ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΕΡΙΤΗ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΜΑΡΑΓΚΑΚΗ ΑΝΤΩΝΙΑΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Νικολαΐδης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καρατζάς Γεώργιος

Νεραντζάκη Σοφία

Χανιά, Απρίλιος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος κύριο Νικόλαο Νικολαΐδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γεώργιο Καρατζά, για όλη τη γνώση που μου προσέφερε μέσω των μαθημάτων του, καθ’ όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών σπουδών, καθώς και την διδάκτωρ Νεραντζάκη Σοφία για την συνεχή καθοδήγηση της στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ όλους τους παραπάνω για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπαλλήλους της Δ.Ε.Υ.Α.Χ., καθώς και τον κύριο Κιμιωνή Εμμανουήλ που μου παρείχαν σημαντικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική αυτή εργασία.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά και τους φίλους μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόηση τους, καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ABSTRACT

This dissertation is about Keritis-Therisos river basin which is located in the prefecture of Chania on the island of Crete. It is a typical Mediterranean river basin with complex hydrogeology. It has a surface area of 210 Km^2 and it provides the drinking and irrigation water of the most populated area of the prefecture of Chania. The dissertation examines the basic principles of hydrological modeling as well as the structure of the SWAT model (Soil Water Assessment Tool) in combination with the karst model of two reservoir (Nikolaidis et.al. 2013). These models were used for the updating of the modeling of Meskla and Agyia (Kalamionas, Platanos, Kolympa) springs . Data are available for Meskla springs (1978-2005), Agyia (1978-1985) and for Kalamiona (1971-1979). In addition, there are data for 2012 and 2014 hydrologic years for Keritis river and 2019-2020 for Agia springs. These data were used for the fine tuning of the calibration of the model for the area. At the same time, the necessary information regarding the meteorological, geological and hydrological data of the study area also are available. Statistical indicators showed that the hydrologic modeling of Keritis river basin was acceptable. The hindcasting of the hydrological flows for the past 50 years allowed the use of statistical analysis (Gumbel and Log Pearson) for the determination of the 50 year return flood over a 24 hour period. Finally, the rainfall analysis of 2019 identified the relationship between peak hourly flow to flood average flow. This information was used to determine the design flood flow with 50 year return period and hourly duration for the design of hydraulic and flood retention structures ($291.9 \frac{m^3}{s}$).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται την λεκάνη απορροής του Κερίτη-Θερίσου η οποία βρίσκεται στο νησί της Κρήτης και υπάγεται στο νομό Χανίων. Αποτελεί μια τυπική Μεσογειακή λεκάνη απορροής με σύνθετη υδρογεωλογία. Εκτείνεται σε επιφάνεια 210 km^2 και είναι μια από τις σπουδαιότερες υδρολογικές λεκάνες απορροής, καθώς φορτίζεται με μεγάλο όγκου νερού και τροφοδοτεί ένα μέρος του νομού Χανίων. Στο κυρίως μέρος της εργασίας, περιγράφονται οι βασικές αρχές των υδρολογικών μοντέλων και αναλύεται η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου SWAT (Soil Water Assesment Tool) σε συνδυασμό με το καρστικό μοντέλο των δύο ταμιευτήρων (Nikolaidis et al.,2013). Τα προαναφερθείσα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την επικαιροποίηση των πηγών των Μεσκλών και της Αγυιάς (Καλαμιώνας, Πλάτανος, Κολύμπα), καθώς και για την επιμέρους μοντελοποίηση των πηγών αυτής (ειδικότερα του Καλαμιώνα και του Πλατάνου, Κολύμπας). Πιο συγκεκριμένα, για τα Μεσκλά υπάρχουν δεδομένα παροχής ύδατος για τα έτη 1978-2005, για το σύνολο των πηγών της Αγυιά υπάρχουν δεδομένα για τα έτη 1978-1985, για την πηγή του Καλαμιώνα υπάρχουν δεδομένα 1971-1979 ενώ για τον ποταμό Κερίτη υπάρχουν δεδομένα για τα έτη 2012-2014. Παράλληλα, δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν τα μετεωρολογικά, τα γεωλογικά και τα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής μελέτης. Στο στάδιο της μεθοδολογίας, αναφέρονται αναλυτικά τα βήματα που ήταν απαραίτητο να ακολουθηθούν για τη δόμηση του μοντέλου, για την προσομοίωση της παροχής ύδατος καθώς και για τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών αποτελεσματικότητας του μοντέλου. Οι δείκτες αυτοί τελικά, αποδεικνύουν ότι τα παραπάνω μοντέλα είναι αξιόπιστα για τη μοντελοποιήση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Κερίτη. Τέλος, πραγματοποιείται η υδρολογική ανάλυση του έτους 2019 και με την βοήθεια στατιστικών μεθόδων Gumbel και Log Pearson υπολογίστηκε η παροχή ύδατος που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών 291.9 $\frac{m^3}{s}$ ενώ παράλληλα υπολογίστηκε και η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση που αφορά το σχεδιασμό υδραυλικών έργων.

Περιεχόμενα

Λίστα εικόνων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τις τελευταίες δεκαετίες αποτελεί κοινή παραδοχή ειδικών και μη, ότι οι παράμετροι που απαρτίζουν το κλίμα του πλανήτη έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές. Έτσι, από τον 19^{ο} αιώνα, έχει ξεκινήσει η αύξηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας.

Κάθε μία από τις τρεις τελευταίες δεκαετίες ήταν θερμότερη από την προηγούμενή της, από τότε που άρχισε η καταγραφή στοιχείων το 1850. Οι επιφανέστεροι κλιματολόγοι του κόσμου πιστεύουν ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες που επιδρούν στη σύνθεση της ατμόσφαιρας είναι σχεδόν σίγουρα, η κύρια αιτία της υπερθέρμανσης που παρατηρείται από τα μέσα του 20ού αιώνα (European Youth Portal). Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Διακυβερνητικής Ομάδας για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), αυτή η άνοδος θα συνεχιστεί τον 21ο αιώνα στις περισσότερες περιοχές του κόσμου, με αύξηση που αναμένεται να κυμαίνεται μεταξύ 1,8 - 4 °C (IPCC, 2007), καθώς εκτιμάται, ότι θα συμβάλει στην αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας και της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (IPCC, 2013). Ένα καιρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως ακραίο είτε από την έντασή του, είτε από την διάρκειά του ή και από την συχνότητα επανεμφάνισης του. Ως ακραία καιρικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται εκείνα τα φαινόμενα στα οποία παρατηρούνται οι μέγιστες ή οι ελάχιστες τιμές μετεωρολογικών παρατηρήσεων, ασυνήθιστων ή και πολύ σπάνιων που συμβαίνουν σε μια περιοχή. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι στην περιοχή της Μεσογείου η ένταση των θερμών εισβολών αναμένεται να αυξηθεί δραστικά και η μεγάλη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας προκαλεί την συνεχή αύξηση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών (Γιαννακόπουλος, 2009). Αυτές οι αλλαγές αναμένεται να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στον πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή τομέα (κτηνοτροφία, αλιεία, τουρισμός, φυσικές καταστροφές, αστικά περιβάλλοντα κ.λπ.) (Τράπεζα της Ελλάδος, 2011).

Αυξημένες δραματικά είναι οι αναφορές, από πολλές περιοχές του κόσμου, για την ένταση και τη συχνότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως είναι οι πλημμύρες, οι ξηρασίες, οι καύσωνες και τα επεισόδια ακραίων αρνητικών θερμοκρασιών. Αν και τα τελευταία 60 χρόνια η ετήσια βροχόπτωση έχει μειωθεί (Soulios et al., 2012), ωστόσο, λόγω της αλλαγής του κλίματος (Stournaras, 2007), οι βροχοπτώσεις καθώς και άλλα κλιματικά φαινόμενα εκδηλώθηκαν υπό ακραίες συνθήκες (IPCC 2012, ΕΜΕΚΑ 2011, Ψηλοβίκος, 2014). Δύο γνωστά ακραία πλημμυρικά φαινόμενα την τελευταία πενταετία για την χώρα της Ελλάδας είναι αυτά που συνέβησαν στις 14-15 Νοεμβρίου του έτους 2017 στη Μάνδρα Αττικής, καθώς και στο νησί της Κρήτης στις 24-26 Φεβρουαρίου του έτους 2019.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το γεγονός στην Μάνδρα Αττικής στις 15 Νοεμβρίου 2017,κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας υψηλής εντάσεως, το ύψος της βροχόπτωσης έφτασε τα 300 mm σύμφωνα με την καταγραφή του βροχομετρικού σταθμού σε 8 ώρες (200mm μόνο σε 3 ώρες) σε μία περιοχή έκτασης 72 Km^2, με αποτέλεσμα εκτεταμένα πλημμυρικά φαινόμενα, τα οποία προκάλεσαν υλικές και οικονομικές ζημιές ακόμα και τον θάνατο 23 ανθρώπων. Στην εικόνα 1 απεικονίζονται διαφορετικά στιγμιότυπα με τα καταστροφικά αποτελέσματα αυτής της καταιγίδας καθώς και το μέγεθος του πλημμυρικού φαινομένου.

Εικόνα 1: Φωτογραφίες από την πλημμύρα στη Μάνδρα, Αττικής

Όσον αφορά το πλημμυρικό γεγονός της Κρήτης στις 24-25 Φεβρουαρίου η βροχόπτωση που έπεσε στο Νομό Χανίων άγγιξαν περίπου τα 380 mm με μέγιστη ωριαία βροχόπτωση 28mm σύμφωνα με τον σταθμό του Ψυχρού Πηγαδιού που διαχειρίζεται το Πολυτεχνείο Κρήτης. Συνολικά στο νησί της Κρήτης υπήρξαν πέντε απώλειες ανθρώπινων ζωών, ενώ στο νομό Χανίων καταγράφηκαν τουλάχιστον τρείς πτώσεις γεφυρών και τεράστιες καταστροφές στο οδικό δίκτυο. Στην εικόνα 2, απεικονίζονται ενδεικτικά κάποιες καταστροφές που υπέστη το οδικό δίκτυο, ενώ στην εικόνα 3 απεικονίζεται η πτώση της γέφυρας του Κερίτη, του Πλατανιά και του Πατελαρίου αντίστοιχα.

Εικόνα 2: Καταστροφές οδικού δικτύου

ΓΕΦΥΡΑ ΚΕΡΙΤΗ

ΓΕΦΥΡΑ ΠΛΑΤΑΝΙΑ

ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ ΠΑΤΕΛΑΡΙΟΥ

Εικόνα 3: Πτώση τριών γεφυρών στο Νομό Χανίων

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη, ειδικότερα με την εντατική ανάπτυξη γεωργίας και της κτηνοτροφίας, έχουν οδηγήσει στην αλόγιστη υπερ-εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων. Οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής πιστεύεται ότι θα είναι πιο δυσμενείς στην περιοχή της Μεσογείου, όπου υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες ερημοποίησης μεγάλων εκτάσεων (Alpert et al.,2008).

Υπό το πρίσμα των παραπάνω ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), έθεσε προτεινόμενες στρατηγικές προστασίας των υδάτινων πόρων προς τη διεθνή κοινότητα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αντιλαμβανόμενη τη ζωτική σημασία της διατήρησης και προστασίας των υδάτινων πόρων εντός των συνόρων της, προχώρησε και συνεχίζει να καταστρώνει και να εφαρμόζει περιβαλλοντικά προγράμματα σχετικά με τη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Στο νόμο 1650/86 λαμβάνεται ειδική πρόνοια για την προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, τα οποία θεωρούνται ως φυσικοί πόροι και οικοσυστήματα τα οποία περιλαμβάνονται στην έννοια του φυσικού περιβάλλοντος (Γλυκερία Π. Σιούτη 2018). Στη συνέχεια, θεσπίστηκε νέα κοινοτική οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα, η 2000/60/ΕΚ στην οποία επισημαίνεται ότι τα κράτη μέλη πρέπει να ορίσουν, καταρχάς, τα υδατικά διαμερίσματα στο πλαίσιο της επικράτειας τους με βάση τις επιμέρους λεκάνες απορροής ποταμού και να εκπονήσουν για αυτές σχέδιο διαχείρισης (ΣτΕ 1688/2005 Ολομ). Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ, επιχειρεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη βιώσιμη διαχείριση του υδάτινου περιβάλλοντος της Ευρώπης. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται στο προοίμιο της Οδηγίας ότι «τα ύδατα είναι , καταρχήν, ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι. Ιδίως η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους...» και «Η καλή ποιότητα του ύδατος θα εξασφαλίσει την παροχή πόσιμου ύδατος στον πληθυσμό».

Επομένως, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, τόσο για την εναρμόνιση στην προαναφερθείσα οδηγία όσο και για την αντιμετώπιση των ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων κρίνεται αναγκαία σε κάθε λεκάνης απορροής να πραγματοποιηθεί η ορθή υδρολογική ανάλυση με την χρήση μαθηματικών μοντέλων, καθώς και η υδραυλική ανάλυση όπου αυτή απαιτείται. Όσον αφορά την λεκάνη απορροής του Κερίτη, απαιτείται η εκπόνηση τόσο της υδρολογικής ανάλυσης, η οποία πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική, όσο και της υδραυλικής με την χρήση μαθηματικών μοντέλων, έτσι ώστε να υπολογιστεί η παροχή σχεδιασμού ύδατος που έχει επαναληψημότητα μία φορά στα πενήντα χρόνια.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το νερό αποτελεί έναν σημαντικό φυσικό πόρο και οι ανάγκες για την σωστή διαχείριση των υδάτων γίνεται ολοένα και σπουδαιότερη . Η διπλωματική αυτή εργασία, έχει ως στόχο την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής Κερίτη- Θερίσου, δηλαδή την επικαιροποίηση των παροχών εκφορτίσεων των πηγών της Αγυιάς (Πλάτανος, Κολύμπα, Καλαμιώνας) και των Μεσκλών καθώς και η επιμέρους μοντελοποίηση των πηγών της Αγυιάς, ειδικότερα του Πλατάνου με της Κολύμπας, και του Καλαμιώνα. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και αναλύθηκε η υδρολογική ανάλυση του έτους 2019, το οποίο ήταν σημαντικό από υδρολογικής άποψης. Για τον αποδοτικό σχεδιασμό των υδραυλικών έργων πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση της υδρολογικής πληροφορίας, και υπολογίστηκε η παροχή του ποταμού Κερίτη που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών. Οι θεωρητικές κατανομές πιθανότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική ανάλυση είναι η κατανομή Pearson III, η κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου Ι (Gumbel) και η μέθοδος POT (peaks over threshold). Τις περισσότερες φορές κατά το σχεδιασμό των υδραυλικών έργων λαμβάνονται υπόψη οι ακραίες τιμές του υδρολογικού φαινομένου (μέγιστες ή ελάχιστες).

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος που έχει μεγάλη σημασία, γιατί είναι από τους βασικούς παράγοντες για τη ζωή και την ανάπτυξη. Τα τελευταία χρόνια το αγαθό αυτό βρίσκεται σε ανεπάρκεια λόγω της κακής διαχείρισης του από τον άνθρωπο και την αλόγιστη υπερεκμετάλλευση του, η οποία προέρχεται από την συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού, τον τουρισμό, την εντατική καλλιέργεια και την άρδευση.

Η προέλευση του νερού ανάγεται στην αρχή της δημιουργίας της γης, όταν στην ατμόσφαιρα επικρατούσαν διάφορα αέρια (N_2, O_2κλπ) και υδρατμοί. Οι υδρατμοί αυτοί με τη συνεχή πτώση της θερμοκρασίας στον πλανήτη συμπυκνώθηκαν και σχημάτισαν σταδιακά μάζες νερού. Διάφοροι ερευνητές συγκλίνουν στην άποψη ότι η ποσότητα του νερού που υπάρχει στη Γη είναι της τάξης μεγέθους $1.360 \times 10^6 \mathrm{Km}^3$ (Μήτρακας, 2016). Στον πίνακα 1 αναλύονται οι κατηγορίες και οι ποσότητες του νερού που υπάρχει στη Γη.

Πίνακας 1 : Εκτίμηση κατά κατηγορία του νερού της Γής

Μορφή νερού	Όγκος ($\times 10^3 \mathrm{Km}^3$)
Θάλασσες (αλμυρό νερό)	1.320.000
Παγετοί-Χιόνια	29.200
Υπόγεια νερά	8.250
Λίμνες	125
Εδαφική υγρασία	65
Ποταμοί	1.25
Λίμνες αλμυρού νερού-υφάλμυρα νερά	105
Νερό ατμόσφαιρας	13
Σύνολο	1.360×10^6

Το νερό καλύπτει το 71% της επιφάνειας της Γης. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, το 97.9 % του νερού της Γης είναι σε υγρή κατάσταση, ενώ το 97.25 % του συνολικού νερού της Γης είναι αλμυρό νερό (ωκεανοί, θάλασσες) ,δύσκολα εκμεταλλεύσιμο με τα σημερινά τεχνολογικά μέσα.

Από την αρκετά μεγάλη ποσότητα του νερού που υπάρχει στη Γη μόνο το 2.8% είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα (γλυκό νερό) και από αυτό το μεγαλύτερο μέρος 77.25% ή 2.1% του συνολικού είναι σε στερεά κατάσταση (πάγοι και χιόνια). Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 0.62% του νερού χαμηλής αλατότητας το μισό περίπου βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 800 m (Αγγελίδης, 1993) και έτσι ουσιαστικά δεν είναι διαθέσιμο. Θα πρέπει τέλος να επισημανθεί, ότι τα αποθέματα των νερών χαμηλής αλατότητας δεν διακρίνονται για το σταθερό τους ισοζύγιο στο χώρο και στο χρόνο, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη σωστής διαχείρισης των υδάτινων πόρων.

Αν ήταν εφικτό να κατανεμηθούν ομοιόμορφα τα αποθέματα του νερού σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη, θα δημιουργούνταν ένας υδάτινος μανδύας βάθους περίπου 3 χιλιομέτρων. Το νερό όμως, δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλες τις περιοχές του πλανήτη για το λόγο αυτό παρατηρούνται σε άλλες περιοχές πλημμύρες και σε άλλες λειψυδρία.

2.1.1 Δομή και ιδιότητες του νερού

- Σύνθεση

  Το μόριο του νερού αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και από ένα άτομο οξυγόνου. Επομένως, ο χημικός τύπος είναι H_2O. Το μόριο του νερού σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο με το οξυγόνο στην κορυφή και η γωνία των δεσμών H-O-H είναι 104.523°.

- Πυκνότητα

  Η πυκνότητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία (υποθέτοντας ατμοσφαιρική πίεση). Σε 0°C ο πάγος έχει πυκνότητα 0.91671$\frac{g}{ml}$, ενώ το νερό στους 0°C έχει πυκνότητα 0.99867 $\frac{g}{ml}$ (Μήτρακας, 2016). Το γεγονός ότι ο πάγος διογκώνεται κατά 8.3%, επιτρέπει από τη μια τη διατήρηση της ζωής κάτω από τις παγωμένες επιφάνειες υδάτινων οικοσυστημάτων (η μέγιστη πυκνότητα του νερού είναι 1.00000$\frac{g}{ml}$ στους 3.98 °C), ενώ από την άλλη απαιτείται η λήψη μέτρων για την προστασία των συστημάτων επεξεργασίας και μεταφοράς του νερού από την ψύξη.

- Τήξη και εξάτμιση

  Ο πάγος τήκεται στους 0°C και σχηματίζει υγρό, το οποίο βράζει και μετατρέπεται σε ατμό στους 100°C σε 1atm. Η τάση των ατμών εξηγεί, γιατί το νερό εξατμίζεται στην επιφάνεια, ακόμα και όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από το σημείο βρασμού.

2.2 Υδάτινοι πόροι

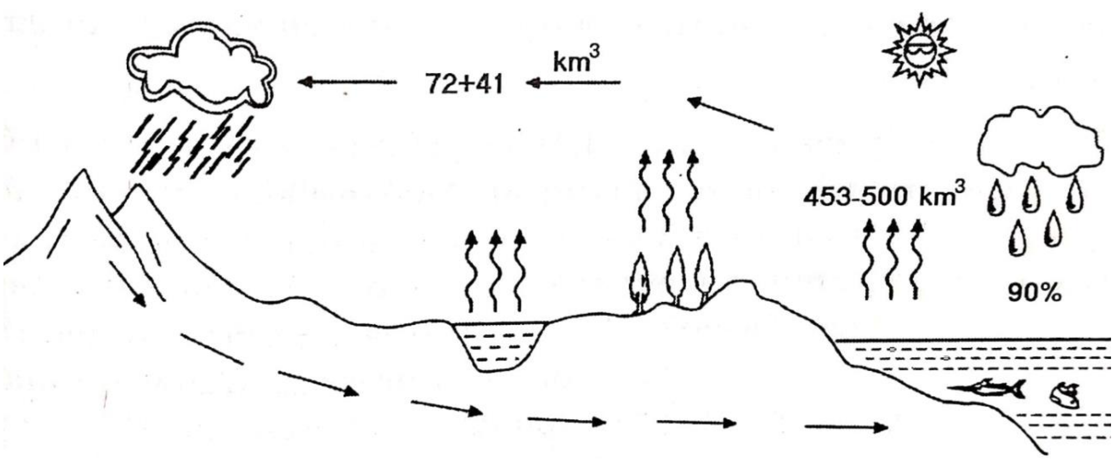
2.2.1 Υδρολογία και αντικείμενο μελέτης της

Η επιστήμη της υδρολογίας ασχολείται με την παρουσία του νερού στην Γη, την κυκλοφορία του, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του και την αλληλεπίδραση του με το περιβάλλον. Η μελέτη της υδρολογίας περιλαμβάνει την ατμόσφαιρα μέχρι ύψους δεκαπέντε περίπου χιλιομέτρων, την επιφάνεια και το εσωτερικό της λιθόσφαιρας μέχρι βάθους περίπου ενός χιλιομέτρου και την υδρόσφαιρα (Μπαλτάς,2013). Το αντικείμενο με το οποίο πραγματεύεται η υδρολογία είναι η ανάλυση, η εξαγωγή συμπερασμάτων και νόμων για τις διάφορες διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα για την χωροχρονική εξέλιξη των υδρολογικών φαινομένων. Τέλος η υδρολογία ως δευτερογενής επιστήμη στηρίζεται στα επιμέρους συμπεράσματα τα οποία συγκεντρώνει από τις διάφορες επιστήμες και τα χρησιμοποιεί για την περαιτέρω ανάλυση τους.

2.2.2 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί σχηματική περιγραφή μια σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σ’ αυτόν τον κύκλο το νερό εμφανίζεται με όλες τις πιθανές μορφές του: υγρό, αέριο (υδρατμούς), στερεό (χιόνι/χαλάζι). Ο κύκλος του νερού εξελίσσεται με έντονους ρυθμούς με αποτέλεσμα τη μεγάλη μεταβολή περιεκτικότητας του σε νερό ακόμη και από ώρα σε ώρα στην ατμόσφαιρα, αλλά και τις έντονες αλλαγές του καιρού. Με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας το νερό της θάλασσας και των ηπείρων (λίμνες,ποτάμια,έδαφος) εξατμίζεται (Αγγελίδης,1993). Στη συνέχεια, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται, σχηματίζουν σύννεφα που δημιουργούν την βροχή, το χιόνι, το χαλάζι (κατακρημνίσματα), τα οποία συλλέγονται στη Γη. Το νερό επιφανειακό ή υπόγειο, καταλήγει πάλι στη θάλασσα όπου μια νέα εξάτμιση θα συνεχίσει, αυτό ονομάζεται ‘’υδρολογικός κύκλος’’.

Υπολογίζεται κατά προσέγγιση ότι κάθε χρόνο 453,000-500,000 km^3 (Μήτρακας,2016) νερού εξατμίζονται από τις θάλασσες-ωκεανούς του πλανήτη. Από αυτήν την ποσότητα το 90% επιστρέφει με κατακρημνίσματα στη θάλασσα, ενώ το 10% περίπου 41,000 m^3 μεταφέρεται σε ηπειρωτικό τμήμα, όπου προστίθενται και 72,000 m^3 εξατμιζόμενου νερού από την ηπειρωτική επιφάνεια της Γής. Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται οι ετήσιες ποσότητες του νερού που εξατμίζονται.



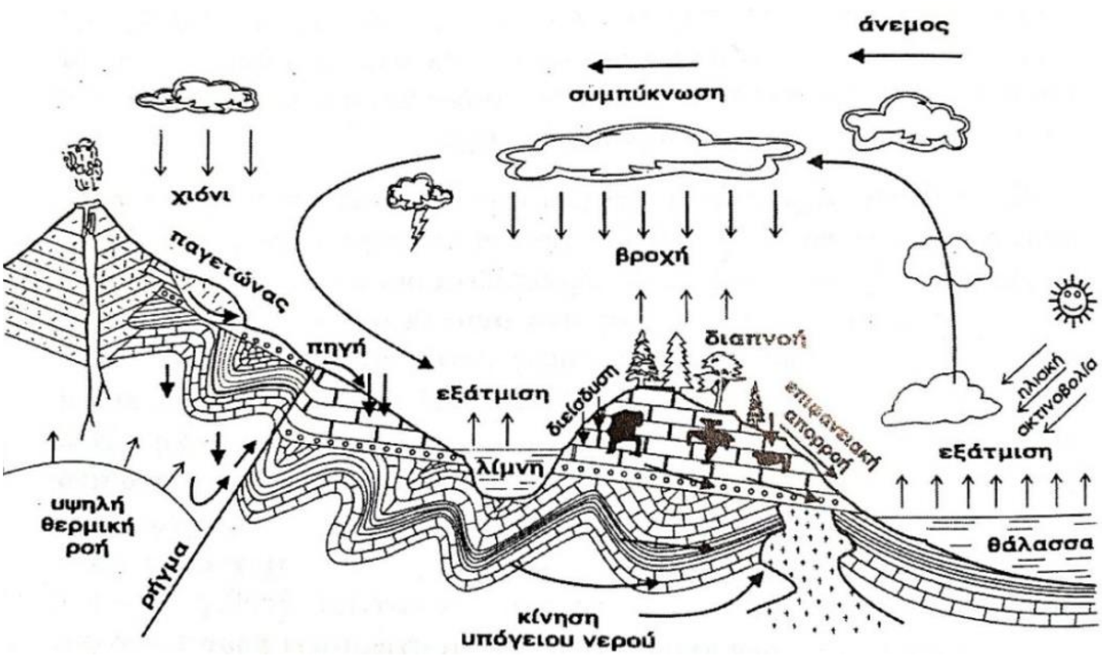
Εικόνα 4: Ποσότητες νερού ($\times 10^3$) που εξατμίζονται κάθε χρόνο (Αγγελίδης,1993)

Οι ποσότητες αυτές δημιουργούν τις ηπειρωτικές βροχές. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι τα ¾ των βροχοπτώσεων πέφτουν στους ωκεανούς ή στις θάλασσες και μόνο το ¼ πέφτει στη Γη.

Πιο αναλυτικά, το νερό εισέρχεται στην ατμόσφαιρα σε αέρια μορφή λόγω της εξάτμισης από τις επιφάνειες της θάλασσας, των λιμνών, των ποταμών, των εδαφών καθώς και την διαπνοή των φυτών, μιας μεγάλης σημασίας λειτουργία, τόσο για το βασικό ρόλο της στην κυκλοφορία του αγγειακού συστήματος και τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών , όσο και για το ρόλο της στη φωτοσύνθεση (Αγγελίδης, 1993). Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε νερό αέριας μορφής έχει ένα ανώτατο όριο, το όριο κορεσμού, το οποίο αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Έτσι, αν προστεθούν υδρατμοί πάνω από το όριο κορεσμού, αλλά κυρίως αν ψυχθεί μια αέρια μάζα και μειωθεί το όριο κορεσμού (αυτό γίνεται συνήθως με την ανύψωση και εκτόνωση της μάζας σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου επικρατούν μικρότερες πιέσεις), οι πλεονάζοντες υδρατμοί υγροποιούνται σχηματίζοντας σε μικροσκοπικό επίπεδο σταγονίδια ή παγοκρυστάλλους και σε μακροσκοπικό επίπεδο σύννεφα. Όταν πολλά σταγονίδια ή κρύσταλλοι συνενωθούν, η δύναμη της βαρύτητας υπερνικά την αεροδυναμική άνωση και έτσι δημιουργούνται αντίστοιχα η βροχόπτωση ή η χιονόπτωση, οι οποίες είναι διαφορετικές μορφές υετού ή κατακρημνισμάτων. Τα κατακρημνίσματα τροφοδοτούν με γλυκό νερό τα εδάφη και τους υποκείμενους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι με τη σειρά τους, εκφορτίζονται μέσω των πηγών και τροφοδοτούν τη ροή των ποταμών. Όταν η ένταση της βροχής είναι μεγάλη, το έδαφος δεν έχει τη δυνατότητα κατακράτησης και διήθησης αυτής, έτσι τα όμβρια νερά ρέουν επιφανειακά σχηματίζοντας την πλημμυρική απορροή.

