτε διηθείται, κινείται με την επιφανειακή ροή (overland flow) σε ένα κανάλι. Το κανάλι είναι το σημείο 'συνάντησης' της επιφανειακής ροής, της κατακρήμνισης που πέφτει απ' ευθείας στα υδάτινα σώματα και της υπεδάφιας και βασικής ροής. Η επακόλουθη ροή του ποταμού αποτελεί και την ολική απορροή της λεκάνης (watershed discharge).



Σχήμα 3.2: Υδρολογικός κύκλος στο HEC HMS (Feldman, 2000 & επεξεργασία συντάκτριας).

Συχνά, σε πολλές μελέτες δεν είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί η παραπάνω λεπτομερής περιγραφή του υδρολογικού κύκλου και να υπολογιστεί η ποσότητα νερού που αποθηκεύεται στα άνω στρώματα του εδάφους, αλλά χρειάζεται μόνο να υπολογιστεί η παροχή αιχμής, η συνολική ποσότητα νερού και το υδρογράφημα της απορροής της λεκάνης. Η απλούστερη αυτή προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου γίνεται από το HEC HMS όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, όπου παραλείπεται κάθε λεπτομερής καταγραφή της κίνησης του νερού μέσα στο έδαφος. Συνδυάζεται, έτσι, η ροή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους με την επιφανειακή ροή και μοντελοποιείται ως άμεση απορροή, χωρίς να περιλαμβάνεται λεπτομερές μοντέλο υπεδάφιας ροής ή ροής σε υπόγειο υδροφορέα.



Σχήμα 3.3: Απλοποιημένη εκδοχή του υδρολογικού κύκλου στο HEC HMS (Feldman, 2000, επεξεργασία συντάκτριας).

3.2.3 Φυσική περιγραφή λεκάνης απορροής – Μετεωρολογικό μοντέλο

Η φυσική περιγραφή της λεκάνης υλοποιείται καθορίζοντας στο πρόγραμμα το Μοντέλο λεκάνης, Basin Model. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το HEC-HMS χρησιμοποιεί ξεχωριστά μοντέλα για κάθε μέρος του υδρολογικού κύκλου του Σχήματος 3.3. Συγκεκριμένα σε αυτό το στάδιο είναι διαθέσιμα τα ακόλουθα (Feldman, 2000):

- Μοντέλα για την εκτίμηση απωλειών: Απώλειες ή υδρολογικά ελλείμματα αποτελούν οι ποσότητες νερού που κατακρατούνται επιφανειακά από τη βλάστηση ή τις κοιλότητες του εδάφους και διηθούνται κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης. Με την εκτίμηση τους, λοιπόν, κατασκευάζεται το καθαρό υετόγραμμα.
- Μοντέλα άμεσης απορροής: Εδώ εξετάζεται το νερό που δεν έχει διηθηθεί ή αποθηκευτεί στη λεκάνη και κινείται πάνω ή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός του καθαρού υετογράμματος σε πλημμυρογράφημα.
- Μοντέλα βασικής ροής: Προσομοιώνουν τη βραδεία υπεδάφια απορροή του νερού.
- Μοντέλα διόδευσης: Προσομοιώνουν τη ροή σε ανοικτούς αγωγούς ως ροή μίας διεύθυνσης.

Ακόμη, το πρόγραμμα διαθέτει μοντέλα για προσομοίωση έργων ελέγχου στάθμης νερού, όπως εκτροπές, δεξαμενές ανάσχεσης κλπ.

Στη συνέχεια, καθορίζεται το μετεωρολογικό μοντέλο (meteorological model) με μοντέλα για την κατακρήμνιση και εξατμισοδιαπνοή, που περιγράφουν τη χωροχρονική κατανομή τους στην έκταση της λεκάνης απορροής. Τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα για τις προσομοιώσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1: Διαθέσιμα μοντέλα για τις προσομοιώσεις

| Συνιστώσα υδρολογικού κύκλου προς προσομοίωση | Μοντέλο |
|---|--|
| 1. Κατακρήμιση | <ul style="list-style-type: none"> i. Παρατηρημένα Υετογράμματα Σταθμών για κάθε υπολεκάνη ii. Δείκτης βάρους καθορισμένος από χρήστη iii. Τετραγωνική αντίστροφη απόσταση για το δείκτη βάρους iv. Κατακρήμιση σε κάνναβο v. Υποθετικές καταιγίδες βασισμένες σε συχνότητα vi. SPS για ανατολικές ΗΠΑ vii. Υποθετικές καταιγίδες SCS |
| 2. Εξατμοδιαπνοή | <ul style="list-style-type: none"> i. Μέση μηνιαία ii. Priestly-Taylor iii. Priestly-Taylor σε κάνναβο |
| 3. Λιώσιμο χιονιού | <ul style="list-style-type: none"> i. Δείκτης θερμοκρασίας ii. Δείκτης θερμοκρασίας σε κάνναβο |
| 4. Εκτίμηση απωλειών | <ul style="list-style-type: none"> i. Ποσοστό αρχική και σταθερή ii. SCS (CN) iii. SCS (CN) σε κάνναβο iv. Green and Ampt v. Εκθετική vi. Smith Parlange vii. Ποσοστό και σταθερής σε κάνναβο viii. Μέτρηση εδαφικής υγρασίας (SMA) x. SMA σε κάνναβο |
| 5. Άμεση απορροή | <ul style="list-style-type: none"> i. MYΓ από χρήστη ii. MYΓ του Clark iii. MYΓ του Snyder iv. MYΓ της SCS v. MYΓ ModClark vi. Κινηματικό κύμα vii. Διάγραμμα S από χρήστη |
| 6. Βασική ροή | <ul style="list-style-type: none"> i. Σταθερή μηνιαία ii. Εκθετικά μειούμενη - Γραμμική αποθήκευση iii. Μη γραμμική κατά Boussinesq |
| 7. Διόδευση | <ul style="list-style-type: none"> i. Κινηματικό κύμα ii. Lag (μέθοδος καθυστέρησης – όχι εξασθένιση πλημμυρικού κύματος) iii. Τροποποιημένη μέθοδος Puls iv. Muskingum - Cunge v. Straddle Stagger |

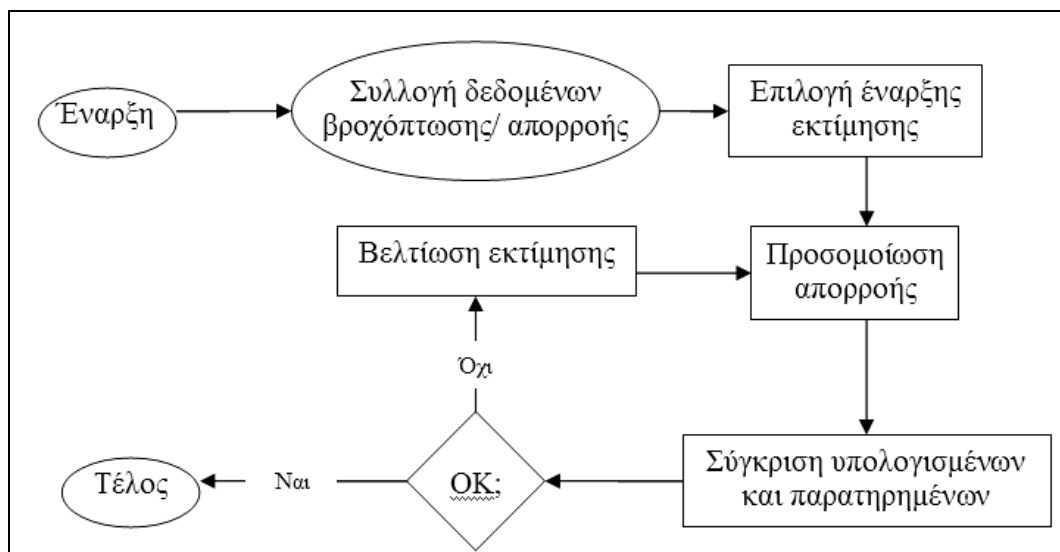
3.2.4 Προσομοίωση

Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ελέγχεται από προδιαγραφές ελέγχου (control specifications), που περιλαμβάνουν την ημερομηνία και την ώρα έναρξης και λήξης του γεγονότος και ένα χρονικό βήμα υπολογισμού. Η εκτέλεση της προσομοίωσης γίνεται τελικά συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω μοντέλα ήτοι το μοντέλο λεκάνης, το μετεωρολογικό μοντέλο καθώς και τις προδιαγραφές ελέγχου. Τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης μπορούν να προβληθούν με τη μορφή πίνακα και να αναπαρασταθούν σε διάγραμμα.

3.2.5 Βελτιστοποίηση παραμέτρων

Κάποια από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν περιλαμβάνουν παραμέτρους που δε μπορούν να εκτιμηθούν με παρατήρηση ή μετρήσεις στο κανάλι και στα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Για παράδειγμα, η παράμετρος C_p στο ΜΥΓ κατά Snyder δεν έχει άμεση φυσική ερμηνεία, όπως και η παράμετρος x στο μοντέλο Muskingum. Οι παράμετροι αυτές των στοιχείων της λεκάνης και του υδρολογικού δικτύου μπορούν να εκτιμηθούν αυτόματα με τη χρήση των δοκιμών βελτιστοποίησης (optimization trials). Το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορα εργαλεία βελτιστοποίησης, αλλά, επειδή αποτελούν αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης, η χρήση τους δεν εγγυάται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης εξαιτίας των τοπικών ακρότατων. Παράλληλα, η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού παραμέτρων, εφόσον όλα τα κριτήρια ικανοποιούνται, γίνεται τελικά κατά την κρίση του μελετητή (Καψάλης, 2009).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4, όπου παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία της βελτιστοποίησης, η βαθμονόμηση ξεκινάει με τη συλλογή των υδρολογικών δεδομένων. Για τα μοντέλα κατακρήμνισης-απορροής, τα απαιτούμενα δεδομένα είναι χρονοσειρές βροχόπτωσης και απορροής, ενώ για τα μοντέλα διόδευσης απαιτούνται παρατηρήσεις εισροών και εκροών. Ακολουθεί η επιλογή των αρχικών εκτιμήσεων των παραμέτρων και, σε συνδυασμό με τις παρατηρημένες οριακές συνθήκες, υπολογίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο καλύτερη είναι η επιλογή των αρχικών παραμέτρων τόσο γρηγορότερα θα βρεθεί η λύση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση του υπολογισμένου υδρογραφήματος με το ιστορικό και, έτσι, εάν η ταύτισή τους δεν είναι ικανοποιητική, αλλάζουν αυτόματα οι παράμετροι και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, αλλιώς το πρόγραμμα θα αναφέρει τις τελικές βέλτιστες τιμές.



Σχήμα 3.4: Σχηματοποίηση διαδικασίας βελτιστοποίησης στο HEC HMS (Feldman, 2000, επεξεργασία συντάκτριας).

3.3 Το υδρολογικό μοντέλο AFFDEF

3.3.1 Εισαγωγή

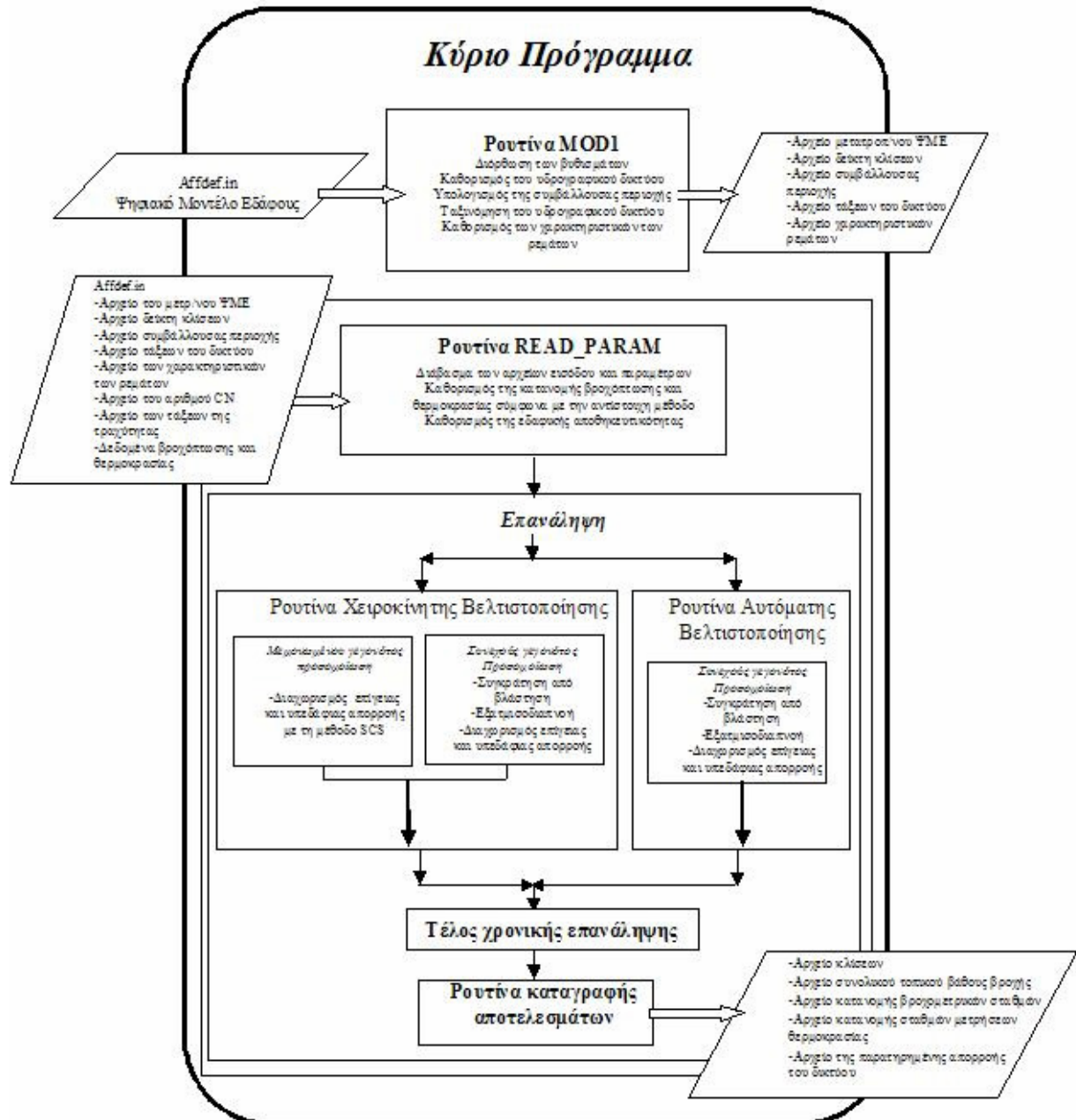
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ακόμη το μοντέλο βροχής- απορροής AFFDEF που έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο της Μπολόνια (Moretti and Montanari, 2004). Αποτελεί ένα καταναμημένο εννοιολογικό, συνεχές μοντέλο προσομοίωσης βροχής-απορροής που είναι εφαρμόσιμο σε ένα εύρος των μελετών, ακόμα και όταν είναι διαθέσιμη μόνο μια μικρή βάση δεδομένων ιστορικών υδρομετεωρολογικών και γεωμορφολογικών στοιχείων. Παρέχει ακόμη τη δυνατότητα για μακρά προσομοίωση σε ωριαίο βήμα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα, ακόμη και για μεσαίας έκτασης λεκάνες.

Πολλές από τις υδρολογικές διαδικασίες που περιλαμβάνονται στο μετασχηματισμό βροχής-απορροής έχουν καταρτιστεί χρησιμοποιώντας εννοιολογικές μεθόδους. Αυτές χρειάζεται να παραμετροποιηθούν στη βάση κάποιων ιστορικών υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Οι Brath et al. (2001) έχουν δείξει την ευκολία του AFFDEF όταν εφαρμόζεται σε περιορισμένα δεδομένα, ειδικά σε σύγκριση με τα αδιαμέριστα μοντέλα. Αυτή η αποτελεσματικότητα οφείλεται στην ικανότητα του μοντέλου να εκμεταλλεύεται την περιγραφή της χωρικής κατανομής της τοπογραφίας της λεκάνης, τον τύπο του εδάφους και τη χρήση.

Το AFFDEF έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα FORTRAN και αποτελείται από μια αρχική φόρμουλα που εξάγει το υδρογραφικό δίκτυο από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και καθορίζει τις ροές και τη συμβάλλουσα περιοχή σε κάθε κελί. Διαθέτοντας τα μετεωρολογικά δεδομένα και τις ιδιότητες του εδάφους, ακολουθεί η διαδικασία που πραγματοποιεί το μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή και οδηγεί τις ροές στην επιφάνεια του εδάφους και το υπέδαφος της λεκάνης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Η προσομοίωση μπορεί να γίνει για ένα μόνο γεγονός αλλά και για συνεχή χρόνο. Για μεμονωμένο επεισόδιο βροχόπτωσης η μεταβολή βροχής- απορροής γίνεται με τη μέθοδο Curve Number. Στην περίπτωση συνεχούς προσομοίωσης, λαμβάνεται υπόψη η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή και ο διαχωρισμός μεταξύ της ροής στην επιφάνεια του εδάφους και της ροής κάτω από αυτή. Το μοντέλο τελικά εξάγει απορροές σε οποιαδήποτε θέση του δικτύου.

3.3.2 Περιγραφή του μοντέλου

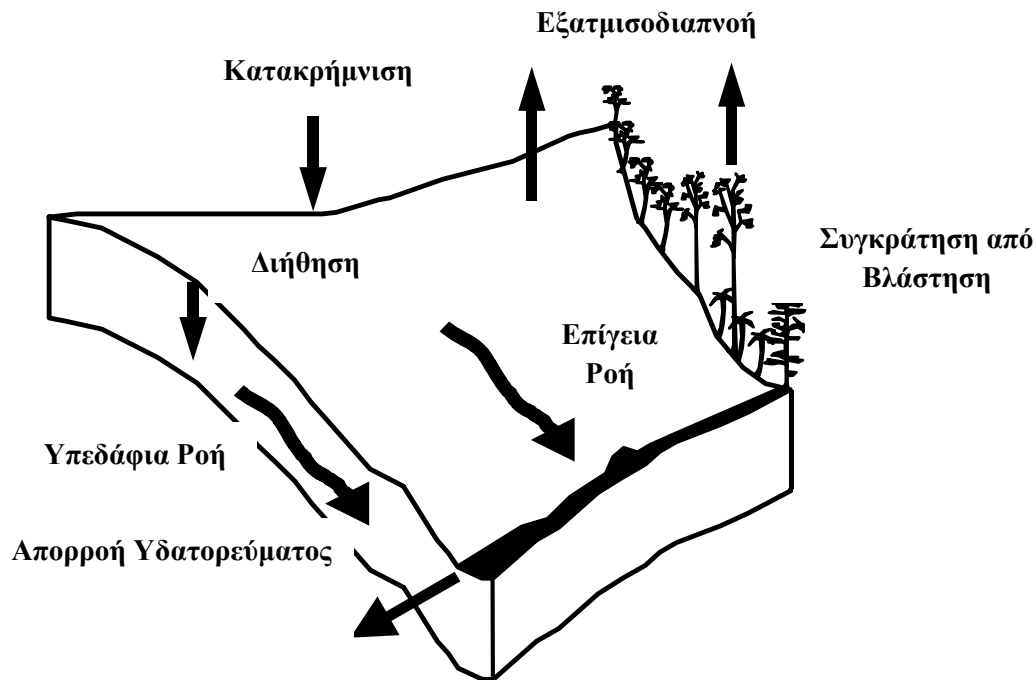
Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η δομή του μοντέλου βροχής- απορροής. Σε πρώτη φάση, συντελείται η διαδικασία MOD1, απ' όπου και προκύπτει το υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης. Παράλληλα, καθορίζεται η κατανομή της βροχόπτωσης και θερμοκρασίας καθώς και η ειδική αποθηκευτικότητα του εδάφους. Ακολούθως, το μοντέλο προχωρά σε βαθμονόμηση. Δίνεται η δυνατότητα τόσο για αυτόματη, όσο και χειροκίνητη βαθμονόμηση. Η αυτόματη βαθμονόμηση των παραμέτρων έχει εισαχθεί για συνεχή προσομοίωση. Η προσομοίωση ολοκληρώνεται με την παραγωγή αρχείου απορροών.



Σχήμα 3.5: Δομή του AFFDEF μοντέλου
(Moretti and Montanari, 2004, επεξεργασία συντάκτριας)

Το μοντέλο χωρίζει την περιοχή της λεκάνης απορροής σε κελιά ανάλογα με εκείνα του διατιθέμενου ΨΜΕ και χρησιμοποιεί εννοιολογικά και φυσικής βάσης σχήματα για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών σε τοπική κλίμακα τόσο για μεμονωμένα γεγονότα όσο και για συνεχείς προσομοιώσεις. Εξαιτίας των απλοποιήσεων που έχουν γίνει στη μοντελοποίηση της απορροής κάτω από την επιφάνεια, το AFFDEF ταιριάζει κυρίως για την προσομοίωση των λεκανών που χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαπερατότητα και σχετικά αδιαπέρατες πλαγιές, όπου η απορροή της επιφάνειας δημιουργείται κυρίως από διήθηση εκ των άνω και όχι από κορεσμό από κάτω.

Η υδρολογία της πλαγιάς προσομοιώνεται στο μοντέλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Σχηματοποίηση των διαδικασιών της υδρολογίας της πλαγιάς (Moretti and Montanari, 2004, επεξεργασία συντάκτριας)

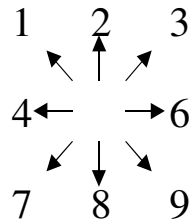
Οι διεργασίες που περιλαμβάνονται στον υδρολογικό κύκλο, όπως θεωρείται από το μοντέλο, περιλαμβάνουν την κατακρήμνιση (precipitation), εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration), διήθηση (infiltration), παρεμπόδιση της διήθησης από τη βλάστηση (interception), επίγεια απορροή (surface flow), υπεδάφια απορροή (lateral subsurface flow) και, τελικά, συνολική απορροή του υδατορεύματος (streamflow).

3.3.3 Καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου

Η αυτοματοποιημένη παραγωγή υδρογραφικών δικτύων από τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους έχει γίνει ευρέως γνωστή τα τελευταία είκοσι χρόνια, αφού η διαθεσιμότητα και ανάλυση των ΨΜΕ, καθώς και η ποιότητα των εργαλείων των υδρολογικών μοντέλων έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Τα χαρακτηριστικά ενός υδρογραφικού δικτύου εξαρτώνται κυρίως από την αναγνώριση των κελιών του δικτύου από το ψηφιακό μοντέλο και μπορούν να επηρεάσουν κατά πολύ την περιγραφή των λεκανών απορροής (Garbrecht et al., 2001).

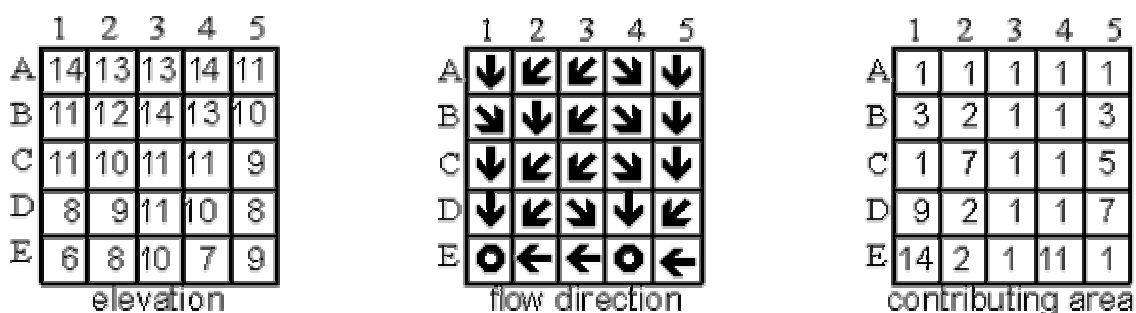
Αλγόριθμοι διεύθυνσης ροής έχουν χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν τα κελιά του δικτύου καθώς και η κίνηση του νερού, των φερτών, και των συστατικών του νερού σε χαμηλότερα γειτονικά κελιά (Desmet and Govers, 1996). Συγκεκριμένα, ένας τέτοιος αλγόριθμος

καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η απορροή από ένα δεδομένο κελί θα κατανεμηθεί σε ένα ή περισσότερα γειτονικά και χαμηλότερου υψομέτρου κελιά. Γνωστοί αλγόριθμοι είναι οι: D8 (O' Callaghan and Mark, 1984), FD8 (Quinn et al., 1991), FMFD (Freeman, 1991), DEMON (Costa-Cabral and Burges, 1994), D_{∞} (Tarboton, 1997). Το μοντέλο AFFDEF χρησιμοποιεί τη μέθοδο D8 (οκτώ διευθύνσεων) όπου προσδιορίζεται η ροή από κάθε κελί του καννάβου σε ένα από τα οκτώ γειτονικά ή διαγώνια, στην κατεύθυνση με την πιο απότομη καθοδική κλίση. Η μέθοδος έχει μειονεκτήματα από τη διακριτοποίηση τη ροής μόνο σε μία από τις 8 πιθανές διευθύνσεις, που χωρίζονται σε 45° προωθώντας έτσι την ανάπτυξη των μεθόδων που προαναφέρθηκαν (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Ροή από το κεντρικό κελί σε ένα από τα οκτώ γειτονικά του (Moretti and Montanari, 2004)

Η διαδικασία MOD1 παράγει το υδρογραφικό δίκτυο αυτόματα από το διατιθέμενο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους εφαρμόζοντας την D-8 μέθοδο, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό των ροών και της συμβαλλόμενης περιοχής σε κάθε κελί. Ο καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου γίνεται θέτοντας σε κάθε κελί του DEM ένα μέγιστο δείκτη κλίσης και μετά υπολογίζοντας κάθε κελί έτσι ώστε να οργανωθεί το υδρογραφικό δίκτυο σύμφωνα με τη μέθοδο Strahler. Το Σχήμα 3.8 παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο σχηματικό παράδειγμα με τη διεύθυνση ροής που προκύπτει στον κάνναβο καθώς και τη συμβάλλουσα περιοχή. Κατά την εκτέλεση, το πρόγραμμα καθορίζει, αρχικά, τη διεύθυνση ροής από κάθε κελί βρίσκοντας το χαμηλότερο γειτονικό του κελί, και έτσι ακολουθώντας τη ροή αθροίζει τον αριθμό των κελιών που ρέουν σε κάθε κελί.



Σχήμα 3.8: Παράδειγμα με καθορισμό της διεύθυνσης ροής και της συμβάλλουσας περιοχής κάθε κελιού

Για παράδειγμα, για το κελί C3, το χαμηλότερο από τα 8 γειτονικά κελιά είναι το D2, έτσι η διεύθυνση ροής είναι νοτιοδυτικά (το κάτω αριστερά). Ακόμη, στο κελί C2, τα B1, B2, και B3 ρέουν σε αυτό, και έτσι η συμβάλλουσα περιοχή a του κελιού C2 είναι ίση με το άθροισμα των συμβαλλουσών περιοχών του B1, B2 και B3 και το ίδιο το κελί, $a = 3+2+1=7$.

Η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου γίνεται κατά Strahler, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Όταν δύο ρέματα διαφορετικής τάξης, ενώνονται με καθοδικό ρέμα, το ρέμα που προκύπτει, είναι τάξης του υψηλότερου διερχόμενου μονοπατιού ροής. Όταν δύο ρέματα ίσης τάξης ενωθούν, το καθοδικό ρέμα αυξάνεται κατά μία μονάδα. Όταν περισσότερα από δύο μονοπάτια ροής διαφορετικής τάξης ενώνονται, η τάξη του καθοδικού είναι η μέγιστη τάξη από τα διερχόμενα ρέματα.



Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της τάξης υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler (State University of New York College of Environmental Science and Forestry)

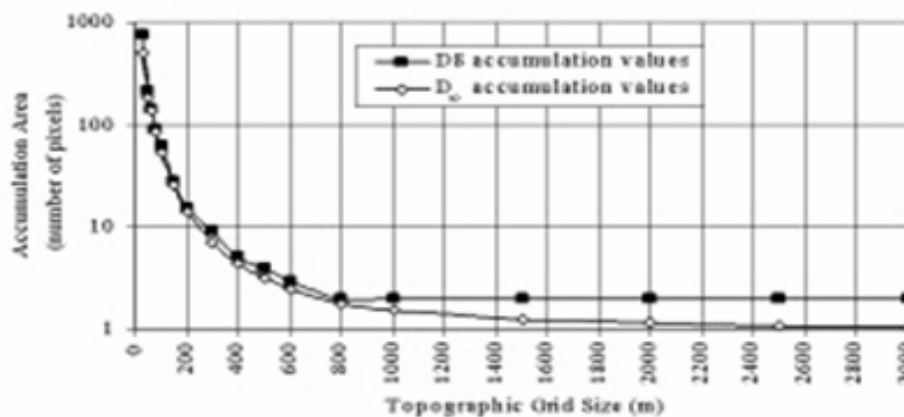
3.3.4 Προσομοίωση βροχής – απορροής

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα για πραγματοποίηση τριών τύπων προσομοιώσεων. Η πρώτη δυνατή προσομοίωση είναι εκείνη σε αδιαπέρατη λεκάνη, όπου εφαρμόζεται η μέθοδος SCS θεωρώντας την αποθηκευτικότητα του εδάφους ίση με το μηδέν για μια ολόκληρη λεκάνη. Εφικτή είναι ακόμη η προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος βροχόπτωσης με την μέθοδο SCS. Τέλος, το μοντέλο πραγματοποιεί συνεχή προσομοίωση, όπου η συσχέτιση μεταξύ εδάφους, βλάστησης και ατμόσφαιρας είναι μοντελοποιημένη εφαρμόζοντας την εννοιολογική μέθοδο, βασισμένη σε τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου SCS.

Η τοπική βροχόπτωση μπορεί να υπολογιστεί ξεκινώντας από τα παρατηρημένα δεδομένα είτε με τη μέθοδο πολυγώνων Thiessen είτε με παρεμβολή αντίστροφης τετραγωνικής απόστασης. Η θερμοκρασία έχει εκχωρηθεί σε κάθε κελί του ΨΜΕ με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Για το μετρητή βροχής και για τους σταθμούς θερμοκρασίας, το μοντέλο αποβάλλει τους σταθμούς που δεν είναι τελικά γενεσιουργοί σε ένα καθορισμένο βήμα και αναδιατάσσει τα βάρη της παρεμβολής.

Ακολουθεί η διάκριση μεταξύ ρέματος, πλαγιάς και καναλιού του υδρογραφικού δικτύου. Για τη διαδικασία έναρξης της δημιουργίας αυλακώσεων στην επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες μελλοντικά θα διαρρέονται από νερό (αυλάκια) και θα σχηματίσουν δυνητικά ποτάμους κλάδους, απαιτείται επαρκής ποσότητα ύδατος, μια κρίσιμη επιφάνεια λεκάνης απορροής και τοπογραφική κλίση. Η πιο κοινή μέθοδος για την εξαγωγή των υδρογραφικών δικτύων από ΨΜΕ, λοιπόν, είναι ο καθορισμός μιας κρίσιμης περιοχής στήριξης που καθορίζει την ελάχιστη περιοχή αποστράγγισης που απαιτείται για να δημιουργηθεί και να κινηθεί ένα κανάλι (Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993). Η εξαγωγή του δικτύου βασίζεται στην έννοια της σταθερής κρίσιμης περιοχής στήριξης (constant critical support area) σύμφωνα με

την οποία η ροή στο ρέμα υποτίθεται ότι συμβαίνει σε κάθε κελί όπου η περιοχή αποστράγγισης δεν υπερβαίνει την τιμή της κρίσιμης περιοχής στήριξης A_0 , ενώ η ροή του καναλιού το αντίθετο (Moretti and Montanari, 2004). Πρακτικά, η τιμή της A_0 αναγνωρίζεται συγκρίνοντας το υδρογραφικό δίκτυο που έχει καθοριστεί από το μοντέλο με έναν τοπογραφικό χάρτη της λεκάνης που δείχνει τη φυσική ροή. Ως αρχική εκτίμηση κάποιος μπορεί να θέσει $A_0 = 0.5 \text{ km}^2$. Ακόμη, το Σχήμα 3.10 παρουσιάζει ενδεικτικές τιμές σε σχέση με την ανάλυση του τοπογραφικού υποβάθρου.



Σχήμα 3.10: Οι κρίσιμες περιοχές στήριξης όπως αυτές υπολογίζονται για κάθε τοπογραφική ανάλυση (McMaster, 2002)

Το μοντέλο εφαρμόζει υδρολογική μέθοδο διόδευσης ως απλούστερο και πιο εύχρηστο αριθμητικό σχήμα επίλυσης. Συγκεκριμένα, οι ροές στην επιφάνεια και κάτω από αυτήν διοδεύονται προς την έξοδο της λεκάνης εφαρμόζοντας τις μεταβλητές παραμέτρους του Muskingum- Cunge μοντέλου. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά στην πρακτική γιατί η λύση επιτυγχάνεται με τη χρήση αλγεβρικών εξισώσεων, ενώ, παράλληλα, επιτρέπει ελευθερία στην επιλογή του χρονικού και χωρικού βήματος (Κουτσογιάννης, 1999). Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα της μεθόδου.

3.3.5 Κύριο αρχείο εισόδου

Το κύριο αρχείο εισόδου (Σχήμα 3.11) περιλαμβάνει ένα παράδειγμα της λίστας με τα αρχεία και τα στοιχεία που το πρόγραμμα χρειάζεται ως είσοδο, το όνομα των αρχείων εξόδου, τις τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης του μοντέλου καθώς και τις επιλογές εκτύπωσης.

```

Affdef.in - Σημειωματάριο
Αρχείο  Επεξεργασία  Μορφή  Προβολή  Βοήθεια
A01: General title for the simulation
Samoggia River basin
A03: gg,mm,aaaa (3l,*) - starting date of the simulation
16 9 1996
A05: Digital Elevation Model (a30) - input file|
demsamocorr.in
A07: NOss (l,*) - number of rainfall data to be read (length of the simulation)
10
A09: StepPio (l,*) - step of observation of the rainfall data [s]
3600
A11: idim,jdim (2xl,*) - dimension of the DEM (Number of rows,Number of columns)
109 57
A13: DX,DY (2xl,*) - size of the DEM cell [m]
250 250
A15: DT (2xl,*)- time step of the simulation [s]
3600
A17: A0 (R,*) - constant critical support area [km^2]
0.5
A19: Wv (R,*) - Channel width/height ratio for the hillslope
600.
A21: NHRou (l,*) - Mode for hillslope roughness (l,*) - (1=constant, >1=number of the classes)
3
A23: Ksv (NHRou x R,*) - Strickler roughness for hillslope (m^(1/3)*s-1)
1 0 0.5 5 0
A25: file of the distribution of roughness classes for the hillslope
ClassHillRough.in
A27: Wv,Ksr0,Ksr1 (3xR,*) - Channel width/height ratio and max and min Strickler (m^(1/3)*s-1) for river network
20 6 10
A29: Ksat (R,*) - saturated hydraulic conductivity [m/s]
0.01
A31: Bp (R,*) - width of the rectangular cross section of the sub surface flow [m]
0.5
A33: Hs (R,*) - parameter for the infiltration reservoir [s]
79095.
A35: H (R,*) - parameter for the infiltration reservoir
0.08
A37: Cint (R,*) - parameter for the interception reservoir
0.3
A39: lchi,jchi (2xl,*)- coordinates of the catchment outlet
1 54
A41: risp1 (l,*)- single event simulation (0=normal catchment, 1=impervious catchment)
0

```

Σχήμα 3.11: Κύριο αρχείο εισόδου

Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει συνολικά τα δεδομένα που απαιτούνται ως είσοδος από το πρόγραμμα, τα οποία κατατάσσονται σε μετεωρολογικά, τοπογραφικά, εκείνα που αφορούν τη διήθηση και τραχύτητα, την προσομοίωση, τις ορθογωνικές διατομές, τις παραμέτρους, κλπ. Ακόμη, σημειώνονται η θέση και ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται για τα δεδομένα.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα εισόδου στο AFFDEF

| Δεδομένα εισόδου | | Αρχείο αναφοράς | Συμβολισμός |
|----------------------------------|--|-----------------------------|-------------|
| A. Μετεωρολογικά δεδομένα | | | |
| <i>i. Βροχόπτωση</i> | | | |
| 1. | Αριθμός βροχομετρικών σταθμών | rain94567.in | |
| 2. | Τοπικές συντεταγμένες βροχομετρικών σταθμών | rain94567.in | |
| 3. | Αριθμός δεδομένων που θα παραλειφθούν | rain94567.in | |
| 4. | Παρατηρημένα ύψη βροχόπτωσης | rain94567.in | |
| 5. | Μέθοδος παρεμβολής (Thiessen, αντίστροφης απόστασης) | Affdef.in | risp2 |
| 6. | Αριθμός δεδομένων βροχόπτωσης που θα χρησιμοποιηθούν (μήκος περιόδου προσομοίωσης) | Affdef.in | NOss |
| 7. | Βήμα παρατήρησης των δεδομένων βροχόπτωσης | Affdef.in | StepPio |
| <i>ii. Θερμοκρασία</i> | | | |
| 1. | Παράμετροι a, b για τη μέθοδο της ακτινοβολίας | tem94567.in | |
| 2. | Μηνιαίος συντελεστής αντιστάθμισης για τη μέθοδο της ακτινοβολίας | tem94567.in | |
| 3. | Μέσος μηνιαίος των μέγιστων ημερήσιας ηλιοφάνειας | tem94567.in | |
| 4. | Αριθμός των ημερών για κάθε μήνα | tem94567.in | |
| 5. | Αριθμός σταθμών μέτρησης θερμοκρασίας | tem94567.in | |
| 6. | Τοπικές συντεταγμένες και υψόμετρα κάθε σταθμού μέτρησης θερμοκρασίας | tem94567.in | |
| 7. | Αριθμός των δεδομένων θερμοκρασίας που πρέπει να παραλειφθούν | tem94567.in | |
| 8. | Τιμή θερμοκρασίας από το σταθμό μέτρησης | tem94567.in | |
| B. Τοπογραφικά δεδομένα | | | |
| 1. | Υψόμετρα επιφάνειας εδάφους (ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ΨΜΕ) | demsamocorr.in Affdef.in | |
| 2. | Διάσταση ΨΜΕ | Affdef.in | idim, jdim |
| 3. | Μέγεθος κελιού του ΨΜΕ | Affdef.in | D_x, D_y |
| Γ. Ικανότητα διήθησης | | | |
| 1. | Αριθμοί καμπύλης CN | cnsamo92.in Affdef.in | |

Πίνακας 3.3: Δεδομένα εισόδου στο AFFDEF (συνέχεια)

| Δ. Τραχύτητα εδάφους | | | |
|--------------------------------------|---|-------------------|------------------------|
| 1. | Κατανομή κλάσεων τραχύτητας Strickler | ClassHillRough.in | |
| 2. | Αριθμός κλάσεων | Affdef.in | |
| 3. | Τραχύτητα Strickler για την πλαγιά | Affdef.in | K_{sv} |
| 4. | Τύπος για την τραχύτητα της πλαγιάς | Affdef.in | NHRou |
| 5. | Μέγιστη και ελάχιστη τιμή τραχύτητας για το υδρογραφικό δίκτυο | Affdef.in | K_{sr0} K_{sr1} |
| Ε. Άλλα δεδομένα προσομοίωσης | | | |
| 1. | Όνομα | Affdef.in | |
| 2. | Χρονικό βήμα | Affdef.in | DT |
| 3. | Προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος για κανονική ή αδιαπέρατη λεκάνη | Affdef.in | rispl |
| 4. | Ημερομηνία έναρξης | Affdef.in | gg,mm,aaaa |
| Ζ. Ορθογωνικές διατομές | | | |
| 1. | Αριθμός ορθογωνικών διατομών όπου εμφανίζεται η προσομοιωμένη απορροή (για τη βαθμονόμηση). | Affdef.in | Nmis |
| Η. Παράμετροι βαθμονόμησης | | | |
| 1. | Παράμετρος για δεξαμενή διήθησης | Affdef.in | H_s |
| 2. | Παράμετρος για δεξαμενή διήθησης | Affdef.in | H |
| 3. | Παράμετρος για δεξαμενή παρεμπόδισης | Affdef.in | C_{int} |
| 4. | Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα | Affdef.in | K_{sat} |
| 5. | Λόγος πλάτους ύψους καναλιού για πλαγιά | Affdef.in | W_v |
| 6. | Πλάτος ορθογωνικής διατομής υπεδάφιας ροής | Affdef.in | B_p |
| Θ. Άλλα | | | |
| 1. | Λόγος πλάτους ύψους καναλιού για υδρογραφικό δίκτυο | Affdef.in | W_r |
| 2. | Σταθερή κρίσιμη περιοχή | Affdef.in | A_0 |
| 3. | Αριθμός κελιών το υψόμετρο των οποίων δε χρειάζεται να αυξηθεί | Affdef.in | N_{pf} |
| 4. | Συντεταγμένες εξόδου λεκάνης | Affdef.in | I_{chi}, J_{chi} |

3.3.6 Λίστα ρουτινών

Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια σειρά από ρουτίνες που πραγματοποιούν τις συναφείς διαδικασίες κατά την προσομοίωση βροχής- απορροής. Στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί,

περιλαμβάνονται οι ρουτίνες αυτές και περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία τους. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση συνεχούς προσομοίωσης, για τη βαθμονόμηση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Shuffled Complex Evolution του Πανεπιστημίου της Αριζόνα (SCE-UA) των Duan et al. (1992, 1993), ο οποίος βελτιστοποιεί τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρων σε ένα λογικό χρονικό διάστημα όπως γράφουν οι Brath et al. (2001). Ο αλγόριθμος SCE-U αποτελείται από 3 υπορουτίνες: sceamain.for, scein.for, sceua.for και το αρχείο εισόδου scein.dat.

Η συνάρτηση στόχου, η οποία ελαχιστοποιείται από το γενετικό αλγόριθμο, υπολογίζεται ως άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών στην υπορουτίνα automatic_calibration.for (που καλείται από τη scein.for). Η αυτόματη βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με αναφορά σε μία ή περισσότερες ορθογωνικές διατομές, για τις οποίες οι παρατηρημένες απορροές πρέπει να είναι διαθέσιμες σε όλο το χρόνο προσομοίωσης.

Πίνακας 3.3: Ρουτίνες στο AFFDEF

| Ρουτίνα | Περιγραφή |
|--|--|
| Automatic_calibration.for | Συνεχής προσομοίωση βροχής- απορροής στην περίπτωση αυτόματης βαθμονόμηση |
| Check_temp.for | Έλεγχος για τη διαθεσιμότητα των δεδομένων θερμοκρασίας |
| CN_method.for | μετατροπή βροχής απορροής για ένα μόνο γεγονός |
| Continuous.for | Συσχέτιση μεταξύ εδάφους, βλάστησης και ατμόσφαιρας στην περίπτωση συνεχούς προσομοίωσης |
| Initial_value.for | Αρχικοποίηση των γενικών συστοιχιών |
| Local_rain.for | Υπολογισμός του τοπικού βάθους βροχής |
| Main_menu.for | Γενικό μενού |
| Manual_calibration.for | Συνεχής προσομοίωση βροχής- απορροής στην περίπτωση βαθμονόμησης |
| Mod1.for | Εκβολή υδρολογικού δικτύου |
| NewInDist.for | Παρεμβολή της βροχόπτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης απόστασης |
| NewThiessen.for | Παρεμβολή της βροχόπτωσης (ή θερμοκρασίας) με τη μέθοδο Thiessen |
| Read_param.for | Διάβασμα των παραμέτρων εισόδου για την προσομοίωση βροχής απορροής, καθορισμός της κλίσης των συνδέσμων, καθορισμός των πολυγώνων και βάρη της μεθόδου αντίστροφων αποστάσεων |
| Routing.for | Διόδευση πλημμύρας |
| Scein.for Sceamain.for Sceua.for | Αλγόριθμος βελτιστοποίησης SCE-UA |
| Update_day.for | Ενημέρωση της τωρινής ημερομηνίας της προσομοίωσης |
| Warn_error.for | Λίστα προειδοποιήσεων και μηνυμάτων σφάλματος |
| Write_ouput.for | Γράψιμο των αποτελεσμάτων της μετατροπής βροχής σε απορροής (για ένα μόνο επεισόδιο προσομοίωσης και για συνεχή προσομοίωση με βαθμονόμηση από το χρήστη) |

Αρχεία που περιλαμβάνονται στις ρουτίνες του κώδικα

Οι ρουτίνες του μοντέλου καλούν ακόμη αρχεία .inc τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Αρχεία .inc στο AFFDEF

| Αρχεία .inc | Περιγραφή |
|----------------|--|
| DimArrays.inc | Περιλαμβάνει: Καθορισμό μεταβλητών, Μέγιστη διάσταση του DEM, Μέγιστο αριθμό κελιών των οποίων το υψόμετρο δε χρειάζεται να αυξηθεί, Μέγιστο αριθμό μετρητών βροχής, Διάστημα εγγραφής των μετεωρολογικών δεδομένων, Μέγιστο αριθμό των σταθμών για μέτρηση θερμοκρασίας, Μέγιστο αριθμό των βημάτων προσομοίωσης, Βήμα χρόνου για την προσομοίωση, Μέγιστο αριθμό συνδέσμων στο δίκτυο, Μέγιστο αριθμό κλάσεων για την πλαγιά, Μέγιστο αριθμό των ορθογωνικών διατομών όπου θα γίνει απορροή, Διάσταση του αρχείου εξόδου απορροής, Μέγιστη διάσταση συστοιχιών που χρησιμοποιούνται για την κατανομή των βροχομέτρων |
| VarMod1.inc | Περιλαμβάνει καθορισμό ακέραιων παραμέτρων |
| ComAutoCal.inc | Περιλαμβάνει καθορισμό πραγματικών παραμέτρων |
| ComRainRun.inc | Περιλαμβάνει καθορισμό ακέραιων και πραγματικών παραμέτρων |
| ComRead.inc | Περιλαμβάνει καθορισμό ακέραιων και πραγματικών παραμέτρων |
| ComVar.inc | Περιλαμβάνει καθορισμό πραγματικών παραμέτρων |

3.4 Σύγκριση των δύο μοντέλων

Η παραπάνω παρουσίαση των δύο μοντέλων βροχής- απορροής επιτρέπει τη συγκριτική μελέτη τους σε θεωρητικό υπόβαθρο. Προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Το μοντέλο AFFDEF αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Μπολόνια και θεωρείται σχετικά πρόσφατο (2004) σε σχέση με την πρώιμη μορφή του HEC-HMS, το HEC-1, που η ανάπτυξή του ξεπερνά την εικοσιπενταετία. Το HEC-HMS αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα, με ποικίλες εφαρμογές ανά τον κόσμο και συνεχείς βελτιώσεις.

- Το AFFDEF προγραμματίστηκε σε γλώσσα Fortran, ενώ το HEC HMS δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας την Java, με κάποιες βιβλιοθήκες ακόμα γραμμένες στη Fortran και τα επιμέρους προγράμματα να διαβάζονται σχεδόν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα. Από την άλλη, η έκδοση του AFFDEF απευθύνεται κυρίως σε χρήστες Windows. Παρ' όλα αυτά, από το 2012, είναι διαθέσιμη και έκδοση για λειτουργικά συστήματα Linux έπειτα από συνεννόηση με τους συγγραφείς του κώδικα.

- Στην παρούσα εφαρμογή το AFFDEF χρησιμοποιήθηκε από τη γραμμή εντολών των Windows (command line), όπου καλείται ο μεταφραστής G95 (compiler G95) και πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Τα δεδομένα εισόδου έχουν αυστηρή μορφή κειμένου .txt και έτσι εισάγονται στο μοντέλο. Αντίθετα, το HEC HMS είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί μέσω γραφικού περιβάλλοντος επιτρέποντας την άμεση παρουσίασή του μοντέλου της λεκάνης και την ευκολότερη διαχείρισή του.

- Η προσομοίωση στο AFFDEF ακόμα και σε ωριαίο χρονικό βήμα πραγματοποιείται σε εύλογο χρονικό διάστημα χωρίς βέβαια να συγκρίνεται με την πολύ γρηγορότερη προσομοίωση του HEC.

- Το AFFDEF αποτελεί ένα καταναμημένο (distributed) μοντέλο όπου η λεκάνη έχει καταταμηθεί σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας, φατνία (cells) δηλαδή του καννάβου. Από την άλλη, το HEC HMS είναι ένα ημικαταναμημένο μοντέλο (semi-distributed), που χωρίζει τη λεκάνη σε διακριτές περιοχές (υπολεκάνες) και η αντίστοιχη απόκριση μεταφέρεται στην έξοδο της λεκάνης με εφαρμογή μεθόδων διόδευσης. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η εφαρμογή του AFFDEF δεν απαιτεί την ταυτόχρονη χρήση άλλου προγράμματος. Παρ' όλα αυτά, κάποια από τα απαιτούμενα αρχεία εισόδου ήτοι ψηφιακό μοντέλο εδάφους, κατηγορίες εδαφών, τραχύτητα εδάφους και ικανότητα διήθησης παρήχθησαν σε μορφή καννάβου σε περιβάλλον GIS, με αποτέλεσμα η ταυτόχρονη χρήση του ArcMap να είναι απαραίτητη. Το HEC HMS από την άλλη, απαιτεί εκ των προτέρων τη χρήση προγράμματος GIS, καθώς και του πρόσθετου εργαλείου HEC GeoHMS όπου δημιουργούνται τα αρχεία εισόδου.

- Πολλές από τις υδρολογικές διεργασίες που περιλαμβάνονται και στα δύο μοντέλα είναι εννοιολογικές, δηλαδή με παραμετρικές σχέσεις. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται μοντελοποίηση φυσικής βάσης χρησιμοποιώντας εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής και άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες.

- Το AFFDEF παρέχει τη δυνατότητα τριών ειδών προσομοίωσης: εκείνης με περιορισμένα δεδομένα βροχόπτωσης, του μεμονωμένου γεγονότος αλλά και της συνεχούς προσομοίωσης. Αντίθετα, στο HEC HMS η προσομοίωση είθισται να είναι μεμονωμένου επεισοδίου καταιγίδας.

