



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Μοντελοποίηση Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Γιόφυρου και Εκτίμηση Πλημμυρικού Κινδύνου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΤΟΡΙΑΝ ΓΚΙΟΚΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Νικολαΐδης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καρατζάς Γεώργιος

Κριτσωτάκης Μαρίνος

Χανιά, Ιούνιος 2025

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής και η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου του ποταμού Γιόφυρου, του νομού Ηρακλείου Κρήτης. Πρόκειται για μια λεκάνη με έκταση 186 km^2 της οποίας ο ποταμός εκβάλει δυτικά της πόλης, δίπλα στο Παγκρήτιο Στάδιο. Για την μοντελοποίηση της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Γιόφυρου, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο υδρολογικό μοντέλο SWAT+, μια ανανεωμένη και πιο φιλική προς τον χρήστη έκδοση του SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Το μοντέλο SWAT+ λειτουργεί σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και πιο συγκεκριμένα το QGIS μέσω της πρόσθετης εφαρμογής QSWAT+. Μέσω αυτής, δημιουργείται η μοντελοποιημένη λεκάνη απορροής και στην συνέχεια εισάγονται τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα στο SWAT+ Editor για την δημιουργία της προσομοίωσης. Το υπόλοιπο κομμάτι της μοντελοποίησης συνεχίζεται σε μια από τις βοηθητικές εφαρμογές του SWAT+, το Toolbox. Το συγκεκριμένο εργαλείο, εξυπηρετεί την ανάγκη του χρήστη να πραγματοποιήσει ανάλυση ευαισθησίας σε διάφορες παραμέτρους με στόχο να εντοπίσει αυτές που παρουσιάζονται πιο ευαίσθητες για την συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη και τελικά να βαθμονομήσει τις παραμέτρους του μοντέλου μέσω αυτόματης βαθμονόμησης, ώστε αυτό, να πλησιάσει σε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική αποτύπωση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής. Η περίοδος βαθμονόμησης ορίστηκε από 01/09/1995 έως 31/08/1997, ενώ η περίοδος επαλήθευσης από 01/09/1980 έως 31/08/1983. Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ποσοτικοί δείκτες εκτίμησης της σύγκλισης μοντελοποιημένων τιμών παροχής και καταγεγραμμένων τιμών παροχής για τις προαναφερθέντες περιόδους. Στην συνέχεια, το μοντέλο τρέχει σε ημερήσιο βήμα για 46 χρόνια (1964-2009) με σκοπό να γίνει στατιστική ανάλυση στην ροή. Από εκεί, λαμβάνονται οι μέγιστες ακραίες τιμές και κατά την μέθοδο Κατανομής Ακραίων Τιμών Τύπου I (Gumbel) υπολογίζεται η παροχή ύδατος με περίοδο επαναφοράς 50 ετών να είναι $70 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η τιμή αυτή αφορούσε το ημερήσιο βήμα, οπότε έγινε κατανομή της ημερήσιας παροχής σε ωριαία χρησιμοποιώντας τον συντελεστή 2.3 ο οποίος είχε υπολογιστεί σε ανάλυση πλημμυρικών επεισοδίων του ποταμού Κοιλιάρη, καθώς για τον ποταμό Γιόφυρο δεν υπήρχαν αντίστοιχα καταγεγραμμένα δεδομένα. Έτσι η τελική πλημμυρική παροχή υπολογίζεται ως $160 \text{ m}^3/\text{sec}$. Στην συνέχεια της εργασίας, γίνεται μοντελοποίηση του ποταμού στην περιοχή όπου διαπερνά από τον αστικό ιστό του Ηρακλείου με στόχο να εντοπιστεί σε ποια σημεία υπερχειλίζει ο ποταμός και μεταφέρεται νερό, δημιουργώντας κινδύνους για τους κατοίκους. Η υδραυλική προσομοίωση έγινε στο ελεύθερο πρόγραμμα HEC-RAS και αφού εισάχθηκαν δεδομένα σχετικά με την περιοχή μελέτης όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υψηλής ανάλυσης και αποτύπωσης βαθυμετρίας του ποταμού, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις με τις πλημμυρικές παροχές $Q_1=70 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_2=105 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_3=140 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $Q_4=160 \text{ m}^3/\text{sec}$. Στην τελευταία παροχή πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στον συντελεστή Manning's για την διερεύνηση της έκτασης της πλημμύρας όταν παρουσιάζονται στον ποταμό χαμηλές και υψηλές τιμές τραχύτητας.

ABSTRACT

The current thesis presents the modelling of the catchment area and the flood risk assessment of the Giofiros river which is in the Prefecture of Heraklion in Crete. The basin covers an area of 186 km² and the river flows west of the city, next to Pagkrito Stadium. The hydrological model SWAT+, an updated and more user-friendly version of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was used to model the Giofiros basin. SWAT+ operates in a Geographic Information System (GIS) environment, more specifically on QGIS through the add-on application QSWAT+. Using this, the modeled basin is created, and then the available climate data is imported into the SWAT+ Editor to create the simulation. The remaining part of the modelling is then continued to SWAT+ Toolbox. This application serves the user's need to carry out sensitivity analysis on various parameters to identify those that are more sensitive to the catchment and eventually calibrate the model parameters through automatic calibration, so that the model can approach realistic representation of the hydrology of the catchment. The calibration period was set from 01/09/1995 to 31/08/1997, while the validation period was set from 01/09/1980 to 31/08/1983. For the evaluation of the model's performance, quantitative indicators were used to estimate the convergence of modeled flow rates and observed flow rates of the previous mentioned periods. The model is then run at a daily step for 46 years (1964-2009) in order to perform statistical analysis on the modeled flow. The maximum extreme values are obtained and using Gumbel's Extreme Value Distribution, the water flow with a return period of 50 years is calculated to be 70 m³/sec. This value relates to the daily step, so the daily flow was divided into hourly flows using the factor 2.3 which was calculated in a flood event analysis of the Koiliaris river, as there were no relevant recorded data for the Giofiros river. Therefore, the final flood flow is calculated as 160 m³/sec. In the next part of the study, the river is modeled into the area where it flows through the urban areas of Heraklion in order to identify where the river overflows and water is carried, creating risks for the local residents. The hydraulic simulation was performed in the HEC-RAS software. After entering data about the study area such as the high-resolution Digital Terrain Model and bathymetry mapping of the river, four simulations were performed with flood flows $Q_1=70$ m³/sec, $Q_2=105$ m³/sec, $Q_3=140$ m³/sec και $Q_4=160$ m³/sec. At the last flow rate, a sensitivity analysis on Manning's coefficient was performed to investigate the extent of flooding when low and high values of roughness occur in the river.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος κύριο Νικόλαο Νικολαΐδη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου το θέμα της εργασίας, την καθοδήγηση του, τις επισημάνσεις του σε καίρια σημεία της εργασίας, την εξαιρετική συνεργασία μας, την υπομονή και την κατανόηση που υπέδειξε απέναντι μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αντωνία Μαραγκάκη για την πολύτιμη βοήθεια, την κατανόηση και την υπομονή της σε όλη την πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά και τον Δρ. Μαρίνο Κριτσωτάκη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για την αγάπη τους, την απεριόριστη στήριξη τους και την εμπιστοσύνη τους, ελπίζοντας να τους έκανα περήφανους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1: ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2: ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Κεφάλαιο 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	5
2.1: ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	5
2.1.1: Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.....	5
2.1.2: Γεωλογία και Υδρογραφικό Δίκτυο	10
2.1.3: Κλιματικά στοιχεία	14
2.2: ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	17
2.2.1: Διοικητική δομή	17
2.2.2: Πληθυσμός	17
2.2.3: Οικονομία.....	17
2.2.4: Χρήσεις γης	18
2.3: ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	19
Κεφάλαιο 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	20
3.1: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWAT+	20
3.1.1: Εισαγωγική περιγραφή μοντέλου SWAT+.....	20
3.1.2: Μοντέλο SWAT	20
3.1.3: Το αναδιαμορφωμένο μοντέλο SWAT+.....	22
3.1.4: Βασικές Διεργασίες SWAT+	23
3.1.5: Υδρολογία του Μοντέλου	27
3.1.6: Διαθέσιμα Εργαλεία SWAT+.....	32
3.1.7: Quantum GIS και QSWAT+	32
3.1.8: SWAT+ Editor	32
3.1.9: SWAT+ Toolbox	33
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS	34
3.2.1: Εισαγωγική περιγραφή μοντέλου HEC-RAS.....	34
3.2.2: Υδραυλικοί Υπολογισμοί	34
3.2.3: Βασικά Δεδομένα Εισόδου του Μοντέλου	39
3.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ.....	41
3.3.1: Ανάλυση Ευαισθησίας (μέθοδος Sobol)	41
3.3.2: Δείκτες Αξιολόγησης Βαθμονόμησης-Επαλήθευσης.....	42
3.3.3: Στατιστική Ανάλυση Υδρολογικής Πληροφορίας.....	46
Κεφάλαιο 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	48

4.1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ SWAT+.....	48
4.1.1: Παρουσίαση Δεδομένων.....	48
4.1.2: Εισαγωγή Δεδομένων στο SWAT+.....	57
4.1.3: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Μοντέλου στο SWAT+ Toolbox	63
4.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ SWAT+	75
4.2.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.....	75
4.2.2: Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου	78
4.2.3: Ανάλυση μοντελοποιημένων δεδομένων ροής Γιόφυρου	80
4.2.4: Υπολογισμός ωριαίας παροχής.....	89
4.3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ HEC-RAS.....	93
4.3.1: Μεθοδολογία και εισαγωγή δεδομένων στο HEC-RAS.....	93
4.3.2: Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS	104
Κεφάλαιο 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
5.1: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ	121
5.2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ ΣΤΟ HEC-RAS.....	122
Κεφάλαιο 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	126

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3. 1. Στατιστικοί Δείκτες και εύρη	45
Πίνακας 3. 2. Τιμές των παραμέτρων y_N και σ_N για διάφορες τιμές του αριθμού παρατηρήσεων N	47
Πίνακας 4. 1. Αναλυτική παρουσίαση παραμέτρων προς επεξεργασία	65
Πίνακας 4. 2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας	66
Πίνακας 4. 3. Τελικές παράμετροι προς βαθμονόμηση	67
Πίνακας 4. 4. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης περιόδου βαθμονόμησης	69
Πίνακας 4. 5. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης περιόδου επαλήθευσης	71
Πίνακας 4. 6. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης μηνιαίας επαλήθευσης	74
Πίνακας 4. 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης	75
Πίνακας 4. 8. Curve Number για το έδαφος s29725	76
Πίνακας 4. 9. Curve Number για το έδαφος s29726	76
Πίνακας 4. 10. Curve Number για το έδαφος s29729	77
Πίνακας 4. 11. Μέγιστες ετήσιες μοντελοποιημένες παροχές	81
Πίνακας 4. 12. Τιμές των παραμέτρων y_N και σ_N για διάφορες τιμές του αριθμού των παρατηρήσεων N	83
Πίνακας 4. 13. Αριθμός παροχών που ξεπερνούν τα $10 \text{ m}^3/\text{sec}$	85
Πίνακας 4. 14. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 25/01/2004	87
Πίνακας 4. 15. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 12/01/1971	87
Πίνακας 4. 16. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 06/12/2007	87
Πίνακας 4. 17. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 12/03/1997	87
Πίνακας 4. 18. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 09/01/1978	88
Πίνακας 4. 19. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 09/01/1981	88
Πίνακας 4. 20. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 13/02/2001	88
Πίνακας 4. 21. Χαρακτηριστικά των πλημμυρών στην λεκάνη του ποταμού Κοιλιάρη για τη περίοδο 2007-2019 (Πηγή: Ερευνητικό Έργο για την Ολοκληρωμένη Παρέμβαση Προστασίας του Παρόχθιου Δάσους για την Αντιπλημμυρική Προστασία του Ποταμού Κοιλιάρη)	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 4. 1. Ετήσιες κατακρημνίσεις όπως καταγράφηκαν από τους σταθμούς.....	51
Γράφημα 4. 2. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Αγίας Βαρβάρας.....	51
Γράφημα 4. 3. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Φοινικιάς	52
Γράφημα 4. 4. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Ηράκλειου ΕΜΥ.....	52
Γράφημα 4. 5. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Προφήτη Ηλία	53
Γράφημα 4. 6. Μέση ετήσια θερμοκρασία στον σταθμό Ηράκλειο ΕΜΥ	53
Γράφημα 4. 7. Μέση ετήσια θερμοκρασία στον σταθμό Φοινικιάς	54
Γράφημα 4. 8. Μέση μηνιαία παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από το 1977 έως το 2002.....	54
Γράφημα 4. 9. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1995 έως 31/08/1997	55
Γράφημα 4. 10. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1997 έως 31/08/1983	55
Γράφημα 4. 11. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1987 έως 31/08/1991	56
Γράφημα 4. 12. Βαθμονόμηση 1995-1997.....	68
Γράφημα 4. 13. R^2 βαθμονόμησης	69
Γράφημα 4. 14. Επαλήθευση στην περίοδο 1980-1983.....	70
Γράφημα 4. 15. R^2 Επαλήθευσης	71
Γράφημα 4. 16. Επαλήθευση σε μηνιαίες τιμές για την περίοδο 1975-2002	73
Γράφημα 4. 17. R^2 στις μηνιαίες τιμές.....	74
Γράφημα 4. 18. Ημερήσιες μοντελοποιημένες τιμές παροχής	80
Γράφημα 4. 19. Gumbel έως $T=50$ έτη	84
Γράφημα 4. 20. Frequency of Exceedance μοντελοποιημένων τιμών παροχής	85
Γράφημα 4. 21. Αριθμός παροχών που ξεπερνούν τα $10 \text{ m}^3/\text{sec}$	86
Γράφημα 4. 22. Μέγιστες ετήσιες μοντελοποιημένες παροχές.....	86
Γράφημα 4. 23 . Αδιαστατοποιημένες κατανομές πλημμυρικών επεισοδίων για την περίοδο 2007-2019 (Πηγή: Ερευνητικό Έργο για την Ολοκληρωμένη Παρέμβαση Προστασίας του Παρόχθιου Δάσους για την Αντιπλημμυρική Προστασία του Ποταμού Κοιλιάρη)	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

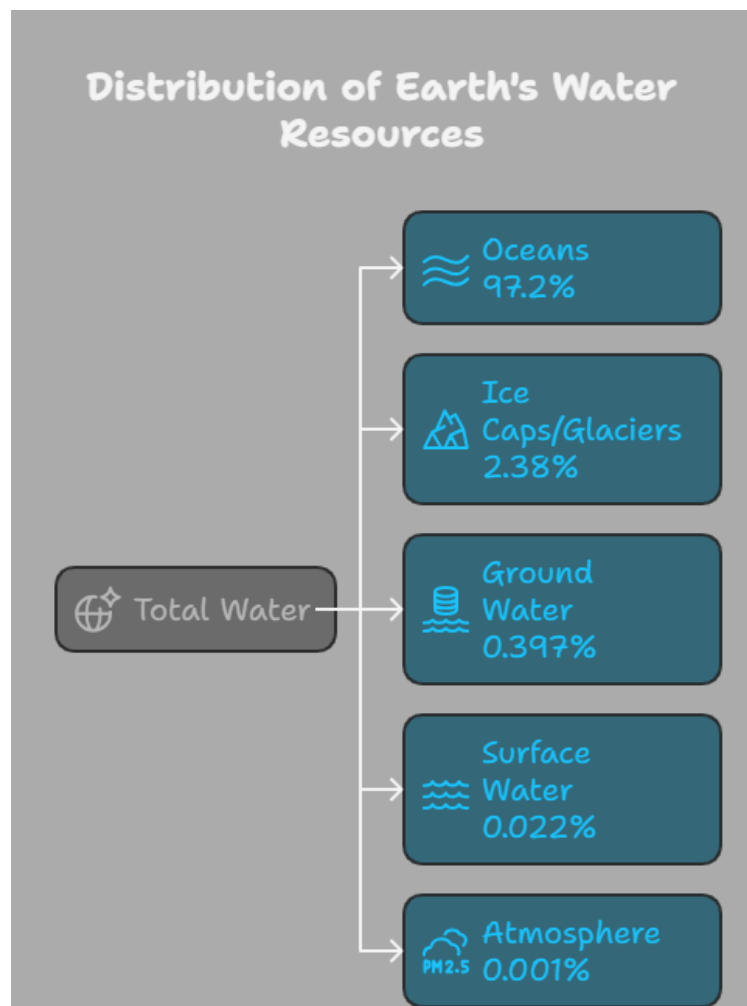
Σχήμα 1. 1. Παγκόσμια κατανομή νερού	1
Σχήμα 2. 1. Υδατικό διαμέρισμα Κρήτης EL13, πηγή: 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Του ΥΔ Κρήτης (EL13), 2023.....	5
Σχήμα 2. 2. Γεωμορφολογικό Ανάγλυφο του ΥΔ Κρήτης EL13, πηγή: 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Του ΥΔ Κρήτης (EL13), 2023	6
Σχήμα 2. 3. Λεκάνη απορροής ποταμού Γιόφυρου (δημιουργία με Google Earth).....	7
Σχήμα 2. 4. Υψομετρικές ζώνες και γεωμορφολογία λεκάνης, πηγή: Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023	8
Σχήμα 2. 5. Ζώνες κλίσεων λεκάνης, πηγή: Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023	9
Σχήμα 2. 6. Απεικόνιση γεωλογικής δομής Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα, πηγή: Δημοσθένης Μ. Μουντράκης, 2010.....	10
Σχήμα 2. 7. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής γύρω από τη λεκάνη απορροής, πηγή: geoportal.apdkritis.gov.gr	11
Σχήμα 2. 8. Λιθολογία ευρύτερης περιοχής γύρω από την λεκάνη απορροής, πηγή: geoportal.apdkritis.gov.gr	12
Σχήμα 2. 9. Υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης απορροής ποταμού Γιόφυρου όπως αποτυπώνεται στο QGIS.....	13
Σχήμα 2. 10. Μέση βροχόπτωση και μέσος αριθμός ημέρων βροχόπτωσης για το Ηράκλειο, πηγή: EMY	14
Σχήμα 2. 11. Ελάχιστη-μέση-μέγιστη θερμοκρασία για το Ηράκλειο, πηγή: EMY	15
Σχήμα 2. 12. Ανεμολογικά στοιχεία για το Ηράκλειο, πηγή: EMY	16
Σχήμα 2. 13. Σχετική υγρασία Ηρακλείου, πηγή: EMY	16
Σχήμα 2. 14. Χάρτης χρήσεων γης Π.Ε. Ηρακλείου, πηγή: © ESA WorldCover project / Contains modified Copernicus Sentinel data (2021) processed by ESA WorldCover consortium	18
Σχήμα 2. 15. Σημαντικές πλημμύρες στο Ηράκλειο όπως καταγράφονται από την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας, δημιουργία με Google Earth.	19
Σχήμα 3. 1. Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού κύκλου, πηγή: Neitsch et al., 2011.....	25
Σχήμα 3. 2. Σχηματική απεικόνιση πορείας νερού στο SWAT+, πηγή: Neitsch et al., 2011.....	27
Σχήμα 3. 3. Σχέση περισεύματος βροχής με το ύψος βροχής στην μέθοδο SCS, πηγή: Neitsch et al., 2011	29
Σχήμα 3. 4. Τιμές Curve Number για διάφορες χρήσεις γης, πηγή: Τσακίρης Γ. et al., 2013	31
Σχήμα 3. 5. Απεικόνιση όρων εξίσωσης ενέργειας (Brunner, 2016).....	35
Σχήμα 3. 6. Μέθοδος υποδιαίρεσης διατομής (Brunner, 2016)	37
Σχήμα 3. 7. Παράδειγμα υπολογισμού μέσης κινητικής (Brunner, 2016).....	37
Σχήμα 3. 8. Διάγραμμα ενέργειας vs. υψόμετρο επιφάνειας νερού (Brunner, 2016).....	39
Σχήμα 4. 1. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Κρήτης, δημιουργία με QGIS	48
Σχήμα 4. 2. Ψηφιακός Χάρτης Χρήσεων Γης Κρήτης, δημιουργία με QGIS	48
Σχήμα 4. 3. Ψηφιακός Χάρτης Εδαφών Κρήτης, δημιουργία με QGIS.....	49
Σχήμα 4. 4. Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και σταθμού μέτρησης παροχής σε δορυφορική απεικόνιση (Πηγή: Google Earth)	50
Σχήμα 4. 5. Καρτέλα Plugins στο QGIS.....	57
Σχήμα 4. 6. Μενού QSWAT+	57
Σχήμα 4. 7. Παράθυρο του μενού 'Delineate Watershed'	58
Σχήμα 4. 8. Υπολεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής Γιόφυρου	59
Σχήμα 4. 9. Μενού QSWAT+	60
Σχήμα 4. 10. Παράθυρο του μενού 'Create HRUs'	60
Σχήμα 4. 11. Μενού QSWAT+ και HRUs λεκάνης.....	61

Σχήμα 4. 12. Μετεωρολογικοί σταθμοί στο SWAT+ Editor	61
Σχήμα 4. 13. Εισαγωγή μετρούμενων τιμών σταθμών.....	62
Σχήμα 4. 14. Run SWAT+	62
Σχήμα 4. 15. Περιβάλλον SWAT+ Toolbox.....	63
Σχήμα 4. 16. Εισαγωγή τιμών πεδίου	63
Σχήμα 4. 17. Παράμετροι προς ανάλυση όπως παρουσιάζονται στο Toolbox	64
Σχήμα 4. 18. Αυτόματη βαθμονόμηση	67
Σχήμα 4. 19. Υδατικό Ισοζύγιο όπως παρουσιάζεται από το SWAT+ Toolbox.....	78
Σχήμα 4. 20. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επικεντρωμένο στην λεκάνη απορροής ποταμού Γιόφυρου (Πηγή δεδομένων: Ν.Π.Δ.Δ. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, ΕΠΨΣ 2007-13, ΕΠΑΝΕΚ2014-20)	93
Σχήμα 4. 21. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επικεντρωμένο στην εκβολή του ποταμού Γιόφυρου (Πηγή δεδομένων: Ν.Π.Δ.Δ. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, ΕΠΨΣ 2007-13, ΕΠΑΝΕΚ2014-20)	94
Σχήμα 4. 22. Πριν την επεξεργασία	95
Σχήμα 4. 23. Μετά την επεξεργασία.....	96
Σχήμα 4. 24. Εμφάνιση DEM Ηρακλείου στο RAS Mapper.....	97
Σχήμα 4. 25. Land Cover Layer (ESA WorldCover 2021 v200).....	98
Σχήμα 4. 26. Τιμές Manning's που εισάγονται στο μοντέλο	99
Σχήμα 4. 27. Πλήρες σχέδιο ποταμού	100
Σχήμα 4. 28. Σχεδιασμός Cross Section (μωβ γραμμή).....	101
Σχήμα 4. 29. Γεωμετρική περιγραφή διατομής υδατορεύματος.....	101
Σχήμα 4. 30. Διατομή γέφυρας με δοκό στο κέντρο.....	102
Σχήμα 4. 31. Ορισμός οριακών συνθηκών	103
Σχήμα 4. 32. Ορισμός Παροχών προς μελέτη.....	103
Σχήμα 4. 33. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=70 \text{ m}^3/\text{sec}$	104
Σχήμα 4. 34. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=70 \text{ m}^3/\text{sec}$	105
Σχήμα 4. 35. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=105 \text{ m}^3/\text{sec}$	106
Σχήμα 4. 36. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=105 \text{ m}^3/\text{sec}$	107
Σχήμα 4. 37. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=140 \text{ m}^3/\text{sec}$	108
Σχήμα 4. 38. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=140 \text{ m}^3/\text{sec}$	109
Σχήμα 4. 39. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$	110
Σχήμα 4. 40. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$	111
Σχήμα 4. 41. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0225$	112
Σχήμα 4. 42. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0225$	113
Σχήμα 4. 43. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0675$	114
Σχήμα 4. 44. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0675$	115
Σχήμα 4. 45. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και διαφορετικά n	116
Σχήμα 4. 46. Έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ ετών σύμφωνα με 1 ^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Κρήτης.	117
Σχήμα 4. 47. Έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ ετών σύμφωνα με μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης τμήματος της πεδινής κοίτης του ποταμού Γιόφυρου.	118
Σχήμα 4. 48. Προσομοίωση πλημμυρικών παροχών που υπολογίστηκαν από τη 1 ^η Αναθεώρηση ΣΔΚΠ και τη μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης κοίτης του ποταμού Γιόφυρου στο μοντέλο HEC-RAS της παρούσας εργασίας.....	119

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1: ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό αποτελεί από τα σημαντικότερα αγαθά που προσφέρει η φύση και είναι απαραίτητο στοιχείο για την συνέχιση της ζωής των ανθρώπων, των ζώων και των φυτών στον πλανήτη. Το σωματικό βάρος του ανθρώπου αποτελείται από περίπου 65-70% νερό και η σημαντικότητα του καταδεικνύεται και από το γεγονός ότι ο άνθρωπος δεν μπορεί να επιβιώσει πάνω από τρεις με πέντε ημέρες χωρίς να καταναλώσει νερό. Αν και είναι αδύνατο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ποσότητα του νερού στον πλανήτη, οι εκτιμήσεις δείχνουν πως ο όγκος του νερού που υπάρχει στη Γη είναι γύρω στα 1,360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα, (Μιμίκου Μ. & Μπαλτάς Ε., 2018). Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. περίπου το 75% του πλανήτη καλύπτεται από νερό και είναι εύκολα αντιληπτό ότι η μεγαλύτερη ποσότητα βρίσκεται τους ωκεανούς με ποσοστό 97.2%. Η εναπομένουσα ποσότητα εντοπίζεται υπό την μορφή παγετώνων σε ένα ποσοστό 2.38%, η οποία όμως δεν είναι εκμεταλλεύσιμη, και περίπου το 0.6% της ποσότητας του νερού εντοπίζεται σε ποτάμια, λίμνες και στο έδαφος σύμφωνα με το U.S. Environmental Protection Agency.



Σχήμα 1. 1. Παγκόσμια κατανομή νερού

Η ποσότητα των υπόγειων υδάτων έχει όγκο περίπου 8.4 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα, (Μιμίκου Μ. & Μπαλτάς Ε., 2018) και αποτελούν την μεγαλύτερη δεξαμενή γλυκού νερού σε όλο τον πλανήτη πέραν των παγετώνων. Αναφορικά με την εκμετάλλευση του υπόγειου νερού, η μισή ποσότητα δεν γίνεται να αντληθεί καθώς βρίσκεται σε πολύ μεγάλα βάθη. Από την συνολική ποσότητα του νερού που δύναται να εκμεταλλευτεί στον πλανήτη, το 98% αφορά τα υπόγεια ύδατα ενώ μόλις το 2% αφορά τα νερά των ποταμών και των λιμνών, (Μιμίκου Μ. & Μπαλτάς Ε., 2018).

Οι ποταμοί, ανέκαθεν, αποτελούσαν σημαντικά κομμάτια της εξέλιξης των ανθρώπων καθώς γύρω από αυτούς δημιουργήθηκαν αρκετές σπουδαίες πόλεις. Το νερό που έπλεε εκμεταλλευόταν για την άρδευση καλλιεργειών και συνεπώς στην επιβίωση των ανθρώπων, και αργότερα στην εμπορική εκμετάλλευση μεταφέροντας γρήγορα και αποτελεσματικά αγαθά από μέρος σε μέρος. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα ποτάμια προσφέρουν αρκετά οφέλη στην ανθρωπότητα, όμως υπάρχουν και οι περιπτώσεις που μπορούν να αποβούν καταστροφικά, οι οποίες με το πέρασμα των χρόνων γίνονται όλο και πιο συχνές. Η εμφάνιση καταιγίδας με υψηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης σε μια περιοχή έχει συχνά ως αποτέλεσμα την απορροή ενός μεγάλου μέρους της κατακρήμνισης στα ποτάμια, με συνεπακόλουθο αυτά να υπερχειλίζουν και να προκαλούν μεγάλες καταστροφές στην πορεία τους, όπως είναι οι πλημμύρες.

Οι κίνδυνοι από τέτοιες πλημμύρες κινητοποίησαν τις αρχές να ξεκινήσουν την μελέτη τέτοιων φαινομένων με στόχο στην καλύτερη δυνατή διαχείριση τους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την κοινοτική οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας η οποία περιλαμβάνει τα εξής:

- Προκαταρκτική εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής ποταμών και προσδιορισμός, με τον τρόπο αυτό, των περιοχών με σοβαρή πιθανότητα πλημμύρας.
- Σε περιοχές, στις οποίες υφίστανται όντως κίνδυνοι για ζημιές από πλημμύρες, τα Κράτη Μέλη οφείλουν να εκπονήσουν χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, στους οποίους θα αποτυπώνονται οι αρνητικές συνέπειες των πλημμυρών (σε πληθυσμό, εγκαταστάσεις, κλπ.).
- Για τις περιοχές αυτές πρέπει να καταρτισθούν σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας. Τα σχέδια διαχείρισης πρέπει να περιλαμβάνουν μέτρα για τη μείωση της πιθανότητας πλημμύρας και τον περιορισμό των πιθανών της επιπτώσεων.

Για την εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας στην Ελλάδα, αρμόδια ήταν η Γενική Διεύθυνση Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

1.2: ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η υδρολογική μελέτη της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου και η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στα σημεία όπου ο ποταμός διέρχεται από την πόλη του Ηρακλείου. Αρχικά πραγματοποιείται μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού στο SWAT+ με στόχο την μελέτη της υδρολογίας. Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα του μοντέλου τα οποία αφορούν την παροχή στην εκβολή του ποταμού χρησιμοποιούνται για στατιστική ανάλυση με κατανομή ακραίων τιμών τύπου Gumbel για να υπολογιστεί η παροχή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών. Τέλος, μέσω του προγράμματος HEC-RAS γίνεται η μοντελοποίηση του ποταμού στην πόλη του Ηρακλείου, όπου μέσω της υδραυλικής προσομοίωσης καταρτίζονται χάρτες που παρουσιάζουν την πλημμυρική έκταση για την πλημμυρική παροχή. Η υδραυλική προσομοίωση βοηθά στην εκτίμηση της έκτασης, του βάθους και των ταχυτήτων ροής του πλημμυρικού πεδίου και αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για την συνολική εκτίμηση των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δύναται να επιφέρει ένα έντονο φαινόμενο πλημμύρας.

Τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα που προκαλούνται από μεγάλης έντασης και σχετικά μικρής διάρκειας βροχόπτωση εμφανίζονται όλο και πιο συχνά στην Ελλάδα. Ισχυρά παραδείγματα αποτελούν οι πλημμύρες της Μάνδρας το 2017 και οι πλημμύρες από την κακοκαιρία Daniel το 2023 η οποία επηρέασε αρκετές χώρες της Μεσογείου. Αποτέλεσμα αυτών ήταν οι σοβαρές υλικές καταστροφές και αρκετοί νεκροί άνθρωποι. Ο ποταμός Γιόφυρος ανήκει στο νησί της Κρήτης και συνεπώς επηρεάζεται από τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής στη Μεσόγειο. Ο ποταμός πλήττεται συχνά από πλημμυρικά επεισόδια που προκαλούνται από ισχυρής έντασης βροχόπτωση με το πιο σημαντικό γεγονός να καταγράφεται τον Ιανουάριο του 1994, όπου οι καταστροφικές επιπτώσεις δεν περιορίστηκαν στην πόλη του Ηρακλείου, αλλά σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού. Η διαρκής και ελαφριά βροχόπτωση που είχε διαποτίσει το έδαφος τις μέρες πριν την εμφάνιση της ισχυρής καταιγίδας διάρκειας 5 ωρών, συνέβαλε σημαντικά στις καταστροφικές συνέπειες της πλημμύρας. Γίνεται λοιπόν αντιληπτή η ανάγκη της μελέτης της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου μέσω μοντελοποίησης με χρήση πραγματικών κλιματικών δεδομένων, με στόχο την εξαγωγή πλημμυρικών παροχών που δύναται να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στην κοινωνία και το περιβάλλον της περιοχής.

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

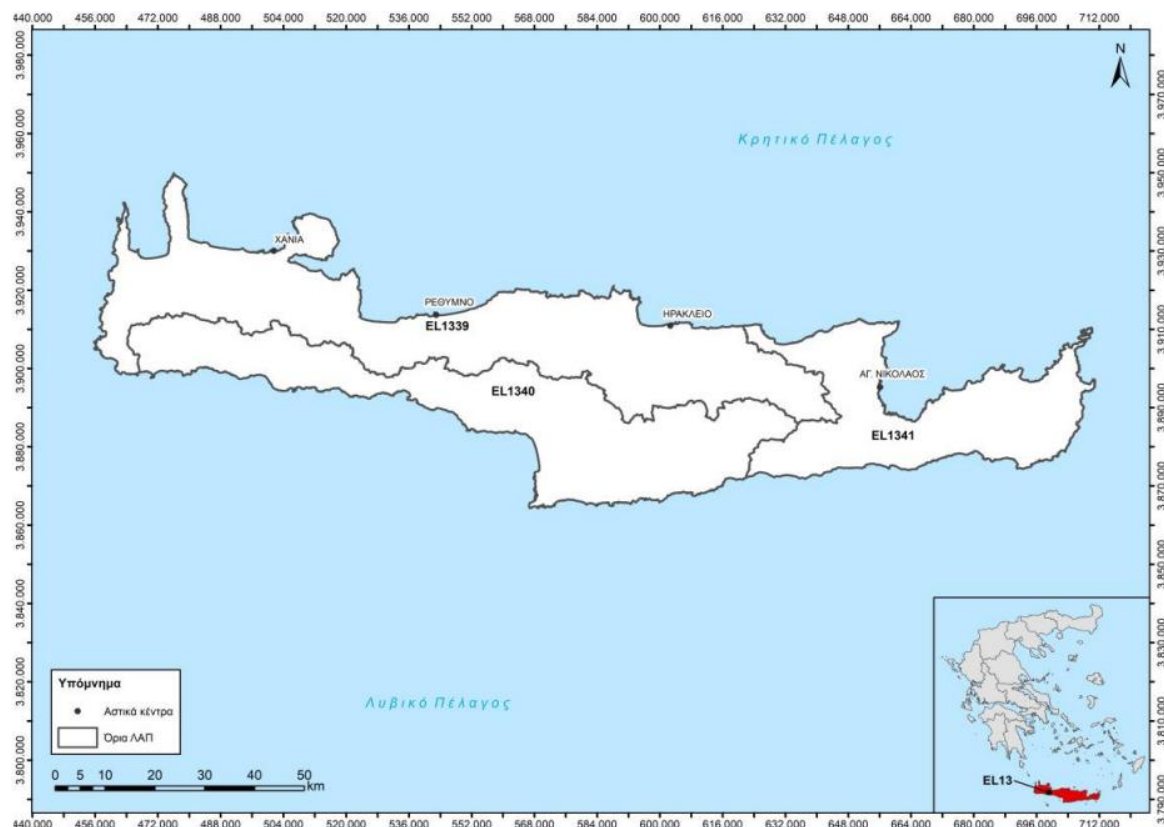
- Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται ορισμένα γενικά στοιχεία για το νερό και την ύπαρξη του στον πλανήτη. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους κινδύνους της πλημμύρας και στην κοινοτική οδηγία της Ευρωπαϊκή Ένωση στην Ελλάδα και αναφέρονται περιληπτικά ο σκοπός και η διάρθρωση της εργασίας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης. Στην αρχή, αναλύονται τα φυσικά χαρακτηριστικά της Κρήτης και της λεκάνης απορροής που μελετάται. Δίνεται έμφαση στην γεωμορφολογία της περιοχής, ενώ στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα χρήσιμα στοιχεία για την γεωλογία της. Επιπλέον, αναλύονται τα κλιματικά στοιχεία της περιοχής που λήφθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου και επικεντρώνονται στις κατακρημνίσεις, στην θερμοκρασία, τους ανέμους και την υγρασία. Τέλος, αναφέρονται ορισμένα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της περιοχής και επισημαίνονται οι ιστορικές πλημμύρες που είχαν μεγάλο αντίκτυπο στην κοινωνία του Ηρακλείου.

- Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου. Αρχικά περιγράφεται το υδρολογικό μοντέλο SWAT+, όπου παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος για τον υπολογισμό των βασικών υδρολογικών διεργασιών. Στη συνέχεια, περιγράφεται το πρόγραμμα υδραυλικής προσομοίωσης HEC-RAS και παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την μονοδιάστατη ανάλυση του ποταμού. Τέλος, παρουσιάζονται το θεωρητικό σκέλος των στατιστικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η μέθοδος Sobol για την ανάλυση ευαισθησίας, οι στατιστικοί δείκτες NSE, PBIAS, MSE, RMSE και R^2 για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης και η μέθοδος Gumbel για τον υπολογισμό παροχής αιχμής.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε όπως και τα αποτελέσματα της λειτουργίας των δυο προγραμμάτων μοντελοποίησης. Στην αρχή, αναφέρονται τα δεδομένα που εισήχθηκαν στο μοντέλο SWAT+ και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διαδικασία της μοντελοποίησης. Έπειτα, με την χρήση του βοηθητικού προγράμματος Toolbox, παρουσιάζεται η βαθμονόμηση και η επαλήθευση με την βοήθεια στατιστικών δεικτών αξιολόγησης. Στη συνέχεια, γίνεται η στατιστική ανάλυση για τον προσδιορισμό της παροχής αιχμής για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη. Αναφορικά με την υδραυλική προσομοίωση, γίνεται παρουσίαση των δεδομένων που εισήχθησαν για το στήσιμο της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα HEC-RAS, αναφέρεται η μέθοδος της υδραυλικής επίλυσης και τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δηλαδή οι χάρτες της πλημμυρικής επιφάνειας όπου αποδίδεται η χωρική πληροφορία σχετικά με την έκταση και τα μέγιστα βάθη της πλημμύρας γύρω από τον ποταμό.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας. Τέλος, γίνεται αναφορά και σύγκριση με αντίστοιχες εργασίες που έγιναν στο παρελθόν για τον ποταμό Γιόφυρο.

Κεφάλαιο 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

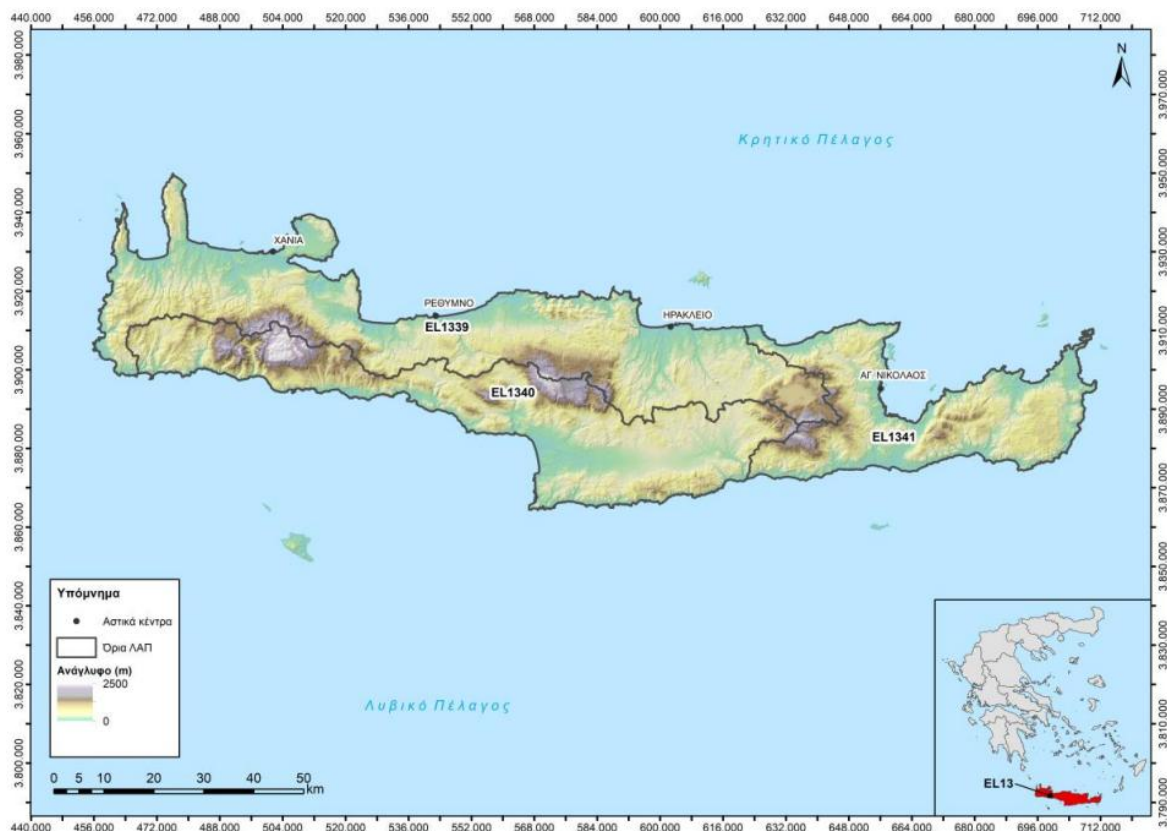
2.1: ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.1.1: Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 2. 1. Υδατικό διαμέρισμα Κρήτης EL13, πηγή: 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Του ΥΔ Κρήτης (EL13), 2023

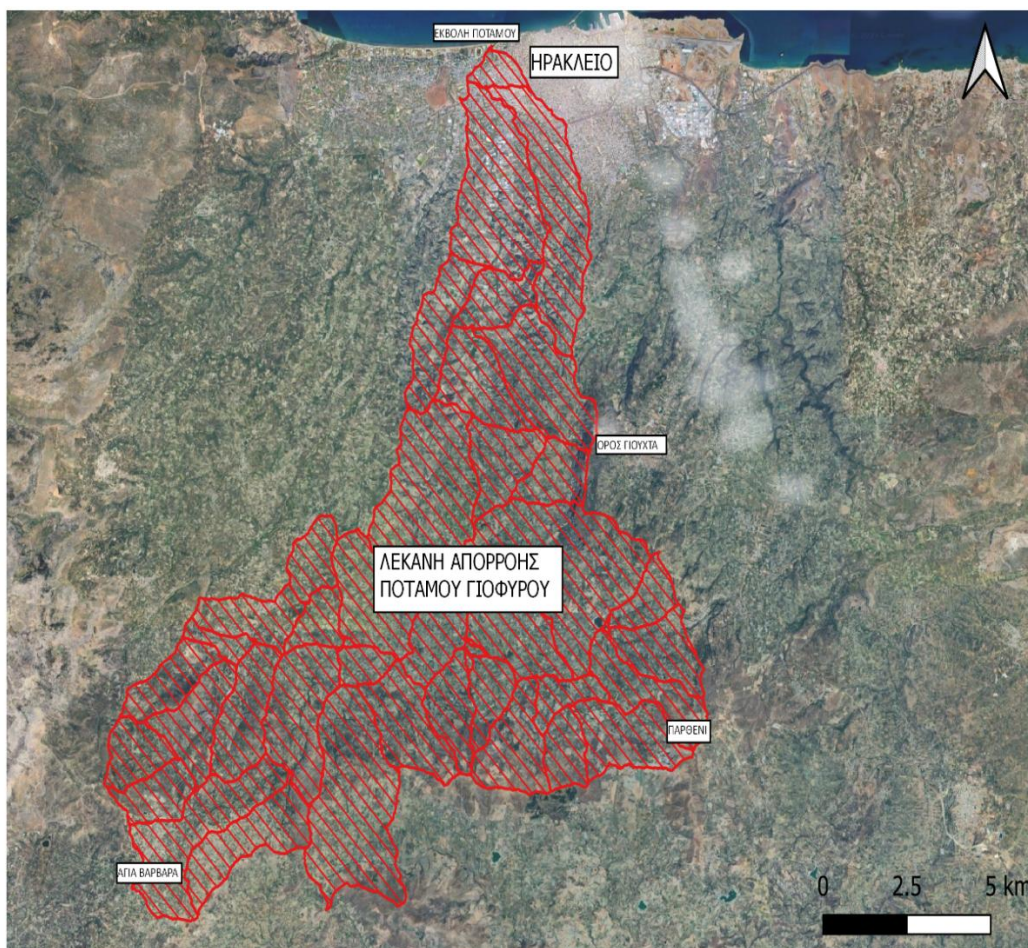
Το Υδατικό Διαμέρισμα 13 «Κρήτη» αποτελεί το νοτιότερο Υδατικό Διαμέρισμα της Ελλάδας. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται η ομώνυμη νήσος μαζί με τα μικρότερα νησιά Γαύδος, Γαυδοπούλα, Δία, Κουφονήσι, Γαϊδουρονήσι, Διονυσάδες, Σπιναλόγκα και Παξιμάδι. Οι Περιφερειακές Ενότητες που περιλαμβάνονται στο διαμέρισμα είναι οι Π.Ε. Χανίων, Π.Ε. Ρεθύμνης, Π.Ε. Ηρακλείου και Π.Ε. Λασιθίου και συνολικά το νησί υπάγεται στην Περιφέρεια Κρήτης. Το Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης αποτελείται από τρεις Λεκάνες Απορροής Ποταμών οι οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί με κωδικές ονομασίες (Σχήμα 2.1.). Αφορούν τα Ρέματα Βορείου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου με την ονομασία EL1339 με έκταση 3,644 km², τα Ρέματα Νότιου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου με την ονομασία EL1340 με έκταση 2,798 km² και τα Ρέματα Ανατολικής Κρήτης EL1341 με έκταση 1,885 km². Η συνολική χερσαία έκταση του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης είναι ίση με 8,327 km² και η ακτογραμμή ανέρχεται στα 1,306 km, (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018)



Σχήμα 2. 2. Γεωμορφολογικό Ανάγλυφο του ΥΔ Κρήτης EL13, πηγή: 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Του ΥΔ Κρήτης (EL13), 2023

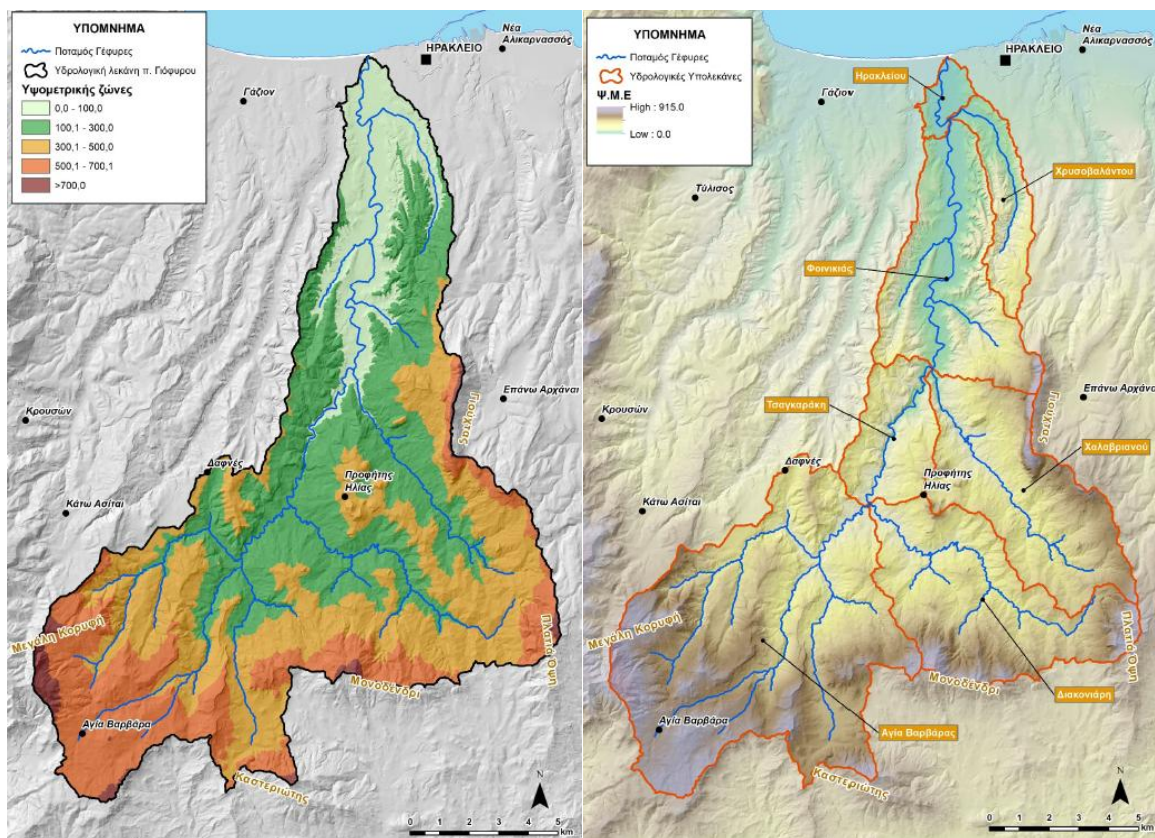
Αναφορικά με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του νησιού (Σχήμα 2.2.), το ανάγλυφο του είναι έντονο με μεγάλους ορεινούς όγκους. Τα κυριότερα ορεινά συγκροτήματα αποτελούν τα Λευκά Όρη με μέγιστο υψόμετρο τα 2,452 m, ο Ψηλορείτης με μέγιστο υψόμετρο τα 2,456 m, ο Κουλούκωνας με μέγιστο υψόμετρο τα 1,083 m, τα Αστερούσια με μέγιστο υψόμετρο τα 1,231 m, η Δίκτη με μέγιστο υψόμετρο τα 2,148 m και τα Λασιθιώτικα Όρη με μέγιστο υψόμετρο τα 1,476 m. Γενικά, υπάρχει μια μεγάλη πληθώρα σπηλαίων και φαραγγίων σε όλη την Κρήτη, και παρουσιάζεται η ύπαρξη σημαντικών οροπεδίων εντός των μεγάλων ορεινών όγκων. Ενδεικτικά, στα Λευκά Όρη εντοπίζεται το οροπέδιο Ομαλού και το οροπέδιο Ασκυφού, ενώ στη Δίκτη εντοπίζεται το οροπέδιο Λασιθίου. Στους πρόποδες των ορεινών όγκων του νησιού αναπτύσσονται τα πιο εύφορα πεδινά τμήματα με χαρακτηριστικά παραδείγματα την κοιλάδα της Μεσσαράς, την πεδιάδα της Ιεράπετρας, την πεδιάδα του Αγίου Νικολάου, την κοιλάδα Ηρακλείου-Μαλλίων και την εκτεταμένη πεδιάδα από την περιοχή του Καστελίου Κισσάμου έως την περιοχή της Άξου. Αναφορικά με τις ακτές της Κρήτης, κυρίως στο Νότιο τμήμα, είναι απόκρημνες και βραχώδεις. Ανάμεσα τους σχηματίζονται εκτεταμένες η μικρότερες παραλίες με άμμο, βότσαλα, αμμοθίνες, αρμυρίκια και καλαμώνες, (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Η περιοχή μελέτης της διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται κεντρικό-βόρειο τμήμα της Κρήτης και βορειοδυτικά της πόλης του Ηρακλείου και αφορά τον ποταμό Γιόφυρο. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης στην οποία θα γίνει η υδρολογική μοντελοποίηση αφορά την Λεκάνη Απορροής του ποταμού Γιόφυρου (Σχήμα 2.3.). Η περιοχή, ανήκει υδρολογικά στη ΛΑΠ Ρεμάτων Βόρειου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου και στην Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου. Η έκταση της λεκάνης έχει εμβαδόν περίπου ίσο με 186 km^2 με μέση κλίση περίπου 27% και παρουσιάζει ένα απιοειδές σχήμα. Εκτείνεται σε μήκος 25 km στον άξονα Βορρά-Νότου από την παράλια ζώνη της πόλης του Ηρακλείου έως την Αγία Βαρβάρα στα Νοτιοδυτικά και το Παρθένι στα Νοτιοανατολικά, όπου η απόσταση τους έχει μήκος 17 km. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης στον άξονα Ανατολής-Δύσης η υδρολογική λεκάνη εκτείνεται από τους όρους Γιούχτα στα Ανατολικά, έως το Βενεράτο στα Δυτικά, (Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023). Ο ποταμός Γιόφυρος αποτελεί από τα μεγαλύτερα επιφανειακά υδάτινα σώματα της Κρήτης και έχει μήκος περίπου 36.9 km. Οι πηγές του εντοπίζονται στην οροσειρά που αναπτύσσεται δυτικά του Ψηλορείτη και εκβάλει στο Κρητικό πέλαγος διερχόμενος δυτικά της πόλης του Ηρακλείου.



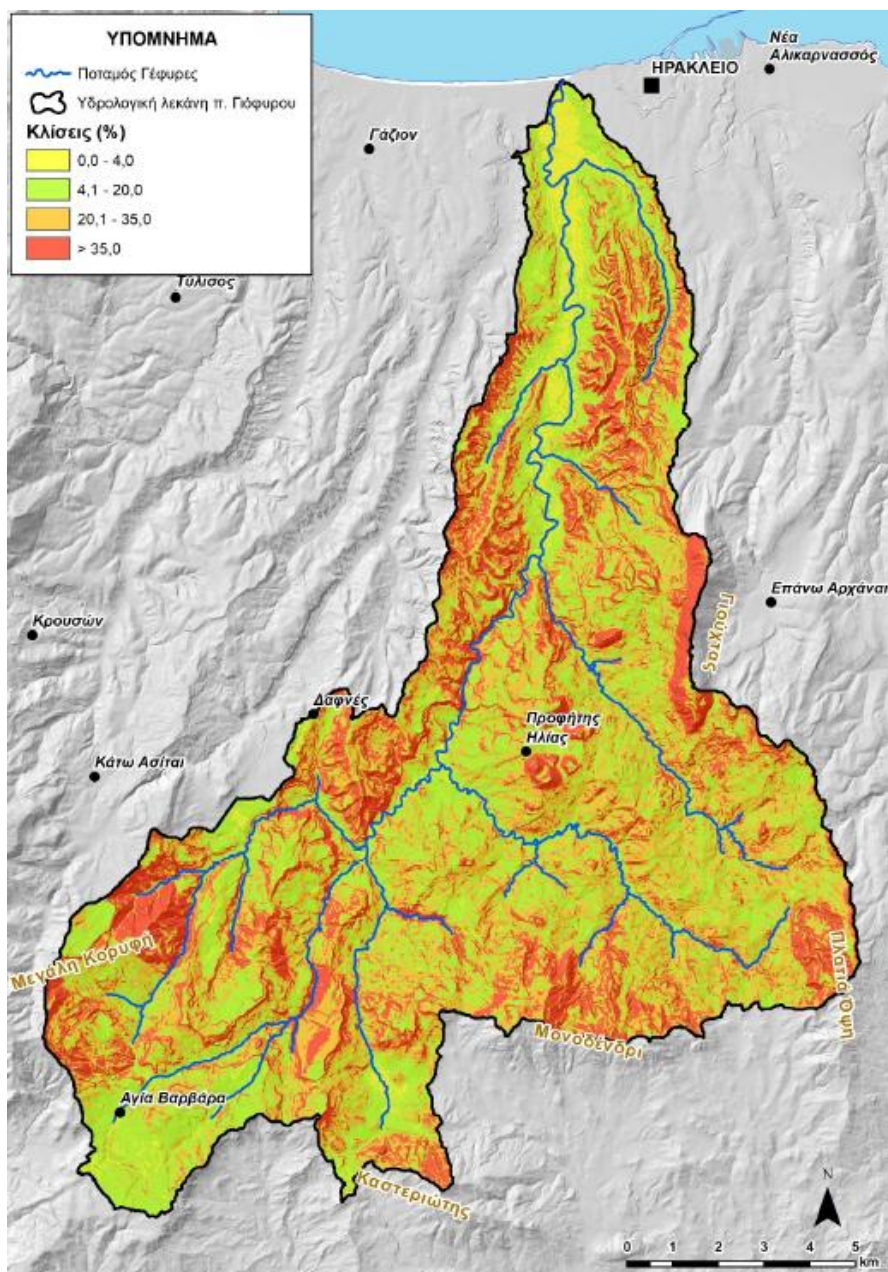
Σχήμα 2. 3. Λεκάνη απορροής ποταμού Γιόφυρου (δημιουργία με Google Earth)

Αναφορικά με την μορφολογία της περιοχής, η λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου χαρακτηρίζεται σχεδόν σε όλο της το σύνολο ως ημιπεδινή και λοφώδης. Στον νότο οριοθετείται από τα όρη Πλατιά Όψη, Μονοδένδρι, Καστεριώτη και Μεγάλη Κορυφή το οποίο παρουσιάζει το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης που είναι ίσο με 972 m. Στα δυτικά και τα ανατολικά οριοθετείται από λόφους με εξαίρεση του όρους Γιούχτας. Το κατάντη τμήμα της λεκάνης όπου είναι και η εκβολή της χαρακτηρίζεται ως πεδινό και καταλαμβάνει το 12% της λεκάνης. Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης χαρακτηρίζεται ως ημιπεδινό και καταλαμβάνει το 34% του συνόλου της, με εξαιρέσεις το ύψωμα του Προφήτη Ηλία όπου το ανάγλυφο παρουσιάζεται λοφώδες και το βουνό Γιούχτα όπου παρουσιάζεται λοφώδες έως ορεινό. Το ανάντη τμήμα της λεκάνης διακρίνεται ως λοφώδες όπου καταλαμβάνει το 32% της έκτασης. Το νότιο τμήμα παρουσιάζεται ημιορεινό και καταλαμβάνει το 19% της λεκάνης, με ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 2% να διακρίνεται ορεινό, (Σχήμα 2.4.), (Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023).



Σχήμα 2. 4. Υψομετρικές ζώνες και γεωμορφολογία λεκάνης, πηγή: Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023

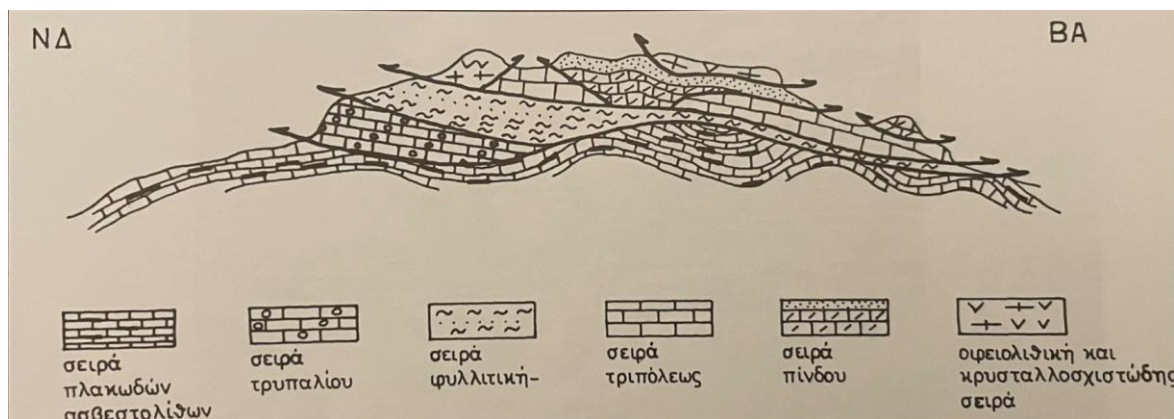
Στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου οι ήπιες κλίσεις της τάξης του 0-4% εμφανίζονται κυρίως στο κατάντη τμήμα και κατά μήκος της κοίτης του ποταμού. Οι ήπιες κλίσεις 4-20% εμφανίζονται σχεδόν σε όλο το εύρος της λεκάνης και καταλαμβάνουν το 37% της έκτασης. Στις ορεινές περιοχές οι κλίσεις παρουσιάζονται σχετικά απότομες της τάξης του 20-35% και καταλαμβάνουν το 34% της υδρολογικής λεκάνης. Τέλος, στις κορυφές των λόφων και των βουνών το ανάγλυφο διακρίνεται ως απότομο όπου οι κλίσεις ξεπερνούν το 35% και καλύπτουν το 24% της έκτασης, (Σχήμα 2.5.), (Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023).



Σχήμα 2. 5. Ζώνες κλίσεων λεκάνης, πηγή: Μελέτη Εκ Νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης Της Πεδινής Κοίτης Ποταμού Γιόφυρου, 2023

2.1.2: Γεωλογία και Υδρογραφικό Δίκτυο

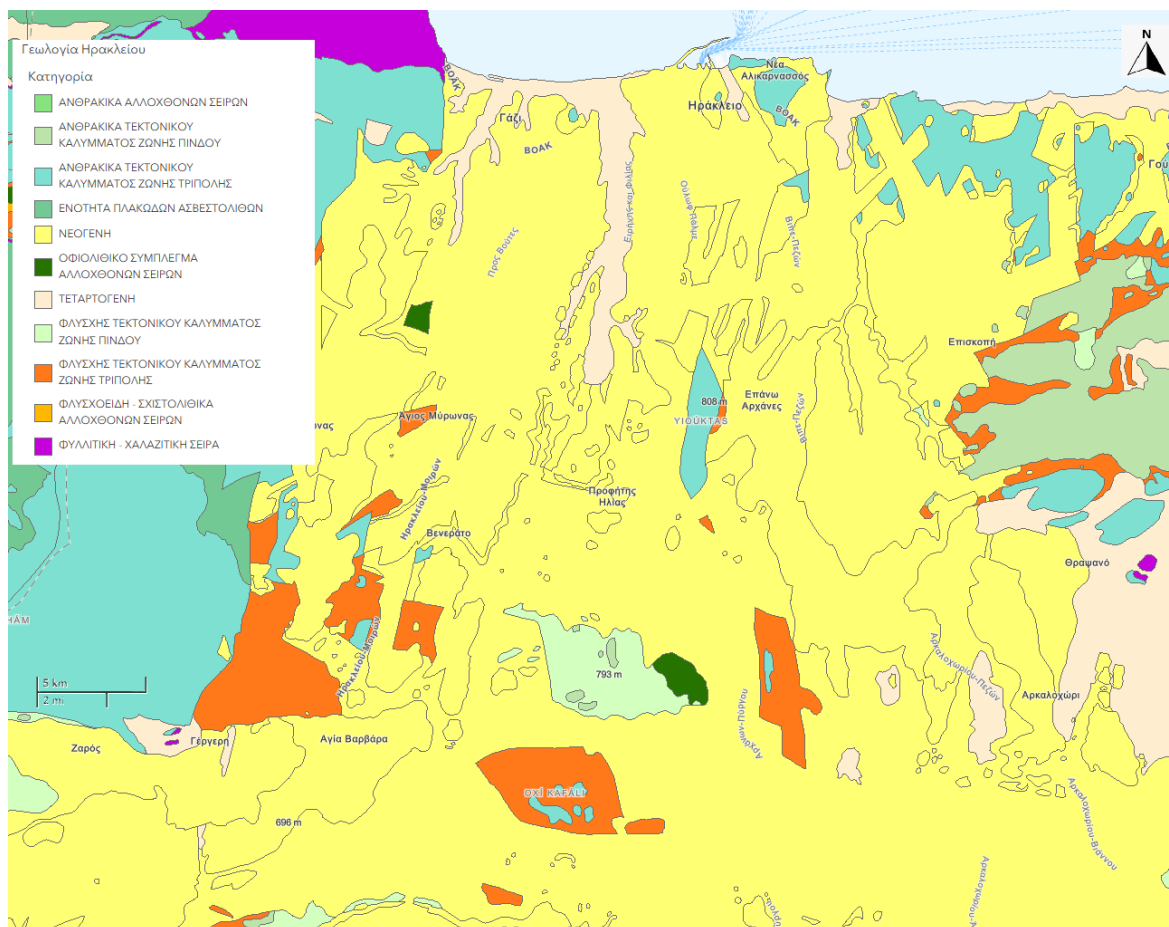
Γενικά η γεωλογική δομή της Κρήτης εξετάζεται με ιδιαιτερότητα καθώς χαρακτηρίζεται από αλληπάλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνίδων ζωνών τα οποία συνωθούνται στον μικρό γεωγραφικό χώρο του νησιού με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο. Η Κρήτη συγκροτείται από ένα σχετικά αυτόχθονο σύστημα που είναι η ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα καλύμματα των άλλων ζωνών και ενοτήτων με λεπιοειδή τεκτονική.



