



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**«Εφαρμογή του μοντέλου SWAT στη λεκάνη απορροής του  
ποταμού Eel (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) κάτω από συνθήκες  
αλλαγής χρήσεων γης»**

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας .....	5
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	7
2.1. Γενικά .....	7
2.2. Το νερό στην Καλιφόρνια .....	8
2.3. Ποταμός Eel - Γεωγραφικός προσδιορισμός.....	8
2.4. Λεκάνη απορροής ποταμού Eel .....	9
2.5. Χρήσεις γης λεκάνης απορροής ποταμού Eel.....	9
2.6. Εδάφη λεκάνης απορροής ποταμού Eel.....	13
2.7. Πανίδα .....	17
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT.....	21
3.1. Υδρολογικός κύκλος του νερού .....	21
3.2. Επιφανειακή απορροή.....	23
3.3. Διήθηση .....	24
3.4. Εξατμισοδιαπνοή.....	29
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ EEL.....	31
4.1. Συλλογή δεδομένων .....	31
4.2. Διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου.....	32
4.2.1. Στήσιμο μοντέλου (SWAT Project Setup).....	32
4.2.2. Επιλογή λεκάνης απορροής (Watershed Delineator) .....	33
4.2.3. Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης.....	40
4.2.4. Προσδιορισμός HRUs .....	47
4.2.5. Εισαγωγή δεδομένων καιρού.....	48
4.3. Εκτέλεση του μοντέλου .....	52
4.4. Αρχεία εξόδου του SWAT.....	55
4.5. Βαθμονόμηση του μοντέλου (Calibration) .....	56
4.6. Επαλήθευση του μοντέλου (Validation) .....	61
4.7. Εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν με το βαθμονομημένο μοντέλο .....	63
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
5.1. Παρούσα κατάσταση - βαθμονόμηση μοντέλου.....	71

5.2.	Παρούσα κατάσταση - επαλήθευση μοντέλου .....	75
5.3.	Σενάρια πυρκαγιάς .....	79
5.3.1.	Σενάριο πυρκαγιάς 1α .....	79
5.3.2.	Σενάρια πυρκαγιάς 1β, 1γ .....	81
5.3.3.	Σενάρια πυρκαγιάς 1δ .....	83
5.4.	Σενάρια υλοτομίας.....	86
5.4.1.	Σενάριο υλοτομίας 2α.....	86
5.4.2.	Σενάριο υλοτομίας 2β.....	87
5.5.	Σενάρια φύτευσης κωνοφόρου δάσους σε θέσεις βοσκοτόπων .....	89
5.5.1.	Σενάριο φύτευσης 3α.....	89
5.5.2.	Σενάριο φύτευσης 3β.....	91
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....	93
6.1.	Αξιολόγηση των μέσων υδρολογικής προσομοίωσης.....	93
6.2.	Αξιολόγηση της λεκάνης απορροής .....	95
6.3.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	95
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>97</b>



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έρχεται το πέρας της προπτυχιακής περιόδου φοίτησης. Πρόκειται για μια εργασία η οποία απαιτεί χρόνο και συνεχή έρευνα προκειμένου να ολοκληρωθεί και να επιτύχει ο φοιτητής το θεμιτό αποτέλεσμα. Προσεγγίζοντας, λοιπόν, στο τέλος του διπλώματος μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Μπαλτά για την τιμή που μου έκανε να με αναλάβει υπό την καθοδήγησή του, την όλη υποστήριξη και την βοήθεια του κατά την περίοδο της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Πέραν της τεχνικής βοήθειας, η ψυχολογική συμπαράσταση που μου προσέφερε κατά τους πρωτόγνωρους καιρούς που βιώνουμε με την πανδημία του Covid-19, μου έδωσε δύναμη για να καταβάλω την μέγιστη προσπάθεια και να μπορέσω να τελειώσω τις σπουδές μου εγκαίρως. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές, κ. Νικόλαο Μαμάση και κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, οι οποίοι συμμετείχαν ως μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής, για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην εργασία μου και τα εποικοδομητικά τους σχόλια. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Μπαριάμη, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την καθοριστική συνεισφορά του και καθοδήγηση σε κάθε σημείο της διπλωματικής, από την επιλογή της περιοχής μελέτης και την εύρεση όλων των απαιτούμενων στοιχείων εισόδου, έως τη βαθμονόμηση και τελική εφαρμογή του μοντέλου SWAT. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Βασίλη και Αλέκα, τον αδελφό μου Κώστα, την φίλη μου Δάφνη και τους συμφοιτητές και φίλους μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, τη Σοφία, την Αναστασία, τον Στέφανο, τον Πλούταρχο, τον Θεοδωρή και τον Άλκη, για την συμπαράσταση και συνεργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου στη Σχολή και το διοικητικό προσωπικό.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη μελέτη της επίδρασης διαφόρων αλλαγών χρήσεων γης σε ένα μέρος της δασικής λεκάνης απορροής του ποταμού Eel στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του υδρολογικού μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει των υδρολογικό κύκλο του νερού μέσα από μεθόδους υπολογισμού της επιφανειακής απορροής, της διήθησης, της εξατμισοδιαπνοής και της κατείσδυσης στα υπόγεια νερά. Ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο χρησιμοποιούνται το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής, οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs) και μετεωρολογικά δεδομένα. Συγκεκριμένα με τον όρο HRU νοούνται μικρές περιοχές διακριτοποίησης της λεκάνης, οι οποίες έχουν ίδια χρήση γης, έδαφος και κλίση, ενώ τα μετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν χρονοσειρές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας αέρα. Η προσομοίωση έγινε για την περίοδο 01-01-2011 έως και 31-12-2020, ενώ τα δύο πρώτα χρόνια αγνοήθηκαν από τα αποτελέσματα για λόγους προετοιμασίας του μοντέλου. Κατά την περίοδο 01-01-2013 έως και 31-12-2017 έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου με σύγκριση με μετρήσεις απορροής σε τρεις σταθμούς της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (USGS). Κριτήρια καλής βαθμονόμησης αποτέλεσαν τα στατιστικά μεγέθη-δείκτες NSE, RMSE και NOF, η κλίση  $\gamma$  και ο συντελεστής συσχέτισης και το ποσοστό BIAS (PBIAS). Τη βαθμονόμηση ακολούθησε η διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου. Κατόπιν, με εφαρμογή του επικυρωμένου μοντέλου εξετάστηκαν σενάρια αλλαγής χρήσης γης που θα ήταν πιθανό να παρατηρηθούν σε μία δασική λεκάνη. Αυτά αφορούσαν στα ενδεχόμενα πυρκαγιάς, υλοτομίας και αναδάσωσης σε τμήματα της λεκάνης της περιοχής μελέτης και τα οποία εφαρμόστηκαν με αλλαγή του αριθμού καμπύλης (curve number-CN2). Τέλος, η στατιστική σημαντικότητα των αλλαγών που επήλθαν στις απορροές του ποταμού λόγω των σεναρίων αυτών εξετάστηκε με χρήση του στατιστικού ελέγχου Student t-test. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι οι αλλαγές χρήσεων γης δεν είχαν στατιστική σημαντικότητα στις απορροές σε επίπεδο 5%. Συμπερασματικά, το μοντέλο SWAT είναι ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για την υδρολογική προσομοίωση λεκανών απορροής και την συγκριτική εξέταση των επιπτώσεων διαφόρων σεναρίων αλλαγής χρήσης γης.





## **ABSTRACT**

This Diploma Thesis deals with the study of the impact of various land use changes on a part of the forest area of the catchment of Eel River, California, USA. For the purpose of the study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used. SWAT is a hydrological model that describes the hydrological cycle through methods of calculation of surface runoff, infiltration, evapotranspiration and percolation to the groundwater. The input files used in the model are the digital elevation model, the Hydrological Response Units (HRUs) and the meteorological data. HRUs are small areas of similar land use, soil and slopes, in which the watershed is discretized. The meteorological data include timeseries of measured precipitation and temperature. The simulation started on 01-01-2011 and ended on 31-12-2020. The first two years were not taken into account in the simulation results because they were used as the warm up period of the simulation. The calibration of the model took place during the period from 01-01-2013 to 31-12-2017 and included comparison of discharge model predictions with measured discharges at three United States Geological Survey (USGS) monitoring stations. As criteria for good calibration were used the statistical indices NSE, RMSE and NOF, the slope  $\gamma$  and  $R^2$  of the measured versus predicted values, and the percent BIAS. The calibration was followed by the validation of the model. Then, the validated model was used to test various land use change scenarios in the basin. These included hypothetical scenarios of forest fires, logging and reforestation in various areas of the basin, which were run by changing the curve number (CN2). The statistical significance of the various scenarios on their effect on the discharge of the river was examined by applying the Student t-test to compare model flow predictions under current conditions and under each scenario. This examination showed that the different scenarios had no statistical significance in the discharge of the river at 5% level. In conclusion, SWAT is a useful and reliable tool for the hydrological modeling of river basins and for testing the effects of various land use change scenarios.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, οι ανησυχίες των επιστημόνων γίνονται καθημερινά πιο έντονες αναφορικά με την διαχείριση των υδατικών πόρων. Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού έχει σαν αποτέλεσμα την υπέρμετρη αύξηση στη ζήτηση σε πόσιμο και αρδευτικό νερό. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η υπερθέρμανση του πλανήτη έχουν ως αποτέλεσμα, πλην των άλλων, και την αύξηση των ακραίων φαινομένων, όπως αυτά των πλημμυρών και των ακραίων θερμοκρασιών. Σε περιοχές με σχετικά ξηρό κλίμα, όπως οι Μεσογειακές, αυξάνεται ο κίνδυνος από δασικές πυρκαγιές ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτές σε συνδυασμό με την ανεξέλεγκτη υλοτομία οδηγούν τα φυσικά οικοσυστήματα στην υποβάθμιση. Ο αντίκτυπος των παραπάνω είναι μεγάλος και στον υδρολογικό κύκλο, διότι επηρεάζονται οι φυσικές διεργασίες του, με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο πλημμύρας. Τέλος, φαινόμενα όπως ο υπερπληθυσμός, η αστικοποίηση και η εντατική γεωργία, εκτός από την αυξημένη ζήτηση σε νερό, συντελούν επίσης και στην υπέρογκη παραγωγή ρύπων οι οποίοι ρυπαίνουν επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα, μειώνοντας περαιτέρω τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους ή αυξάνοντας τα κόστη επεξεργασίας του νερού.

Οι ανωτέρω διαφαινόμενοι κίνδυνοι υπερεκμετάλλευσης και ρύπανσης των υδατικών πόρων, καθώς και η ανησυχία για τις επιπτώσεις των πλημμυρών στην ανθρώπινη ζωή και περιουσία, έχει οδηγήσει την Ευρωπαϊκή Ένωση στην λήψη μέτρων σχετικών με την προστασία τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παρακάτω οδηγίες:

- Οδηγία 2000/60/EK “Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων”: Με αυτή την οδηγία η Ευρωπαϊκή Ένωση επιχείρησε την επέκταση της προστασίας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων τόσο από ποιοτική όσο και από ποσοτική άποψη. Στόχοι της οδηγίας ήταν ο εξορθολογισμός της εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, ο προσδιορισμός των ορίων εκπομπών των ρύπων και ο καθορισμός των επιθυμητών επιπέδων ποιότητας. Τα παραπάνω ορίζονται σε επίπεδο αναφοράς την λεκάνη απορροής.
- Οδηγία 2007/60/EK “Οδηγία για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας”: Η παρούσα οδηγία στοχεύει στην θέσπιση ενός πλαισίου για την βέλτιστη αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, ώστε να αποφεύγονται οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία,

το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομία. Κεντρικοί πυλώνες του σχεδίου είναι η πρόληψη, η προστασία και η ετοιμότητα. Μάλιστα, σχετικά με αναπτυξιακές πολιτικές που αφορούν στα ύδατα και τις χρήσεις γης, η συγκεκριμένη οδηγία επισημαίνει την κρισιμότητά τους στην αρτιότερη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας. Για τον λόγο αυτό επισημαίνεται η ανάγκη χάραξης χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας.

Μεγάλη σημασία έχει και η επίδραση των δασικών πυρκαγιών στον υδρολογικό κύκλο του νερού. Μελέτες των υδρολογικών επιπτώσεων μια πυρκαγιάς έχουν γίνει από τα τέλη της δεκαετίας του '40. Πρωτοπόροι ήταν οι Rycroft (1947) και Colman (1951). Η έλλειψη των κατάλληλων εργαλείων την εποχή εκείνη δεν οδήγησε όμως σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πρωταρχικά εργαλεία για την μελέτη του αντίκτυπου της πυρκαγιάς στην υδρολογία μιας περιοχής θεωρούνται οι πειραματικές μέθοδοι και η υδρολογική μοντελοποίηση (Nalbantis and Batelis 2013). Παράδειγμα εφαρμογής πειραματικής μεθόδου αποτίμησης των επιπτώσεων της πυρκαγιάς είναι η μελέτη του Scott (1993) στην Νότια Αφρική. Όπως αναφέρουν οι Παπαθεοδοσίου και Χριστοδούλου (2009), οι επιδράσεις της πυρκαγιάς στον υδρολογικό κύκλο ξεκινάνε όταν καταστραφεί η βλάστηση, καθώς και τα οργανικά στρώματα του εδάφους της λεκάνης απορροής. Το γυμνό έδαφος μετά την πυρκαγιά παρουσιάζει μειωμένη διήθηση και ως εκ τούτου αυξημένη επιφανειακή απορροή για τους παρακάτω λόγους:

- Αρχικά, λόγω της αποδόμησης του εδάφους, η οποία συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας του και μείωση του πορώδους, παράγοντα σημαντικού για την διήθηση.
- Επιπλέον, η πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής στο γυμνό από βλάστηση έδαφος μετά την πυρκαγιά επιφέρει περεταίρω συμπύκνωση και άρα επιπλέον μείωση του πορώδους και της διηθητικής ικανότητας.
- Τέλος, η στάχτη και ο ξυλάνθρακας που μένουν στην επιφάνεια ως κατάλοιπα της πυρκαγιάς φράζουν τους πόρους, εμποδίζοντας εκ νέου την διαφυγή του νερού προς το υπέδαφος (DeBano et al. 1998).

Παράλληλα, μεγάλης σημασίας είναι και οι συνέπειες τις πυρκαγιές στον υδρολογικό κύκλο του νερού, οι οποίες σχετίζονται με την καταστροφή της βλάστησης, όπως (Parathanasiou et al. 2015):

- Μείωση της παρεμπόδισης του νερού από τα φυλλώματα των φυτών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του νερού που καταλήγει στο έδαφος και ως εκ τούτου η αύξηση της επιφανειακής απορροής.
- Μείωση της εξατμισοδιαπνοής ως επακόλουθο της καταστροφής της βλάστησης και επομένως μείωση των απωλειών του νερού.

Μικρότερη επίδραση στον υδρολογικό κύκλο του νερού, αλλά καθοριστική, έχει αντίστοιχα και η υλοτομία. Αυτή δεν επιδρά στην σύσταση του εδάφους επηρεάζοντας την διαπερατότητα του, αλλά λόγω της καταστροφής της βλάστησης μειώνει τόσο την παρεμπόδιση της βροχής όσο και την εξατμισοδιαπνοή. Γενικά, οποιαδήποτε αλλαγή στη σύνθεση και δομή της βλάστησης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξατμισοδιαπνοής και την αύξησης της απορροής (Γκόφας 2001).

Τα υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης, όπως το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) το οποίο εφαρμόζεται σε αυτή την διπλωματική, καλούνται να λειτουργήσουν επικουρικά στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Για παράδειγμα, η προσομοίωση σε επίπεδο λεκάνης απορροής μιας επερχόμενης υλοτομίας, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με τις επιπτώσεις της στον υδρολογικό κύκλο του νερού και κατ' επέκταση στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής.

Το μοντέλο SWAT έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές υδρολογικές μελέτες ανά τον κόσμο και έχει ένα πλήθος εφαρμογών. Χαρακτηριστικά μελέτες αναφορικές με το μοντέλο SWAT έχουν γίνει σε περιοχές των ΗΠΑ, της Ευρώπης, της Ασίας καθώς και της Αφρικής. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικές πρόσφατες εργασίες στις ΗΠΑ. Οι St-Pierre et al. (2020) σύγκριναν τη οριοθέτηση που προκύπτει από το μοντέλο SWAT με τις οριοθετήσεις με GIS περιοχών προστασίας πηγών νερού στον Καναδά, έχοντας ως κριτήριο τον χρόνο συρροής του νερού. Οι Liu et al. (2015) εφάρμοσαν το SWAT σε λεκάνη απορροής στον Καναδά για την εκτίμηση της διάβρωσης από τα ανάντη σημεία της λεκάνης και τη στερεομεταφορά μέσα στο ρέμα. Οι Budamala et al. (2020) ανέπτυξαν με επιτυχία σε περιβάλλον Matlab μοντέλο εξομοιωτή (emulator) που μιμείται τη λειτουργία του αρχικού μοντέλου SWAT με σκοπό την ανάλυση

ευαισθησίας των παραμέτρων εισαγωγής και την εφαρμογή του στη λεκάνη Peachtree Creek, Atlanta, USA. Οι Li et al. (2020) αξιολόγησαν με χρήση του SWAT τις απορροές από αστικές περιοχές στα Βορειοδυτικά της πολιτείας του Delaware, USA για χρονοσειρές βροχής υγρών και ξηρών ετών. Οι Chattopadhyay et al. (2017) εκτίμησαν με χρήση του SWAT τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη μελλοντική διαθεσιμότητα σε νερού και στα φαινόμενα ξηρασίας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Kentucky, USA. Οι Kaini et al. (2012) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT σε ποταμούς στο Illinois, USA με σκοπό την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης των νερών. Οι Parajuli et al. (2018) αξιολόγησαν την χρήση δεδομένων εξατμισοδιαπνοής που προέκυψαν με χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης στο μοντέλο SWAT.

Το μοντέλο SWAT έχει εφαρμοστεί και σε πολλές μελέτες στην Ελλάδα και την υπόλοιπη Ευρώπη: όπως αναφέρθηκε, οι Nalbantis and Batelis (2014) εξέτασαν τις επιπτώσεις πυρκαγιάς σε λεκάνες του Θεσσαλικού κάμπου στην Ελλάδα. Οι Boskidis et al. (2012) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT στη λεκάνη απορροής του ποταμού Νέστου με σκοπό την μελέτη της ποιότητας των υδάτων του ποταμού. Παρόμοια, οι Boskidis et al. (2010) εφάρμοσαν το SWAT στην λεκάνη του ποταμού Βοσβόζη στον Νομό Ροδόπης και σύγκριναν τις προβλέψεις σε τρεις σταθμούς με αντίστοιχες μετρήσεις παροχής και ποιοτικών παραμέτρων. Οι Gikas et al. (2006) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT στη λεκάνη απορροής της λιμνοθάλασσας Βιστωνίδας στην Β. Ελλάδα, ενώ οι Pisinaras et al. (2010) το εφάρμοσαν στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοσύνθου στον Νομό Ξάνθης. Ο Καπερώνης (2016) εφάρμοσε το μοντέλο SWAT στην μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού στο Νομό Αχαΐας και εξέτασε με το μοντέλο μέτρα διαχείρισης για την μείωση των εξαγόμενων ρύπων. Οι Varanou et al. (2002) μελέτησαν την επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στην ποσότητα και ποιότητα του νερού στη λεκάνη Αλή Εφέντη στην κεντρική Ελλάδα χρησιμοποιώντας το SWAT.

Ενδιαφέρουσα ιδιαίτερα είναι και η μελέτη των Guse et al. (2015) αναφορικά με την επιρροή των αλλαγών χρήσεων γης στις συγκεντρώσεις των νιτρικών σε λεκάνη απορροής της Βόρειας Γερμανίας όπου κυριαρχεί η αγροτική χρήση γης. Οι Koch et al. (2013) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT σε πεδινή λεκάνη στην Βορειοανατολική Γερμανία όπου ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν υψηλός, με σκοπό να εξετάσουν την αποτελεσματικότητα της χρήσης στραγγιστικών αγωγών. Για τον σκοπό αυτό, το

μοντέλο εφαρμόστηκε δύο φορές, μία με στραγγιστικούς αγωγούς και μία χωρίς. Οι Ali et al. (2016) χρησιμοποίησαν το μοντέλο SWAT σε περιοχή της Ιρλανδίας στα πλαίσια της σύνθεσης ενός νέου υδρολογικού μοντέλου (new combined model-NCM), το οποίο βασίζεται στο υδρολογικό μοντέλο Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF), ενώ μέσω του SWAT γίνεται ο υπολογισμός της μεταφοράς του φωσφόρου.

Στην Ασία, η εφαρμογή του μοντέλου SWAT είναι ιδιαίτερα δημοφιλής. Οι Narsimlu et al. (2015) βαθμονόμησαν το SWAT βάσει πραγματικών μετρήσεων και ανάλυση αβεβαιότητας χρησιμοποιώντας την μέθοδο Sequential Uncertainty Fitting. Οι Dahal et al. (2016) εφάρμοσαν το SWAT σε λεκάνη των Ιμαλαίων στη Δυτική Ινδία με σκοπό την αξιολόγηση σεναρίων κλιματικής αλλαγής στην απόκριση της λεκάνης στην επιφανειακή απορροή. Οι Gautam et al. (2016) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT σε λεκάνη απορροής στο Νεπάλ προκειμένου να αναλύσουν την επίδραση που έχει η ακρίβεια του ανάγλυφου (DEM) της λεκάνης απορροής στον υπολογισμό των απορροών.

Μελέτες με χρήση του μοντέλου SWAT έχουν γίνει και στην Αφρική. Ενδεικτικά, οι Bulti et al. (2021) χρησιμοποίησαν το μοντέλο SWAT με σκοπό την εύρεση της επίδρασης της κατασκευής ενός φράγματος στις απορροές της περιοχής μελέτης.

### **1.1.Στόχοι της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εφαρμογή του μοντέλου SWAT στην λεκάνη απορροής του ποταμού Eel, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Ειδικότερα, την διαμόρφωση του μοντέλου, ακολουθεί η βαθμονόμηση και η πιστοποίηση του βάσει πραγματικών μετρήσεων για το μέγεθος των απορροών, ώστε τα αποτελέσματα να είναι έγκυρα. Τέλος, η εργασία εξετάζει διαφορετικά σενάρια αλλαγής χρήσεων γης, προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση τους στις απορροές της λεκάνης.





## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1. Γενικά

Για τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής αποφασίστηκε να επιλεγεί μια περιοχή μελέτης εντός των ΗΠΑ και μάλιστα στην πολιτεία Καλιφόρνια. Ο κύριος λόγος που οδήγησε σε αυτήν την απόφαση ήταν η διαθεσιμότητα των απαιτούμενων δεδομένων για την χρήση του μοντέλου SWAT από τις εθνικές υπηρεσίες των ΗΠΑ. Έτσι, λοιπόν, υπήρχε η δυνατότητα για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση στη μελέτη.

Η Καλιφόρνια αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες οικονομίες του κόσμου στηριζόμενη σε μεγάλο βαθμό και στην αγροτική παραγωγή. Όπως αναφέρουν οι Ray et al. (2020), η Καλιφόρνια αποτελεί, την 5<sup>η</sup> μεγαλύτερη οικονομία στον κόσμο, ενώ η γεωργική παραγωγή της ανέρχεται στα 2/3 της παραγωγής των φρούτων και ξηρών καρπών των ΗΠΑ και στο 1/3 των λαχανικών. Συμπερασματικά, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ζητήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, εφόσον η ζήτηση σε νερό είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, η χρήση αρδευτικού νερού στην Καλιφόρνια κυμαίνεται μεταξύ περίπου του 29% και 61% επί του συνόλου σε υγρό και ξηρό καιρό, αντίστοιχα (<https://www.ppic.org/publication/water-use-in-california/>). Οι αντίστοιχες κατανομές για αστική χρήση είναι 8% με 11%, ενώ το υπόλοιπο (62% με 28%, αντίστοιχα) αναφέρεται σε περιβαλλοντικές χρήσεις, δηλαδή τη διατήρηση των οικοσυστημάτων (<https://www.ppic.org/publication/water-use-in-california/>). Έτσι, ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του ποταμού Eel στην Βορειοδυτική Καλιφόρνια, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1 .



Εικόνα 2.1: Περιοχή μελέτης - λεκάνη απορροής ποταμού Eel

## **2.2. Το νερό στην Καλιφόρνια**

Το υδρευτικό σύστημα της Καλιφόρνια εξυπηρετεί πάνω από 30.000.000 κατοίκους και προσφέρει νερό για άρδευση περίπου 2.300.000 ha καλλιεργήσιμης γης. Μάλιστα, οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι σε ετήσια βάση η ζήτηση σε νερό ανέρχεται σε 49 km<sup>3</sup> ([https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_in\\_California](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_in_California)). Το μεγαλύτερο πρόβλημα που εμφανίζεται στην περιοχή είναι η παρουσία περιόδων ξηρασίας στην Νότια Καλιφόρνια (όπου το κλίμα είναι ημι-ερημικό), κάτι που οδηγεί σε διχασμό των αρμόδιων φορέων οι οποίοι αναζητούν λύσεις σχετικά με την διαχείριση των υδατικών πόρων. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο έντονο, διότι η Καλιφόρνια, ιδίως η Νότια, αποτελεί την πιο πυκνοκατοικημένη πολιτεία της Αμερικής. Το ερώτημα, λοιπόν, που προκύπτει είναι εάν η πολιτεία θα πρέπει να αυξήσει την διανομή νερού στα μεγάλα αστικά και γεωργικά κέντρα και κατά πόσο αυτό θα επηρέαζε τα φυσικά οικοσυστήματα (εθνικούς δρυμούς και εθνικά πάρκα) ιδίως της Βόρειας Καλιφόρνιας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κύριο δίκτυο μεταφοράς νερού και ύδρευσης της πολιτείας, το οποίο κατασκευάστηκε στα πλαίσια του προγράμματος California State Water Project (SWP) και ονομάζεται California Aqueduct. Το SWP μεταφέρει νερό από την λεκάνη απορροής του ποταμού Feather που ανήκει στην οροσειρά της Sierra Nevada στα βόρεια της πολιτείας, διασχίζει την κοιλάδα της Κεντρικής Καλιφόρνιας και καταλήγει στο Νότιο τμήμα, διανύοντας μια απόσταση περίπου 640 km. Το SWP είναι ένα από τα μεγαλύτερα δημόσια δίκτυα μεταφοράς νερού και παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, καλύπτοντας τις ανάγκες νερού για πάνω από 23.000.000 ανθρώπους. Την επίβλεψη του δικτύου έχει αναλάβει το Υπουργείο Υδατικών Πόρων της Καλιφόρνιας (California Department of Water Resources). Όταν σχεδιάστηκε το σύστημα, στόχος ήταν να παραδίδει 5.2 km<sup>3</sup> ανά χρόνο, αλλά η πραγματική παραγωγή του ανέρχεται σε 2.8 km<sup>3</sup>, επειδή πολλά από τα αρχικά σχεδιασμένα χαρακτηριστικά δεν κατασκευάστηκαν ποτέ ([https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_in\\_California#The\\_State\\_Water\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_in_California#The_State_Water_Project)).

## **2.3. Ποταμός Eel - Γεωγραφικός προσδιορισμός**

Περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη του ποταμού Eel, ο οποίος ρέει στην δυτική πλευρά της ακτής της Βόρειας Καλιφόρνιας, καταλήγοντας στον Ειρηνικό Ωκεανό κοντά στην πόλη Ferndale, νότια του Humboldt Bay και του Eureka. Η αποστράγγιση του ποταμού

Eel έχει έκταση λεκάνης περίπου 3600 mi<sup>2</sup> (Brown and Ritter 1971), δηλαδή περίπου 9324 km<sup>2</sup>. Ο ποταμός πηγάζει στα βουνά κοντά στην πόλη Ukiah, μεταξύ San Francisco και Eureka (Εικόνα 2.1). Τα τρία κύρια ρέματα του ποταμού Eel ρέουν με κατεύθυνση προς τα βόρεια μέχρι το σημείο όπου συγκλίνουν στον νοτιότερο κλάδο (South Fork). Ο ποταμός παρέχει επανατροφοδότηση υπόγειων υδάτων, αναψυχή, καθώς και βιομηχανικό, γεωργικό και πόσιμο νερό.

#### **2.4. Λεκάνη απορροής ποταμού Eel**

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Eel αποτελεί ουσιαστικά μέρος της ευρύτερης έκτασης που αποστραγγίζει ο ποταμός με μέγεθος 3963 km<sup>2</sup> μέχρι την πόλη Scotia, η οποία βρίσκεται μερικά km ανάντη του δέλτα του ποταμού, στην Κομητεία Humboldt της Καλιφόρνια, στο σημείο όπου ο αυτοκινητόδρομος 101 διασχίζει τον ποταμό Eel. Ο προσδιορισμός των ορίων της λεκάνης απορροής έγινε βάσει του ψηφίου κωδικού της Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (USGS) που αντιστοιχεί σε κάθε λεκάνη απορροής. Έτσι, η λεκάνη απορροής του ποταμού Eel έχει την κωδική ονομασία 18010105. Πιο συγκεκριμένα, τα 2 πρώτα νούμερα του κωδικού αυτού αντιστοιχούν στην πολιτεία στην οποία ανήκει η λεκάνη απορροής (region) και τα 2 επόμενα στην υπο-πολιτεία (sub-region). Οι τελευταίοι 4 αριθμοί έχουν την ακόλουθη κωδικοποίηση: οι 2 πρώτοι αναφέρονται ως λογιστικές μονάδες (accounting units) και οι 2 επόμενοι ως μονάδες καταλόγου (cataloguing units). Μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένεται η επέκταση του ψηφίου κωδικού, αρχικά σε 10 ψηφία, όπου τα 2 τελευταία θα αναφέρονται στις εκάστοτε λεκάνες απορροής (watershed), και έπειτα, σε 12 ψηφία, όπου τα 2 τελευταία θα αναφέρονται ως κωδικές ονομασίες των υπολεκανών (sub-watershed).

#### **2.5. Χρήσεις γης λεκάνης απορροής ποταμού Eel**

Οι χρήσεις γης για την λεκάνη του ποταμού Eel βρέθηκαν από την National Land Cover Database (NLCD) της USGS (<https://www.mrlc.gov/viewer/>) και συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η λεκάνη απορροής του ποταμού Eel είναι μια κατά κύριο λόγο δασική έκταση, ενώ υπάρχουν και αρκετοί βοσκότοποι. Αναφορικά με την δασική έκταση, το μεγαλύτερο ποσοστό της αποτελείται από κωνοφόρα δάση (Coniferous forest). Μάλιστα ο συγκεκριμένος τύπος δάσους αποτελεί και την κύρια χρήση γης της λεκάνης απορροής σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%. Άξια

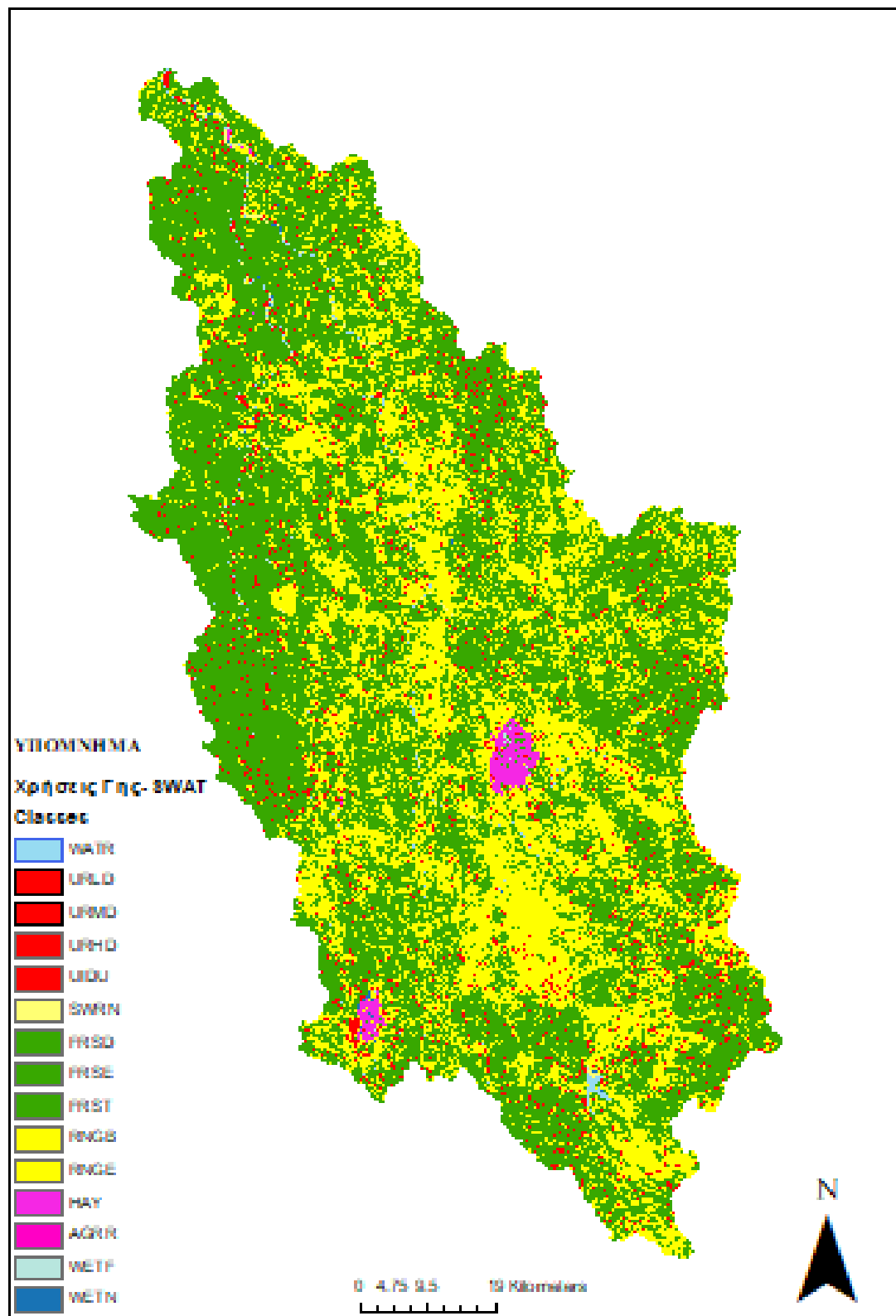
αναφοράς, επίσης, είναι και η παρουσία φυλλοβόλων δασών (Broad-Leaved forest) στην περιοχή μελέτης. Το ποσοστό κάλυψης τους στην λεκάνη απορροής είναι σημαντικά μικρότερο από το ποσοστό των κωνοφόρων δένδρων και κυμαίνεται σε μια τιμή ανάμεσα σε 3-4%. Παράλληλα, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 6% παρατηρούνται στην περιοχή μικτά δάση (Mixed forest). Συμπερασματικά, οι χρήσεις γης που σχετίζονται με δασικές εκτάσεις ξεπερνάνε σε ποσοστό το 60% της έκτασης της λεκάνης απορροής. Χαρακτηριστικό δέντρο της περιοχής είναι η σεκόγια (redwood <https://www.watereducation.org/aquapedia-background/eel-river>), που ανήκει στην οικογένεια των κωνοφόρων δέντρων. Άλλοι τύπου δέντρων που εμφανίζονται συχνά είναι το έλατο Douglas και το Hemlock. Το δεύτερο αποτελεί κωνοφόρο δέντρο του γένους Tsuga.

Πέραν της κάλυψης γης από δάσος, κρίσιμη είναι και αυτή από βοσκοτόπους. Σε αυτή την κατηγορία χρήσης γης συναντώνται 2 βασικοί τύποι. Αρχικά, υπάρχουν οι βοσκοτόποι οι οποίοι αποτελούνται από θαμνώδεις εκτάσεις (Range-Brush) και κυμαίνονται σε ένα ποσοστό περίπου 27% της λεκάνης απορροής. Παράλληλα, υπάρχουν και οι βοσκοτόποι οι οποίοι καλύπτονται από χλόη (Range-Grasses) και προσεγγίζουν το 6.5% της λεκάνης απορροής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση γης από βοσκοτόπους ξεπερνάει το 33%, αποτελώντας, έτσι, μαζί με την δασική έκταση ένα ποσοστό μεγαλύτερο από το 94% της λεκάνης απορροής.

Η υπολειπόμενη κάλυψη της λεκάνης αποτελείται κατά κύριο λόγο από τρεις συνιστώσες. Βασικότερη εκ των τριών είναι η κάλυψη από αστική περιοχή η οποία ανέρχεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 4%. Αυτό μεταφράζεται σε αστικούς δρόμους και σε ένα αστικό μέρος που παρατηρείται στα βόρειο-δυτικά της λεκάνης. Αναφορικά με την κάλυψη από αγροτικές εκτάσεις, αυτή είναι μικρότερη από 1% και αντιστοιχεί σε παραγωγή κυρίως σανού (Hay). Τέλος, μικρότερη από 1% είναι η κάλυψη από νερό στην λεκάνη απορροής.

