



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Χημικών Μηχανικών/Μηχανικών Περιβάλλοντος(Επιλογή)

Διαχείριση υδάτινων πόρων για το ποταμό Μύρτο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Θεοχάρη

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής/γήτρια
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ/ΟΥΣΑ)

Καθηγητής/γήτρια

Καθηγητής/γήτρια

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



Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της. Πρωτίστως, ευχαριστώ εγκάρδια τον Καθηγητή του Τμήματος της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της διπλωματικής διατριβής κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τη συνεχή υποστήριξη που έδειξε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Παρά το γεμάτο πρόγραμμά του έδωσε ιδιαίτερη προσοχή και ήταν διαθέσιμος οπότε κι αν τον χρειάστηκα. Οι γνώσεις και η εμπειρία που απέκτησα χάρη στη βοήθεια του θα φανούν πολύ χρήσιμες για τη μετέπειτα πορεία μου. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τη διδακτορική φοιτήτρια Σοφία Νερατζάκη του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη συνεχή καθοδήγηση της και την υπομονή που είχε σε όλο το διάστημα εκπόνησης και συγγραφής της εργασίας. Οι γνώσεις της πάνω σε όλα τα θέματα διαχείρισης υδάτων, αλλά και λογισμικού (προγραμμάτων) ήταν πολύτιμες. Η συνεργασία και η επικοινωνία μας ήταν άψογη, στεκόταν πάντα στο πλευρό μου και έδινε με όλους τους δυνατούς τρόπους ενθάρρυνση και κουράγιο σε αυτήν την προσπάθεια. Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και για τις γνώσεις υπογείων και επιφανειακών υδάτων που μου μετέδωσαν στα μαθήματά τους στο προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.



Περιεχόμενα

Ευχαριστίες **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Περίληψη	5
1. Εισαγωγή	7
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	8
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
2.1 Περιβαλλοντικά Μοντέλα	9
2.1.1 Ορισμός.....	9
2.1.2 Διαδικασία κατασκευής Μαθηματικού Μοντέλου.....	9
2.2 Υδρολογικά Μοντέλα.....	10
2.2.1 Ορισμός.....	10
2.2.2 Γνωστά Υδρολογικά μοντέλα.....	11
2.2.3 Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων	11
2.3 Βαθμονόμηση-Επαλήθευση	12
2.3.1 Βαθμονόμηση.....	12
2.3.2 Είδη Βαθμονόμησης.....	13
2.3.3 Επαλήθευση	14
2.3.4 Δείκτες Επαλήθευσης.....	14
2.4 Μοντέλο SWAT	16
2.4.1 Γενικά.....	16
2.4.2 Υδρολογικός Κύκλος στο SWAT	17
2.5 Φράγματα	19
2.5.1 Γενικά.....	19
2.5.2 Υδρολογικός Σχεδιασμός.....	25
2.6 Κλιματική Αλλαγή.....	26
2.6.1 Γενικά.....	26
2.6.2 Η Κλιματική Αλλαγή και ο IPCC	27
2.7 Ερημοποίηση	28
3. Περιοχή μελέτης	34
3.1 Γενικά	34
3.2 Γεωμορφολογία.....	35
3.3 Υδρογεωλογία.....	36



3.4	Κλίμα	38
3.5	Σεισμικότητα	39
3.6	Χρήσεις Γης	39
4	Ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου	41
4.1	Παροχή	41
4.2	Κλιματικά και Μετεωρολογικά δεδομένα	42
4.2.1	Βροχόπτωση	44
4.1.2	Θερμοκρασία	44
4.2	Πρόγραμμα και δεδομένα εισόδου	46
4.3	Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του μοντέλου	56
5	Ταμιευτήρας Ιεράπετρας και υδατικοί πόροι της περιοχής	67
5.1	Γενικά	67
5.2	Ισοζύγιο Φράγματος	68
5.2.1	Απεικόνιση ισοζυγίου των Μπραμιανων	68
5.2.2	Μεθοδολογία	69
5.3	Καληψη υδατικών αναγκών με τη βοήθεια του ποταμού Μύρτου	72
5.4	Υφαλμήριση	74
6	Συζήτηση	76
	Βιβλιογραφία	77



Περίληψη



Abstract



1. Εισαγωγή

Το νερό είναι ο πλέον θεμελιώδης φυσικός πόρος για τη ζωή στον πλανήτη, καθώς υποστηρίζει τόσο τα οικοσυστήματα όσο και την ανθρώπινη δραστηριότητα (UNESCO, 2021). Καλύπτει περίπου το 71% της γήινης επιφάνειας, ωστόσο μόλις ένα μικρό ποσοστό αντιστοιχεί σε γλυκό νερό δηλαδή κατάλληλο για κατανάλωση ή άρδευση (FAO, 2016). Η φυσική του ανανέωση μέσω του υδρολογικού κύκλου εξαρτάται από κλιματικούς και γεωλογικούς παράγοντες, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις ανά περιοχή και εποχή.

Η παγκόσμια κατανάλωση γλυκού νερού έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες, με τον ρυθμό χρήσης να ξεπερνά την αύξηση του πληθυσμού (WWAP, 2019). Η γεωργία απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό, αγγίζοντας σε πολλές χώρες το 70 με 80% της συνολικής κατανάλωσης. Ιδιαίτερα στις μεσογειακές περιοχές, όπου οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες, η εντατική άρδευση οδηγεί σε υδατικά ελλείμματα και σε ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων. Από την άλλη η βιομηχανική δραστηριότητα, αν και καταναλώνει μικρότερο ποσοστό περίπου 20% συμβάλει σημαντικά στη ρύπανση μέσω αποβλήτου που περιέχου βάρεα μέταλλα, οργανικές ενώσεις και θρεπτικά στοιχεία (EEA, 2021). Παράλληλα, η αστική ανάπτυξη και οι ανεπαρκείς και υπόγεια ύδατα, καθιστώντας τη διαχείριση τους ιδιαίτερα απαιτητική.

Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει τα υφιστάμενα προβλήματα, ενισχύοντας φαινόμενα ξηρασίας και ακραίων πλημμυρών (IPCC, 2022). Η άνιση κατανομή των υδάτων δημιουργεί κοινωνικές και οικονομικές πιέσεις, ενώ η αύξηση της ζήτησης για πόσιμο νερό και για αγροτική παραγωγή επιβάλλει πιο αυστηρούς κανόνες διαχείρισης. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, έχει αναπτυχθεί η έννοια της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (Integrated Water Resources Management – IWRM), η οποία συνδυάζει οικολογικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια. Βασικές της αρχής είναι η ισότιμη κατανομή, η αρχή <<ο ρυπαίνω πληρώνει>> και η διασφάλιση της αειφορίας των οικοσυστημάτων (GWP, 2013).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οδηγία-Πλαίσιο 2000/60/EK αποτέλεσε τομή, καθιερώνοντας τη σύνταξη σχεδίων διαχείρισης για όλα τα υδατικά σώματα. Τα σχέδια αυτά περιλαμβάνουν χαρτογράφηση υδατικών πόρων, καθορισμό ποιοτικών στόχων και προγράμματα μέτρων για τη μείωση ρύπανσης και την αποκατάσταση οικοσυστημάτων (EC, 2012). Η εφαρμογή της οδηγίας συνεχίζει να εξελίσσεται, ενσωματώνοντας νέα επιστημονικά εργαλεία, όπως υδρολογικά μοντέλα και τεχνικές προβλέψεις (Abbaspour et al., 2015). Η επίτευξη βιώσιμης διαχείρισης απαιτεί συντονισμένη δράση κυβερνήσεων, επιστημόνων και πολιτών. Μέτρα όπως ο εξ ορθολογισμός λυμάτων της ύδρευσης, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων, η προστασία



υγροτόπων και η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων είναι κρίσιμα βήματα. Η εξασφάλιση επαρκούς και καθαρού νερού δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντικό στόχο αλλά και η προϋπόθεση κοινωνικής ευημερίας και οικονομικής ανάπτυξης.