Σχήμα 2. 6. Απεικόνιση γεωλογικής δομής Κρήτης με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα, πηγή: Δημοσθένης Μ. Μουντράκης, 2010

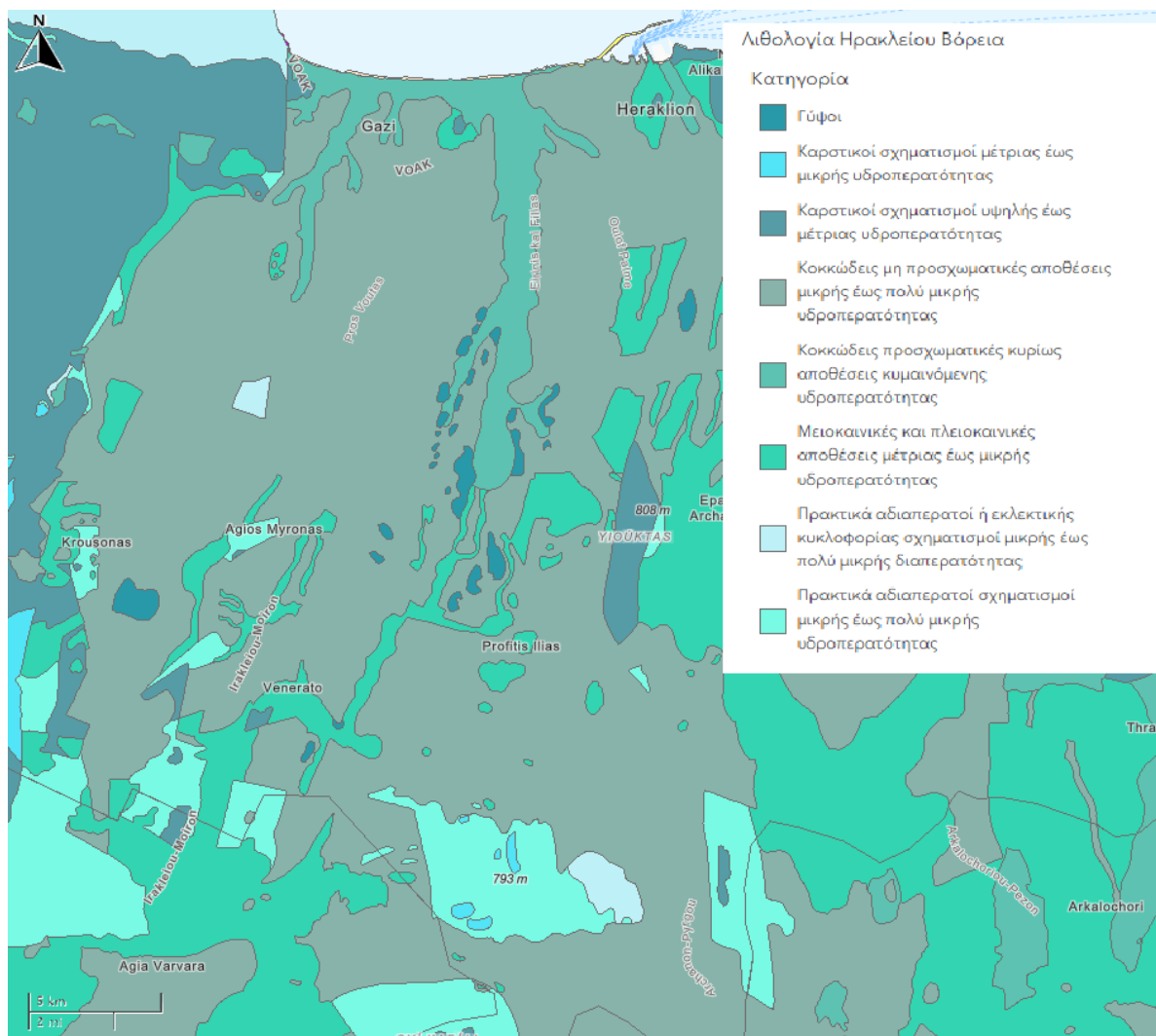
Η σειρά των τεκτονικών καλυμμάτων με το κατώτερο προς το ανώτερο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6. οι μάζες των ορεινών όγκων των Λευκών Όρεων δομούνται από την ενότητα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων. Πάνω σε αυτήν την ενότητα βρίσκεται η σειρά Τρυπαλίου, που αποτελείται από ασβεστόλιθους κροκαλοπαγής και λατυποπαγής. Επωθημένη πάνω από τις προηγούμενες σειρές βρίσκεται η ενότητα Φυλλιτών-Χαλαζιτών και αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, φακοειδής ασβεστόλιθους, μεταβασίτες και μεταανδρείτες. Στη συνέχεια, εντοπίζεται η σειρά Τριπόλεως, που αποτελείται από νηριτικούς ασβεστόλιθους, και έπειτα σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται επωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης Πίνδου. Στο τέλος, πάνω σε αυτούς τους αλπικούς σχηματισμούς τοποθετούνται με στρωματογραφική ασυμφωνία τα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση και πάχος στις παραλιακές ζώνες της Κρήτης, (Δημοσθένης Μ. Μουντράκης, 2010).

Στην Νοτιοδυτική πλευρά της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου, ο όγκος του Ψηλορείτη που αναπτύσσεται, αποτελείται κατά μεγάλο μέρος από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Τα βαθύτερα στρώματα του περιλαμβάνουν πλακώδεις μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους από την Ιόνιο ζώνη, ενώ αντίθετα στα υψηλότερα στρώματα εντοπίζονται δολομίτες και ασβεστόλιθοι της σειράς Τριπόλεως. Στο ενδιάμεσο των δυο ασβεστολιθικών στρωμάτων, παρεμβάλλεται η σειρά Φυλλιτών-Χαλαζιτών.



Σχήμα 2. 7. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής γύρω από τη λεκάνη απορροής, πηγή: geoportal.apdkritis.gov.gr

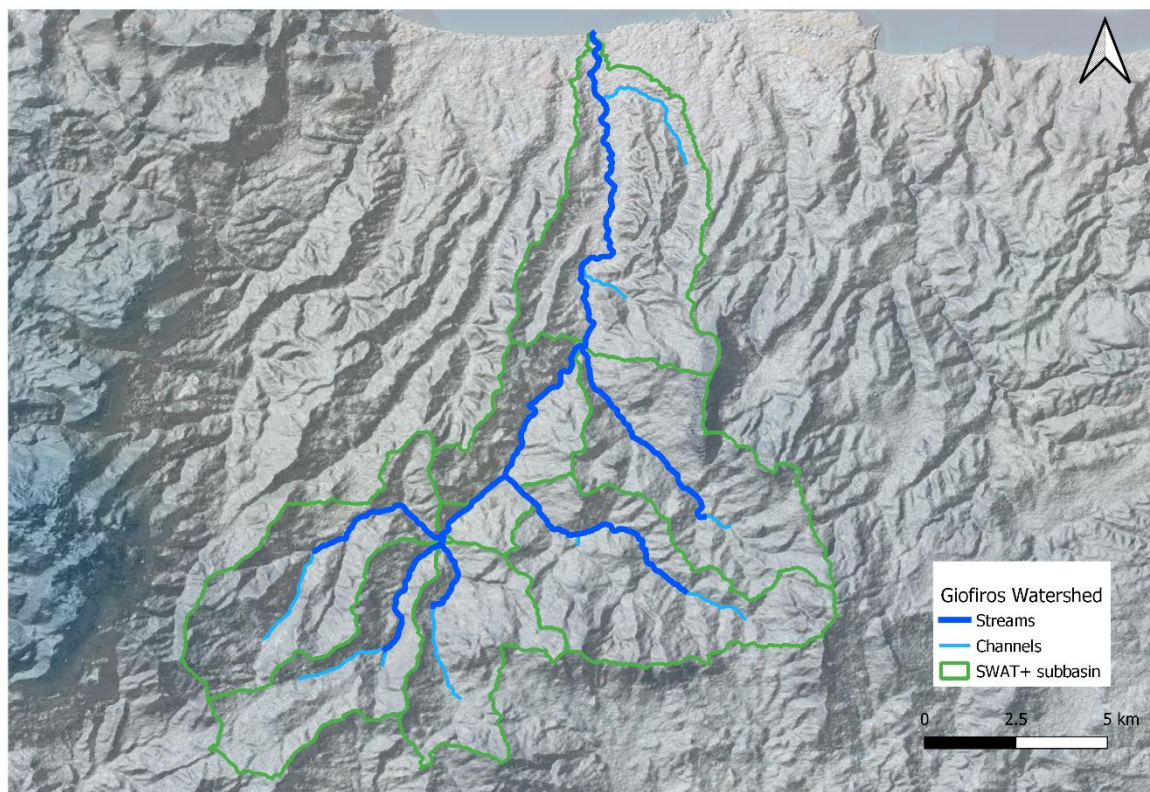
Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7, που αφορά την αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών της Κρήτης και δημιουργήθηκε από το Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών υπό τον συντονισμό της Περιφέρειας Κρήτης στο πλαίσιο του έργου CRINNO (Crete Innovation) και αποσκοπεί στην κατασκευή ενός σύνθετου και πολυδιάστατου γεωγραφικού πληροφοριακού συστήματος διαχείρισης και δικτύωσης πληροφοριών που αφορούν τους φυσικούς και περιβαλλοντικούς πόρους της Κρήτης, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου έχει απλή γεωλογική δομή καθώς ένα μεγάλο ποσοστό αποτελείται από νεότερα ιζήματα. Επιπλέον, από την παράλια ζώνη της ακτής του Ηρακλείου έως περίπου την Φοινικιά, ακολουθώντας την λωρίδα στον άξονα Βορρά-Νότου εντοπίζεται ο ποταμός Γιόφυρος και παρατηρείται η ύπαρξη του Τεταρτογενών αποθέσεων. Η κάλυψη της μεγαλύτερης περιοχής από αυτά τα σχήματα θεωρείται εύλογη και απαντάται και στην ανάπτυξη της γεωλογικής δομής της Κρήτης που αναλύθηκε προηγουμένως. Επιπλέον, παρατηρείται σε ορισμένα ορεινά σημεία της λεκάνης η παρουσία της σειράς Τριπόλεως όπως και η σειρά Πίνδου.



Σχήμα 2. 8. Λιθολογία ευρύτερης περιοχής γύρω από την λεκάνη απορροής, πηγή: geoportals.apd.kritis.gov.gr

Στο γεωγραφικό πληροφοριακό σύστημα του έργου CRINNO αναπτύχθηκε και η παρουσίαση της λιθολογίας της κάθε περιοχής της Κρήτης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Για την περιοχή του Βόρειου Ηρακλείου όπου και εντοπίζεται η λεκάνη απορροής που μελετάται, διαφαίνεται το μεγαλύτερο μέρος της να είναι Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Από την παράλια ζώνη του Ηρακλείου έως περίπου την περιοχή της Φοινικιάς, στην λωρίδα που αναπτύσσεται ο ποταμός Γιόφυρος, απαντώνται Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Τέλος, σε μικρότερες εκτάσεις εντοπίζονται Μειοκαινικές και Πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας, κυρίως στις ορεινές περιοχές, Γύψοι που εντοπίζονται κυρίως γύρω από τον ποταμό, και τέλος, Καρστικοί σχηματισμοί υψηλής έως μέτριας διαπερατότητας. Σύμφωνα με την Διεύθυνση Υδάτων Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης, και με βάση την λιθολογική σύσταση της λεκάνης, εντοπίζονται δυο υπόγεια υδατικά συστήματα με μερικές πηγές. Η εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων γίνεται μέσω γεωτρήσεων για υδρευτικούς και αρδευτικούς σκοπούς της περιοχής. (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018)

Ο ποταμός Γιόφυρος χαρακτηρίζεται ως ποταμός χειμερινής διαλείπουσας ροής ή αλλιώς ως ποταμός ακραίας χειμερινής ροής. Η ροή του παρουσιάζεται αυξημένη τους χειμερινούς μήνες κυρίως λόγω συχνών βροχοπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης, ενώ αντίθετα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, λόγω υποβάθμισης του υδροφόρου ορίζοντα και έλλειψης βροχοπτώσεων, η ροή διακόπτεται. Ο ποταμός πηγάζει από αρκετούς παραπόταμους στην ορεινή πλευρά της λεκάνης και στην περιοχή γύρω από τον Προφήτη Ηλία, διασχίζει την βόρεια πλευρά του Νομού Ηρακλείου και καταλήγει να εκβάλει δυτικά της πόλης, δίπλα από το Παγκρήτιο Στάδιο, (Σταματάκη, 2019). Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού παρουσιάζει έναν δενδριτικό τύπο και στην πεδινή περιοχή της λεκάνης παρουσιάζει έντονους μαιανδρισμούς, (Σχήμα 2.9.).



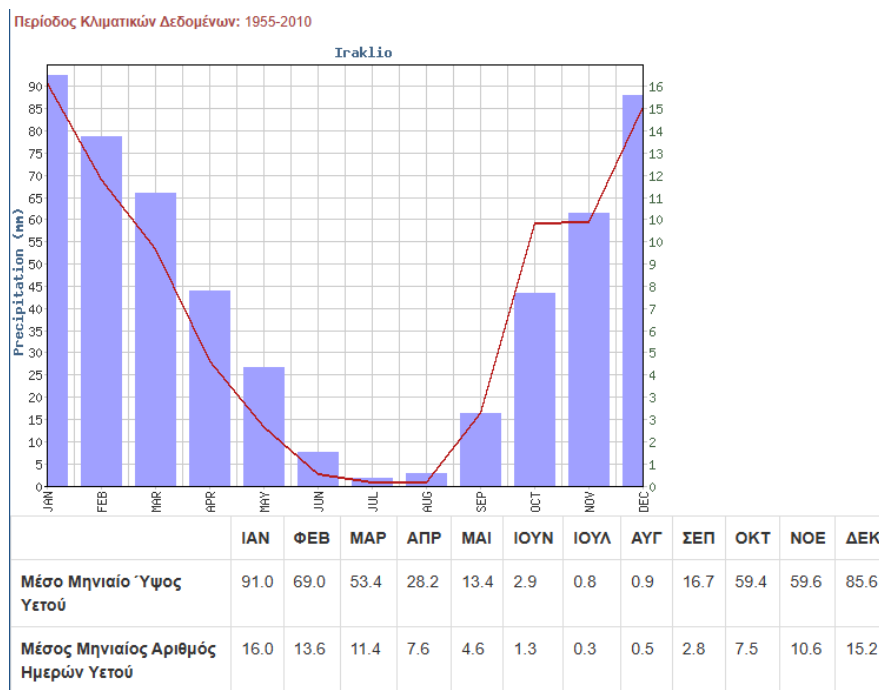
Σχήμα 2. 9. Υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης απορροής ποταμού Γιόφυρου όπως αποτυπώνεται στο QGIS

2.1.3: Κλιματικά στοιχεία

Αναφορικά με το κλίμα της Κρήτης, πρόκειται για έναν τύπο κλίματος μεταβατικό ενδιάμεσο μεταξύ χερσαίου Μεσογειακού και ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η Νοτιοανατολική πλευρά της Κρήτης. Οι πεδινές περιοχές του νησιού χαρακτηρίζονται από ήπιο χειμώνα με βροχοπτώσεις μικρού ύψους και ξηρή περίοδο σχετικά μεγάλης διάρκειας. Τους θερινούς μήνες, οι πεδινές περιοχές παρουσιάζουν μια σχετική δροσιά λόγω της θαλάσσιας αύρας, όμως οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Οι ορεινές περιοχές του νησιού παρουσιάζουν πιο έντονες θερμοκρασιακές αποκλίσεις, όπου παρατηρείται η μέση ετήσια θερμοκρασία να είναι χαμηλότερη κατά 2-3 °C συγκριτικά με τις θερμοκρασίες των πεδινών περιοχών. Η χειμερινή περίοδος θεωρείται ήπια και διαρκεί από τα μέσα Δεκέμβρη ως τα μέσα Μαρτίου, με τον ψυχρότερο μήνα να είναι ο Φεβρουάριος. Στην χειμερινή περίοδο εντοπίζονται και οι περισσότερες κατακρημνίσεις στο νησί, ιδιαίτερα στην δυτική πλευρά του.

Για την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γιόφυρου, το κλίμα που επικρατεί είναι Μεσογειακό με τον ποταμό να παρουσιάζει ροή στη διάρκεια της υγρής χειμερινής περιόδου, όπου και εκδηλώνεται η πλειοψηφία της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, (Κουτρούλης Γ. Α., 2010).

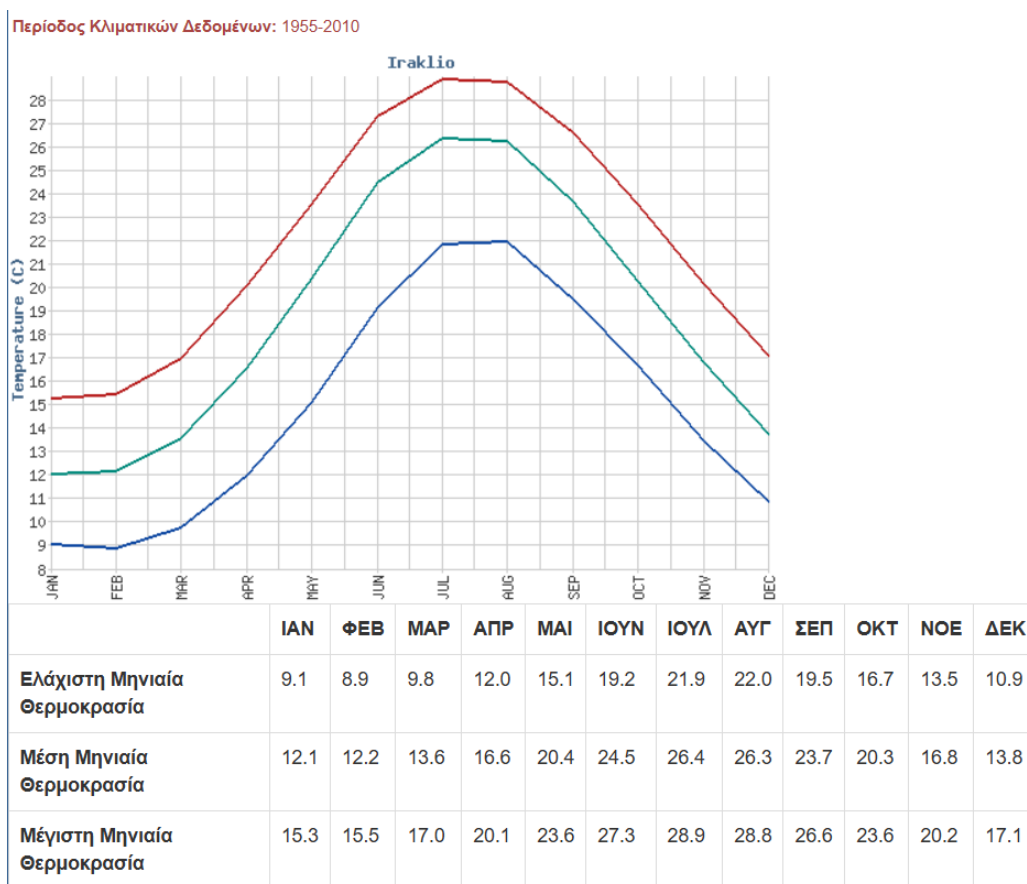
Κατακρημνίσεις



Σχήμα 2. 10. Μέση βροχόπτωση και μέσος αριθμός ημερών βροχόπτωσης για το Ηράκλειο, πηγή: ΕΜΥ

Το ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται περίπου στα 480 mm σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου. Η πορεία των βροχοπτώσεων παρουσιάζει ελάχιστο τους μήνες Ιούλιο έως Αύγουστο, ενώ μέγιστο τους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο, (Σχήμα 2.10.). Οι χιονοπτώσεις στην περιοχή είναι σπάνιο φαινόμενο το οποίο κυρίως παρουσιάζεται στην ορεινή ζώνη. Συνολικά στην λεκάνη απορροής η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι ίση με 827 mm σύμφωνα με την ανάλυση των μετεωρολογικών σταθμών που έγινε από (Ganoulis, 2003).

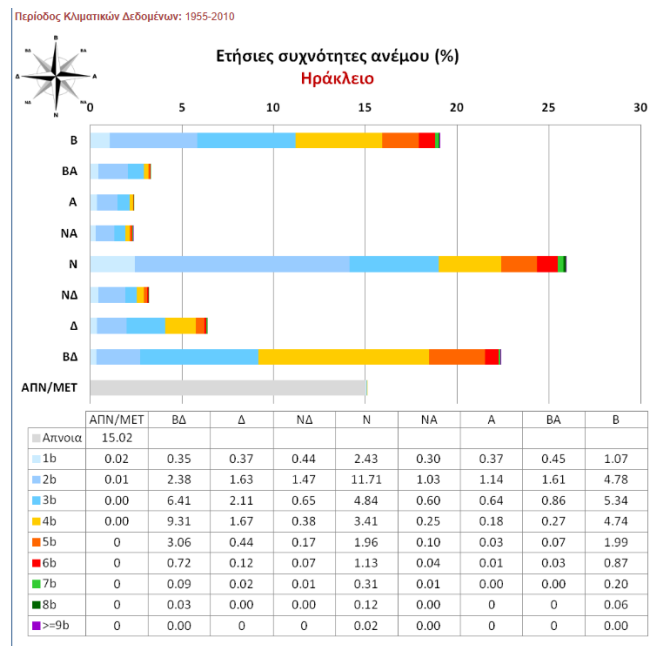
Θερμοκρασία



Σχήμα 2. 11. Ελάχιστη-μέση-μέγιστη θερμοκρασία για το Ηράκλειο, πηγή: ΕΜΥ

Θερμότερος μήνας του έτους στο Ηράκλειο είναι ο Ιούλιος με μέση υπερετήσια θερμοκρασία λίγο πιο πάνω από τους 26 °C. Ο Αύγουστος είναι στην δεύτερη θέση με ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ ο Ιούνιος και ο Σεπτέμβριος παρουσιάζουν υψηλές και κοντινές τιμές θερμοκρασίας (24.5 °C για τον Ιούνιο και 23.7 °C για τον Σεπτέμβριο). Οι θερμοκρασίες αυτές είναι που καθορίζουν σε έντονο βαθμό την χρονική διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και καλύπτει τουλάχιστον τέσσερις μήνες από Ιούνιο έως Σεπτέμβριο. Ψυχρότερος μήνας του έτους παρουσιάζεται ο Ιανουάριος με μέση υπερετήσια θερμοκρασία τους 12.1 °C με τον Φεβρουάριο να ακολουθεί με ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία (12.2°C), (Σχήμα 2.11.).

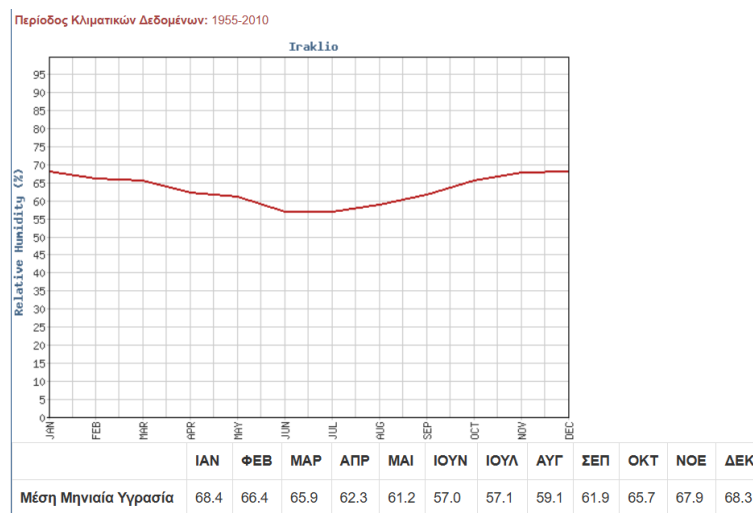
Άνεμοι



Σχήμα 2. 12. Ανεμολογικά στοιχεία για το Ηράκλειο, πηγή: ΕΜΥ

Επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή του Ηρακλείου κατά τη διάρκεια του έτους είναι του Βόρειου τομέα (περίπου 40%) ενώ αξιόλογη είναι η παρουσία των νότιων ανέμων (περίπου 25%). Αξιοσημείωτη είναι και η συχνότητα των νηνεμίων στο Ηράκλειο (περίπου 15%), (Σχήμα 2.12.).

Υγρασία



Σχήμα 2. 13. Σχετική υγρασία Ηρακλείου, πηγή: ΕΜΥ

Η σχετική υγρασία κυμαίνεται σε σταθερά επίπεδα κατά τη διάρκεια των ετών. Μεγαλύτερη σχετική υγρασία παρουσιάζεται τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο, ενώ ξηρότεροι μήνες παρατηρούνται να είναι ο Ιούνιος και ο Ιούλιος, (Σχήμα 2.13.).

2.2: ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.2.1: Διοικητική δομή

Το Υδατικό Διαμέρισμα 13 «Κρήτη» αποτελεί το νοτιότερο Υδατικό Διαμέρισμα της Ελλάδας. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται την ομώνυμη νήσο μαζί με τα μικρότερα νησιά Γαύδος, Γαυδοπούλα, Δία, Κουφονήσι, Γαϊδουρονήσι, Διονυσάδες, Σπιναλόγκα και Παξιμάδι. Οι Περιφερειακές Ενότητες που περιλαμβάνονται στο διαμέρισμα είναι οι Π.Ε. Χανίων, Π.Ε. Ρεθύμνης, Π.Ε. Ηρακλείου και Π.Ε. Λασιθίου και συνολικά το νησί υπάγεται στην Περιφέρεια Κρήτης. Η Π.Ε. Ηρακλείου αποτελείται από τους Δήμους Ηρακλείου, Αρχανών-Αστερουσίων, Βιάννου, Γόρτυνας, Μαλεβιζίου, Μινώα Πεδιάδας, Φαιστού και Χερσονήσου. Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γιόφυρου εκτείνεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στον Δήμο Ηρακλείου, ένα μικρότερο μέρος της στον Δήμο Αρχανών-Αστερουσίων και η νότια και ορεινή πλευρά του στον Δήμο Γόρτυνας.

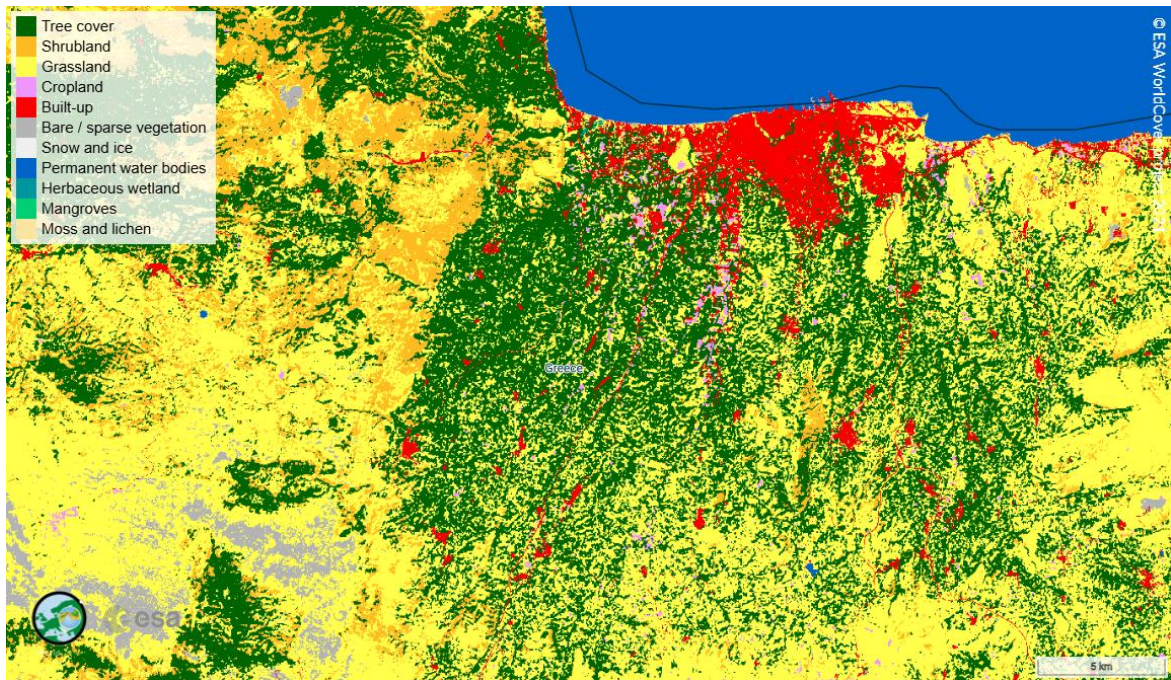
2.2.2: Πληθυσμός

Το νησί της Κρήτης αποτελεί το μεγαλύτερο και πολυπληθέστερο νησί της Ελλάδας και το πέμπτο μεγαλύτερο σε όλη τη Μεσόγειο θάλασσα. Συνολικά η Περιφέρεια Κρήτης έχει πληθυσμό ίσο με 624,000 κατοίκους και αποτελεί σχεδόν το 6% του πληθυσμού της χώρας. Στην Π.Ε. Ηρακλείου εντοπίζεται και ο μισός πληθυσμός της Κρήτης με 305,000 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2021 από την Ελληνική Στατιστική Αρχή.

2.2.3: Οικονομία

Η ανάπτυξη του νησιού της Κρήτης έγινε με ταχείς ρυθμούς και για μεγάλη χρονική περίοδο συνεισφέροντας πλέον στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) με ποσοστό της τάξεως του 5%. Η Π.Ε. Ηρακλείου έχει την υψηλότερη συνεισφορά σε περιφερειακό επίπεδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες ενότητες του νησιού, κάτι το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο μισός πληθυσμός του νησιού διαμένει στην ενότητα. Την μεγαλύτερη συνεισφορά στην προστιθέμενη αξία των προϊόντων της Κρήτης την προσφέρει ο κλάδος του τουρισμού και του εμπορίου. Ο κλάδος του τουρισμού είναι αρκετά σημαντικός στο νησί, αλλά εμπεριέχει και αρκετά προβλήματα με το πιο σημαντικό να είναι η εποχικότητα που παρουσιάζει. Αναφορικά με τον Πρωτογενή τομέα, το ποσοστό συνεισφοράς του παρουσιάζει υποχώρηση, καθώς οι αρδεύσιμες εκτάσεις της Κρήτης δεν επαρκούν να την ανάπτυξη του, ενώ οι δομές των καλλιεργειών χαρακτηρίζονται για την έμφαση τους σε παραδοσιακές καλλιέργειες χωρίς τις κατάλληλες υποδομές. Αντίστοιχα, στο ίδιο μοτίβο κινείται η κτηνοτροφία, παρουσιάζοντας ελάχιστες οργανωμένες μονάδες. Όσον αφορά τον Δευτερογενή τομέα, τα προβλήματα που εντοπίζονται στον εκσυγχρονισμό της παραγωγικής διαδικασίας και την οργάνωσης εμπορικών δικτύων έχουν οδηγήσει την κίνηση του σε χαμηλά επίπεδα. Παρόλα αυτά, ο κατασκευαστικός κλάδος πλέον, παρουσιάζει ανοδική πορεία εκμεταλλευόμενη την σημαντική ανάπτυξη του τουριστικού κλάδου. Τέλος, στον Τριτογενή τομέα, η συνεισφορά της Κρήτης παρουσιάζεται χαμηλή. Η Κρήτη αναφέρεται ως κέντρο ανάπτυξης της ναυτιλίας χάρις την γεωγραφική της θέση, ενώ έντονη θεωρείται και η ερευνητική δραστηριότητα του νησιού έχοντας πλέον αρκετά πανεπιστήμια, σχολές ναυτιλίας, τεχνολογικά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα, (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

2.2.4: Χρήσεις γης



Σχήμα 2. 14. Χάρτης χρήσεων γης Π.Ε. Ηρακλείου, πηγή: © ESA WorldCover project / Contains modified Copernicus Sentinel data (2021) processed by ESA WorldCover consortium

Σύμφωνα με τον χάρτη χρήσεων γης που λήφθηκε από το European Space Agency WorldCover Project με λήψεις του 2021 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14., η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια αγροτική περιοχή καθώς οι αστικές χρήσεις καταλαμβάνουν ένα μέρος της βόρειας πλευράς της λεκάνης. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης καταλαμβάνεται από το “Tree Cover” το οποίο συμπεριλαμβάνει τους ελαιώνες και τα μικτά δάση. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με απογραφή Γεωργίας/Κτηνοτροφίας του 2000 από την Ελληνική Στατιστική Αρχή για τον Νομό Ηρακλείου, 960 χιλιάδες στρέμματα αφορούν μόνιμες καλλιέργειες σε γεωργικές περιοχές. Οι βοσκοτοπικές εκτάσεις με δασώδη/θαμνώδη/ποώδη ή και καθόλου βλάστηση ήταν ίση με 721 χιλιάδες στρέμματα. Ο συνδυασμός δασικών και θαμνωδών εκτάσεων καταλαμβάνει 337 χιλιάδες στρέμματα, ενώ οι τεχνητές περιοχές που αφορούν την αστική οικοδόμηση, τα δίκτυα συγκοινωνιών και τις βιομηχανικές ζώνες καταλαμβάνει περίπου 50 χιλιάδες στρέμματα.

2.3: ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ



Σχήμα 2. 15. Σημαντικές πλημμύρες στο Ηράκλειο όπως καταγράφονται από την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας, δημιουργία με Google Earth.

Μια από τις πιο σημαντικές πλημμύρες που έπληξε την πόλη του Ηρακλείου ήταν η πλημμύρα του 1994. Η συγκεκριμένη παρουσιάζει ιδιαίτερη σημαντικότητα καθώς είχε καταστροφικές επιπτώσεις όχι μόνο στον αστικό ιστό του Ηρακλείου, αλλά σχεδόν σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής. Οι εκτιμήσεις αναφέρουν ότι κατακλύσθηκαν 3,000 στρέμματα με αμπέλια, πνίγηκαν χιλιάδες ζώα σε στάβλους και πολλά σπίτια κοντά στην έξοδο της λεκάνης πλημμύρισαν θέτοντας σε κίνδυνο την ζωή τους. Το ύψος των ζημιών ανήλθε σε τουλάχιστον 2 δις δραχμές, (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018). Επιπλέον, μια ακόμη σημαντική καταστροφή της πλημμύρας ήταν η ζημιά που προκλήθηκε στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων της πόλης, που βρισκόταν υπό κατασκευή εκείνη τη περίοδο σε ιδιαίτερα κοντινή απόσταση με την κοίτη του ποταμού, ανάντη της γέφυρας της οδού Μάνου Κατράκη, (Koutroulis et al, 2010). Το φαινόμενο που συντέλεσε στην καταστροφική πλημμύρα ήταν η διαρκής και ελαφριά βροχόπτωση που είχε διαποτίσει το έδαφος τις μέρες πριν τις 16 Ιανουαρίου, το οποίο ακολουθήθηκε από καταιγίδα διάρκειας 5 ωρών την 16^η Ιανουαρίου στο νότιο τμήμα της λεκάνης με τον σταθμό Αγ. Βαρβάρας να καταγράφει μέγιστη αθροιστική τιμή βροχόπτωσης τα 123 mm. Η τιμή αυτή ξεπέρασε κατά πολύ την τιμή μέγιστης αθροιστικής βροχόπτωσης που είχε θεσπιστεί για περίοδο επαναφοράς 100 ετών που ήταν τα 98 mm, (Koutroulis et al, 2010). Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός του 2004 όπου σημειώθηκαν μεγάλες υλικές ζημιές σε οικίες, καταστήματα, βιοτεχνίες, καλλιέργειες, στο οδικό δίκτυο και στα δίκτυο των τηλεπικοινωνιών και της ΔΕΗ. Πρόσφατα, το γεγονός της 13 Ιανουαρίου 2014 με την υπερχειλίση του ποταμού Γιόφυρου, κινδύνεψαν οι ζωές των κατοίκων οι οποίοι τελικά απεγκλωβίστηκαν με την συμβολή βαρκών, ενώ προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές σε καλλιέργειες, σπίτια και δίκτυα υποδομών, (Σχήμα 2.15.), (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, 2018).

Κεφάλαιο 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SWAT+

3.1.1: Εισαγωγική περιγραφή μοντέλου SWAT+

Το εργαλείο μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν το Soil and Water Assessment Tool Plus (SWAT+), ένα χρονο-συνεχές ημι-κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών-Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας (USDA-ARS) και το Texas A&M AgriLife Research and Extension, του πανεπιστημίου του Τέξας. Το SWAT+ είναι μια πλήρως αναδομημένη έκδοση του SWAT που αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τις σημερινές και μελλοντικές προκλήσεις στη μοντελοποίηση και διαχείριση των υδάτινων πόρων και για να καλύψει τις ανάγκες της παγκόσμιας κοινότητας χρηστών. Αναμένεται ότι θα βελτιώσει την ανάπτυξη και την συντήρηση του κώδικα, θα υποστηρίξει τη διαθεσιμότητα δεδομένων, την ανάλυση, την οπτικοποίηση και θα βελτιώσει τις δυνατότητες του μοντέλου όσον αφορά τη χωρική αναπαράσταση των στοιχείων και των διεργασιών εντός των λεκανών απορροής (Bieger, et al., 2017).

3.1.2: Μοντέλο SWAT

Το SWAT που πλέον χρησιμοποιείται είναι άμεσο παράγωγο του μοντέλου SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), (Williams, Nicks, & Arnold, 1985). Το SWAT αποτέλεσε την μετεξέλιξη και την συγχώνευση προηγούμενων μοντέλων της Υπηρεσίας Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA), όπως το GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems), (Leonard, Knisel, & Still, 1987), το CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), (Knisel, 1980) και του EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator), (Williams, Jones, & Dyke, 1984). Την βάση αποτέλεσε το μοντέλο CREAMS, το οποίο προσομοίωνε τις επιπτώσεις που είχε η διαχείριση της γης, στο νερό, τα θρεπτικά συστατικά, τα ιζήματα και τα φυτοφάρμακα που εγκατέλειπαν το έδαφος. Το GLEAMS ήταν ένα μοντέλο μη σημειακών πηγών το οποίο στόχευε στην προσομοίωση της συνεισφοράς φορτίων από φυτοφάρμακα και θρεπτικές ουσίες στα υπόγεια ύδατα, ενώ το μοντέλο EPIC αρχικά αναπτύχθηκε για να προσομοιώσει τα αποτελέσματα της διάβρωσης στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών και πλέον έχει εξελιχθεί σε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο αγροτικής διαχείρισης σε κλίμακα πεδίου (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). Η ανάπτυξη του SWRRB ξεκίνησε με την τροποποίηση της ημερήσιας βροχόπτωσης του υδρολογικού μοντέλου του CREAMS και άλλες σημαντικές αλλαγές όπως : στην επέκταση του αλγορίθμου του μοντέλου, ώστε να επιτρέπονται οι ταυτόχρονοι υπολογισμοί σε πολλαπλές υπολεκάνες για την πρόβλεψη της υδατικής παροχής της λεκάνης απορροής, στην προσθήκη συντελεστή επιστροφής νερού από τον υδροφορέα, στην προσθήκη συνιστώσας αποθήκευσης σε ταμιευτήρες για τον υπολογισμό της επίδρασης των λιμνών και των ταμιευτήρων στην απόδοση νερού και ιζήματος, στην προσθήκη μοντέλου προσομοίωσης καιρικών συνθηκών, στην βελτίωση των μεθόδων για την πρόβλεψη της μέγιστης απορροής, στην προσθήκη του μοντέλου EPIC για την ανάπτυξη καλλιεργειών, στην προσθήκη συνιστώσας διόδευσης πλημμύρας, στην προσθήκη συνιστωσών μεταφοράς ιζήματος για την προσομοίωση της κίνησης από λίμνες, ταμιευτήρες και ρέματα, και τέλος, ενσωματώθηκε ο υπολογισμός των απωλειών μεταφοράς. Οι τροποποιήσεις αυτές διευρύναν τις δυνατότητες του μοντέλου να αντιμετωπίσει αρκετά προβλήματα διαχείρισης λεκανών απορροής (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). Αργότερα, λόγω της ανάγκης για εκτίμηση των υδατικών πόρων σε λεκάνες με μεγαλύτερο μέγεθος και που να ξεπερνούν τις χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα, αναπτύχθηκε το μοντέλο ROTO (Routing Outputs to Outlet), (Arnold, Williams, & Maidment, 1995), το οποίο λάμβανε τα αποτελέσματα από πολλαπλά τρεξίματα του SWRRB και διόδευε τις παροχές νερού από την έξοδο

της υπολεκάνης σε κατάντη θέσεις του ποταμού. Με λίγα λόγια το ROTO ένωνε τους υπολογισμούς του SWRRB. Παρόλη την αποτελεσματικότητα των δύο προγραμμάτων, η εισαγωγή πολλαπλών δεδομένων και η εξαγωγή πολλαπλών αποτελεσμάτων παρουσιάστηκε πρόβλημα για την υπολογιστική ισχύ της εποχής, καθώς απαιτούνταν σημαντικός χώρος αποθήκευσης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, τα δύο προγράμματα συγχωνεύθηκαν σε ένα μοντέλο, το SWAT, το οποίο επέτρεπε την προσομοίωση εκτεταμένων περιοχών, διατηρώντας όλα τα χαρακτηριστικά που έκαναν το SWRRB ένα τόσο αξιόπιστο πρόγραμμα προσομοίωσης, (Neitsh, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). Όλα αυτά καταδεικνύουν την προσπάθεια της USDA να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για λεκάνες απορροής που να διαθέτει την ικανότητα να προσομοιώνει σύνθετες φυσικές διεργασίες σε ένα μεγάλο εύρος διαχειριστικών προβλημάτων ποιότητας και ποσότητας του νερού.

Από την δημιουργία του SWAT στις αρχές του 1990, το πρόγραμμα έχει υποβληθεί σε συνεχή αξιολόγηση και επέκταση των δυνατοτήτων του. Μερικές από τις πιο σημαντικές βελτιώσεις παρουσιάζονται στις εκδόσεις:

- SWAT94.2: Ενσωμάτωση πολλαπλών υδρολογικών μονάδων απόκρισης (HRUs).
- SWAT96.2: Εισαγωγή αυτόματης λίπανσης εδάφους και αυτόματης άρδευσης ως διαχειριστικές επιλογές, εισαγωγή της εξίσωσης Penman-Monteith για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, εισαγωγή πλευρικής ροής νερού στο έδαφος, ενσωμάτωση αποθηκευτικότητας του νερού, εισαγωγή πορείας φυτοφαρμάκων μέσα στο ποτάμι.
- SWAT98.1: Επέκταση κυκλικής ρουτίνας των θρεπτικών συστατικών, εισαγωγή αποστράγγισης ως διαχειριστικό εργαλείο, βελτίωση πρακτικών στο λιώσιμο του χιονιού.
- SWAT99.2: Βελτίωση κυκλικής ρουτίνας θρεπτικών συστατικών, βελτίωση διεργασιών που αφορούν υδροβιότοπους, εισαγωγή δυνατότητας χρήσης ταμιευτήρα σε σημεία που καταλήγει το νερό, εισαγωγή πορείας μετάλλων μέσα στο ποτάμι.
- SWAT2000: Εισαγωγή μεθόδου Green & Ampt για την διήθηση, βελτίωση προσομοίωσης καιρικών συνθηκών, χρήση επιπρόσθετων καιρικών συνθηκών όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία, δυνατότητα προσομοίωσης άπειρων ταμιευτήρων, προσθήκη μεθόδου Muskingum για την διόδευση πλημμύρας, προσθήκη ρουτίνας μεταφοράς βακτηρίων.
- SWAT2009: Εισαγωγή σεναρίων πρόβλεψης καιρού, εισαγωγή υπο-ημερήσιας δημιουργίας βροχόπτωσης, βελτίωση ρουτίνας μεταφοράς βακτηρίων, δυνατότητα μοντελοποίησης συστημάτων υγρών αποβλήτων.

Το SWAT, σε συνδυασμό με τις προαναφερθέντες βελτιώσεις, τελειοποιήθηκε με την ανάπτυξη περιβάλλοντος Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μερικά από αυτά είναι το GRASS και το ArcView. Με την τελευταία έκδοση του SWAT, το ArcSWAT2012, το πρόγραμμα άρχισε να αναπτύσσεται σε περιβάλλον ArcGIS και πλέον διατίθεται με τα κατάλληλα πακέτα υπηρεσιών στις εκδόσεις του προγράμματος.

3.1.3: Το αναδιαμορφωμένο μοντέλο SWAT+

Τα τελευταία χρόνια, το SWAT έγινε ευρέως γνωστό και χρήσιμο όχι μόνο στις ΗΠΑ, άλλα και στον υπόλοιπο κόσμο. Το μοντέλο παρουσιάζει έναν μεγάλο αριθμό επιτυχημένων εφαρμογών σε πολλά υδρολογικά ερωτήματα που εμφανίζονται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η παγκόσμια κοινότητα χρηστών πλέον όμως, εστιάζει περισσότερο στην προσομοίωση των ενδότερων διεργασιών που λαμβάνουν μέρος σε μια λεκάνη απορροής και δεν εφησυχάζει μόνο με την επίτευξη ικανοποιητικής συσχέτισης μεταξύ παρατηρούμενων και μοντελοποιημένων τιμών παροχής, (Bieger K. , et al., 2019). Η ανάγκη κατανόησης των υδρολογικών σχέσεων των τοπίων και πως αυτές μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά, είναι σημαντική για την εξήγηση της υδρολογικής απόκρισης μια λεκάνης απορροής σε φαινόμενα βροχόπτωσης και χιονόπτωσης, και είναι κρίσιμη για την σωστή καθοδήγηση της εξέλιξης των μοντέλων, (Jencso, et al., 2009). Έτσι, ο κώδικας του SWAT υποβλήθηκε σε αρκετές τροποποιήσεις για να παρουσιαστεί η νέα αναδομημένη έκδοση του, το SWAT+. Η νέα έκδοση του μοντέλου παρουσιάζεται πιο ευέλικτη από την παλαιότερη αναφορικά με την χωρική αναπαράσταση των διεργασιών στις λεκάνες απορροής. Στο SWAT+ τα διάφορα στοιχεία μιας λεκάνης απορροής όπως τα LSUs, τα HRUs, οι λίμνες, οι ταμειυτήρες, οι υδροφορείς, οι εισροές, οι σημειακές πηγές και τα κανάλια ορίζονται ως χωρικά αντικείμενα. Ο χρήστης ορίζει τις υδρολογικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων χωρικών αντικειμένων με στόχο να αναπαρασταθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας υδρολογικής λεκάνης όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά. Το SWAT+ χρησιμοποιεί το λεγόμενο αρχείο σύνδεσης (connect file) για τον καθορισμό της δρομολόγησης της ροής από το ένα χωρικό αντικείμενο σε ένα ή περισσότερα άλλα. Το καθένα από αυτά έχει το δικό του αρχείο σύνδεσης, το οποίο αποτελεί μια σημαντική βελτίωση συγκριτικά με τις προηγούμενες εκδόσεις, όπου οι εντολές δρομολόγησης συνοψίζονταν σε ένα αρχείο και η δρομολόγηση τμημάτων του ίδιου υδρογραφήματος σε διαφορετικά αντικείμενα ήταν εφικτή μόνο με την τροποποίηση του πηγαίου κώδικα, (Bieger et al., 2019). Επιπλέον, προκειμένου να διαχωριστούν οι ορεινές διεργασίες από τους υγροτόπους, το μοντέλο εισάγει τις μονάδες τοπίου (LSU) που αποτελούν λεπτότερες διαιρέσεις των υπολεκανών, (Bieger et al., 2017). Τα LSU ορίζονται από το κατώφλι καναλιού που ορίζει ο χρήστης και που πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με το κατώφλι ρέματος, ενώ οι υπολεκάνες ορίζονται από το κατώφλι ρέματος, (Chawanda et al., 2020).

3.1.4: Βασικές Διεργασίες SWAT+

Παρόλη την ευελιξία που προσφέρει η νέα έκδοση στον χρήστη για την διαμόρφωση του μοντέλου, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών είναι οι ίδιες που χρησιμοποιούνται στο SWAT, (Chawanda et al., 2020). Κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης μιας λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του SWAT, αυτή υποδιαιρείται σε υπολεκάνες (subbasin), όπου ο αριθμός και το μέγεθος τους ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της και το υδρογραφικό δίκτυο. Η χρήση των υπολεκάνων είναι ιδιαίτερα επωφελής καθώς είναι συχνό φαινόμενο σε διαφορετικές περιοχές μιας λεκάνης, να κυριαρχούν διαφορετικές χρήσεις γης και εδάφη με διαφορετικές ιδιότητες που επηρεάζουν την υδρολογία της. Η κάθε υπολεκάνη, στην συνέχεια, διαχωρίζεται σε Υδρολογικές Μονάδες Απόκρισης (Hydrologic Response Units), όπου κάθε μια χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση από έναν μοναδικό συνδυασμό των τύπων χρήσης γης (land use) και εδάφους (soils) και που ανήκει σε μια κατηγορία εδαφικής κλίσης (slope), (Neitsch et al., 2011)

Για την ακριβή πρόβλεψη της κίνησης του νερού, των ιζημάτων, των φυτοφαρμάκων και των θρεπτικών ουσιών, ο υδρολογικός κύκλος θα πρέπει να είναι σύμφωνος με όσα συμβαίνουν στην λεκάνη απορροής, για αυτόν τον λόγο ένας από τους βασικούς στόχους του SWAT είναι η προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου. Για τον σκοπό αυτό, τα δεδομένα εισόδου των υπολεκάνων ομαδοποιούνται σε κατηγορίες ανάλογα με την φυτική κάλυψη, το έδαφος, τον υπόγειο υδροφόρο, τις καιρικές συνθήκες και των υδάτινων ρεμάτων που αποστραγγίζουν την υπολεκάνη.

Η κίνηση της βασικής απορροής του νερού, των ιζημάτων και των θρεπτικών ουσιών στο υδάτινο ρεύμα, προσομοιώνεται έχοντας λάβει υπόψιν την επίδραση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν μέρος όπως η εξάτμιση, η διήθηση, η πρόσληψη από τα φυτά, η πλευρική ροή και η διήθηση σε κατώτερα στρώματα. Τα αποτελέσματα της απορροής υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε HRU και στο τέλος προστίθενται και καταλήγουν, μέσω των καναλιών, στην έξοδο της λεκάνης.

Πιο αναλυτικά, η προσομοίωση της υδρολογίας μιας λεκάνης απορροής μπορεί να διαχωριστεί σε δυο κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι αφορά την ανάλυση της απορροής στην επιφάνεια του εδάφους (Land Phase), όπου ελέγχεται η ποσότητα νερού, ιζήματος, θρεπτικών και φορτίων φυτοφαρμάκων που υπάρχουν στα κύρια κανάλια κάθε υπολεκάνης, ενώ το δεύτερο στην ανάλυση της πορείας του νερού εντός του υδρογραφικού δικτύου (Routing Phase).

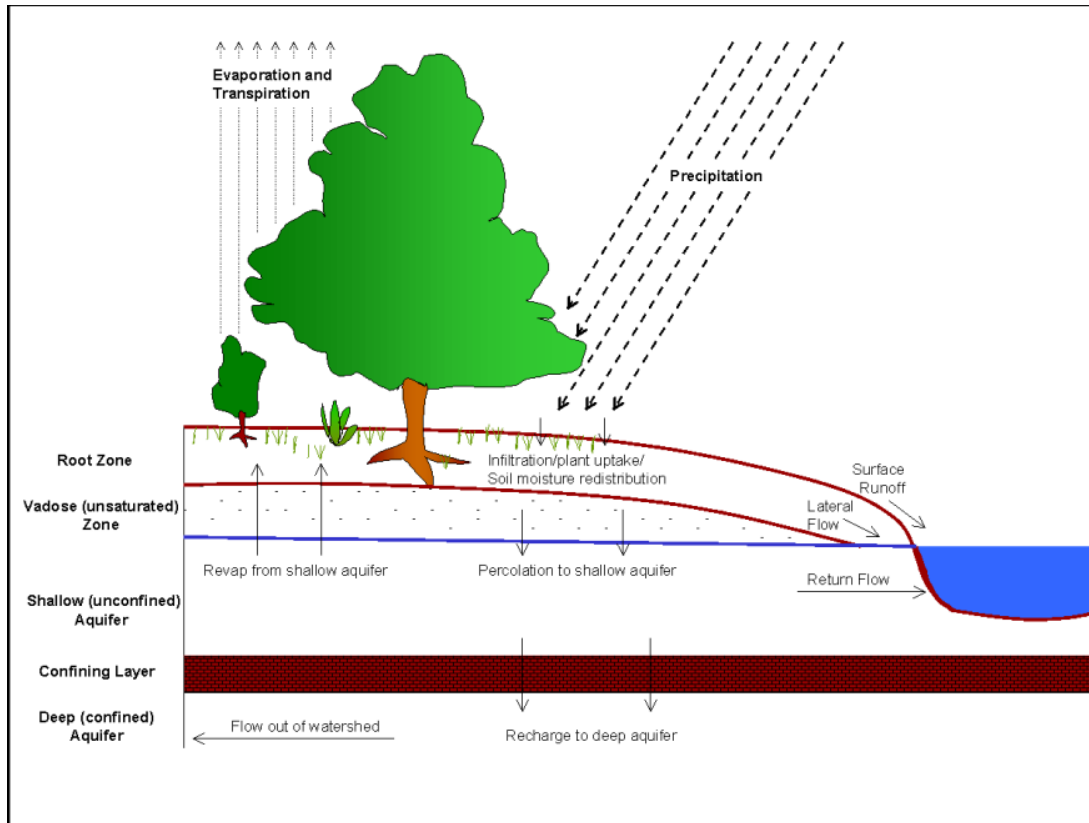
Land Phase

Σε αυτό το κομμάτι γίνεται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου σε κάθε HRU ξεχωριστά για να συγκεντρωθούν τα αποτελέσματα για κάθε υπολεκάνη, βασιζόμενο στις ιδιότητες κάθε HRU. Εισάγονται ημερήσια δεδομένα κατακρήμνισης που έχουν καταγραφεί από μετεωρολογικούς σταθμούς. Εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με την θερμοκρασία που έχει καταγραφεί. Η βροχόπτωση που εμφανίζεται και που αναλογεί σε κάθε υπολεκάνη καθορίζεται από τον σταθμό που βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο βάρους της.

Το νερό της βροχής που είναι διαθέσιμο, χωρίζεται σε διάφορες διεργασίες. Μια από αυτές είναι η διήθηση στο έδαφος, όπου διοδεύεται στις διαφορετικές εδαφικές στρώσεις. Μια επιπρόσθετη αφορά την επιφανειακή απορροή. Το ποσοστό του νερού που απορρέεται διαμορφώνεται από τον συντελεστή απορροής, ο οποίος είναι ανάλογος του τύπου εδάφους αλλά και της χρήσης γης. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση πραγματοποιείται με την χρήση της μεθόδου αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) που αναπτύχθηκε από το Soil Conservation Service του USDA το 1972. Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από την βλάστηση και στη συνέχεια διαπνέεται ή υφίσταται εδαφική εξάτμιση, κατεισδύει στον αβαθή υδροφορέα ή ακόμα, συμβάλλει στην απορροή της εξόδου της λεκάνης μέσω της ενδιάμεσης απορροής.

Το μοντέλο υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή με μια από τις μεθόδους Penman-Monteith, (Monteith, 1965), Priestley-Taylor, (Priestley & Taylor, 1972) και Hargreaves, (Hargreaves & Zohrab, 1985). Επιπλέον, το μοντέλο επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή αρχείου με ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής σε περίπτωση που επιθυμεί την χρήση άλλης μεθόδου. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή της Penman-Monteith και αυτή χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στην συνέχεια, ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφορέα (shallow aquifer) θεωρείται ότι μεταφέρεται στα βαθύτερα στρώματα (deep aquifer) και χάνεται από το σύστημα. Το επιφανειακό νερό που κινείται στο ποτάμι συναντά πιθανές λίμνες και ταμιευτήρες, όπου η εξισώσεις του υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση του νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Στο τέλος, το νερό που παρουσιάζεται να καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, της ενδιάμεσης και της υπόγειας απορροής και διοδεύεται έως την έξοδο της λεκάνης, (Σχήμα 3.1.).



Σχήμα 3. 1. Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού κύκλου, πηγή: Neitsch et al., 2011

Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιείται στο SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου για κάθε υδρολογική μονάδα είναι η εξής:

$$SW_n = SW_0 + \sum_{i=1}^n (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Όπου:

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους

SW_0 : η αρχική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την χρονική στιγμή 0

R_{day} : η ημερήσια κατακρήμνιση την ημέρα i (mm H₂O)

Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H₂O)

E_a : η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (mm H₂O)

W_{seep} : η ποσότητα νερού που εξέρχεται από την ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H₂O)

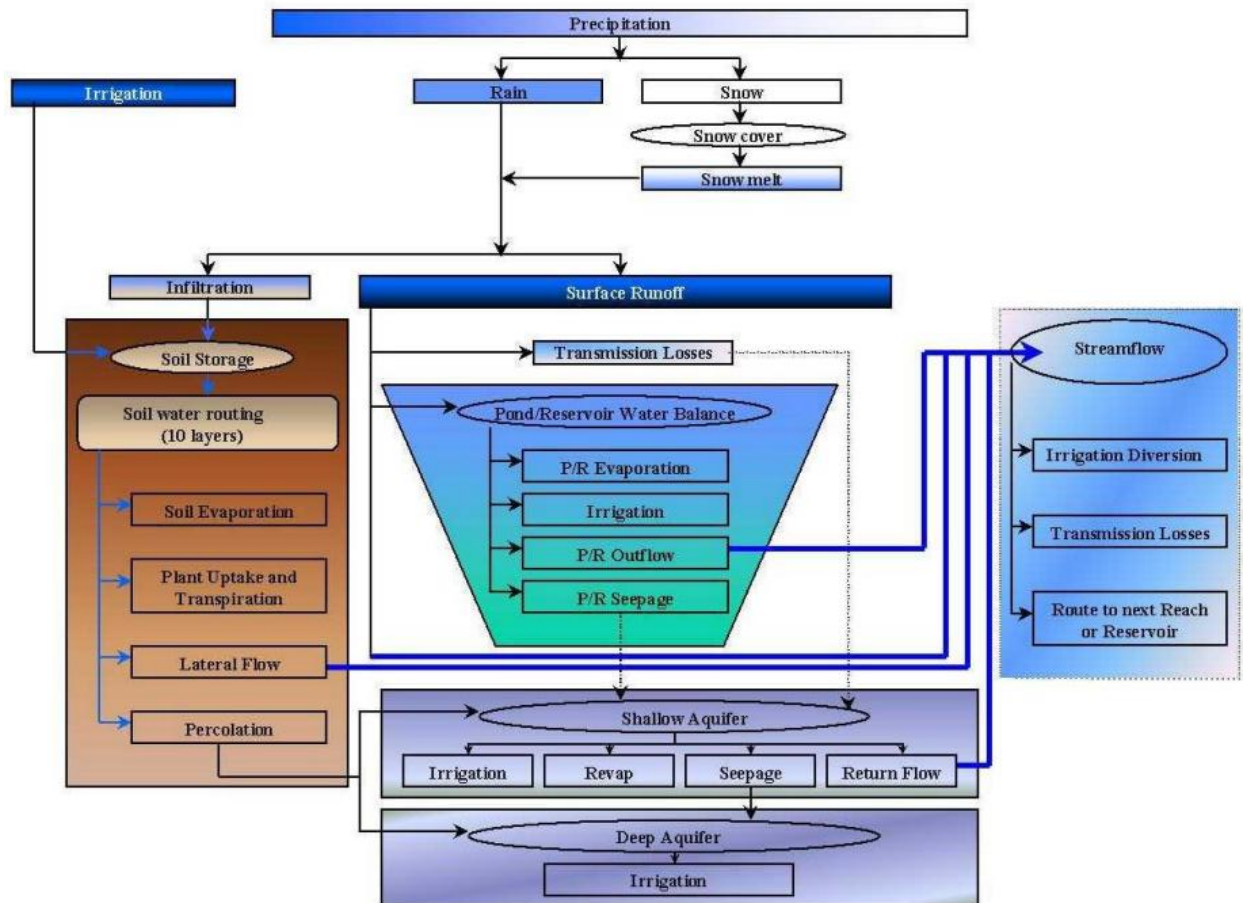
Q_{gw} : η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H₂O)

Routing Phase

Η διόδευση του νερού στο υδρογραφικό δίκτυο μέχρι το τέλος του και την έξοδο της λεκάνης αποτελεί το δεύτερο κομμάτι της προσομοίωσης του SWAT. Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών της επιφανειακής απορροής, του κύκλου των θρεπτικών, των ιζημάτων και της ανάπτυξης φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης σειρά έχει η χρήση αυτών των δεδομένων στην προσομοίωση του συστήματος συνολικά. Τα αποτελέσματα ροής των υδρολογικών μονάδων απόκρισης, της κάθε υπολεκάνης, αθροίζονται και έπειτα διοδεύονται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο με την χρήση είτε της μεθόδου αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού, (Williams, 1969) είτε την μέθοδο Muskingum, (Neitsch et al., 2005). όπου και οι δυο είναι παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος. Επιπλέον, τα φορτία ή οι συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα φυτοφάρμακα και οι θρεπτικές ουσίες των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης αθροίζονται και διοδεύονται μέσω των καναλιών, των υγροτόπων και των ταμιευτήρων για να καταλήξουν τελικά της έξοδο της λεκάνης απορροής.

3.1.5: Υδρολογία του Μοντέλου

Με την κατακρήμνιση να φτάνει στο έδαφος το νερό μπορεί να πέσει στο έδαφος ή να συγκρατηθεί από τα φυλλώματα των φυτών. Το νερό που καταφέρνει να φτάσει στο έδαφος μπορεί να διηθηθεί στο εδαφικό προφίλ ή να απομακρυνθεί μέσω της επιφανειακής ροής, όπου και απομακρύνεται σχετικά γρήγορα προς το υδρογραφικό δίκτυο. Το διηθημένο νερό, μπορεί να απομακρυνθεί αργότερα μέσω της εξατμισοδιαπνοής ή να επιστρέψει στα επίγεια υδάτινα συστήματα μέσω υπόγειων διαδρομών, (Σχήμα 3.2.), (Neitsch et al., 2011).



Σχήμα 3. 2. Σχηματική απεικόνιση πορείας νερού στο SWAT+, πηγή: Neitsch et al., 2011

Μερικές από τις σημαντικότερες υδρολογικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο SWAT είναι οι παρακάτω:

Διήθηση: Αναφέρεται στην είσοδο του νερού από το έδαφος στα εδαφικά υποστρώματα. Τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους αυξάνονται κατά τη διήθηση και προκαλείται μείωση του ρυθμού της με τον χρόνο μέχρι να επιτευχθεί η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους. Ο αρχικός ρυθμός διήθησης εξαρτάται από την ήδη υπάρχουσα εδαφική υγρασία κάθε εδαφικού στρώματος, πριν την εισαγωγή νερού στο επιφανειακό έδαφος. Η ποσότητα νερού που διηθείται, υπολογίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην ποσότητα βροχόπτωσης και στο νερό που καταλήγει ως επιφανειακή απορροή.

Εξατμισοδιαπνοή: Αναφέρεται στις διαδικασίες κατά τις οποίες το νερό, υγρής ή στερεάς φάσης, που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης, μετατρέπεται στην αέρια φάση. Περιλαμβάνεται η εξάτμιση από τις λίμνες, τα ποτάμια, το έδαφος, τις φυτικές επιφάνειες, την διαπνοή από τα φύλλα των φυτών και την εξάχνωση του πάγου και των χιονισμένων επιφανειών. Η εξάτμιση των εδαφών και των φυτών υπολογίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο.

Ροή επιστροφής: Αφορά την ποσότητα νερού που ρέει στο υδρογραφικό δίκτυο και προέρχεται από τον υπόγειο υδροφόρο. Στο μοντέλο διαχωρίζεται η υπόγεια ροή σε δύο υδροφορείς, τον ρηχό, όπου συνεισφέρει νερό με την ροή επιστροφής στο υδρογραφικό δίκτυο εντός της λεκάνης, και τον βαθύ, όπου χάνονται τα ύδατα και δεν μπορούν να επιστρέψουν στην λεκάνη.

Συμβάλλοντα υδατορεύματα: Εντός μιας υπολεκάνης ορίζονται δυο είδη καναλιών, τα βασικά ή κύρια κανάλια και τα δευτερεύοντα ή παραπόταμοι ή αλλιώς συμβάλλοντα υδατορεύματα. Οι παραπόταμοι δεν λαμβάνουν ροή από τα υπόγεια ύδατα. Η ροή από τα συμβάλλοντα υδατορεύματα διοδεύεται στα κύρια κανάλια της υπολεκάνης.

Επιφανειακή απορροή: Αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που απορρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και η κίνηση του επιτυγχάνεται μέσω της βαρύτητας λόγω των κλίσεων του εδάφους, με τελικό αποτέλεσμα την διοχέτευση του στο υδρογραφικό δίκτυο. Το SWAT προσομοιώνει την επιφανειακή ροή για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης μέσω της τροποποιημένης μεθόδου αριθμού καμπύλης CN όταν τα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης αφορούν ημερήσιες καταγεγραμμένες τιμές, ενώ την μέθοδο Green & Ampt όταν τα δεδομένα παρέχουν ωριαίες τιμές.

Η μέθοδος αριθμού καμπύλης SCS (SCS Curve Number ή CN) είναι μια γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική μέθοδος στην υδρολογία, για την εκτίμηση της επιφανειακής απορροής του πλεονάζοντος νερού έπειτα από βροχόπτωση. Στη μέθοδο, ενσωματώνεται η χρήση γης και ο τύπος εδάφους. Έτσι οι τρεις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι το ύψος βροχής, η αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους και το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους-καλύμματος, (Τσακίρης Γ. et al., 2013).

Η εξίσωση αριθμού καμπύλης SCS είναι η:

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

Όπου, Q_{surf} είναι η επιφανειακή απορροή ή περίσσειμα βροχής (mm H₂O), R_{day} είναι η βροχόπτωση της ημέρας (mm H₂O), I_a είναι οι αρχικές απώλειες που αφορούν την συγκράτηση, την εξάτμιση και την διήθηση πριν την απορροή (mm H₂O) και S είναι η παράμετρος απωλειών.