- Η προσομοιωμένη υδρολογία της πλαγιάς στο AFFDEF όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι όμοια με την απλοποιημένη που εφαρμόζεται στο HEC HMS. Στην τελευταία βέβαια παρέχεται επιπλέον η δυνατότητα εισαγωγής βασικής απορροής (base flow), η οποία, όμως, δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εφαρμογή.

- Τόσο στο AFFDEF, όσο και στο HEC-HMS το ΨΜΕ διορθώνεται, εντοπίζοντας τα βυθίσματα και συμπληρώνοντάς τα. Επιπλέον, το HEC με τη μέθοδο AGREE μπορεί να ανακατατάξει τα κελιά του καννάβου κατά μήκος των ρεμάτων, διορθώνοντας λανθασμένα ή ελλιπή υψόμετρα, λειτουργία που κρίνεται σε πολλές περιπτώσεις απαραίτητη.

- Το υδρογραφικό δίκτυο στο AFFDEF καθορίζεται με την αρχική φόρμουλα MOD1. Σε αυτήν, όπως αναφέρθηκε, περιλαμβάνεται αλγόριθμος με τη μέθοδο διεύθυνσης ροής D8. Είναι η ίδια μέθοδος που εφαρμόζεται εκτελώντας την εντολή Flow Direction στο HEC-GeoHMS. Ακολούθως, και στα δύο μοντέλα υπολογίζονται οι ροές και η συμβάλλουσα περιοχή για κάθε κελί, όπου στο μεν AFFDEF η διαδικασία περιλαμβάνεται στη φόρμουλα MOD1, ενώ στο HEC- GeoHMS εκτελείται η εντολή Flow Accumulation. Στο HEC ο χρήστης μπορεί άμεσα να δει τον κάνναβο συγκέντρωσης ροής και να δημιουργήσει το υδρογραφικό δίκτυο επιλέγοντας ένα κατώτατο κατώφλι. Συγκρίνοντας το δίκτυο που προέκυψε με εκείνο από χάρτες της ΓΥΣ και μεταβάλλοντας την τιμή του κατωφλίου είναι εφικτός ο ορθότερος προσδιορισμός του υδρογραφικού δικτύου. Άμεση εποπτεία και μεταβολή του υδρογραφικού δικτύου εκτελώντας το AFFDEF δεν υπάρχει. Παρ' όλα αυτά, και εδώ ορίζεται μια τιμή κατωφλίου, η λεγόμενη κρίσιμη περιοχή στήριξης (A_0), η τιμή της οποίας εξάγεται κυρίως βιβλιογραφικά. Τελικά, η ιεράρχηση του υδρολογικού δικτύου γίνεται και στις δύο εφαρμογές με τη μέθοδο Strahler.

- Τα δεδομένα βροχόπτωσης εισάγονται στο AFFDEF με μορφή αρχείου .txt και η αναγωγή εκτελείται αυτόματα με ρουτίνα, είτε με τη μέθοδο πολυγώνων Thiessen είτε με τη μέθοδο αντίστροφης τετραγωνικής απόστασης. Από την άλλη, στο HEC-HMS εισάγονται απ' ευθείας οι ανηγμένες βροχοπτώσεις κάθε υπολεκάνης. Σε προηγούμενο στάδιο, με χρήση του ArcMap, έχουν δημιουργηθεί τα πολύγωνα Thiessen, οι αντίστοιχοι παράγοντες βάρους και έχουν υπολογιστεί έτσι οι βροχοπτώσεις σε κάθε υπολεκάνη.

- Η υδρολογική μέθοδος διόδευσης περιλαμβάνεται και στα δύο μοντέλα και μάλιστα οι ροές στην επιφάνεια και κάτω από αυτήν διοδεύονται προς την έξοδό της εφαρμόζοντας τη μέθοδο Muskingum- Cunge. Το HEC όπως παρουσιάστηκε παραπάνω παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής και άλλων μεθόδων. Το περίσσειμα της βροχής υπολογίζεται και στις δύο περιπτώσεις με τη μέθοδο SCS της Υπηρεσίας Εδαφικής Προστασίας των ΗΠΑ. Η μετατροπή του περισσεύματος βροχής σε απορροή πραγματοποιείται με τη μέθοδο MYΓ της SCS και στα δύο μοντέλα. Παρέχονται και άλλες μεθοδολογίες στο HEC, που όμως δεν εφαρμόζονται εδώ. Η ωριαία ένταση της πιθανής εξατμισοδιαπνοής σε τοπική κλίμακα υπολογίζεται με τη μέθοδο των Doorembos and Pruitt (1984), η οποία, όμως, δε χρησιμοποιείται από το HEC. Στο AFFDEF απαιτείται η εισαγωγή αρχείου με τις τάξεις της τραχύτητας του εδάφους κατά Strickler για κάθε κελί του μοντέλου εδάφους, ενώ στο HEC HMS ορίζεται ο αριθμός Manning (n) για κάθε υπολεκάνη.

- Τα δύο μοντέλα τελικά εξάγουν απορροές σε οποιαδήποτε θέση του δικτύου, αφού πρώτα αυτή καθοριστεί από το χρήστη.

4 Εφαρμογή στη Λεκάνη Απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας

4.1 Εισαγωγή

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας τοποθετείται κεντρικά και ανατολικά στην ηπειρωτική Ελλάδα καταλαμβάνοντας το 10.6% της συνολικής επικράτειας. Αποτελεί περιοχή με υδρολογικό ενδιαφέρον καθώς διαθέτει πλούσιο φυσικό περιβάλλον με τη μεγαλύτερη πεδιάδα η οποία διαρρέεται από τον Πηνειό, το τρίτο μεγαλύτερο ποτάμι της χώρας. Σε αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί το δυτικό τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος και συγκεκριμένα η λεκάνη απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας έκτασης 1128.4 km². Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η λεκάνη σε ορθοφωτοχάρτες της υπηρεσίας εντοπισμού Google maps.



Σχήμα 4.1: Λεκάνη απορροής Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας
(Πηγή: Google & επεξεργασία συντάκτριας)

Η διερεύνηση που πραγματοποιείται στα επόμενα εδάφια απαιτεί την ύπαρξη δεδομένων βροχής και απορροής σε ωριαία κλίμακα. Για την υπό μελέτη λεκάνη τα δεδομένα αυτά διατίθενται από το ερευνητικό έργο: *Υδρολογική Διερεύνηση Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας* (Ξανθόπουλος κ.ά., 1988) που είναι αναρτημένο στο διαδικτυακό τόπο της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ.

Η εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής πραγματοποιείται με τη χρήση του ημικατανεμημένου μοντέλου HEC-HMS. Επιδιώκοντας τη διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση των απορροών πλημμύρας, εξετάζονται τέσσερα σενάρια: Στο πρώτο, μελετάται μία, ενιαία λεκάνη υπονοώντας τη δημιουργία ενός συγκεντρωτικού

μοντέλου (lumped). Στο δεύτερο μελετώνται τρεις υπολεκάνες, εισάγοντας έτσι τη μελέτη ημικατανομημένου μοντέλου (semi-distributed). Στο πλαίσιο αυτό, διερευνώνται και περισσότερες υπολεκάνες, ήτοι πέντε (τρίτο σενάριο) και εννιά (τέταρτο σενάριο). Η εφαρμογή του υδρολογικού σχεδιασμού πραγματοποιείται για κάθε σενάριο μελέτης και κάθε επεισόδιο πλημμύρας ξεχωριστά.

4.2 Δεδομένα Περιοχής Μελέτης

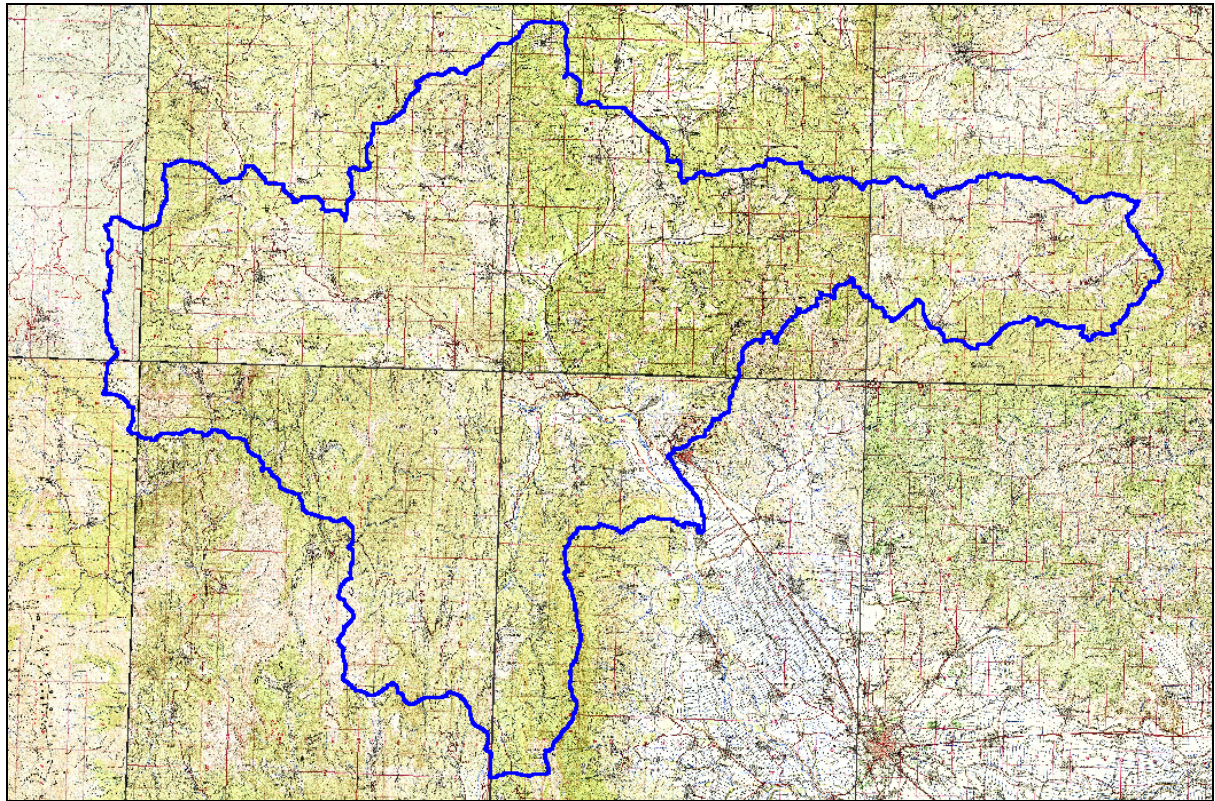
4.2.1 Υδρολογικά Δεδομένα

Στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής υπάρχουν οι βροχογραφικοί σταθμοί Παλαιοχωρίου και Κερασιάς, ενώ γειτονικοί σταθμοί με βροχογράφο είναι εκείνοι των Τρικάλων και της Δεσκάτης. Οι σταθμοί που λειτούργησαν χωρίς ελλείψεις πριν το 1968 είναι εκείνοι του Παλαιοχωρίου και των Τρικάλων. Όσον αφορά στις μετρήσεις παροχής, η λειτουργία του σταθμού Σαρακίνας ξεκίνησε το 1951, όμως συστηματικές μετρήσεις υπάρχουν μετά το 1960, με καλή λειτουργία του μέχρι και το έτος 1968 (Ξανθόπουλος κ.ά, 1988).

Από την εξέταση των παρατηρημένων βροχοπτώσεων και απορροών παρατηρούνται ελλείψεις στις καταγραφές καθώς και πιθανά σφάλματα μετρήσεων. Παρά ταύτα, μελετώντας διεξοδικά τα πλημμυρογραφήματα, επιλέγονται τέσσερα (4), τα οποία κρίνονται αξιόπιστα και στα οποία παρατηρείται αντιστοιχία των χρονικών διακυμάνσεών τους με τα αντίστοιχα υετογράμματα. Πρόκειται για τα επεισόδια στις 13/04/1965, 7/12/1966, 14/12/1966 και 13/11/1968. Τα επεισόδια βροχόπτωσης είναι μικρά (48ωρα), με σχετικά ομοιόμορφη ένταση και σε επαρκή χρονική απόσταση από προηγούμενα και επόμενα επεισόδια. Προφανώς, η μεγάλη έκταση της λεκάνης δεν επιτρέπει τον εντοπισμό μικρότερων επεισοδίων βροχής και την ταυτόχρονα ομοιόμορφη επιφανειακή διανομή της. Το γεγονός αυτό ίσως δημιουργεί εκ των προτέρων σφάλμα στην κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος, το οποίο όμως για την εν λόγω μελέτη κρίνεται αποδεκτό.

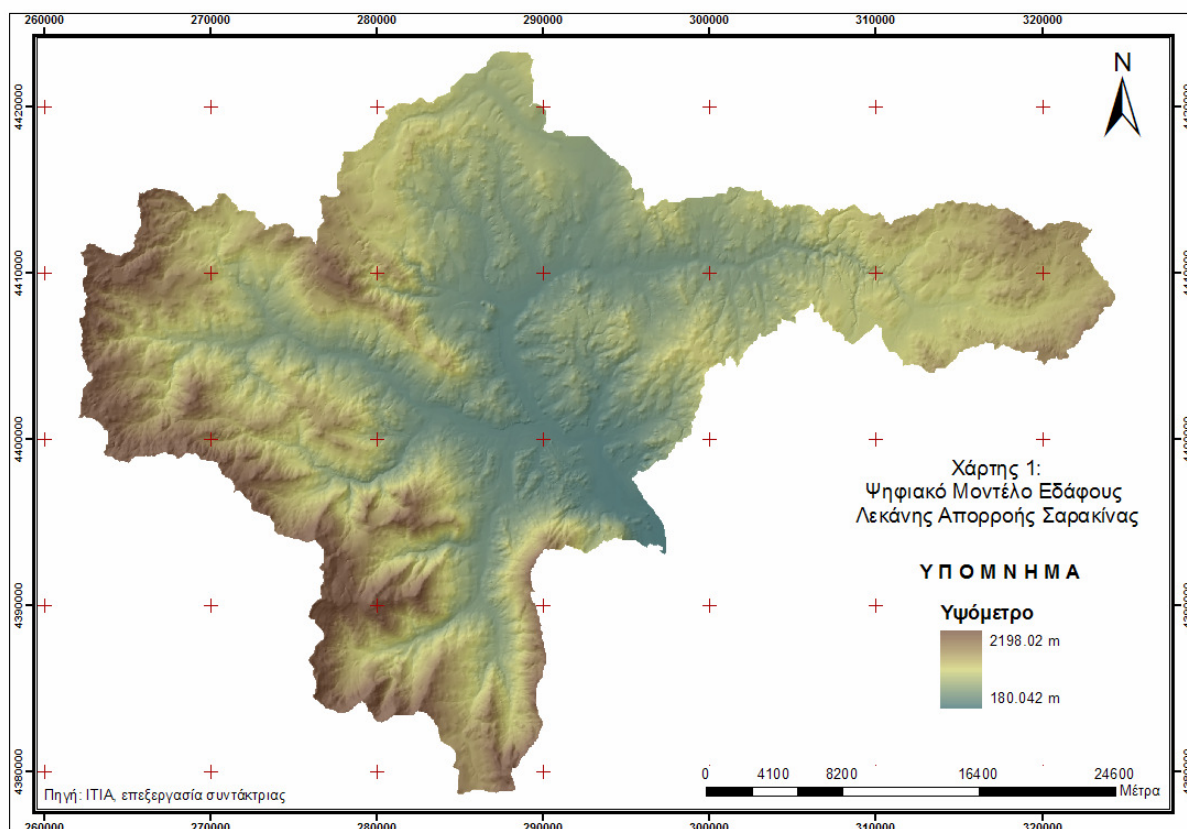
4.2.2 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε χωρικά κατανομημένα μοντέλα, γεγονός που απαιτεί τη χρήση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Η παραγωγή του ΨΜΕ γίνεται συνήθως με ψηφιοποίηση της υψομετρικής πληροφορίας με ποικίλες μεθόδους, όπως επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους, τοπογραφικούς χάρτες, στερεοσκοπικά φωτογραμμετρικά μοντέλα, δορυφορικά μοντέλα, LiDAR, και SAR. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η δημιουργία του ΨΜΕ αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική εργασία η οποία δεν τελέστηκε στην παρούσα εργασία, καθώς ξέφυγε από τα όρια μελέτης αυτής. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της λεκάνης ανάντη της Σαρακίνας, παρασχέθηκε από τον κ. Α. Κουκουβίνο της ερευνητικής ομάδας «ΓΠΙΑ». Το μοντέλο αυτό βασίστηκε στην ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:50000. Συγκεκριμένα, για την εν λόγω περιοχή χρειάστηκαν τα φύλλα χάρτη «Παναγία», «Αγιοφύλλο», «Καστανέα», «Καλαμπάκα», «Δεσκάτη», «Μέτσοβο», «Πράμαντα» και «Τρίκαλα». Τα φύλλα αυτά διατίθενται σε προβολικό σύστημα UTM με Datum το Ευρωπαϊκό Datum 1950 (ED50) και μεταφέρονται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87) ακολουθώντας τις κατάλληλες μετατροπές, ώστε να ακολουθείται κοινό σύστημα αναφοράς σε όλα τα δεδομένα της μελέτης. Η λεκάνη απορροής αποτυπώνεται στα παραπάνω φύλλα όπως παρουσιάζει το Σχήμα 4.2.



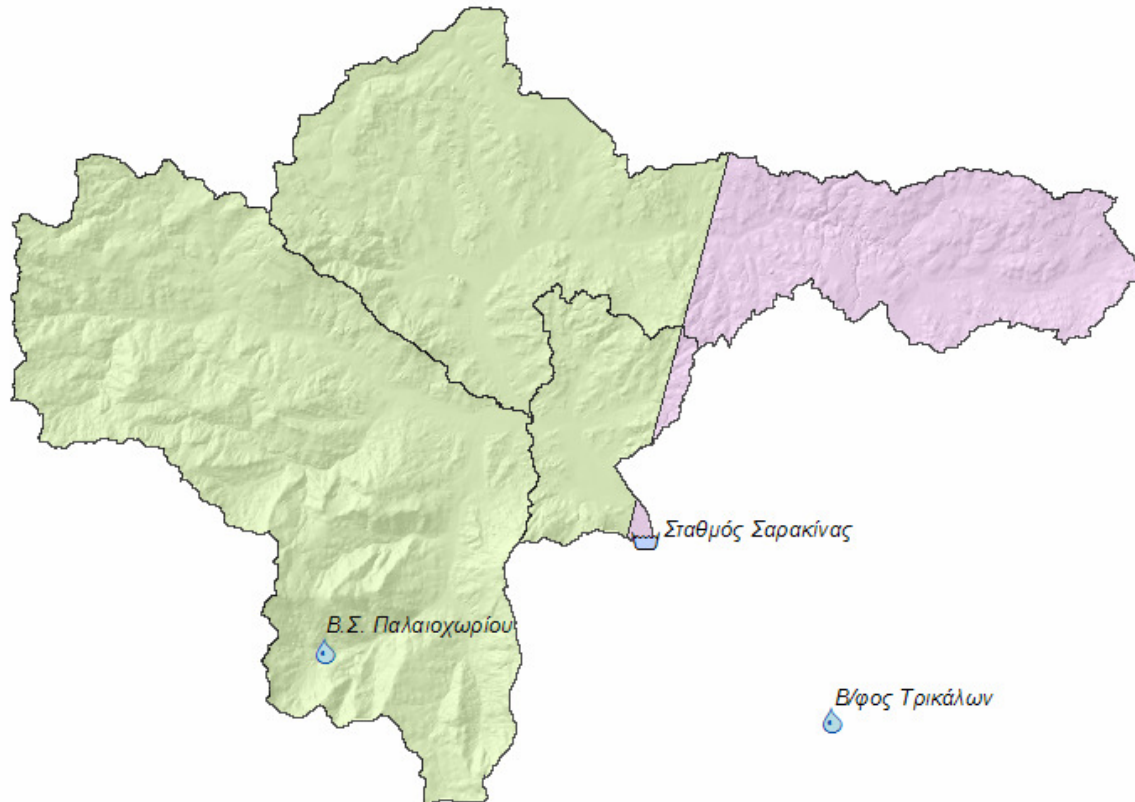
Σχήμα 4.2: Φύλλα χάρτη ΓΥΣ κλίμακας 1:50000 για την περιοχή μελέτης

Η διάσταση του φατνίου του ΨΜΕ είναι 25m×25m και η ανάλυση κρίνεται ικανοποιητική για το μέγεθος της λεκάνης απορροής. Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει το ΨΜΕ της περιοχής.



Σχήμα 4.3: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Λεκάνης Απορροής ανάντη του σταθμού Σαρακίνας

Στα σενάρια με τις υπολεκάνες που μελετώνται για κάθε επεισόδιο, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία για τον υπολογισμό του μέσου βροχομετρικού ύψους σε κάθε υπολεκάνη. Σε περιβάλλον ArcGis δημιουργείται στο σύστημα συντεταγμένων, το επίπεδο πληροφορίας με τους βροχομετρικούς σταθμούς Τρίκαλα και Παλαιοχώρι. Εκτελείται η εντολή Create Thiessen Polygons με σκοπό τη δημιουργία πολυγώνων Thiessen. Για να δημιουργηθεί το layer πολυγώνων, ακριβώς στην περιοχή της λεκάνης απορροής, θα πρέπει να οριστεί το μέγεθος του παραγόμενου αρχείου να είναι ίσο με την έκταση της λεκάνης επιλέγοντας την καρτέλα Environments. Στη συνέχεια, για να προκύψει η έκταση επηρεασμού κάθε σταθμού παρατήρησης για κάθε υπολεκάνη εκτελείται σε πρώτη φάση η εντολή Intersect. Έτσι, παράγεται ένα layer πολυγώνων Thiessen για κάθε υπολεκάνη. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δημιουργίας πολυγώνων Thiessen όπου με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η περιοχή που επηρεάζεται από το Β.Σ. Παλαιοχωρίου, ενώ με μωβ η περιοχή που επηρεάζεται από το βροχογράφο Τρικάλων.



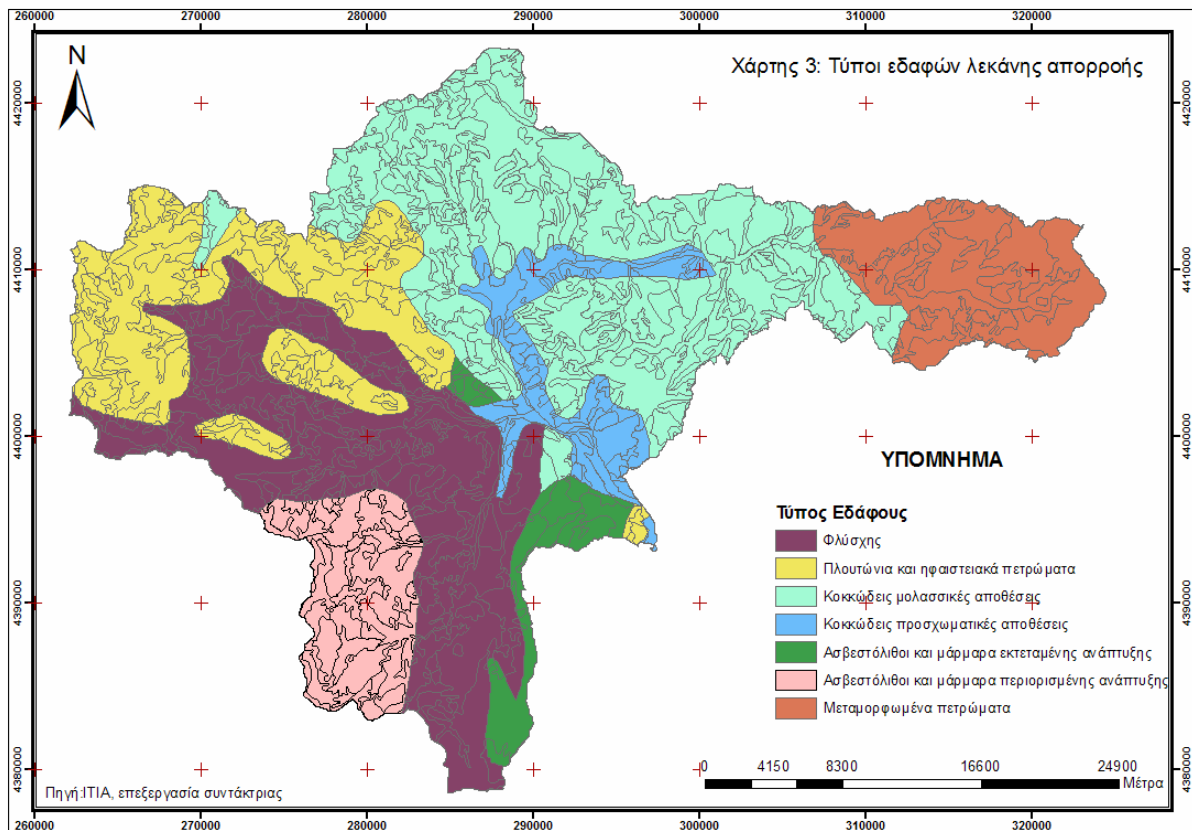
Σχήμα 4.4: Δημιουργία πολυγώνων Thiessen στο ArcGIS.

Από τον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) του layer που προέκυψε, υπολογίζεται η έκταση κάθε υπολεκάνης που επηρεάζεται από τον κάθε σταθμό. Διαθέτοντας έτσι βροχοπτώσεις κάθε σταθμού εύκολα υπολογίζεται το μέσο βροχομετρικό ύψος για κάθε υπολεκάνη. Στην παρούσα εργασία, η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για κάθε επεισόδιο βροχής-απορροής και εκτελέστηκε σε λογιστικό φύλλο Excel.

4.2.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά λεκάνης

Από τον ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB_data_1k_raster_intro/ESDB_1k_raster_data_intro.html) διατίθενται, ύστερα από αίτηση, αρχεία σε διανυσματική μορφή (raster) με δεδομένα για τους τύπους εδαφών σε όλη την Ευρώπη. Η ανάλυση των δεδομένων δεν κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική, αφού το μέγεθος του φατνίου είναι 1 kmx1 km. Παράλληλα όμως, δεδομένα σε μορφή shapefiles για εισαγωγή σε περιβάλλον GIS για τους εδαφικούς τύπους, διατέθηκαν από την ερευνητική ομάδα «ΙΤΙΑ» και συγκεκριμένα από τον Α. Κουκουβίνο. Τα δεδομένα αυτά βασίζονται σε γεωλογικό χάρτη κλίμακας 1:50000 του ΙΓΜΕ.

Έτσι, τα δεδομένα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενεργούν επικουρικά και επιβεβαιώνουν τις πληροφορίες από τον γεωλογικό χάρτη. Τελικά, ο χάρτης με τους εδαφικούς τύπους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί.

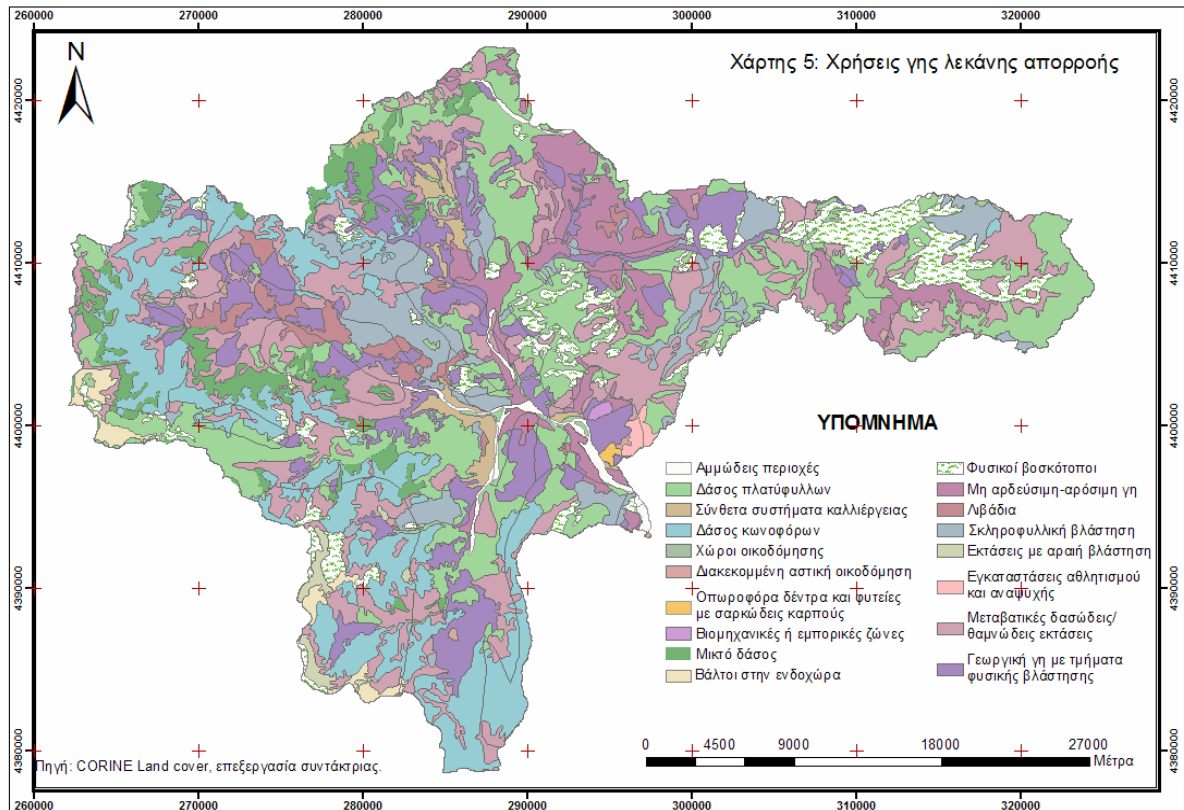


Σχήμα 4.5: Χάρτης τύπων εδαφών λεκάνης απορροής ανάντη του σταθμού Σαρακίνας

4.2.4 Χρήσεις Γης Λεκάνης Μελέτης

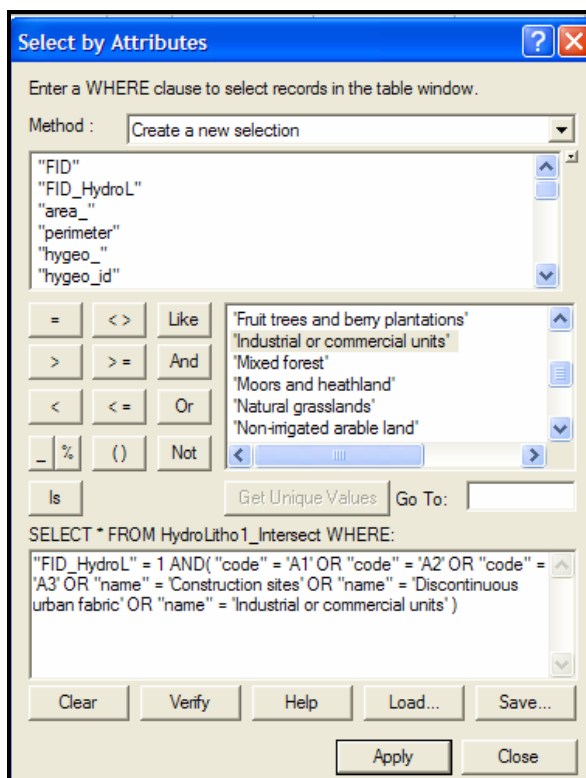
Στα πλαίσια του προγράμματος CORINE (CO-ordination of Information on the Environment) που εποπτεύεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, κατασκευάστηκαν δεδομένα κάλυψης εδάφους για το σύνολο του ελληνικού χώρου και για τις χρονολογίες 1990 και 2000. Το CORINE βασίζεται σε οπτική φωτοερμηνεία εικόνων του δορυφόρου LANDSAT 7 ETM+ από εθνικές ομάδες εργασίας. Για την Ελλάδα η αποτίμηση ακρίβειας έδωσε λίγο περισσότερο από 14 μέτρα κατά μέσο όρο, κατά X και κατά Y, ενώ το ένα τρίτο των εικόνων έχει μέσο τετραγωνικό σφάλμα πάνω από 22.5 μέτρα εστιασμένο στα ανατολικά και βόρεια της χώρας (Σταθάκης κ.ά., 2006).

Από το διαδικτυακό τόπο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database-3>) είναι διαθέσιμα δεδομένα με τις χρήσεις γης για όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση, τα οποία μπορούν να εισαχθούν σε περιβάλλον GIS. Μετά από επεξεργασία και γεωαναφορά των δεδομένων με τη βοήθεια του ArcGIS 9.3 της ESRI, προκύπτει μια χωρική οντότητα (feature class) που περιλαμβάνει τις χρήσεις γης κατά CORINE για τη λεκάνη απορροής που εξετάζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Χάρτης χρήσεων γης λεκάνης απορροής ανάντη του σταθμού Σαρακίνας

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών σε κάθε υπολεκάνη. Αδιαπέρατες επιφάνειες θεωρούνται οι κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών A1, A2 και A3 οι οποίες αποτελούν αντίστοιχα φλύσχη, μεταμορφωμένα πετρώματα και πλουτώνια- ηφαιστειακά πετρώματα. Επιπλέον ως αδιαπέρατες θεωρούνται και οι εκτάσεις που καλύπτονται από αστικές χρήσεις όπως κατοικίες και βιομηχανίες. Σε περιβάλλον ArcGis παρέχεται η δυνατότητα άμεσης επιλογής των παραπάνω κατηγοριών εδαφών και χρήσεων διατυπώνοντας ερώτημα σε SQL μέσα στον πίνακα ιδιοτήτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα για μία υπολεκάνη του σεναρίου 4, φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Υπολογίζοντας έπειτα την επιφάνεια των αδιαπέρατων επιφανειών προκύπτει και το ποσοστό τους σε κάθε υπολεκάνη.



Σχήμα 4.7: Παράδειγμα επιλογής αδιαπέρατων επιφανειών σε μία υπολεκάνη

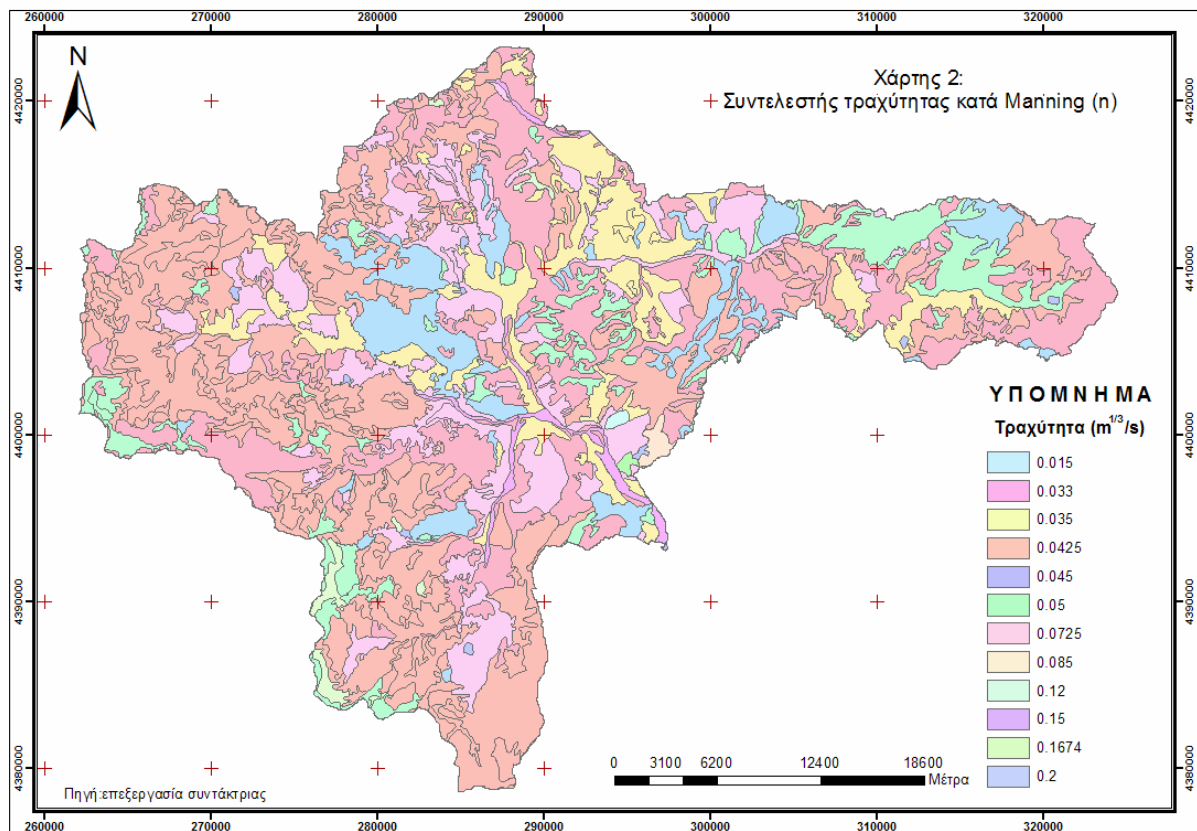
4.2.5 Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (n)

Ακολουθώς υπολογίζεται η τραχύτητα της λεκάνης με τον συντελεστή τραχύτητας του Manning (n). Οι σχετικές τιμές, προκύπτουν με βάση τον κάρναβο των χρήσεων γης της υπό μελέτη περιοχής. Σε κάθε χρήση του Corine Land Cover, αντιστοιχίζεται ένας συντελεστής τραχύτητας όπως προκύπτει από μελέτη της λεκάνης και την ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (Chow, 1959, Χριστοφίδης, 2008, Van der Sande et al., 2003, Huang, 2005). Οι συντελεστές που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1: Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning για κάθε χρήση γης

| α/α | Κατηγορίες χρήσεων γης | Κατηγορίες χρήσεων γης κατά Corine Land cover | Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (n) |
|-----|---|--|---|
| 1 | Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές | Beaches, dunes, sands | 0.045 (Huang, 2005) |
| 2 | Δάσος πλατύφυλλων | Broad-leaved forest | 0.12 (Chow, 1959) |
| 3 | Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας | Complex cultivation patterns | 0.05 (Huang, 2005) |
| 4 | Δάσος κωνοφόρων | Coniferous forest | 0.2 (Huang, 2005) |
| 5 | Χώροι οικοδόμησης | Construction sites | 0.12 (Huang, 2005) |
| 6 | Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση | Discontinuous urban fabric | 0.015 (Χριστοφίδης, 2008) |
| 7 | Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς | Fruit trees and berry plantations | 0.15 (Huang, 2005) |
| 8 | Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες | Industrial or commercial units | 0.1674 (Chow, 1959; Van der Sande et al., 2003) |
| 9 | Μικτό δάσος | Mixed forest | 0.2 (Huang, 2005) |
| 10 | Βάλτοι στην ενδοχώρα | Moors and heathland | 0.033 (Huang, 2005) |
| 11 | Φυσικοί βοσκότοποι | Natural grasslands | 0.033 (Huang, 2005) |
| 12 | Μη αρδευσιμη-αρόσιμη γη | Non-irrigated arable land | 0.035 (Huang, 2005) |
| 13 | Λιβάδια | Pastures | 0.035 (Huang, 2005) |
| 14 | Σκληροφυλλική βλάστηση | Sclerophyllous vegetation | 0.085 (Huang, 2005) |
| 15 | Εκτάσεις με αραιή βλάστηση | Sparsely vegetated areas | 0.0425 (Huang, 2005) |
| 16 | Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής | Sport and leisure facilities | 0.0725 (Huang, 2005) |
| 17 | Μεταβατικές δασώδεις- θαμνώδεις εκτάσεις | Transitional woodland-shrub | 0.2 (Χριστοφίδης, 2008) |
| 18 | Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης | Land principally agriculture, with areas of natural vegetation | 0.05 (Huang, 2005) |

Δημιουργείται έτσι μια καινούρια στήλη στον πίνακα ιδιοτήτων των χρήσεων γης που περιλαμβάνει τις τιμές τραχύτητας. Για τη μετατροπή του διανυσματικού αρχείου σε κάρναβο, εκτελείται στο ArcGis την εντολή Feature to Raster και προκύπτει ο κάρναβος τραχυτήτων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 παρακάτω.



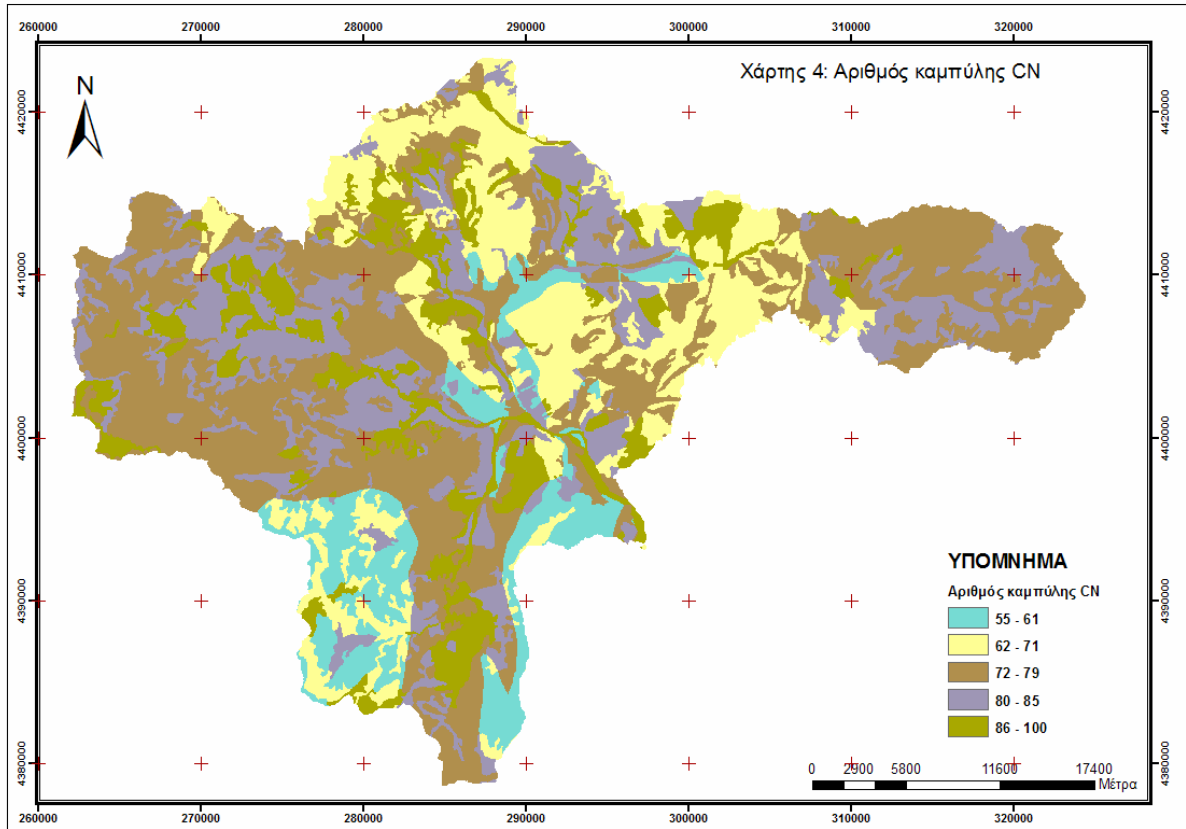
Σχήμα 4.8: Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning ($m^{1/3}/s$)

4.2.6 Αριθμός καμπύλης (CN)

Για την εκτίμηση του αριθμού καμπύλης, CN, απαιτείται η γνώση των εδαφικών σχηματισμών και των χρήσεων γης. Σε πρώτη φάση, προκειμένου να ενωθούν οι διαθέσιμες πληροφορίες με τους εδαφολογικούς σχηματισμούς και τις χρήσεις γης, εκτελείται στο ArcGIS η εντολή Intersect, οπότε παράγεται μία νέα χωρική οντότητα (feature class) με συγκεντρωμένα όλα τα απαιτούμενα δεδομένα.

Για τον καθορισμό του αριθμού CN αρχικά τα εδάφη κατατάσσονται ανάλογα με τη διηθητικότητα και διαπερατότητα σε τέσσερις κατηγορίες A, B, C και D. Εν προκειμένω, από τα δεδομένα, οι κατηγορίες C, C1 και I1 αντιστοιχίζονται στην κατηγορία B των εδαφών με μέτρια διηθητικότητα, η I3 στα εδάφη μικρής διηθητικότητας και διαπερατότητας τύπου C και οι A1, A2 και A3 στην κατηγορία D εδαφών με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα. Η νέα κατάταξη εδαφών εισάγεται στον πίνακα ιδιοτήτων της νέας οντότητας, όπου επιπλέον προστίθεται νέο πεδίο για τη συμπλήρωση των αριθμών CN.

Διαθέτοντας τα παραπάνω δεδομένα και ακολουθώντας τον πίνακα με τους αριθμούς καμπύλης CN (Παράρτημα Α, Πίνακας Α.1) του Wanielista (1978) εισάγονται πλέον οι αριθμοί CN στο αντίστοιχο πεδίο. Η εντολή του ArcGIS Feature to Raster παράγει τον κάρναβο με τους αριθμούς CN του Σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9: Αριθμός καμπύλης CN

Επιπλέον υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος του CN για κάθε υπολεκάνη, αριθμός ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα στην υδρολογική προσομοίωση. Οι τελικοί αριθμοί καμπύλης CN για τα τέσσερα σενάρια υπολεκανών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2 Αριθμός καμπύλης CN για κάθε υπολεκάνη των τεσσάρων σεναρίων

| α/α υπολεκάνης | Αριθμός καμπύλης CN | | | |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Σενάριο 1 ^ο | Σενάριο 2 ^ο | Σενάριο 3 ^ο | Σενάριο 4 ^ο |
| 1 | 74.1 | 78.5 | 80.3 | 78 |
| 2 | | 77.7 | 74.8 | 73 |
| 3 | | 74 | 77.7 | 73 |
| 4 | | | 84.2 | 81 |
| 5 | | | 74 | 79 |
| 6 | | | | 74 |
| 7 | | | | 76 |
| 8 | | | | 71 |
| 9 | | | | 73 |

4.3 Εισαγωγή δεδομένων στο HEC - GeoHMS

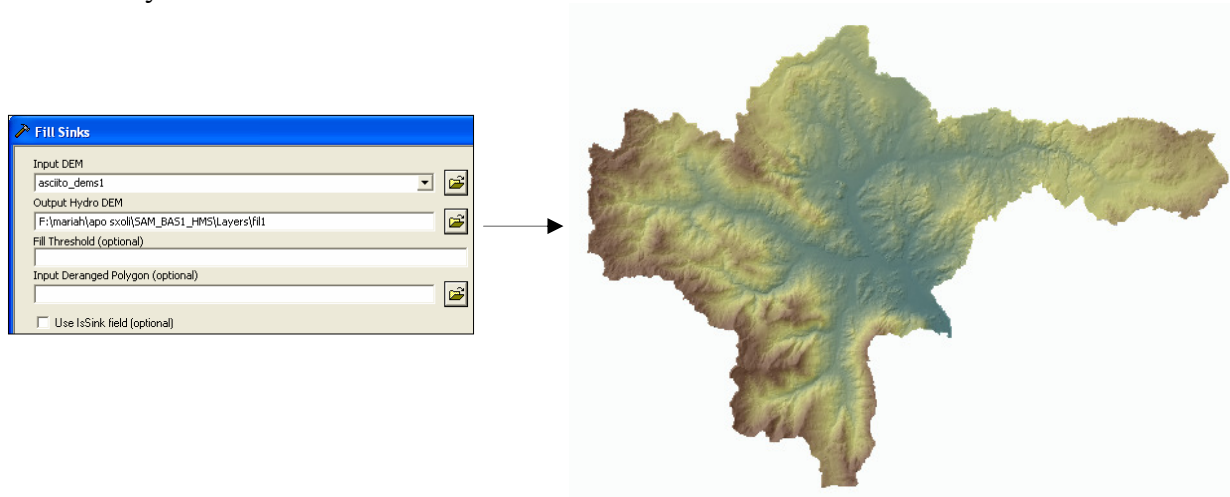
Η υδρολογική προσομοίωση της υπό μελέτη λεκάνης απορροής πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την επέκταση του ArcGIS, HEC GeoHMS, καθώς και το λογισμικό HEC-HMS. Το HEC-GeoHMS χρησιμοποιεί τη διαθέσιμη ψηφιακή χωρική πληροφορία για να κατασκευάσει υδρολογικά μοντέλα πιο γρήγορα από τις χειροκίνητες μεθόδους. Το πρόγραμμα επιτρέπει την οπτικοποίηση της χωρικής πληροφορίας, την εξαγωγή των χαρακτηριστικών της λεκάνης, τη χωρική ανάλυση, τον καθορισμό των υπολεκανών και ρεμάτων καθώς και το σχεδιασμό των αρχείων εισόδου για τα υδρολογικά μοντέλα (Scharffenberg and Flemming, 2010).

Όπως αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία πρόκειται να διερευνηθεί η επίδραση του αριθμού των υπολεκανών στην εκτίμηση της απορροής και έτσι, για το σκοπό αυτό εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, διερευνούνται μία, τρεις, πέντε και εννιά υπολεκάνες στην περιοχή. Η διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως, εφαρμόζεται και για τα τέσσερα σενάρια μελέτης.

4.3.1 Προεπεξεργασία Εδάφους – Terrain Preprocessing

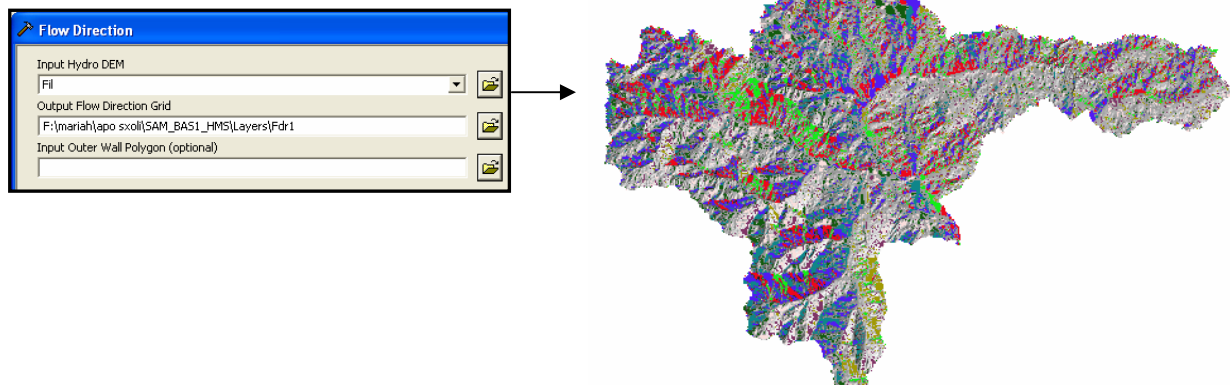
Το πρώτο βήμα κατά την εφαρμογή του HEC-GeoHMS είναι η ‘Προεπεξεργασία Εδάφους’ – Terrain Preprocessing, όπου με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους παράγονται οι πέντε κάρτες της διεύθυνσης και συγκέντρωσης ροής, του υδρογραφικού δικτύου και του καθορισμού των υπολεκανών καθώς και δύο διανυσματικά αρχεία με τις υπολεκάνες και τα ρέματα.