A. Σκοπός της εργασίας

Το νερό είναι ένας πολύτιμος πόρος, ειδικά στις περιοχές της Μεσογείου, όπου η διαθεσιμότητά του είναι περιορισμένη. Η ανάπτυξης των περιορισμένων υδατικών πόρων στην περιοχή της Μεσογείου σε συνδυασμό με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει προκαλέσει έντονη ανησυχία όσον αφορά τη βιωσιμότητα των πόρων και τον κίνδυνο ερημοποίησης της περιοχής (Fantechi et al., 1995). Στην Ελλάδα, παρόλο που γενικά διατίθενται αρκετοί υδατικοί πόροι, η υπερβολική κατανάλωση, ιδιαίτερα το καλοκαίρι, οδηγεί σε ελλείψεις, καθώς η ζήτηση ξεπερνά την προσφορά. Η άνοδος της θερμοκρασίας και οι αλλαγές στις βροχοπτώσεις επιδεινώνουν το πρόβλημα, κάνοντας ακόμα πιο αναγκαία τη σωστή διαχείριση του νερού. Η Κρήτη, λόγω της θέσης της και του έντονου γεωργικού της χαρακτήρα, αντιμετωπίζει ακόμα μεγαλύτερη πρόκληση στη διατήρηση των υδάτινων αποθεμάτων της. Γι' αυτό, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής του ποταμού Μύρτου και τις τεχνικής λίμνης της Ιεράπετρας, χρησιμοποιώντας το υδρολογικό μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι η μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Μύρτου και τις τεχνικής λίμνης της Ιεράπετρας με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου SWAT (Soil Water Assessment Tool- Εργαλείο Αξιολόγησης Εδαφών και Νερού). Επιπλέον, πρόκειται να εφαρμοστούν διαφορά διαχειριστικά σενάρια στο ήδη βαθμονομημένο μοντέλο που αφορούν τον τρόπο με τον οποίο θα καλύπτονται οι αρδευτικές ανάγκες ώστε να αξιολογηθούν στην συνέχεια οι πιθανές επιπτώσεις τους στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής. Οπότε ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης αρδευτικής πρακτικής που θα ικανοποιεί τις αρδευτικές ανάγκες και την βιωσιμότητα των υδατικών πόρων στην υπό μελέτη περιοχή.



2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

A. Περιβαλλοντικά Μοντέλα

2.1.1 Ορισμός

Τα περιβαλλοντικά μοντέλα είναι μαθηματικά μοντέλα που αναπτυχθήκαν από την επιστήμη του περιβάλλοντος με σκοπό να προσομοιώνουν και να αναλύσουν τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο περιβάλλον (Jerald L. Schooner, 2005). Τα περιβαλλοντικά μοντέλα ή καλύτερα τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στους ερευνητές να κατανοήσουν καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο οι διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν το περιβάλλον, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η αλλαγή του κλίματος, η διάχυση των ρύπων σε υδάτινους πόρους και ούτω καθεξής. Βασίζονται σε εκθέσεις δεδομένων, εξισώσεις και προσομοιώσεις για να προβλέψουν πώς θα εξελιχθούν τα περιβαλλοντικά συστήματα σε διάφορες συνθήκες και με την επίδραση διαφόρων επεμβάσεων. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση και τη προστασία του περιβάλλοντος.

Η τρεις πιο σημαντικοί λόγοι για την ανάπτυξη αυτών των μαθηματικών μοντέλων για τους περιβαλλοντικούς ρύπους είναι:

- ✚ Για την απόκτηση καλύτερης γνώσης της τύχης και της μεταφοράς των χημικών ουσιών ποσοτικοποιώντας τις αντιδράσεις, την εξέλιξη (δημιουργία νέων ουσιών) και την κίνηση τους.
- ✚ Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων στις οποίες εκτίθενται οι υδρόβιοι οργανισμοί ή/και οι άνθρωποι στο παρελθόν, παρόν ή μέλλον.
- ✚ Η πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια επιβάρυνσης ή εναλλακτικές διαχειριστικές πρακτικές.

2.1.2 Διαδικασία κατασκευής Μαθηματικού Μοντέλου

Η περιγραφή για την κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η εξής:

Αρχικά γίνεται προσπάθεια για κατανόηση της φυσικής διαδικασίας καθορίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια γράφεται η εξίσωση για τη ομαδοποίηση των χαρακτηριστικών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό που μελετάτε σε μαθηματική μορφή. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου γνωρίζονται οι φυσικοί νόμοι που περιγράφουν το φαινόμενο, δηλαδή υπάρχει κάποια σχετική μαθηματική θεωρία από πριν. Σε περίπτωση που αυτοί οι νόμοι είναι περίπλοκοι μπορεί να χρειάζεται να κατασκευαστούν εξισώσεις από την αρχή ή να χρησιμοποιηθεί η φυσική διαίσθηση για την μαθηματική απλοποίηση. Σαν τελικό αποτέλεσμα χρειάζεται ένα επιλήψιμο πρόβλημα επαρκές να δώσει ένα ρεαλιστικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα το ζητούμενο είναι ότι οι εξισώσεις αυτές με κάποιο τρόπο πρέπει να λύνονται. Τέλος γίνεται η σύγκλιση της λύσης με περαιτέρω ή και συμπεριλαμβάνουμε περισσότερα χαρακτηριστικά. Αρχίζουμε την διαδικασία από την αρχή μέχρι να έχουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα



(Χρήστος Νικολόπουλος ,σημειώσεις για το μάθημα «Μαθηματικά μοντέλα στις φυσικές επιστήμες»).

B. Υδρολογικά Μοντέλα

2.2.1 Ορισμός

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης. Τα μοντέλα αυτά είτε περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (event-type), όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, είτε περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ. μια λεκάνη απορροής). Στην πρώτη περίπτωση, η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστημικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), παραλείποντας τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν στη μελέτη, όπως η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η προσέγγιση διέπτετε, εν μέρει έστω, από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, αναπαριστώντας σε συνεχή χρόνο (continuous-time) τις κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης (Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Ν. Μαμάσης, και Μ. Σαλαχώρης, Ανάλυση απαιτήσεων εφαρμογών, Τεύχος 6, Κ/Ξ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ, Ιούλιος 2009).

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται τόσο για τη χωρική όσο και τη χρονική «επέκταση» των παρατηρήσεων δειγμάτων, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου του συστήματος, δηλαδή οι φορτίσεις και οι παράμετροι (Beven, 2001). Πράγματι, με τα μοντέλα επιτυγχάνεται η προσομοίωση πολλαπλών διεργασιών του φυσικού συστήματος και σε πολλαπλές θέσεις ενδιαφέροντος, που περιγράφονται από τις διάφορες μεταβλητές εξόδου. Βεβαίως, αν και οι έξοδοι ενός υδρολογικού μοντέλου είναι πολύ περισσότερες από τις εισόδους, είναι συνήθως μη ελεγχόμενες, αφού δεν μπορούν να τεκμηριωθούν από μετρήσεις. Από την άλλη πλευρά, η χρονική επέκταση υποδηλώνει ότι ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο πρόγνωσης, για τη διερεύνηση των επιπτώσεων διάφορων κλιματικών, διαχειριστικών και άλλων σεναρίων στο υδατικό δυναμικό μιας λεκάνης. Γενικά, η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης, την εμπειρία του μελετητή και τα διαθέσιμα δεδομένα. Συχνά, η ποσότητα αλλά και ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα σε μια έρευνα ή μελέτη, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, η οποία θεωρητικά εξασφαλίζεται από την χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και



άλλων δεδομένων, που είναι απαραίτητα για την κατάστρωση και σχηματοποίηση του μοντέλου. Αφού γίνει η επιλογή του μοντέλου, ακολουθεί η διαδικασία προσαρμογής του στη συγκεκριμένη λεκάνη, ήτοι η εκτίμηση των χαρακτηριστικών μεγεθών (παραμέτρων) του.

2.2.2 Γνωστά Υδρολογικά μοντέλα

Τα πιο γνωστά υδρολογικών μοντέλα που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στη επιστήμη των υδάτων είναι:

- ✚ Η ορθολογική μέθοδος
- ✚ Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite
- ✚ Το Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
- ✚ Modflow

2.2.3 Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων

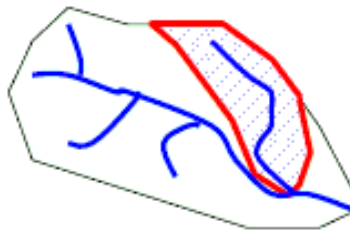
Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων ταξινομούνται με βάση:

A. Την χωρική κλίμακα

- ✚ Αδιαμέριστα(Lumped): Κοινές φορτίσεις και κοινές παράμετροι για όλη τη λεκάνη απορροής

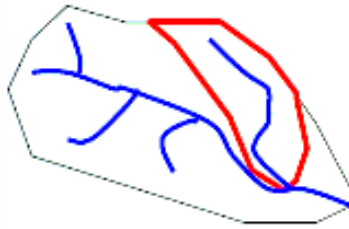


- ✚ Ημι-Κατανεμημένα(Semi-Distributed): Διαφορετικές φορτίσεις και παράμετροι ανά χωρική ενότητα