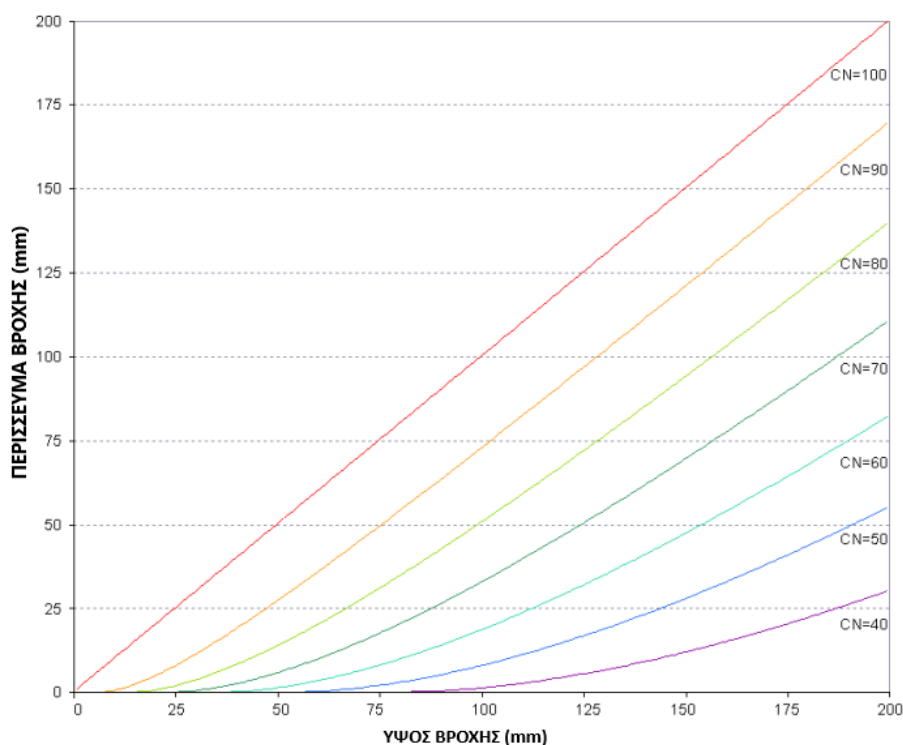
Η παράμετρος απωλειών S ποικίλλει χωρικά λόγω των μεταβολών στις χρήσεις γης, στα εδάφη, στις κλίσεις και στην εδαφική υγρασία σε μια λεκάνη απορροής. Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως:

$$S = 25.4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Όπου, CN είναι ο αριθμός καμπύλης της ημέρας (day). Στη μέθοδο SCS εκτιμάται ότι οι αρχικές απώλειες είναι το 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ ύψους βροχής και ύψους περισσεύματος βροχής. Έτσι, η αρχική εξίσωση του αριθμού καμπύλης μετατρέπεται σε:

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

Η γραφική επίλυση της εξίσωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3



Σχήμα 3. 3. Σχέση περισσεύματος βροχής με το ύψος βροχής στην μέθοδο SCS, πηγή: Neitsch et al., 2011

Καθώς ο αριθμός καμπύλης (SCS CN) αποτελεί μια εξίσωση που συμπεριλαμβάνει τους τύπους των εδαφών, των χρήσεων γης και διαθέσιμης υγρασίας του εδάφους, παρουσιάζονται οι κατηγορίες που αναφέρονται σε αυτά και βοηθάνε στον υπολογισμό του CN.

Από Μυρωνίδης, 2021, Τσακίρης Γ. et al., 2013 και Neitsch et al., 2011.

Προηγούμενη Υγρασιακή Κατάσταση Εδάφους (Antecedent Soil Moisture Condition)

Η μέθοδος SCS, με βάση την βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών, διαχωρίζει την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους σε τρεις κατηγορίες: *Κατηγορία I* – αναφέρεται σε ξηρά, αρόσιμα εδάφη, *Κατηγορία II* – αναφέρεται σε μέση υγρασιακή κατάσταση και *Κατηγορία III* – αναφέρεται σε υγρό έδαφος που προκλήθηκε από μεγάλη βροχόπτωση. Το Curve Number αναφέρεται κυρίως για την *Κατηγορία II* και συχνά παρουσιάζεται ως CN_2 . Αντίστοιχα για την *Κατηγορία I* ο αριθμός καμπύλης αναφέρεται ως CN_1 και για την *Κατηγορία III* αναφέρεται ως CN_3 . Οι αριθμοί καμπύλης για τις κατηγορίες *I* και *III* υπολογίζονται με την βοήθεια εξισώσεων που έχουν ως βάση το CN_2 .

Κατηγορίες Εδαφών από Υδρολογική Άποψη (Soil Hydrologic Groups)

Το NRCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις υδρολογικές κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά διήθησης των εδαφών. Οι υδρολογικές κατηγορίες ορίζονται ως ομάδες εδαφών με παρόμοια δυνητική απορροή υπό παρόμοιες καταιγίδες και συνθήκες κάλυψης. Οι ομάδες αυτές είναι:

Κατηγορία A

Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης και υψηλή διαπερατότητα, ακόμη και όταν προηγουμένως έχουν διαβραχεί πλήρως με νερό. Συνήθως πρόκειται για βαθιά αμμώδη ή χαλκώδη εδάφη.

Κατηγορία B

Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης και μέτρια διαπερατότητα όταν προηγουμένως έχουν διαβραχεί πλήρως με νερό. Αποτελούνται κυρίως από μέτρια βαθιά έως βαθιά, μέτρια καλά έως καλά στραγγιζόμενα εδάφη, με λεπτές έως μέτρια λεπτές υφές. Συνήθως πρόκειται για ρηχά πηλώδη και πηλοαμμώδη εδάφη.

Κατηγορία C

Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης και μικρή διαπερατότητα, όταν προηγουμένως έχουν διαβραχεί πλήρως με νερό. Τα εδάφη αυτά, περιέχουν κυρίως ένα στρώμα που εμποδίζει την καθοδική κίνηση του νερού και έχουν μέτρια λεπτή έως λεπτή υφή. Πρόκειται για αργιλοπηλώδη, ρηχά αμμοπηλώδη και εδάφη πλούσια σε άργιλο.

Κατηγορία D

Εδάφη με πολύ χαμηλούς ρυθμούς διήθησης και μικρή διαπερατότητα, όταν προηγουμένως έχουν διαβραχεί πλήρως με νερό. Περιλαμβάνονται αργιλώδη εδάφη υψηλού δυναμικού διόγκωσης, εδάφη όπου ο υπόγειος υδροφορέας είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια, εδάφη με στρώμα αργίλου ή πηλό κοντά στην επιφάνεια κι αβαθή εδάφη σε αδιαπέρατο υπόστρωμα.

3.1.6: Διαθέσιμα Εργαλεία SWAT+

Το μοντέλο SWAT+ είναι ένα πρόγραμμα που λειτουργεί με γραμμές εντολών χρησιμοποιώντας αρχεία εισόδου και εξόδου. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν ορισμένα εργαλεία που εγκαθίστανται με το πακέτο του SWAT+ με στόχο οι εντολές να εκτελούνται σε γραφικό περιβάλλον, όπου η προετοιμασία μιας προσομοίωσης γίνεται πιο εύχρηστη και φιλική προς τους χρήστες.

3.1.7: Quantum GIS και QSWAT+

Οι προηγούμενες εκδόσεις του SWAT λειτουργούσαν σε περιβάλλον ArcGIS που αναπτύχθηκε από το ESRI. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε το ArcGIS-SWAT, ένα μοντέλο γεωδεδομένων και περιβάλλον συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών, το οποίο ήταν το πρόσθετο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ώστε να αποθηκεύονται γεωγραφικά, αριθμητικά και σε μορφή κειμένου δεδομένα εισόδου τα οποία θα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα με οργανωμένο τρόπο, (Olivera et al., 2006). Με την αναδιαμόρφωση του SWAT και με την εισαγωγή του SWAT+, το περιβάλλον συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών που προτιμήθηκε ήταν το Quantum Geographic Information System (QGIS). Το QGIS είναι ένα δωρεάν, ελεύθερου κώδικα και επεκτάσιμο εργαλείο GIS το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη πρόσθετων προγραμμάτων στις γλώσσες Python και C++. Πρόκειται για ένα από τα επίσημα έργα του Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), (Moysroun & Portet, 2018). Ένα από τα πρόσθετα προγράμματα που αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του QGIS, είναι το QSWAT+ το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τα δεδομένα που αφορούν την προετοιμασία του μοντέλου SWAT+. Μερικά από αυτά τα δεδομένα αφορούν την εισαγωγή ψηφιακών χαρτών της περιοχής μελέτης, των ψηφιακών χαρτών εδαφών και των ψηφιακών χαρτών χρήσεων γης. Μέσω του πρόσθετου προγράμματος QSWAT+ γίνεται η διαμόρφωση της λεκάνης απορροής και η κατάλληλη επεξεργασία των χαρακτηριστικών της για την οριοθέτηση των υπολεκάνων και των HRUs, (Schürz et al., 2022).

3.1.8: SWAT+ Editor

Με την εισαγωγή όλων των γεωχωρικών δεδομένων και αφού ετοιμαστεί η μοντελοποιημένη λεκάνη απορροής, το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή επιπρόσθετων δεδομένων για την πραγματοποίηση τρεξίματος της προσομοίωσης. Αυτό γίνεται δυνατό μέσω του SWAT+ Editor. Το συγκεκριμένο εργαλείο είναι το γραφικό περιβάλλον που λαμβάνει την μοντελοποιημένη λεκάνη απορροής από το QSWAT+ και επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και λοιπών καιρικών δεδομένων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Με λίγα λόγια, το SWAT+ Editor επιτρέπει την τροποποίηση των βάσεων δεδομένων του μοντέλου προσθέτοντας μετεωρολογικούς σταθμούς και τις καταγεγραμμένες τιμές αυτών, επιτρέπει την εκτέλεση της προσομοίωσης δίνοντας στον χρήστη την επιλογή του τρόπου εμφάνισης των αποτελεσμάτων (ημερήσια, μηνιαία, ετήσια και ακόμη ωριαία με την εισαγωγή αντίστοιχων μετεωρολογικών δεδομένων) σε μια σειρά από επιλογές όπως η συνολική παροχή στην έξοδο του ποταμού, η ποσότητα του νερού που υπάρχει στον υπόγειο υδροφόρα και πολλές ακόμη επιλογές. Επιπλέον, στο SWAT+ Editor γίνεται δυνατή η επεξεργασία των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, με την βοήθεια αρχείου που έχει καταγεγραμμένες τιμές πεδίου, με στόχο την καλύτερη δυνατή αποτύπωση της πραγματικότητας.

3.1.9: SWAT+ Toolbox

Στο κομμάτι της αξιολόγησης του μοντέλου, υπάρχουν αρκετά προγράμματα που δημιουργήθηκαν για να διευκολύνουν τους χρήστες στην επεξεργασία των παραμέτρων και στην όσο το δυνατόν πιο σωστή βαθμονόμηση τους. Στις παλαιότερες εκδόσεις του SWAT, ο χρήστης επεξεργαζόταν χειροκίνητα τις παραμέτρους στο πρόγραμμα και μετέβαινε στο Microsoft Access για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ώστε να εισάγει τις τιμές στις εξισώσεις υπολογισμού των στατιστικών δεικτών. Με το Toolbox, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο, καθώς στο γραφικό περιβάλλον του ενσωματώνονται όλες οι παραπάνω λειτουργίες και αποτελεί μια ευκολία για τον χρήστη. Στο SWAT+ Toolbox, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει την λειτουργία της προσομοίωσης, να επιλέξει το είδος των αποτελεσμάτων που θέλει να εξάγει και να πραγματοποιήσει ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους του μοντέλου με στόχο να εντοπίσει τις λιγότερο και περισσότερο ευαίσθητες. Από αυτές, μπορεί να πραγματοποιήσει αυτόματη βαθμονόμηση και να επιβλέπει την διαδικασία καθώς τα γραφικά αποτελέσματα και οι στατιστικοί δείκτες παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο στην ίδια καρτέλα. Επιπλέον, δίνεται και η επιλογή της χειροκίνητης βαθμονόμησης, (Chawanda, 2021).

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS

3.2.1: Εισαγωγική περιγραφή μοντέλου HEC-RAS

Το U.S. Army Corps of Engineers River Analysis System (HEC-RAS) είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει την εκτέλεση μονοδιάστατων υπολογισμών υδραυλικής σταθερής ροής (1D), μονοδιάστατων (1D) και δισδιάστατων (2D) υπολογισμών υδραυλικής σταθερής ροής, μονοδιάστατων (1D) και δισδιάστατων υπολογισμών (2D) υδραυλικής μη σταθερής ροής ποταμών, υπολογισμών μεταφοράς ιζημάτων και γενικευμένη μοντελοποίηση ποιότητας νερού μέσω της μεταφοράς θρεπτικών ουσιών. Το HEC-RAS αναπτύχθηκε στο Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής (Hydrologic Engineering Center-HEC) που αποτελεί παράρτημα του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων (Institute for Water Resources-IWR) του U.S. Army Corps of Engineers. Το λογισμικό σχεδιάστηκε από τον Gary W. Brunner, υπεύθυνο της ομάδας ανάπτυξης του HEC-RAS. (USACE, 2024). Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως και θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστο. Η μονοδιάστατη μοντελοποίηση (1D) χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση της ροής του νερού σε ποτάμια και κανάλια, απλοποιώντας την αναπαράσταση του υδραυλικού συστήματος μόνο στη κύρια διεύθυνση, θεωρώντας την ροή σε ένα επίπεδο. Για την ανάπτυξη του μοντέλου, χρειάζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) για την ρύθμιση της γεωμετρίας της περιοχής και της βαθυμετρίας του ποταμού, και δεδομένα ροής για την ρύθμιση των οριακών συνθηκών. Στο HEC-RAS, το κανάλι ή ο ποταμός που μοντελοποιείται, διαιρείται σε μια σειρά από διατομές όπου εντός της κάθε μιας, υπολογίζονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της ροής του νερού όπως το βάθος και η ταχύτητα. Γενικά, το HEC-RAS χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν σε μια περιοχή, διάφορα σενάρια ροής, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) για την καλύτερη δυνατή χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση HEC-RAS 6.4.1 για την μονοδιάστατη (1D) προσομοίωση του ποταμού Γιόφυρου.

3.2.2: Υδραυλικοί Υπολογισμοί

Από Hydraulic Reference Manual, Gary W. Brunner, 2016

Το θεωρητικό σκέλος των υπολογισμών της μονοδιάστατης μοντελοποίησης (1D) περιλαμβάνει την χρήση θεμελιωδών αρχών της υδραυλικής μηχανικής και της ρευστομηχανικής με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της κίνησης του νερού στα ποτάμια.

Εξισώσεις Υπολογισμού Μονοδιάστατης Ροής

Ο προσδιορισμός της υδάτινης επιφάνειας από την μια διατομή στην επόμενη μπορεί να προσεγγιστεί επιλύοντας την εξίσωση Ενέργειας. Αυτή η επίλυση γίνεται με μια επαναληπτική διαδικασία μεταξύ γειτονικών διατομών που ονομάζεται «Standard Step Method». Η εξίσωση Ενέργειας ορίζεται ως εξής:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

όπου:

Z_1, Z_2 είναι το υψόμετρο πυθμένα διατομής

Y_1, Y_2 είναι το βάθος του νερού στις διατομές

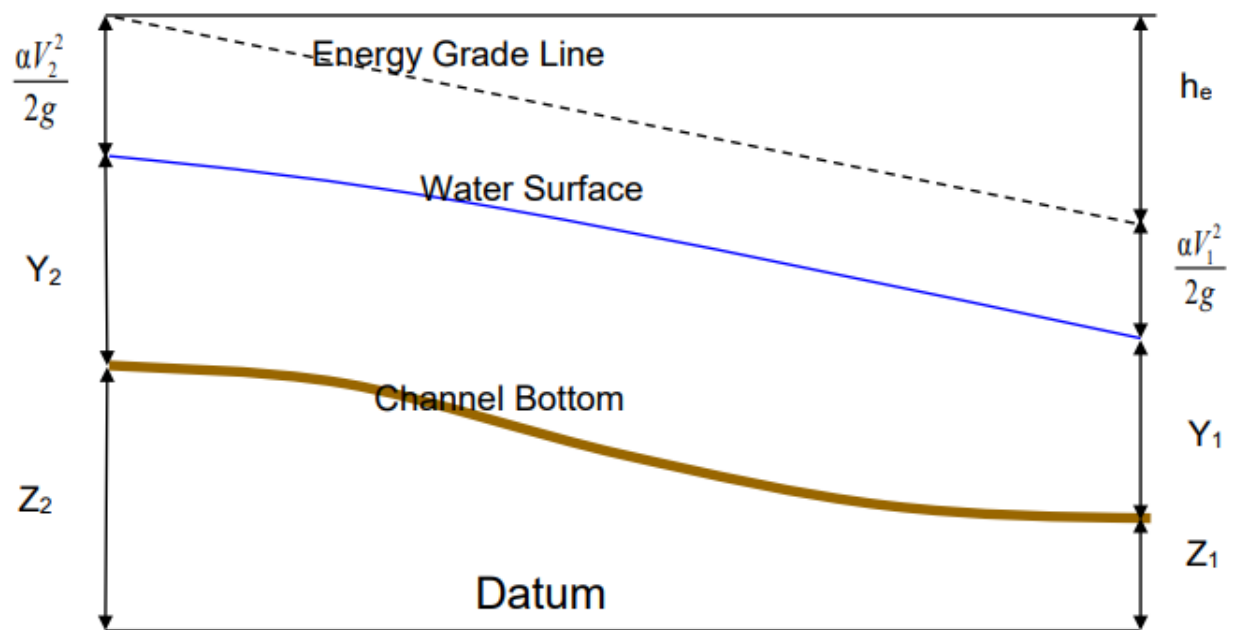
V_1, V_2 είναι οι μέσες ταχύτητες ροής

a_1, a_2 είναι οι σταθμισμένοι συντελεστές διόρθωσης κινητικής ενέργειας

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

h_e είναι οι απώλειες ενέργειας

Στο Σχήμα 3.5. παρουσιάζονται οι όροι της εξίσωσης Ενέργειας.



Σχήμα 3. 5. Απεικόνιση όρων εξίσωσης ενέργειας (Brunner, 2016)

Οι απώλειες ενέργειας h_e ορίζονται ως εξής:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

όπου:

L είναι το σταθμισμένο μήκος απόστασης μεταξύ δυο διατομών

\bar{S}_f είναι η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής μεταξύ δυο διατομών

C συντελεστής απωλειών λόγω συστολής η διαστολής

Το σταθμισμένο μήκος απόστασης μεταξύ δύο διατομών ορίζεται ως εξής

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

όπου:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} είναι τα μήκη μεταξύ διατομών για την αριστερή όχθη (lob), το κύριο υδατόρευμα (ch) και την δεξιά όχθη (rob)

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ είναι οι μέσοι όροι των παροχών για την ροή μεταξύ διατομών για την αριστερή όχθη (lob), το κύριο υδατόρευμα (ch) και την δεξιά όχθη (rob)

Υποδιαίρεση Διατομής για Υπολογισμούς Παροχευτικότητας

Για την εκτίμηση της παροχευτικότητας όπως και του συντελεστή ταχύτητας σε μια διατομή, γίνεται υποδιαίρεση της ροής σε τμήματα όπου η ταχύτητα είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, (Σχήμα 3.6.). Η παροχευτικότητα υπολογίζεται σε κάθε τμήμα μέσω της εξίσωσης του Manning:

$$Q = KS_f^{1/2}$$
$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

όπου:

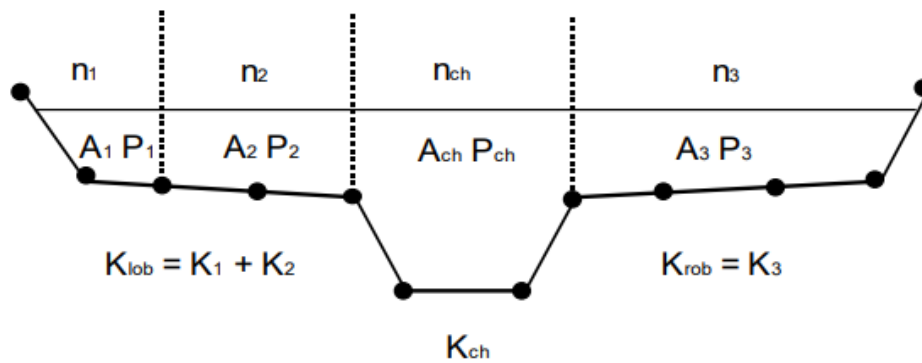
K είναι η παροχευτικότητα κάθε τμήματος

n είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning για το κάθε τμήμα

A είναι το εμβαδόν ροής του κάθε τμήματος

R είναι η υδραυλική ακτίνα (Εμβαδόν ροής / Βρεχόμενη περίμετρος)

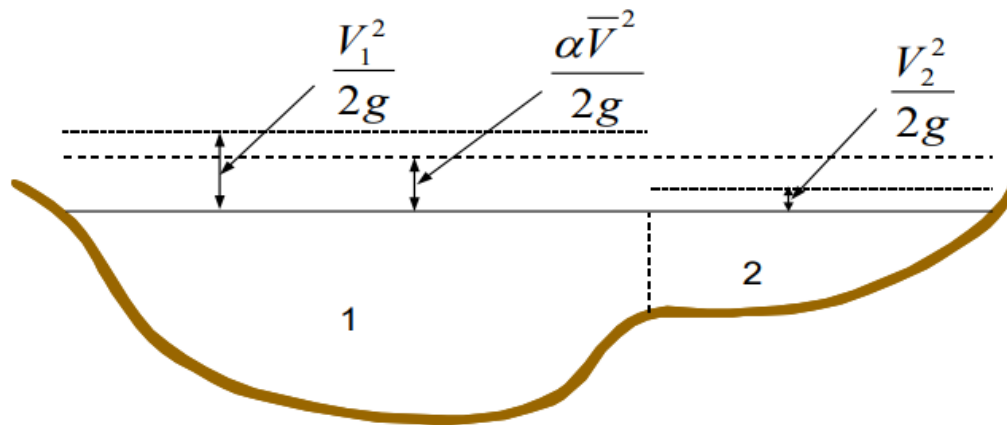
S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας



Σχήμα 3. 6. Μέθοδος υποδιαίρεσης διατομής (Brunner, 2016)

Υπολογισμός Μέσης Κινητικής Ενέργειας

Για κάθε δεδομένο ύψος υδατικής επιφάνειας, η μέση κινητική ενέργεια λαμβάνεται υπολογίζοντας την σταθμισμένη ροή ενέργειας στα τρία τμήματα μιας διατομής (αριστερή όχθη, κύριο υδατόρευμα, δεξιά όχθη). Το Σχήμα 3.7. παρουσιάζει πως το HEC-RAS υπολογίζει τη μέση κινητική ενέργεια σε μια διατομή που έχει μόνον το κύριο υδατόρευμα και την δεξιά όχθη:



V_1 = mean velocity for subarea 1

V_2 = mean velocity for subarea 2

Σχήμα 3. 7. Παράδειγμα υπολογισμού μέσης κινητικής (Brunner, 2016)

Για τον υπολογισμό της μέσης κινητικής ενέργειας είναι απαραίτητο να ληφθεί ο σταθμισμένος συντελεστής διόρθωσης κινητικής ενέργειας α . Ο συντελεστής υπολογίζεται ως εξής:

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + Q_N V_N^2]}{Q \bar{V}^2}$$

Ο συντελεστής α υπολογίζεται με βάση της παροχετευτικότητας στα τρία τμήματα της ροής, την δεξιά και την αριστερή όχθη, και το κύριο υδατόρευμα. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί ακόλουθη εξίσωση:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3}$$

όπου:

A_t είναι η συνολική επιφάνεια της διατομής

A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} είναι οι επιφάνειες ροής της αριστερής και της δεξιάς όχθης και του κύριου υδατορεύματος

K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} είναι η παροχετευτικότητα της αριστερής και της δεξιάς όχθης και του κύριου υδατορεύματος

K_t είναι η συνολική παροχετευτικότητα της διατομής

Προσδιορισμός Κρίσιμου Βάθους

Το κρίσιμο βάθος για μια διατομή θα καθοριστεί εφόσον ικανοποιηθεί κάποια από τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Έχει οριστεί το πρόγραμμα υπερκρίσιμης ροής.
- Να ζητηθεί από τον χρήστη ο υπολογισμός του κρίσιμου βάθους.
- Όταν πρόκειται για μια εξωτερική οριακή διατομή και πρέπει να προσδιοριστεί το κρίσιμο βάθος για να διασφαλιστεί ότι η οριακή συνθήκη που εισάχθηκε βρίσκεται στο σωστό πρόγραμμα ροής.
- Ο έλεγχος του αριθμού Froude για ένα υποκρίσιμο προφίλ, υποδεικνύει τον καθορισμό του κρίσιμου βάθους, για την επιβεβαίωση του προγράμματος ροής.
- Το πρόγραμμα δεν μπορεί να εξισορροπήσει την εξίσωση ενέργειας εντός των ορίων ανοχής πριν την επίτευξη του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων.

Η ολική ενέργεια για μια διατομή ορίζεται ως εξής:

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

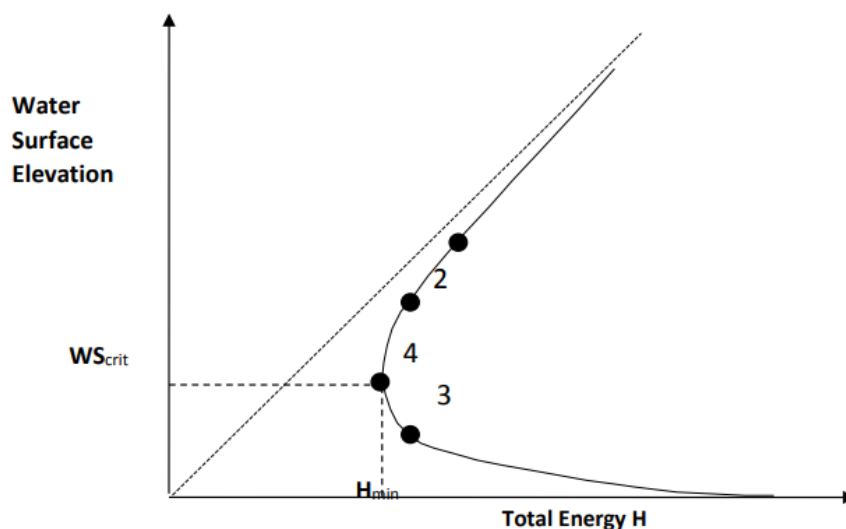
όπου:

H είναι η ολική ενέργεια

WS είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ είναι το κινηματικό φορτίο ταχύτητας

Το κρίσιμο υψόμετρο της επιφάνειας του νερού είναι το υψόμετρο όπου η ολική ενέργεια είναι ελάχιστη. Το κρίσιμο βάθος καθορίζεται με μια επαναληπτική διαδικασία στην οποία υποθέτοντας το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού (WS), μια αντίστοιχη τιμή ολικής ενέργειας (H) υπολογίζεται με βάση την παραπάνω εξίσωση, μέχρι να εντοπιστεί η ελάχιστη τιμή ολικής ενέργειας, (Σχήμα 3.8.).



Σχήμα 3. 8. Διάγραμμα ενέργειας vs. υψόμετρο επιφάνειας νερού (Brunner, 2016)

3.2.3: Βασικά Δεδομένα Εισόδου του Μοντέλου

Από Hydraulic Reference Manual, Gary W. Brunner, 2016

Ο κύριος στόχος του HEC-RAS αποτελεί το ύψος της στάθμης του νερού σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος, σε συγκεκριμένα δεδομένα ροής. Οι κύριες κατηγορίες δεδομένων που χρειάζονται για μια προσομοίωση είναι: Γεωμετρικά Δεδομένα, Δεδομένα Μόνιμης Ροής, Δεδομένα Μη Μόνιμης Ροής, Δεδομένα Ιζημάτων και Δεδομένα Ποιότητας Νερού. Από όλα τα παραπάνω, μόνο τα γεωμετρικά δεδομένα είναι απαραίτητα για μια μοντελοποίηση. Τα υπόλοιπα είναι απαραίτητα ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης που θέλει να κάνει ο χρήστης. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, η μοντελοποίηση που έγινε ήταν μονοδιάστατη (1D) και τα δεδομένα που χρειάστηκαν ήταν τα εξής:

Γεωμετρικά Δεδομένα

Γεωμετρία εδάφους: Εισαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) που να αποτυπώνει με καλή ευκρίνεια την γεωμορφολογία του εδάφους. Πρόκειται για το πιο σημαντικό δεδομένο που εισάγεται, καθώς αυτό εισάγεται στο εσωτερικό εργαλείο τύπου GIS που διαθέτει το HEC-RAS για την επεξεργασία γεωμορφολογικών δεδομένων, το RAS Mapper. Πάνω στο DEM της περιοχής μελέτης, σχεδιάζεται με τα εργαλεία του RAS Mapper, η κύρια κοίτη του ποταμού, οι όχθες και οι γραμμές πορείας πλημμύρας εκατέρωθεν του ποταμού.

Τοπογραφία του ποταμού: Είναι χρήσιμη καθώς μέσω αυτής μπορεί να διορθωθεί η βαθυμετρία του ποταμού. Συνήθως τα DEM δεν παρέχουν λεπτομερή απεικόνιση του βάθους των ποταμών κυρίως λόγω της ύπαρξης νερού ή βλάστησης στις κοίτες. Μέσω μιας τοπογραφικής μελέτης της κοίτης του ποταμού, αντλούνται οι πραγματικές τιμές του βάθους και εισάγονται στο μοντέλο για μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Επιπλέον, στις τοπογραφικές μελέτες αναφέρονται και τα τεχνικά έργα που έχουν κατασκευαστεί κατά μήκος του ποταμού, τα οποία επηρεάζουν σε αρκετές περιπτώσεις την ροή και θα πρέπει να συνυπολογιστούν στην προσομοίωση. Ορισμένα από αυτά τα τεχνικά έργα είναι οι γέφυρες και οι οχετοί.

Ψηφιακός χάρτης χρήσεων γης: Ο κύριος λόγος για την εισαγωγή χάρτη χρήσεων γης (Land Cover Layer) αφορά κυρίως τον εντοπισμό του συντελεστή Manning για κάθε σημείο της υπό μελέτης περιοχής. Η τιμή του συντελεστή Manning ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η τραχύτητα της επιφάνειας, η βλάστηση εντός του καναλιού, οι εδαφικές εναποθέσεις εντός του καναλιού, η χρήση διάφορων υλικών στην κατασκευή της κοίτης (για ποτάμια που έχουν υποστεί ανθρώπινη παρέμβαση). Γενικά, η επιλογή του σωστού συντελεστή για την εκάστοτε περιοχή είναι σημαντική καθώς από αυτό εξαρτάται η ακρίβεια των υπολογισμών της μοντελοποιημένης στάθμης του νερού.

Δεδομένα Μόνιμης Ροής

Οριακές συνθήκες: Στα άκρα του προσομοιωμένου ποταμού, χρειάζονται κάποιες γνωστές τιμές οι οποίες ονομάζονται οριακές συνθήκες (boundary conditions) και είναι απαραίτητες για την έναρξη των επαναληπτικών διαδικασιών επίλυσης των εξισώσεων ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές επιλογές οριακών συνθηκών που μπορεί να εισάγει ένας χρήστης:

- 1) Known Water Surface Elevation: Ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει το ύψος της στάθμης του νερού για να γίνει η προσομοίωση.
- 2) Critical Depth: Όταν επιλέγεται η συγκεκριμένη συνθήκη, ο χρήστης δεν χρειάζεται να εισάγει κάτι περαιτέρω, καθώς το πρόγραμμα θα υπολογίσει το κρίσιμο βάθος και θα το χρησιμοποιήσει ως οριακή συνθήκη.
- 3) Normal Depth: Εισάγεται η κλίση γραμμής ενέργειας που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος στη συγκεκριμένη θέση μέσω της εξίσωσης Manning. Γενικά, για την εκτίμηση της κλίσης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κλίση του πυθμένα της κοίτης του ποταμού ή της επιφάνειας του νερού.
- 4) Rating Curve: Ο χρήστης εισάγει την καμπύλη στάθμης-παροχής για την οποία θα πρέπει αν υπάρχουν δεδομένα. Σε αυτή τη περίπτωση, κάθε τιμή παροχής αντιστοιχεί σε μια τιμή στάθμης ελεύθερης επιφάνειας.

Συνοπτικά τα βήματα που ακολουθούνται σε μια μοντελοποίηση με το HEC-RAS είναι

- Κατασκευή γεωμετρικού υποβάθρου και δημιουργία διατομών κατά το μήκος του ποταμού.
- Εισαγωγή των τιμών του συντελεστή Manning σε συνδυασμό με ψηφιακό χάρτη χρήσεων γης.
- Προσδιορισμός συνθηκών ροής και οριακών συνθηκών.
- Εισαγωγή παροχών αιχμής για μοντελοποίηση.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης είναι τα δεδομένα εξόδου και αναφέρονται στην στάθμη του νερού σε κάθε διατομή, ανά κάθε παροχή (profile) που έχει εισάγει ο χρήστης.

3.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

3.3.1: Ανάλυση Ευαισθησίας (μέθοδος Sobol)

Στο βοηθητικό πρόγραμμα SWAT+ Toolbox κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή ορισμένων παραμέτρων για ανάλυση της ευαισθησίας τους στην μοντελοποίηση. Η ανάλυση ευαισθησίας μελετά την επίδραση που έχουν οι μεταβολές των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου στα αποτελέσματά του, με στόχο την ταξινόμηση τους κατά σειρά σημαντικότητας. Γενικά, η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να οριστεί ως η μελέτη του τρόπου με τον οποίο η αβεβαιότητα στις εξόδους ενός μοντέλου μπορεί να καταλογιστεί στις διάφορες πηγές αβεβαιότητας που υπάρχουν στις πηγές του μοντέλου, (Saltelli A. et al., 2008). Στο Toolbox, προσφέρονται αρκετές μέθοδοι που μπορούν να εκτελέσουν ανάλυση ευαισθησίας, όπως η Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST), η Random Balance Designs-FAST, η Delta-Moment Independent Measure και η **μέθοδος Sobol**. Η κάθε μέθοδος προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για τις παραμέτρους, ανάλογα με το στόχο της κάθε μελέτης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Sobol που αναπτύχθηκε και ονομάστηκε από τον Ρώσο μαθηματικό Ilya M. Sobol, (Sobol, 2001). Είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές παγκόσμιας ανάλυσης ευαισθησίας (Global Sensitivity Analysis). Συχνά αναφέρεται και ως ανάλυση ευαισθησίας με βάση την διακύμανση (Variance Based Sensitivity Analysis). Η μέθοδος Sobol παρουσιάζεται ως μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ανάλυση σύνθετων μοντέλων με πολλές μεταβλητές, όπως τα μοντέλα του SWAT. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια από τα βήματα που ακολουθούνται για την ποσοτικοποίηση των μεταβλητών εισόδου και την αλληλεπίδραση τους στη διακύμανση τους στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Από Sobol, 2001 και Saltelli et al., 2010

Προσδιορισμός της επίδρασης της αβεβαιότητας των παραμέτρων εισόδου στην αβεβαιότητα της εξόδου του μοντέλου: Επιτυγχάνεται μέσω της κατανομής της διακύμανσης της εξόδου σε διάφορες πηγές στις εισόδους. Εστιάζει στην παγκόσμια ανάλυση ευαισθησίας (GSA), η οποία λαμβάνει υπόψη όλο το εύρος των εισόδων.

Ανάλυση διακύμανσης με αναπαράσταση ANOVA: Για την αποσύνθεση της συνολικής διακύμανσης σε όρους που οφείλονται στις παραμέτρους εισόδου και στις αλληλεπιδράσεις τους η συνάρτηση $f(x)$, όπου $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ αναλύεται ως εξής:

$$f(x) = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{12\dots n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Η αναπαράσταση αυτή, διαχωρίζει τη συμβολή κάθε μεταβλητής και των αλληλεπιδράσεων τους.

Δείκτες Ευαισθησίας: Οι δείκτες ορίζονται ως:

$$S_{i_1 \dots i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D}$$

Όπου $D_{i_1 \dots i_s}$ αφορά τη συνεισφορά της διακύμανσης ενός συνόλου μεταβλητών και D την συνολική διακύμανση. Οι δείκτες αυτοί εκτιμούν την βαρύτητα που έχει κάθε μεταβλητή στο μοντέλο.

Χρήση διάφορων στρατηγικών δειγματοληψίας που είναι βασισμένες στις μεθόδους Monte Carlo και quasi-Monte Carlo: Οι δείκτες υπολογίζονται μέσω Monte Carlo ή quasi-Monte Carlo με στόχο την πιο ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου των παραμέτρων εισόδου. Απαιτούνται υπολογισμοί ολοκληρωμάτων της $f(x)$, $f^2(x)$ και των γινομένων $f(x)f(y, z')$ και $f(x)f(y', z)$.

Εφαρμογές δεικτών ευαισθησίας: Οι δείκτες ευαισθησίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς όπως η κατάταξη των παραμέτρων κατά σειρά σημαντικότητας, ο εντοπισμός των λιγότερο σημαντικών παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να παραλειφθούν και η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων.

Γενικά, η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας με βάση τη διακύμανση (Sobol) είναι ένα ισχυρό εργαλείο που παρέχει ένα πλαίσιο για την κατανόηση της συμβολής των εισόδων του μοντέλου, και βοηθά στην αξιολόγηση της σημασίας κάθε παραμέτρου όπως και των αλληλεπιδράσεων τους, με στόχο την απλοποίηση του μοντέλου χωρίς σημαντικές απώλειες στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

3.3.2: Δείκτες Αξιολόγησης Βαθμονόμησης-Επαλήθευσης

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, είναι σημαντική η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου ώστε αυτές να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα την περιοχή μελέτης. Ο έλεγχος της βαθμονόμησης γίνεται με στατιστικούς δείκτες ανεξάρτητα από την κλίμακα του μοντέλου, ετήσια, μηνιαία ημερήσια. Η αξιολόγηση της πρόγνωσης των μοντέλων του υδατικού ισοζυγίου πραγματοποιείται με στατιστικούς δείκτες με τη σύγκριση των αριθμητικών προβλέψεων του μοντέλου και των μετρήσεων της ίδιας χρονικής κλίμακας. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι:

- Δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency – NSE)
- Ποσοστιαία απόκλιση (Percent Bias – PBIAS)
- Μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (Mean Squared Error – MSE)
- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error – RMSE)
- Συντελεστής προσδιορισμού της δειγματικής ευθείας της παλινδρόμησης (R^2)

Δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency – NSE)

Ο δείκτης *NSE* είναι μια αδιάστατη και κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που καθορίζει το σχετικό μέγεθος της υπολειμματικής διακύμανσης σε σύγκριση με την διακύμανση των μετρούμενων δεδομένων, (Nash & Sutcliffe, 1970). Πρόκειται για ένα στατιστικό μέτρο που χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση της απόδοσης των υδρολογικών μοντέλων και εκτιμά την σύγκριση της γραφικής παράστασης των παρατηρούμενων τιμών έναντι των προσομοιωμένων τιμών, (D. N. Moriasi et al., 2007). Ο *NSE* ορίζεται ως εξής:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right]$$

Όπου, Y_i^{obs} η παρατηρούμενη τιμή την χρονική στιγμή i , Y_i^{sim} η προσομοιωμένη τιμή την χρονική στιγμή i , Y_i^{mean} ο μέσος όρος των παρατηρούμενων τιμών και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Ο NSE κυμαίνεται από $-\infty$ έως 1, με $NSE = 1$ να είναι η μέγιστη και βέλτιστη τιμή και ερμηνεύει την τέλεια συμφωνία μεταξύ παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών. Σύμφωνα με τους D. N. Moriasi et al., 2007, οι γενικές αξιολογήσεις απόδοσης του δείκτη NSE για μηνιαίο χρονικό βήμα σε μοντέλα που προσομοιώνουν την ροή των υδάτων, κατατάσσονται ως εξής:

- Πολύ καλή για $0.75 < NSE \leq 1.00$
- Καλή για $0.65 < NSE \leq 0.75$
- Ικανοποιητική για $0.50 < NSE \leq 0.65$
- Μη ικανοποιητική για $NSE \leq 0.50$

Ποσοστιαία απόκλιση (Percent Bias – PBIAS)

Ο δείκτης $PBIAS$ χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την απόδοση ενός μοντέλου μετρώντας την τάση που παρουσιάζει το μοντέλο να υπερεκτιμά ή να υποεκτιμά τις μετρούμενες τιμές πεδίου. Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0 και οι χαμηλές τιμές υποδεικνύουν μια αρκετά καλή προσομοίωση. Οι θετικές τιμές του δείκτη δείχνουν υποεκτίμηση του μοντέλου, ενώ οι αρνητικές δείχνουν υπερεκτίμηση, (H. V. Gupta et al., 1999). Ο $PBIAS$ ορίζεται ως εξής:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

Όπου, Y_i^{obs} η παρατηρούμενη τιμή την χρονική στιγμή i , Y_i^{sim} η προσομοιωμένη τιμή την χρονική στιγμή i και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Σύμφωνα με τους D. N. Moriasi et al., 2007, οι γενικές αξιολογήσεις απόδοσης του δείκτη $PBIAS$ για μηνιαίο χρονικό βήμα σε μοντέλα που προσομοιώνουν την ροή των υδάτων, κατατάσσονται ως εξής:

- Άριστη για $PBIAS \leq \pm 10\%$
- Καλή για $\pm 10\% < PBIAS \leq \pm 15\%$
- Ικανοποιητική για $\pm 15\% < PBIAS \leq \pm 25\%$
- Μη ικανοποιητική για $PBIAS \geq \pm 15\%$

Μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (Mean Squared Error – MSE)

Ο δείκτης MSE είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ακρίβειας με την οποία προσομοιώνει και προβλέπει ένα υδρολογικό μοντέλο. Το MSE υπολογίζει τον μέσο όρο των τετραγώνων της διαφοράς παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών, και συνεπώς δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα μεγαλύτερα σφάλματα που παρουσιάζονται, (H. V. Gupta et al., 2009). Ο MSE ορίζεται ως εξής:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2$$

Όπου, Y_i^{sim} η προσομοιωμένη τιμή την χρονική στιγμή i , Y_i^{obs} η παρατηρούμενη τιμή την χρονική στιγμή i και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Το εύρος του MSE κυμαίνεται από το 0 έως $+\infty$. Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο δείκτης MSE είναι και η βέλτιστη τιμή του καθώς αυτό υποδεικνύει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι ιδανικές. Γενικά, οι χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν την καλή απόδοση του μοντέλου. Αντίθετα, οι μεγάλες τιμές που μπορεί να παρουσιάσει ο δείκτης καταδεικνύουν την μη αποδοτική δυνατότητα πρόβλεψης του μοντέλου.

Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error – RMSE)

Ο δείκτης $RMSE$ είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των σφαλμάτων. Πρόκειται για μια στατιστική μέθοδο που αξιολογεί την ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου. Υπολογίζει την ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων της διαφοράς παρατηρούμενων και μοντελοποιημένων τιμών, (Chai & Draxler, 2014). Ο $RMSE$ υπολογίζεται ως εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}$$

Όπου, Y_i^{sim} η προσομοιωμένη τιμή την χρονική στιγμή i , Y_i^{obs} η παρατηρούμενη τιμή την χρονική στιγμή i και n το πλήθος των παρατηρήσεων.

Το εύρος του $RMSE$ κυμαίνεται από το 0 έως $+\infty$. Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο δείκτης $RMSE$ είναι και η βέλτιστη τιμή του καθώς αυτό υποδεικνύει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι ιδανικές. Οι χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν την καλή απόδοση του μοντέλου. Αντίθετα, οι μεγάλες τιμές που καταδεικνύουν την μη αποδοτική δυνατότητα πρόβλεψης του μοντέλου.

Συντελεστής προσδιορισμού της δειγματικής ευθείας της παλινδρόμησης (R^2)

Ο δείκτης R^2 είναι ένα από τα πολλά κριτήρια απόδοσης (efficiency criteria) που χρησιμοποιούνται στις υδρολογικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της «καλής προσαρμογής (goodness of fit)» των προσομοιωμένων τιμών με τα παρατηρούμενα δεδομένα. Κυμαίνεται από το 0 έως το 1, με το 1 να είναι η βέλτιστη τιμή και τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη συμφωνία μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών, (Legates & McCabe, 1999),(Onyutha, 2024). Το R^2 ορίζεται ως εξής:

$$R^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

Όπου, το X είναι οι παρατηρούμενες τιμές, το \bar{X} ο μέσος όρος των παρατηρούμενων τιμών, το Y οι μοντελοποιημένες τιμές και το \bar{Y} ο μέσος όρος των μοντελοποιημένων τιμών.

Στον πίνακα 3.1. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν όπως και τα εύρη τους.

Πίνακας 3. 1. Στατιστικοί Δείκτες και εύρη

Στατιστικός Δείκτης	Εύρος τιμών	Αποδεκτά Όρια	Βέλτιστη τιμή
NSE	$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$	≥ 0.5	1
PBIAS	$-\infty \leq \text{PBIAS} \leq +\infty$	$\leq 25 $	0
MSE	$0 \leq \text{MSE} \leq +\infty$	-	0
RMSE	$0 \leq \text{RMSE} \leq +\infty$	-	0
R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$	≥ 0.5	1

3.3.3: Στατιστική Ανάλυση Υδρολογικής Πληροφορίας

Τα περισσότερα υδρολογικά έργα σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη μελλοντικά υδρολογικά φαινόμενα για τα οποία δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί ο ακριβής χρόνος εκδήλωσης τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μεθοδολογίες της στατιστικής και των πιθανοτήτων, προκειμένου να υπολογιστεί η πιθανότητα εκδήλωσης ενός υδρολογικού φαινομένου ορισμένου μεγέθους στο μέλλον, (Μυρωνίδης, 2021). Παράδειγμα τέτοιων έργων που πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τη σχέση μεγέθους – συχνότητας εμφάνισης υδρολογικών φαινομένων είναι οι υπερχειλιστές ασφαλείας των φραγμάτων, τα δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων υδάτων, τα στραγγιστικά δίκτυα, οι γέφυρες και τα αντιπλημμυρικά έργα, (Τσακίρης Γ. et al., 2013). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται η ανάλυση συχνότητας εμφάνισης υδρολογικού φαινομένου με την *Κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου I (Gumbel)* με την μέθοδο της συχνότητας. Η κατανομή Gumbel παρουσιάζει την κατανομή των ακραίων τιμών οι οποίες αργότερα χρησιμοποιούνται στις υδρολογικές μελέτες για τον υπολογισμό μέγιστων πλημμυρικών ροών, μέγιστων βροχοπτώσεων κ.α., (Badaluta Minda, 2024).

Κατανομή μεγίστων Gumbel από Μυρωνίδης, 2021 και Τσακίρης Γ. et al., 2013

Η κατανομή μεγίστων Gumbel, η οποία αναφέρεται και ως Extreme Value Type I (EVI), είναι μια κατανομή η οποία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον υπολογισμό των ακραίων τιμών. Οι υπολογισμοί γίνονται ως ακολούθως με την χρήση της μεθόδου του παράγοντα συχνότητας, (V. T. Chow, 1951):

Υπολογίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του δείγματος

Μέσος όρος:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{N}$$

Τυπική απόκλιση:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N - 1}}$$

Όπου:

\bar{Q} ο μέσος όρος των ετήσιων μεγίστων των ημερήσιων παροχών του υδατορεύματος για την περίοδο που μελετάται

$\hat{\sigma}$ η τυπική απόκλιση του δείγματος

N το πλήθος των τιμών του δείγματος

Στην συνέχεια μέσω της μεθόδου του παράγοντα συχνότητας υπολογίζεται η παροχή σύμφωνα με την σχέση που ισχύει:

$$x_T = \bar{x}(1 + c_v \cdot k_T)$$

όπου : x_T το μέγεθος του γεγονότος περιόδου επαναφοράς T ,

\bar{x} ο μέσος όρος των τιμών του δείγματος,

c_v ο συντελεστής διακύμανσης που δίνεται από τη σχέση $c_v = \frac{\hat{\sigma}}{\bar{x}}$ και

k_T ο παράγοντας συχνότητας που εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς T και τα χαρακτηριστικά της κατανομής

Ο παράγοντας συχνότητας k_T για μικρά σχετικά δείγματα ($N < 100$), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_T = \frac{-\left[\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) + \bar{y}_N\right]}{\sigma_N}$$

όπου \bar{y}_N και σ_N (μέσος όρος και τυπική απόκλιση της ανηγμένης μεταβλητής y), που δίνονται από τον πίνακα 3.2. και υπολογίζονται με βάση τον αριθμό των παρατηρήσεων του δείγματος:

Πίνακας 3. 2. Τιμές των παραμέτρων y_N και σ_N για διάφορες τιμές του αριθμού παρατηρήσεων N

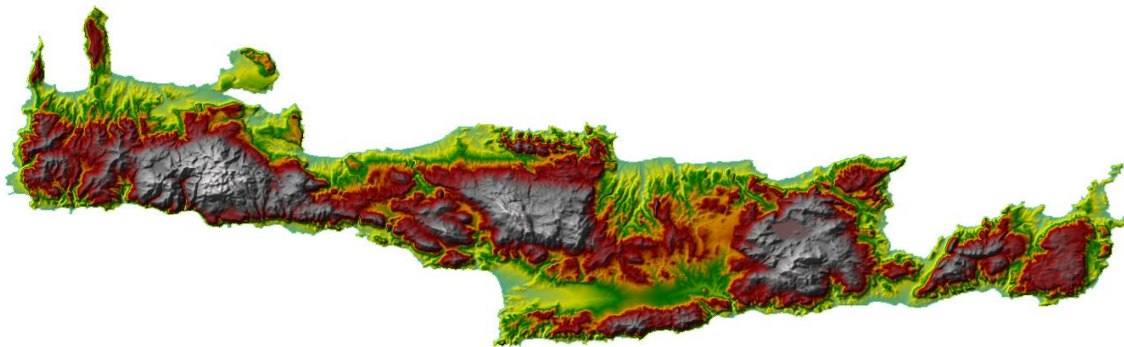
N	\bar{y}_N	σ_N	N	\bar{y}_N	σ_N	N	\bar{y}_N	σ_N
8	0.4843	0.9043	35	0.54034	1.12847	64	0.55330	1.17930
9	0.4902	0.9288	36	0.54100	1.13130	66	0.55380	1.18140
10	0.4952	0.9497	37	0.54180	1.13390	68	0.55430	1.18340
11	0.4996	0.9676	38	0.54240	1.13630	70	0.55477	1.18536
12	0.5035	0.9833	39	0.54300	1.13880	72	0.55520	1.18730
13	0.5070	0.9972	40	0.54362	1.14132	74	0.55570	1.18900
14	0.5100	1.0095	41	0.54420	1.14360	76	0.55610	1.19060
15	0.5128	1.0206	42	0.54480	1.14580	78	0.55650	1.19230
16	0.5157	1.0316	43	0.54530	1.14800	80	0.55688	1.19382
17	0.5181	1.0411	44	0.54580	1.14990	82	0.55720	1.19530
18	0.5202	1.0493	45	0.54630	1.15185	84	0.55760	1.19670
19	0.5220	1.0566	46	0.54680	1.15380	86	0.55800	1.19800
20	0.5236	1.0628	47	0.54730	1.15570	88	0.55830	1.19940
21	0.5252	1.0696	48	0.54770	1.15740	90	0.55860	1.20073
22	0.5268	1.0754	49	0.54810	1.15900	92	0.55890	1.20200
23	0.5283	1.0811	50	0.54854	1.16066	94	0.55920	1.20320
24	0.5296	1.0864	51	0.54890	1.16230	96	0.55950	1.20440
25	0.5309	1.0915	52	0.54930	1.16380	98	0.55980	1.20550
26	0.5320	1.0961	53	0.54970	1.16530	100	0.56002	1.20649
27	0.5332	1.1004	54	0.55010	1.16670	150	0.56461	1.22534
28	0.5343	1.1047	55	0.55040	1.16810	200	0.56715	1.23598
29	0.5353	1.1086	56	0.55080	1.16960	250	0.56878	1.23292
30	0.5362	1.1124	57	0.55110	1.17080	300	0.56993	1.24786
31	0.5371	1.1159	58	0.55150	1.17210	400	0.57144	1.25450
32	0.5380	1.1193	59	0.55180	1.17340	500	0.57240	1.25880
33	0.5388	1.1226	60	0.55208	1.17467	750	0.57377	1.26506
34	0.5396	1.1155	62	0.55270	1.17700	1000	0.57450	1.26851

Κεφάλαιο 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

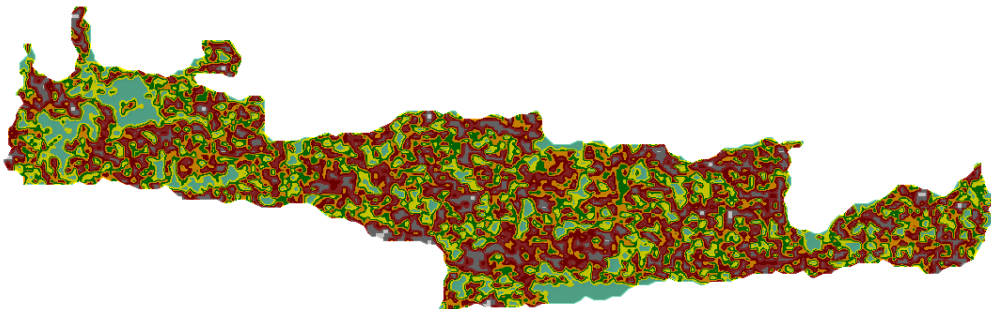
4.1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ SWAT+

4.1.1: Παρουσίαση Δεδομένων

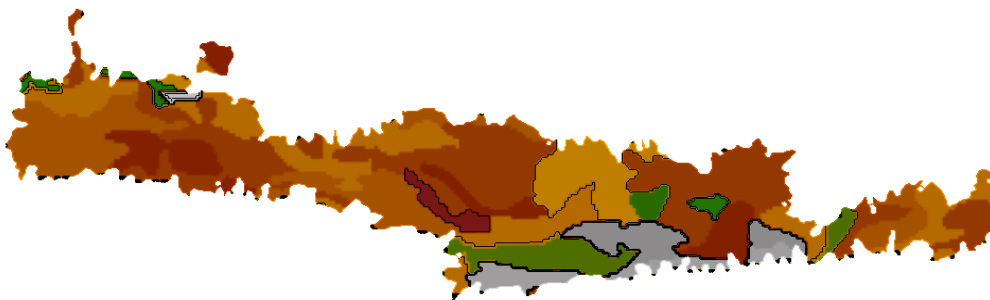
Σε αυτή την ενότητα, περιέχονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου με το μοντέλο SWAT+. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της Κρήτης ανάλυσης 25×25 m σε μορφότυπο αρχείου TIF, (Σχήμα 4.1.). Αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί χάρτες για τις χρήσεις γης, (Σχήμα 4.2.) αλλά και χάρτες εδαφών, (Σχήμα 4.3.).



Σχήμα 4. 1. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Κρήτης, δημιουργία με QGIS



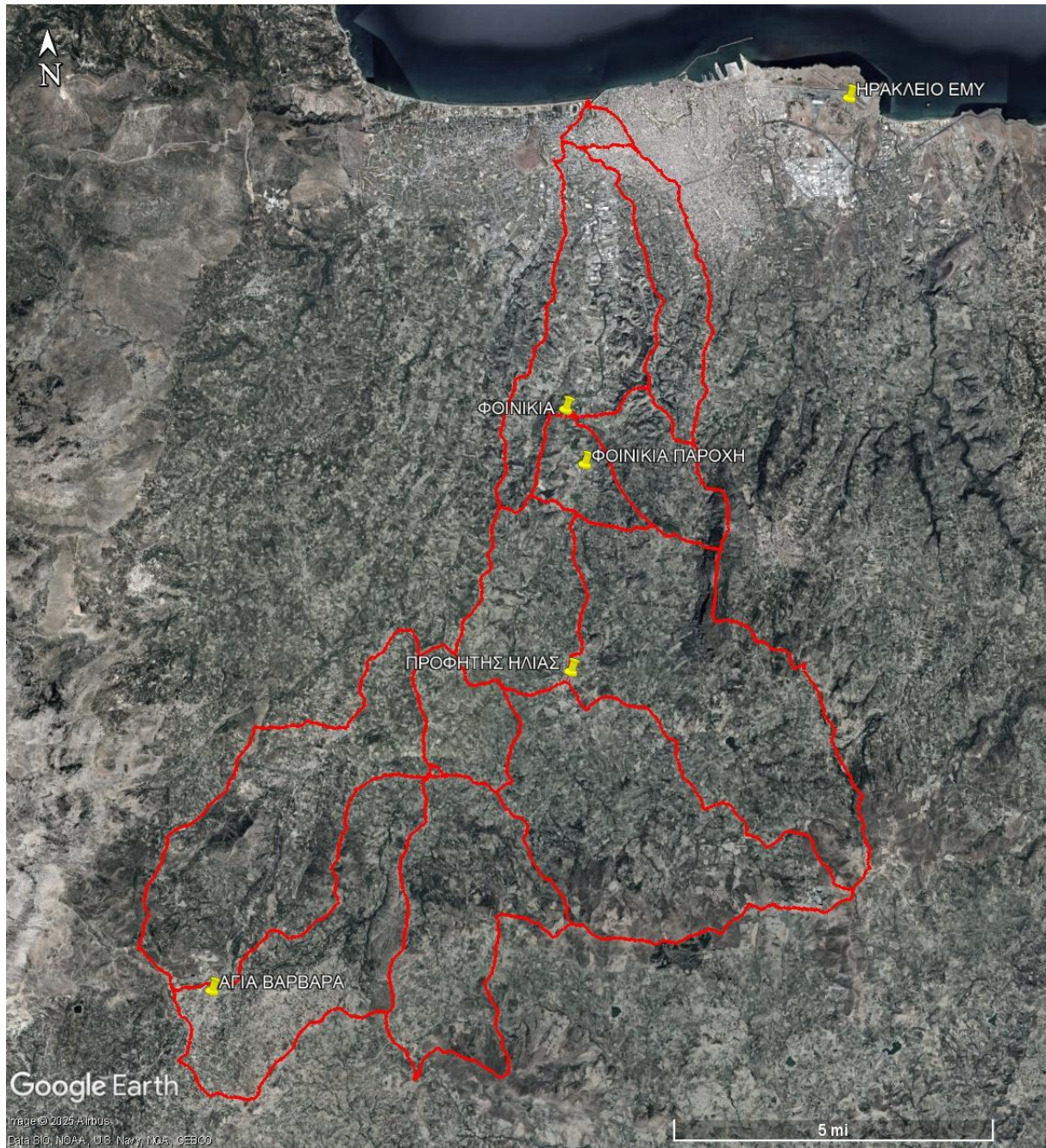
Σχήμα 4. 2. Ψηφιακός Χάρτης Χρήσεων Γης Κρήτης, δημιουργία με QGIS



Σχήμα 4. 3. Ψηφιακός Χάρτης Εδαφών Κρήτης, δημιουργία με QGIS

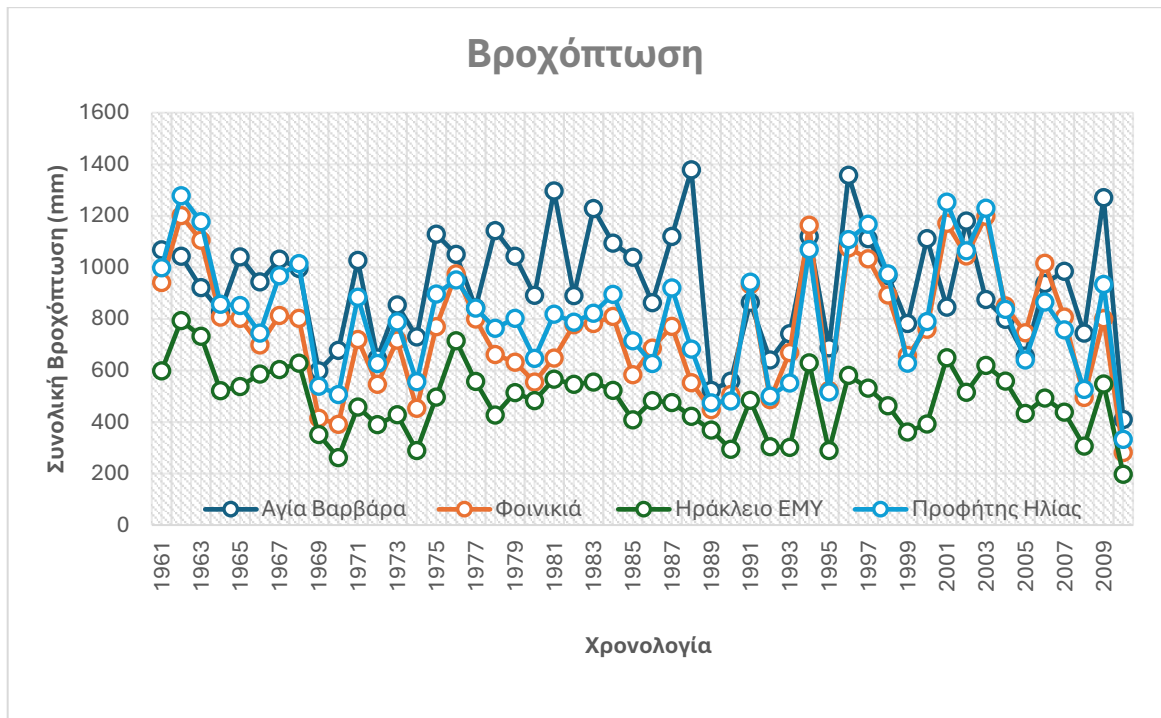
Οι ψηφιακοί χάρτες χρήσεων γης και εδαφών συνοδεούντουσαν από συμπληρωματικά αρχεία όπου παρείχαν τις πληροφορίες σχετικά με τι τύπους εδαφών και χρήσεων γης παρουσιάζονταν στους χάρτες.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο SWAT+ ήταν κυρίως οι ημερήσιες βροχοπτώσεις που προέρχονται από τέσσερις διαφορετικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής που καλύπτουν την λεκάνη του Γιόφυρου, (Σχήμα 4.4.). Πρόκειται για τον σταθμό της Αγίας Βαρβάρας, του Προφήτη Ηλία, της Φοινικιάς και του Ηρακλείου ΕΜΥ. Όσον αφορά την θερμοκρασία, μόνο οι σταθμοί της Φοινικιάς και του Ηρακλείου ΕΜΥ παρείχαν καταγεγραμμένες μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες τιμές. Τα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν αναφορικά με την παροχή ύδατος έχουν καταγραφεί από τον σταθμό που βρίσκεται στην Φοινικιά.



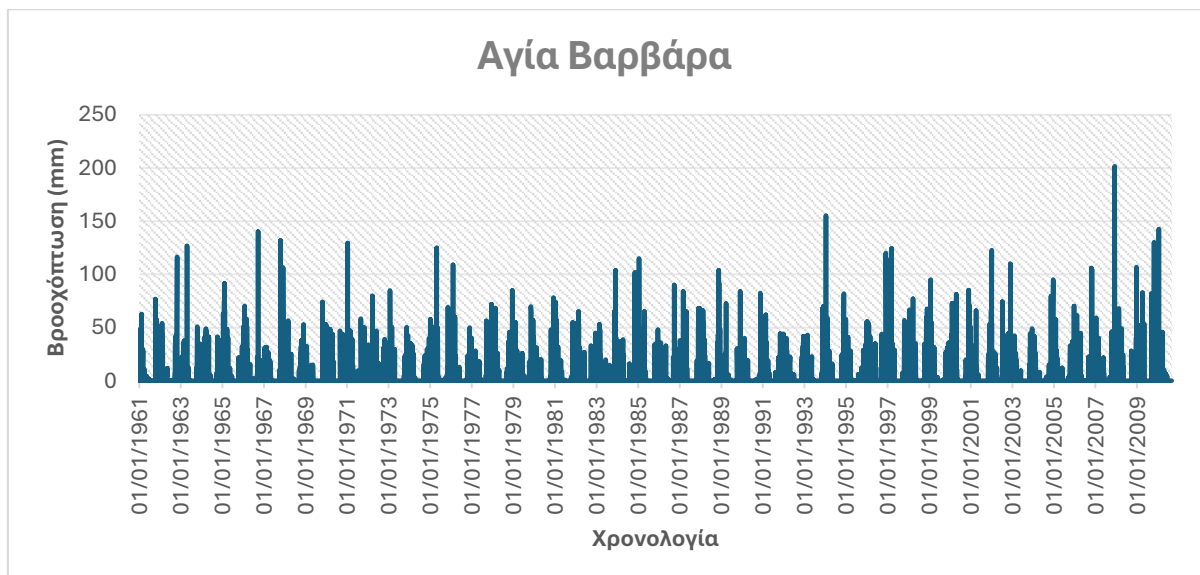
Σχήμα 4. 4. Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και σταθμού μέτρησης παροχής σε δορυφορική απεικόνιση (Πηγή: Google Earth)

Εν συνεχεία παρουσιάζονται γραφήματα των δεδομένων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που είναι διαθέσιμα για την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Αρχικά παρουσιάζεται η συνολική βροχόπτωση ανά έτος, σε κάθε έναν από τους τέσσερις σταθμούς, (Γράφημα 4.1.).