Η αντιστοιχία της κωδικής ονομασίας που προέκυψε από τον πίνακα αναζήτησης (look up table) της National Land Cover Database (NLCD) της USGS (<https://www.mrlc.gov/viewer/>) στο ArcSWAT με την εκάστοτε χρήση γης που αναγνωρίζει το SWAT έγινε σύμφωνα με πίνακα που παρουσιάζουν οι Niraula et al. (2012) (Table 3. SWAT Land use classes). Τα παραπάνω συνοψίζονται και στους

Πίνακες 2.1 και 2.2. Η κατανομή των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής φαίνονται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Κάναβος χρήσεων γης της περιοχής Μελέτης

Πίνακας 2.1: Χρήσεις γης-NLCD 2006 (<https://www.mrlc.gov/viewer/>) της USGS στην λεκάνη απορροής του ποταμού Eel, όπως εισήχθησαν στο SWAT

Τιμή (Value)	Έκταση (%)	Χρήση Γης-ArcSWAT	Τύπος	Χρήση Γης
11	0.35	WATR	Water	Νερό
21	4.08	URLD	Residential-Low density	Αστική Περιοχή
22	0.14	URMD	Residential-Medium density	
23	0.04	URHD	Residential-High density	
24	0.01	UIDU	Industrial	Βιομηχανική Περιοχή
31	0.27	SWRN	Range	Βοσκότοπος
41	3.64	FRSD	Broad-Leaved forest (deciduous)	Δασική Έκταση
42	50.26	FRSE	Coniferous forest (evergreen)	
43	6.87	FRST	Mixed forest	
52	27.03	RNGB	Range-Brush	Βοσκότοπος
71	6.49	RNGE	Range-Grasses	
81	0.67	HAY	Hay	Αγροτική Περιοχή
82	0.01	AGRR	Agricultural Land-Row Crops	
90	0.09	WETF	Wetlands-Forested	Υγρότοπος
95	0.06	WETN	Wetlands-Non-Forested	

Πίνακας 2.2: Χρήσεις γης στην λεκάνη απορροής του ποταμού Eel

Χρήσεις Γης	Ποσοστό Λεκάνης (%)
Νερό	0.35
Βοσκότοπος	33.79
Δασική Έκταση	60.92
Αστική Περιοχή	4.27
Αγροτική Περιοχή	0.67

## 2.6. Εδάφη λεκάνης απορροής ποταμού Eel

Οι κατηγορίες εδαφών για την περιοχή μελέτης βρέθηκαν από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών (ARS) του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (US Department of Agriculture, USDA) (<https://soilseries.sc.egov.usda.gov/>). Αναφορικά με τα εδάφη της περιοχής μελέτης αυτά προέκυψαν με βάση την κωδική ονομασία από τον χάρτη US STATSGO για κάθε πολιτεία της Αμερικής. Έπειτα με την βοήθεια των δεδομένων της υπηρεσίας USDA, έγινε η ανάλυση των εδαφικών σχηματισμών. Παρακάτω παρουσιάζεται ξεχωριστά το κάθε έδαφος που συναντήθηκε στην περιοχή μελέτης.

- **CA137 και CA262:** Πρόκειται για εδάφη της σειράς Sheetiron. Η σειρά Sheetiron αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεσαία βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται από υλικά που προέρχονται από σχιστόλιθο και χαλαζία. Τα εδάφη αυτά βρίσκονται στα βουνά. Οι κλίσεις τους είναι από 9% έως 90% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA150:** Πρόκειται για εδάφη της σειράς Parrish. Τα εδάφη Parrish είναι πηλώδη εδάφη με χαλίκι και με ανοιχτό καφέ χρώμα για εδαφικούς ορίζοντες A1. Για εδαφικούς ορίζοντες B2 είναι αργιλικά εδάφη με χαλίκι και έχουν καστανοκόκκινο χρώμα. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία C.
- **CA255:** Τα συγκεκριμένα εδάφη ανήκουν στην σειρά Cole. Η σειρά Cole αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μεγάλα βάθη, κάπως φτωχά αποστραγγιζόμενα, που σχηματίστηκαν από αλλούβιες αποθέσεις από μικτές πηγές. Τα εδάφη Cole συναντώνται σε πρηνή με κλίσεις 0 έως 5% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους C.
- **CA259:** Η σειρά Millsholm αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μικρά βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται από αποσαθρωμένο ψαμμίτη, λάσπη και σχιστόλιθο. Τα εδάφη Millsholm βρίσκονται σε λόφους και βουνά και έχουν κλίσεις 5% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA260:** Πρόκειται για τον εδαφικό σχηματισμό με την ονομασία Maymen. Η σειρά Maymen αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μικρά βάθη, είναι αποστραγγιζόμενα σε μεγάλο βαθμό και σχηματίστηκαν ως αποτέλεσμα της μακράς διάβρωσης σχιστόλιθου, πρασινωπού πυριγενούς πετρώματος και

ψαμμίτη. Τα εδάφη Maymen βρίσκονται κατά κύριο λόγο στα βουνά. Οι κλίσεις τους κυμαίνονται από 5% έως 100% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.

- **CA261:** Η σειρά Sanhedrin αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίστηκαν ως αποτέλεσμα της μακράς διάβρωσης ψαμμίτη, σχιστόλιθου και αργίλου. Τα εδάφη Sanhedrin παρουσιάζουν ρωγμές ανά περίπου 10 εκατοστά. Συναντώνται στα βουνά και έχουν κλίσεις από 2% έως 75%. Η υδρολογική κατηγορία στην οποία τα κατατάσσει το SWAT είναι η B.
- **CA263:** Η σειρά Yollabolly αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μικρά βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται από αποσαθρωμένο σχιστόλιθο. Τα εδάφη Yollabolly βρίσκονται στα βουνά και έχουν κλίσεις από 30% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA270:** Η σειρά Gielow αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι κάπως ανεπαρκώς αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αλλούβιο από ιζηματογενή πετρώματα. Τα εδάφη Gielow βρίσκονται σε αλλούβια πεδιάδα και έχουν κλίσεις από 0 έως 5%. Τα εδάφη αυτά κατατάσσονται από το SWAT στην υδρολογική κατηγορία εδάφους C.
- **CA271:** Η σειρά Pinole αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αλλούβιο από ιζηματογενή και άλλες πηγές πετρωμάτων. Τα εδάφη Pinole βρίσκονται σε αναβαθμίδες και έχουν κλίσεις 0 έως 30%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA273:** Η σειρά Beaughton αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μικρά βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αποσαθρωμένο υλικό από ελικοειδή περιδοτίτη. Τα εδάφη Beaughton βρίσκονται στα βουνά και έχουν κλίσεις 5% έως 60%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA274:** Η σειρά αυτών των εδαφών ονομάζεται Empire. Τα εδάφη της σειράς έχουν σκούρο καστανοκόκκινο χρώμα και είναι μεσαίας οξύτητας πηλώδη εδάφη για εδαφικούς ορίζοντες A. Για εδαφικούς ορίζοντες B έχουν καστανόξανθο χρώμα με έντονη οξύτητα, αποτελούμενα από άργιλο. Τα εδάφη



προέρχονται από μαλακά ιζηματογενή πετρώματα και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.

- **CA279:** Η σειρά αυτών των εδαφών ονομάζεται Xerofluvents. Τα εδάφη έχουν ανοιχτούς καφέ ή πολύ ανοιχτούς καφέ έντονα αλκαλικούς εδαφικούς ορίζοντες A και ανοιχτούς καφέ μέτρια έως έντονα αλκαλικούς εδαφικούς ορίζοντες C. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους A.
- **CA280:** Η σειρά Vanvor αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και κατά κύριο λόγο βρίσκονται σε βουνά. Αυτά τα εδάφη βρίσκονται σε κολλουβιακές αποθέσεις από μετα-ηφαιστειακό βράχο. Η κλίση τους κυμαίνεται από 30% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA281:** Πρόκειται για εδάφη της σειράς Rock Outcrop. Αυτό το εδαφικό σύμπλεγμα αποτελείται από βασάλτη (κατά 30-50%) και εδάφη της σειράς Holyoke (κατά 50-70%). Η σειρά Holyoke αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται από ένα λεπτό στρώμα βασάλτη, ερυθρού ψαμμίτη, κονγκλομερίτη και σχιστόλιθου. Συναντώνται σε κορυφογραμμές και σε λόφους και η κλίση τους κυμαίνεται από 0 έως 60%, ενώ το μοντέλο SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA282:** Η σειρά Jayel αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεσαία βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται από αποσθρωμένο ελικοειδή περιδοτίτη. Τα εδάφη του Jayel βρίσκονται σε ορεινές περιοχές και έχουν κλίσεις 5% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA283:** Η σειρά Madonna αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μέσο βάθος, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αποσθρωμένους ιζηματογενείς ψαμμίτες και σχιστόλιθους. Τα εδάφη της σειράς Madonna βρίσκονται σε υψίπεδα και έχουν κλίσεις 15% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους C.
- **CA285:** Η σειρά Nanny αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αλλούβιο από βασικό πυριγενή βράχο. Τα εδάφη της Nanny παρατηρούνται σε

προσχωσιγενείς πεδιάδες (αλλούβιες). Οι κλίσεις τους κυμαίνονται από 0 έως 9% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.

- **CA286:** Η σειρά Ferndale αποτελείται από εδάφη που παρουσιάζονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα σε υψηλά επίπεδα πλημμύρας και σχηματίστηκαν ως αλλούβιες από μικτές πηγές. Οι κλίσεις τους κυμαίνονται από 0 έως 5% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA289:** Η σειρά Atwell αποτελείται από εδάφη που παρουσιάζονται σε μεγάλα βάθη, είναι μέτρια έως καλά αποστραγγιζόμενα. Σχηματίζονται από υλικό από ιζηματογενή πετρώματα που έχουν υποστεί διάτμηση. Τα εδάφη Atwell βρίσκονται στα βουνά σε πλαγιές με κλίσεις από 15% έως 50% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA290:** Η σειρά Bigriver αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε αλλούβιο και προέρχονται από μικτές πηγές. Τα εδάφη Bigriver βρίσκονται σε πεδινές περιοχές και έχουν κλίσεις από 0 έως 5%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA293:** Η σειρά Imulco αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε υλικά από αποσαθρωμένο ψαμμίτη. Τα εδάφη Imulco βρίσκονται σε λόφους και έχουν κλίσεις 9% έως 75% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA294:** Η σειρά Ornbaun αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε υλικά από αποσαθρωμένο ψαμμίτη και ιλύ. Τα εδάφη Ornbaun βρίσκονται σε λόφους και βουνά και έχουν κλίσεις 9% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA295:** Η σειρά Casabonne αποτελείται από εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίζονται σε κολλουβιακές αποθέσεις από αποσαθρωμένους ιζηματογενείς ψαμμίτες και σχιστόλιθους. Σε αυτά τα εδάφη η απόσταση μεταξύ των ρωγμών είναι μικρότερη από 10 cm, ενώ βρίσκονται σε λόφους και βουνά. Οι κλίσεις κυμαίνονται από 9% έως 75% και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.

- **CA296:** Η σειρά Hopland αποτελείται από εδάφη που παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά της Casabonne. Έτσι, βρίσκονται σε μεγάλα βάθη και πρόκεινται για καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη που σχηματίζονται σε κολλουβιακές αποθέσεις από αποσαθρωμένους ιζηματογενείς ψαμμίτες ή σχιστόλιθους. Σε αυτά τα εδάφη η απόσταση μεταξύ των ρωγμών είναι μικρότερη από 10 cm. Τα εδάφη Hopland βρίσκονται σε λόφους και βουνά και έχουν κλίσεις 9 έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους B.
- **CA297:** Η σειρά Yorkville αποτελείται από εδάφη που παρουσιάζονται σε μεγάλα βάθη, είναι καλά αποστραγγιζόμενα και σχηματίστηκαν σε υλικό αποσαθρωμένο από σχιστόλιθο και άλλα ιζηματογενή και μεταμορφικά πετρώματα. Τα εδάφη του Yorkville βρίσκονται σε λόφους και βουνά και έχουν κλίσεις 5% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους D.
- **CA298:** Η σειρά Kneeland αποτελείται από εδάφη που συναντώνται σε μεγάλα βάθη, καλά αποστραγγιζόμενα. Κάτω από αυτά τα εδάφη και σε βάθος 60 - 115 cm βρίσκεται στρώμα από κόκκους σκληρού ψαμμίτη. Τα εδάφη Kneeland βρίσκονται σε υψίπεδα και το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους C.
- **CA299:** Η σειρά Yorktree αποτελείται από εδάφη που παρατηρούνται σε μεγάλα βάθη, καλά αποστραγγιζόμενα, τα οποία σχηματίζονται σε υλικό που έχει αποσαθρωθεί από σχιστόλιθο ή ψαμμίτη. Τα εδάφη αυτά έχουν απόσταση μεταξύ των ρωγμών λιγότερο από 10 cm. Τα εδάφη Yorktree βρίσκονται σε λόφους και βουνά και έχουν κλίσεις 15% έως 75%. Το SWAT τα κατατάσσει στην υδρολογική κατηγορία εδάφους C.
- **CAW:** Η συγκεκριμένη σειρά αφορά σε υγροτροπικά εδάφη.

## 2.7. Πανίδα

Ο ποταμός Eel αποτελεί καταφύγιο για πολλά ανάδρομα ήδη ψαριών. Ως ανάδρομα ψάρια εννοούνται τα ψάρια που πηγαίνουν αντίθετα στην ροή του ποταμού. Μερικά από αυτά είναι η ιριδίζουσα πέστροφα (steelhead ή rainbow trout), η λάμπρενα (είδος χελιού, lamprey eel) και ο βασιλικός σολωμός (chinook salmon). Ο ποταμός φιλοξενεί, επίσης, έναν πληθυσμό ασημένιου σολωμού (coho salmon) που ζει κυρίως στο South

Fork διασχίζοντας την διαδρομή μέχρι την κεντρική κοιτή του ποταμού και τον παραπόταμο που ονομάζεται Outlet Creek. Όταν βρισκόταν στην εντελώς φυσική του κατάσταση ο ποταμός, αποτέλεσε το τρίτο μεγαλύτερο ποτάμιο σύστημα παραγωγής σολωμού στην Καλιφόρνια, με αναπαραγωγή περισσότερων από 1.000.000 σολομούς ετησίως. Η επέμβαση του ανθρώπου στην περιοχή οδήγησε σε δραματική μείωση των πληθυσμών σολωμού και πέστροφας. Η αρχή της εμπορικής αλιείας στην περιοχή του ποταμού Eel χρονολογείται πίσω στο 1850. Μάλιστα, το 1877, μόνο οι εργασίες κονσερβοποίησης χρειάστηκαν περίπου 600.000 ψάρια. Η μεταφορά φερτών στις περιοχές όπου αναπαράγονταν τα ψάρια, σε συνδυασμό με μεγάλες πλημμύρες το 1955 και το 1964, οδήγησαν στην εξαφάνιση μεγάλου μέρους του πληθυσμού των ψαριών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μετά την Χριστουγεννιάτικη Πλημμύρα του 1964, ο ετήσιος πληθυσμός του σολωμού μειώθηκε στις 10.000. ([https://en.wikipedia.org/wiki/Christmas\\_flood\\_of\\_1964](https://en.wikipedia.org/wiki/Christmas_flood_of_1964)).



Εικόνα 2.3: Χριστουγεννιάτικη Πλημμύρα 1964 στον ποταμό Eel (Πηγή: <https://www.northcoastjournal.com/>)

Επίσης, στην περιοχή μελέτης και γύρω από τον ποταμό συναντώνται υδρόβια θηλαστικά, όπως οι κάστορες. Αυτοί κατοικούν κατά κύριο λόγο στην περιοχή του παραπόταμου του ποταμού Eel, Outlet Creek. Τέλος, στην περιοχή υπάρχουν ρακούν, βίδρες ποταμού και βιζόν (<https://wildlandsconservancy.org/>).



### **3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT**

Το μαθηματικό μοντέλο Soil and Water Assessment Tool (SWAT) αποτελεί ένα υδρολογικό μοντέλο που έχει δημιουργηθεί από την Υπηρεσία Αγροτικής Έρευνας του Υπουργείου Γεωργίας (Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture ή USDA). Το μοντέλο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη για χωρική παραμετροποίηση σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Ο στόχος του μοντέλου είναι να υπολογίζει την επίδραση στην υδρολογία των αλλαγών χρήσεων γης, των διαφορετικών τύπων εδαφών και κλίσεων, καθώς και του κλίματος της περιοχής ως προς την ποσότητα και την ποιότητα του νερού. Σχετικά με την ποσοτική ανάλυση του μοντέλου αυτή έγκειται στον υπολογισμό της επίδρασης των παραπάνω στην απορροή της λεκάνης, στην στερεομεταφορά και στη κατείδυση στα υπόγεια νερά. Επιπλέον, η ποιοτική ανάλυση του μοντέλου αφορά στην επιρροή των παραπάνω στην μεταφορά χημικών ουσιών, όπως ο φωσφόρος (P) και το άζωτο (N), μέσα από διεργασίες παραγωγής, μεταφοράς και αποδόμησης στην λεκάνη απορροής και τον ποταμό. Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου σχετίζεται με το γεγονός ότι σε σύντομη χρονική διάρκεια δύναται να προσομοιώσει, τόσο μεγάλες χρονικές περιόδους, όσο και μεγάλης έκτασης λεκάνες απορροής. Μάλιστα, επιτρέπει στον χρήστη την επιλογή του χρονικού βήματος σε ημέρες ή μήνες ανάλογα με την ακρίβεια που αυτός επιζητεί στους υπολογισμούς του.

Αναφορικά με την λειτουργία του μοντέλου, βασικό σημείο είναι ο διαχωρισμός της εκάστοτε λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες και έπειτα σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (Hydrologic Response Units, HRUs). Ο χωρισμός σε υπολεκάνες προσφέρει στον μελετητή την ακριβέστερη κατανομή των χαρακτηριστικών με την ύπαρξη περισσότερων σημείων ελέγχου στην λεκάνη. Έτσι, σε περίπτωση «μη λογικών» αποτελεσμάτων είναι ευκολότερος ο εντοπισμός της πηγής του προβλήματος. Κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης αποτελείται από τρεις ξεχωριστές συνιστώσες, μία χρήση γης, ένα τύπο εδάφους και μία κλίση εδάφους.

#### **3.1. Υδρολογικός κύκλος του νερού**

Το SWAT στηρίζει την λειτουργία του στον υδρολογικό κύκλο του νερού. Όπως είναι γνωστό και φαίνεται στην Εικόνα 3.1, ο υδρολογικός κύκλος περιγράφεται στο μοντέλο SWAT βάσει της παρακάτω εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

όπου:

$SW_t$ : η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

$SW_0$ : η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

$t$ : ο χρόνος σε ημέρες (days)

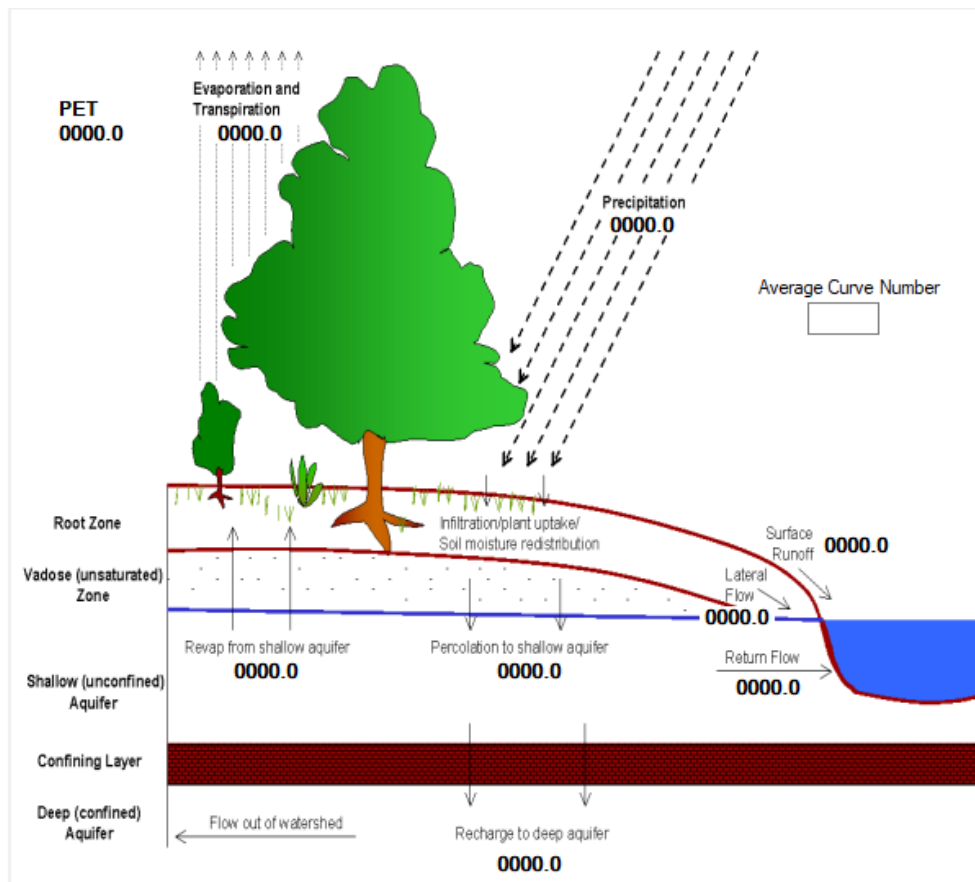
$R_{day}$ : η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

$Q_{surf}$ : η ημερήσια απορροή (mm)

$E_a$ : η εξατμισοδιαπνοή (mm)

$W_{seep}$ : η διήθηση στο υπέδαφος (mm)

$Q_{gw}$ : η υπόγεια ροή (mm)



Εικόνα 3.1: Υδρολογικός κύκλος του νερού (Πηγή: ArcSWAT)



### 3.2. Επιφανειακή απορροή

Η επιφανειακή απορροή εμφανίζεται σε ένα έδαφος, όταν η διοχέτευση νερού στην επιφάνεια του εδάφους ξεπερνά την διαπερατότητα του εδάφους. Το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής τη Μέθοδο της Υπηρεσίας Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service ή SCS ή σύμφωνα με την τωρινή ονομασία Natural Resources Conservation Service) του Υπουργείου Γεωργίας των Η.Π.Α (US Department of Agriculture)

Σύμφωνα με την μέθοδο SCS, η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται για τέσσερις κύριες κατηγορίες εδαφών, βάσει των ιδιοτήτων τους να αποστραγγίζονται (υδρολογική κατάταξη). Οι κατηγορίες αυτές είναι οι A, B, C, D (Τσιχριντζής 1999).

- Κατηγορία A: Σε αυτά τα εδάφη η δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής είναι πολύ μικρή, ενώ η διηθητική ικανότητα μεγάλη και επομένως το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Η σύσταση τους αποτελείται κυρίως από άμμο η οποία είναι εμπλουτισμένη με αρκετό χαλίκι και ελάχιστη ποσότητα λεπτής άμμου.
- Κατηγορία B: Τα εδάφη αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής απ' ό,τι αυτά της κατηγορίας A, αλλά η τιμή της παραμένει μικρή. Η δυνατότητα διήθησης παραμένει σε ανώτερα επίπεδα από τις μέσες τιμές. Στην παρούσα, λοιπόν, κατηγορία συναντώνται κυρίως αμμώδη εδάφη τα οποία, όμως, ως προς την σύσταση τους είναι πιο λεπτόκοκκα από ό,τι στην κατηγορία A.
- Κατηγορία C: Τα εδάφη αυτής της κατηγορίας έχουν ικανοποιητικές τιμές επιφανειακής απορροής, την στιγμή που η διηθητική ικανότητα τους κυμαίνεται σε τιμές κατώτερες των μέσων. Ως προς την σύσταση, πρόκειται για εδάφη που αποτελούνται από ικανοποιητικό ποσοστό αργίλου.
- Κατηγορία D: Τα εδάφη της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι πρακτικά αδιαπέρατα, με αποτέλεσμα η επιφανειακή απορροή να είναι πολύ μεγάλη.

Μια κατηγοριοποίηση των εδαφών αφορά στην υφή τους. Έτσι, ένα έδαφος μπορεί να θεωρηθεί είτε χαλίκι-άμμος (sand), είτε λεπτή άμμος-ιλύς (silt) είτε άργιλος (clay). Μάλιστα, σε περίπτωση που επιδιώκεται ακριβέστερη κατάταξη των εδαφών, υπάρχει

η δυνατότητα κατηγοριοποίησης τους σε 11 υποκατηγορίες, όπως αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2 και τον Πίνακα 3.1.

Η σχέση που διέπει την εκτίμηση της επιφανειακής απορροής είναι η ακόλουθη:

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

όπου:

$Q_{surf}$ : η επιφανειακή απορροή (mm)

$P_{day}$ : η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

$I_a$ : οι αρχικές απώλειες (mm)

$S$ : η ικανότητα κατακράτησης ή κατακράτηση κορεσμού του εδάφους (mm).

Οι αρχικές απώλειες  $I_a$  υπολογίζονται βάσει του τύπου:

$$I_a = \lambda S \quad (3.3)$$

όπου ο συντελεστής  $\lambda$  παίρνει συνήθως την τιμή 0.2. Όταν  $P_{day} < I_a = \lambda S$ , τότε στην Εξ. (3.2) τίθεται  $Q_{surf} = 0.0$ .

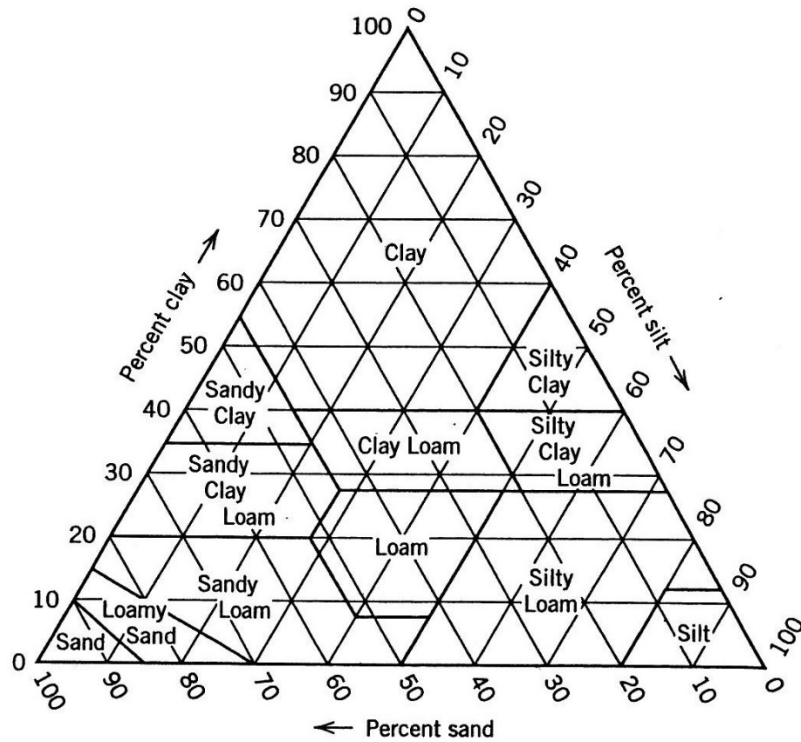
Η κατακράτηση κορεσμού  $S$  (mm) δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{25000}{CN} - 254 \quad (3.4)$$

όπου  $CN$  είναι ο αριθμός καμπύλης (curve number). Πρόκειται για μια εμπειρική παράμετρο που εξαρτάται από τον τύπο εδάφους, τη χρήση γης, την κάλυψη και την κατάσταση την επιφάνειας του εδάφους και την κατάσταση αρχικής υγρασίας. Η τιμές της παραμέτρου  $CN$  μεταβάλλονται μεταξύ 0 (για μια θεωρητική λεκάνη απορροής με άπειρες απώλειες) και 100 (για μια αδιαπέρατη λεκάνη). Στην πράξη κατά την εφαρμογή της μεθόδου, οι τιμές λαμβάνονται από πίνακες (Πίνακες 3.2 έως 3.4).

### 3.3. Διήθηση

Η διήθηση υπολογίζεται από το μοντέλο ξεχωριστά για κάθε εδαφικό στρώμα. Για να διηθηθεί το νερό σε ένα κατώτερο στρώμα θα πρέπει η ποσότητα να ξεπερνά την αποθηκευτικότητα του εκάστοτε στρώματος.



Εικόνα 3.2: Κατηγορίες εδαφών λόγω της υφής (USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 3.1: Κατάταξη και χαρακτηριστικά εδαφών (USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Κατηγορία υφής	Ελάχιστος ρυθμός διήθησης (mm/hr)	Υδρολογική κατηγορία κατά SCS
Άμμος (Sand)	210.0	A
Τυρφόδης άμμος (Loamy sand)	61.2	A
Αμμώδης τύρφη (Sandy loam)	25.9	B
Τύρφη (Loam)	13.2	B
Λεπτή αμμώδης τύρφη (Silty loam)	6.8	C
Αμμώδης αργιλώδης τύρφη (Sandy clay loam)	4.3	C
Αργιλώδης τύρφη (Clay loam)	2.3	D
Λεπτή αμμώδης αργιλώδης τύρφη (Silty clay loam)	1.5	D
Αμμώδης άργιλος (Sandy clay)	1.3	D
Λεπτή αμμώδης άργιλος (Silty clay)	1.0	D
Άργιλος (Clay)	0.5	D

Πίνακας 3.2: Τιμές Curve Number (CN) για αστικές χρήσεις γης (USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Περιγραφή		% Αδιαπερατότητας	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
Τύπος Κάλυψης	Υδρολογική Κατάσταση		A	B	C	D
Ανοικτοί χώροι (κήποι, πάρκα, γρασίδι, κοιμητήρια, γήπεδα γκολφ, κλπ)	Άσχημη κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι <50%)		68	79	86	89
	Μέση κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι 50-75%)		49	69	79	84
	Καλή κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι >50%)		39	61	74	80
Αδιαπέρατες επιφάνειες	Στρωμένοι ανοικτοί χώροι στάθμευσης, στέγες, ταρράτσες, κλπ		98	98	98	98
Δρόμοι και αρτηρίες	Στρωμένοι, με κράσπεδα και υπονόμους ομβρίων		98	98	98	98
	Στρωμένοι, με ανοικτά στραγγιστικά χαντάκια στις άκρες		83	89	92	93
	Χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
	Χωματοδρομοί		72	82	87	89
Αστικές περιοχές	Εμπορικές ζώνες	85	89	92	94	95
	Βιομηχανικές ζώνες	72	81	88	91	93
Αστικές περιοχές με κατοικίες μιάς οικογένειας σε οικόπεδα (βάσει μεγέθους οικοπέδου)	0.05 ha = 0.5 στρέμμα	65	77	85	90	92
	0.1 ha = 1.0 στρέμμα	38	61	75	83	87
	0.13 ha = 1.3 στρέμματα	30	57	72	81	86
	0.2 ha = 2 στρέμματα	25	54	70	80	85
	0.4 ha = 4 στρέμματα	20	51	68	79	84
	0.8 ha = 8 στρέμματα	12	46	65	77	82
Νέες περιοχές κατοικιών υπό κατασκευή	Διαπερατές επιφάνειες χωρίς γρασίδι		77	86	91	94
Κενά οικόπεδα	από τον Πίνακα 2.27					

*Σημειώσεις:* (1) Οι τιμές του πίνακα ισχύουν για κατηγορία υγρασίας εδάφους από προηγούμενες βροχές (AMC II και  $\lambda=0.2$ ). (2) Για τις περιοχές όπου φαίνεται το ποσοστό αδιαπερατότητας, οι τιμές CN είναι γεωμετρικοί μέσοι όροι σύμφωνα με το ποσοστό αδιαπερατότητας που φαίνεται. Για το αδιαπέρατο μέρος χρησιμοποιήθηκε  $CN=98$  και για το διαπερατό μέρος οι τιμές που αντιστοιχούν σε ανοικτό χώρο με γρασίδι σε καλή κατάσταση για την αντίστοιχη κατηγορία εδάφους. Κατά συνέπεια διορθώσεις των τιμών είναι δυνατές όταν το ποσοστό αδιαπερατότητας είναι γνωστό.

Πίνακας 3.3: Τιμές Curve Number (CN) για γεωργικές λεκάνες (USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Χρήση Γης	Επιφάνεια ή γεωργική πρακτική	Υδρολογική Κατάσταση	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
			A	B	C	D
Γεωργική γη που έχει μείνει ακαλλιέργητη			77	86	91	94
Διάφορες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	72	81	88	91
		Καλή	67	78	85	89
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	70	79	84	88
		Καλή	65	75	82	86
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	66	74	80	82
		Καλή	62	71	78	81
Μικρόκοκκες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	65	76	84	88
		Καλή	63	75	83	87
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	63	74	82	85
		Καλή	61	73	81	84
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	61	72	79	82
		Καλή	59	70	78	81
Λαχανικά ή εναλασόμενες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	66	77	85	89
		Καλή	58	72	81	85
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	64	75	83	85
		Καλή	55	69	78	83
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	63	73	80	83
		Καλή	51	67	76	80
Βοσκότοπος, κτηνοτροφική περιοχή	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	68	79	86	89
		Μέση	49	69	79	84
		Καλή	39	61	74	80
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	47	67	81	88
		Μέση	25	59	75	83
		Καλή	6	35	70	79
Λιβάδια		Καλή	30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις		Άσχημη	45	66	77	83
		Μέση	36	60	73	79
		Καλή	25	55	70	77
Φάρμες			59	74	82	86
Δρόμοι	Χωματόδρομοι		72	82	87	89
	Με σκληρή επιφάνεια		74	84	90	92

Πίνακας 3.4: Ρύθμιση τιμής Curve Number (CN) ανάλογα με την προϋπάρχουσα υγρασία του εδάφους (USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Κατάσταση Προϋπάρχουσας Υγρασίας (Antecedent Moisture Condition, AMC)		
AMC II (Κανονική)	AMC I (Ξηρή)	AMC III (Υγρή)
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50

Σημείωση:

AMC I: Σχετικά ξηρά εδάφη, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες < 12.5 mm.

AMC II: Κανονική κατάσταση, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες μεταξύ 12.5 και 38 mm.

AMC III: Σχετικά υγρά εδάφη, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες > 38 mm.

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η διήθηση σε ένα εδαφικό στρώμα είναι η εξής (SWAT Theoretical Documentation 2009):

$$SW_{ty,excess} = \begin{cases} SW_{ly} - FC_{ly}, & \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \\ 0 & \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{cases} \quad (3.5)$$

όπου:

$SW_{ty,excess}$ : το ύψος του νερού που διηθείται σε ένα στρώμα σε μια μέρα (mm).

$SW_{ly}$ : το διαθέσιμο ύψος νερού που προϋπάρχει στο εδαφικό στρώμα την ίδια μέρα (mm).

$FC_{ly}$ : η χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος σε νερό (mm).

Η διήθηση από ένα εδαφικό στρώμα σε ένα άλλο γίνεται σύμφωνα με τον τύπο (SWAT Theoretical Documentation 2009):

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

όπου:

$W_{perc,ly}$ : το ύψος του νερού που διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα (mm).

$\Delta t$ : το χρονικό βήμα (h).

$TT_{perc}$ : ο χρόνος ολοκλήρωσης της διήθησης του νερού ποσότητας  $W_{perc,ly}$  στο αμέσως επόμενο στρώμα (h).

### 3.4. Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει τόσο την διαπνοή από την βλάστηση όσο και την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, το έδαφος το χιόνι, τον πάγο και την βλάστηση (Μπαλτάς και Μιμίκου 2018). Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Το SWAT χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο την μέθοδο Penman-Monteith, η οποία περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (Μπαλτάς και Μιμίκου 2018):

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \cdot \frac{R_n}{\lambda} \cdot \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} \cdot F(u) \cdot D \quad (3.7)$$

όπου:

$\Delta$ : η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδάτων (hPa/°C)

$R_n$ : η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [kJ/(m<sup>2</sup>d)]

$\lambda$ : η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης (kJ/kg)

$D$ : το έλλειμα κορεσμού των υδρατμών (hPa)

$F(u)$ : η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ταχύτητας του ανέμου [kg/(hPa m<sup>2</sup> d)]

$\gamma'$ : η τροποποιημένη έκφραση του ψυχομετρικού συντελεστή, ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων (hPa/°C)

Η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ταχύτητας του ανέμου και του ψυχομετρικού συντελεστή περιγράφονται από τις Εξ. (3.8) και (3.9):

$$F(u) = \frac{90}{T+275} \cdot u \quad (3.8)$$

$$\gamma' = (1 + 0.33u) \cdot \gamma \quad (3.9)$$

όπου:

$T$ : η θερμοκρασία (°C)

$u$ : η ταχύτητα ανέμου (m/s)

$\gamma$ : ο ψυχομετρικός συντελεστής (hPa/°C)



## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAT ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ EEL

### 4.1. Συλλογή δεδομένων

Το πρώτο και θεμελιώδες βήμα για το στήσιμο του μοντέλου SWAT είναι η συλλογή των δεδομένων εισόδου του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, τα απαραίτητα αρχεία για την εφαρμογή του μοντέλου SWAT ήταν τα ακόλουθα:

- **Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Αρχείο DEM)**: Το συγκεκριμένο αρχείο, τύπου TIFF, αποτελεί την βάση για το υδρολογικό μοντέλο, εφόσον περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Πηγή άντλησης των δεδομένων αυτών, ήταν η USGS και πιο συγκεκριμένα η ενότητα EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).
- **Χρήσεις Γης (Land use)**: Η διαδικασία συνεχίστηκε με την λήψη των δεδομένων χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Eel, οι οποίες αποτελούν μια εκ των τριών δεδομένων διακριτοποίησης μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs) που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Αυτές αντλήθηκαν από το MRLC (Multi-Resolution Land Characteristics Consortium - <https://www.mrlc.gov/viewer/>), μια κοινοπραξία ομοσπονδιακών οργανισμών των ΗΠΑ, που ασχολούνται με την συλλογή και παραγωγή δεδομένων για μια ποικιλία εφαρμογών περιβάλλοντος, διαχείρισης γης και μοντελοποίησης.
- **Λεδομένα Εδάφους (Soil)**: Η εύρεση της δεύτερης κατηγορίας μονάδων υδρολογικής απόκρισης διαφοροποιείται για λεκάνη απορροής εντός και εκτός των ΗΠΑ. Στην παρούσα εργασία, όπου η περιοχή μελέτης είναι εντός των ΗΠΑ, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα εδάφους του χάρτη US STATSGO (Digital General Soil Map of the United States - [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2\\_053629](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2_053629)), ο οποίος περιέχει μια ευρεία απογραφή των εδαφικών χαρακτηριστικών της Αμερικής.
- **Κλίσεις**: Η συλλογή δεδομένων αναφορικά με τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης ολοκληρώθηκε με την εύρεση των κλίσεων στην περιοχή. Ο κλίση κλίσεων της περιοχής μελέτης παράχθηκε με την βοήθεια των εντολών

του ArcGIS και έπειτα έγινε η ομαδοποίηση τους ώστε να γίνει καλύτερη αποτύπωση του ανάγλυφου της περιοχής.