Ένα μέρος του νερού που πέφτει στη Γη ρέει επιφανειακά πάνω στο έδαφος και αφού διανύσει μια μικρή ή μεγάλη διαδρομή, συγκεντρώνεται σε μεγαλύτερους αγωγούς, τους ποταμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους το οδηγούν στις λίμνες ή στις θάλασσες. Το τμήμα αυτό αποτελεί το επιφανειακό νερό. Ένα άλλο τμήμα από το μετεωρικό νερό (βροχή) δε φτάνει ποτέ στο έδαφος, επειδή κατά τη διαδρομή της πτώσης του εξατμίζεται ή αν φτάσει στο έδαφος πάνω στη βλάστηση, εξατμίζεται από τις ελεύθερες επιφάνειες των φύλλων των φυτών. Μια τρίτη κατηγορία νερού είναι αυτή που το νερό φτάνοντας στο έδαφος, περνά ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, στη συνέχεια παραλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών και ακολουθώντας τον υδρολογικό κύκλο διαπνέεται από τα φύλλα και απελευθερώνεται και πάλι στην ατμόσφαιρα.

Το υπόλοιπο νερό που δεν ανήκει στις παραπάνω κατηγορίες, είναι αυτό που τείνει να κινηθεί βαθύτερα και να συγκεντρωθεί σε βαθιά στρώματα. Παρόλη του όμως την προσπάθεια δεν φτάνει ποτέ ολόκληρο στον προορισμό του. Ένα μέρος από αυτό θα συγκρατηθεί από τους κόκκους των πετρωμάτων με δυνάμεις συνάφειας που υπερνικούν τη δύναμη της βαρύτητας. Έτσι, η ποσότητα αυτή του νερού δεν υπόκειται στη δύναμη της βαρύτητας και δεν μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει το υμενώδες και το υγροσκοπικό νερό. Σε αυτό θα προστεθεί ακόμη μια ποσότητα νερού που γεμίζει τα ανοίγματα των πετρωμάτων και θα σχηματίσει το βαρυτικό νερό. Αυτό το τμήμα από το αρχικό μετεωρικό νερό είναι αυτό που θα κατεισδύσει μέσα στο πέτρωμα ,θα εμπλουτίσει το υπόγειο νερό και θα αυξήσει τα αποθέματα του μέσα στο φυσικό υπόγειο ταμιευτήρα του, τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Το νερό από τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, αλλά και από τους επιφανειακούς ταμιευτήρες (λίμνες, ποτάμια) εξυπηρετεί την κάλυψη ανθρωπογενών αναγκών. Στην εικόνα 5 αναπαρίστανται οι διεργασίες που απαρτίζουν τον υδρολογικό κύκλο.



Εικόνα 5: Ο υδρολογικός κύκλος (Αγγελίδης, 1993)

Ο υδρολογικός κύκλος μπορεί να συντομευθεί ή και να διαφοροποιηθεί σε κάποια στάδια. Αυτό συμβαίνει πρώτον, όταν η βροχή πέσει κατευθείαν πάνω στη θάλασσα ή στις λίμνες και δεύτερον, όταν ο χρόνος πραγματοποίησης ενός κύκλου δεν είναι πάντα ο ίδιος. Κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας φαίνεται να έχει διακοπεί, ενώ κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας φαίνεται ότι είναι συνεχής. Τρίτον, η ένταση και η συχνότητα του κύκλου εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση και το κλίμα της περιοχής, επειδή η λειτουργία του είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους. Τέλος, οι παρεμβάσεις του ανθρώπου στον φυσικό αυτόν κύκλο είναι δυνατόν να προκαλέσουν ανεπανόρθωτες βλάβες.

2.3 Υδρολογικά μοντέλα.

Ως μοντέλο μπορεί να ορισθεί η <<απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας>>. Το ιδανικότερο μοντέλο, είναι αυτό το οποίο δίνει αποτελέσματα τα οποία συγκλίνουν στην πραγματικότητα με τη χρήση ελάχιστων παραμέτρων και ελάχιστης πολυπλοκότητας αυτού (Chow,1964). Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος και την κατανόηση-εξήγηση διάφορων υδρολογικών διεργασιών. Ένα μοντέλο απορροής μπορεί να ορισθεί ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που βοηθούν τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την διαχείριση των υδάτινων πόρων, την πρόβλεψη πλημμυρικών φαινομένων και ξηρασίας, την μελέτη της ποιότητας των υδάτων, την εκτίμηση της απορροής ως συνάρτηση διάφορων παραμέτρων (μετεωρολογικά, γεωμορφολογικά, υδρολογικά κτλ) που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της λεκάνης απορροής (Schnoor,2003). Δύο από τα σημαντικότερα δεδομένα εισαγωγής που απαιτούνται σε όλα τα υδρολογικά μοντέλα είναι η βροχόπτωση και η αποστράγγιση της εκάστοτε περιοχής. Ακόμα, κάποια άλλα δεδομένα που απαιτούνται είναι οι ιδιότητες του εδάφους, η κάλυψη σε βλάστηση, η τοπογραφία της λεκάνης απορροής, η υγρασία του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του υπόγειου υδροφορέα.

2.3.1 Στάδια δημιουργίας και λειτουργίας μοντέλου

Τα στάδια που ακολουθούνται για την δημιουργία ενός υδρολογικού μοντέλου, παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.

- Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση (perceptual model).
- Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model).
- Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας (procedural model).
- Βαθμονόμηση του μοντέλου (model validation).
- Υπολογισμός παραμέτρων (model calibration).
- Αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας (model validation).

Πιο συγκεκριμένα:

<u>Βαθμονόμηση</u>

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι συνήθως παραμετρικά μοντέλα, δηλαδή περιλαμβάνουν αριθμητικές παραμέτρους. Βαθμονόμηση είναι η διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, έτσι ώστε τα δεδομένα που θα εξάγει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα (πειραματικές μετρήσεις , τιμές από μετρήσεις πεδίου κ.τ.λ). Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να γίνει η προσομοίωση των δεδομένων με υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Η βαθμονόμηση μπορεί να είναι χειροκίνητη, αυτόματη και ημιαυτόματη.

<u>Επαλήθευση</u>

Η επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα που εξάγει το μοντέλο αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν. Για την επαλήθευση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κάποιοι στατιστικοί δείκτες. Οι δείκτες και τα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με τους Moriasi & Arnold απεικονίζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 : Βαθμός απόδοσης δεικτών

Βαθμός Απόδοσης	RSR	NSE	PBIAS (%) Streamflow
Πολύ καλή	0.00≤RSR≤0.50	0.75≤NSE≤1.00	PBIAS<± 10
Καλή	0.50≤RSR≤0.60	0.60≤NSE≤0.75	± 10≤PBIS≤± 15
Ικανοποιητική	0.60≤RSR≤0.70	0.50≤NSE≤0.65	± 15≤PBIS≤± 25
Μη ικανοποιητική	0.70≤RSR	NSE≤0.50	± 25≤PBIS

2.3.2 Κατηγοριοποίηση των Υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι μαθηματικοί μετασχηματισμοί ολοκληρωμένης γεω-υδρολογικής προσομοίωσης πολύπλοκων λεκανών απορροής. Συνδυάζουν, μια δέσμη μοντέλων και αναπαριστούν τις φυσικές διεργασίες στο έδαφος, την ακόρεστη ζώνη και στον υδροφόρο ορίζοντα (Chow,1964). Επίσης, αναπαριστούν τις χρήσεις νερού και τη λειτουργία των κύριων υδραυλικών έργων που επιχειρούν να απεικονίσουν τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα, τα οποία εξαρτώνται από την διαθέσιμη πληροφορία και τους διαθέσιμους πόρους.

Οι Singh and Woolhiser (2002), σε μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, ξεχωρίζουν ένα πλήθος 70 περίπου καταξιωμένων υδρολογικών σχημάτων, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- το πεδίο εφαρμογής τους.
- τη χωρική τους κλίμακα.
- την μαθηματική τους δομή.
- τη χρονική τους διακριτότητα.

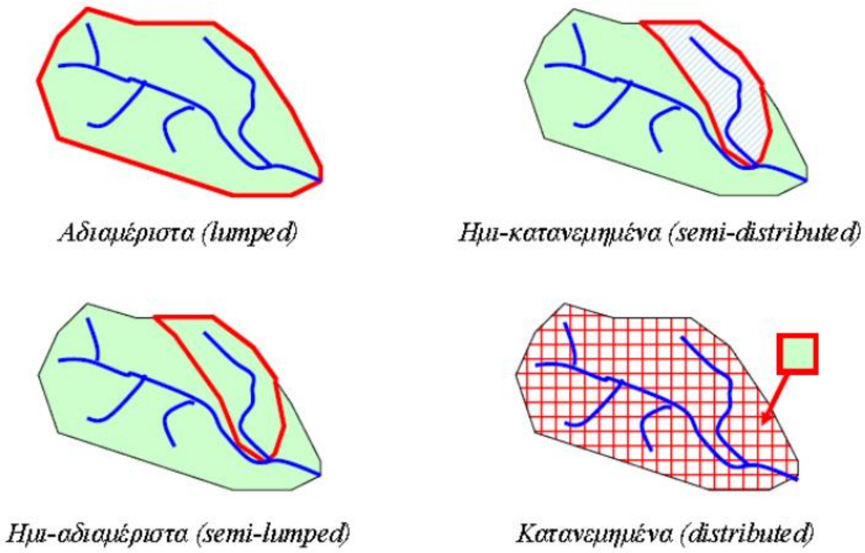
<u>Η διάκριση σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής τους</u>

Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών πρακτικών διαχείρισής τους, αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας ως εξέλιξη των σχετικών φυσικών διεργασιών.

• Μοντέλα Βροχής – Απορροής

Τα μοντέλα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας δεν λειτουργούν πλέον αυτόνομα, αλλά αποτελούν συνιστώσες των συστημάτων που θα υποστηρίξουν αποφάσεις, στα οποία εντάσσονται κλιματικά, διαχειριστικά και υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα διασποράς ρύπων σε υδάτινα σώματα και στο υπέδαφος, καθώς και μοντέλα στερεομεταφοράς.

<u>Η διάκριση σύμφωνα με την χωρική τους κλίμακα</u>



- Αδρομερής ή Αδιαμέριστη ή Συγκεντρωτική (lumped):
  Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.

- Ημικατανεμημένη (semi-distributed)
  Η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές, που αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες (συνηθέστερα) είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (Singh and Woolhiser,2002). Μετά το πέρας των υπολογισμών για κάθε χωρική ενότητα, η αντίστοιχη απόκριση (δηλαδή η απορροή) «μεταφέρεται» στην έξοδο της λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή σχημάτων διόδευσης.

- Ημιαδιαμέριστη (semi-lumped)

Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.

- Κατανεμημένη (distributed)
  Γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας, δηλαδή κύτταρα, τα οποία προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένοι όγκοι). Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων).

<u>Η διάκριση σύμφωνα με την χρονική τους διακριτότητα</u>

Εξαρτάται άμεσα από τον σκοπό του μοντέλου. Τα σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια. Η λεπτή χρονική κλίμακα επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων προϋποθέτει κατάλληλη μετρητική υποδομή στη λεκάνη, από καταγραφικά όργανα σε συνεχή χρόνο, όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους. Σε τέτοιες κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα χρονισμένα, ώστε να αποτυπώνουν τους πραγματικούς χρόνους υστέρησης.

<u>Η διάκριση σύμφωνα με την μαθηματική τους δομή</u>

• μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based).

Τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based) είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή τις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες (Singh & Frevert 2006). Επειδή, η χωρική ανάλυση των μοντέλων αυτών είναι πυκνή, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών τους είναι εξαιρετικά μεγάλο. Θεωρητικά, τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους, οπότε είναι δυνατό να εκτιμηθούν με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, καθώς και από παρατηρήσεις πεδίου. Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα, αφού η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών, προϋποθέτει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε πιο λεπτομερή χωρική κλίμακα (ειδικά όταν η μελέτη γίνεται για μικρές λεκάνες και σχετικά ξηρά κλίματα). Είναι κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα, τα οποία αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας στηριζόμενα επιστημονικά από τους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής). Η χρήση ενός μοντέλου φυσικής βάσης ενδείκνυται, κυρίως, σε επίπεδο λεκάνης απορροής λόγω της μεγάλης απαίτησης του σε δεδομένα. Είναι τα μοναδικά μοντέλα που δεν βασίζονται σε μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, για την προσαρμογή των παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται κατάλληλα για την εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις, κάτι που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των υδρολογικών επιστημών τα τελευταία έτη. Συνήθως, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες έρευνες, όπως η εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλίμα, η φυτοκάλυψη ή οι χρήσεις γης. Συχνά συνδυάζονται με υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων στο νερό και το έδαφος, καθώς και μοντέλα μεταφοράς φερτών. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την πρόγνωση και προσομοίωση της απορροής, είναι υπολογιστικά ασύμφορη και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προγνώσεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα.

• εννοιολογικά μοντέλα (conceptual).

Διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα, που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους. Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων (Salas et al., 1980). Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Τα εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές κλίμακες και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας (10 έως 20 παραμέτρους για ξηρές ή ημίξηρες λεκάνες, ως ελάχιστες παράμετροι για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό). Αρκετοί ερευνητές εκφράζουν έντονο σκεπτικισμό ως προς τη δυνατότητα γενίκευσης των σημειακών φυσικών νόμων, που ισχύουν στην απειροστή κλίμακα (δηλαδή σε έναν πεπερασμένο όγκο αναφοράς), για την προσομοίωση χωρικά κατανεμημένων διεργασιών, έστω και σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια. Έτσι, θεωρούν ότι ακόμη και τα κατανεμημένα σχήματα είναι στην πραγματικότητα εννοιολογικά, όχι όμως σε κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης, αλλά στη μονάδα χωρικής διακριτότητας που αναφέρεται η σχηματοποίηση του μοντέλου, στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο.

Διατυπώνουν παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα (και όχι φυσικούς νόμους) τα οποία αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες στην μικρότερη χωρική ενότητα, που υποστηρίζεται από τη σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη).

• στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα

Τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, οι οποίες αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού. Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεθόδους της επαγωγικής στατιστικής, και είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Τα στοχαστικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων, είναι πληρέστερα, καθώς λαμβάνουν υπόψη και τη χρονική αλληλεπίδραση ή αλλιώς στοχαστική δομή των φαινομένων, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση. Οι παράμετροί των παραπάνω μοντέλων εξαρτώνται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων δειγμάτων, τα οποία και αναπαράγουν, όχι από τα ίδια τα δείγματα. Σε αντίθεση με την καθαρά προσδιοριστική προσέγγιση που υιοθετούν τα μοντέλα φυσικής και εννοιολογικής βάσης, τα στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Στηρίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές. Παραδείγματος χάριν, η αιχμή ενός πλημμυρικού φαινομένου ενός ποταμού θεωρείται ανεξάρτητη από κάθε άλλη (επόμενη ή προηγούμενη) πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Επίσης, τα στοχαστικά μοντέλα εξασφαλίζουν στατιστική και στοιχειώδη συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

• μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black-box).

Οι εξισώσεις σε αυτήν την κατηγορία δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσεως μοντέλα. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης. Στην υδρολογία, ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα νευρωνικά δίκτυα, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδου (Salas et al., 1980).. Η δομή (αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων) και οι παράμετροί τους δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο, και προκύπτουν μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής που βασίζεται στη χρήση γενετικών, συνήθως, αλγορίθμων και είναι γνωστή ως εκπαίδευση (training) του δικτύου. Στην πράξη, το νευρωνικό δίκτυο είναι ένας κρυφός υπολογιστικός κώδικας, στον οποίο δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης. Άλλη κατηγορία μοντέλων μαύρου κουτιού είναι τα γενετικού προγραμματισμού, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος, που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε πραγματεύονται περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων. Η διάδοση των νευρωνικών δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και η συνηθέστερη εφαρμογή τους είναι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων. Ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων, και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών.

2.4 Μοντέλο Swat (Soil and Water Assesment Tool)

Το Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (S.L. Neitsch et al. 2011) αποτελεί ένα σύνθετο, ντετερμινιστικό, ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο, με τη δυνατότητα χωρικής παραμετροποίησης που έχει δημιουργηθεί από την U.S. Department of Agriculture (USDA) με σκοπό να προβλέπει τη μακροπρόθεσμη επίδραση των κλιματικών και γεωργικών πρακτικών στο νερό, τα ιζήματα και την ποσότητα γεωργικών χημικών σε μεγάλες και σύνθετες λεκάνες. Το μοντέλο λειτουργεί με ημερήσιο χρονικό βήμα. Τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι η υδρολογία, το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής, τα μετεωρολογικά στοιχεία (βροχόπτωση, μέγιστη-ελάχιστη θερμοκρασία κτλ), τα εδάφη, η ανάπτυξη των φυτών, τα θρεπτικά συστατικά, τα φυτοφάρμακα και οι χρήσεις γης. Το μοντέλο λειτουργεί χωρίζοντας την λεκάνη απορροής σε μικρότερα κομμάτια. Αυτές οι υπολεκάνες, ή αλλιώς Hydrologic Response Units (HRU), έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά ως προς την κλίση του εδάφους, το έδαφος και τις χρήσεις γης. Το ισοζύγιο του νερού σε κάθε HRU παρουσιάζεται σε τέσσερα επίπεδα: το χιόνι, το προφίλ του εδάφους, τον ρηχό και τον βαθύ υπόγειο υδροφορέα. Τα εδάφη μπορεί να χωριστούν σε πολλά στρώματα αν έχουν διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικά βάθη (S.L. Neitsch et al. 2011). Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο έδαφος είναι η εξάτμιση, η διήθηση, η πρόσληψη από τα φυτά, η πλευρική ροή και η διήθηση σε κατώτερα στρώματα. Όπως είναι φυσικό, η διήθηση στο τελευταίο στρώμα τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφορέα. Τα αποτελέσματα ως προς την απορροή, το ίζημα και την φόρτιση από μη σημειακές πηγές ρύπανσης για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) προστίθενται και καταλήγουν στην έξοδο της λεκάνης μέσω των καναλιών.

Σε κάθε εφαρμογή του SWAT, τον πιο καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το υδατικό ισοζύγιο. Ο υδρολογικός κύκλος, όπως προσομοιώνεται από το μοντέλο, είναι υπεύθυνος για τον ακριβή υπολογισμό όλων των αποτελεσμάτων, όπως η κίνηση των χημικών ουσιών, των θρεπτικών ή και των φερτών υλικών. Η προσομοίωση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής μπορεί να χωριστεί σε δύο κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι αφορά τις χερσαίες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και είναι υπεύθυνο για την ποσότητα του νερού, των φερτών, των θρεπτικών και των χημικών ουσιών που καταλήγουν στα κυρίως υδατορεύματα των υπολεκανών. Αντιθέτως, το δεύτερο τμήμα της υδρολογικής προσομοίωσης ασχολείται με τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου από και προς τις υδάτινες περιοχές και αφορά στην κίνηση του νερού και των υπόλοιπων στοιχείων διαμέσου του υδρογραφικού δικτύου προς την έξοδο της λεκάνης.

Ο υδρολογικός κύκλος προσομοιώνεται στο SWAT βασισμένος στην παρακάτω εξίσωση υδατικού ισοζυγίου.

$$\mathrm{SW_t} = \mathrm{SW_0} + \sum_{i=0}^{t}\left(\mathrm{R_{day}} - \mathrm{Q_{surf}} - \mathrm{E_a} - \mathrm{W_{seep}} - \mathrm{Q_{gw}}\right)$$

όπου:

$\mathrm{SW_t}$: είναι η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm H2O)

$\mathrm{SW_0}$: είναι η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm H2O)

t: είναι ο χρόνος σε ημέρες (days)

$\mathrm{R_{day}}$: η ημερήσια βροχόπτωση (mm H2O)

$\mathrm{Q_{surf}}$: η ημερήσια απορροή (mm H2O)

$\mathrm{E_a}$: η εξατμισοδιαπνοή (mm H2O)

Wseep: η διήθηση (mm H2O)

$\mathrm{Q_{gw}}$: η υπόγεια ροή (mm H2O)

Παρακάτω αναλύονται τα μεγέθη της παραπάνω εξίσωσης

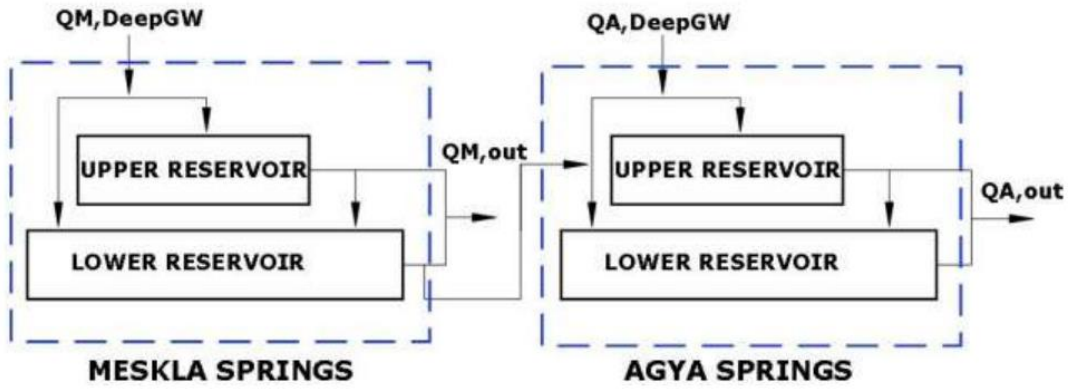
- **Επιφανειακή Απορροή**
  Η επιφανειακή απορροή προκύπτει, όταν η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στην επιφάνεια του εδάφους, είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να απορροφήσει το έδαφος.
- **Διήθηση**
  Το μοντέλο υπολογίζει την διήθηση από κάθε στρώμα του εδαφικού προφίλ. Στην περίπτωση που η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από την αποθηκευτικότητα κάθε στρώματος, τότε αυτό διηθείται στα κατώτερα στρώματα.
- **Εξατμισοδιαπνοή**
  Ο όρος εξατμισοδιαπνοή συγκεντρώνει όλες τις διεργασίες με τις οποίες απομακρύνεται το νερό από το έδαφος και γίνεται υδρατμοί. Είναι ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο το νερό απομακρύνεται από την λεκάνη απορροής.

Περίπου το 62% του νερού της βροχόπτωσης απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Η ακριβής εκτίμηση της είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές, όπως αυτές που ασχολείται το μοντέλο SWAT.

- **Υπόγεια νερά**
  Το νερό εισέρχεται στα υπόγεια συστήματα μέσω της διήθησης και απομακρύνεται με την εκροή του στα ποτάμια, λίμνες ή τις θάλασσες. Στις κορεσμένες αυτές ζώνες του εδαφικού προφίλ, είναι δυνατόν να βρεθούν συστατικά τόσο με χαμηλή όσο και με υψηλή αγωγιμότητα, που διευκολύνουν την ροή του νερού. Το γεωλογικό σύστημα το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα νερού και να το μεταφέρει αρκετά γρήγορα ώστε να έχει υδρολογική σημασία, ονομάζεται υδροφορέας. Διακρίνονται δύο είδη υδροφορέων: ο περιορισμένος υδροφορέας και ο μη περιορισμένος. Ο περιορισμένος είναι αυτός που οριοθετείται από δύο αδιαπέρατες στρώσεις γεωλογικών σχηματισμών όπου η αγωγιμότητα τους είναι πολύ πιο μικρή από αυτή του υδροφορέα. Ο μη περιορισμένος υδροφορέας είναι οριοθετημένος μόνο από την κάτω πλευρά και από πάνω τροφοδοτείται από την διήθηση των πρώτων στρωμάτων. Το SWAT προσομοιώνει δύο υπόγειους υδροφορείς σε κάθε υπολεκάνη, τον ρηχό και τον βαθύ υδροφορέα. Ο ρηχός αποτελεί έναν μη περιορισμένο υδροφορέα που συνεισφέρει στην ροή του ποταμού ή στο ρέμα της κάθε υπολεκάνης. Ο βαθύς υδροφορέας θεωρείται ότι συνεισφέρει στην ροή του ποταμού κάπου έξω από την λεκάνη απορροής. Παρακάτω γίνεται ανάλυση της υπόγειας ροής βάση των δύο αυτών υδροφορέων.

2.5 Καρστικό μοντέλο δυο ταμιευτήρων

Η προσομοίωση του καρστικού σχηματισμού στο μοντέλο SWAT μπορεί να πραγματοποιηθεί ενσωματώνοντας στο μοντέλο του SWAT ένα πλήρως κατανεμημένο μοντέλο, όπως για παράδειγμα το MODFLOW (Kim&Arnold 2008) ή χρησιμοποιώντας ένα εννοιολογικό μοντέλο για την προσομοίωση της εκφόρτισης των καρστικών πηγών. Το 2013 αναπτύχθηκε ένα εννοιολογικό, μαθηματικό μοντέλο δύο ταμιευτήρων (Nikolaidis et al., 2013). Η διήθηση στον βαθύ υδροφορέα από το SWAT χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για το καρστικό μοντέλο. Η συνολική εκφόρτιση των πηγών είναι το άθροισμα της εκφόρτισης των δύο ταμιευτήρων. Στην λεκάνη απορροής του Κερίτη διακρίνονται οι πηγές της Αγυιάς και των Μεσκλών, οι οποίες είναι μέρος του ίδιου καρστικού σχηματισμού. Έτσι, πραγματοποιήθηκε μια μικρή τροποποίηση στο μοντέλο του καρστ για την προσομοίωση της υπόγειας σύνδεσης των δύο αυτών πηγών.



Το υδραυλικό ισοζύγιο όπως περιγράφεται στο καρστικό μοντέλο είναι :

$$Q_{karstic} = (1 - a_2) \times Q_1 + Q_2 \qquad [2.5.1]$$

Όπου

$Q_{karstic}$: Η συνολική απορροή του καρστ $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$(1 - a_2) \times Q_1$: ο όρος του ανώτερου ταμιευτήρα

a_2: ο λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο ταμιευτήρα

Q_2 : ο όρος του κατώτερου ταμιευτήρα

Για την διεξαγωγή της παραπάνω εξίσωσης χρησιμοποιήθηκαν τα υδραυλικά ισοζύγια και τα ισοζύγια μάζας του ανώτερου και κατώτερου ταμιευτήρα.