Σε πρώτη φάση απαιτείται η διόρθωση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, με την πλήρωση όλων των βυθισμάτων του. Με την εντολή Terrain Preprocessing → Fill Sinks, όλες οι καταβόθρες εξαλείφονται και παράγεται ένας νέος κάρναβος (Σχήμα 4.10) που αντιπροσωπεύει το διορθωμένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο και χρησιμοποιείται ακολούθως.



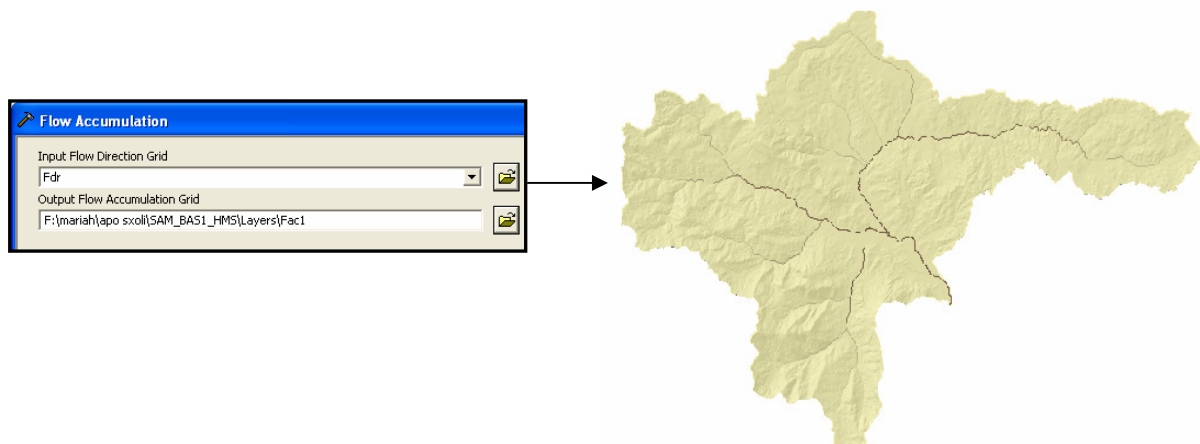
Σχήμα 4.10: Εντολή πλήρωσης βυθισμάτων στο HEC-GeoHMS και διορθωμένο ΨΜΕ

Έπειτα, υπολογίζεται ο κάρναβος διεύθυνσης ροής (Σχήμα 4.11), όπου καθορίζεται η διεύθυνση της πιο απότομης κατωφέρειας για κάθε κελί του κάρναβου με την εφαρμογή της μεθόδου D-8. Εκτελώντας την εντολή Terrain Preprocessing → Flow Direction παράγεται ο κάρναβος διεύθυνσης ροής.



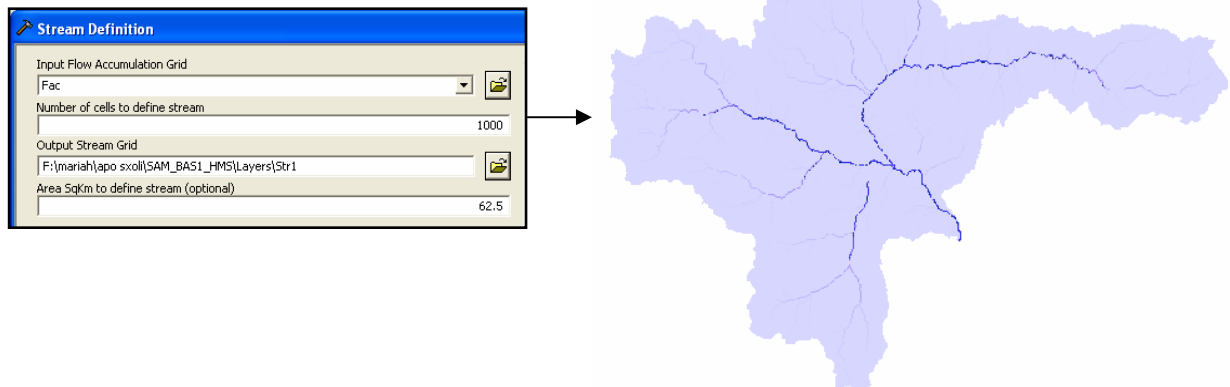
Σχήμα 4.11: Εντολή δημιουργίας καννάβου διεύθυνσης ροής στο HEC-GeoHMS και παραγόμενος καννάβος

Η εντολή Terrain Preprocessing → Flow Accumulation καθορίζει τον αριθμό των κελιών που απορρέουν σε κάθε κελί και έτσι παράγεται ο καννάβος συγκεντρωτικής ροής (Σχήμα 4.12).



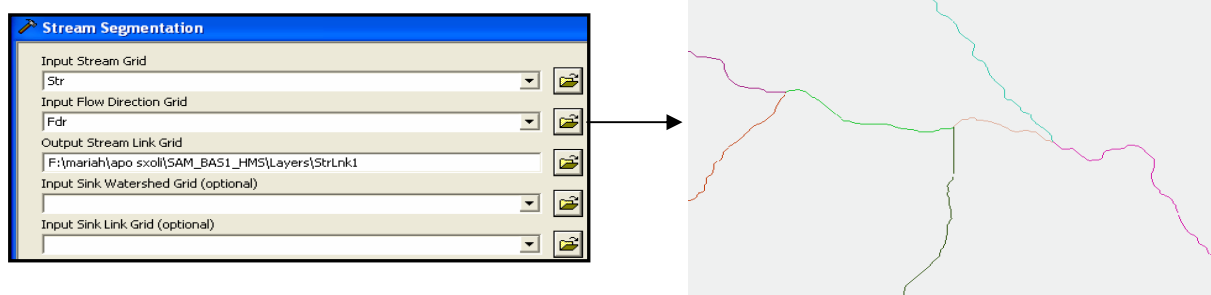
Σχήμα 4.12: Εντολή δημιουργίας καννάβου συγκεντρωτικής ροής στο HEC-GeoHMS και παραγόμενος καννάβος

Ακολουθεί η παραγωγή του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 4.13) με την εντολή Terrain Preprocessing → Stream Definition, όπου ταξινομούνται όλα τα κελιά με συγκεντρωτική ροή μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή που ορίζει ο χρήστης. Όσο μικρότερη είναι αυτή η ελάχιστη τιμή, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των υπολεκανών που σχηματίζονται στο επόμενο βήμα. Στην παρούσα μελέτη που εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις υπολεκανών, εδώ θέτονται τέσσερις διαφορετικές ελάχιστες τιμές-όριο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μελέτης μίας ενιαίας λεκάνης, επιλέχθηκε ως ελάχιστη τιμή τα 800.000, για μελέτη τριών υπολεκανών η τιμή 600.000, για το σχεδιασμό πέντε υπολεκανών η τιμή 110.000 και τέλος για τις εννιά υπολεκανές καθορίστηκε η οριακή τιμή 100.000.



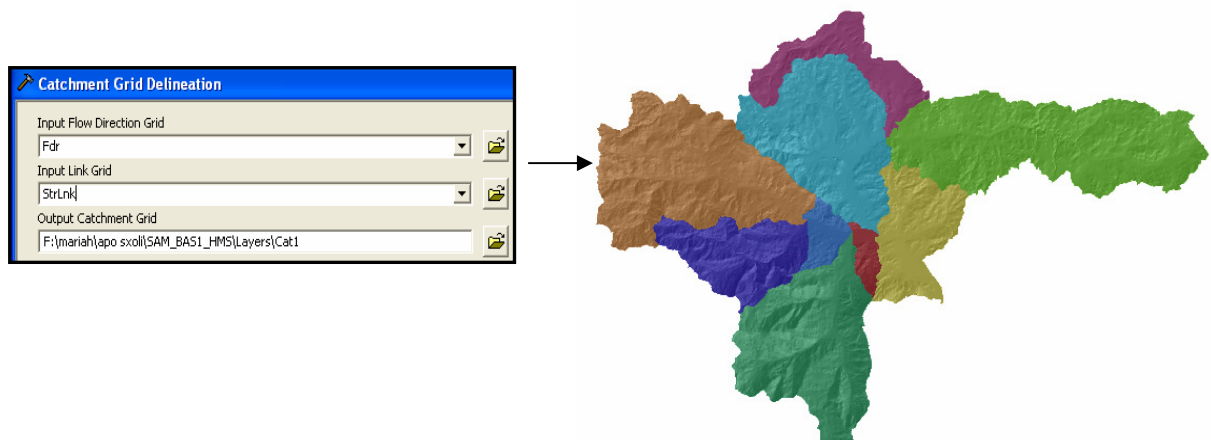
Σχήμα 4.13: Παράδειγμα εντολής καθορισμού ρεμάτων στο HEC-GeoHMS και παραγόμενου καννάβου

Το υδρογραφικό δίκτυο διαιρείται σε μικρότερα τμήματα και ταξινομείται με τη μέθοδο Strahler, εκτελώντας Terrain Preproceccing → Stream Segmentation (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Παράδειγμα εντολής διαίρεσης υδρογραφικού δικτύου στο HEC-GeoHMS και παραγόμενων τμημάτων

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των υπολεκανών σε κάθε τμήμα υδατορεύματος που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Εκτελώντας Terrain Preproceccing → Catchment Grid Delineation δημιουργούνται ξεχωριστά οι εννιά, πέντε, τρεις υπολεκάνες και μία λεκάνη που θα εισαχθούν μετέπειτα στο υδρολογικό μοντέλο (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Παράδειγμα εντολής δημιουργίας υπολεκανών στο HEC-GeoHMS και του αντίστοιχου παραγόμενου καννάβου

Οι υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο για να υποστούν επεξεργασία στη συνέχεια θα πρέπει να μετατραπούν και σε διανυσματική μορφή (vector). Για το σκοπό αυτό ακολουθείται η εντολή Terrain Preprocessing → Catchment Polygon Processing για το σχεδιασμό του αρχείου με τις υπολεκάνες και Terrain Preprocessing → Drainage Line Processing για το δίκτυο. Η τελευταία εντολή που εκτελείται στην Προεπεξεργασία του Εδάφους είναι η Terrain Preprocessing → Watershed Aggregation και πραγματοποιεί την ένωση των ανάντη υπολεκανών σε κάθε συμβολή του ποταμού. Το βήμα αυτό δεν έχει καμία υδρολογική σημασία, αλλά συντελεί σε ταχύτερους υπολογισμούς και ενισχύει την εξαγωγή δεδομένων κατά τον καθορισμό της εργασίας στο HEC-GeoHMS.

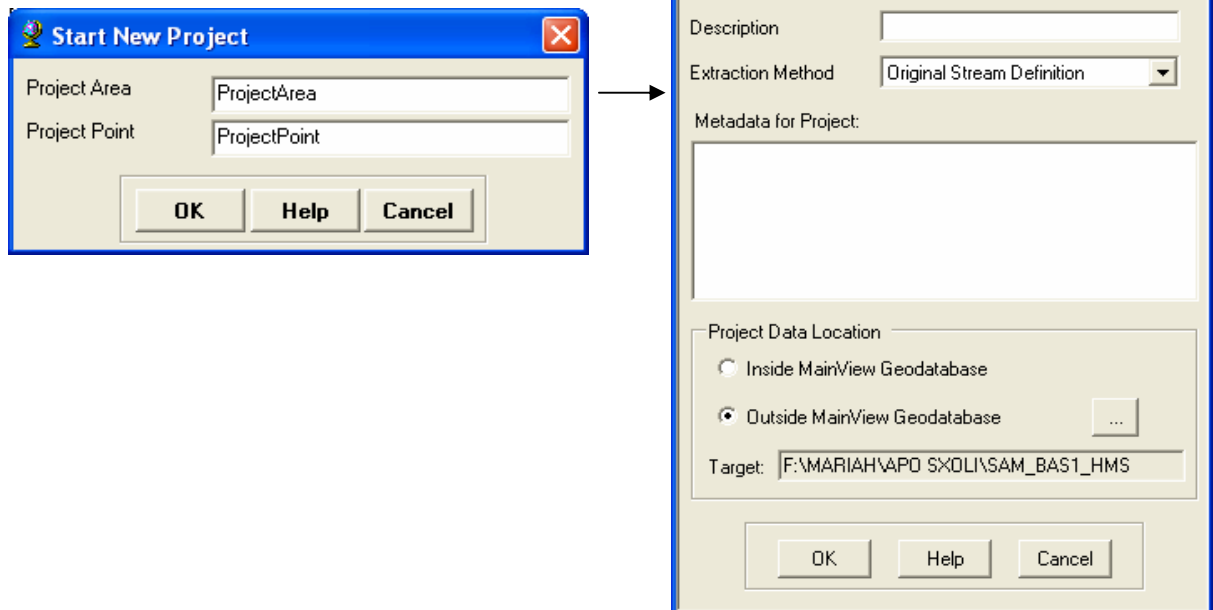
Στο Παράρτημα Β, στα Σχήματα Β.1 και Β.2, παρουσιάζονται οι υπολεκάνες για κάθε σενάριο, όπως δημιουργήθηκαν σε αυτό το βήμα. Στο δεύτερο σενάριο δημιουργούνται δύο μεγάλες υπολεκάνες (W40, W50) όπου ρέει το μεγαλύτερο τμήμα του υδρογραφικού δικτύου, και μία μικρότερη ανάντη της εξόδου η οποία δέχεται και τις ροές των W40 και W50. Στο τρίτο σενάριο, από την προηγούμενη μεγάλη λεκάνη W50 προκύπτουν δύο μικρότερες (W70, W80) και ένα τμήμα που σε συνδυασμό με τμήμα της προηγούμενης W60, τώρα δημιουργούν μία τρίτη, μικρή υπολεκάνη, την W90. Η υπολεκάνη αυτή, συγκεντρώνει τους κλάδους των ανάντη W70 και W80 και οδηγεί τη ροή στην τελική υπολεκάνη πριν την έξοδο.

Το τέταρτο σενάριο περιλαμβάνει εννιά υπολεκάνες. Σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, παραμένουν ως έχουν οι υπολεκάνες W100 και W90. Η υπολεκάνη W70 στα δυτικά, χωρίζεται σε τρία τμήματα καθένα από τα οποία αποτελεί πλέον τη W130, τη W140 και τη W150 υπολεκάνη. Επίσης, η προηγούμενη W60, που καταλάμβανε το βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης, διαμερίζεται σε τρεις νέες, την W120, W100 και W110.

Σημειώνεται ότι στο σύνολό τους οι υπολεκάνες όλων των σεναρίων κρίνονται αποδεκτές αφού ελεγχθεί ότι αναπαριστούν ορθά, φυσικές υπολεκάνες. Στις περιπτώσεις των υπολεκανών με έκταση μικρότερη από 30 km², δεν ξεχωρίζει καθαρά ο υδροκρίτης και εκείνες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διόδευση της παροχής από ανάντη σε κατάντη υπολεκάνες.

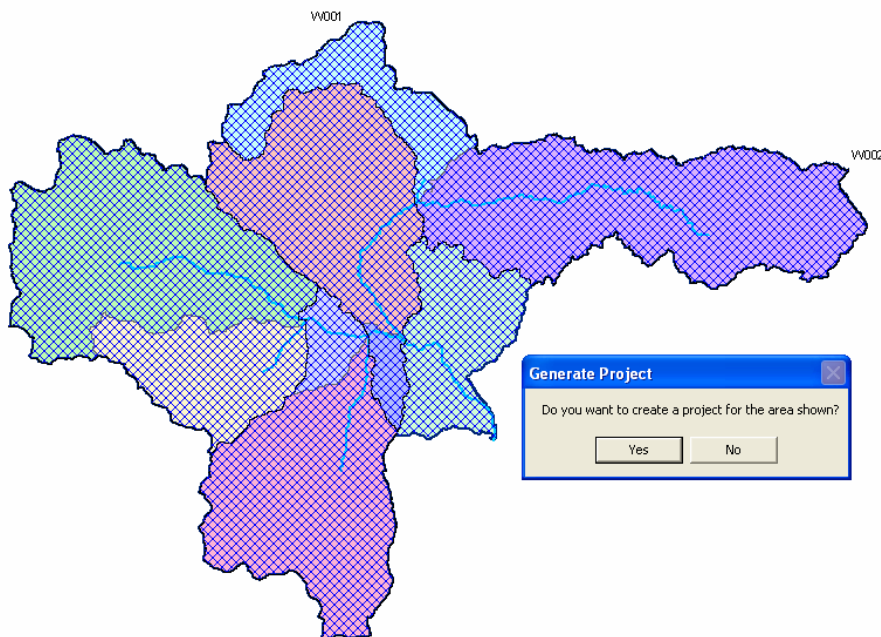
4.3.2 Ρύθμιση νέας εργασίας στο HEC-HMS.

Ο καθορισμός της ονομασίας της νέας εργασίας που θα δημιουργηθεί στο πρόγραμμα, καθώς και του καταλόγου με τα συναφή αρχεία γίνεται από το μενού επιλογών HMS Project Setup, αρχικά με την εντολή Start New Project και έπειτα εκτελώντας Define a New Project (Σχήμα 4.16).



Σχήμα 4.16: Παράδειγμα δημιουργίας νέας εργασίας στο HEC-GeoHMS

Το πρόγραμμα εμφανίζει μήνυμα σύμφωνα με το οποίο προτρέπει το χρήστη στη δημιουργία του σημείου εξόδου με την εντολή Add Project Point. Μεγεθύνοντας την εικόνα, επιλέγεται το κατάλληλο φατνίο που θα αντιπροσωπεύει την έξοδο της λεκάνης. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας γίνεται με την εντολή Generate Project, όπου ελέγχεται ο κατάλογος με τα δεδομένα και παράγεται η περιοχή μελέτης όπως φαίνεται γραμμοσκιασμένη, στο Σχήμα 4.17 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.17: Παραγωγή περιοχής μελέτης στο HEC-GeoHMS

4.3.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών ρεμάτων και υπολεκανών

Το πρόγραμμα υπολογίζει διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των ρεμάτων και υπολεκανών που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, επιλέγοντας Basin Characteristics επιλέγονται οι ακόλουθες εντολές:

- River Length: υπολογίζεται το μήκος του ποταμού
- River Slope: εκτιμάται η κλίση του υδατορεύματος
- Basin Slope: η συνάρτηση υπολογίζει τη μέση κλίση της λεκάνης
- Longest Flow Path: το εργαλείο αυτό υπολογίζει το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής
- Basin Centroid: εντοπίζεται το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης
- Centroid Elevation: χρησιμοποιώντας το ΨΜΕ υπολογίζεται το υψόμετρο κάθε κέντρου βάρους
- Centroidal Flow Path: εκτιμάται η υδάτινη διαδρομή του κέντρου βάρους, προβάλλοντας το κέντρο βάρους στη μεγαλύτερη υδάτινη διαδρομή

4.3.4 Εκτίμηση Υδρολογικών παραμέτρων

Έπειτα από την εξαγωγή των φυσικών χαρακτηριστικών των υπολεκανών και των ρεμάτων, οι χρήστες έχουν την επιλογή να εκτιμήσουν μια σειρά από υδρολογικές παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουν στον υδρολογικό σχεδιασμό.

Σε πρώτη φάση επιλέγονται οι μέθοδοι που πρόκειται να εφαρμοστούν στην υδρολογική μελέτη του HEC-HMS με την εντολή Hydrologic Parameters → Select HMS Processes. Στην παρούσα μελέτη για την εύρεση του ύψους των απωλειών βροχόπτωσης επιλέχθηκε η μέθοδος της SCS Curve Number, ως μέθοδος μετατροπής σε απορροή η μέθοδος Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της SCS, και ως μέθοδος διόδευσης η Muskingum-Cunge. Έπειτα, εισάγονται αυτόματα ονόματα για τα ρέματα και τις υπολεκάνες εκτελώντας River Auto Name και Basin Auto Name αντίστοιχα. Επιπλέον, κατά την υδρολογική μελέτη απαιτείται η εισαγωγή του χρόνου υστέρησης για κάθε υπολεκάνη, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί σε αυτό το στάδιο εκτελώντας την μέθοδο της NCRS CN Lag Method (Kent, 1972). Σύμφωνα με τη μέθοδο εκτελείται η ακόλουθη συνάρτηση:

$$L = \frac{l^{0.8} \times (S + 1)^{0.7}}{1900 \times Y^{0.5}} \quad (4.1)$$

όπου:

L = χρόνος υστέρησης (h)

l = μήκος κύριας μισγάγγειας (ft)

$S = \frac{1000}{CN} - 10$ όπου CN ο αριθμός καμπύλης CN

Y = μέση κλίση λεκάνης απορροής (%)

4.3.5 Δημιουργία αρχείων εισόδου στο HMS

Για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου από το HEC-GeoHMS στο HEC-HMS ακολουθούνται με τη σειρά οι εντολές του μενού επιλογών HMS. Ειδικότερα εκτελούνται:

- Map to HMS Units: Μετατροπή των φυσικών χαρακτηριστικών των ρεμάτων και των υπολεκανών σε σύστημα μονάδων καθορισμένο από το χρήστη. Εδώ επιλέχθηκε το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI).
- Check Data: Ελέγχονται τα δεδομένα και το πρόγραμμα εμφανίζει τυχόν μηνύματα σφαλμάτων έτσι ώστε να διορθωθούν από το χρήστη (Σχήμα 4.18).

```

SkelConstCheck.txt - Notepad
File Edit Format View Help
HMS Consistency Checking Log
-----
Project: BASIN1_SAM
File Creation Date: 9/6/2012
File Creation Time: 04:04:51

Checking uniqueness of names ...
Checking River HydroID uniqueness:
End of checking River HydroID uniqueness - all IDs are unique.
Checking River Name uniqueness:
End of checking River Name uniqueness - all Names are unique.
Checking Drainage Area HydroID uniqueness:
End of checking Drainage Area HydroID uniqueness - all IDs are unique.
Checking Drainage Area Name uniqueness:
End of checking Drainage Area Name uniqueness - all Names are unique.
Checking VIP Name uniqueness:
End of checking VIP Name uniqueness - all Names are unique.
End of checking uniqueness of names.

Checking river containment...
End of checking river containment.

Checking centroid...
End of Checking centroid.

Checking river's connectivity...
End of checking river's connectivity.

Checking project points [VIP points]...
Checking VIP Point: Outlet1 x=250235.3736, y=4403340.311
End of checking point: name=Outlet1 oid=1 - No PROBLEM found.
End of checking project points [VIP points].

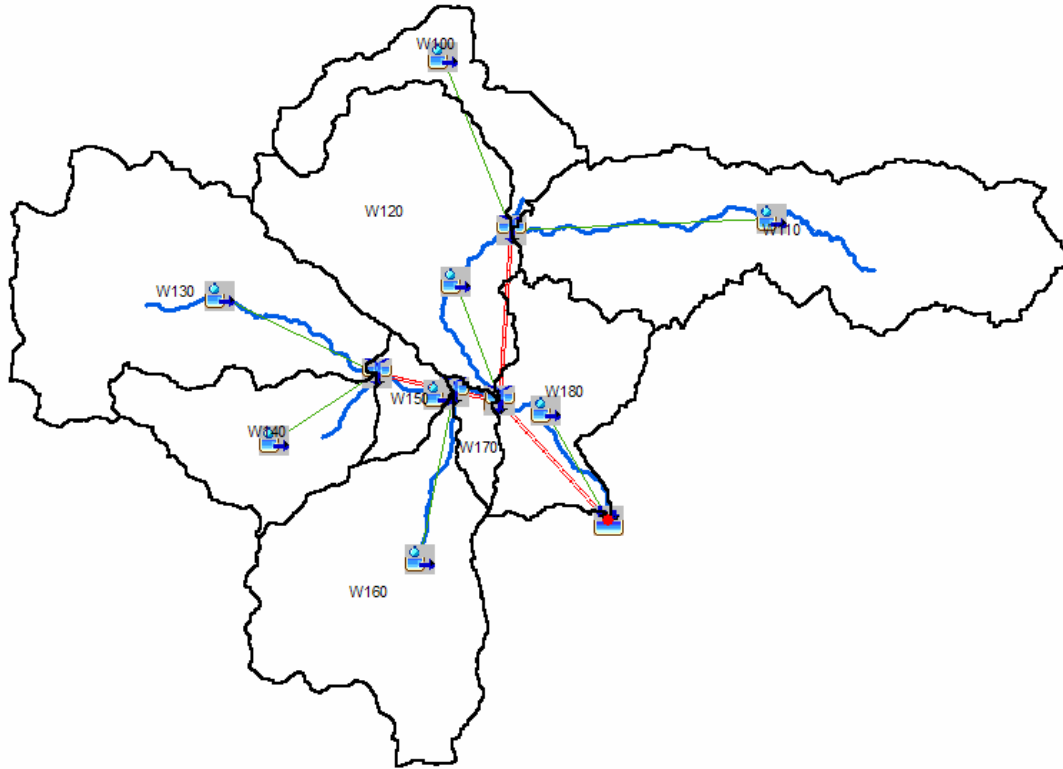
Checking Finished: 04:04:51

CHECKING SUMMARY
*****
Unique names      - no problems.
River containment - no problems.
Center containment - no problems.
River connectivity - no problems.
VIP relevance     - no problems.

```

Σχήμα 4.18: Αρχείο με τυχόν σφάλματα κατά τη δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS

- HMS Schematic: Αποτελεί μια παρουσίαση GIS του μοντέλου HEC-HMS, όπου δημιουργείται ένα επίπεδο πληροφορίας συνδέσμων που αντιπροσωπεύει τη συνδεσιμότητα των ρεμάτων, και ένα επίπεδο πληροφορίας κόμβων που παρουσιάζει τη θέση των υπολεκανών και των κόμβων.
- HMS Legend: Εδώ χρησιμοποιούνται εικονίδια για την αναπαράσταση των διαύλων και κόμβων (Σχήμα 4.19).

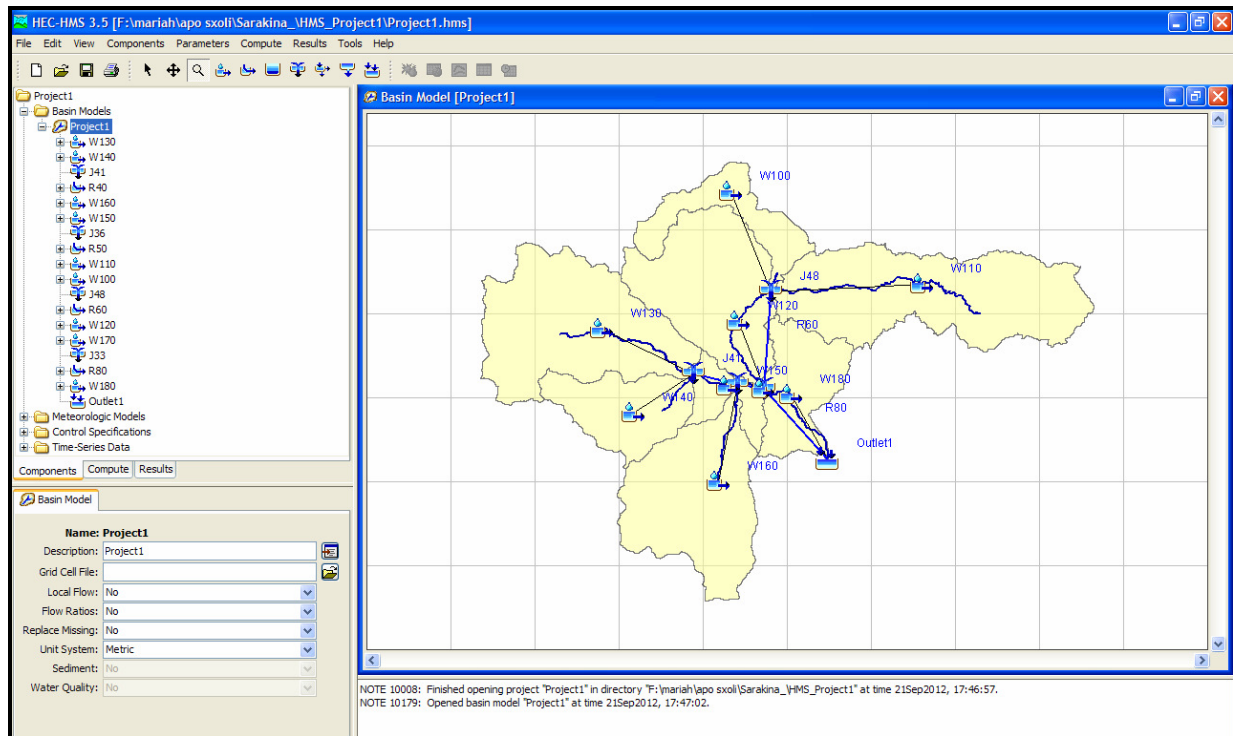


Σχήμα 4.19: Παράδειγμα αναπαράστασης διαύλων και κόμβων στο HEC

- Add Coordinates: Προστίθενται γεωγραφικές συντεταγμένες στους διαύλους και κόμβους.
- Prepare Data for Model Export: Αυτό το εργαλείο συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα και τα προετοιμάζει για εξαγωγή στο HEC-HMS.
- Background Shape File: Το αρχείο αυτό που δημιουργείται, περιλαμβάνει τη γεωγραφική πληροφορία των ορίων των υπολεκανών και των ρεμάτων.
- Basin Model File: Το αρχείο αυτό που συντάσσεται, περιλαμβάνει τα υδρολογικά στοιχεία, τη συνδεσιμότητά τους και τη συναφή γεωγραφική πληροφορία σε ένα αρχείο ASCII.
- Create HEC-HMS Project: Παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας εργασίας στο HEC-HMS από το παρόν πρόγραμμα και τελικά παράγεται ένα αρχείο εισόδου στο HMS, μορφής .hms.

4.4 Εισαγωγή δεδομένων στο HEC - HMS

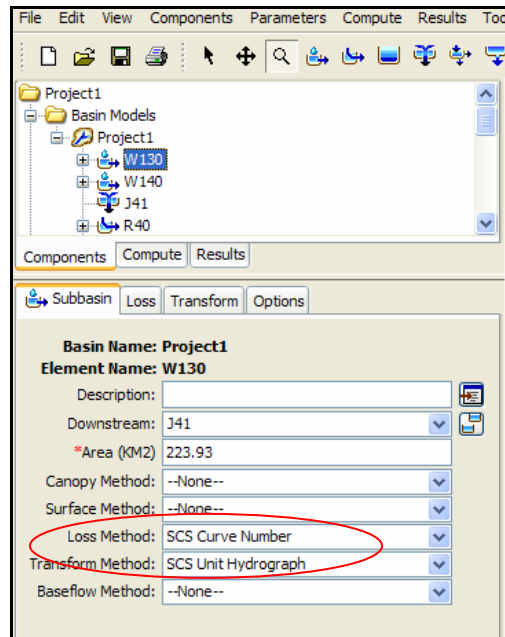
Η διαδικασία που περιγράφεται για την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS πραγματοποιείται χειροκίνητα για τα τέσσερα σενάρια μελέτης, για κάθε επεισόδιο ξεχωριστά. Αρχικά, λοιπόν, εισάγεται το μοντέλο της λεκάνης απορροής όπως είχε δημιουργηθεί στο HEC-GeoHMS, εκτελώντας File → Import Basin Model. Για την καλύτερη οπτικοποίηση της λεκάνης προστίθενται και οι χάρτες με τις υπολεκάνες καθώς και τα ρέματα από View → Background Map και τελικά στην οθόνη παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής. Ένα παράδειγμα λεκάνης όπως φαίνεται στο HEC-HMS δείχνει το Σχήμα 4.20 που ακολουθεί.



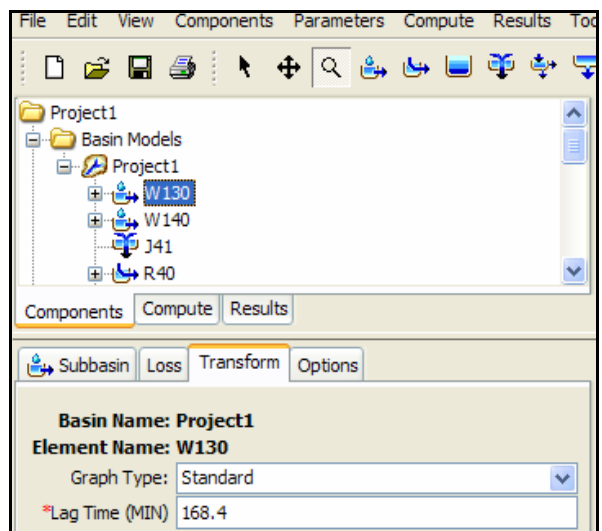
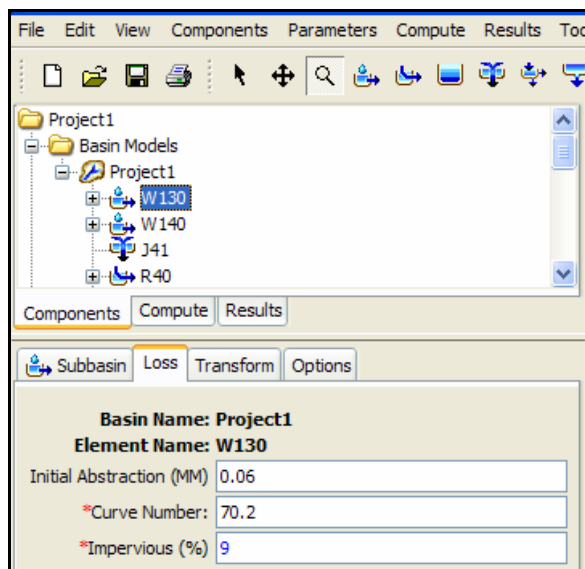
Σχήμα 4.20: Παράδειγμα λεκάνης απορροής στο HEC-HMS

4.4.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model)

Σε αυτή τη φάση ελέγχονται οι μέθοδοι που είχαν εισαχθεί προηγουμένως και εισάγονται οι παράμετροι που αφορούν κάθε υπολεκάνη. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.21 στο πεδίο της μεθόδου απωλειών έχει εγγραφεί η μέθοδος SCS Curve Number και στη μέθοδο μετατροπής σε απορροή το MYG της SCS. Τα θεωρητικά βήματα των μεθόδων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Στο πεδίο Loss απαιτείται η εισαγωγή του αρχικού ελλείμματος. Πρακτικά αυτός ο αριθμός καθορίζει το ποσό της κατακρήμνισης που πρέπει να σημειωθεί πριν προκληθεί ροή από την επιφάνεια και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο υπολογισμένο βάθος ροής αλλά και στην παροχή αιχμής του υδρογραφήματος. Στην περίπτωση που το πεδίο αφεθεί κενό, αυτό αυτόματα θα υπολογιστεί από το πρόγραμμα ως το 20% της δυναμικής κατακράτησης που υπολογίζεται από τον αριθμό CN. Οι Hawkins et al. (2002) χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα πλήθος γεγονότων βροχής- απορροής στις ΗΠΑ πρότειναν την αλλαγή του συντελεστή από 0.2 σε 0.05 για χρήση σε υπολογισμούς απορροής. Σε παρόμοιες τιμές έχουν καταλήξει και άλλοι ερευνητές (Mishra and Singh, 2004, Baltas et al., 2007). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται ως αρχικό έλλειμμα το 0.05. Ακόμη, σημειώνονται ο αριθμός CN καθώς και το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών όπως υπολογίστηκαν παραπάνω. Τέλος, στην καρτέλα Transform εισάγεται αυτόματα ο χρόνος υστέρησης που υπολογίστηκε από το HEC-GeoHMS (Σχήμα 4.22).

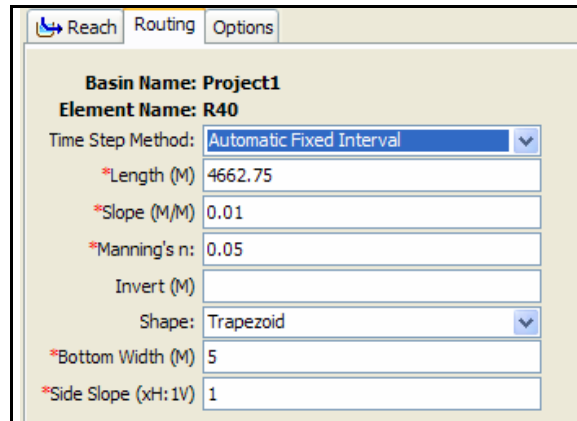
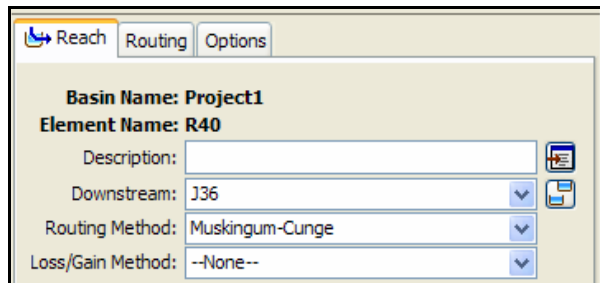


Σχήμα 4.21: Καθορισμός μεθόδων απωλειών και μετατροπής απορροών για μία υπολεκάνη



Σχήμα 4.22: Καθορισμός παραμέτρων μεθόδου απωλειών και μεθόδου μετατροπής απορροών για μία υπολεκάνη

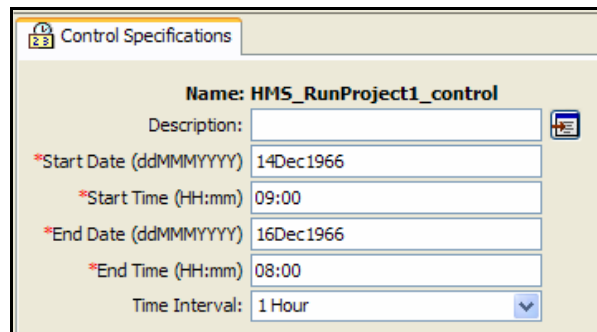
Για κάθε τμήμα του δικτύου (R) ελέγχεται εάν έχει εισαχθεί η σωστή μέθοδος διόδευσης. Στην καρτέλα Routing αυτόματα από τα δεδομένα εισόδου έχουν συμπληρωθεί το μήκος του ρέματος και η κλίση. Εισάγεται ο αριθμός Manning (n) όπως υπολογίστηκε, επιλέγεται η τραπεζοειδής διατομή με πλάτος πυθμένα στα 5 m και κλίση πλαγιάς ίση με 1:1, τιμές που προέκυψαν βιβλιογραφικά. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 4.23 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.23: Καθορισμός παραμέτρων μεθόδου διάδευσης

4.4.2 Μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorologic Model) και Συνθήκες ελέγχου (Control Specifications)

Εκτελώντας Components → Meteorologic Model Manager εισάγεται το μετεωρολογικό μοντέλο για τη λεκάνη απορροής που εξετάζεται. Σε αυτό ορίζεται και η κατακρήμνιση από τα νετογράμματα που διατίθενται. Ομοίως από την επιλογή Components → Control Specifications ορίζονται οι συνθήκες ελέγχου. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24 ορίζεται η ημερομηνία και ώρα έναρξης της προσομοίωσης καθώς και τα αντίστοιχα στοιχεία για το τέλος της προσομοίωσης. Ακόμη, σημειώνεται το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, το οποίο σε πρώτη φάση επιλέγεται να είναι ίσο με το χρονικό βήμα των παρατηρημένων βροχοπτώσεων, ήτοι μία ώρα.



Σχήμα 4.24: Παράδειγμα καθορισμού χρόνου προσομοίωσης απορροής για ένα πλημμυρικό επεισόδιο

Για να ολοκληρωθεί η ρύθμιση του μοντέλου θα πρέπει να εισαχθούν οι διαθέσιμες χρονοσειρές δεδομένων. Αυτές περιλαμβάνουν τις παρατηρημένες βροχοπτώσεις από τους σταθμούς Τρικάλων και Παλαιοχωρίου και τις παροχές από το σταθμό της Σαρακίνας (έξοδος λεκάνης). Από το μενού Components επιλέγεται η εντολή Time Series Data και εισάγονται τα δεδομένα βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη όπως υπολογίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο. Συγκεκριμένα, επιλέγονται τα χιλιοστά ως μονάδες μέτρησης βροχής και ως χρονικό διάστημα η μία ώρα και εισάγονται τα δεδομένα για το παράθυρο χρόνου (Σχήμα 4.25). Στο Σχήμα 4.26 σημειώνονται οι τιμές βροχόπτωσης για κάθε ώρα και έτσι το υδρογράφημα παρουσιάζεται στην καρτέλα Graph.

Name: G1_nov68

Description:

Data Source:

Units:

Time Interval:

Latitude Degrees:

Latitude Minutes:

Latitude Seconds:

Longitude Degrees:

Longitude Minutes:

Longitude Seconds:

Name: Precip Gage 8

*Start Date (ddMMYYYY)

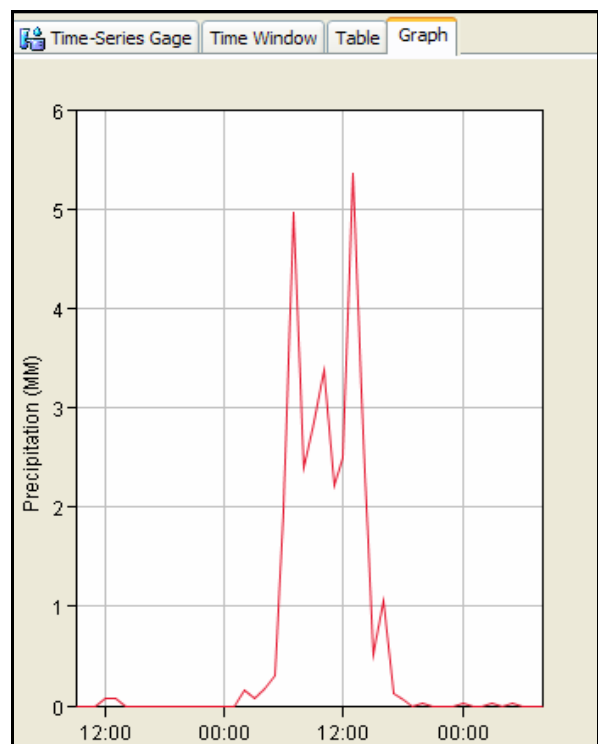
*Start Time (HH:mm)

*End Date (ddMMYYYY)

*End Time (HH:mm)

Σχήμα 4.25: Παράδειγμα καθορισμού χρόνου προσομοίωσης για ένα πλημμυρικό επεισόδιο

| Time (ddMMYYYY, HH:mm) | Precipitation (MM) |
|------------------------|--------------------|
| 14Dec1966, 18:00 | 0.00 |
| 14Dec1966, 19:00 | 0.00 |
| 14Dec1966, 20:00 | 0.00 |
| 14Dec1966, 21:00 | 0.00 |
| 14Dec1966, 22:00 | 0.00 |
| 14Dec1966, 23:00 | 0.00 |
| 15Dec1966, 00:00 | 0.00 |
| 15Dec1966, 01:00 | 0.00 |
| 15Dec1966, 02:00 | 0.15 |
| 15Dec1966, 03:00 | 0.07 |
| 15Dec1966, 04:00 | 0.17 |
| 15Dec1966, 05:00 | 0.30 |
| 15Dec1966, 06:00 | 1.95 |
| 15Dec1966, 07:00 | 4.97 |
| 15Dec1966, 08:00 | 2.40 |
| 15Dec1966, 09:00 | 2.85 |
| 15Dec1966, 10:00 | 3.37 |
| 15Dec1966, 11:00 | 2.22 |
| 15Dec1966, 12:00 | 2.50 |
| 15Dec1966, 13:00 | 5.35 |
| 15Dec1966, 14:00 | 2.75 |



Σχήμα 4.26: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων βροχόπτωσης και αντίστοιχου υδρογραφήματος

Κάθε τρέξιμο προσομοίωσης αποτελείται από ένα μετεωρολογικό μοντέλο, ένα μοντέλο λεκάνης και τις συνθήκες ελέγχου όπως ορίστηκαν παραπάνω. Επιλέγοντας την εντολή Compute → Create Simulation Run, δημιουργείται το τρέξιμο της προσομοίωσης, και εκτελώντας Compute πραγματοποιείται τελικά η προσομοίωση.

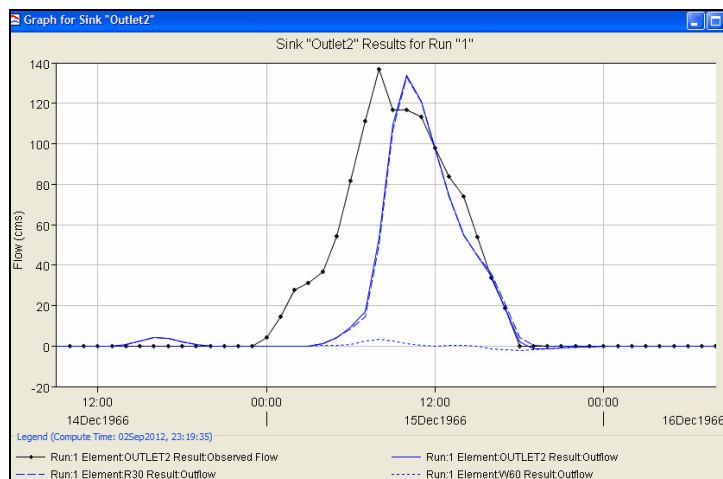
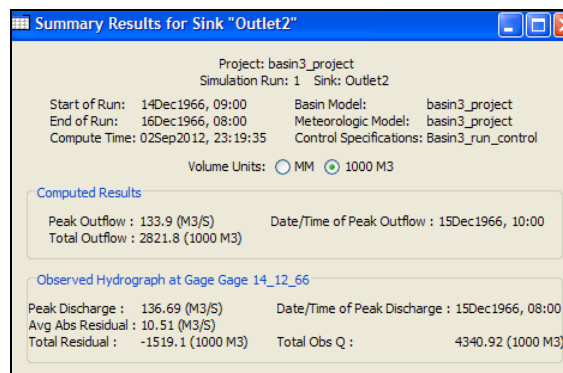
4.5 Διερεύνηση της επίδρασης του πλήθους των υπολεκανών

Έχοντας πραγματοποιήσει την εισαγωγή όλων των απαιτούμενων δεδομένων στο HEC-HMS, ακολουθεί η προσομοίωση της λεκάνης απορροής για τα τέσσερα επεισόδια που διατίθενται. Σε κάθε περίπτωση, μελετώνται τα τέσσερα σενάρια αριθμού υπολεκανών.

4.5.1 Εισαγωγή

Μετά την εισαγωγή όλων των απαιτούμενων δεδομένων στο HEC-HMS, ακολουθεί η προσομοίωση της υπό μελέτη λεκάνης απορροής για τα τέσσερα επεισόδια που διατίθενται. Για κάθε ένα από τα επεισόδια εξετάζονται τα τέσσερα σενάρια μελέτης λεκάνης. Στο πρώτο σενάριο υπολογίζεται η απορροή θεωρώντας μία ενιαία λεκάνη απορροής, στο δεύτερο εξετάζεται η περίπτωση τριών υπολεκανών, στο τρίτο προσδιορίζονται πέντε λεκάνες ενώ στο τέταρτο σενάριο μελετώνται περισσότερες υπολεκάνες, εννιά.

Με την εντολή Results από το μενού επιλογών του HMS, επιλέγεται η εξαγωγή Πίνακα συνολικής περίληψης (Global summary table) και Διαγράμματος (Element graph). Ένα παράδειγμα αυτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.27. Όπως φαίνεται στο σχήμα, παρουσιάζονται οι παρατηρημένες και εκτιμημένες τιμές της παροχής αιχμής και του συνολικού όγκου πλημμύρας. Ακόμη, το διάγραμμα παρέχει οπτική σύγκριση του καταγεγραμμένου με το υπολογισμένο υδρογράφημα.



Σχήμα 4.27 Πίνακας με περίληψη αποτελεσμάτων και υδρογράφημα πλημμύρας από το HEC-HMS.

Πραγματοποιώντας τις προσομοιώσεις στο μοντέλο, αξιολογούνται τα αποτελέσματα αυτών, λαμβάνοντας υπόψη τη συνάρτηση στόχου του συστήματος. Η διαδικασία που πραγματοποιείται στη συνέχεια, στοχεύει στην εύρεση των τιμών κάποιων παραμέτρων που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση στόχου. Εν προκειμένω, ως παράμετροι εξετάζονται ο αριθμός καμπύλης CN, ο χρόνος υστέρησης, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, το ποσοστό της αδιαπεράστης επιφάνειας καθώς και ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών που ελαχιστοποιούν τα σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής

πλημμύρας και του πλημμυρικού όγκου, αποτελούν και τις τελικές. Σημειώνεται ότι η βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται γίνεται χειροκίνητα από το χρήστη για κάθε σενάριο και κάθε επεισόδιο ξεχωριστά.

4.5.2 Εξέταση επεισοδίου 13^{ης} Απριλίου 1965

Αρχικά μελετάται η παρατηρημένη πλημμύρα στη Σαρακίνα στις 13 Απριλίου 1965. Στο καταγεγραμμένο υδρογράφημα έχει εκτιμηθεί παροχή αιχμής πλημμύρας στα 150.43 m³/s και πλημμυρικός όγκος ίσος με 5.2×10⁶ m³. Πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των τιμών των αριθμού CN, χρόνου υστέρησης, χρονικού βήματος προσομοίωσης, αδιαπέρατης επιφάνειας και συντελεστή τραχύτητας κατά Manning.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Σε πρώτη φάση χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία και υπολογίζονται οι απορροές. Έτσι, ο πλημμυρικός όγκος εκτιμάται περί τα 0.2×10⁶ m³, δηλαδή πολύ μικρότερος από τον πραγματικό, ο οποίος είχε καταγραφεί ίσος με 5.2×10⁶ m³. Η παροχή αιχμής υποεκτιμάται κατά 68%. Ακολουθεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έτσι ώστε να αυξηθούν οι πλημμυρικές απορροές.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης

Η εκτίμηση του αριθμού CN πιθανότατα να ενέχει σφάλματα, καθώς βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα. Ακόμη, τα διατιθέμενα δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροών αφορούν τη δεκαετία του '60, ενώ τα δεδομένα χρήσεων γης προκύπτουν από πρόσφατη βάση του Corine. Θεωρώντας, λοιπόν, εδάφη με μικρότερους ρυθμούς διήθησης από εκείνους που αρχικά είχαν υπολογιστεί αλλά και περισσότερες μη καλλιεργούμενες εκτάσεις, ο αριθμός CN αυξάνεται. Η αύξηση αυτή θα πρέπει να ακολουθηθεί από επόμενη μείωση του χρόνου υστέρησης.