- **Δεδομένα Καιρού (Weather Data)**: Αφού ολοκληρωθεί ο σχηματισμός των HRUs, το μοντέλο απαιτεί την εισαγωγή των δεδομένων που σχετίζονται με τον καιρό. Ειδικότερα, απαραίτητη είναι η εισαγωγή δεδομένων βροχόπτωσης και τιμών μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε χαρακτηριστικά σημεία της περιοχής. Άλλες παράμετροι σχετικές με τον καιρό που δύναται να χρησιμοποιήσει το μοντέλο είναι η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα ανέμου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως δεδομένα καιρού χρησιμοποιήθηκαν 10ετείς χρονοσειρές για βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες (ελάχιστες και μέγιστες τιμές) από 3 σταθμούς μέτρησης σε κάθε περίπτωση. Πηγή των δεδομένων ήταν η Αμερικάνικη υπηρεσία NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration-<https://www.noaa.gov/>).
- **Δεδομένα Παροχών**: Το τελευταίο δεδομένο που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία ήταν οι μετρημένες τιμές παροχών από χαρακτηριστικούς σταθμούς της USGS ([https://waterdata.usgs.gov/nwis/current?huc\\_cd=18010105&index\\_pmcode\\_STATION\\_NM=1&index\\_pmcode\\_00065=3&index\\_pmcode\\_00060=4&index\\_pmcode\\_00062=5&index\\_pmcode\\_72020=6&sort\\_key=site\\_no&group\\_key=county\\_cd&sitefile\\_output\\_format=html\\_table&index\\_pmcode\\_DATETIME=2](https://waterdata.usgs.gov/nwis/current?huc_cd=18010105&index_pmcode_STATION_NM=1&index_pmcode_00065=3&index_pmcode_00060=4&index_pmcode_00062=5&index_pmcode_72020=6&sort_key=site_no&group_key=county_cd&sitefile_output_format=html_table&index_pmcode_DATETIME=2)). Σε αυτό το σημείο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι παροχές αποτελούν το βασικό αρχείο εξόδου του μοντέλου. Οι μετρημένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν αφού είχε ολοκληρωθεί το στήσιμο και η εκτέλεση του μοντέλου ώστε να γίνει η αρτιότερη βαθμονόμηση του και να ελεγχθεί το κατά πόσο ήταν λογικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

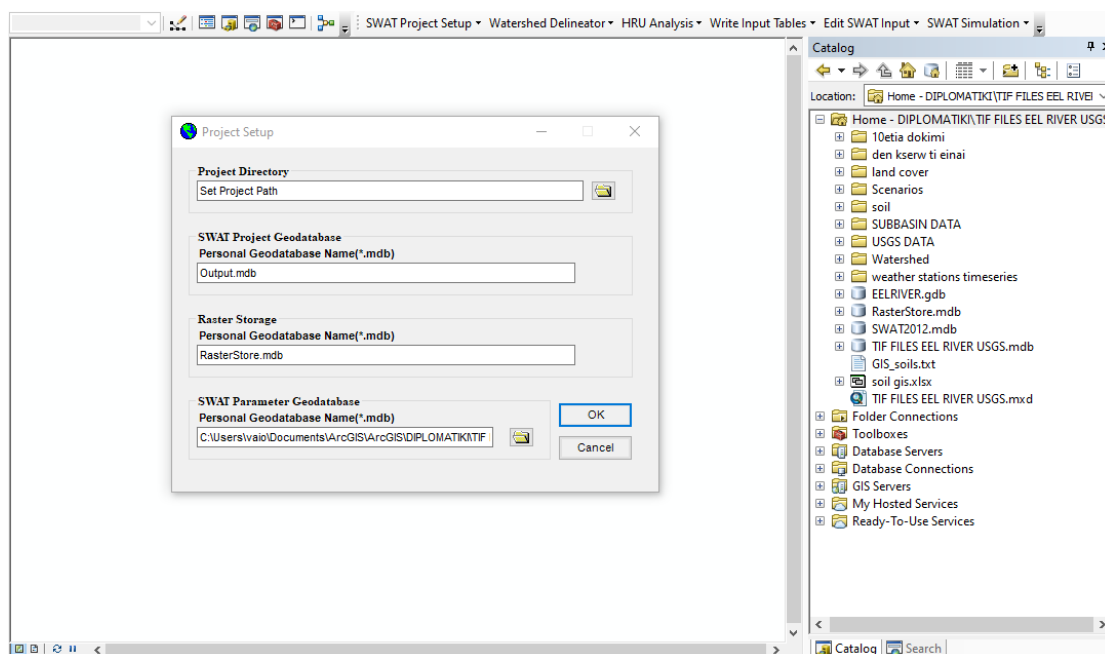
## **4.2. Διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου**

Αφού ολοκληρώθηκε η συλλογή δεδομένων ξεκίνησε η διαμόρφωση του μοντέλου, η οποία έγινε σε 4 στάδια, σύμφωνα με την βασική γραμμή εργαλείων του προγράμματος.

### **4.2.1. Στήσιμο μοντέλου (SWAT Project Setup)**

Πρώτο βήμα για την διαμόρφωση ενός νέου project στο SWAT είναι η επιλογή του φακέλου αποθήκευσης του μέσα από του μενού του SWAT Project Setup (Εικόνα 4.1).

Σημασία έχει να έχουν τοποθετηθεί μέσα σε αυτόν τον φάκελο όλα τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά στο project, εφόσον δεν επιτρέπεται στον χρήστη η χρήση αρχείων εκτός φακέλου. Μαζί επιλέγεται και η βάση δεδομένων από την οποία θα λαμβάνονται τα αρχεία. Τέλος, στο μενού του Project Setup δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης, αντιγραφής και διαγραφής του project.



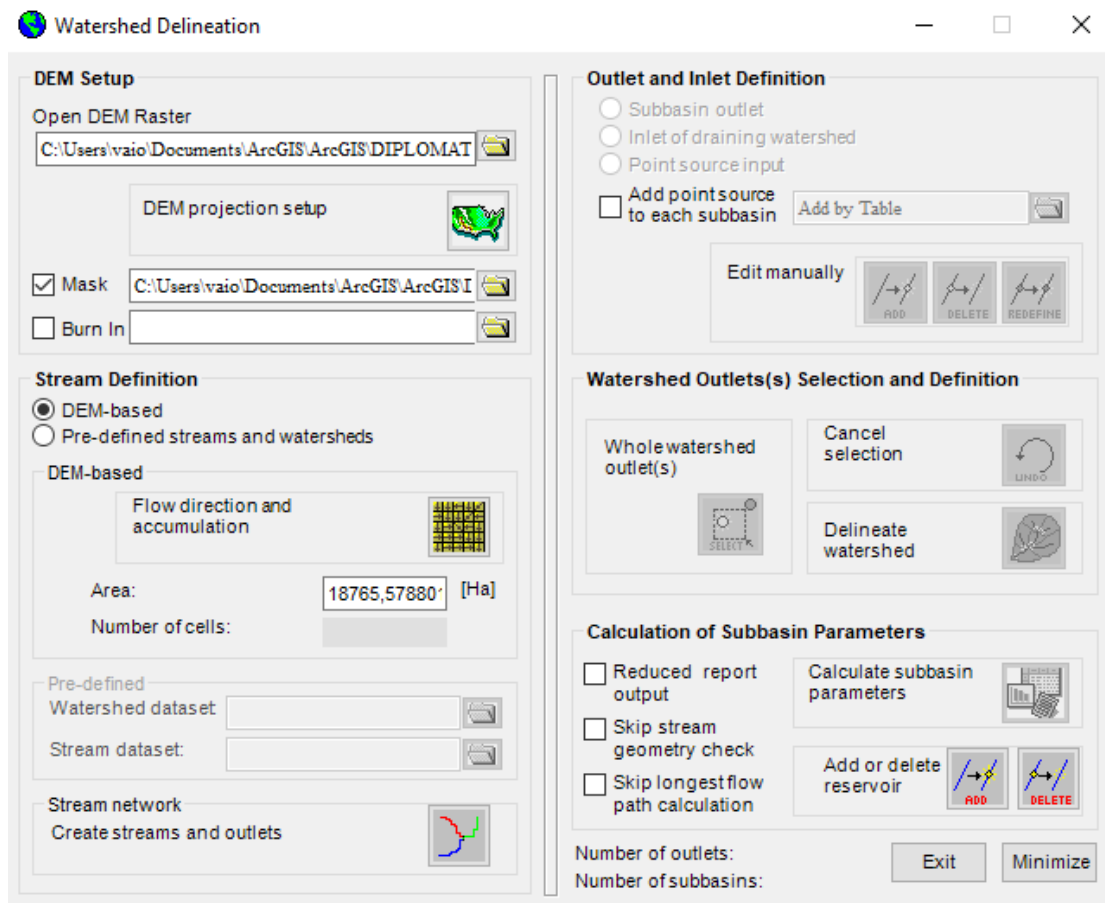
Εικόνα 4.1: Project Setup (πηγή: ArcSWAT2012)

#### 4.2.2. Επιλογή λεκάνης απορροής (Watershed Delineator)

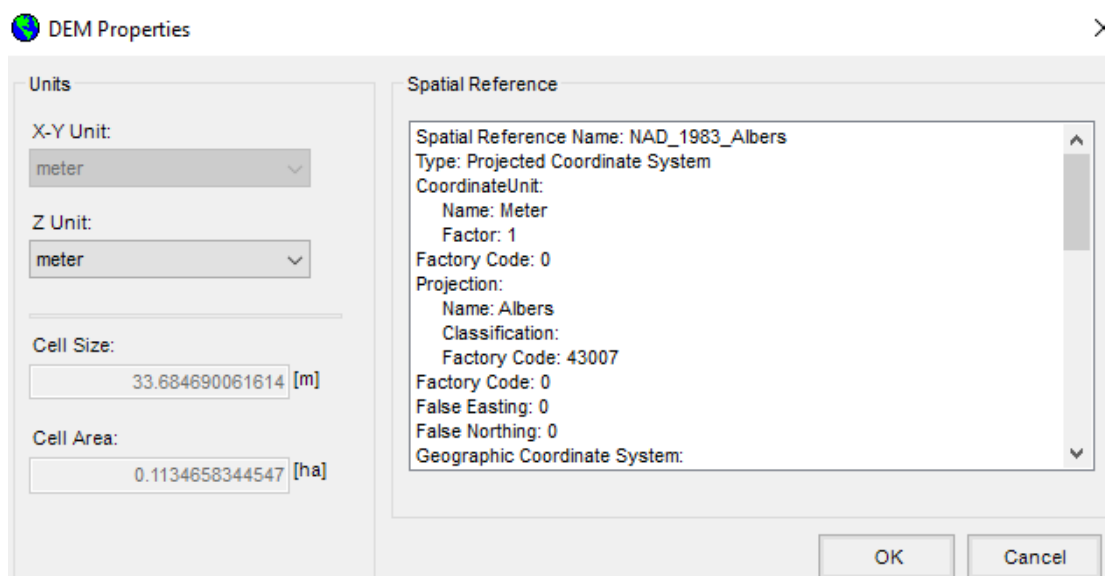
Αφού ολοκληρωθεί η διαμόρφωση των φακέλων του project, η διαδικασία συνεχίζει με την επιλογή της Λεκάνης Απορροής. Για αυτό τον σκοπό, θα πρέπει να γίνει προεργασία στο περιβάλλον ArcGIS για το αρχείο DEM που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα αρχεία-εικόνες τύπου TIFF, τα οποία αντλήθηκαν από την USGS. Με την εντολή «Mosaic To New Raster» από την εργαλειοθήκη του ArcGIS γίνεται σύνθεση των προαναφερθέντων αρχείων στο τελικό αρχείο DEM, της ευρύτερης περιοχής, το οποίο περιέχει την λεκάνη απορροής που μελετήθηκε. Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα αρχεία-εικόνες. Προσοχή χρειάζεται, σε αυτό το σημείο, στον συντονισμό των αρχείων στο κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων, εφόσον τόσο τα αρχεία τύπου TIFF όσο και το τελικό raster αρχείο που προκύπτει βρίσκονται σε γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων (Geographic Coordinate System) ενώ τα αρχεία εισόδου πρέπει να είναι σε προβολικό σύστημα συντεταγμένων

(Projected Coordinate System). Με την εντολή, λοιπόν, «Project Raster» επιλέχθηκε ως νέο σύστημα συντεταγμένων το «NAD\_1983\_Contiguous\_USA\_Albers», το οποίο χρησιμοποιεί ως μονάδα μέτρησης τα μέτρα. Αυτό αποτέλεσε και το σύστημα συντεταγμένων όλων των αρχείων του project.

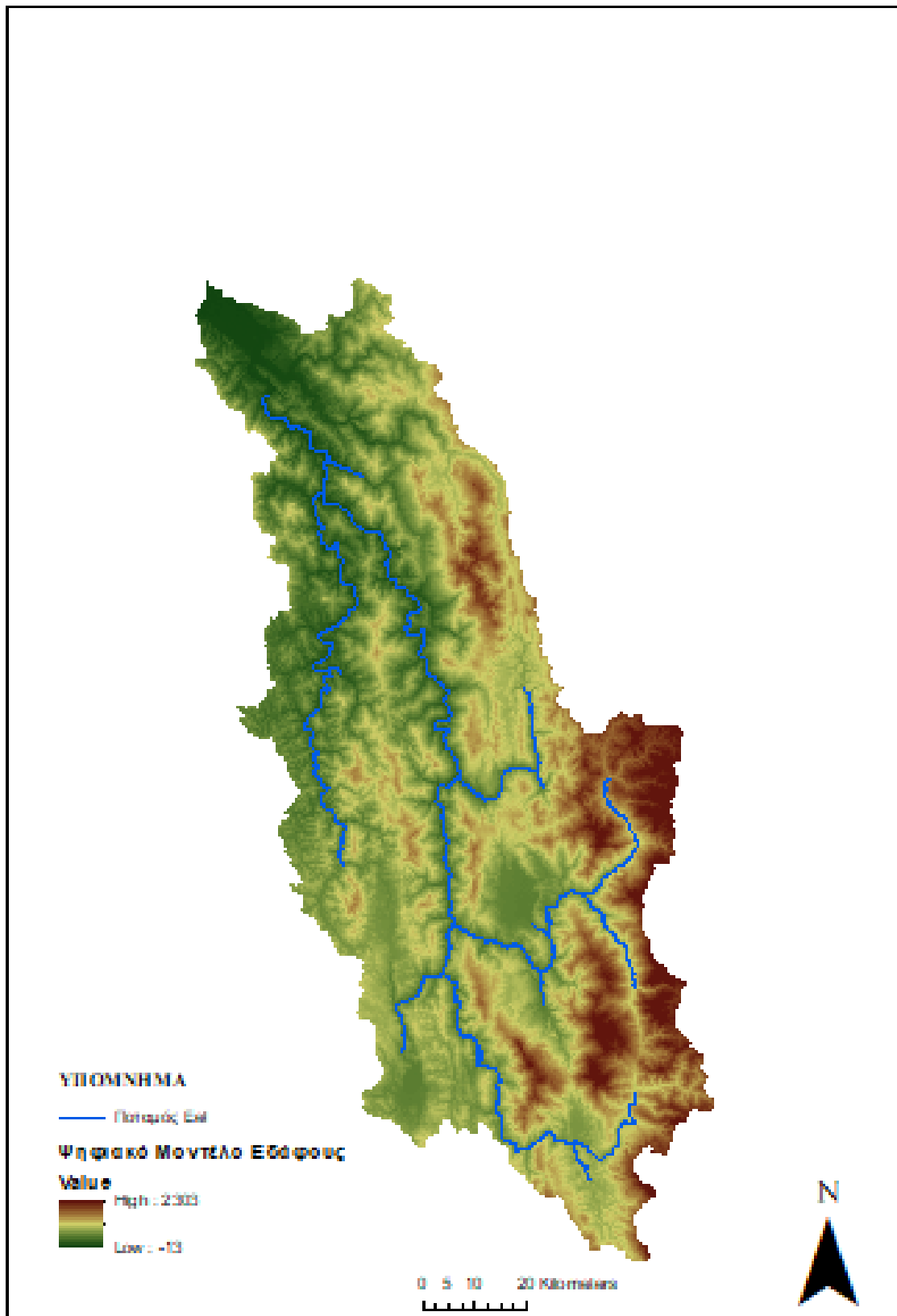
Ολοκληρώνοντας, έτσι, την προεργασία στο ArcGIS, ήταν δυνατό να ξεκινήσει το δεύτερο στάδιο της διαμόρφωσης του μοντέλου. Στο περιβάλλον του ArcSWAT και στην ενότητα Watershed Delineator (Εικόνα 4.2), η πρώτη απαίτηση του προγράμματος ήταν η επιλογή του DEM (DEM Setup), δηλαδή του αρχείου που είχε προετοιμαστεί προηγουμένως. Στην ενότητα DEM Projection Setup δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει τις μονάδες του άξονα z, δηλαδή του άξονα των υψομέτρων, όπου και επιλέχθηκαν εκ νέου τα μέτρα (Εικόνα 4.3). Έπειτα, προκειμένου να “αποκοπεί” η λεκάνη απορροής, ενεργοποιήθηκε η επιλογή «Mask» και επιλέχθηκε το αρχείο της περιμέτρου της λεκάνης απορροής. Έχοντας, λοιπόν, αποκόψει την λεκάνη απορροής, το επόμενο βήμα ήταν ο προσδιορισμός της ροής (Stream Definition). Έτσι, βάσει του ανάγλυφου (DEM-based), προσδιορίστηκε η διεύθυνση της ροής των υδάτων (Flow Direction) καθώς και το που αυτά συσσωρεύονται (Flow Accumulation). Στην συνέχεια, ορίστηκε το υδρογραφικό δίκτυο (Stream Network) και τα σημεία εξόδου των υπολεκανών μέσω της επιλογής «Create streams and outlets». Επόμενο βήμα, ήταν ο προσδιορισμός των πρόσθετων σημείων εξόδου (outlets) για την δημιουργία των υπολεκανών. Επιλέχθηκαν τρία πρόσθετα σημεία, στα οποία υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις παροχής από τους σταθμούς του USGS και προστέθηκαν χειροκίνητα και προσεγγιστικά στον χάρτη (Edit manually-Add). Απαραίτητο σε αυτό το σημείο ήταν να επιλεγεί το ολικό σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής (Whole Watershed Outlet). Γι αυτό το σκοπό επιλέχθηκε ο σταθμός Scotia, ο οποίος ήταν ένας εκ των τριών σταθμών της USGS, για τους οποίους υπήρχαν μετρημένες παροχές. Η διαδικασία του «Watershed Delineator» ολοκληρώθηκε με την χάραξη των υπολεκανών, καθώς και τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων των υπολεκανών. Τέλος, η αρχική λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 27 υπολεκάνες και χαράχθηκε ο υδροκρίτης. Τα παραπάνω συνοψίζονται στους κανάβους των Εικόνων 4.4, 4.5, 4.6, 4.7.



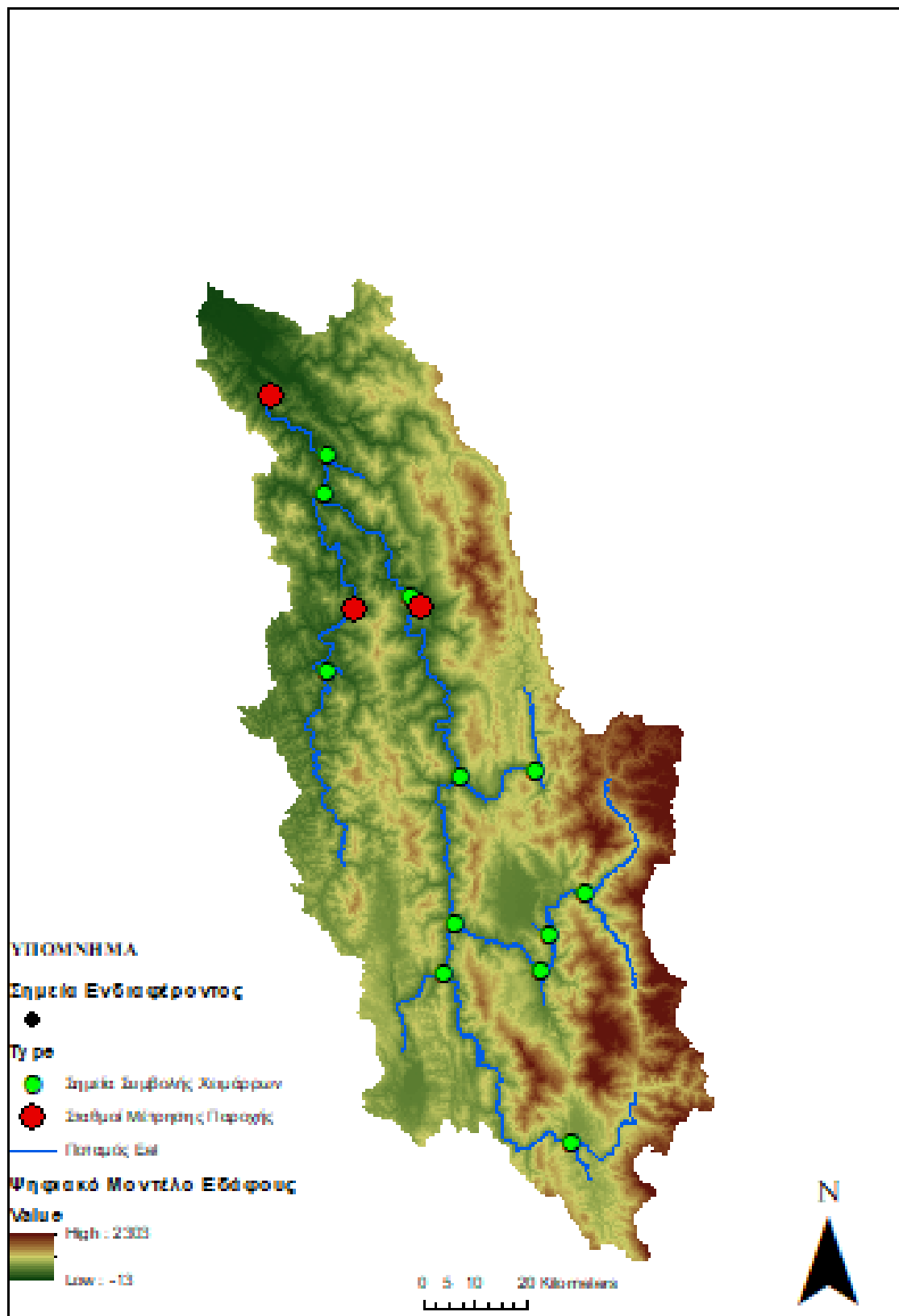
Εικόνα 4.2: Επιλογή λεκάνης απορροής - Watershed Delineator (πηγή: ArcSWAT2012)



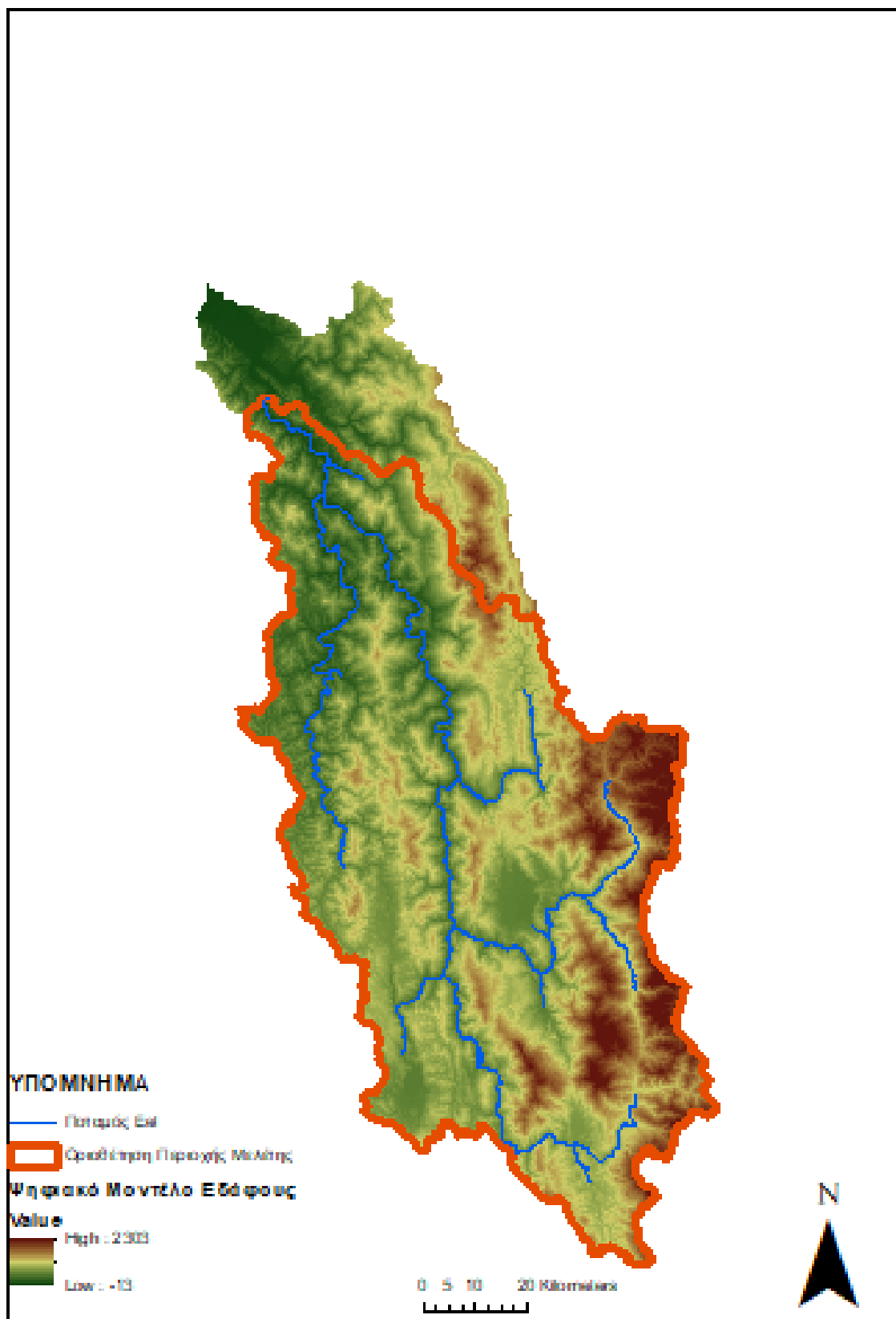
Εικόνα 4.3: Επιλογή μονάδων για τον άξονα z (πηγή: ArcSWAT2012)



Εικόνα 4.4: Δεκάνη απορροής ποταμού Eel - Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

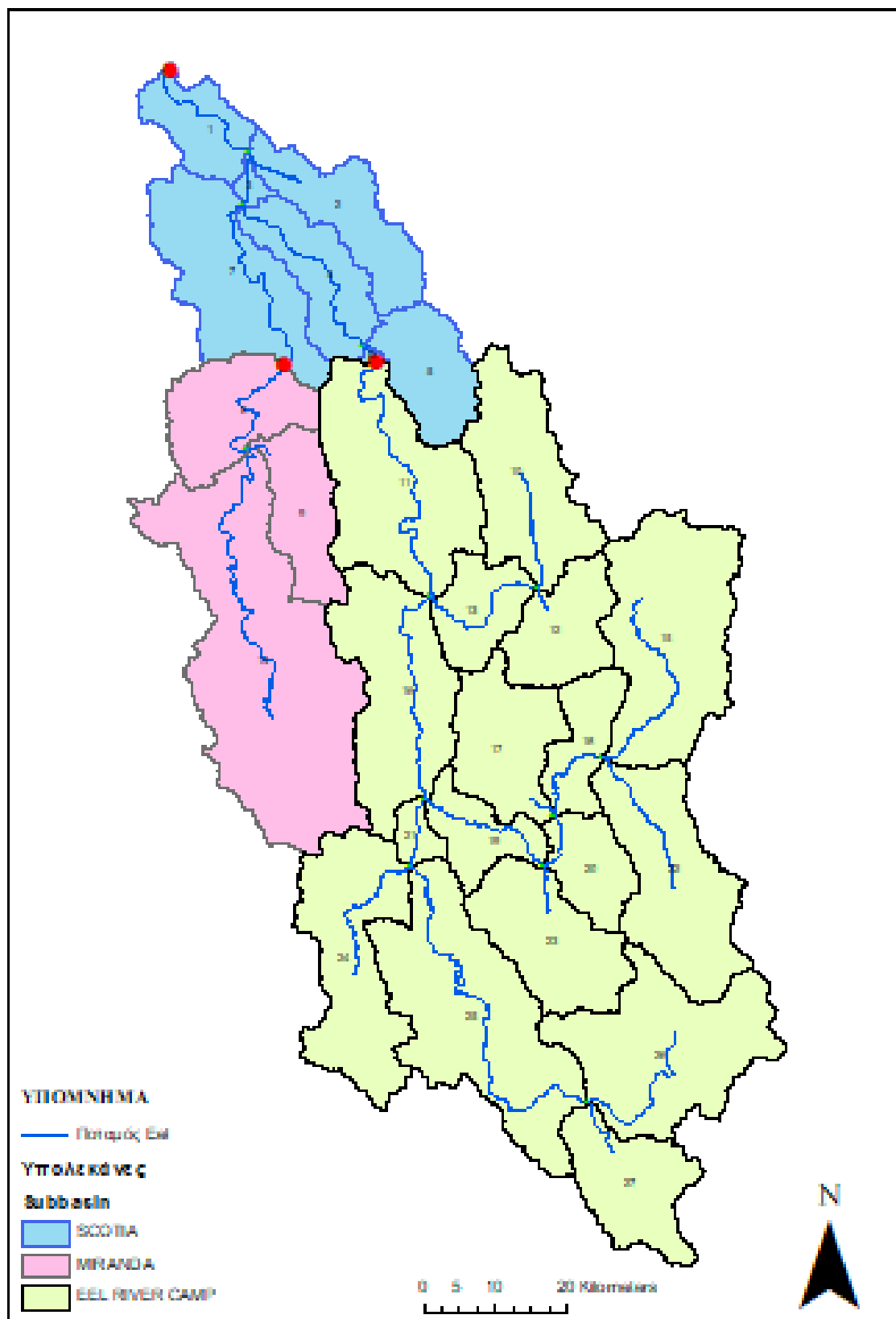


Εικόνα 4.5: Σημεία συμβολής χειμάρρων και σταθμοί μέτρησης παροχής στην λεκάνη απορροής του ποταμού Eel



Εικόνα 4.6: Οριοθέτηση τελικής περιοχής μελέτης ανάντη του σταθμού Scotia





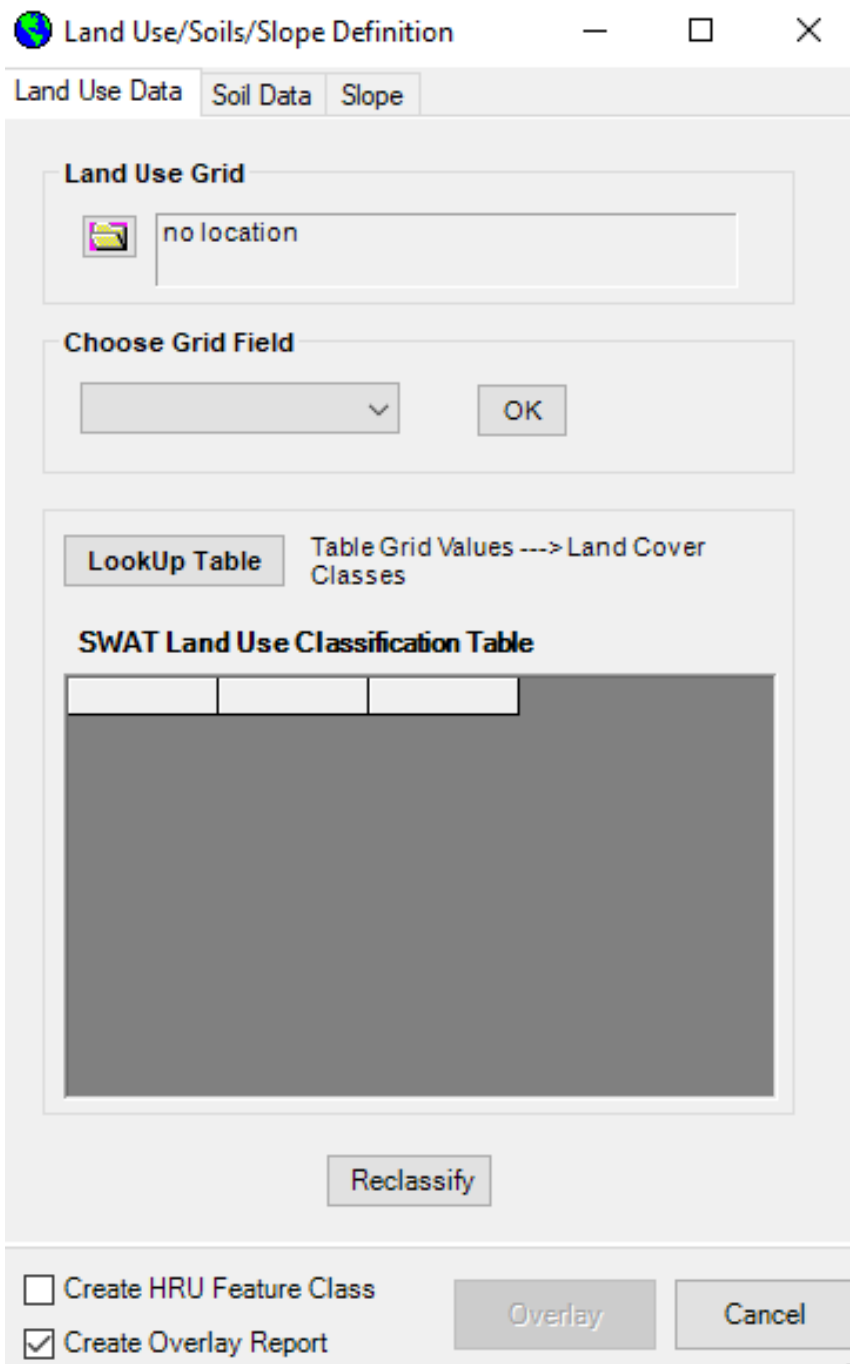
Εικόνα 4.7: Υπολεκάνες στην περιοχή μελέτης ανάντη του σταθμού Scotia

#### 4.2.3. Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs)

Κρίσιμη στην σύσταση του μοντέλου είναι η σωστή επιλογή των υδρολογικών μονάδων απόκρισης HRUs. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα HRUs που χρησιμοποιεί το ArcSWAT καθορίζονται από τις χρήσεις γης (Land Use data), τους τύπους εδάφους (Soil data) και τις κλίσεις (Slope). Σημαντικό είναι τα δεδομένα εισόδου για κάθε περίπτωση να είναι άρτια προσανατολισμένα στο σωστό σύστημα συντεταγμένων, ώστε να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα στην πορεία της διαδικασίας.

##### 4.2.3.1. *Χρήσεις γης (Land Use)*

Η επιλογή των χρήσεων γης έγινε με την βοήθεια του MRLC, από όπου αντλήθηκε ο κάρναβος χρήσεων γης (NLCD\_2006\_Land\_Cover- <https://www.mrlc.gov/viewer/>). Η επιλογή «Choose Grid Field» ήταν «Values» και ως «Lookup Table» επιλέχθηκε το «NLCD 2001/2006» του ArcSWAT, αφού πρώτα διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι αντιπροσωπευτικό της σημερινής κατάστασης (Εικόνα 4.8). Να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που η περιοχή μελέτης ήταν εκτός των ΗΠΑ, θα έπρεπε να δημιουργηθεί νέο «Lookup Table», εφόσον το «NLCD 2001/2006» αναφέρεται αποκλειστικά σε περιοχές εντός ΗΠΑ. Τέλος, με την εντολή «Reclassify», δημιουργήθηκε από το μοντέλο ο κάρναβος χρήσεων γης της λεκάνη απορροής. Οι χρήσεις γης που προέκυψαν ήταν 15, με τις κυριότερες να αφορούν σε δασικές εκτάσεις και βοσκοτόπους (Εικόνα 2.2).