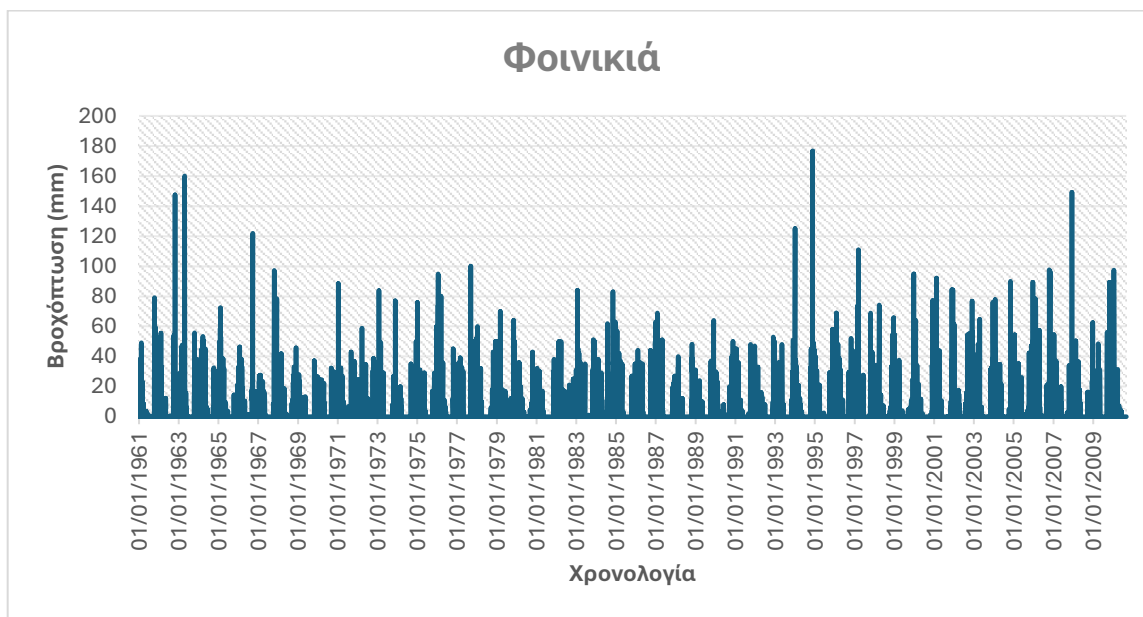
Γράφημα 4. 1. Ετήσιες κατακρημνίσεις όπως καταγράφηκαν από τους σταθμούς

Η ημερήσια βροχόπτωση από το 1961 έως το 2009 που καταγράφηκε στον σταθμό της Αγίας Βαρβάρας, (Γράφημα 4.2.).



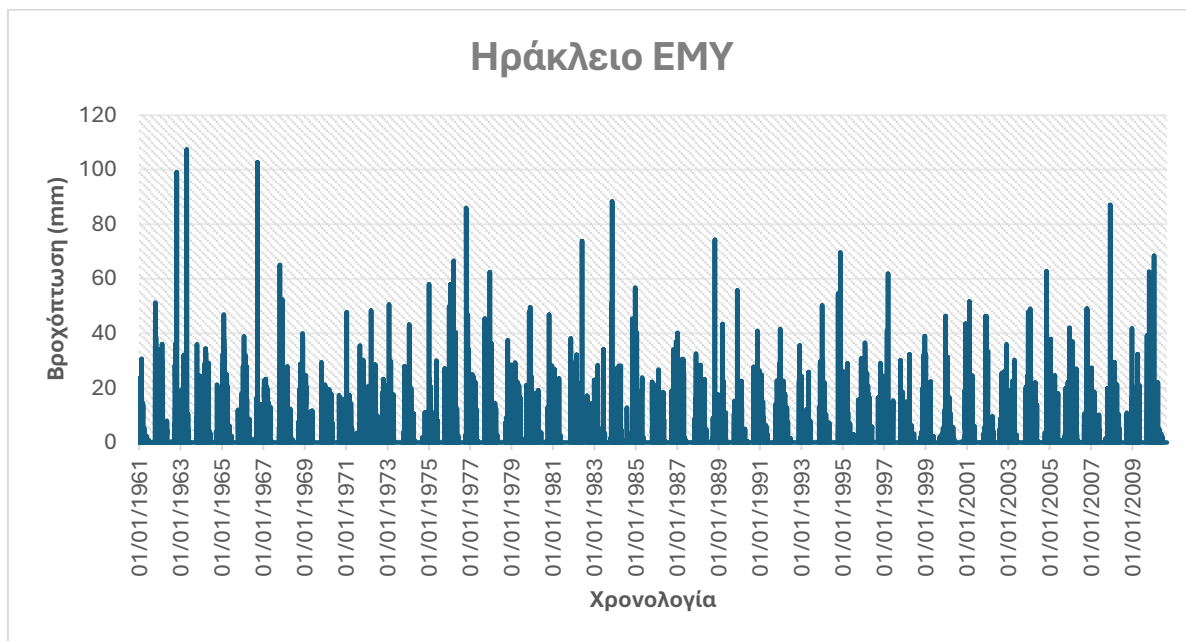
Γράφημα 4. 2. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Αγίας Βαρβάρας

Η ημερήσια βροχόπτωση από το 1961 έως το 2009 που καταγράφηκε στον σταθμό της Φοινικιάς, (Γράφημα 4.3.).



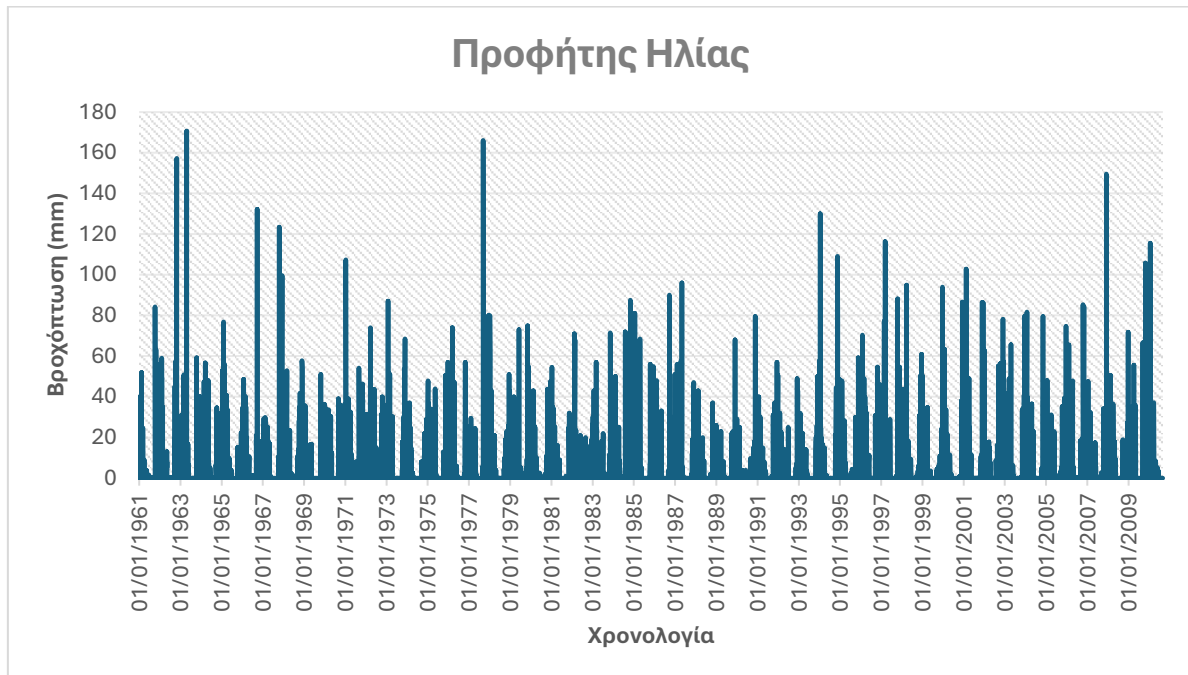
Γράφημα 4. 3. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Φοινικιάς

Η ημερήσια βροχόπτωση από το 1961 έως το 2009 που καταγράφηκε στον σταθμό του Ηρακλείου, (Γράφημα 4.4.).



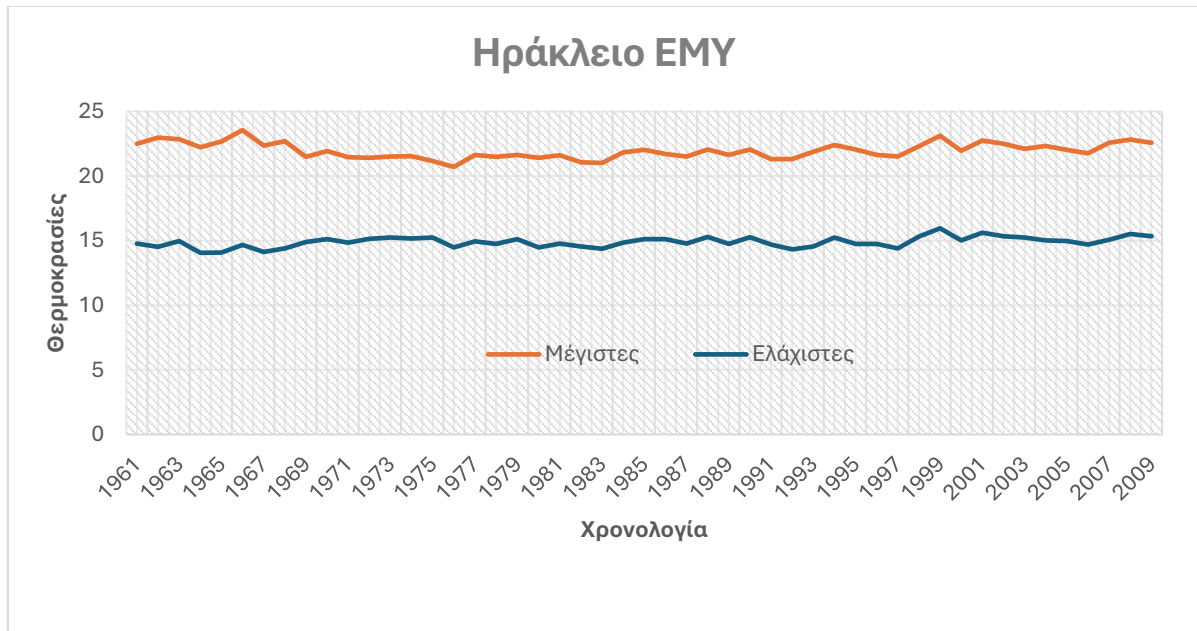
Γράφημα 4. 4. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου ΕΜΥ

Η ημερήσια βροχόπτωση από το 1961 έως το 2009 που καταγράφηκε στον σταθμό του Προφήτη Ηλία, (Γράφημα 4.5.).



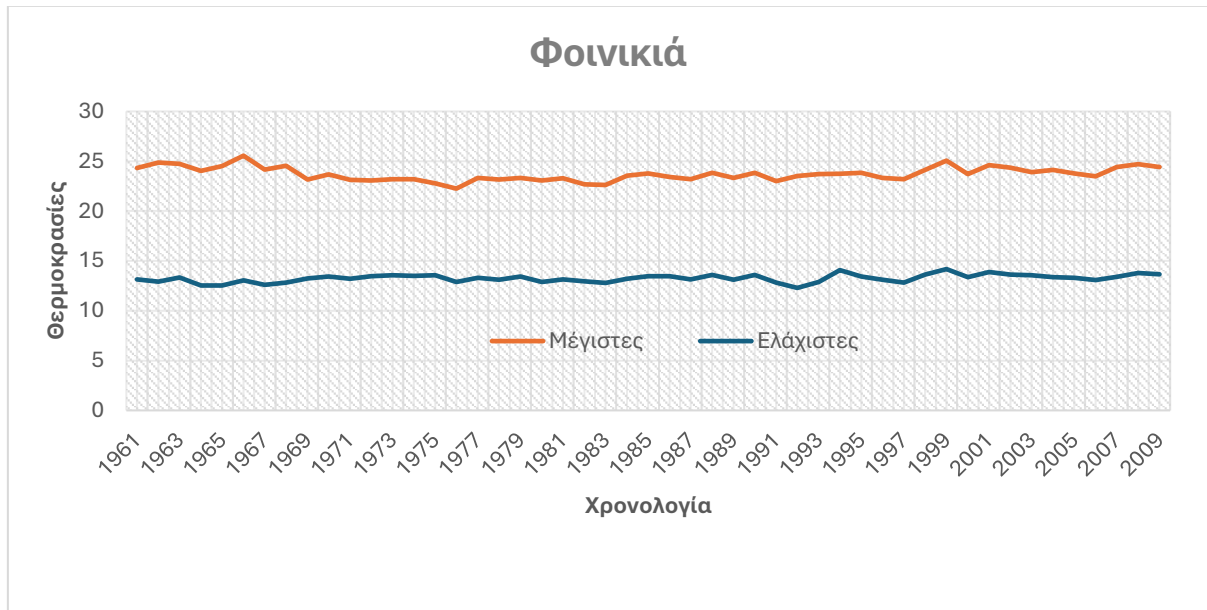
Γράφημα 4. 5. Ημερήσιες κατακρημνίσεις μετεωρολογικού σταθμού Προφήτη Ηλία

Η μέση ετήσια θερμοκρασία που καταγράφηκε στον σταθμό του Ηρακλείου, (Γράφημα 4.6.).



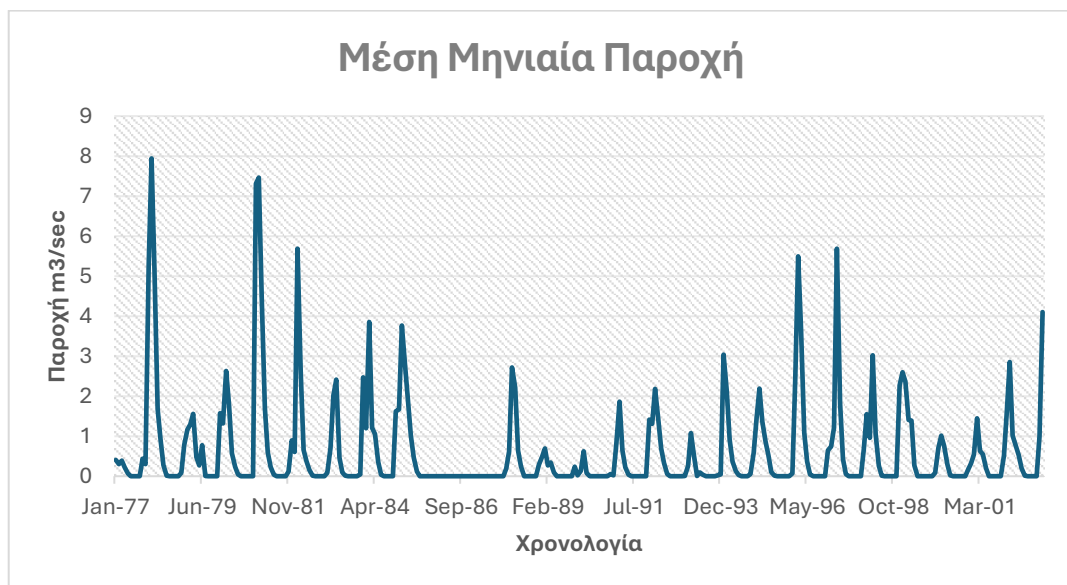
Γράφημα 4. 6. Μέση ετήσια θερμοκρασία στον σταθμό Ηράκλειο ΕΜΥ

Η μέση ετήσια θερμοκρασία που καταγράφηκε στον σταθμό της Φοινικιάς, (Γράφημα 4.7.).



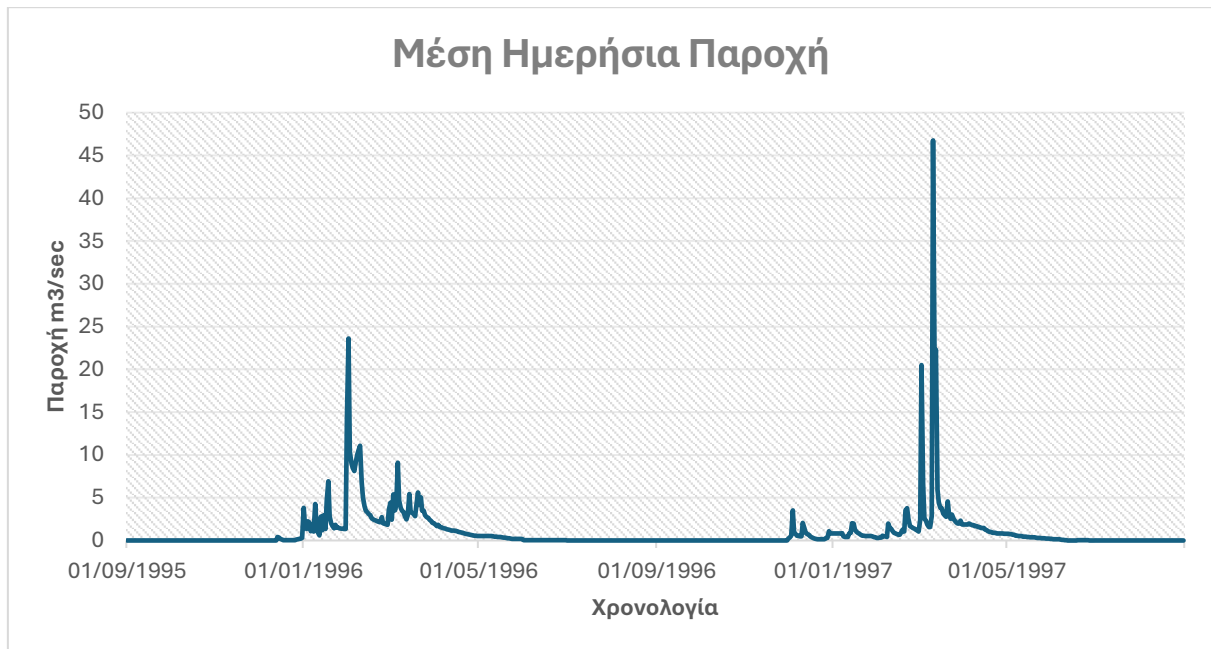
Γράφημα 4. 7. Μέση ετήσια θερμοκρασία στον σταθμό Φοινικιάς

Έπειτα, παρουσιάζονται τα γραφήματα των δεδομένων του πεδίου που είναι διαθέσιμα για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στο γράφημα 4.8. παρουσιάζεται η μέση μηνιαία παροχή του ποταμού Γιόφυρου στην περιοχή της Φοινικιάς για την περίοδο 1975-2002. Όπως φαίνεται, τους θερινούς μήνες η παροχή παρατηρούνται χαμηλές παροχές ύδατος ενώ αντίθετα τους χειμερινούς αυτές αυξάνονται. Την χρονιά 1986 δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες τιμές, πιθανόν λόγω δυσλειτουργίας των μηχανημάτων μέτρησης.



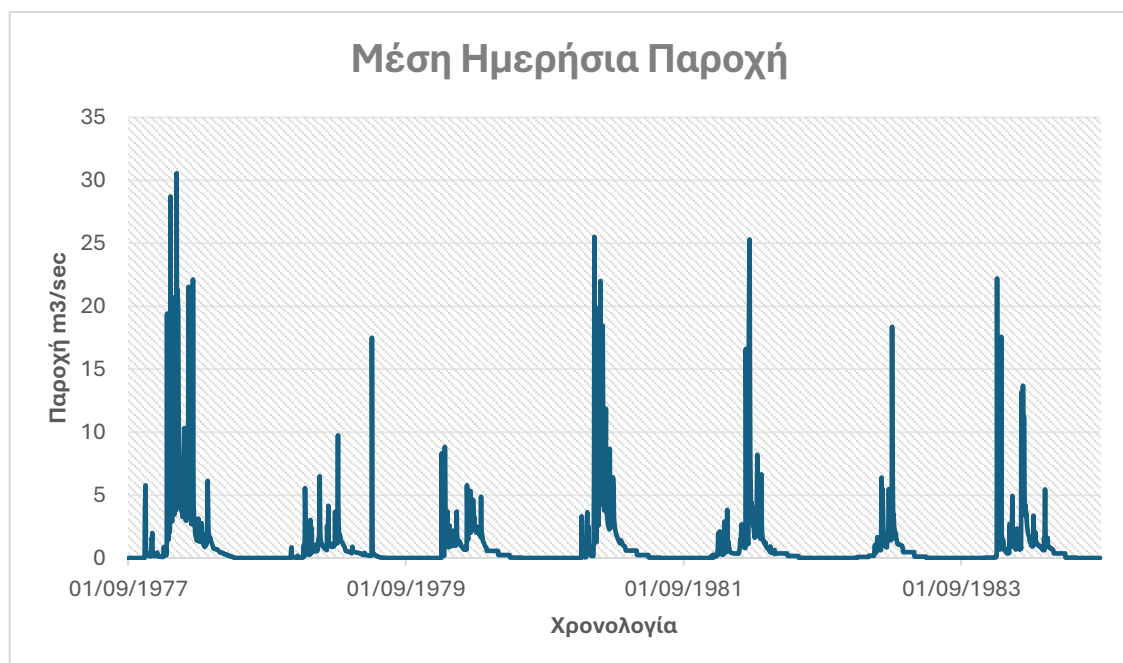
Γράφημα 4. 8. Μέση μηνιαία παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από το 1977 έως το 2002

Στο γράφημα 4.9., παρουσιάζεται η μέση ημερήσια παροχή πεδίου για την περίοδο 01/09/1995-31/08/1997. Η παροχή τους θερινούς μήνες είναι σχεδόν μηδενική ενώ τους χειμερινούς αυξάνεται σημαντικά με την μέγιστη να εμφανίζεται ίση με $46.7 \text{ m}^3/\text{sec}$.



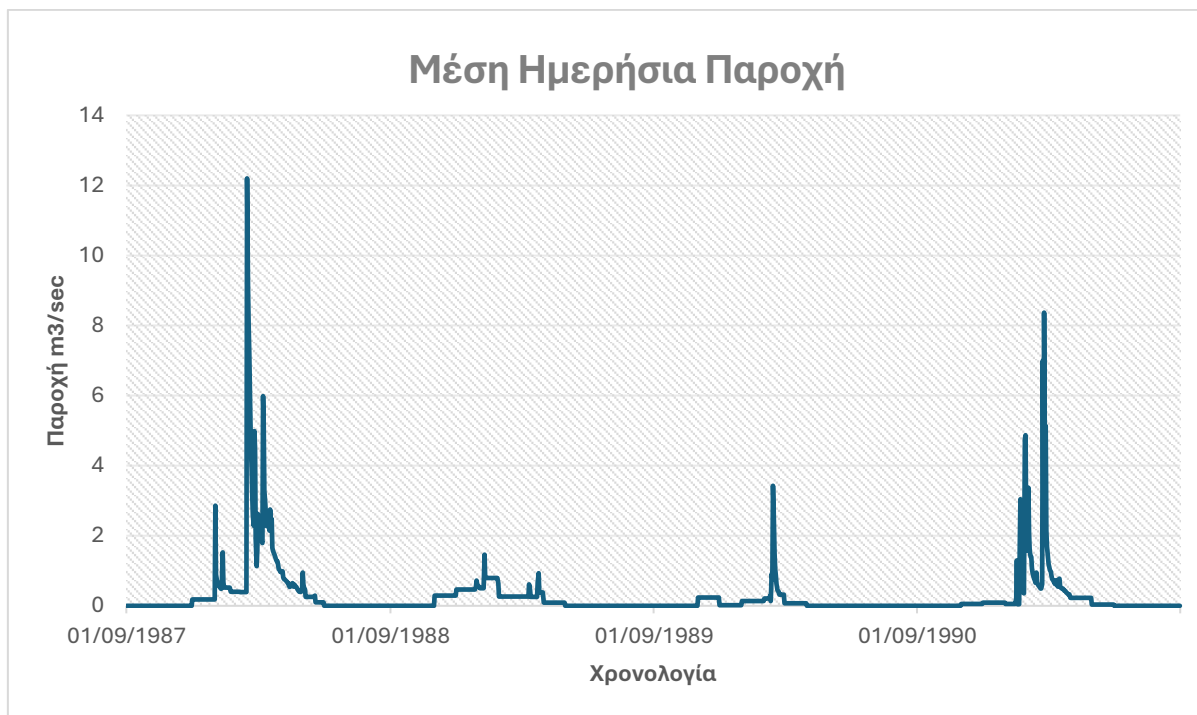
Γράφημα 4. 9. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1995 έως 31/08/1997

Αντίστοιχα παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.10. οι μετρήσεις για την περίοδο 01/09/1977 - 31/08/1983 όπου συνεχίζεται το μοτίβο των χαμηλών τιμών το καλοκαίρι και των υψηλών τον χειμώνα.



Γράφημα 4. 10. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1977 έως 31/08/1983

Τέλος, στο γράφημα 4.11. παρουσιάζεται και η τελευταία περίοδος για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα. Πρόκειται για την χρονική περίοδο 01/09/1987-31/08/1991. Στην συγκεκριμένη περίοδο παρατηρείται ότι δυο συνεχόμενες χρονιές (1988,1989) η μέση ημερήσια παροχή δεν ξεπέρασε τα $4 \text{ m}^3/\text{sec}$ στην διάρκεια των χειμερινών μηνών.



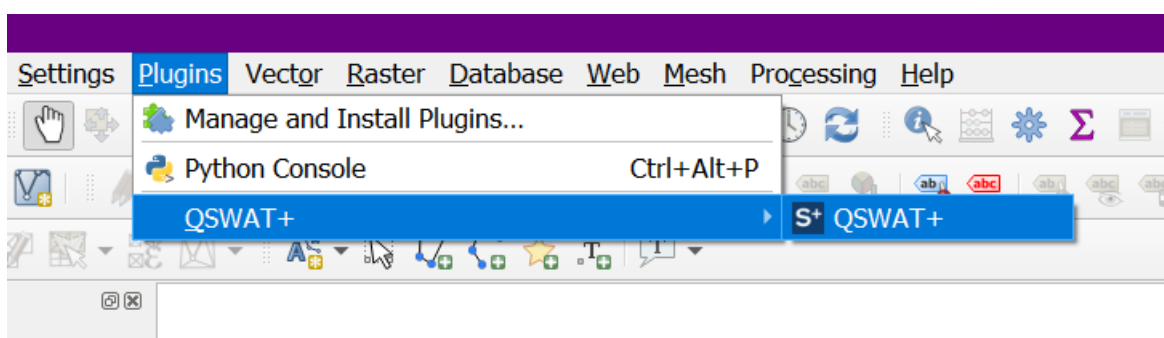
Γράφημα 4. 11. Μέση ημερήσια παροχή στον σταθμό Φοινικιάς από 01/09/1987 έως 31/08/1991

4.1.2: Εισαγωγή Δεδομένων στο SWAT+

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα εφαρμογής του μοντέλου SWAT+ με την βοήθεια του πρόσθετου βοηθήματος QSWAT+ του προγράμματος QGIS. Στην συνέχεια το στήσιμο του SWAT+ θα εισαχθεί στο SWAT+ Toolbox για την βαθμονόμηση της μοντελοποίησης. Η έκδοση του SWAT+ ήταν το SWAT+ 2.3.3, του βοηθήματος QSWAT+ ήταν το QSWAT+ έκδοσης 2.4.7, του QGIS ήταν η έκδοση 3.22.16 και του SWAT+ Toolbox ήταν της έκδοσης 1.0.5. Τα βασικά εργαλεία του QSWAT+ περιλάμβαναν τις εξής επιλογές:

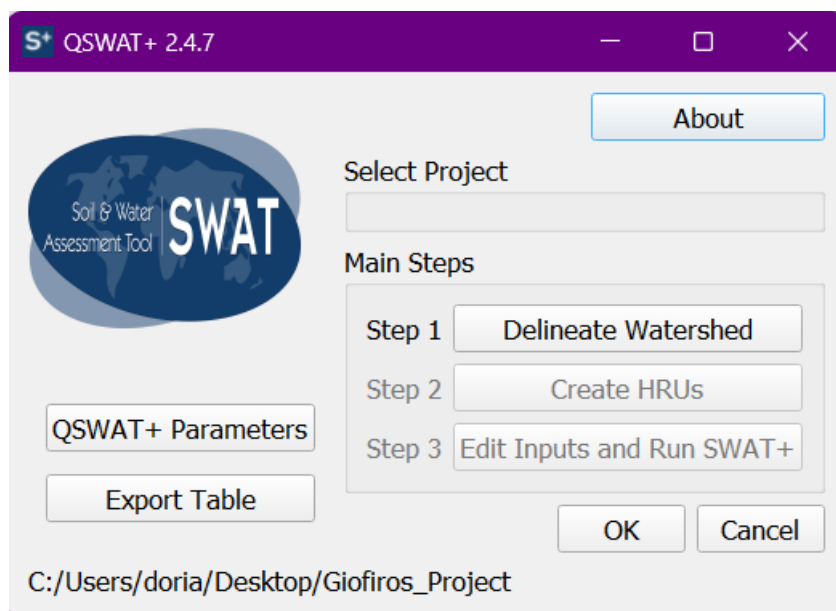
- Delineate Watershed
- Create HRUs
- Edit Inputs and Run SWAT+

Αρχικά επιλέγεται το πρόσθετο QSWAT+ από τις επιλογές των Plugins του QGIS, (Σχήμα 4.5.).



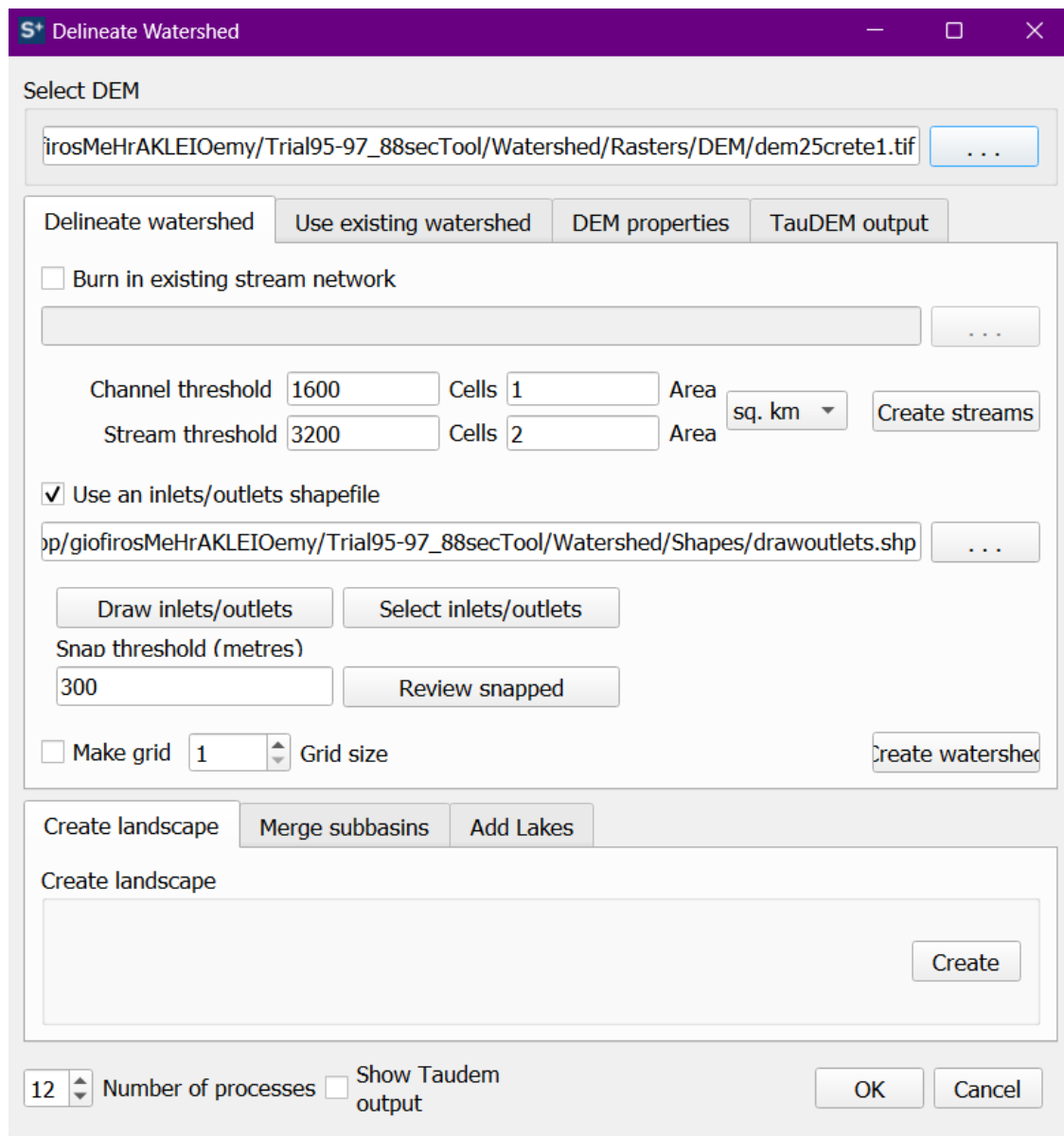
Σχήμα 4. 5. Καρτέλα Plugins στο QGIS

Στην συνέχεια εμφανίζεται το μενού επιλογών του QSWAT+, (Σχήμα 4.6.).



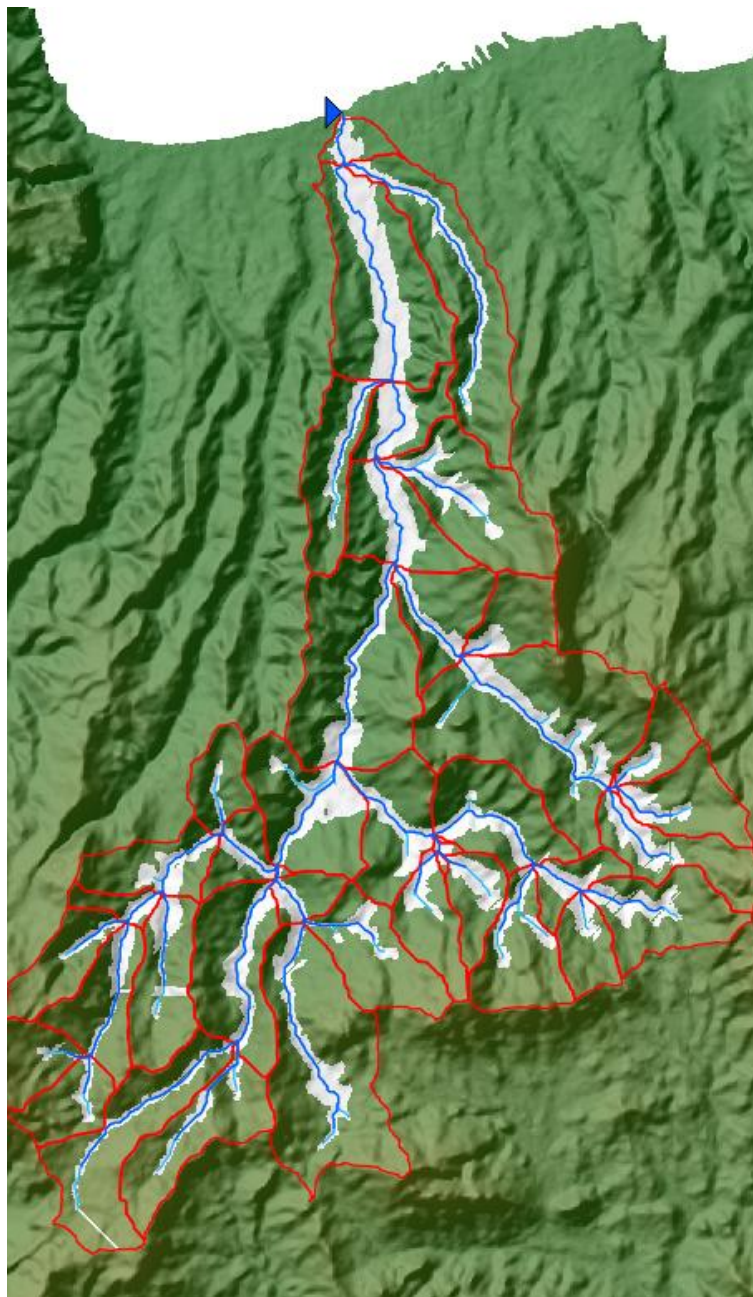
Σχήμα 4. 6. Μενού QSWAT+

Επιλέγεται το πρώτο βήμα, όπου γίνεται εισαγωγή του διαθέσιμου ψηφιακού χάρτη όλης της Κρήτης. Έπειτα, εισάγονται οι τιμές κατωφλίου ορισμού των καναλιών και των ποταμών με σκοπό να δημιουργηθεί η κύρια κοίτη της ροής. Η συγκεκριμένη λειτουργία σχεδιάζει όλους του ποταμούς που μπορεί να υπάρχουν στο DEM, και θα πρέπει να υποδηλωθεί το σημείο εκροής του ποταμού ενδιαφέροντος ώστε να αποθηκευτεί στο σχέδιο μόνον η λεκάνη απορροής του ποταμού, (Σχήμα 4.7.).



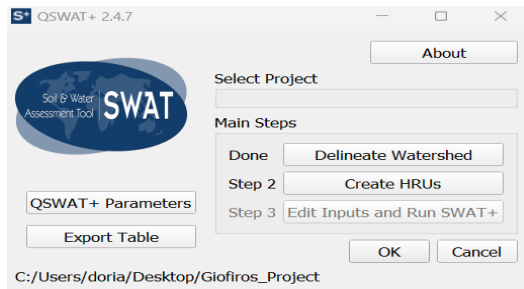
Σχήμα 4. 7. Παράθυρο του μενού 'Delineate Watershed'

Αφού πραγματοποιηθούν όλα τα παραπάνω, δημιουργείται η λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου μαζί με τις υπολεκάνες, όπως τις δημιουργεί το μοντέλο, (Σχήμα 4.8.).

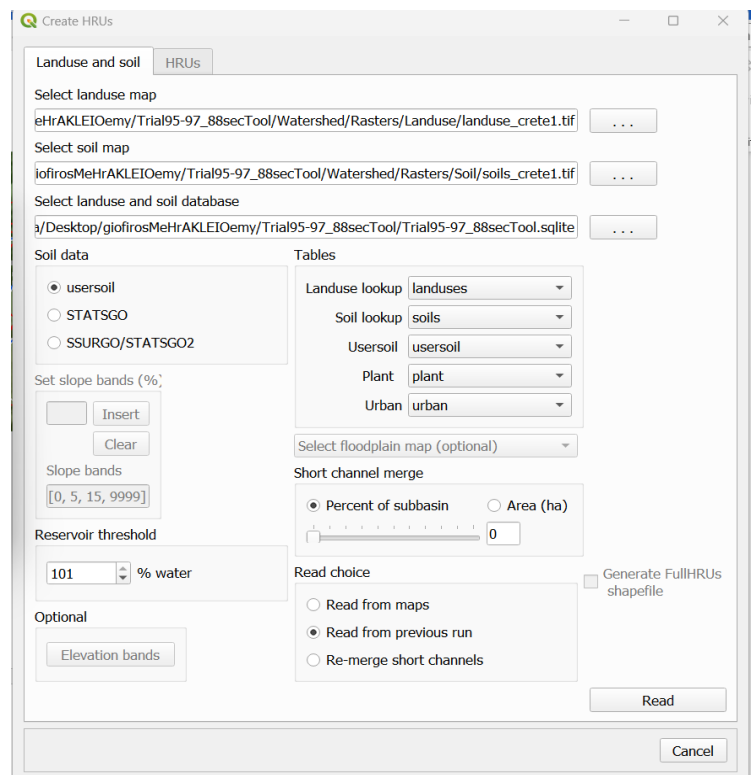


Σχήμα 4. 8. Υπολεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής Γιόφυρου

Στην συνέχεια επιλέγεται το δεύτερο βήμα, Create HRUs για τον διαχωρισμό της λεκάνης σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης, (Σχήμα 4.9.). Εισάγονται ψηφιακοί χάρτες χρήσεων γης, ψηφιακοί χάρτες εδαφών και τα αρχεία που έχουν τις πληροφορίες των χαρτών σε μορφή CSV. Εισάγονται οι κλίσεις με κατώτερη τιμή το 0 και ενδιάμεσες 5,15 και ανώτερη 9999. Στην συνέχεια, φιλτράρεται η δημιουργία των HRUs με τιμές κατωφλίου: 15% για χρήσεις γης, 15% για εδάφη και 30% για την κλίση, (Σχήμα 4.10.).

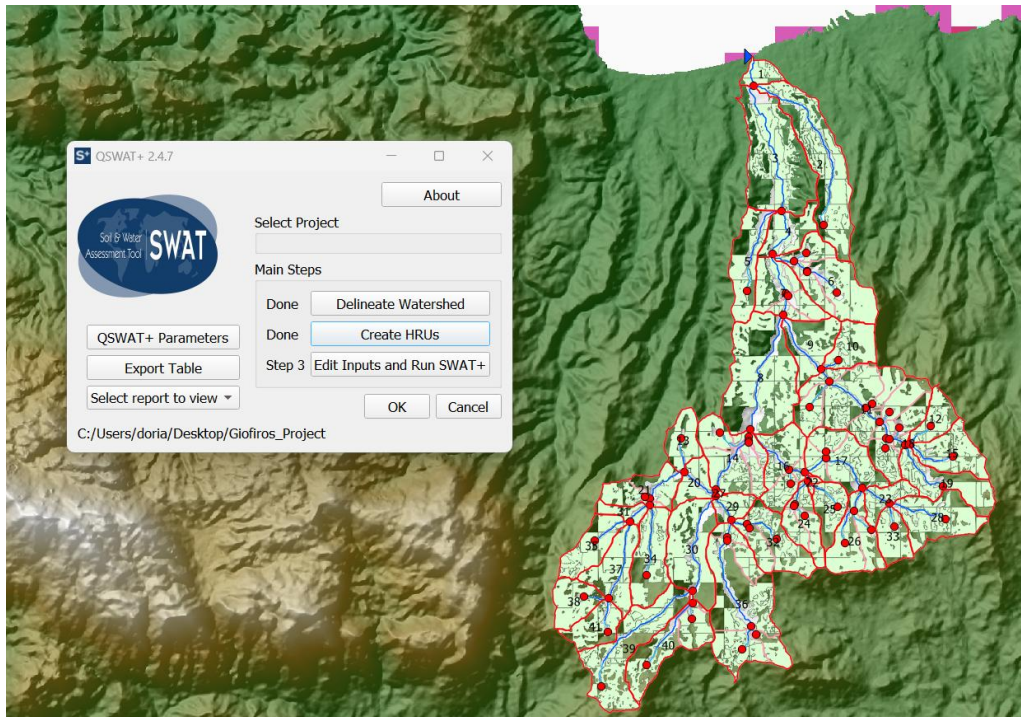


Σχήμα 4. 9. Μενού QSWAT+



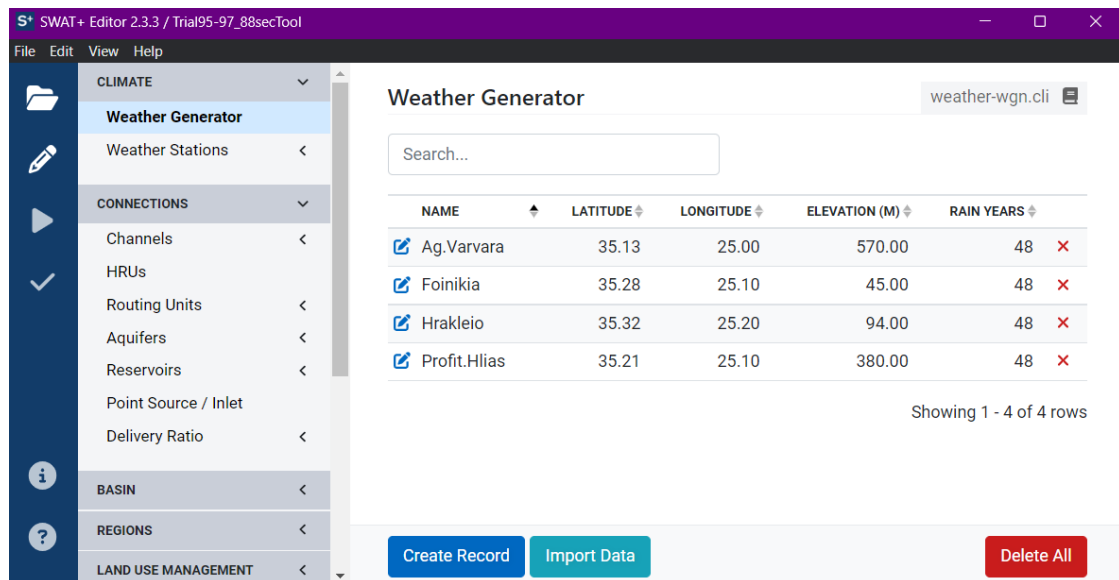
Σχήμα 4. 10. Παράθυρο του μενού 'Create HRUs'

Τα HRUs που δημιουργήθηκαν ήταν 266. Στην συνέχεια, στο μενού του QSWAT+ εμφανίζεται η τρίτη επιλογή, δηλαδή το Edit Inputs and Run SWAT+, όπου γίνεται δυνατή η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων στο μοντέλο, (Σχήμα 4.11.).



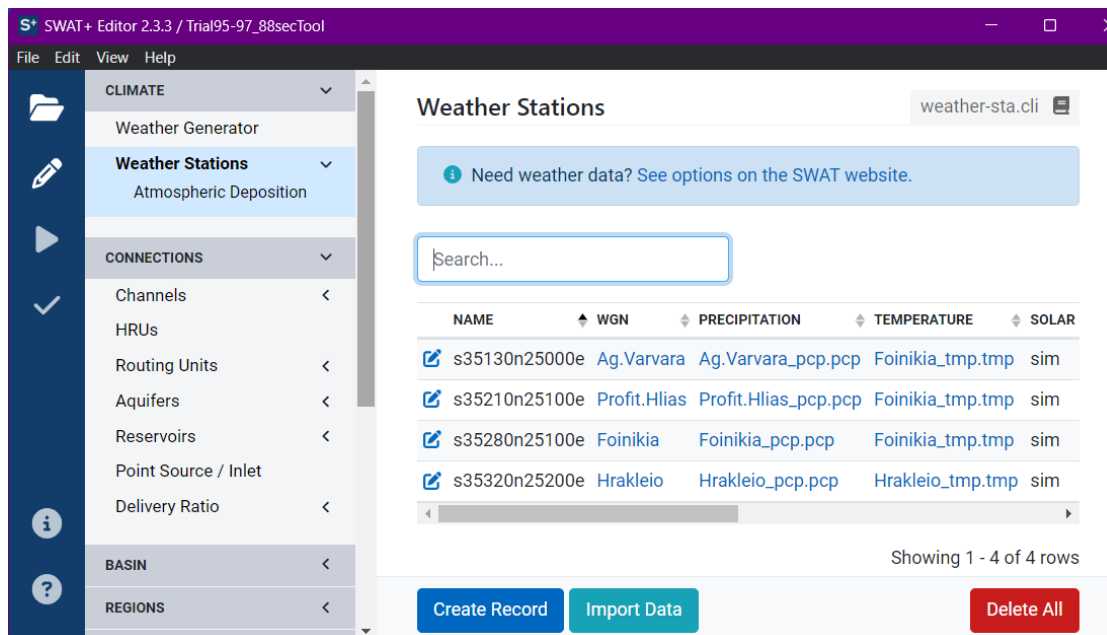
Σχήμα 4. 11. Μενού QSWAT+ και HRUs λεκάνης

Εισάγονται οι τέσσερις διαθέσιμοι σταθμοί, (Σχήμα 4.12.) μαζί με στατιστικά στοιχεία διάφορων παραμέτρων όπως η μέγιστες θερμοκρασίες, οι ελάχιστες θερμοκρασίες, μέση βροχόπτωση κ.α.



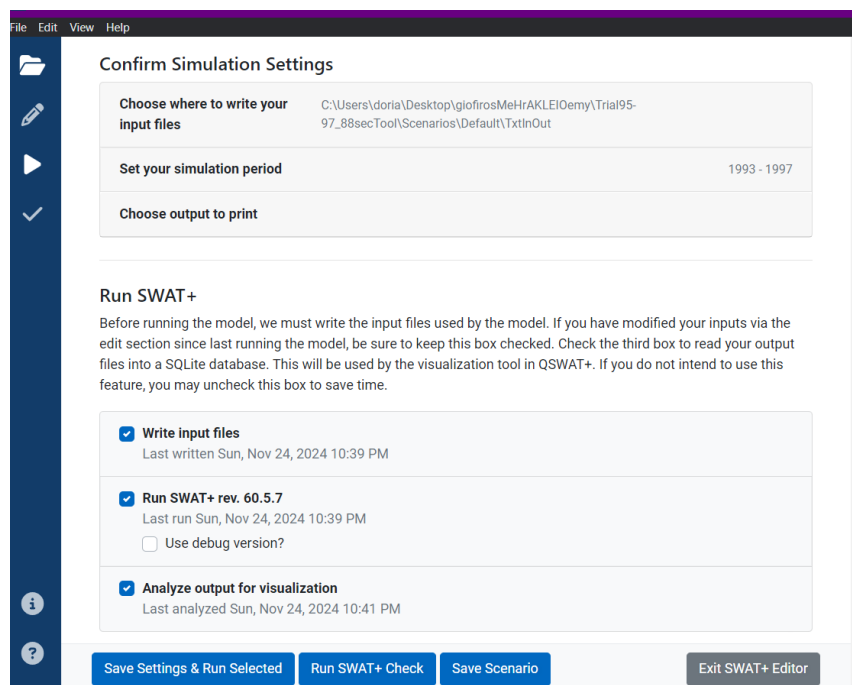
Σχήμα 4. 12. Μετεωρολογικοί σταθμοί στο SWAT+ Editor

Στην επιλογή Weather Stations εισάγονται τα αρχεία όπου παρέχουν τις καταγεγραμμένες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για τους τέσσερις σταθμούς, (Σχήμα 4.13.).



Σχήμα 4. 13. Εισαγωγή μετρούμενων τιμών σταθμών

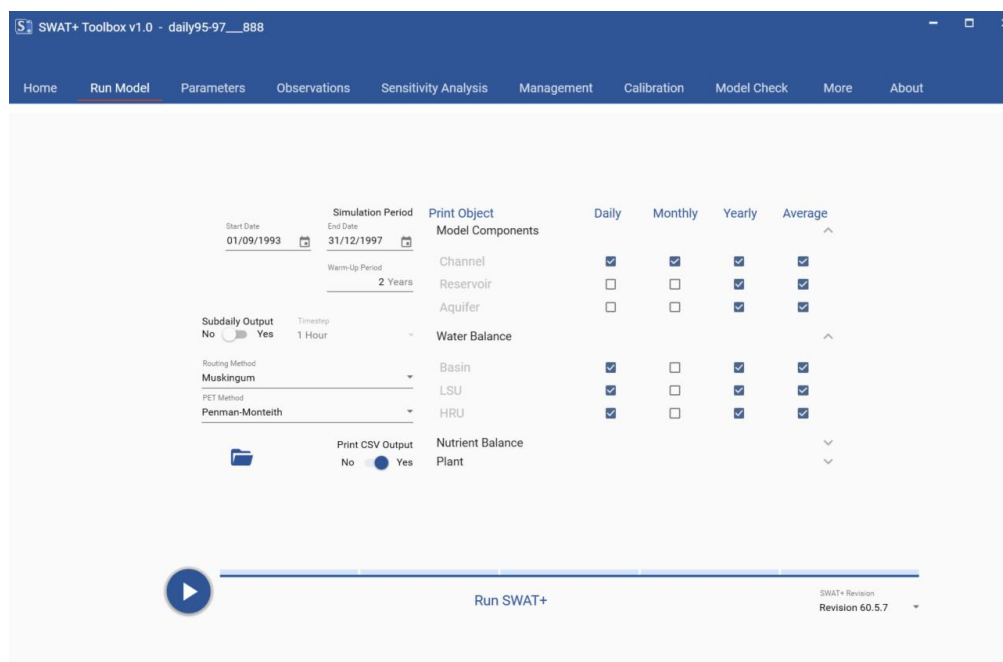
Τέλος, στην καρτέλα Run SWAT+ επιλέγεται η χρονική περίοδος της πρώτης προσομοίωσης που πραγματοποιηθεί. Η περίοδος είναι από 01/09/1993 έως 31/12/1997 με warm up 2 χρόνια, (Σχήμα 4.14.).



Σχήμα 4. 14. Run SWAT+

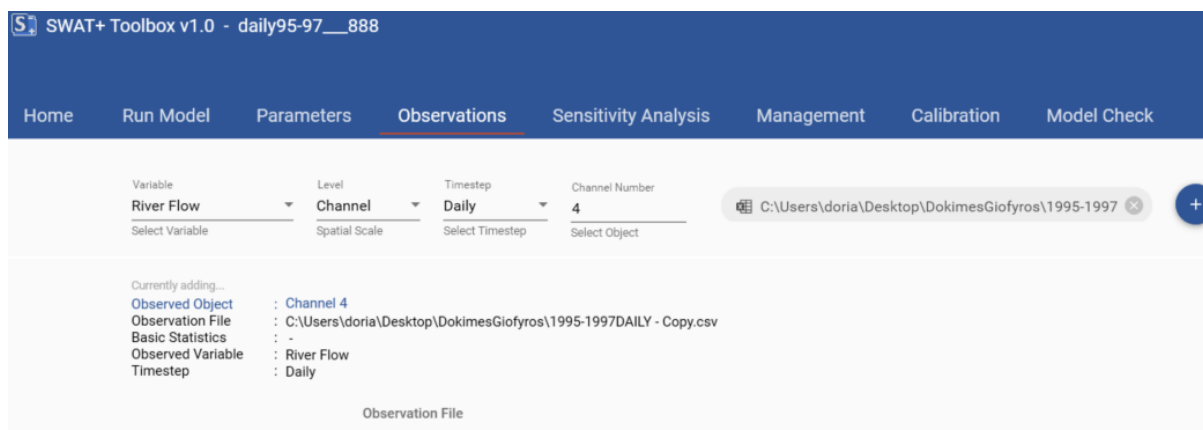
4.1.3: Βαθμονόμηση και Επαλήθευση Μοντέλου στο SWAT+ Toolbox

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται μέσω της διαρκούς μεταβολής των τιμών των διάφορων παραμέτρων που υπάρχουν από την προεπιλογή στο μοντέλο. Στόχος αποτελεί η ικανοποιητική σύγκλιση των τιμών που προβλέπει το μοντέλο με τις πραγματικές τιμές του πεδίου. Εισάγεται η χρονική περίοδος που θα γίνει η βαθμονόμηση η οποία είναι από 01/09/1993 έως 31/08/1997 με warm up 2 χρόνια, (Σχήμα 4.15.).



Σχήμα 4. 15. Περιβάλλον SWAT+ Toolbox

Στην συγκεκριμένη περίπτωση συγκρίνονται οι τιμές παροχής ποταμού όπου οι μετρήσεις πεδίου έγιναν στην περιοχή της Φοινικιάς, (Σχήμα 4.16.). Η περιοχή αυτή, στο μοντέλο μεταφράζεται ως η εκβολή της υπολεκάνης 4 (Subbasin 4). Εισάγεται το αρχείο με τις καταγεγραμμένες τιμές πεδίου.



Σχήμα 4. 16. Εισαγωγή τιμών πεδίου

Η βαθμονόμηση στην παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δυο στάδια: Την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων και την αυτόματη βαθμονόμηση.

Στην ανάλυση ευαισθησίας προστίθενται όσες παράμετροι επιθυμεί ο χρήστης και μέσω στατιστικών μεθόδων αναλύονται και κατηγοριοποιούνται σε κλίμακα ευαισθησίας. Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η Sobol, οι επαναλήψεις ήταν 100 και οι τελικές προσομοιώσεις της ανάλυσης ανήλθαν στις 2,200. Η χρονική περίοδος στην οποία έγινε η ανάλυση ευαισθησίας ήταν η περίοδος 01/09/1993-31/08/1997 με warm up 2 χρόνια.

Στη συγκεκριμένη εργασία αναλύθηκαν 10 διαφορετικές παράμετροι από αρκετές ομάδες παραμέτρων που αφορούν παραμέτρους του εδάφους, των υπόγειων υδροφόρων και της ευρύτερης ροής του νερού, κυρίως της επιφανειακής απορροής. Το SWAT+ Toolbox, δίνει την ευχέρεια στον χρήστη, κατά τη διάρκεια της επιλογής των παραμέτρων, να ορίσει τον τρόπο με τον οποίο θα μεταβάλλονται οι τιμές τους στην ανάλυση ευαισθησίας αλλά και αυτόματης βαθμονόμησης. Οι επιλογές που διατίθενται είναι οι εξής: Ποσοστιαία μεταβολή (percent change), αντικατάσταση (replace change) και σχετική μεταβολή (relative change). Σε κάθε μια από τις μεταβολές θα πρέπει να επιλεγθούν και τα όρια στα οποία θα μπορεί να γίνεται η μεταβολή των τιμών. Έτσι, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, οι τρόποι αλλαγής των τιμών τους και τα όρια που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.17.

Name	Change Type	Minimum	Maximum
cn2	Percent	-20	40
cn3_swf	Percent	-30	30
esco	Replace	0	1
slope	Percent	-20	20
perco	Percent	-20	20
flo_min	Percent	-20	20
revap_co	Percent	-20	20
alpha	Replace	0	1
awc	Relative	-0.5	0.5
k	Replace	-0.5	0.5

Σχήμα 4. 17. Παράμετροι προς ανάλυση όπως παρουσιάζονται στο Toolbox

Πίνακας 4. 1. Αναλυτική παρουσίαση παραμέτρων προς επεξεργασία

A/A	Ομάδα Παραμέτρων	Παράμετρος	Τύπος Μεταβολής Τιμών	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδα Μέτρησης	Τυπικό Εύρος στο SWAT+
1	Hru	cn2	Percent	-20	40	-	35-95
2	Hru	cn3_swf	Percent	-30	30	-	0-1
3	Hru	slope	Percent	-20	20	m/m	0.0001-0.9
4	Hru	esco	Replace	0	1	-	0-1
5	Hru	perco	Percent	-20	20	fraction	0-1
6	Aqu	flo_min	Percent	-20	20	m	0-50
7	Aqu	revap_co	Percent	-20	20	-	0.02-02
8	Aqu	alpha	Replace	0	1	days	0-1
9	Sol	awc	Relative	-0.5	0.5	mm_H2O/mm	0.01-1
10	Sol	k	Relative	-0.5	0.5	mm/hr	0.0001-2000

Αξίζει να σημειωθεί στον Πίνακα 4.1., ότι οι παράμετροι για τις οποίες έχει επιλεχθεί η ποσοστιαία μεταβολή των τιμών τους, δεν μπορούν να λάβουν την ίδια τιμή για όλη την έκταση της λεκάνης. Ενδεικτικά, το Curve Number δεν μπορεί να παρουσιάζει την ίδια τιμή σε όλη την λεκάνη, έτσι με την χρήση της ποσοστιαίας μεταβολής, υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή και οι ήδη προκαθορισμένες τιμές μεταβάλλονται κατά ένα ποσοστό, δίχως να έχουν την ίδια τιμή.

Πίνακας 4. 2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας

A/A	Ομάδα Παραμέτρων	Παράμετρος	Τύπος Μεταβολής Τιμών	Μονάδα Μέτρησης	Ευαισθησία
1	Hru	cn2	Percent	-	0.395710917971996
2	Hru	cn3_swf	Percent	-	0.354205418219056
3	Hru	awc	Relative	mm_H2O/mm	0.0664010404538815
4	Hru	esco	Replace	-	0.0313000770220323
5	Hru	alpha	Replace	days	0.0180988581739751
6	Aqu	slope	Percent	m/m	-0.000146097410596467
7	Aqu	revap_co	Percent	-	-0.000152390466580976
8	Aqu	flo_min	Percent	m	-0.000164456091836951
9	Sol	k	Relative	mm/hr	-0.000792527058168225
10	Sol	perco	Percent	fraction	-0.0158261471192948

Όπως διαφαίνεται στον Πίνακα 4.2., οι πέντε πρώτες παράμετροι έχουν θετικό πρόσημο όσον αφορά την ευαισθησία, ενώ οι πέντε τελευταίες έχουν αρνητικό. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι παράμετροι με αρνητική τιμή, εφόσον προστεθούν στην βαθμονόμηση, δεν θα επιφέρουν σχεδόν καμία αλλαγή και για αυτόν τον λόγο απορρίπτονται και η βαθμονόμηση προχωρά με τις πέντε παραμέτρους που έχουν θετικό πρόσημο.

Συνέχεια στην αυτόματη βαθμονόμηση (Automatic Calibration) όπου το πρόγραμμα μεταβάλλει κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας, με στόχο την καλύτερη δυνατή σύγκλιση μεταξύ τιμών παροχής πεδίου και μοντέλου. Το πρόγραμμα, κατά την περίοδο της μελέτης, επέτρεπε την αυτόματη βαθμονόμηση μόνο με το αλγόριθμο Dynamically Dimensioned Search (DDS) και αυτό επιλέχθηκε. Οι τιμές πεδίου που εισάχθηκαν ήταν οι ημερήσιες τιμές παροχής στην Φοινικιά και η χρονική περίοδος στην οποία έγινε η αυτόματη βαθμονόμηση ήταν η περίοδος 01/09/1993-31/08/1997 με warm up 2 χρόνια. Έπειτα επιλέγεται ο στατιστικός δείκτης προς βελτιστοποίηση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE), ο οποίος αποτελεί ένα μέτρο σύγκλισης προσομοιωμένης και παρατηρούμενης χρονοσειράς. Πρόκειται για έναν ευαίσθητο δείκτη, του οποίου η τιμή διακύμανσης βρίσκεται μεταξύ του 0 και του 1, όπου η μονάδα αποτελεί την βέλτιστη τιμή. Τέλος επιλέγεται το πλήθος των προσομοιώσεων που θα εκτελεστούν στην αυτόματη βαθμονόμηση, όπου σε αυτή τη περίπτωση είναι 200, (Σχήμα 4.18.).

Πίνακας 4. 3. Τελικές παράμετροι προς βαθμονόμηση

Παράμετρος	Περιγραφή	Τύπος μεταβολής τιμών	Τιμή
cn2	Αριθμός καμπύλης που διέπει την επιφανειακή ροή	Ποσοστιαία	-9.568
cn3_swf	Συντελεστής προσαρμογής εδαφικού νερού	Ποσοστιαία	4.748
esco	Παράμετρος που καθορίζει το ποσοστό εξάτμισης από το έδαφος	Αντικατάσταση	0.097
alpha	Δείκτης απόκρισης της βασικής ροής κατά τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων	Αντικατάσταση	0.991
awc	Διαθέσιμη εδαφική υγρασία	Σχετική	0.042

Calibration Algorithm: Dynamically Dimensioned Search (DDS)

Observation: Channel 4 Daily River Flow | Objective Fun: NSE | Direction: Maximise | Max. Iterations: 200

Best OBJ FX: -

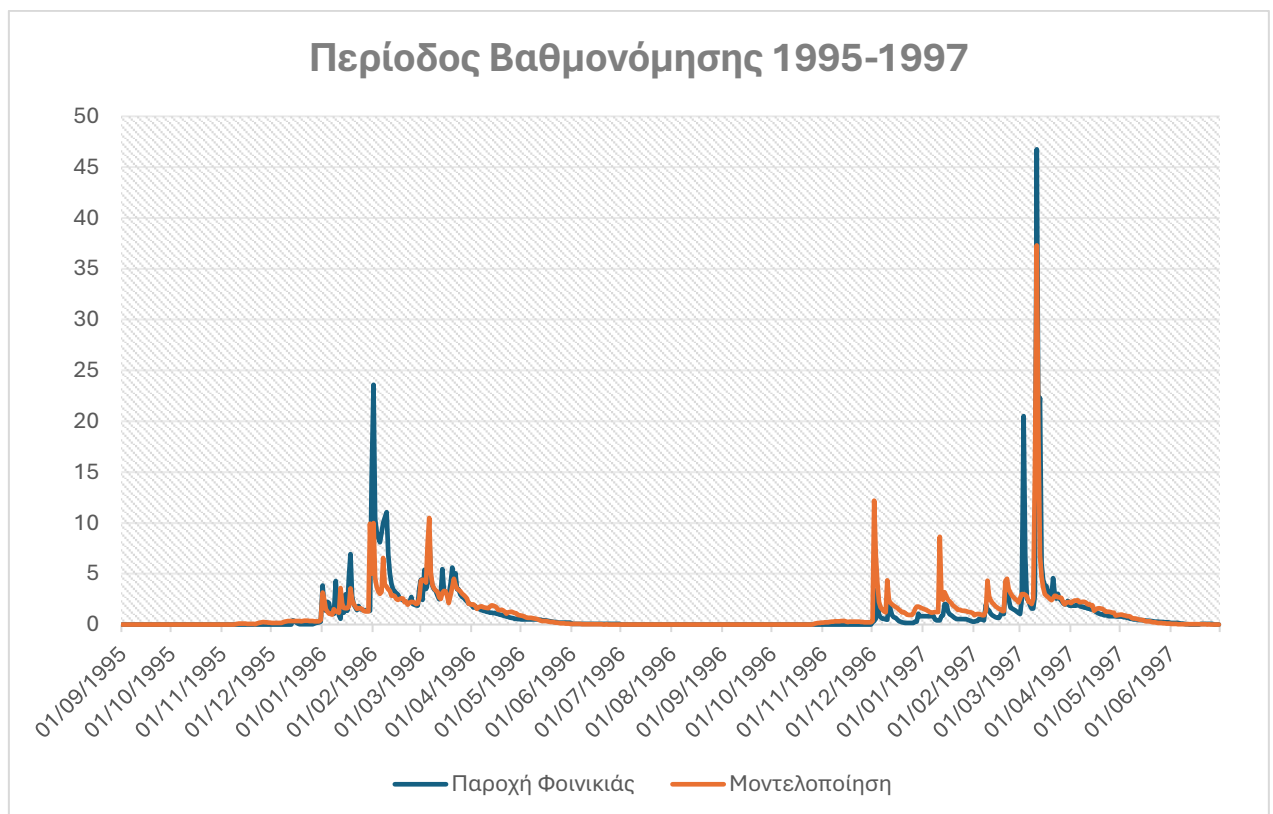
Group	Name	Change Type	Min	Current Best	Value	Max
hru	cn2	Percent	-20.00	-9.568	-10.582	40.00
hru	cn3_swf	Percent	-30.00	4.748	4.849	30.00
hru	esco	Replace	0.00	0.097	0.028	1.00
aqu	alpha	Replace	0.00	0.991	0.977	1.00
sol	awc	Relative	-0.50	0.042	0.052	0.50

Best OBJ FX: - Channel 4 Daily River Flow NSE 0.000

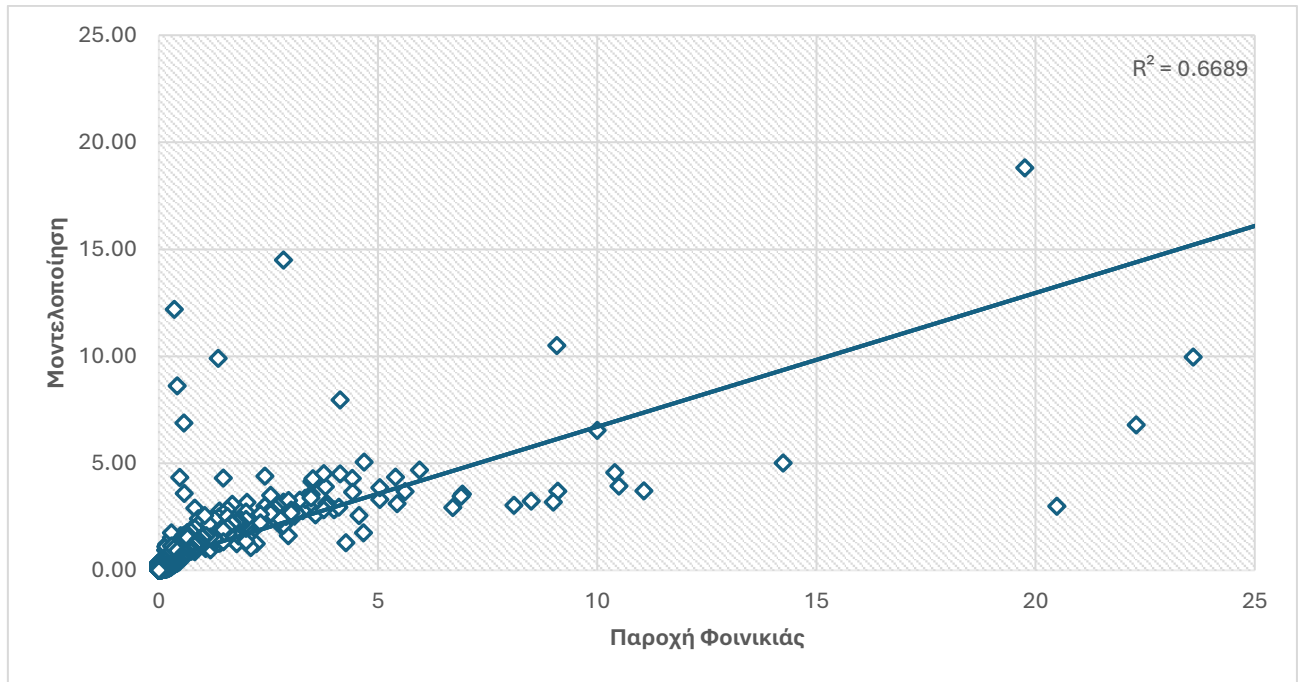
Manual Automatic

Σχήμα 4. 18. Αυτόματη βαθμονόμηση

Με την ολοκλήρωση της αυτόματης βαθμονόμησης επιλέγονται οι παραπάνω τιμές ως οι βέλτιστες τιμές για κάθε παράμετρο, (Πίνακας 4.3.). Στην συνέχεια πραγματοποιείται προσομοίωση με αυτές τις τιμές για να υπολογιστούν οι στατιστικοί δείκτες αλλά και για να δημιουργηθεί διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι μοντελοποιημένες τιμές παροχής μαζί με τις τιμές πεδίου, (Γράφημα 4.12.).