Παρ' όλα αυτά, η αύξηση του αριθμού CN και η μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 20% δε μεταβάλλει τις απορροές αφού ο πλημμυρικός όγκος παραμένει στα ίδια επίπεδα, ενώ η παροχή αιχμής φτάνει μόλις τα 52.8 m³/s.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Η μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης θα μπορούσε να επιτρέψει στο μοντέλο την καταγραφή κάποιων αιχμών που δεν 'προλαβαίνει' να καταγράψει στο αρχικά επιλεγμένο βήμα της μίας ώρας. Επιχειρείται, λοιπόν, μείωση του βήματος προσομοίωσης στο μισάωρο. Η μείωση αυτή, προκαλεί αύξηση τόσο της παροχής αιχμής όσο και του πλημμυρικού όγκου. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής παρατηρείται τώρα στα 225.8 m³/s, ενώ ο όγκος στα 11.5×10⁶ m³. Παρ' όλα αυτά, γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση των απορροών είναι υπερβολική και απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση.

- Επαναφορά των αρχικών τιμών CN και χρόνου υστέρησης

Με σκοπό τη μείωση της απορροής όπως προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο, επαναφέρονται οι αρχικές τιμές των CN και χρόνου υστέρησης, ενώ παράλληλα διατηρείται το χρονικό βήμα προσομοίωσης στο μισάωρο (1/2 h). Η προκύπτουσα αιχμή είναι 157.3 m³/s, τιμή που πλησιάζει την πραγματική, ενώ ο πλημμυρικός όγκος μειώθηκε σε σχέση με πριν, στα 9.2×10⁶ m³.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Το προηγούμενο βήμα προσέγγισε τα πραγματικά δεδομένα, ωστόσο επιχειρείται μείωση των απορροών, με μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Η αλλαγή αυτή προκάλεσε πλημμυρική αιχμή στα 150 m³/s σχεδόν ίδια με την καταγεγραμμένη. Ο πλημμυρικός όγκος, παρόλο που μειώθηκε εκ νέου, υπερεκτιμάται και εδώ κατά 46.9%. Εξετάζεται περαιτέρω μεταβολή των παραμέτρων αυτών κατά 20%, η οποία όμως οδηγεί σε μεγάλη μείωση της παροχής αιχμής που μόλις φτάνει τα 140 m³/s.

- Μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας

Χρησιμοποιείται η μεταβολή μείωσης του αριθμού CN κατά 10% και αύξησης του χρόνου υστέρησης κατά 10% και εξετάζεται η μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 10%. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν παροχή αιχμής στα 158.3 m³/s και πλημμυρικός όγκος στα 7.2×10⁶ m³, τιμές που απέχουν από τις πραγματικές κατά 5.2% και 38.4% αντίστοιχα. Με τη μεταβολή αυτή προκύπτουν ικανοποιητικές τιμές απορροών.

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

Η προκύπτουσα πλημμυρική αιχμή με τα αρχικά δεδομένα, αγγίζει μόλις τα 41.9 m³/s σε σχέση με τα 150.43 m³/s της παρατηρημένης. Ο πλημμυρικός όγκος που εκτιμήθηκε ισούται με 5.8×10⁶ m³ υπερεκτιμώντας έτσι κατά 11.5% τον πραγματικό. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι απαιτείται βελτιστοποίηση των παραμέτρων (συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, CN και χρόνος υστέρησης) για να αυξηθεί η υπολογισμένη παροχή αιχμής.

- Μείωση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning (*n*)

Σε πρώτη φάση μειώνεται ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (*n*) από 0.08 σε 0.05 και 0.035. Η μείωση αυτή όμως δε μετέβαλε καθόλου την υπολογισμένη παροχή αιχμής, ούτε και τον πλημμυρικό όγκο. Επιχειρήθηκε επιπλέον αύξηση του αριθμού σε 0.09 και 0.095, χωρίς όμως αποτέλεσμα. Διαπιστώνεται ότι τόσο ο όγκος όσο και η παροχή αιχμής δεν επηρεάζονται άμεσα από τις μικρομεταβολές του αριθμού Manning.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Όπως προηγούμενα, έτσι και εδώ, προσομοιώνεται η λεκάνη αυξάνοντας τον αριθμό CN κατά 10% και μειώνοντας κατά το ίδιο ποσοστό το χρόνο υστέρησης. Η προκύπτουσα όμως τιμή της παροχής αιχμής ελάχιστα αυξήθηκε φθάνοντας τα 46.2 m³/s, με αποτέλεσμα να προχωρούμε σε μεγαλύτερη μεταβολή κατά 20%. Όμως, και εδώ η παροχή αιχμής αυξήθηκε μόνο κατά 0.3 m³/s. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι η μεταβολή τόσο του αριθμού καμπύλης CN, όσο και του χρόνου υστέρησης δεν είναι ικανή να αυξήσει την αιχμή.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Αρχικά, επαναφέρονται οι αρχικές τιμές CN και χρόνου υστέρησης. Στη συνέχεια μεταβάλλεται το χρονικό βήμα έτσι ώστε να αποδοθούν τιμές παροχής κάθε μισή ώρα (1/2 h). Πράγματι, προκύπτει παροχή αιχμής πολύ μεγαλύτερη, στα 149.2 m³/s με ταυτόχρονη αύξηση του πλημμυρικού όγκου στα 5.6×10⁶ m³.

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

Προσομοιώνοντας τη λεκάνη αρχικά, σημειώνεται όγκος πλημμύρας ίσος με 5.9×10⁶ m³ και πλημμυρική αιχμή ίση με 74.1 m³/s, τιμές αρκετά διαφορετικές από τις παρατηρημένες. Και εδώ οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη, χρήζουν βελτιστοποίησης.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αρχικά, μεταβάλλονται ο αριθμός CN και ο χρόνος υστέρησης κατά 20%, όπου παρατηρείται μια μικρή αύξηση της παροχής αιχμής στα $78.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο πλημμυρικός όγκος δε μεταβάλλεται αισθητά, οπότε και σε αυτή την περίπτωση προέκυψε ίσος με $5.9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ακόμα και η μεγάλη μεταβολή των παραμέτρων αυτών, δεν ήταν ικανή να αποδώσει παροχές που να πλησιάζουν τις παρατηρημένες.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Αρχικά μειώνεται το χρονικό βήμα προσομοίωσης στο μισό έτσι ώστε να ληφθούν τιμές παροχής κάθε μισή ώρα. Προκύπτει έτσι, πολύ μεγαλύτερη παροχή αιχμής, περί τα $179.8 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που διαφέρει από την παρατηρημένη κατά 19.5%. Επιπλέον, με αυτή την αλλαγή αυξήθηκε και ο πλημμυρικός όγκος, φτάνοντας τα $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, ήτοι υπερεκτιμήθηκε κατά 19.2%. Κατά συνέπεια, η μείωση του χρονικού βήματος θεωρείται ως η ιδανική βελτιστοποίηση και στο σενάριο των πέντε λεκανών απορροής.

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που εισήχθησαν προηγουμένως, υπολογίζεται παροχή αιχμής στα $88.7 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή αρκετά μικρότερη σε σχέση με την παρατηρημένη, ενώ και ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμάται κατά 17.3%. Εξετάζονται μεταβολές του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης καθώς και μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Η πρώτη μεταβολή που επιχειρείται είναι η αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης σε ποσοστό 20%. Η προκύπτουσα παροχή αιχμής είναι $91.6 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή μικρότερη της αναμενόμενης παρατηρημένης μέγιστης παροχής.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Το χρονικό βήμα προσομοίωσης μειώνεται από μία ώρα στη μισή, με αποτέλεσμα να προκύπτει όγκος πλημμύρας μεγαλύτερος κατά $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ από τον παρατηρημένο. Επίσης, εντοπίζεται πολύ μεγαλύτερη παροχή αιχμής, περί τα $265.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Η αλλαγή του χρονικού βήματος φαίνεται ότι υπερεκτιμά και την παροχή αιχμής κατά 76%, γι' αυτό και γίνεται περαιτέρω προσπάθεια μείωσης των υπερεκτιμημένων τιμών.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Εφόσον η μεταβολή του χρονικού βήματος οδήγησε σε πολύ μεγαλύτερες τιμές παροχών, απαιτείται μείωσή τους. Αυτό μπορεί να συμβεί με τη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 20%. Πράγματι, υπολογίζονται μειωμένη παροχή αιχμής στα $197.6 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που υπερεκτιμά την πραγματική κατά 31.3% και όγκος πλημμύρας στα $6.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, δηλαδή 25% μεγαλύτερος από τον καταγεγραμμένο. Από τα παραπάνω, διαφαίνεται ότι η συνδυασμένη μεταβολή του χρονικού βήματος προσομοίωσης, του αριθμού καμπύλης CN και του χρόνου υστέρησης αποδίδει την ακριβέστερη εκτίμηση της μέγιστης απορροής για το συγκεκριμένο σενάριο.

Ο Πίνακας 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζει, για κάθε σενάριο, τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα των παροχών αιχμής και πλημμυρικών όγκων, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για το επεισόδιο της 13^{ης} Απριλίου 1965

| 13-4-65 | Σενάριο 1 ^ο | | Σενάριο 2 ^ο | | Σενάριο 3 ^ο | | Σενάριο 4 ^ο | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m ³ /s) | 48.1 | 158.3 | 41.9 | 149.2 | 74.1 | 179.8 | 88.7 | 197.6 |
| Όγκος (10 ⁶ m ³) | 0.2 | 7.2 | 5.8 | 5.6 | 5.9 | 6.2 | 6.1 | 6.5 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -68 | +5.2 | -72.1 | -0.6 | -50.7 | +19.5 | -41 | +31.3 |
| Σφάλμα στο συνολικό όγκο (%) | -96.2 | +38.4 | +11.5 | +7.7 | +13.4 | +19.2 | +17.3 | +25 |

4.5.3 Εξέταση επεισοδίου 7^{ης} Δεκεμβρίου 1966

Στις 7 Δεκεμβρίου 1966 η παροχή αιχμής πλημμύρας προσδιορίστηκε ίση με 162.22 m³/s και ο πλημμυρικός όγκος ίσος με 5.6×10⁶ m³. Εξετάζοντας τις τιμές των αριθμού CN, χρόνου υστέρησης, χρονικού βήματος προσομοίωσης και αδιαπέρατης επιφάνειας, επιχειρείται η καλύτερη εκτίμηση των απορροών.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Πραγματοποιείται προσομοίωση στο HEC-HMS με τα αρχικά δεδομένα και προκύπτουν παροχή αιχμής 120.9 m³/s, αντί της παρατηρημένης 162.22 m³/s, και πλημμυρικός όγκος ίσος με 0.7×10⁶ m³ αντί του παρατηρημένου 5.6×10⁶ m³. Όπως γίνεται αντιληπτό, απαιτείται αύξηση της απορροής για την ορθότερη εκτίμησή της.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αυξάνεται ο αριθμός καμπύλης CN και μειώνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 20%. Όπως και στα προηγούμενα πλημμυρικά επεισόδια, έτσι και εδώ, η μεταβολή αυτή δεν είναι ικανή να αυξήσει την πλημμυρική αιχμή και τον όγκο τόσο, ώστε να πλησιάζουν τα πραγματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής υποεκτιμάται κατά 8% και ο όγκος κατά 85.7%.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Επιχειρείται μείωση του βήματος προσομοίωσης στη μισή ώρα, χρησιμοποιώντας σε πρώτη φάση αρχικά δεδομένα CN και χρόνου υστέρησης. Προκαλείται έτσι, αύξηση της παροχής

αιχμής η οποία υπερεκτιμάται τώρα κατά 3.7%. Παράλληλα, υπερεκτιμάται κατά 64.2% και ο πλημμυρικός όγκος.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Στο προηγούμενο βήμα επετεύχθη αύξηση των απορροών που όμως κρίνεται υπερβολική. Σε αυτό το βήμα εκτός από τη χρήση μισάωρου χρονικού βήματος προσομοίωσης, μειώνεται ο αριθμός CN και αυξάνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 10%. Η αλλαγή αυτή προκαλεί πλημμυρική αιχμή στα 167.8 m³/s, τιμή κατά 3.4% μικρότερη από την παρατηρημένη. Ο πλημμυρικός όγκος μειώνεται και φτάνει στα 8.2×10⁶ m³. Εξετάζεται περαιτέρω μεταβολή των παραμέτρων αυτών κατά 20%, η οποία όμως οδηγεί και εδώ σε μεγάλη μείωση της παροχής αιχμής που μόλις φτάνει τα 141.6 m³/s.

- Μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας

Επαναφέρονται οι αριθμοί CN και το χρονικό βήμα και εξετάζεται η μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 10%. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν παροχή αιχμής στα 151.6 m³/s και πλημμυρικός όγκος στα 8.8×10⁶ m³, τιμές που απέχουν από τις πραγματικές κατά 6.5% και 57.1% αντίστοιχα.

Επομένως η καλύτερη εκτίμηση της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου σε αυτό γίνεται με την μείωση του αριθμού CN κατά 10% με ισόποση αύξηση του χρόνου υστέρησης και με χρήση μισάωρου (1/2 h) χρονικού βήματος.

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

Εκτελώντας την προσομοίωση της λεκάνης με τα στοιχεία που καταχωρήθηκαν προηγούμενα, υπολογίζεται παροχή αιχμής ίση με 146.4 m³/s, τιμή κατά 9.7% μικρότερη σε σχέση με την παρατηρημένη. Επιπλέον, ο πλημμυρικός όγκος υποεκτιμάται εδώ κατά 42.8%. Ακολουθώντας, επιχειρείται μεταβολή παραμέτρων του μοντέλου για την καλύτερη εκτίμηση της μέγιστης απορροής.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αρχικά, προσομοιώνεται η λεκάνη αυξάνοντας τον αριθμό CN κατά 10% και μειώνοντας το χρόνο υστέρησης κατά 10%. Η προκύπτουσα τιμή της παροχής αιχμής αυξήθηκε περισσότερο από τα αναμενόμενα, στα 173.3 m³/s. Ο πλημμυρικός όγκος φαίνεται να πλησιάζει καλύτερα τον καταγεγραμμένο, αφού υποεκτιμάται πλέον κατά 32.1%. Σε δεύτερη φάση, εφαρμόζεται μικρότερη αύξηση του αρχικού αριθμού CN κατά 5% και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 5% με στόχο την καλύτερη εκτίμηση της παροχής αιχμής. Η μέγιστη παροχή εκτιμάται τελικά στα 163.3 m³/s, μόλις 0.7% μεγαλύτερη από την παρατηρημένη, ενώ ο πλημμυρικός όγκος εξακολουθεί να υποεκτιμάται κατά 33.9%.

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

Η αρχική προσομοίωση της λεκάνης αποδίδει παροχή αιχμής ίση με 132.1 m³/s, και πλημμυρικό όγκο ίσο με 3.3×10⁶ m³. Αν και τα αποτελέσματα αυτά, πλησιάζουν τα παρατηρημένα, γίνεται προσπάθεια βελτίωσής τους με μεταβολή παραμέτρων του συστήματος.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αρχικά, μεταβάλλονται ο αριθμός CN και ο χρόνος υστέρησης κατά 20%, όπου παρατηρείται μια μικρή αύξηση της παροχής αιχμής στα 173.3 m³/s, τιμή που είναι μόλις 6.8% μεγαλύτερη

από την καταγραμμένη. Παράλληλα, αυξήθηκε και ο πλημμυρικός όγκος, ο οποίος υποεκτιμάται κατά 23% σε σχέση με τον παρατηρημένο.

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα στο μοντέλο εκτιμάται όγκος πλημμύρας ίσος με $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η παροχή αιχμής υπολογίζεται κατά 11% μεγαλύτερη από την πραγματική, και συγκεκριμένα στα $180 \text{ m}^3/\text{s}$. Επιχειρείται η βελτίωση των τιμών των απορροών με μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Στοχεύοντας στη μείωση των απορροών, μειώνεται ο αριθμός CN και παράλληλα αυξάνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 20%. Η προκύπτουσα τιμή αιχμής είναι $161 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή μικρότερη μόλις κατά 0.7% σε σχέση με την παρατηρημένη. Ο πλημμυρικός όγκος δε, προέκυψε ίσος με $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$, ήτοι 26.8% μικρότερος από τον καταγραμμένο όγκο.

Ο Πίνακας 4.4 που ακολουθεί παρουσιάζει για κάθε σενάριο τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα των παροχών αιχμής και πλημμυρικών όγκων, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα για το επεισόδιο της 7^{ης} Δεκεμβρίου 1966

| 7-12-65 | Σενάριο 1 ^ο | | Σενάριο 2 ^ο | | Σενάριο 3 ^ο | | Σενάριο 4 ^ο | |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m^3/s) | 120.9 | 167.8 | 146.4 | 163.3 | 132.1 | 173.3 | 180 | 161 |
| Όγκος (10^6 m^3) | 0.7 | 8.2 | 3.2 | 3.7 | 3.3 | 4.3 | 4.5 | 4.1 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -25.5 | +3.4 | -9.7 | +0.7 | -18.6 | +6.8 | +11 | -0.7 |
| Σφάλμα στο συνολικό όγκο (%) | -87.5 | +46 | -42.8 | -33.9 | -41 | -23.2 | -19.6 | -26.8 |

4.5.4 Εξέταση επεισοδίου 14^{ης} Δεκεμβρίου 1966

Στη συνέχεια εξετάζεται η παρατηρημένη πλημμύρα στη Σαρακίνα στις 14 Δεκεμβρίου 1966. Σύμφωνα με το καταγεγραμμένο υδρογράφημα η τιμή της παροχής αιχμής φτάνει στα $136.7 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο πλημμυρικός όγκος είναι ίσος με $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το μοντέλο προσομοιώνεται στο HEC-HMS, απ' όπου και εξάγονται τα αποτελέσματα και συγκρίνονται οι παρατηρημένες τιμές της απορροής με τις υπολογισμένες. Ακολουθεί η εύρεση των τιμών αριθμού CN, χρόνου υστέρησης, χρονικού βήματος προσομοίωσης και αδιαπέρατης επιφάνειας που οδηγούν στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων εκτίμησης απορροής.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση μελέτης μίας ενιαίας λεκάνης απορροής. Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου όσα προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία, εκτελείται το μοντέλο. Ο πλημμυρικός όγκος που προκύπτει είναι $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ η παροχή αιχμής φτάνει τα $82.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Τα δύο μεγέθη είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές, γι' αυτό και απαιτείται βελτιστοποίηση κάποιων παραμέτρων. Στο σενάριο αυτό, ελέγχεται ο αριθμός καμπύλης CN, ο χρόνος υστέρησης, το χρονικό βήμα προσομοίωσης καθώς και το ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Εξαιτίας του μεγάλου σφάλματος εκτίμησης της απορροής, επιλέγεται αρχικά μια σχετικά μεγάλη αύξηση του αριθμού CN κατά 20%, η οποία ακολουθείται από μείωση του χρόνου υστέρησης κατά το ίδιο ποσοστό. Όπως αναμενόταν, η μεταβολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τόσο του πλημμυρικού όγκου στα $244.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, όσο και της παροχής αιχμής στα $107.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Παρόλα αυτά, η αύξηση αυτή δεν κρίνεται ικανοποιητική καθώς τα σφάλματα παραμένουν ιδιαίτερα υψηλά.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Επαναφέρονται οι αρχικές τιμές του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης και επιλέγεται έτσι μικρότερο χρονικό βήμα στα 30 λεπτά. Πράγματι, παρατηρείται αύξηση των απορροών, που όμως υπερεκτιμούνται κατά πολύ. Πιο συγκεκριμένα, ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμάται κατά 95% και η παροχή αιχμής κατά 88.7%.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Με τη μεταβολή του χρονικού βήματος υπερεκτιμήθηκε κατά πολύ η απορροή, γι' αυτό και επιχειρείται μείωσή της, μεταβάλλοντας τις αρχικές τιμές του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης. Η μείωση του CN κατά 20% και η παράλληλη αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 20%, οδήγησε σε μειωμένες τιμές απορροής. Η παροχή αιχμής που υπολογίστηκε διαφέρει μόλις 5.2% από την καταγεγραμμένη. Ο πλημμυρικός όμως όγκος εξακολουθεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλος, αφού φτάνει στα $8.1 \times 10^6 \text{ m}^3$.

- Μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας

Η λεκάνη απορροής αποτελείται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από αδιαπέρατες επιφάνειες, είτε εξαιτίας του εδαφικού υλικού είτε λόγω των χρήσεων που έχουν αναπτυχθεί στην περιοχή. Η θεώρηση ενός μέσου όρου για το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών ενέχει προφανώς σφάλματα, καθώς υπονοεί μια αδρομερή μελέτη της περιοχής. Πιθανώς, λοιπόν, να απαιτείται μείωση του ποσοστού αυτού έτσι ώστε να μειωθεί και η παραγόμενη απορροή.

Εξετάζεται, λοιπόν, η ταυτόχρονη μείωση του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας και αριθμού CN κατά 10%, και η αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά το ίδιο ποσοστό. Η αλλαγή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό μιας παροχής αιχμής που πλησιάζει την καταγεγραμμένη κατά 1.7%. Ακόμη, ο πλημμυρικός όγκος προσεγγίζει τα $6.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, σαφώς μικρότερος σε σχέση με τους προηγούμενους εκτιμημένους. Περαιτέρω προσπάθεια μείωσης είτε του αριθμού CN, είτε του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας οδηγεί σε ακόμη μικρότερες τιμές παροχής αιχμής.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η καλύτερη εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών γίνεται με τη μείωση του αριθμού CN κατά 10%, την ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου

υστέρησης κατά το ίδιο ποσοστό καθώς και τη μείωση του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας στο 10%.

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

Εκτελώντας την προσομοίωση με τα δεδομένα που εισήχθησαν στο προηγούμενο στάδιο, προκύπτει παροχή αιχμής $69.8 \text{ m}^3/\text{s}$ η οποία χαρακτηρίζεται μικρή σε σχέση με την παρατηρημένη $136.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ακόμη, ο πλημμυρικός όγκος προκύπτει κατά 51.2% μικρότερος από τον παρατηρημένο όγκο ίσο με $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Για την ορθότερη εκτίμηση της παροχής αιχμής, αλλά και του όγκου της πλημμύρας επιχειρείται η βελτιστοποίηση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, του αριθμού καμπύλης CN και του χρόνου υστέρησης (lag time).

- Μείωση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning

Μια ενδεχόμενη μείωση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning πιθανώς να οδηγήσει σε αύξηση της πλημμυρικής αιχμής. Έτσι, εξετάζεται μεταβολή του αριθμού από 0.08 που είχε εκτιμηθεί σε 0.05 και 0.035. Η μεταβολή αυτή, οδήγησε πράγματι σε αύξηση της παροχής αιχμής σε 71 και $72 \text{ m}^3/\text{s}$, αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή κρίνεται ιδιαίτερα μικρή, σε συνδυασμό με την αισθητή μεταβολή του πλημμυρικού όγκου, με αποτέλεσμα να συμπεραίνεται ότι η αρχική υποεκτίμηση της παροχής αιχμής, πιθανότατα να μην οφείλεται σε λανθασμένη επιλογή του συντελεστή Manning.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Σε πρώτη φάση, μεταβάλλονται ο αριθμός CN και ο χρόνος υστέρησης κατά 10%, με αποτέλεσμα να προκύπτει αυξημένη παροχή αιχμής κατά 18%. Έπειτα, εφαρμόζεται αύξηση του CN κατά 20% και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 20%, όπου προκύπτει παροχή αιχμής στα $106.4 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή 20% μικρότερη της παρατηρημένης αιχμής. Περαιτέρω μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 30% του αρχικού, οδηγεί σε παροχή αιχμής ίση με $133.9 \text{ m}^3/\text{s}$ τιμή που πλησιάζει κατά πολύ την παρατηρημένη. Ο πλημμυρικός όγκος αυξήθηκε σε αυτή την περίπτωση στα $2.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, δηλαδή περίπου 34% μικρότερος από τον παρατηρημένο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μια συνδυασμένη αύξηση του αριθμού καμπύλης CN κατά 20% και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 30%, οδηγεί στον καλύτερο υπολογισμό της παροχής αιχμής για το συγκεκριμένο σενάριο, με μια υποεκτίμηση της τάξης του 2%. Παρ' όλα αυτά, η μεταβολή των παραμέτρων αυτών ίσως να είναι αρκετά μεγάλη και να μην ανταποκρίνεται στα πραγματικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη λεκάνης.

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

Η παροχή αιχμής που προκύπτει εκτελώντας την προσομοίωση με τα δεδομένα που εισήχθησαν, είναι $127.7 \text{ m}^3/\text{s}$, μόλις 6.6% μικρότερη σε σχέση με την παρατηρημένη $136.7 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο πλημμυρικός όγκος ίσος με $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Εδώ, υποτίθεται ότι μια μικρή μεταβολή του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης (lag time) θα αποδώσει την αναμενόμενη τιμή αιχμής.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αρχικά, μεταβάλλονται ο αριθμός CN και ο χρόνος υστέρησης κατά 10%, και προκύπτει σχεδόν σύμπτωση της παροχής αιχμής που υπολογίζει το μοντέλο και της παρατηρημένης. Πιο συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής υπολογίστηκε στα $137.2 \text{ m}^3/\text{s}$, και ο πλημμυρικός όγκος αυξήθηκε στα $2.9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η επιλογή της μεταβολής κατά 10% κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική, όμως, μια μικρή υπερεκτίμηση της παροχής αιχμής ίσως να ήταν προτιμότερη

σε μελέτες κινδύνου πλημμύρας. Έτσι, στη συνέχεια εκτελείται προσομοίωση με μεταβολή των παραμέτρων CN και χρόνου υστέρησης κατά 20%. Η προκύπτουσα παροχή αιχμής ανέρχεται πλέον στα 143.8 m³/s.

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Το 4^ο σενάριο περιλαμβάνει την προσομοίωση με το μεγαλύτερο αριθμό υπολεκανών. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που εισήχθησαν προηγουμένως, προκύπτει μεγάλη παροχή αιχμής, στα 179.4 m³/s, σε σχέση πάντα με την παρατηρημένη (136.7 m³/s). Ο πλημμυρικός όγκος εκτιμάται στην εν λόγω προσομοίωση να προσεγγίζει τα 3.4×10⁶ m³, δηλαδή μόλις 20.9% μικρότερος από τον πραγματικό. Αν και ο πλημμυρικός όγκος που προέκυψε είναι ικανοποιητικός, απαιτείται μείωση της αιχμής παροχής, εξετάζοντας τη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, του CN και του χρόνου υστέρησης.

- Μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning

Μια ενδεχόμενη αύξηση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning (n), πιθανότατα να οδηγήσει σε μείωση της παροχής αιχμής Έτσι, εξετάζεται μεταβολή του αριθμού n από 0.08 που είχε εκτιμηθεί, σε 0.09 και 0.095. Η μεταβολή αυτή, όμως οδηγεί σε αύξηση της παροχής αιχμής σε 186 m³/s και στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, εξετάστηκε μείωση του αριθμού n σε 0.05 και 0.035, γεγονός όμως που δεν προκάλεσε καμία μεταβολή στην τιμή της παροχής αιχμής. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η μεταβολή του συντελεστή Manning δε φαίνεται να επηρεάζει εν προκειμένω την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Η πρώτη μεταβολή που επιχειρείται είναι η μείωση του αριθμού CN και η αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Η προκύπτουσα τιμή της παροχής αιχμής είναι 169.6 m³/s, μικρότερη από την αρχικά υπολογισμένη, αλλά μεγαλύτερη από την παρατηρημένη. Έτσι, οδηγούμαστε σε μεγαλύτερο ποσοστό μεταβολής, της τάξης του 20% επί των αρχικών τιμών. Με τη μεταβολή αυτή, η αιχμή που προκύπτει φτάνει στα 158.1 m³/s, τιμή μεγαλύτερη κατά 15.6% από τη διατιθέμενη παροχή αιχμής. Διαπιστώνεται έτσι ότι η θεώρηση περισσότερων λεκανών απορροής έχει οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της παροχής αιχμής η οποία δύσκολα αναιρείται με βελτιστοποίηση των παραμέτρων. Από την άλλη, ο πλημμυρικός όγκος σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε 3.1×10⁶ m³, ήτοι 27.9% υποεκτιμημένος από τον παρατηρημένο.

Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει για κάθε σενάριο τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα για το επεισόδιο της 14^{ης} Δεκεμβρίου 1966

| 14-12-66 | Σενάριο 1 ^ο | | Σενάριο 2 ^ο | | Σενάριο 3 ^ο | | Σενάριο 4 ^ο | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m ³ /s) | 82.4 | 134.3 | 69.8 | 133.9 | 127.7 | 137.2 | 179.4 | 158.1 |
| Όγκος (10 ⁶ m ³) | 0.2 | 6.5 | 2.1 | 2.8 | 2.5 | 2.9 | 3.4 | 3.1 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -39.7 | -1.7 | -48.9 | -2 | -6.6 | +0.3 | +31.2 | +15.6 |
| Σφάλμα στο συνολικό όγκο (%) | -95.3 | +51.2 | -51.2 | -34.9 | -41.8 | -32.5 | -20.9 | -27.9 |

Μετά τη βελτιστοποίηση η εκτίμηση των απορροών είναι σαφώς καλύτερη σε όλες τις περιπτώσεις. Η παροχή αιχμής της πλημμύρας έχει προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια και στα τέσσερα σενάρια. Ο πλημμυρικός όγκος εκτιμήθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με την αρχική προσομοίωση, ωστόσο δεν ήταν εφικτή η εξάλειψη του σφάλματος σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές.

4.5.5 Εξέταση επεισοδίου 13^{ης} Νοεμβρίου 1968

Το τελευταίο πλημμυρικό επεισόδιο που εξετάζεται είναι εκείνο στις 13 Νοεμβρίου 1968, όπου η παροχή αιχμής προσδιορίστηκε ίση με 168.67 m³/s και ο πλημμυρικός όγκος ίσος με 7.9×10⁶ m³. Με στόχο την καλύτερη εκτίμηση των απορροών, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των τιμών αριθμού CN, χρόνου υστέρησης, χρονικού βήματος προσομοίωσης και αδιαπέρατης επιφάνειας, επιχειρείται η καλύτερη εκτίμηση των απορροών.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης δίδουν παροχή αιχμής ίση με 54.1 m³/s, τιμή κατά 67.8 m³/s μικρότερη από την παρατηρημένη και πλημμυρικό όγκο ίσο με 0.4×10⁶ m³, υποεκτιμημένο κατά 94.9%. Απαιτείται, λοιπόν, σημαντική αλλαγή των παραμέτρων με σκοπό την αύξηση της απορροής.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Αρχικά μειώνεται το βήμα προσομοίωσης σε μισή ώρα και προκύπτουν αυξημένες απορροές. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής προσδιορίζεται στα 135.5 m³/s και ο πλημμυρικός όγκος στα

$8.3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η διαφορά των τιμών αυτών σε σχέση με τις παρατηρημένες είναι πολύ μικρή. Παρ' όλα αυτά, επιχειρείται μια μικρή αύξησή τους όπως φαίνεται στη συνέχεια.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Σε συνδυασμό με την προηγούμενη μείωση του χρονικού βήματος, αυξάνεται ο αριθμός CN και μειώνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 10%. Η μεταβολή αυτή προκάλεσε αύξηση της παροχής αιχμής, η οποία υποεκτιμάται τώρα κατά 16.3% και αύξηση του όγκου ο οποίος υπολογίζεται κατά 7.5% μεγαλύτερος σε σχέση με τον καταγεγραμμένο.

- Μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας

Ταυτόχρονα με τις προηγούμενες μεταβολές, πραγματοποιείται μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 10%, με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της απορροής. Πράγματι, η παροχή αιχμής αυξήθηκε και φτάνει τώρα τα $154.7 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο όγκος ανέρχεται στα $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Επιχειρείται αύξηση των απορροών, αυξάνοντας λίγο περισσότερο τον αριθμό CN και μειώνοντας το χρόνο υστέρησης κατά 20%. Παρατηρείται όμως πολύ μεγάλη αύξηση των απορροών, καθώς η παροχή αιχμής πλέον πλησιάζει τα $180 \text{ m}^3/\text{s}$, και ο όγκος τα $11.2 \times 10^6 \text{ m}^3$. Συνεπώς, η μεταβολή αυτή δε συμβάλλει στον καλύτερο υπολογισμό των απορροών.

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από τη μελέτη που προηγήθηκε, η πρώτη προσομοίωση της λεκάνης με τρεις υπολεκάνες, εκτιμά την παροχή αιχμής της πλημμύρας στα $102.4 \text{ m}^3/\text{s}$ και τον όγκο στα $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η υπολογισμένη τιμή παροχής αιχμής και ο όγκος είναι αρκετά μικρότεροι συγκριτικά με τις παρατηρημένες τιμές $168.67 \text{ m}^3/\text{s}$ και $7.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ αντίστοιχα. Επιχειρείται βελτιστοποίηση του συστήματος με μεταβολές των αριθμού CN, του χρόνου υστέρησης, αλλά και του χρονικού βήματος προσομοίωσης.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Προσομοιώνεται η λεκάνη, αυξάνοντας τον αριθμό CN κατά 20% και μειώνοντας το χρόνο υστέρησης κατά 20%. Η προκύπτουσα τιμή της αιχμής αυξήθηκε και ισούται με $135.2 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή μικρότερη κατά 19.8% από την παρατηρημένη απορροή. Παράλληλα, αυξήθηκε και ο πλημμυρικός όγκος, ο οποίος υποεκτιμάται πλέον κατά 20.4%.

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

Από τον αρχικό υπολογισμό της απορροής προκύπτει πολύ μικρή παροχή αιχμής ίση με $89 \text{ m}^3/\text{s}$, που κρίνεται αρκετά μικρότερη από την παρατηρημένη. Ανάλογη υποεκτίμηση συμβαίνει και με τον όγκο. Και εδώ το μοντέλο χρήζει βελτιστοποίησης των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Αρχικά, μεταβάλλονται ο αριθμός CN και ο χρόνος υστέρησης κατά 20%, όπου παρατηρείται μια μικρή αύξηση της παροχής αιχμής στα $103.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ακόμα και η μεγάλη μεταβολή των παραμέτρων αυτών δεν ήταν ικανή να αποδώσει μέγιστη απορροή που να πλησιάζει την παρατηρημένη.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Εδώ, προκύπτει αυξημένη παροχή αιχμής περί τα $189.9 \text{ m}^3/\text{s}$, αρκετά μεγαλύτερη όμως της παρατηρημένης τιμής. Ο πλημμυρικός όγκος φαίνεται να προσεγγίζει τον πραγματικό, αφού υπολογίζεται ίσος με $8.4 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η μέγιστη παροχή όμως πρέπει να μειωθεί, με συνέπεια να απαιτείται εκ νέου μεταβολή του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης και συγκεκριμένα, επαναφορά των αρχικών τιμών τους. Πράγματι, θεωρώντας ως χρονικό βήμα προσομοίωσης τη μισή ώρα και τις αρχικές εκτιμημένες τιμές CN και χρόνου υστέρησης, η παροχή αιχμής που προκύπτει είναι ίση με $169 \text{ m}^3/\text{s}$, μόλις κατά 0.2% μεγαλύτερη της παρατηρημένης. Μάλιστα και ο όγκος της πλημμύρας φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τον πραγματικό, αφού εκτιμάται ίσος με $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Η πρώτη προσομοίωση υποεκτιμά την παροχή αιχμής (ίση με $112 \text{ m}^3/\text{s}$) καθώς και τον πλημμυρικό όγκο ($3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$), με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η μεταβολή παραμέτρων για τον ορθότερο υπολογισμό των απορροών.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Η πρώτη μεταβολή που επιχειρείται είναι η αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Η προκύπτουσα παροχή αιχμής είναι $137.4 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή μικρότερη της αναμενόμενης παρατηρημένης. Έτσι, αυξάνεται περαιτέρω ο αριθμός CN, ενώ παράλληλα μειώνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 20%. Η αλλαγή αυτή δίνει την καλύτερη παροχή αιχμής, που πλησιάζει τα $153.6 \text{ m}^3/\text{s}$ και πλημμυρικό όγκο ίσο με $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Στο εν λόγω σενάριο, λοιπόν, το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά την παροχή αιχμής περίπου κατά 9% και το όγκο κατά 30.4%.

Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει για κάθε σενάριο τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα για το επεισόδιο της 13^{ης} Νοεμβρίου 1968

| 13-11-68 | Σενάριο 1 ^ο | | Σενάριο 2 ^ο | | Σενάριο 3 ^ο | | Σενάριο 4 ^ο | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m ³ /s) | 54.1 | 154.7 | 102.4 | 135.2 | 89 | 169 | 112 | 153.6 |
| Όγκος (10 ⁶ m ³) | 0.4 | 8.8 | 4.3 | 6.3 | 3.8 | 8.5 | 4.1 | 5.5 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -67.8 | -8 | -39.29 | -19.8 | -47.2 | +0.2 | -33.6 | -8.9 |
| Σφάλμα στο συνολικό όγκο (%) | -95.6 | +11.3 | -51.8 | -20.4 | -57.7 | -7.5 | -54.4 | -30.4 |

Μέχρι τώρα εξετάστηκαν τα τέσσερα πλημμυρικά επεισόδια στην έξοδο της Σαρακίνας και η υδρολογική ανάλυσή τους βασίστηκε στα τέσσερα σενάρια υποδιαίρεσης της λεκάνης απορροής. Όπως έγινε αντιληπτό, για κάθε επεισόδιο και κάθε σενάριο εφαρμόστηκε διαφορετική βελτιστοποίηση παραμέτρων η οποία οδήγησε και στην καλύτερη εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών από το μοντέλο. Ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη της επίδρασης στην εκτίμηση της απορροής μιας ενιαίας μεταβολής των παραμέτρων σε κάθε σενάριο. Για το σκοπό αυτό ελήφθησαν οι μέσοι όροι των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων κάθε σεναρίου για όλα τα επεισόδια, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Συγκεκριμένα, για το πρώτο σενάριο μελέτης μιας ενιαίας λεκάνης, υπολογίστηκε ότι ο μέσος όρος μεταβολής του αριθμού καμπύλης CN είναι 5% μικρότερος σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα, ενώ ο χρόνος υστέρησης θα πρέπει να αυξηθεί κατά το ίδιο ποσοστό. Ακόμη, το επικρατέστερο χρονικό βήμα προσομοίωσης είναι στα τριάντα λεπτά και το ποσοστό αδιαπερατής επιφάνειας φαίνεται ότι πρέπει να μειωθεί κατά 10%.

Στο δεύτερο σενάριο θα πρέπει να εφαρμοστεί αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 11.25%, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης θα ληφθεί ίσο με μισάωρο και τέλος το ποσοστό διαπερατής επιφάνειας θα παραμείνει ίδιο με το αρχικό για κάθε υπολεκάνη.

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία υπολογισμού των μέσων όρων και στο τρίτο σενάριο, όπου τελικά θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αύξηση του CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 10%, το χρονικό βήμα να ληφθεί ίσο με μισή ώρα και το ποσοστό διαπερατής επιφάνειας να παραμείνει αμετάβλητο.

Στο τελευταίο σενάριο οι μεταβολές που θα πραγματοποιηθούν είναι μείωση του CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 10%, θεώρηση του χρονικού βήματος ίσο με μία ώρα και του ποσοστού διαπερατής επιφάνειας ίσο με το αρχικό για κάθε υπολεκάνη.

Οι νέες παράμετροι εισάγονται στο μοντέλο και πραγματοποιείται εκ νέου προσομοίωση για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο σε κάθε σενάριο. Ο Πίνακας 4.7 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρουσιάζοντας τα ποσοστιαία σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου κάθε σεναρίου για όλα τα επεισόδια.

Πίνακας 4.7: Ποσοστιαία σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου μετά την εισαγωγή ενιαίων παραμέτρων σε όλα τα επεισόδια (διαφορετικών ανά σενάριο)

| | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 13/04/65 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | +8 | +2.3 | +33.8 | -44.9 |
| Σφάλμα στον όγκο (%) | +21.1 | +17.3 | +25 | -46.1 |
| 7/12/66 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -7.2 | +78.9 | +55.5 | +5.2 |
| Σφάλμα στον όγκο (%) | +48.2 | +85.7 | +92.8 | -25 |
| 14/12/66 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | +1.6 | -12.5 | -6.3 | +24.1 |
| Σφάλμα στον όγκο (%) | +66.7 | -34.2 | -37.2 | -23.2 |
| 13/11/68 | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -28.1 | -23.5 | +12.5 | -33.8 |
| Σφάλμα στον όγκο (%) | -12.6 | -36.4 | +9.1 | -65.5 |

Σε πρώτη φάση, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά τη νέα βελτιστοποίηση των παραμέτρων με εκείνα από τις προηγούμενες βελτιστοποιήσεις των Πινάκων 4.3, 4.4, 4.5 και 4.6, τώρα παρατηρείται αύξηση των σφαλμάτων. Παρ' όλα αυτά, όπως αναφέρθηκε, εδώ εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου για κάθε σενάριο χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους.

Έτσι, από τον Πίνακα 4.7 προκύπτει ότι η εκτίμηση του πλημμυρικού επεισοδίου στις 13 Απριλίου 1965 είναι καλύτερη στην περίπτωση που εφαρμόζονται τρεις υπολεκάνες. Καλή φαίνεται να είναι και η εκτίμηση των απορροών κατά τη θεώρηση μιας ενιαίας λεκάνης απορροής. Τα σφάλματα φαίνεται ότι αυξάνονται στις περιπτώσεις μεγαλύτερου αριθμού υπολεκανών, με το τέταρτο σενάριο να είναι το χειρίστο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πλημμυρικό επεισόδιο στις 7 Δεκεμβρίου 1966 είναι διαφορετικά από το προηγούμενο επεισόδιο. Εδώ η θεώρηση των εννιά υπολεκανών παρέχει τα μικρότερα σφάλματα εκτίμησης απορροών, ενώ το προηγούμενο καλύτερο σενάριο, τώρα αποτελεί το χειρότερο, με σφάλμα εκτίμησης όγκου που φτάνει το 85%. Το

σενάριο 1 εξακολουθεί να εκτιμά πολύ καλά την παροχή αιχμής, όμως το σφάλμα υπολογισμού του συνολικού όγκου είναι αρκετά μεγάλο.

Η εκτίμηση των απορροών στο επεισόδιο στις 14 Δεκεμβρίου 1966 φαίνεται να είναι αρκετά καλή για όλα τα σενάρια. Τα μικρότερα σφάλματα υπολογισμού της παροχής αιχμής παρατηρούνται στα σενάρια 1 και 3, ενώ το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης πλημμυρικού όγκου εντοπίζεται στο τέταρτο σενάριο μελέτης. Το σενάριο 3 κρίνεται ικανοποιητικό στην εκτίμηση τόσο της αιχμής, όσο και του πλημμυρικού όγκου αυτού του επεισοδίου.

Στην περίπτωση του επεισοδίου στις 13 Νοεμβρίου 1968 τα τέσσερα σενάρια φαίνεται να παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το τρίτο σενάριο δίνει τα μικρότερα σφάλματα εκτίμησης απορροών στο συγκεκριμένο επεισόδιο, αλλά και το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης όγκου σε σχέση με όλα τα πλημμυρικά επεισόδια.

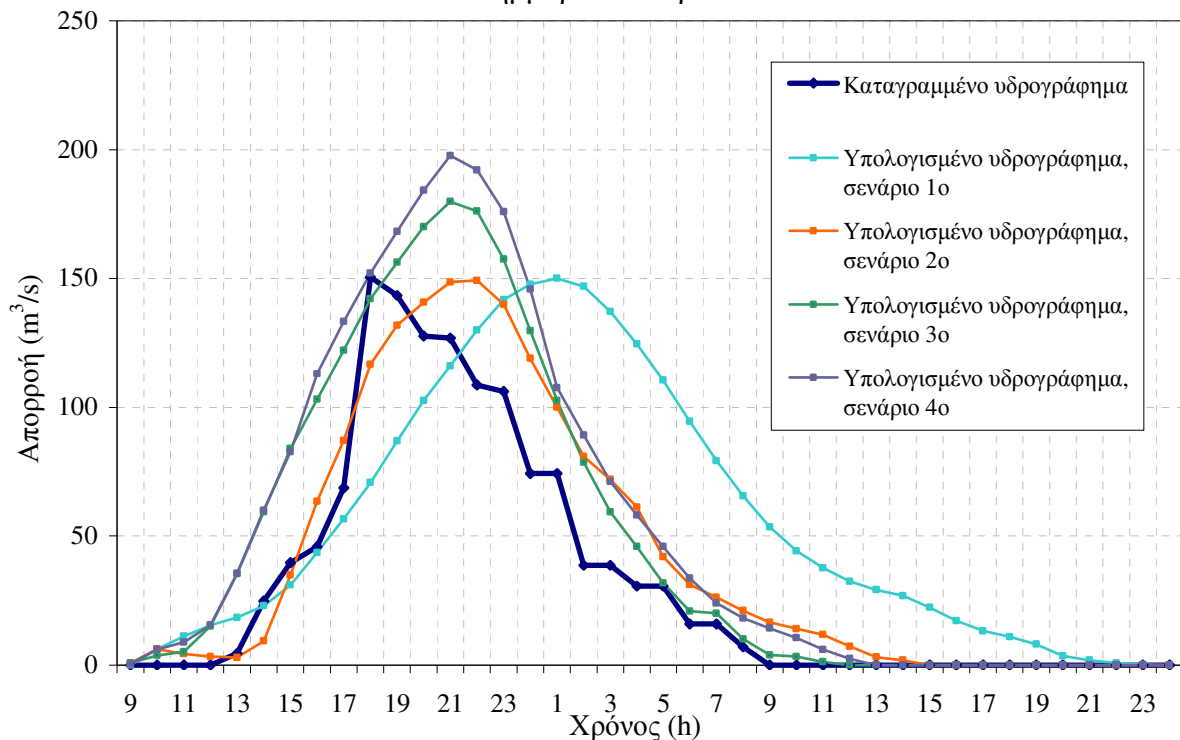
4.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο εδάφιο αποσκοπούσε στην καλύτερη εκτίμηση των παροχών αιχμής και πλημμυρικών όγκων των τεσσάρων επεισοδίων.

Ο Πίνακας 4.3 που παρουσιάστηκε προηγουμένως στο επεισόδιο 13/4/1965, καταδεικνύει τη σημασία της βελτιστοποίησης κάποιων παραμέτρων, καθώς μείωσε αισθητά τα σφάλματα εκτίμησης των πλημμυρικών απορροών. Ειδικότερα, η θεώρηση τριών υπολεκανών υποεκτιμά μόλις κατά 0.6% τη μέγιστη πλημμυρική απορροή, ενώ ο σχεδιασμός πολύ περισσότερων υπολεκανών -5 ή 9 υπολεκάνες, αντίστοιχα σενάρια 3 και 4- τις υπερεκτιμά κατά 19.5% και 31.3% αντίστοιχα. Όσον αφορά στον πλημμυρικό όγκο, η καλύτερη εκτίμησή του πραγματοποιείται με την εφαρμογή τριών και υπολεκανών. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις το σφάλμα κυμαίνεται ανάμεσα στο 25-40%.

Το Σχήμα 4.28 παρέχει μια οπτική σύγκριση μεταξύ του παρατηρημένου υδρογραφήματος και των υπολογισμένων κάθε σεναρίου. Παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής ή προσεγγίζεται καλύτερα στις περιπτώσεις της μίας και των τριών υπολεκανών, με την πρώτη όμως να εμφανίζει την απορροή λίγες ώρες αργότερα. Όταν μελετώνται περισσότερες υπολεκάνες σημειώνεται μια μικρή υπερεκτίμηση στην τιμή της παροχής αιχμής ζ . Ο πλημμυρικός όγκος δε φαίνεται να εκτιμάται καλύτερα κατά τη μελέτη τριών και πέντε υπολεκανών.