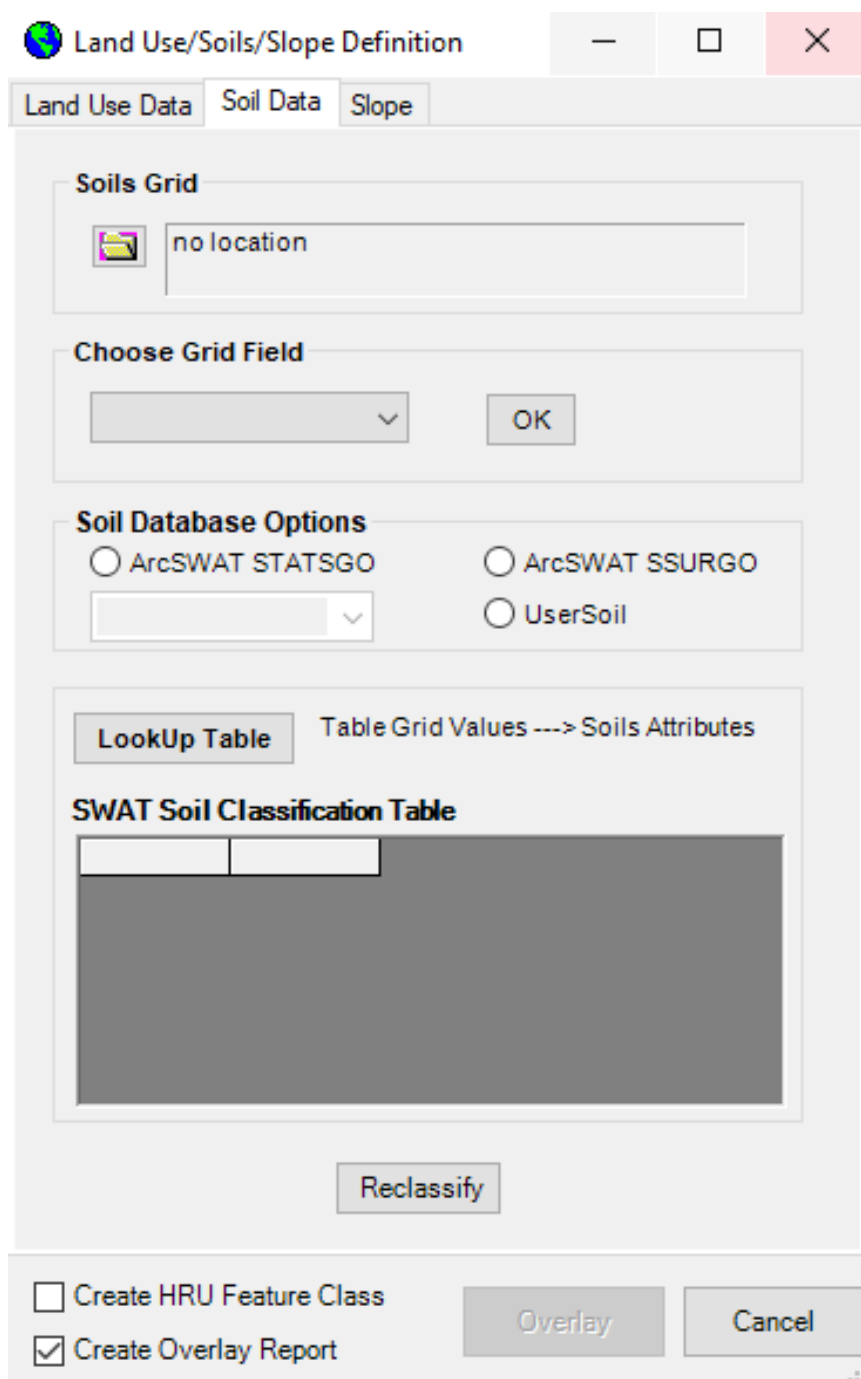


Εικόνα 4.8: Χρήσεις γης - Land use data (πηγή: ArcSWAT2012)

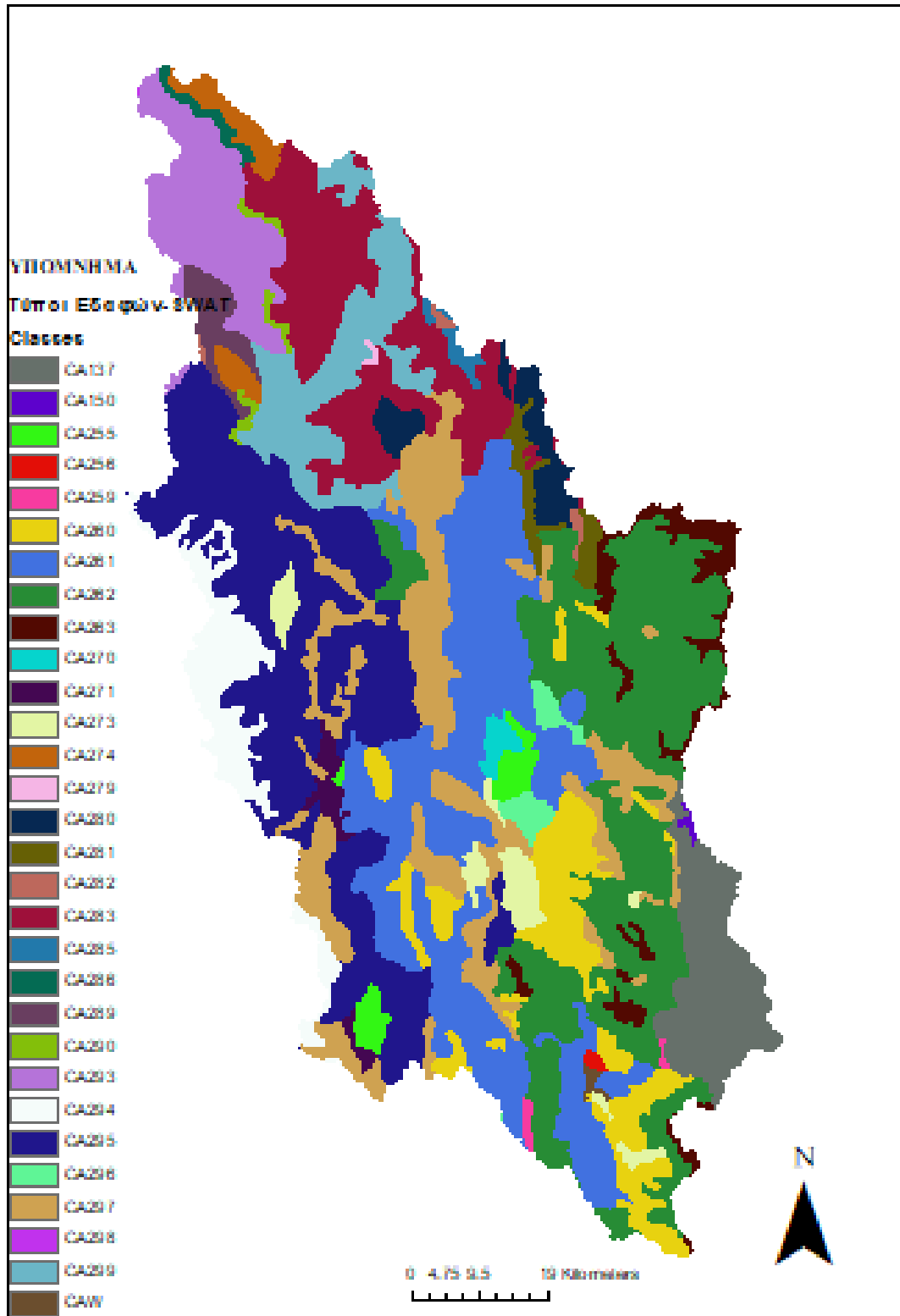
#### 4.2.3.2. Δεδομένα εδάφους (Soil Data)

Αναφορικά με τα δεδομένα εδάφους, φαίνεται για ακόμα μια φορά η ευκολία στο στήσιμο του προγράμματος, για περιοχές εντός των ΗΠΑ. Όπως αναφέρθηκε και πριν, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα εδάφους του χάρτη US STATSGO, προσφέροντας παράλληλα ένα έτοιμο «Lookup

Table», το οποίο περιγράφει τους τύπους εδάφους της περιοχής (Εικόνα 4.10). Αυτοί παρουσιάζονται με την κωδική ονομασία CA\_αριθμός (π.χ. CA137), όπου το CA αναφέρεται στην Πολιτεία της περιοχής μελέτης, δηλαδή την Καλιφόρνια (California). Στην περιοχή μελέτης εμφανίστηκαν 23 τύποι εδάφους, η αποκωδικοποίηση των οποίων εμπεριέχεται στην βάση δεδομένων που έχει δημιουργηθεί από την αρχή για το project και παρουσιάστηκε στην §2.6. Πάλι με την εντολή «Reclassify» δημιουργήθηκε ο κάρναβος των τύπων εδάφους (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.9: Τύποι εδαφών - Soil data (πηγή: ArcSWAT2012)



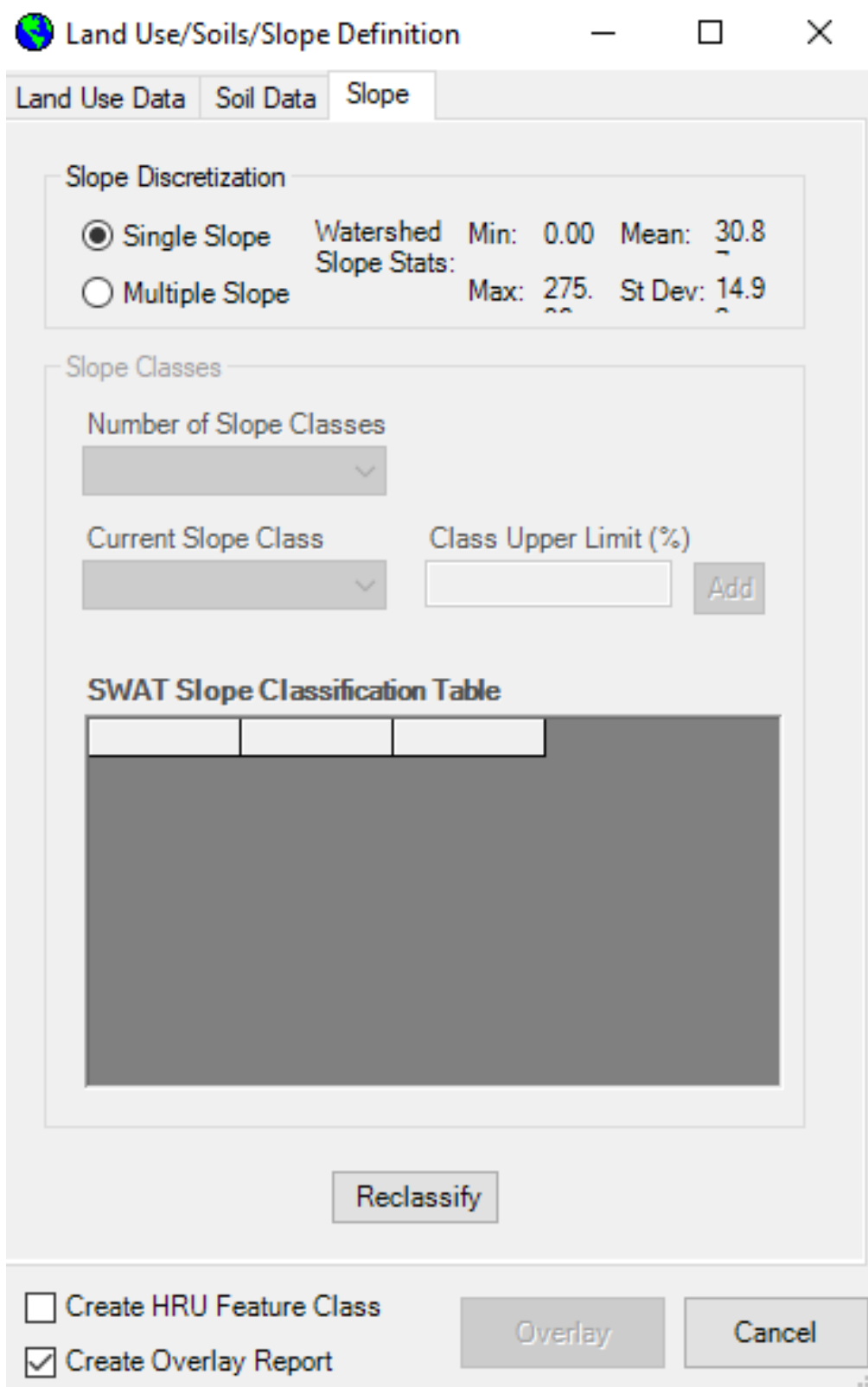
Εικόνα 4.10: Τύποι εδάφους στην περιοχή μελέτης

#### 4.2.3.3. Κλίσεις (Slope)

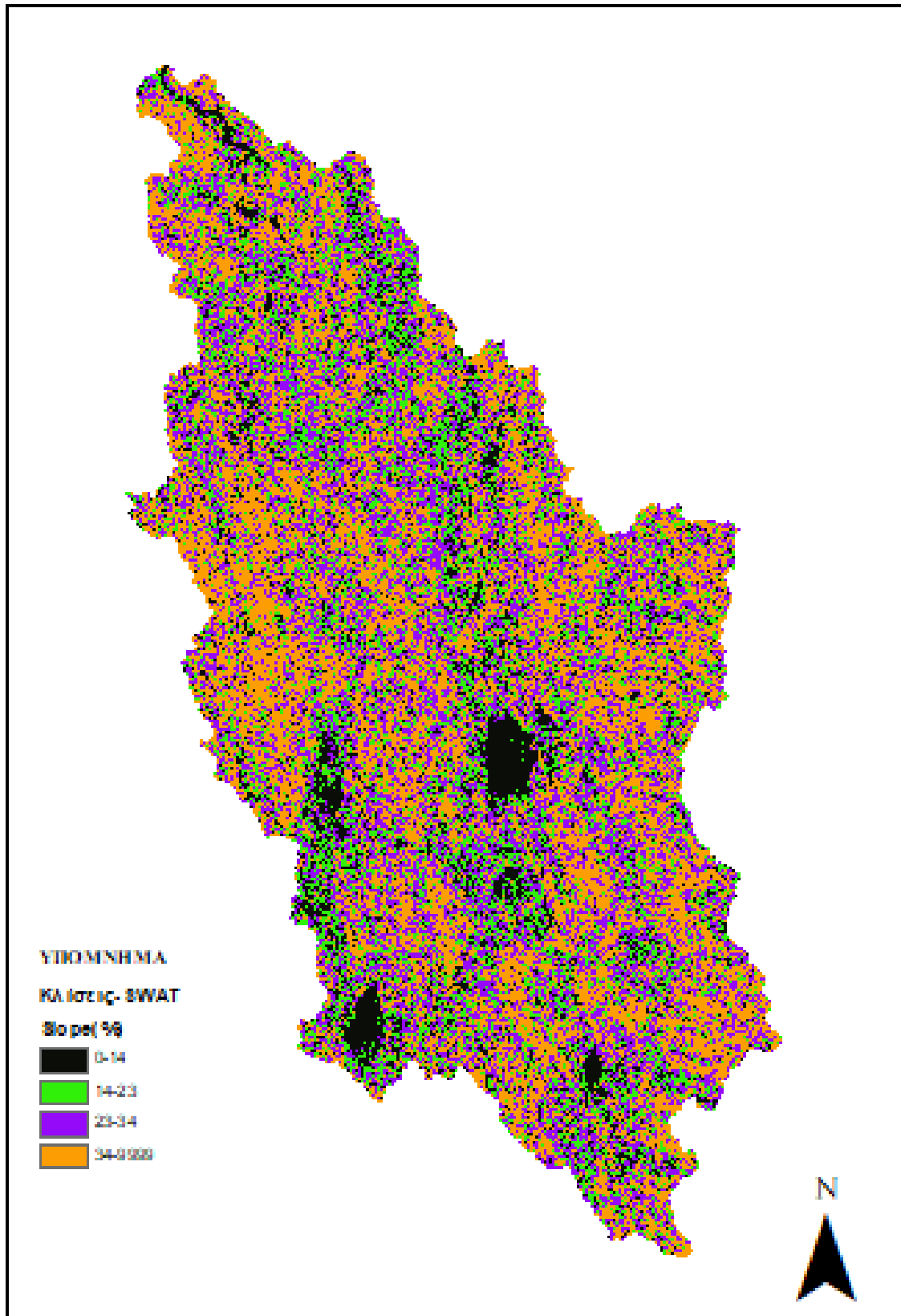
Προκειμένου να προσδιοριστούν οι κλίσεις της περιοχής, έγινε για ακόμα μια φορά χρήση του προγράμματος ArcGIS. Στο περιβάλλον του ArcMap, λοιπόν, έχοντας δεδομένο το αρχείο DEM της λεκάνη απορροής, χρησιμοποιήθηκε η εντολή «Slope» με την οποία προέκυψε ο κλίση κλίσεων της περιοχής. Το πρόβλημα που υπήρχε ήταν ότι η συγκεκριμένη εντολή δεν δημιουργεί πίνακα με τις τιμές των κλίσεων (Attribute Table). Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε η εντολή «Int» των «Spatial Analyst Tools», η οποία δημιούργησε τον πίνακα τιμών των κλίσεων της περιοχής. Έπειτα, με την βοήθεια του Microsoft Excel έγινε ομαδοποίηση των κλίσεων. Αποφασίστηκε ο διαχωρισμός των κλίσεων σε τέσσερις κατηγορίες (κλάσεις): 0-14%, 14-23%, 23-34% και 34-100%.

Συνεχίζοντας, λοιπόν, το project του ArcSWAT (Εικόνα 4.12), επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές κλίσεις (Multiple Slope) με τέσσερις κλάσεις, όπως αναφέρθηκε και πριν, και με την εντολή «Reclassify» δημιουργήθηκε ο κλίση των κλίσεων της περιοχής. Να σημειωθεί εδώ η σημασία του σωστού προσδιορισμού των κλίσεων στην λεκάνη απορροής για τον αρτιότερο προσδιορισμό των διεργασιών βροχόπτωσης και απορροής.

Μέσω της επιλογής «Overlay» ολοκληρώθηκε η δημιουργία των κανάβων των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs) για την περιοχή μελέτης (Εικόνα 4.13).



Εικόνα 4.11: Κλίσεις - Slope data (πηγή: ArcSWAT2012)

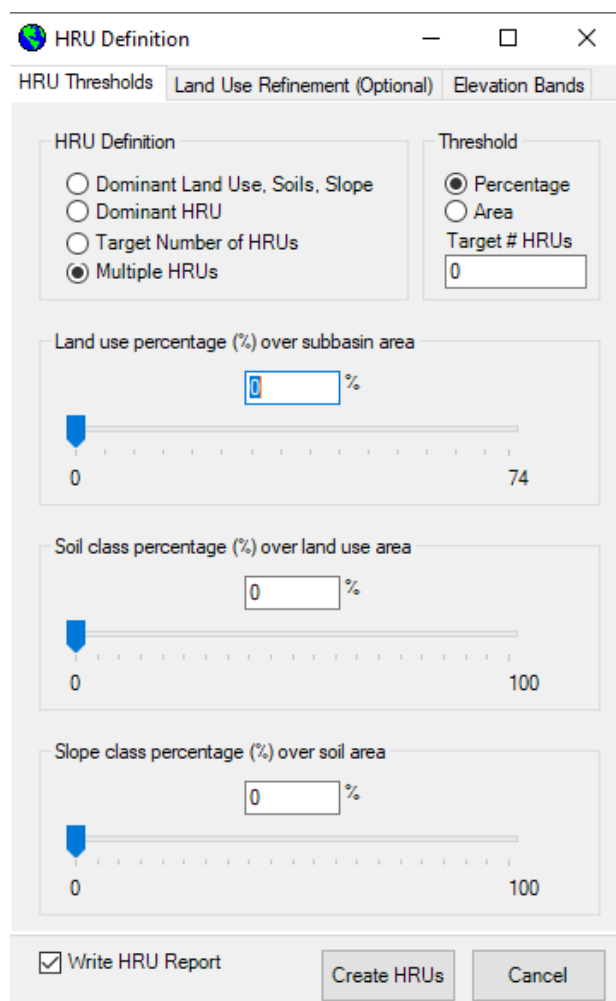


Εικόνα 4.12: Κάναβος κλίσεων στην περιοχή μελέτης



#### 4.2.4. Προσδιορισμός μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs)

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία παραγωγής των κανάβων των υδρολογικών μονάδων απόκρισης, επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των HRUs (HRU Definition), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14. Σε προηγούμενο βήμα, το πρόγραμμα έχει χωρίσει όλες τις υπολεκάνες σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης, βάσει των στοιχείων που έχουν εισαχθεί σε αυτό για τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις. Σε αυτό το σημείο δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει το ελάχιστο ποσοστό της κάθε υπολεκάνης που πρέπει να καταλαμβάνει μια χρήση γης, ένα τύπο εδάφους ή μια κλίση, ώστε να δύναται να δημιουργηθεί ένα ξεχωριστό HRU. Στην περιοχή μελέτης αποφασίστηκε να γίνουν αποδεκτές χρήσεις γης που καταλαμβάνουν τουλάχιστον το 10% μιας υπολεκάνης. Αναφορικά με τους τύπους εδαφών και τις κλίσεις, αποδεκτές τιμές ήταν όσες υπερέβαιναν το 5%. Τελικά στην λεκάνη απορροής δημιουργήθηκαν 899 HRUs.



Εικόνα 4.13: Ορισμός μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs) (πηγή: ArcSWAT2012)

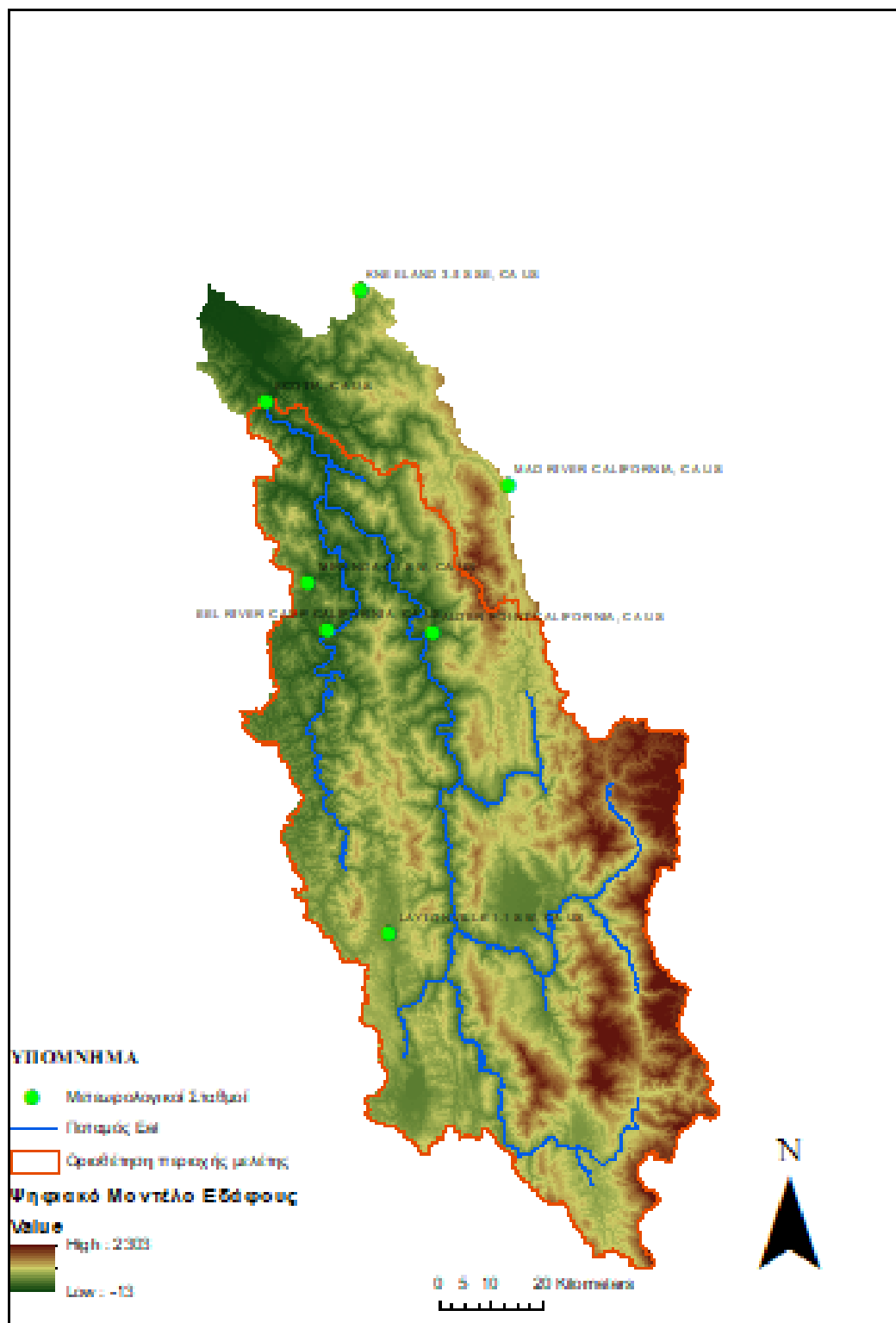
#### 4.2.5. Εισαγωγή δεδομένων καιρού

Τέταρτο και τελευταίο στάδιο στην διαμόρφωση του μοντέλου είναι η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων. Αυτό γίνεται μέσω της τέταρτης ενότητας της βασικής γραμμής εργαλείων του προγράμματος «Write Input Tables» και συγκεκριμένα στην υποενότητα «Weather Stations». Όπως έχει αναφερθεί, τα απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής για να λειτουργήσει το πρόγραμμα είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες, καθώς και τα ύψη βροχής. Χρησιμοποιήθηκαν, λοιπόν, δεδομένα από τρεις σταθμούς μέτρησης θερμοκρασίας (ελάχιστης και μέγιστης) και από τρεις σταθμούς μέτρησης της βροχόπτωσης σε διαφορετικά σημεία της λεκάνης απορροής, εκ των οποίων ο ένας ήταν κοινός για βροχές και θερμοκρασίες. Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών φαίνονται στην Εικόνα 4.15 και τα δεδομένα, όπως προαναφέρθηκε, έγιναν διαθέσιμα από τη National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA). Από αυτούς αντλήθηκαν 10ετείς ημερήσιες χρονοσειρές από την 1/1/2011 έως και την 31/12/2020. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν ξεχωριστά για βροχές και θερμοκρασίες αρχεία txt τα οποία περιείχαν το όνομα του κάθε σταθμού, τις συντεταγμένες και το υψόμετρο (wgen file). Αυτά ήταν και τα αρχεία εισαγωγής στο πρόγραμμα στις ενότητες «Rainfall Data» για τις βροχές και «Temperature Data» για τις θερμοκρασίες (Εικόνα 4.16). Παράλληλα, δημιουργήθηκαν txt αρχεία (Εικόνα 4.17) τα οποία εμπεριείχαν τις χρονοσειρές για κάθε σταθμό θερμοκρασίας ή βροχής, όπως αυτές προέκυψαν από τα δεδομένα της NOAA. Προσοχή σε αυτό το σημείο απαιτείται, αρχικά, στην μορφή αυτών των αρχείων, όπως αναλύεται παρακάτω:

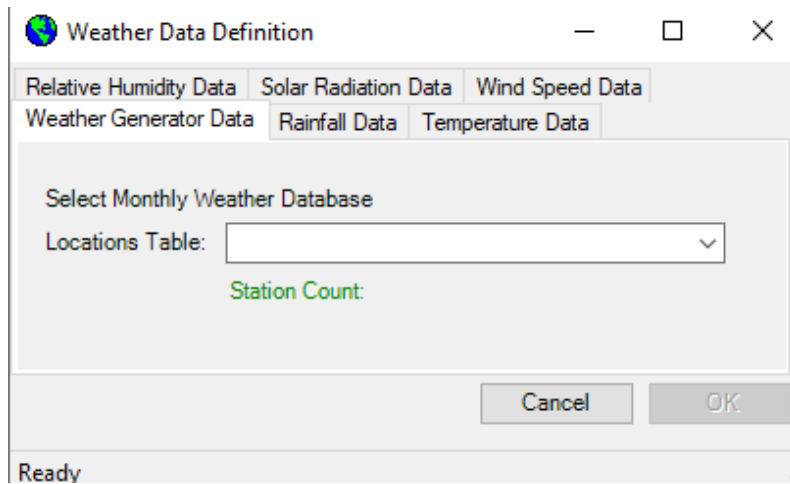
Μορφή wgen file (Εικόνα 4.18):

- ID: Αριθμός καταλόγου σταθμού
- NAME: Όνομα σταθμού, το οποίο θα πρέπει να συμφωνεί με το όνομα που θα δοθεί στο txt αρχείο που περιέχει την κάθε χρονοσειρά
- LAT: Γεωγραφικό πλάτος μετεωρολογικού σταθμού (degrees)
- LONG: Γεωγραφικό μήκος μετεωρολογικού σταθμού (degrees)
- ELEVATION: Υψόμετρο σταθμού (m)

Τα παραπάνω στοιχεία χωρίζονται με κόμμα (,)



Εικόνα 4.14: Μετεωρολογικοί σταθμοί στην λεκάνη απορροής του ποταμού Εελ και στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 4.15: Δεδομένα καιρού - Weather data definition (πηγή: ArcSWAT2012)

alderpoint.txt - Σημειωματάριο

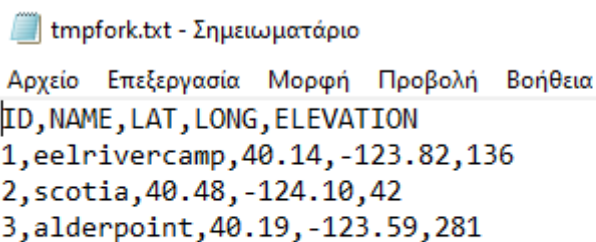
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια

```

20110101
10,3.9
12.8,2.2
8.9,1.1
6.1,0.6
10,1.7
7.8,0
9.4,1.7
9.4,1.1
8.3,-1.7
7.2,-3.3
11.7,1.7
14.4,6.7
12.8,9.4
15,8.3
14.4,7.2
14.4,9.4
15.6,8.9
13.9,5.6
12.8,6.1
14.4,4.4
16.7,2.2
14.4,6.1
16.7,2.2
16.1,3.3
12.2,2.8
17.8,2.2
17.2,2.8
15,2.2
15.6,5.6

```

Εικόνα 4.16: Μορφή txt αρχείου που εμπεριέχει τα δεδομένα θερμοκρασίας



```
tmpfork.txt - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
ID,NAME,LAT, LONG, ELEVATION
1,eelrivercamp,40.14, -123.82,136
2,scotia,40.48, -124.10,42
3,alderpoint,40.19, -123.59,281
```

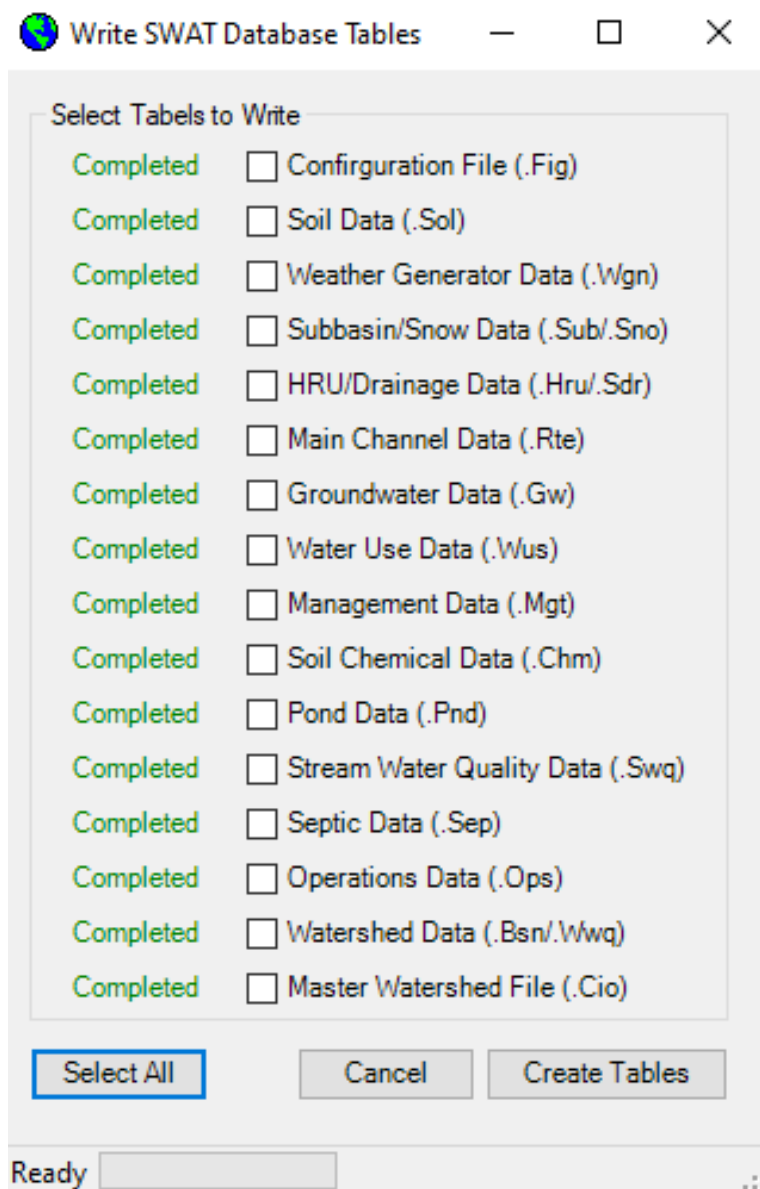
Εικόνα 4.17: Wgen file αναφορικά με τους σταθμούς μέτρησης βροχής ή θερμοκρασίας

Επιπλέον, προσοχή θα πρέπει να δοθεί και στην μορφή των txt αρχείων που περιέχουν την χρονοσειρά. Πέρα από την συμφωνία που θα πρέπει να υπάρχει αναφορικά με το όνομα του wgen file και το όνομα με το οποίο θα αποθηκευτεί το txt αρχείο της χρονοσειράς, τα δύο αρχεία θα πρέπει να έχουν αποθηκευτεί και στον ίδιο φάκελο του υπολογιστή, ώστε να μπορεί το μοντέλο να ανιχνεύει την χρονοσειρά. Συμπληρωματικά, τα αρχεία που περιέχουν τις χρονοσειρές θα πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένη μορφή. Η πρώτη σειρά αναφέρεται στην ημερομηνία της πρώτης μέτρησης με την εξής μορφή YYYYMMDD, δηλαδή στην παρούσα διπλωματική εργασία 20110101. Έπειτα, το txt αρχείο συνεχίζει με την χρονοσειρά, έχοντας μια τιμή σε κάθε σειρά για τις βροχές και δύο τιμές (μέγιστη και ελάχιστη) για τις θερμοκρασίες, οι οποίες χωρίζονται με κόμμα (,).

Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία και επιλεγθεί ως «Weather Generator Data» το «WGEN\_user», τα μετεωρολογικά δεδομένα έχουν πλέον εισαχθεί στο project. Αναφορικά με τις τιμές σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τιμές από το μοντέλο, λόγω έλλειψης δεδομένων.

Τελευταίο βήμα στην διαδικασία του «Write Input Tables» είναι η συγγραφή πινάκων με δεδομένα εισαγωγής «Write SWAT Database Tables» (Εικόνα 4.19). Ο χρήστης, με αυτόν τον τρόπο, δημιουργεί πίνακες που περιέχουν απαραίτητα δεδομένα για να λειτουργήσει το μοντέλο. Σε περίπτωση που κάποια παράμετρος του μοντέλου δεν είναι ικανοποιητική, ο χρήστης δύναται να την μεταβάλει χωρίς να ξεκινήσει την

διαδικασία από την αρχή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της πέμπτης ενότητας της βασικής γραμμής εργαλείων του μοντέλου, «Edit SWAT Input».