Υδραυλικό ισοζύγιο ανώτερου ταμιευτήρα

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_{in,1} - Q_1 \qquad [2.5.2]$$

Όπου

$Q_{in,1} = a_1 \times Q_{in,deepGW}$ [2.5.3]

a_1: ο λόγος της παροχής του καρστικού στον ανώτερο ταμιευτήρα,

$Q_{in,deepGW}$: Παροχή βαθέος υδροφορέα από το SWAT $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$$Q_1 = K_u \times V_1 \qquad [2.5.4]$$

K_u: Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα $(\frac{1}{day})$,

Υδραυλικό ισοζύγιο κατώτερου ταμιευτήρα:

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_{in,2} - Q_2 \qquad [2.5.5]$$

Όπου

$Q_{in,2}$= (1-a_1)× $Q_{in,deepGW} + a_2 \times Q_1$ [2.5.6]

a_2: ο λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο ταμιευτήρα

$Q_{in,deepGW}$: Παροχή βαθέος υδροφορέα από το SWAT $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$$Q_2 = K_l \times V_2 \qquad [2.5.7]$$

K_l: Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα ($\frac{1}{day}$),

Θεωρώντας σταθερά $Q_{in,1}$ και $Q_{in,2}$ οι αναλυτικές λύσεις των διαφορικών εξισώσεων [2.5.2] και [2.5.5] είναι:

$$\boxed{Q_1 = Q_{1,0} \times e^{-K_u \times t} + Q_{in,1} \times (1 - e^{-a_1 \times K_u \times t})} \qquad [2.5.8]$$

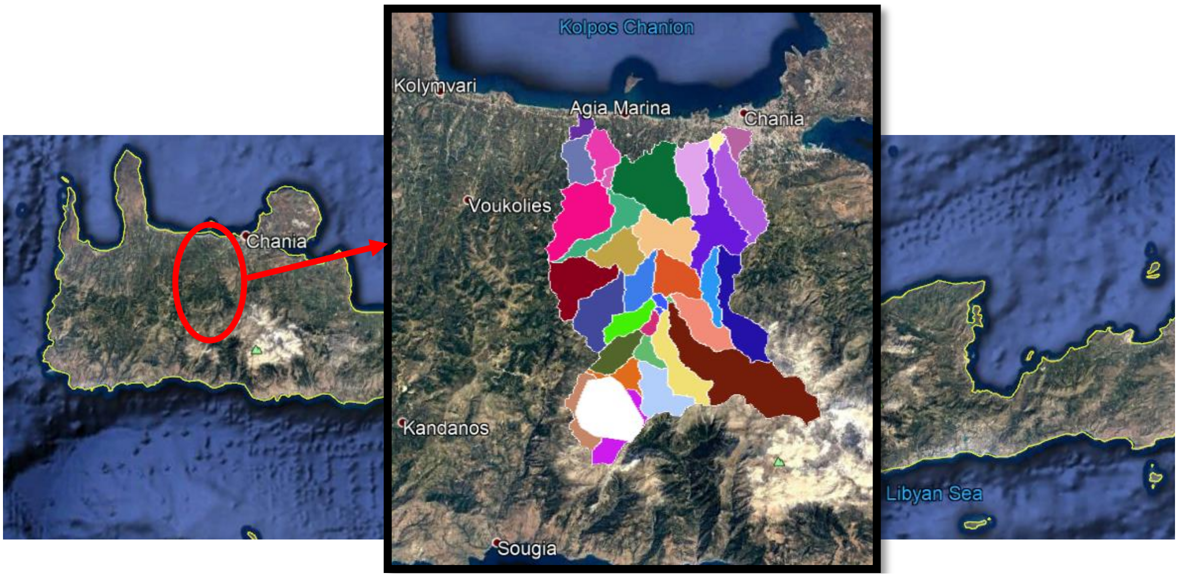
$$\boxed{Q_2 = Q_{2,0} \times e^{-K_l \times (1-a2) \times t} + (1 - a1) \times Q_{in,2} \times \left(1 - e^{-K_l \times (1-a2) \times t}\right)} \qquad [2.5.9]$$

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή

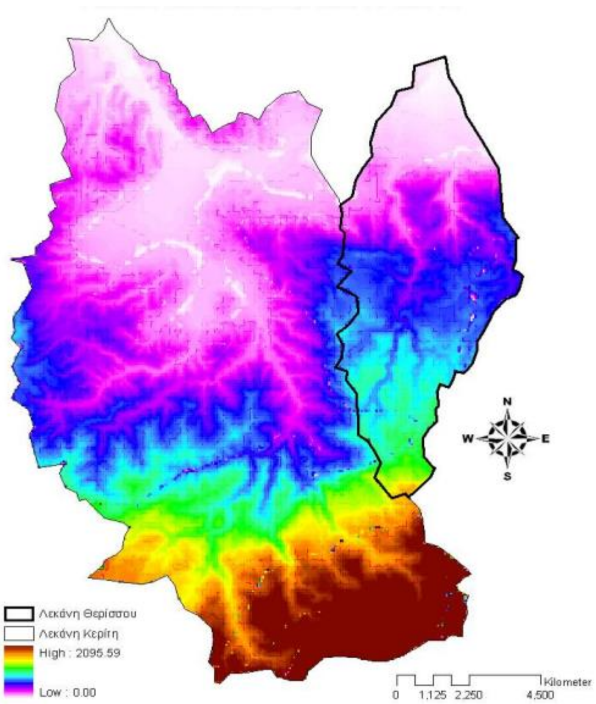
Μια από τις δύο κύριες λεκάνες απορροής του νομού Χανίων είναι η λεκάνη απορροής του Κερίτη- Θερίσου. Συναντάται στο Βόρειο κεντρικό τμήμα του νομού Χανίων, Δυτικά της πόλης σε απόσταση 12 χιλιομέτρων από αυτή. Τοποθετείται μεταξύ των γεωγραφικών συντεταγμένων 35 15΄ - 35 32΄ Βόρειου πλάτους και 23 45΄ - 23 55΄Ανατολικού μήκους. Η υδρολογική λεκάνη έχει έκταση 210 km^2 , μέσο υψόμετρο 734 μέτρα και υπάγεται στο Δήμο Πλατανιά (σύμφωνα με το Πρόγραμμα Καλλικράτης).Η λεκάνη απορροής καλύπτει περίπου 136 km. Οι κύριες δημοτικές περιοχές που ανήκουν στην υδρολογική λεκάνη είναι : Μεσκλά, Ορθούνι, Φουρνές, Σκηνές, Αλικιανός, Αγυιά κ.α.

Η λεκάνη απορροής του ποταμού καθώς και η τεχνητή λίμνη της Αγυιάς ανήκουν στις προστατευόμενες περιοχές Natura 2000. Η λεκάνη απορροής του Θερίσου απέχει 3km από την πόλη των Χανίων. Έχει μικρή έκταση, περίπου 60km^2. Κύριος ποταμός της λεκάνης είναι ο Κλαδισσός. Λόγω της μικρής έκτασης της λεκάνης απορροής του Θερίσου, μελετάται ως τμήμα της λεκάνης απορροής του Κερίτη, οπότε πλέον στην συνέχεια της εργασίας αναφέρεται ως ενιαία λεκάνη Κερίτη- Θερίσου. Στην εικόνα 6 οριοθετείται η τοποθεσία της λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου στο νησί της Κρήτης και στις εικόνες 7,8 παρουσιάζονται οι οικισμοί που περιλαμβάνει η λεκάνη απορροής του Κερίτη και η υψομετρική διακύμανση αντίστοιχα.



Εικόνα 6: Τοποθεσία λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου

Εικόνα 7: Κοινότητες που περιλαμβάνει η λεκάνη απορροής του Κερίτη



Εικόνα 8: Υψομετρική διακύμανση της υδρολογικής λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου

3.2 Μετεωρολογικά-υδρογραφικά-υδρολογικά στοιχεία

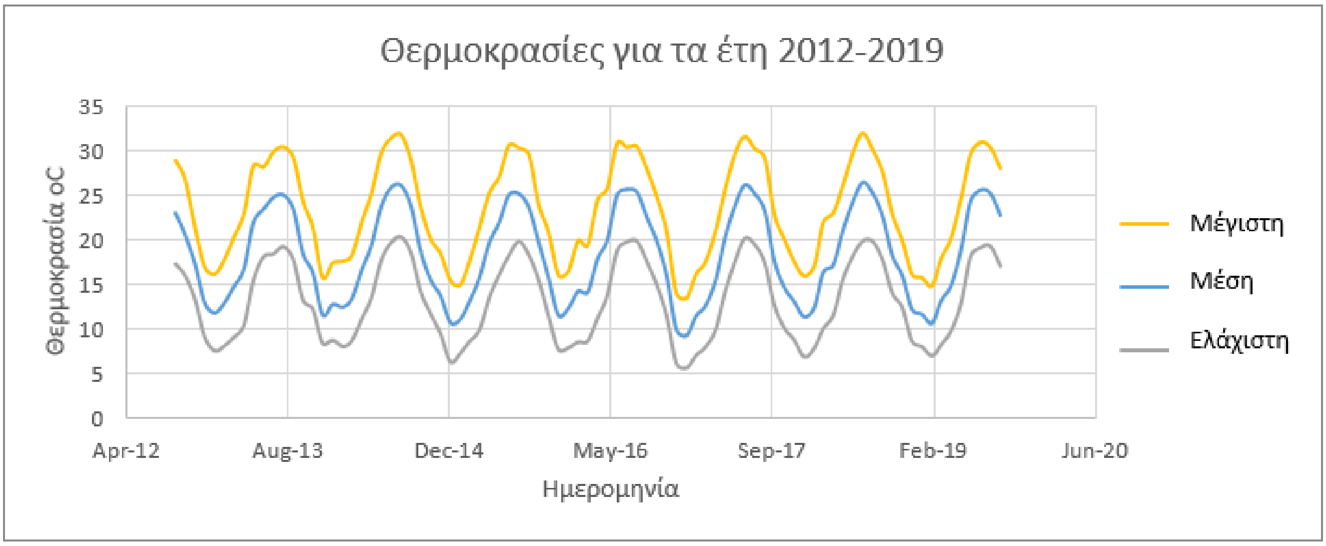
3.2.1 Κλίμα της περιοχής

Σύμφωνα με την UNESCO/FAO (1963), η περιοχή μελέτης έχει υγρό Μεσογειακό κλίμα, με υγρούς και σχετικά κρύους χειμώνες και ξηρά-ζεστά καλοκαίρια. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μέση θερμοκρασία 19°C. Η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή κυμαίνεται από 140mm έως περισσότερα από 310 mm τον μήνα αιχμής. Πιο συγκεκριμένα, οι ετήσιες βροχοπτώσεις για την περιοχή των Χανίων έχουν εκτιμηθεί ότι είναι 665 mm (Chartzoulakis et al.2001). Περίπου το 65% της ετήσιας βροχόπτωσης χάνεται με εξατμισοδιαπνοή , 21% με την απορροή στη θάλασσα και μόνο το 14% επαναφορτίζει τη λεκάνη των υπόγειων υδάτων. Η βροχόπτωση κυρίως συγκεντρώνεται τους χειμερινούς μήνες, ενώ η περίοδος ξηρασίας εκτείνεται για περισσότερο από έξι μήνες (Μάϊος έως τον Οκτώβριο). Αυτό, έχει σαν συνέπεια η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων να είναι περιορισμένη λόγω των χωροχρονικών μεταβολών. Η ζήτηση για άρδευση νερού είναι πολύ υψηλή, ενώ αρδεύεται μόνο το 31% της διαθέσιμης γεωργικής γης (Tsagarakis et al.2004).Επομένως, οι αυξανόμενες ανάγκες σε νερό προβάλλουν την αναγκαιότητα διαχείρισης των πόρων για την αειφόρο ανάπτυξη.

3.2.2 Μετεωρολογικά Στοιχεία

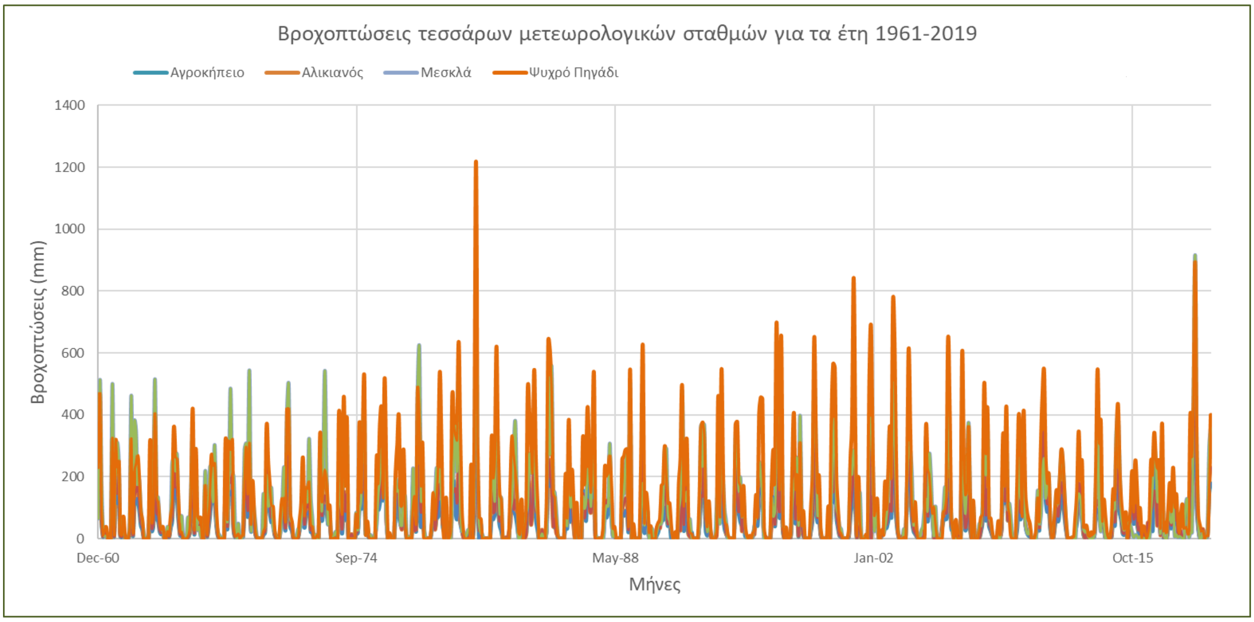
Εντός του Δήμου Πλατανιά στον οποίο υπάγεται η περιοχή μελέτης, υπάρχουν αρκετοί μετεωρολογικοί σταθμοί από τους οποίους αντλήθηκαν δεδομένα για την συγκρότηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχετικά με τις μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν. Για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της λεκάνης απορροής χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού Αλικιανού ,του Ψυχρού Πηγαδιού, των Μεσκλών και του Αγροκηπείου.

Σχετικά με την θερμοκρασία, οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με τη μέση θερμοκρασία να φτάνει τους 12°C. Η ελάχιστη θερμοκρασία σπάνια κατέρχεται κάτω από τους 0°C, με εξαίρεση τα μεγάλα υψόμετρα. Στο διάγραμμα 1, φαίνεται η ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία για τα έτη 2012-2019 που έχουν προκύψει από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού (meteo data.gr).



Διάγραμμα 1: Μέγιστη, Μέση και Ελάχιστη θερμοκρασία από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού

Όσον αφορά την βροχόπτωση, τα μεγαλύτερα ποσοστά της εμφανίζονται το χειμώνα με τη μέση μηνιαία βροχόπτωση να φτάνει τα 105 mm, ενώ οι μικρότερες τιμές υετού παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες. Στο διάγραμμα 2, παρουσιάζονται οι βροχοπτώσεις από τους τέσσερις προαναφερόμενους βροχομετρικούς σταθμούς για τα έτη 1961-2019 και παρατηρείται ότι η βροχόπτωση τον Φεβρουάριο του 2019 ήταν μη αναμενόμενα υψηλή περίπου 895mm.



Διάγραμμα 2: Μηνιαίες βροχοπτώσεις για τα έτη 1961-2019 από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία.

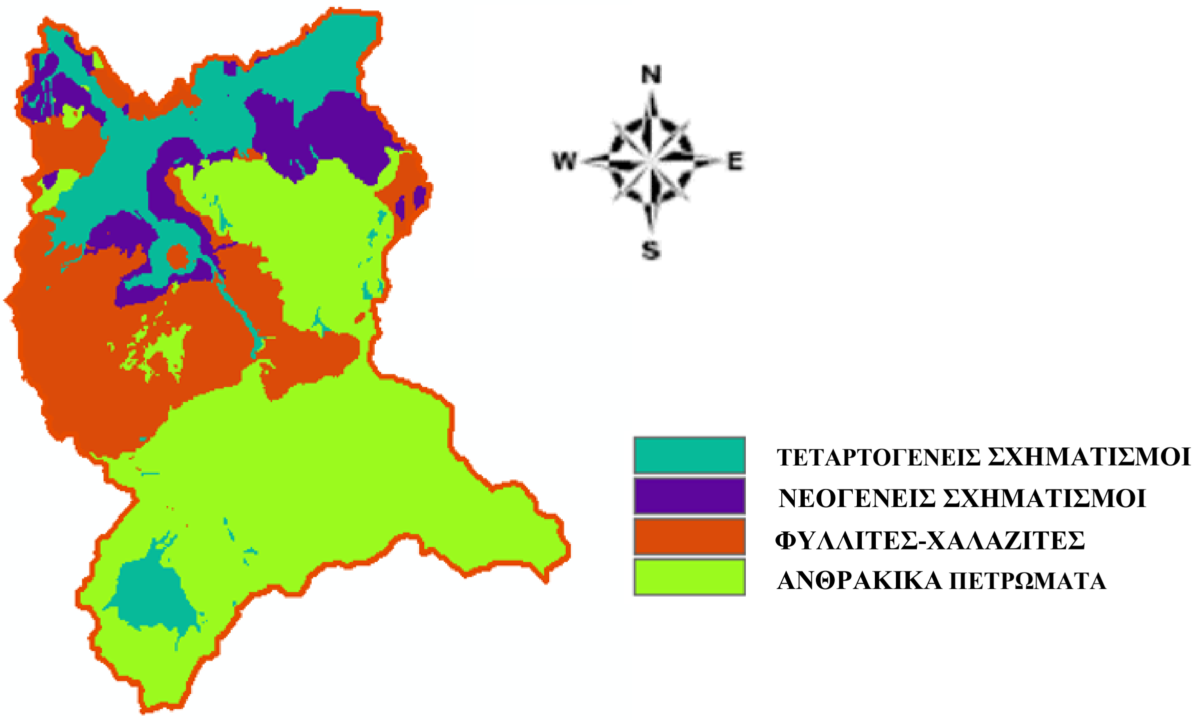
Ολικοί παγετοί δεν εμφανίζονται στην περιοχή και αποτελούν σπάνιο φαινόμενο. Οι χιονοπτώσεις είναι ελάχιστες, χωρίς να δημιουργούν σχεδόν ποτέ πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Το χαλάζι πέφτει σπάνια στα χαμηλά και το μέγεθος του είναι συνήθως μικρό, συνεπώς οι ζημιές που προκαλούνται από αυτό μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες.

Αναφορικά με τον άνεμο, οι μέγιστες μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του πρώτου εξαμήνου του έτους (>13m/s), ενώ οι ελάχιστες το τελευταίο τρίμηνο του έτους. Επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμων είναι η Δυτική και η Βορειοδυτική. Στο διάγραμμα 3 έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της ταχύτητας του ανέμου για τα έτη 2012-2019 από τον μετεωρολογικό σταθμό του χωριού Αλικιανού (meteo.gr).

Διάγραμμα 3 : Ταχύτητα ανέμου από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού για τα έτη 2012-2019

3.3 Γεωλογικές συνθήκες

Όπως είναι γνωστό η Κρήτη βρίσκεται στο άνω μέρος του Ελληνικού ηφαιστειακού τόξου και έχει πολύπλοκη γεωλογική δομή που οφείλεται στην σύγκλιση της Αφρικανικής με την Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα (Soupios et al.,2007). Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην λεκάνη απορροής του Κερίτη- Θερίσου απεικονίζονται στην εικόνα 9 και αναλύονται στη συνέχεια.



Εικόνα 9: Κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί στην λεκάνη απορροής του Κερίτη-Θερίσου

ΦΥΛΛΙΤΕΣ-ΧΑΛΑΖΙΤΕΣ

Φυλλίτες -Χαλαζίτες: Απαντώνται στο κεντρικό-δυτικό τμήμα της λεκάνης και εμφανίζονται σε μικρότερη έκταση στο βόρειο τμήμα της. Είναι γενικά μη υδατοπερατοί σχηματισμοί και αποτελούν συνήθως όρια των υπόγεων υδάτων. Οι φυλλίτες αυτοί, ανήκουν στη μεγάλη διάπλαση που καλύπτει το δυτικό τμήμα της δυτικής Κρήτης, πέρα από τα Λευκά Όρη. Έχουν μεσοανωτριαδική ηλικία , δηλαδή είναι νεότεροι από τους δολομιτικούς κυψελώδεις ασβεστόλιθους.

ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Νεογενείς σχηματισμοί: Στη λεκάνη του Κερίτη αναπτύσσονται νεογενείς σχηματισμοί στο βόρειο τμήμα της λεκάνης οι οποίοι εμφανίζουν μειωμένη υδροφορία και μεταβλητή υδροπερατότητα. Ένα παράδειγμα νεογενών σχηματισμών είναι τα αργιλομαργαϊκά στρώματα τα οποία καλύπτονται σχεδόν σε όλη τους την έκταση με ένα μανδύα από φυλλιττικές και σπανιότερα ασβεστολιθικές κροκαλολατύπες, με πάχος λίγων μέτρων. Τα στρώματα αυτά είναι σχεδόν οριζόντια.

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Είναι οι νεότερες αποθέσεις και εμφανίζονται στο βόρειο και κεντρικό μέρος της λεκάνης που μελετάται. Αποτελούνται από αδρομερή εν γένει υλικά, καθώς και αργίλους, άμμους,λατυποπαγή,ψαμμίτες και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό τμήμα της λεκάνης στην περιοχή Αγυιάς, Αλικιανού, Βατολάκκου, Σκηνέ, Κουφού, με σημαντικό πάχος και αξιόλογη υδροφορία. Η υδροφορία αυτών των σχηματισμών είναι αξιόλογη καθώς τροφοδοτείται πλευρικά από το καρστικό σύστημα, επιφανειακά από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (π.χ. βροχή, χιόνι) και τα υδατορεύματα.

ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Καταλαμβάνουν το Νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής, και επεκτείνονται πολύ νοτιότερα, πέραν των ορίων της εν λόγω υδρολογικής λεκάνης, έως τον κύριο ασβεστολιθικό όγκο των Λευκών Ορέων. Επίσης, μικρή επιφανειακή εμφάνιση του καρστικού συστήματος βρίσκεται δυτικά του οικισμού «Κουφός» το οποίο τροφοδοτεί τις πηγές υπερχείλισης του (τοποθεσία Βλυχάδες). Αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα και μπορούν να καταταχθούν γενικότερα σε καρστικούς σχηματισμούς. Χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλή υδροπερατότητα, λόγω των καρστικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα και η δομή τους ευνοεί τη δημιουργία σημαντικών υπόγειων υδροφορέων. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και ανθρακικά κροκαλοπαγή.

3.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Το υδρογραφικό δίκτυο ξεκινάει από το νότιο και υψηλότερο τμήμα της λεκάνης απορροής (περίπου 2000 μέτρα), τα Λευκά Όρη και εκβάλλει Βόρεια του οικισμού Πλατανιά. Στον ποταμό Κερίτη εκβάλλουν οι χείμαρροι Σκηνιανός, Βαλσαμιώτης, Φασάς και Μαύρος ποταμός. Επιπρόσθετα, εκβάλλει και η λίμνη της Αγυιάς, στην οποία εκφορτίζουν οι πηγές Καλαμιώνα-Κολύμπα-Πλάτανος που μαζί με τον Κερίτη συνθέτουν το πρωτεύον δίκτυο παροχέτευσης της υδρολογικής λεκάνης του. Η λεκάνη απορροής αυτή, είναι μία από τις σημαντικότερες υδρολογικές λεκάνες του νομού, λόγω της πλούσιας υδροφορίας της. Στην λεκάνη απορροής βρίσκονται πολλές γεωτρήσεις και πηγάδια που εξυπηρετούν υδρευτικούς και αρδευτικούς σκοπούς της ευρύτερης περιοχής.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του Κερίτη-Θερίσου εμφανίζουν διαφορετική υδρογεωλογική και υδραυλική συμπεριφορά λόγω των λιθολογικών και τεκτονικών χαρακτηριστικών τους, καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το υδρολογικό καθεστώς της περιοχής μελέτης. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από την παρουσία δύο κύριων βαθύτερων υδρογεωλογικών συστημάτων και ενός δευτερεύοντος επιφανειακού συστήματος. Το βαθύτερο, αντιπροσωπεύεται από διαπερατούς ανθρακικούς σχηματισμούς και εμφανίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής κοντά στα χωριά Μυλωνιανά, Φουρνές, Μεσκλά. Οι υπόγειες πηγές προέρχονται κυρίως από τον νοτιοδυτικό τομέα, όπου οι σχηματισμοί των ασβεστόλιθων επαναφορτίζονται κυρίως από τους ανθρακικούς ασβεστόλιθους των Λευκών Ορέων. Στο βόρειο τμήμα ο σχηματισμός των ανθρακικών πετρωμάτων διακόπτεται από ένα ρήγμα ανατολικό-δυτικό το οποίο προκαλεί τον σχηματισμό των καρστικών πηγών στην περιοχή της Αγυιάς (Καλαμιώνας,Πλάτανος, Κολύμπα).

Το δεύτερο βασικό υδρογεωλογικό σύστημα είναι ένα αδιαπέρατο σύστημα φυλλιτών-χαλαζιτών, εκτείνεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής και πιο συγκεκριμένα στις περιοχές Λάκκους, Καράνου, Ορθούνι, Λαγγός, Σκηνές και στα νότια τμήματα του Αλικιανού και του Βατολάκκου. Η προαναφερθείσα έκταση χαρακτηρίζεται από πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο καθώς τα φυλλιτικά- χαλαζιακά πετρώματα αποτρέπουν την βροχόπτωση να εισχωρήσει στο έδαφος. Αυτό έχει ως απόρροια την ύπαρξη έντονης επιφανειακής απορροής και κατά συνέπεια τον σχηματισμό πλήθους χειμάρρων όπως ο Μαύρος ποταμός, ο Φασάς , ο Βαλσαμιώτης, ο Σκηνιανός και ο Αλικιανιώτης, οι οποίοι τροφοδοτούν το κύριο ρεύμα του ποταμού Κερίτη και συνενώνονται στο ύψος του Σκηνέ-Αλικιανού. Οι πηγές των Μεσκλών τροφοδοτούνται από τους ασβεστόλιθους και την επιφανειακή απορροή επί των φυλλιτών του Κερίτη, αναβλύζοντας στις τοποθεσίες Παναγιά, Κεφαλοβρύσια και Νικολιανά, οι οποίες βρίσκονται νοτιοδυτικά του χωριού Μεσκλά.

Το δευτερεύον υδρογεωλογικό σύστημα τεταρτογενών αποθέσεων που εκτείνεται βόρεια των φυλλιτών του κεντρικού τμήματος της λεκάνης απορροής Κερίτη ,τροφοδοτείται από τις επιφανειακές απορροές των φυλλιτών, καθώς και από τις υπόγειες πλευρικές απορροές ανατολικά της λεκάνης. Είναι αξιοσημείωτη η αναφορά στις διαφορετικές ποιότητες και συστάσεις του νερού που μπορεί κανείς να συναντήσει σε αυτή την περιοχή. Δηλαδή, η σύσταση του νερού στην περιοχή Σκηνέ- Αλικιανού διαφέρει από την σύσταση του νερού στην περιοχή του Κουφού. Συμπερασματικά, τα παραπάνω υποδηλώνουν την ύπαρξη δύο υπολεκανών στη περιοχή.

Όσον αφορά την υδρολογική λεκάνη Θερίσου ο συνολικός όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που δέχεται η λεκάνη είναι περίπου 75 εκατ. m^3 , με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 855 mm (στοιχεία ΥΕΒ). Υπάρχουν πλευρικές μεταγγίσεις από τα ανθρακικά πετρώματα που βρίσκονται νοτιότερα εκτός της λεκάνης Θερίσου, αλλά εντός της λεκάνης του Κερίτη.

3.5 Υδραυλικές απολήψεις

Λόγω της πλούσιας υδροφορίας που αναφέρθηκε παραπάνω στη λεκάνη απορροής του Κερίτη-Θερίσου, παρέχονται υψηλές ποσότητες νερού σε ένα μεγάλο μέρος του Νομού Χανίων. Οι φορείς που διαχειρίζονται τους υδάτινους πόρους μέσω των αντλήσεων είναι η Δ.Ε.Υ.Α.Χ. (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων) ,ο Ο.Α.ΔΥ.Κ (Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης, πρώην Ο.Α.Κ.) και ο Τ.Ο.Ε.Β. Βαρυπέτρου (Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων). Στους πίνακες 3, 4, 5 έχουν καταγραφεί οι ετήσιες ποσότητες άντλησης από τους παραπάνω φορείς.

Πίνακας 3 :Ετήσια ποσότητα άντλησης σε Mm^3 από τον Τ.Ο.Ε.Β.

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΥΒΙΚΩΝ
2009	5.4
2010	5.9
2011	4.0
2012	5.0
2013	5.4
2014	5.0
2015	4.0
2016	4.7
2017	3.8
2018	3.6
2019	3.8

Πίνακας 4 : Ετήσια ποσότητα άντλησης σε Mm^3 από την Δ.Ε.Υ.Α.Χ

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΥΒΙΚΩΝ
2009	8.3
2010	7.9
2011	8.6
2012	*8.5
2013	**8.9
2014	**8.7
2015	**8.5
2016	***8.8
2017	***5.1
2018 (8/11-8/30)	2.3
2019	-

Πίνακας 5 :Ετήσια ποσότητα άντλησης σε Mm^3 από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ.

ΕΤΟΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΥΒΙΚΩΝ
2009	12.1
2010	16.3
2011	*11.3
2012	*10.9
2013	13.7
2014	*11.5
2015	11.0
2016	14.9
2017 (μέχρι Ιούλιο)	4.6

*Συμπλήρωση ολόκληρου έτους
**Διαθέσιμη ετήσια τιμή, συμπλήρωση μηνιαίων
***Διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα από γεωτρήσεις-συμπλήρωση δεδομένων αντλήσεων από πηγή Αγυιάς.

3.6 Φυσικό Περιβάλλον

3.6.1 Οικοσυστήματα

Στην περιοχή ενδιαφέροντος έχουν καταγραφεί 10 διαφορετικοί τύποι οικοτόπων της οδηγίας 92/43 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (1992) και το εγχειρίδιο ερμηνείας, που έχει εκδώσει η DG XI (compiled by C. Romao, 1996). Ο αριθμός αυτός είναι αρκετά μεγάλος για την περιορισμένη έκταση της περιοχής μελέτης.

Εκτός από τους οικοτόπους προτεραιότητας (φυσικοί οικότοποι) ιδιαίτερης αξίας είναι και η μέριμνα για όλους τους παρόχθιους και υδατικούς οικοτόπους: η οικολογική τους αξία θεωρείται δεδομένη στη δημιουργία ενδιαιτημάτων για την πανίδα, τη χλωρίδα και τη ρύθμιση των υδάτων.

Τα μεσογειακά εποχιακά τέλματα αποτελούνται από εκτάσεις που καλύπτονται από λίγα εκατοστά νερό το χειμώνα και την άνοιξη. Στις λίμνες της περιοχής έρευνας αναπτύσσεται βενθική βλάστηση χαροειδών φυτών που αποτελούν με την επιπλέουσα βλάστηση τα υδροχαρή φυτά των υγροτόπων.

Οι καλαμώνες με Phragmites australis και Arundo donax φύονται στις όχθες των ποταμών και επεκτείνονται στις υγρές θέσεις των περιοχών μελέτης και αποτελούν σημαντικά ενδιαιτήματα για την ορνιθοπανίδα.

3.6.2 Δίκτυο NATURA2000

Το Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί ένα Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο περιοχών, οι οποίες φιλοξενούν φυσικούς τύπους οικοτόπων και οικοτόπους ειδών, που είναι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αποτελείται από δύο κατηγορίες περιοχών:

- τις «Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ)» (Special Protection Areas - SPA) για την Ορνιθοπανίδα, όπως ορίζονται στην Οδηγία 79/409/ΕΚ «για τη διατήρηση των άγριων πτηνών»
- τους «Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ)» (Sites of Community Importance – SCI) όπως ορίζονται στην Οδηγία 92/43/ΕΟΚ. Για τον προσδιορισμό των ΤΚΣ λαμβάνονται υπόψη οι τύποι οικοτόπων και τα είδη των Παραρτημάτων I και II της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ καθώς και τα κριτήρια του Παραρτήματος III αυτής.

Η Ελλάδα έχει χαρακτηρίσει σήμερα 202 Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) και 241 Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ). Οι δύο κατάλογοι περιοχών παρουσιάζουν μεταξύ τους επικαλύψεις όσον αφορά τις εκτάσεις τους.

Στην περιοχή μελέτης οι περιοχές που ανήκουν στο Δίκτυο Natura 2000 είναι η λίμνη της Αγυιάς και ο ποταμός Κερίτης.

- Είδη του οικοσυστήματος της Λίμνης της Αγυιάς

Αν και η λίμνη της Αγυιάς δεν είναι μια φυσική λίμνη, εμφανίζει μεγάλη ποικιλότητα υδρόβιων κοινοτήτων. Αποτελεί μια σημαντική περιοχή για υδρόβια πτηνά λευκοτσικνιάς (Egretta garzetta) και βαλτόπαπια (Aythya nyroca). Κύριες απειλές είναι η απομάκρυνση υδάτων, οι διάφορες υποδομές και η έντονη ανάπτυξη του τουρισμού.

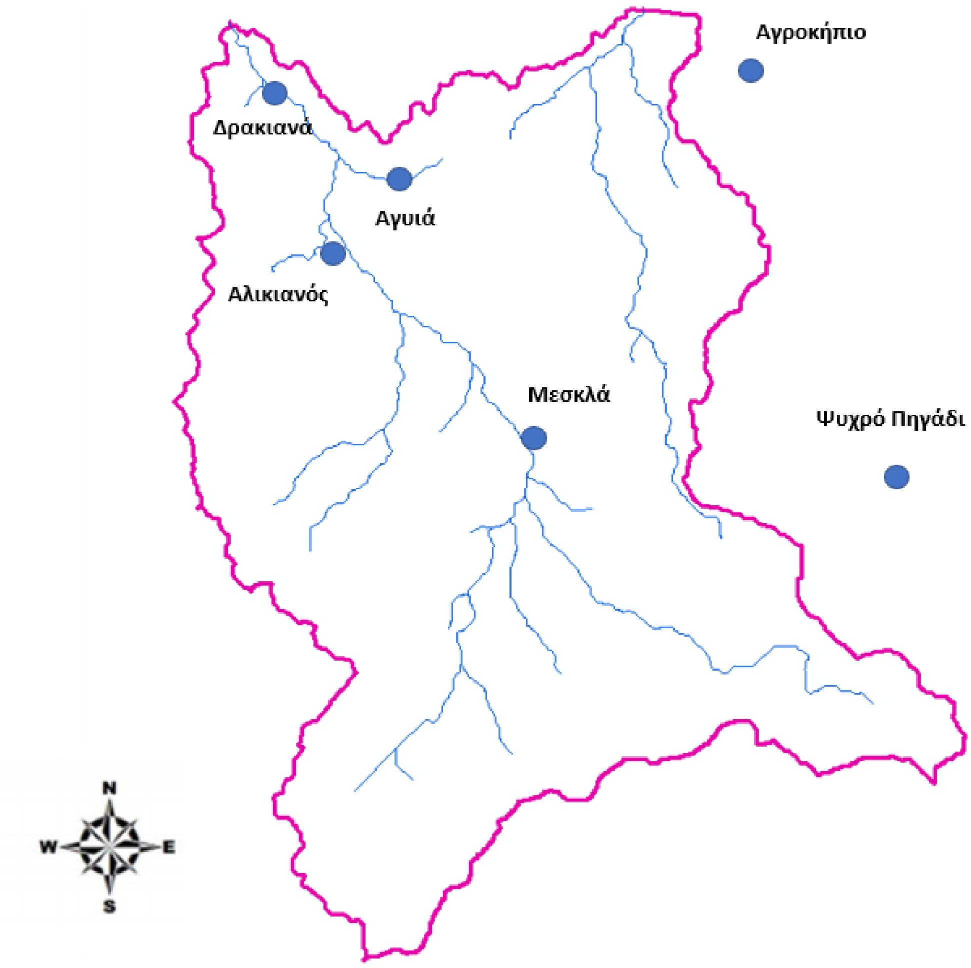
- Είδη του οικοσυστήματος της Λίμνης-Κερίτη

* Σπιτόφιδο (Leopard snake - Elaphe situla (Linnaeus, 1758))
* Γραμμωτή νεροχελώνα (Mauremys rivulata (Valenciennes, 1833))
* Τρανορινόλοφος (Greater horseshoe bat - Rhinolophus ferrumequinum (Schreber, 1774))
* Lesser horseshoe bat - Rhinolophus hipposideros (Bechstein, 1800)
* Woodwardia radicans (L.) Sm.

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ- ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Στην ενότητα αυτή, περιέχονται τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποιήση της λεκάνης απορροής του Κερίτη-Θερίσου με το μοντέλο SWAT και το καρστικό μοντέλο. Τα δεδομένα της βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο SWAT είναι κυρίως η ημερήσια βροχόπτωση, η ημερήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία. Τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας προέρχονται συνολικά από 4 σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής, τον σταθμό του Αλικιανού, των Μεσκλών, του Ψυχρού πηγαδιού και του Αγροκηπίου ενώ τα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν για την παροχή ύδατος στον ποταμό Κερίτη καθώς και στην Αγυιά καταγράφονται από τους σταθμός που βρίσκονται στην τοποθεσία Δρακιανά για τον Κερίτη και στην τοποθεσία Αγυιά για τις πηγές αυτής. Η τοποθεσία των σταθμών αυτών σε σχέση με την υπό μελέτη λεκάνη φαίνονται στην 10η εικόνα.

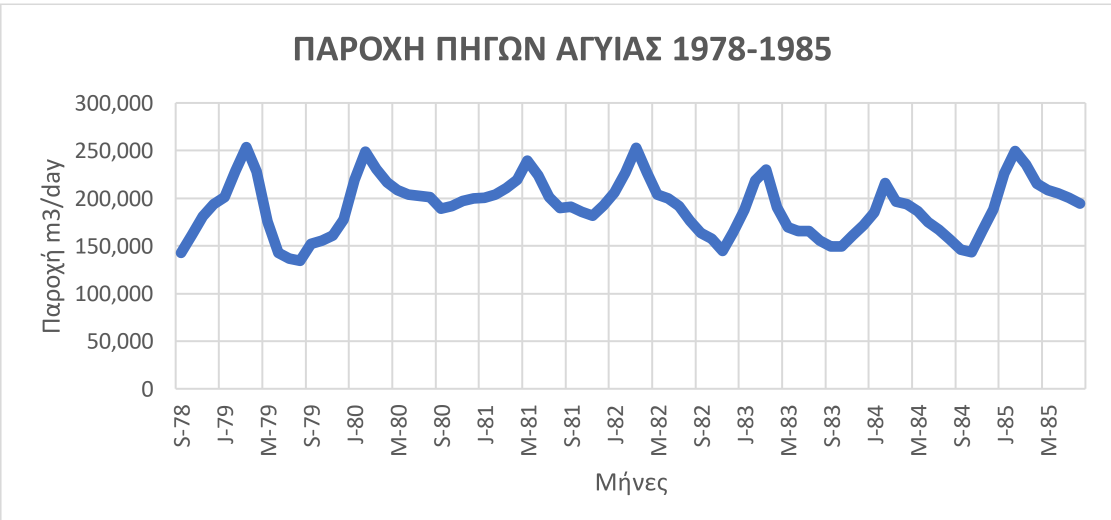


Εικόνα 10: Τοποθεσία των μετεωρολογικών σταθμών σχετικά με την λεκάνη απορροής

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δεδομένων του πεδίου που είναι διαθέσιμα για την βαθμονόμηση του μοντέλου.

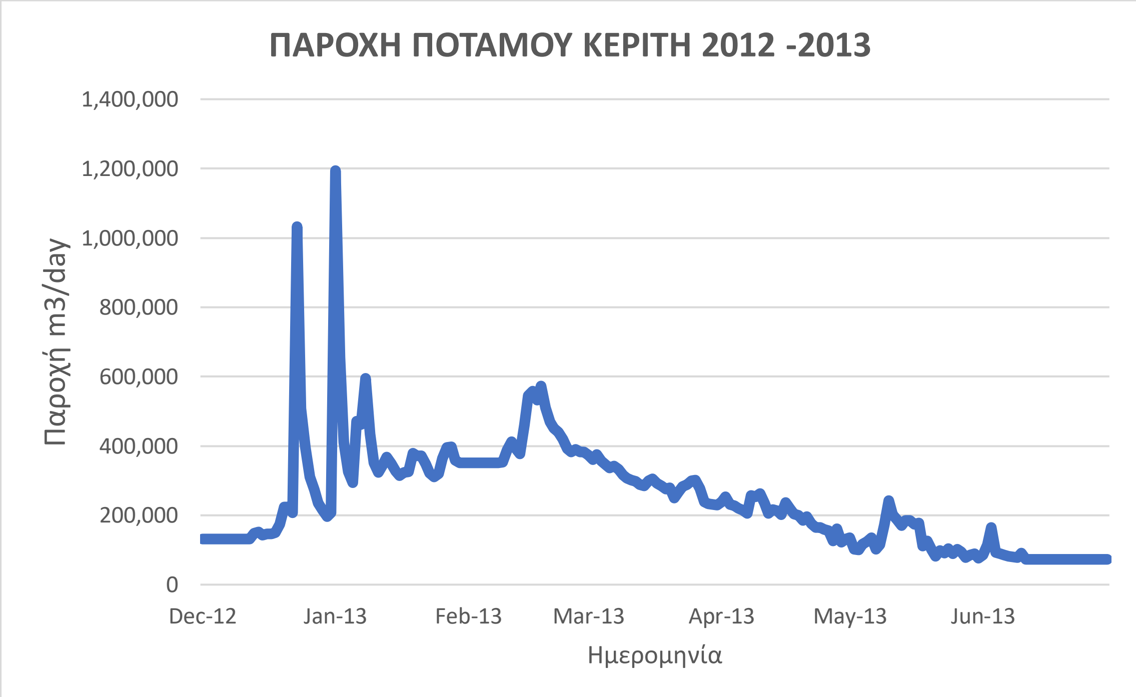
Διάγραμμα 4: Δεδομένα πεδίου για τις πηγές των Μεσκλών για τα έτη 1978-2005

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4 παρατηρείται ότι για το διάστημα που υπάρχουν δεδομένα (1978-2005), τους χειμερινούς μήνες υπάρχουν μεγάλες τιμές παροχής ύδατος, με την μέγιστη να ανέρχεται περίπου στα $3.64\times10^5\ \frac{m^3}{day}$ τον Φεβρουάριο του 1985. Ενώ τους θερινούς μήνες παρατηρούνται χαμηλές παροχές ύδατος, με την χαμηλότερη να αγγίζει περίπου τα $550\ \frac{m^3}{day}$ τον Οκτώβριο του 1990.

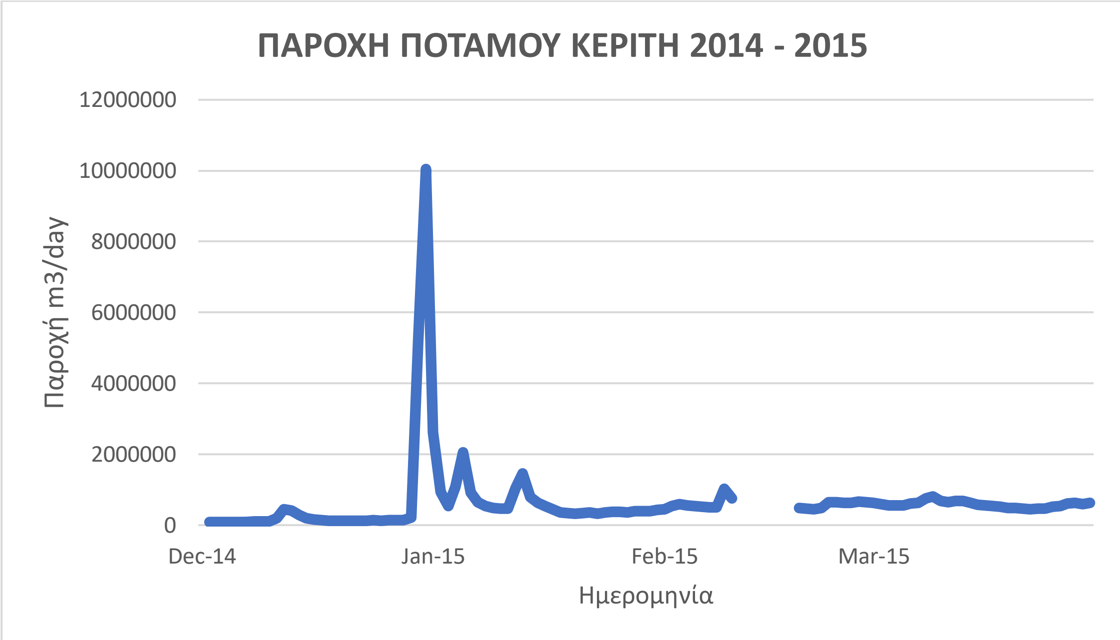


Διάγραμμα 5: Δεδομένα πεδίου για τις πηγές της Αγυιάς για τα έτη 1978-1985

Στο διάγραμμα 5, απεικονίζεται η συνολική παροχή από τις πηγές της Αγυιάς (Πλάτανος-Κολύμπα και Καλαμιώνας). Σύμφωνα με το διάγραμμα φαίνεται ότι οι ποσότητες νερού που εκφορτίζονται από την Αγυιά παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα στο χειμώνα και το καλοκαίρι. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που εκρέουν από τις πηγές της Αγυιάς τόσο το χειμώνα (φόρτιση του καρστ από τις βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις), όσο και το καλοκαίρι υποδεικνύουν ότι υπάρχει μεγάλος όγκος νερού σε μόνιμο απόθεμα. Η μέγιστη παροχή του συνόλου των πηγών της Αγυιάς ανέρχεται στα $2.54\times10^5\ \frac{m^3}{day}$ τον Μάρτιο του 1979 και η ελάχιστη $1.34\times10^5\ \frac{m^3}{day}$ τον Απρίλιο του 1979.

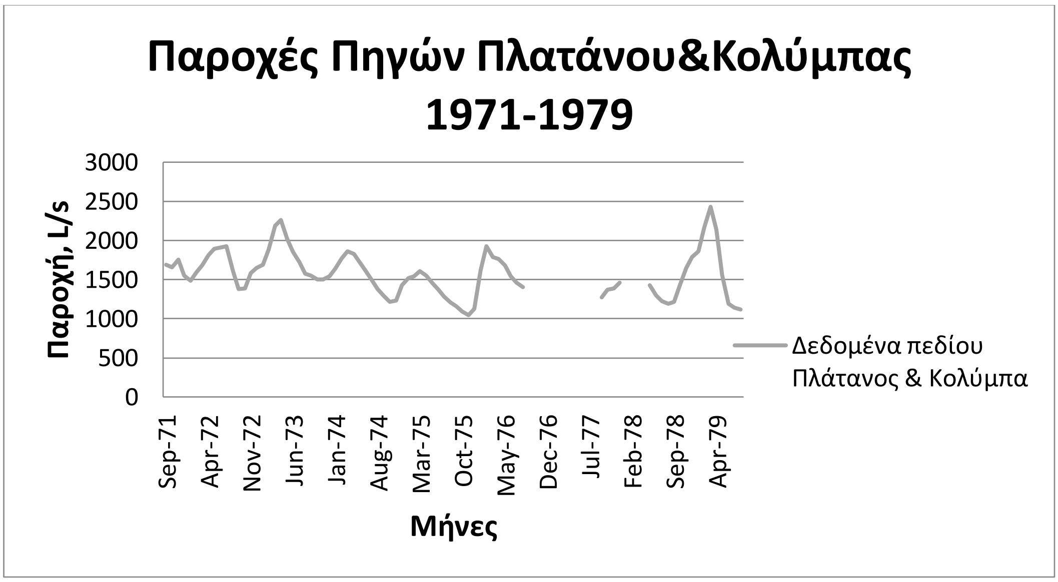


Διάγραμμα 6 : Δεδομένα πεδίου για τον ποταμό Κερίτη για τα έτη 2012-2013



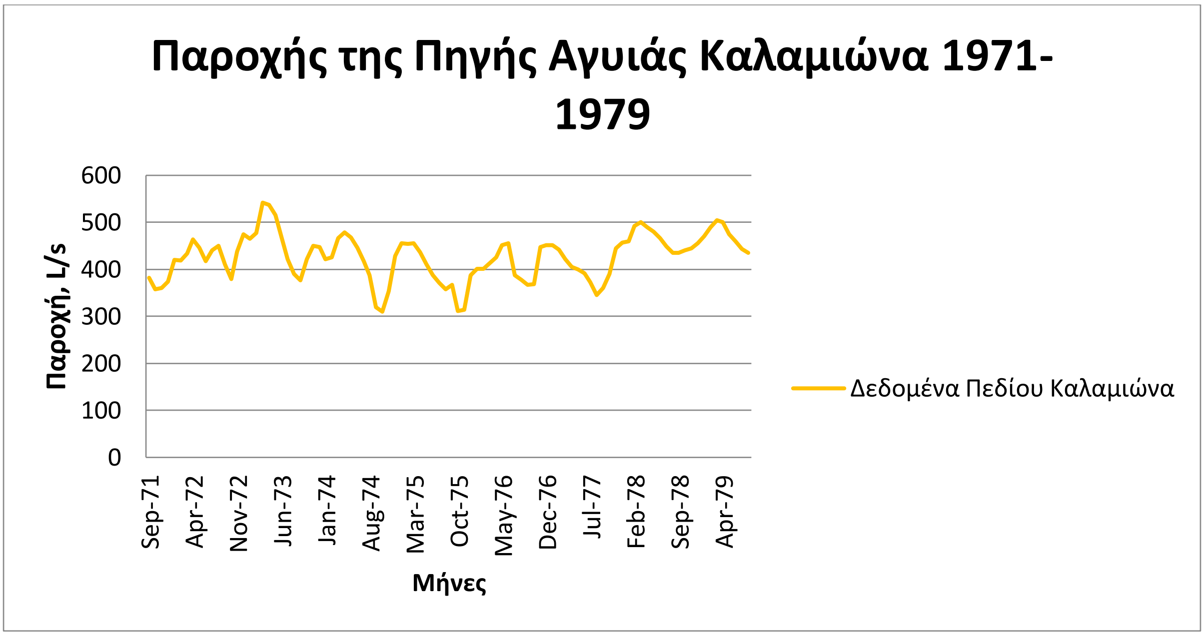
Διάγραμμα 7: Δεδομένα πεδίου για τον ποταμό Κερίτη για τα έτη 2014-2015

Όσον αφορά την επιφανειακή υδραυλική απορροή του ποταμού Κερίτη, η οποία έχει σχεδιαστεί στα διαγράμματα 6 και 7, παρατηρούνται κάποιες πλημμυρικές απορροές (κορυφές) κατά τη χειμερινή περίοδο οι οποίες φτάνουν τη μέγιστη τιμή $1.19\times10^{6}\ \frac{m^3}{day}$ τον Ιανουάριο του 2013, ενώ η ελάχιστη παροχή ύδατος είναι $7.3\times10^{4}\ \frac{m^3}{day}$ τον Ιούνιο του 2013.



Διάγραμμα 8: Δεδομένα πεδίου για τις πηγές του Πλατάνου και της Κολύμπας για τα έτη 1971-1979

Στο διάγραμμα 8, φαίνονται οι ποσότητες νερού που εκφορτίζονται από τις πηγές της Αγυιάς, Κολύμπα και Πλάτανος οι οποίες παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα στο χειμώνα και το καλοκαίρι. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που εκρέουν από τις παραπάνω πηγές τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι υποδεικνύουν ότι υπάρχει όγκος νερού σε μόνιμο απόθεμα. Η μέγιστη παροχή ύδατος των πηγών Κολύμπα και Πλάτανος ανέρχεται περίπου στα $2.54\times10^3\ \frac{L}{s}$ τον Μάρτιο του 1979 και η ελάχιστη $1.05\times10^3\ \frac{L}{s}$ τον Απρίλιο του 1979. Στο διάγραμμα 9, απεικονίζεται οι παροχή ύδατος της πηγής του Καλαμιώνα,



Διάγραμμα 9: Δεδομένα πεδίου για την πηγή της Αγυιάς Κλαμιώνα για τα έτη 1971-1979

Και σε αυτήν τη πηγή, παρατηρείται ότι υπάρχει μόνιμο απόθεμα. Η ελάχιστη τιμή της παροχής ύδατος είναι 310 $\frac{L}{s}$ τον Οκτώβριο του 1974 και η μέγιστη τιμή 542 $\frac{L}{s}$ τον Μάρτιο του 1973.

4.2 Μεθοδολογία

4.2.1 Επεξεργασία δεδομένων με το μοντέλο SWAT

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα εφαρμογής του μοντέλου SWAT με την βοήθεια του προγράμματος GIS. Η έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ArcSWAT 2012.10.2.18. Η βασική γραμμή εργαλείων περιλαμβάνει τις εξής επιλογές:

• SWAT Project Setup

• Watershed Delineation

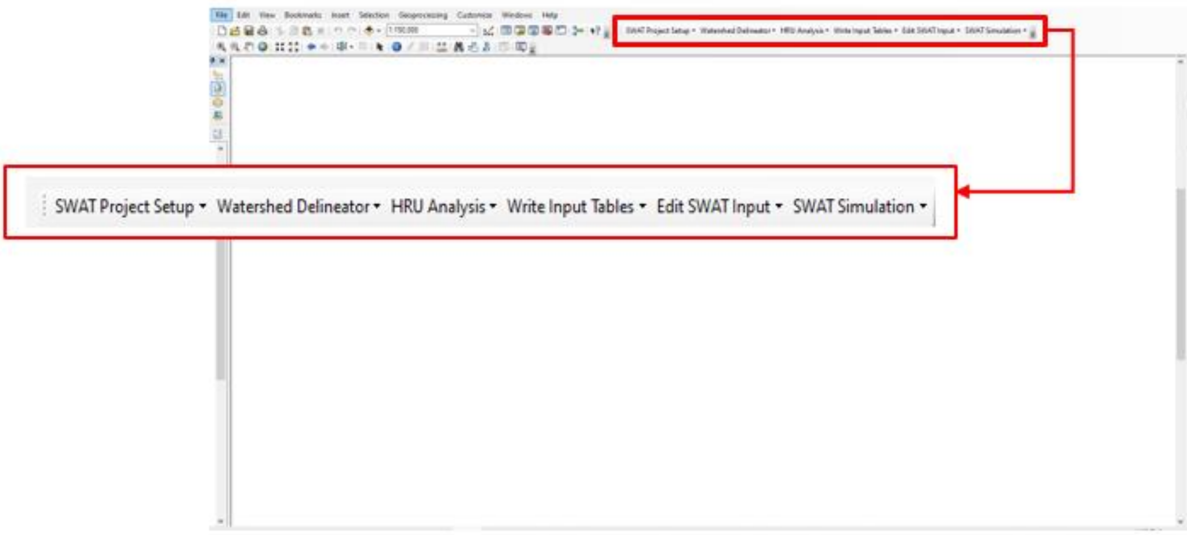
• HRU Analysis

• Write input Tables

• Edit SWAT Input

• SWAT Simulation

Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται το αρχικό περιβάλλον του προγράμματος GIS καθώς και η βασική γραμμή εργαλείων του ArcSWAT.



Εικόνα 11: Αρχική γραμμή εντολών του ArcSWAT

- Στην πρώτη ομάδα εντολών (SWAT Project Setup), ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει στη δημιουργία ενός νέου project, για το οποίο ορίζει που θα αποθηκευτεί και από ποια βάση δεδομένων θα λαμβάνει στοιχεία. Επίσης, από το μενού αυτό δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης, αντιγραφής και διαγραφής ενός project.

- Το δεύτερο μενού εντολών (Watershed Delineator), αφορά τον σχεδιασμό της λεκάνης απορροής του ποταμού και γίνεται εισαγωγή των δεδομένων για το υψόμετρο. Πραγματοποιείται εντοπισμός του υδρογραφικού δικτύου και η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρότερες υπολεκάνες. Το μενού μπορεί να δώσει αναφορές που αφορούν σε τοπογραφικά χαρακτηριστικά κάθε υπολεκάνης.

- Στο τρίτο μενού (HRU Analysis) πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU). Για να επιτευχθεί αυτή η διακριτοποίηση, εισάγονται βασικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, εισάγονται από τον χρήστη δεδομένα για τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις.

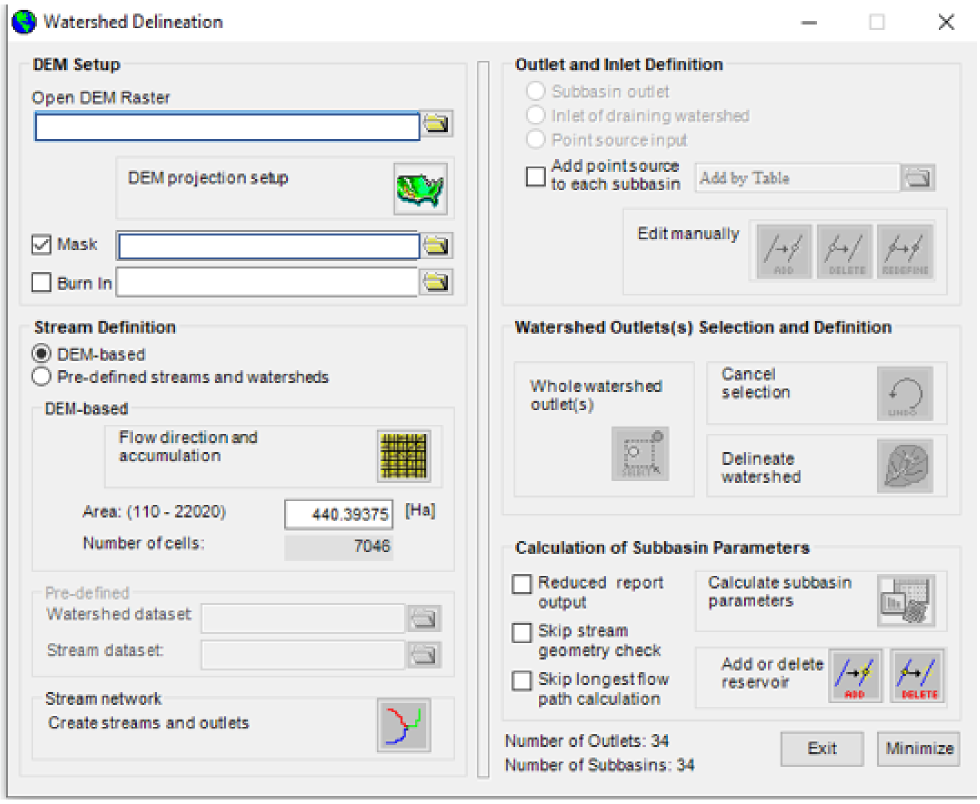
- Τα μενού Write Input Table και Edit Swat Input αφορούν την κατασκευή και επεξεργασία δεδομένων που είναι απαραίτητα για να τρέξει το μοντέλο. Η επεξεργασία τους είναι αναγκαία σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης και μπορεί να υλοποιηθεί πολύ εύκολα μέσα από μενού του προγράμματος.