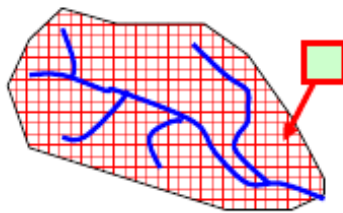


- ✚ Ημι- Αδιαμέριστα (Semi-Lumped): Διαφορετικές φορτίσεις αλλά κοινές παράμετροι ανά χωρική ενότητα





- ✚ Πλήρως κατανεμημένα (Distributed): Κατάτμηση σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες και χρήση φυσικών εξισώσεων



B. Τη μαθηματική δομή

- ✚ Μοντέλα φυσικής βάσης: Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες
- ✚ Εννοιολογικά μοντέλα: Παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες
- ✚ Στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα: Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων
- ✚ Μοντέλα “μαύρου κουτιού”: Διαδοχικοί μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου- αποτελέσματος

C. Βαθμονόμηση-Επαλήθευση

2.3.1 Βαθμονόμηση

Τα υδρολογικά μοντέλα, συνήθως, είναι παραμετρικά, που σημαίνει ότι περιλαμβάνουν αριθμητικές παραμέτρους. Η διαδικασία της βαθμονόμησης στοχεύει στην προσαρμογή αυτών των παραμέτρων έτσι ώστε το μοντέλο να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα, όπως πειραματικές μετρήσεις ή τιμές που προέρχονται από μετρήσεις στον φυσικό χώρο και άλλες πηγές. Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα υδρολογικό μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να προσομοιώσει τα δεδομένα με υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν περισσότερες παραμέτρους που



πρέπει να βαθμονομηθούν, και η πολυπλοκότητα αυξάνεται. Επίσης, με την αύξηση της πολυπλοκότητας, υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για δεδομένα υψηλής ποιότητας και για ακριβείς παραμέτρους, καθιστώντας τη βαθμονόμηση ακόμη πιο σημαντική.

2.3.2 Είδη Βαθμονόμησης

Η διαδικασία της βαθμονόμησης συνήθως υλοποιείται με δυο τρόπους: **a)** είτε μέσω χειροκίνητης βαθμονόμησης, ονομαζόμενη και “Manual Calibration”, **b)** είτε αυτόματα, με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων, γνωστή ως “Automated Calibration”. Επιπλέον, υπάρχει και μια τρίτη μέθοδος που συνδυάζει στοιχεία από τις παραπάνω δυο, και ονομάζεται ημιαυτόματη βαθμονόμηση. Σε αυτή την μέθοδο βαθμονόμησης συνήθως ορισμένες διαδικασίες εκτελούνται αυτόματα, ενώ άλλες απαιτούν την παρέμβαση του χειριστή.

Εμπειρική βαθμονόμηση: Η εμπειρική βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία όπου πραγματοποιείται η προσαρμογή ή ρύθμιση των παραμέτρων ενός μοντέλου με βάση παρατηρήσεις ή πρακτικές μετρήσεις. Συνήθως, αυτή η διαδικασία γίνεται ώστε το μοντέλο να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα και να παράγει προβλέψεις ή αποτελέσματα που είναι πιο ακριβή. Κατά τη διάρκεια της εμπειρικής βαθμονόμησης, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που παράγονται από το μοντέλο με τα πραγματικά παρατηρηθείτε δεδομένα. Στη συνέχεια, προσαρμόζονται οι παράμετροι του μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε οι προβλέψεις του να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις παρατηρήσεις. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την προσαρμογή των παραμέτρων, τη βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων, ή ακόμα και την αλλαγή της δομής του μοντέλου, αν απαιτείται. Η επιτυχημένη εμπειρική βαθμονόμηση μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του μοντέλου, καθιστώντας το χρήσιμο για προβλέψεις ή αναλύσεις του πραγματικού κόσμου.

Αυτόματη βαθμονόμηση: Η αυτόματη βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία όπου ένα μαθηματικό μοντέλο προσαρμόζεται αυτόματα χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Στόχος της αυτόματης βαθμονόμησης είναι να βρει τις βέλτιστες παραμέτρους του μοντέλου που είναι σε θέση να προβλέπει τις παρατηρήσεις ή να προσομοιώνει τα δεδομένα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Χρησιμοποιεί αλγόριθμους βελτιστοποίησης που εκτελούν επαναληπτικές διαδικασίες για να προσαρμόσουν τις παραμέτρους του μοντέλου έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν μια συγκεκριμένη συνάρτηση σφάλματος ή κριτήριο απόδοσης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση διάφορων τεχνικών όπως η γενετική βελτιστοποίηση, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, η κατάβαση της κλίσης, κ.λπ. Γενικά η αυτόματη βαθμονόμηση είναι συχνά χρήσιμη σε πολύπλοκα μοντέλα όπου η χειροκίνητη βαθμονόμηση είναι



δύσκολη ή χρονοβόρα. Επίσης, μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και την απόδοση των μοντέλων και να τα καταστήσει πιο αποτελεσματικά στην πρόβλεψη ή προσομοίωση των δεδομένων.

Ημιαυτόματη βαθμονόμηση: Είναι μια διαδικασία που συνδυάζει στοιχεία της χειροκίνητης βαθμονόμησης (manual calibration) και της αυτόματης βαθμονόμησης (automated calibration) σε ένα ενδιάμεσο σύστημα. Συνήθως, ανθρώπινος παράγοντας συμμετέχει στην διαδικασία, αλλά επιλέγει να χρησιμοποιήσει υπολογιστικές τεχνικές για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της αυτόματης βαθμονόμησης, όπως η ταχύτητα και η αντικειμενικότητα, με την εμπειρία και την επίγνωση του ειδικού. Αυτό επιτρέπει τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων και την προσαρμογή τους στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του προβλήματος (Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων Αθήνα 2009). Η πιο συχνή διαδικασία για την ημιαυτόματη βαθμονόμηση περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- ✚ **Αρχική ρύθμιση:** Ανθρώπινος εμπειρογνώμονας καθορίζει αρχικές τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου.
- ✚ **Εκτέλεση αυτόματης βαθμονόμησης:** Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι αυτόματης βαθμονόμησης για να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους του μοντέλου βάσει των διαθέσιμων δεδομένων.
- ✚ **Ανθρώπινη επαλήθευση:** Ο ειδικός αξιολογεί τα αποτελέσματα της αυτόματης βαθμονόμησης και επεξεργάζεται τυχόν παρατηρήσεις ή βελτιώσεις που απαιτούνται.
- ✚ **Προσαρμογή:** Με βάση την ανθρώπινη αξιολόγηση, ο ειδικός προσαρμόζει το μοντέλο με χειροκίνητο τρόπο, τροποποιώντας τις παραμέτρους όπως απαιτείται.

2.3.3 Επαλήθευση

Η επαλήθευση αναφέρεται στη διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, με σκοπό να διαπιστωθεί εάν τα αποτελέσματα που παράγονται από το μοντέλο αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε. Για την επαλήθευση, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν στατιστικοί δείκτες.

2.3.4 Δείκτες Επαλήθευσης

Δείκτης NSE

Ο δείκτης NSE είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που εκτιμά την σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρημένη χρονοσειρά και εκφράζεται από την εξίσωση (Nash and Sutcliffe, 1970)

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



Όπου:

Y_i^{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

Y_i^{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

Y_{mean} : ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένη χρονοσειρά

n: το μήκος της χρονοσειράς

Δείκτης PBIAS

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

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

Όπου

PBIAS: η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων

Y_i^{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

Y_i^{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

Δείκτες RMSE και RSR

Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriassi et al., 2007). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται 50 από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται, οπότε σε συνδυασμό με τον δείκτη RSR (Singh et al. 2004) γίνεται η αξιολόγηση του μοντέλου. Ο δείκτης RSR μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το RSR, τόσο μικρότερο το RMSE, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Η σχέση για τον υπολογισμό τους είναι:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right]}$$



Παρακάτω παρουσιάζονται τα όρια για τον κάθε δείκτη για την ορθή επαλήθευση της βαθμονόμησης του μοντέλου βάση με τους Moriasi & Arnold.

Πίνακας 1

Performance Rating	NSE	PBIAS (%)	RSR
Very good	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$
Good	$0.60 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$
Satisfactory	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$
Unsatisfactory	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS}$	$0.70 < \text{RSR}$

D. Μοντέλο SWAT

2.4.1 Γενικά

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA – ARS, Agricultural Research Service) με στόχο την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης σε λεκάνες απορροής με μικρό αριθμό σταθμών παρακολούθησης και την προσομοίωση (simulation) της επίδρασής τους στον υδρολογικό κύκλο, τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, τα ιζήματα και την παραγωγή χημικών (Arnold et al., 1995, Neitsch et al., 2005). Η αποτελεσματικότητά του, το κατέστησε διεθνώς αποδεκτό ως ένα από τα πλέον κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής με διάφορους τύπους εδάφους, χρήσεων γης και συνθηκών διαχείρισης (Arnold and Fohrer, 2005, Gassman et al., 2007a).