Πλημμύρα 13 Απριλίου 1965

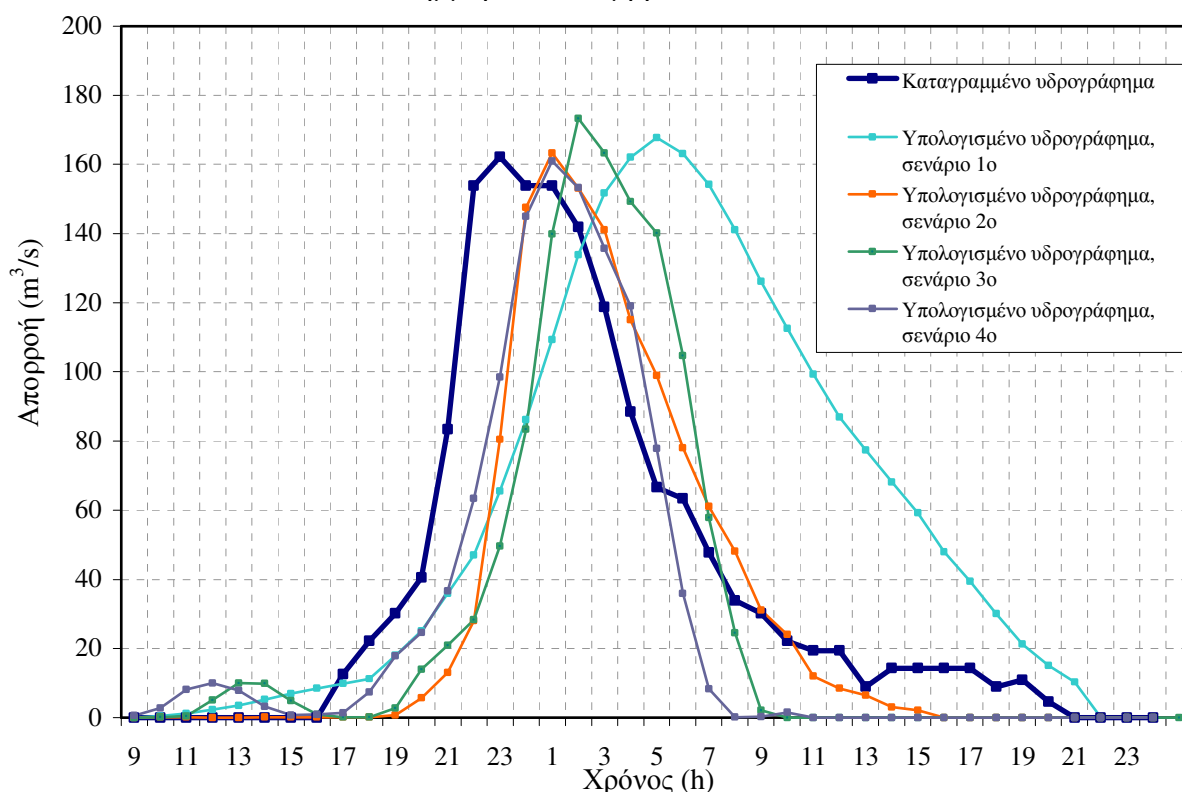


Σχήμα 4.28: Παρατηρημένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα πλημμύρας 13/4/1965

Η μελέτη του επεισοδίου στις 7/12/1965 απέδωσε τις καλύτερες τιμές στις παραμέτρους που ελήφθησαν υπόψη, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.4. Διαπιστώνεται, λοιπόν, η καλή εκτίμηση της παροχής αιχμής ζ και στα τρία σενάρια. Βέβαια, το τρίτο σενάριο είναι εκείνο που προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη παροχή αιχμής κατά 0.7%. Ο υπολογισμός όμως του πλημμυρικού όγκου και για τις τρεις περιπτώσεις δεν κρίνεται ικανοποιητικός αφού το αντίστοιχο σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 23.2~46%. Στο συγκεκριμένο επεισόδιο υπολογίζεται και ο δείκτης Nash-Sutcliffe για να εκτιμηθεί η καλύτερη επίδοση των προσομοιώσεων. Εφαρμόζοντας το δείκτη, προέκυψε ότι όταν εξετάζονται 5 λεκάνες (σενάριο 3^ο) ο δείκτης Nash-Sutcliffe ισούται με 0.65, ενώ όταν οι υπολεκάνες είναι περισσότερες ο δείκτης υπολογίζεται ίσως με 0.79. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι το σενάριο 4 εκτίμησε με τον καλύτερο τρόπο τις απορροές του επεισοδίου στις 7 Δεκεμβρίου 1968.

Το Σχήμα 4.29 οπτικοποιεί αυτή την πληροφορία, παραθέτοντας το παρατηρημένο και τα εκτιμημένα υδρογραφήματα αυτή της πλημμύρας. Όπως γίνεται αντιληπτό τα σενάρια δύο τρία και τέσσερα είναι εκείνα που φαίνεται να εκτιμούν καλύτερα τόσο το συνολικό μέγεθος της πλημμύρας, όσο και την παροχή αιχμής της. Κατά τη μελέτη της μίας λεκάνης παρατηρείται και εδώ μία καθυστέρηση στην εμφάνιση της αιχμής καθώς και μια υπερεκτίμηση των τιμών της απορροής.

Πλημμύρα 7 Δεκεμβρίου 1966

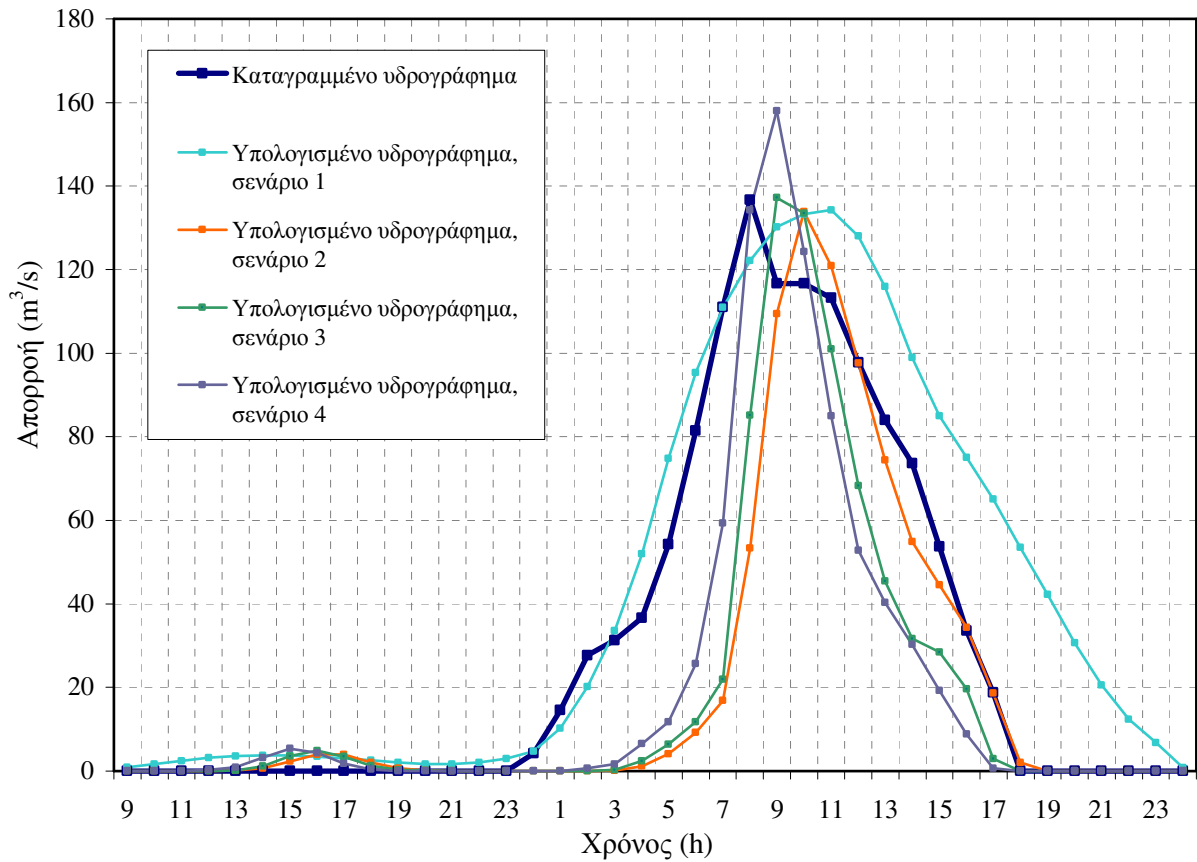


Σχήμα 4.29: Παρατηρημένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα πλημμύρας 7/12/1966

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5, η βελτιστοποίηση που ακολουθήθηκε για το επεισόδιο 14/12/1966, μείωσε τα σφάλματα εκτίμησης τόσο του πλημμυρικού όγκου όσο και της παροχής αιχμής. Όταν οι εξεταζόμενες υπολεκάνες είναι πέντε, προκύπτει η καλύτερη εκτίμηση της μέγιστης παροχής, με σφάλμα εκτίμησης μόλις 0.3%. Στο ίδιο όμως σενάριο, ο πλημμυρικός όγκος φαίνεται ότι υποεκτιμάται κατά μεγάλο ποσοστό. Από την άλλη, η μελέτη περισσότερων υπολεκανών οδήγησε στην εξαγωγή μικρότερου σφάλματος εκτίμησης όγκου σχετικά με τα υπόλοιπα σενάρια. Παρόλα αυτά, σε αυτή την περίπτωση η αιχμή υπερεκτιμάται κατά 15.6%.

Το Σχήμα 4.30 παρουσιάζει το καταγραμμένο υδρογράφημα εκείνης της ημερομηνίας, καθώς και τα υπολογισμένα για κάθε σενάριο. Όσον αφορά στην παροχή αιχμής, διαπιστώνεται και εδώ ότι στην περίπτωση μελέτης μίας, τριών και πέντε υπολεκανών γίνεται η καλύτερη εκτίμησή της. Σημειώνεται και εδώ μια μικρή καθυστέρηση στην εμφάνιση της απορροής στην περίπτωση μελέτης μιας λεκάνης. Επιπλέον, τα σενάρια 2 και 3 παρέχουν μια πιο ακριβή προσομοίωση της συνολικής πλημμυρικής απορροής.

Πλημμύρα 14 Δεκεμβρίου 1966

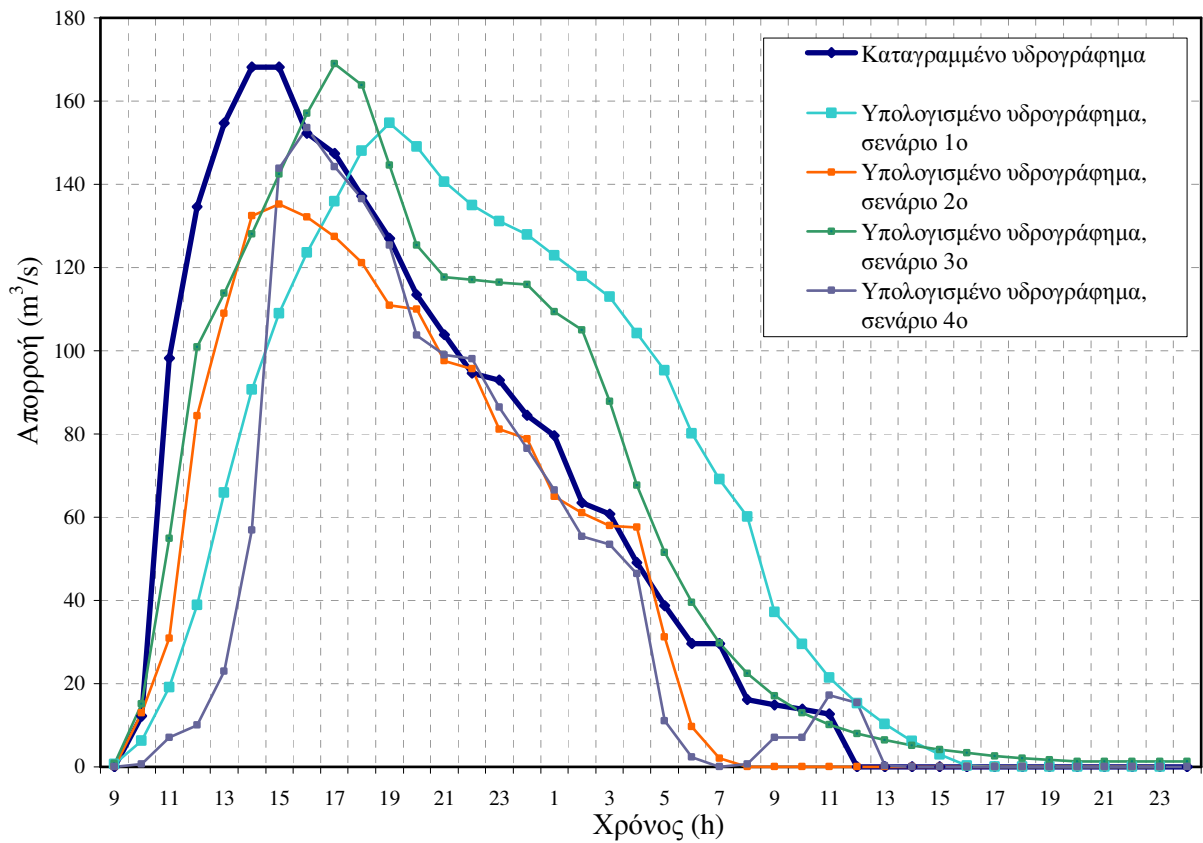


Σχήμα 4.30: Παρατηρημένα και υπολογισμένα υδρογραφήματα πλημμύρας 14/12/1966

Ο Πίνακας 4.6 όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, σημειώνει τη βελτίωση των τιμών της παροχής αιχμής και πλημμυρικού όγκου του επεισοδίου στις 13/11/68. Η μελέτη του οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σενάριο 3 είναι εκείνο που εκτιμά με πιστότερα τόσο την πλημμυρική αιχμή, όσο και τον πλημμυρικό όγκο. Ειδικότερα, κατά τη μελέτη 5 υπολεκανών υπερεκτιμάται η αιχμή μόλις κατά 0.2%, σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης των υπόλοιπων σεναρίων μελέτης. Ακόμη, η υποεκτίμηση του πλημμυρικού όγκου κρίνεται ιδιαίτερα μικρή συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες των άλλων περιπτώσεων.

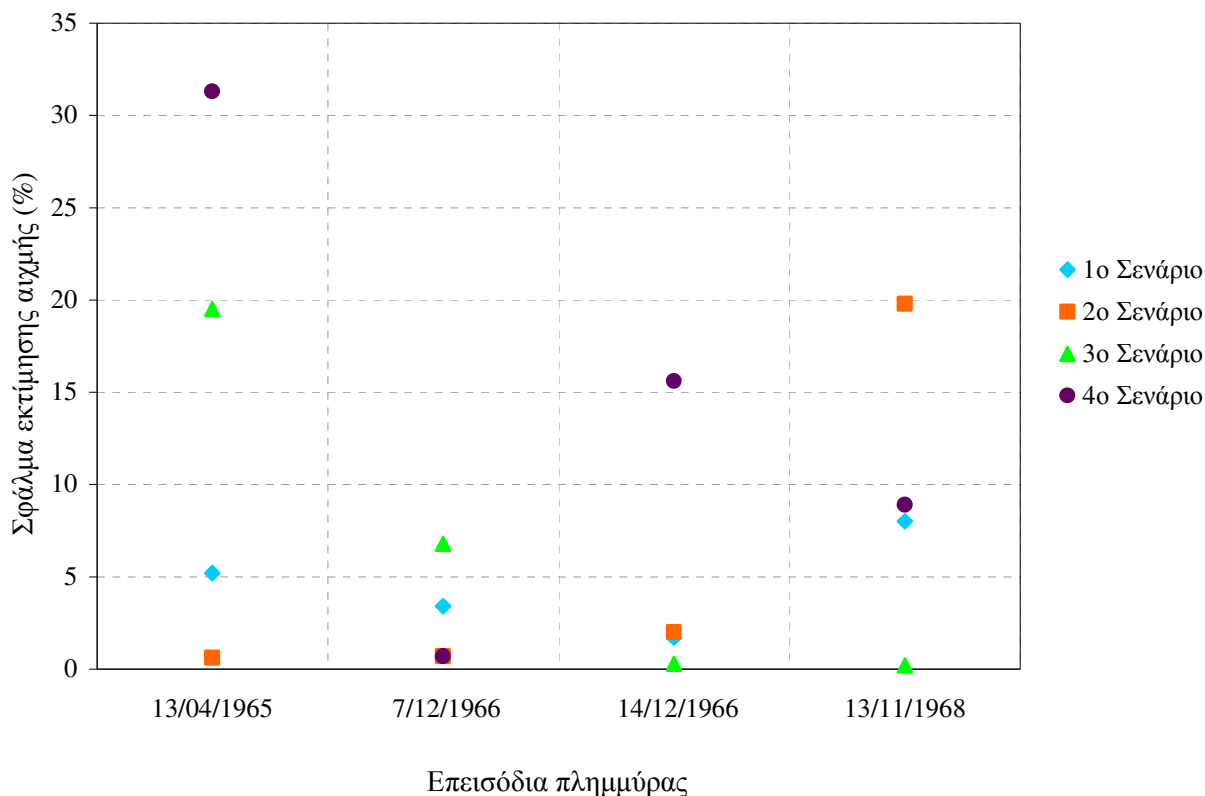
Όπως φαίνεται και από το συγκεντρωτικό διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.31), το σενάριο 3 είναι εκείνο που προσεγγίζει καλύτερα την τιμή και ώρα εμφάνισης της παροχής αιχμής, καθώς και το συνολικό όγκο της πλημμύρας. Τα σενάρια 2 και 4 φαίνεται να υποεκτιμούν τα μεγέθη, ενώ στο πρώτο σενάριο εμφανίζεται η αιχμή μερικές ώρες μετά από την πραγματική ώρα εμφάνισής της.

Πλημμύρα 13 Νοεμβρίου 1968



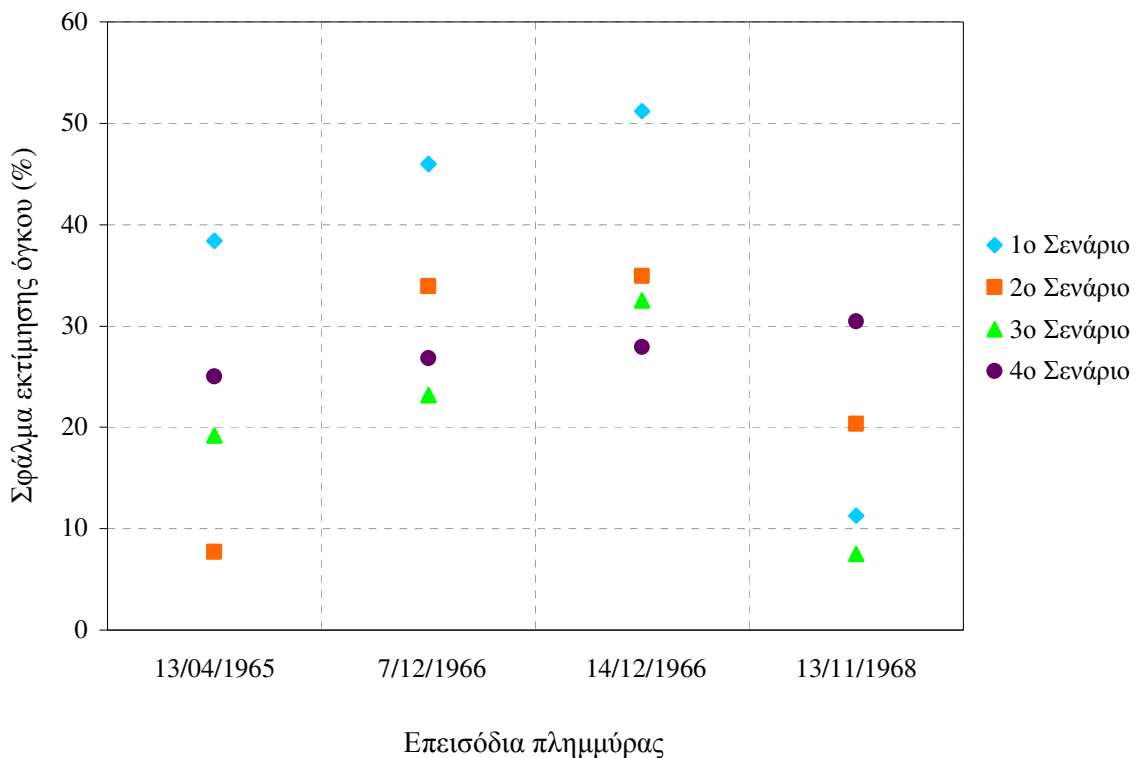
Σχήμα 4.31: Παρατηρημένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα πλημμύρας 13/11/1968

Τα Σχήματα 4.32 και 4.33 συγκεντρώνουν τα σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και όγκου κάθε πλημμύρας που εξετάστηκε για τα τέσσερα σενάρια μελέτης υπολεκανών.



Σχήμα 4.32: Σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής πλημμύρας κάθε επεισοδίου, για κάθε σενάριο μελέτης

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.32 το πρώτο σενάριο εκτιμά την παροχή αιχμής για τα τρία από τα τέσσερα επεισόδια με σφάλμα μικρότερο του 5%, ενώ στο τελευταίο επεισόδιο το σφάλμα είναι λίγο μεγαλύτερο. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το δεύτερο σενάριο, όπου το αντίστοιχο σφάλμα για τα τρία πρώτα επεισόδια είναι κάτω του 5%. Ωστόσο και εδώ το σφάλμα εκτίμησης της παροχής αιχμής του επεισοδίου στις 13/11/68 είναι αρκετά μεγαλύτερο και πλησιάζει το 20%. Το σενάριο 3 παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό σφάλμα στα επεισόδια στις 14/12/66 και 13/11/68 και κάτω του 10% για την πλημμύρα στις 7/12/66. Το σφάλμα αυξάνεται στην περίπτωση του επεισοδίου στις 13/04/65. Το 4^ο σενάριο είναι εκείνο που παρουσιάζει τα μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.32 μόνο στην περίπτωση του επεισοδίου στις 7/12/66 το σφάλμα είναι πολύ μικρό.



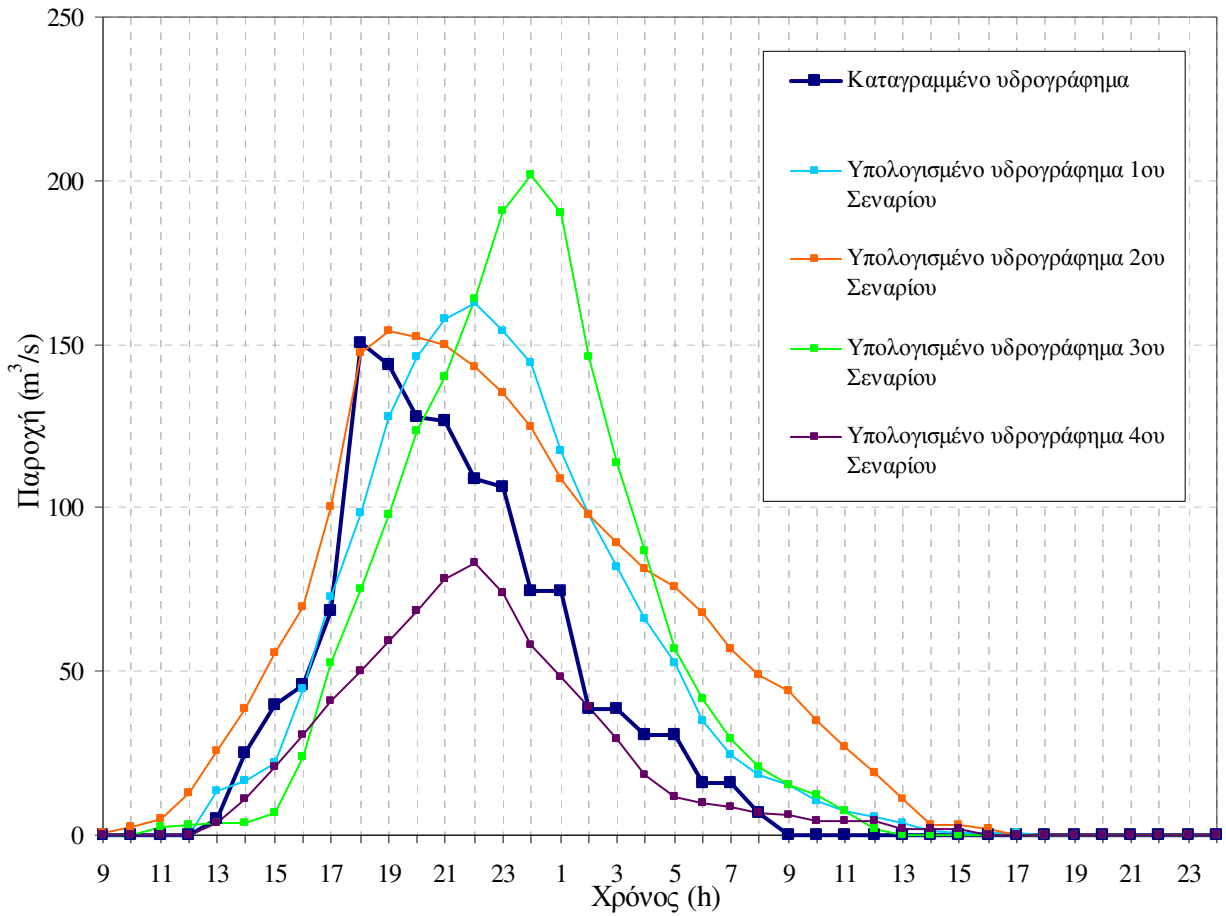
Σχήμα 4.33: Σφάλματα εκτίμησης όγκου πλημμύρας κάθε επεισοδίου, για κάθε σενάριο μελέτης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.33 τα σφάλματα εκτίμησης του πλημμυρικού όγκου στο πρώτο σενάριο είναι αρκετά μεγάλα, και μάλιστα στην περίπτωση του επεισοδίου στις 14/12/66 το σφάλμα ξεπερνά το 50%. Το δεύτερο σενάριο φαίνεται να εκτιμά λίγο καλύτερα τον πλημμυρικό όγκο, όμως και εδώ σημειώνονται μεγάλα σφάλματα που αγγίζουν το 35%. Το τρίτο σενάριο είναι εκείνο που παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις στην εκτίμηση του όγκου. Συγκεκριμένα, σε δύο από τα τέσσερα επεισόδια το σφάλμα είναι κάτω του 20%, ενώ μόνο σε ένα επεισόδιο πλημμύρας ο όγκος υπολογίστηκε με διαφορά από τον πραγματικό λίγο μεγαλύτερη από 30%. Όσον αφορά στο τέταρτο σενάριο, αυτό φαίνεται να προσεγγίζει καλά τον πλημμυρικό όγκο για τα τρία από τα τέσσερα επεισόδια με σφάλμα μικρότερο του 30%, ενώ στο τελευταίο επεισόδιο το σφάλμα είναι ελάχιστα μεγαλύτερο πλησιάζοντας το 31%.

Η εξέταση της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης χρησιμοποιώντας ενιαίες τιμές παραμέτρων σε κάθε σενάριο μελέτης, προκάλεσε όπως αναφέρθηκε, μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης των απορροών. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι νέες τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο αποτελούν απλώς το μέσο όρο των καλύτερων εκτιμήσεών τους (ανά επεισόδιο και σενάριο). Η περίπτωση με χρήση αυτών των μέσων τιμών των παραμέτρων θα αναφέρεται στο εξής ως «νέα βελτιστοποίηση».

Το Σχήμα 4.34 παρουσιάζει τα υδρογραφήματα απορροής μετά την εφαρμογή της νέας βελτιστοποίησης καθώς και το καταγεγραμμένο υδρογράφημα του επεισοδίου στις 13 Απριλίου 1965. Όπως και στον Πίνακα 4.7, έτσι και εδώ παρατηρείται ότι το υδρογράφημα που προέκυψε από το δεύτερο σενάριο προσεγγίζει καλύτερα το παρατηρημένο υδρογράφημα. Ακόμη, φαίνεται η υποεκτίμηση των απορροών μετά την εφαρμογή του τέταρτου σεναρίου και η υπερεκτίμηση αυτών μετά τη χρήση του τρίτου σεναρίου μελέτης.

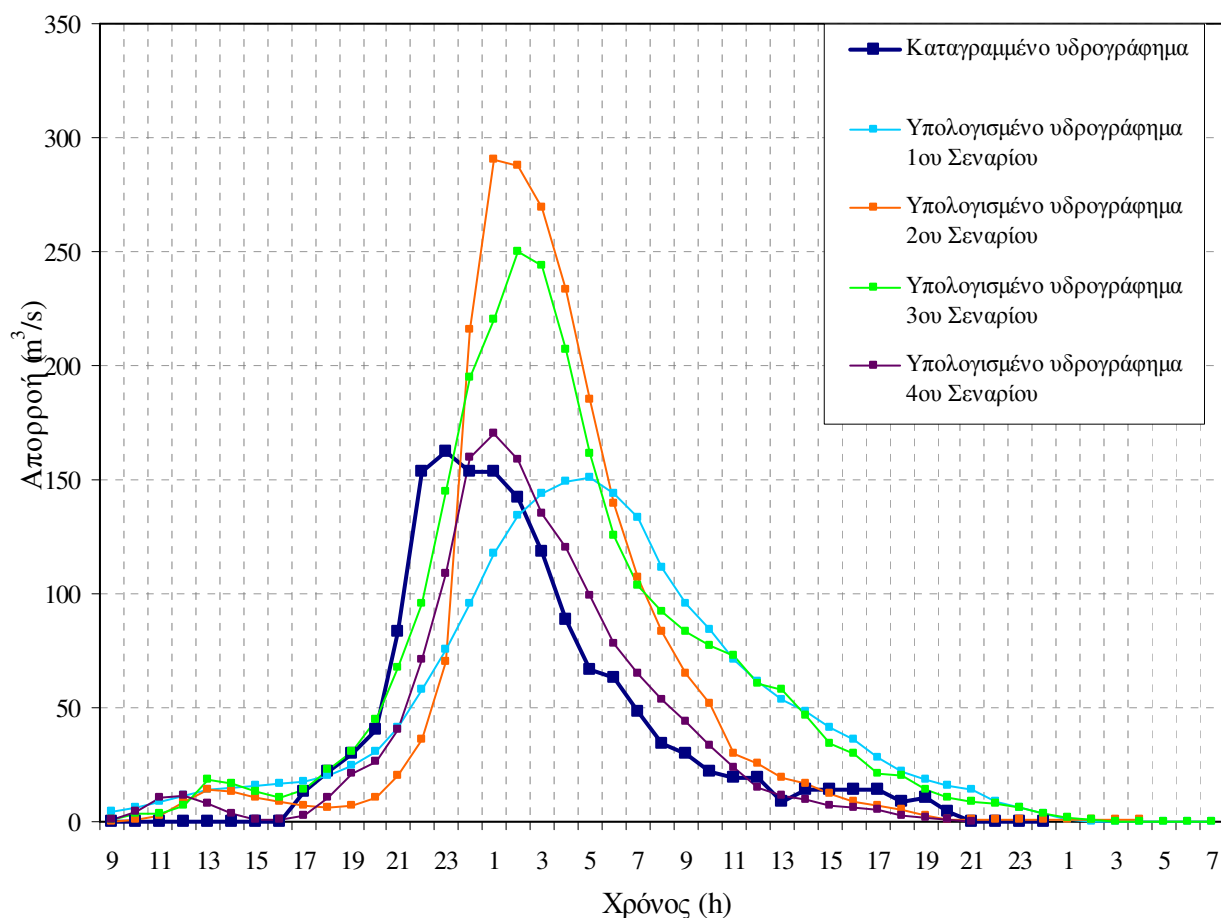
Πλημμύρα 13 Απριλίου 1965



Σχήμα 4.34: Καταγραμμένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα μετά τη νέα βελτιστοποίηση, για το επεισόδιο πλημμύρας 13/4/1965.

Το Σχήμα 4.35 παρουσιάζει τα υδρογραφήματα απορροής μετά την εφαρμογή της νέας βελτιστοποίησης καθώς και το καταγεγραμμένο υδρογράφημα του επεισοδίου στις 7 Δεκεμβρίου 1966. Σε αντίθεση με το Σχήμα 4.34, εδώ παρατηρείται ότι το υδρογράφημα που προκύπτει από τη μελέτη του τέταρτου σεναρίου προσεγγίζει πιο πιστά το πραγματικό. Τα σενάρια τρία και τέσσερα φαίνεται να υπερεκτιμούν τις παροχές αιχμής.

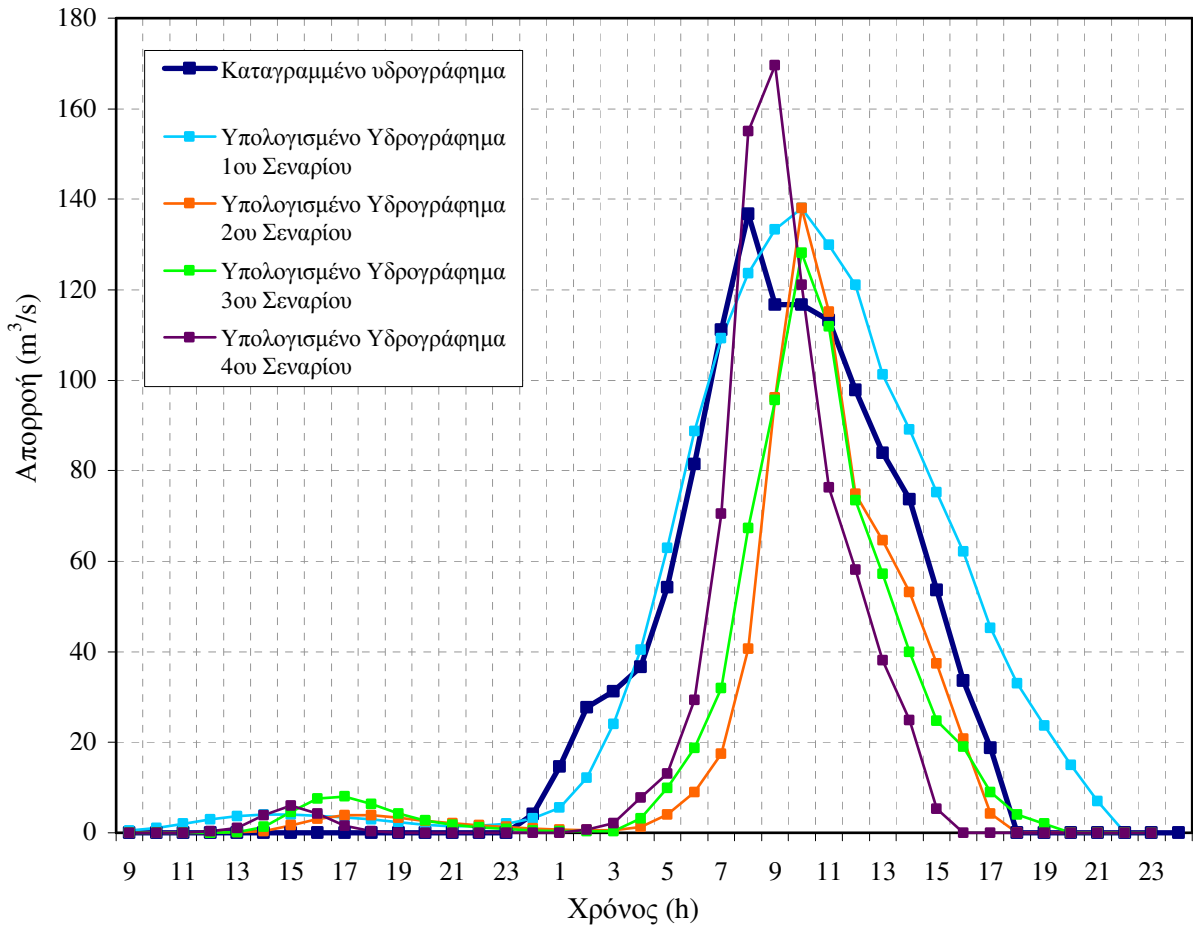
Πλημμύρα 7 Δεκεμβρίου 1966



Σχήμα 4.35: Καταγεγραμμένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα μετά τη νέα βελτιστοποίηση, για το επεισόδιο πλημμύρας 7/12/1966.

Τα υδρογραφήματα απορροής μετά την εφαρμογή της νέας βελτιστοποίησης καθώς και το καταγεγραμμένο υδρογράφημα του επεισοδίου στις 14 Δεκεμβρίου 1966 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.36. Σε γενικές γραμμές διαπιστώνεται ότι και τα τέσσερα υδρογραφήματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά το πραγματικό, με ίσως όμως χειρότερη προσέγγιση από το υδρογράφημα του πρώτου σεναρίου το οποίο φαίνεται να υπερεκτιμά τις απορροές. Η θεώρηση πέντε υπολεκανών φαίνεται να αποδίδει πιο πιστά τόσο την παροχή αιχμής όσο και τον όγκο.

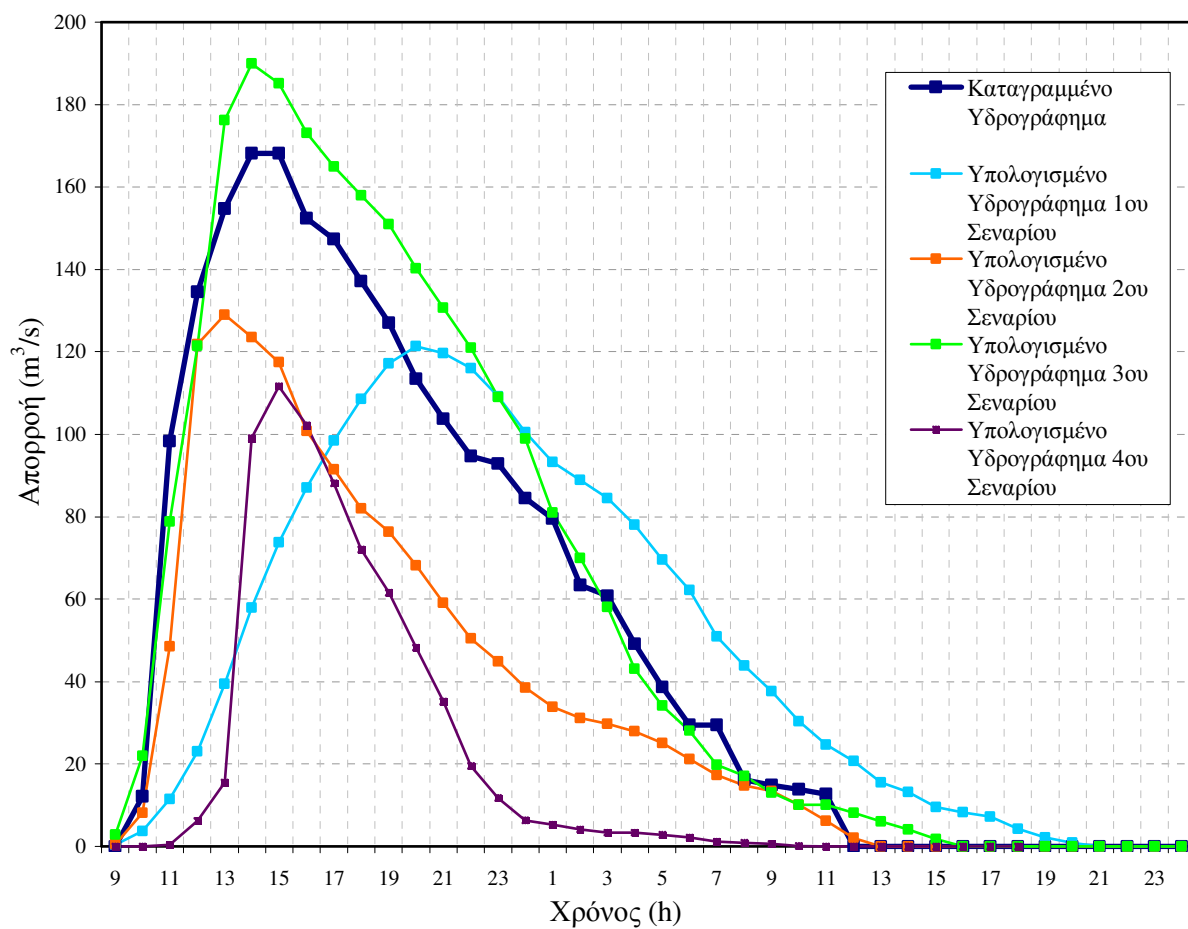
Πλημμύρα 14 Δεκεμβρίου 1966



Σχήμα 4.36: Καταγραμμένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα μετά τη νέα βελτιστοποίηση, για το επεισόδιο πλημμύρας 14/12/1966.

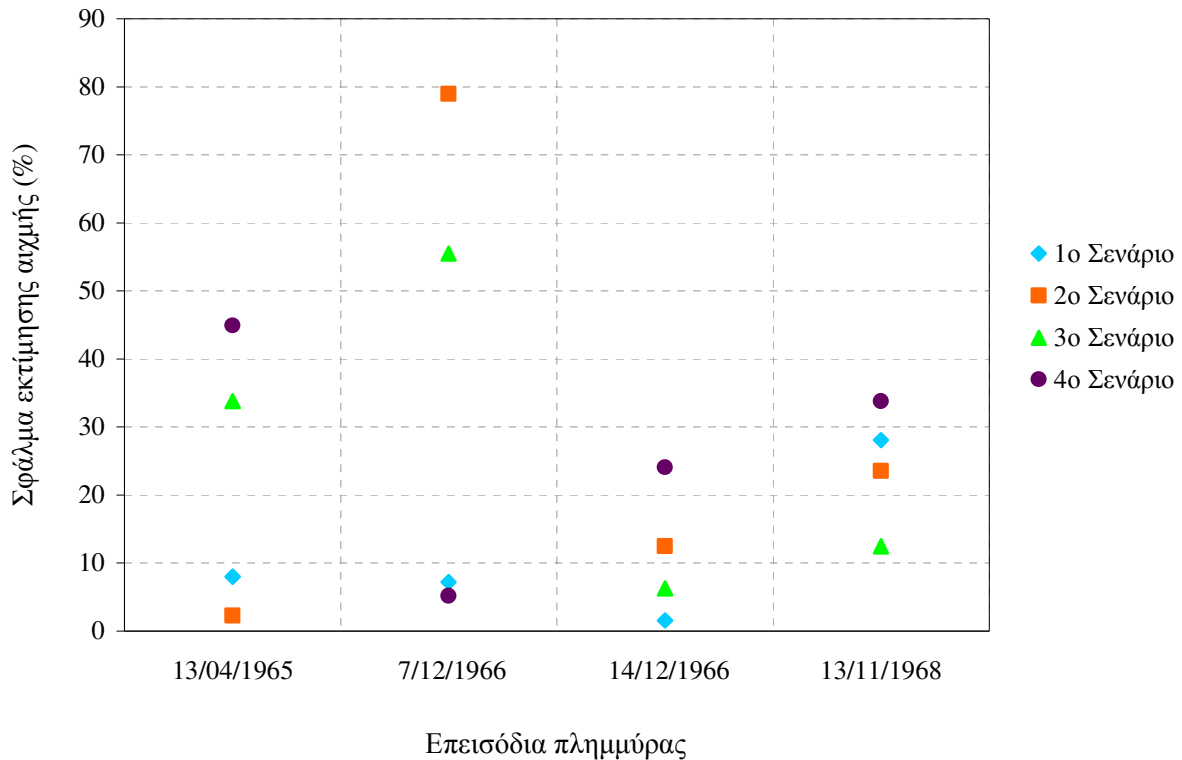
Στο Σχήμα 4.37 περιλαμβάνονται το καταγραμμένο υδρογράφημα πλημμύρας στις 13 Νοεμβρίου 1968 καθώς και τα υπολογισμένα υδρογραφήματα όπως προέκυψαν μετά τη νέα βελτιστοποίηση. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του τρίτου σεναρίου προσεγγίζουν καλύτερα τις παρατηρημένες απορροές. Μάλιστα εδώ, ο υπολογισμένος χρόνος αιχμής φαίνεται να συμπίπτει με τον αντίστοιχο παρατηρημένο. Στα υπόλοιπα σενάρια είναι αντιληπτή η υποεκτίμηση των απορροών, όμως τα υδρογραφήματα κρίνονται εν γένει ικανοποιητικά.

Πλημμύρα 13 Νοεμβρίου 1968



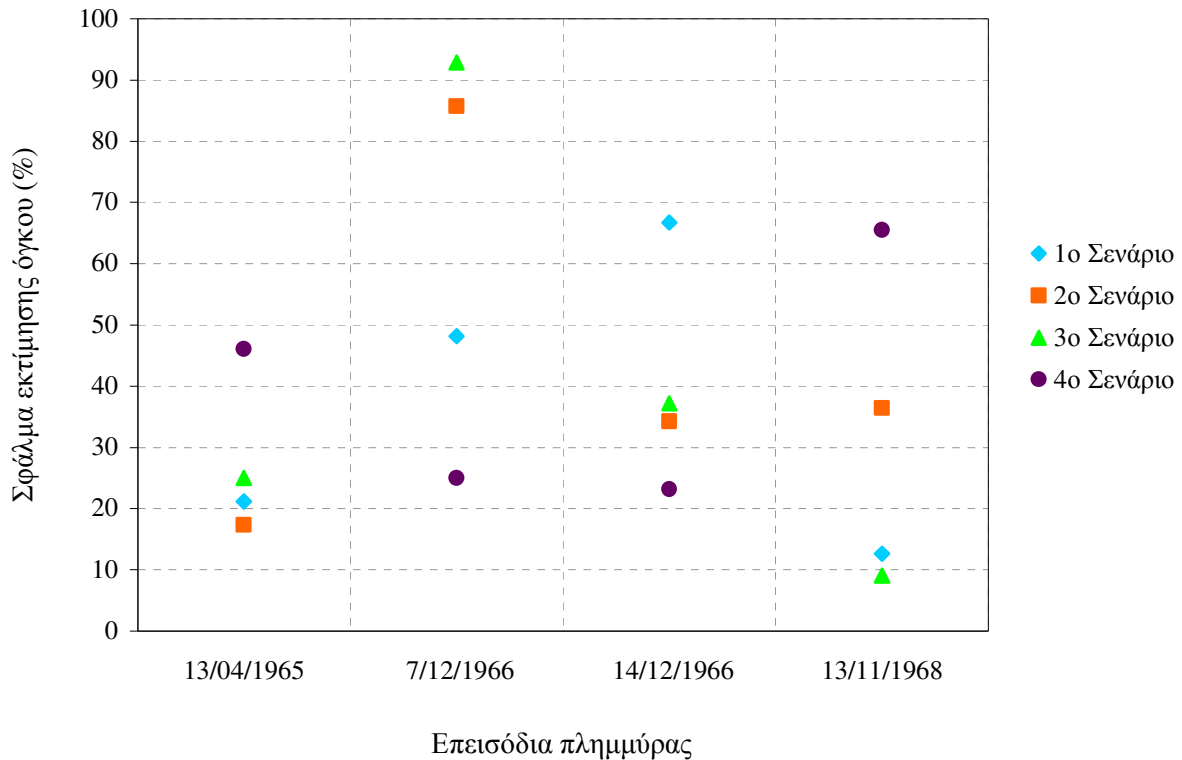
Σχήμα 4.37: Καταγραμμένο και υπολογισμένα υδρογραφήματα μετά τη νέα βελτιστοποίηση, για το επεισόδιο πλημμύρας 13/11/1968.

Τα Σχήματα 4.38 και 4.39 παρουσιάζουν τα απόλυτα σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου για κάθε εξεταζόμενο επεισόδιο και για κάθε σενάριο, όπως προέκυψαν με τις νέες προσομοιώσεις.



Σχήμα 4.38: Σφάλματα εκτίμησης αιχμής πλημμύρας κάθε επεισοδίου, για κάθε σενάριο μελέτης με τις νέες προσομοιώσεις

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.38, το πρώτο σενάριο εκτιμά την παροχή αιχμής για τα τρία από τα τέσσερα επεισόδια με σφάλμα μικρότερο του 10%, μάλιστα το απόλυτο σφάλμα για το επεισόδιο της 14^{ης} Δεκεμβρίου 1966 προσεγγίζει το μηδέν. Παρ' όλα αυτά, στο τελευταίο επεισόδιο το σφάλμα είναι μεγαλύτερο, περί το 30%. Το δεύτερο σενάριο φαίνεται να εκτιμά με πολύ καλή ακρίβεια την παροχή αιχμής του επεισοδίου του 1965, και με ικανοποιητική τα επεισόδια του 1968 και της 14^{ης} Δεκεμβρίου 1966. Ωστόσο, ο υπολογισμός της παροχής αιχμής του επεισοδίου στις 7 Δεκεμβρίου 1966 ενέχει μεγάλη αβεβαιότητα καθώς το απόλυτο σφάλμα αγγίζει το 80%. Το σφάλμα εκτίμησης της παροχής αιχμής της πλημμύρας από το τρίτο σενάριο μελέτης ποικίλει ανάμεσα στα τέσσερα επεισόδια, χωρίς όμως να κρίνεται απαγορευτικό σε κάποιο από αυτά. Ειδικότερα, ο καλύτερος υπολογισμός γίνεται για το επεισόδιο στις 14/12/1966 με σφάλμα μικρότερο του 10%, ενώ ο χειρότερος υπολογισμός σημειώνεται στην πλημμύρα στις 7/12/1966 με σφάλμα που ξεπερνά το 50%. Το τέταρτο σενάριο παρουσιάζει μια όμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο, αφού και εδώ το σφάλμα εκτίμησης της παροχής αιχμής κυμαίνεται σε χαμηλά ποσοστά.



Σχήμα 4.39: Σφάλματα εκτίμησης όγκου πλημμύρας κάθε επεισοδίου, για κάθε σενάριο μελέτης με τις νέες προσομοιώσεις

Μελετώντας το Σχήμα 4.39 διαπιστώνεται ότι η εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου περιλαμβάνει μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τον υπολογισμό των αιχμών του Σχήματος 4.35. Συγκεκριμένα, το σενάριο 1 υπολογίζει τον όγκο της πλημμύρας του 1965 με σφάλμα περί το 20%, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα της 14^{ης} Δεκεμβρίου 1966 αγγίζει το 70%. Η διακύμανση των σφαλμάτων στο δεύτερο σενάριο μοιάζει με την αντίστοιχη στις παροχές αιχμής, με το χειρότερο σφάλμα εδώ να εντοπίζεται κάτω από το 90%. Το 3^ο σενάριο υπολογίζει με αρκετά καλή ακρίβεια τον όγκο για τα τρία από τα τέσσερα επεισόδια, σημειώνοντας την καλύτερη εκτίμηση όγκου σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα σενάρια στο επεισόδιο της 13^{ης} Νοεμβρίου 1968. Παρά ταύτα, στο επεισόδιο στις 7/12/1966 σημειώνεται η χειρότερη εκτίμηση όγκου. Η θεώρηση εννιά υπολεκανών προσεγγίζει με αρκετά καλή ακρίβεια δύο από τα τέσσερα επεισόδια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.36. Για τα υπόλοιπα δύο επεισόδια το απόλυτο σφάλμα κυμαίνεται ανάμεσα στο 45~65%. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο επεισόδιο στις 7/12/1966 παρατηρούνται τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης όγκου στην περίπτωση μελέτης τριών και πέντε υπολεκανών, και μεσαία σφάλματα στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας την παραπάνω μελέτη, συγκεντρώνονται οι καλύτερες αποδόσεις των σεναρίων. Τα 'καλύτερα' σενάρια έχουν ως επί το πλείστον μικρά σφάλματα εκτίμησης όγκου και παροχή αιχμής, ήτοι μικρότερα από 10%. Ακολουθούν τα σενάρια με σφάλματα μικρότερα του 20% και 30%.