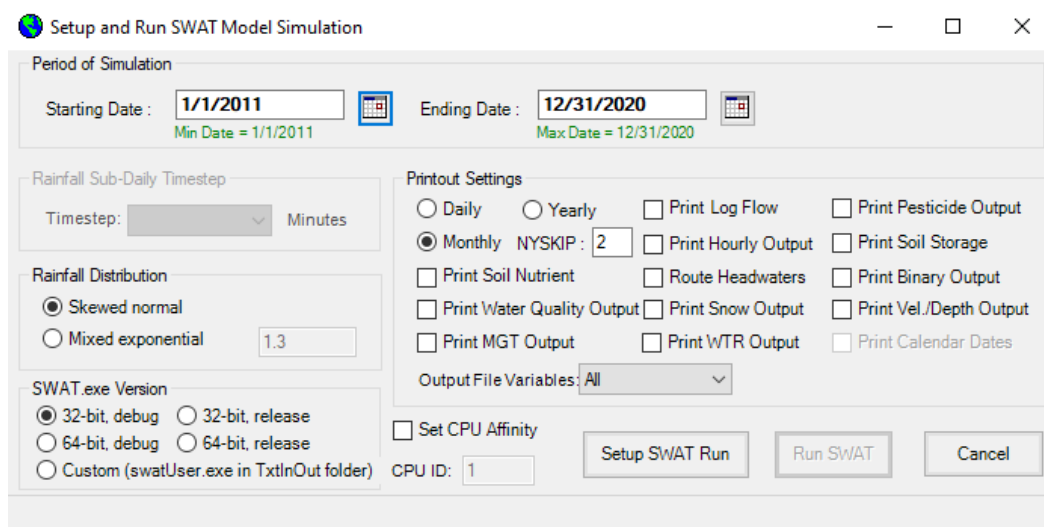


Εικόνα 4.18: Write SWAT Database Tables – Εισαγωγή αποτελεσμάτων στην βάση δεδομένων (πηγή: ArcSWAT2012)

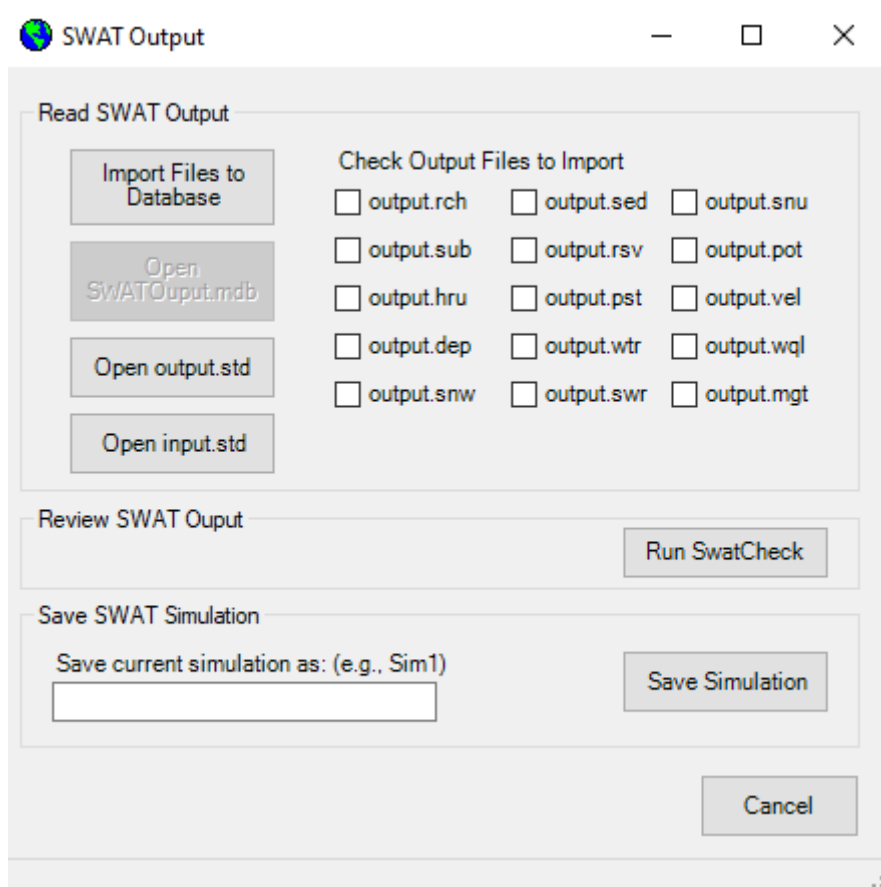
#### 4.3. Εκτέλεση του μοντέλου

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, ο χρήστης είναι έτοιμος να προχωρήσει στην προσομοίωση και το τρέξιμο του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται από την έκτη και τελευταία ενότητα της βασικής γραμμής εργαλείων «SWAT Simulation», και

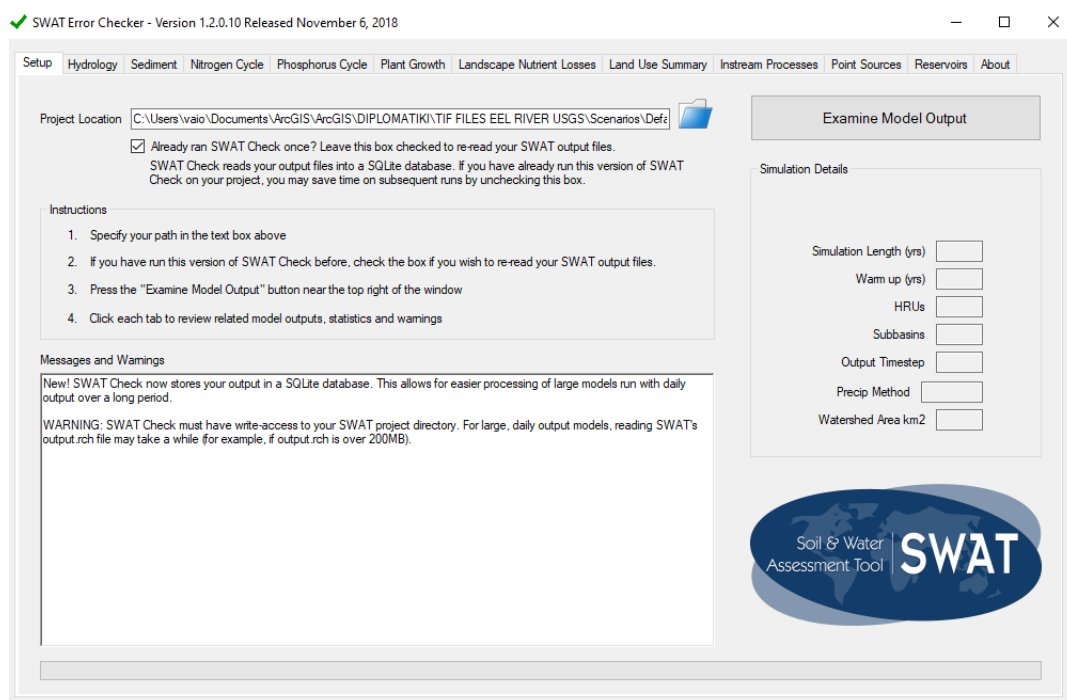
συγκεκριμένα από την υποενότητα «Run SWAT» (Εικόνα 4.20). Στο παράθυρο του «Run SWAT», πρέπει αρχικά να επιλεγθεί η περίοδος της προσομοίωσης «Period of Simulation». Σε αυτό το σημείο, να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις που έγιναν πριν την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου, τελέστηκαν από την 1-1-2011 έως και τις 31-12-2017, ενώ μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου, καταληκτική ημερομηνία της προσομοίωσης ήταν η 31-12-2020. Έπειτα, ο χρήστης καλείται να επιλέξει την κατανομή που θα ακολουθούν οι βροχοπτώσεις «Rainfall Distribution». Αυτή μπορεί να είναι είτε η «Skewed Normal» είτε η «Mixed exponential», στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η «Skewed Normal». Επιπλέον, επιλέχθηκε μηνιαίο βήμα προσομοίωσης και η πρώτη 2ετία ήταν περίοδος «Warm Up» προετοιμασίας του προγράμματος, για την οποία δεν χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα. Η περίοδος του «Warm Up» είναι απαραίτητη για την βέλτιστη λειτουργία του μοντέλου, εφόσον γίνονται αρχικοί υπολογισμοί για τον υδρολογικό κύκλο ή και για την αποκατάσταση των μόνιμων συνθηκών. Τα χρόνια του «Warm Up» τοποθετούνται στο σημείο «NYSKIP». Τέλος, πατώντας την επιλογή «Setup SWAT Run» και «Run SWAT» ξεκινάει η προσομοίωση. Με τη ολοκλήρωση της προσομοίωσης, ο χρήστης δύναται να διαβάσει τα αρχεία εξόδου μέσα από την υποενότητα «Read SWAT Output» (Εικόνα 4.21). Στην ίδια υποενότητα υπάρχει η δυνατότητα να εξεταστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου μέσα από την επιλογή «Run SwatCheck» (Εικόνα 4.22), καθώς και να αποθηκευτεί η τελευταία προσομοίωση «Save Simulation».



Εικόνα 4.19: Setup and run SWAT simulation (πηγή: ArcSWAT2012)



Εικόνα 4.20: Read SWAT output (πηγή: ArcSWAT2012)



Εικόνα 4.21: SWAT error checker (πηγή: ArcSWAT2012)



#### 4.4. Αρχεία Εξόδου του SWAT

Το SWAT δίνει μια πληθώρα αποτελεσμάτων και αρχείων στον χρήστη σχετικά με τις παραμέτρους του υδρολογικού κύκλου του νερού στην λεκάνη απορροής που μελετάται. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αρχεία που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- **Αρχείο output.std**: Στο αρχείο αυτό παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης αναφορικά με το υδατικό ισοζύγιο, τα θρεπτικά (N, P) και τα φερτά. Έτσι, γίνεται ο αρχικός έλεγχος αναφορικά με την ορθότητα των αποτελεσμάτων.
- **Αρχείο output.rch**: Το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει στοιχεία αναφορικά με το υδατόρεμα στην περιοχή μελέτης, τόσο στην έξοδο της λεκάνης, όσο και στην είσοδο. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι ποιοτικά ή ποσοτικά. Σημαντικότερο στοιχείο για την παρούσα εργασία ήταν οι παροχές εισόδου και εξόδου που περιέχονται στο αρχείο. Μάλιστα, οι παροχές εξόδου των υπολεκανών ήταν το βασικό κριτήριο που οδήγησε στην μετέπειτα βαθμονόμηση του μοντέλου.
- **Αρχείο output.sub**: Το αρχείο αυτό συγκεντρώνει στοιχεία αναφορικά με την συνεισφορά των υπολεκανών στις παραμέτρους του υδρολογικού κύκλου. Μερικά σημαντικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο αρχείο είναι η επιφανειακή απορροή, τα υπόγεια νερά και η εξατμισοδιαπνοή.
- **Αρχείο output.hru**: Πρόκειται για ένα αρχείο παρόμοιο με το output.sub. Η διαφορά σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η μελέτη γίνεται σε επίπεδο υδρολογικής μονάδας απόκρισης και όχι υπολεκάνης. Ειδικότερα διαφαίνεται το κατά πόσο οι διάφορες χρήσεις γης και, αντίστοιχα, οι τύποι εδαφών επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Τα παραπάνω αρχεία, όπως και άλλα αρχεία που διαθέτει το SWAT, είναι εύκολο να τα εντάξει ο χρήστης στην βάση δεδομένων «SWATOutput.mdb», μέσα από την υποενότητα του «Read SWAT Output». Κλικάροντας τα αρχεία της επιλογής του και πατώντας «Import Files to Database», τα αρχεία γίνονται διαθέσιμα στην βάση δεδομένων. Προσοχή χρειάζεται στο ότι η βάση δεδομένων θα πρέπει να είναι

κλειστή κατά την διάρκεια της εισαγωγής. Αυτό εξυπηρετεί τον μελετητή, εφόσον βρίσκει τα αρχεία απευθείας σε πινακοποιημένη μορφή και είναι εύκολη η μεταφορά τους σε υπολογιστικό φύλλο του Microsoft Excel.

#### 4.5.Βαθμονόμηση του μοντέλου (Calibration)

Το κρισιμότερο στάδιο της εργασίας αφού είχε γίνει η πρώτη προσομοίωση ήταν η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Ως βαθμονόμηση εννοούμε την διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου με βάση μετρήσεις των υδρολογικών μεγεθών εισόδου και εξόδου (Τσακίρης 2006). Στην παρούσα διπλωματική, η βαθμονόμηση έγινε για το μέγεθος των απορροών σε τρεις υπολεκάνες όπου και υπήρχαν μετρημένες τιμές απορροής από τρεις σταθμούς της USGS. Η περίοδος βαθμονόμησης του μοντέλου ήταν από 01-01-2013 έως και 31-12-2017. Προκειμένου να ελεγχθεί η βαθμονόμηση, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες:

- **Συντελεστής Nash-Sutcliffe (NSE):**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0)^2} \quad (4.1)$$

όπου:

$Q_0^t$ : Μετρημένη απορροή στη χρονική στιγμή  $t$  ( $m^3/s$ )

$Q_m^t$ : Υπολογισμένη απορροή στη χρονική στιγμή  $t$  ( $m^3/s$ )

$Q_0$ : Μέση μετρημένη απορροή ( $m^3/s$ )

$T$ : Διάρκεια χρονοσειράς (μήνες)

Όταν οι τιμές του NSE προσεγγίζουν την τιμή 1, τότε το μοντέλο παρουσιάζει άριστη προσαρμογή στις τιμές των παρατηρήσεων. Πολύ καλές τιμές του NSE θεωρούνται οι τιμές που βρίσκονται ανάμεσα στα όρια 0.75 και 1. Ως ικανοποιητικές τιμές του NSE νοούνται οι τιμές ανάμεσα στα όρια 0.36 και 0.75.

- **Κλίση της ευθείας Υπολογισμένης (M) και Μετρημένης (O) απορροής-Γραμμή Παλινδρόμησης και συντελεστής συσχέτισης R<sup>2</sup>**

Εφαρμόζεται γραμμική ευθεία παλινδρόμησης μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών σύμφωνα με την εξίσωση:

$$O = \gamma \cdot M \quad (4.2)$$

όπου:

*O*: Μετρημένη απορροή (m<sup>3</sup>/s)

*M*: Υπολογισμένη απορροή (m<sup>3</sup>/s)

$\gamma$ : Κλίση της ευθείας παλινδρόμησης

Η κλίση της ευθείας συγκρίνεται με την κλίση της ευθείας  $O = M$ . Τιμές της κλίσης  $\gamma$  μεγαλύτερες του 1.0 οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις απορροές, ενώ κλίσεις μικρότερες του 1.0 υποδεικνύουν υπερεκτίμηση των απορροών από το μοντέλο. Το ζητούμενο, προφανώς, είναι οι κλίσεις  $\gamma$  να τείνουν στο 1. Παράλληλα με τον έλεγχο της κλίσης της ευθείας, γίνεται και έλεγχος της διασποράς των σημείων γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης με υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης R<sup>2</sup>. Όσο το R<sup>2</sup> τείνει πιο κοντά στο 1.0, τόσο μικρότερη είναι η διασπορά και καλύτερη η συσχέτιση των προγνώσεων του μοντέλου με τις παρατηρήσεις.

- **Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE) – Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Στόχου (NOF):**

Το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα και η Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Στόχου υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (4.3)$$

$$NOF = \frac{RMSE}{O_{mean}} \quad (4.4)$$

όπου:

$O_i$ : Μετρημένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$M_i$ : Υπολογισμένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$N$ : Αριθμός παρατηρήσεων

$O_{mean}$ : Μέση τιμή μετρημένων απορροών ( $m^3/s$ )

Σύμφωνα με τους Kornecki et al. (1999), η ιδανική τιμή για την συνάρτηση  $NOF$  είναι το 0. Ωστόσο, για την βαθμονόμηση ενός μοντέλου, αποδεκτές θεωρούνται οι τιμές μεταξύ του 0 και 1.

- **Ποσοστό BIAS**

Το PBIAS υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (4.5)$$

όπου:

$O_i$ : Μετρημένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$M_i$ : Υπολογισμένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$N$ : Αριθμός παρατηρήσεων

Το ποσοστό PBIAS υπολογίζει την «μέση τάση» των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο να είναι μεγαλύτερα ή μικρότερα από τις τιμές των παρατηρήσεων. Η ιδανική τιμή και σε αυτή την περίπτωση είναι το 0. Οι θετικές τιμές υποδεικνύουν στον χρήστη ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου υποεκτιμούν τις πραγματικές μετρήσεις, ενώ οι αρνητικές τα υπερεκτιμούν.

Βάσει των Moriasi et al. (2007), η προσομοίωση ενός μοντέλου με μηνιαίο χρονικό βήμα θεωρείται «πολύ καλή» για PBIAS μεταξύ των ορίων  $\pm 10\%$  για τις απορροές,

«καλή» ανάμεσα στο  $\pm 10\%$  και  $\pm 15\%$  και «ικανοποιητική» ανάμεσα στο  $\pm 15\%$  και  $\pm 25\%$ .

Προκειμένου, λοιπόν, να επαληθευθούν τα όρια των παραπάνω βοηθητικών μεγεθών, έγινε σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου. Το μοντέλο από την πρώτη κι όλας προσομοίωση φάνηκε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις μετρημένες τιμές παροχών στις 3 εξόδους των υπολεκανών. Ως εκ τούτου, η βαθμονόμηση του μοντέλου απαίτησε μικρές αλλαγές στις παραμέτρους, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν στην πορεία της βαθμονόμησης είναι οι εξής:

- **CN2**: Πρόκειται για τον αριθμό καμπύλης απορροής (Curve Number) που αφορά στην υδρολογική κατάσταση 2, δηλ. την κανονική κατάσταση πρότερης υγρασίας εδάφους. Οι τιμές του εξαρτώνται από την χρήση γης της περιοχής μελέτης, την υδρολογική κατηγορία του εδάφους (A, B, C, D), την κλίση κλπ. Μεγαλύτερες τιμές του CN2 συνεπάγονται και μικρότερη διήθηση νερού στο έδαφος, οπότε και μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή. Όπως αναφέρθηκε, μικρότερη διήθηση παρουσιάζουν τα εδάφη κατηγορίας D και επομένως έχουν μεγαλύτερο CN2. Το εύρος τιμών της παραμέτρου CN2 είναι γενικά μεταξύ 15-95.
- **GW DELAY**: Πρόκειται για τον χρόνο υστέρησης του υπογείου νερού, ο οποίος μετράται σε ημέρες. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη παράμετρος υποδηλώνει τον χρόνο που καλύπτει το νερό από τον πυθμένα του ριζοστρώματος μέχρι να φτάσει στον ελεύθερο υδροφόρο. Το εύρος των τιμών είναι μεταξύ 0 και 500 ημέρες.
- **GW QMIN**: Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτελεί το όριο του νερού στον ελεύθερο υδροφόρο που απαιτείται ώστε να δύναται να εμφανιστεί επιστρέφουσα ροή. Η ροή του υπογείου νερού στο υδατόρεμα επιτρέπεται μόνο αν το βάθος του νερού σε mm είναι ίσο ή μεγαλύτερο από την τιμή του GW\_QMIN. Μονάδα μέτρησης της παραμέτρου είναι τα mm.
- **REVAPMN**: Η παράμετρος αυτή αφορά στο ελάχιστο ύψος νερού στον επιφανειακό υδροφόρο προκειμένου να υπάρξει κίνηση του νερού από αυτόν προς το ριζόστρωμα. Η μονάδα μέτρησης είναι και πάλι τα mm.

- **SOL\_AWC**: Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία είναι μία από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους του υδατικού ισοζυγίου. Αναφέρεται στον όγκο νερού που διατίθεται στα φυτά, όταν το έδαφος βρεθεί σε κατάσταση κορεσμού.

Για να γίνει η ορθότερη επεξεργασία των παραμέτρων, οι 27 υπολεκάνες της περιοχής χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες υπολεκανών. Η έξοδος της κάθε ομαδοποιημένης υπολεκάνης ήταν ο εκάστοτε σταθμός, στον οποίο υπήρχαν μετρημένες απορροές. Η κάθε ομάδα υπολεκανών, περιείχε όλες τις ανάντη υπολεκάνες από τον σταθμό, πλην της 3<sup>ης</sup> υποομάδας, η οποία περιείχε μόνο τις ανάντη υπολεκάνες που δεν ανήκαν στις δύο προηγούμενες ομάδες. Η ομαδοποίηση, λοιπόν, έγινε ως εξής:

- **Ομάδα 1**: Έξοδος της υπολεκάνης ήταν ο σταθμός Miranda. Ανάντη του σταθμού υπήρχαν τρεις υπολεκάνες και συγκεκριμένα οι υπολεκάνες 8, 9, 14 (Εικόνα 4.7).
- **Ομάδα 2**: Έξοδος της υπολεκάνης ήταν ο σταθμός A Fort Seward. Ανάντη του σταθμού υπήρχαν 17 υπολεκάνες και συγκεκριμένα οι υπολεκάνες 10-13 και 15-27 (Εικόνα 4.7).
- **Ομάδα 3**: Έξοδος της υπολεκάνης ήταν ο σταθμός Scotia. Ανάντη του σταθμού υπήρχαν επτά υπολεκάνες και συγκεκριμένα οι υπολεκάνες 1-7 (Εικόνα 4.7).

Παρακάτω παρουσιάζεται η επιλογή των παραμέτρων για κάθε περίπτωση.

- **Ομάδα 1**: Ανάντη του σταθμού Miranda, οι μοντελοποιημένες απορροές φάνηκαν να ανταποκρίνονται καλά στις μετρημένες τιμές. Ως εκ τούτου, έγιναν μικρές αλλαγές στις παραμέτρους, ώστε να επαληθεύονται οι στατιστικοί έλεγχοι (Εξ. 4.1-4.5). Οι τελικές τιμές οι οποίες αποφασίστηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2.
- **Ομάδα 2**: Σε αυτή την περίπτωση, ανάντη του σταθμού A Fort Seward βρισκόταν η μεγαλύτερη από τις ομαδοποιημένες υπολεκάνες της μελέτης. Συνεπώς, η βαθμονόμηση εδώ ήταν πιο απαιτητική. Τα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης παρουσίαζαν αυξημένες απορροές σε σύγκριση με τις παρατηρήσεις του σταθμού. Τελικά, έπειτα από πολλαπλές αυξομειώσεις των παραμέτρων και κυρίως του αριθμού CN επιτεύχθηκε το βέλτιστο αποτέλεσμα, το οποίο πληρούσε τους στατιστικούς ελέγχους (Εξ. 4.1-4.5). Οι τελικές τιμές των παραμέτρων φαίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2.

- **Ομάδα 3:** Αφού, λοιπόν, ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση στις δύο ανάντη ομάδες λεκανών, η διαδικασία συνεχίστηκε με την βαθμονόμηση του μοντέλου και στην έξοδο της συνολικής λεκάνης απορροής. Προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα έγινε επεξεργασία των παραμέτρων μόνο για τις υπολεκάνες 1-7, δηλαδή για όσες ανήκαν στην 3<sup>η</sup> ομάδα, ώστε να μην επηρεαστεί η βαθμονόμηση που είχε γίνει στα ανάντη σημεία των υπολοίπων σταθμών. Όπως παρατηρήθηκε και σε αυτό το σημείο το μοντέλο φάνηκε να ανταποκρίνεται εξ αρχής καλά στις δεδομένες παρατηρήσεις. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2. Αυτές επαλήθευαν του στατιστικούς ελέγχους (Εξ. 4.1-4.5).

#### **4.6. Επαλήθευση του μοντέλου (Validation)**

Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου, επόμενο βήμα είναι η επαλήθευση του (validation). Η αναγκαιότητα αυτού του βήματος έγκειται στο να γίνει ο έλεγχος της ορθότητας των αλλαγών που έχουν γίνει στην περίοδο της βαθμονόμησης. Υπενθυμίζεται ότι από την δεκαετή χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων (βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες), η οποία αποτέλεσε και την περίοδο μελέτης, τα δυο πρώτα χρόνια αμελήθηκαν προκειμένου να «προετοιμαστεί το μοντέλο», ενώ τα πέντε επόμενα χρόνια χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της βαθμονόμησης του. Η τελευταία τριετία, δηλαδή η περίοδος 01-01-2018 έως και 31-12-2020 αποτέλεσε την περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου.

Για το σκοπό, λοιπόν, της επαλήθευσης, η διαδικασία δεν διαφέρει πολύ από αυτήν της βαθμονόμησης. Χρησιμοποιούνται όμως στην εκτέλεση του μοντέλου οι παράμετροι (π.χ. CN2) που έχουν προκύψει από την βαθμονόμηση. Και σε αυτή την περίπτωση ο χρήστης καλείται να συγκρίνει τα αποτελέσματα των απορροών που προκύπτουν από το μοντέλο με μετρημένες τιμές απορροής σε χαρακτηριστικά σημεία (σταθμούς). Οι δεδομένες απορροές προκύπτουν για άλλη μια φορά από την USGS, ενώ ο έλεγχος γίνεται με την βοήθεια των Εξ. 4.1 έως 4.5.

Πίνακας 4.1: Τιμές Curve Number (CN2) μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του μοντέλου

Χρήση Γης	Υδρολογική Κατηγορία Εδάφους	Τιμή CN2-Ομάδα 1	Τιμή CN2-Ομάδα 2	Τιμή CN2-Ομάδα 3
FRSE	A	-	-	23
	B	55	36	50
	C	70	46	63
	D	77	50	69
FRST	A	-	-	-
	B	-	39	-
	C	-	-	-
	D	-	51	-
RNGB	A	-	-	35
	B	61	40	55
	C	74	48	67
	D	80	52	72
RNGE	A	-	-	44
	B	69	45	62
	C	79	51	71
	D	84	55	76
HAY (αποκλειστικά στην υπολεκάνη 17)	A	-	-	-
	B	-	-	-
	C	-	47	-
	D	-	-	-

Πίνακας 4.2: Τιμές λοιπών παραμέτρων έπειτα από την βαθμονόμηση του μοντέλου

Παράμετρος	Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3
GW DELAY (d)	200	200	200
GW_QMIN (m)	2	2	2
REVAPMN (m)	1	1	1
SOL_AWC	0.175	0.175	0.175



#### **4.7. Εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν με το βαθμονομημένο μοντέλο**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αφού είχε ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου, εξετάστηκαν σενάρια αλλαγής χρήσεων γης. Για την ανάλυση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφόρων σεναρίων αλλαγής χρήσεων γης στις προβλέψεις απορροών από το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε η στατιστική δοκιμή Student t-test, η οποία εφαρμόστηκε στο λογιστικό φύλλο Microsoft Excel. Η σύγκριση σε αυτήν την περίπτωση έγινε ανάμεσα στην χρονοσειρά απορροών της παρούσας κατάστασης και αυτής του εκάστοτε σεναρίου.

Η πρώτη κατηγορία σεναρίων που εξετάστηκε αφορούσε το ενδεχόμενο πυρκαγιάς σε κάποιο μέρος της λεκάνης απορροής. Αρχικά, έγινε αναζήτηση σχετικά με την προϊστορία πυρκαγιών στην περιοχή, ώστε να γίνει πιο ρεαλιστική προσέγγιση επί του θέματος, δηλαδή για την μοντελοποίηση μιας συγκεκριμένης περιοχής. Στοιχεία αναζητήθηκαν από την υπηρεσία California Department of Forestry and Fire Protection (<https://www.fire.ca.gov/>). Παρ' όλα αυτά, δεν βρέθηκε κάποια κρίσιμη παλαιότερη πυρκαγιά, οπότε και επιλέχθηκαν τα θεωρητικά σενάρια που περιγράφονται παρακάτω. Σκοπός ήταν η μελέτη μέσω του βαθμονομημένου-επικυρωμένου στην περιοχή μοντέλου της επίπτωσης της υποτιθέμενης δασικής πυρκαγιάς στα υδρογραφήματα στα τρία προαναφερθέντα σημεία εξόδου της λεκάνης.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η πυρκαγιά έχει επιπτώσεις στον υδρολογικό κύκλο του νερού, εφόσον καταστρέφει την βλάστηση, μετατρέποντας την ευρύτερη περιοχή σε γυμνό έδαφος ανεξάρτητα της πρωτύτερης χρήσης της. Ως εκ τούτου, παρατηρείται μείωση των υπόγειων διαφυγών του νερού και αύξηση της επιφανειακής απορροής. Η κύρια αλλαγή που επιφέρει, λοιπόν, μια πυρκαγιά στο έδαφος είναι η αλλαγή του αριθμού CN2 (curve number), ο οποίος όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω είναι καθοριστικός παράγοντας της μεθόδου SCS (Εξ. 3.3) που χρησιμοποιεί το μοντέλο SWAT για τον υπολογισμό των απωλειών και της επιφανειακής απορροής.

Προς αυτό τον σκοπό, λοιπόν, εξετάζονται σενάρια πυρκαγιάς διαφορετικών εκτάσεων και θέσεων. Κοινός γνώμονας των παρακάτω σεναρίων είναι η αλλαγή του αριθμού CN2 όπως περιγράφεται παρακάτω στις υπολεκάνες που υποτίθεται ότι έχουν καεί:

- Για εδάφη τύπου A, το CN2 λαμβάνει την τιμή 77 με την χρήση γης να είναι γυμνό έδαφος.
- Για εδάφη τύπου B, το CN2 λαμβάνει την τιμή 86 με την χρήση γης να είναι γυμνό έδαφος.
- Για εδάφη τύπου C, το CN2 λαμβάνει την τιμή 91 με την χρήση γης να είναι γυμνό έδαφος.
- Για εδάφη τύπου D, το CN2 λαμβάνει την τιμή 94 με την χρήση γης να είναι γυμνό έδαφος.

Οι υπόλοιπες υπολεκάνες, που δεν έχουν καεί, δεν υπόκεινται σε κάποια αλλαγή στις παραμέτρους τους.

#### Σενάριο 1α: Πυρκαγιά ανάντη του σταθμού Miranda

Κατά το πρώτο σενάριο, επιλέχθηκε να γίνει προσομοίωση φωτιάς στις υπολεκάνες 8, 9 και 14 (Εικόνα 4.7), οι οποίες αποτελούν το 17.2% της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης. Δηλαδή, στην ομαδοποιημένη υπολεκάνη ανάντη του σταθμού μέτρησης παροχής Miranda. Σε αυτή την περιοχή, η κύρια χρήση γης είναι δασικές εκτάσεις, ενώ σημαντική είναι και η παρουσία βοσκοτόπων. Όπως είναι λογικό σε αυτή την περίπτωση αναμένονταν αλλαγές στις υπολογισμένες επιφανειακές απορροές των σταθμών Miranda και Scotia και όχι στις υπολογισμένες απορροές του σταθμού A Fort Seward, διότι η ανάντη λεκάνη του δεν επηρεάζεται από την φωτιά.

#### Σενάριο 1β: Πυρκαγιά στις υπολεκάνες 26 και 27 ανάντη του σταθμού A Fort Seward:

Σε αυτή την περίπτωση έγινε προσομοίωση πυρκαγιάς στις πιο απομακρυσμένες υπολεκάνες από την έξοδο, δηλαδή στις 26 και 27, οι οποίες καταλαμβάνουν το 9.2% της έκτασης της συνολικής περιοχής μελέτης. Κι αυτές οι υπολεκάνες αποτελούνται κατά κύριο λόγο από δασικές εκτάσεις, αλλά αυτή την φορά είναι πιο έντονη η παρουσία βοσκοτόπων στην περιοχή. Στα σύνορα μάλιστα των δύο υπολεκανών παρατηρείται μια μικρή λίμνη. Η επίπτωση της παραπάνω πυρκαγιάς θα έπρεπε να φαίνεται κατά κύριο λόγο στον έλεγχο που θα γινόταν στον σταθμό A Fort Seward και έπειτα στον σταθμό Scotia.

#### Σενάριο 1γ: Πυρκαγιά στην υπολεκάνη 15 ανάντη του σταθμού A Fort Seward:

Η επιλογή μια δεύτερης προσομοίωσης φωτιάς ανάντη του ίδιου σταθμού ελέγχου αποσκοπούσε σε μια δεύτερη δοκιμή πιο κοντά στην έξοδο της ομαδοποιημένης υπολεκάνης. Η έκταση της πυρκαγιάς σε αυτή την περίπτωση ανερχόταν στο 6.6% της περιοχής μελέτης. Ως κύρια χρήση γης παραμένει το δάσος, ενώ σημαντική είναι και η ύπαρξη βοσκοτόπων. Τα αποτελέσματα της πυρκαγιάς αναμένεται να φανούν στους σταθμούς A Fort Seward και Scotia.

#### Σενάριο 1δ: Μεγάλη Πυρκαγιά ανάντη των σταθμών A Fort Seward και Miranda:

Στόχος, εν προκειμένω, ήταν η εμφάνιση των επιπτώσεων στον κύκλο του νερού από μια πυρκαγιάς μεγάλης έκτασης. Στην παρούσα πυρκαγιά «κάηκε» το 79.2% της περιοχής μελέτης, καταστρέφοντας την πληθώρα των δασικών εκτάσεων και των χώρων βόσκησης, τα οποία αποτελούν και τις κύριες χρήσεις γης. Τα αποτελέσματα της πυρκαγιάς αναμένεται να είναι ορατά σε όλα τα σημεία ελέγχου της επιφανειακής απορροής.

Η δεύτερη κατηγορία σεναρίων που εκτελέστηκαν στην λεκάνη απορροής αφορούσαν την υλοτομία. Η συγκεκριμένη δραστηριότητα επιλέχθηκε εφόσον είναι συνήθης στην περιοχή και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο απολογισμός της επίδρασης της στον υδρολογικό κύκλο και κατ' επέκταση στο οικοσύστημα. Ως χρήση γης μετά την κοπή του δάσους επιλέχθηκε σε κάθε περίπτωση ο βοσκοτόπος με θάμνους. Έτσι, οι αριθμοί CN2 που αντιστοιχούσαν σε δασική έκταση αντικαταστάθηκαν από τις αντίστοιχες τιμές των βοσκοτόπων για κάθε υδρολογική κατηγορία εδάφους, με την διαφορά ότι αυτή την φορά σε κάθε ομαδοποιημένη υπολεκάνη χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές του CN2.

#### Σενάριο 2α: Υλοτομία ανάντη του σταθμού Miranda

Όπως και στην περίπτωση της πυρκαγιάς, έτσι και εδώ, εξετάστηκε η αλλαγή χρήσης γης για της υπολεκάνες 8, 9 και 14, οι οποίες αποτελούσαν το 17.2% της περιοχής μελέτης. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες υπολεκάνες, διότι αποτελούνται από μεγάλη

δασική έκταση και θα είχε λογική η δραστηριότητα της υλοτομίας σε αυτές. Επίσης, σημαντικό είναι ότι η υλοτομία τελέστηκε στα σημεία των υπολεκανών που οι κλίσεις κυμαίνονταν στα όρια 0-14%, ώστε να είναι πιο ρεαλιστικό το σενάριο. Ο αριθμός CN2 έλαβε μια μικρότερη αύξηση συγκριτικά με αυτή που είχε λάβει εξ αιτίας της πυρκαγιάς. Οι τιμές του διαφαινονται παρακάτω:

- Εδάφη τύπου A δεν παρατηρούνται στην περιοχή
- Για εδάφη τύπου B, το CN2 λαμβάνει την τιμή 61 και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.
- Για εδάφη τύπου C, το CN2 λαμβάνει την τιμή 74 και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.
- Για εδάφη τύπου D, το CN2 λαμβάνει την τιμή 80 και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.

Οι τιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Αλλαγή CN2 για το σενάριο υλοτομίας 2α

Υδρολογική Κατηγορία Εδάφους	Αρχικό CN2	Τελικό CN2
A	-	-
B	55	61
C	70	74
D	77	80

Σενάριο 2β: Μεγάλη δραστηριότητα υλοτομίας ανάντη των σταθμών A Fort Seward και Miranda:

Ένα ακόμα σενάριο που εξετάστηκε ήταν η δραστηριότητα υλοτομίας στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα στις λεκάνες 10-27, οι οποίες καταλαμβάνουν το 79.2% της περιοχής μελέτης. Το συγκεκριμένο σενάριο ίσως να μην αποτελεί μια ρεαλιστική προσέγγιση και προφανώς δεν προτείνεται, αλλά εξετάστηκε προκειμένου να διαπιστωθεί η ανταπόκριση του μοντέλου σε μια τόσο μεγάλη αλλαγή. Όπως και πριν, η δασική έκταση της λεκάνης αντικαταστάθηκε με βοσκοτόπους με θάμνους, σε σημεία όπου οι κλίσεις βρισκόντουσαν ανάμεσα στα όρια 0 και 14%. Στην

λεκάνη 14 ανάντη του σταθμού Miranda, οι αριθμοί CN2 αντικαταστάθηκαν σύμφωνα με τις τιμές του σεναρίου 2α. Στις υπόλοιπες υπολεκάνες, οι οποίες στο σύνολο τους αποτελούν την ανάντη ομαδοποιημένη λεκάνη του σταθμού μέτρησης παροχής A Fort Seward, οι τιμές του CN2 ήταν οι παρακάτω, ανάλογα με την υδρολογική κατηγορία του εδάφους:

- Εδάφη τύπου A δεν παρατηρούνται στην περιοχή
- Για εδάφη τύπου B, το CN2 λαμβάνει την τιμή 40, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.
- Για εδάφη τύπου C, το CN2 λαμβάνει την τιμή 48, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.
- Για εδάφη τύπου D, το CN2 λαμβάνει την τιμή 52, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι βοσκότοπος με θάμνους.

Συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.4 έχουμε τη σύγκριση αρχικού CN χωρίς αλλαγή χρήσης γης και τελικού CN μετά την αλλαγή.

Πίνακας 4.4: Αλλαγή CN2 για το σενάριο υλοτομίας 2β

<b>Χρήση γης ανά ομάδα υπολεκανών</b>	<b>Υδρολογική Κατηγορία Εδάφους</b>	<b>Αρχικό CN2</b>	<b>Τελικό CN2</b>
FRSE-Ομάδα 1 (Υπολεκάνη 14)	A	-	-
	B	55	61
	C	-	-
	D	-	-
FRSE-Ομάδα 2	A	-	-
	B	36	40
	C	46	48
	D	50	52
FRST-Ομάδα 2	A	-	-
	B	39	40
	C	-	-
	D	51	52

Η τρίτη κατηγορία σεναρίων που εξετάστηκε αφορούσε στην μετατροπή των βοσκοτόπων σε δάσος. Προκειμένου αυτό το σενάριο να έχει ρεαλιστικό υπόβαθρο, έπρεπε να γίνει η θεώρηση ότι η δενδροφύτευση προηγήθηκε της μελέτης μερικές

δεκαετίες, δηλαδή έγινε η υπόθεση πλήρους ανάπτυξης του δάσους. Οι αριθμοί CN2, λοιπόν, που αφορούσαν τους βοσκοτόπους, αντικαταστάθηκαν αυτή την φορά με τους αριθμούς CN2 που αφορούσαν κωνοφόρα δάση για κάθε υδρολογική κατηγορία εδάφους και ομαδοποιημένη υπολεκάνη ξεχωριστά.

Σενάριο 3α: Φύτευση κωνοφόρων δέντρων σε επιλεγμένες λεκάνες ανάντη του σταθμού A Fort Seward:

Κατά το συγκεκριμένο σενάριο εξετάστηκε η επίδραση που θα είχε στον υδρολογικό κύκλο του νερού η αντικατάσταση μια περιοχής με βοσκοτόπους με δασική έκταση, δεδομένου ότι από την εποχή που έγινε η ανάπλαση του δάσους, δεν είχε προκύψει κάποια περαιτέρω αλλαγή στο οικοσύστημα. Και σε αυτή την περίπτωση, οι αλλαγές χρήσεων γης έγιναν για κλίσεις εδάφους 0-14%. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι υπολεκάνες 23, 24 και 27 με αλλαγή χρήσεων γης, ώστε να είναι πλήρως δασικές. Οι τιμές του CN2 διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Εδάφη τύπου A δεν παρατηρούνται στην περιοχή.
- Για εδάφη τύπου B, το CN2 λαμβάνει την τιμή 55, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.
- Για εδάφη τύπου C, το CN2 λαμβάνει την τιμή 70, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.
- Για εδάφη τύπου D, το CN2 λαμβάνει την τιμή 77, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.