- Τέλος, το μενού που ακολουθεί (SWAT Simulation), έχει να κάνει με την προσομοίωση του μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι λεπτομέρειες και οι προτιμήσεις του χρήστη για την προσομοίωση, διαβάζονται τα αποτελέσματα ενώ μπορεί να πραγματοποιηθεί και μια βαθμονόμηση με επιλογές του χρήστη.

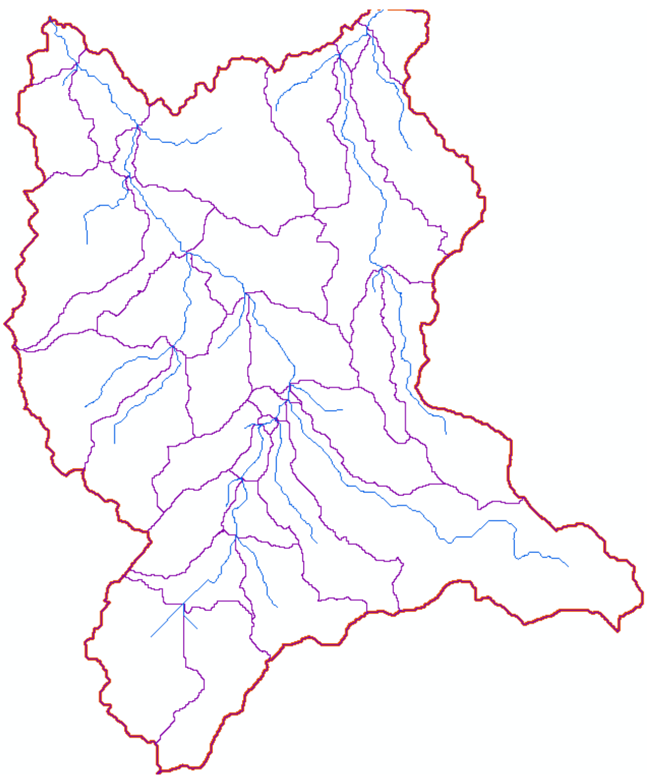
Παρακάτω περιγράφεται πιο αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου

4.2.1.1 Σχεδιασμός της λεκάνης απορροής

Πρώτο βήμα επεξεργασίας για το πρόγραμμα είναι ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής του ποταμού με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM (digital elevation model). Τα δεδομένα, που συλλέγονται για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αποτελούνται από μια σειρά εικόνων που όταν τοποθετηθούν σε περιβάλλον GIS δημιουργούν ένα σύμπλεγμα εικόνων σε πραγματικές συντεταγμένες. Αφού δημιουργηθεί το καινούργιο project από το SWAT Project Setup ξεκινάει η διαδικασία για τον σχηματισμό της λεκάνης απορροής επιλέγοντας το δεύτερο μενού (Watershed Delineator). Στην καρτέλα που εμφανίζεται, εικόνα 12, επιλέγεται το αρχείο dem που χρειάζεται, και με την εντολή DEM project setup καθορίζεται η μονάδα μέτρησης του υψομέτρου για το μοντέλο που έχει εισαχθεί. Οι μονάδες που επιλέγονται είναι τα μέτρα (m), μιας και αυτή είναι η μονάδα μέτρησης των υψομέτρων στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Στη συνέχεια, εφόσον έχει διαγραμμιστεί η ενδιαφερόμενη λεκάνη απορροής και επιλέγοντας την εντολή create streams and outlets σχεδιάζεται η δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου. Για να σχεδιαστεί η λεκάνη, απαραίτητο είναι να δοθεί το σημείο εξόδου της . Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ή να δημιουργήσει ένα καινούριο σημείο στο οποίο θέλει να «κλείνει» η λεκάνη. Μετά την επιλογή του σημείου, πραγματοποιείται η σχεδίαση της λεκάνης απορροής και των υπολεκανών. Όταν ολοκληρωθούν όλες οι απαραίτητες εντολές προκύπτει η χάραξη του υδροκρίτη της λεκάνης και γίνεται ο χωρισμός της σε 34 υπολεκάνες. Το παράθυρο που είναι υπεύθυνο για τον διαχωρισμό της λεκάνης και για την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους φαίνεται στην εικόνα 12. Ο χάρτης που αποτυπώνει τις υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης απεικονίζεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 12: Παράθυρο του μενού "Watershed Delineation"



Εικόνα 13: Υπολεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου

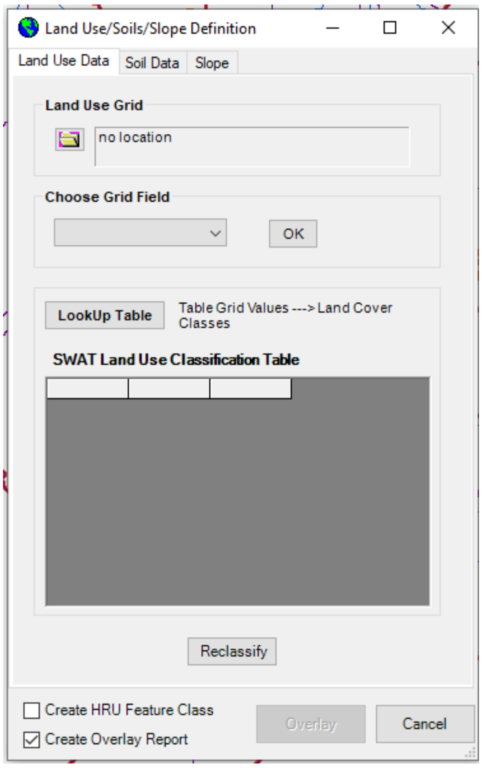
4.2.1.2 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης

Μετά το σχεδιασμό της λεκάνης απορροής, ακολουθεί η δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU). Όπως αναφέρθηκε, τα HRU's αποτελούν περιοχές με συγκεκριμένες και κοινές ιδιότητες ως προς τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις. Προκειμένου λοιπόν, να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε HRU, αναγκαίο είναι να γίνει εισαγωγή των δεδομένων χρήσεων γης και εδάφους και να δοθούν οδηγίες για την κατασκευή του χάρτη κλίσεων αυτού.

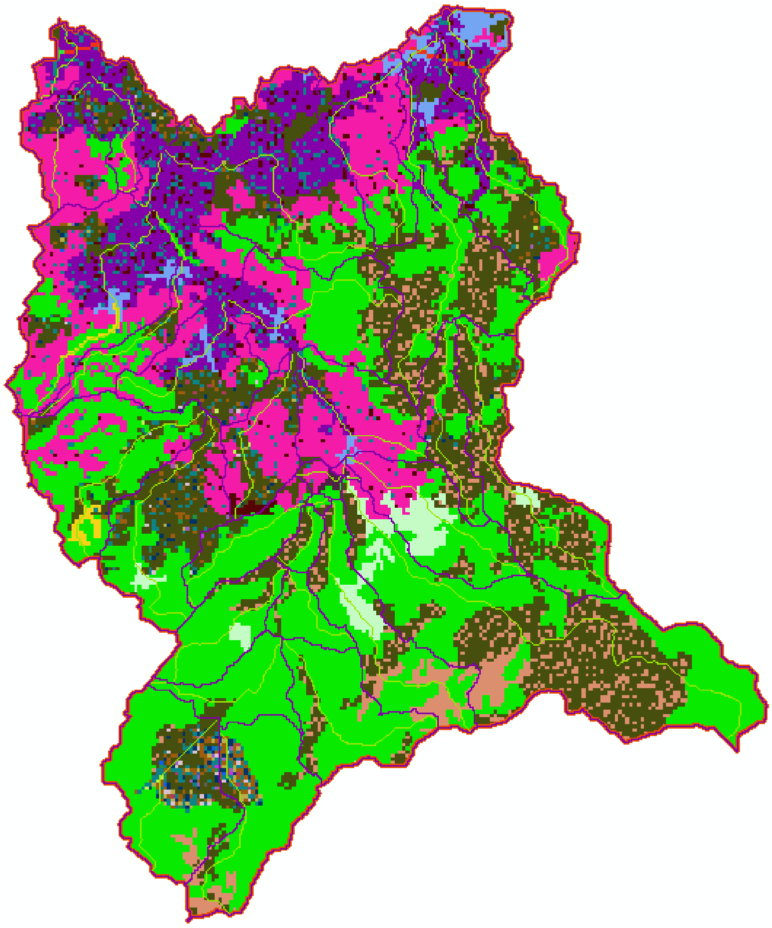
Για την δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU) επιλέγεται πρώτα το τρίτο μενού (HRU Analysis) και στην συνέχεια η εντολή «Land Use/Soil/Slope Definition» . Στο σημείο αυτό, εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα στην οποία ο χρήστης καλείται να δώσει δεδομένα αρχικά για τις χρήσεις γης, την εδαφολογία και τις κλίσεις.

4.2.1.3 Εισαγωγή Χρήσεων γης

Αρχικά, ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα που αφορούν τις χρήσεις γης, της περιοχής μέσω του παρακάτω μενού που εμφανίζεται, εικόνα 14. Στην εικόνα 15, παρουσιάζονται οι χρήσεις γης που εισήχθησαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.



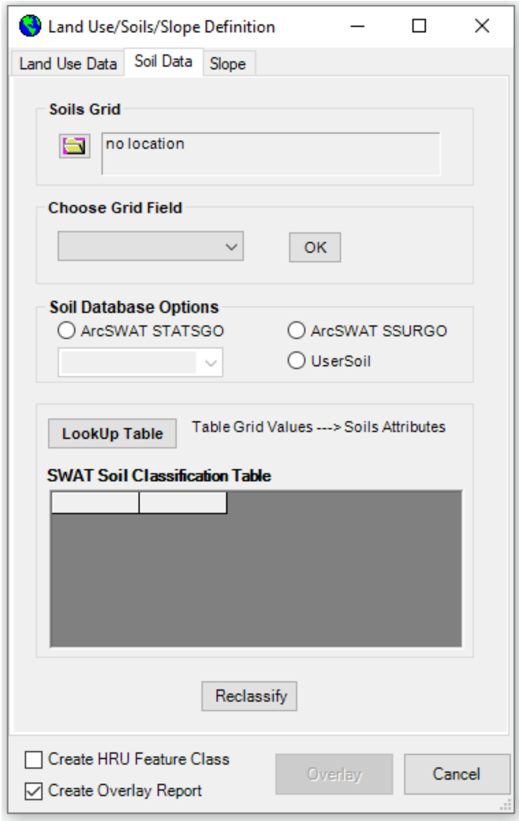
Εικόνα 14: Μενού για εισαγωγή υποβάθρου χρήσεων γης



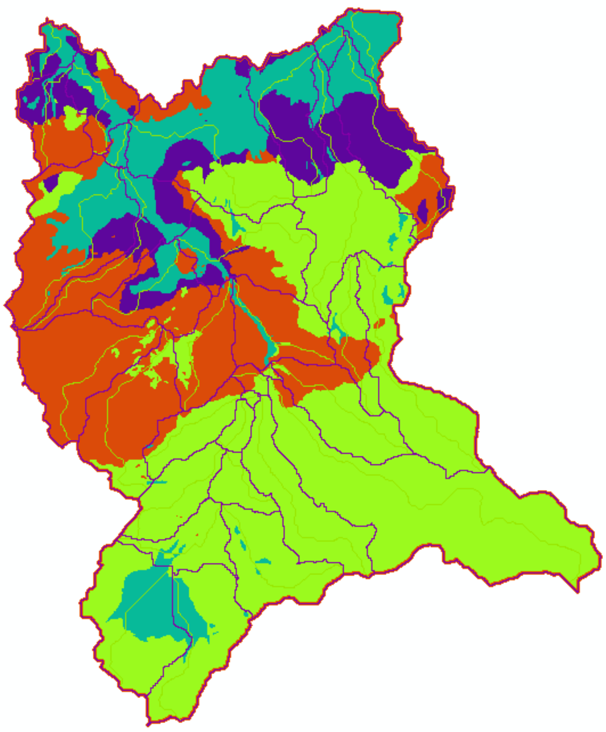
Εικόνα 15: Χάρτης χρήσεων γης

4.2.1.4 Εισαγωγή Δεδομένων εδάφους

Μετά τις χρήσεις γης, ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα του εδάφους, εικόνα 16. Αφού επιλεχθεί το υπόβαθρο για τα εδάφη και γίνει η αντιστοίχιση μέσω ενός "Lookup Table", προκύπτει ένα καινούριο layer που περιέχει τα τέσσερα εδάφη. Ο χάρτης με τα εδάφη της λεκάνης απορροής φαίνεται στην Εικόνα 17.



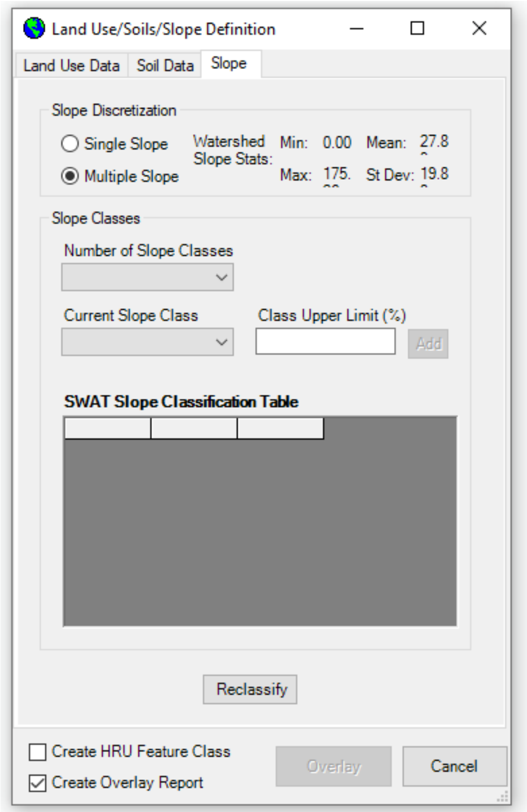
Εικόνα 16: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων εδάφους



Εικόνα 17: Εδάφη της περιοχής μελέτης

4.2.1.5 Εισαγωγή Κλίσεων

Καθοριστικής σημασίας για τις διεργασίες βροχόπτωσης και απορροής είναι το ανάγλυφο και οι κλίσεις της λεκάνης απορροής. Το ανάγλυφο μιας λεκάνης επηρεάζει αισθητά το χρόνο συγκέντρωσης του νερού, ο οποίος αυξάνεται, όταν οι κλίσεις είναι μικρές, το ανάγλυφο μη ομαλό, την αποκόλληση και μεταφορά φερτών υλικών προς το κύριο υδατόρευμα. Για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, η αναπαράσταση των κλίσεων γίνεται με χάρτη κλίσεων που δημιουργήθηκε από το ArcSWAT και από το μενού Slope του HRU Analysis. Η εικόνα 18 αποτυπώνει τη φόρμα που χρησιμοποιεί πρόγραμμα.



Εικόνα 18: Φόρμα εισαγωγής κλίσεων εδάφους

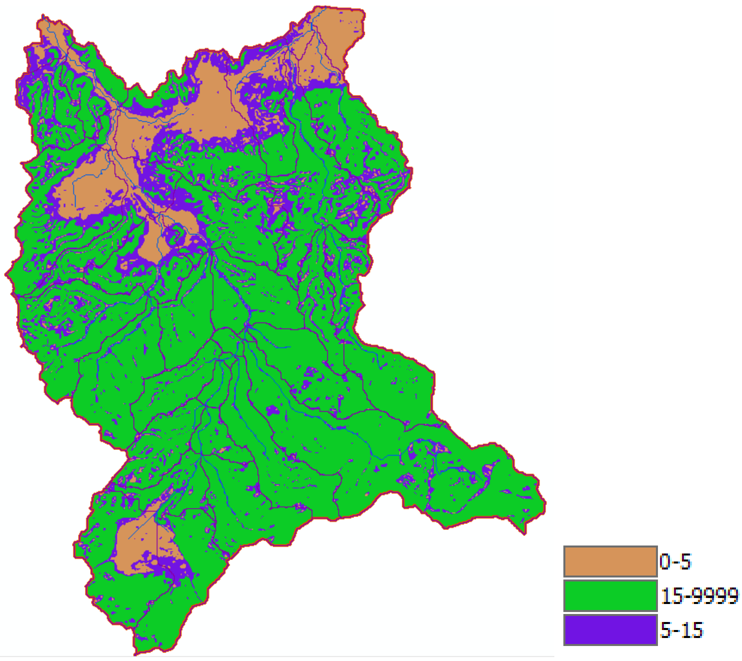
Το πρόγραμμα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 18, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει σε πόσες κατηγορίες κλίσεων θέλει να κατατάξει την λεκάνη που μελετάται. Το μέγιστο όριο είναι 5 κατηγορίες και ο χρήστης δίνει τιμές για τα όρια των κατηγοριών. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται οι εξής κατηγορίες:

• 0-5

• 5-15

• 15-9999.

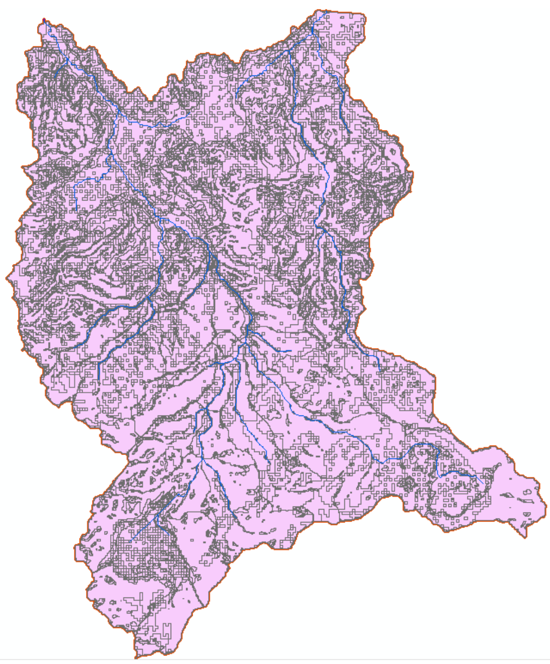
Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται το καινούριο επίπεδο με τον χάρτη κλίσεων, όπως φαίνεται στην εικόνα 19.



Εικόνα 19: Χάρτης κλίσεων εδάφους

4.2.1.6 Ορισμός HRU

Μόλις εισαχθούν τα υπόβαθρα των χρήσεων γης, των εδαφών και των κλίσεων, το πρόγραμμα χωρίζει την λεκάνη απορροής και τις υπολεκάνες σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Η διαδικασία αυτή γίνεται αυτόματα και παρουσιάζεται στην εικόνα 20.



Εικόνα 20: Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) της λεκάνης απορροής Κερίτη-Θερίσου

4.2.1.7 Εισαγωγή δεδομένων καιρού

Ο χρήστης καλείται να εισάγει επιπλέον τα δεδομένα του καιρού. Η εισαγωγή αυτή γίνεται από την φόρμα "Weather Stations" που βρίσκεται στην κατηγορία «Write Input Tables" του κεντρικού μενού. Σε αυτή τη φόρμα εισάγονται δύο τύποι στοιχείων, ένας πίνακας που περιέχει πληροφορίες για κάθε μετεωρολογικό σταθμό (wgen file) και οι χρονοσειρές για την βροχόπτωση, την θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου σε μορφή κειμένου. Τα χαρακτηριστικά του πίνακα wgen είναι τα ακόλουθα:

• TITLE: Όνομα του μετεωρολογικού σταθμού.

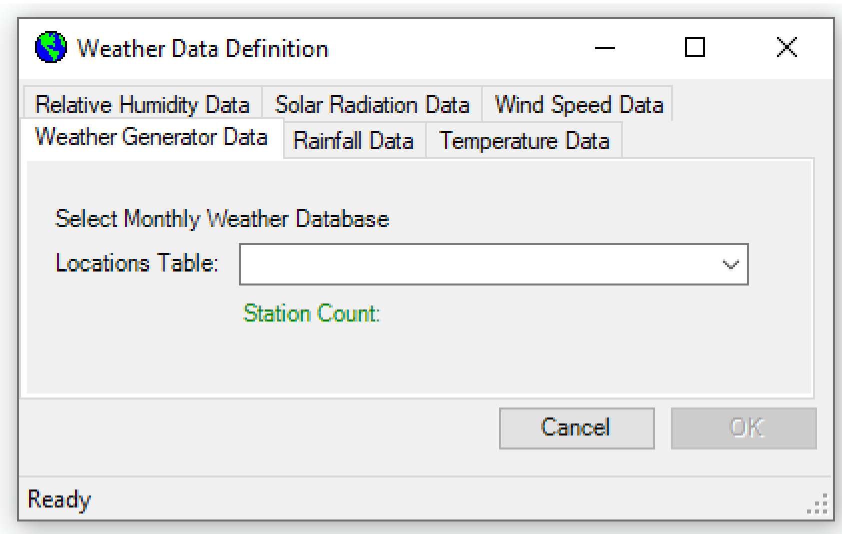
• WLATITUDE: Γεωγραφικό πλάτος μετεωρολογικού σταθμού (degrees).

• WLONGTITUDE: Γεωγραφικό μήκος μετεωρολογικού σταθμού (degrees).

• WELEV: Υψόμετρο σταθμού (m).

Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από τις πληροφορίες του κάθε σταθμού.

Μόλις τα αρχεία αυτά περαστούν στην βάση δεδομένων του ArcSWAT γίνεται η εισαγωγή τους με χρήση της φόρμας του προγράμματος που παρουσιάζεται στην εικόνα 21.

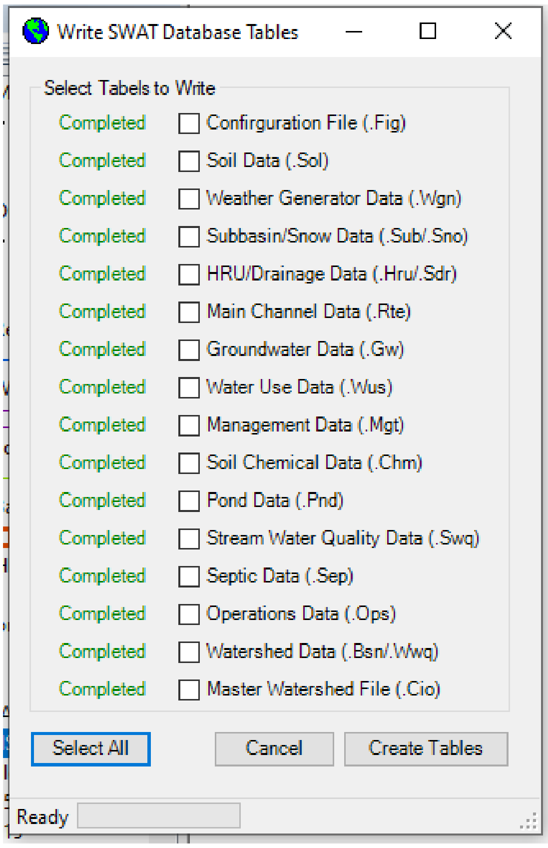


Εικόνα 21: Φόρμα εισαγωγής μετεωρολογικών στοιχείων

Στην φόρμα της εικόνας 21, εισάγονται επίσης, και οι χρονοσειρές για τη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τιμές προσομοίωσης έναντι μετρημένων τιμών.

4.2.1.8 Συγγραφή πινάκων με δεδομένα εισαγωγής

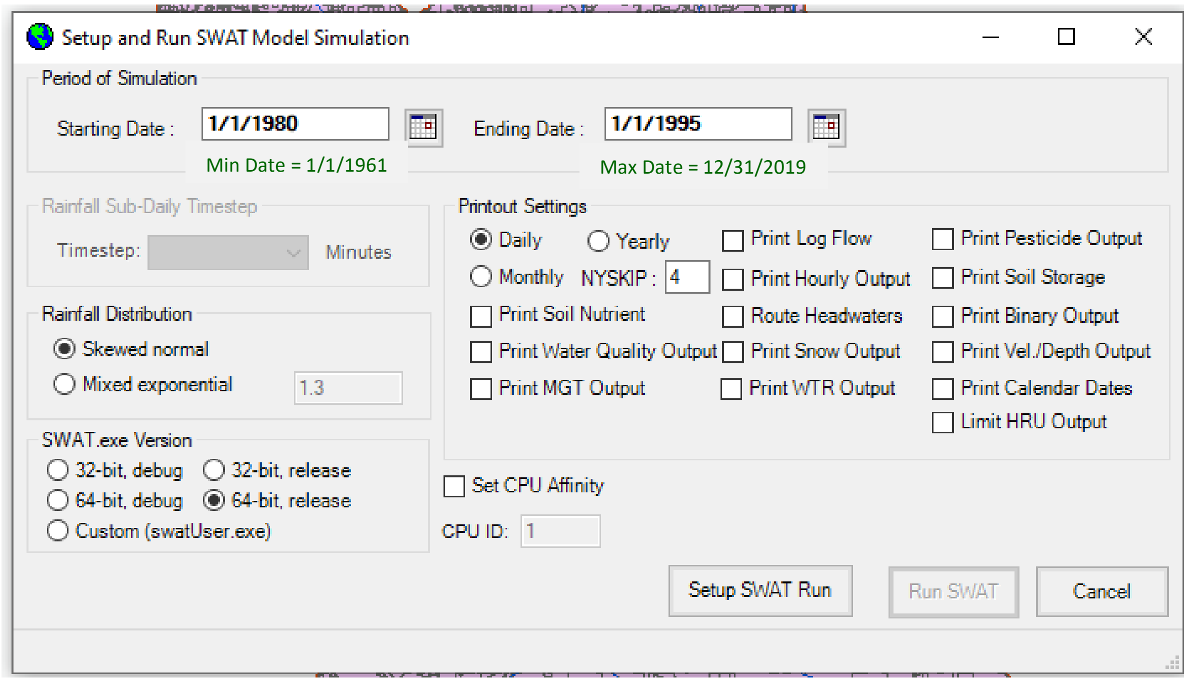
Όταν ολοκληρωθεί η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων, το πρόγραμμα δημιουργεί πίνακες που περιέχουν απαραίτητα δεδομένα για να λειτουργήσει το μοντέλο. Ο χρήστης επιλέγει την εντολή «Write SWAT Input Tables» και εμφανίζεται μια άλλη φόρμα η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22: Φόρμα για την δημιουργία πινάκων εισαγωγής δεδομένων

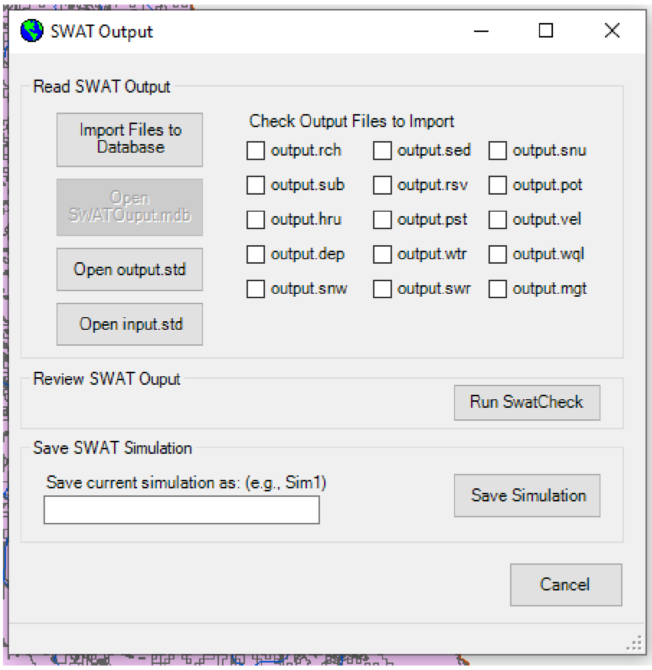
4.2.1.9 Προσομοίωση του μοντέλου

Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία των πινάκων από το πρόγραμμα, ακολουθεί η προσομοίωση με το τρέξιμο του μοντέλου. Η αρχική προσομοίωση γίνεται με σκοπό να εξακριβωθεί ότι όλα τα δεδομένα έχουν εισαχθεί με επιτυχία στο πρόγραμμα και δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα. Εάν το πρόγραμμα λειτουργήσει κανονικά, τότε ακολουθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης.