Από τις προσομοιώσεις του πρώτου σεναρίου βρέθηκε ότι το μοντέλο πριν τη βελτιστοποίηση υπερεκτιμά τις απορροές και στα τέσσερα επεισόδια πλημμύρας. Μετά από μεταβολή των παραμέτρων καταλήγουμε στο ότι οι καλύτερες εκτιμήσεις απορροής παρέχονται με μείωση του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 10%, η οποία στις

περισσότερες περιπτώσεις συνδυάζεται με μεταβολή του αριθμού καμπύλης CN κατά 10%. Σε όλα τα επεισόδια πλημμύρας το σενάριο εκτιμά την παροχή αιχμής με σφάλμα λιγότερο από 10%. Η καλύτερη εκτίμηση όγκου είναι κάτω από 20% και εντοπίζεται σε ένα μόνο επεισόδιο.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του δεύτερου σεναρίου, διαφαίνεται η υποεκτίμηση της απορροής από το μοντέλο, πριν από τη βελτιστοποίηση, και στα τέσσερα επεισόδια πλημμύρας. Τα μικρότερα σφάλματα υπολογισμού προκύπτουν είτε με αύξηση του αριθμού CN κατά 20%, είτε με μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης στο μισάωρο. Εδώ, σε τρία από τα τέσσερα επεισόδια το σφάλμα εκτίμησης της παροχής αιχμής είναι μικρότερο του 10%, ενώ η καλύτερη εκτίμηση του όγκου σημειώνεται σε ένα επεισόδιο με σφάλμα μικρότερο του 20%.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έτσι και κατά τη θεώρηση πέντε υπολεκανών το μοντέλο αρχικά υποεκτιμά την πλημμυρική απορροή. Με τη βελτιστοποίηση όμως των CN και χρονικού βήματος προσομοίωσης, ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα εκτίμησης της πλημμύρας. Όσον αφορά στην παροχή αιχμής, τρία από τα τέσσερα επεισόδια εκτιμήθηκαν με σφάλμα μικρότερο από 10%. Ο όγκος εκτιμήθηκε με σφάλμα μικρότερο από 10% για δύο επεισόδια, γεγονός που αποτελεί τον καλύτερο υπολογισμό του σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια.

Η υιοθέτηση μεγαλύτερου αριθμού υπολεκανών θα αναμενόταν να δώσει ακόμα καλύτερες εκτιμημένες τιμές της απορροής. Παρ' όλα αυτά, μόλις σε δύο επεισόδια η παροχή αιχμής υπολογίστηκε με μικρό σφάλμα, ενώ ο όγκος μόνο σε ένα αποδόθηκε με σφάλμα μικρότερο από 20%.

Από τη μελέτη των τεσσάρων περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι ο αριθμός των υπολεκανών παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών. Εν προκειμένω, ο σχεδιασμός και η προσομοίωση μέσω πέντε υπολεκανών κρίθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική και στα τέσσερα επεισόδια πλημμύρας.

Διαφαίνεται, λοιπόν, η ανάγκη διερεύνησης του αριθμού των υπολεκανών για κάθε περίπτωση εκτίμησης πλημμυρικής απορροής. Η τελική επιλογή θα πρέπει να προκύπτει μετά από ενδελεχή μελέτη και βελτιστοποίηση της προσομοίωσης, όπου θα λαμβάνονται υπόψη τόσο το μέγεθος και η ποικιλομορφία της κάθε λεκάνης απορροής, όσο και παρατηρημένα γεγονότα βροχοπτώσεων και απορροών.

5 Εικονική Λεκάνη Απορροής

5.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 4 εκτιμήθηκαν μεγέθη για τέσσερα επεισόδια πλημμύρας που αφορούν τη λεκάνη απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας. Μάλιστα, εξετάστηκε η επίδραση στον υπολογισμό της πλημμύρας, του αριθμού των υπολεκανών που εφαρμόζονται σε ένα ημικατανεμημένο μοντέλο όπως το HEC-HMS. Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται η επίδραση της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της απορροής μιας εικονικής (ή, πειραματικής στο επίπεδο H/Y) λεκάνης απορροής με χρήση ενός ημικατανεμημένου (HEC-HMS) και ενός κατανεμημένου μοντέλου (AFFDEF).

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σχεδιασμός της εικονικής λεκάνης αρχικά στο AFFDEF και στη συνέχεια αυτή διερευνάται με το HEC-HMS. Στο τελευταίο μοντέλο οι παράμετροί του βαθμονομούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εκτίμηση των απορροών να είναι ταυτόσημη με την αντίστοιχη που προέκυψε από το AFFDEF. Εφαρμόζονται και εδώ τέσσερα σενάρια μελέτης υπολεκανών και συγκρίνονται τα μεταξύ τους σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου.

5.1.1 Δεδομένα βροχόπτωσης

Τα δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται σε αρχείο .in όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Εκεί, σημειώνεται ο αριθμός των βροχομέτρων R01, που εδώ είναι τρεις (3), καθώς και το ζεύγος αριθμού γραμμής-στήλης. Το αρχείο επιπλέον περιλαμβάνει τα παρατηρημένα ύψη του επεισοδίου που μελετάται.

```

Αρχείο Επεξεργασία Εύρεση Προβολή Κωδικοποίηση Γλώσσα Ρυθμίσεις Μακροεντολή Εκτέλεση T
change.log Demamocorr.txt rain94567.IN
1 R01: Nplu (I,*) - number of raingauges
2 3
3 R03: Coordp (2xI,*) - coordinates of the raingauges
4 74 13
5 51 55
6 81 51
7 R05: nskip (I,*)- number of precipitation data to be skipped
8 0
9 R07: step and rainfall depth [mm]
10 R08: xpas (I,*), PIO (R,*)
11 1 0 0 0
12 2 0 0 0
13 3 0 0 0
14 4 0 0 0
15 5 0 0 0
16 6 0 0 0
17 7 0 0 0
18 8 0 0.2 0
19 9 0.1 0 0.1
20 10 0.2 0.2 0.2
21 11 0.3 0 0
22 12 0.6 0 0
23 13 0.4 0 0
24 14 1.5 0 0
25 15 1.5 1.2 1.2
26 16 1.5 1.2 1.2
27 17 1.7 1.4 1.2
28 18 1.7 2 1.2
29 19 2 2 1.5
30 20 2.2 2.8 2
31 21 2.4 2.5 2
32 22 2.4 2 1.2
33 23 2 0.8 1.6
34 24 1.6 1.5 1.4
35 25 1.4 0.6 0.6

```

Σχήμα 5.1: Αρχείο με δεδομένα βροχόπτωσης

5.1.2 Τοπογραφικά δεδομένα

Ως Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) χρησιμοποιήθηκε ένα διαθέσιμο σε μορφή Unicode, από το διαδικτυακό τόπο του μοντέλου AFFDEF και αφορά τη λεκάνη Samoggia στην Μπολόνια της Ιταλίας (<http://distart119.ing.unibo.it/alberto/site/showquestion.php?fldAuto=15&faq=2>). Ο φάκελος του ΨΜΕ αποτελεί έναν πίνακα που όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 που περιλαμβάνει τα υψόμετρα της επιφάνειας του εδάφους (σε μέτρα) σε αντιστοιχία με κάθε κελί του καννάβου. Το ΨΜΕ προφανώς καλύπτει μόνον την περιοχή απορροής της υπό μελέτη λεκάνης, ενώ για τα κελιά που βρίσκονται εκτός λεκάνης σημειώνεται αρνητική τιμή (-99). Οι γραμμές και οι στήλες εκτός της λεκάνης επιτρέπονται στις πλευρές του πίνακα αφού το πρόγραμμα τις αναγνωρίζει και δεν τις λαμβάνει υπόψη.

Σχήμα 5.2: Αρχείο με τοπογραφικά δεδομένα (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους)

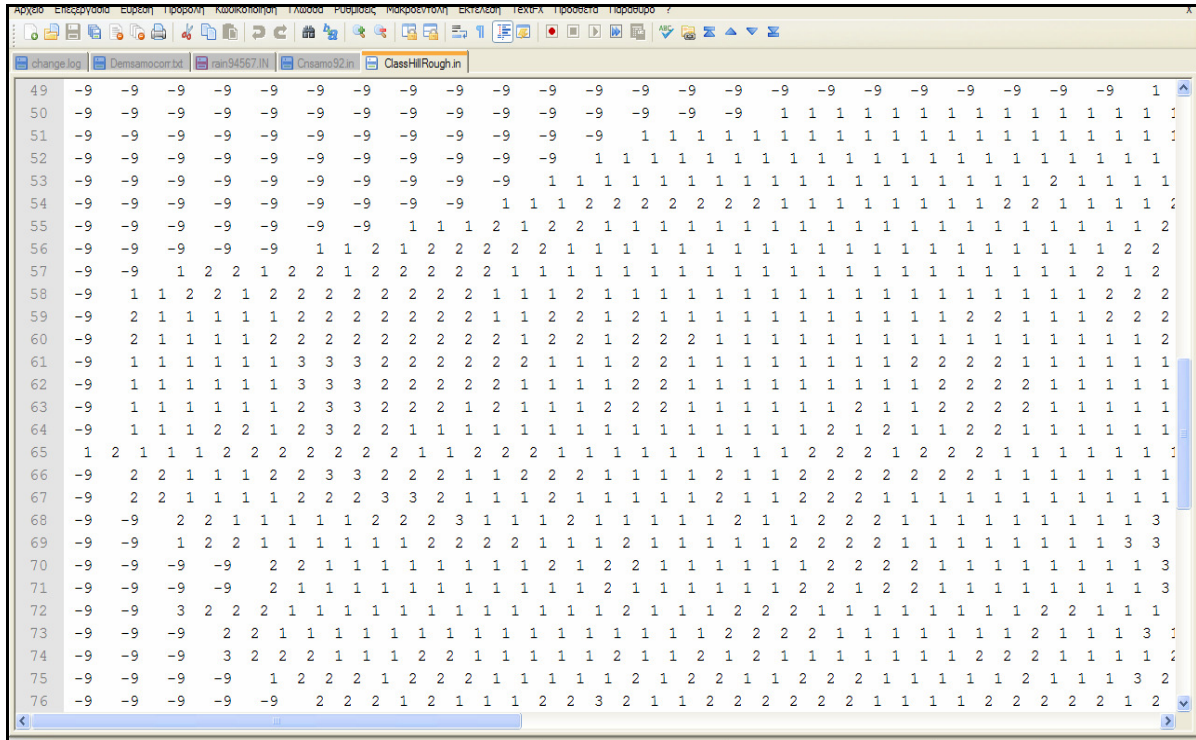
5.1.3 Ικανότητα διήθησης

Ο αριθμός καμπύλης απορροής CN (Curve Number) για κάθε κελί περιλαμβάνεται στο αρχείο Curve Number (Σχήμα 5.3), ως ένας πίνακας που διαβάζεται σαν πραγματικός αριθμός με ελεύθερη μορφή. Η παράμετρος CN έχει λάβει τιμές από 0 μέχρι 100. Οι αρνητικές τιμές λαμβάνονται για κελιά εκτός της λεκάνης.

Σχήμα 5.3: Αρχείο με τους αριθμούς CN

5.1.4 Δεδομένα τραχύτητας εδάφους

Η κλάση της τραχύτητας σε κάθε κελί καννάβου δίδεται στο φάκελο των κλάσεων τραχύτητας Strickler (Σχήμα 5.4). Οι τάξεις σημειώνονται με θετική τιμή, με αυξανόμενο ακέραιο αριθμό (1, 2, 3, 4, ...), ενώ αρνητικές τιμές (-9) χρησιμοποιούνται για τα κελιά εκτός της λεκάνης.



Σχήμα 5.4: Αρχείο με τους δείκτες τραχύτητας

5.2 Εφαρμογή στο AFFDEF

5.2.1 Εισαγωγή

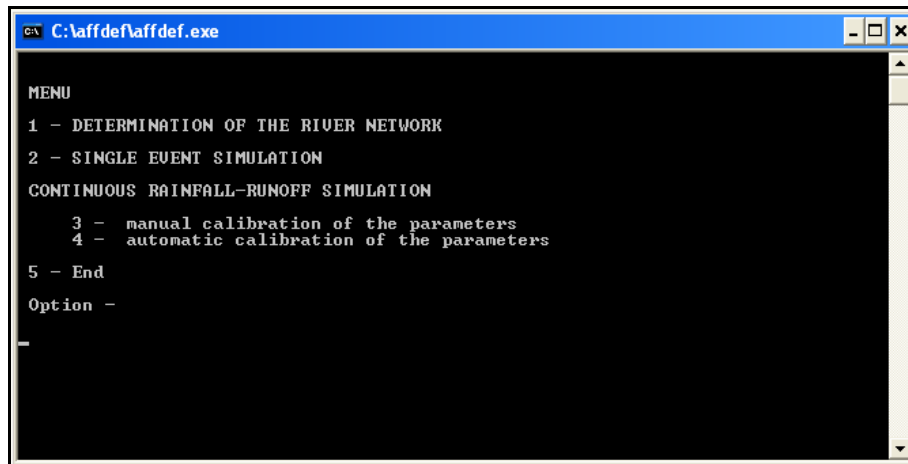
Στην παρούσα εργασία, για την εκτέλεση του AFFDEF, χρησιμοποιείται ο μεταφραστής G95 που διατίθεται ελεύθερα από το διαδίκτυο (<http://www.g95.org/>), αφού πρώτα έχει εγκατασταθεί στον υπολογιστή το πρόσθετο mingw (<http://www.mingw.org/>). Οι αντίστοιχες ιστοσελίδες περιλαμβάνουν πλήρεις οδηγίες για την εγκατάστασή τους. Για τον εντοπισμό των σφαλμάτων δε χρησιμοποιήθηκε κάποιο πρόγραμμα, αλλά εφαρμόστηκε χειροκίνητη αποσφαλμάτωση (debugging), όπου αυτό χρειάστηκε.

Εισάγοντας τα αρχεία που παρουσιάστηκαν προηγουμένως επιχειρείται η μετάφραση του κώδικα. Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθούν παρατηρήσεις που προέκυψαν μετά από μελέτη στον κώδικα, αφού σε πρώτη φάση τόσο η ορθή μετάφρασή του όσο και η επιτυχής εκτέλεσή του ήταν δύσκολη. Συγκεκριμένα, ο χρήστης θα πρέπει να χρησιμοποιεί την αγγλική γλώσσα στον υπολογιστή όπου εργάζεται έτσι ώστε να αποφευχθεί σύγχυση με τα δεκαδικά ψηφία. Παρατηρήθηκε ωστόσο, ότι για την επιτυχή μετάφραση του κώδικα, θα πρέπει επιπλέον η τελεία (.) να αντικατασταθεί με κόμμα (,) στο αρχείο με τις τάξεις των τραχυτήτων του εδάφους. Ακόμη, για εκείνους που θα εκτελέσουν και την αυτόματη βαθμονόμηση, σημειώνεται ότι θα πρέπει να διορθωθεί η αρχική τιμή της μεταβλητής i_{pr} στη

ρουτίνα Scein.for και να αυξηθεί από 5 σε μεγαλύτερη τιμή (π.χ., 15). Τέλος, για την παρουσίαση των απορροών που εκτιμώνται μετά από προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος στο αρχείο Outlet.out, προστέθηκε η αντίστοιχη εντολή στον κώδικα και, έτσι, εκτελώντας τελικά την επιλογή 5 το αρχείο Outlet.out περιλαμβάνει τις απορροές.

5.2.2 Εκτέλεση AFFDEF για μεμονωμένο γεγονός βροχόπτωσης

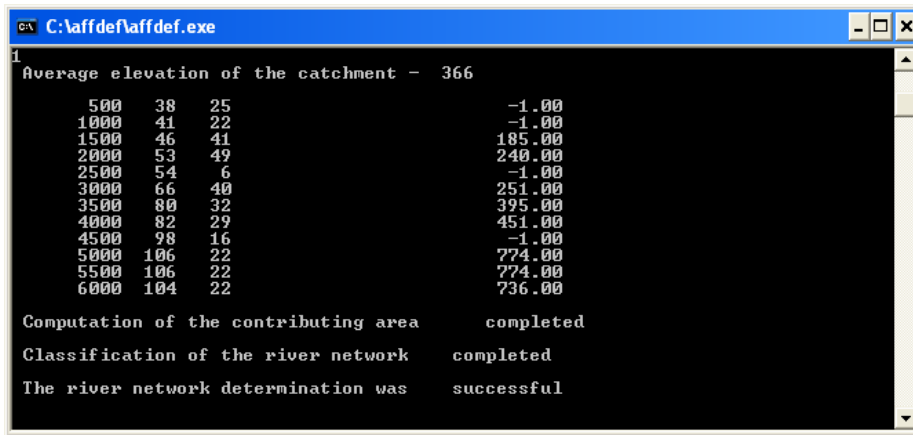
Το AFFDEF εκτελείται από τη γραμμή εντολών του MS-DOS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Εκτέλεση AFFDEF

Από τις πέντε επιλογές που παρέχονται, στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθούν οι δύο πρώτες, αφού η πρώτη αφορά τον καθορισμό του υδρολογικού δικτύου και η δεύτερη την προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, έχει υπολογιστεί το μέσο υψόμετρο της λεκάνης στα 366 m, ενώ παράλληλα η γραμμή εντολών μας ενημερώνει ότι έχει ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της συμβάλλουσας περιοχής καθώς και η ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου. Πράγματι, έχουν παραχθεί τα αρχεία:

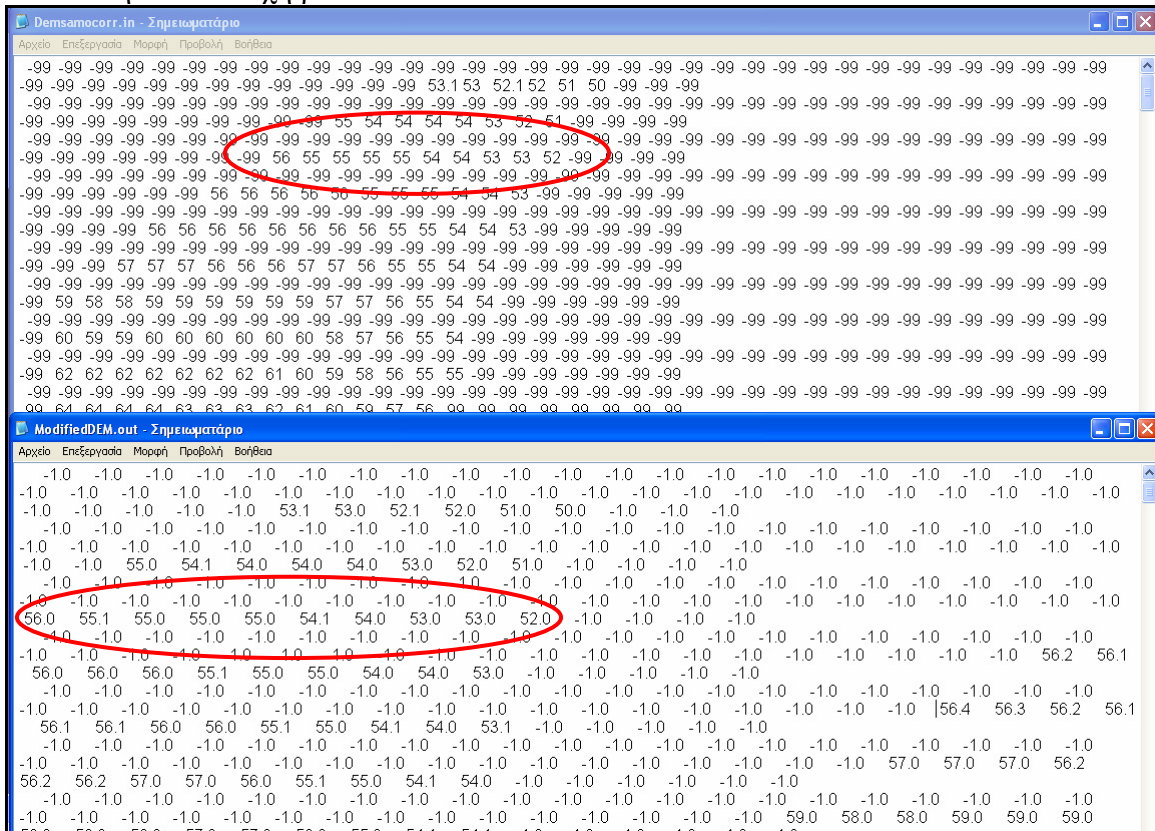
- Διορθωμένο Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους: *ModifiedDEM.out*
- Δείκτης κλίσεων: *Slopepointer.out*
- Συμβάλλουσας περιοχής: *ContributingArea.out*
- Ιδιοτήτων κλάδων: *LinkProperties.out*
- Ταξινόμησης Υδρογραφικού δικτύου: *Riverorder.out*



Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα πρώτης επιλογή στο AFFDEF

Διορθωμένο ΨΜΕ (ModifiedDEM)

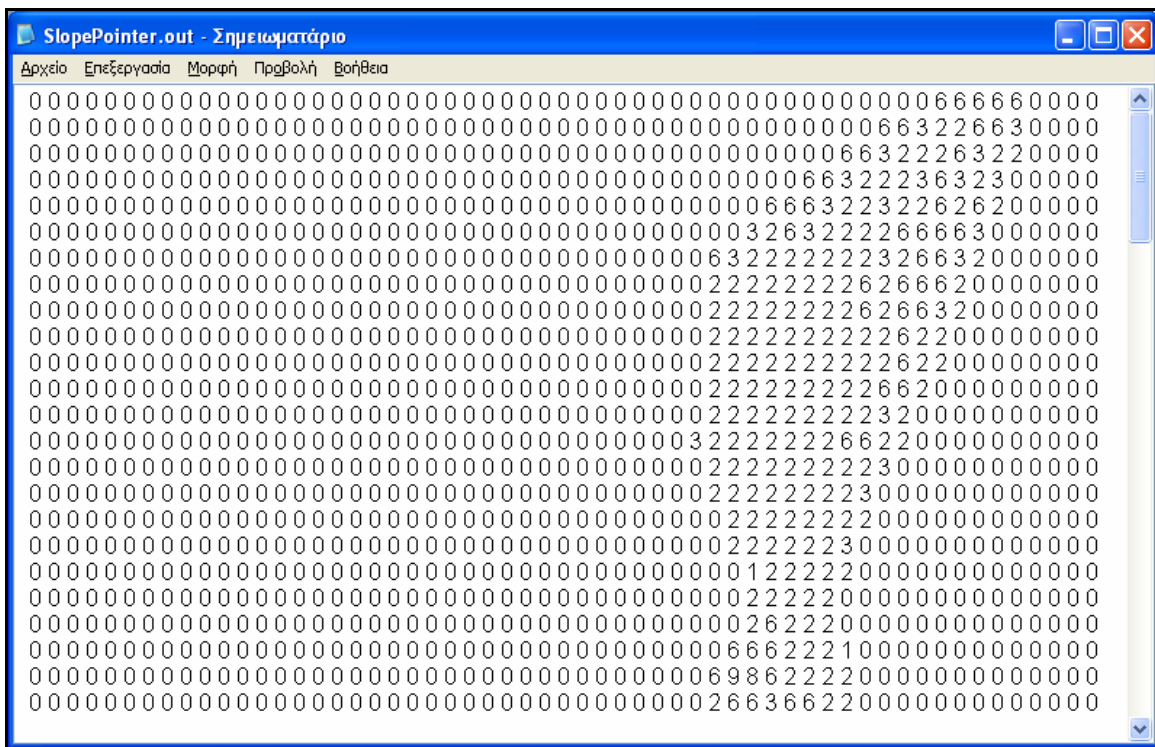
Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μετατροπής του αρχικού ΨΜΕ. Έχουν αφαιρεθεί τα τυχόν σφάλματα, αφού πλέον σε ό,τι θεωρείται βύθισμα (pit) έχει αυξηθεί η τιμή του από 11% από την αντίστοιχη ρουτίνα.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση αρχικού και διορθωμένου ΨΜΕ

Κλίσεις γήινης επιφάνειας (Sloperointer.out)

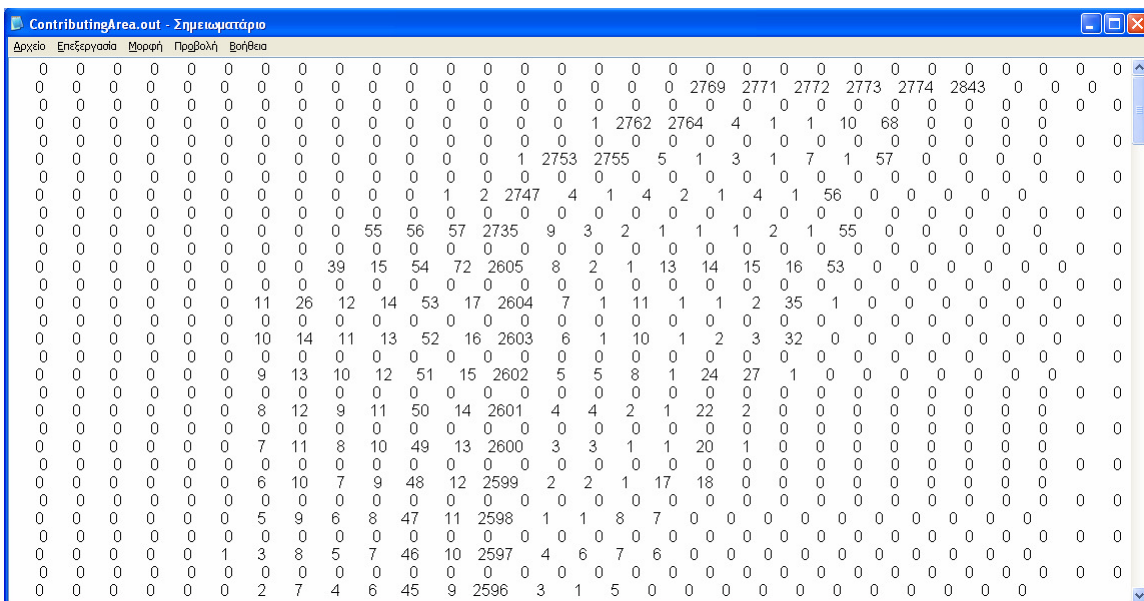
Ο καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου γίνεται θέτοντας σε κάθε κελί του ΨΜΕ ένα μέγιστο δείκτη κλίσης (Σχήμα 5.8). Η κλίση του ΨΜΕ μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά στο υψόμετρο μεταξύ δύο γειτονικών κελιών διαιρούμενη με τη μεταξύ τους απόσταση. Η κλίση, λοιπόν, που σχετίζεται με ένα κελί είναι η κλίση από το εν λόγω κελί προς ένα γειτονικό μικρότερης κλίσης, αφού λογικά προς αυτή την κατεύθυνση ρέει και το νερό.



Σχήμα 5.8: Κλίσεις ΨΜΕ (Slopepointer.out)

Συμβάλλουσα περιοχή (ContributingArea.out)

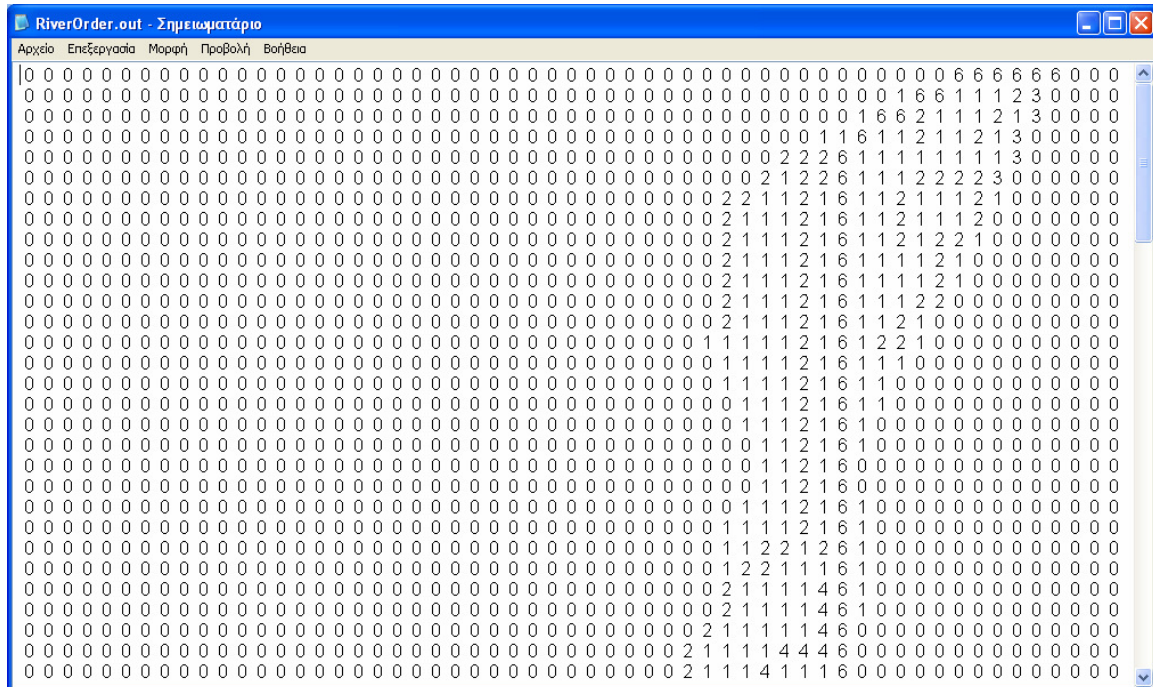
Στο αρχείο αυτό, περιλαμβάνεται η συμβάλλουσα περιοχή, ο αριθμός δηλαδή των κελιών που ρέουν σε κάθε κελί. Εφαρμόζεται η μέθοδος D8 (8 διευθύνσεις ροής) (O' Callaghan and Mark, 1984), σύμφωνα με την οποία προσδιορίζεται η ροή από κάθε κελί του καννάβου σε έναν από τους οκτώ γείτονές του, στην κατεύθυνση με την πιο απότομη καθοδική κλίση (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Συμβάλλουσα περιοχή (ContributingArea.out)

Τάξη Υδρογραφικού δικτύου (Riverorder.out)

Στο αρχείο αυτό (Σχήμα 5.10), παρουσιάζεται η τάξη του υδρογραφικού δικτύου. Σε κάθε κελί φαίνεται ο αριθμός της κλάσης όπως υπολογίστηκε με το σύστημα ταξινόμησης κατά Strahler, ενώ ως μέγιστη τάξη του δικτύου προκύπτει η 6^η.



The screenshot shows a software window titled "RiverOrder.out - Σημειωματάριο" with a menu bar containing "Αρχείο", "Επεξεργασία", "Μορφή", "Προβολή", and "Βοήθεια". The main area displays a grid of numerical data representing river order values. The grid is approximately 30 rows by 100 columns. The values are integers ranging from 0 to 6, representing the Strahler order of the river network. The data is organized in a way that suggests a flow network, with higher values indicating higher-order streams. The window has a standard Windows-style title bar and a scroll bar on the right side.

Σχήμα 5.10: Τάξη Υδρογραφικού δικτύου (Riverorder.out)

Χαρακτηριστικά κλάδων υδρολογικού δικτύου (LinkProperties.out)

Το αρχείο των ιδιοτήτων των συνδέσμων (Σχήμα 5.11) περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των ακραίων κελιών που ορίζουν τον κλάδο, την τάξη καθώς και το μήκος του κλάδου.

| IIN | JIN | IFIN | JFIN | ORD | LEN |
|-----|-----|------|------|-----|-----|
| 2 | 46 | 2 | 47 | 1 | 1.0 |
| 2 | 50 | 1 | 50 | 1 | 1.0 |
| 2 | 51 | 2 | 52 | 1 | 1.0 |
| 3 | 44 | 3 | 45 | 1 | 1.0 |
| 3 | 48 | 2 | 48 | 1 | 1.0 |
| 3 | 50 | 3 | 51 | 1 | 1.0 |
| 3 | 52 | 2 | 52 | 1 | 1.0 |
| 4 | 42 | 4 | 44 | 1 | 2.0 |
| 4 | 46 | 3 | 46 | 1 | 1.0 |
| 4 | 49 | 4 | 50 | 1 | 1.0 |
| 4 | 51 | 3 | 51 | 1 | 1.0 |
| 5 | 47 | 4 | 47 | 1 | 1.0 |
| 5 | 48 | 1 | 49 | 1 | 4.4 |
| 5 | 49 | 4 | 50 | 1 | 2.0 |
| 5 | 51 | 5 | 52 | 1 | 1.0 |
| 6 | 46 | 4 | 47 | 1 | 2.4 |
| 7 | 45 | 3 | 45 | 1 | 4.0 |
| 7 | 47 | 6 | 47 | 1 | 1.0 |
| 7 | 48 | 7 | 50 | 1 | 2.0 |
| 7 | 51 | 6 | 51 | 1 | 1.0 |
| 8 | 45 | 8 | 46 | 1 | 1.0 |
| 8 | 47 | 8 | 50 | 1 | 3.0 |
| 9 | 47 | 9 | 48 | 1 | 1.0 |
| 9 | 50 | 8 | 50 | 1 | 1.0 |
| 10 | 47 | 10 | 48 | 1 | 1.0 |
| 11 | 46 | 9 | 46 | 1 | 2.0 |
| 11 | 47 | 11 | 48 | 1 | 1.0 |
| 11 | 49 | 9 | 49 | 1 | 2.0 |
| 12 | 46 | 12 | 47 | 1 | 1.0 |

Σχήμα 5.11: Χαρακτηριστικά κλάδων υδρογραφικού δικτύου (LinkProperties.out)

Στη συνέχεια, επιλέγεται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος (επιλογή -2-). Υπολογίζονται η μέση κλίση της λεκάνης απορροής στα 0.1, καθώς και ο μέσος αριθμός CN στα 72.7 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12.

```

C:\affdef\affdef.exe
2
Average slope of the catchment 0.111114874

Curve Number statistics
Average 72.702705
Variance 80.07374
Standard deviation 8.948393

23736 steps of rainfall data have been skipped
10 steps of rainfall data have been read

```

Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα επιλογής προσομοίωσης μεμονωμένου γεγονότος

Παράλληλα, προκύπτει το αρχείο outlet.out, που περιλαμβάνει τις υπολογισμένες απορροές ανά μία ώρα, στην έξοδο που έχει καθοριστεί. Η προσομοίωση υπολογίζει παροχή αιχμής πλημμύρας ίση με $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ και πλημμυρικό όγκο ίσο με $29.52 \times 10^3 \text{ m}^3$. Σύμφωνα με τις απορροές αυτές, θα πραγματοποιηθεί η εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών στο HEC-HMS. Ακόμη, παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής της υπολογισμένης απορροής σε οποιοδήποτε

φατνίο, αρκεί να έχει οριστεί ο αριθμός των φατνίων και οι συντεταγμένες τους στο αρχείο Affdef.in και DimArrays.in.

Επιπλέον, παράγονται το αρχείο timestep.out που ενημερώνει για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, το αρχείο RainThDistr όπου φαίνεται η κατανομή επιρροής των βροχομετρικών σταθμών σύμφωνα με τη μέθοδο Thiessen καθώς και το αρχείο με τις κλίσεις των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.

5.3 Εκτίμηση πλημμύρας Εικονικής λεκάνης απορροής στο HEC - HMS

5.3.1 Εισαγωγή

Όπως ακολουθήθηκε στην εφαρμογή στη λεκάνη του Πηνειού, ανάντη της Σαρακίνας, έτσι και εδώ εξετάζονται τέσσερα σενάρια αριθμού υπολεκανών. Στο πρώτο σενάριο υπολογίζεται η απορροή θεωρώντας μία ενιαία λεκάνη απορροής, στο δεύτερο εξετάζεται η περίπτωση τριών υπολεκανών, στο τρίτο προσδιορίζονται πέντε λεκάνες ενώ στο τέταρτο σενάριο μελετώνται περισσότερες υπολεκάνες (εννιά). Στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.3, παρουσιάζονται στο χάρτη οι υπολεκάνες για κάθε σενάριο μελέτης.

Για την προσομοίωση της λεκάνης ακολουθούνται τα ίδια βήματα που περιγράφηκαν και στη λεκάνη της Σαρακίνας. Σημειώνεται ότι οι κάνναβοι ΨΜΕ και αριθμού καμπύλης CN που χρησιμοποιήθηκαν στο AFFDEF εισάγονται στο ArcGIS για επεξεργασία, προσθέτοντας αρχικά στο αρχείο τις παρακάτω γραμμές:

```
ncols      57
nrows      109
xllcorner  237735.37860389
yllcorner  4377965.310974
cellsize   250
NODATA_value -99
```

Δηλώνονται δηλαδή: ο αριθμός των στηλών και γραμμών του καννάβου που θα δημιουργηθεί σε περιβάλλον GIS, η τετμημένη του ακραίου φατνίου βόρεια και η τεταγμένη του ακραίου σημείου νότια. Οι συντεταγμένες αυτές είναι τυχαίες και σε καμία περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν τη χωροθέτηση της πραγματικής λεκάνης απορροής απ' όπου ελήφθη το ΨΜΕ. Ακόμη, σημειώνεται το μέγεθος του κελιού του καννάβου και οι τιμές των φατνίων που βρίσκονται εκτός λεκάνης απορροής. Αυτή η μορφοποίηση είναι εκείνη που απαιτείται από το ArcGIS για να διαβάσει τα αρχεία .txt. Έπειτα με την εντολή ASCII to Raster, μετατρέπονται τα αρχεία σε καννάβους που μπορούν να υποστούν επεξεργασία από το ArcGIS.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο μοντέλο AFFDEF. Στόχος είναι οι απορροές που υπολογίζονται στο HEC-HMS να προσεγγίσουν τις εκτιμημένες τιμές από το AFFDEF. Για το σκοπό αυτό, βελτιστοποιούνται παράμετροι όπως ο αριθμός καμπύλης CN, ο χρόνος υστέρησης, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας για κάθε σενάριο. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης γίνεται χειροκίνητα από το χρήστη, πραγματοποιώντας λογικές υποθέσεις. Τελικά, προκύπτουν οι τιμές των παραμέτρων

που ελαχιστοποιούν τα σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής πλημμύρας και του πλημμυρικού όγκου.

5.3.2 Εξέταση επεισοδίου πλημμύρας

Μελετάται η πλημμύρα στην εικονική λεκάνη απορροής για το ίδιο επεισόδιο που μελετήθηκε και στο μοντέλο AFFDEF. Η προσομοίωση στο AFFDEF υπολόγισε αιχμή πλημμύρας ίση με $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ και πλημμυρικό όγκο ίσο με $29.52 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η προσομοίωση στο HEC-HMS για τα τέσσερα σενάρια μελέτης που εξετάζονται. Παράλληλα, βελτιστοποιούνται οι παράμετροι του συστήματος έτσι ώστε να εκτιμηθούν απορροές όσο το δυνατόν πιο όμοιες με τις εκτιμημένες από το AFFDEF. Συγκεκριμένα, βελτιστοποιούνται οι τιμές του αριθμού καμπύλης CN, του χρόνου υστέρησης, του χρονικού βήματος προσομοίωσης και του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Σε πρώτη φάση εισάγονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και στην προσομοίωση με το μοντέλο AFFDEF και υπολογίζονται οι απορροές. Έτσι, ο πλημμυρικός όγκος εκτιμάται περί τα $0.5 \times 10^3 \text{ m}^3$, πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο υπολογισμένο στο AFFDEF. Ακόμη και η παροχή αιχμής υποεκτιμάται κατά 54.5%. Ακολουθεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έτσι ώστε να αυξηθούν οι πλημμυρικές απορροές.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης

Η αύξηση του αριθμού CN και η μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 10% οδηγεί σε αύξηση της παροχής αιχμής στα $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Παρ' όλα αυτά, ο πλημμυρικός όγκος δε μεταβάλλεται καθόλου.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Με σκοπό την αύξηση του συνολικού όγκου απορροής επαναφέρονται οι αρχικές τιμές CN και χρόνου υστέρησης και μειώνεται το βήμα προσομοίωσης στο μισάωρο. Η μείωση αυτή, προκαλεί αύξηση τόσο της παροχής αιχμής όσο και του πλημμυρικού όγκου. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής παρατηρείται τώρα στα $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο όγκος στα $27.3 \times 10^3 \text{ m}^3$. Για την επίτευξη όμως καλύτερης εκτίμησης απαιτείται περαιτέρω βελτιστοποίηση.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Το προηγούμενο βήμα προσέγγισε τα αποτελέσματα του AFFDEF, ωστόσο επιχειρείται επιπλέον αύξηση των απορροών, με αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Η αλλαγή αυτή προκαλεί παροχή αιχμής στα $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ μικρότερη από την υπολογισμένη στο AFFDEF κατά 27.27%. Ο πλημμυρικός όγκος όμως αυξήθηκε πολύ, ξεπερνώντας τον αντίστοιχο του AFFDEF κατά 15.51%. Εξετάζεται η αύξηση του αριθμού CN κατά 20% και η παράλληλη μείωση του χρόνου υστέρησης κατά το ίδιο ποσοστό. Παρατηρείται υπερβολική αύξηση τόσο της παροχής αιχμής, όσο και του πλημμυρικού όγκου, αφού η πρώτη φτάνει στα $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο δεύτερος στα $51.6 \times 10^3 \text{ m}^3$.

- Μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας

Χρησιμοποιείται η μεταβολή του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης κατά 10% και εξετάζεται η μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 60%. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν παροχή αιχμής στα $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ και πλημμυρικός όγκος στα $42.9 \times 10^3 \text{ m}^3$, τιμές που απέχουν από τις αρχικά εκτιμημένες στο AFFDEF κατά 9.09% και 42.9% αντίστοιχα. Στη συνέχεια μειώνεται εκ νέου το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 20%. Με τη μεταβολή αυτή

προκύπτουν ικανοποιητικές τιμές απορροών. Ειδικότερα, η παροχή αιχμής προσεγγίστηκε χωρίς κανένα σφάλμα και ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμήθηκε κατά 28.42%. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται καθυστέρηση στο χρόνο εμφάνισης της αιχμής της πλημμύρας, γεγονός που δηλώνει σφάλμα στην εκτίμηση του χρόνου υστέρησης.

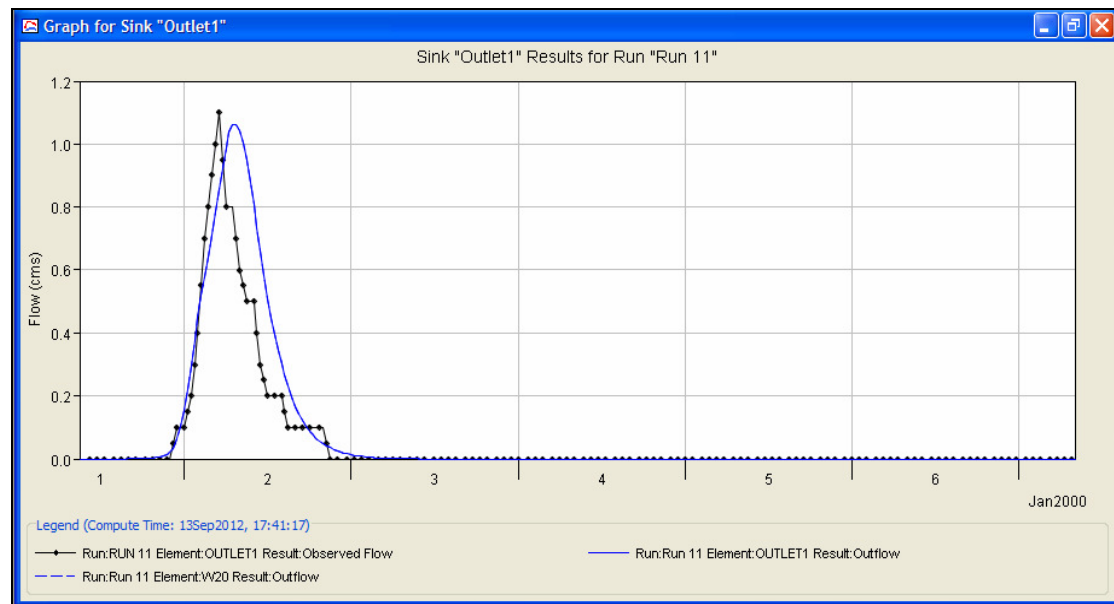
- Επαναφορά του αριθμού καμπύλης CN και του ποσοστού της αδιαπέρατης επιφάνειας και αύξηση του χρόνου υστέρησης

Επαναφέρονται οι αρχικές τιμές του CN και του χρόνου υστέρησης και αυξάνεται κατά 50% το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας σε σχέση με το αρχικό. Η παροχή αιχμής που προκύπτει είναι ίση με $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο όγκος πλημμύρας ίσος με $36.5 \times 10^3 \text{ m}^3$. Γίνεται αντιληπτό ότι ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμήθηκε κατά 23.65%, ενώ, από την άλλη, η παροχή αιχμής υποεκτιμάται κατά 27.27%. Όπως και στο προηγούμενο βήμα, έτσι και εδώ η αιχμή σημειώνεται λίγες ώρες πιο αργά σε σχέση με εκείνη που εκτιμήθηκε από το AFFDEF.

- Μείωση του χρόνου υστέρησης

Με σκοπό την εμφάνιση της αιχμής πιο γρήγορα, αλλά και την αύξηση της παροχής αιχμής, μειώνεται ο χρόνος υστέρησης κατά 50%. Έτσι, παρατηρείται ταύτιση της παροχής αιχμής με την πραγματική. Η υπερεκτίμηση του πλημμυρικού όγκου τώρα είναι μικρότερη και φτάνει το 21.95%. Παράλληλα, ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής βελτιώθηκε κατά πολύ, αφού απέχει μόλις μισή ώρα από τον αντίστοιχο που υπολογίστηκε από το AFFDEF.

Το Σχήμα 5.13 παράγεται από το HEC-HMS και παρουσιάζει το τελικό υπολογισμένο υδρογράφημα από το HEC-HMS (καμπύλη με μπλε χρώμα) για το σενάριο 1, καθώς και το υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο AFFDEF (καμπύλη με μαύρο χρώμα).



Σχήμα 5.13: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 1).

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

Η προκύπτουσα παροχή αιχμής με τα αρχικά δεδομένα, αγγίζει μόλις τα $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ σε σχέση με τα $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ της εκτιμημένης στο AFFDEF. Ο πλημμυρικός όγκος που εκτιμήθηκε ισούται με $10.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ υποεκτιμώντας κατά 63% τον πραγματικό (από το AFFDEF). Εύκολα γίνεται

αντιληπτό ότι απαιτείται βελτιστοποίηση των παραμέτρων (αριθμός CN, χρόνος υστέρησης, χρονικό βήμα προσομοίωσης) για να αυξηθούν οι υπολογισμένες παροχές.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Σε πρώτη φάση, προσομοιώνεται η λεκάνη αυξάνοντας τον αριθμό CN κατά 10% και μειώνοντας κατά το ίδιο ποσοστό το χρόνο υστέρησης. Η προκύπτουσα όμως παροχή αιχμής ελάχιστα αυξήθηκε, στα $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, όπως και ο όγκος, στα $16.8 \times 10^3 \text{ m}^3$.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Επαναφέρονται οι αρχικές τιμές CN και χρόνου υστέρησης. Στη συνέχεια, μεταβάλλεται ο χρόνος έτσι ώστε να αποδοθούν τιμές παροχής κάθε μισή ώρα (1/2 h). Η παροχή αιχμής δε φαίνεται να μεταβάλλεται και ο πλημμυρικός όγκος εκτιμάται στα $16.3 \times 10^3 \text{ m}^3$.

- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Χρησιμοποιώντας χρονικό βήμα μισής ώρας, αυξάνονται οι τιμές του CN κατά 10% και μειώνονται οι τιμές του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Η παροχή αιχμής εκτιμάται στα $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο όγκος της πλημμύρας είναι ίσος με $19.2 \times 10^3 \text{ m}^3$, τιμές μικρότερες από τις εκτιμημένες στο AFFDEF. Εφαρμόζεται επιπλέον μεταβολή των παραμέτρων κατά 10%, οπότε η παροχή αιχμής αυξάνεται στα $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο όγκος στα $25.9 \times 10^3 \text{ m}^3$, υποεκτιμώντας έτσι τις απορροές του AFFDEF κατά 27.7% και 12.27% αντίστοιχα.

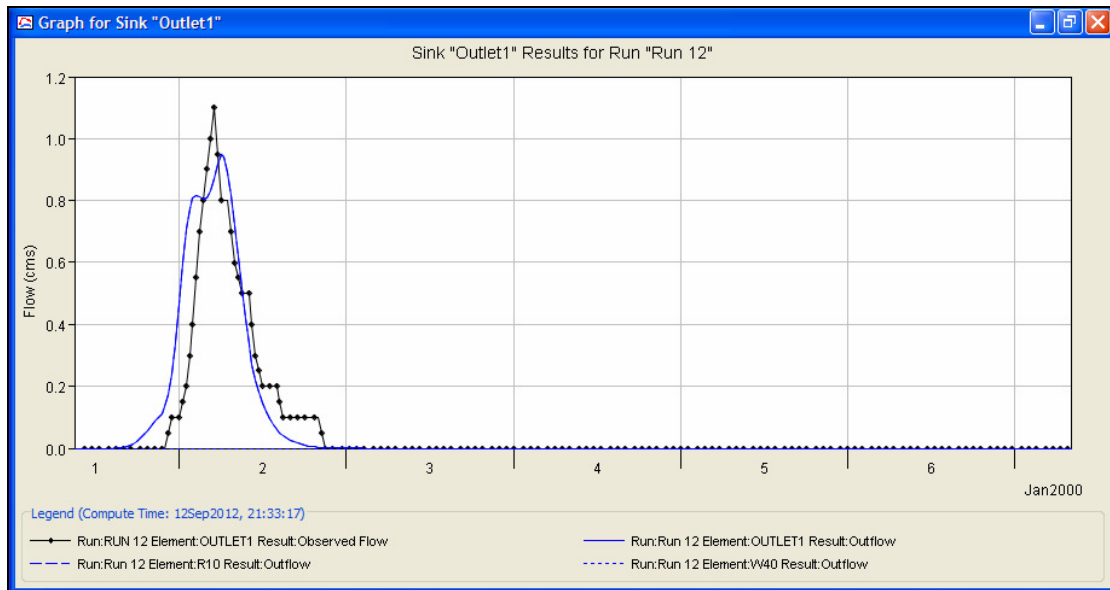
- Αύξηση ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας

Σε συνέχεια του προηγούμενου βήματος, όπου προσομοιώνεται η λεκάνη θεωρώντας αυξημένο CN και μειωμένο χρόνο υστέρησης κατά 20%, αυξάνεται και το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 10%. Η παροχή αιχμής που προκύπτει είναι μεγαλύτερη σε σχέση με πριν, αλλά υποεκτιμά την πραγματική κατά 18.2%. Όσον αφορά στον πλημμυρικό όγκο, εκείνος αυξήθηκε και υπολογίζεται μεγαλύτερος από τον παραγόμενο στο AFFDEF κατά 11%. Η εκτίμηση αυτή της απορροής είναι η καλύτερη μέχρι τώρα και θεωρείται ικανοποιητική.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

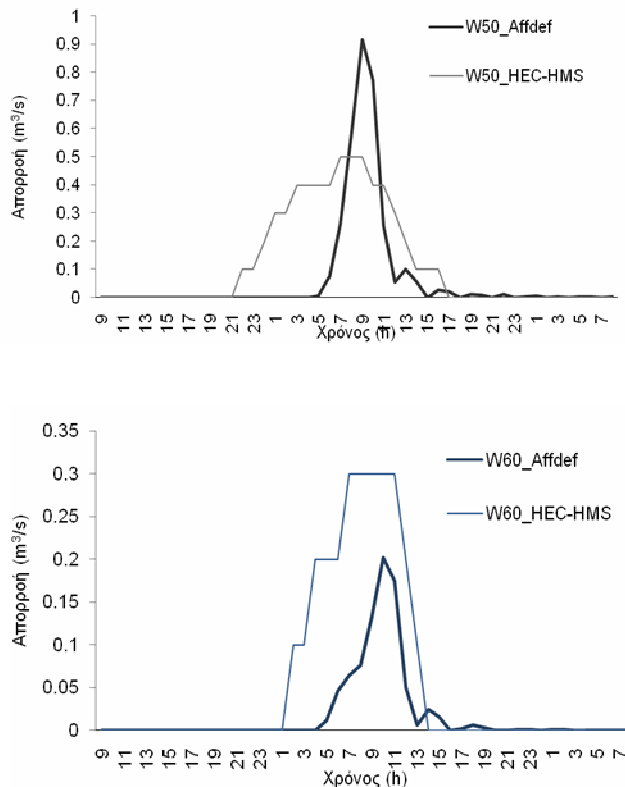
Επιχειρείται μείωση του πλημμυρικού όγκου που υπολογίστηκε παραπάνω, με μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Πράγματι ο πλημμυρικός όγκος μειώθηκε στα $32.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ ήτοι 10% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στο AFFDEF. Η παροχή αιχμής της πλημμύρας δε, εκτιμάται ίση με την προηγούμενη υπολογισμένη.