Συγκεντρωτικά, οι αλλαγές φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Αλλαγή CN2 για το σενάριο δενδροφύτευσης 3α

Χρήση γης	Υδρολογική Κατηγορία Εδάφους	Αρχικό CN2	Τελικό CN2
RNGB	A	-	-
	B	61	55
	C	74	70
	D	80	77
RNGE	A	-	-
	B	69	55
	C	79	70
	D	84	77

Σενάριο 3β: Φύτευση κωνοφόρων δέντρων στις λεκάνες ανάντη των σταθμών A Fort Seward και Miranda:

Το παρόν σενάριο, αν και ξεφεύγει λίγο από μια ρεαλιστική προσέγγιση, τελέστηκε και πάλι προκειμένου να διαπιστωθεί το πώς αντιδράει το μοντέλο σε μια μεγάλη αλλαγή στις λεκάνες 10-27 (79.2% της περιοχής μελέτης) και για κλίσεις εδάφους μεταξύ των τιμών 0 και 14%. Για την υπολεκάνη 14 ανάντη του σταθμού Miranda, οι τιμές του αριθμού CN2, διατηρήθηκαν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση. Σχετικά, όμως, με τα εδάφη ανάντη του σταθμού A Fort Seward, οι υδρολογικές κατηγορίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εδάφη τύπου A δεν παρατηρούνται στην περιοχή.
- Για εδάφη τύπου B, το CN2 λαμβάνει την τιμή 36, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.
- Για εδάφη τύπου C, το CN2 λαμβάνει την τιμή 40, ανεξάρτητα της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.
- Για εδάφη τύπου D, το CN2 λαμβάνει την τιμή 50, ανεξαρτήτως της κλίσης και με την χρήση γης να είναι κωνοφόρο δάσος.

Οι αλλαγές αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Αλλαγή CN2 για το σενάριο δενδροφύτευσης 3β

<b>Χρήση γης ανά ομάδα υπολεκανών</b>	<b>Υδρολογική Κατηγορία Εδάφους</b>	<b>Αρχικό CN2</b>	<b>Τελικό CN2</b>
RNGB-Ομάδα 1 (Υπολεκάνη 14)	A	-	-
	B	61	55
	C	-	-
	D	80	77
RNGB-Ομάδα 2	A	-	-
	B	40	36
	C	48	46
	D	52	50
RNGE-Ομάδα 2	A	-	-
	B	45	36
	C	51	46
	D	55	50





## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών με το μοντέλο SWAT αφορούν στην χρονική περίοδο 01-01-2013 έως και τις 31-12-2020 για την οποία υπήρχαν μετρήσεις παροχών σε τρεις σταθμούς στη λεκάνη. Όπως προαναφέρθηκε, έγινε διαχωρισμός τη χρονοσειράς μετρημένων παροχών σε δύο μέρη, δηλ. από 01-01-2013 έως και 31-12-2017 με σκοπό τα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, και από 01-01-2018 έως και τις 31-12-2020 με σκοπό τα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση του μοντέλου. Η διαδικασία βαθμονόμησης ήταν χειρωνακτική, δηλαδή έγιναν συνεχείς επαναλήψεις και δοκιμές και έτσι προέκυψαν τα αποτελέσματα τα οποία περιγράφουν την παρούσα κατάσταση αναφορικά με τις επιφανειακές απορροές της περιοχής μελέτης.

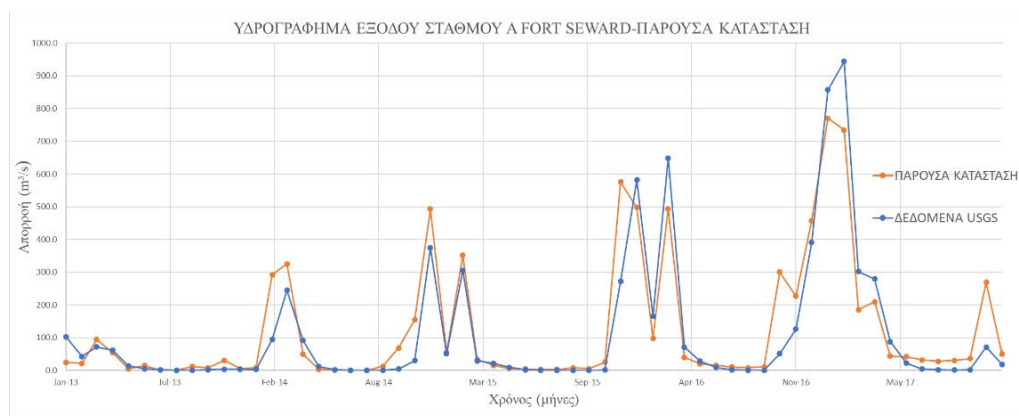
### 5.1. Παρούσα Κατάσταση - Βαθμονόμηση Μοντέλου

Στόχος των υπολογισμών, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ήταν η επιφανειακή απορροή που προέκυπτε ως προϊόν βαθμονόμησης του μοντέλου να επαληθεύει σε ικανοποιητικό βαθμό τις δεδομένες μετρήσεις που υπήρχαν από την USGS. Προς αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικοί έλεγχοι (Εξ. 4.1-4.5) που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

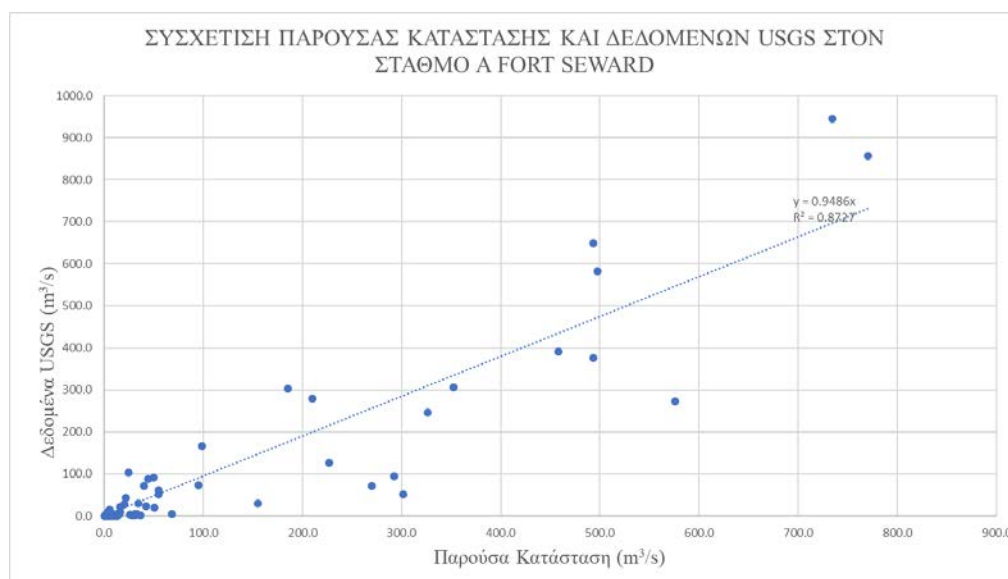
Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων που έγιναν και στους τρεις σταθμούς για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου. Η καλή σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρημένων παροχών φαίνεται από το γεγονός ότι τηρούνται τα όρια των στατιστικών ελέγχων όπως αυτά έχουν διευκρινιστεί στο Κεφάλαιο 4.5. Παράλληλα, η ανταπόκριση του μοντέλου στην πραγματική κατάσταση αναφορικά με τις επιφανειακές απορροές φαίνεται και από τα υδρογραφήματα (Εικόνες 5.1, 5.3, 5.5) στους τρεις σταθμούς με δεδομένες μετρήσεις. Τέλος, η καλή πρόβλεψη του μοντέλου φαίνεται και στα διαγράμματα διασποράς μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών (Εικόνες 5.2, 5.4, 5.6). Τέλος, στις Εικόνες 5.3 και 5.5 είναι εμφανές ότι οι αιχμές των υδρογραφημάτων ακολουθούν τις αυξομειώσεις τους ύψους βροχής στο υετογράφημα και συμπίπτουν χρονικά με αυτές των μετρήσεων.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων βαθμονόμησης μοντέλου

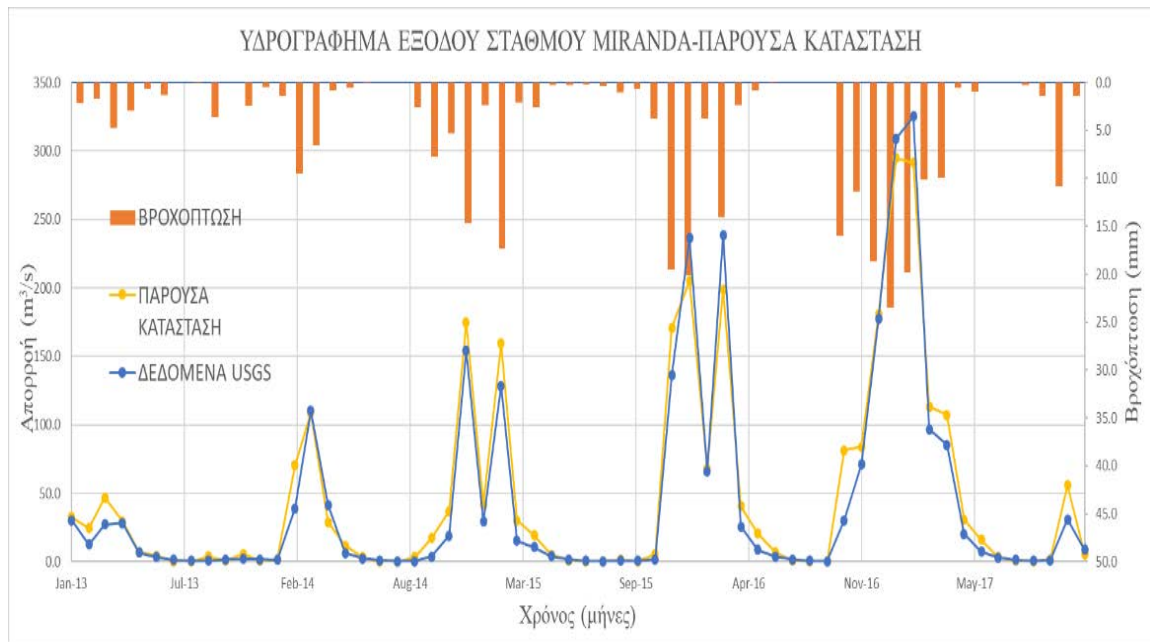
Παράμετρος (Εξ. 4.1-4.5)	Προτεινόμενες Τιμές	Σταθμός		
		Miranda	A Fort Seward	Scotia
NSE	0.75 - 1.00	0.9591	0.8325	0.8866
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	-	15.284	83.084	111.440
NOF	0.0 -1.0	0.36	0.76	0.61
PBIAS (%)	±25	-11	-13	-18
$\gamma$	1.0	0.9904	0.9486	0.9413
R <sup>2</sup>	1.0	0.9692	0.8727	0.9169



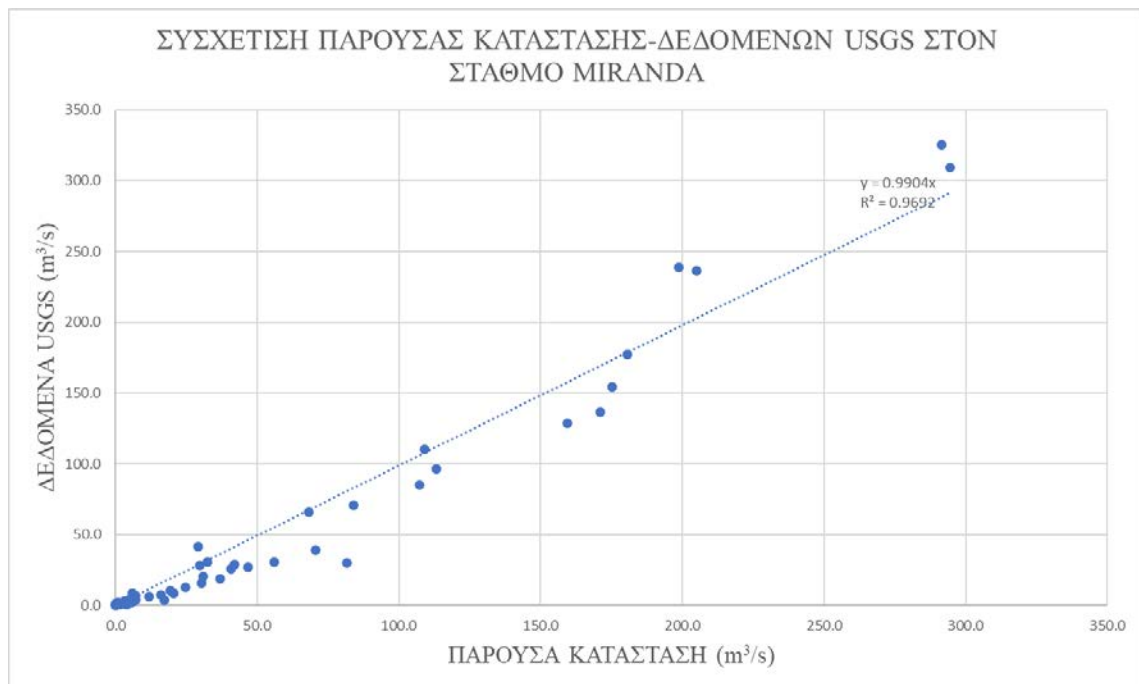
Εικόνα 5.1: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός A Fort Seward



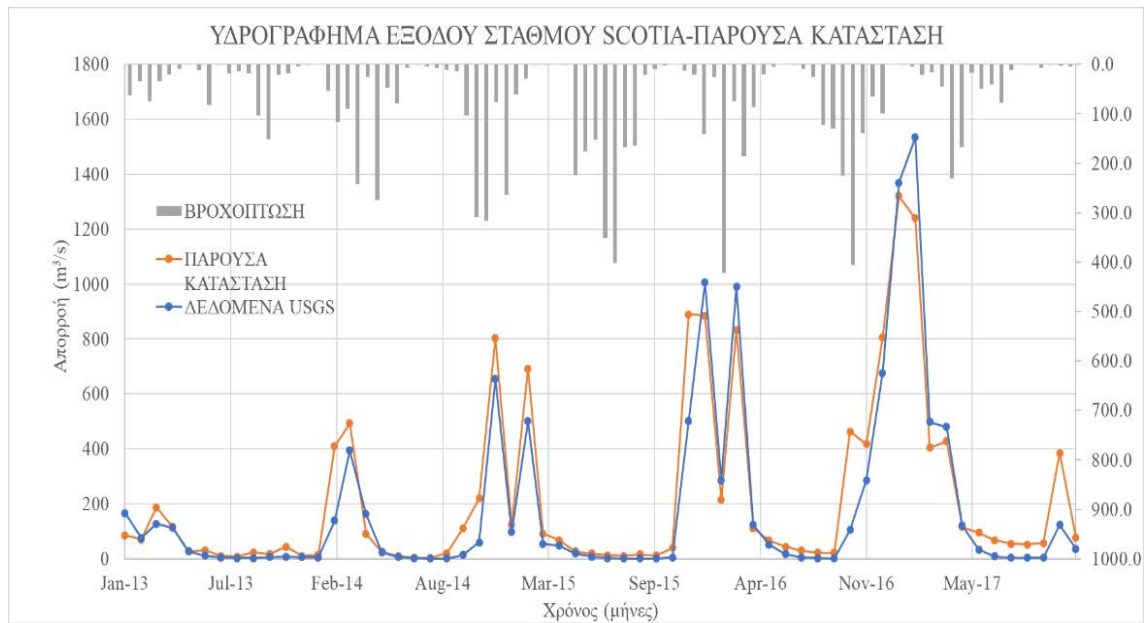
Εικόνα 5.2: Συσχέτιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό A Fort Seward



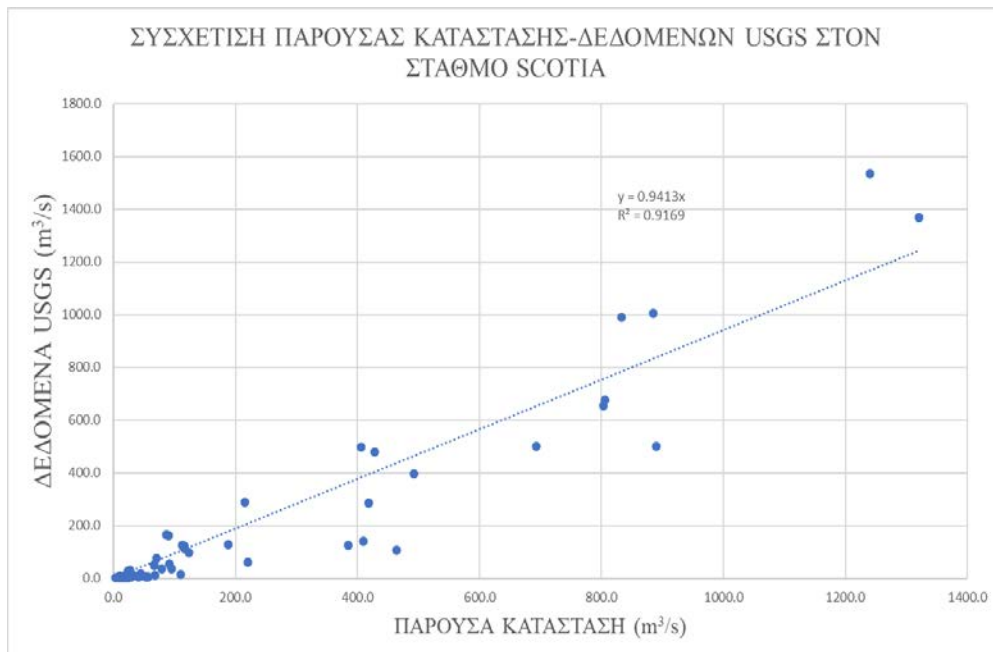
Εικόνα 5.3: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός Miranda



Εικόνα 5.4: Σύσχετιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό Miranda



Εικόνα 5.5: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός Scotia



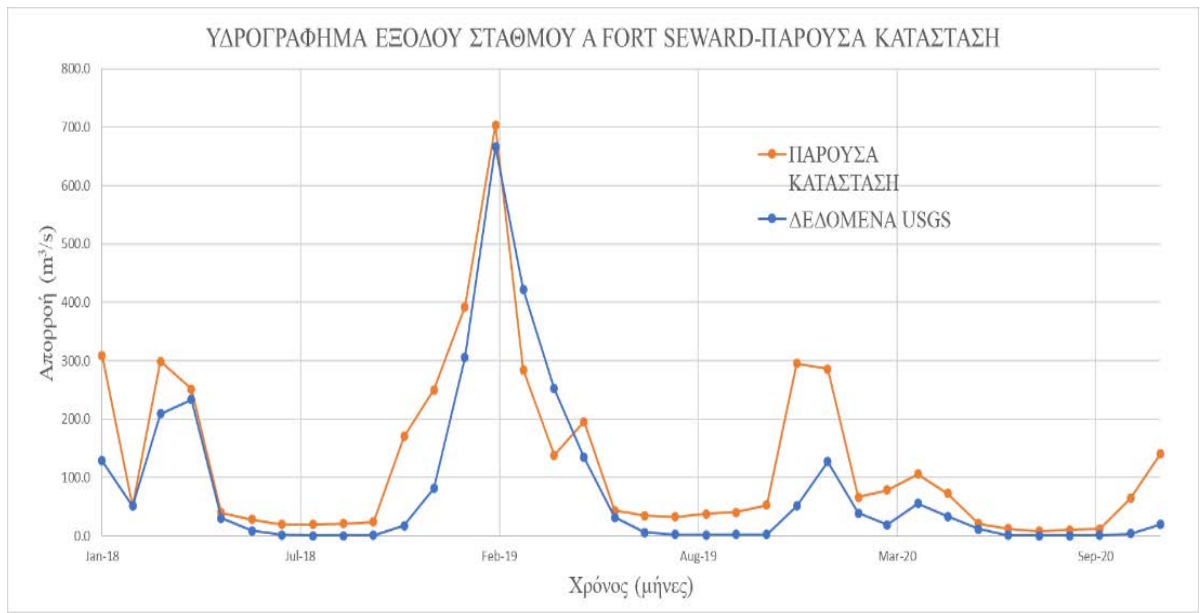
Εικόνα 5.6: Συσχέτιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό Scotia

## 5.2. Παρούσα Κατάσταση - Επαλήθευση Μοντέλου

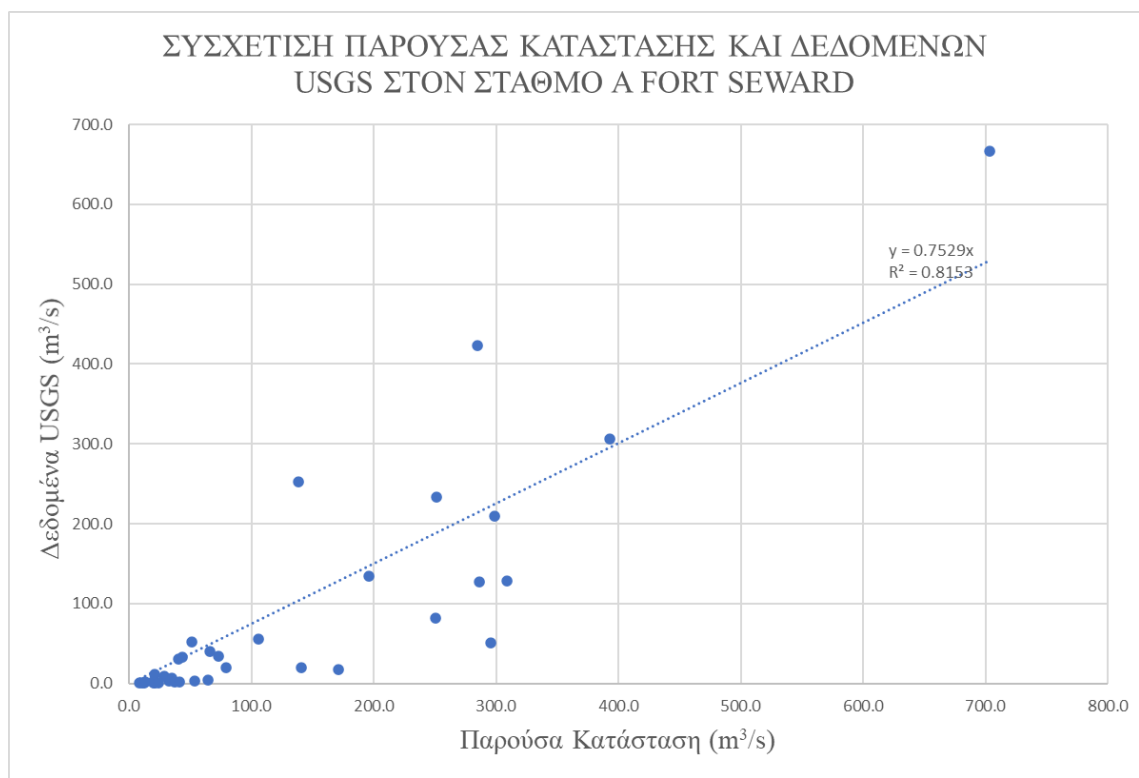
Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων που έγιναν και στους τρεις σταθμούς αναφορικά με την περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου. Η καλή σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρημένων παροχών φαίνεται από το γεγονός ότι τηρούνται τα όρια των στατιστικών μεγεθών όπως αυτά έχουν διευκρινιστεί στο Κεφάλαιο 4 (Εξ. 4.1-4.5). Παράλληλα, η ανταπόκριση του μοντέλου στην πραγματική κατάσταση αναφορικά με τις επιφανειακές απορροές φαίνεται και από τη σύγκριση μετρήσεων-προβλέψεων των υδρογραφημάτων (Εικόνες 5.7, 5.9, 5.11) στους τρεις σταθμούς με δεδομένες μετρήσεις. Τέλος, η καλή πρόβλεψη του μοντέλου φαίνεται και στα διαγράμματα διασποράς μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών (Εικόνες 5.8, 5.10, 5.12). Επίσης, στις Εικόνες 5.9 και 5.11 είναι εμφανές ότι οι αιχμές των υδρογραφημάτων ακολουθούν τις αυξομειώσεις τους ύψους βροχής στο υετογράφημα.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων πιστοποίησης μοντέλου

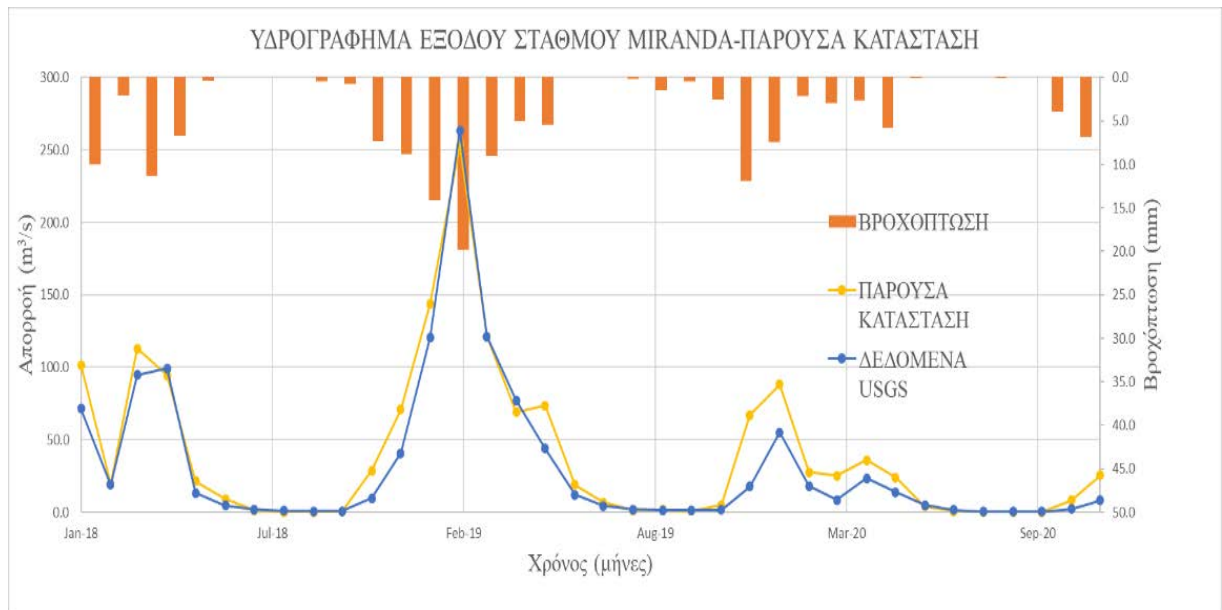
Παράμετρος (Εξ.4.1-4.5)	Σταθμός		
	Miranda	A Fort Seward	Scotia
NSE	0.9125	0.6373	0.7621
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	12.078	65.682	86.808
NOF	0.37	0.80	0.61
PBIAS (%)	-26%	-56%	-48%
Γ	0.8892	0.7529	0.8000
R <sup>2</sup>	0.9511	0.8153	0.8860



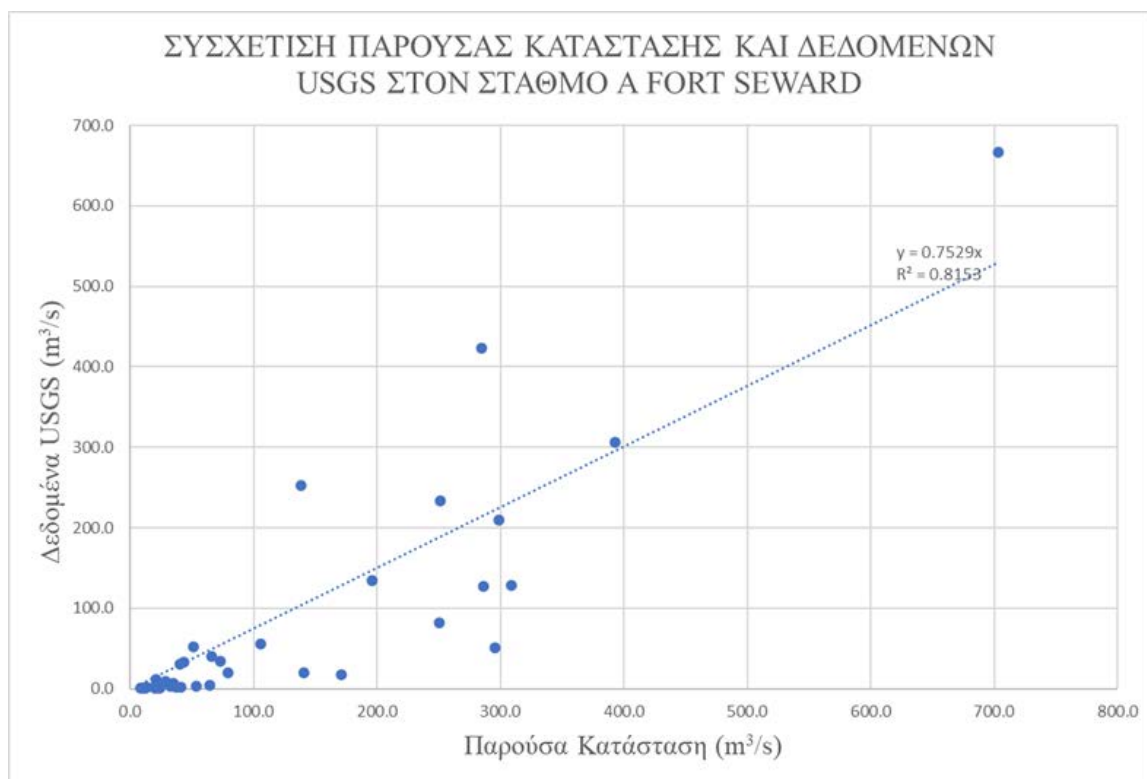
Εικόνα 5.7: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός A Fort Seward



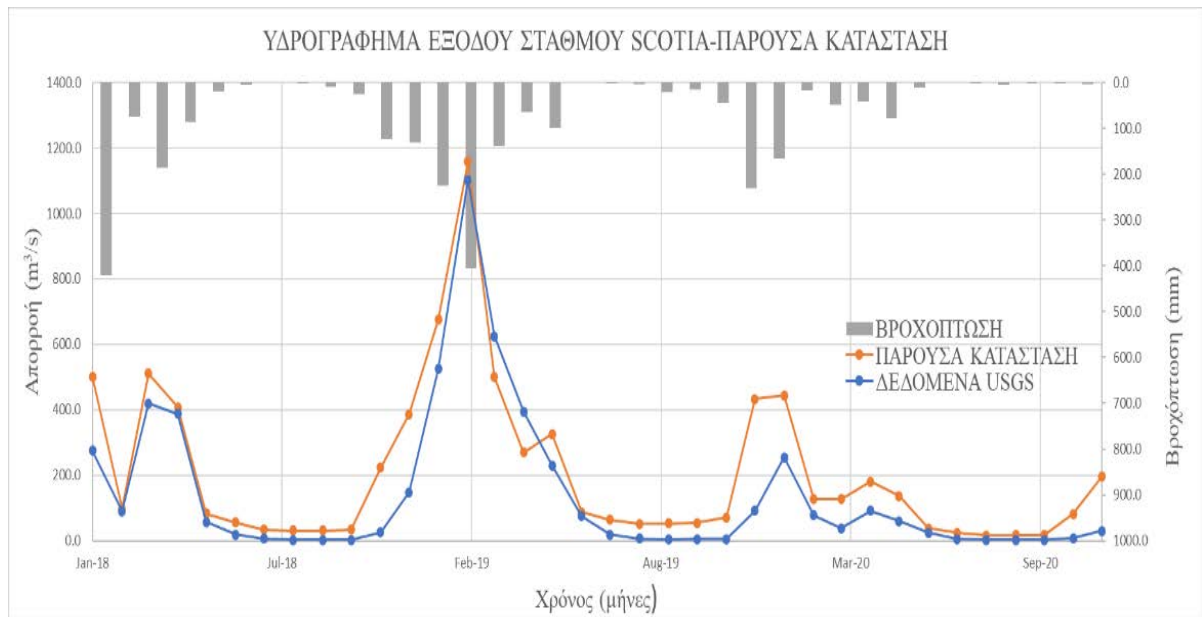
Εικόνα 5.8: Συσχέτιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό A Fort Seward



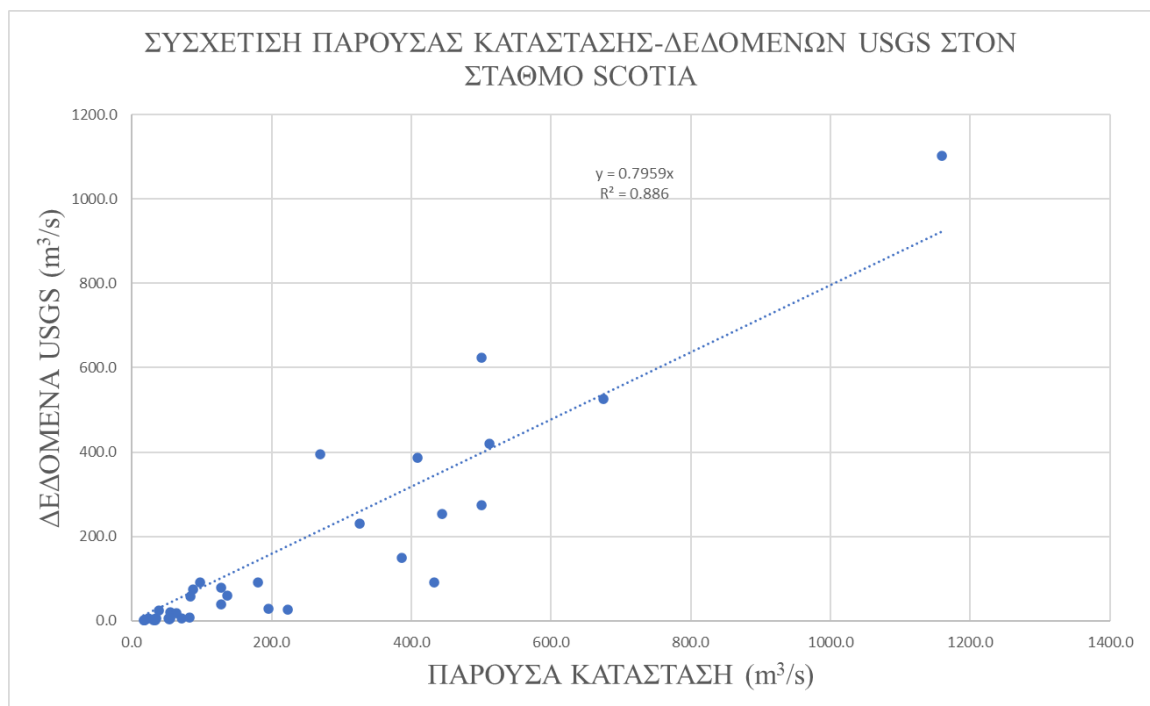
Εικόνα 5.9: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός Miranda



Εικόνα 5.10: Συσχέτιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό Miranda



Εικόνα 5.11: Υδρογράφημα εξόδου - σταθμός Scotiá



Εικόνα 5.12: Συσχέτιση παρούσας κατάστασης και δεδομένων USGS στον σταθμό Scotiá



### 5.3. Σενάρια Πυρκαγιάς

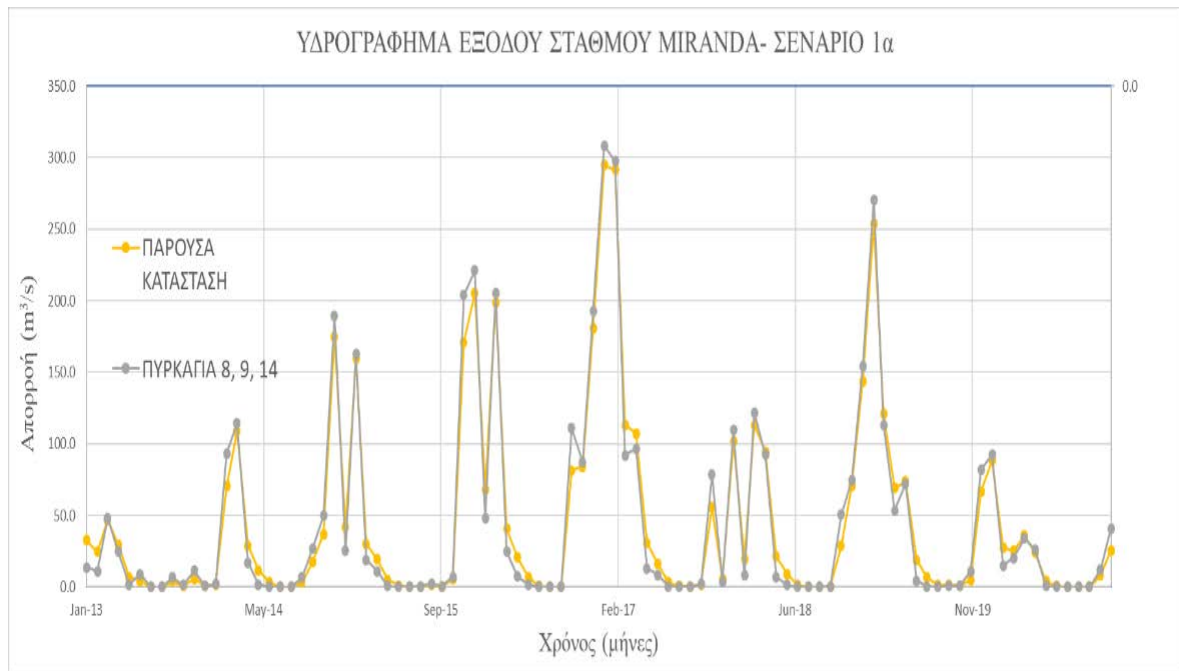
Όπως περιεγράφηκε στον Κεφάλαιο 4, προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της πυρκαγιάς, έγινε αλλαγή της παραμέτρου CN (Παράγραφος 4.7). Στην περιοχή υπήρχαν πριν την υποθετική πυρκαγιά κωνοφόρα δάση και βοσκότοποι με θάμνους ή γρασίδι. Η σύγκριση στην περίπτωση των εναλλακτικών σεναρίων έγινε με βάση το βαθμονομημένο αποτέλεσμα του μοντέλου, εφόσον ζητούμενο ήταν η διαπίστωση της επίδρασης των αλλαγών χρήσεων γης στην απορροή. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, η επίδραση της πυρκαγιάς δεν παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα αναφορικά με τις απορροές της περιοχής. Κριτήριο για το αν μια φωτιά έχει επίδραση μεγάλης σημασίας αναφορικά με τις παροχές που παρατηρούνται στα σημεία ελέγχου αποτελεί ο έλεγχος σημαντικότητας t-test και συγκεκριμένα η τιμή p-value. Στατιστικά σημαντική διαφορά θεωρήθηκε ότι υπάρχει όταν  $p < 0.05$  (5%).