Πρόκειται για ένα καταμεμημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου, που λειτουργεί με ημερήσιο βήμα (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2001). Λαμβάνει υπόψη δεδομένα σχετικά με το έδαφος, τις χρήσεις γης και το κλίμα σε μια λεκάνη και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά υλικά και τις ποιοτικές παραμέτρους του επιφανειακού νερού, χημικές (συγκεντρώσεις ενώσεων N και P) και βιολογικές (BOD, DO), στην έξοδο της λεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία. Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου περιγράφεται από εξισώσεις παλινδρόμησης.

Το μοντέλο SWAT έχει τη δυνατότητα για:



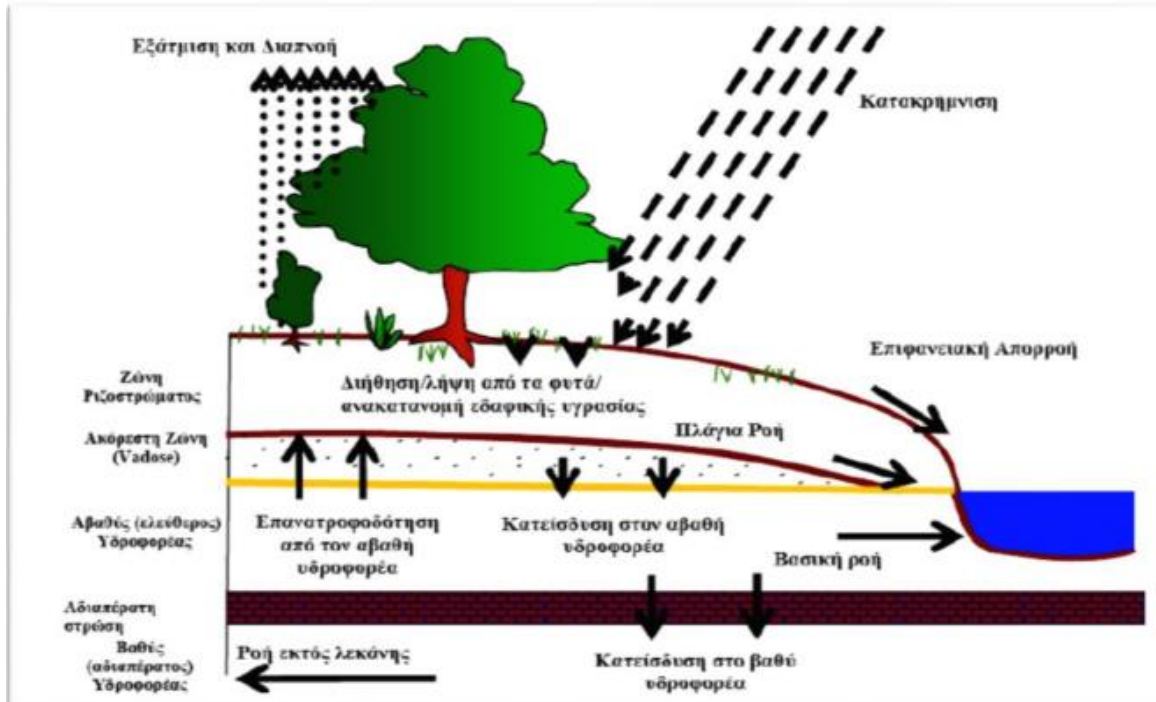
- ✚ προσομοίωση της βροχόπτωσης και της χιονόπτωσης μέχρι και 10 κλιμάκων υψομέτρου
- ✚ επαναπροσδιορισμού των εισαχθέντων δεδομένων για προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής
- ✚ πρόβλεψη των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών

2.4.2 Υδρολογικός Κύκλος στο SWAT

Η διαίρεση της λεκάνης απορροής στις υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRU) επιτρέπει στο μοντέλο να βρίσκει την εξατμισοδιαπνοή για διαφορετικές σοδειές και εδάφη. Η απορροή βρίσκεται ξεχωριστά για κάθε HRU και στη συνέχεια στο σύνολο της απορροής.

Το νερό της βροχόπτωσης πέφτει στα φύλλα ή στο έδαφος. Στο έδαφος, ή θα απορροφηθεί, ή θα γίνει επιφανειακή απορροή. Το ποσοστό του νερού απορροής ρυθμίζεται από τον συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης. Το τελευταίο κατευθύνεται πολύ γρήγορα προς ένα κανάλι και συνεισφέρει στην άμεση και μικρής διάρκειας αύξηση της παροχής του ποταμού. Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται (διαπνοή), υφίσταται εδαφική εξάτμιση ή συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την ενδιάμεση απορροή (lateral flow). Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές μεθόδους (Thorntwaite, Hargreaves και Penman-Monteith), που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφόρα (shallow aquifer) θεωρείται ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (deep aquifer) και χάνεται από το σύστημα. Το επιφανειακό νερό κινούμενο στο ποτάμι συναντά πιθανούς ταμιευτήρες και λίμνες, όπου η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου διέπει την αποθήκευση και την απελευθέρωση νερού στο εκάστοτε χρονικό βήμα. Το νερό που τελικά καταλήγει στο ποτάμι είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής και διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφόρας) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου, 2006).





Η γενική εξίσωση που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου του μοντέλου σε κάθε υδρολογική μονάδα είναι:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{qw})$$

όπου:

SW_t = η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t

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

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

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

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

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

Q_{qw} = η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H₂O)



Ε. Φράγματα

2.5.1 Γενικά

Τα φράγματα αποτελούν από τα σημαντικότερα έργα υδροτεχνικής υποδομής, καθώς συνδέονται άμεσα με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, την ενεργειακή παραγωγή και την αντιπλημμυρική προστασία. Με τον όρο φράγμα περιγράφεται το τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος με σκοπό την παρεμπόδιση της φυσικής ροής και τη δημιουργία ενός ταμιευτήρα. Και λόγω αυτού της παρέμβασης το νερό μπορεί να αποθηκευτεί, να καλύπτουν οι ανάγκες της ύδρευσης, άρδευσης και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροτροβίλων που αξιοποιούν τη διαφορά στάθμης (ICOLD,2020). Η σημασία των φραγμάτων έχει ενισχυθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, καθώς η κλιματική αλλαγή προκαλεί μεγαλύτερη αστάθεια στις βροχοπτώσεις και συχνότερη εμφάνιση ακραίων υδρολογικών φαινομένων, καθιστώντας αναγκαία την αποθήκευση και ρύθμιση των διαθέσιμων υδατικών πόρων (C.Zarfl, 2019).

Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου φράγματος για τη περιοχή μελέτης εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

- Γεωλογία και τοπογραφία
- Τη σεισμικότητα
- Τη υδρογεωλογία
- Τους περιβαλλοντικούς σκοπούς

Επίσης για κάθε έργο είναι απαραίτητη η λεπτομερής μελέτη ώστε να επιλεγεί ο τύπος που εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη ασφάλεια και λειτουργικότητα με το χαμηλότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Foster& Fell,2022). Οι δυο βασικές κατηγορίες είναι τα άκαμπτα φράγματα και τα άκαμπτα/ χωμάτινα φράγματα. Στο κείμενο αυτό εξετάζονται τα άκαμπτα φράγματα τα οποία κατασκευάζονται κυρίως από σκυρόδεμα και χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή, μεγάλη διάρκεια ζωής και δυνατότητα ανάληψης σημαντικών φορτίων.

Μια από τις συνηθέστερες μορφές άκαμπτων φραγμάτων είναι τα φράγματα βαρύτητας, τα οποία αντιστέκονται στις υδροστατικές πίεσης με το ίδιο τους το βάρος. Ο σχεδιασμός τους στηρίζεται σε γεωμετρική σταθερότητα και σε στιβαρή θεμελίωση, καθιστώντας τα μια από τις πιο αξιόπιστες επιλογές για μεγάλα έργα υδροδότησης ή ενεργειακής παραγωγής. Μια νεότερη εξέλιξη της ίδιας φιλοσοφίας είναι τα φράγματα από κυλινδρωμένο σκυρόδεμα(RCC),τα οποία επιτρέπουν ταχύτερη και οικονομικότερη κατασκευή, ενώ προσφέρουν υψηλή μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα. Η χρήση τους έχει αυξηθεί σημαντικά μετά τη δεκαετία του 1990 λόγω της ευελιξίας και της μειωμένης ανάγκης για παραδοσιακό ξυλότοιχο(ACI,2019).