Γράφημα 4. 12. Βαθμονόμηση 1995-1997



Γράφημα 4. 13. R^2 βαθμονόμησης

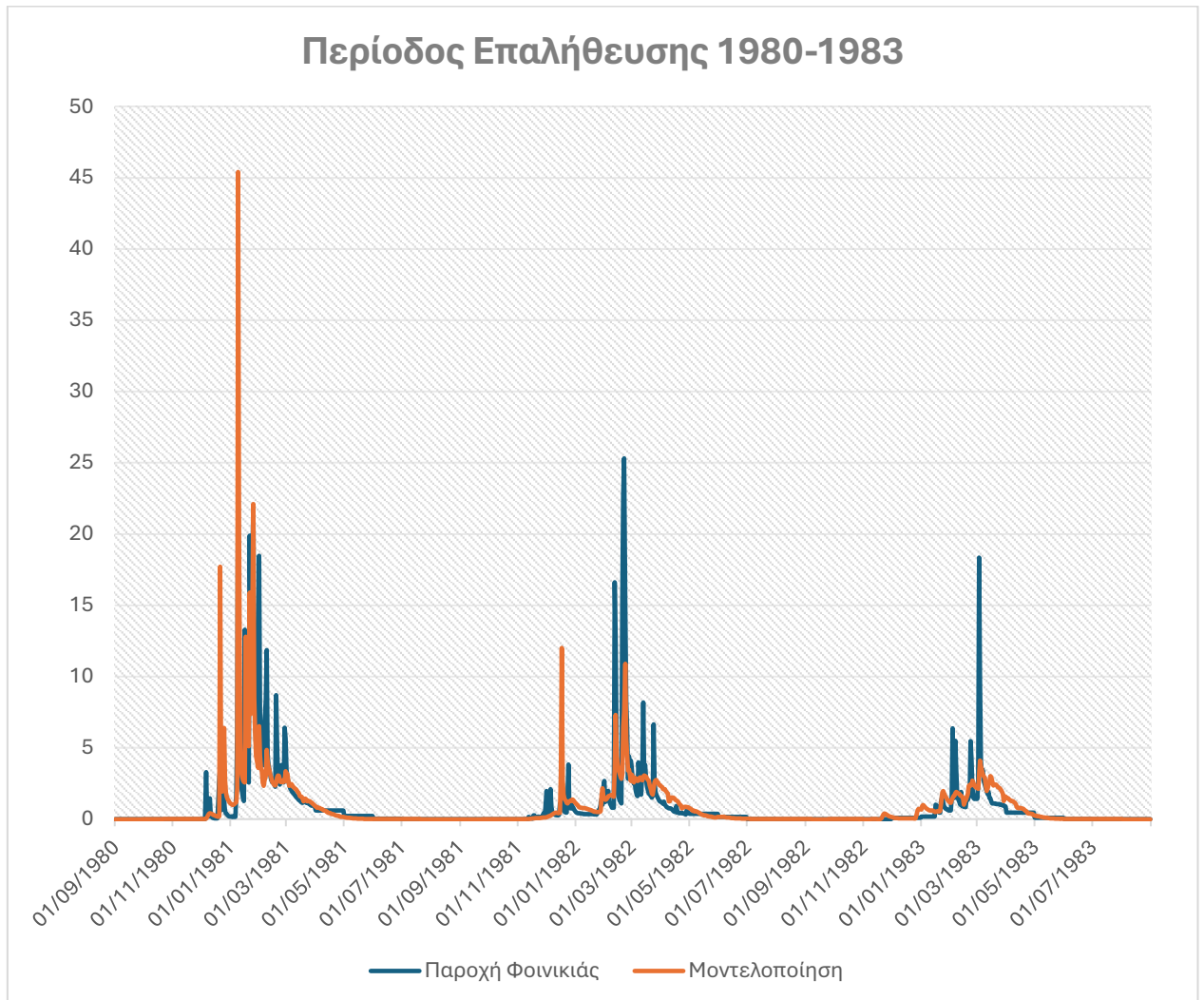
Στατιστική αξιολόγηση περιόδου βαθμονόμησης

Στατιστικός Δείκτης	Εύρος τιμών	Αποδεκτά Όρια	Βέλτιστη τιμή	Τιμή προσομοίωσης μοντέλου
NSE	$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$	≥ 0.5	1	0.63
PBIAS	$-\infty \leq \text{PBIAS} \leq +\infty$	$\leq 25 $	0	-4.83
MSE	$0 \leq \text{MSE} \leq +\infty$	-	0	2.78
RMSE	$0 \leq \text{RMSE} \leq +\infty$	-	0	1.67
R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$	≥ 0.5	1	0.67

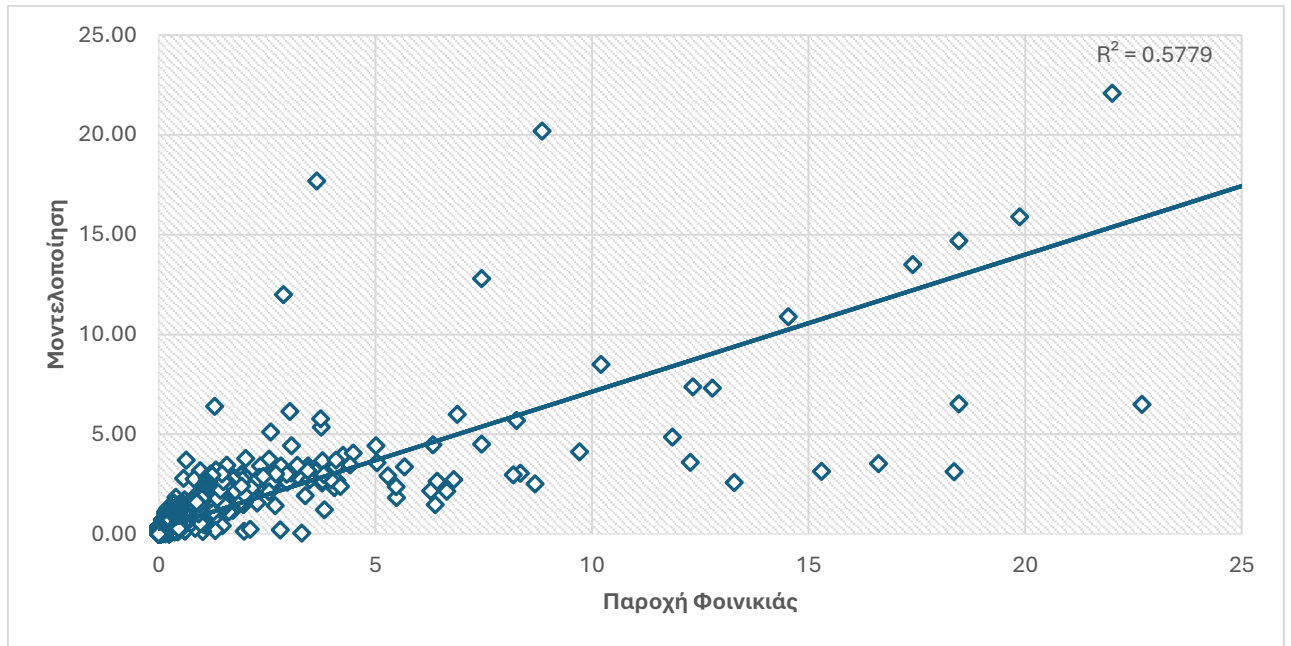
Πίνακας 4. 4. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγηση περιόδου βαθμονόμησης

Όπως φανερώνουν οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες στο Γράφημα 4.13. και στον Πίνακα 4.4., η ποιότητα των μοντελοποιημένων τιμών παροχής μετά την βαθμονόμηση παρουσιάζεται αρκετά ικανοποιητική. Ο κύριος στατιστικός δείκτης που επιλέχθηκε να βελτιστοποιηθεί, NSE, παρουσίασε μια τιμή ίση με 0.63, ξεπερνώντας το όριο ικανοποίησης. Ο δεύτερος στατιστικός δείκτης που παρουσίασε πολύ ικανοποιητική προσέγγιση ήταν ο PBIAS όπου υπολογίστηκε -4.83 και βρέθηκε αρκετά κοντά στην βέλτιστη τιμή 0. Επιπλέον οι δείκτες MSE και RMSE, υπολογίστηκαν ίσοι με 2.78 και 1.67 αντίστοιχα και πλησίασαν αρκετά την βέλτιστη τους τιμή. Τέλος, ο δείκτης R^2 παρουσιάστηκε ικανοποιητικός έχοντας τιμή ίση με 0.67.

Στην συνέχεια εισάγεται η συμπληρωματική περίοδος, η περίοδος επαλήθευσης. Πραγματοποιείται τρέξιμο (Run) πάνω σε αυτή τη περίοδο και ελέγχονται οι δείκτες εάν είναι ικανοποιητικοί. Οι τιμές πεδίου που εισάχθηκαν ήταν οι ημερήσιες τιμές παροχής στην Φοινικιά και η χρονική περίοδος στην οποία έγινε η αυτόματη βαθμονόμηση ήταν η περίοδος 01/09/1978-31/08/1983 με warm up 2 χρόνια. Στόχος είναι στην συγκεκριμένη προσομοίωση οι στατιστικοί δείκτες να παραμείνουν σε ικανοποιητικό επίπεδο και συνεπώς να θεωρηθεί η συνολική μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής αποδεκτή. Παρακάτω παρουσιάζονται το Γράφημα 4.14. με τις μοντελοποιημένες τιμές παροχής μαζί με τις τιμές πεδίου, όπως και οι στατιστικοί δείκτες.



Γράφημα 4. 14. Επαλήθευση στην περίοδο 1980-1983



Γράφημα 4. 15. R^2 Επαλήθευσης

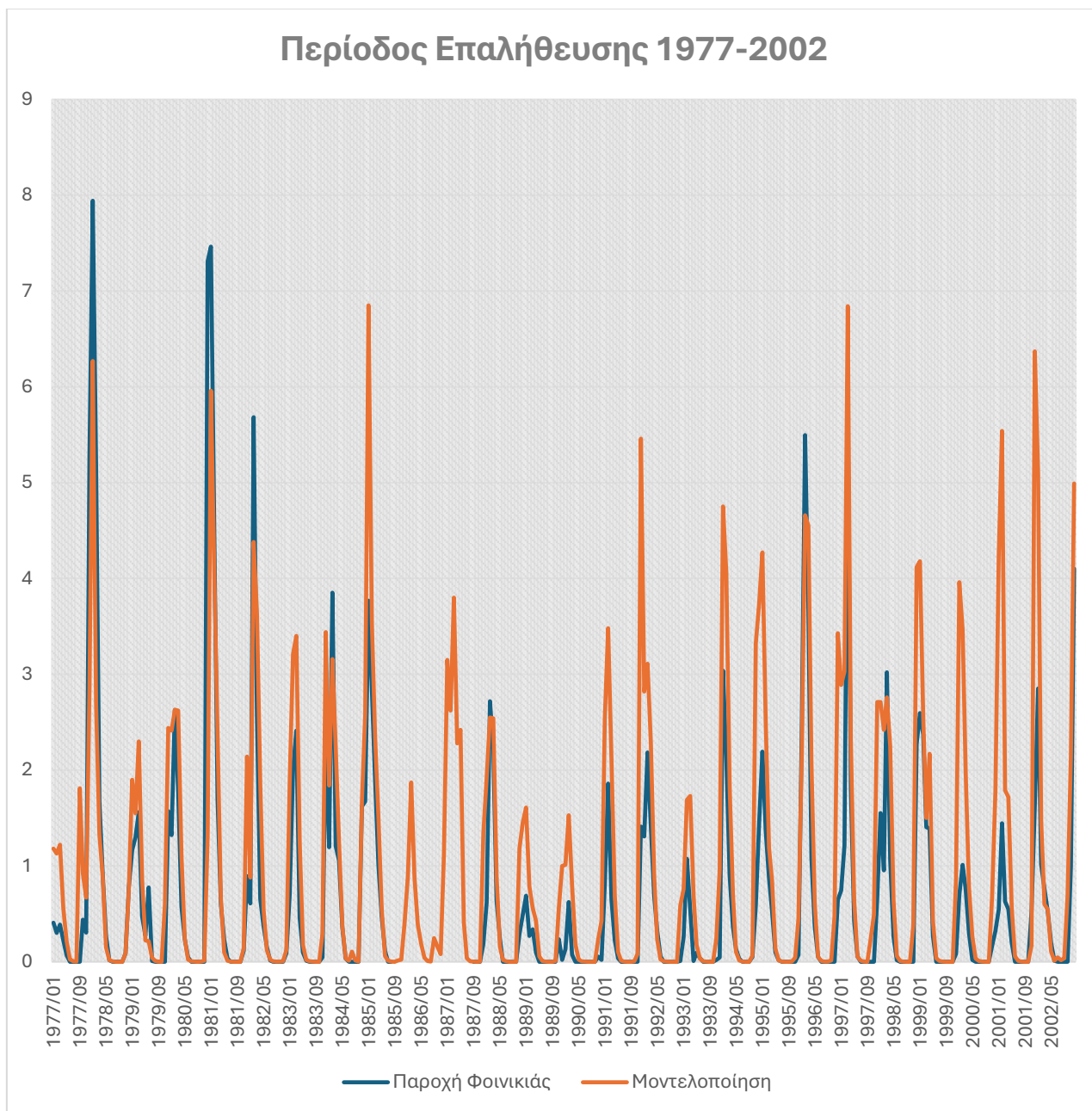
Στατιστική αξιολόγηση περιόδου Επαλήθευσης

Πίνακας 4. 5. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης περιόδου επαλήθευσης

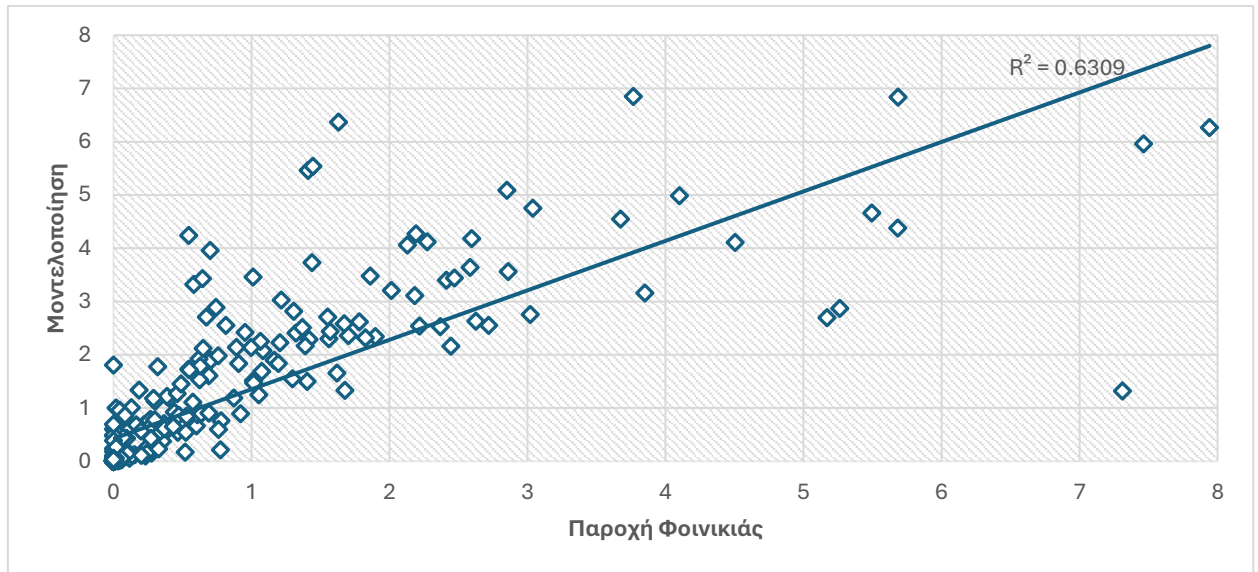
Στατιστικός Δείκτης	Εύρος τιμών	Αποδεκτά Όρια	Βέλτιστη τιμή	Τιμή προσομοίωσης μοντέλου
NSE	$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$	≥ 0.5	1	0.56
PBIAS	$-\infty \leq \text{PBIAS} \leq +\infty$	$\leq 25 $	0	1.80
MSE	$0 \leq \text{MSE} \leq +\infty$	-	0	2.75
RMSE	$0 \leq \text{RMSE} \leq +\infty$	-	0	1.66
R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$	≥ 0.5	1	0.58

Όπως φανερώνουν οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες στο Γράφημα 4.15. και στον Πίνακα 4.5., η ποιότητα των μοντελοποιημένων τιμών παροχής στην περίοδο επαλήθευσης παρουσιάζεται αρκετά ικανοποιητική. Ο κύριος στατιστικός δείκτης που επιλέχθηκε εξ αρχής να βελτιστοποιηθεί, NSE, παρουσίασε μια τιμή ίση με 0.56, ξεπερνώντας το όριο ικανοποίησης. Ο δεύτερος στατιστικός δείκτης που παρουσίασε πολύ ικανοποιητική προσέγγιση ήταν ο PBIAS όπου υπολογίστηκε 1.80 και βρέθηκε αρκετά κοντά στην βέλτιστη τιμή 0. Επιπλέον οι δείκτες MSE και RMSE, υπολογίστηκαν ίσοι με 2.75 και 1.66 αντίστοιχα και πλησίασαν αρκετά την βέλτιστη τους τιμή. Τέλος, ο δείκτης R^2 παρουσιάστηκε ικανοποιητικός έχοντας τιμή ίση με 0.58.

Μια επιπρόσθετη περίοδος επαλήθευσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η χρονική περίοδος 1977 έως 2002. Σε αυτή τη περίοδο υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για την παροχή του ποταμού σε μέσο μηνιαίο βήμα, (Γράφημα 4.16.). Θα εξεταστεί κατά πόσο το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει σωστά τις μέσες μηνιαίες τιμές παροχής και θα παρουσιαστούν οι στατιστικοί δείκτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι τιμές πεδίου που εισάχθηκαν ήταν οι μέσες μηνιαίες τιμές παροχής στην Φοινικιά και η χρονική περίοδος στην οποία έγινε η επαλήθευση ήταν η περίοδος 01/01/1975-31/12/2002 με warm up 2 χρόνια. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις μοντελοποιημένες τιμές παροχής μαζί με τις τιμές πεδίου, όπως και οι στατιστικοί δείκτες.



Γράφημα 4. 16. Επαλήθευση σε μηνιαίες τιμές για την περίοδο 1975-2002



Γράφημα 4. 17. R^2 στις μηνιαίες τιμές

Στατιστική αξιολόγηση περιόδου Επαλήθευσης με μηνιαίο βήμα

Πίνακας 4. 6. Αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης μηνιαίας επαλήθευσης

Στατιστικός Δείκτης	Εύρος τιμών	Αποδεκτά Όρια	Βέλτιστη τιμή	Τιμή προσομοίωσης μοντέλου
NSE	$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$	≥ 0.5	1	0.63
PBIAS	$-\infty \leq \text{PBIAS} \leq +\infty$	$\leq 25 $	0	17.3
MSE	$0 \leq \text{MSE} \leq +\infty$	-	0	0.60
RMSE	$0 \leq \text{RMSE} \leq +\infty$	-	0	0.78
R^2	$0 \leq R^2 \leq 1$	≥ 0.5	1	0.63

Όπως φανερώνουν οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες στο Γράφημα 4.17. και στον Πίνακα 4.6., η ποιότητα των μοντελοποιημένων τιμών παροχής στην περίοδο επαλήθευσης παρουσιάζεται αρκετά ικανοποιητική. Ο κύριος στατιστικός δείκτης που επιλέχθηκε εξ αρχής να βελτιστοποιηθεί, NSE, παρουσίασε μια τιμή ίση με 0.63, ξεπερνώντας το όριο ικανοποίησης. Ο δεύτερος στατιστικός δείκτης που παρουσίασε ικανοποιητική προσέγγιση ήταν ο PBIAS όπου υπολογίστηκε 17.35. Επιπλέον οι δείκτες MSE και RMSE, υπολογίστηκαν ίσοι με 0.603 και 0.776 αντίστοιχα και πλησίασαν σε μεγάλο βαθμό την βέλτιστη τους τιμή. Τέλος, ο δείκτης R^2 παρουσιάστηκε ικανοποιητικός έχοντας τιμή ίση με 0.63 .

4.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ SWAT+

4.2.1: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

- Παρουσίαση στατιστικών δεικτών για την βαθμονόμηση και την επαλήθευση.

Πίνακας 4. 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικής αξιολόγησης

Συγκεντρωτικός Πίνακας Στατιστικών Δεικτών Μοντελοποίησης				
	Περίοδος Βαθμονόμησης	Περίοδος Επαλήθευσης		
Δείκτης	Ημερήσια	Ημερήσια	Μηνιαία	Εύρος τιμών
NSE	0.63	0.56	0.63	$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$
PBIAS	-4.83	1.80	17.3	$-\infty \leq \text{PBIAS} \leq +\infty$
MSE	2.78	2.75	0.60	$0 \leq \text{MSE} \leq +\infty$
RMSE	1.67	1.66	0.78	$0 \leq \text{RMSE} \leq +\infty$
R ²	0.67	0.58	0.63	$0 \leq \text{R}^2 \leq 1$

Συμπερασματικά, παρατηρώντας τους ποσοτικούς δείκτες στον Πίνακα 4.7., γίνεται αντιληπτό ότι κυμαίνονται σε αποδεκτά έως και πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Συνολικά, γίνεται αντιληπτό ότι η διαδικασία της μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου, κρίνεται επιτυχημένη.

- Παρουσίαση τελικών τιμών παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν.

Οι τελικές παράμετροι που βαθμονομήθηκαν για την μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής, βρέθηκαν έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό να εντοπιστούν αυτές που θα είχαν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην τελική βαθμονόμηση. Αυτές οι παράμετροι είναι οι:

- cn2
- cn3_swf
- esco
- alpha
- awc

Εφαρμόζοντας τον τύπο μεταβολών των τιμών, που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.3, στις προεπιλεγμένες τιμές που έχει θέσει το SWAT+ για την κάθε παράμετρο γίνεται δυνατός ο υπολογισμός των τελικών βαθμονομημένων τιμών των παραμέτρων.

-cn2

Για την παράμετρο του αριθμού καμπύλης cn2, αρχικά εντοπίζεται ο τύπος εδάφους. Σε κάθε τύπο εδάφους αντιστοιχούν διάφορες χρήσεις γης. Εν συνεχεία, σε κάθε διαφορετικό τύπο χρήσης γης αντιστοιχούν ορισμένες πρακτικές διαχείρισης και ανάλογα την διαχείριση και τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν, ορίζεται μια υδρολογική κατηγορία εδάφους και συνεπώς μια τιμή σύμφωνα με τον πίνακα 3.4. Σε αυτή την αρχική τιμή εφαρμόζεται η μεταβολή που υπολογίστηκε από την βαθμονόμηση, (-9.568%).

Πιο αναλυτικά,

Για το έδαφος s29725, (Πίνακας 4.8.)

Πίνακας 4. 8. Curve Number για το έδαφος s29725

Land Use	CN Class Name	Soil Hydrologic Group	Default CN Value	Calibrated CN Value
agrc_lum	sg_strow_g	B	75	67.8
agrl_lum	rc_strow_g	B	78	70.5
corn_lum	rc_strow_g	B	78	70.5
frsd_lum	wood_f	B	60	54.3
frst_lum	wood_f	B	60	54.3
grsg_lum	rc_strow_g	B	78	70.5
jhgr_lum	pastg_g	B	61	55.2
rnge_lum	pastg_f	B	69	62.4
ryea_lum	sg_strow_g	B	75	67.8
spas_lum	pastg_g	B	61	55.2
swgr_lum	pastg_g	B	61	55.2
wetw_lum	wood_p	B	66	59.7

Για το έδαφος s29726, (Πίνακας 4.9.)

Πίνακας 4. 9. Curve Number για το έδαφος s29726

Land Use	CN Class Name	Soil Hydrologic Group	Default CN Value	Calibrated CN Value
agrc_lum	sg_strow_g	C	83	75.1
corn_lum	rc_strow_g	C	85	76.9
grsg_lum	rc_strow_g	C	85	76.9
jhgr_lum	pastg_g	C	74	66.9
pmil_lum	rc_strow_g	C	85	76.9
ryea_lum	sg_strow_g	C	83	75.1
spas_lum	pastg_g	C	74	66.9
swgr_lum	pastg_g	C	74	66.9
wetw_lum	wood_p	C	77	69.6

Για το έδαφος s29729, (Πίνακας 4.10.)

Πίνακας 4. 10. Curve Number για το έδαφος s29729

Land Use	CN Class Name	Soil Hydrologic Group	Default CN Value	Calibrated CN Value
agrc_lum	sg_strow_g	C	83	75.1
agrl_lum	rc_strow_g	C	85	76.9
grsg_lum	rc_strow_g	C	85	76.9
ryea_lum	sg_strow_g	C	83	75.1
spas_lum	pastg_g	C	74	66.9

-cn3_swf

Για την παράμετρο *cn3_swf*, όπου η αρχική τιμή σε όλα τα HRUs ήταν 0.95, εφαρμόζοντας την μεταβολή +4.748% στην παράμετρο σε όλες τις υδρολογικές μονάδες απόκρισης, η τελική τιμή είναι 0.995106.

-esco

Για την παράμετρο *esco*, όπου η αρχική τιμή σε όλα τα HRUs ήταν 0.95, εφαρμόζοντας την μεταβολή αντικατάστασης, η τελική βαθμονομημένη τιμή είναι 0.097.

-alpha

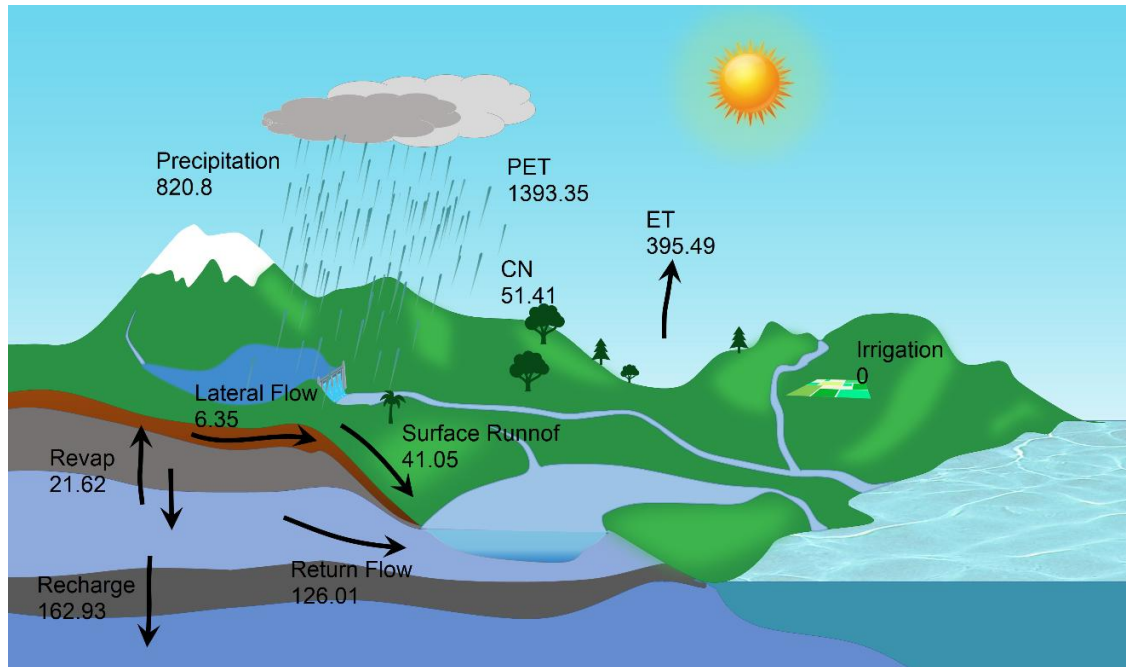
Για την παράμετρο *alpha*, όπου η αρχική τιμή για όλους τους υδροφορείς ήταν 0.05, εφαρμόζοντας την μεταβολή αντικατάστασης, η τελική βαθμονομημένη τιμή είναι 0.091.

-awc

Για την παράμετρο *awc*, όπου η αρχική τιμή για όλα τα εδάφη ήταν 0.15, εφαρμόζοντας την σχετική μεταβολή, η τελική βαθμονομημένη τιμή είναι 0.192.

4.2.2: Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου

Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση των ημερήσιων αποτελεσμάτων παροχής της εκβολής της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου ακολουθεί η κατάστρωση του υδρολογικού ισοζυγίου, (Σχήμα 4.19.).



Σχήμα 4. 19. Υδατικό Ισοζύγιο όπως παρουσιάζεται από το SWAT+ Toolbox.

Η τυπική τιμή βροχόπτωσης ετησίως και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για το χρονικό διάστημα 1964-2009 είναι:

$$P = 820.8 \text{ mm}$$

$$PET = 1393.35 \text{ mm}$$

Η συνολική εξατμισοδιαπνοή και η ποσότητα που εξατμίζεται από τον ρηχό υδροφόρα αντίστοιχα παρουσιάζεται:

$$ET = 395.49 \text{ mm}$$

$$REVAP = 21.62 \text{ mm}$$

Η επιφανειακή απορροή, η πλάγια απορροή και η απορροή που επιστρέφει από το ρηχό υδροφόρα είναι:

$$SURFACE \text{ RUNOFF} = 41.05 \text{ mm}$$

$$LATERAL \text{ FLOW} = 6.35 \text{ mm}$$

$$RETURN \text{ FLOW} = 126.01 \text{ mm}$$

Η κατείδυση στο βαθύ υδροφόρα είναι:

$$RECHARGE = 162.93 \text{ mm}$$

Το ετήσιο ισοζύγιο της λεκάνης απορροής δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta S = P - (Q_{sur} + Q_{lat} + Q_{rtrn} + ET + Revap + Q_{deep})$$

Σύμφωνα με αυτή, η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα μιας λεκάνης απορροής είναι ίση με την ποσότητα νερού που εισέρχεται με τη μορφή κατακρήμνισης P , μείον τη ποσότητα που απορρέει επιφανειακά Q_{sur} , την ποσότητα που απορρέει πλευρικά Q_{lat} , την ποσότητα επιστρέφει από το ρηχό υδροφορέα Q_{rtrn} , την συνολική εξατμισοδιαπνοή ET , την ποσότητα που εξατμίζεται από τον ρηχό υδροφορέα $Revap$ και την ποσότητα που απορρέει στον υπόγειο υδροφορέα Q_{deep} . Έτσι η σχέση υπολογίζεται ως εξής:

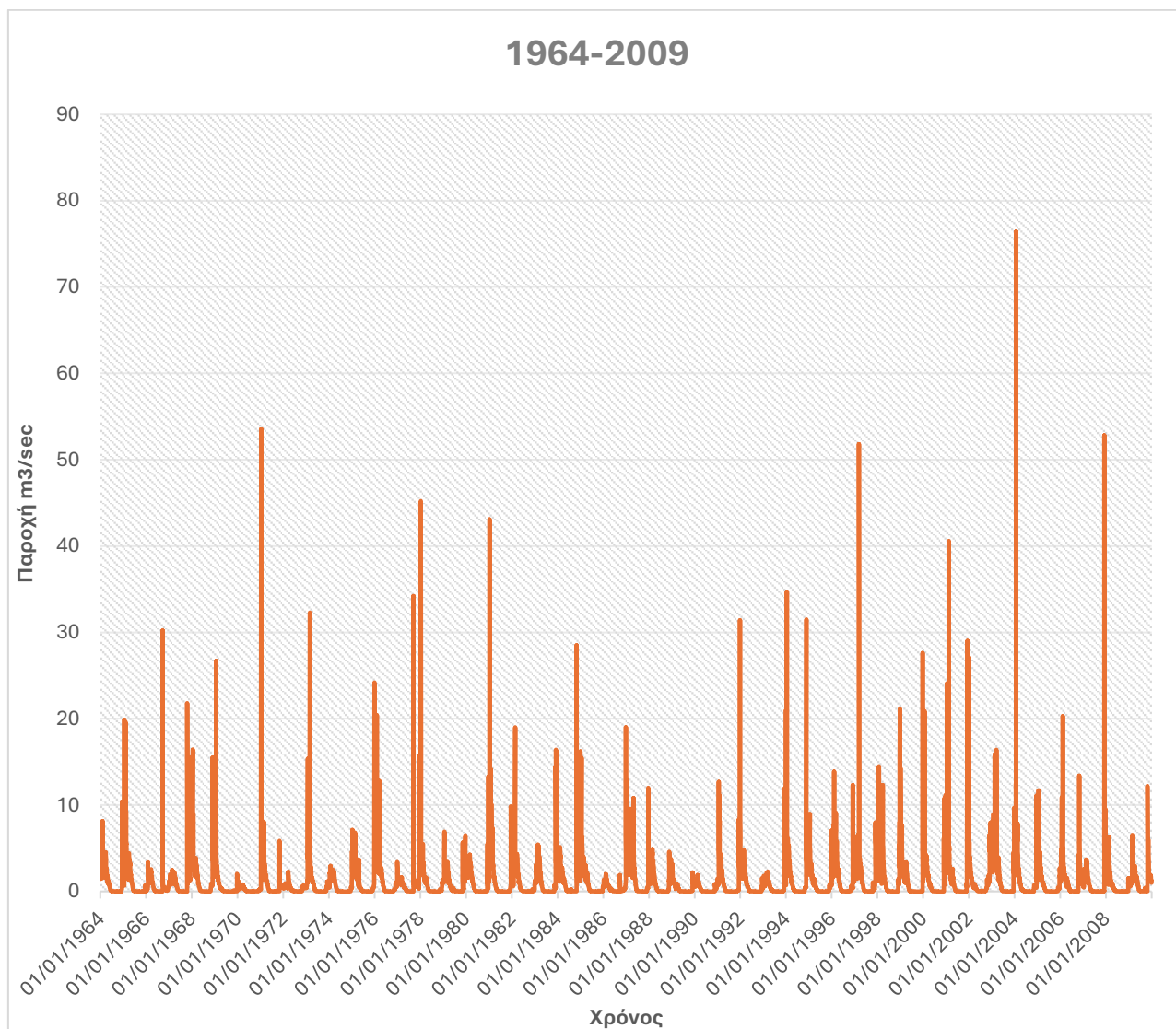
$$\Delta S = 820.8 - (41.05 + 6.35 + 126.01 + 395.49 + 21.62 + 162.93)$$

$$\Delta S = 67.35 \text{ mm}$$

Άρα, η ποσότητα νερού στο σύστημα αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι το πλεονάζον νερό μπορεί να αποθηκευτεί στον υδροφόρο ορίζοντα και περισσότερο νερό διηθείται στο έδαφος.

4.2.3: Ανάλυση μοντελοποιημένων δεδομένων ροής Γιόφυρου

Με την επίτευξη της επιτυχημένης βαθμονόμησης του μοντέλου, γίνεται δυνατή η εκτέλεση του τρεξίματος σε μια ευρύτερη χρονική περίοδο. Το μοντέλο έτρεξε για 46 χρόνια από το 1964 έως το 2009 με στόχο την εξαγωγή παροχών σε ημερήσιο βήμα, για στατιστική ανάλυση. Πιο αναλυτικά, τα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης των μετεωρολογικών σταθμών που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα, κυμαινόντουσαν από το 1961 έως το 2009. Έτσι η περίοδος τρεξίματος ορίστηκε από 01/01/1961 έως το 31/12/2009 με warm up 3 χρόνια και εξαγωγή παροχής σε ημερήσια αποτελέσματα. Στο Γράφημα 4.18. παρουσιάζεται το υδρογράφημα για την περίοδο μοντελοποίησης 1964-2009 στην εκβολή του ποταμού.



Γράφημα 4. 18. Ημερήσιες μοντελοποιημένες τιμές παροχής

Έχοντας εξάγει την ημερήσια παροχή για όλη την περίοδο μοντελοποίησης γίνεται η ανάλυση της συχνότητας αιχμών πλημμύρας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η Κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου I (Gumbel). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται η μέθοδος του παράγοντα συχνότητας, (V. T. Chow, 1951). Η Κατανομή Ακραίων Τιμών αποτελεί από τις κατανομές που ενδείκνυται να εφαρμόζεται συνήθως για την στατιστική επεξεργασία των μέγιστων τιμών ενός υδρολογικού μεγέθους όπως οι ραγδαίες βροχές και οι πλημμυρικές απορροές, (Τσακίρης Γ. et al., 2013). Στόχος είναι ο υπολογισμός η παροχή που έχει περίοδο επαναφοράς 50 έτη.

Αρχικά αναλύονται όλες οι ημερήσιες παροχές και επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να εντοπιστούν οι ετήσιες μέγιστες μέσες ημερήσιες παροχές στην περίοδο 1964-2009, (Πίνακας 4.11.).

Πίνακας 4. 11. Μέγιστες ετήσιες μοντελοποιημένες παροχές

α/α	Έτος	Μέγιστη Παροχή (m ³ /sec)	α/α	Έτος	Μέγιστη Παροχή (m ³ /sec)	α/α	Έτος	Μέγιστη Παροχή (m ³ /sec)
1	1964	10.4	17	1980	13.3	33	1996	13.9
2	1965	19.9	18	1981	43.1	34	1997	51.8
3	1966	30.2	19	1982	19	35	1998	21.2
4	1967	21.8	20	1983	16.4	36	1999	27.6
5	1968	16.4	21	1984	28.5	37	2000	20.9
6	1969	26.7	22	1985	15.5	38	2001	40.6
7	1970	1.12	23	1986	19	39	2002	27.1
8	1971	53.6	24	1987	12.9	40	2003	16.4
9	1972	2.32	25	1988	4.89	41	2004	76.4
10	1973	32.3	26	1989	3.11	42	2005	11.7
11	1974	2.95	27	1990	1.89	43	2006	20.3
12	1975	24.2	28	1991	31.4	44	2007	52.8
13	1976	20.4	29	1992	4.9	45	2008	6.35
14	1977	34.2	30	1993	11.9	46	2009	12.2
15	1978	45.2	31	1994	34.7			
16	1979	6.93	32	1995	8.99			

Υπολογίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του δείγματος

Μέσος όρος:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{N}$$

Τυπική απόκλιση:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N - 1}}$$

όπου ο μέσος όρος των ετήσιων μεγίστων των ημερήσιων παροχών του υδατορεύματος για την περίοδο 1964-2009, $\hat{\sigma}$ η τυπική απόκλιση του δείγματος και N το πλήθος των τιμών του δείγματος. Το πλήθος των τιμών του δείγματος είναι $N=46$.

Επομένως ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του συγκεκριμένου δείγματος είναι:

$$\bar{Q} = 22.12 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\hat{\sigma} = 16.21 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Στην συνέχεια μέσω της μεθόδου του παράγοντα συχνότητας υπολογίζεται η παροχή σύμφωνα με την σχέση που ισχύει:

$$x_T = \bar{x}(1 + c_v \cdot k_T)$$

όπου :

x_T το μέγεθος του γεγονότος περιόδου επαναφοράς T ,

\bar{x} ο μέσος όρος των τιμών του δείγματος,

c_v ο συντελεστής διακύμανσης που δίνεται από τη σχέση $c_v = \frac{\hat{\sigma}}{\bar{x}}$ και

k_T ο παράγοντας συχνότητας που εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς T και τα χαρακτηριστικά της κατανομής

Ο παράγοντας συχνότητας k_T για μικρά σχετικά δείγματα ($N < 100$), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_T = \frac{-\left[\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) + \bar{y}_N\right]}{\sigma_N}$$

όπου \bar{y}_N και σ_N (μέσος όρος και τυπική απόκλιση της ανηγμένης μεταβλητής y), που δίνονται από τον Πίνακα 4.12. και υπολογίζονται με βάση τον αριθμό των παρατηρήσεων του δείγματος:

$$\bar{y}_N = 0.5468 \quad \text{και} \quad \sigma_N = 1.1538$$

Πίνακας 4. 12. Τιμές των παραμέτρων γ_N και σ_N για διάφορες τιμές του αριθμού των παρατηρήσεων N

N	$\bar{\gamma}_N$	σ_N	N	$\bar{\gamma}_N$	σ_N	N	$\bar{\gamma}_N$	σ_N
8	0.4843	0.9043	35	0.54034	1.12847	64	0.55330	1.17930
9	0.4902	0.9288	36	0.54100	1.13130	66	0.55380	1.18140
10	0.4952	0.9497	37	0.54180	1.13390	68	0.55430	1.18340
11	0.4996	0.9676	38	0.54240	1.13630	70	0.55477	1.18536
12	0.5035	0.9833	39	0.54300	1.13880	72	0.55520	1.18730
13	0.5070	0.9972	40	0.54362	1.14132	74	0.55570	1.18900
14	0.5100	1.0095	41	0.54420	1.14360	76	0.55610	1.19060
15	0.5128	1.0206	42	0.54480	1.14580	78	0.55650	1.19230
16	0.5157	1.0316	43	0.54530	1.14800	80	0.55688	1.19382
17	0.5181	1.0411	44	0.54580	1.14990	82	0.55720	1.19530
18	0.5202	1.0493	45	0.54630	1.15185	84	0.55760	1.19670
19	0.5220	1.0566	46	0.54680	1.15380	86	0.55800	1.19800
20	0.5236	1.0628	47	0.54730	1.15570	88	0.55830	1.19940
21	0.5252	1.0696	48	0.54770	1.15740	90	0.55860	1.20073
22	0.5268	1.0754	49	0.54810	1.15900	92	0.55890	1.20200
23	0.5283	1.0811	50	0.54854	1.16066	94	0.55920	1.20320
24	0.5296	1.0864	51	0.54890	1.16230	96	0.55950	1.20440
25	0.5309	1.0915	52	0.54930	1.16380	98	0.55980	1.20550
26	0.5320	1.0961	53	0.54970	1.16530	100	0.56002	1.20649
27	0.5332	1.1004	54	0.55010	1.16670	150	0.56461	1.22534
28	0.5343	1.1047	55	0.55040	1.16810	200	0.56715	1.23598
29	0.5353	1.1086	56	0.55080	1.16960	250	0.56878	1.23292
30	0.5362	1.1124	57	0.55110	1.17080	300	0.56993	1.24786
31	0.5371	1.1159	58	0.55150	1.17210	400	0.57144	1.25450
32	0.5380	1.1193	59	0.55180	1.17340	500	0.57240	1.25880
33	0.5388	1.1226	60	0.55208	1.17467	750	0.57377	1.26506
34	0.5396	1.1155	62	0.55270	1.17700	1000	0.57450	1.26851

Επομένως ο παράγοντας συχνότητας k_T είναι:

$$k_T = \frac{-\left[\ln\left(\ln\left(\frac{50}{50-1}\right)\right) + 0.5468\right]}{1.1538} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow k_T = 2.9079$$

ο συντελεστής διακύμανσης είναι:

$$c_v = \frac{\hat{\sigma}}{\bar{Q}} = \frac{16.21}{22.12} = 0.7329$$

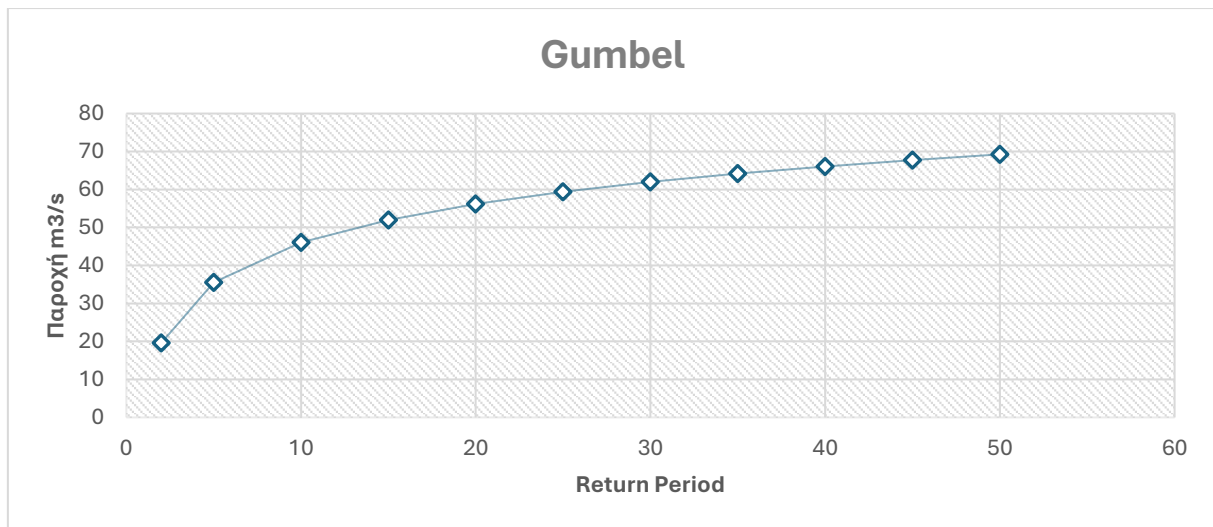
Τελικά από την σχέση του παράγοντα συχνότητας υπολογίζεται:

$$Q_T = \bar{Q}(1 + c_v \cdot k_T) = 22.12(1 + 0.7329 \cdot 2.9079) = 69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Επομένως η παροχή περιόδου επαναφοράς 50 ετών με την μέθοδο του παράγοντα συχνότητας της κατανομής Ακραίων Τιμών Τύπου I (Gumbel) είναι:

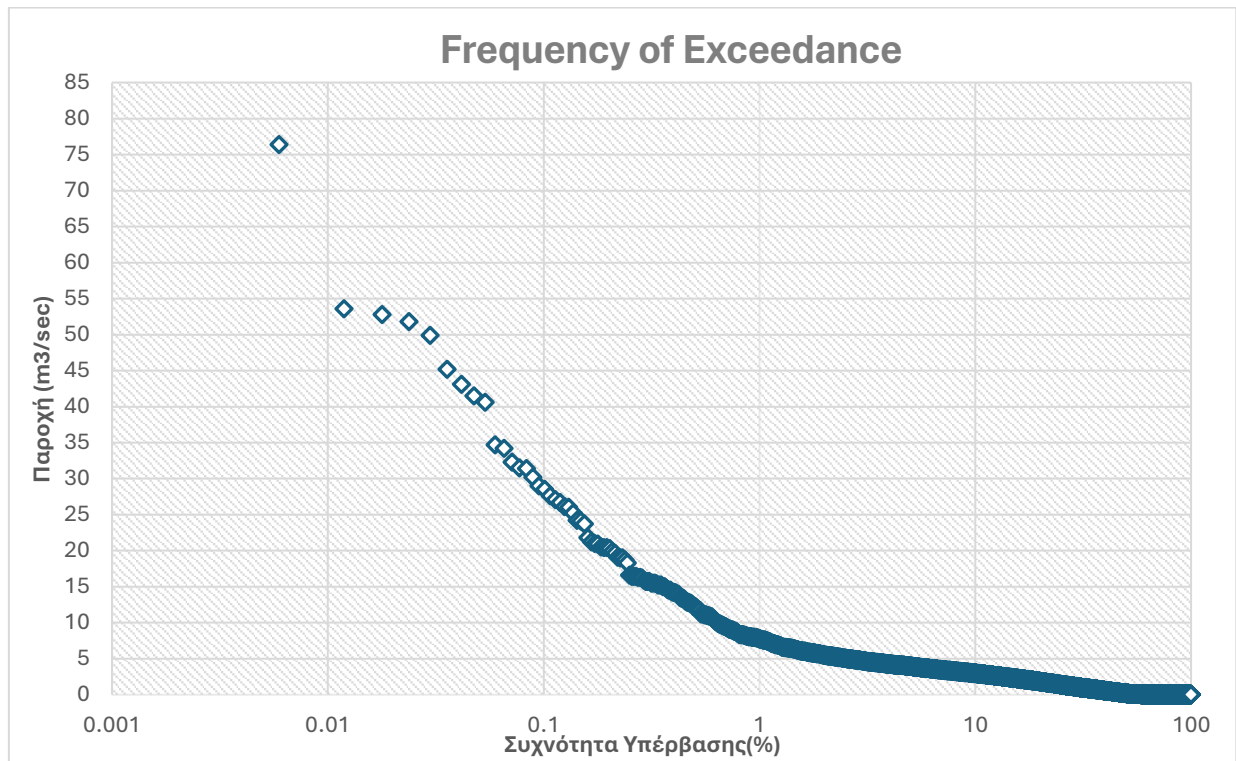
$$Q_{50} = 69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Στο Γράφημα 4.19, παρουσιάζεται το διάγραμμα Gumbel των παροχών σε συνάρτηση με τις περιόδους επαναφοράς:



Γράφημα 4. 19. Gumbel έως T=50 έτη

Έπειτα, τα ημερήσια αποτελέσματα παροχών ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά για να υπολογιστεί ποια είναι η πιθανότητα να εμφανιστούν συγκεκριμένες τιμές παροχών, (Γράφημα 4.20.).

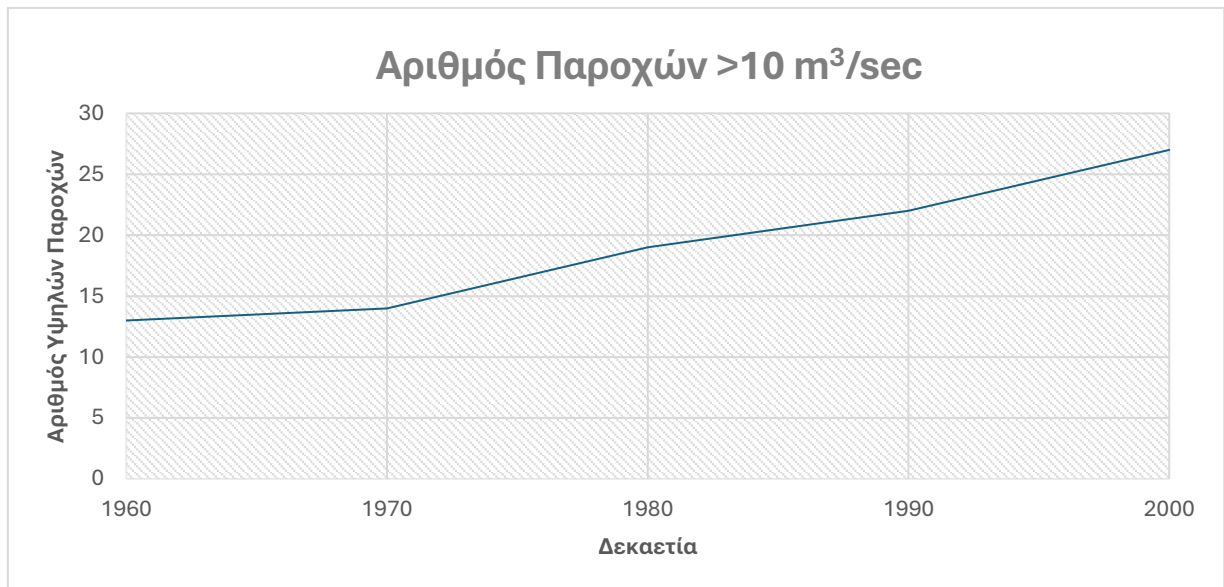


Γράφημα 4. 20. Frequency of Exceedance μοντελοποιημένων τιμών παροχής

Όπως φαίνεται από το γράφημα, οι πιο συχνές τιμές παροχής με τιμή μικρότερη των 10 m³/sec παρουσιάζονται στο 99% των περιπτώσεων. Αντίθετα, οι μεγαλύτερες τιμές παροχής παρουσιάζονται σε ποσοστό μικρότερο του 1%. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη τιμή παροχής που μοντελοποιήθηκε υπολογίστηκε ίση με 76.4 m³/sec και το ποσοστό εμφάνισης ήταν ίσο με 0.006%. Συνολικά, στις μοντελοποιημένες τιμές, βρέθηκαν 95 τιμές που ξεπερνούσαν τα 10 m³/sec και όλες ήταν σε ποσοστό μικρότερο του 1%, (Πίνακας 4.13.).

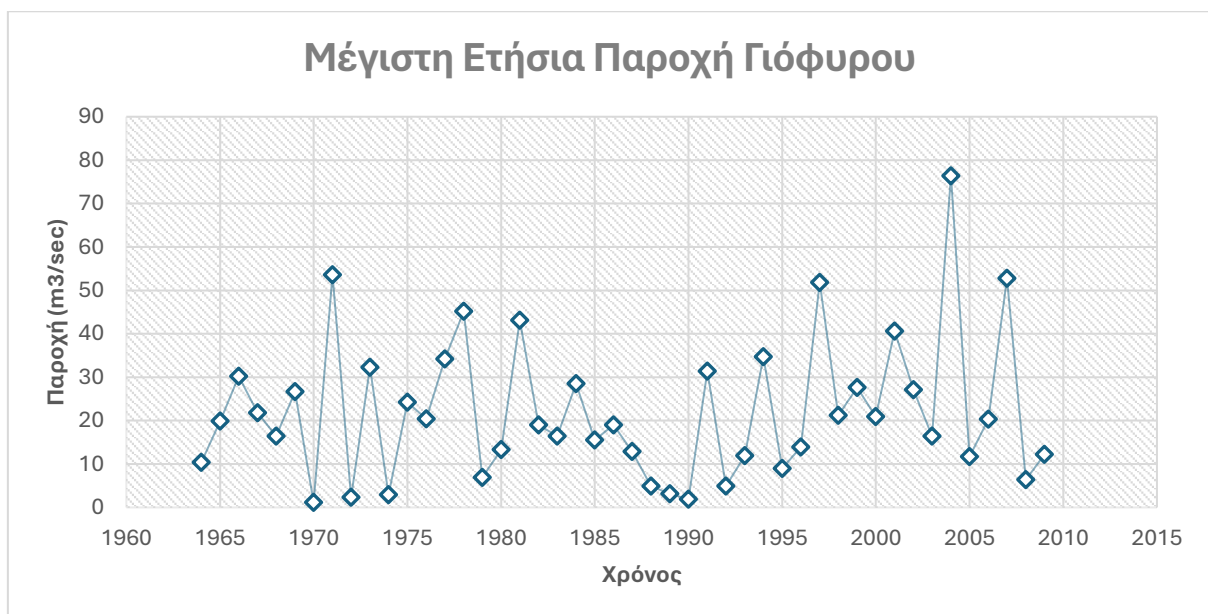
Πίνακας 4. 13. Αριθμός παροχών που ξεπερνούν τα 10 m³/sec

Δεκαετία	Παροχές >10 m³/sec	Μέγιστη τιμή (m³/sec)
1964-1969	13	30.2
1970-1979	14	53.6
1980-1989	19	43.1
1990-1999	22	51.8
2000-2009	27	76.4



Γράφημα 4. 21. Αριθμός παροχών που ξεπερνούν τα $10 \text{ m}^3/\text{sec}$

Αυτό που παρατηρείται μέσω του γραφήματος 4.21 αφορά την τάση που παρουσιάζεται κατά το πέρασμα των ετών, να εμφανίζονται όλο και περισσότερα φαινόμενα όπου η παροχή να ξεπερνά τα $10 \text{ m}^3/\text{sec}$. Στο Γράφημα 4.22. παρουσιάζονται οι μέγιστες μέσες ημερήσιες μοντελοποιημένες παροχές στην εκβολή του ποταμού.



Γράφημα 4. 22. Μέγιστες ετήσιες μοντελοποιημένες παροχές

Επιπλέον, για ορισμένες από τις μέγιστες μοντελοποιημένες τιμές παρουσιάζονται οι τιμές συνεχόμενης βροχοπτώσης όπως καταγράφηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς.

Για την 25/01/2004 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=76.4 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.14.).

Πίνακας 4. 14. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 25/01/2004

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
21/01/2004	3.27	7.51	2.83	2.69	1.70
22/01/2004	3.95	0.00	45.42	43.25	27.30
23/01/2004	12.5	41.82	47.41	45.15	28.50
24/01/2004	7.74	0.00	8.48	8.08	5.10
25/01/2004	76.4	6.93	81.69	77.79	49.10

Για την 12/01/1971 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=53.6 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.15.).

Πίνακας 4. 15. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 12/01/1971

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
06/01/1971	0.206	21.67	17.97	14.83	8.00
07/01/1971	0.262	23.03	19.10	15.75	8.50
08/01/1971	0.363	44.16	36.62	30.21	16.30
09/01/1971	0.486	12.19	10.11	8.34	4.50
10/01/1971	0.593	4.06	3.37	2.78	1.50
11/01/1971	0.772	15.17	12.58	10.38	5.60
12/01/1971	53.6	129.51	107.38	88.58	47.80

Για την 06/12/1971 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=52.8 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.16.).

Πίνακας 4. 16. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 06/12/2007

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
05/12/2007	0	6.97	5.17	5.16	3.01
06/12/2007	52.8	201.60	149.53	149.27	87.01

Για την 11/03/1997 και 12/03/1997 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=51.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $Q=49.9 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.17.).

Πίνακας 4. 17. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 12/03/1997

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
08/03/1997	3.36	31.27	0.00	0.00	0.00
09/03/1997	4.05	69.01	11.85	11.31	6.30
10/03/1997	12.7	124.39	30.48	29.09	16.20
11/03/1997	51.8	0.00	116.28	110.96	61.80
12/03/1997	49.9	0.00	76.02	72.54	40.40

Για την 09/01/1978 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=45.2 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.18.).

Πίνακας 4. 18. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 09/01/1978

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
05/01/1978	3.66	8.00	0.00	24.00	0.00
06/01/1978	8.24	30.00	27.00	29.00	20.80
07/01/1978	26	61.50	41.00	40.00	12.50
08/01/1978	41.5	53.00	80.00	40.00	36.30
09/01/1978	45.2	33.50	61.00	60.00	1.30

Για την 09/01/1981 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=43.1 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.19.).

Πίνακας 4. 19. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 09/01/1981

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
03/01/1981	1.18	4.00	7.00	9.00	12.60
04/01/1981	1.2	3.00	6.00	0.00	0.00
05/01/1981	1.25	21.50	1.50	0.00	0.00
06/01/1981	4.75	36.00	4.00	0.00	1.50
07/01/1981	3.06	0.00	0.00	19.00	16.00
08/01/1981	3.71	72.00	49.00	32.00	22.10
09/01/1981	43.1	74.00	54.50	22.00	11.00

Για την 13/02/2001 όπου η μοντελοποιημένη παροχή ήταν $Q=40.6 \text{ m}^3/\text{sec}$, (Πίνακας 4.20.).

Πίνακας 4. 20. Σειρά βροχοπτώσεων πριν την 13/02/2001

Ημερομηνία	Παροχή (m^3/sec)	Αγία Βαρβάρα	Προφήτης Ηλίας	Φοινικιά	Ηράκλειο
10/02/2001	2.99	32.94	0.00	0.00	0.00
11/02/2001	3.04	13.02	15.92	14.25	8.00
12/02/2001	4.05	0.00	47.15	42.20	23.70
13/02/2001	40.6	0.00	102.85	92.06	51.70

4.2.4: Υπολογισμός ωριαίας παροχής

Αφού παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής σχεδιασμού για περίοδο 50 ετών σε ημερήσιο βήμα, σειρά έχει ο προσδιορισμός της ωριαίας πλημμυρικής παροχής με περίοδο επαναφοράς 50 ετών. Για το προσδιορισμό της ωριαίας παροχής είναι αναγκαίες παρατηρήσεις από ακραία γεγονότα βροχόπτωσης μεγάλης διάρκειας, που συνέβησαν στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Γιόφυρου και κατέληξαν σε πλημμύρα. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί και ο σταθμός μέτρησης παροχής που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική δεν είχαν καταγεγραμμένα ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης και παροχής για να αναλυθούν και να βρεθεί η συσχέτιση ωριαίας αιχμής παροχής με την ημερήσια.

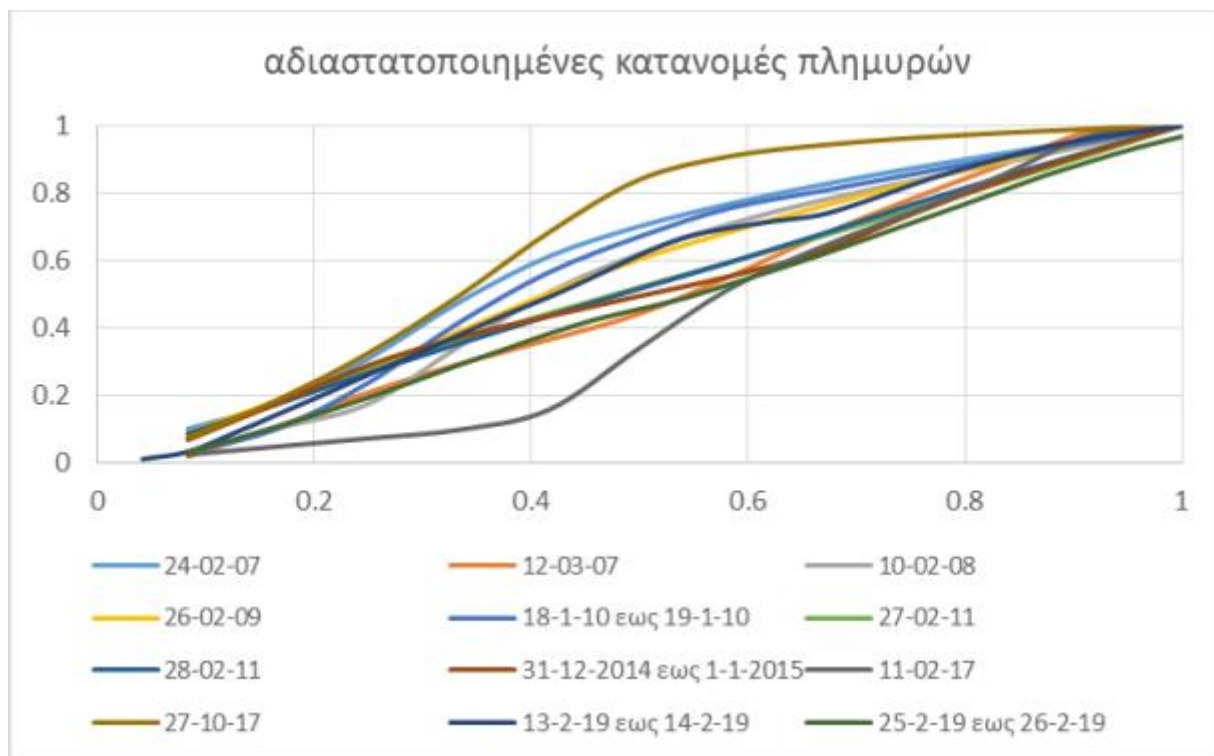
Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι υπολογισμοί της υδραυλικής ανάλυσης του Ερευνητικού Έργου για την Ολοκληρωμένη Παρέμβαση Προστασίας του Παρόχθιου Δάσους για την Αντιπλημμυρική Προστασία του Ποταμού Κοιλιάρη στο πλαίσιο της προγραμματικής σύμβασης του άρθρου 100 του Ν. 3852/2010 μεταξύ της Περιφέρειας Κρήτης, του Δήμου Αποκορώνου και του Πολυτεχνείου Κρήτης με Επιστημονικό Υπεύθυνο τον Καθηγητή κ. Ν. Νικολαΐδη.