#### 5.3.1. Σενάριο Πυρκαγιάς 1α

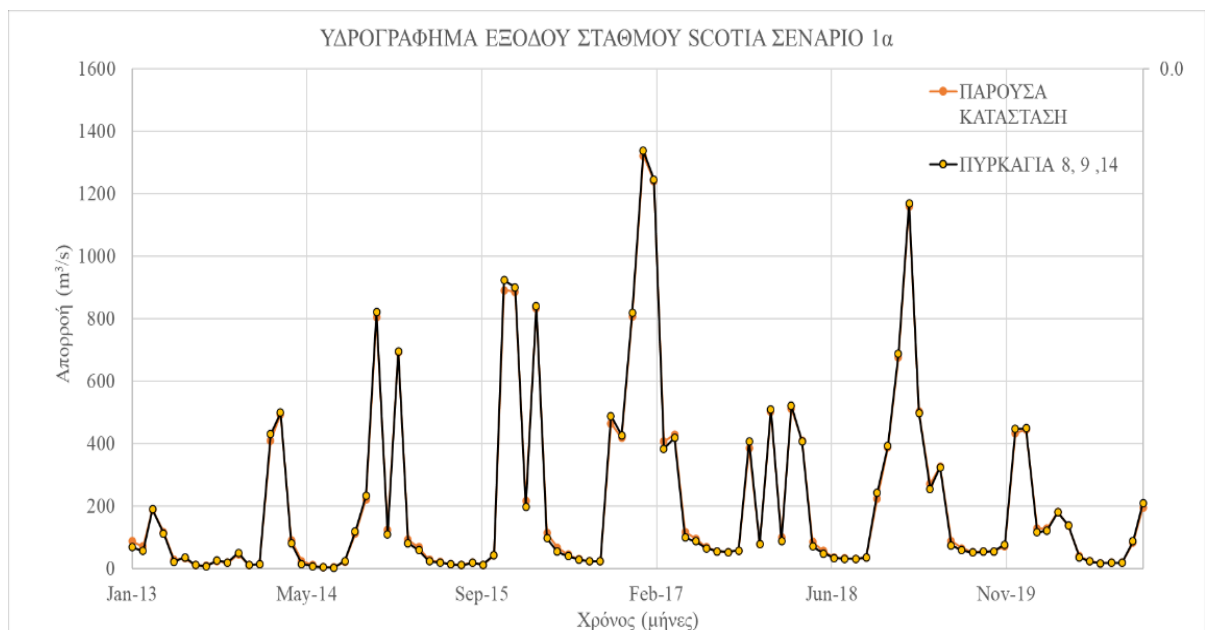
Για το πρώτο σενάριο πυρκαγιάς που εξετάστηκε, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα υδρογραφήματα των Εικόνων 5.13 και 5.14. Υπενθυμίζεται ότι στο παρόν σενάριο έγινε προσομοίωση πυρκαγιάς στις υπολεκάνες 8, 9 και 14. Όπως φαίνεται, η συγκεκριμένη φωτιά και η μετατροπή του εδάφους σε γυμνό, δεν επηρεάζει σημαντικά τις απορροές, οι οποίες είναι λίγο μεγαλύτερες από τις τιμές της Παρούσας Κατάστασης που προέκυψε από την βαθμονόμηση του μοντέλου τόσο στον σταθμό Miranda, όσο και στον σταθμό Scotia. Αυτό επαληθεύεται και από την έλλειψη στατιστικής σημαντικότητας στις παροχές με την αλλαγή χρήσης γης, όπως έχει προκύψει από τον έλεγχο t-Test (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3: Σενάρια αλλαγών χρήσεων γης - Στατιστικός έλεγχος Student t-test

Σενάριο	p-value (%)			Σημαντικότητα αλλαγής χρήσης γης
	Miranda	A Fort Seward	Scotia	
Πυρκαγιά στις υπολεκάνες 8, 9, 14	48.80	-	49.88	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Πυρκαγιά στην υπολεκάνη 15	-	19.71	29.70	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Πυρκαγιά στις υπολεκάνες 26, 27	-	17.57	27.84	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Πυρκαγιά στις υπολεκάνες 10-27	49.25	12.63	22.96	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Υλοτομία στις υπολεκάνες 8, 9, 14	49.15	-	49.99	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Υλοτομία στις υπολεκάνες 10-27	49.89	43.05	45.97	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Φύτευση Κωνοφόρων Δένδρων στις υπολεκάνες 23, 24, 27	-	49.97	49.77	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα
Φύτευση Κωνοφόρων Δένδρων στις υπολεκάνες 10-27	49.99	46.03	47.78	Η αλλαγή χρήσης γης δεν έχει στατιστικά σημαντική επίπτωση στο συνολικό υδρογράφημα



Εικόνα 5.13: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1α - σταθμός Miranda

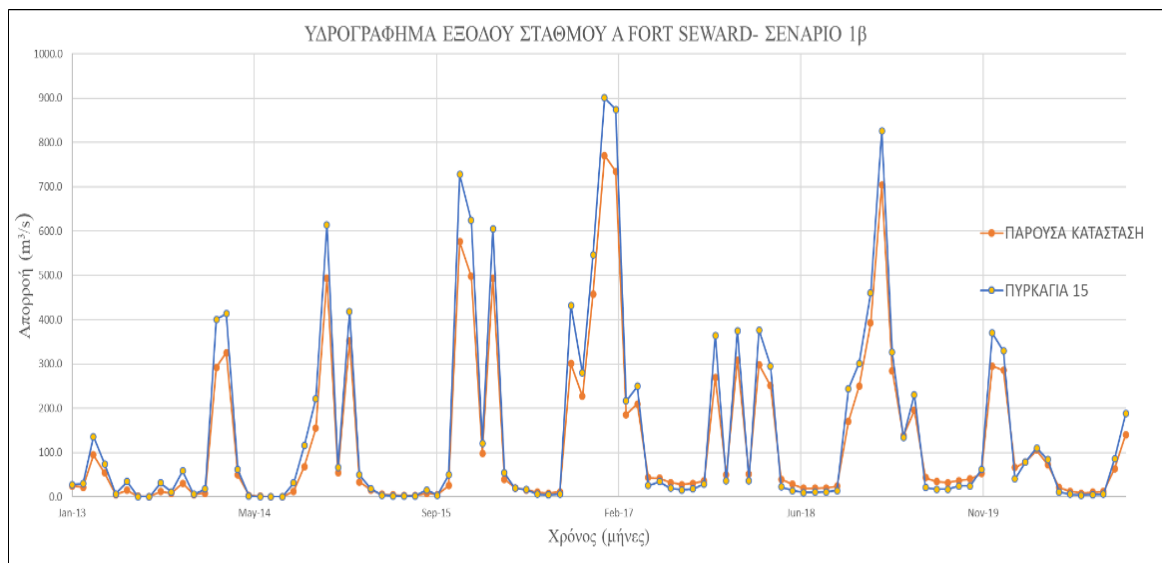


Εικόνα 5.14: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1α - σταθμός Scotia

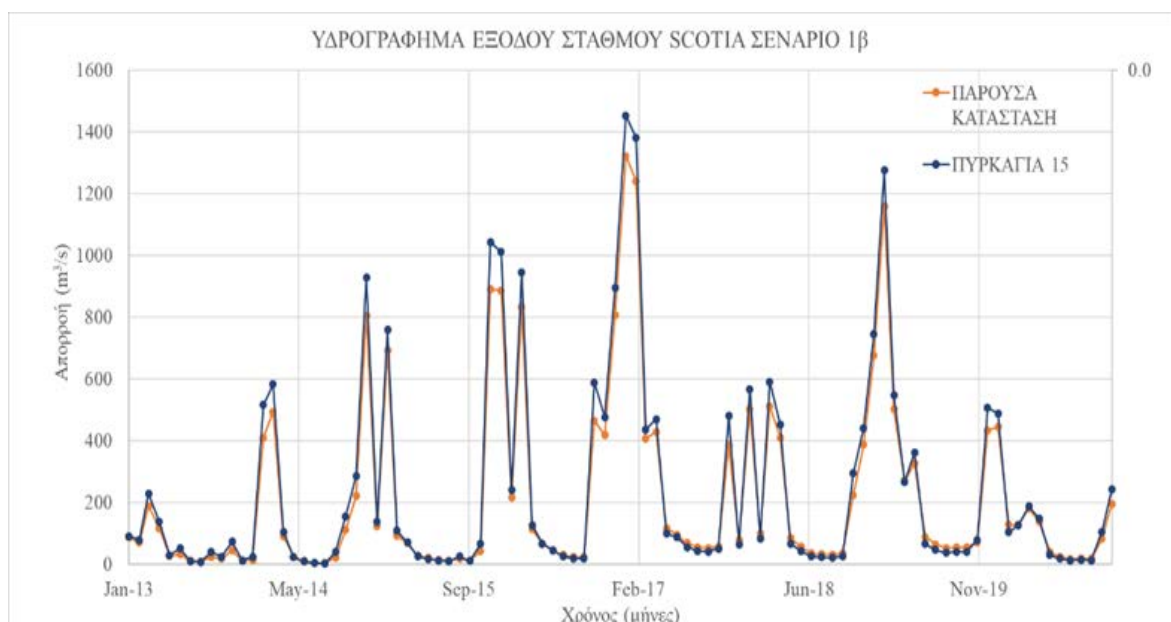
### 5.3.2. Σενάρια Πυρκαγιάς 1β, 1γ

Στο σενάριο πυρκαγιάς 1β, έγινε προσομοίωση πυρκαγιάς στην υπολεκάνη 15, ενώ στο σενάριο πυρκαγιάς 1γ στις υπολεκάνες 26, 27. Και στις δύο περιπτώσεις ανάντη του σταθμού A Fort Seward. Η έκταση της πυρκαγιάς και στις 2 περιπτώσεις δεν

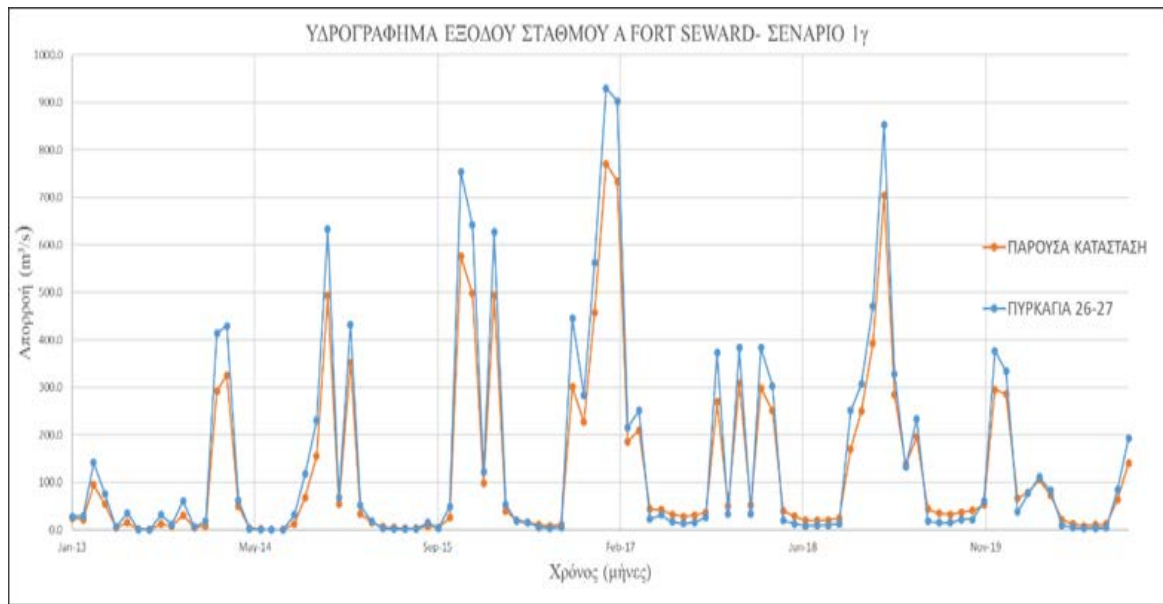
υπερέβαινε το 9.2% της περιοχής μελέτης και είχε ως επακόλουθο να μην υπάρξει μεγάλη αλλαγή στις απορροές του ποταμού στα σημεία ελέγχου. Αυτό φαίνεται στις Εικόνες 5.15 και 5.16 για το σενάριο 1β και στις Εικόνες 5.17 και 5.18 για το σενάριο 1γ, όπου παρουσιάζονται τα συγκριτικά υδρογραφήματα της υφιστάμενης κατάστασης και της θεωρητικής πυρκαγιάς στην θέση των σταθμών A Fort Seward και Scotia. Τα αποτελέσματα των υδρογραφημάτων επιβεβαιώνουν και πάλι την μικρή στατιστικά σημαντικότητα της πυρκαγιάς αναφορικά πάντα με την επιφανειακή απορροή της λεκάνης, κάτι που φαίνεται και από τις τιμές του Πίνακα 5.3.



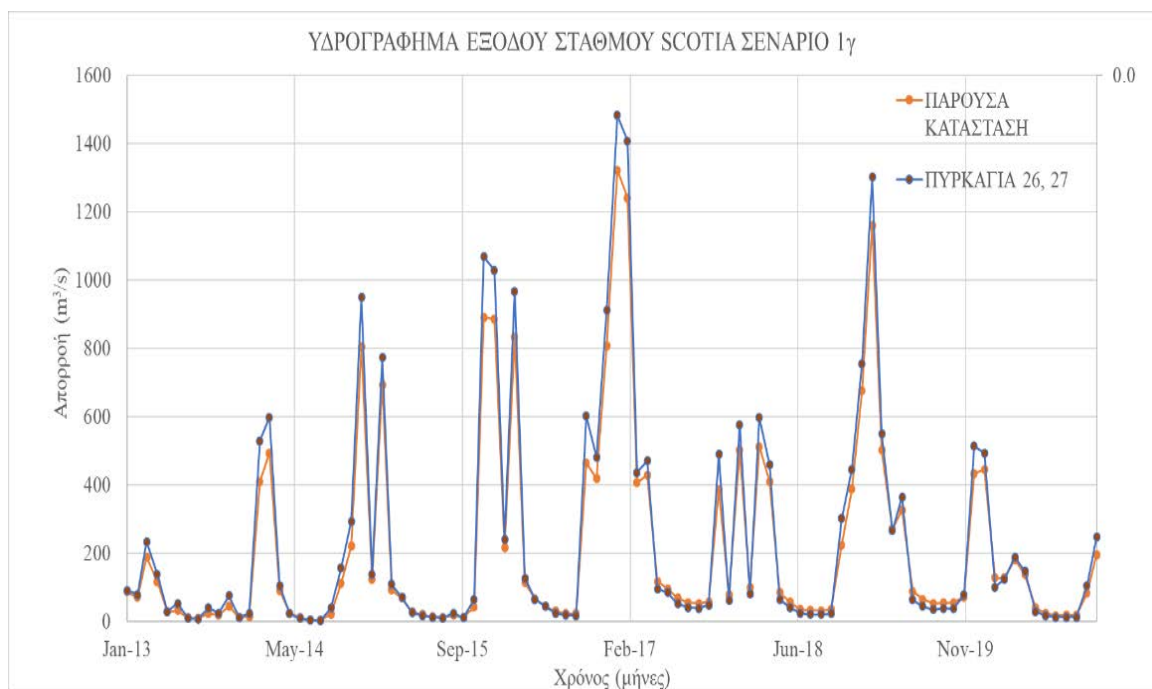
Εικόνα 5.15: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1β - σταθμός A Fort Seward



Εικόνα 5.16: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1β - σταθμός Scotia



Εικόνα 5.17: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1γ - σταθμός A Fort Seward

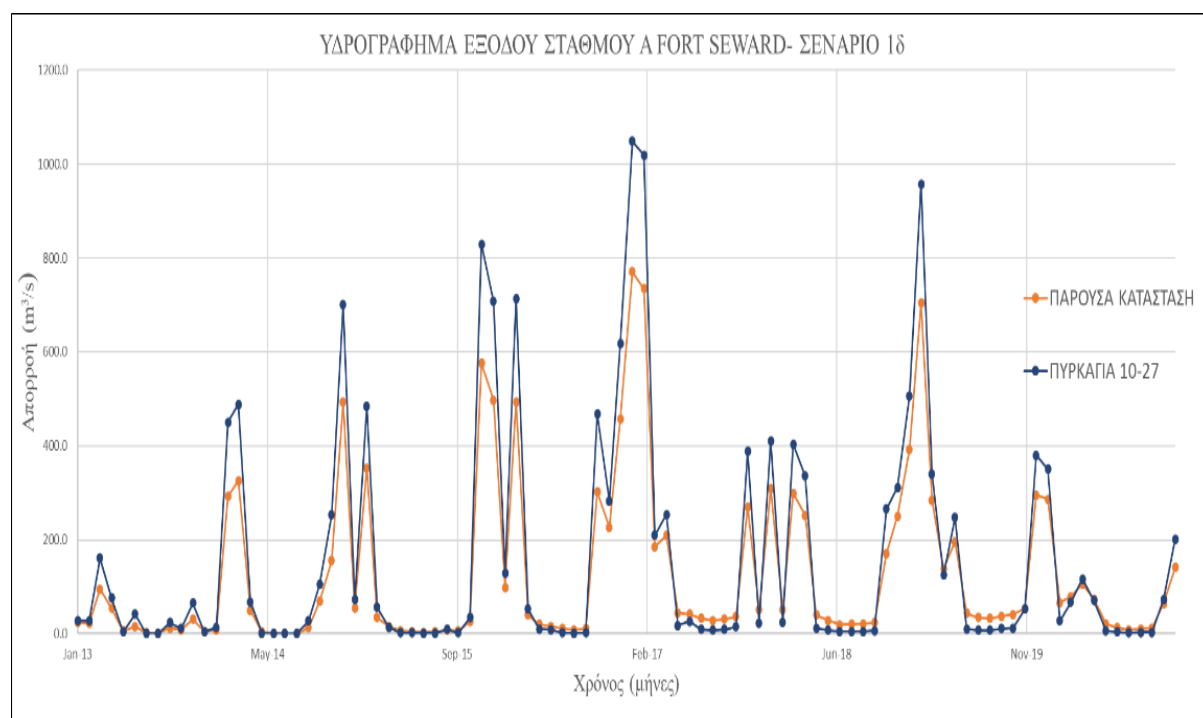


Εικόνα 5.18: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1γ - σταθμός Scotia

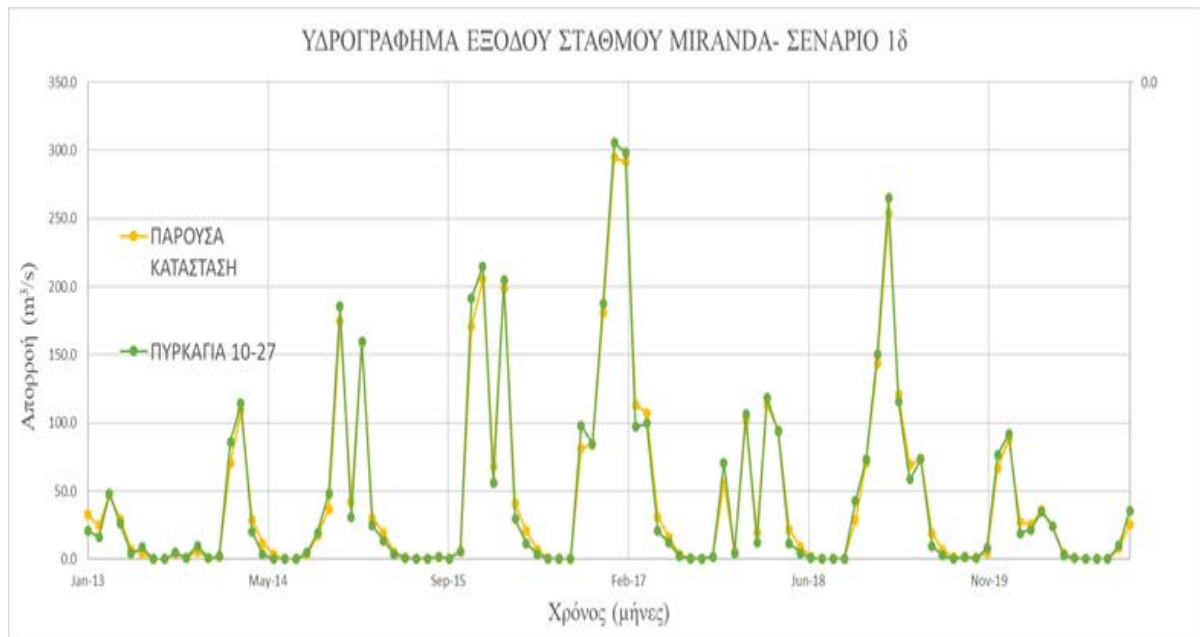
### 5.3.3. Σενάρια Πυρκαγιάς 1δ

Λόγω των μικρών αλλαγών που παρατηρήθηκαν στις επιφανειακές απορροές που προέκυψαν από τα παραπάνω σενάρια πυρκαγιάς, αποφασίστηκε η προσομοίωση μιας πυρκαγιάς μεγαλύτερης έκτασης, ώστε να διαπιστωθεί και σε αυτή την περίπτωση η αντίδραση του μοντέλου. Έτσι, στο σενάριο 1δ, έγινε προσομοίωση πυρκαγιάς του

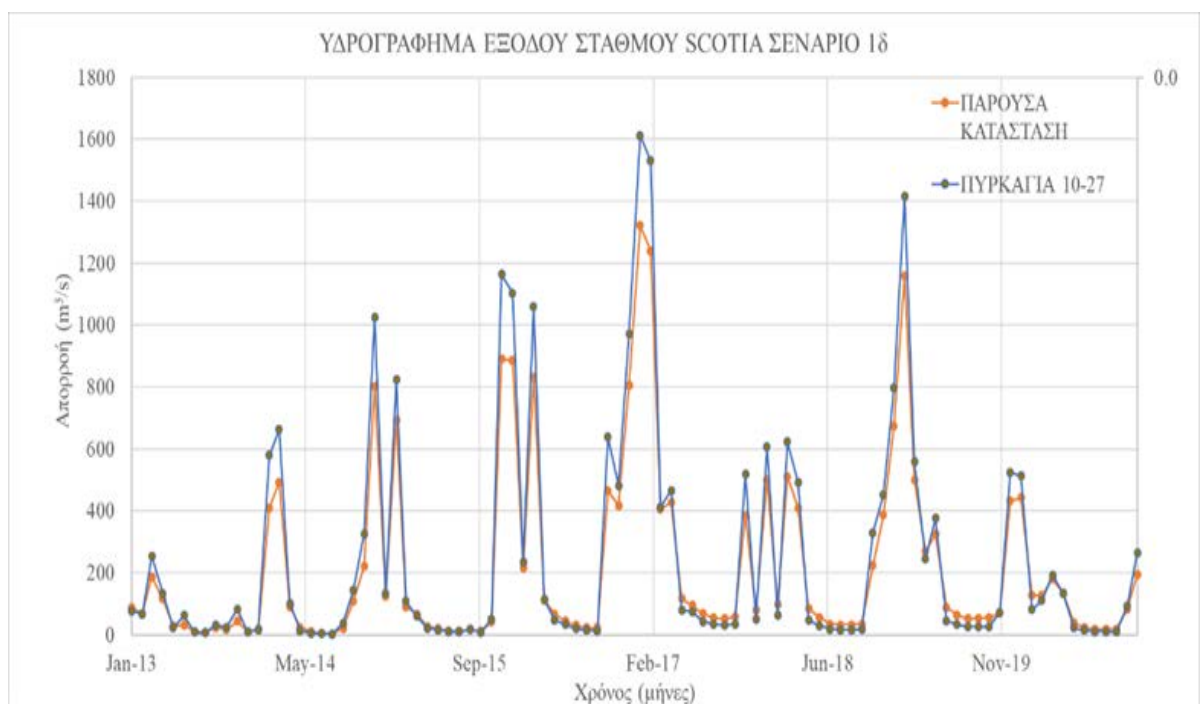
μεγαλύτερου μέρους της λεκάνης απορροής, και συγκεκριμένα των υπολεκανών 10-27. Οι προαναφερθείσες λεκάνες, με εξαίρεση την 14, αποτελούν ολόκληρη την ανάντη υπολεκάνη του σταθμού A Fort Seward, ενώ η 14 είναι ανάντη υπολεκάνη του σταθμού Miranda. Όπως διακρίνεται από το υδρογράφημα (Εικόνα 5.19) στο σταθμό A Fort Seward, υπάρχει διαφορά στις τιμές των παροχών του μοντέλου, ιδίως στις αιχμές κατά την διάρκεια της επταετούς περιόδου μελέτης. Στον σταθμό Miranda είναι πολύ μικρή η επίδραση της φωτιάς, διότι καίγεται ένα μικρό μέρος της ανάντη περιοχής (Εικόνα 5.20) Τέλος, και στον σταθμό Scotia παρατηρούνται αξιοσημείωτες αλλαγές στις αιχμές όπως φαίνεται από τα υδρογραφήματα της Εικόνας 5.21. Οι διαφορές, πάντως, στις τιμές των παροχών, συνεχίζουν να μην θεωρούνται στατιστικά σημαντικές, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.3 από την τιμή  $p$  που είναι μεγαλύτερη από 5%.



Εικόνα 5.19: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1δ - σταθμός A Fort Seward



Εικόνα 5.20: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1δ - σταθμός Miranda

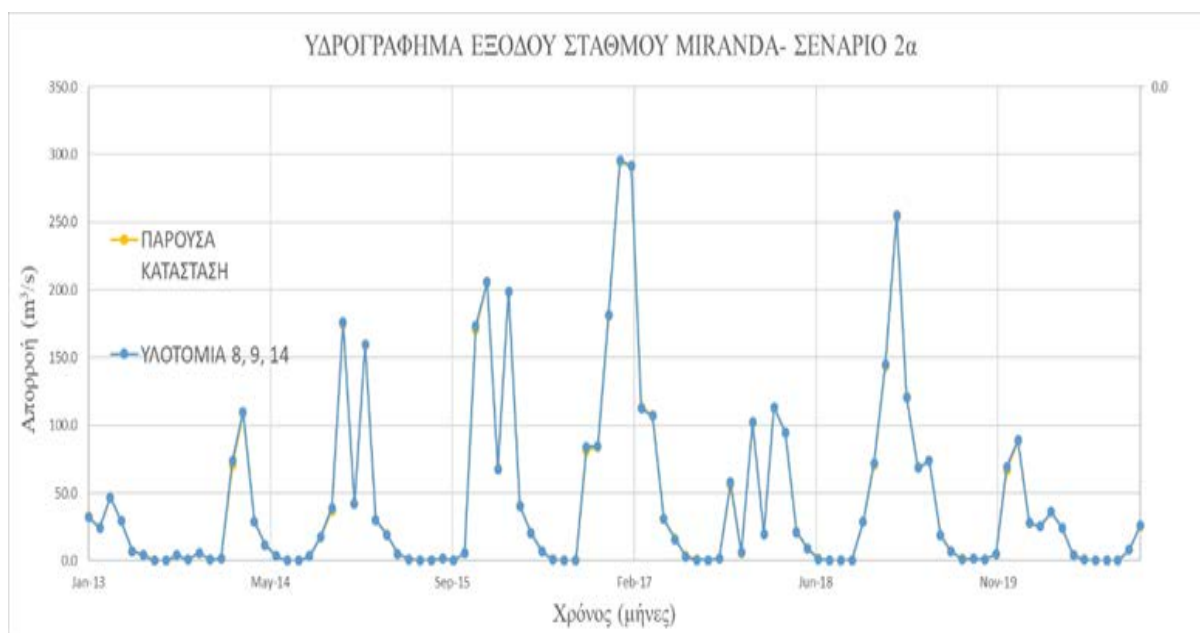


Εικόνα 5.21: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 1δ - σταθμός Scotia

## 5.4. Σενάρια Υλοτομίας

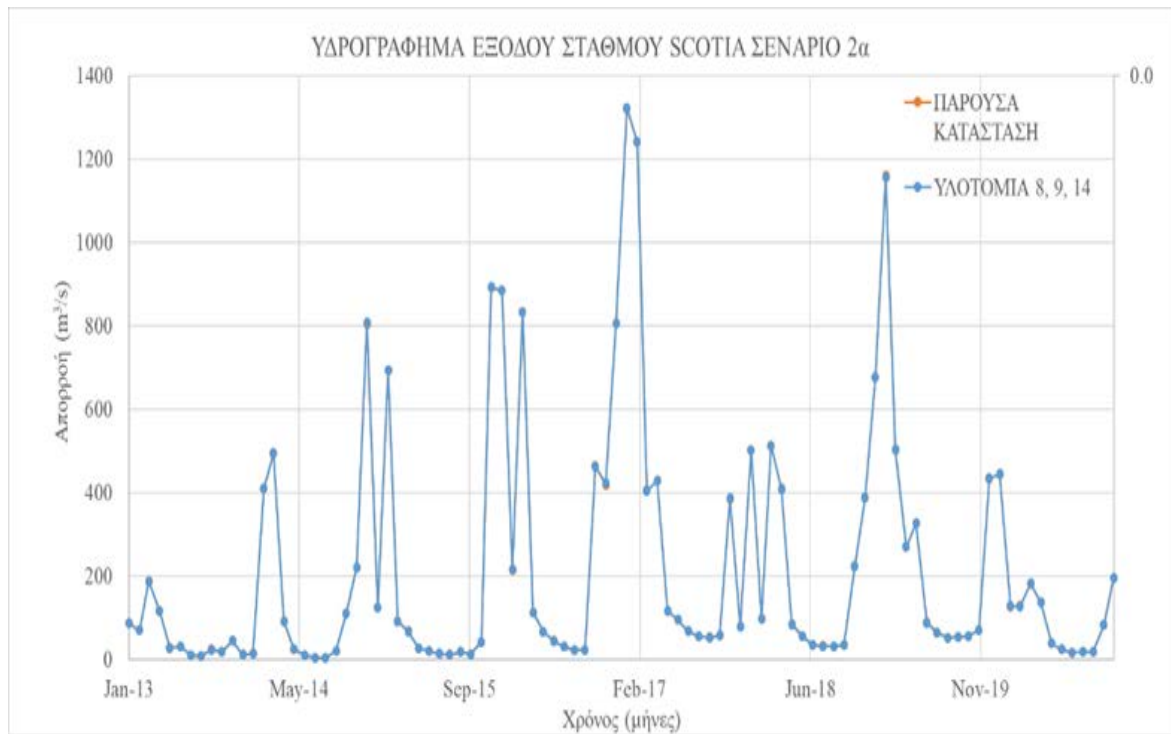
### 5.4.1. Σενάριο Υλοτομίας 2α

Κατά το σενάριο 2α, έγινε, όπως έχει αναφερθεί, αλλαγή της χρήσης γης στην περιοχή των υπολεκανών ανάντη του σταθμού Miranda από δασική έκταση σε βοσκότοπο με θάμνους, λόγω δραστηριότητας υλοτομίας για κλίσεις 0-14%. Το αποτέλεσμα της υλοτομίας στην περιοχή δεν είχε σημαντική επιρροή στη επιφανειακή απορροή στο σημείο του σταθμού Miranda όπως φαίνεται από τη σύγκριση του αντίστοιχου υδρογραφήματος με αυτό της παρούσας κατάστασης (Εικόνας 5.22). Αντίστοιχο συμπέρασμα προκύπτει και από το υδρογράφημα της εξόδου της συνολικής λεκάνης στο σημείο που βρίσκεται ο σταθμός Scotia, όπως παρατηρείται στα υδρογραφήματα της Εικόνας 5.23. Προφανώς, καμιά επιρροή δεν υπάρχει στο υδρογράφημα του σταθμού A Fort Seward εφόσον δεν επηρεάζονται οι χρήσεις γης των υπολεκανών που αποστραγγίζει. Τα παραπάνω επιβεβαιώνουν για άλλη μια φορά τα αποτελέσματα της δοκιμής t-test που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.