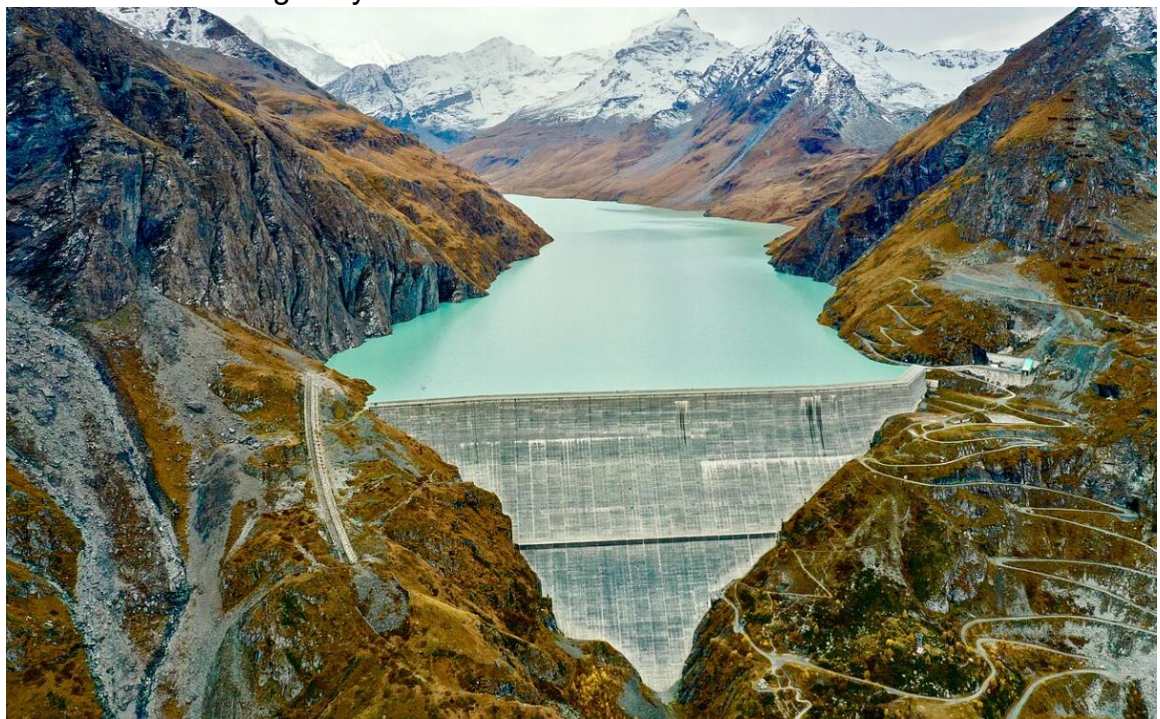
Ένας ακόμη τύπος φράγματος είναι τα φράγματα κυλινδρωμένου σκληρού επιχώματος φράγματα, τα οποία συνδυάζουν στοιχεία επιχώματος και



σκυροδέματος και χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου αποκτείνεται αυξημένη αντοχή σε σεισμικές φορτίσεις. Λόγω της κατασκευαστικής τους φιλοσοφίας, επιτυγχάνουν μειωμένο κόστος υλικών και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τους πιο βαριές τύπους. Σημαντική θέση κατέχουν και τα τοξωτά φράγματα, τα οποία λειτουργούν μεταφέροντας τα υδροστατικά φορτία στις παρειές της κοιλάδας μέσω της καμπυλότητάς τους. Αυτά είναι κατάλληλα για στενές και βαθιές χαράδρες, όπου το γεωλογικό υπόβαθρο μπορεί να αναλάβει πολύ υψηλά φορτία. Τέλος, αυτής της κατηγορίας είναι τα αντηρίδα φράγματα που διαθέτουν κατακόρυφα τοιχώματα που στηρίζονται σε αντηρίδες επιτρέποντας έτσι την εξοικονόμηση των υλικών. Αυτά χρησιμοποιούνται σπανιότερα σήμερα, αλλά εξακολουθούν να αποτελούν κατάλληλη λύση για συγκεκριμένες γεωλογικές σύνηθες.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες και σχεδιαγράμματα για τα είδη των φραγμάτων που υπάρχουν.

- ✚ Βαρύτητας σκυροδέματος (Gravity dams) Grande Dixence Dam, a massive concrete gravity dam in Switzerland.



- ✚ Βαρύτητας κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Rolled Compacted Concrete dams) Taum Sauk





✚ Αξονοσυμμετρικά κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος



Αξονοσυμμετρικά κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος- ΑΚΣΕ (hard-filled dams)
Peruvian Andes Περού



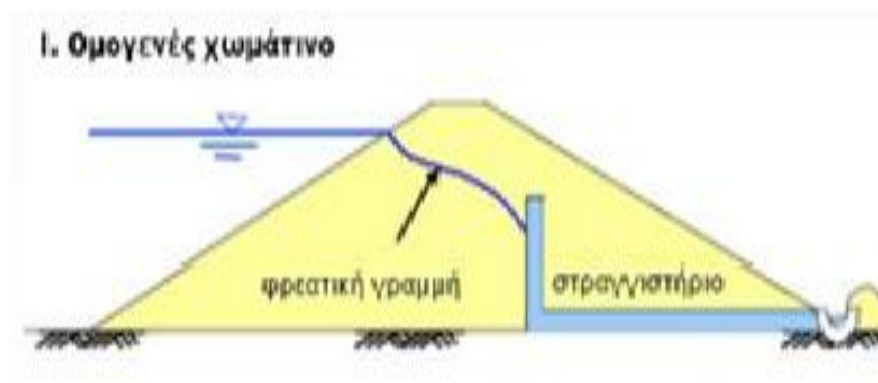
✚ Τοξωτά (Arch dams) Hoover Dam



✚ Αντηριδωτά (Buttress dams) Roselend Dam in France



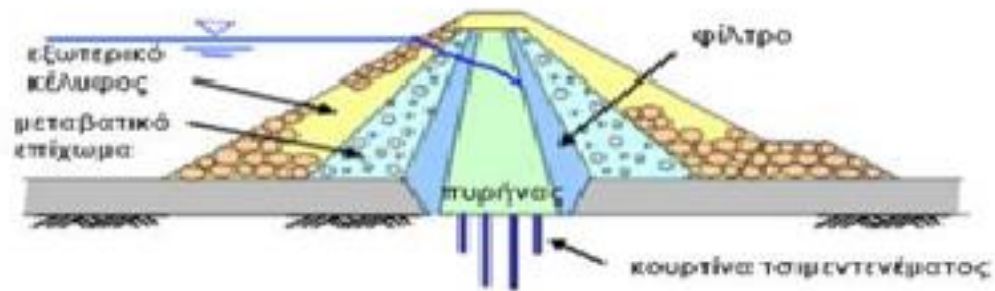
1. Εύκαμπτα φράγματα – γεωφράγματα (embankment dams) τα οποία διαθέτουν στεγανά υλικά κεντρικά ή ανάντη και ταξινομούνται σε:
- ✚ Χωμάτινα (earth-filled dams) ομογενή ή με πυρήνα



- ✚ Λιθόρριπτα (rock-filled dams) με πυρήνα

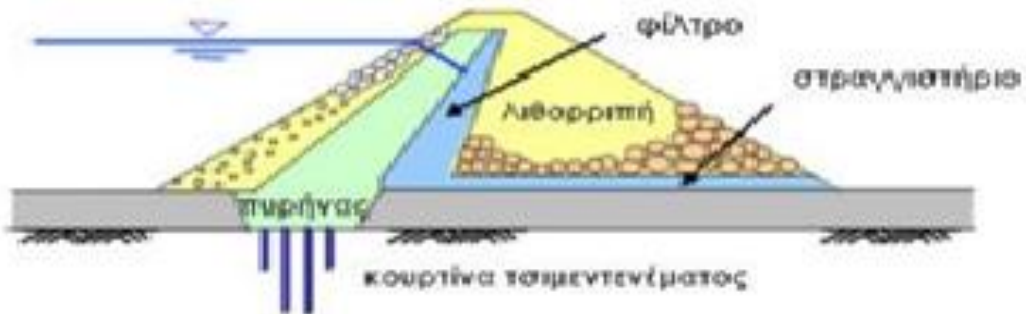


II. Λιθόρριπτο με κεντρικό πυρήνα



- ✚ Λιθόρριπτα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος – ΛΑΠΣ (concrete faced)

III. Λιθόρριπτο με επικλινή πυρήνα



- ✚ Χωμάτινα ή λιθόρριπτα με ανάντη ασφαλτική μεμβράνη

IV. Λιθόρριπτο με αδιαπέρατο στρώμα στην ανάντη πλευρά



2.5.2 Υδρολογικός Σχεδιασμός

Οι ταμιευτήρες γενικά υπολογίζονται για ετήσιο κύκλο λειτουργίας, δηλαδή για αποθήκευση νερού κατά τους υγρούς μήνες και απόδοση του αποθηκευμένου νερού κατά τους ξηρούς μήνες. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ωφέλιμο όγκο του, γιατί προβλέπεται ένας νεκρός όγκος στον πυθμένα που θα γεμίσει με το χρόνο από τα φερτά υλικά, και ένας επιπλέον όγκος πάνω από τον ωφέλιμο, για ανάσχεση πλημμυρών.