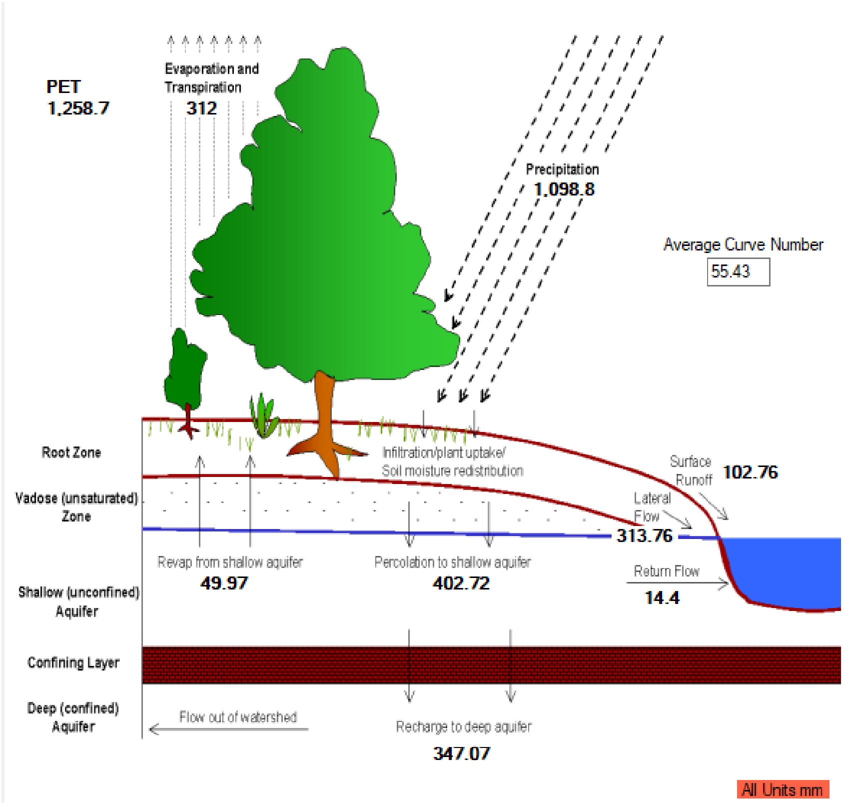
Εικόνα 23: Φόρμα για την ρύθμιση της προσομοίωσης του μοντέλου

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 23, που παρουσιάζει την φόρμα του προγράμματος, για την εκκίνηση της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις ημερομηνίες εκκίνησης και τέλους της, καθώς επίσης και να ορίσει πόσα χρόνια θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να γίνει «ζέσταμα» (NYSKIP) του προγράμματος. Στη συγκεκριμένη διπλωματική το χρονικό διάστημα που επιλέγεται για να γίνει η προσομοίωση είναι από τη 1/1/1974 έως τις 31/12/2019, που υπάρχουν βροχομετρικά δεδομένα από τους σταθμούς. Ο χρόνος που τίθεται για «ζέσταμα» έτσι ώστε το πρόγραμμα να τρέξει χωρίς να δώσει αποτελέσματα είναι τέσσερα έτη. Όταν ο χρήστης είναι έτοιμος, επιλέγει την εντολή “Setup SWAT Run” και μετά το “Run SWAT”. Το πρόγραμμα συνεχίζει στην προσομοίωση και μόλις η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί, ο χρήστης είναι σε θέση να κάνει ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Τέλος, αφού το τρέξιμο του μοντέλου ολοκληρωθεί, χρειάζεται να επιλεχθούν και να γραφτούν τα δεδομένα του μοντέλου στην βάση δεδομένων της access πατώντας πρώτα στο μενού SWAT Simulation την επιλογή Read SWAT output και έπειτα Import Files to Database. Οι επιλογές αυτές διακρίνονται στην εικόνα 24.



Εικόνα 24: Φόρμα επιλογής ανάγνωσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Στην καρτέλα Read SWAT output υπάρχει το υδρολογικό ισοζύγιο που έχει δημιουργηθεί από το μοντέλο πατώντας την επιλογή Run SWATcheck και έπειτα την επιλογή Hydrology. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται το υδρολογικό ισοζύγιο που προέκυψε από το μοντέλο.



Εικόνα 25: Υδρολογικό ισοζύγιο του μοντέλου

4.3 Επεξεργασία δεδομένων

Αφού εισαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα στο μοντέλο και εξαχθούν τα απαιτούμενα αποτελέσματα, έπεται η διαδικασία επεξεργασίας αυτών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λεκάνη απορροής του Κερίτη λειτουργεί με το σύστημα των δύο ταμιευτήρων. Τα Μεσκλά αποτελούνται από τις πηγές Παναγιά, Κεφαλοβρύσια, Νικολιανά οι οποίες τροφοδοτούνται από τα Λευκά Όρη, ενώ η Αγυιά αποτελείται από τις πηγές Καλαμιώνας, Πλάτανος και Κολύμπα.

Σύμφωνα με το παράθεμα της μελέτης Υδρογεωλογική-διαχειριστική μελέτη για την αναρρύθμιση των καρστικών πηγών Αγυιας,2017, *<<από γεωχημικής άποψης, οι πηγές (Πλάτανος/Κολύμπα και Καλαμιώνας) είναι διαφορετικές και τροφοδοτούνται από διαφορετικά καρστικά συστήματα (Μυλωνιανών και Κουφού αντιστοίχως). Αυτό συμπεραίνεται από τη γεωχημεία των πηγών Πλατάνου και Κολύμπας η οποία σχετίζεται με την γεωχημεία του καρστικού των Μυλωνιανών ενώ του Καλαμιώνα με την γεωχημεία του καρστικού του Κουφού. Σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο συστημάτων είναι το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα χλωριόντα, τα θειικά, καθώς και ασβέστιο, μαγνήσιο και νάτριο.*

Πίνακας 6 : Σύγκριση της γεωχημίας των γεωτρήσεων

	ΤΟΕΒ Μυλωνιανών	Πηγή Πλατάνου ΔΕΥΑΧ	Πηγή Κολύμπας	Πηγή Καλαμιώνα	Γεώτρηση Κουφού
pH	8.0	7.8	7.8	7.6	7.6
EC (μS/cm)	269	291	556	1443	1358
Σκληρότητα (mg/l)	131	139	149	160	180
Cl- (mg/l)	13.94	13.04	24.50	38.40	44.09
SO42-(mg/l)	9.15	16.47	135.97	632.43	657.70
N-NO3- (mg/L)	0.66	0.55	0.32	0.43	2.10
N-NH4 (mg/l)	0.05	0.04	0.09	0.03	0.03
P-PO43- (mg/l)	0.02	0.03	0.05	0.58	0.02
PHENOLS (ppm)	0.11	0.01	0.15	0.05	0.04
Na (ppm)	4.2	6.0	8.4	12.6	13.9
Mg (ppm)	5.0	8.4	13.2	33.7	34.5
K (ppm)	0.1	0.2	0.9	0.5	0.5
Ca (ppm)	22.2	30.4	43.5	126.1	147.9
Mn (ppb)	10.6	2.0	1.9	0.5	2.9
Fe (ppb)	1.7	18.9	10.6	20.3	25.8

Η εκδοχή η οποία ερμηνεύει τη συσχέτιση των πηγών είναι η ύπαρξη μιας επιλεκτικής πορεία κάτω από το τεταρτογενές και από την κοίτη του ποταμού Κερίτη που δημιουργήθηκε με τεκτονική ρηγμάτωση. Οι γεωτρήσεις του Αλικιανού και Βατολάκκου που βρίσκονται στο τεταρτογενές έχουν διαφορετική χημεία από τον Καλαμιώνα. Γενικά, η γεωχημεία του Καλαμιώνα (εκτός από τον Κουφό) δεν συναντάται πουθενά από τα Μεσκλά μέχρι τον Αλικιανό και τις γεωτρήσεις του τεταρτογενούς. Η δημιουργία αυτής της επιλεκτικής πορείας ενισχύεται από τις παρακάτω παρατηρήσεις. Αν θεωρήσουμε μία νοητή γραμμή που συνδέει τα καρστικά του Κουφού (τρίπολι με γύψο) με τον Καλαμιώνα, *πιθανολογείται ότι υπάρχει μία ασυνέχεια στο τεταρτογενές διότι το βόρειο τμήμα δεν υπάρχει υδροφορία ενώ στο νότιο υπάρχει σταθερή υδροφορία που τροφοδοτείται από το καρστικό στο Σκινέ. Αυτή η ασυνέχεια πιθανόν σχετίζεται με την επιλεκτική πορεία της εκφόρτισης του καρστικού του Κουφού στον Καλαμιώνα και υποδηλώνει ότι τα δύο συστήματα είναι ανεξάρτητα.*

Στην εικόνα 26, απεικονίζεται η τοποθεσία των πηγών της Αγυιάς Καλαμιώνας, Πλάτανος, Κολύμπα ενώ στις εικόνες 27,28 παρατίθενται φωτογραφίες από τις πηγές Κολύμπα και Καλαμιώνα αντίστοιχα.

Εικόνα 26: Τοποθεσία των πηγών της Αγυιά

Εικόνα 27: Πηγή Κολύμπας

Εικόνα 28: Πηγή Καλαμιώνα

Αρχικά, μέσω του μοντέλου SWAT ορίζονται οι υπολεκάνες οι οποίες τροφοδοτούν το σύστημα των Μεσκλών, της Αγυιάς και του Κουφού. Στη συνέχεια, για τις χρονιές που υπάρχουν δεδομένα πεδίου συγκρίνεται και βελτιστοποιείται η παροχή του μοντέλου SWAT με τα πραγματικά δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, για τις πηγές των Μεσκλών υπάρχουν δεδομένα από 9/1/78 έως 8/1/2005. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση απεικονίζονται στον πίνακα7.

Πίνακας 7 : Τιμές παραμέτρων για την βαθμονόμηση των πηγών των Μεσκλών

	Παράμετροι	**Τιμή**	**Μονάδα Μέτρησης**
ΜΕΣΚΛΑ	Κλάσμα εισροής στον ανώτερο ταμιευτήρα, a1.	0.95	
	Κλάσμα εισροής από τον ανώτερο στον κατώτερο ταμιευτήρα, a2.	0.45	
	Χρόνος Παραμονής στον ανώτερο ταμιευτήρα, tu.	20.00	day
	Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα, ku.	0.050	1/day
	Χρόνος Παραμονής στον κατώτερο ταμιευτήρα, tl.	800.00	day
	Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα, kl.	0.001	1/day
	Βήμα, t	1.00	day
	Κλάσμα ροής από τα Μεσκλά στην Αγυιά, a3	0.99	

Για την πηγή του Καλαμιώνα (η παροχή ύδατος συγκρίνεται με τις πηγές του Κουφού) υπάρχουν δεδομένα από 9/1/1971 έως 8/1/1979. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8 : Τιμές παραμέτρων για την βαθμονόμηση της πηγής του Καλαμιώνα

	Παράμετροι	**Τιμή**	**Μονάδα Μέτρησης**
ΚΑΛΑΜΙΩΝΑΣ	Αρχική εισροή στο καρστ, Qko	35000	m3/day
	Λόγος της παροχής που εισρέει στον ανώτερο ταμιευτήρα, a1	1	
	Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα, ku	0.002	1/day
	Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα, kl	1	1/day
	Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο, a2	0	
	Συνολικός χρόνος προσομοίωσης	2557	days

Για τις πηγές της Αγυιάς υπάρχουν δεδομένα από 9/1/78 έως 8/1/2005. Σε αυτή την περίπτωση, αυτά αναφέρονται στο σύνολο των πηγών της δηλαδή στη Κολύμπα, Πλάτανος και Καλαμιώνας. Επομένως, είναι απαραίτητο μέσω του μοντέλου, εφόσον βαθμονομηθεί ορθά ο Καλαμιώνας και προσεγγιστούν οι παροχές του για τα έτη 9/1/78 έως 8/1/2005 να προστεθούν σε αυτές, οι παροχές του Πλάτανου και της Κολύμπας, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση τους. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των πηγών της Αγυιάς βρίσκονται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9 : Τιμές παραμέτρων για την βαθμονόμηση των πηγών της Αγυιάς

	Παράμετροι	**Τιμή**	**Μονάδα Μέτρησης**
ΑΓΥΙΑ	Κλάσμα εισροής στον ανώτερο ταμιευτήρα, b1.	0.95	
	Κλάσμα εισροής από τον ανώτερο στον κατώτερο ταμιευτήρα, b2.	0.10	
	Χρόνος Παραμονής στον ανώτερο ταμιευτήρα, tu.	5.00	day
	Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα, ku.	0.20	1/day
	Χρόνος Παραμονής στον κατώτερο ταμιευτήρα, tl.	2500.00	day
	Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα, kl.	0.00040	1/day
	Βήμα, t.	1.00	day

Τέλος, συγκρίνονται οι παροχές της λεκάνης απορροής Κερίτη που έχουν μετρηθεί στο πεδίο, με αυτή που προκύπτει έμμεσα από το μοντέλο. Στα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν οι αντλήσεις που πραγματοποιούνται από τους φορείς που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για κάθε μια από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι απαραίτητος ο υπολογισμός στατιστικών δεικτών, ώστε να κριθεί η αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης. Οι δείκτες αυτοί αναφέρονται παρακάτω:

- $\mathrm{NSE} = 1 - \left(\frac{\Sigma(\mathrm{Q_o} - \mathrm{Q_s})^2}{\Sigma(\mathrm{Q_o} - \mathrm{Qo_{mean}})^2}\right)$
- $\mathrm{PBIS} = \frac{(\Sigma(\mathrm{Q_o} - \mathrm{Q_s})) \times 100}{\Sigma\, \mathrm{Q_o}}$
- $\mathrm{RMSE} = \sqrt{\Sigma(\mathrm{Q_o} - \mathrm{Q_s})^2}$
- $\mathrm{RSR} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\Sigma(\mathrm{Q_o} - \mathrm{Qo_{mean}})^2}$

4.4 Στατιστικές μέθοδοι

Η ανάλυση συχνότητας της υδρολογικής πληροφορίας συμβάλει ουσιαστικά στον ορθολογικό σχεδιασμό των έργων που έχουν άμεση ή έμμεση σχέση με το νερό, Παραδείγματα τέτοιων έργων που πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τη σχέση μεγέθους-συχνότητας εμφάνισης του υδρολογικού φαινομένου είναι μεταξύ άλλων οι υπερχειλιστές ασφαλείας των φραγμάτων, οι γέφυρες και τα δίκτυα αποχέτευσης όμβριων νερών (Τσακίρης, 2013). Η στατιστική ανάλυση της υδρολογικής πληροφορίας δεν συνεισφέρει μόνο στο σχεδιασμό υδραυλικών κατασκευών με μικρή διακινδύνευση στη λειτουργία της αλλά κυρίως στον αποδοτικό σχεδιασμό των έργων ο οποίος πρέπει να προέρχεται από συνδυασμό ανάλυσης συχνότητας εμφάνισης του υδρολογικού φαινομένου με την οικονομική ανάλυση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται η ανάλυση συχνότητας εμφάνισης υδρολογικού φαινομένου με την μέθοδο Gumbel, Log Pearson type 3 και την μέθοδο POT για περίοδο επαναφοράς 50 έτη. Με τον όρο περίοδο επαναφοράς ενός φαινομένου νοείται το μέσο χρονικό διάστημα Τ (έτη) μέσα στο οποίο το θεωρούμενο υδρολογικό φαινόμενο θα εμφανισθεί μόνο μια φορά με τιμή ίση η μεγαλύτερη της δοθείσας (Τσακίρης, 2013). Η περίοδος επαναφοράς εξαρτάται από το μέγεθος και τη σπουδαιότητα του υπό μελέτη έργου. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα από το έτος 1975 έως το 2018 και υπολογίζεται η παροχή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών, δηλαδή η παροχή που θα εμφανιστεί μια φορά στα 50 χρόνια.

4.4.1 Μέθοδος GUMBEL

Η κατανομή Gumbel ανήκει στην κατηγορία των κατανομών Ακραίων Τιμών και αποτελεί μία από τις κατανομές που ενυπάρχουν στην Γενικευμένη κατανομή Ακραίων Τιμών. (Τσακίρης, 2013).

- Αρχικά, επιλέγονται οι μέγιστες ετήσιες παροχές από τα έτη 1975 έως το 2018 (ημερήσια δεδομένα) και ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά.
- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος (μέση τιμή $\overline{\mathrm{X}}$ και τυπική απόκλιση $\mathrm{S_x}$)
- Προσδιορισμός της περιόδου επαναφοράς για κάθε μία από τις μέγιστες παροχές με τη χρήση του τύπου $\mathrm{T} = \frac{\mathrm{N+1}}{\mathrm{m}}$, όπου N ο αριθμός ετών και m ο αριθμός εμφάνισης των γεγονότων ενδιαφέροντος, δηλαδή των μέγιστων παροχών (έπειτα από ταξινόμηση των παροχών κατά αύξουσα σειρά)
- Υπολογισμός των συντελεστών Yn και Sn μέσω του παρακάτω πίνακα

Table 2: Reduced standard deviation S_N (y)[3]

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.9496	0.9676	0.9833	0.9971	1.0095	1.0206	1.0316	1.0411	1.0493	1.0565
20	1.0628	1.0696	1.0754	1.0811	1.0864	1.0915	1.0961	1.1004	1.1047	1.1086
30	1.1124	1.1159	1.1193	1.1226	1.1255	1.1285	1.1313	1.1339	1.1363	1.1388
40	1.1413	1.1436	1.1458	1.1480	1.1499	1.1519	1.1538	1.1557	1.1574	1.1590
50	1.1607	1.1623	1.1638	1.1658	1.1667	1.1681	1.1696	1.1708	1.1721	1.1734
60	1.1747	1.1758	1.1770	1.1782	1.1793	1.1803	1.1814	1.1824	1.1834	1.1844
70	1.1854	1.1863	1.1873	1.1881	1.1890	1.1898	1.1906	1.1915	1.1923	1.1930
80	1.1938	1.1945	1.1953	1.1959	1.1967	1.1973	1.1980	1.1987	1.1994	1.2001
90	1.2007	1.2013	1.2020	1.2026	1.2032	1.2038	1.2044	1.2049	1.2055	1.2060
100	1.2065									

Table 3: Reduced mean Y_N[3]

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.4952	0.4996	0.5035	0.5070	0.5100	0.5128	0.5157	0.5181	0.5202	0.5220
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5283	0.5296	0.5309	0.5320	0.5332	0.5343	0.5353
30	0.5362	0.5371	0.5380	0.5388	0.5396	0.5402	0.5410	0.5418	0.5424	0.5430
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5473	0.5477	0.5481
50	0.5485	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515	0.5518
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.5530	0.5533	0.5535	0.5538	0.5540	0.5543	0.5545
70	0.5548	0.5550	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565	0.5567
80	0.5569	0.5570	0.5572	0.5574	0.5576	0.5578	0.5580	0.5581	0.5583	0.5585
90	0.5586	0.5587	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598	0.5599
100	0.5600									

- Υπολογισμός των παραμέτρων Yt και K με τους παρακάτω τύπους.

  $$\mathrm{Yt} = -\left(\ln\left(\ln\left(\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T-1}}\right)\right)\right),\ \mathrm{K} = \frac{y_t - y_n}{S_n}$$

- Δημιουργία διαγράμματος παροχής ύδατος - περιόδου επαναφοράς.
- Υπολογισμός της παροχής Q μέσω του τύπου $\mathrm{Q} = \mathrm{Q_{mean}} + \mathrm{K} \times \mathrm{stdv}$

4.4.2 Μέθοδος LOG PEARSON

Αρχικά, επιλέγονται οι μέγιστες ετήσιες παροχές από τα έτη 1975 έως το 2018 (ημερήσια δεδομένα) και ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά.

- Υπολογισμός του log κάθε τιμής παροχής.
- Προσδιορισμός της περιόδου επαναφοράς για κάθε μία από τις μέγιστες παροχές με τη χρήση του τύπου $\mathrm{T} = \frac{\mathrm{N+1}}{\mathrm{m}}$, όπου N ο αριθμός ετών και m ο

αριθμός εμφάνισης των γεγονότων ενδιαφέροντος, δηλαδή των μέγιστων παροχών (έπειτα από ταξινόμηση των παροχών κατά αύξουσα σειρά)

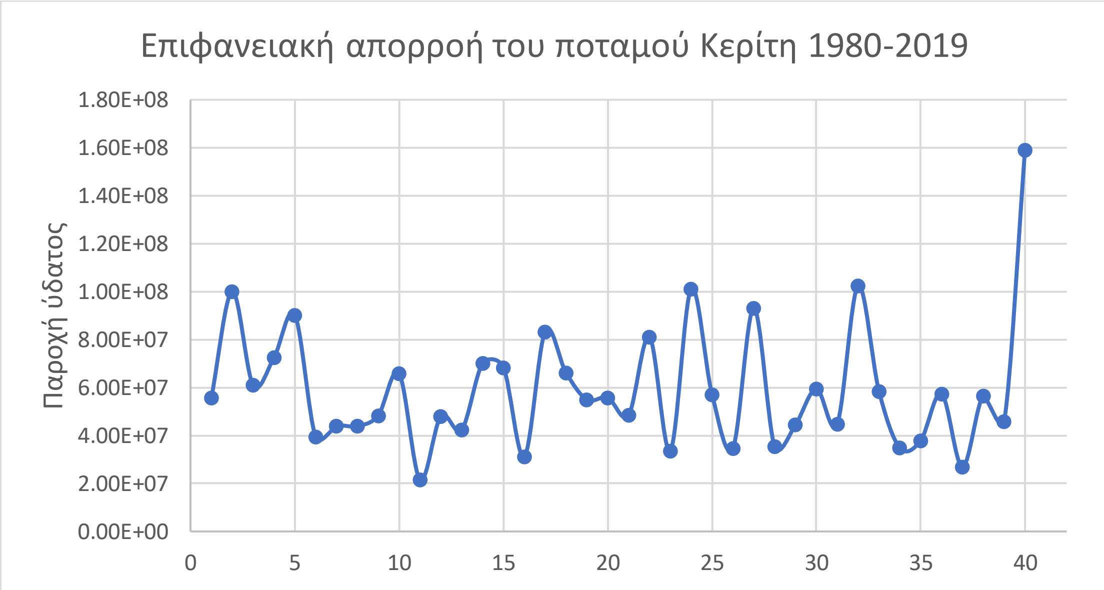
- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος, $\overline{\mathrm{Q}}$, stdv, skew.
- Υπολογισμός της παραμέτρου K από τον τύπο $\mathrm{K} = 0.609 \times \ln \mathrm{T} - 0.251$
- Υπολογισμός παραμέτρου $\mathrm{Q_T} = \overline{\mathrm{Q}} + \mathrm{K} \times \mathrm{stdv}$
- Τέλος, υπολογισμός των παροχών επαναφοράς 50 χρόνων από τον τύπο $\mathrm{Q_{50}} = 10^{\mathrm{Q_t}}$

4.4.3 Μέθοδος POT

Στην συγκεκριμένη μέθοδο, ορίζεται μια τιμή ως κατώφλι και επιλέγονται οι παροχές αιχμής. Ως κατώφλι ορίζεται μια σχετικά χαμηλή τιμή, ώστε να εξασφαλίζεται η επιλογή τουλάχιστον ενός γεγονότος ανά έτος (Kite,1977). Ωστόσο, όταν οι ακραίες τιμές των δεδομένων επιλέγονται με τον παραπάνω τρόπο υπάρχει το ενδεχόμενο να μην είναι στατιστικά ανεξάρτητες (Chow et al.,1988), γεγονός που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της μεθόδου.

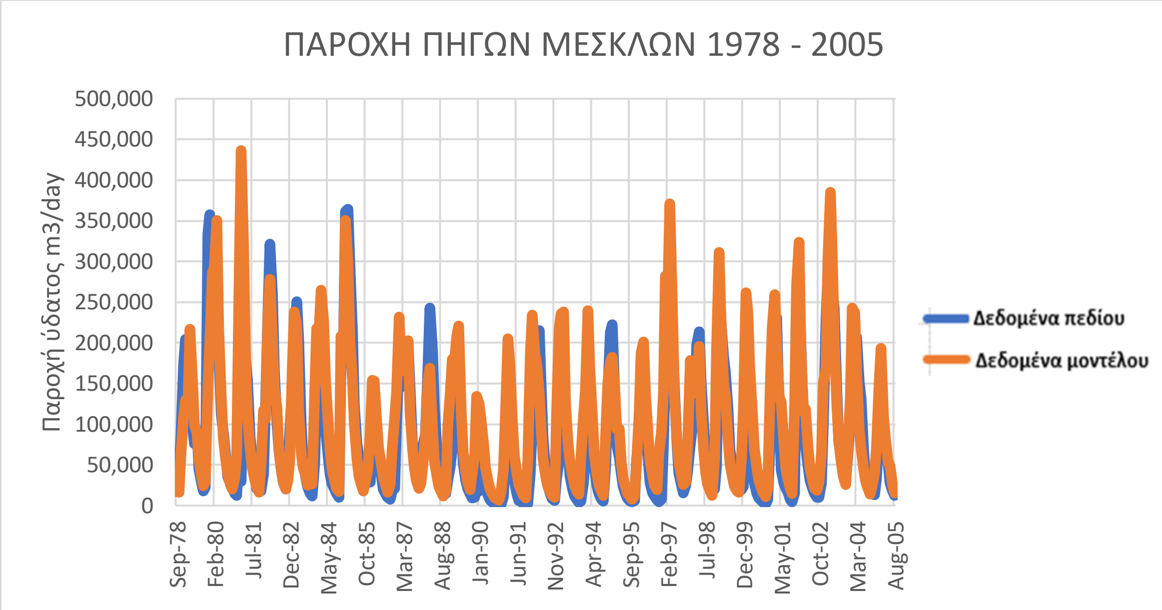
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αφού ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου, ήταν απαραίτητο να συγκριθούν τα προσομοιωμένα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα πεδίου και να χαρακτηριστεί η αποδοτικότητα τους μέσω στατιστικών δεικτών. Οι συγκρίσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, αφορούν την μοντελοποίηση των πηγών των Μεσκλών, του συνόλου των πηγών της Αγυιάς καθώς και την επιμέρους μοντελοποίηση της πηγής του Καλαμιώνα (πηγή Αγυιάς), και του ποταμού Κερίτη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, το έτος 2019 η επιφανειακή απορροή του Κερίτη ήταν $4.35 \times 10^5 \mathrm{m}^3$. Στο διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η επιφανειακή απορροή του ποταμού για 39 έτη από το 1980 έως το 2019.



Διάγραμμα 10: Επιφανειακή απορροή του ποταμού Κερίτη

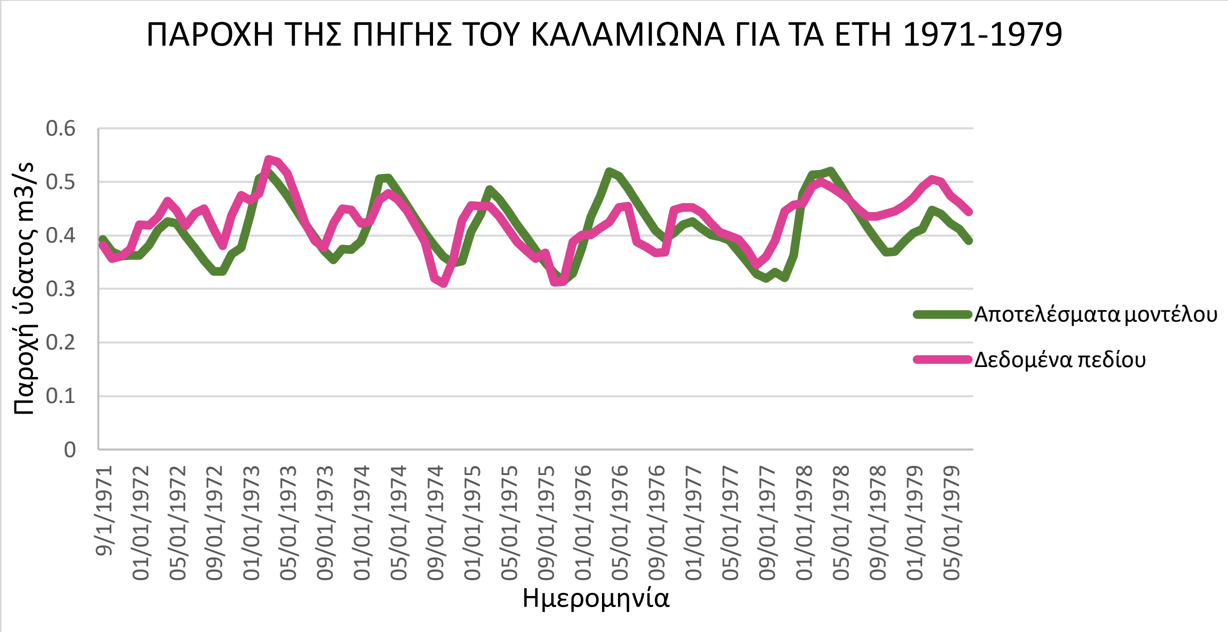
Η βαθμονόμηση του μοντέλου ξεκίνησε με τις πηγές των Μεσκλών. Για τις πηγές αυτές, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4 υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τα έτη 1978-2005.