Εικόνα 5.22: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 2α - σταθμός Miranda

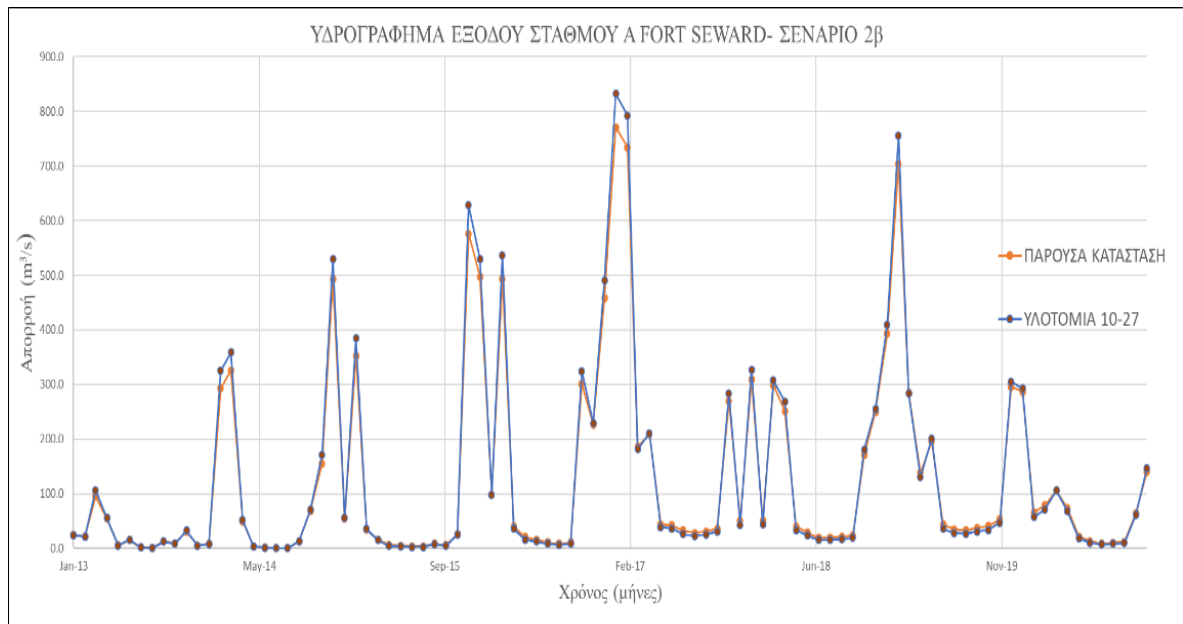




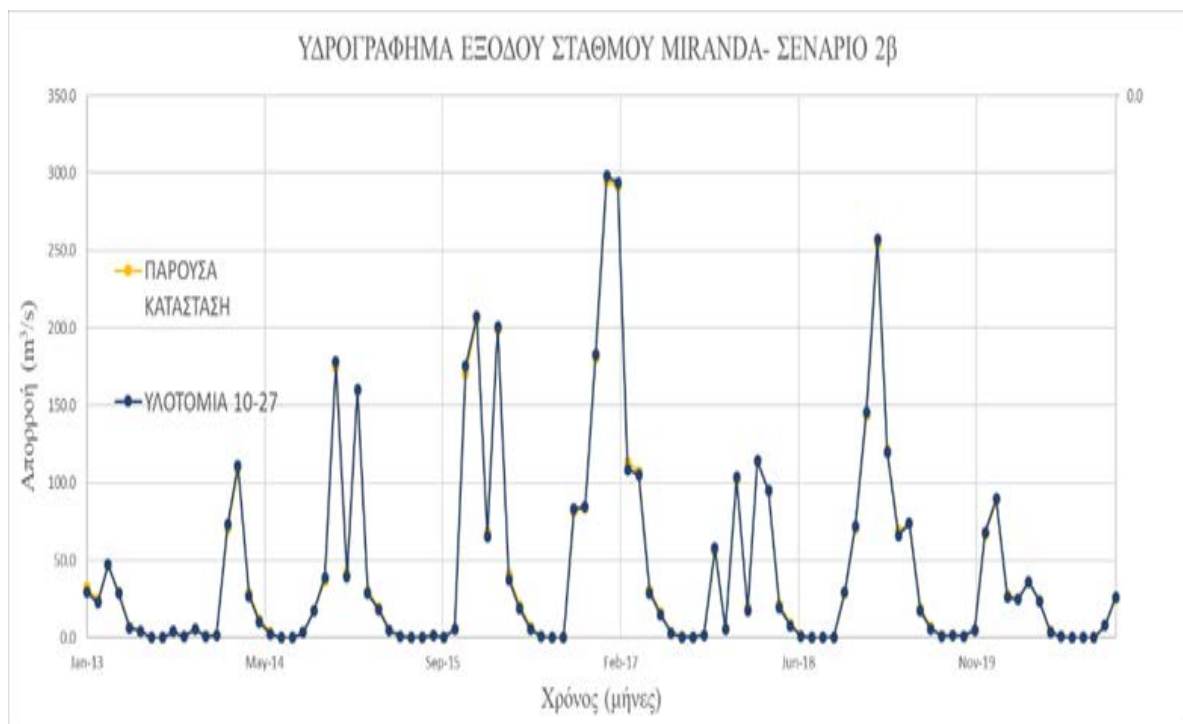
Εικόνα 5.23: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 2α - σταθμός Scotia

#### 5.4.2. Σενάριο Υλοτομίας 2β

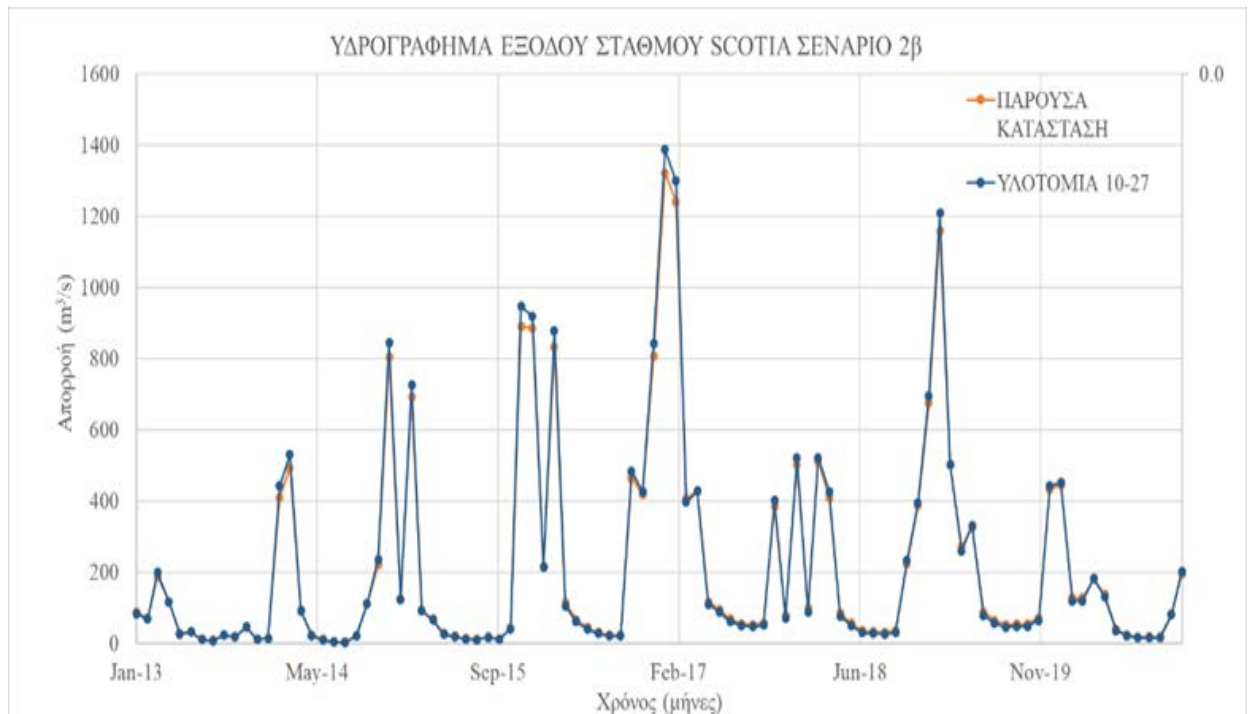
Κατά το σενάριο 2β, παρατηρώντας την μικρή αλλαγή που προέκυψε από μια μικρής έκτασης δραστηριότητα υλοτομίας στην επιφανειακή απορροή, αποφασίστηκε, όπως και πριν, η προσομοίωση της δραστηριότητας στην μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η αντικατάσταση της δασικής έκτασης των υπολεκανών 10-27 από βοσκοτόπους με θάμνους για κλίσεις 0-14%. Παρ' όλα αυτά, και σε αυτή την περίπτωση, οι διαφορές στις αιχμές των υδρογραφημάτων δεν ήταν ιδιαίτερες σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.24-5.26. Προφανώς, αυτό οφείλεται και στην μικρή διαφορά ανάμεσα στους αριθμούς CN που αντιστοιχούν σε δασικές εκτάσεις κωνοφόρων δέντρων και βοσκοτόπων. Τα παραπάνω επαληθεύονται, προφανώς, από τον Πίνακα 5.3 όπου διαφαίνεται ότι οι τιμές  $p$  ξεπερνάνε και στα τρία σημεία ελέγχου το 40%, την στιγμή που το όριο στατιστικής σημαντικότητας τοποθετείται στην τιμή 5%.



Εικόνα 5.24: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 2β - σταθμός A Fort Seward



Εικόνα 5.25: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 2β - σταθμός Miranda

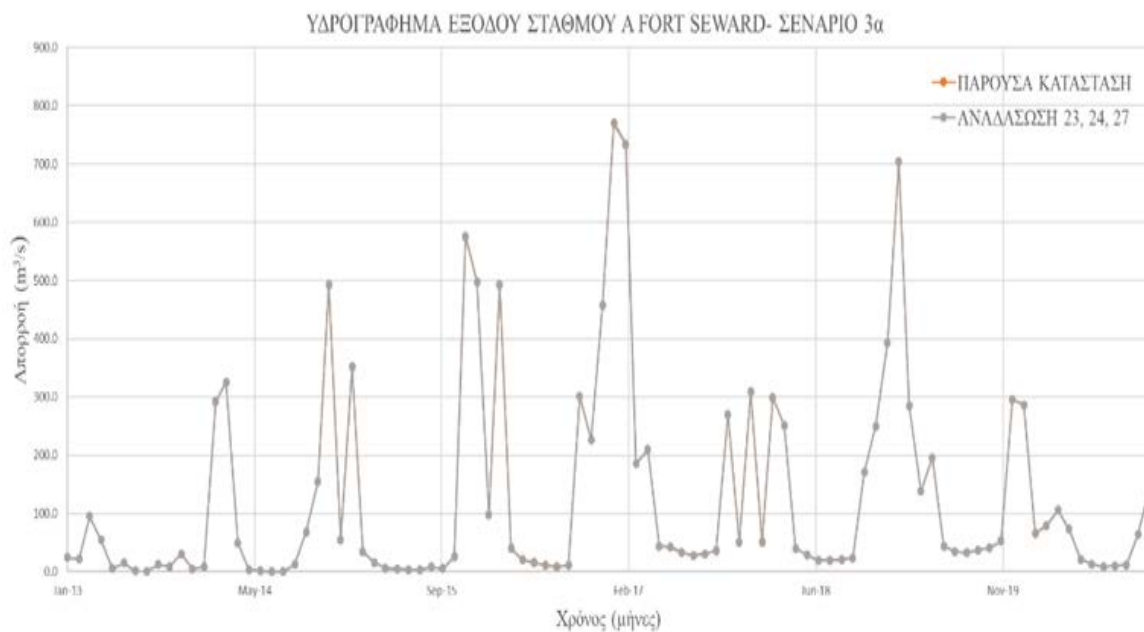


Εικόνα 5.26: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 2β - σταθμός Scotia

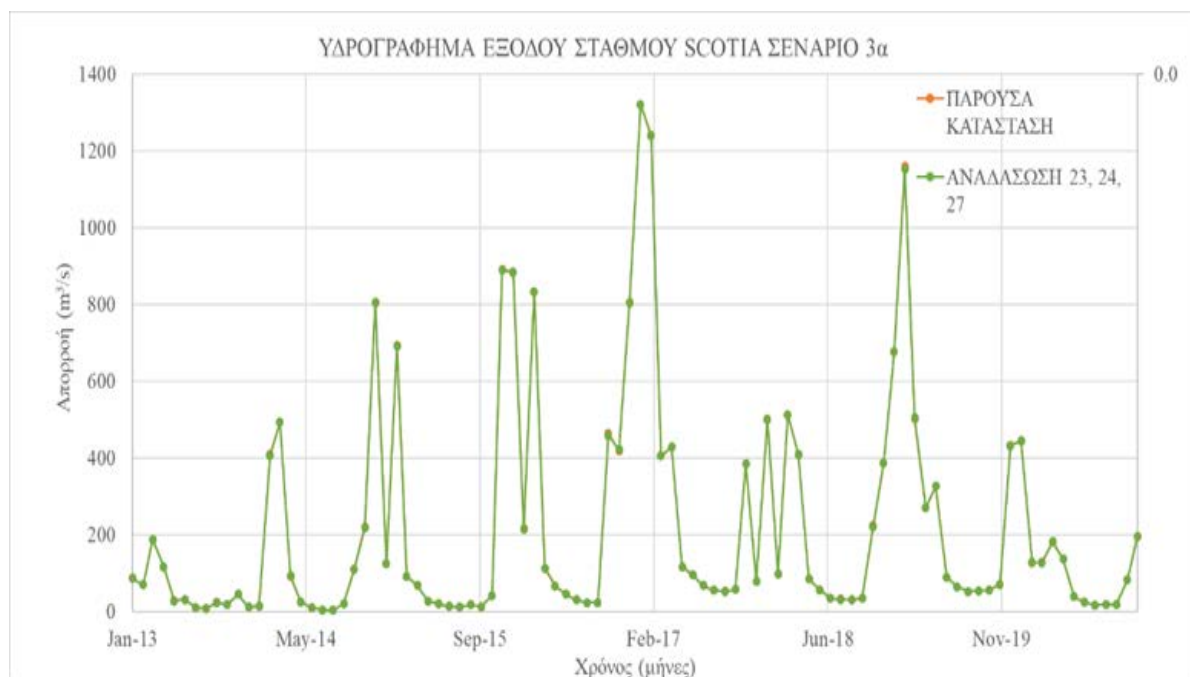
## 5.5. Σενάρια φύτευσης κωνοφόρου δάσους σε θέσεις βοσκοτόπων

### 5.5.1. Σενάριο Φύτευσης 3α

Κατά το σενάριο 3α επιλέχθηκε η ανάπλαση κωνοφόρου δάσους στις υπολεκάνες 23, 24 και 27 και στα σημεία όπου υπήρχαν βοσκοτόποι με θάμνους ή γρασίδι με κλίσεις μικρότερες από 14%. Οι επιλεγμένες υπολεκάνες βρίσκόντουσαν ανάντη του σταθμού A Fort Seward. Η δραστηριότητα αναδάσωσης, όπως έχει αναφερθεί, θεωρείται ότι προηγείται μερικών δεκαετιών από την έναρξη του χρόνου μελέτης, ώστε να δύναται να επιφέρει αλλαγή στην χρήση γης. Παρατηρώντας τα υδρογραφήματα στις Εικόνες 5.27 και 5.28, οι αλλαγές που σημειώνονται στις παροχές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τον στατιστικό έλεγχο του Πίνακα 5.3.



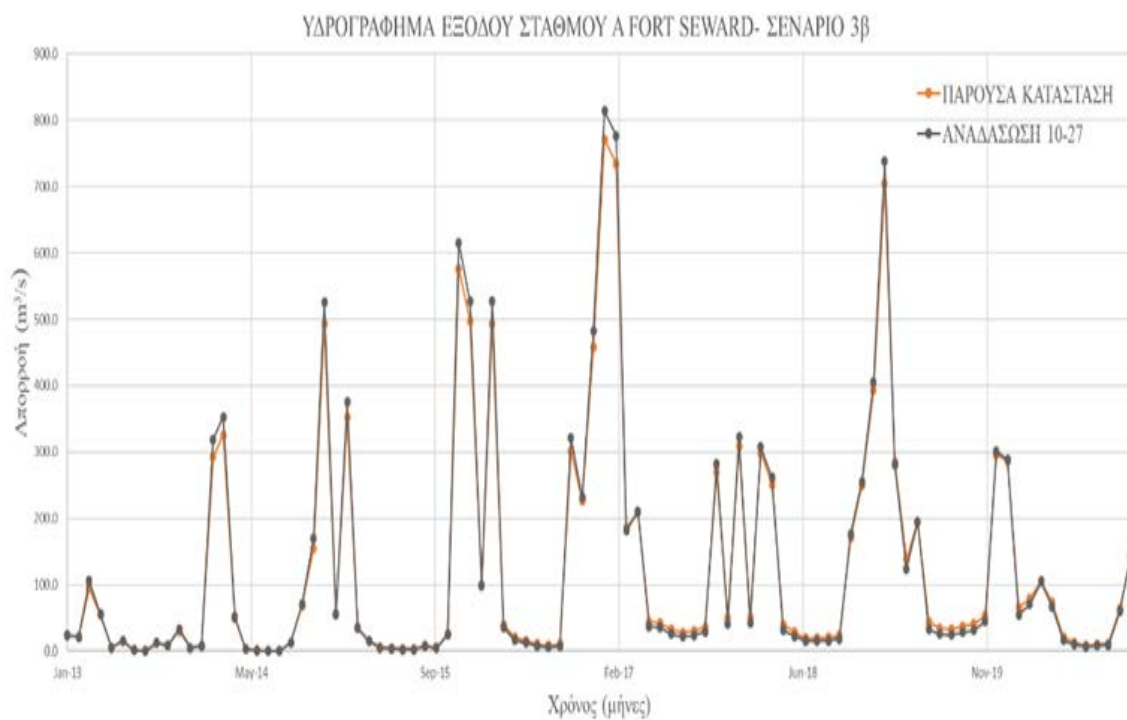
Εικόνα 5.27: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 3α - σταθμός A Fort Seward



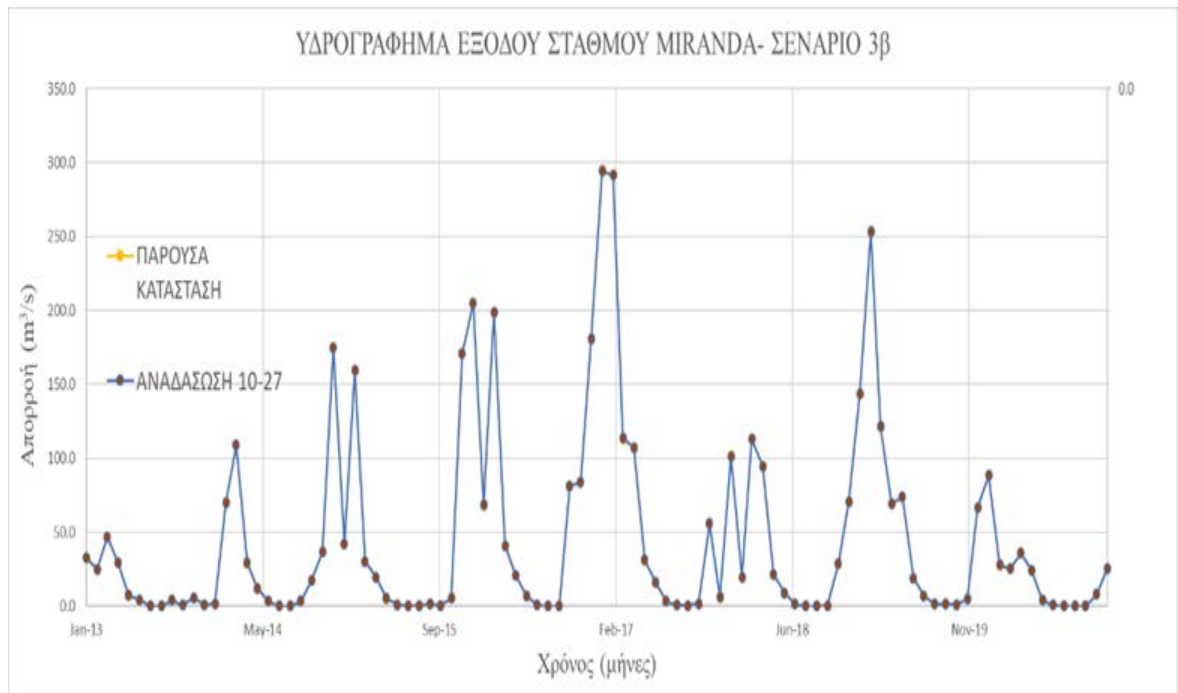
Εικόνα 5.28: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 3α - σταθμός Scotia

### 5.5.2. Σενάριο Φύτευσης 3β

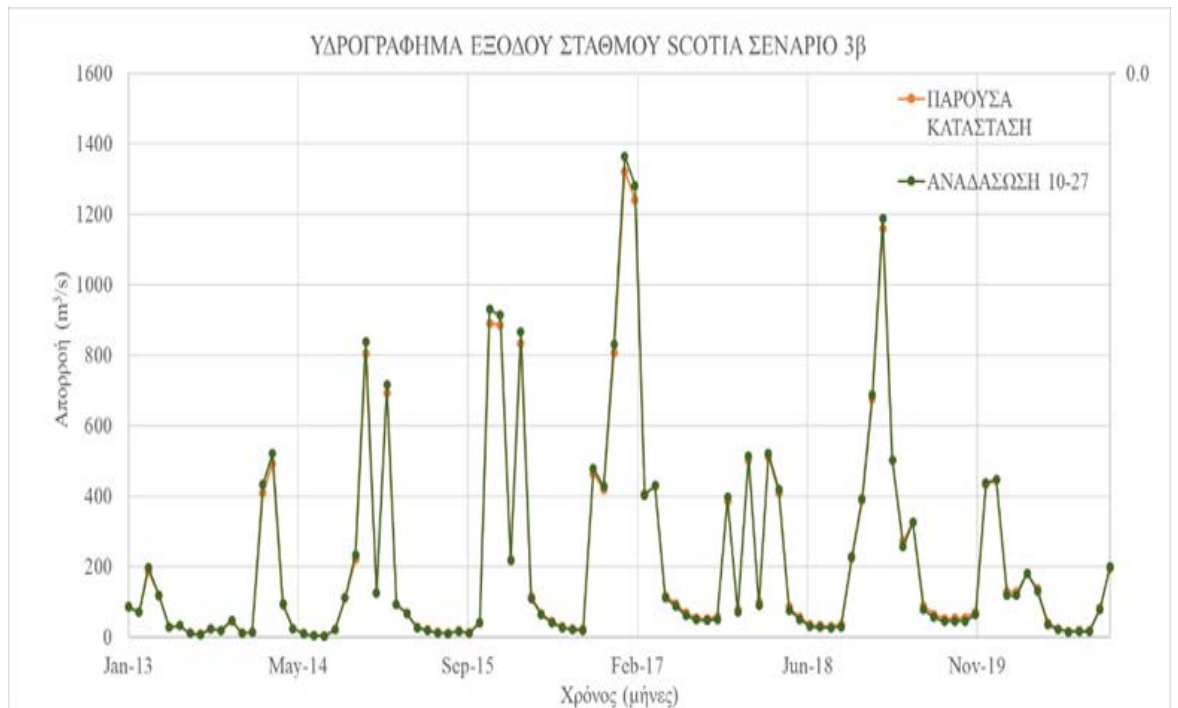
Το τελευταίο σενάριο που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούσε σε μια δενδροφύτευση μεγαλύτερης έκτασης προκειμένου για άλλη μια φορά να εξεταστεί η επίδραση στις επιφανειακές απορροές στις υπολεκάνες 10-27. Οι κλίσεις πάλι ήταν μικρότερες από 14%. Όπως και στην περίπτωση της υλοτομίας, έτσι και εδώ, λόγω των μικρών διαφορών στους αριθμούς CN, δεν παρουσιάστηκαν μεγάλες αλλαγές και πάλι στην επιφανειακή απορροή. Αυτό φαίνεται από τα υδατογραφήματα στις Εικόνες 5.29 έως και 5.31 και επαληθεύεται από τον Πίνακα 5.3 με τον στατιστικό έλεγχο t-test.



Εικόνα 5.29: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 3β - σταθμός A Fort Seward



Εικόνα 5.30: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 3β - σταθμός Miranda



Εικόνα 5.31: Υδρογράφημα εξόδου για το Σενάριο 3β - σταθμός Scotia

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 6.1. Αξιολόγηση των μέσων υδρολογικής προσομοίωσης

Τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης και τα συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας, απαιτούν αρκετό χρόνο για την εξοικείωση του χρήστη με αυτά. Το μοντέλο SWAT, όπως και το ArcMap του ArcGIS, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελούν μερικά από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται με σκοπό την υδρολογική προσομοίωση σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Η χρήση αυτή συμβαίνει, επειδή, προσφέρουν μια πληθώρα εργαλείων και δυνατοτήτων σχετικά με την μελέτη του υδρολογικού κύκλου του νερού και κατ' επέκταση προβλημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων. Παρακάτω θα αναλυθούν μερικά από τα βασικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας και οι λύσεις που προτείνονται από τον μελετητή, με σκοπό την μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων και την διευκόλυνση αυριανών χρηστών:

- Το πρώτο και κυριότερο βήμα της προσομοίωσης του μοντέλου SWAT αποτελεί η συλλογή των δεδομένων. Αυτή καθίσταται μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία, εφόσον συχνά ο χρήστης αντιμετωπίζει προβλήματα με την διαθεσιμότητα δεδομένων αναφορικά με τον καιρό, τις χρήσεις γης, τα εδάφη ή τις κλίσεις. Πολλές φορές αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο, ιδίως για περιοχές των ΗΠΑ. Όμως, και σε αυτό το ενδεχόμενο η εύρεση τους δεν καθίσταται πιο απλοϊκή, διότι οι ιστοσελίδες εύρεσης τους ανανεώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Έτσι, σε περίπτωση εκπόνησης μελέτης με χρήση του μοντέλου SWAT θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η περίοδος αναζήτησης και εύρεσης των απαραίτητων στοιχείων για την δόμηση του μοντέλου.
- Σημαντικό πρόβλημα, επίσης, αναφορικά με τα δεδομένα που δομούν το μοντέλο, είναι ότι αυτά θα πρέπει να έχουν μια συγκεκριμένη μορφή. Σε περίπτωση που απαιτείται, λοιπόν, «μετάφραση» των δεδομένων στον κώδικα που χρησιμοποιεί το SWAT, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος λαθών. Έτσι, αυξάνεται η αβεβαιότητα του μοντέλου και ο χρήστης οδηγείται σε λάθος συμπεράσματα.
- Στα προηγούμενα θα πρέπει να συμπληρωθεί ότι, σχετικά με τα δεδομένα βροχής, το SWAT δεν δύναται να «διαβάσει» χρονοσειρές οι οποίες

παρουσιάζουν κενά στις τιμές τους. Δυστυχώς, αυτό είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στην περίπτωση των μετεωρολογικών δεδομένων, διότι τυχόν δυσλειτουργίες ή προγραμματισμένες συντηρήσεις στους σταθμούς, δημιουργούν ασυνέχειες στις χρονοσειρές. Ως εκ τούτου ο χρήστης θα πρέπει να προβεί στην συμπλήρωση αυτών των κενών, γεγονός που αυξάνει και πάλι την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων αλλά και δημιουργεί ένα ζήτημα για το ποια είναι η καλύτερη μέθοδος συμπλήρωσης τους. Μια άλλη λύση είναι η αυτόματη συμπλήρωση αυτών των τιμών με την τιμή -99. Σε αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα τελεί μόνο του την συμπλήρωση.

- Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την μελέτη ήταν η συγγραφή των αρχείων wgen και των txt αρχείων που περιείχαν μέσα τους μετεωρολογικούς σταθμούς (με δεδομένα ύψους βροχής και θερμοκρασίας). Η διαμόρφωση αυτών των αρχείων θα πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή, εφόσον ένα παραπάνω κενό ή ένα λάθος σύμβολο, αποπροσανατολίζει τον αλγόριθμο του προγράμματος και δεν δύναται να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Χαρακτηριστικά στην παρούσα εργασία, κατά την δημιουργία των txt αρχείων που περιείχαν τις χρονοσειρές βροχών και θερμοκρασιών παρουσιαζόταν μια κενή σειρά στο τέλος της κάθε χρονοσειράς, λόγω της οποίας σταματούσε η προσομοίωση. Προβλήματα σαν αυτό είναι δύσκολο να εντοπιστούν από τον χρήστη και συνίσταται η επανάληψη της διαδικασίας από την αρχή.
- Απαραίτητη είναι επίσης η τοποθέτηση κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης μιας περιόδου προετοιμασίας για το πρόγραμμα. Την περίοδο που το πρόγραμμα κάνει «warm up» ολοκληρώνονται μερικοί υδρολογικοί κύκλοι και έτσι τα αποτελέσματα που έπονται αυτής της περιόδου χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Ακόμα, ο μελετητής συμπεραίνει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσίαζαν συμβατότητα σε ένα βαθμό με τις δεδομένες τιμές απορροής από τους σταθμούς, πριν ακόμα τελεστεί η βαθμονόμηση του (calibration). Αυτό οφείλεται στο ότι η περιοχή μελέτης βρισκόταν εντός των ΗΠΑ, όπου και υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων που παρέχουν στο κοινό οι διάφορες δημόσιες υπηρεσίες. Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα οι βροχές που λαμβάνει κανείς από τη NOAA είναι ανάλογες των απορροών της USGS.



## **6.2. Αξιολόγηση της λεκάνης απορροής**

Το SWAT, παρ' ότι είναι ένα ιδιαίτερα πολυσύνθετο πρόγραμμα, είναι και ιδιαίτερα χρήσιμο για την προσέγγιση ζητημάτων σχετικών με τις παρακολούθηση της εξέλιξης υδρολογικών παραμέτρων. Ο χρήστης δύναται να μελετήσει την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, της ανθρωπογενούς παρέμβασης ή των φυσικών καταστροφών καθώς και να εξετάσει διαφορετικά σενάρια διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Έτσι και στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν διάφορα σενάρια τα οποία επέτρεψαν την αξιολόγηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Eel από τον μελετητή, σε επίπεδο απορροών.

- Η επιφανειακή απορροή της λεκάνης είναι σχετικά μικρή, κάτι αναμενόμενο λόγω της χρήσης γης και της κάλυψης του εδάφους.
- Η πυρκαγιά, ακόμη και αυτή στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είχε σχετικά μικρή επίπτωση στις απορροές, κάτι που πάλι εξηγείται από τη σχετικά μικρή μεταβολή των τιμών CN.
- Ακόμα μικρότερη ήταν η μεταβολή των CN και, συνεπώς, και των απορροών στην περίπτωση της μεταβολής της χρήσης γης από βοσκότοπους σε δασική έκταση και αντίστροφα.

## **6.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η επιστήμη της υδρολογίας στηρίζει την συνεχή εξέλιξη στα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης. Η εξέλιξη, λοιπόν, της μοντελοποίησης θα πρέπει να αποτελέσει βασικό στόχο για τον αυριανό μελετητή, προκειμένου να αναπτυχθούν ακόμα πιο αξιόπιστα μοντέλα, καθώς και να μειωθεί η αβεβαιότητα των ήδη υπαρχόντων. Βασικό στάδιο προς αυτόν τον σκοπό θα πρέπει να είναι η απλοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων, όπως και η εξασφάλιση της διαθεσιμότητά τους. Όπως έχει προαναφερθεί η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Η ανάπτυξη ενός πυκνότερου δικτύου σταθμών (μετεωρολογικών, μέτρησης απορροής κλπ) θα μπορούσε να είναι το πρώτο βήμα για μια αναβάθμιση των υδρολογικών μελετών. Αυτό, διότι, οι παρατηρήσεις των σταθμών αποτελούν το μοναδικό αξιόπιστο στοιχείο στα πλαίσια μια επιστήμης η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα στις προβλέψεις της.

Μπορεί να διαπιστωθεί ότι η ανάπτυξη τόσο της μοντελοποίησης όσο και η διαθεσιμότητα υδρολογικών δεδομένων βρίσκεται σε ένα καλό επίπεδο εντός των ΗΠΑ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σε συνεργασία με τους επιστήμονες θα πρέπει να κάνει μεγάλα βήματα προκειμένου να επιτύχει ανάλογα αποτελέσματα και στον Ευρωπαϊκό χώρο, ιδίως στην Ελλάδα.

Τέλος, η παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται για μια ποσοτική μελέτη, η οποία υπολογίζει την επίδραση των αλλαγών χρήσεων γης στις απορροές της περιοχής μελέτης. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε στο μέλλον και η μελέτη και από ποιοτικής άποψης των αντίστοιχων σεναρίων, π.χ., διάβρωση και μεταφορά φερτών, ώστε να υπάρξουν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα για την λεκάνη απορροής του ποταμού Eel. Βέβαια, η εμφάνιση στην περιοχή μικρών περιοχών με χρήση γης γεωργική καλλιέργεια, μας οδηγεί στην υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις του ποταμού σε νιτρικά (N), φωσφόρο (P) και φυτοφάρμακα θα κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική**

Γκόφας Α (2001) Εγχειρίδιο Δασοπροστασίας. Γιακούδη-Γιαπούλη, 342 σελ., ISBN-13: 9789607425409

Καπερώνης Σ (2016) Μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού με χρήση του μοντέλου SWAT και προτάσεις διαχείρισης για την μείωση των εξαγόμενων ρύπων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Μιμίκου Μ, Μπαλτάς Ε (2018). Τεχνική Υδρολογία, 6η Έκδοση, Αθήνα, Ελλάδα.

Παπαθεοδοσίου Μ, Χριστοδούλου Δ (2009) Επιπτώσεις των Πυρκαγιών στην Υδρολογία και τη Διάβρωση: Η Περίπτωση της Πάρνηθας. Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Τσακίρης Γ (2006) Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση. Τόμος ΙΙ: Εγγειοβελτιωτικά Έργα, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Τσιχριντζής Β (1999) Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία, Τόμος 1: Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών, Έκδοση 2<sup>η</sup>, Εκδ. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα.

### **Αγγλική**

Ali I, Bruen M (2016) Methodology and application of the combined SWAT-HSPF model. Environmental Processes 3:645–661. DOI: 10.1007/s40710-016-0167-x.

Batelis CS, Nalbantis I (2014) Potential effects of forest fires on streamflow in the Enipeas River Basin, Thessaly, Greece. Environmental Processes 1:73–85. DOI: 10.1007/s40710-014-0004-z

Boskidis I, Gikas G, Sylaios G, Tsihrintzis V (2012) Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos river basin. Water Resources Management 26:3023–3051. DOI: 10.1007/s11269-012-0064-7

- Boskidis I, Gikas GD, Pisinaras V, Tsihrintzis VA (2010) Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 45:1421–1440. DOI: 10.1080/10934529.2010.500936
- Brown, WM, Ritter JR (1971) Sediment Transport and Turbidity in the Eel River Basin, California. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1986. DOI: 10.3133/wsp198.
- Budamala V, Baburao Mahindrakar A (2020) Integration of adaptive emulators and sensitivity analysis for enhancement of complex hydrological models. *Environmental Processes* 7:1235–1253. DOI: 10.1007/s40710-020-00468-x.
- Bulti AT (2021) The influence of dam construction on the catchment hydrologic behavior and its effects on a discharge forecast in hydrological models. *Water Resources Management* 35:2023–2037. DOI: 10.1007/s11269-021-02829-z.
- Chattopadhyay S, Edwards D, Yu Y, Hamidisepehr A (2017) An assessment of climate change impacts on future water availability and droughts in the Kentucky river basin. *Environmental Processes* 4:477–507. DOI: 10.1007/s40710-017-0259-2.
- Colman EA (1951) Fire and water in southern California's mountains. U.S. Forest Service of California for Range Experimental Station.
- Dahal V, Shakya NM, Bhattarai R (2016) Estimating the impact of climate change on water availability in Bagmati basin, Nepal. *Environmental Processes* 3:1–17. DOI: 10.1007/s40710-016-0127-5.
- DeBano LF, Daniel GL, Ffolliot PF (1998) *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-16356-5
- Gautam S, Dahal V, Bhattarai R (2019) Impacts of DEM source, resolution and area threshold values on SWAT generated stream network and streamflow in two distinct Nepalese catchments. *Environmental Processes* 6:597–617. DOI: 10.1007/s40710-019-00379-6.
- Gikas GD, Yiannakopoulou T, Tsihrintzis VA (2006) Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environmental Modeling and Assessment* 11:219-233. DOI: 10.1007/s10666-005-9017-3

- Guse B, Pfannerstill M, Fohrer N (2015) Dynamic modelling of land use change impacts on nitrate loads in rivers. *Environmental Processes* 2:575–592. DOI: 10.1007/s40710-015-0099-x.
- Kaini P, Artita K, Nicklow J (2012). Optimizing structural best management practices using SWAT and genetic algorithm to improve water quality goals. *Water Resources Management* 26:1827–1845. DOI 10.1007/s11269-012-9989-0
- Koch S, Bauwe A, Lennartz B (2013) Application of the SWAT model for a tile-drained lowland catchment in North-Eastern Germany on subbasin scale. *Water Resources Management* 27:791–805. DOI: 10.1007/s11269-012-0215-x
- Kornecki TS, Sabbagh GJ, Storm DE (1999) Evaluation of runoff, erosion and phosphorus modeling system–Simple. *Journal of the American Water Resources Association* 35(4):807–820. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04176.x.
- Li Y, DeLiberty T (2020) Assessment of urban streamflow in historical wet and dry years using SWAT across Northwestern Delaware. *Environmental Processes* 7:597–614. DOI: 10.1007/s40710-020-00428-5
- Liu Y, Yang W, Yu Z, Lung I, Gharabaghi B (2015) Estimating sediment yield from upland and channel erosion at a watershed scale using SWAT. *Water Resources Management* 29:1399–1412. DOI: 10.1007/s11269-014-0729-5.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions ASAE* 50(3): 885–900.
- Narsimlu B, Gosain A, Chahar B, Singh SK, Srivastava P (2015) SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari river basin, India, using sequential uncertainty fitting. *Environmental Processes* 2:79–95. DOI: 10.1007/s40710-015-0064-8.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR., Williams J R (2009) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Water Resources Institute 406.
- Niraula R, Norman L, Meixner T, Callegary J (2012) Multi-gauge calibration for modeling the semi-arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico border area using SWAT. *Libertas Academica Ltd*: 41-57. DOI: 10.4137/ASWR.S9410

- Papathanasiou C, Makropoulos C, Mimikou M (2015) Hydrological modelling for flood forecasting: Calibrating the post-fire initial conditions. *Journal of Hydrology* 529(3): 1838-1850. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.038
- Parajuli P, Jayakody P, Ouyang Y (2018) Evaluation of using remote sensing evapotranspiration data in SWAT. *Water Resources Management* 32:985–996. DOI: 10.1007/s11269-017-1850-z
- Pisinaras V, Petalas C, Gikas GD, Gemitzi A, Tsihrintzis VA (2010) Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250:274–286. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.044
- Rani S, Sreekesh S (2019) Evaluating the responses of streamflow under future climate change scenarios in a Western Indian Himalaya watershed. *Environmental Processes* 6:155–174. DOI: 10.1007/s40710-019-00361-2.
- Ray P, Wi S, Schwarz A, Correa M, He M, Brown C (2020) Vulnerability and risk: climate change and water supply from California’s Central Valley water system. *Climate Change* 161:177–199. DOI: 10.1007/s10584-020-02655-z
- Rycroft HB (1947) A note on the immediate effects of veldburning on stormflow in a Jonkershoek catchment. *Journal of South African Forest Association* 15(80):85
- Scott DF (1993) The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology* 150(2–4):409–432
- St-Pierre F, Tardif F, Rodriguez M, Pelletier G (2020) Comparison of hydrological model-based and geographical-based approaches for estimating water travel times for source water protection. *Environmental Processes* 8:99–117. DOI: 10.1007/s40710-020-00473-0.
- Varanou E, Gkouvatsou E, Baltas E, Mimikou M (2002) Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of Soil and Water Assessment Tool Model. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(3): 228-244. DOI: 10.1061/~ASCE!1084-0699~2002!7:3~228!
- Winchell M, Srinivasan R, Di Luzio M, Arnold J (2013) ArcSWAT Interface for SWAT2012 User’s Guide. Blackland Research and Extension Center, Texas

AgriLife Research, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Temple, Texas.

US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) (1986) Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55

## Ιστότοποι

1. <https://www.ppic.org/publication/water-use-in-california/>
2. [https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_in\\_California](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_in_California)
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_in\\_California#The\\_State\\_Water\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_in_California#The_State_Water_Project)
4. <https://www.mrlc.gov/viewer/>
5. <https://soilseries.sc.egov.usda.gov/>
6. <https://www.watereducation.org/aquapedia-background/eel-river>
7. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
8. <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>
9. <https://www.noaa.gov/>
10. [https://waterdata.usgs.gov/nwis/current?huc\\_cd=18010105&index\\_pmcode\\_S TATION\\_NM=1&index\\_pmcode\\_00065=3&index\\_pmcode\\_00060=4&index\\_pmcode\\_00062=5&index\\_pmcode\\_72020=6&sort\\_key=site\\_no&group\\_key=county\\_cd&sitefile\\_output\\_format=html\\_table&index\\_pmcode\\_DATETIME=2](https://waterdata.usgs.gov/nwis/current?huc_cd=18010105&index_pmcode_S TATION_NM=1&index_pmcode_00065=3&index_pmcode_00060=4&index_pmcode_00062=5&index_pmcode_72020=6&sort_key=site_no&group_key=county_cd&sitefile_output_format=html_table&index_pmcode_DATETIME=2)
11. <https://www.fire.ca.gov/>
12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Christmas\\_flood\\_of\\_1964](https://en.wikipedia.org/wiki/Christmas_flood_of_1964)
13. <https://www.northcoastjournal.com/>
14. <https://wildlandsconservancy.org/>
15. [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2\\_053629](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2_053629)