Το γενικευμένο ισοζύγιο για τον σχεδιασμό ενός φράγματος με μηνιαίο χρονικό βήμα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Vi=Vi-1+Qini+ P \cdot A - PET \cdot A - Qeco - Qirr$$

Όπου:

Vi : ο αποθηκευμένος όγκος νερού τον μήνα i (m^3)

$Vi-1$: ο αποθηκευμένος όγκος νερού τον μήνα $i-1$ (m^3)

$Qini$: η εισροή στον ταμιευτήρα κατά τον μήνα i (m^3)

P : η ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i (m)

A : η επιφάνεια του φράγματος (m^2)

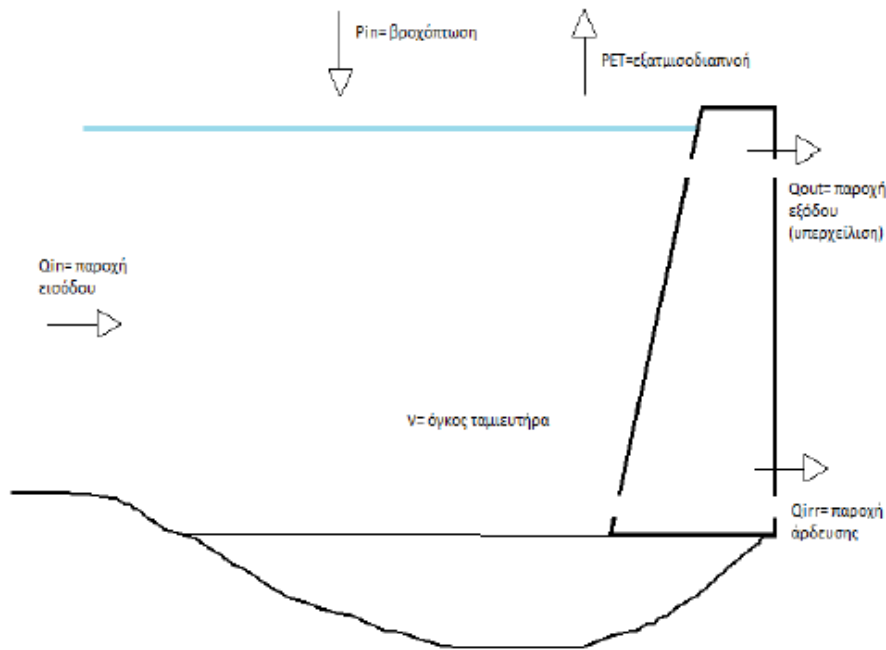
PET : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή τον μήνα i (m)

$Qeco$: η οικολογική παροχή ή παροχή υπερχειλίσης τον μήνα i (m^3)

$Qirr$: η ποσότητα που χρησιμοποιείται για αρδευτικούς ή υδρευτικούς σκοπούς τον μήνα i (m^3)

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το ισοζύγιο σχεδιασμό του ταμιευτήρα





Ε. Κλιματική Αλλαγή

2.6.1 Γενικά

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας και απαιτεί δράση σε παγκόσμιο επίπεδο για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και την προσαρμογή στις αναπόφευκτες αλλαγές που έχουν ήδη ενεργοποιηθεί. Αναφέρεται στις μεταβολές στο κλίμα της Γης, που προκαλούνται κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η κλιματική αλλαγή περιλαμβάνει τις αυξημένες θερμοκρασίες, τις αλλαγές στα πρότυπα των βροχοπτώσεων, τη θάλασσα επίπεδη αύξηση, και άλλες αλλαγές στα φυσικά χαρακτηριστικά του πλανήτη. Οι κύριες αιτίες της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την καύση των ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, την αποψίλωση των δασών, τη γεωργία, τη βιομηχανία και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι αλλαγές αυτές στο κλίμα έχουν ευρείες επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων:

Αύξηση της θερμοκρασίας: Η γήρανση του πλανήτη οδηγεί σε αυξημένες θερμοκρασίες σε παγκόσμια κλίματα.

Αλλαγές στα πρότυπα των βροχοπτώσεων: Ορισμένες περιοχές βιώνουν αυξημένες βροχοπτώσεις, ενώ άλλες υποφέρουν από ξηρασία.

Θαλάσσια αύξηση: Η αύξηση της θερμοκρασίας του ωκεανού οδηγεί σε αύξηση της στάθμης της θάλασσας, προκαλώντας προβλήματα ως προς την εκβιομηχάνιση και την επιπλάμενη πλημμίκη καταστροφή.

Επιδράσεις στην υγεία: Η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάσει την υγεία του ανθρώπου, προκαλώντας αυξημένες θερμοκρασίες, επικίνδυνες θαλάσσιες αλλαγές, και εκρήξεις καύσωνα.



Απώλεια βιοποικιλότητας: Η αλλαγή του κλίματος μπορεί να απειλήσει τη βιοποικιλότητα, καθώς ορισμένα είδη δυσκολεύουν να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες.

2.6.2 Η Κλιματική Αλλαγή και ο IPCC

Το IPCC αντιπροσωπεύει το "Διεθνές Πάνελ για την Κλιματική Αλλαγή" (Intergovernmental Panel on Climate Change) και πρόκειται για μια οργάνωση που δημιουργήθηκε από τα "Ηνωμένα Έθνη" (United Nations) το 1988. Το κύριο έργο του IPCC είναι να αξιολογεί την κατάσταση της κλιματικής αλλαγής μέσα από επιστημονικές έρευνες και να παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το κλίμα και τις επιπτώσεις του. Οι βασικοί στόχοι του IPCC περιλαμβάνουν:

1. Εκπόνηση εκθέσεων σχετικά με τις εξελίξεις της κλιματικής αλλαγής, τις αιτίες που την προκαλούν, και τις επιπτώσεις που έχει στο παγκόσμιο κλίμα.
2. Αξιολόγηση των διαθέσιμων κλιματικών επιστημονικών ερευνών και δεδομένων.
3. Παροχή επιστημονικής βάσης για την ανάπτυξη πολιτικών και μέτρων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.
4. Διεξαγωγή συνεδριάσεων και συναντήσεων μεταξύ επιστημόνων, κυβερνητικών οργάνων και άλλων ενδιαφερόμενων μερών για τη συζήτηση της κλιματικής αλλαγής και των αντίστοιχων λύσεων.

Επίσης το IPCC λειτουργεί με τη συνεργασία των κυβερνήσεων από διάφορες χώρες και αναλαμβάνει να συγκεντρώνει, αξιολογεί και παρουσιάζει την τελευταία και πιο αξιόπιστη επιστημονική πληροφορία σχετικά με την κλιματική αλλαγή. Οι αξιολογήσεις του IPCC συνεισφέρουν στον διεθνή διάλογο για την αλλαγή του κλίματος και βοηθούν τις χώρες να αναπτύξουν πολιτικές και μέτρα για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.



G. Ερημοποίηση

Η ερημοποίηση είναι η διαδικασία υποβάθμισης των εδαφών που συμβαίνει κυρίως σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές. Αυτή η υποβάθμιση των εδαφών μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των κλιματικών αλλαγών και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Οι περιβαλλοντικές συνέπειες της ερημοποίησης είναι πολύπλοκες και συμπεριλαμβάνουν τη μείωση της γεωργικής παραγωγικότητας, την απώλεια της βιοποικιλότητας και τη μείωση της παραγωγής τροφίμων. Επίσης, η ερημοποίηση μπορεί να οδηγήσει στην εξάντληση των υδάτινων πόρων, με όλες τις αρνητικές επιπτώσεις που αυτό συνεπάγεται. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην ερημοποίηση είναι πολύπλοκοι και σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν:

- ✚ **Αποψίλωση των δασών:** Η αφαίρεση των δασών μπορεί να μειώσει την προστασία του εδάφους από τη διάβρωση και να αυξήσει την απώλεια εδάφους.
- ✚ **Πυρκαγιές:** Οι πυρκαγιές μπορεί να καταστρέψουν τη φυτοκάλυψη και να επιταχύνουν την ερημοποίηση του εδάφους.
- ✚ **Υπερβόσκηση:** Η υπερβόσκηση από τα κατοικίδια ζώα μπορεί να εξαντλήσει τη φυτοκάλυψη και να επιδεινώσει την ποιότητα του εδάφους.
- ✚ **Εντατική γεωργία:** Η εκτεταμένη γεωργική δραστηριότητα μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση του εδάφους, κατανάλωση των υδάτινων πόρων και απώλεια βιοποικιλότητας.
- ✚ **Αλόγιστη διαχείριση των υδάτινων πόρων:** Οι κατασκευές φραγμάτων, υπεράντληση των υδάτινων πόρων και αποξήρανση υγροτόπων μπορούν να επιδεινώσουν την κατάσταση του εδάφους.