Στην συγκεκριμένη μελέτη, εξετάστηκαν τα 12 πιο σημαντικά πλημμυρικά επεισόδια που παρατηρήθηκαν στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη κατά τη διάρκεια της περιόδου 2007-2019 από τα οποία δυο είχαν διάρκεια 24 ωρών ενώ τα υπόλοιπα δέκα είχαν διάρκεια 12 ωρών. Παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των επεισοδίων όπως η ημερομηνία που πραγματοποιήθηκαν, η διάρκεια, η μέγιστη ωριαία παροχή, η συνολική ποσότητα νερού και ο λόγος της ποσότητας ύδατος που πέρασε κατά τη διάρκεια της δυσμενέστερης ώρας (μέγιστη παροχή) προς τη συνολική ποσότητα νερού που πέρασε κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, (Πίνακας 4.21.).

Πίνακας 4. 21. Χαρακτηριστικά των πλημμυρών στην λεκάνη του ποταμού Κουλιάρη για τη περίοδο 2007-2019 (Πηγή: Ερευνητικό Έργο για την Ολοκληρωμένη Παρέμβαση Προστασίας του Παρόχθιου Δάσους για την Αντιπλημμυρική Προστασία του Ποταμού Κουλιάρη)

A/A	Ημερομηνία	Διάρκεια (hr)	Μέγιστη ωριαία παροχή (m ³ /sec)	Μέγιστη ωριαία παροχή/ συνολική παροχή	Κυβικά νερού κατά τη διάρκεια πλημμύρας (m ³)
1	24/02/2007	12	92.9	12.2 %	2.75×10 ⁶
2	12/03/2007	12	80.6	16.7 %	1.74×10 ⁶
3	10/02/2008	12	45.3	17.0 %	9.60×10 ⁵
4	26/02/2009	12	70.9	11.5 %	2.23×10 ⁶
5	18-19/01/2010	12	58.1	17.8 %	1.17×10 ⁶
6	27/02/2011	12	47.0	9.6 %	1.76×10 ⁶
7	28/02/2011	12	46.9	9.2 %	1.84×10 ⁶
8	31/12/2014-01/01/2015	12	60.5	11.2 %	1.95×10 ⁶
9	11/02/2017	12	80.5	18.3 %	1.58×10 ⁶
10	27/10/2017	12	115.6	19.0 %	2.20×10 ⁶
11	13-14/02/2019	24	136.6	6.4 %	7.71×10 ⁶
12	25-26/02/2019	24	140.3	4.9 %	1.03×10 ⁷

Για λόγους σύγκρισης, οι αδιαστατοποιημένες κατανομές των πλημμυρών παρουσιάζονται γραφικά στο γράφημα 4.23.



Γράφημα 4. 23 . Αδιαστατοποιημένες κατανομές πλημμυρικών επεισοδίων για την περίοδο 2007-2019 (Πηγή: Ερευνητικό Έργο για την Ολοκληρωμένη Παρέμβαση Προστασίας του Παρόχθιου Δάσους για την Αντιπλημμυρική Προστασία του Ποταμού Κοιλιάρη)

Σύμφωνα με το γράφημα και τον πίνακα, η σχέση μέγιστης ωριαίας αιχμής προς την συνολική παροχή αναλύθηκε για όλα τα πλημμυρικά επεισόδια και χρησιμοποιήθηκε αυτή που παρουσίασε τον μεγαλύτερο λόγο της μέγιστης ωριαίας παροχής προς τη συνολική παροχή. Δηλαδή αυτή που έχει την εντονότερη κλίση στο διάγραμμα. Για τον λόγο αυτό ως πλημμύρα σχεδιασμού επιλέχθηκε η πλημμύρα που πραγματοποιήθηκε στις 27/10/2017. Η ημερήσια παροχή με περίοδο επαναφοράς $T=50$, που είχε υπολογιστεί στην μελέτη ίση με $Q=55.45 \text{ m}^3/\text{sec}$, μετατράπηκε σε ωριαία χρησιμοποιώντας την κατανομή του πλημμυρικού επεισοδίου στις 27/10/2017, και η μέγιστη ωριαία παροχή προέκυψε ίση με $127.5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η ωριαία πλημμυρική παροχή δηλαδή, προκύπτει από την αντίστοιχη ημερήσια, όταν αυτή πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή ίσο με 2.3.

Έτσι, κάνοντας την παραδοχή ότι και στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου, υπάρχει έντονη πιθανότητα εμφάνισης καταιγίδας ίδιας έντασης με αυτή που εμφανίστηκε στον ποταμό Κοιλιάρη, λαμβάνεται ο συντελεστής 2.3 για τον υπολογισμό της ωριαίας πλημμυρικής παροχής. Η ανάλυση αυτή είναι ενδεικτική και είναι σημαντικό να γίνονται μετρήσεις παροχής μεγάλης συχνότητας στον ποταμό Γιόφυρο για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την αντίστοιχη πλημμυρική αιχμή που αντιπροσωπεύει την λεκάνη απορροής. Επιπλέον, για να ελεγχθεί η μεταβλητότητα των επιπτώσεων των πλημμυρικών φαινομένων, έγινε προσομοίωση του μοντέλου με διαφορετικές παροχές αιχμής, (Ανάλυση Ευαισθησίας).

Στην περίπτωση του ποταμού Γιόφυρου, έπειτα από την υδρολογική ανάλυση και μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής, η ημερήσια πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς 50 ετών υπολογίστηκε ίση με $Q=69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$. Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή, υπολογίζεται η ωριαία πλημμυρική παροχή με περίοδο επαναφοράς 50 ετών ίση με **$Q=159.3 \text{ m}^3/\text{sec}$** .

Η συγκεκριμένη παροχή θα εφαρμοστεί στην προσομοίωση στο μοντέλο HEC-RAS.

Για λόγους σύγκρισης και παρατήρησης διαφορετικών παροχών στον ποταμό, οι παροχές που θα εισαχθούν θα εκτείνονται στα εύρη από $69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$ μέχρι τα $159.3 \text{ m}^3/\text{sec}$. Πιο αναλυτικά θα μελετηθούν οι παρακάτω τιμές:

$$Q \approx 70 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$Q \approx 1.5 \times 70 \text{ m}^3/\text{sec} = 105 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$Q \approx 2 \times 70 \text{ m}^3/\text{sec} = 140 \text{ m}^3/\text{sec}$$

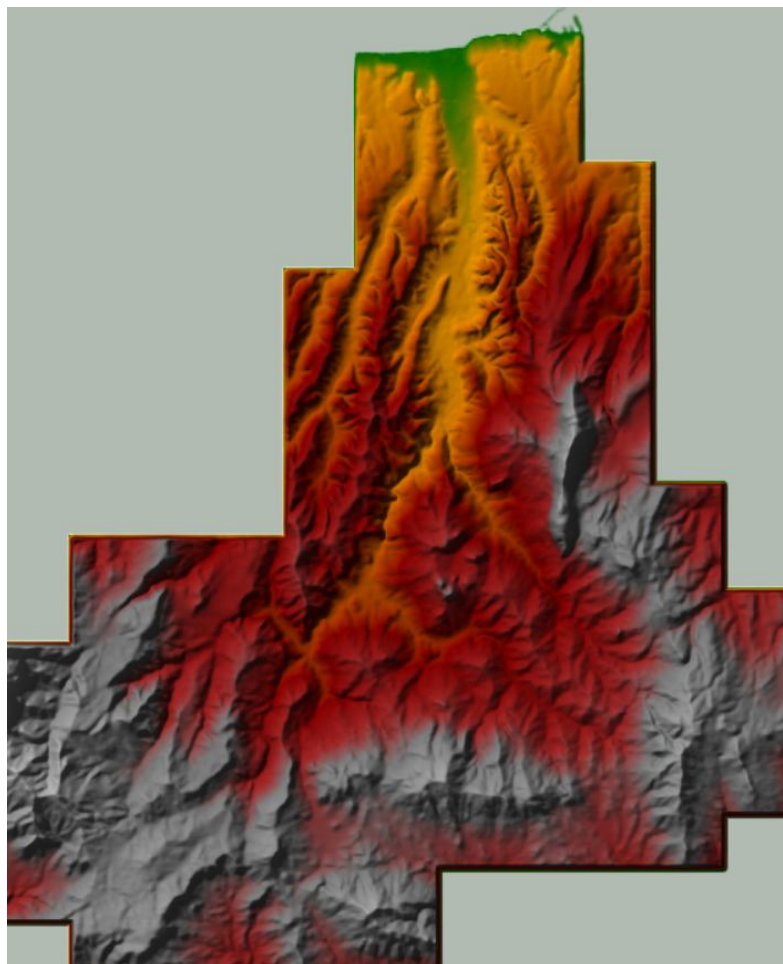
$$Q \approx 2.3 \times 70 \text{ m}^3/\text{sec} = 160 \text{ m}^3/\text{sec}$$

4.3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ HEC-RAS

4.3.1: Μεθοδολογία και εισαγωγή δεδομένων στο HEC-RAS

- Εύρεση ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM)

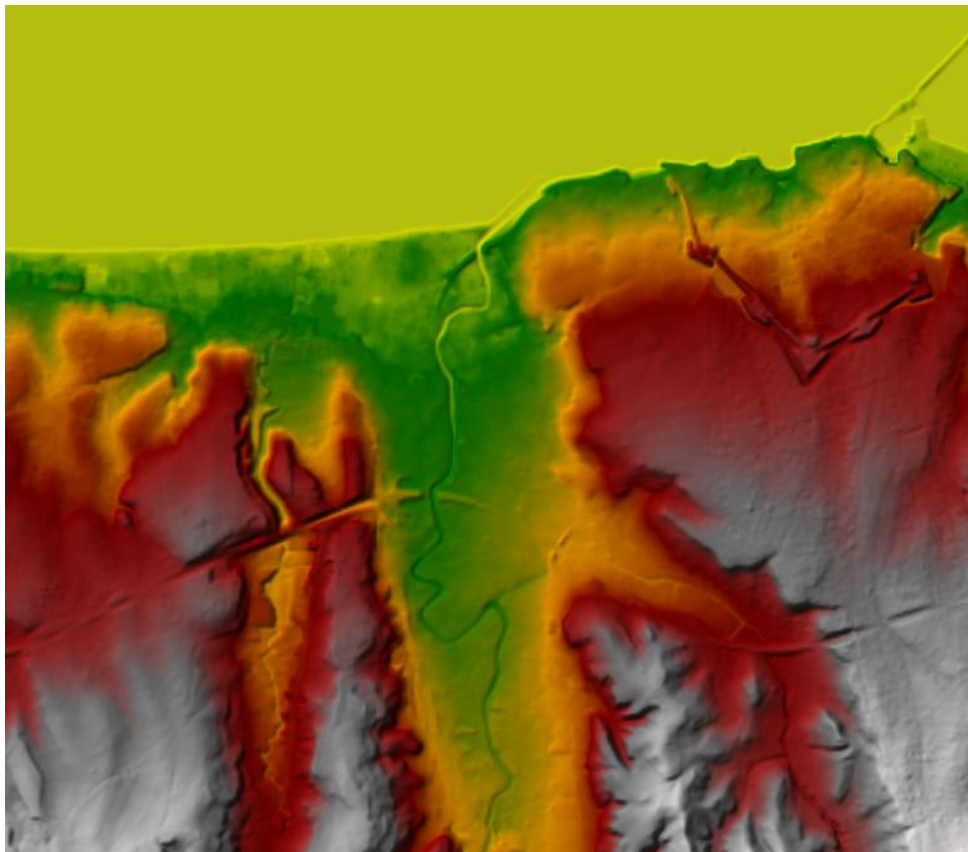
Ένα πρόβλημα που έπρεπε να ξεπεραστεί ήταν η εύρεση ενός καινούριου, πιο αναλυτικού DEM καθώς αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση του SWAT+ ήταν ανάλυσης 25×25 m. Έτσι, κατά τον σχεδιασμό της κύριας κοίτης του ποταμού και των οχθών, θα εμφανιζόταν πως βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Το ίδιο φαινόμενο θα συνέβαινε και στα σημεία του αστικού ιστού που θα μελετιούνταν, δηλαδή θα εμφάνιζε πως κάποιο σημείο ενός δρόμου, θα βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο με την κοίτη του ποταμού. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα και να αποδοθεί η πραγματική γεωμορφολογία του εδάφους στο Ηράκλειο όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, έγινε αίτημα προς την Διεύθυνση Προϊόντων και Υπηρεσιών του Ελληνικού Κτηματολογίου για χορήγηση γεωχωρικών δεδομένων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Έτσι, μετά την αποδοχή του αιτήματος, λήφθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM με ανάλυση pixel 2×2 m σε μορφότυπο αρχείου .tif το οποίο παρήχθη στα πλαίσια του έργου LSO25 (φωτοληψία 2014-2016) και καλύπτει τον Νομό Ηρακλείου, (Σχήμα 4.20.).



Σχήμα 4. 20. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επικεντρωμένο στην λεκάνη απορροής ποταμού Γιόφυρου (Πηγή δεδομένων: Ν.Π.Δ.Δ. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, ΕΠΨΣ 2007-13, ΕΠΑΝΕΚ2014-20)

Κατά την παραλαβή του αρχείου από το Ελληνικό Κτηματολόγιο, διαπιστώθηκε ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Νομού Ηρακλείου, είχε χωριστεί σε 995 μικρότερα .tif files για τον πιο αποτελεσματικό διαμοιρασμό του και χωρίς να χαθεί η λεπτομέρεια που προσέφερε. Έτσι, τα 995 .tif files, έπρεπε να ενωθούν για να παραχθεί ολοκληρωμένος ο ψηφιακός χάρτης. Η συγχώνευση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ελεύθερου λογισμικού QGIS.

Σε πρώτη φάση ενώθηκαν τα .tif files για να σχηματιστεί η λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου και δημιουργήθηκε ο ψηφιακός χάρτης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σε δεύτερη φάση, ενώθηκαν τα .tif files για να σχηματιστεί η περιοχή όπου εκβάλει ο ποταμός. Η περιοχή αυτή εμπίπτει στον δυτικό αστικό ιστό της πόλης όπου υπάρχουν κατοικίες, επιχειρήσεις, αποθήκες και κεντρικοί δρόμοι με μεγάλη κυκλοφορία όπως ο ΒΟΑΚ. Σε αυτό το κομμάτι του ποταμού θα γίνει και η υδραυλική ανάλυση στο HEC-RAS, οπότε θεωρήθηκε πρακτικό να δημιουργηθεί ένα DEM που να επικεντρώνεται σε αυτό το σημείο, ώστε να μην υπερφορτωθεί το πρόγραμμα με ένα μεγάλο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Το DEM της εκβολής του ποταμού στην πόλη παρουσιάζεται στο σχήμα 4.21.



Σχήμα 4. 21. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους επικεντρωμένο στην εκβολή του ποταμού Γιόφυρου (Πηγή δεδομένων: Ν.Π.Δ.Δ. ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, ΕΠΨΣ 2007-13, ΕΠΑΝΕΚ2014-20)

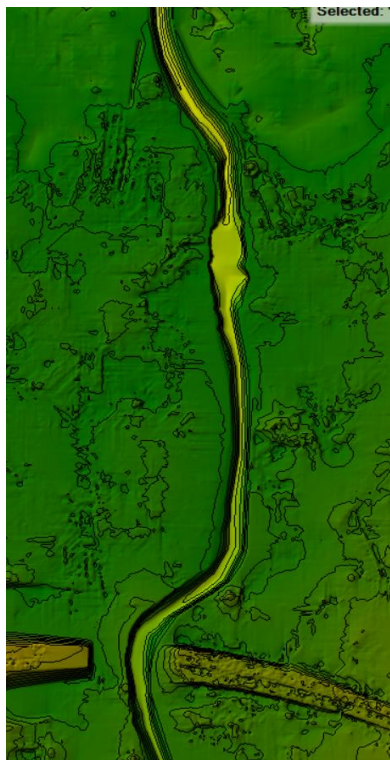
- Εύρεση Τοπογραφικών χαρτών του ποταμού.

Με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 2x2 m έγινε μια πρώτη δοκιμαστική εφαρμογή στο HEC-RAS για τον έλεγχο της αποτύπωσης της γεωμορφολογίας του εδάφους. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, παρ' όλα αυτά, παρατηρώντας την γεωμετρία του ποταμού, διαπιστώθηκε ότι έχει σημαντικές αποκλίσεις από το πραγματικό εδαφικό υπόβαθρο. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία έντονης βλάστησης όπως καλάμια και διαφορά φυτά, μέσα στον ποταμό κατά την διάρκεια της φωτοληψίας του Ελληνικού Κτηματολογίου, τα οποία δεν επιτρέπουν να αποτυπωθεί ορθά η υψομετρική ανάλυση. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, αναζητήθηκε μια πρόσφατη τοπογραφική μελέτη της κοίτης του ποταμού. Με αυτό τον σκοπό, έγινε αίτημα προς την Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Π.Ε. Ηρακλείου, του τμήματος Δομών Περιβάλλοντος της Περιφέρειας Κρήτης, για χορήγηση των πιο πρόσφατων τοπογραφικών μελετών που έγιναν στα πλαίσια της οριοθέτησης και διευθέτησης του ποταμού Γιόφυρου για την ΜΠΕ της ανακατασκευής του ΒΟΑΚ. Η Διεύθυνση ενέκρινε το αίτημα χορήγησης για την Διπλωματική Εργασία.

Για την δημιουργία της βαθυμετρίας του ποταμού, αρχικά μεταφέρθηκαν οι τοπογραφικοί χάρτες από μορφή PDF στο περιβάλλον Autocad για την δημιουργία ενός ενιαίου σχεδίου. Στην συνέχεια, στο πρόγραμμα HEC-RAS φορτώθηκε το DEM της πόλης του Ηρακλείου και σχεδιάστηκε ο ποταμός, πάνω στον οποίο σχεδιάστηκαν αρκετές διατομές κατά την διεύθυνση του. Οι θέσεις των διατομών αυτών μεταφέρθηκαν στο Autocad όπου εντοπίστηκε η γεωμετρία της κάθε διατομής κατά μήκος του ποταμού. Οι τιμές αυτές σημειώθηκαν και συνέχισε η επεξεργασία και εισαγωγή τους στο HEC-RAS για την δημιουργία της βαθυμετρίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το DEM πριν (Σχήμα 4.22.) την επεξεργασία της βαθυμετρίας και μετά (Σχήμα 4.23.) από αυτήν.



Σχήμα 4. 22. Πριν την επεξεργασία



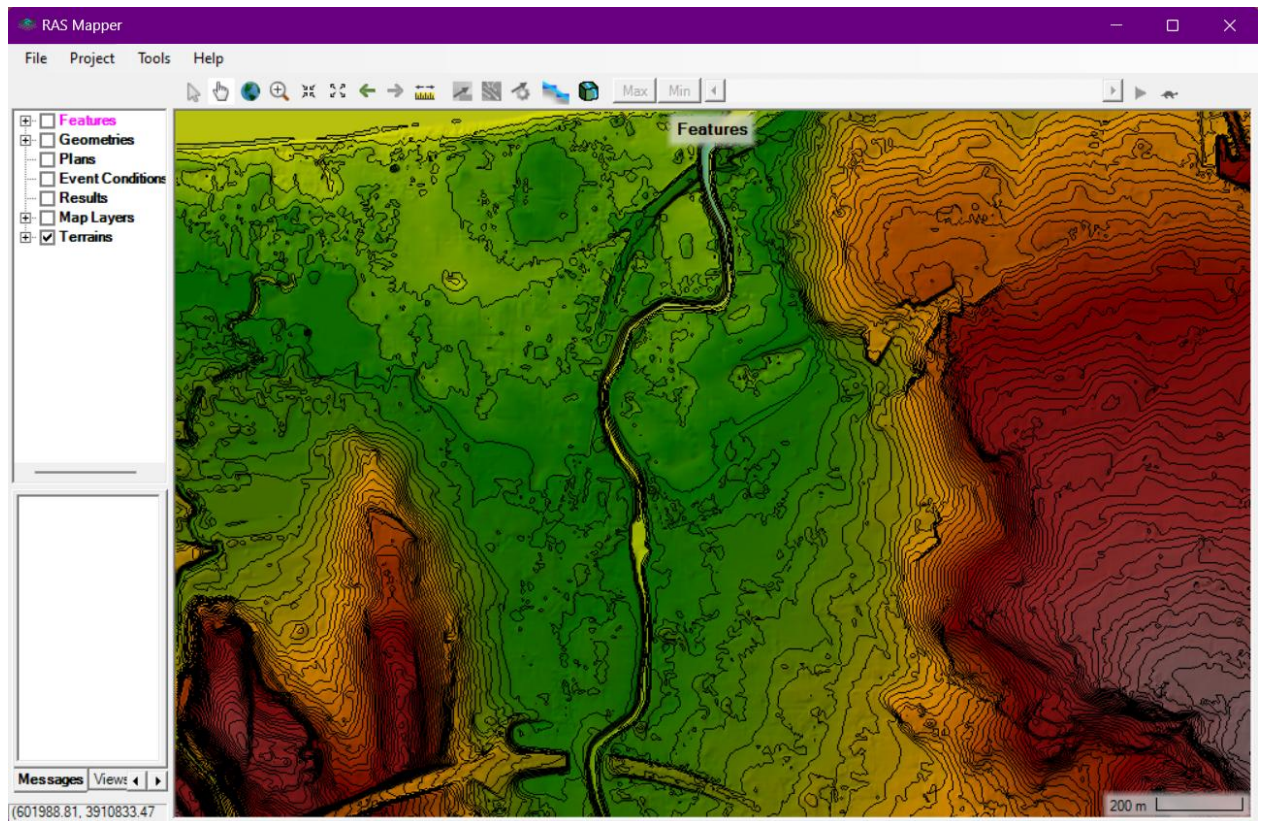
Σχήμα 4. 23. Μετά την επεξεργασία

Έχοντας ένα ικανοποιητικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους στο οποίο αποτυπώνεται όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά η γεωμορφολογία της ευρύτερης περιοχής αλλά και του ίδιου του ποταμού, γίνεται δυνατή η εκκίνηση της ανάλυσης στο HEC-RAS. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Εισαγωγή DEM και λοιπών δεδομένων εδάφους
- Γεωμετρία και διατομές
- Υδραυλική επίλυση
- Αποτελέσματα

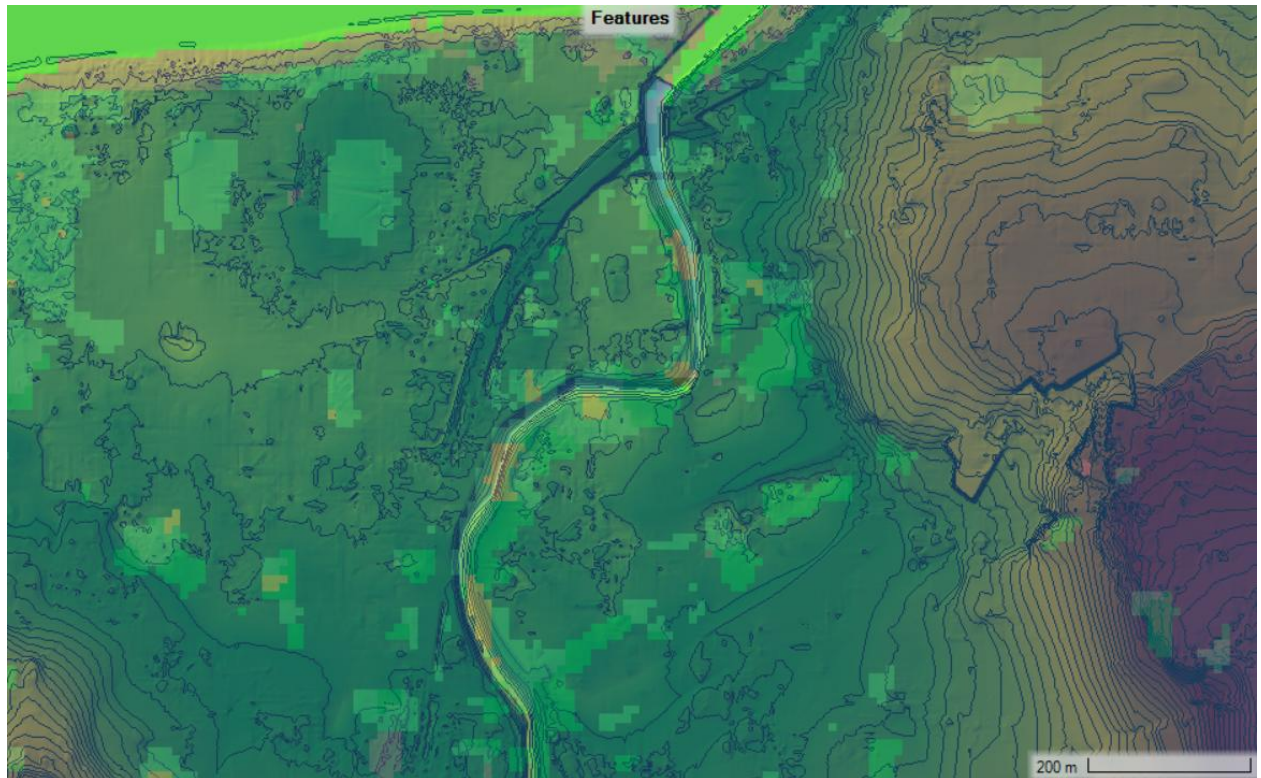
Εισαγωγή DEM και λοιπών δεδομένων εδάφους.

Αρχικά, εισάγεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αφού έχει επεξεργαστεί και αποτυπώνεται η βαθυμετρία του ποταμού, (Σχήμα 4.24.).



Σχήμα 4. 24. Εμφάνιση DEM Ηρακλείου στο RAS Mapper

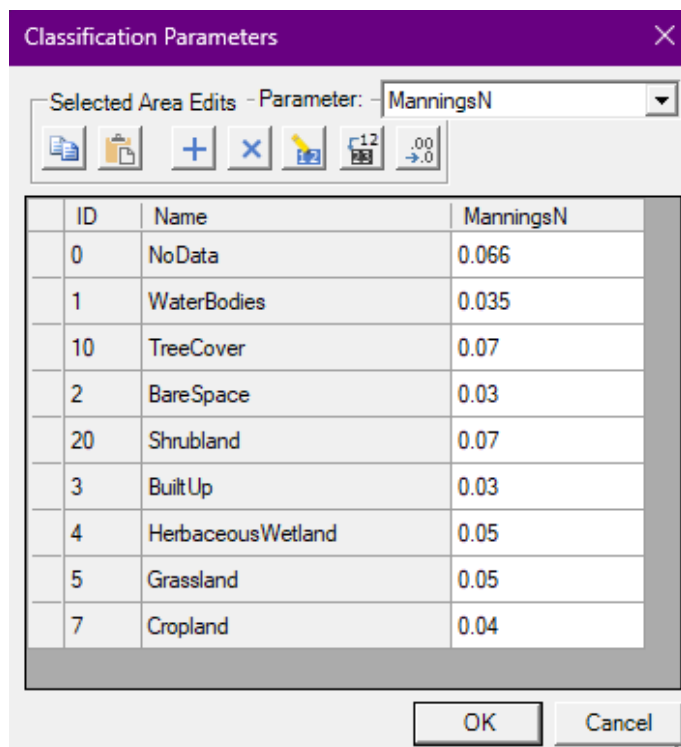
Στην συνέχεια, εισάγεται χάρτης εδαφικής κάλυψης (Land Cover Layer), ο οποίος είναι χρήσιμος για την υδραυλική επίλυση καθώς μέσω αυτού θα οριστούν οι τιμές Manning για κάθε σημείο του σχεδίου. Ο χάρτης αυτός εντοπίζεται στην ιστοσελίδα esa-worldcover.org και παρέχεται χωρίς χρέωση, (Σχήμα 4.25.).



Σχήμα 4. 25. Land Cover Layer (ESA WorldCover 2021 v200)

Ο χάρτης δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την τιμή Manning's για κάθε κάλυψη και είναι κάτι που θα προστεθεί σε πίνακα που θα συνδέει κάθε εδαφική κάλυψη με μια τιμή Manning's. Οι τιμές Manning's θα οριστούν συνδυαστικά από τις προτεινόμενες τιμές που παρουσιάζουν τα εγχειρίδια του προγράμματος και από το τεχνικό εγχειρίδιο του U.S. Geological Survey (Asante et al., 2008)

Έτσι με γνώμονα τις προτεινόμενες τιμές, μέσω του Edit Land Cover Data Table οι τιμές Manning's που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο παρουσιάζονται στο σχήμα 4.26.



ID	Name	ManningsN
0	NoData	0.066
1	WaterBodies	0.035
10	TreeCover	0.07
2	BareSpace	0.03
20	Shrubland	0.07
3	BuiltUp	0.03
4	HerbaceousWetland	0.05
5	Grassland	0.05
7	Cropland	0.04

Σχήμα 4. 26. Τιμές Manning's που εισάγονται στο μοντέλο

Αναφορικά με την τιμή Manning's για την κοίτη του ποταμού επιλέχθηκε η τιμή $n = 0.045$, (Chow, 1959). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί για καθαρά ρέματα ελικοειδούς τύπου τα οποία παρουσιάζουν πέτρες και βλάστηση. Η παράμετρος του συντελεστή τραχύτητας θεωρείται αρκετά σημαντική στους υπολογισμούς του HEC-RAS και επηρεάζει σε έντονο βαθμό τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, θεωρήθηκε αναγκαία η ανάλυση ευαισθησίας της τιμής Manning's σε ένα εύρος $\pm 50\%$ για να διαπιστωθεί η έκταση της πλημμύρας σε κάθε περίπτωση. Ο κύριος λόγος που πραγματοποιείται η ανάλυση είναι να ελεγχθούν οι περιπτώσεις που ο ποταμός παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονη βλάστηση και συσσώρευση φερτών υλικών λόγω μεταφοράς από ανάντη της λεκάνης, και περιπτώσεις όπου ο ποταμός παρουσιάζεται καθαρός από βλάστηση και από φερτά υλικά μετά από εργασίες των αρμόδιων συνεργείων του Δήμου.

Έτσι, καθορίζονται οι τιμές n Manning's για το κύριο κανάλι που μελετώνται ως:

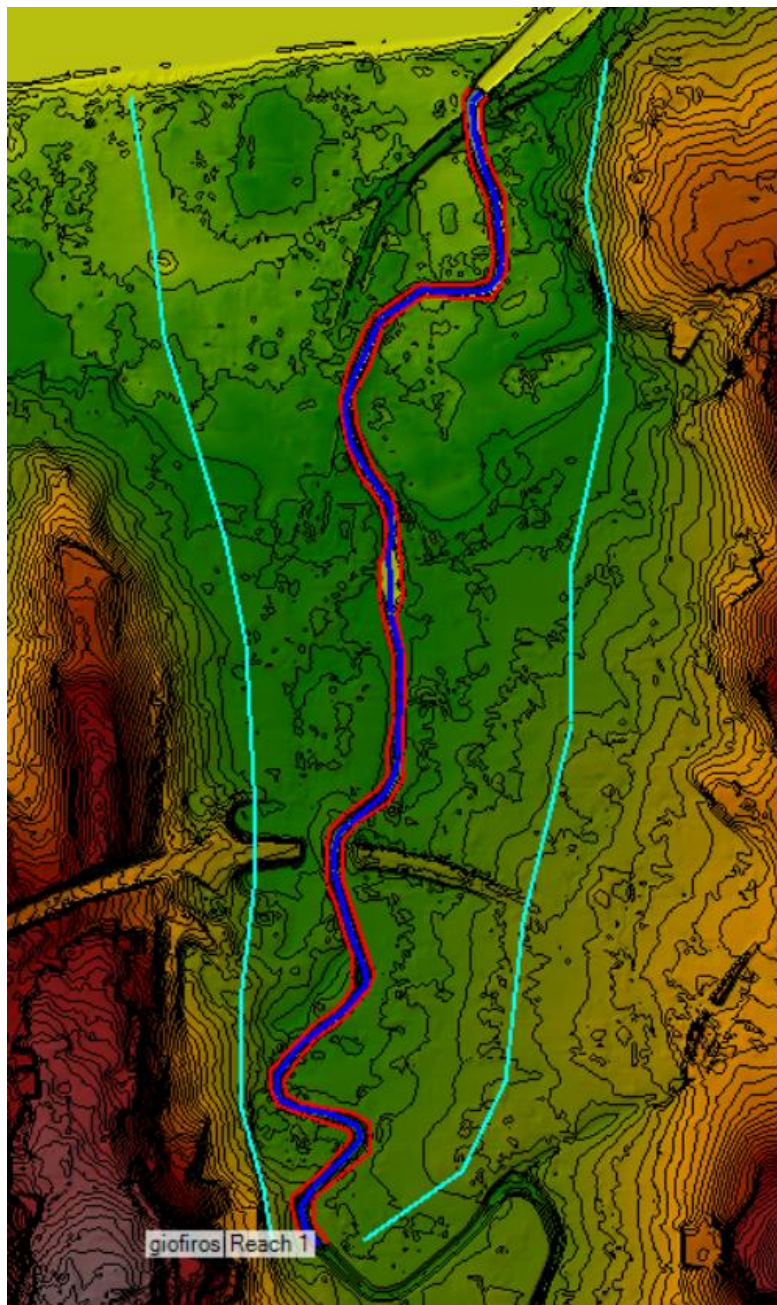
$$n_1 = 0.045$$

$$n_2 = 0.045 - (50\% \times n_1) = 0.0225$$

$$n_3 = 0.045 + (50\% \times n_1) = 0.0675$$

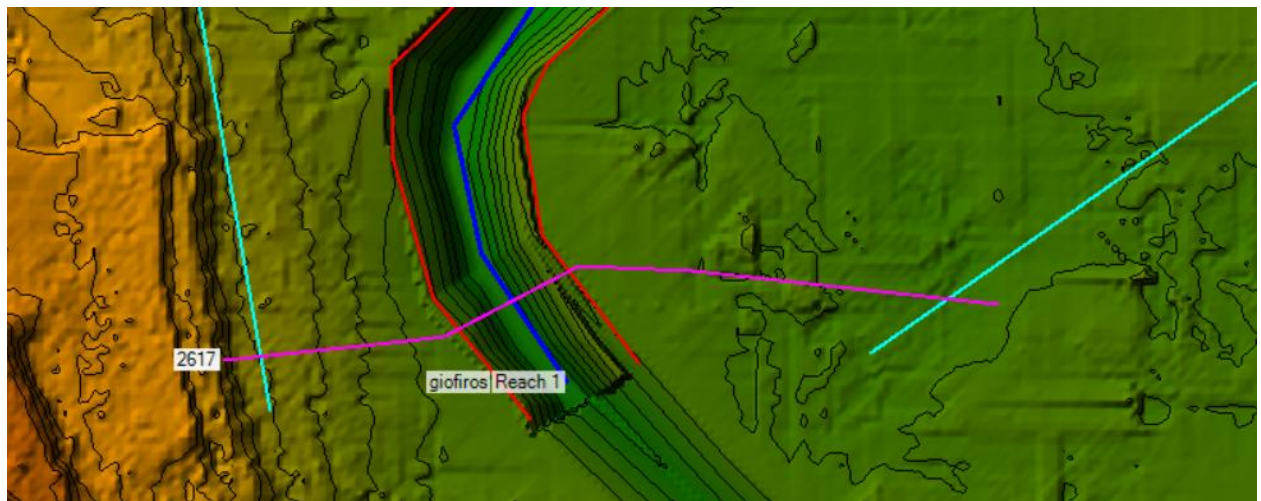
Γεωμετρία και διατομές.

Στην συνέχεια, γίνεται ο σχεδιασμός σκαριφήματος του ποταμού. Αρχικά σχεδιάζεται η κύρια κοίτη του ποταμού πάνω στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Έπειτα, σχεδιάζονται οι δύο όχθες εκατέρωθεν της κοίτης για όλο το μήκος του ποταμού. Τέλος, σχεδιάζονται οι γραμμές πορείας που αναμένεται να έχει η πλημμύρα εκατέρωθεν του ποταμού, (Σχήμα 4.27.).



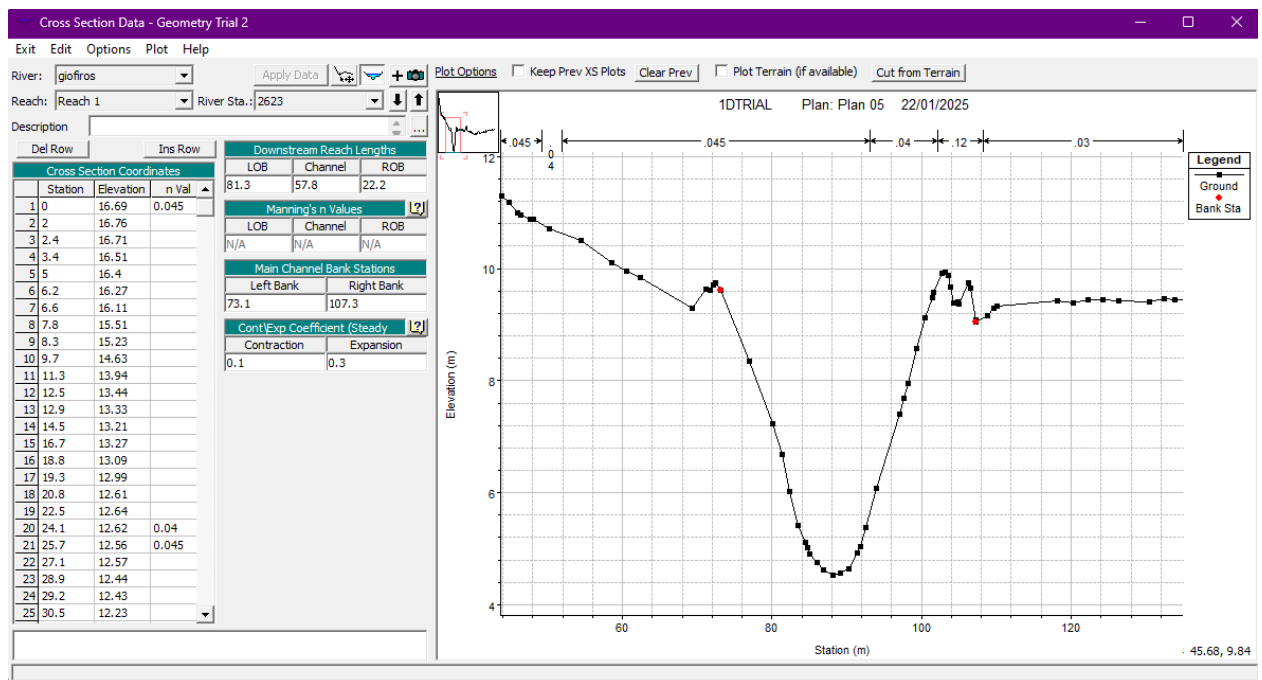
Σχήμα 4. 27. Πλήρες σχέδιο ποταμού

Στην συνέχεια, σχεδιάζονται διατομές κάθετες στις γραμμές ροής οι οποίες περιγράφουν την γεωμετρία του ποταμού. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται ξεκινώντας από τα αριστερά και συμπεριλαμβάνοντας όλες τις γραμμές του σκαριφήματος του ποταμού, (Σχήμα 4.28.).



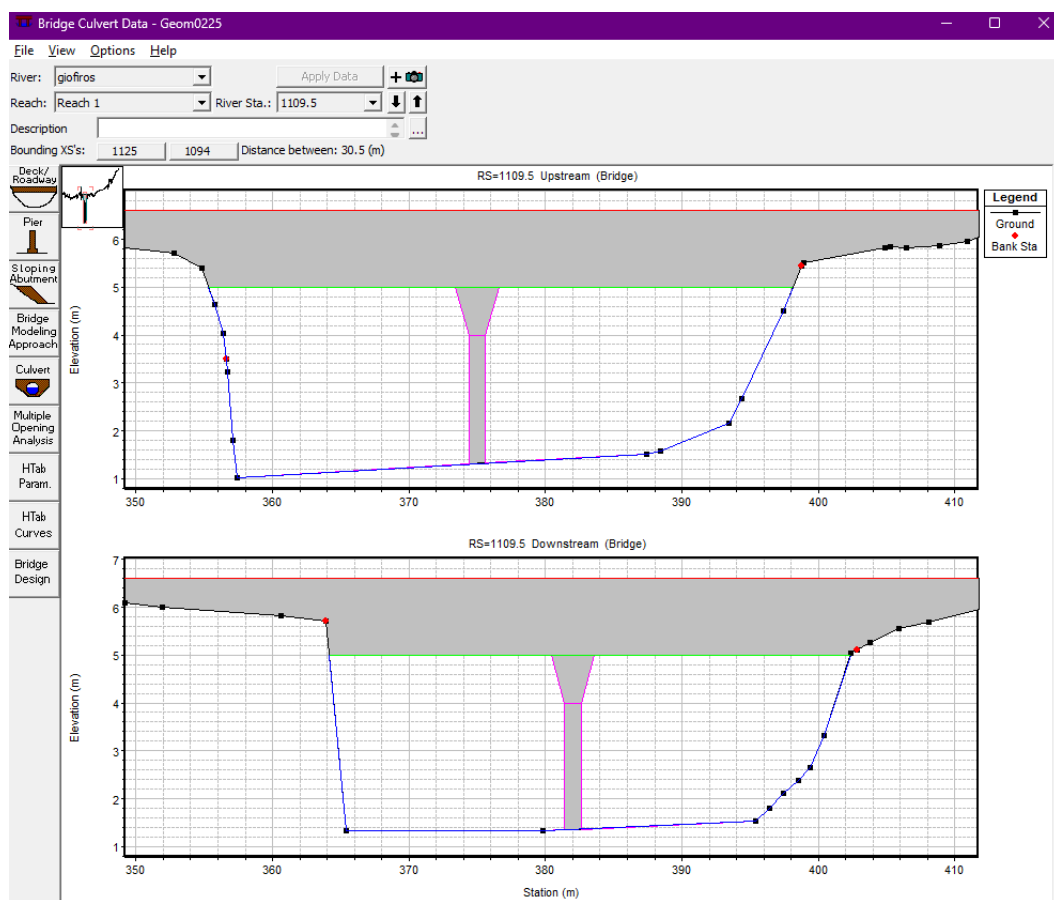
Σχήμα 4. 28. Σχεδιασμός Cross Section (μωβ γραμμή)

Στο Σχήμα 4.29. παρουσιάζεται ενδεικτικά μια από τις 47 διατομές που έγιναν.



Σχήμα 4. 29. Γεωμετρική περιγραφή διατομής υδατορεύματος

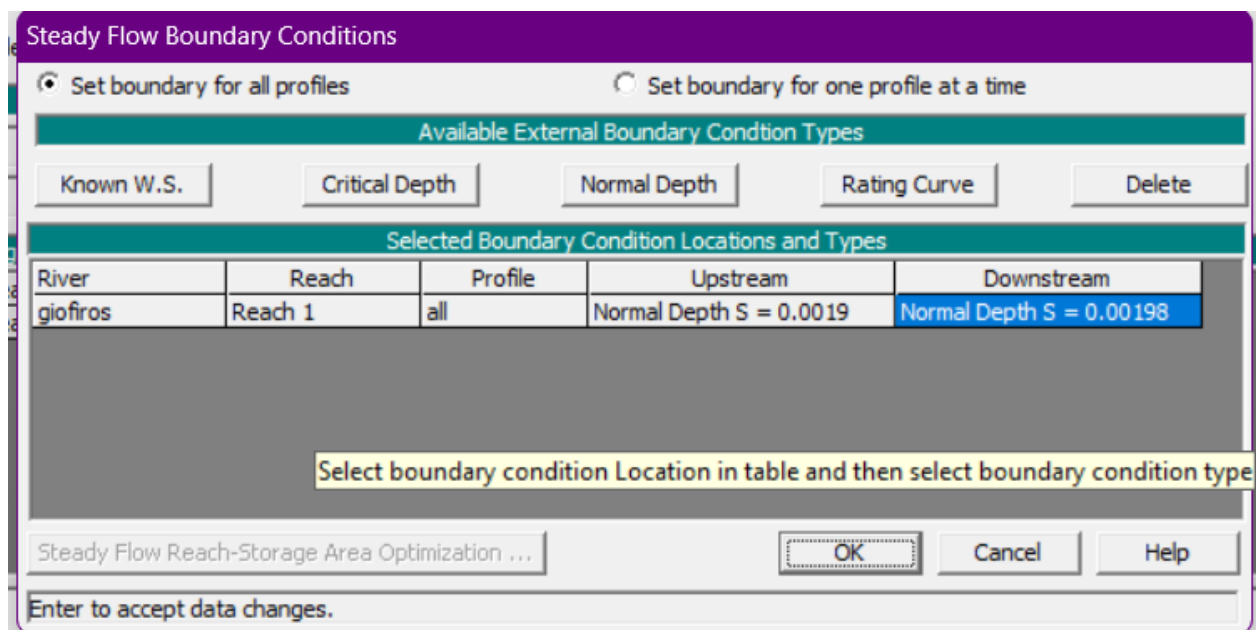
Το τελευταίο κομμάτι της Γεωμετρίας που θα πρέπει να προστεθεί είναι τα τεχνικά έργα που βρίσκονται κατά το μήκος του ποταμού. Τα μοναδικά τεχνικά έργα που παρουσιάζονται στην περιοχή που μοντελοποιείται, είναι οι γέφυρες. Σύμφωνα με τα τοπογραφικά σχέδια του ποταμού αλλά και του Παραρτήματος 8 του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης: Τοπογραφικές αποτυπώσεις τεχνικών έργων-διατομών, οι γέφυρες που εμφανίζονται είναι σε σύνολο οκτώ (8). Μέσω των τοπογραφικών αποτυπώσεων εντοπίστηκαν σημαντικά στοιχεία όπως οι διαστάσεις μήκους και πλάτους, το πάχος φορέα τεχνικού και το συνολικό υψόμετρο τους. Έχοντας εισάγει στο μοντέλο όλα τα παραπάνω δεδομένα, γίνεται αντιληπτό ότι έγινε προσπάθεια απεικόνισης της πραγματικότητας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, (Σχήμα 4.30.).



Σχήμα 4. 30. Διατομή γέφυρας με δοκό στο κέντρο

Υδραυλική Επίλυση

Με την ολοκλήρωση της αποτύπωσης της περιοχής, του σχεδιασμού του ποταμού και της γεωμετρίας των διατομών, σειρά έχει η υδραυλική επίλυση. Εξετάσθηκαν συνολικά τέσσερα σενάρια (profiles) με βάση τις πλημμυρικές παροχές που αναφέρθηκαν στην υδρολογική μελέτη. Οι τιμές που εισάχθηκαν στη μοντελοποίηση είναι οι εξής $Q_1=70 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_2=105 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_3=140 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $Q_4=160 \text{ m}^3/\text{sec}$. Σε αυτό το στάδιο ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες σε κανονικό βάθος και κλίση ανάντη ίση με 0.0019, ενώ η κλίση κατάντη να είναι ίση με 0.00198, (Σχήμα 4.31.).



Σχήμα 4. 31. Ορισμός οριακών συνθηκών

Flow Change Location				Profile Names at			
	River	Reach	RS	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4
1	giofiros	Reach 1	2623	70	105	140	160

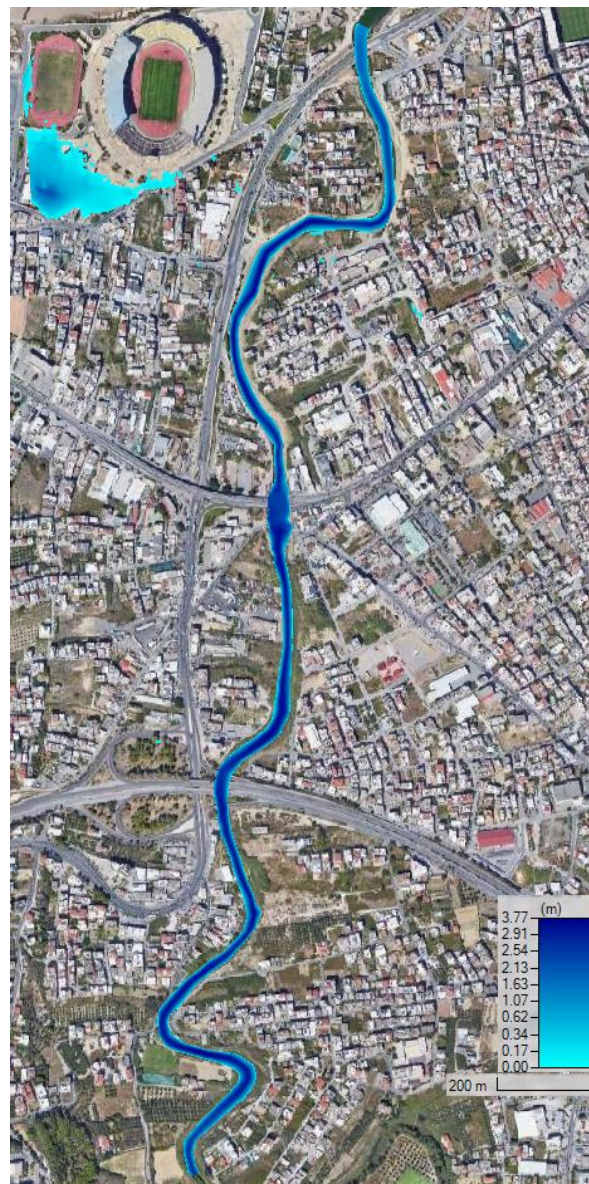
Σχήμα 4. 32. Ορισμός Παροχών προς μελέτη

Οι προσθήκες των παροχών αποθηκεύονται στο αρχείο ροής, και χρησιμοποιούνται στην καρτέλα ανάλυσης για να γίνουν οι υδραυλικοί υπολογισμοί. Επιλέγεται μόνιμη και μικτή ροή και το πρόγραμμα ξεκινά την μοντελοποίηση. Με την επιτυχή έκβαση της προσομοίωσης γίνεται δυνατή η παρουσίαση της πορείας της πλημμύρας στο RAS Mapper.

4.3.2: Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS

Πλημμυρική παροχή $Q=70 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.045$

Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή υπολογίστηκε από την υδρολογική μελέτη στο SWAT+ και είναι η παροχή της πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς 50 έτη. Ο στόχος είναι να εξετασθεί σε ποια σημεία η στάθμη του νερού υπερβαίνει τις όχθες του ποταμού και υπερχειλίζει με αποτέλεσμα να εισέρχεται στην αστική περιοχή. Παρακάτω παρουσιάζεται η ροή του νερού στον ποταμό αλλά και στην πόλη με την βοήθεια αεροφωτογραφιών των δορυφόρων της Google. Επιπλέον, δίνεται και ο πίνακας των υδραυλικών στοιχείων των διατομών, (Σχήμα 4.33. και Σχήμα 4.34.).



Σχήμα 4. 33. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=70 \text{ m}^3/\text{sec}$

Profile Output Table - Standard Table 1												
File Options Std. Tables Locations Help												Reload Data
HEC-RAS Plan: n045 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 1												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 1	70.00	4.53	7.35	6.59	7.62	0.005301	2.28	30.69	17.19	0.55
Reach 1	2565	PF 1	70.00	4.42	7.15	6.29	7.34	0.003720	1.91	36.69	21.10	0.46
Reach 1	2484	PF 1	70.00	4.28	7.00	5.84	7.10	0.002006	1.43	48.94	27.66	0.34
Reach 1	2389	PF 1	70.00	3.74	6.86	5.41	6.94	0.001376	1.20	58.24	32.30	0.29
Reach 1	2270	PF 1	70.00	2.93	6.71	4.81	6.80	0.001016	1.26	55.54	21.64	0.25
Reach 1	2196	PF 1	70.00	3.52	6.56	5.21	6.69	0.001910	1.59	44.11	19.49	0.34
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 1	70.00	3.52	6.53	5.21	6.67	0.002123	1.67	41.90	18.40	0.35
Reach 1	2122	PF 1	70.00	3.07	6.44	4.93	6.54	0.001598	1.42	49.25	23.02	0.31
Reach 1	2007	PF 1	70.00	2.93	6.00	5.07	6.24	0.004287	2.18	32.08	15.93	0.49
Reach 1	1913	PF 1	70.00	2.50	5.88	4.49	5.97	0.001571	1.29	54.08	29.99	0.31
Reach 1	1795	PF 1	70.00	2.21	5.51	4.47	5.69	0.003417	1.91	36.65	19.35	0.44
Reach 1	1763	PF 1	70.00	2.24	5.45	4.23	5.59	0.002334	1.64	42.77	21.51	0.37
Reach 1	1725	PF 1	70.00	2.21	5.41	3.76	5.51	0.001305	1.40	49.91	18.76	0.27
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 1	70.00	2.27	5.40	3.83	5.50	0.001306	1.38	50.70	20.26	0.28
Reach 1	1708	PF 1	70.00	2.34	5.40	3.85	5.49	0.001266	1.34	52.41	22.10	0.28
Reach 1	1699	PF 1	70.00	2.40	5.39	3.85	5.48	0.001225	1.27	55.01	24.99	0.27
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 1	70.00	2.51	5.36	3.90	5.44	0.001248	1.24	56.50	27.15	0.27
Reach 1	1664	PF 1	70.00	2.53	5.34	3.95	5.43	0.001432	1.30	53.67	26.43	0.29
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 1	70.00	2.53	5.32	3.99	5.42	0.001667	1.39	50.38	24.91	0.31
Reach 1	1573	PF 1	70.00	1.72	5.26	3.33	5.31	0.000731	1.02	68.92	30.08	0.21
Reach 1	1438	PF 1	70.00	1.67	5.06	3.65	5.16	0.001718	1.43	49.00	24.10	0.32
Reach 1	1323	PF 1	70.00	1.30	4.62	3.79	4.85	0.004512	2.11	33.13	18.39	0.50
Reach 1	1209	PF 1	70.00	0.99	4.43	2.84	4.54	0.001524	1.46	47.84	20.19	0.30
Reach 1	1159	PF 1	70.00	1.07	4.47	2.24	4.49	0.000226	0.62	112.38	42.42	0.12
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 1	70.00	1.03	3.86	1.99	3.88	0.000283	0.65	108.25	45.91	0.13
Reach 1	1133	PF 1	70.00	1.02	3.84	2.13	3.87	0.000472	0.80	87.38	38.29	0.17
Reach 1	1125	PF 1	70.00	1.01	3.84	2.07	3.87	0.000395	0.75	93.19	39.83	0.16
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 1	70.00	1.32	3.81	2.19	3.85	0.000548	0.86	81.77	36.41	0.18
Reach 1	1045	PF 1	70.00	0.48	3.57	2.55	3.77	0.003506	1.98	35.29	17.73	0.45
Reach 1	958	PF 1	70.00	0.58	3.44	2.22	3.53	0.001771	1.37	51.23	28.26	0.32
Reach 1	877	PF 1	70.00	-0.21	3.24	1.87	3.37	0.002159	1.62	43.22	20.38	0.36
Reach 1	741	PF 1	70.00	-0.54	2.89	1.83	3.04	0.002775	1.70	41.38	26.11	0.40
Reach 1	606	PF 1	70.00	-0.94	2.86	1.27	2.88	0.000374	0.66	130.97	168.12	0.15
Reach 1	545	PF 1	70.00	-1.04	2.67	1.30	2.80	0.002195	1.60	44.65	42.66	0.36
Reach 1	494	PF 1	70.00	-1.37	2.60	1.04	2.70	0.001592	1.36	54.17	49.11	0.31
Reach 1	455	PF 1	70.00	-1.16	2.38	1.45	2.59	0.004064	2.03	34.76	23.36	0.48
Reach 1	411	PF 1	70.00	-0.99	2.28	1.20	2.42	0.002866	1.69	41.35	23.30	0.41
Reach 1	364	PF 1	70.00	-1.27	2.11	0.98	2.28	0.003181	1.84	38.12	19.84	0.42
Reach 1	319	PF 1	70.00	-1.06	1.69	1.30	2.04	0.008822	2.61	26.80	18.21	0.69
Reach 1	289	PF 1	70.00	-1.28	1.40	1.01	1.77	0.008973	2.69	26.03	17.11	0.70
Reach 1	249	PF 1	70.00	-1.45	1.18	0.60	1.45	0.006120	2.31	30.35	19.01	0.58
Reach 1	206	PF 1	70.00	-1.60	0.99	0.30	1.20	0.004807	2.06	34.15	23.13	0.52
Reach 1	147	PF 1	70.00	-1.75	0.69	0.06	0.91	0.005107	2.07	33.83	22.11	0.53
Reach 1	106	PF 1	70.00	-1.70	0.22	-0.01	0.60	0.011223	2.70	25.93	20.63	0.77
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 1	70.00	-1.67	0.14	-0.11	0.50	0.010736	2.64	26.52	21.12	0.75
Reach 1	68	PF 1	70.00	-1.83	0.05	-0.50	0.23	0.004857	1.90	36.89	26.67	0.52
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 1	70.00	-1.87	-0.06	-0.62	0.10	0.004467	1.78	39.24	29.35	0.49
Reach 1	5	PF 1	70.00	-1.93	-0.68	-0.68	-0.23	0.020936	2.95	23.74	26.83	1.00

Σχήμα 4. 34. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=70 \text{ m}^3/\text{sec}$

Πλημμυρική παροχή $Q=105 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.045$

Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή είναι πολλαπλασιασμένη με το 1.5 επί της παροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Ο στόχος είναι να εξετασθεί σε ποια σημεία η στάθμη του νερού υπερβαίνει τις όχθες του ποταμού και υπερχειλίζει με αποτέλεσμα να εισέρχεται στην αστική περιοχή. Παρακάτω παρουσιάζεται η ροή του νερού στον ποταμό αλλά και στην πόλη με την βοήθεια αεροφωτογραφιών των δορυφόρων της Google. Επιπλέον, δίνεται και ο πίνακας των υδραυλικών στοιχείων των διατομών, (Σχήμα 4.35. και Σχήμα 4.36.).



Σχήμα 4. 35. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=105 \text{ m}^3/\text{sec}$

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: n045 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 2												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 2	105.00	4.53	7.97	7.07	8.28	0.005123	2.49	42.21	20.19	0.55
Reach 1	2565	PF 2	105.00	4.42	7.80	6.70	8.02	0.003370	2.03	51.65	25.02	0.45
Reach 1	2484	PF 2	105.00	4.28	7.68	6.21	7.80	0.001740	1.51	69.56	32.54	0.33
Reach 1	2389	PF 2	105.00	3.74	7.58	5.82	7.66	0.001104	1.26	85.10	49.10	0.27
Reach 1	2270	PF 2	105.00	2.93	7.41	5.23	7.52	0.001139	1.47	71.31	23.76	0.27
Reach 1	2196	PF 2	105.00	3.52	7.24	5.61	7.41	0.001990	1.81	57.92	21.34	0.35
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 2	105.00	3.52	7.20	5.64	7.39	0.002230	1.92	54.75	20.83	0.37
Reach 1	2122	PF 2	105.00	3.07	7.13	5.35	7.25	0.001502	1.55	70.35	54.56	0.31
Reach 1	2007	PF 2	105.00	2.93	6.67	5.55	6.96	0.004190	2.39	44.66	24.88	0.50
Reach 1	1913	PF 2	105.00	2.50	6.62	4.91	6.71	0.001241	1.35	79.94	47.00	0.28
Reach 1	1795	PF 2	105.00	2.21	6.28	4.94	6.48	0.002836	1.98	53.02	22.97	0.42
Reach 1	1763	PF 2	105.00	2.24	6.24	4.67	6.39	0.001981	1.72	61.16	25.16	0.35
Reach 1	1725	PF 2	105.00	2.21	6.19	4.14	6.33	0.001369	1.62	64.85	19.63	0.28
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 2	105.00	2.27	6.19	4.22	6.31	0.001320	1.56	67.11	21.82	0.28
Reach 1	1708	PF 2	105.00	2.34	6.19	4.23	6.30	0.001159	1.48	72.07	28.27	0.27
Reach 1	1699	PF 2	105.00	2.40	6.19	4.22	6.28	0.001046	1.38	76.66	32.08	0.26
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 2	105.00	2.51	6.16	4.25	6.25	0.001044	1.32	79.35	29.52	0.26
Reach 1	1664	PF 2	105.00	2.53	6.15	4.30	6.24	0.001180	1.38	76.25	29.54	0.27
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 2	105.00	2.53	6.12	4.35	6.23	0.001396	1.46	72.08	29.26	0.29
Reach 1	1573	PF 2	105.00	1.72	6.08	3.69	6.14	0.000622	1.11	95.65	38.71	0.21
Reach 1	1438	PF 2	105.00	1.67	5.92	4.05	6.03	0.001208	1.48	74.48	49.16	0.28
Reach 1	1323	PF 2	105.00	1.30	5.65	4.26	5.83	0.002446	1.90	59.23	60.97	0.39
Reach 1	1209	PF 2	105.00	0.99	5.54	3.27	5.63	0.001007	1.39	81.85	54.45	0.26
Reach 1	1159	PF 2	105.00	1.07	5.57	2.48	5.59	0.000165	0.64	171.49	78.39	0.11
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 2	105.00	1.03	4.46	2.21	4.49	0.000308	0.77	136.30	46.79	0.14
Reach 1	1133	PF 2	105.00	1.02	4.44	2.37	4.48	0.000518	0.95	110.84	40.10	0.18
Reach 1	1125	PF 2	105.00	1.01	4.44	2.30	4.48	0.000428	0.89	117.52	41.30	0.17
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 2	105.00	1.32	4.40	2.44	4.46	0.000588	1.01	103.67	37.31	0.19
Reach 1	1045	PF 2	105.00	0.48	4.09	3.02	4.37	0.004199	2.33	45.07	20.21	0.50
Reach 1	958	PF 2	105.00	0.58	3.96	2.58	4.09	0.001881	1.57	67.02	31.38	0.34
Reach 1	877	PF 2	105.00	-0.21	3.70	2.32	3.90	0.002804	1.97	53.22	22.87	0.41
Reach 1	741	PF 2	105.00	-0.54	3.29	2.23	3.48	0.003424	2.00	57.46	65.04	0.45
Reach 1	606	PF 2	105.00	-0.94	3.34	1.83	3.35	0.000183	0.51	250.44	369.18	0.11
Reach 1	545	PF 2	105.00	-1.04	3.22	1.77	3.30	0.001486	1.42	109.17	247.63	0.30
Reach 1	494	PF 2	105.00	-1.37	3.18	1.50	3.24	0.000906	1.19	124.77	248.30	0.24
Reach 1	455	PF 2	105.00	-1.16	2.95	1.91	3.16	0.003636	2.11	55.89	71.10	0.46
Reach 1	411	PF 2	105.00	-0.99	2.85	1.63	3.02	0.002673	1.86	60.60	72.56	0.40
Reach 1	364	PF 2	105.00	-1.27	2.65	1.45	2.87	0.003732	2.08	51.98	59.53	0.46
Reach 1	319	PF 2	105.00	-1.06	2.18	1.72	2.61	0.008496	2.90	36.26	20.43	0.69
Reach 1	289	PF 2	105.00	-1.28	1.85	1.44	2.33	0.009451	3.07	34.18	19.05	0.73
Reach 1	249	PF 2	105.00	-1.45	1.62	1.02	1.99	0.006708	2.68	39.11	20.77	0.62
Reach 1	206	PF 2	105.00	-1.60	1.45	0.70	1.71	0.004877	2.32	46.66	32.07	0.54
Reach 1	147	PF 2	105.00	-1.75	1.14	0.45	1.42	0.005387	2.35	45.40	29.43	0.56
Reach 1	106	PF 2	105.00	-1.70	0.59	0.36	1.08	0.011852	3.10	33.85	22.71	0.81
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 2	105.00	-1.67	0.49	0.26	0.97	0.011747	3.08	34.04	22.86	0.81
Reach 1	68	PF 2	105.00	-1.83	0.41	-0.19	0.67	0.005337	2.25	46.72	27.95	0.56
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 2	105.00	-1.87	0.29	-0.33	0.52	0.004829	2.10	49.95	30.83	0.53
Reach 1	5	PF 2	105.00	-1.93	-0.39	-0.39	0.17	0.019644	3.32	31.65	28.48	1.01

Σχήμα 4. 36. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=105 \text{ m}^3/\text{sec}$

Πλημμυρική παροχή $Q=140 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.045$

Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή είναι πολλαπλασιασμένη με το 2 επί της παροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Ο στόχος είναι να εξετασθεί σε ποια σημεία η στάθμη του νερού υπερβαίνει τις όχθες του ποταμού και υπερχειλίζει με αποτέλεσμα να εισέρχεται στην αστική περιοχή. Παρακάτω παρουσιάζεται η ροή του νερού στον ποταμό αλλά και στην πόλη με την βοήθεια αεροφωτογραφιών των δορυφόρων της Google. Επιπλέον, δίνεται και ο πίνακας των υδραυλικών στοιχείων των διατομών, (Σχήμα 4.37. και Σχήμα 4.38.).