Το Σχήμα 5.14 παράγεται από το HEC-HMS και παρουσιάζει το τελικό υπολογισμένο υδρογράφημα από το HMS (καμπύλη με μπλε χρώμα) για το σενάριο 2, καθώς και το υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο AFFDEF (καμπύλη με μαύρο χρώμα).



Σχήμα 5.14: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 2).

Το HEC-HMS παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των απορροών στην έξοδο κάθε υπολεκάνης. Έτσι, μετά την προσομοίωση, επιλέγοντας από την καρτέλα των αποτελεσμάτων (Results), την κάθε υπολεκάνη, παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα για κάθε μια. Το Σχήμα 5.15 που ακολουθεί συγκρίνει τα υδρογραφήματα στην έξοδο κάθε υπολεκάνης που προέκυψαν από το HEC-HMS σε σχέση με εκείνα που υπολογίζονται στο μοντέλο AFFDEF. Όπως παρατηρείται, τα πλημμυρικά επεισόδια σημειώνονται παρόμοιες ώρες. Ωστόσο το επεισόδιο που προκύπτει από το HEC-HMS έχει μεγαλύτερη διάρκεια. Από την άλλη, ο όγκος και η παροχή αιχμής της απορροής παρουσιάζονται με διαφορές ανάμεσα στις υπολογισμένες τιμές από τα δύο μοντέλα.



Σχήμα 5.15: Διαγράμματα απορροών στις εξόδους των υπολεκανών όπως προκύπτουν από το HEC-HMS και AFFDEF

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

Προσομοιώνοντας τη λεκάνη αρχικά, σημειώνεται όγκος πλημμύρας ίσος με $15 \times 10^3 \text{ m}^3$ και παροχή αιχμής ίση με $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμές αρκετά μικρότερες από τις εκτιμημένες στο AFFDEF. Και εδώ, οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη, χρήζουν βελτιστοποίησης.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια έτσι και εδώ εξετάζεται η μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης στο μισό έτσι ώστε να αποδοθούν τιμές παροχής κάθε μισή ώρα. Προκύπτει πολύ μεγαλύτερη παροχή αιχμής, περί τα $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που διαφέρει από την παρατηρημένη κατά 18.2%. Επιπλέον, με αυτή την αλλαγή αυξήθηκε και ο πλημμυρικός όγκος, φτάνοντας τα $53.3 \times 10^3 \text{ m}^3$, ήτοι υπερεκτιμήθηκε κατά 80.6%. Κατά συνέπεια, απαιτείται μείωση των απορροών που υπολογίζονται από το μοντέλο.

- Ταυτόχρονη μείωση του αριθμού CN και αύξηση του χρόνου υστέρησης.

Με μεταβολή του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης κατά 10%, επιτυγχάνεται μείωση των απορροών. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής υπολογίζεται ίση με εκείνη που εκτιμήθηκε στο AFFDEF. Ο πλημμυρικός όγκος όμως εξακολουθεί να είναι υπερεκτιμημένος σε πολύ μεγάλο ποσοστό, αφού προσεγγίζει τα $47.4 \times 10^3 \text{ m}^3$.

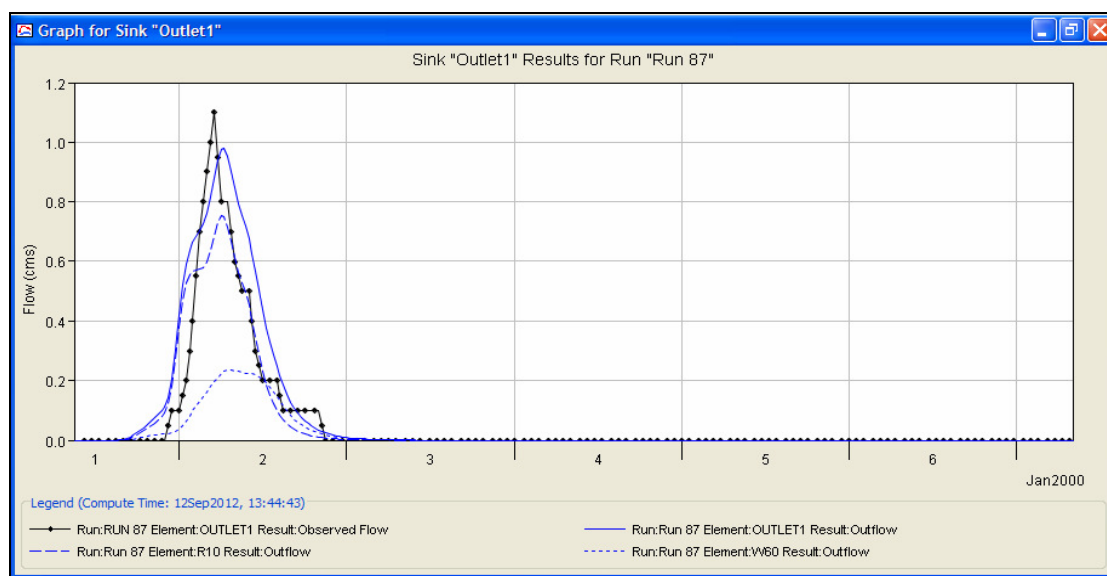
- Μείωση ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας

Η μείωση του ποσοστού της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 40% οδηγεί σε μείωση των τιμών τόσο του πλημμυρικού όγκου όσο και της παροχής αιχμής. Η παροχή αιχμής μειώνεται πλέον και υπολογίζεται ίση με $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ ο όγκος προσεγγίζεται στα $38.5 \times 10^3 \text{ m}^3$ παραμένοντας μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του AFFDEF.

- Επαναφορά του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης.

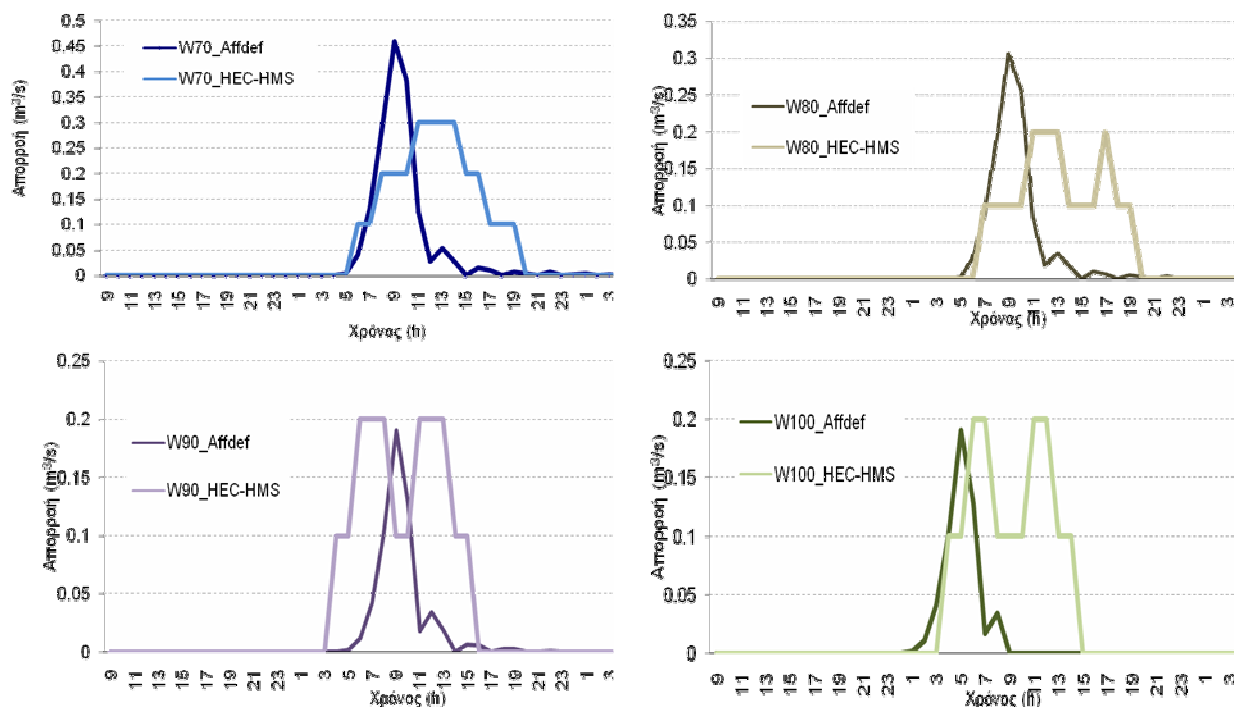
Επαναφέρονται οι αρχικές τιμές των παραμέτρων CN και χρόνου υστέρησης και εφαρμόζεται η μείωση στο ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας του προηγούμενου βήματος. Έτσι, προκύπτει παροχή αιχμής ίση με $1 \text{ m}^3/\text{s}$ δηλαδή μόλις 9.1% υποεκτιμημένη. Ο πλημμυρικός όγκος εξακολουθεί να είναι μεγάλος ($39.6 \times 10^3 \text{ m}^3$), όμως είναι ο μικρότερος που προκύπτει από τις βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Το Σχήμα 5.16 παρουσιάζει το τελικό υπολογισμένο υδρογράφημα από το HEC-HMS (καμπύλη με μπλε χρώμα) για το σενάριο 3, καθώς και το υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο AFFDEF (καμπύλη με μαύρο χρώμα).



Σχήμα 5.16: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 3).

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού και των απορροών στην έξοδο κάθε υπολεκάνης. Οι τιμές αυτές μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες που προέκυψαν κατά την υδρολογική μελέτη στο AFFDEF. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται, συγκεντρώνοντας στο Σχήμα 5.17 τις απορροές στην έξοδο κάθε υπολεκάνης, όπως προέκυψαν από το AFFDEF και από το HEC-HMS.



Σχήμα 5.17: Διαγράμματα απορροών στις εξόδους των υπολεκανών όπως προκύπτουν από το HEC-HMS και το AFFDEF

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 5.17 οι απορροές που προκύπτουν από το HEC-HMS από την υδρολογική μελέτη σε κάθε υπολεκάνη διαφέρουν σε σχέση με τις αντίστοιχες από το AFFDEF. Η παροχή αιχμής σε κάθε έξοδο φαίνεται να προσεγγίζεται καλά, ωστόσο ο όγκος της απορροής υπερεκτιμάται από το HEC-HMS.

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που εισήχθησαν αρχικά, υπολογίζεται παροχή αιχμής στα $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή αρκετά μικρότερη σε σχέση με την παρατηρημένη, ενώ και ο πλημμυρικός όγκος υποεκτιμάται κατά 47.15%. Εξετάζονται μεταβολές του αριθμού CN και του χρόνου υστέρησης καθώς και μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης.

- Μείωση του χρονικού βήματος προσομοίωσης (time interval)

Το χρονικό βήμα προσομοίωσης μειώνεται από μία ώρα στη μισή, με αποτέλεσμα να προκύπτει λίγο μεγαλύτερος όγκος πλημμύρας ($26.6 \times 10^3 \text{ m}^3$), και ελάχιστα μεγαλύτερη παροχή αιχμής ($0.7 \text{ m}^3/\text{s}$). Οι τιμές των απορροών, λοιπόν, είναι ακόμη υποεκτιμημένες γι' αυτό και γίνεται περαιτέρω προσπάθεια αύξησής τους.

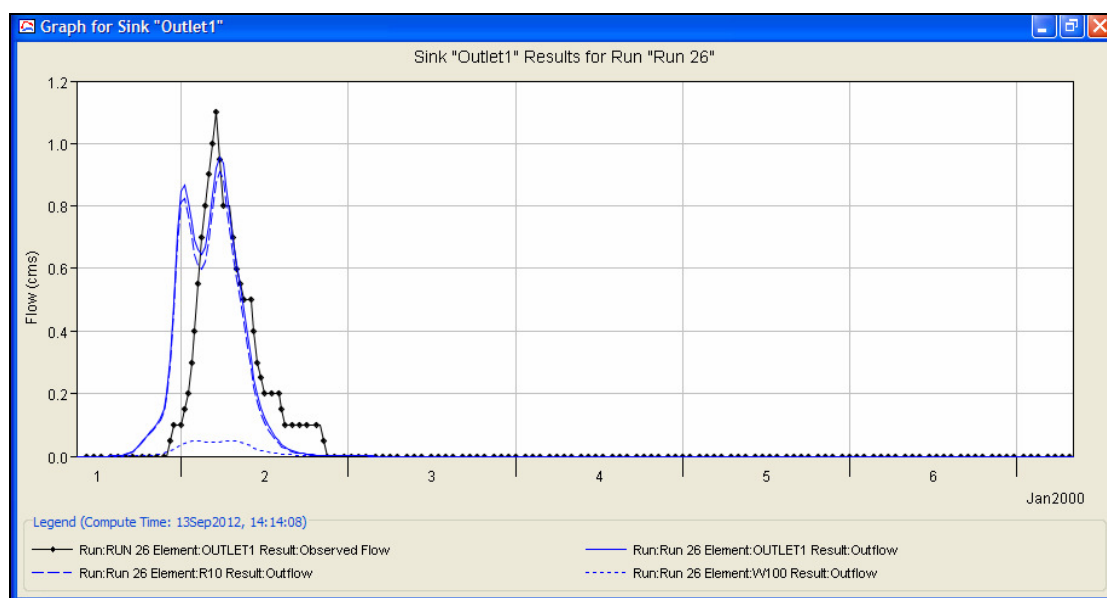
- Ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης.

Εφόσον η μεταβολή του χρονικού βήματος δεν οδήγησε σε ιδιαίτερα μεγάλες τιμές παροχών, απαιτείται αύξησή τους. Αυτό μπορεί να συμβεί με την αύξηση του αριθμού CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 10%. Υπολογίζονται αυξημένη παροχή αιχμής, στα $1 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή που υποεκτιμά την αντίστοιχη από το AFFDEF κατά 9.1% και όγκος πλημμύρας στα $33.6 \times 10^3 \text{ m}^3$, δηλαδή 13.82% μεγαλύτερος από τον υπολογισμένο στο AFFDEF. Περαιτέρω αύξηση του CN και μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 20% οδηγεί σε μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές.

- Μείωση αδιαπέρατης επιφάνειας

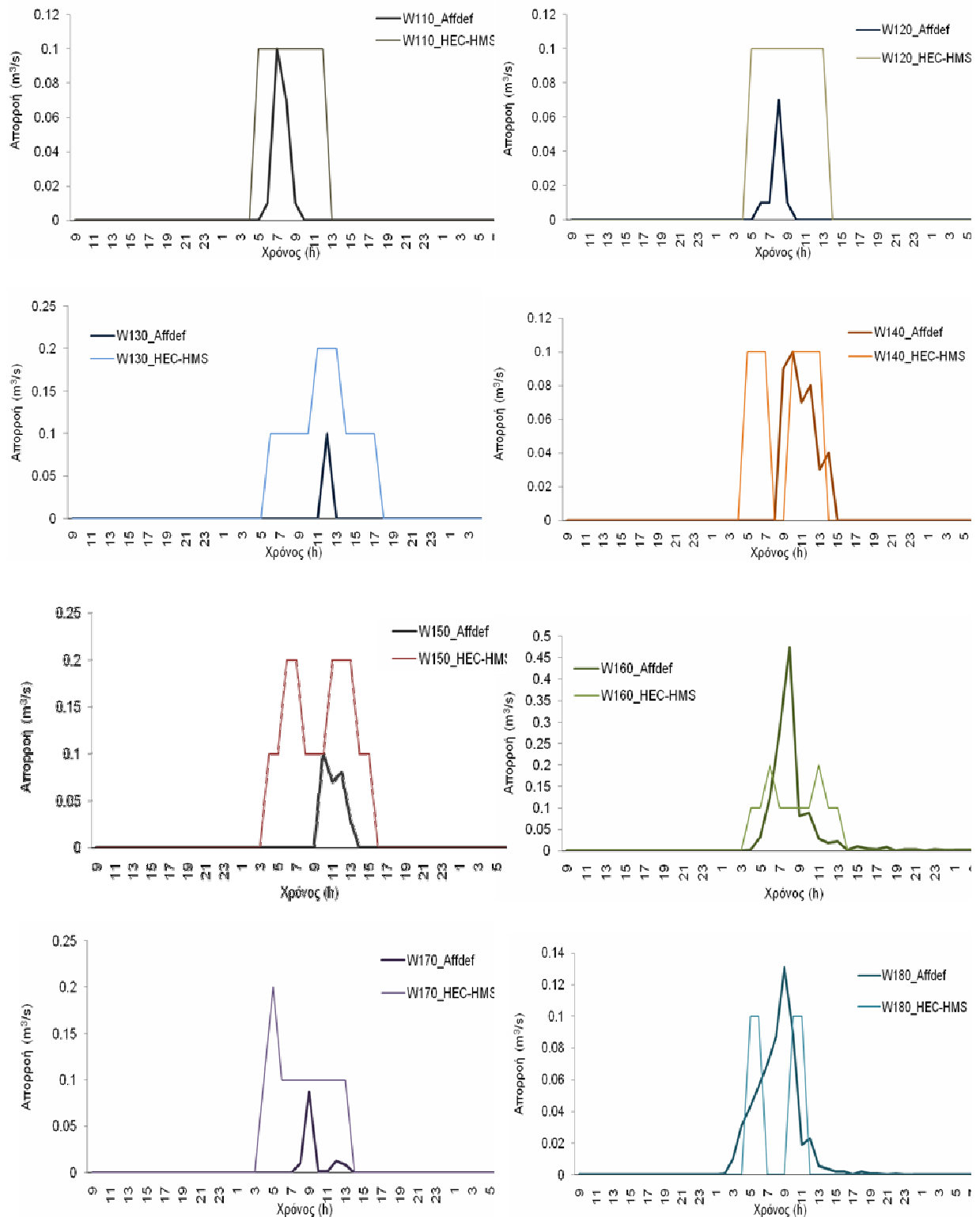
Ελέγχεται εάν η μείωση της αδιαπέρατης επιφάνειας κατά 30% θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση του αυξημένου πλημμυρικού όγκου. Η προσομοίωση αυτή, αποδίδει πράγματι μικρότερο πλημμυρικό όγκο που φτάνει στα $33.5 \times 10^3 \text{ m}^3$. Η τιμή αυτή φαίνεται ότι υπερεκτιμά τον εκτιμημένο όγκο από το AFFDEF κατά 13.48%. Όσον αφορά στην παροχή αιχμής δε σημειώνεται αλλαγή από το προηγούμενο βήμα, οπότε παραμένει η υποεκτίμησή της κατά 9.1%. Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η συνδυασμένη μεταβολή του χρονικού βήματος προσομοίωσης, του αριθμού καμπύλης CN, του χρόνου υστέρησης και του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας αποδίδει την ακριβέστερη εκτίμηση της μέγιστης απορροής για το συγκεκριμένο σενάριο.

Το Σχήμα 5.18 παράγεται από το HEC-HMS και παρουσιάζει το τελικό υπολογισμένο υδρογράφημα από το HEC-HMS (καμπύλη με μπλε χρώμα) για το σενάριο 4, καθώς και το υδρογράφημα που εκτιμήθηκε στο AFFDEF (καμπύλη με μαύρο χρώμα).



Σχήμα 5.18: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 4).

Όπως και στον προηγούμενα σενάρια, έτσι και εδώ πραγματοποιείται σύγκριση των απορροών στην έξοδο κάθε υπολεκάνης όπως εκτιμήθηκαν από τα δύο μοντέλα (Σχήμα 5.19).



Σχήμα 5.19: Διαγράμματα απορροών στις εξόδους των υπολεκανών όπως προκύπτουν από το HEC-HMS και το AFFDEF

Όπως παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα σενάρια, το χρονικό διάστημα του πλημμυρικού επεισοδίου είναι παρόμοιο στα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων. Παρά ταύτα, σημειώνονται διαφορές όσον αφορά στον πλημμυρικό όγκο και στην τιμή της αιχμής στις εξόδους των υπολεκανών.

Ο Πίνακας 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζει για κάθε σενάριο τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα των παροχών αιχμής και πλημμυρικών όγκων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση σε σύγκριση με τις απορροές που εκτιμήθηκαν στο AFFDEF.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα για το υπό μελέτη επεισόδιο για τα τέσσερα σενάρια

| | Σενάριο 1 ^ο | | Σενάριο 2 ^ο | | Σενάριο 3 ^ο | | Σενάριο 4 ^ο | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Με δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Μετά τη βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m ³ /s) | 0.5 | 1.1 | 0.4 | 0.9 | 0.6 | 1 | 0.6 | 1 |
| Όγκος (10 ³ m ³) | 0.5 | 36 | 10.9 | 32.5 | 15 | 39.6 | 15.6 | 33.5 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -54.5 | 0 | -63.6 | -18.2 | -45.5 | -9.1 | -41 | -9.1 |
| Σφάλμα στο συν. όγκο (%) | -98.3 | +21.95 | -63.1 | +10 | -49.2 | +34.1 | -47.15 | +13.5 |

5.3.3 Εξέταση επεισοδίου πλημμύρας μετά από ενιαία μεταβολή παραμέτρων

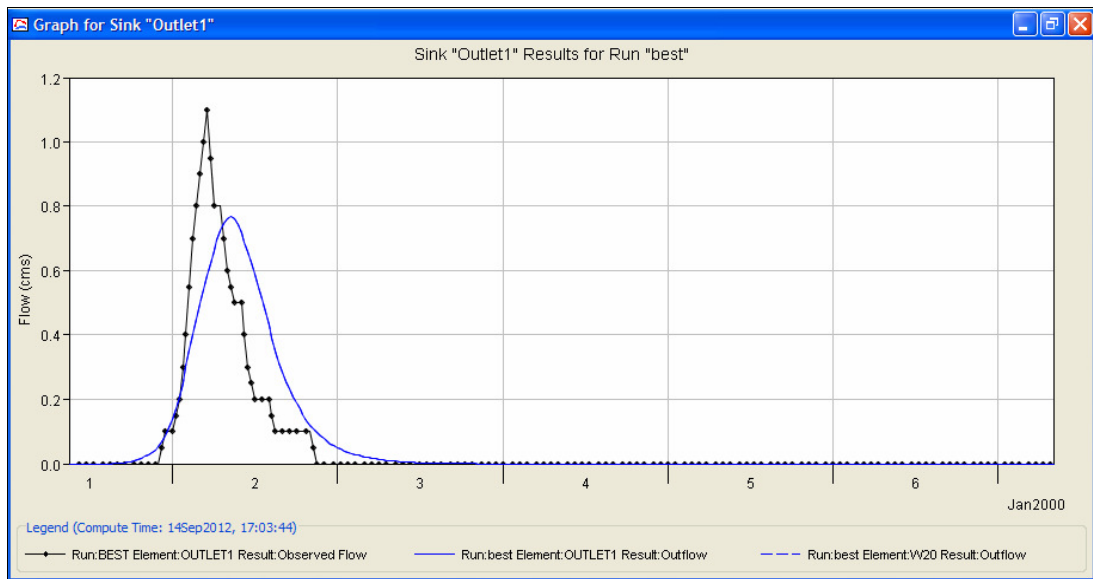
Όπως φάνηκε από την ανάλυση που προηγήθηκε, σε κάθε σενάριο η επίτευξη του μικρότερου σφάλματος είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στο σύστημα. Η ελαχιστοποίηση όμως των σφαλμάτων αυτών είναι απόρροια διαφορετικών μεταβολών των παραμέτρων σε κάθε σενάριο.

Εν προκειμένω εξετάζεται η περίπτωση ίδιας μεταβολής των παραμέτρων σε όλα τα σενάρια μελέτης υπολεκανών. Οι μεταβολές αυτές προκύπτουν από το μέσο όρο των αυξομειώσεων των παραμέτρων σε κάθε περίπτωση. Έτσι, προκύπτει κατά μέσο όρο, ότι ο αριθμός καμπύλης CN θα πρέπει να αυξηθεί κατά 5% σε όλα τα σενάρια, ενώ ο χρόνος υστέρησης κατά 15%. Από την άλλη, το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας θα μειωθεί κατά 15% και το χρονικό βήμα προσομοίωσης θα γίνει μισάωρο σε κάθε σενάριο μελέτης. Εκτελώντας, λοιπόν, τις βελτιστοποιήσεις αυτές, προσομοιώνεται η λεκάνη απορροής στα τέσσερα σενάρια.

1^ο σενάριο: Μία ενιαία λεκάνη απορροής

Ακολουθώντας τη βελτιστοποίηση που περιγράφηκε, παρατηρείται παροχή αιχμής που φτάνει στα 0.8 m³/s, ήτοι 27.27% μικρότερη από την αντίστοιχη υπολογισμένη στο AFFDEF και από το HEC-HMS με την καλύτερη βελτιστοποίηση του σεναρίου. Από την άλλη, ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμάται ακόμα περισσότερο σε σχέση με την αρχική

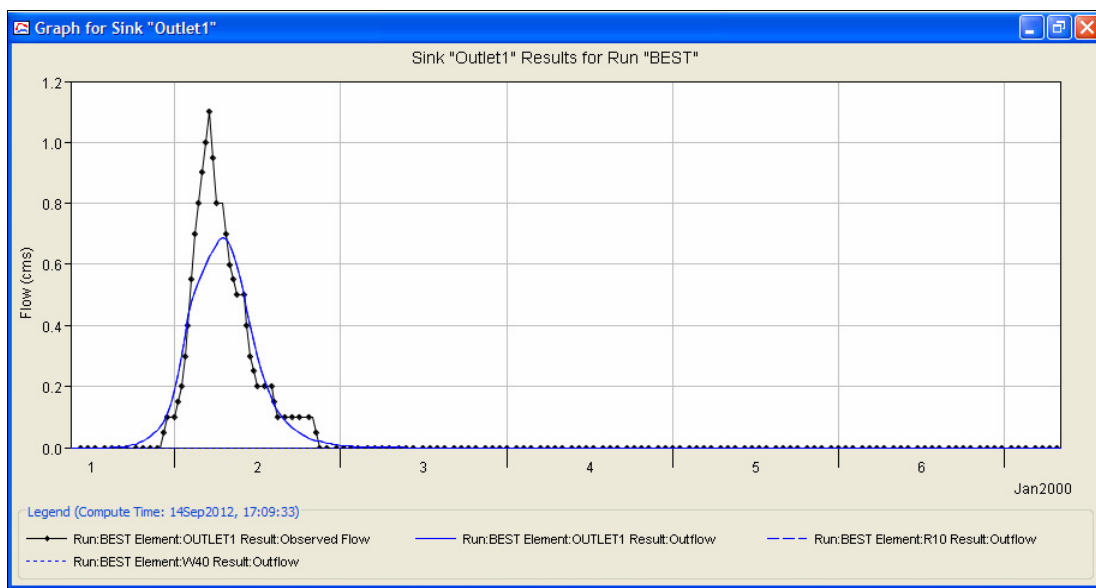
βελτιστοποίηση των παραμέτρων, καθώς ξεπερνά τον εκτιμώμενο από το AFFDEF όγκο κατά 22.63%. Το υπολογισμένο υδρογράφημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.20: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 1, ενιαία βελτιστοποίηση).

2^ο σενάριο: Τρεις (3) λεκάνες απορροής

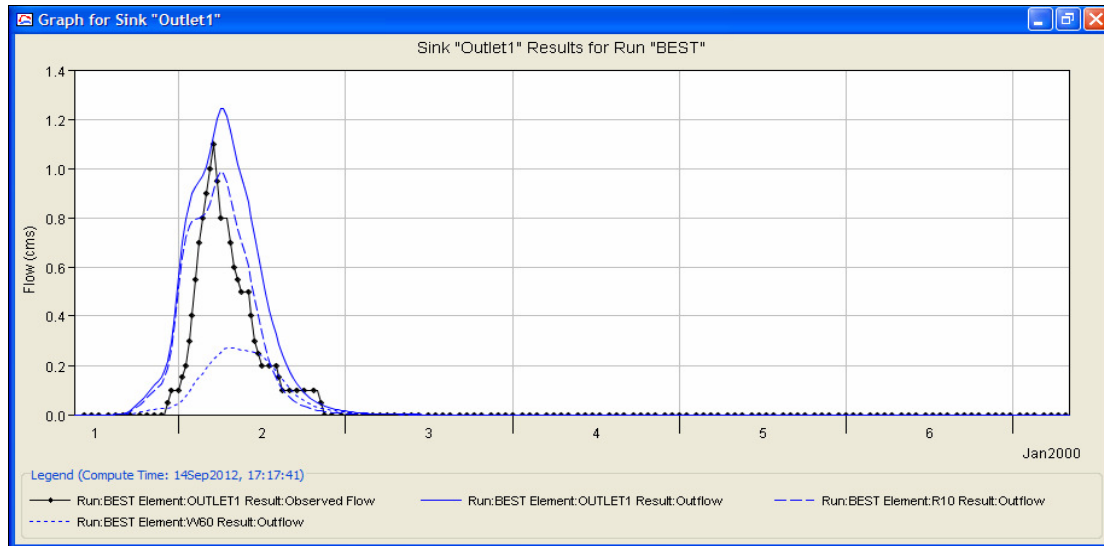
Η νέα προσομοίωση της λεκάνης, εφαρμόζοντας το δεύτερο σενάριο, οδηγεί σε υποεκτίμηση τόσο της παροχής αιχμής όσο και του πλημμυρικού όγκου. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής υποεκτιμάται κατά 36.36%, έναντι 18.2% της αρχικής βελτιστοποίησης. ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής είναι κατά δύο ώρες μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο υπολογισμένο στο AFFDEF. Ο όγκος υπολογίζεται εδώ στα 27.2%, μικρότερος δηλαδή πιο μικρός κατά 7.86%, όπως φαίνεται και στο Σχήμα. 5.21 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.21: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 2, ενιαία βελτιστοποίηση).

3^ο σενάριο: Πέντε (5) λεκάνες απορροής

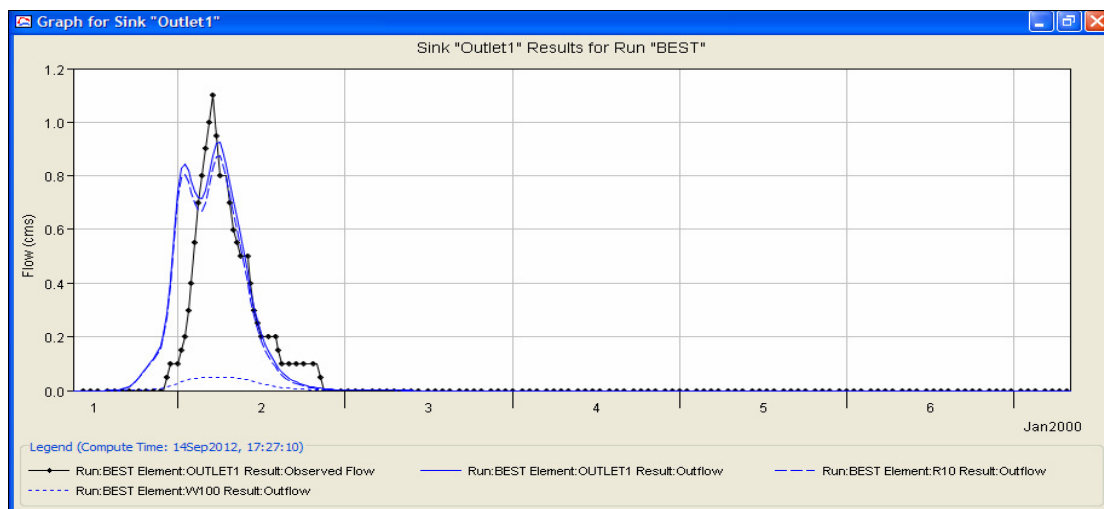
Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, η θεώρηση πέντε υπολεκανών οδηγεί σε μια υπερεκτίμηση των απορροών. ειδικότερα, υπερεκτιμάται η απορροή κατά 9.09%, ενώ ο πλημμυρικός όγκος κατά 42.27%. Σημειώνεται ότι η παροχή αιχμής της πλημμύρας εμφανίζεται πολύ κοντά σε σχέση με την παρατηρημένη από το AFFDEF, αφού εδώ φαίνεται να καθυστερεί μόλις μιάμιση ώρα (Σχήμα 5.22).



Σχήμα 5.22: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 3, ενιαία βελτιστοποίηση).

4^ο σενάριο: Εννέα (9) λεκάνες απορροής

Κατά τη μελέτη περισσότερων υπολεκανών η παροχή αιχμής πλημμύρας εκτιμάται μικρότερη με σφάλμα περί το 18.18%, ενώ ο πλημμυρικός όγκος είναι μεγαλύτερος κατά 23.98% από τον αντίστοιχο υπολογισμένο στο AFFDEF. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.23 η εκτίμηση του χρόνου αιχμής της πλημμύρας είναι ο καλύτερος σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια, καθώς εδώ η αιχμή καθυστερεί μόλις μία ώρα.



Σχήμα 5.23: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από HEC-HMS και AFFDEF όπως παρουσιάζονται στο HEC-HMS (σενάριο 4, ενιαία βελτιστοποίηση).

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει για κάθε σενάριο τις εκτιμημένες τιμές και τα ποσοστιαία σφάλματα των παροχών αιχμής και πλημμυρικών όγκων μετά την ενιαία βελτιστοποίηση σε σύγκριση με τις απορροές που εκτιμήθηκαν στο AFFDEF.

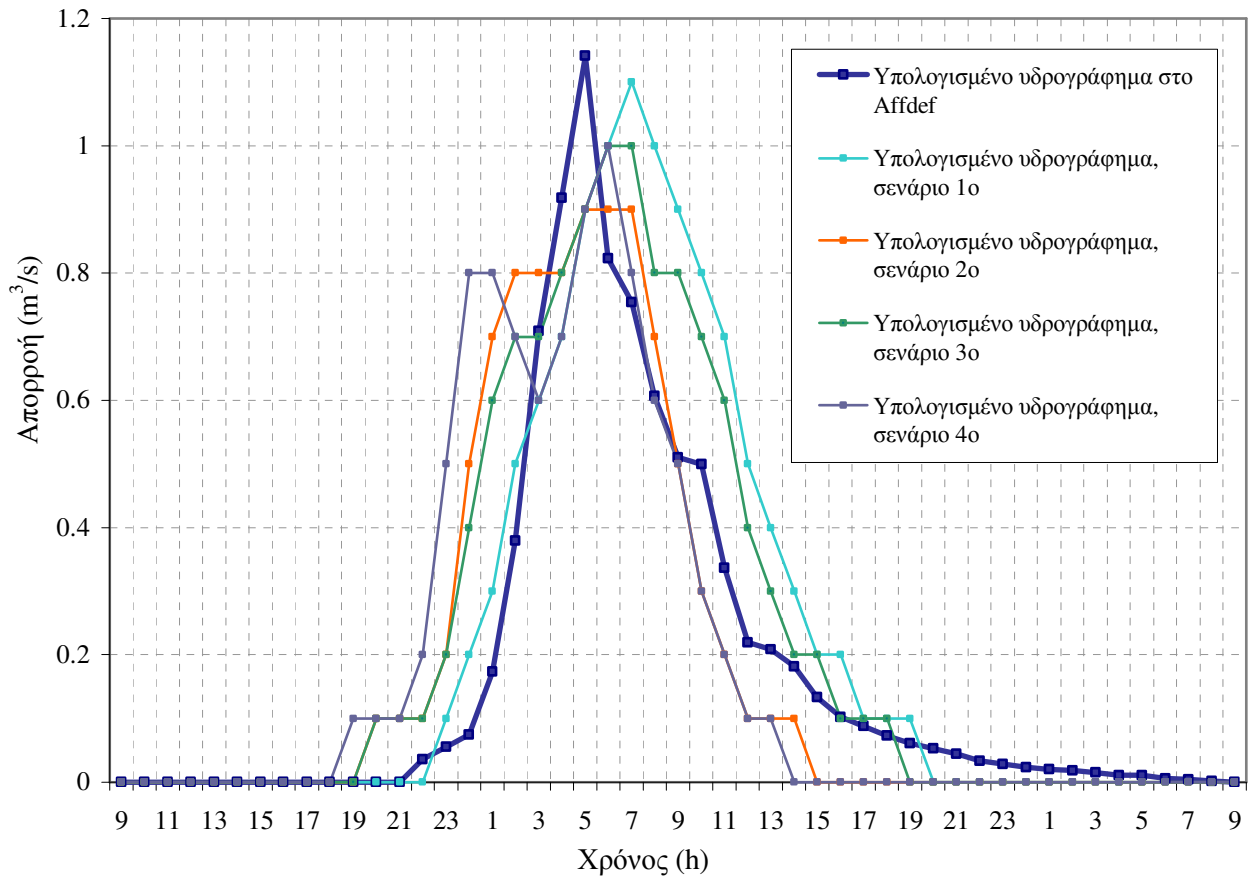
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα για το υπό μελέτη επεισόδιο για τα τέσσερα σενάρια (ενιαία βελτιστοποίηση)

| | Σενάριο 1° | | Σενάριο 2° | | Σενάριο 3° | | Σενάριο 4° | |
|---|-------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | Με δεδομένα | Με ενιαία βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Με ενιαία βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Με ενιαία βελτιστοποίηση | Με αρχικά δεδομένα | Με ενιαία βελτιστοποίηση |
| Αιχμή (m ³ /s) | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.6 | 1.2 | 0.6 | 0.9 |
| Όγκος (10 ³ m ³) | 0.5 | 36.2 | 10.9 | 27.2 | 15 | 39.6 | 15.6 | 36.6 |
| Σφάλμα στην παροχή αιχμής (%) | -54.5 | -27.27 | -63.6 | -36.36 | -45.5 | +9.09 | -41 | -18.18 |
| Σφάλμα στο συν. όγκο (%) | -98.3 | +22.63 | -63.1 | -7.86 | -49.2 | +42.27 | -20.8 | +23.98 |

5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

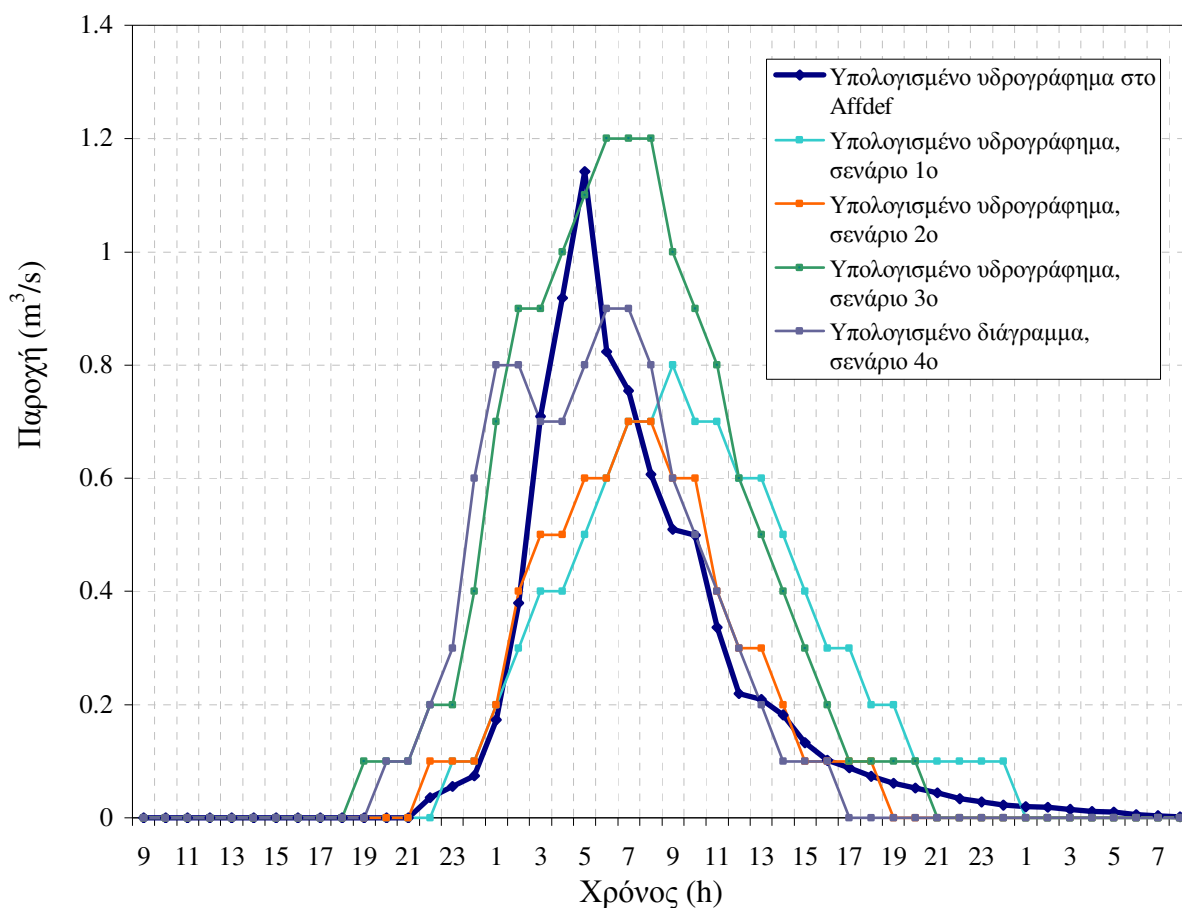
Στο προηγούμενο εδάφιο εξετάστηκε η υδρολογική συμπεριφορά της εικονικής λεκάνης απορροής για ένα επεισόδιο βροχόπτωσης, με χρήση του HEC-HMS. Αρχικά πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στο σύστημα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης του πλημμυρικού όγκου καθώς και της αιχμής της απορροής σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή του AFFDEF.

Το Σχήμα 5.24 συγκεντρώνει τα υδρογραφήματα που προέκυψαν από το μοντέλο AFFDEF καθώς και εκείνα για κάθε σενάριο μελέτης στο HEC-HMS. Σε πρώτη φάση, παρατηρείται μια μικρή υποεκτίμηση των αιχμών της πλημμύρας από όλα τα σενάρια που εφαρμόστηκαν στο HEC-HMS σε σχέση με τις τιμές του AFFDEF. Τα σενάρια 1,3 και 4 είναι εκείνα που εκτίμησαν με την καλύτερη ακρίβεια την αιχμή, παρ' όλο που την εμφανίζουν με καθυστέρηση 1-2 ωρών. Από την άλλη, το δεύτερο σενάριο αν και υπολογίζει μικρότερη αιχμή, φαίνεται να εντοπίζει επακριβώς το χρόνο αιχμής. Όσον αφορά στον πλημμυρικό όγκο, αυτός εκτιμάται καλύτερα με τα σενάρια 2 και 4.



Σχήμα 5.24: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από το AFFDEF και το HEC-HMS για τα τέσσερα σενάρια μελέτης

Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα υπολογισμένα υδρογραφήματα με τη νέα ενιαία βελτιστοποίηση για τα τέσσερα σενάρια μελέτης. Εύκολα διακρίνεται η υποεκτίμηση των απορροών από το σενάριο που μελετά τις τρεις λεκάνες απορροής. Οι μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν στα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας των τριών υπολεκάνων, δεν επέτρεψαν σημαντικό όγκο νερού να καταλήξει στην έξοδο της λεκάνης, προκαλώντας έτσι την αναμενόμενη πλημμύρα. Συγκρίνοντας τη νέα βελτιστοποίηση με την αντίστοιχη καλύτερη του σεναρίου, γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση του χρόνου υστέρησης κατά 15% στις τρεις υπολεκάνες δεν επέτρεψε την αύξηση των πλημμυρικών παροχών.



Σχήμα 5.25: Υπολογισμένα υδρογραφήματα από το AFFDEF και το HEC-HMS για τα τέσσερα σενάρια μελέτης, μετά τη νέα μεταβολή των παραμέτρων

Από την άλλη, είναι φανερή και η υπερεκτίμηση των απορροών από το σενάριο μελέτης πέντε υπολεκανών. Η διαμέριση σε πέντε υπολεκανές είχε προκαλέσει ήδη στην αρχή της προσομοίωσης αυξημένες τιμές απορροής. Η νέα βελτιστοποίηση, λοιπόν, που προβλέπει αύξηση του αριθμού CN κατά 5%, προφανώς συνετέλεσε στις υπερεκτιμημένες απορροές από το μοντέλο.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.25, η εξέταση μιας ενιαίας λεκάνης και εννέα υπολεκανών οδήγησε σε παρόμοια μεγέθη παροχών, αφού και στις δύο περιπτώσεις η παροχή αιχμής υποεκτιμήθηκε, ενώ ο πλημμυρικός όγκος υπερεκτιμήθηκε. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ο σχεδιασμός περισσότερων λεκανών δε συμβάλλει ιδιαίτερα στην καλύτερη εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών, ενώ από την άλλη η θεώρηση μιας ενιαίας λεκάνης απορροής παρέχει μια γενικευμένη εικόνα της υπό μελέτη λεκάνης. Παρ' όλα αυτά, ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής στο σενάριο 4 είναι σαφώς ο καλύτερος σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα σενάρια.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, παρατηρείται ότι κατά την προσομοίωση χρησιμοποιώντας τις καλύτερες τιμές παραμέτρων όπως προέκυψαν με τη βελτιστοποίηση, τα σενάρια που εκτιμούν ικανοποιητικά τόσο τον πλημμυρικό όγκο όσο και την παροχή αιχμής είναι το πρώτο και το τέταρτο. Ο σχεδιασμός με αδιαμέριστο μοντέλο βροχής-απορροής, αν και αυτό απλοποιεί τόσο τα εδαφολογικά όσο και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, αποδίδει το μικρότερο σφάλμα στην παροχή αιχμής (<10%) και μικρό σφάλμα (περίπου 20%) στον όγκο.

Η εφαρμογή εννιά υπολεκανών παρέχει σχετικά μικρά σφάλματα εκτίμησης όγκου και παροχή αιχμής, περί το 10%. Στην εικονική λεκάνη, λοιπόν, ο διαμερισμός σε πολλές υπολεκάνες βελτιώνει την ακρίβεια εκτίμησης των απορροών. Σε αντίθεση με την πραγματική λεκάνη που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 4, εδώ ο υπολογισμός των παραμέτρων σε κάθε υπολεκάνη φαίνεται πιο εύκολος, αφού τα εικονικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο HEC-HMS, εφαρμόστηκαν και στο AFFDEF.

Η εφαρμογή των μέσων όρων των καλύτερων τιμών των παραμέτρων και στα τέσσερα σενάρια, οδήγησε σε μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης. Ειδικότερα για το πρώτο σενάριο, τα σφάλματα εκτίμησης της παροχής αιχμής και όγκου είναι μεγαλύτερα από 20%. Στο τέταρτο σενάριο, η παροχή αιχμής υπολογίζεται, πλέον, με σφάλμα μικρότερο του 20% και ο όγκος με σφάλμα μικρότερο του 30%. Και εδώ φαίνεται ότι η υδρολογική προσομοίωση σε μία λεκάνη απορροής, με τις απλουστεύσεις που αυτός επιφέρει, βοηθά σε ένα αποδεκτό υπολογισμό των απορροών. Από την άλλη, η θεώρηση περισσότερων υπολεκανών ενισχύει και εδώ την ακρίβεια εκτίμησης, παρά το μεγαλύτερο όγκο δεδομένων που απαιτούνται.

Η χρήση τριών ή πέντε υπολεκανών δε φαίνεται να αποδίδει ξεκάθαρα αποτελέσματα και έτσι δε θεωρείται ικανοποιητική προσέγγιση για την εν λόγω λεκάνη απορροής.

6 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία σκόπευε στην εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής με μαθηματικά μοντέλα. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επιρροή της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου και της παροχής αιχμής. Εξετάστηκε η λεκάνη απορροής του Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας, και εφαρμόστηκαν τέσσερα σενάρια διαφορετικού αριθμού υπολεκανών. Με παρόμοιο τρόπο μελετήθηκε και μία εικονική λεκάνη απορροής.

Η πρώτη προσομοίωση και των δύο λεκανών υποεκτίμησε ως επί το πλείστον, την παροχή αιχμής και τον όγκο της πλημμύρας. Γι' αυτό, κρίθηκε αναγκαία η διερεύνηση των καλύτερων τιμών παραμέτρων όπως ο αριθμός καμπύλης CN, ο χρόνος υστέρησης, ο συντελεστής τραχύτητας Manning (n), το χρονικό βήμα της προσομοίωσης και το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φάνηκε ότι η μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας Manning δεν οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές των τιμών της απορροής. Αντίθετα, η ποσοστιαία μεταβολή των υπόλοιπων παραμέτρων είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση στόχου του μοντέλου.