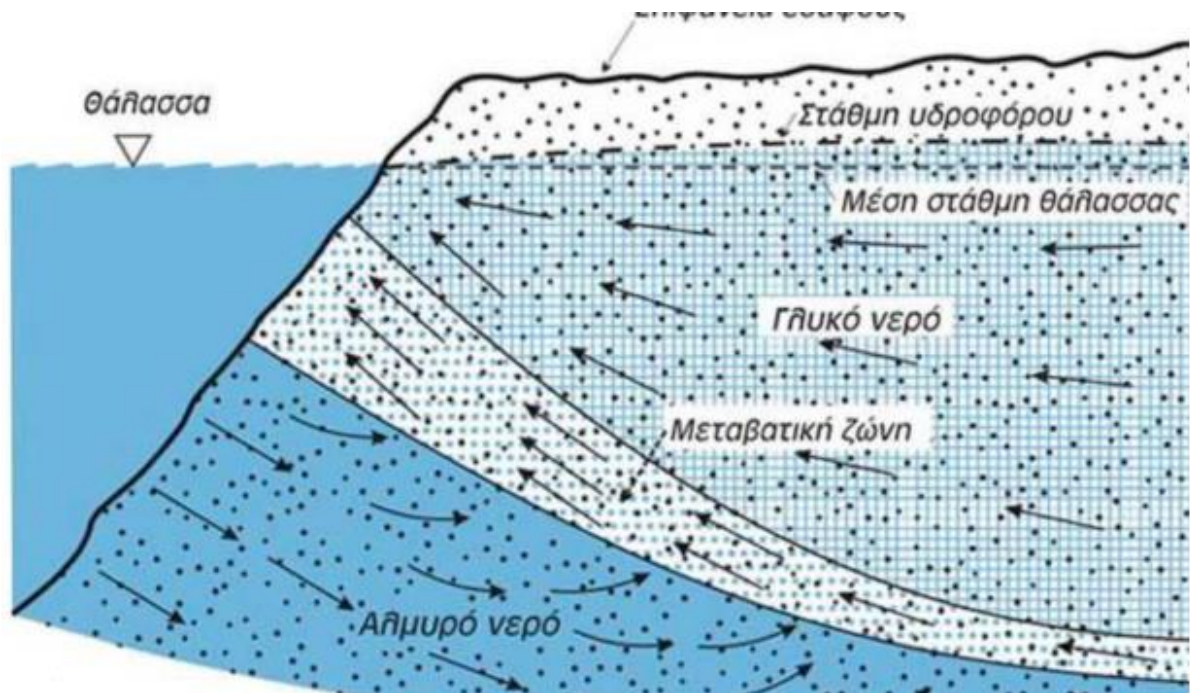


2.8 Υφαλμήρινη

2.8.1 Γενικά

Η υφαλμήρινη είναι το αποτέλεσμα της διατάραξης της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού στους παράκτιους υδροφορίες. Τα εμφανή αποτελέσματα της δεν αποδίδονται σε μόνο ένα μεμονωμένο παράγοντα αλλά σε ένα σύνθετο συνδυασμό φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών, οι οποίες επιδρούν αθροιστικά και συχνά μη αναστρέψιμα (Custodio, E., & Bruggeman, G. A. (1987)).





Η ευαισθησία ενός υδροφορέα στην υφαλμήριση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα γεωλογικά κι υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα οι αμμώδεις και Καρστικοί υδροφορίες, στους οποίους η υψηλή περατότητα επιτρέπουν την γρήγορη μετακίνηση των ρευστών, Αντίθετα οι υδροφορίες με αργιλικά ή λιγότερο διαπερατά στρώματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση στην υφαλμήριση, χωρίς ωστόσο να είναι τόσο προστατευμένοι.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά τον ρυθμό και την έκταση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού είναι:

- ✚ Η υδραυλική αγωγιμότητα
- ✚ Το πάχος και η γεωμετρία του υδροφορέα
- ✚ Η παρουσία ρηγμάτων ή Καρστικών σχημάτων

2.8.2 Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την υφαλμήριση

α. Η κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή είναι ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες για το φαινόμενο της υφαλμήρισης για τους παρακτίους υδροφορίες. Με άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας αυξάνεται η υδροστατική πίεση που ασκείται στο θαλασσινό νερό στα παράκτια υδρογεωλογικά συστήματα. Λόγω αυτής της αύξησης μετατοπίζεται το μέτωπο επαφής με το γλυκό νερό με αλμυρού πριν την ενδοχώρα και σε περιοχές όπου η ανθρώπινη άντληση δεν είναι ιδιαίτερα έντονη.



Επίσης η μείωση των βροχοπτώσεων και η αύξηση των ξηρών περιόδων περιορίζουν τη φυσική ανατροφοδότηση των υπόγειων υδροφόρων. Με αποτέλεσμα να μειώνεται η εισροή του γλυκού νερού και να υπάρχει έντονη πτώση της πιεζομετρικής στάθμης.



b. Οι γεωργικές πρακτικές και η δευτερογενής αλάτωση

Η συστηματική άρδευση με μεγάλες ποσότητες νερού σε περιοχές με ξηρόθερμο κλίμα όπως αυτό της Κρήτης όταν δεν συνοδεύεται από αποστράγγιση που προκαλεί τη συσσώρευση των διαλυμένων αλάτων στο επιφανειακό έδαφος. Λόγω αυτού τα άλατα παραμένουν στο έδαφος και με την πάροδο του χρόνου αυξάνουν την αλατότητα η οποία μεταφέρεται στα βαθύτερα στρώματα μέσω της διήθησης επηρεάζοντας έτσι το ριζόστρωμα των καλλιεργειών αλλά και τον υπόγειο υδροφόρα. Με αποτέλεσμα η διαδικασία αυτή να δημιουργεί ένα φαύλο κύκλο υποβάθμισης καθώς λόγω της αυξημένης αλατότητας μειώνεται σημαντικά η γεωργική παραγωγικότητα που με τη σειρά του απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση νερού.





γ. Οι ανθρωπογενείς πίεσης

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα τα τελευταία χρόνια είναι οι ανθρωπογενείς πίεσης και πιο συγκεκριμένα η έντονη αστικοποίηση, η αύξηση του πληθυσμού και η ανάπτυξη του τουρισμού. Ειδικά τους θερινούς μήνες για τη Κρήτη λόγω του υπερ. τουρισμού οι ανάγκες του γλυκού νερού αυξάνονται σημαντικά που αυτό οδηγεί σε ανεξέλεγκτη άντληση υπόγειων υδάτων. Λόγω της απουσίας των ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης των υδατικών πόρων και ο ελλιπής έλεγχος των γεωτρήσεων ενισχύουν τη μακροχρόνια υποβάθμιση των υδροφόρων.