Σχήμα 4. 37. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=140 \text{ m}^3/\text{sec}$

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: n045 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 3												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 3	140.00	4.53	8.42	7.47	8.79	0.005274	2.70	52.19	32.33	0.57
Reach 1	2565	PF 3	140.00	4.42	8.27	7.05	8.51	0.003428	2.19	63.84	27.92	0.46
Reach 1	2484	PF 3	140.00	4.28	8.15	6.52	8.29	0.001754	1.64	85.49	35.53	0.34
Reach 1	2389	PF 3	140.00	3.74	8.06	6.13	8.15	0.001008	1.32	125.27	122.80	0.26
Reach 1	2270	PF 3	140.00	2.93	7.86	5.59	8.01	0.001370	1.69	85.14	57.40	0.30
Reach 1	2196	PF 3	140.00	3.52	7.65	5.96	7.87	0.002371	2.09	68.02	34.57	0.39
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 3	140.00	3.52	7.60	6.00	7.85	0.002631	2.20	64.78	28.35	0.41
Reach 1	2122	PF 3	140.00	3.07	7.57	5.70	7.69	0.001338	1.63	104.91	97.36	0.30
Reach 1	2007	PF 3	140.00	2.93	7.10	5.96	7.43	0.004283	2.57	57.67	34.86	0.51
Reach 1	1913	PF 3	140.00	2.50	7.07	5.24	7.17	0.001205	1.42	106.26	69.50	0.28
Reach 1	1795	PF 3	140.00	2.21	6.67	5.32	6.93	0.003319	2.24	62.39	25.22	0.46
Reach 1	1763	PF 3	140.00	2.24	6.63	5.03	6.82	0.002378	1.97	71.23	27.54	0.39
Reach 1	1725	PF 3	140.00	2.21	6.55	4.48	6.74	0.001896	1.93	77.46	68.70	0.34
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 3	140.00	2.27	6.55	4.54	6.72	0.001668	1.83	86.90	88.62	0.32
Reach 1	1708	PF 3	140.00	2.34	6.55	4.56	6.70	0.001437	1.74	85.17	47.90	0.31
Reach 1	1699	PF 3	140.00	2.40	6.55	4.54	6.68	0.001238	1.61	89.98	42.12	0.29
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 3	140.00	2.51	6.52	4.55	6.65	0.001261	1.56	90.01	29.84	0.29
Reach 1	1664	PF 3	140.00	2.53	6.50	4.61	6.64	0.001405	1.61	86.92	30.77	0.30
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 3	140.00	2.53	6.48	4.66	6.62	0.001620	1.69	86.53	69.33	0.32
Reach 1	1573	PF 3	140.00	1.72	6.43	4.00	6.51	0.000755	1.30	112.27	58.59	0.23
Reach 1	1438	PF 3	140.00	1.67	6.24	4.39	6.38	0.001338	1.68	99.51	98.51	0.30
Reach 1	1323	PF 3	140.00	1.30	6.04	4.62	6.20	0.002006	1.89	97.71	161.75	0.36
Reach 1	1209	PF 3	140.00	0.99	5.91	3.63	6.02	0.001054	1.54	116.40	150.99	0.27
Reach 1	1159	PF 3	140.00	1.07	5.95	2.69	5.98	0.000191	0.73	214.73	136.87	0.12
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 3	140.00	1.03	4.91	2.41	4.95	0.000344	0.89	157.58	47.42	0.16
Reach 1	1133	PF 3	140.00	1.02	4.88	2.59	4.94	0.000585	1.08	129.40	42.86	0.20
Reach 1	1125	PF 3	140.00	1.01	4.88	2.50	4.94	0.000479	1.03	136.21	42.50	0.18
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 3	140.00	1.32	4.84	2.66	4.91	0.000664	1.17	120.16	37.96	0.21
Reach 1	1045	PF 3	140.00	0.48	4.45	3.41	4.81	0.005331	2.65	52.80	23.13	0.56
Reach 1	958	PF 3	140.00	0.58	4.33	2.89	4.48	0.001999	1.72	90.17	116.75	0.36
Reach 1	877	PF 3	140.00	-0.21	3.96	2.70	4.25	0.003736	2.36	59.60	25.63	0.48
Reach 1	741	PF 3	140.00	-0.54	3.47	2.57	3.71	0.004200	2.27	71.81	88.77	0.50
Reach 1	606	PF 3	140.00	-0.94	3.57	2.05	3.57	0.000166	0.51	345.08	493.30	0.10
Reach 1	545	PF 3	140.00	-1.04	3.48	2.15	3.53	0.001071	1.24	193.11	389.93	0.26
Reach 1	494	PF 3	140.00	-1.37	3.45	1.87	3.49	0.000665	1.08	210.38	389.94	0.21
Reach 1	455	PF 3	140.00	-1.16	3.27	2.37	3.43	0.003047	2.01	97.93	198.33	0.43
Reach 1	411	PF 3	140.00	-0.99	3.20	1.98	3.32	0.001971	1.72	109.83	181.73	0.35
Reach 1	364	PF 3	140.00	-1.27	3.16	1.84	3.24	0.001633	1.45	133.84	289.18	0.31
Reach 1	319	PF 3	140.00	-1.06	2.61	2.07	3.07	0.008092	3.04	47.07	31.28	0.69
Reach 1	289	PF 3	140.00	-1.28	2.20	1.81	2.79	0.010011	3.40	41.25	22.90	0.77
Reach 1	249	PF 3	140.00	-1.45	1.95	1.37	2.42	0.007515	3.04	46.11	22.09	0.67
Reach 1	206	PF 3	140.00	-1.60	1.83	1.07	2.12	0.004582	2.45	59.73	35.64	0.53
Reach 1	147	PF 3	140.00	-1.75	1.56	0.77	1.85	0.004872	2.44	59.50	39.55	0.55
Reach 1	106	PF 3	140.00	-1.70	1.14	0.68	1.59	0.008102	2.97	47.72	32.29	0.69
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 3	140.00	-1.67	1.11	0.57	1.52	0.007132	2.84	50.13	34.51	0.65
Reach 1	68	PF 3	140.00	-1.83	1.11	0.08	1.32	0.003035	2.04	72.82	54.52	0.44
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 3	140.00	-1.87	1.07	-0.08	1.23	0.002286	1.79	86.14	63.28	0.38
Reach 1	5	PF 3	140.00	-1.93	1.02	-0.14	1.15	0.001981	1.63	101.52	93.37	0.35

Σχήμα 4. 38. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=140 \text{ m}^3/\text{sec}$

Πλημμυρική παροχή $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.045$

Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή είναι πολλαπλασιασμένη με το 2.3 επί της παροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Ο στόχος είναι να εξετασθεί σε ποια σημεία η στάθμη του νερού υπερβαίνει τις όχθες του ποταμού και υπερχειλίζει με αποτέλεσμα να εισέρχεται στην αστική περιοχή. Παρακάτω παρουσιάζεται η ροή του νερού στον ποταμό αλλά και στην πόλη με την βοήθεια αεροφωτογραφιών των δορυφόρων της Google. Επιπλέον, δίνεται και ο πίνακας των υδραυλικών στοιχείων των διατομών, (Σχήμα 4.39. και Σχήμα 4.40.).



Σχήμα 4. 39. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: n045 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 4												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 4	160.00	4.53	8.63	7.67	9.02	0.005318	2.79	60.23	49.66	0.57
Reach 1	2565	PF 4	160.00	4.42	8.46	7.23	8.73	0.003591	2.31	69.39	29.14	0.48
Reach 1	2484	PF 4	160.00	4.28	8.34	6.68	8.49	0.001849	1.73	92.41	36.72	0.35
Reach 1	2389	PF 4	160.00	3.74	8.28	6.29	8.36	0.000918	1.33	154.33	154.22	0.25
Reach 1	2270	PF 4	160.00	2.93	8.06	5.78	8.22	0.001465	1.79	103.76	123.14	0.31
Reach 1	2196	PF 4	160.00	3.52	7.82	6.15	8.07	0.002607	2.23	75.49	58.30	0.41
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 4	160.00	3.52	7.77	6.19	8.05	0.002923	2.37	69.70	33.33	0.43
Reach 1	2122	PF 4	160.00	3.07	7.76	5.89	7.88	0.001262	1.65	125.62	124.36	0.30
Reach 1	2007	PF 4	160.00	2.93	7.28	6.18	7.62	0.004367	2.66	64.19	37.91	0.52
Reach 1	1913	PF 4	160.00	2.50	7.27	5.39	7.37	0.001160	1.46	120.96	80.44	0.28
Reach 1	1795	PF 4	160.00	2.21	6.83	5.51	7.12	0.003724	2.41	66.52	30.82	0.48
Reach 1	1763	PF 4	160.00	2.24	6.77	5.21	7.00	0.002655	2.13	75.31	28.35	0.41
Reach 1	1725	PF 4	160.00	2.21	6.69	4.65	6.91	0.002205	2.08	88.36	88.04	0.36
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 4	160.00	2.27	6.69	4.71	6.88	0.001851	1.96	100.43	103.75	0.34
Reach 1	1708	PF 4	160.00	2.34	6.69	4.73	6.86	0.001634	1.88	92.34	56.67	0.33
Reach 1	1699	PF 4	160.00	2.40	6.69	4.70	6.84	0.001385	1.75	95.86	43.71	0.31
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 4	160.00	2.51	6.65	4.71	6.80	0.001462	1.70	94.06	32.90	0.31
Reach 1	1664	PF 4	160.00	2.53	6.63	4.77	6.79	0.001590	1.76	94.65	93.80	0.32
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 4	160.00	2.53	6.60	4.83	6.77	0.001806	1.83	97.99	107.58	0.34
Reach 1	1573	PF 4	160.00	1.72	6.55	4.16	6.65	0.000859	1.42	120.58	77.74	0.25
Reach 1	1438	PF 4	160.00	1.67	6.35	4.57	6.50	0.001464	1.80	111.67	130.85	0.32
Reach 1	1323	PF 4	160.00	1.30	6.18	4.81	6.32	0.001838	1.87	124.11	221.70	0.35
Reach 1	1209	PF 4	160.00	0.99	6.04	3.82	6.15	0.001052	1.58	138.04	168.84	0.27
Reach 1	1159	PF 4	160.00	1.07	6.08	2.80	6.11	0.000211	0.79	233.25	146.80	0.12
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 4	160.00	1.03	5.15	2.51	5.20	0.000360	0.95	168.80	47.74	0.16
Reach 1	1133	PF 4	160.00	1.02	5.12	2.70	5.18	0.000604	1.15	139.48	43.43	0.20
Reach 1	1125	PF 4	160.00	1.01	5.12	2.61	5.18	0.000503	1.10	146.21	43.15	0.19
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 4	160.00	1.32	5.04	2.77	5.12	0.000721	1.25	127.62	38.26	0.22
Reach 1	1045	PF 4	160.00	0.48	4.59	3.61	5.01	0.006092	2.85	56.09	24.54	0.60
Reach 1	958	PF 4	160.00	0.58	4.52	3.05	4.65	0.001784	1.69	116.98	164.06	0.35
Reach 1	877	PF 4	160.00	-0.21	4.08	2.89	4.42	0.004284	2.56	63.76	53.88	0.52
Reach 1	741	PF 4	160.00	-0.54	3.53	2.78	3.81	0.004825	2.45	77.40	98.14	0.54
Reach 1	606	PF 4	160.00	-0.94	3.65	2.16	3.66	0.000171	0.52	385.94	518.29	0.11
Reach 1	545	PF 4	160.00	-1.04	3.57	2.36	3.61	0.001020	1.24	227.86	435.42	0.25
Reach 1	494	PF 4	160.00	-1.37	3.54	2.07	3.57	0.000645	1.08	245.50	435.44	0.20
Reach 1	455	PF 4	160.00	-1.16	3.37	2.74	3.52	0.002905	2.00	119.93	252.65	0.42
Reach 1	411	PF 4	160.00	-0.99	3.31	2.16	3.42	0.001831	1.69	132.59	249.93	0.34
Reach 1	364	PF 4	160.00	-1.27	3.29	2.05	3.35	0.001212	1.26	176.22	360.71	0.27
Reach 1	319	PF 4	160.00	-1.06	2.98	2.27	3.25	0.004456	2.47	86.02	185.69	0.52
Reach 1	289	PF 4	160.00	-1.28	2.37	1.99	3.02	0.010295	3.56	45.80	32.38	0.78
Reach 1	249	PF 4	160.00	-1.45	2.08	1.55	2.62	0.008239	3.25	49.19	22.75	0.71
Reach 1	206	PF 4	160.00	-1.60	1.98	1.29	2.30	0.004689	2.55	65.38	36.87	0.54
Reach 1	147	PF 4	160.00	-1.75	1.73	0.98	2.04	0.004762	2.53	66.54	44.32	0.54
Reach 1	106	PF 4	160.00	-1.70	1.26	0.83	1.76	0.008695	3.17	51.81	37.38	0.72
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 4	160.00	-1.67	1.22	0.73	1.68	0.007691	3.03	54.39	38.84	0.68
Reach 1	68	PF 4	160.00	-1.83	1.24	0.22	1.47	0.003211	2.16	80.27	57.49	0.45
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 4	160.00	-1.87	1.20	0.05	1.38	0.002442	1.90	94.45	64.90	0.40
Reach 1	5	PF 4	160.00	-1.93	1.16	-0.01	1.29	0.001982	1.69	114.57	96.16	0.35

Σχήμα 4. 40. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$

Πλημμυρική παροχή $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0225$ (-50%)

Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή είναι πολλαπλασιασμένη με το 2.3 επί της παροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Επιπλέον, στο κύριο κανάλι η τιμή Manning's είναι $n = 0.0225$, (Σχήμα 4.41. και Σχήμα 4.42.).



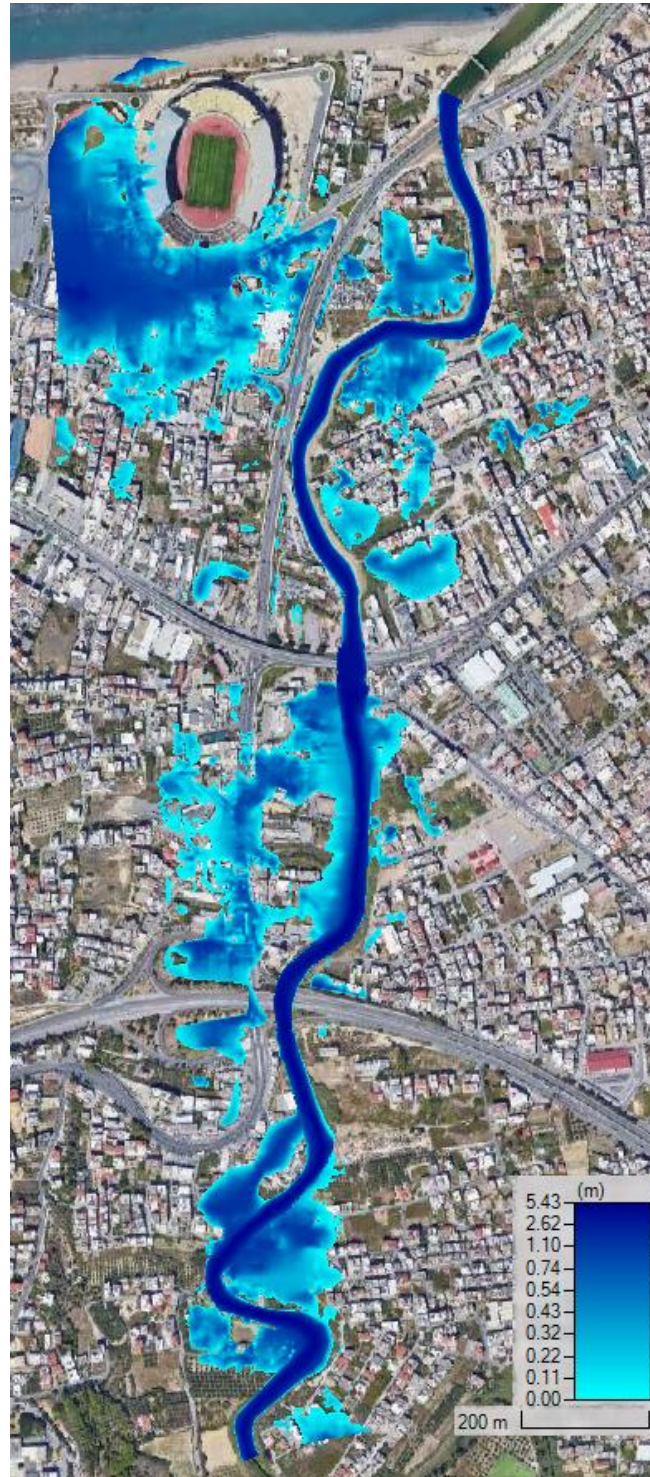
Σχήμα 4. 41. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0225$

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: n0225 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 4												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 4	160.00	4.53	7.67	7.67	8.66	0.004407	4.39	36.44	18.81	1.01
Reach 1	2565	PF 4	160.00	4.42	6.83	7.22	8.27	0.008353	5.31	30.14	19.43	1.36
Reach 1	2484	PF 4	160.00	4.28	7.61	6.68	7.90	0.001109	2.38	67.26	32.09	0.52
Reach 1	2389	PF 4	160.00	3.74	7.61	6.29	7.79	0.000619	1.90	86.57	50.77	0.40
Reach 1	2270	PF 4	160.00	2.93	7.46	5.78	7.71	0.000632	2.21	72.51	23.94	0.40
Reach 1	2196	PF 4	160.00	3.52	7.25	6.15	7.63	0.001146	2.75	58.10	21.36	0.53
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 4	160.00	3.52	7.18	6.19	7.62	0.001330	2.95	54.22	20.01	0.57
Reach 1	2122	PF 4	160.00	3.07	7.24	5.89	7.50	0.000757	2.27	77.66	73.17	0.44
Reach 1	2007	PF 4	160.00	2.93	6.18	6.18	7.24	0.004435	4.56	35.07	16.71	1.01
Reach 1	1913	PF 4	160.00	2.50	6.61	5.39	6.83	0.000735	2.07	79.61	46.66	0.43
Reach 1	1795	PF 4	160.00	2.21	6.13	5.51	6.66	0.001975	3.23	49.50	22.18	0.69
Reach 1	1763	PF 4	160.00	2.24	6.20	5.21	6.56	0.001208	2.66	60.04	24.93	0.55
Reach 1	1725	PF 4	160.00	2.21	6.20	4.65	6.51	0.000791	2.46	64.98	19.65	0.43
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 4	160.00	2.27	6.21	4.71	6.49	0.000752	2.37	67.58	21.88	0.43
Reach 1	1708	PF 4	160.00	2.34	6.22	4.73	6.48	0.000650	2.24	73.17	29.45	0.41
Reach 1	1699	PF 4	160.00	2.40	6.25	4.70	6.46	0.000571	2.07	78.58	33.09	0.39
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 4	160.00	2.51	6.25	4.71	6.44	0.000553	1.96	81.77	29.59	0.38
Reach 1	1664	PF 4	160.00	2.53	6.22	4.77	6.43	0.000629	2.04	78.49	29.74	0.40
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 4	160.00	2.53	6.19	4.83	6.43	0.000749	2.16	73.95	29.69	0.43
Reach 1	1573	PF 4	160.00	1.72	6.22	4.16	6.36	0.000311	1.61	101.61	45.33	0.29
Reach 1	1438	PF 4	160.00	1.67	6.06	4.57	6.29	0.000593	2.15	83.35	74.10	0.40
Reach 1	1323	PF 4	160.00	1.30	5.87	4.81	6.19	0.001023	2.59	75.37	99.14	0.51
Reach 1	1209	PF 4	160.00	0.99	5.91	3.82	6.08	0.000378	1.85	116.76	151.25	0.32
Reach 1	1159	PF 4	160.00	1.07	6.00	2.80	6.03	0.000064	0.86	221.08	139.62	0.14
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 4	160.00	1.03	4.71	2.51	4.77	0.000137	1.08	148.00	47.14	0.19
Reach 1	1133	PF 4	160.00	1.02	4.67	2.70	4.76	0.000240	1.33	120.51	41.91	0.25
Reach 1	1125	PF 4	160.00	1.01	4.68	2.61	4.76	0.000192	1.26	127.58	41.93	0.23
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 4	160.00	1.32	4.64	2.77	4.74	0.000265	1.42	112.62	37.66	0.26
Reach 1	1045	PF 4	160.00	0.48	3.61	3.61	4.62	0.004345	4.45	35.98	17.88	1.00
Reach 1	958	PF 4	160.00	0.58	3.92	3.05	4.22	0.001162	2.44	65.54	31.11	0.54
Reach 1	877	PF 4	160.00	-0.21	3.56	2.89	4.08	0.001906	3.19	50.10	21.97	0.68
Reach 1	741	PF 4	160.00	-0.54	3.39	2.76	3.80	0.001767	2.91	64.60	77.95	0.65
Reach 1	606	PF 4	160.00	-0.94	3.62	2.22	3.64	0.000111	0.84	373.98	513.49	0.17
Reach 1	545	PF 4	160.00	-1.04	3.49	2.34	3.61	0.000565	1.81	195.84	394.86	0.37
Reach 1	494	PF 4	160.00	-1.37	3.50	2.06	3.58	0.000318	1.51	228.36	415.60	0.29
Reach 1	455	PF 4	160.00	-1.16	2.99	2.62	3.51	0.002170	3.27	58.63	83.27	0.71
Reach 1	411	PF 4	160.00	-0.99	3.10	2.17	3.37	0.000993	2.39	92.94	166.81	0.50
Reach 1	364	PF 4	160.00	-1.27	3.13	2.05	3.31	0.000833	2.07	124.74	265.49	0.44
Reach 1	319	PF 4	160.00	-1.06	2.26	2.26	3.17	0.004336	4.22	38.00	22.62	1.00
Reach 1	289	PF 4	160.00	-1.28	1.79	2.01	2.99	0.006017	4.84	33.06	18.80	1.17
Reach 1	249	PF 4	160.00	-1.45	1.11	1.55	2.66	0.009130	5.52	28.96	18.70	1.42
Reach 1	206	PF 4	160.00	-1.60	0.81	1.24	2.24	0.008759	5.31	30.19	21.27	1.39
Reach 1	147	PF 4	160.00	-1.75	1.23	0.96	1.82	0.002745	3.42	48.08	30.80	0.81
Reach 1	106	PF 4	160.00	-1.70	0.97	0.83	1.68	0.003468	3.73	42.97	25.91	0.90
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 4	160.00	-1.67	0.52	0.73	1.60	0.006455	4.61	34.69	23.00	1.20
Reach 1	68	PF 4	160.00	-1.83	-0.24	0.21	1.28	0.012880	5.47	29.28	25.57	1.63
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 4	160.00	-1.87	0.36	0.05	0.84	0.002478	3.08	52.00	31.59	0.76
Reach 1	5	PF 4	160.00	-1.93	-0.01	-0.01	0.70	0.004540	3.73	42.87	30.35	1.00

Σχήμα 4. 42. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0225$

Πλημμυρική παροχή $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0675$ (+50%)

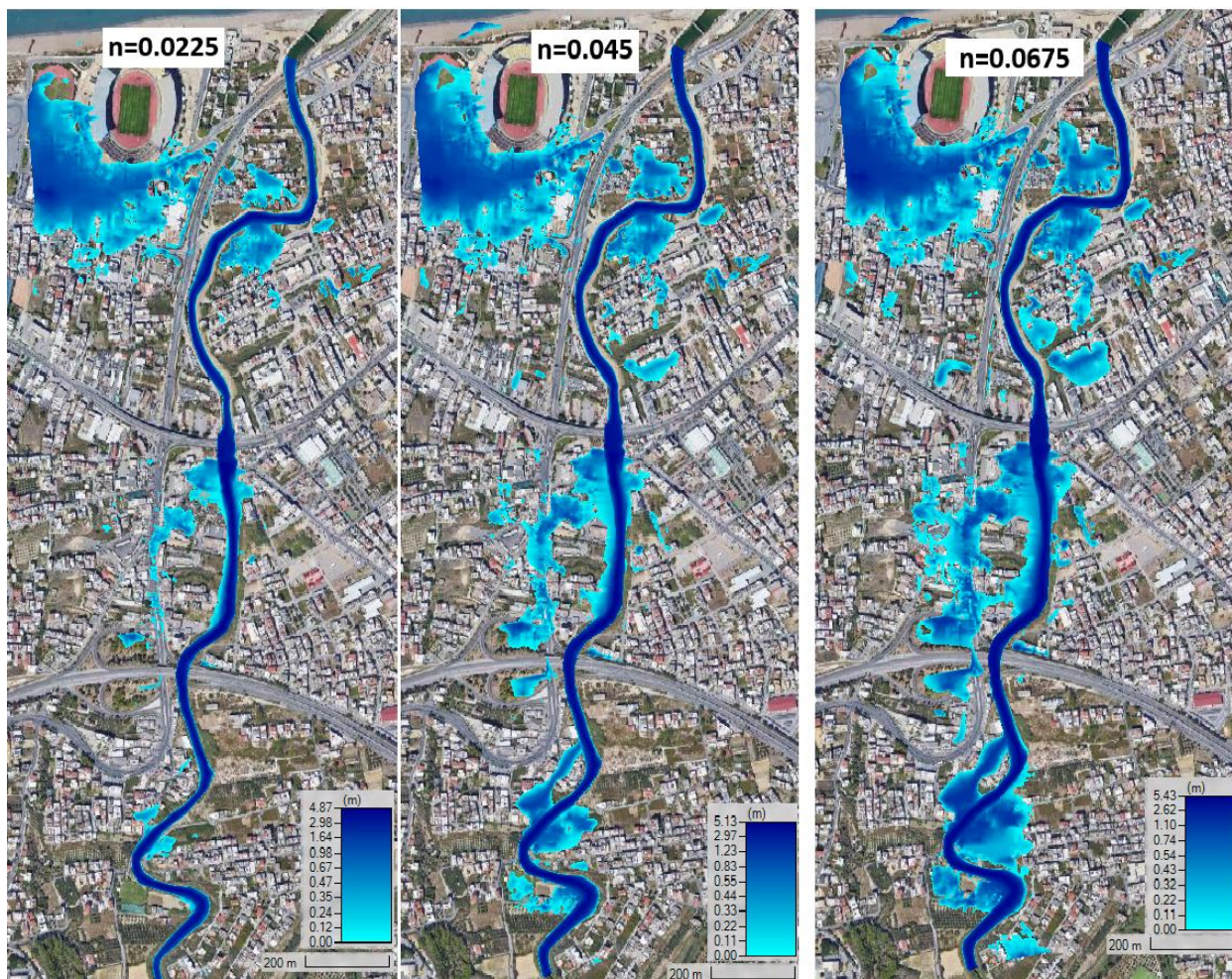
Η συγκεκριμένη πλημμυρική παροχή είναι πολλαπλασιασμένη με το 2.3 επί της παροχής περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Επιπλέον, στο κύριο κανάλι η τιμή Manning's είναι $n = 0.0675$, (Σχήμα 4.43. και Σχήμα 4.44.).



Σχήμα 4. 43. Αποτέλεσμα προσομοίωσης για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0675$

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: n0675 River: giofiros Reach: Reach 1 Profile: PF 4												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2623	PF 4	160.00	4.53	9.19	7.67	9.30	0.003385	1.58	116.57	151.17	0.31
Reach 1	2565	PF 4	160.00	4.42	8.91	7.23	9.09	0.004764	1.88	93.29	130.02	0.37
Reach 1	2484	PF 4	160.00	4.28	8.66	6.68	8.77	0.002952	1.53	106.39	59.03	0.30
Reach 1	2389	PF 4	160.00	3.74	8.57	6.29	8.61	0.001057	1.01	206.17	193.00	0.18
Reach 1	2270	PF 4	160.00	2.93	8.37	5.78	8.46	0.001998	1.44	153.04	200.14	0.25
Reach 1	2196	PF 4	160.00	3.52	8.20	6.15	8.31	0.002745	1.56	121.71	158.96	0.28
Reach 1	2192.5	Bridge										
Reach 1	2189	PF 4	160.00	3.52	8.16	6.19	8.26	0.002714	1.61	122.70	166.61	0.28
Reach 1	2122	PF 4	160.00	3.07	8.10	5.89	8.15	0.001148	1.12	181.55	189.85	0.19
Reach 1	2007	PF 4	160.00	2.93	7.77	6.18	7.94	0.004297	1.90	94.22	121.02	0.35
Reach 1	1913	PF 4	160.00	2.50	7.68	5.39	7.73	0.001146	1.06	163.01	122.97	0.19
Reach 1	1795	PF 4	160.00	2.21	7.28	5.51	7.48	0.004934	1.99	86.39	56.34	0.38
Reach 1	1763	PF 4	160.00	2.24	7.16	5.21	7.33	0.003846	1.82	90.35	54.62	0.34
Reach 1	1725	PF 4	160.00	2.21	7.07	4.65	7.19	0.002878	1.65	129.31	133.53	0.28
Reach 1	1720.5	Bridge										
Reach 1	1716	PF 4	160.00	2.27	7.07	4.71	7.16	0.002134	1.47	153.63	167.67	0.25
Reach 1	1708	PF 4	160.00	2.34	7.02	4.73	7.13	0.002302	1.55	114.74	73.34	0.26
Reach 1	1699	PF 4	160.00	2.40	7.00	4.70	7.11	0.002098	1.51	110.83	52.50	0.26
Reach 1	1685.5	Bridge										
Reach 1	1672	PF 4	160.00	2.51	6.93	4.71	7.05	0.002476	1.56	104.16	41.56	0.27
Reach 1	1664	PF 4	160.00	2.53	6.92	4.77	7.03	0.002381	1.51	132.56	163.91	0.27
Reach 1	1660	Bridge										
Reach 1	1656	PF 4	160.00	2.53	6.90	4.83	7.00	0.002477	1.51	135.79	149.38	0.27
Reach 1	1573	PF 4	160.00	1.72	6.76	4.16	6.84	0.001417	1.26	140.36	115.98	0.21
Reach 1	1438	PF 4	160.00	1.67	6.54	4.57	6.63	0.002027	1.46	142.80	203.18	0.25
Reach 1	1323	PF 4	160.00	1.30	6.35	4.81	6.41	0.001823	1.29	171.31	311.05	0.23
Reach 1	1209	PF 4	160.00	0.99	6.15	3.82	6.22	0.001548	1.30	157.19	181.34	0.22
Reach 1	1159	PF 4	160.00	1.07	6.15	2.80	6.18	0.000389	0.72	244.13	161.80	0.11
Reach 1	1155	Culvert										
Reach 1	1151	PF 4	160.00	1.03	5.51	2.51	5.54	0.000594	0.86	187.33	67.55	0.14
Reach 1	1133	PF 4	160.00	1.02	5.47	2.70	5.53	0.000973	1.03	155.25	45.59	0.17
Reach 1	1125	PF 4	160.00	1.01	5.47	2.61	5.52	0.000829	0.99	161.57	44.48	0.16
Reach 1	1109.5	Bridge										
Reach 1	1094	PF 4	160.00	1.32	5.32	2.77	5.38	0.001265	1.16	138.66	42.41	0.20
Reach 1	1045	PF 4	160.00	0.48	4.91	3.61	5.22	0.009735	2.48	64.82	32.83	0.51
Reach 1	958	PF 4	160.00	0.58	4.76	3.05	4.82	0.001797	1.17	165.09	229.04	0.24
Reach 1	877	PF 4	160.00	-0.21	4.39	2.89	4.57	0.005351	1.97	96.76	152.03	0.39
Reach 1	741	PF 4	160.00	-0.54	3.64	2.78	3.82	0.007376	2.05	88.41	120.44	0.45
Reach 1	606	PF 4	160.00	-0.94	3.68	2.12	3.69	0.000187	0.37	402.62	523.18	0.07
Reach 1	545	PF 4	160.00	-1.04	3.61	2.35	3.64	0.001216	0.91	247.46	453.12	0.18
Reach 1	494	PF 4	160.00	-1.37	3.57	2.05	3.59	0.000822	0.82	259.90	447.39	0.15
Reach 1	455	PF 4	160.00	-1.16	3.45	2.78	3.53	0.003453	1.48	144.56	306.15	0.31
Reach 1	411	PF 4	160.00	-0.99	3.36	2.16	3.43	0.002618	1.36	144.77	270.73	0.27
Reach 1	364	PF 4	160.00	-1.27	3.31	2.04	3.35	0.001662	0.99	181.23	367.25	0.21
Reach 1	319	PF 4	160.00	-1.06	3.18	2.28	3.27	0.003754	1.49	133.08	284.55	0.32
Reach 1	289	PF 4	160.00	-1.28	3.05	1.99	3.16	0.003902	1.62	118.02	212.73	0.33
Reach 1	249	PF 4	160.00	-1.45	2.56	1.55	2.91	0.010752	2.64	60.52	26.32	0.55
Reach 1	206	PF 4	160.00	-1.60	2.35	1.31	2.54	0.005732	2.01	82.34	62.71	0.40
Reach 1	147	PF 4	160.00	-1.75	2.05	1.00	2.25	0.005875	2.02	82.14	54.02	0.41
Reach 1	106	PF 4	160.00	-1.70	1.72	0.84	1.98	0.008528	2.31	71.06	49.54	0.49
Reach 1	102.5	Bridge										
Reach 1	99	PF 4	160.00	-1.67	1.68	0.73	1.91	0.007338	2.17	76.93	56.22	0.45
Reach 1	68	PF 4	160.00	-1.83	1.61	0.22	1.74	0.003683	1.66	102.53	68.31	0.33
Reach 1	54.5	Bridge										
Reach 1	41	PF 4	160.00	-1.87	1.54	0.05	1.64	0.002929	1.49	118.48	80.00	0.29
Reach 1	5	PF 4	160.00	-1.93	1.49	-0.01	1.56	0.001982	1.21	148.08	105.41	0.24

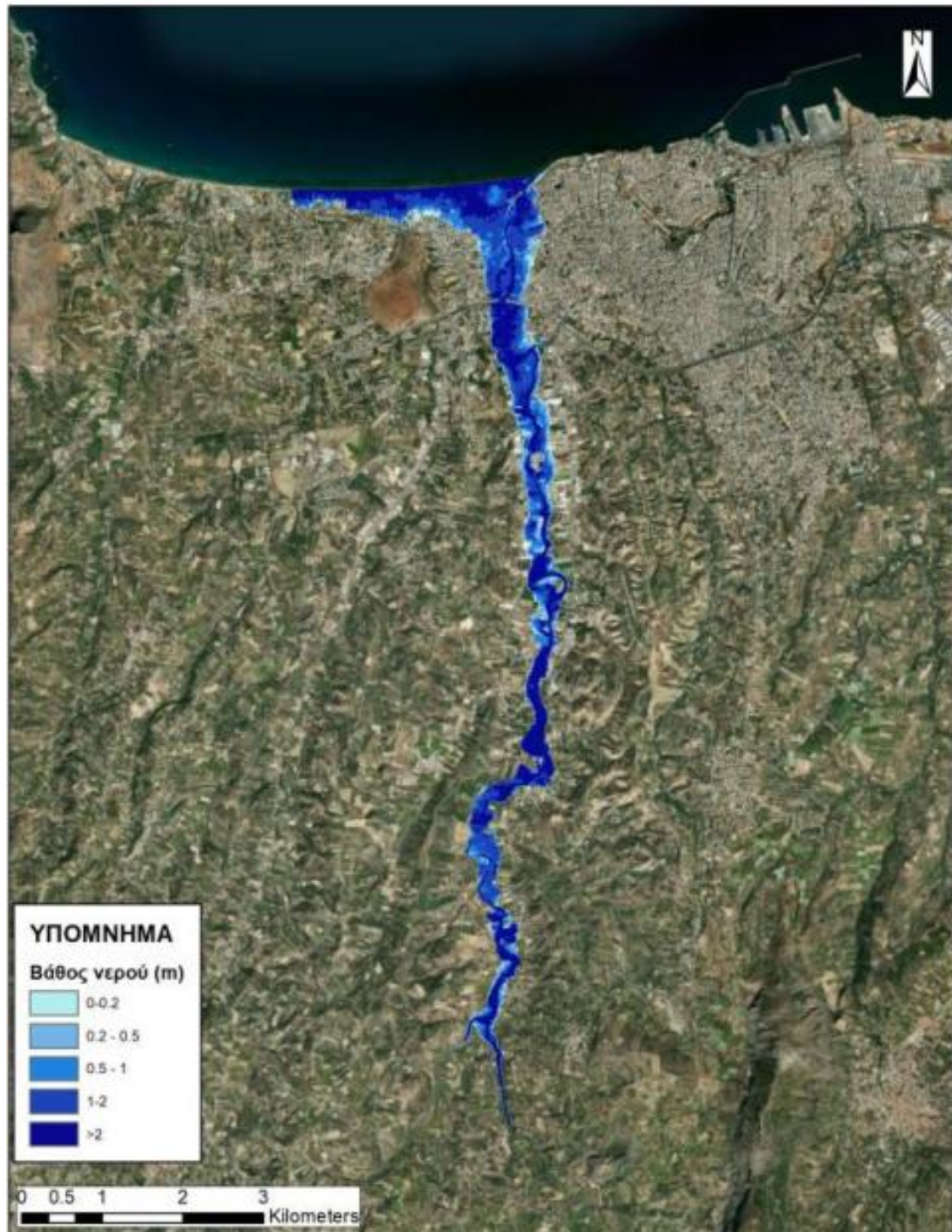
Σχήμα 4. 44. Υδραυλικά στοιχεία διατομών για $Q=160 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $n=0.0675$



Σχήμα 4. 45. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για $Q=160\text{m}^3/\text{sec}$ και διαφορετικά n

Ολοκληρώνοντας την μοντελοποίηση του ποταμού Γιόφυρου στο HEC-RAS και επιλύοντας την υδραυλική ανάλυση για την παροχή $Q = 160 \text{ m}^3/\text{sec}$ σε συνδυασμό με διαφορετικές τιμές n Manning's, στο σχήμα 4.45. παρουσιάζεται η απεικόνιση της πλημμύρας για την ίδια παροχή και τις τρεις διαφορετικές τιμές n . Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση παρουσιάζεται πλήρωση της κοίτης του ποταμού και υπερχειλίση του σε ορισμένα σημεία με αποτέλεσμα την μεταφορά ύδατος πέρα των οχθών. Πιο συγκεκριμένα για τιμή $n = 0.0225$ εμφανίζεται μια μικρή υπερχειλίση στην αρχή του σχεδίου του ποταμού στην περιοχή πριν τον ΒΟΑΚ, ενώ μετά τον ΒΟΑΚ και έως την επόμενη γέφυρα εμφανίζει κατά το μήκος του υπερχειλίση. Τέλος, στην καμπύλη πριν την εκβολή υπάρχει μεταφορά νερού εκατέρωθεν των οχθών. Στη συνέχεια για $n = 0.045$ εμφανίζονται υπερχειλίσεις και μεταφορά νερού στα ίδια σημεία με την διαφορά να έγκειται στην μεγαλύτερη επιφάνεια που καλύπτει το νερό. Τέλος, για την μεγαλύτερη τιμή $n = 0.0675$, παρουσιάζεται από την αρχή του σχεδίου του ποταμού μεγάλη έκταση να υπερχειλίζεται εκατέρωθεν του ποταμού, ειδικά στους πρώτους μαιάνδρους του σχεδίου και να συνεχίζεται στην αριστερή πλευρά μετά τον ΒΟΑΚ έως την επόμενη γέφυρα. Επιπλέον, έντονη υπερχειλίση εμφανίζεται και στην καμπύλη πριν την εκβολή του ποταμού. Γίνεται κατανοητό, ότι σε κάθε περίπτωση μια πλημμύρα επηρεάζει μεγάλα κομμάτια του αστικού ιστού του Ηρακλείου προκαλώντας προβλήματα στους κατοίκους.

Συγκρίνοντας την έκταση της πλημμύρας της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα της 1^{ης} Αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (2023), (Σχήμα 4.46.), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μοντελοποιημένη πλημμύρα του Σχεδίου παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη έκταση καθώς η πλημμυρική παροχή περιόδου επαναφοράς με την οποία γίνεται η μοντελοποίηση ανέρχεται σε περίπου $Q=664.4 \text{ m}^3/\text{sec}$.

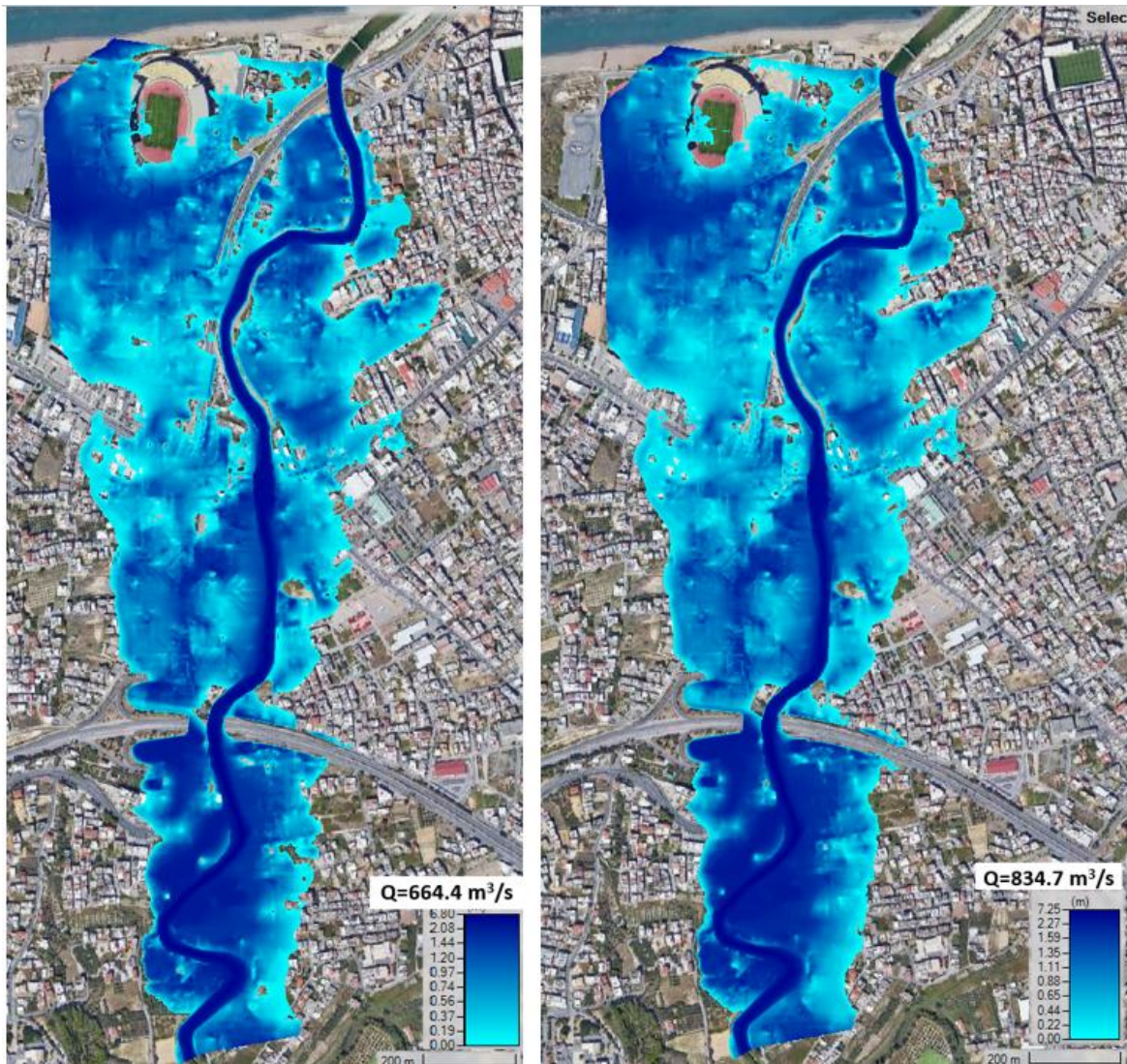


Σχήμα 4. 46. Έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ ετών σύμφωνα με 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Κρήτης.

Επιπλέον, συγκρίνοντας την έκταση της πλημμύρας της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα της Υδραυλικής Μελέτης της Μελέτης εκ νέου Οριοθέτησης Και Διευθέτησης της Κοίτης ποταμού Γιόφυρου (2024), (Σχήμα 4.47.), στην οποία πραγματοποιήθηκε υδρολογική μελέτη όπου εισάχθηκαν οι όμβριες καμπύλες της περιοχής και προέκυψε πλημμυρική παροχή για $T=50$ έτη, $Q=834.7 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η τιμή είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από την πλημμυρική αιχμή της παρούσας εργασίας και ως εκ τούτου είναι λογικό η ζώνη πλημμύρας του Γιόφυρου στην μελέτη να είναι μεγαλύτερη σε έκταση από την ζώνη πλημμύρας της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4. 47. Έκταση πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ ετών σύμφωνα με μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης τμήματος της πεδινής κοίτης του ποταμού Γιόφυρου.



Σχήμα 4. 48. Προσομοίωση πλημμυρικών παροχών που υπολογίστηκαν από τη 1^η Αναθεώρηση ΣΔΚΠ και τη μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης κοίτης του ποταμού Γιόφυρου στο μοντέλο HEC-RAS της παρούσας εργασίας.

Στο Σχήμα 4.48. παρουσιάζεται το μοντέλο που στήθηκε στο HEC-RAS και που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πλημμυρικής παροχής που υπολογίστηκε από την υδρολογική μελέτη της παρούσας εργασίας. Για λόγους σύγκρισης της έκτασης της πλημμυρικής γραμμής οι παροχές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι πλημμυρικές παροχές για T=50 έτη της 1^{ης} Αναθεώρησης ΣΔΚΠ και της μελέτης της εκ νέου Οριοθέτησης της Κοίτης του ποταμού Γιόφυρου από την Π.Ε. Ηρακλείου.

Στην πρώτη εικόνα του σχήματος 4.48 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση με πλημμυρική παροχή $Q=664.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ και η οποία ήταν η παροχή για T=50 ετών που υπολογίστηκε από την 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών της Κρήτης. Η πλημμυρική έκταση που υπολογίστηκε με το μοντέλο της παρούσας εργασίας συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με την έκταση που υπολογίστηκε από τη 1^η Αναθεώρηση ΣΔΚΠ με εξαίρεση την αριστερή πλευρά της εκβολής καθώς στην 1^η αναθεώρηση παρουσιάζεται η πλημμύρα να κινείται και να κατακλύζει μεγάλο μέρος του παραλιακού μετώπου της παραλίας της Αμμουδάρας. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η μοντελοποίηση της 1^{ης} Αναθεώρησης ΣΔΚΠ έγινε και αυτή στο πρόγραμμα HEC-RAS, όμως επιλέχθηκε η 2D υδραυλική επίλυση σχεδιάζοντας ένα πλέγμα στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, εισάγοντας τα τεχνικά έργα και τέλος, το

υδρογράφημα μετά την υδρολογική τους μελέτη. Οι διαφορές με το μοντέλο της παρούσας εργασίας εντοπίζονται στο γεγονός ότι στην εργασία μας εισάχθηκαν πραγματικές τιμές της βαθυμετρίας και γεωμετρίας του ποταμού για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση του και δεν χρησιμοποιήθηκε μόνη της η απεικόνιση της κοίτης από το DEM το οποίο περιέχει σφάλματα. Επιπλέον, η υδραυλική επίλυση έγινε με 1D μέθοδο όπου η παροχή ήταν σταθερή και δεν μεταβαλλόταν.

Στην δεύτερη εικόνα του σχήματος 4.48. παρουσιάζεται η μοντελοποίηση με πλημμυρική παροχή $Q=834.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ και η οποία ήταν η παροχή για $T=50$ ετών που υπολογίστηκε από την Μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης και Διευθέτησης της Κοίτης του Ποταμού Γιόφυρου. Η πλημμυρική έκταση που υπολογίστηκε με το μοντέλο της παρούσας εργασίας φαίνεται να συμπίπτει με τα αποτελέσματα της Μελέτης. Η μόνη διαφορά αναφορικά με το αποτέλεσμα της κατάκλυσης της πλημμύρας είναι στο γεγονός ότι η Μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης δεν είχε διαθέσιμο όλο το DEM της περιοχής παρά μόνο τη λωρίδα στη οποία εντοπίζεται ο ποταμός. Η μοντελοποίηση τους έγινε με 2D υδραυλική επίλυση εισάγοντας τεχνικά έργα και πιθανόν δεδομένα βαθυμετρίας ποταμού. Σε αυτή τη περίπτωση η μόνη διαφορά που υπάρχουν μεταξύ των δυο μοντέλων είναι ο τρόπος υδραυλικής επίλυσης και η παροχή αιχμής.

Είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στον τρόπο υπολογισμού της πλημμυρικής παροχής από την 1^η Αναθεώρηση ΣΔΚΠ και την Μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης και Διευθέτησης της Κοίτης του Ποταμού Γιόφυρου, καθώς σε αυτή την τιμή εντοπίζεται η μεγαλύτερη διαφορά που αλλάζει αρκετά τα αποτελέσματα κατάκλυσης. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε από την 1^η Αναθεώρηση και τη Μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης ήταν το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Στο συγκεκριμένο εισάχθηκε το DEM της λεκάνης απορροής του ποταμού, οριοθετήθηκε η λεκάνη, δημιουργήθηκαν οι παραπόταμοι, οι υπολεκάνες και τέλος, πραγματοποιήθηκε το μετεωρολογικό ομοίωμα. Στο ομοίωμα αυτό, η βροχόπτωση δημιουργήθηκε μέσω των όμβριων καμπυλών όπως έχουν καταρτιστεί για την περιοχή της Π.Ε. Ηρακλείου. Αναφορικά με τις τιμές του Curve Number, μια παράμετρος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στη Μελέτη εκ νέου Οριοθέτησης εκτεινόταν σε ένα εύρος 74-83 ενώ στην 1^η Αναθεώρηση η μέση τιμή για όλες τις υπολεκάνες ήταν 81. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι τιμές του Curve Number που προέκυψαν από την βαθμονόμηση του μοντέλου από τα ιστορικά δεδομένα της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου εκτείνονται σε εύρος από 55-76 με τις υψηλές τιμές να μη παρουσιάζονται σε μεγάλη συχνότητα.

Συνολικά, αναφορικά με την παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της ωριαίας πλημμυρικής παροχής, λόγω έλλειψης δεδομένων, όμως συγκρίνοντας την εργασία με επίσημες μελέτες του Υπουργείου Περιβάλλοντος μέσω της 1^{ης} Αναθεώρησης ΣΔΚΠ και της Π.Ε. Ηρακλείου μέσω της Μελέτης εκ νέου Οριοθέτησης Κοίτης του Ποταμού Γιόφυρου, αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι επίσημες μελέτες έχουν υπερδιαστασιολογήσει την παροχή αιχμής και συνεπώς το πλημμυρικό πεδίο. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι οι δυο μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει μόνο τις καταρτισμένες όμβριες καμπύλες για να υπολογίσουν την βροχόπτωση της λεκάνης, έχουν θέσει υψηλούς αριθμούς Curve Number σε μια λεκάνη που θεωρείται αγροτική περιοχή και το πιο σημαντικό, δεν έχουν χρησιμοποιήσει ιστορικά μετρούμενα δεδομένα είτε βροχόπτωσης είτε παροχής για να βαθμονομηθούν τα μοντέλα τους με στόχο να υπάρχει μια καλύτερη και πιο ρεαλιστική προσέγγιση.

Κεφάλαιο 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας επιτεύχθηκε η υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου. Η χρήση του αναδιαμορφωμένου προγράμματος SWAT+ μαζί με τα πρόσθετα βοηθήματα του όπως το SWAT+ Toolbox που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση, έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία έκριναν την μοντελοποίηση επιτυχής. Η υδρολογική ανάλυση έδειξε τα ακόλουθα.

- Στο υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής που προκύπτει, η μέση βροχόπτωση είναι 820.8 mm, η εξατμισοδιαπνοή που αποτελεί το 48% είναι 395.5 mm, η συνολική απορροή που αποτελεί το 21% είναι 173.4 mm και το 19.7% που αποτελεί τις απώλειες νερού στον υπόγειο υδροφόρο της λεκάνης είναι 162.9 mm.
- Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης με ημερήσιο βήμα για 46 χρόνια (1964-2009), έγινε στατιστική ανάλυση με την Κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου I (Gumbel) σύμφωνα με την οποία η ημερήσια παροχή περιόδου επαναφοράς 50 ετών είναι ίση με $Q_{50} = 69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$.
- Για τον υπολογισμό της ωριαίας πλημμυρικής παροχής χρησιμοποιήθηκε συντελεστής που πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη ημερήσια. Λόγω της μη ύπαρξης κατάλληλων δεδομένων βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γιόφυρου για ανάλυση και για την εξαγωγή του συντελεστή, έγινε χρήση του συντελεστή $\lambda=2.3$ που είχε υπολογιστεί σε μελέτη πλημμυρικών φαινομένων στον ποταμό Κουλιάρη. Εφαρμόζοντας τον συντελεστή η ωριαία πλημμυρική παροχή για τον ποταμό Γιόφυρο είναι ίση με $Q = 160 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Αναφορικά με την διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου, παρότι κρίθηκε επιτυχημένη, γίνεται κατανοητό πως με την ύπαρξη μεγαλύτερης και ποιοτικότερης χρονοσειράς παρατηρούμενων δεδομένων παροχής και πιο αναλυτικών κλιματικών δεδομένων, τα αποτελέσματα θα μπορούσε να ήταν ακόμη καλύτερα καθώς το μοντέλο διαθέτει τις δυνατότητες για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση. Η ύπαρξη της ανάλυσης ευαισθησίας στο SWAT+ Toolbox θεωρείται ένα ιδιαίτερα βοηθητικό εργαλείο καθώς δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δοκιμάσει την ευαισθησία αρκετών παραμέτρων στην προσομοιωμένη υδρολογική λεκάνη, με στόχο να τις κατατάξει σε κλίμακα ευαισθησίας για την καλύτερη δυνατή χρήση τους στην διαδικασία της βαθμονόμησης. Με το πέρας της ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων, δίνεται η επιλογή είτε χειροκίνητης, είτε αυτόματης βαθμονόμησης. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η αυτόματη βαθμονόμηση για τις πιο σημαντικές παραμέτρους, με πολλές επαναλήψεις και επιλέγοντας τον δείκτη NSE προς βελτιστοποίηση. Σε επίπεδο αποτελεσμάτων, έπειτα από την στατιστική ανάλυση των ακραίων τιμών που προσομοιώθηκαν, η παροχή περιόδου επαναφοράς 50 ετών ήταν ίση με $Q_{50} = 69.25 \text{ m}^3/\text{sec}$ το οποίο προσεγγίζει την τιμή που είχε υπολογιστεί σε παλαιότερη διπλωματική εργασία μοντελοποίησης του ποταμού Γιόφυρου με το πρόγραμμα SWAT ($Q=81 \text{ m}^3/\text{sec}$), (KONTOΓΕΩΡΓΟΣ, 2014). Πολλαπλασιάζοντας επί τον συντελεστή $\lambda=2.3$ η πλημμυρική παροχή γίνεται $Q = 160 \text{ m}^3/\text{sec}$. Επιπλέον, η πλημμυρική παροχή που υπολογίστηκε στην υδρολογική μελέτη για την «Μελέτη εκ νέου οριοθέτησης και διευθέτησης τμήματος της πεδινής κοίτης ποταμού Γιόφυρου» από την Περιφέρεια Κρήτης, ήταν $Q=834.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ και η παροχή της 1^{ης} Αναθεώρησης ΣΔΚΠ Λεκανών Απορροής Ποταμών Κρήτης, ήταν $Q=664.4 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η μεγάλη αυτή απόκλιση πιθανόν να οφείλεται στην υπερδιαστασιολόγηση των παροχών από τις επίσημες μελέτες καθώς σε αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα για να πραγματοποιήσουν την βαθμονόμηση στα μοντέλα τους

5.2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ ΣΤΟ HEC-RAS

Αναφορικά με την μοντελοποίηση του ποταμού Γιόφυρου στο κομμάτι που διαπερνά την δυτική πλευρά της πόλης του Ηρακλείου για να καταλήξει στον κόλπο Ηρακλείου, έγινε προσπάθεια για μια ρεαλιστική αποτύπωση τα πραγματικότητας της περιοχής μελέτης. Για να επιτευχθεί αυτό, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε DEM του Ελληνικού Κτηματολογίου με ανάλυση 2×2 m για την καλύτερη δυνατή αποτύπωση της μορφολογίας του εδάφους. Επιπλέον, έγινε προσθήκη της βαθυμετρίας του ποταμού μέσω της πιο πρόσφατης τοπογραφικής μελέτης που χορηγήθηκε από το τμήμα Δομών Περιβάλλοντος της Περιφέρειας Κρήτη. Έτσι, έγινε δυνατή η αποτύπωση του βάθους κατά μήκος του ποταμού. Μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά προφίλ ροής, τα $Q_1=70$ m^3/sec , $Q_2=105$ m^3/sec , $Q_3=140$ m^3/sec και $Q_4=160$ m^3/sec όπου η τιμή του συντελεστή Manning's ήταν $n=0.045$ για τον ποταμό. Επειδή στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες τιμές για ποτάμια που παρουσιάζουν έντονη βλάστηση και πέτρες επιλέχθηκε στην πλημμυρική παροχή $Q_4=160$ m^3/sec να γίνει ανάλυση ευαισθησίας στον συντελεστή Manning's σε ένα εύρος $\pm 50\%$ καθώς είναι μια σημαντική παράμετρος όπου ανάλογα την τιμή της επηρεάζονται τα αποτελέσματα.

Πραγματοποιώντας την προσομοίωση, αποδεικνύεται ότι σε κάθε περίπτωση υπάρχει μεταφορά νερού λόγω υπερχειλίσσης του ποταμού σε αρκετά κομμάτια της πόλης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι αυξάνοντας την τιμή του συντελεστή Manning's, η ποσότητα του νερού που υπερχειλίζει αυξάνεται με αποτέλεσμα να διοχετεύεται στην πόλη.

Συγκρίνοντας το πλημμυρικό πεδίο της παρούσας εργασίας με τα πλημμυρικά πεδία που υπολόγισαν οι επίσημες μελέτες Υπουργείου και Περιφέρειας, φαίνεται το πλημμυρικό πεδίο των επίσημων μελετών να καλύπτει αρκετά μεγαλύτερη έκταση, το οποίο είναι εύλογο καθώς οι μοντελοποιήσεις τους γίνονται με αρκετά υψηλές τιμές παροχής.

Κεφάλαιο 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής του ΥΔ Κρήτης (EL13). (2023).
- Asante, K., Artan, G., Pervez, M. S., Bandaragoda, C., & Verdin, J. (2008). *Technical manual for the Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM)*.
- Badaluta Minda, C. (2024). Gumbel's Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analyses of Timis River. *Qeios*. <https://doi.org/10.32388/0F56EB>
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., & Allen, P. M. (2019). Representing the Connectivity of Upland Areas to Floodplains and Streams in SWAT+. *Journal of the American Water Resources Association*, 55(3), 578–590. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12728>
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- Celray James CHAWANDA, B. (2021). *SWAT+ Toolbox User Manual*.
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?* <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>
- Chawanda, C. J., Arnold, J., Thiery, W., & van Griensven, A. (2020). Mass balance calibration and reservoir representations for large-scale hydrological impact studies using SWAT+. *Climatic Change*, 163(3), 1307–1327. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02924-x>
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ganoulis, J. (2003). Risk-based floodplain management: A case study from Greece. *International Journal of River Basin Management*, 1(1), 41–47. <https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635191>
- Gary W. Brunner. (2016). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual (5.0)*. US Army Corps of Engineers-HEC.
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Jimmy R. Williams. (1969). Flood Routing With Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*, 12(1), 0100–0103. <https://doi.org/10.13031/2013.38772>
- Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2010). A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.012>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 205–234.
- Moyroud, N., & Portet, F. (2018). Introduction to QGIS. In *QGIS and Generic Tools* (pp. 1–17). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch1>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*.
- Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., Choi, J., Cho, H., Koka, S., & Agrawal, A. (2006). ARCGIS-SWAT: A GEODATA MODEL AND GIS INTERFACE FOR SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 295–309. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03839.x>
- Onyutha, C. (2024). Pros and cons of various efficiency criteria for hydrological model performance evaluation. *Proceedings of IAHS*, 385, 181–187. <https://doi.org/10.5194/piahs-385-181-2024>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., & Tarantola S. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd.

- Schürz, C., Čerkasova, N., Farkas, C., Nemes, A., Plunge, S., Strauch, M., Szabó, B., & Piniewski, M. (2022). *SWAT+ modeling protocol for the assessment of water and nutrient retention measures in small agricultural catchments*.
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. In *Mathematics and Computers in Simulation* (Vol. 55).
- US Army Corps Of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center. (2024). *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*.
- V. T. Chow. (1951). A general formula for hydrologic frequency analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(2), 231–237. <https://doi.org/10.1029/TR032i002p00231>
- Δημήτριος Μυρωνίδης. (2021). *Υδρολογία και Υδραυλική*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Δημοσθένης Μ. Μουντράκης. (2010). *Γεωλογία και Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας* (1st ed.). University Studio Press.
- ΚΟΝΤΟΓΕΩΡΓΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ. (2014). *ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ*. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ.
- Κουτρούλης Γ. Α. (2010). *Ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα και επίδραση της κλιματικής μεταβολής στην εξέλιξη τους. Εφαρμογή στην περιοχή της Κρήτης*. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μελέτη εκ νέου οριοθέτησης και διευθέτησης της πεδινής κοίτης ποταμού Γιόφυρου*. (2023).
- Μιμίκου Μ., & Μπαλτάς Ε. (2018). *Τεχνική Υδρολογία* (6η Έκδοση). Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Σταματάκη Μαρία-Δανάη. (2019). *ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΕ ΧΩΡΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου Σχολή Περιβάλλοντος.
- Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης*. (2018).
- Τσακίρης Γ., Αντωνόπουλος Β., Γιακουμάκης Σ., Καββαδίας Γ., Καϊμάκη Σ., Κερκίδης Π., Λατινόπουλος Π., Μπαλούτσος Γ., Μπέλλος Κ., Παπαϊωάννου Γ., & Χρυσάνθου Β. (2013). *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων* (Τσακίρης Γ., Ed.). Εκδόσεις Συμμετρία .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σύγκριση τελικών τιμών παραμέτρων με εργασία που έγινε στο SWAT

Στην διπλωματική εργασία του Ιωάννη Κοντογεώργου με τίτλο «Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Γιόφυρου» έγινε η προσομοίωση στο πρόγραμμα SWAT, το οποίο αποτελεί η προηγούμενη έκδοση του SWAT+ που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία. Σε αυτό το στάδιο θα γίνει προσπάθεια σύγκρισης των τελικών τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του κάθε μοντέλου. Αρχικά, στην παρούσα διπλωματική έγινε ανάλυση ευαισθησίας σε δέκα (10) παραμέτρους και αφού κατατάχθηκαν σε σειρά σημαντικότητας, επιλέχθηκαν πέντε (5) για την βαθμονόμηση. Αυτές είναι οι $cn2$, $cn3_swf$, $esco$, $alpha$, awc . Στην διπλωματική εργασία του κ. Κοντογεώργου οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για βαθμονόμηση ήταν είκοσι τρεις (23). Από αυτές οι κοινές παράμετροι που βαθμονομήθηκαν ήταν τέσσερις.

esco

Η τελική τιμή της παραμέτρου στην διπλωματική εργασία του κ. Κοντογεώργου ήταν 0.2, ενώ στην παρούσα εργασία ήταν 0.097, η οποία είναι αρκετά χαμηλότερη.

awc (mm H₂O/ mm soil)

Στην διπλωματική εργασία του κ. Κοντογεώργου έχει γίνει διαχωρισμός των εδαφικών παραμέτρων σε πέντε τομείς όπου η παράμετρος έχει τιμές: Στον πρώτο τομέα 0.232, στον δεύτερο τομέα 0.450, στον τρίτο τομέα 0.232, στον τέταρτο τομέα 0.450 και στον πέμπτο τομέα 0.110. Στην παρούσα διπλωματική δεν έχει γίνει διαχωρισμός σε τομείς αλλά η τιμή της παραμέτρου αντιστοιχεί για κάθε ένα από τα τρία εδάφη που εμφανίζονται στην λεκάνη. Η τελική τιμή της παραμέτρου για κάθε έδαφος ήταν 0.192.

alpha (1/days)

Για την συγκεκριμένη παράμετρο στην διπλωματική εργασία του κ. Κοντογεώργου η τελική τιμή ήταν 0.025, ενώ στην παρούσα εργασία ήταν 0.091.

cn2

Η παράμετρος του Curve Number // όπως παρουσιάζεται στην εργασία του κ. Κοντογεώργου ανά HRU.

HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2
1	74	43	52	85	42	127	56
2	74	44	46	86	49	128	60
3	42	45	42	87	46	129	47
4	46	46	50	88	55	130	50
5	38	47	46	89	52	131	39
6	50	48	52	90	46	132	43
7	37	49	49	91	50	133	40.1
8	35	50	55	92	42	134	43
9	35	51	42	93	40	135	72
10	40	52	50	94	46	136	69
11	46	53	46	95	49	137	66
12	42	54	37	96	52	138	70
13	37	55	40	97	46	139	62
14	35	56	52	98	42	140	53
15	35	57	49	99	50	141	72
16	46	58	49	100	46	142	69
17	50	59	52	101	40	143	62
18	40	60	46	102	37	144	66
19	35	61	46	103	35	145	54
20	37	62	50	104	35	146	57
21	55	63	42	105	52	147	60
22	49	64	37	106	49	148	53
23	52	65	40	107	46	149	49
24	42	66	35	108	42	150	45
25	50	67	52	109	35	151	51
26	46	68	46	110	37	152	54
27	37	69	42	111	35	153	66
28	40	70	37	112	35	154	58
29	46	71	49	113	49	155	62
30	50	72	42	114	49	156	66
31	35	73	40	115	42	157	57
32	35	74	52	116	46	158	60
33	52	75	49	117	52	159	54
34	46	76	46	118	46	160	53
35	49	77	42	119	37	161	49
36	38	78	49	120	35	162	66
37	50	79	42	121	59	163	57
38	42	80	46	122	62	164	51
39	46	81	37	123	65	165	54
40	35	82	49	124	56		
41	35	83	52	125	52		
42	49	84	46	126	48		

Πίνακας 1. Βαθμονομημένες τιμές cn2 διπλωματικής εργασίας Κοντογεώργου 2014

Η παράμετρος του Curve Number // όπως παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία ανά HRU.

HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2	HRU	CN2
1	54.3	43	55.2	85	75.1	127	66.9	169	75.1	211	75.1	253	75.1
2	54.3	44	55.2	86	75.1	128	75.1	170	75.1	212	66.9	254	75.1
3	54.3	45	67.8	87	70.5	129	75.1	171	76.9	213	66.9	255	75.1
4	54.3	46	70.5	88	55.2	130	75.1	172	76.9	214	66.9	256	59.7
5	54.3	47	67.8	89	70.5	131	75.1	173	76.9	215	67.8	257	66.9
6	70.5	48	70.5	90	55.2	132	67.8	174	75.1	216	67.8	258	55.2
7	70.5	49	67.8	91	70.5	133	70.5	175	66.9	217	75.1	259	75.1
8	70.5	50	67.8	92	67.8	134	76.9	176	66.9	218	55.2	260	76.9
9	55.2	51	67.8	93	67.8	135	76.9	177	76.9	219	67.8	261	66.9
10	55.2	52	70.5	94	70.5	136	67.8	178	75.1	220	67.8	262	55.2
11	70.5	53	67.8	95	70.5	137	75.1	179	66.9	221	75.1	263	66.9
12	70.5	54	67.8	96	55.2	138	75.1	180	75.1	222	75.1	264	66.9
13	67.8	55	70.5	97	70.5	139	75.1	181	75.1	223	67.8	265	75.1
14	67.8	56	67.8	98	55.2	140	75.1	182	76.9	224	67.8	266	76.9
15	62.4	57	67.8	99	70.5	141	75.1	183	76.9	225	55.2		
16	70.5	58	75.1	100	67.8	142	76.9	184	76.9	226	67.8		
17	55.2	59	55.2	101	55.2	143	76.9	185	75.1	227	75.1		
18	55.2	60	66.9	102	55.2	144	75.1	186	75.1	228	75.1		
19	67.8	61	66.9	103	70.5	145	66.9	187	76.9	229	76.9		
20	55.2	62	75.1	104	67.8	146	66.9	188	75.1	230	76.9		
21	55.2	63	75.1	105	67.8	147	75.1	189	67.8	231	67.8		
22	67.8	64	66.9	106	67.8	148	75.1	190	75.1	232	55.2		
23	70.5	65	70.5	107	67.8	149	75.1	191	75.1	233	66.9		
24	67.8	66	67.8	108	67.8	150	69.6	192	76.9	234	55.2		
25	67.8	67	67.8	109	67.8	151	66.9	193	76.9	235	66.9		
26	67.8	68	76.9	110	75.1	152	55.2	194	67.8	236	75.1		
27	67.8	69	75.1	111	75.1	153	70.5	195	67.8	237	75.1		
28	67.8	70	75.1	112	76.9	154	67.8	196	67.8	238	66.9		
29	70.5	71	75.1	113	75.1	155	67.8	197	67.8	239	75.1		
30	70.5	72	75.1	114	67.8	156	55.2	198	67.8	240	75.1		
31	70.5	73	66.9	115	75.1	157	67.8	199	70.5	241	75.1		
32	67.8	74	76.9	116	75.1	158	67.8	200	55.2	242	67.8		
33	67.8	75	76.9	117	67.8	159	67.8	201	67.8	243	75.1		
34	67.8	76	75.1	118	70.5	160	66.9	202	67.8	244	70.5		
35	70.5	77	75.1	119	67.8	161	66.9	203	67.8	245	76.9		
36	70.5	78	76.9	120	67.8	162	75.1	204	75.1	246	67.8		
37	67.8	79	76.9	121	75.1	163	75.1	205	66.9	247	75.1		
38	55.2	80	76.9	122	55.2	164	75.1	206	66.9	248	75.1		
39	67.8	81	76.9	123	55.2	165	75.1	207	67.8	249	75.1		
40	67.8	82	75.1	124	67.8	166	75.1	208	67.8	250	76.9		
41	67.8	83	75.1	125	75.1	167	76.9	209	75.1	251	76.9		
42	55.2	84	76.9	126	75.1	168	76.9	210	66.9	252	76.9		

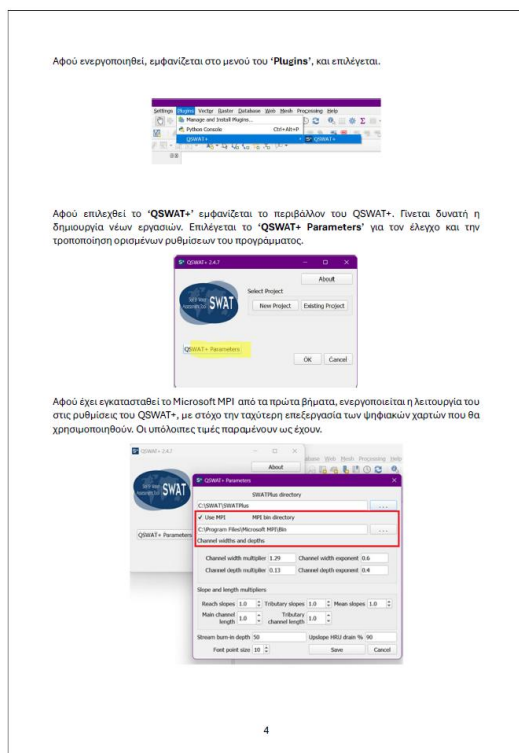
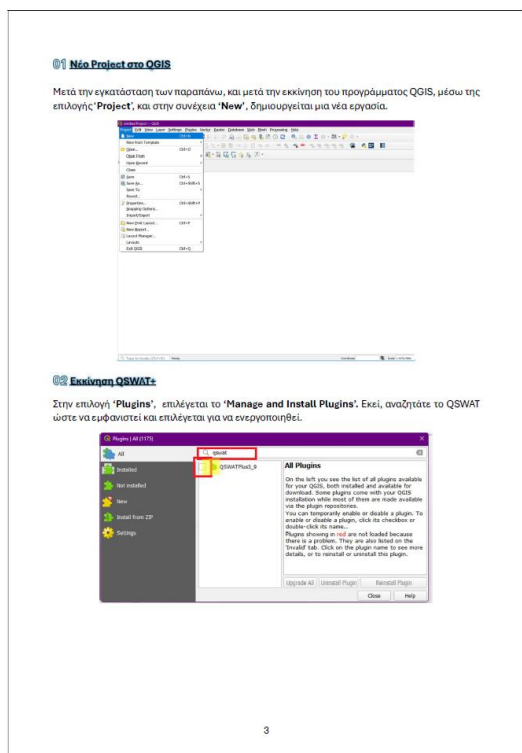
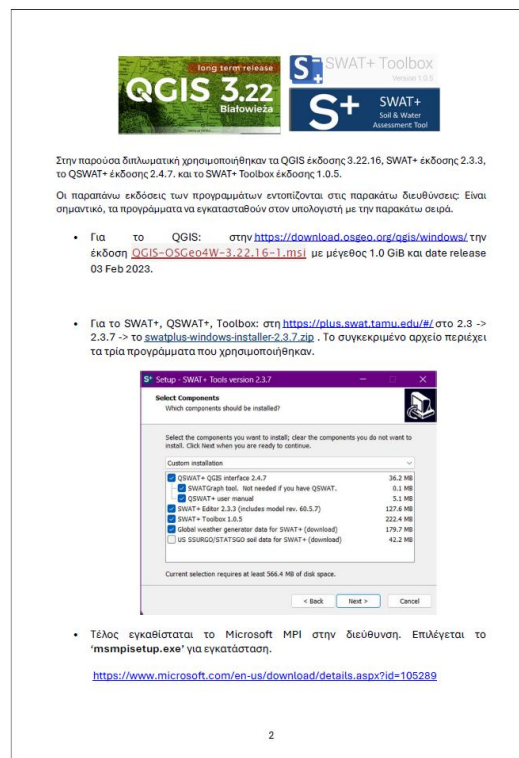
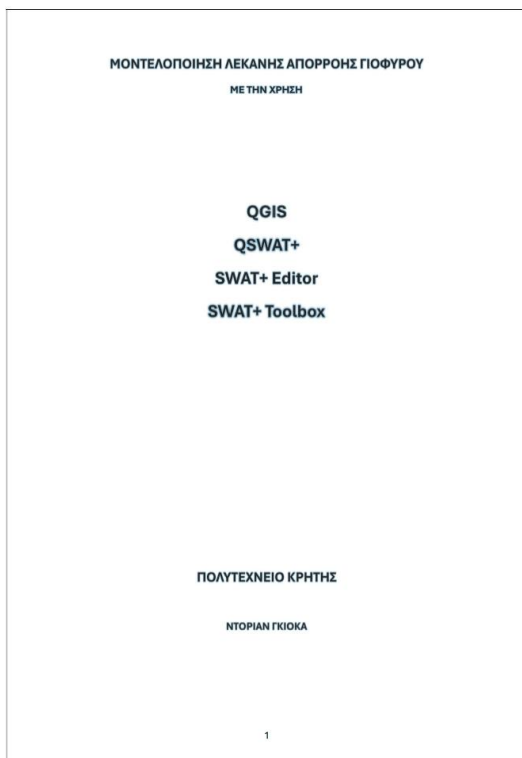
Πίνακας 2. Βαθμονομημένες τιμές cn2 στην παρούσα διπλωματική εργασία

Όπως διαφαίνεται και από τους πίνακες 1. και 2., οι τελικές βαθμονομημένες τιμές του Curve Number της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται πιο υψηλές συγκριτικά με τις τιμές της εργασίας του κ. Κοντογεώργου.

Η ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στις δυο εργασίες φαίνεται να αφορά τη χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας και της αυτόματης βαθμονόμησης. Αρχικά, πραγματοποιώντας την ανάλυση ευαισθησίας σε παραμέτρους από διάφορες ομάδες βοηθά στον καθορισμό των πιο ευαίσθητων ως προς τις μεταβολές που θα επέλθουν στο μοντέλο. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να εστιάσει την προσοχή του, στο στάδιο της βαθμονόμησης, στις πιο σημαντικές παραμέτρους για την μοντελοποιημένη περιοχή μελέτης, αφήνοντας τις υπόλοιπες στην προεπιλεγμένη τιμή από το μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν λιγότερες παράμετροι συγκριτικά με την εργασία του κ. Κοντογεώργου. Αναφορικά με την βαθμονόμηση, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η αυτόματη βαθμονόμηση θέτοντας προς βελτιστοποίηση τον δείκτη NSE. Στην συνέχεια επιλέχθηκε ο αριθμός προσομοιώσεων που θα εκτελέσει το SWAT+ Toolbox, ο οποίος ήταν 200 επαναλήψεις. Η λειτουργία της αυτόματης βαθμονόμησης τρέχει την κάθε επανάληψη χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για κάθε παράμετρο, σύμφωνα με τα όρια και τον τρόπο μεταβολής που έχει θέσει ο χρήστης. Ο στόχος είναι ο καθορισμός ενός συνδυασμού τιμών παραμέτρων που θα δίνουν την πιο υψηλή τιμή NSE. Αυτό αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα της αυτόματης βαθμονόμησης καθώς οι τιμές που θέτει στις παραμέτρους πολλές φορές δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές για μια περιοχή μελέτης παρόλο που δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στους στατιστικούς δείκτες που αξιολογούν τα μοντέλα. Για τους λόγους αυτούς, μπορεί να εξηγηθεί η διαφοροποίηση των τελικών τιμών των κοινών παραμέτρων των δυο εργασιών.

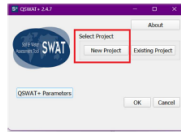
2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παρουσιάζονται τα αναλυτικά βήματα για την μοντελοποίηση του ποταμού Γιόφυρου στα προγράμματα SWAT+ και HEC-RAS.



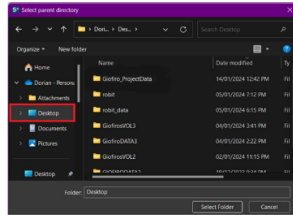
03 New QSWAT+ Project

Αφού ενεργοποιηθεί το MPI και γίνει αποθήκευση, εμφανίζεται το περιβάλλον του QSWAT+ και επιλέγεται το **'New Project'**, για την δημιουργία της εργασίας.

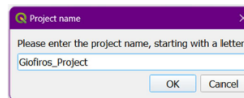


04 New QSWAT+ Project

Επιλέγεται η τοποθεσία αποθήκευσης του φακέλου της εργασίας. Σε αυτόν, θα αποθηκευτούν όλα τα αρχεία της εργασίας, όπως και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.



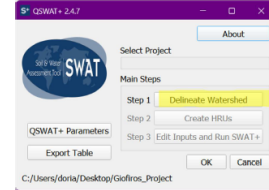
Εισάγεται το όνομα που θα πάρει η εργασία και ο φάκελος.



5

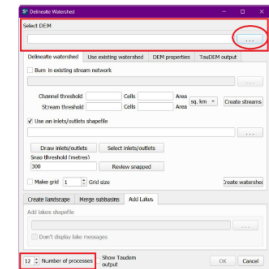
05 Delineate Watershed

Ενεργοποιείται το Step 1 του QSWAT+ **'Delineate Watershed'**, στο οποίο θα γίνει η οριοθέτηση της υπό μελέτη λεκάνης, το οποίο και επιλέγεται.



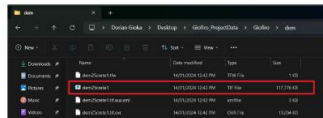
06 Delineate Watershed

Αφού ανοίξει το παράθυρο Delineate Watershed, σειρά έχει η φόρτωση του ψηφιακού χάρτη της περιοχής μελέτης. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το Number of Processes να είναι 12, για να χρησιμοποιηθεί το MPI.



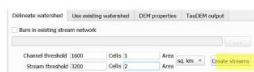
6

Εισάγεται το αρχείο dem25crete1.tif το οποίο είναι διαθέσιμο στον φάκελο των δεδομένων.



07 Create Streams

Στην συνέχεια, θέτονται οι τιμές καταψήφιο καναλιών και ποταμών με σκοπό να δημιουργηθεί η κύρια κοίτη και η διεύθυνση ροής. Όσο μικρότερη τιμή, τόσο περισσότερα κανάλια και ποτάμια θα δημιουργηθούν στον χάρτη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται 1 τετραγωνικό χλμ. για τα κανάλια και 2 τετραγωνικά χλμ. για το ποτάμι.



Με την επιλογή του **'Create Streams'**, δημιουργούνται στο QGIS τα ποτάμια και τα κανάλια για όλο τον χάρτη.



7

08 Draw Outlet

Επιλέγεται το **'Draw inlets/outlets'**, για τον σχεδιασμό του σημείου εξόδου του ποταμού. Η τιμή 300, αφορά το σημείο εφαρμογής της ένδειξης που θα τοποθετηθεί από τον χρήστη, και χρησιμεύει σαν βοηθητικό εργαλείο, ώστε ακόμα και εάν δεν τοποθετηθεί ακριβώς επάνω στην έξοδο του ποταμού, αυτά να συνεχίσουν την ακτίνα γύρω από αυτή την τιμή(βλ.παράρτημα 300m), και να τοποθετηθεί την ένδειξη ορθά.



Τοποθετείται η ένδειξη στη έξοδο του ποταμού, έπειτα χαρακτηρίζεται η ένδειξη ως **'Outlet'**, επιλέγεται το **'OK'**.



8

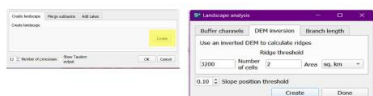
09 Create Watershed

Τέλος δημιουργείται η περιοχή μελέτης επιλέγοντας 'Create Watershed'.



10 Create Landscape

Η δημιουργία τοπίου αφορά τον σχεδιασμό της περιοχής πλημύρας εκατέρωθεν του ποταμού. Ο σχεδιασμός αυτός πραγματοποιείται επιλέγοντας τη καρτέλα 'Create Landscape'. Στην συνέχεια στο παράθυρο 'Landscape Analysis' που εμφανίζεται, επιλέγεται το 'Create' και μετά το 'Done'.



9

Παρουσιάζεται στο QGIS το νέο τοπίο που δημιουργείται με ενσωματωμένο τον χάρτη πλημύρας.

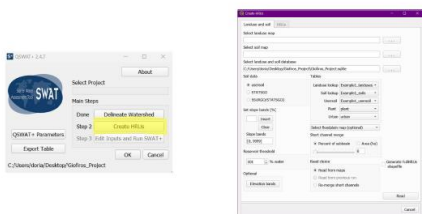


Στο τέλος, επιλέγεται το OK για την έξοδο από το Delineate Watershed, και την επιστροφή στο μενού του QSWAT+.

10

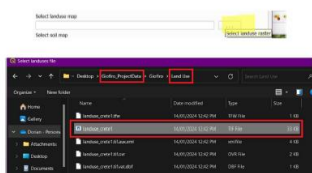
11 Create HRUs

Στο μενού του QSWAT+, ενεργοποιείται το Step 2, δηλαδή η δυνατότητα δημιουργίας των HRUs. Αφού επιλεγεί το 'Create HRUs', εμφανίζεται το παράθυρο στο οποίο θα πρέπει να εισαχθούν δεδομένα για τις χρήσεις γης της περιοχής, δεδομένα για τους τύπους των εδαφών και για τις κλίσεις.



12 Landuse Map

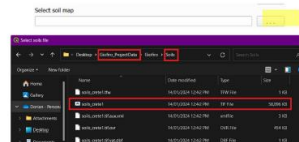
Για την εισαγωγή χρήσεων γης επιλέγεται το 'Select landuse map'. Εισάγεται ο χάρτης χρήσεων γης ο οποίος εντοπίζεται στον φάκελο των δεδομένων χρήσεων γης, στο αρχείο 'landuse_crete1.tif'.



11

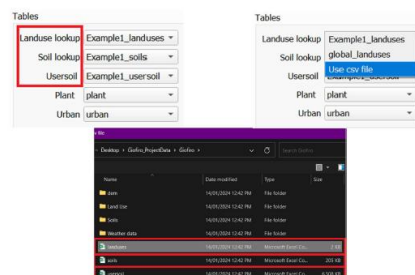
13 Soils Map

Αντίστοιχα, για την εισαγωγή των εδαφών επιλέγεται το αρχείο 'soils_crete1.tif' για να εισαχθεί στην επιλογή 'Select soil map'.



14 CSV Files

Στην συνέχεια, επιλέγεται κάθε φορά ένα από τα 'Landuse lookup', 'Soil lookup' και 'Usersoil' και εισάγονται τα Excel CSV Files στα οποία είναι αποθηκευμένες όλες οι πληροφορίες των χαρτών που φορτώθηκαν προηγουμένως.



12

16 Slopes

Εισαγωγή των κλίσεων με κατώτερη τιμή το 0 και ενδιάμεσες 5, 15 και ανώτερη 9999. Εισάγεται η τιμή 5, έπειτα επιλέγεται το 'Insert' και καταχωρείται. Αντίστοιχα για την τιμή 15.

Set slope bands (%)

Plant Urban

Set slope bands (%)

Insert

Insert a new division between slope bands

Slope bands [0, 9999]

Short channel method Percent of s

Slope bands [0, 5, 15, 9999]

Στην επιλογή 'Read' υπολογίζονται τα HRUs της περιοχής, και απεικονίζονται στην περιοχή μελέτης στο QGIS. Σημαντικό είναι να έχει επιλεγεί το 'Generate FullHRUs shapefile', ώστε να εμφανίσει όλα τα πιθανά HRUs.



13

18 Create HRUs

Με την δημιουργία των όλων των HRUs, δίνεται πρόσβαση σε περαιτέρω επεξεργασία αυτών, στην καρτέλα 'HRUs'. Εκεί επιλέγεται το 'Filter by landuse' για να εισαχθούν οι επιθυμητές τιμές.

Create HRUs

Landuse and soil

Optional

Single/Multiple HRUs

Landuse, soil, slope ID

0 slope (1.00)

0 soil (%) (1.00)

0 pre (1.00)

Threshold method

Generate HRUs

Εισάγονται οι τιμές κατωφλίου: 15% για χρήσεις γης, 15% για εδάφη και σε 30% για την κλίση. Στην συνέχεια επιλέγεται το 'Create HRUs'.

Create HRUs

Landuse and soil

Optional

Single/Multiple HRUs

Landuse, soil, slope ID

0 slope (1.00)

0 soil (%) (1.00)

0 pre (1.00)

Threshold method

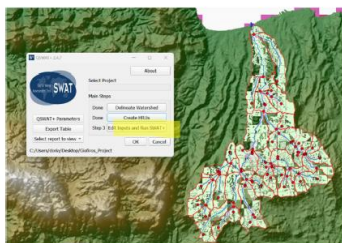
Generate HRUs

Στον χάρτη του QGIS, εμφανίζεται η περιοχή μελέτης στην οποία έχουν φιλτραριστεί τα HRUs.

14

17 Swat+ Editor

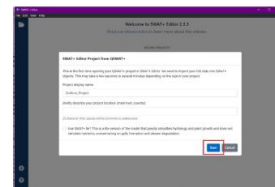
Στο μενού του QSWAT+ εμφανίζεται πλέον το Step 3, η επιλογή της επεξεργασίας του μοντέλου, η οποία επιλέγεται για την εκκίνηση της SWAT+ Editor.



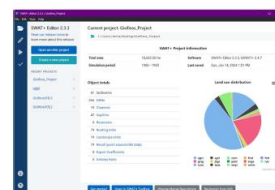
15

19 Edit Inputs and Run SWAT+

Όσα είχαν προηγουμένως εισαχθεί στο QSWAT+ μεταφέρονται στο SWAT+ και γίνεται δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Επιλέγεται το 'Start' για να μεταφερθεί η εργασία στο περιβάλλον του Editor.



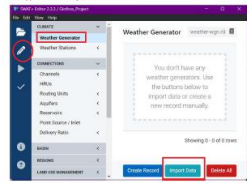
Αρχικά, εμφανίζονται αρκετές συγκεντρωμένες πληροφορίες σχετικά με την περιοχή που μελετάται.



16

18 Weather Generator

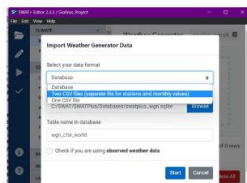
Στην επιλογή 'Edit SWAT+ Inputs' (μολύβι) εμφανίζονται αρκετές επιλογές για την επεξεργασία των δεδομένων του μοντέλου. Αρχικά, στην καρτέλα 'Climate' επιλέγεται το 'Weather Generator' και στην συνέχεια το 'Import Data'.



Το SWAT+ χρειάζεται μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία θα τα εντοπίσει από παγκόσμιες βάσεις δεδομένων ή θα τα λάβει από τον χρήστη.

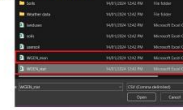
20 Weather Stations Data

Στην συγκεκριμένη εργασία, θα χρησιμοποιηθούν δύο αρχεία CSV στα οποία είναι καταγεγραμμένοι οι μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης, όπως και οι μετρήσεις τους για μια μεγάλη χρονική περίοδο.

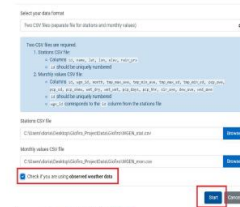


17

Επιλέγονται τα δύο CSV αρχεία και εισάγονται.



Αφού επιλέχθηκαν οι σταθμοί και οι μετρήσεις τους, επιλέγεται το 'Check if you are using Observed Weather Data' καθώς στα δεδομένα υπάρχουν όλες τις παρατηρούμενες τιμές για καιρικά δεδομένα.



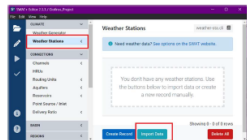
Αφού επιλεγεί το 'Start', εμφανίζονται οι σταθμοί, όπως και διάφορες πληροφορίες για αυτούς.



18

21 Weather Stations

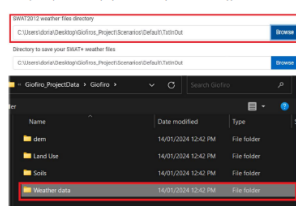
Στην συνέχεια, στην ίδια καρτέλα επιλέγεται το 'Weather Stations' και στην συνέχεια το 'Import Data'.



Επιλέγεται τι είδους δεδομένα θα εισαχθούν, δηλαδή σε τι μορφή θα είναι τα αρχεία που θα περιέχουν όλα τα δεδομένα.

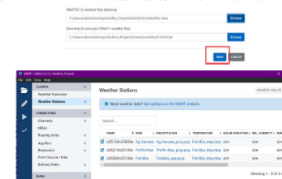


Επιλέγεται το 'Browse' για την εύρεση του φακέλου όπου βρίσκονται τα δεδομένα. Εκεί επιλέγεται ο φάκελος 'Weather Data', στον οποίον βρίσκονται οι μετρούμενες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας σε rcr file και tnp file αντίστοιχα.



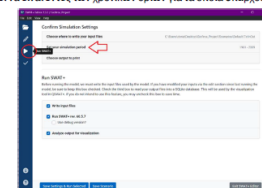
19

Στην επιλογή 'Start' εισάγονται τα δεδομένα των σταθμών στο μοντέλο και παρουσιάζονται όλοι οι μετεωρολογικοί σταθμοί μαζί με τα αρχεία βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.



22 Running SWAT+

Στην τελική γραμμή και αφού επιλεγεί το 'Run SWAT+' εμφανίζεται η καρτέλα στην οποία θα ρυθμιστεί η λειτουργία του μοντέλου. Αρχικά, επιλέγεται η χρονική περίοδος της προσομοίωσης η οποία θα πρέπει να είναι εντός των χρονικών ορίων για τα οποία υπάρχουν δεδομένα.



20

Η χρονική περίοδος στην οποία θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση είναι από 01/01/1975 έως 31/12/2002.

Set your simulation period 1993 - 1997

Make sure your simulation dates fall within the dates in your observed weather files. Simulation dates outside this range will result in simulated weather.

Starting date of simulation
September 1, 1993

Ending date of simulation
August 31, 1997

Στην συνέχεια επιλέγεται η επιθυμητή μορφή εκτύπωσης των αποτελεσμάτων στο **Choose output to print**, ανάλογα την χρήση για την οποία προορίζονται, όπως για παράδειγμα την σύγκριση με δεδομένα πεδίου, την απεικόνιση τους στον χάρτη του QGIS κ.α. Επιλέγεται χρόνος προθέρμανσης του μοντέλου τα 2 χρόνια.

Choose output to print

Warm-up period
2

Number of years to skip printing output

Daily Monthly Yearly Average Outputs

Model Components

Channel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	channel_sd channel_sdmorph
Aquifer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	aquifer
Reservoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	reservoir
Point Source (Recall)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	recall
Routing Unit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ru
Hydrology	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	hyd
Water Allocation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	water_allo

Basin Model Components

Channel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	basin_sd_cha basin_sd_chamorph
---------	-------------------------------------	--------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

21

Στην συνέχεια, αποθηκεύονται οι αλλαγές που έγιναν προηγουμένως και γίνεται η εκκίνηση της προσομοίωσης του μοντέλου.

Run SWAT+

Before running the model, we must write the input files used by the model. The model has a built-in tool to help you do this. Check the third box to use the visualization tool in QSWAT+. If you do not intend to use this feature, you can skip this step.

☒ Write input files

☒ Run SWAT+ now: 60.5.7

☐ Use debug version?

☒ Analyse output for visualization

Save Settings & Run Simulation Run Simulation

Run SWAT+ Check

Αφού τρέξει το μοντέλο, επιλέγεται το **'Run SWAT+ Check'** για να εμφανιστούν τα αποτελέσματα. Εμφανίζονται ορισμένα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε. Στην πλευρά αριστερά μπορούν να επιλεγούν συγκεκριμένες καρτέλες για περισσότερη λεπτομέρεια. Τελος γίνεται επιστροφή στο μενού του QSWAT+ από την επιλογή Exit SWAT+ Editor.

SWAT+ Check

SWAT+ Check reads model output from a SWAT+ project and performs many simple checks to identify potential model problems. The model output of this program is to identify model problems early in the modeling process. Model output problems often result in the need to re-evaluate or re-run the model, resulting in an additional waste of time. This program is designed to compare a series of SWAT+ output to model input based on the output of model development. A warning does not necessarily indicate a problem. The program is to help attention to model problems. The software also provides a visual representation of model output results in a map view.

Model Version	SWAT+ v60.5.7	Watershed Area	10,000.00 ha
Simulation Length	3 years	HRU	200
Warm-up	2 years	Units	mm
Weather	Observed	Databases	47

22

Visualise

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και την έξοδο από το SWAT+ Editor, ενεργοποιείται το Step 4 του QSWAT+, που έχει να κάνει με την ανάγνωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και απεικόνισή τους στο QGIS.

QSWAT+ 2.4.7

Select Project

Main Steps

Done Delineate Watershed

Done Create HRUs

QSWAT+ Parameters Step 3 Edit Inputs and Run SWAT+

Export Table Step 4 Visualise

Select report to view

OK Cancel

C:/Users/dorian/Desktop/Gadinos_Project

Με την επιλογή του **'Visualise'**, ανοίγει η καρτέλα 'Visualise Results' και ο χάρτης εστιάζει μόνο στην περιοχή μελέτης. Έχοντας όλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, γίνεται δυνατός ο έλεγχος της ποσότητας του νερού που υπάρχει στον ποταμό που μελετάται καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης και την σύγκριση των τιμών αυτών με τις πραγματικές, όπως επίσης και η οπτικοποίηση διάφορων άλλων πληροφοριών σχετικών με την λεκάνη που μελετάται.

Visualise Results

Choose scenario: Choose SWAT+ output table

Choose period: Default

Start date: 1 September 1993

End date: 31 August 1997

Static maps: Animated maps: Plots: Post process:

Choose results display: #BasinChannel or #Downstream

Choose variables: By out: No out

Choose settings: All All Out

Print: 1 Landscape: 1 Units: Number of: 10 Post

OK Cancel

Αρχικά, στην επιλογή **'SWAT+ output table'** επιλέγεται ο πίνακας **'channel_sd_mon'** καθώς σε αυτόν έχουν αποθηκευτεί οι τιμές παροχής σε μηνιαίο βήμα. Στην συνέχεια, προστίθεται η μεταβλητή **'No_out'** για την απεικόνιση της.

23

Visualise Results

Choose scenario: Choose SWAT+ output table

Choose period: Default

Start date: 1 September 1993

End date: 31 August 1997

Static maps: Animated maps: Plots: Post process:

Choose results display: #BasinChannel or #Downstream

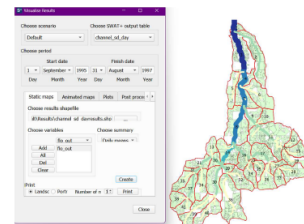
Choose variables: By out: No out

Choose settings: All All Out

Print: 1 Landscape: 1 Units: Number of: 10 Post

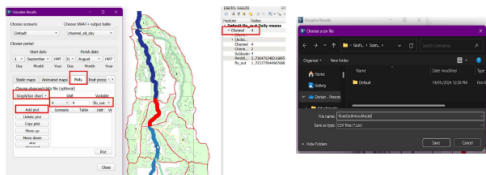
OK Cancel

Επί, εμφανίζεται, με διάφορες χρωματικές απεικονίσεις, η παροχή του ποταμού για κάθε μήνα καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

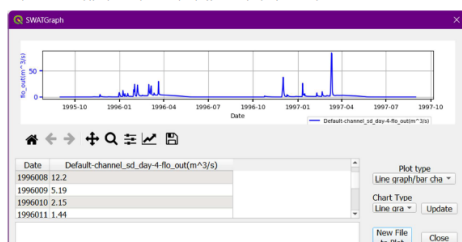


24

Στην συνέχεια, στην καρτέλα 'Plots', επιλέγεται η μεταβλητή 'flo_out', όπως και το ποίο κομμάτι του ποταμού είναι προς μελέτη. Στην προκειμένη περίπτωση είναι το Channel 4 καθώς σε εκείνη την ζώνη, βρίσκεται ο σταθμός μέτρησης παροχής του ποταμού. Επιλέγεται το 'Add plot' και έπειτα το 'Plot'. Αποθηκεύεται σε CSV File στον φάκελο της εργασίας.



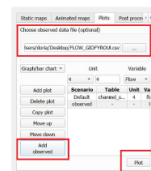
Παρουσιάζεται η γραφική παράσταση παροχής ανά ημέρα για τα έτη από το 1995 έως το 1997.



25

Observed Data

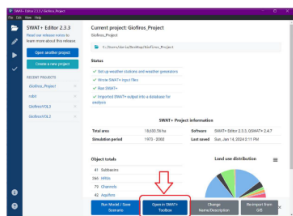
Σε περίπτωση που υπάρχουν παρατηρούμενες τιμές, εισάγονται για την σύγκριση και αξιολόγηση του μοντέλου με την πραγματικότητα. Επιλέγεται το αρχείο 'FLOW.GIOFYROU' με τις παρατηρούμενες τιμές και στην συνέχεια το 'Add Observed' και τέλος 'Plot'. Αποθηκεύεται το αρχείο στον ίδιο φάκελο με προηγούμενους. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται το γεγονός πως θα πρέπει να μεταβληθούν οι ημερομηνίες της προσομοίωσης και να είναι ίδιες με αυτές για τις οποίες υπάρχουν τιμές πεδίου. Παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των δύο παροχών, μοντέλου και πεδίου. Παρατηρείται ο δείκτης $NSE=0.08$ ο οποίος υποδηλώνει τη μη ικανοποιητική απόδοση της πραγματικότητας. Αυτό σημαίνει, πως θα πρέπει να συνεχιστεί η επεξεργασία το μοντέλου με επόμενο βήμα την βαθμολόγηση για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων.



26

SWAT+ Toolbox

Επανεκκινείται το SWAT+ Editor με σκοπό την εύρεση του εργαλείου 'SWAT+ Toolbox'. Σε αυτό, θα εισαχθούν τιμές πεδίου για σύγκριση, θα τροποποιηθούν οι τιμές ορισμένων παραμέτρων και έπειτα θα αξιολογηθούν τα νέα αποτελέσματα.



Date format

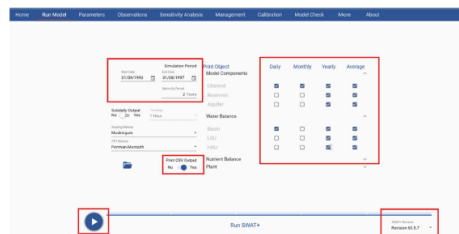
Αρχικά θα πρέπει να οριστεί η ημερομηνία του υπολογιστή ως εξής:

Date formats
Short date:

27

Edit Inputs and Run SWAT+ on Toolbox

Αφού παρουσιαστεί το παράθυρο του SWAT+ Toolbox, επιλέγεται η καρτέλα 'Run Model'. Αρχικά, στην κάτω δεξιά πλευρά επιλέγεται το 'Revision 60.5.7' καθώς αυτή η έκδοση χρησιμοποιήθηκε στο SWAT+ Editor. Στη συνέχεια, επιλέγεται το Daily για το Channel στο Print Object, τοποθετείται η ημερομηνία προσομοίωσης 01/09/1993-31/08/1997 με 2 χρόνια warm up. Επιλέγεται το Yes στο Print CSV Output για να εξάγει τα αποτελέσματα σε csv files για ευκολότερη επεξεργασία. Το πρώτο τρέξιμο θα γίνει στην περίοδο 1995-1997, δηλαδή την περίοδο της προσομοίωσης, ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν εμφανίζεται κάποιο ζήτημα.



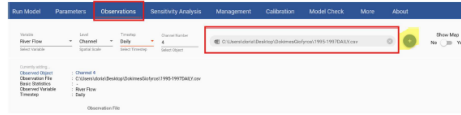
Εφόσον δεν εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα, εισάγεται η περίοδος στην οποία θα γίνει βαθμολόγηση. Για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από το 1995 έως το 1997 και από το 1978-1984. Εται, χωρίστηκαν σε δυο περιόδους, στην περίοδο βαθμολόγησης 1995-1997 και την περίοδο επαλήθευσης 1980-1983. Εισάγεται η περίοδος βαθμολόγησης 01/09/1993-31/08/1997 με 2 χρόνια, και επιλέγεται το Run Model.

Simulation Period
Start Date: 01/09/1993
End Date: 31/08/1997
Warm-Up Period: 2 Years

28

30 Observations on Toolbox

Στην καρτέλα **'Observations'** εισάγεται το CSV αρχείο '1995-1997/DAILY' στο οποίο υπάρχουν οι τιμές πεδίου. Στο συγκεκριμένο αρχείο, βρίσκονται οι μετρούμενες τιμές παροχής από το 1995 έως το 1997. Επιλέγεται ως μεταβλητή το River Flow, έπειτα το Channel, στη συνέχεια το Daily καθώς οι παρατηρούμενες τιμές παροχής είναι ημερήσιες και τέλος το Channel Number 4 καθώς σε αυτό το κομμάτι βρίσκεται ο σταθμός μέτρησης.



29

30 Parameters

Στην συνέχεια προτίθενται μερικές πιθανές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στην βαθμονόμηση. Οι συγκεκριμένες παράμετροι θα περάσουν πρώτα από ανάλυση ευαισθησίας για να καθοριστούν εάν επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα. Αρχικά, επιλέγοντας το **Parameter Group**, εντοπίζονται οι κατηγοριοποιημένες ομάδες των παραμέτρων. Έχοντας επιλέξει την ομάδα, στο **Parameter Name** επιλέγεται πιο ειδικά η παράμετρος που θα εισαχθεί. Το **Change Type** ορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης θέλει να επηρεάσει οι αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων κατά την διάρκεια της ανάλυσης και βαθμονόμησης. Το **percentage** λαμβάνει την ήδη υπάρχουσα τιμή και την αυξάνει ή την μειώνει κατά ένα προκαθορισμένο ποσοστό. Το **replace** λαμβάνει την ήδη υπάρχουσα τιμή και την αντικαθιστά. Το **relative change** λαμβάνει την ήδη υπάρχουσα τιμή και της προστίθεται ή της αφαιρείται ένας προκαθορισμένος αριθμός. Το **minimum** και **maximum** είναι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για να γίνουν οι μεταβολές στις ήδη υπάρχουσες τιμές των παραμέτρων. Για παράδειγμα στη παράμετρο **cn2** θα χρησιμοποιηθεί το **percentage** για μεταβολή της τιμής και τα όρια της μεταβολής αυτής θα είναι από **-20%** έως **+40%** της αρχικής τιμής. Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν παρουσιάζονται παρακάτω:

10 Parameters added

Group	Name	Change Type	Minimum	Maximum	Units
Soil	cn2	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_2	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_3	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_4	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_5	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_6	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_7	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_8	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_9	Percent	-20	40	%
Soil	cn2_10	Percent	-20	40	%

30

31 Sensitivity Analysis

Επιλέγεται η καρτέλα **'Sensitivity Analysis'**, όπου θα υπολογιστεί, έπειτα από ανάλυση, ποιες παράμετροι είναι πιο ευαίσθητες για το μοντέλο. Επιλέγεται μια από τις διαθέσιμες μεθόδους με την οποία θα γίνει η ανάλυση (στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος **Sobolj**), καθώς μετά από αρκετές δοκιμές, ήταν η μόνη που παρουσίαζε σταθερά ίδια αποτελέσματα), προστίθεται το αρχείο με τις τιμές πεδίου (Channel 4 Daily River Flow) και τέλος, τον αριθμό των επαναλήψεων που θέλει ο χρήστης να εκτελεστούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το **seed** ήταν 100 και τα **samples** 2200 (περίπου 11 ώρες διάρκεια).

Παρουσιάζονται σε σειρά οι πιο ευαίσθητες παράμετροι. Έτσι, όσες βρίσκονται χαμηλά, μπορούν να διαγραφούν και να μην βαθμονομηθούν αφού οι αλλαγές που επέρχονται σε αυτές, δεν θα επιφέρουν σημαντικές αλλαγές, όσο οι πρώτες.

Sensitivity Analysis Results

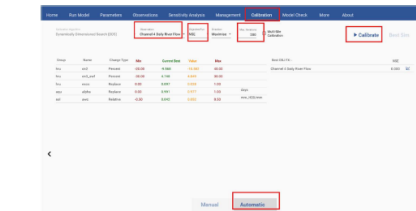
Group	Parameter	Value	Rank
Soil	cn2	0.0000000000000000	1
Soil	cn2_2	0.0000000000000000	2
Soil	cn2_3	0.0000000000000000	3
Soil	cn2_4	0.0000000000000000	4
Soil	cn2_5	0.0000000000000000	5
Soil	cn2_6	0.0000000000000000	6
Soil	cn2_7	0.0000000000000000	7
Soil	cn2_8	0.0000000000000000	8
Soil	cn2_9	0.0000000000000000	9
Soil	cn2_10	0.0000000000000000	10

Για να διαγραφούν, επιλέγεται η καρτέλα **Parameters** και υπάρχει επιλογή για την διαγραφή τους στα πλαίσια κάθε παραμέτρου.

31

32 Automatic Calibration

Στην συνέχεια, στην καρτέλα **'Calibration'**, εισάγονται τα παρατηρούμενα δεδομένα από τα **Observations**. Έπειτα, επιλέγεται ένας από τους τρεις διαθέσιμους δείκτες (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο **NSE**) που χρειάζεται βελτιστοποίηση και εισάγεται το πλήθος των επαναλήψεων (οι 200 επαναλήψεις θεωρήθηκαν αρκετές για την αυτόματη βαθμονόμηση) που επιθυμεί ο χρήστης και τέλος εκκινεί η αυτόματη βαθμονόμηση επιλέγοντας το **'Calibrate'**.



Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται παρακάτω:

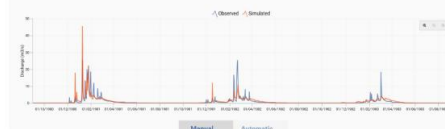


32

The screenshot shows the top navigation bar of the software with four tabs: 'Run Model', 'Parameters', 'Observations', and 'Sensitivity Analysis'. The 'Run Model' tab is highlighted with a red box. Below the tabs, on the right side, is a 'Simulation Period' section, also highlighted with a red box. It contains three input fields: 'Start Date' with the value '01/01/1970', 'End Date' with the value '31/03/1980', and 'Monthly Period' with the value '2 Years'. Each input field has a small calendar icon to its right.

[illegible]

33

[illegible]

34

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΓΙΟΦΥΡΟΥ
ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ

HEC-RAS

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΝΤΟΡΙΑΝ ΓΚΙΟΚΑ

1



US Army Corps
of Engineers

Hydrologic Engineering Center

Στην παρούσα διδασκαλία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 6.4.1 του προγράμματος HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center- River Analysis System).

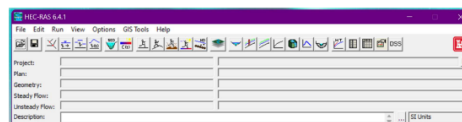
Η παραπάνω έκδοση του προγράμματος εντοπίζεται στην παρακάτω διεύθυνση:

- <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasrn/6.4.1>

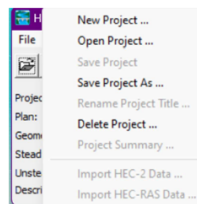


01 Νέα Project στο HECRAS

Παρακάτω παρουσιάζεται το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος.

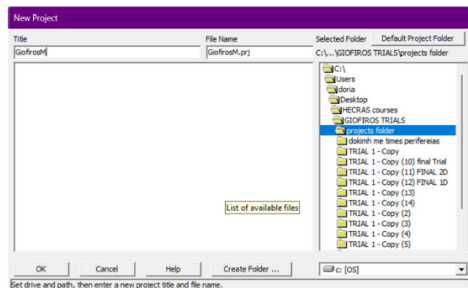


Στην επιλογή File και έπειτα New Project γίνεται δυνατή η εκκίνηση της εργασίας.

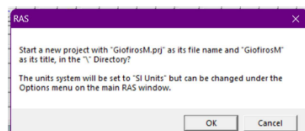


2

Δίνεται το όνομα της εργασίας και αποθηκεύεται σε φάκελο της επιλογής του χρήστη.

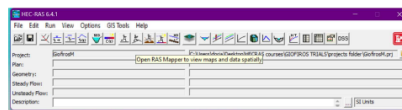


Αφού γίνει αποθήκευση της νέας εργασίας, στην επιστροφή στο αρχικό μενού, εμφανίζεται ερώτημα του προγράμματος σχετικά με τις μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν. Εφόσον είναι στο SI, γίνεται αποδοχή.

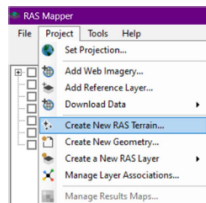


3

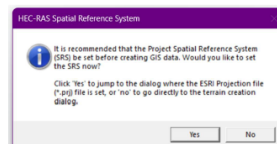
Επιλέγεται το εικονίδιο του RAS Mapper, για την εισαγωγή δεδομένων σχετικά με την περιοχή μελέτης.



Στην καρτέλα Project, επιλέγεται το Create New RAS Terrain για την εισαγωγή του DEM της περιοχής.

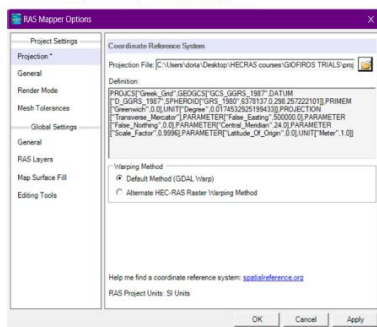


Το επόμενο ερώτημα του προγράμματος έχει να κάνει αναφορικά με την γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής. Εφόσον διατίθεται αρχείο με αυτή, επιλέγεται το YES

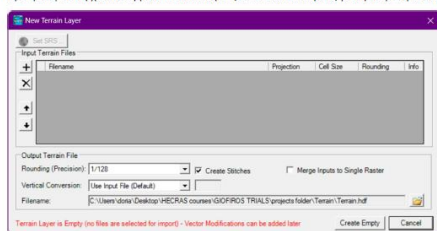


4

Εισάγεται το αρχείο του Projection της περιοχής.

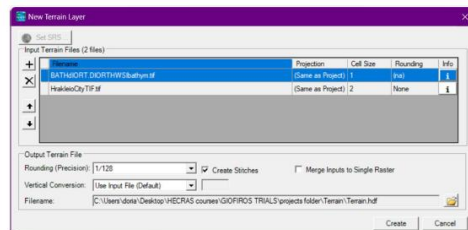


Στην συνέχεια, ανοίγει το παράθυρο της εισαγωγής του DEM. Επιλέγεται το κουμπι (+) και ανοίγει η πρόσβαση στα αρχεία που βρίσκονται αποθηκευμένα στον υπολογιστή για την εύρεση του DEM.

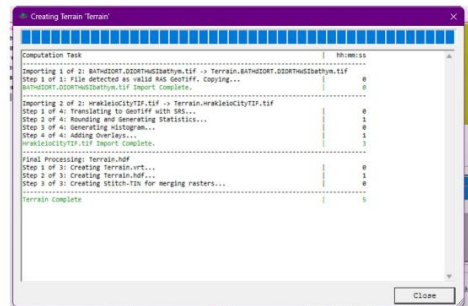


5

Επιλέγονται τα αρχεία του DEM. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν δυο αρχεία καθώς το ένα περιέχει την αποτύπωση της ευρύτερης περιοχής γύρω από τον Ποταμό Γιοφόρο, ενώ το δεύτερο περιέχει την αποτύπωση της βαθμμετρίας του ποταμού.



Εμφανίζεται το παράθυρο της φόρτωσης των δυο DEM. Σε περίπτωση που υπάρχει πρόβλημα με την φόρτωση, το πρόγραμμα εμφανίζει ακριβώς το σημείο που υπάρχει το πρόβλημα ώστε ο χρήστης να το διορθώσει.

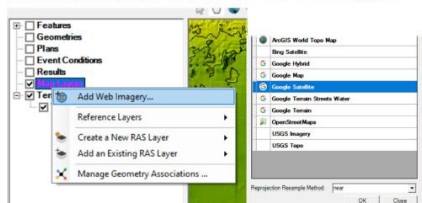


6

Εμφανίζεται η περιοχή μελέτης στον χάρτη.



Στο πλαίσι του χάρτη, στην επιλογή Map Layers επιλέγεται το Add Web Imagery, για την φόρτωση κάποιου δορυφορικού χάρτη για την επεξεργασία των δεδομένων που εισήχθησαν.



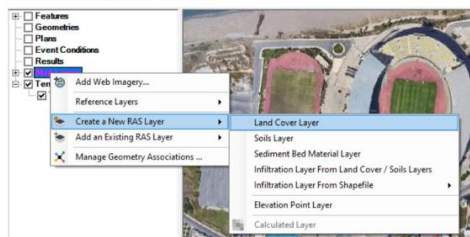
7

Έτσι παρουσιάζεται και ο χάρτης γύρω από την περιοχή του ποταμού.

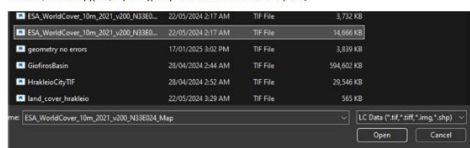


8

Εισάγεται το αρχείο χρήσεων γης από τον δορυφόρο Corine ώστε να υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τον συντελεστή τραχύτητας Manning.

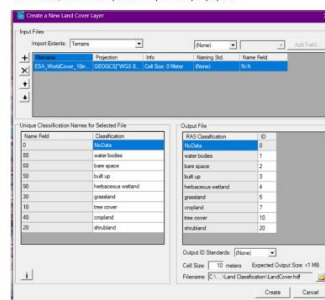


Εντοπίζεται το αρχείο, αφού έχει εγκατασταθεί στον υπολογιστή.

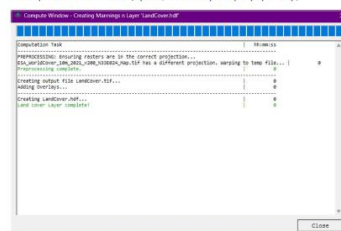


9

Σε περίπτωση που η κατηγοριοποίηση εμφανίζεται με αριθμούς όχι με όνομα, οι αριθμοί μπορούν να αντικατασταθούν όπως αναφέρονται παρακάτω. Επιπλέον, στην επιλογή Cell Size, αντικαθίσταται με 10 meters, όσο είναι η ανάλυση του δορυφόρου.



Επιλέγεται το Create και εμφανίζεται το παράθυρο φόρτωσης.



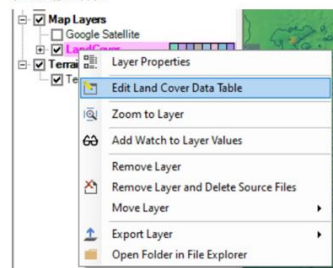
10

Έτσι, εμφανίζεται στον χάρτη και η πληροφορία χρήσης γης για κάθε σημείο.

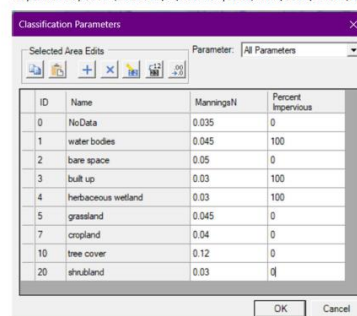


11

Στην επιλογή Land Cover, πατώντας το δεξί κλικ γίνεται δυνατή η επεξεργασία των τιμών Manning για κάθε χρήση γης.



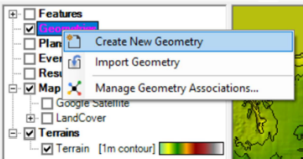
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές που εισάγονται, όπως αυτές εντοπίζονται στην βιβλιογραφία.



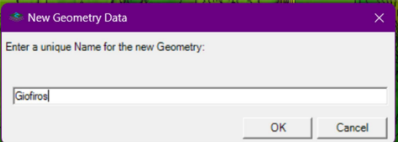
12

Σχεδιασμός Ποταμού

Στην συνέχεια, με δεξί κλικ στο Geometry, επιλέγεται το Create New Geometry, για τον σχεδιασμό του ποταμού στο πρόγραμμα.

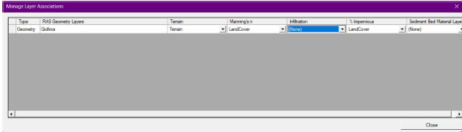


Εισάγεται το όνομα

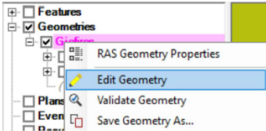


13

Στο συγκεκριμένο παράθυρο, επιλέγουμε στην στήλη Manning's n και Impervious, την επιλογή Land Cover. Αυτό συμβαίνει για να υπάρχει σύνδεση του ποταμού που θα σχεδιαστεί με τα χαρακτηριστικά των χρήσεων γης που εισήχθησαν νωρίτερα.

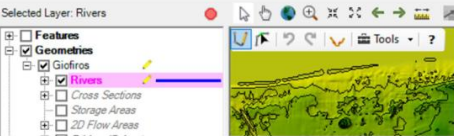


Κάτω από το Geometries, στο Giofros που δημιουργήθηκε επιλέγεται το Edit Geometry




14

Επιλέγεται το Rivers και το μολύβι ώστε να σχεδιαστεί η κοίτη του ποταμού.

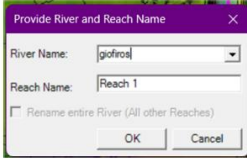


Σχεδιάζετε η γραμμή που αντιπροσωπεύει την κοίτη του ποταμού από τα ανάντη προς τα κατόντη. Στο σημείο της εκβολής με διπλό κλικ τερματίζεται η σχεδίαση.

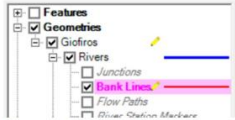


15

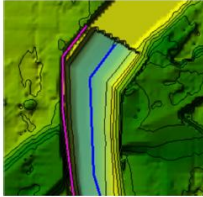
Αμέσως το πρόγραμμα ζητάει το όνομα του ποταμού, και εισάγεται.



Αντίστοιχα, το ίδιο συμβαίνει με το Bank Lines, για να σχεδιαστούν οι όχθες εκατέρωθεν της κοίτης.

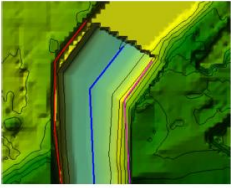


Η αριστερή όχθη στην εκβολή.



16

Η δεξιά όψη της εκβολής.



Αντίστοιχα, σχεδιάζεται η περιοχή όπου δύναται να εμφανιστεί νερό σε περίπτωση πλημμύρας.

Geometries

- ☒ Geofires
- ☒ Rivers
 - ☐ Junctions
 - ☒ Bank Lines
 - ☒ Flow Paths
 - ☐ River Station Markers
- ☐ Time Scales

17



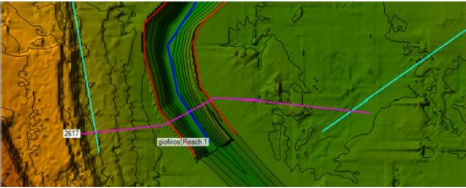
Στην συνέχεια εισάγονται τα Cross Sections όπου με γραμμές που σχεδιάζονται αποτυπώνεται το εδαφικό προφίλ του κάθε σημείου.

Features

Geometries

- ☒ Geofires
- ☒ Rivers
 - ☐ Junctions
 - ☒ Bank Lines
 - ☒ Flow Paths
 - ☐ River Station Markers
- ☒ Cross Sections
- ☐ Storage Areas
- ☐ 2D Flow Areas
- ☐ Bridges/Culverts

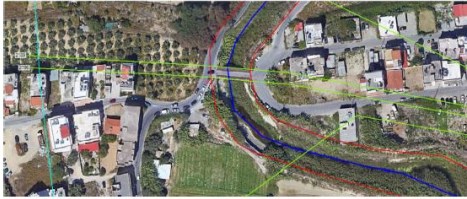
Είναι σημαντικό η γραμμή του Cross Section να ξεκινά και να τελειώνει στην εξωτερική πλευρά των γραμμών που σχεδιάστηκαν. Επιπλέον, θα πρέπει οι γραμμές που διασχίζουν τον ποταμό, θα πρέπει να είναι σχεδόν κάθετες στην διεύθυνση του.



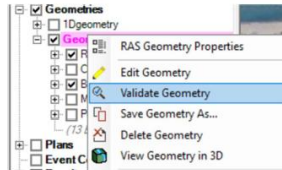
19



Τα σημεία που παρουσιάζονται κοντά οι γραμμές, είναι τα σημεία που βρίσκονται οι γέφυρες και θα πρέπει να σχεδιάζονται αρκετά κοντά σε αυτές.



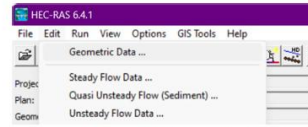
Τέλος, γίνεται έλεγχος του σχεδιασμού για τυχόν λάθη του χρήστη κατά την σχεδίαση των γραμμών. Εφόσον δεν εμφανίζονται, συνεχίζεται η μοντελοποίηση.



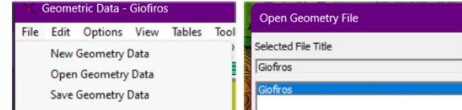
21

Δημιουργία Γεφυρών

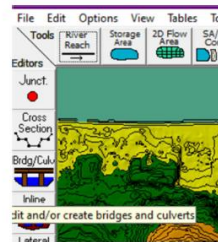
Για την δημιουργία των γεφυρών στο πρόγραμμα επιλέγεται από το αρχικό μενού το Geometric Data.



Επιλέγεται το Open Geometry Data, όπου φορτώνεται ο σχεδιασμός του ποταμού που έγινε προηγουμένως.

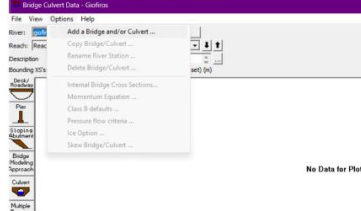


Στην συνέχεια, στις πλαινές επιλογές μέσω του Bridges/Culverts γίνεται δυνατό να εισαχθούν δεδομένα για τις γεφυρές.



22

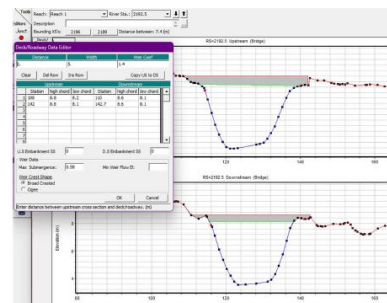
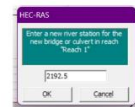
Στα options, επιλέγεται η δημιουργία γεφυρών.



No Data for Plot

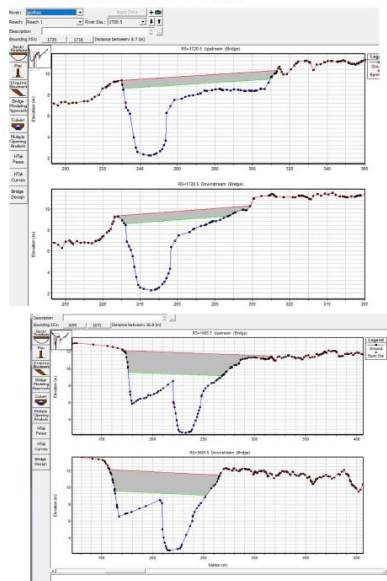
23

Στη συνέχεια εμφανίζεται μήνυμα στο οποίο το πρόγραμμα ζητά το σημείο όπου θα τοποθετηθεί. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τοποθετείται το σημείο 2192.5 το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στα Cross Sections 2196 και 2189. Εισάγεται η απόσταση μεταξύ γέφυρας 1m και πλάτος γέφυρας 5m. Οι συγκεκριμένες τιμές αλλάζουν για κάθε γέφυρα. Τέλος εισάγονται τα ύψη της πάνω και κάτω πλευράς για την δημιουργία τους.

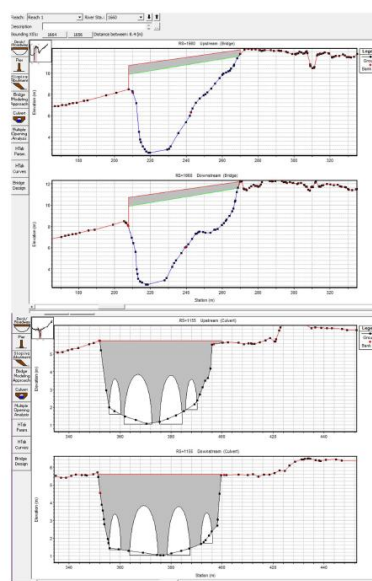


24

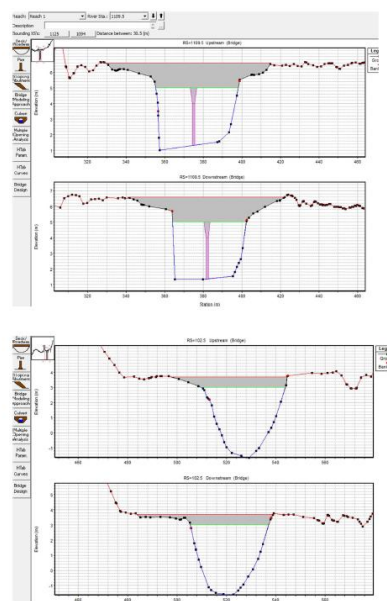
Αντίστοιχα δημιουργούνται οι υπόλοιπες γέφυρες:



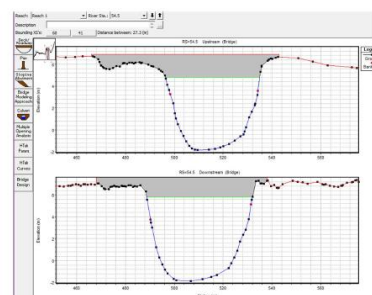
25



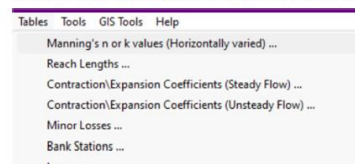
26



27



Ελέγχεται μέσω της επιλογής Tables οι τιμές Manning έχουν εισαχθεί σε όλη την περιοχή μελέτης.



28

Edt Mapping v s n & r Values

Rows: (path) ... Edt Interpreted KES Channel n Values Have a light green background

Reach: Reach 1 ... All Regions

Selected Area Edt Options

Add Contour ... Multiple Factor ... Get Values ... Replace ... Reduce to L, Ch, r ...

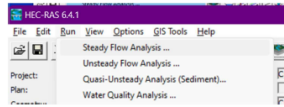
ver	Chale	hm	chC	n #1	n #2	n #3	n #4	n #5	n #6	n #7	n #8	n #9	n #10	n #11	n #12	▲
32	1133	n	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	
32	1125	n	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03				
32	1105.5	Bridge														
34	1004	n	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.07	0.03					
35	1045	n	0.03	0.03	0.07	0.03	0.05	0.07	0.03	0.07	0.04	0.04	0.04	0.07	0.0	
36	1050	n	0.03	0.05	0.03	0.07	0.04	0.04	0.05	0.07	0.03					
37	877	n	0.03	0.07	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.07	0.05	0.0	
38	741	n	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03		
39	705	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.03	0.07	0.0	
40	145	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.0	
41	494	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.0	
42	415	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.07	0.04	0.07	0.05	0.07	0.0	
43	411	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.0	
44	364	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.0	
45	219	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.0	
46	280	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.03	0.07	0.03	0.04	0.04	0.04	0.0	
47	249	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.03	0.0	
48	206	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.0	
49	147	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05	0.0
50	106	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.0	
51	102.3	Bridge														
52	99	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.03			
53	108	n	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04	0.0	
54	54.5	Bridge														
55	41	n	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03						

30

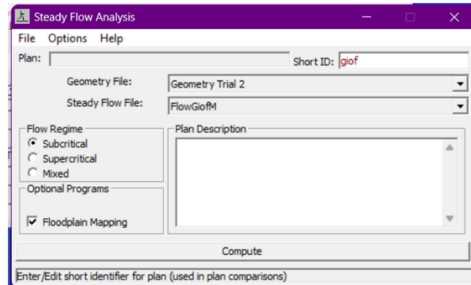
31

32

Στο αρχικό μενού, επιλέγεται το Run Flow Analysis για την πραγματοποίηση τρεξίματος του μοντέλου με τις τιμές παροχής που προστέθηκαν προηγουμένως.

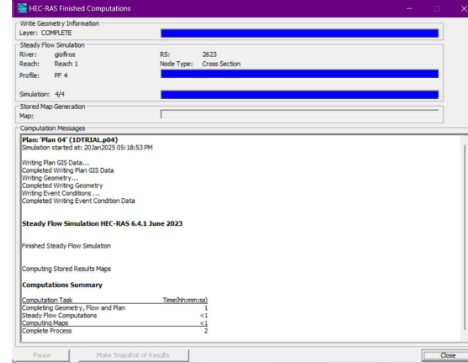


Επιλέγεται το πλέον σχεδιασμού και τα δεδομένα παροχής. Εισάγεται ένα Short ID για την ευκολότερη διαχείριση από τον χρήστη σε περίπτωση που έχει πολλές αναλύσεις. Επιλέγεται το Compute.



33

Εμφανίζεται το παράθυρο φόρτωσης όπου το τρέξιμο διαρκεί λίγα δευτερόλεπτα.



34

Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Επιλέγοντας το RAS Mapper, και ενεργοποιώντας το Results και έπειτα Depth παρουσιάζεται η πορεία της πλημμύρας για κάθε παροχή.

Για 70 m³/s:



Για 105 m³/s:



35

Για 140 m³/s:



Για 160 m³/s:



36