Διάγραμμα 11: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για τις πηγές των Μεσκλών

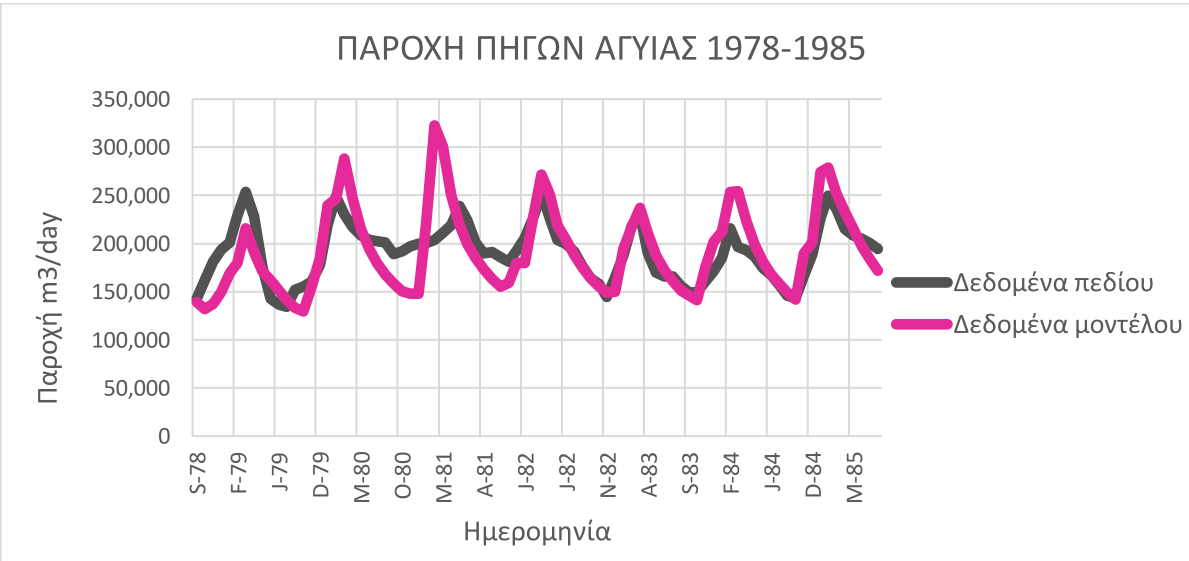
Στο διάγραμμα 11, απεικονίζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παροχής των Μεσκλών με τα διαθέσιμα δεδομένα. Συμπεραίνεται, ότι τα δεδομένα που εξάγει το μοντέλο είναι κοντά στα πραγματικά δεδομένα. Η προσέγγιση του μοντέλου χαρακτηρίζεται ως ‘’καλή’’, αφού οι δείκτες NSE, RSR και PBIS έχουν τιμή 0.71, 0.54 και -22.5 αντίστοιχα (βλ πινακα 2).

Στη συνέχεια, για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης των πηγών της Αγυιάς πραγματοποιήθηκε αρχικά η επιμέρους μοντελοποίηση της πηγής του Καλαμιώνα. Για την πηγή του Καλαμιώνα υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τα έτη 1971-1979. Από την σύγκριση που προέκυψε, διάγραμμα 12, συμπεραίνεται, ότι το μοντέλο, σύμφωνα με τις τιμές των στατιστικών δεικτών NSE και RSR δεν προσομοιάζει ικανοποιητικά τα δεδομένα του πεδίου. Σύμφωνα όμως με τον δείκτη PBIS ο οποίος έχει τιμή 11.5, η προσομοίωση χαρακτηρίζεται Καλή.



Διάγραμμα 12: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για την πηγή του Καλαμιώνα

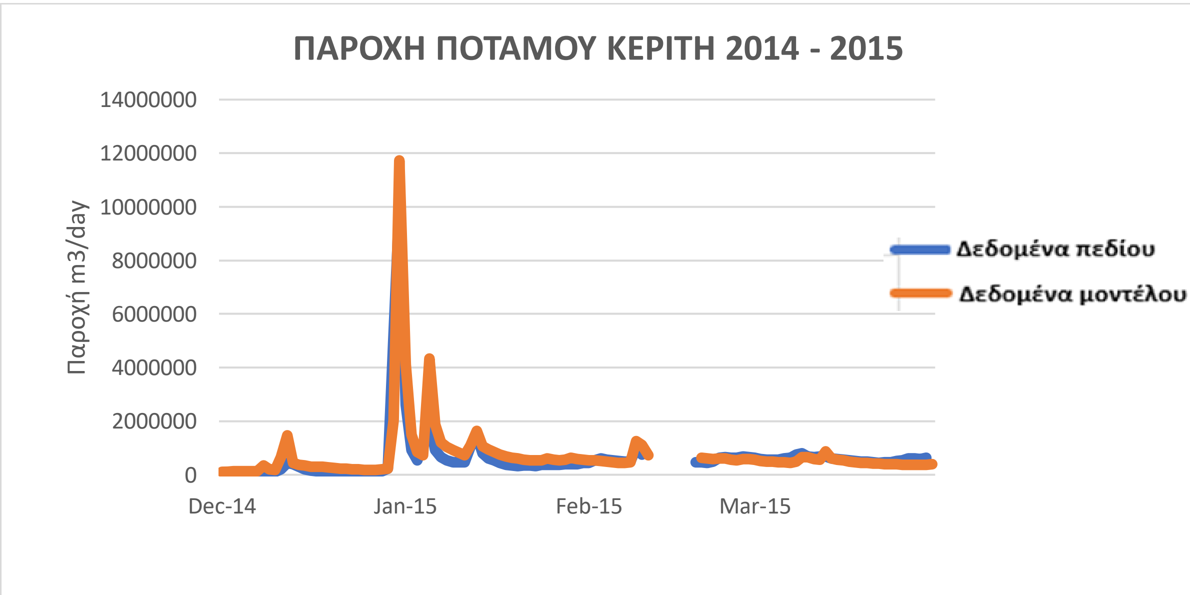
Όσον αφορά την μοντελοποίηση του συνόλου των πηγών της Αγυιάς, τα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν τα έτη 1978-1985. Η σύγκριση των δεδομένων παρουσιάζεται στο διάγραμμα 13 και συμπεραίνεται ότι η προσέγγιση του μοντέλου σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες NSE και RSR δεν προσομοιάζει ικανοποιητικά τα δεδομένα του πεδίου. Σύμφωνα όμως με τον δείκτη PBIS ο οποίος έχει τιμή 0.42, η προσομοίωση χαρακτηρίζεται Πολύ καλή.



Διάγραμμα 13: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για το σύνολο των πηγών της Αγυιάς

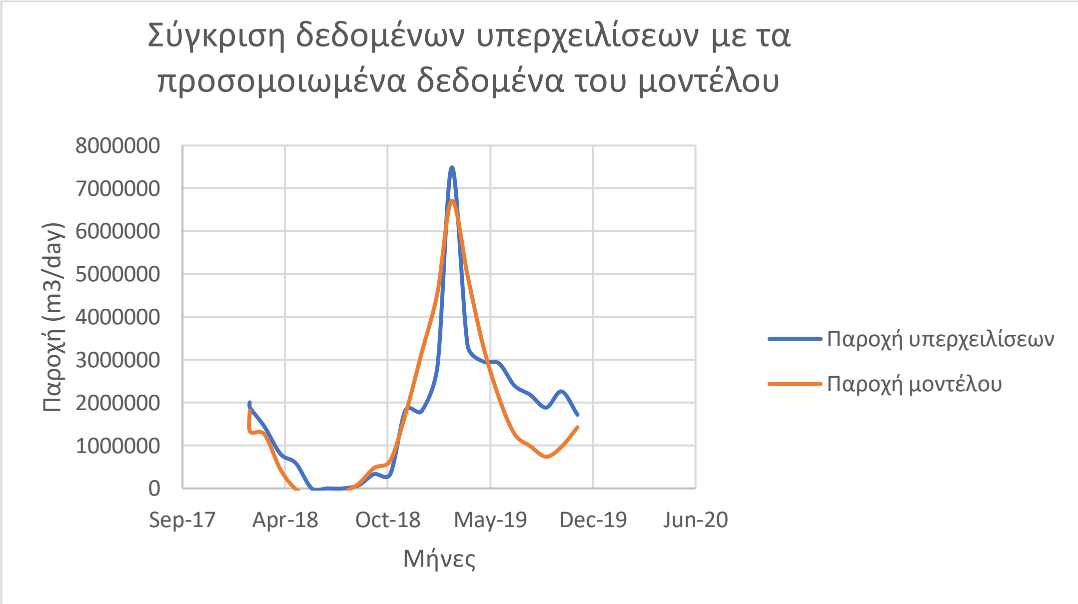
Όσον αφορά την παροχή του ποταμού Κερίτη, υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τα έτη 2012-2015. Από την σύγκριση που προέκυψε, διάγραμμα 14 & διάγραμμα 15 συμπεραίνεται ότι τα προσομοιωμένα δεδομένα είναι κοντά στα δεδομένα πεδίου. Για το διάστημα 2012-2013, η καλή αυτή προσομοίωση επιβεβαιώνεται από την τιμή του στατιστικού δείκτη PBIS αλλά όχι όμως από τις τιμές των στατιστικών δεικτών NSE και RSR. Αντιθέτως, η σύγκριση του μοντέλου για τα έτη 2014-2015 χαρακτηρίζεται ‘’ Πολύ καλή’’ καθώς οι τιμές των δεικτών NSE , RSR και PBIS είναι 0.79, 0.46, -15 αντίστοιχα.

Διάγραμμα 14: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για τον ποταμό του Κερίτη για τα έτη 2012-2013



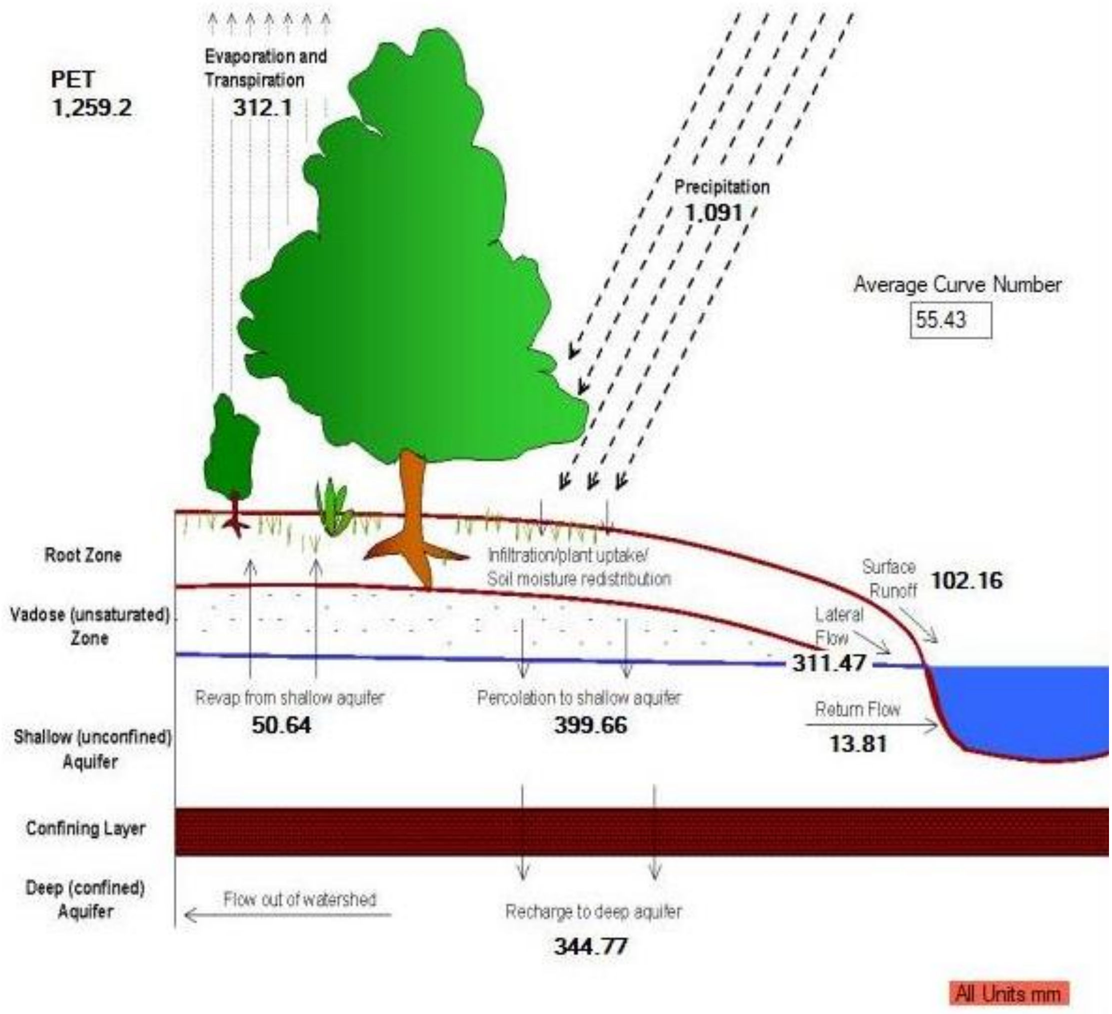
Διάγραμμα 15: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για τον ποταμό του Κερίτη για τα έτη 2014-2015

Τέλος, για το έτος 2019 υπάρχουν δεδομένα υπερχειλίσεων για τη Γέφυρα (τον βροχομετρικό σταθμό που είναι τοποθετημένος στην τεχνητή λίμνη της Αγυιάς) στην οποία καταλήγουν οι πηγές της. Για το έτος αυτό με τη χρήση του μοντέλου SWAT, πραγματοποιείται η εκτίμηση της παροχής ύδατος της Αγυιάς, αφού πρώτα αφαιρέθηκαν τα ποσά των αντλήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί και συγκρίνονται, διάγραμμα 16. Η προσομοίωση του μοντέλου χαρακτηρίζεται ως ΄΄Καλή΄ αφού οι τιμές των δεικτών NSE και RSR είναι 0.73 και 0.52 αντίστοιχα (βλ. πινακα2).



Διάγραμμα 16: Σύγκριση δεδομένων υπερχειλίσεων με τα προσομοιωμένα δεδομένα του μοντέλου για τα έτη 2018- 2019

Αφού ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου και παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν ορθά, δημιουργήθηκε μέσω του μοντέλου SWAT το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής για τα έτη 1978-2019, εικόνα 29. Σύμφωνα με αυτό, η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί περίπου το 29% της συνολικής βροχόπτωσης, η συνολική απορροή της λεκάνης περίπου το 39%, ενώ το ποσοστό που εισχωρεί στο βαθύ υπόγειο υδροφορέα είναι 32%. Το ποσοστό της εξάτμισοδιαπνοής προκύπτει από τον λόγο, που έχει ως αριθμητή την εξάτμιση με τιμή 312.1mm και ως παρονομαστή την συνολική βροχόπτωση 1091mm. Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και τα υπόλοιπα ποσοστά.

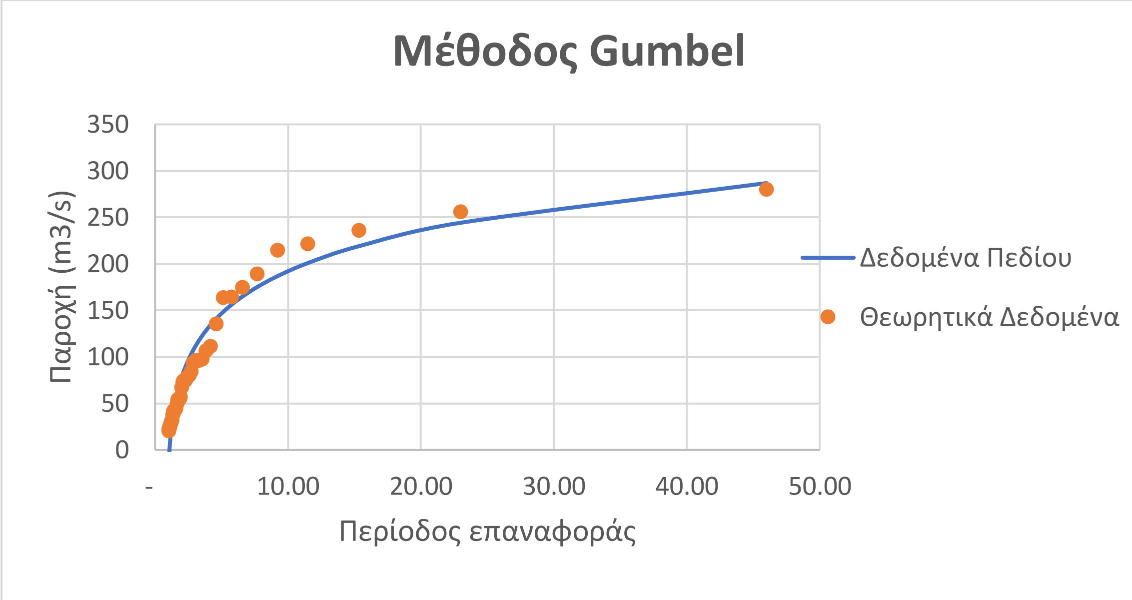


Εικόνα 29: Υδρολογικό ισοζύγιο του μοντέλου SWAT για τα έτη 1978-2019

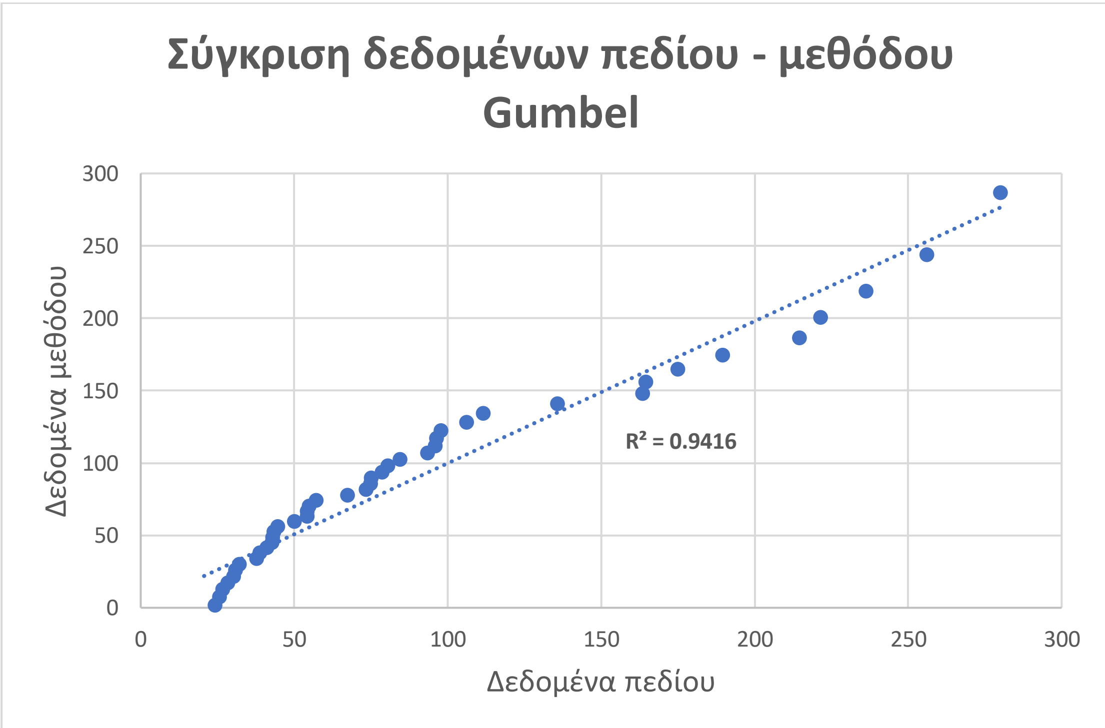
5.1 Στατιστικές μεθοδοι

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης με τις μεθόδους Gumbel και Log Pearson, καθώς και τα διαγράμματα με τους συντελεστές προσδιορισμού R^2 που προέκυψαν από τις παραπάνω μεθόδους, παρατίθενται παρακάτω. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ του μηδέν και της μονάδας, δηλαδή $0 \leq R^2 \leq 1$. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή R^2 τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή της παλινδρόμησης του δείγματος στα δεδομένα.

Στην μέθοδο Gumbel, διάγραμμα 17, παρατηρείται ότι οι προσομοιωμένες τιμές της μεθόδου αυτής είναι πολύ κοντά στις τιμές του πεδίου. Στο διάγραμμα 18, επιβεβαιώνεται η πολύ καλή προσέγγιση των δεδομένων πεδίου αφού η τιμή του συντελεστή R^2 είναι 0.94 . Σε αυτή τη μέθοδο υπολογίστηκε η παροχή ύδατος $Q_{50} = 291.9\ \frac{m^3}{s}$.

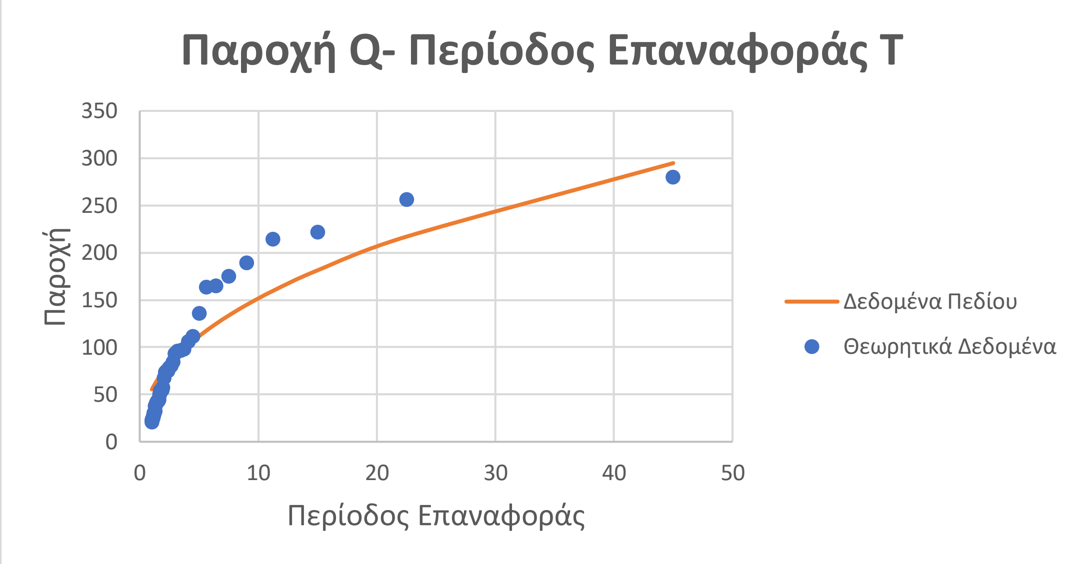


Διάγραμμα 17 : Αποτελέσματα της μεθόδου Gumbel

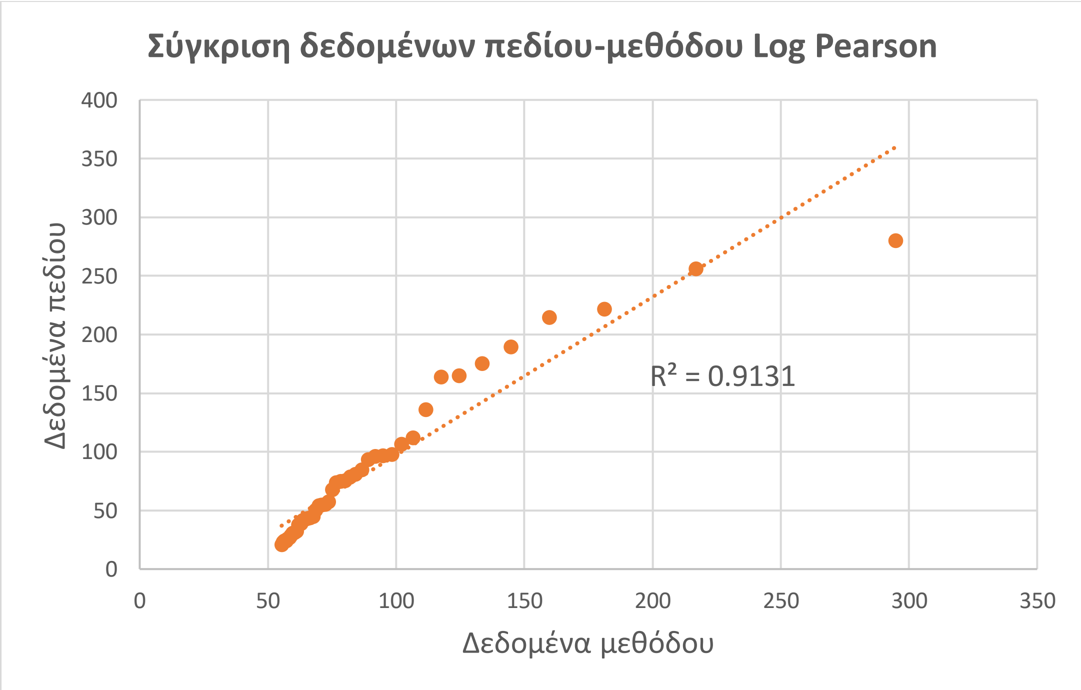


Διάγραμμα 18: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα αποτελέσματα της μεθόδου Gumbel

Όσον αφορά τη μέθοδο Log Pearson, διάγραμμα 19, οι προσομοιωμένες τιμές και της μεθόδου αυτής, είναι πολύ κοντά στις τιμές του πεδίου. Στο διάγραμμα 20, επιβεβαιώνεται η πολύ καλή προσέγγιση των δεδομένων πεδίου αφού η τιμή του συντελεστή R^2 είναι 0.91 . Σε αυτή τη μέθοδο υπολογίστηκε η παροχή ύδατος $Q_{50} = 308.8\ \frac{m^3}{s}$.



Διάγραμμα 19: Αποτελέσματα της μεθόδου Log Pearson



Διάγραμμα 20: Σύγκριση δεδομένων πεδίου με τα αποτελέσματα της μεθόδου Log Pearson

Συγκρίνοντας τις παραπάνω μεθόδους, είναι αντιληπτό ότι και οι δύο στατιστικές μέθοδοι είναι αξιόπιστες, καθότι τα αποτελέσματα των στατιστικών δεικτών χαρακτηρίζονται Πολύ Καλές. Ωστόσο, η μέθοδος που επιλέγεται για τον υπολογισμό της παροχής ύδατος που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών, είναι η Gumbel, καθώς τα θεωρητικά δεδομένα που παράγει, συγκλίνουν περισσότερο στα δεδομένα του πεδίου. Επομένως, η επιλεχθείσα παροχή επαναφοράς είναι $Q_{50} = 291.9\ \frac{m^3}{s}$.