Η βελτιστοποίηση που ακολουθήθηκε έγινε χειροκίνητα και αρχικά εφαρμόστηκε ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων, για κάθε σενάριο και επεισόδιο πλημμύρας ίδια σε κάθε υπολεκάνη. Όσον αφορά στη λεκάνη απορροής στη Σαρακίνα, προέκυψε ότι η καλύτερη εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου και της παροχής αιχμής γίνεται από το τρίτο σενάριο όπου μελετώνται πέντε υπολεκάνες. Ακολουθούν με αύξουσα σειρά σφαλμάτων απορροής, το πρώτο, δεύτερο και τέταρτο σενάριο.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των παραμέτρων από τα τέσσερα επεισόδια, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση κάθε σεναρίου. Όπως αναμενόταν η μεταβολή αυτή είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των σφαλμάτων σε κάθε σενάριο. Παρά ταύτα, η συμπεριφορά της λεκάνης στα τέσσερα σενάρια ήταν παρόμοια με προηγούμενα. Έτσι, τα μικρότερα σφάλματα εκτίμησης όγκου και παροχής αιχμής πλημμύρας εντοπίστηκαν με αύξουσα σειρά στο τρίτο, πρώτο, δεύτερο και τέταρτο σενάριο.

Η θεώρηση μίας ενιαίας λεκάνης απορροής (συγκεντρωτικό μοντέλο) προφανώς απλοποιεί το πρόβλημα, καθώς λαμβάνονται μέσοι όροι στις τιμές των παραμέτρων. Η ποικιλία όμως τόσο στις χρήσεις γης, όσο και στα εδαφολογικά στοιχεία μιας λεκάνης, είναι τέτοια που δύσκολα παρέχει μικρά σφάλματα στην αδρομερή μελέτη της. Γι' αυτό και στην περίπτωση της λεκάνης απορροής της Σαρακίνας, εκτιμώνται κυρίως μεγαλύτερες τιμές απορροών σε σχέση με τις παρατηρημένες. Υπερεκτίμηση στον όγκο σημειώνεται και στην εικονική λεκάνη, που οφείλεται στο γεγονός ότι όλη η έκταση της λεκάνης αποδίδεται με τα ίδια εδαφολογικά χαρακτηριστικά, και, συνεπώς, οποιαδήποτε προσπάθεια βελτιστοποίησής τους, μεταβάλλει εξ ολοκλήρου το χαρακτηρισμό όλης της λεκάνης.

Από την άλλη, η υπερεκτίμηση του πλημμυρικού όγκου θα μπορούσε να είναι αποδεκτή (υπέρ της ασφαλείας) σε μελέτες σχεδιασμού και κατασκευής υδραυλικών έργων με μεγάλη περίοδο επαναφοράς. Επιπλέον, η γενίκευση αυτή συντελεί στην ευκολία χειρισμού του συστήματος, αλλά και στη μείωση του χρόνου προεπεξεργασίας, επεξεργασίας των δεδομένων και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Σε αντίθεση με την περίπτωση μελέτης μιας λεκάνης, οι τρεις υπολεκάνες επιχειρούν μια πιο πιστή αναπαράσταση της φυσικής λεκάνης απορροής. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το έδαφος και την κάλυψη της γήινης επιφάνειας κατανέμονται πλέον σε τρεις υπολεκάνες. Αποδείχθηκε ότι στην περίπτωση της λεκάνης στη Σαρακίνα οι εκτιμήσεις ήταν παρόμοιες με τις αντίστοιχες του πρώτου σεναρίου.

Η δημιουργία πέντε υπολεκανών σκοπεύει στην ακόμα καλύτερη χωρική ανάλυση του συστήματος. Στην περίπτωση των επεισοδίων που εξετάστηκαν στη Σαρακίνα, η ανάλυση αυτή οδήγησε σε ακριβείς εκτιμήσεις της παροχής αιχμής και του πλημμυρικού όγκου. Μάλιστα, σε δύο από τα τέσσερα επεισόδια πλημμύρας σημειώθηκαν τα μικρότερα σφάλματα εκτίμησης πλημμυρικού όγκου σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια μελέτης, που δεν υπερέβαιναν το 6%. Ακόμη, σε τρία από τα τέσσερα επεισόδια το σφάλμα εκτίμησης της παροχής αιχμής ήταν λιγότερο από 7%.

Στην περίπτωση της εικονικής λεκάνης απορροής όμως, η χρήση τριών ή πέντε υπολεκανών δε φαίνεται να αποδίδει ξεκάθαρα θετικά αποτελέσματα. Ο διαχωρισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ποικιλομορφία σε κάθε υπολεκάνη. Έτσι, για να αποδώσει το μοντέλο πιο ακριβείς τιμές απορροής, απαιτείται μεγάλη μεταβολή των παραμέτρων σε κάθε υπολεκάνη, η οποία, όμως, δε δύναται να αντιπροσωπεύσει τα πραγματικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης.

Η υιοθέτηση μεγαλύτερου αριθμού υπολεκανών θα αναμενόταν να αποδώσει ακόμα καλύτερες εκτιμημένες τιμές απορροής. Το μοντέλο όμως στη λεκάνη στη Σαρακίνα, απέδωσε μέτρια σφάλματα εκτίμησης των απορροών. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η διαίρεση σε πολλές υπολεκάνες δεν οδήγησε και σε πιο ακριβείς τιμές απορροής. Πιθανώς, η λεκάνη να αναλύθηκε σε περισσότερες από το όριο- κατώφλι υπολεκάνες και με αυτόν τον τρόπο η 'υπερανάλυση' αυτή οδήγησε σε μεγαλύτερα σφάλματα. Από την άλλη, δεν αποκλείεται η περίπτωση ελλιπών δοκιμών βελτιστοποίησης από το χρήστη. Ο μεγάλος αριθμός των υπολεκανών, όμως, δεν επιτρέπει μεγάλο αριθμό χειροκίνητων δοκιμών από το χρήστη, καθώς αυτό θα προκαλούσε πολύ μεγάλο υπολογιστικό φόρτο.

Αντίθετα, στην εικονική λεκάνη, η εφαρμογή εννιά υπολεκανών παρέχει σχετικά μικρά σφάλματα εκτίμησης όγκου και παροχής αιχμής, περί το 10%. Εδώ, όμως, ο υπολογισμός των παραμέτρων σε κάθε υπολεκάνη είναι πιο εύκολος, αφού τα εικονικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο HEC-HMS, εφαρμόστηκαν και στο AFFDEF και, έτσι, δεν απαιτήθηκε κόπος και χρόνος για την εκτίμησή τους.

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε και η προσομοίωση όπου χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων (από όλα τα επεισόδια και ξεχωριστά για κάθε σενάριο). Στην πραγματική λεκάνη απορροής παρατηρείται ότι η χρήση πολλών υπολεκανών δεν οδηγεί σε ακριβείς εκτιμήσεις. Όπως καταλήξαμε και προηγουμένως η αύξηση του αριθμού των υπολεκανών προφανώς αυξάνει και τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν. Πιθανότατα απαιτείται διαφορετική ποσοστιαία μεταβολή των τιμών των παραμέτρων κατά τη βαθμονόμηση, σε κάθε υπολεκάνη. Μια ενδελεχής μελέτη κάθε υπολεκάνης, σε συνδυασμό με τη χρήση αυτόματης βελτιστοποίησης θα μπορούσε να αποδώσει καλύτερες τιμές των παραμέτρων και, κατά συνέπεια, πιο ακριβείς εκτιμήσεις απορροών. Παρά ταύτα, δεν είναι ξεκάθαρο πόσο το 'κέρδος' (ακριβής εκτίμηση πλημμυρικού όγκου και παροχής αιχμής) από αυτή τη διαδικασία, αντισταθμίζει το 'κόστος' (υπολογιστικός φόρτος, χρόνος).

Εν γένει, η εκτίμηση της παροχής αιχμής της πλημμύρας από όλα τα σενάρια φαίνεται να είναι πιο ακριβής σε σχέση με την εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου. Μάλιστα, στην

περίπτωση της λεκάνης στη Σαρακίνα υποεκτιμάται ο πλημμυρικός όγκος από σχεδόν όλα τα σενάρια μελέτης, ακόμα και μετά τη βελτιστοποίηση. Ο όγκος της απορροής σχετίζεται με το ποσό της κατακρήμνισης αλλά και της χωρικής κατανομής αυτής. Έτσι, τυχόν σφάλματα μετρήσεων της βροχής μεταφέρονται και στην εκτίμηση της απορροής από το μοντέλο. Από την άλλη, στην περιοχή υπήρχαν δεδομένα βροχής από το βροχογραφικό σταθμό του Παλαιοχωρίου και τον βροχογράφο των Τρικάλων. Ο βροχογραφικός σταθμός βρίσκεται εντός της λεκάνης απορροής, αλλά ο βροχογράφος βρίσκεται εκτός. Η κατανομή, λοιπόν, των σταθμών δεν είναι κατάλληλη ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη χωρική κατανομή της βροχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen.

Κατά τη μελέτη της εικονικής λεκάνης η εφαρμογή των μέσων όρων των καλύτερων τιμών των παραμέτρων (αυτή τη φορά, μέσοι όροι και στα τέσσερα σενάρια), οδήγησε σε μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς ο διαφορετικός αριθμός υπολεκανών επιβάλλει, γενικά, διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, κάθε υπολεκάνη πιθανώς να περιλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση που ευνοεί τη ροή, σε σχέση με την αρχικά εκτιμημένη. Η μεταβολή, λοιπόν, των παραμέτρων του αριθμού CN ή του ποσοστού αδιαπέρατης επιφάνειας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ληφθεί υπόψη από το μοντέλο και αυτή η πρόσθετη ροή. Αντίθετα, στο τέταρτο σενάριο, στην ίδια περιοχή, η λήψη της ίδιας, με το προηγούμενο σενάριο, μεταβολής παραμέτρων ασφαλώς οδηγεί σε σφάλμα, για το ίδιο λόγο (πλέον η έκταση κάθε υπολεκάνης είναι αρκετά μικρότερη).

Επιχειρήθηκε επίσης η σύγκριση των παροχών στα σημεία εξόδου των υπολεκανών όπως προκύπτουν από το HEC-HMS και το AFFDEF. Παρατηρήθηκαν αρκετές διαφοροποιήσεις στην παροχή αιχμής, αλλά κυρίως στον όγκο της πλημμύρας. Πιθανώς, ο διαχωρισμός σε υπολεκάνες δε δύναται να εισάγει τη λεπτομερή περιγραφή των εδαφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών που επιτρέπει η διαμέριση σε φατνία.

Κατά την εφαρμογή στο μοντέλο AFFDEF παρουσιάστηκαν αρκετά προβλήματα. Το γεγονός ότι ο κώδικας είναι αρκετά μεγάλος, διαβάζεται από τη γραμμή εντολών των Windows και δεν οπτικοποιούνται οι υδρολογικές διεργασίες (όπως στο HEC-HMS) δυσχεραίνει τη χρήση του. Απαιτήθηκε η επέμβαση στον κώδικα και σε αρχείο εισόδου καθώς και συνεχείς διαδικασίες αποσφαλμάτωσης (Debugging) για να εκτελεστεί το μοντέλο και να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση μεμονωμένου γεγονότος. Όταν επιχειρήθηκε η είσοδος μεγαλύτερων λεκανών σε σχέση με την εικονική που τελικά επιλέχθηκε, παρουσιάστηκε σφάλμα κατά τον καθορισμό του υδρολογικού δικτύου. Παρά την επίπονη και χρονοβόρα προσπάθεια εξάλειψης του προβλήματος, δεν καταστάθηκε αυτό δυνατό και έτσι επιλέχθηκε μικρότερη λεκάνη απορροής.

7 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Έπειτα από τη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τις δυσκολίες που συναντήθηκαν, συνοψίζονται οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα στις ακόλουθες:

- Προτείνεται η μελέτη και άλλων λεκανών απορροής ακολουθώντας το ίδιο μεθοδολογικό πλαίσιο. Η εξέταση πολλαπλών λεκανών είναι ικανή να οδηγήσει ασφαλέστερα σε πιο ακριβή συμπεράσματα όσον αφορά την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής και την επίδραση της χωρικής ανάλυσης σε αυτή.

- Προς διευκόλυνση του μελετητή θα ήταν καλό να χρησιμοποιηθούν λεκάνες απορροής για τις οποίες υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα βροχής και απορροής. Για παράδειγμα, η επιλογή λεκανών με ομοιόμορφα κατανομημένους βροχομετρικούς σταθμούς ή βροχογράφους σε όλη την έκτασή τους, υποβοηθεί την ορθή χωρική κατανομή της βροχόπτωσης.

- Επιπλέον, η χρήση λεκανών που έχουν μελετηθεί στο παρελθόν θα παρείχε ακριβείς τιμές παραμέτρων και η βελτιστοποίηση θα ήταν πιο εύκολη διαδικασία. Γνωρίζοντας ένα αποδεκτό εύρος τιμών των παραμέτρων, ο ερευνητής θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει επιτυχώς και την ημιαυτόματη βελτιστοποίηση που παρέχεται από το HEC-HMS, χωρίς τον κίνδυνο εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι εφαρμόζοντας τα παραπάνω ο μελετητής δύναται να διερευνήσει την επιρροή της χωρικής ανάλυσης στην εκτίμηση της απορροής χωρίς να σπαταλά πολύ χρόνο και κόπο στην εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου.

- Ακόμη, θα ήταν σκόπιμο κατά τη διάρκεια είτε χειροκίνητης είτε αυτόματης βελτιστοποίησης, να εφαρμοστεί μεταβολή των παραμέτρων διαφορετική σε κάθε υπολεκάνη. Για παράδειγμα, ίσως να απαιτούνταν αύξηση κατά 10% στον αριθμό καμπύλης CN σε μία εκ των πέντε υπολεκανών, αλλά για τις υπόλοιπες υπολεκάνες ο αριθμός CN να έπρεπε να μείνει σταθερός.

- Στα πλαίσια εφαρμογής ενός ημικατανομημένου μοντέλου όπως το HEC-HMS προτείνεται η υποδιαίρεση σε περισσότερες υπολεκάνες, έτσι ώστε να διαλευκανθεί πλήρως, η εύρεση ορίου ή κατωφλίου (εάν υπάρχει) στον αριθμό των υπολεκανών, πέραν του οποίου η χωρική ανάλυση δεν προσφέρει στην καλύτερη εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών.

- Κρίνεται ακόμη αναγκαία η διερεύνηση του τρόπου καθορισμού των ορίων των υπολεκανών που δημιουργούνται από το HEC-HMS και κατά πόσο η διαφοροποίηση στα όρια αυτά μπορεί να μεταβάλει την τελική εκτίμηση των απορροών.

- Ενδιαφέρον θα είχε και η χρησιμοποίηση ενός κατανομημένου μοντέλου και η σύγκριση των εκτιμημένων παροχών με εκείνες που προκύπτουν από ένα ημικατανομημένο μοντέλο. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πλήρως κατανομημένο μοντέλο AFFDEF, στο οποίο όμως δεν πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση αλλά απλά αυτό χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή, μέσω προσομοίωσης, της απορροής μιας εικονικής λεκάνης.

- Επίσης θα μπορούσε να μελετηθεί λεκάνη απορροής για την οποία υπάρχουν μετρήσεις κατακρημνίσεων από ραντάρ. Άλλωστε, η ιδεατή περίπτωση ενός πλήρως κατανεμημένου μοντέλου απαιτεί, μεταξύ άλλων, δεδομένα βροχόπτωσης από μετεωρολογικά ραντάρ ώστε να είναι δυνατόν σε κάθε ένα φατνίο να αποδοθεί διαφορετική βροχόπτωση.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

Βαφειάδης, Μ. (2005) *Διοδεύσεις*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Καμάλης, Π. (2009) *Προσομοίωση της ανάντη λεκάνης του ποταμού Πηνειού και ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ. (1999) *Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης, Έκδοση 3.1*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μαμάσης, Ν. (2009) *Προχωρημένη Υδρολογία*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μαμάσης, Ν. (2012) *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μπέλλος, Κ. (2005) *Τεχνική Υδρολογία*, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

Ξανθόπουλος, Θ., Κουτσογιάννης, Δ., Ρώτη, Σ. και Τζεράνης, Ι. (1988) *Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Σταθάκης, Δ., Περάκης, Κ. και Φαρασλής, Ι. (2006) *Διαχρονική ανάλυση χρήσεων γης με βάση δεδομένα του ευρωπαϊκού προγράμματος CORINE εξετάζοντας τον πίνακα αλλαγών*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Τσακίρης, Γ. (1995) *Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Χριστοφίδης, Α. (2008) *Ανάπτυξη μοντέλου βροχής-απορροής σε Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)*, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ξενόγλωσσες

Baltas, E. A., Dervos, N. A. and Mimikou, M. A. (2007) Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1825–1829.

Bingner, R. L., Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1997) Effect of watershed subdivision on simulation runoff and sediment yield. *Transaction of the ASAE*, 40 (5), 1329-1335.

- Brath, A., Montanari, A. and Toth, E. (2001) Comparing the calibration requirements and the simulation performances of lumped and distributed hydrological models: an Italian case study. *Eos. Trans. AGU*, 82, *Spring Meet. Suppl.*, Abstract H31D-04.
- Burian, S. J., Brown, M. J. and McPherson, T. N. (2002) Evaluation of land use/land cover data sets for urban watershed modeling. *Water Set. & Tech.*, 45, 269-276.
- Chow, V. T. (1959) *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Costa-Cabral, M. C., and Burges, S. J. (1994) Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resour. Res.*, 30, 1681–1692.
- Desmet, P. J. J. and Govers, G. (1996) Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, 311–331.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1984) Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO*, Rome.
- Duan, Q, Gupta, V. K. and Sorooshian, S. (1993) A shuffled complex evolution approach for effective and efficient optimization. *J. Optimization Theory Appl.*, 76(3): 501-521.
- EC (2007) Directive 2007/60/EC in the assessment and management of flood risks. *Official journal of the European Union L288/27*.
- Eid, N. J., Cernesson, F., Folton, N. and Kosuth, P. (2006) Role of spatial aggregation over runoff calculations on southeast France catchments. *Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Brazil*, April 2005.
- Feldman, A. D. (2000) Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual, Technical reference manual CPD-74B. *Hydrologic Engineering Center*, Davis, California.
- FitzHugh, T. W. and Mackay, D. S. (2000) Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *J. Hydrol.*, 236, 35-53.
- Freeman, G. T. (1991) Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17, 413–422.
- Garbrecht, J., Ogden, FL., DeBarry, and P. A., Maidment, DR. (2001) GIS and distributed watershed models. 1: Data coverages and sources. *J. Hydrol. Engng ASCE* 6, (6), 506-514.
- Gupta, V. K. and Sorooshian S., (1983) Uniqueness and observability of conceptual rainfall-runoff model parameters: The percolation process examined. *Water Resour. Res.*, 19 (1), 269-276, 52.
- Gupta, V. K. and Sorooshian, S., (1985) The automatic calibration of conceptual catchment models using derivative-based optimization algorithms. *Water Resour. Res.*, 21 (4), 473-485.

- Hawkins, R. H., Jiang, R., Woodward, D. E., Hjelmfelt, A. T., Van Mullem, J. A. and Quan, Q. D. (2002) Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio in Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Las Vegas, Nevada, U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado.
- Hornberger, G., Beven, K., Cosby, B. and Sappington, D. (1985) Shenandoah watershed study: Calibration of a topography-based, variable contributing area hydrological model to a small forested catchment. *Water Resour. Res.*, 21 (12), 1841-1850.
- Hromadka II, T. V., (1986) County of San Bernardino hydrology manual. *Engineer's report, Williamson and Schmid, Civil Engineers*, Irvine, California.
- Huang, Y., (2005) Appropriate modelling for intergrated flood risk assessment. Dissertation, University of Twente, The Netherlands.
- Jakeman, A. and Hornberger, G. (1993) How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *Water Resour. Res.*, 29 (8), 2637-2649.
- Jha, M., Gassman, P. W., Secchi, S., Gu, R. and Arnold, J. (2004) Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 40 (3), 811-825.
- Kent, K.M. (1972) National Engineering Handbook. In: *Section 4, Chapter 15*, Water Resources Pubns (June 1994).
- Loague, K. M. and Freeze, R. A., (1985) A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resour. Res.*, 21 (2), 229-248.
- Mamillapalli, S., Srinivasan, R., Arnold, J. G. and Engel, B. A., (1996) Effect of spatial variability on basin scale modelling. In Third International Conference/Workshop on Integrated Remote Sensing Resource Centre, established with support from NASA (NAG5-6535). *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, January, 21 - 26*, (1996). National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.
- McMaster, K. J. (2002) Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. *Water Resour. Res.*, 38(4), 10.1029/2000WR000150.
- Mishra, S. K. and Singh, V. P. (2004) Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrol. Process.*, 18, 1291-1313.
- Moretti, G. and Montanari, A. (2004) Affdef, a spatially distributed grid based rainfall-runoff model for continuous time simulations of river discharge, User's manual. *University of Bologna, Italy*.
- Montgomery, D. and Foufoula- Georgiou, E. (1993) Channel Network Representation Using Digital Elevation Models. *Water Resour. Res.*, 29, (12), 3925-3934.

- Norris, G. and Haan, C. T. (1993) Impact of subdividing watersheds on estimated hydrographs. *Soil and Water Division American Society of Agricultural Engineers*, 9 (5), 443-445.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 28: 328-344.
- Quinn, P.F., Beven, K.J., Chevallier, P. and Planchon, O. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrol. Processes*, 5: 59-79.
- Scharffenberg, W. A. and Fleming, M. J. (2010) Hydrologic modeling system HEC-HMS version 3.5. *Hydrologic Engineering Center*, Davis, California.
- Smith, M. B., Dong-Jun, S., Koren, V. I., Reed, S. M., Zhang, Z., Duan, Q., Moreda, F. and Cong, S. (2004) "The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP): Motivation and Experiment Design". *J. Hydrol.*, 298, pp. 4-26.
- Sorooshian, S. (1981) Parameter estimation of rainfall-runoff models with heteroscedastic stream-flow errors - the noninformative data case. *J. Hydrol.*, 52, 127-138.
- Sorooshian, S. and Gupta V. K. (1983) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resour. Res.*, 19 (1), 260-268.
- Tarboton, D.G. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resour. Res.*, 33: 309-319.
- Thompson, D. B. and Cleveland, T. G. (2009) Subdivision of Texas watersheds for hydrologic modeling. *Texas Department of Transportation Research Project*, 0-5822.
- Tripathi, M. P., Raghuwanshi, N. S. and Rao, G. P. (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrol. Processes*, 20, 1137-1156.
- Van der Sande, C.J., Jong de, S.M. and Roo de, A.P.J. (2003) A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (4), 217-229.
- Wanielista, M. (1978) *Stormwater Management, Quantity and Quality*. Ann Arbor Science, Ann Arbor.
- Wood, ELF., Siva Alan, M., Bevin, K. and Band, L. (1988) Effects of Spatial Variability and Scale with Implication to Hydrologic Modern. *J. Hydrol.*, Volume 102, 29-47.
- Yang, D., Herath, S. and Musiaka K. (2001) Spatial resolution of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. *Hydrol. Processes*, 15, 2085-2099.

Διαδικτυακοί τόποι

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2000). *Διανυσματικά Δεδομένα Χρήσεων Γης - Corine2000*. Διαθέσιμο: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database-3>. Τελευταία προσπέλαση 16-01-2012.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2003). *Υπηρεσία για τη Διαχείριση των Εδαφών*. Διαθέσιμο: http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB_data_1k_raster_intro/ESDB_1k_raster_data_intro.html. Τελευταία προσπέλαση 16-01-2012.

Μεταφραστής G95 (2010). *Fortran 95 Compiler*. Διαθέσιμο: www.g95.org Τελευταία προσπέλαση 14-10-2010.

Μινιμαλιστικό GNU για το λειτουργικό σύστημα Windows (2011). *MinGW*. Διαθέσιμο: www.mingw.org. Τελευταία προσπέλαση 14-10-2010.

EM-DAT (2012). *Βάση δεδομένων παγκόσμιων καταστροφών*. Διαθέσιμο: <http://www.emdat.be/>. Τελευταία προσπέλαση: 10-09-2012

Google maps (2012). *Δορυφορική απεικόνιση λεκάνης απορροής*. Διαθέσιμο: <http://maps.google.gr>. Τελευταία προσπέλαση 09-09-2012.

Hydrologic Engineering Center, Davis, California (2000). *Προγράμματα HEC-HMS, HEC-GEOHMS*. Διαθέσιμο: <http://www.hec.usace.army.mil/>. Τελευταία προσπέλαση 08-02-2012.

Montanari, A., University of Bologna, Italy (2010). *Ψηφιακό μοντέλο Εδάφους Πειραματικής Λεκάνης*. Διαθέσιμο: <http://distart119.ing.unibo.it/alberto/site/showquestion.php?fldAuto=15&faq=2>. Τελευταία προσπέλαση 25-09-2012.

State University of New York College of Environmental Science and Forestry (2012). *Σχηματική αναπαράσταση της τάξης υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler*. Διαθέσιμο: <http://www.esf.edu/>. Τελευταία προσπέλαση 23-07-2011.

Παράρτημα Α

Περίσσευμα βροχόπτωσης με τη μέθοδο SCS

Η μέθοδος της Υπηρεσίας Εδαφικής Προστασίας των ΗΠΑ (Soil Conservation Service, 1972) ανέπτυξε μια μέθοδο που χρησιμοποιείται αρκετά τα τελευταία χρόνια από τους Υδρολόγους μηχανικούς κυρίως σε λογισμικά προγράμματα βροχόπτωσης- απορροής. Η μέθοδος SCS υπολογίζει το περίσσευμα της βροχής από δεδομένη βροχή με τη βοήθεια του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας και των υδρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (γεωμορφολογία, λιθολογία, βλάστηση) τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο δείκτη-αριθμό καμπύλης απορροής CN (Curve number).

Σύμφωνα με τη 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_R). Ακόμη,

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{h_r + 0.8S} \quad \text{για } h_r > 0.2S \quad (\text{A.1})$$

$$h_R = 0 \quad \text{για } h_r < 0.2S \quad (\text{A.2})$$

Όπου h_R : το ύψος του περισσεύματος βροχής (ή άμεση απορροή)

h_r : το ύψος βροχόπτωσης

S : το μέγιστο θεωρητικό ύψος απωλειών

Διαθέτοντας δεδομένα απορροών εξάγονται οι συνολικές απώλειες (S) από την εξίσωση 1 και προκύπτει:

$$S = 5h_r + 10h_R - 10\sqrt{h_r(h_R + 1.25h_r)} \quad (\text{A.3})$$

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα σε πολλές πειραματικές λεκάνες απορροής το μέγιστο ύψος απωλειών S μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση (4):

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{A.4})$$

Η παράμετρος CN λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 100, και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσης γης στη λεκάνη απορροής, καθώς τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας -οι τελευταίες συναρτώνται με τη χρονική απόσταση της υπό μελέτη καταιγίδας από προηγούμενες. Κατ' αρχήν η υπηρεσία SCS κατατάσσει τα εδάφη στις ακόλουθες τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη διαπερατότητα τους:

- Ομάδα Α: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
- Ομάδα Β: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

- Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
- Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια. Στη συνέχεια η SCS ορίζει τους ακόλουθους τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας, (AMC):

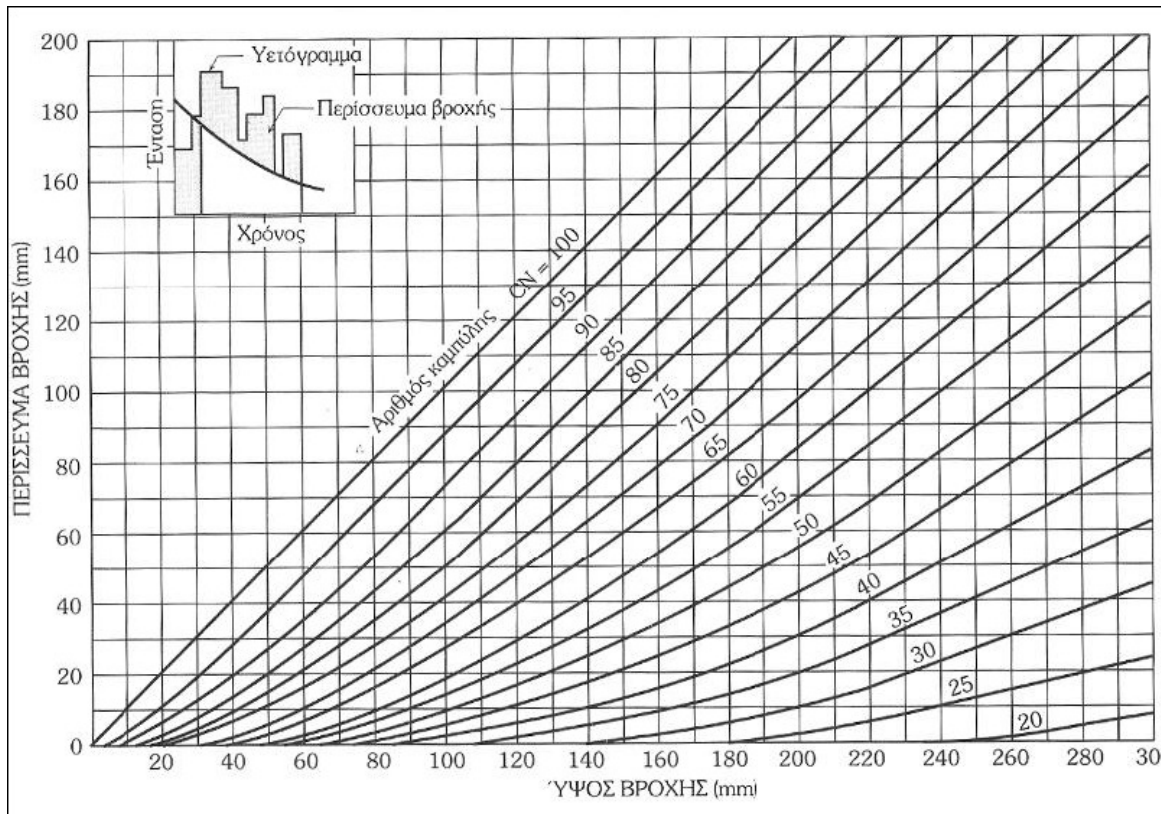
Ανάλογα με τις συνθήκες υγρασίας καθορίζονται τρεις τύποι:

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

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Ο Wanielista (1978) δίνει τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1. Το περίσσειμα της βροχής, h_R , προκύπτει με είσοδο στο ύψος βροχής, h_t , και με γνωστό τον αριθμό καμπύλης CN από το Σχήμα Α.1.

Πίνακας Α.1: Αριθμός καμπύλης CN για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (AMC) τύπου II (Wanielista, 1978).

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



Σχήμα Α.1: Υπολογισμός του περισσέυματος βροχής με τη μέθοδο SCS (Τσακίρης, 1995).

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

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.0058CN_{II}} \quad (A.5)$$

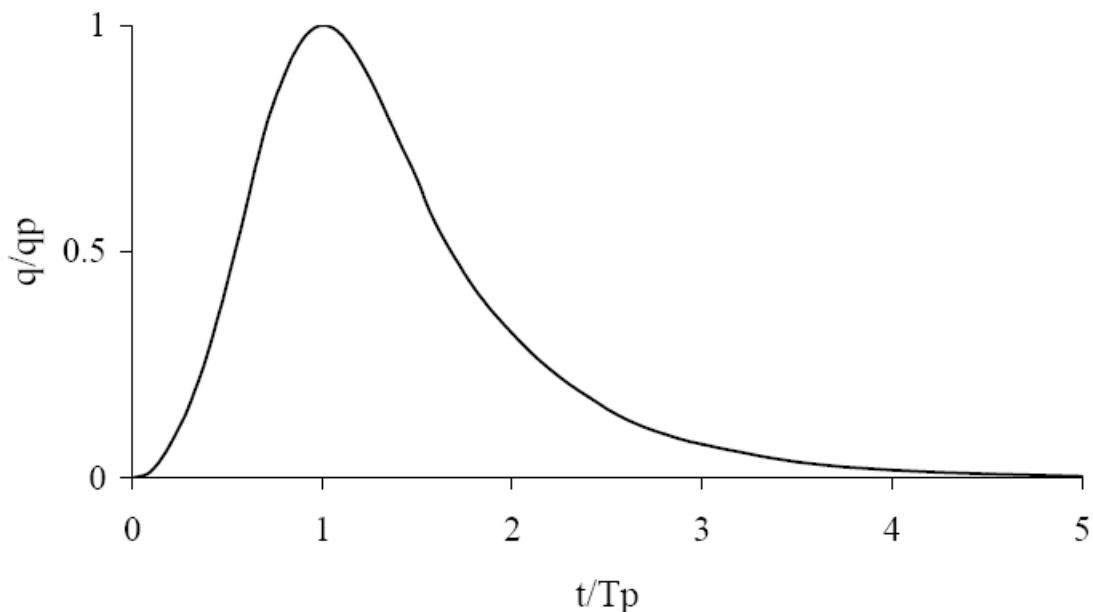
$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.013CN_{II}} \quad (A.6)$$

Το Αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της SCS

Το μοναδιαίο υδρογράφημα που παράγεται από δεδομένα βροχοπτώσεων και παροχών σε μια λεκάνη απορροής, βρίσκει εφαρμογή μόνο στη συγκεκριμένη λεκάνη και στο σημείο του ρέματος όπου έχουν ληφθεί στοιχεία για την παροχή. Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μοναδιαίων υδρογραφημάτων για άλλες τοποθεσίες από τις οποίες διέρχεται το ρέμα, στην ίδια λεκάνη απορροής ή σε παρακείμενες λεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τρεις τύποι συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων χρησιμοποιούνται (Τσακίρης, 1995):

- Εκείνα που συσχετίζουν χαρακτηριστικά υδρογραφημάτων (παροχή αιχμής, χρόνος βάσης κτλ). με χαρακτηριστικά λεκανών απορροής (Snyder 1938, Gray 1961)
- Εκείνα που βασίζονται σε ένα αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα (Soil Conservation Service, 1972)
- Εκείνα που βασίζονται σε μοντέλα αποθήκευσης (Clark 1943).

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Πρόκειται για ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα στο οποίο η παροχή εκφράζεται από το λόγο της παροχής Q προς την παροχή αιχμής Q_p , ενώ στον άξονα x , απεικονίζεται ο λόγος του χρόνου t προς τον χρόνο ανόδου T_p . Με γνωστή την παροχή αιχμής και το χρόνο υστέρησης για τη διάρκεια του περισεύματος βροχόπτωσης, υπολογίζεται το μοναδιαίο υδρογράφημα για την εκάστοτε λεκάνη απορροής. Στο Σχήμα Α.2 φαίνεται το αδιάστατο συνθετικό υδρογράφημα της SCS.



Σχήμα Α.2: Αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS (Μπέλλος, 2005).

Μπορεί να δειχθεί ότι η παροχή αιχμής είναι:

$$Q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (\text{A.7})$$

όπου $C = 2.08$ και A είναι το εμβαδό της λεκάνης απορροής σε km^2 .

Επιπλέον, μια μελέτη μοναδιαίων υδρογραφημάτων από πολλές μεγάλες και μικρές λεκάνες απορροής έδειξε ότι ο χρόνος υστέρησης ισούται με $t_p = 0.6t_c$, όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης. Επίσης, ο χρόνος ανόδου μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του χρόνου υστέρησης και της διάρκειας του περισσεύματος βροχόπτωσης t_R από τον τύπο:

$$T_p = \frac{t_R}{2} + t_p \quad (\text{A.8})$$

Διόδευση πλημμύρας με τη μέθοδο Muskingum- Cunge

Με τον όρο διόδευση πλημμύρας νοείται ο υπολογισμός του πλημμυρικού υδρογραφήματος σε μια θέση Β στα κατάντη ενός υδατορεύματος, όταν αυτό είναι γνωστό σε μια θέση Α στα ανάντη ή αντίστοιχα τον υπολογισμό του πλημμυρικού υδρογραφήματος στην έξοδο ενός ταμιευτήρα όταν το υδρογράφημα είναι γνωστό στην είσοδο του ταμιευτήρα. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα μαθηματικό υπολογισμό που περιγράφει το «πέρασμα» του πλημμυρικού κύματος μέσα από την κοίτη ενός υδατορεύματος ή μέσα από ένα ταμιευτήρα που παρεμβάλλεται σε ένα υδατόρευμα (Βαφειάδης, 2005).

Η μέθοδος Muskingum- Cunge είναι μια υδραυλική μέθοδος διόδευσης και αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου Muskingum, ενώ εφαρμόζεται όταν η ροή γίνεται μέσα σε αγωγό σταθερής και γνωστής διατομής.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέχειας:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (\text{A.9})$$

Όπου: I= η εισροή

Q= η εκροή

S= η αποθήκευση

Ο αποθηκευμένος όγκος συνδέεται με την εισροή και εκροή από το υδρογράφημα με την εξίσωση:

$$S = K[xI + (1 - x)Q] \quad (\text{A.10})$$

όπου: K= συντελεστής με διαστάσεις χρόνου

x= αδιάστατος αριθμός (x<0.5)

Η εξίσωση 10 μετά από μετασχηματισμό σε πεπερασμένες διαφορές για διάστημα Δt μετατρέπεται:

$$S_{i+1} - S_i = K[x(I_{i+1} - I_i) + (1 - x)(Q_{i+1} - Q_i)] \quad (\text{A.11})$$

και έτσι η εξίσωση που δίνει την εκροή το επόμενο χρονικό βήμα είναι:

$$Q_{i+1} = C_0 I_{i+1} + C_1 I_i + C_2 Q_i \quad (\text{A.12})$$

όπου:

$$C_0 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (\text{A.13})$$

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t + Kx}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (\text{A.14})$$

$$C_2 = \frac{-0.5\Delta t - Kx + K}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (\text{A.15})$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (\text{A.16})$$

Το x αποτελεί ένα συντελεστή που προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ εισροής και εκροής ως προς την επίδρασή τους στον προσδιορισμό του αποθηκευμένου όγκου στο υδατόρευμα. Σύμφωνα με τον Cunge, ο συντελεστής x μπορεί να προσδιοριστεί από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του αγωγού:

$$\bar{I} - \bar{Q} = K \frac{d}{dt} [xI + (1-x)Q]$$

$$x = 0.5 \left(1 - \frac{q_0}{S_0 c \Delta x} \right) \quad (\text{A.17})$$

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

Όπου: q_0 = ειδική παροχή (παροχή ανά μονάδα πλάτους του αγωγού)

c = ταχύτητα μεταδόσεως κύματος

$$c = mV = \frac{5}{3} V$$

S_0 = κλίση του πυθμένα του καναλιού

Δx = απόσταση μεταξύ των δύο διατομών για τις οποίες γίνεται η διόδευση.

Και έτσι προκύπτουν:

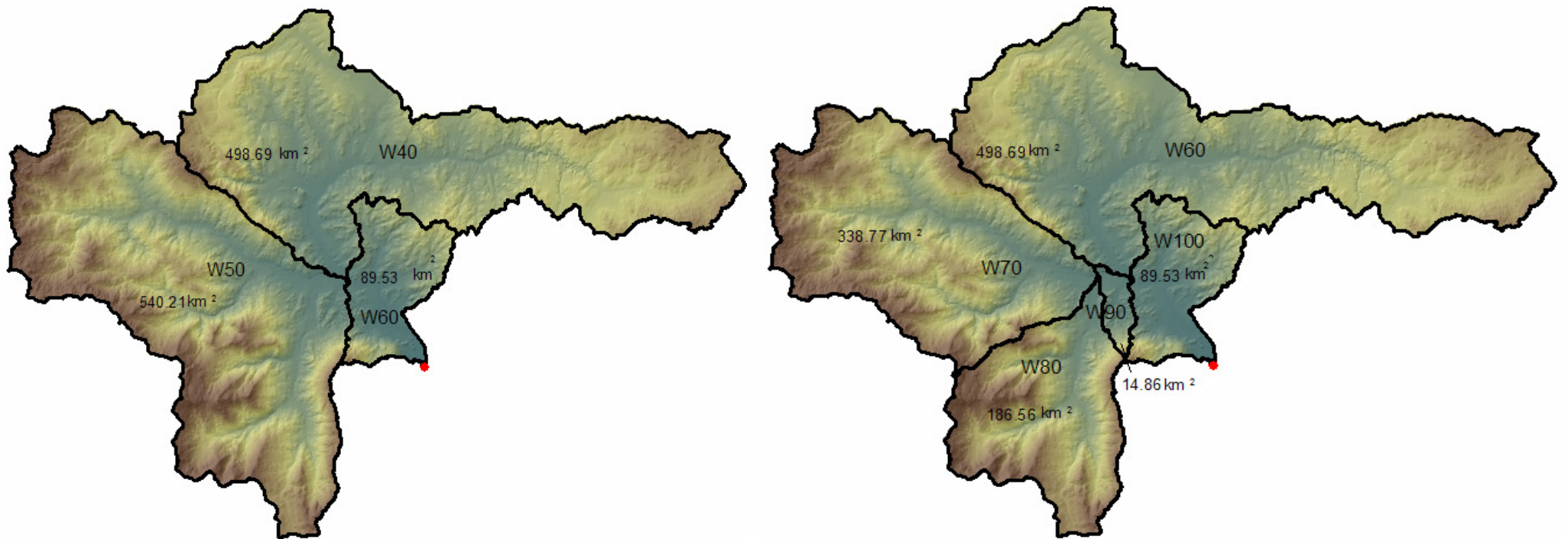
$$C_0 = \frac{\Delta t / K - 2x}{2(1-x) + \Delta t / K} \quad (\text{A.18})$$

$$C_1 = \frac{\Delta t / K + 2x}{2(1-x) + \Delta t / K} \quad (\text{A.19})$$

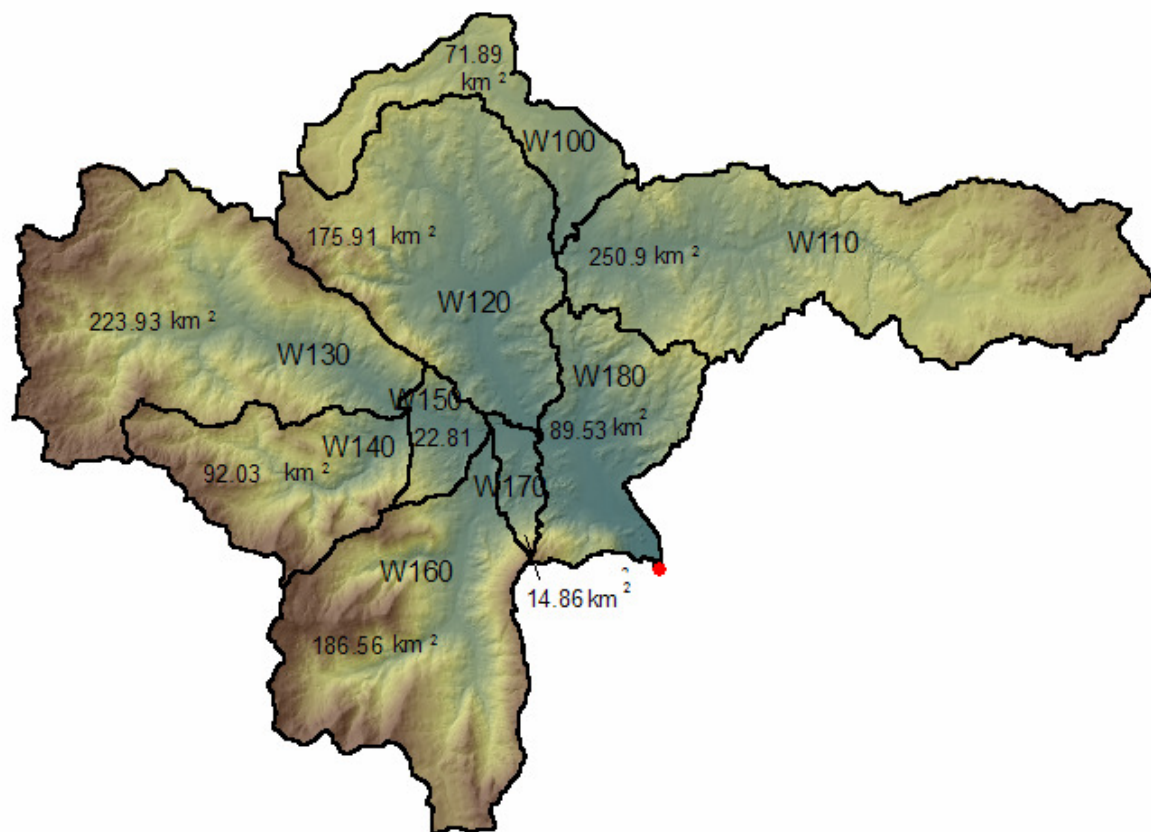
$$C_2 = \frac{2(1-x) - c \Delta t / K}{2(1-x) + \Delta t / K} \quad (\text{A.20})$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (\text{A.21})$$

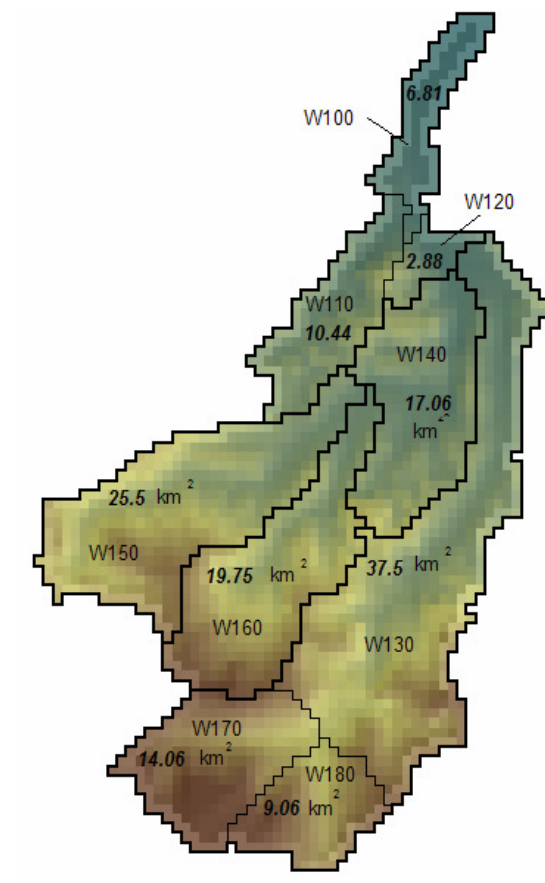
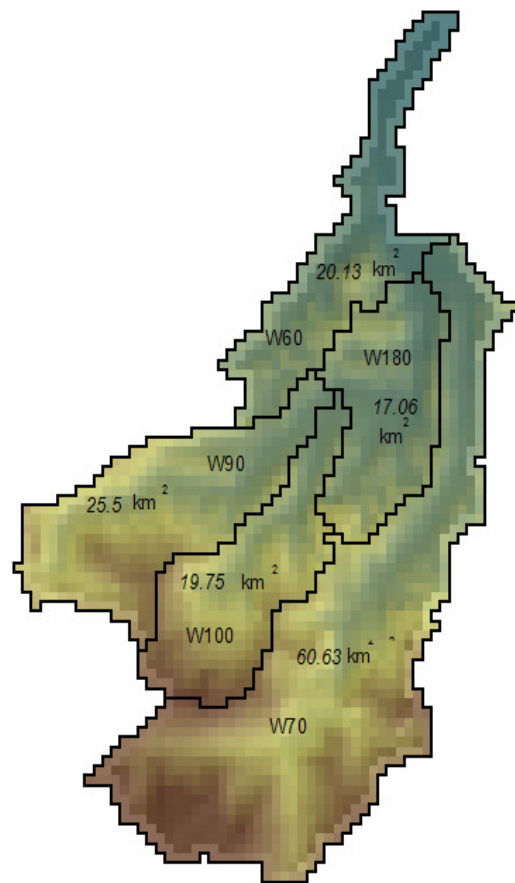
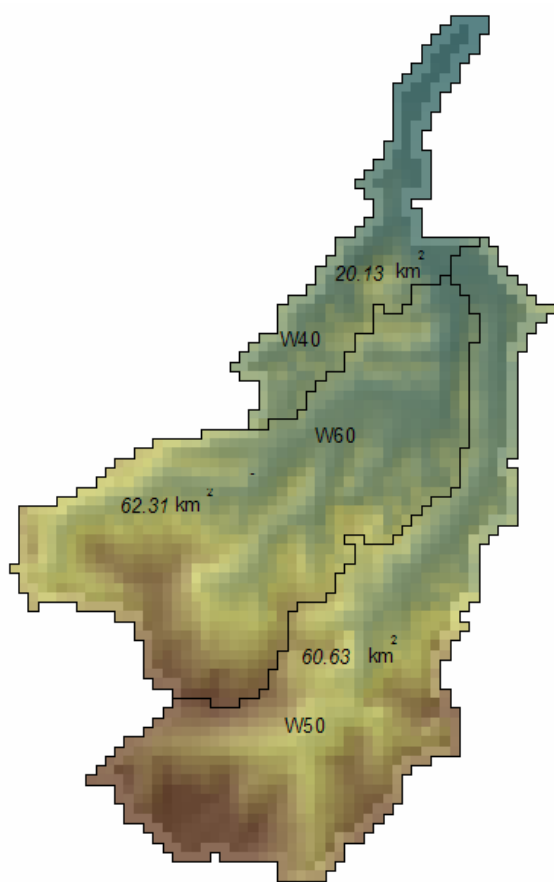
Παράρτημα Β: Σχήματα



Σχήμα Β.1: Διαμέριση της λεκάνης απορροής Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας σε τρεις και πέντε υπολεκάνες (σενάριο 2^ο και 3^ο).



Σχήμα Β.2: Διαμέριση της λεκάνης απορροής Πηνειού ανάντη της Σαρακίνας σε εννιά υπολεκάνες (σενάριο 4^ο).



Σχήμα Β.3: Διαμέριση της Πειραματικής λεκάνης απορροής σε τρεις, πέντε και εννιά υπολεκάνες (σενάρια 2^ο, 3^ο και 4^ο αντίστοιχα).