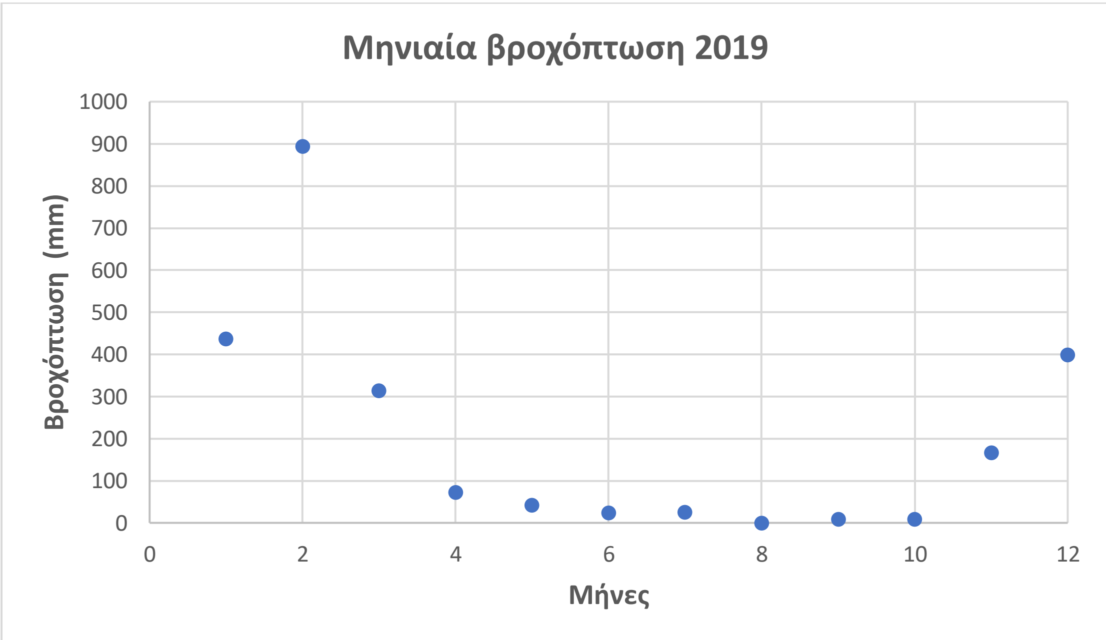
5.2 Ανάλυση βροχόπτωσης έτους 2019

Το έτος 2019 ήταν ένα σημαντικό έτος από υδρολογικής άποψης, καθώς εμφάνισε ασυνήθιστα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα σε όλη την Ελλάδα. Όσον αφορά το νησί της Κρήτης και κυρίως το νομό Χανιών δύο ήταν οι σοβαρές καταιγίδες που τον έπληξαν. Και οι δύο καταιγίδες προκάλεσαν υπερβολικές βροχοπτώσεις προκαλώντας σοβαρές ζημιές ειδικά στο δυτικό μέρος της Κρήτης. Η πρώτη καταιγίδα, ονομάστηκε Χιόνη από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, η οποία διήρκησε από 13/2 έως 17/2 παράγοντας μεγάλα ύψη βροχής και μεγάλα ποσά επιφανειακής απορροής, τα οποία προκάλεσαν πλημμύρες. Η πρώτη καταιγίδα, προκάλεσε τον κορεσμό του εδάφους, που αυτός ενίσχυσε την ευπάθεια της περιοχής στα επόμενα επεισόδια βροχής. Η δεύτερη καταιγίδα ονομάστηκε Ωκεανίδα και παρά τη μικρότερη διάρκεια (24/2 έως 26/2) παρήγαγε υψηλότερα ποσοστά βροχής 144.4 mm/day. Στην δεύτερη καταιγίδα, καταγράφηκαν πολλά πλημμυρικά επεισόδια (εικόνα 30) και πολλές καταστροφές, όπως του οδικού δικτύου και την κατάρρευση γεφυρών (εικόνα 31).

Εικόνα 30: Πλημμυρικό φαινόμενο

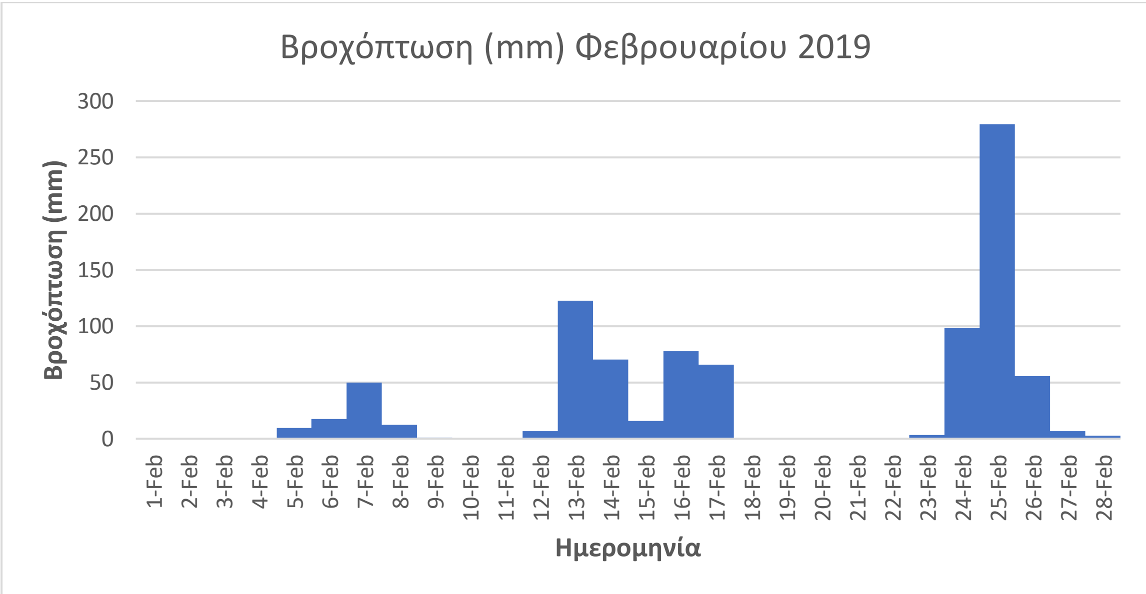
Εικόνα 31: Κατάρρευση ιστορικού μνημείου

Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα του Ψυχρού πηγαδιού, τον μήνα Φεβρουάριο η βροχόπτωση ήταν περίπου 900 mm, διάγραμμα 21.

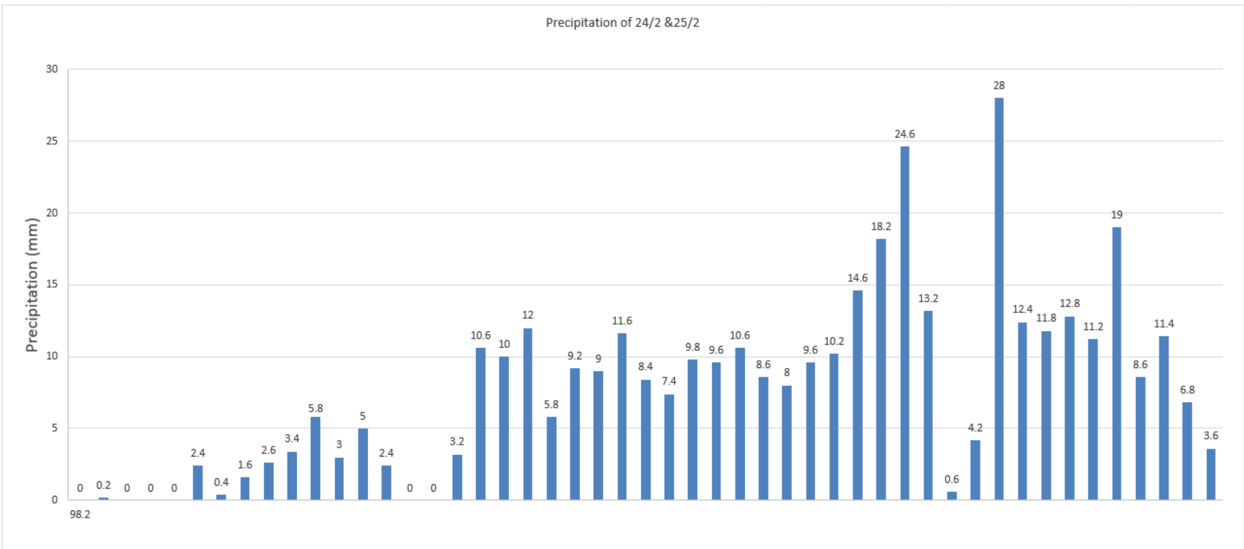


Διάγραμμα 21: Μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης (mm) για το έτος 2019

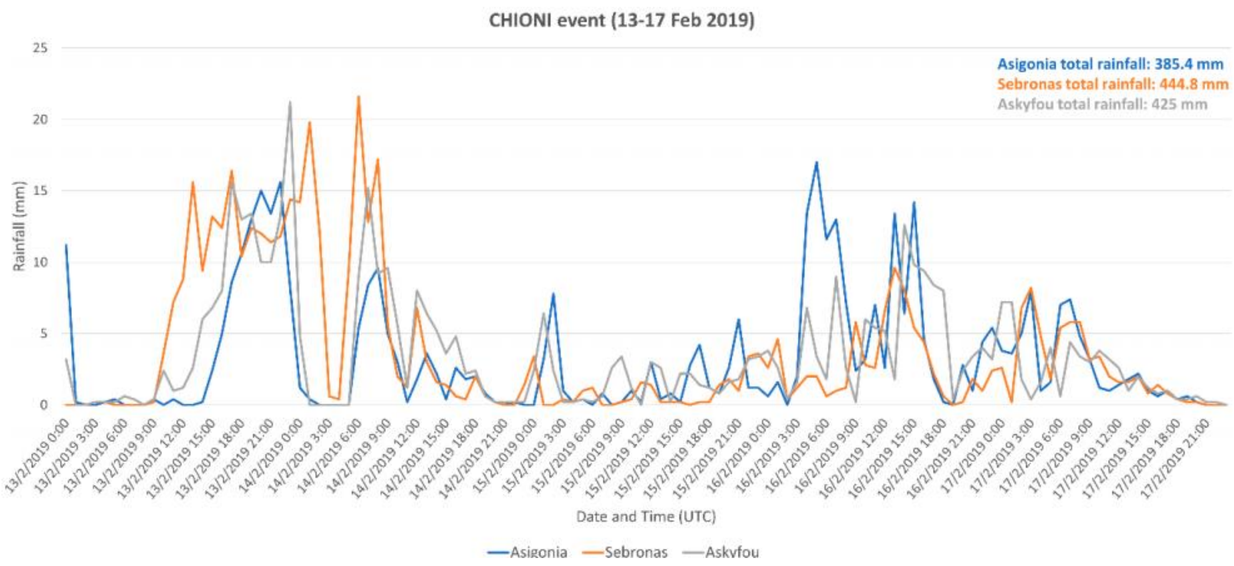
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μήνα Φεβρουάριο καταγράφηκε το μεγαλύτερο πλημμυρικό φαινόμενο το οποίο συνέβη στις 24/2-25/2 και πιο συγκεκριμένα η μέγιστη βροχόπτωση σημειώθηκε στις 25 Φεβρουαρίου στις 15:00 μετά μεσημβρίας. Στο διάγραμμα 22, απεικονίζονται τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης του Φεβρουαρίου, ενώ στο διάγραμμα 23 τα ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης του προαναφερόμενου πλημμυρικού επεισοδίου. Η μέση ωριαία βροχόπτωση των δύο αυτών ημερών, ήταν περίπου 7.8mm ενώ η μέγιστη ήταν 28mm. Στο διάγραμμα 24, παρουσιάζονται τα ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης (mm) για την πρώτη καταιγίδα (Χιόνη) του Φεβρουαρίου από τρείς μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ στο διάγραμμα 25 απεικονίζονται τα ωριαία δεδομένα της δεύτερης καταιγίδας από τρείς βροχομετρικούς σταθμούς.



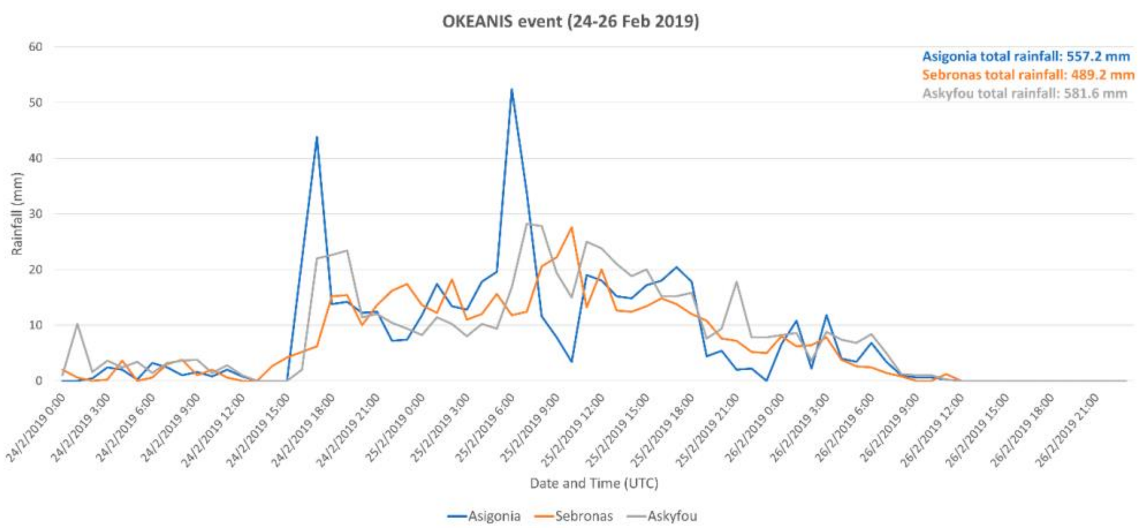
Διάγραμμα 22: Ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης (mm) για τον μήνα Φεβρουάριο του έτους 2019



Διάγραμμα 23: Ωριαία βροχόπτωση της δεύτερης καταιγίδας του Φεβρουαρίου του 2019

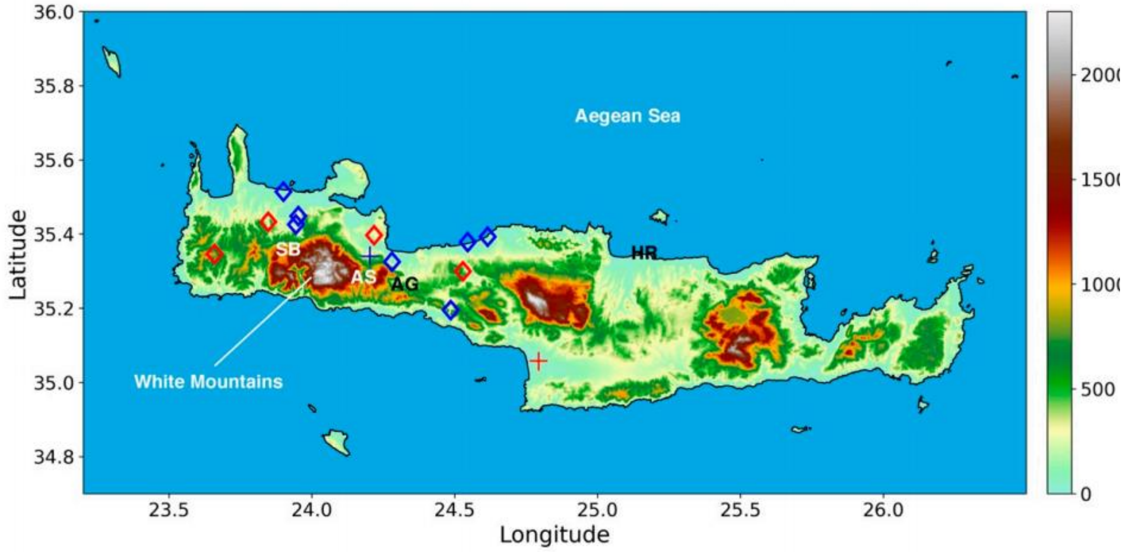


Διάγραμμα 24 : Ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης (mm) για την πρώτη καταιγίδα (Χιόνη) του Φεβρουαρίου από τρείς μετεωρολογικούς σταθμούς



Διάγραμμα 25: Ωριαία δεδομένα της δεύτερης καταιγίδας από τρείς βροχομετρικούς σταθμούς

Στην εικόνα 32 απεικονίζονται τα σημεία στα οποία προέκυψαν οι καταστροφές. Οι μπλε ρόμβοι αναφέρονται στην πρώτη καταιγίδα (Χιόνη), ενώ οι κόκκινοι ρόμβοι αναφέρονται στην δεύτερη καταιγίδα (Ωκεανίδα). Τέλος, παρουσιάζονται οι τρείς βροχομετρικοί σταθμοί του Σέμπρωνα (SB), της Ασής Γωνιάς (AG) και των Ασκύφου (AS).



Εικόνα 32: Σημεία στα οποία προέκυψαν καταστροφές κατά την διάρκεια των δύο καταιγίδων του Φεβρουαρίου 2019

Παρατηρώντας τα κανονικοποιημένα δεδομένα Χρόνου- Βροχόπτωσης στο διάγραμμα 26 που αφορούν τη δεύτερη καταιγίδα, σύμφωνα με την γραμμή του διαγράμματος συμπεραίνεται ότι περίπου στο ένα τρίτο του χρόνου η βροχόπτωση ήταν πολύ μικρή ενώ στη συνέχεια, όπου η γραμμή του διαγράμματος τείνει να γίνει ευθεία, δηλώνει ότι η βροχόπτωση είχε σταθερή ένταση.

Διάγραμμα 26: Κανονικοποιημένα δεδομένα Χρόνου- Βροχόπτωσης για την δεύτερη καταιγίδα του Φεβρουαρίου 2019

Όσον αφορά, την υδρολογική ανάλυση του έτους 2019 και πιο συγκεκριμένα, το έντονο μετεωρολογικά φαινόμενο στις 24 και 25 Φεβρουαρίου, εύλογα συνάγεται το συμπέρασμα, ότι η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση ήταν 3.6 φορές μεγαλύτερη από την μέση βροχόπτωση του φαινομένου αυτού (μέγιστη ωριαία βροχόπτωση 28mm, μέση ωριαία βροχόπτωση 7.8mm) . Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζοντας την παροχή ύδατος σύμφωνα με την μέθοδο Gumbel, που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών, $291.9\ \frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}$ (δηλ. 25 $\frac{\mathrm{Mm^3}}{\mathrm{d}}$) και κάνοντας την υπόθεση ότι η βροχόπτωση κατανεμήθηκε ομοιόμορφα σε ένα εικοσιτετράωρο, τότε προκύπτει ότι κάθε ώρα είχαμε απορροή $1.1\,\frac{\mathrm{Mm^3}}{\mathrm{h}}$ ύδατος.

Σύμφωνα όμως με τα δεδομένα που καταγράφηκαν από τον σταθμό του Ψυχρού Πηγαδιού, η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση ήταν 28mm ενώ ο μέσος όρος της βροχόπτωσης ήταν 7.8 $\frac{\mathrm{mm}}{\mathrm{h}}$. Επομένως, για τα πραγματοποιηθεί ο ορθός σχεδιασμός των υδραυλικών έργων, θα πρέπει να σχεδιαστεί με την μέγιστη ωριαία και όχι με τον μέσο όρο, δηλαδή να αυξηθεί η μέση ωριαία παροχή με τον συντελεστή $3.6 \times 1{,}1\,\frac{\mathrm{Mm^3}}{\mathrm{h}} \approx 4\ \frac{\mathrm{Mm^3}}{\mathrm{h}}$ ύδατος.

Ακόμα, γνωρίζοντας ότι η λεκάνη απορροής του Κερίτη έχει έκταση 210 $\mathrm{Km^2}$, κατά μέσο όρο, δέχτηκε 1.7 εκατομμύρια κυβικά νερού με τυπική απόκλιση 1.2 εκατομμύρια κυβικά νερού σύμφωνα με την μέση τιμή βροχόπτωσης που αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ κατά την διάρκεια της μέγιστης ωριαίας βροχόπτωσης δέχτηκε 5.9 εκατομμύρια κυβικά νερού από τα οποία ένα μεγάλο ποσοστό έγινε επιφανειακή απορροή, καθώς είχε ήδη επέλθει ο κορεσμός του εδάφους λόγω των συνεχόμενων βροχοπτώσεων των προηγούμενων ημερών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της πλημμύρας.

Η μέγιστη ωριαία βροχόπτωση του φαινομένου αυτού, καταγράφηκε στις 15:00 μετά μεσημβρίας. Η ώρα εκείνη, συμπίπτει με την ώρα της κατάρρευσης του ιστορικού μνημείου της γέφυρας του Αλικιανού που αναφέρθηκε παραπάνω (εικόνα 30). Δηλαδή, για να γίνει αντιληπτή η ένταση του φαινομένου, σε μια περίοδο περίπου 9 ωρών πέρασαν 28 εκατομμύρια κυβικά νερού. Η ποσότητα δηλαδή αυτή, υπερκαλύπτει τις ανάγκες για ύδρευση και άρδευση που καταναλώνει ένα μέρος του νομού Χανίων για όλο το έτος από τις γεωτρήσεις. Επομένως, είναι κατανοητό ότι για τον ορθό σχεδιασμό ενός υδραυλικού έργου πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μέγιστη τιμή της ωριαίας παροχής ύδατος και βροχόπτωσης, ώστε το έργο να είναι ανθεκτικό, ακόμα και στο δυσμενέστερο σενάριο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει επιτευχθεί η υδρολογική ανάλυση του ποταμού Κερίτη. Η υδρολογική ανάλυση έδειξε τα ακόλουθα.

- Η επικαιροποίηση της μοντελοποίησης των πηγών των Μεσκλών και της Αγυιάς, καθώς και η επιμέρους μοντελοποίηση της πηγής του Καλαμιώνα πραγματοποιήθηκε με επιτυχία.
- Το υδρολογικό ισοζύγιο που προκύπτει δηλώνει ότι η μέση βροχόπτωση είναι 1091mm, η εξατμισοδιαπνοή που αποτελεί το 29% είναι 312.1 mm, η συνολική απορροή που αποτελεί περίπου το 39% είναι 428 mm, ενώ το 32% που αναφέρεται σε απώλειες νερού στον υπόγειο υδροφορέα της λεκάνης απορροής του Κερίτη είναι 345 mm.
- Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση του μοντέλου, χρησιμοποιούνται στατιστικοί δείκτες για την αξιολόγηση της. Οι στατιστικοί δείκτες φανερώνουν, ότι η προσομοίωση του μοντέλου δεν είναι ικανοποιητική για τα παλαιά δεδομένα της Αγυιάς και των Μεσκλών, ενώ είναι ικανοποιητική για τα πιο πρόσφατα δεδομένα αυτών, για τα δεδομένα του ποταμού Κερίτη και για τα δεδομένα υπερχειλίσεων της Αγυιάς. Επομένως, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται αξιόπιστα.
- Για την ανάλυση της παροχής ύδατος σε σχέση με την περίοδο επαναφοράς, προσαρμόζονται δύο στατιστικές μέθοδοι, η μέθοδος Gumbel και η Log Pearson. Η στατιστική μέθοδος που προσομοιώνει καλύτερα τα δεδομένα πεδίου είναι η Gumbel σύμφωνα με την οποία η παροχή ύδατος υπολογίστηκε $291.9\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$.
- Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη το έντονο πλημμυρικό φαινόμενο του 2019, υπολογίζεται η μέγιστη ωριαία παροχή ύδατος με την οποία σχεδιάζονται τα υδραυλικά έργα. Η μέγιστη ωριαία παροχή ύδατος προκύπτει από την μέση ωριαία παροχή ύδατος πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή 3.6. Τελικά, η τιμή αυτής είναι $4\ \frac{\mathrm{Mm}^3}{\mathrm{h}}$.

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Διεθνής βιβλιογραφία

- Angelakis, A. N., Cosmas, C., & Monopolis, D. (1997). Land and water resources and their degradation in Crete, Greece. Desertification Control Bulletin, No. 32, UNEP, Nairobi, Kenya, pp. 40–50.
- Arnold, J.G., Allen, P.M. & Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. Journal of Hydrology, 142(1-4), pp.47–69.
- Angelakis, A. N., & Diamadopoulos, E. (1995). Water resources management in Greece: Current status and prospective outlook. Water Science and Technology, 32(9–10), 267–272.
- Angelakis, A. N., & Spyridakis, S. V. (1996). The status of water resources in Minoan times. In A. N. Angelakis, & A. S. Issar (Eds.), Diachronic climatic impacts on water resources with emphasis on Mediterranean region (pp. 161–199). Berlin, Heidelberg: Springer (Chapter 8).
- Chartzoulakis, K., Angelakis, A. N., & Skylourakis, P. (1997). Irrigation of horticultural crops in the Island of Crete. Acta Horticulturae, 449, 1–14.
- Chow, V.,(1964). Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill,New York, USA
- Department of Industry, Energy & Technology (1989). Water resources in Greece.
- Dialynas, G. E., Diamadopoulos, E., & Angelakis, A. N. (1995). Water resources management in Crete, Greece including potential for wastewater reclamation and reuse. In A. N. Angelakis, et al. (Ed.), Preprint book of second international symposium on wastewater reclamation and reuse (pp. 177–184), Vol. 1. Iraklio, Greece: IAWQ.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2004. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. Transactions in GIS 8 (1), 113-136.
- Kanta, A., P. Soupios, F. Vallianatos, D. Rust and P. Barsukov, 2009. The application of Time Domain Electromagnetic Method to characterize the Keritis Basin, in Western Crete, Greece, Proc. 3rd IASME International Conference on Geology and Seismology, (GES '09), Cambridge, UK.
- Kaufman, A. and G. Keller, 1983. Frequency & Transient Soundings (Methods in Gepchemistry & Geophysics vol 16), Elsevier, Amsterdam.
- Krahl, J., G. Kauffmann, H. Kozur, D. Richter, O. Forster and F. Heinritzi, 1983. ‘Neue Daten zur Biostratigraphie und zur tektonischen Lagerung der PhyllitGruppe und der Trypali-Gruppe aufder Insel Kreta (Griechenland)’, Geol. Rundsch., v. 72, p. 1147-1166
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. & Nikolaidis, N.P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. Journal of Hydrology, 381(3-4), pp.308–321.

- Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., Jacob, D, 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece, Journal of Hydrology, 479, 146–158
- Moraetis, D., Stamati, F., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N.,
- Marinatos, S. (1927). The ancient Cretan civilization. Athens, Greece: Xen. E. Sergiadou.
- Markou-Iakovaki, M. (1979). Atmospheric precipitation in the Island of Crete. Ph.D. Thesis. School of Physics and Mathematics, University of Athens, Athens, Greece
- Nikolaidis, N.P, F. Bouraoui. and G. Bidoglio, 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, Journal of Hydrology.
- Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. Water Resources Res. 24, 1983-96.
- Perleros, C., and Vozinakis, K., (2002). Hydrological study of the Chania county, geological map, Organization for Development of West Crete (ODWC)
- Refsgaard, J.C., 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198 (1-4), 69-97.
- Robinson Mark, Hydrology Principles and processes
- Soupios, P.M., M. Kouli, F. Vallianatos, A. Vafidis and G. Stavroulakis, 2007. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – G
- S.L. Neitsch, J.G. Arnold,J.R. Williams, R. Srinivasan, E.B. Haney: Soil and Water Assesment Tool ,Input/Output Documentation Version 2012, Texas Water Resources Institute No. 439
- V. Pisinaras, C.Petalas, G.D.Gikas, A.Gemitzi, V.A. Tsihrintzis (2010): Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Desalinitation 250 274-286

7.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- Αγγελίδης, Ζ.,(1993). Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Εκπαίδευση. Έκδοση Art of Text, Θεσσαλονίκη
- Δημητρίου Α.,2015. Υδρολογική και γεωχημική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ε.Ε., 2000. Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα Νερά.
- Κουτούπα – Ρεγκάκου, Ε., 2008. Δίκαιο του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα.
- Λάλος, Χ., 2012. Προσομοίωση επιφανειακής απορροής με συνδυασμένη χρήση των μοντέλων MIKE SHE / MIKE 11 στη λεκάνη απορροής του

ποταμού Κερίτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διπλωματική Εργασία, Χανιά.

- Μανούτσογλου, Ε., 2007. Σημειώσεις του μαθήματος Εισαγωγή στις Γεωεπιστήμες – Περιβαλλοντική Γεωλογία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.82
- Μήτρακα, Μ., 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Μιμίκου,Α.Μ.,(2006) ‘’Τεχνολογία Υδατικών Πόρων΄΄.ΕΜΠ,Αθήνα.
- Μπαλτάς Ευάγγελος Α. Εφαρμοσμένη Μετεωρολογία, εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Νικολαΐδης, Ν., 2005. Υδατική Χημεία – Θεωρία, Μοντέλα και Περιβαλλοντικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα.
- Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2010. Ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερίτη – Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Παπαμηχαήλ,Δ.,(202)΄΄Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων΄΄.ΑΠΘ,Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ., (1986). Γενική Υδρολογία. Έκδοση University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Τσακίρης Γ. Υδατικοί Πόροι :Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη διαχειριση υδατικών Πόρων, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2013.
- Τσαΐμος, Γ., Καρατζάς, Γ., 2009. Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη – Θερίσσου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.