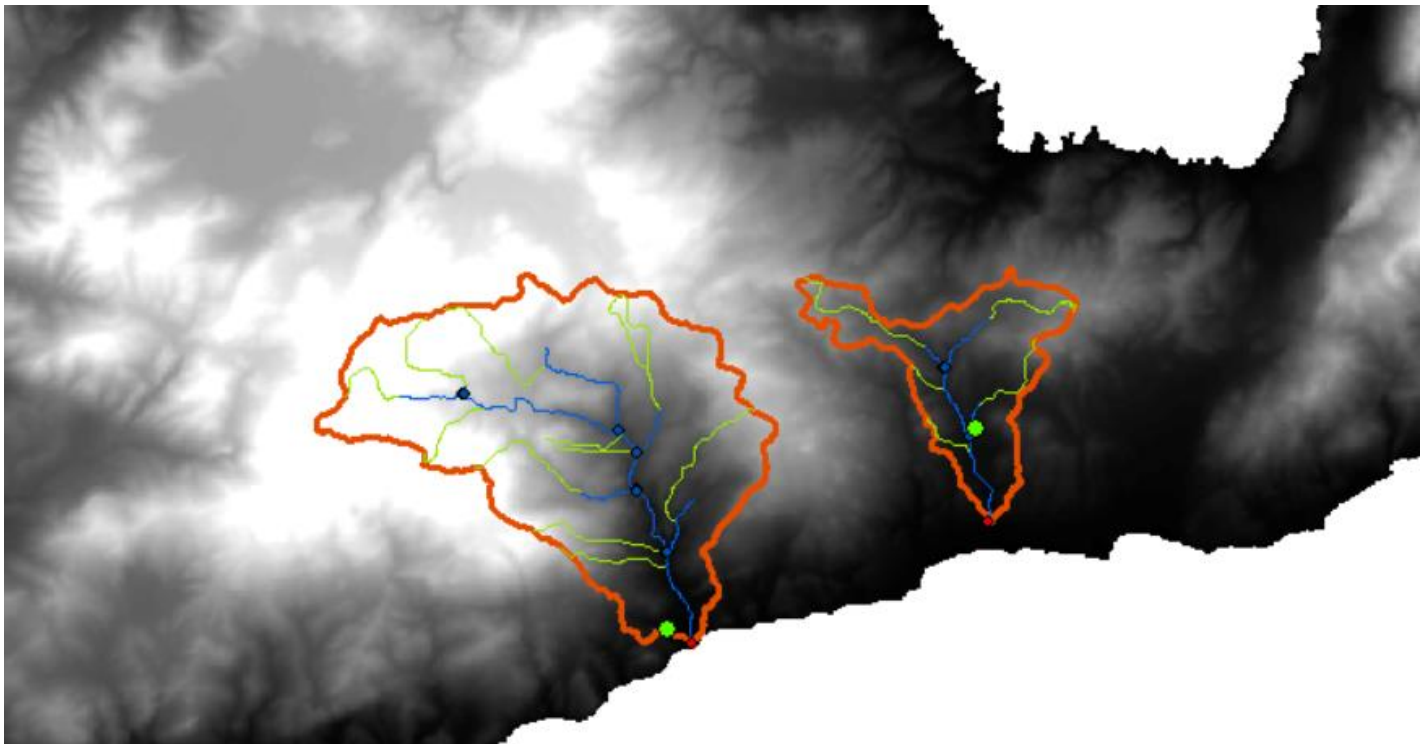




3. Περιοχή μελέτης

A. Γενικά

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου όπου εκτείνεται σε έκταση περίπου 99 τετραγωνικών χιλιομέτρων και καλύπτει τον χώρο από τη νότια πλευρά του όρους Δίχτυ μέχρι το Λιβυκό Πέλαγος. Προς τα ανατολικά, ορίζεται από τις κορυφές Ρούσο Ξύλο και Μεγάλη Κορυφή, ενώ προς τα δυτικά από τις κορυφές Αφέντης Χριστός, Ψαρί Μαδάρα, Σαρακινό Καράβι, Κυλιάρα και Αγία Αικατερίνη. Η γεωμετρία της λεκάνης είναι ακανόνιστη, με υψόμετρα που κυμαίνονται από -0 (θάλασσα) έως +2148 μέτρα από το μέσο ύψος της θάλασσας. Η τοπογραφία της περιοχής είναι κυρίως λοφώδης με ήπια ανάγλυφα. Οι υδρογραφικές ροές στην περιοχή είναι πυκνές, με τον χείμαρρο Μύρτο να αποτελεί τον κύριο αποδέκτη. Η γεωλογική δομή της περιοχής, που κυρίως αποτελείται από αδιαπέρατους ή ελάχιστα περατούς σχηματισμούς, προωθεί τη γρήγορη επιφανειακή αποστράγγιση της λεκάνης. Ο χείμαρρος Μύρτος, με συνολικό μήκος περίπου 20,80 χιλιόμετρα, δέχεται ύδατα από παραχειμάρρους και πηγές, με τον κύριο κλάδο να έχει σχεδόν μόνιμη ροή από βορρά βορειοανατολικά προς βορρά-βορειοανατολικά. Ο χείμαρρος παρουσιάζει υψηλή κλίση στο ανάντη τμήμα, κυμαίνοντας από 6% έως 36%, με μέση κλίση 16%, ενώ στα κατόντη παρουσιάζει μικρότερη κλίση, κυμαίνοντας από 1,5% έως 6%, με μέση τιμή 3%(Βασιλική Μπούρα, 2010).



B. Γεωμορφολογία

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου εκτείνεται σε επιφάνεια περίπου 99km² και καλύπτει τον χώρο από τις νότιες υπώρειες του Όρους Δίκτη έως τις εκβολές του στο Λιβυκό Πέλαγος. Προς τα ανατολικά οροθετείται από τις κορυφές Ρούσο Ξύλο και Μεγάλη Κορυφή, ενώ προς τα δυτικά από τα υψώματα Αφέντης Χριστός, Ψαρί Μαδάρα, Σαρακινό Καράβι, Κυλιάρα και Αγία Αικατερίνη. Η μορφή της λεκάνης είναι ακανόνιστη, με υψομετρικές διακυμάνσεις από το επίπεδο της θάλασσας έως τα 2148 μέτρα. Το ανάγλυφο είναι κυρίως λοφώδες έως ημιορεινό, με έντονες τοπικές κλίσεις και περιορισμένες πεδινές εκτάσεις στο νότιο τμήμα, κοντά στις εκβολές.

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης είναι ανεπτυγμένο και ιδιαίτερα διακλαδισμένο, στοιχείο που αντανακλά τη γεωλογική πολυπλοκότητα και την έντονη διάβρωση που επικρατεί στην περιοχή. Ο χείμαρρος Μύρτος, με μήκος περίπου 20,8 km αποτελεί τον κύριο αποδέκτη των επιφανειακών απορροών. Δέχεται ύδατα από πολλούς παραχειμάρρους και πηγές, με τον κύριο κάδο να εμφανίζει σχεδόν μόνιμη ροή, κατευθυνόμενος από βορρά σε βορειανατολικά προς νότο και νοτιοδυτικά.

Η κλίση του ποταμού μεταβάλλεται κατά μήκος της κοίτης του δηλαδή στο ανάντη τμήμα κυμαίνεται από 6% έως 36%, ενώ στο κατάντη περιορίζεται σε 1,5% έως 6% με μέση τιμή περίπου 3%. Το δίκτυο απορροής αποτελείται από V-σχήματος χαραδρώσεις, με πλάτος έως 1000m στην κορυφή ενώ το πλάτος της κύριας κοίτης δεν υπερβαίνει τα 50m. Οι κλίσεις των πρηνών κυμαίνονται από 20° έως 40°, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται στο δυτικό τμήμα, όπου το βάθος των χαραδρώσεων φτάνει τα 400m. Στο ανατολικό τμήμα, οι χαραδρώσεις είναι πιο ήπιες, με βάθη έως 200m και κλίσεις περίπου 20°.

Η γεωλογική δομή της περιοχής αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικούς και φυσικούς σχηματισμούς, οι οποίοι είναι αδιαπέραστοι ή χαμηλής περατότητα, γεγονός που προάγει τη γρήγορη επιφανειακή αποστράγγιση και περιορίζει τη διήθηση. Η συνύπαρξη συμπαγών και διαπερατών πετρωμάτων, σε συνδυασμό με την έντονη τεκτονική δραστηριότητα, έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση ενός ανισόμορφου και έντονα τεμαχισμένου ανάγλυφου. Συνολικά, η λεκάνη του Μύρτου παρουσιάζει ποικιλία γεωμορφολογικών ζωνών από τα ορεινά, απότομα τμήματα στα βόρεια έως τις πεδινές παράκτιες εκτάσεις στα νότια. Η παρουσία βαθιών χαραδρώσεων, οι υψηλές κλίσεις και η ενεργή διάβρωση αποκαλύπτουν ένα νεαρό και δυναμικό τοπίο των νοτίων περιοχών της Κρήτης, όπου οι τεκτονικές διεργασίες και οι κλιτικοί παράγοντες εξακολουθούν να διαμορφώνουν την επιφάνεια του εδάφους.





3.3 Υδρογεωλογία

Βάσει των γεωλογικών μελετών, η περιοχή φαίνεται να ανήκει σε ένα σύστημα γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκεται σε εξέλιξη. Σε αυτό το σύστημα, υπερισχύει η κατακόρυφη και πλευρική διάβρωση. Παρατηρούνται επίσης ορατές αλλουβιακές αποθέσεις, κυρίως κατά μήκος του ποταμού Μύρτου, καθώς και πλευρικά κορήματα και κατακρημνισμένοι ασβεστολιθικοί όγκοι. Επιπλέον, στην περιοχή παρατηρούνται:

Απολιθωματοφόρες μάργες: Αυτό ενδείκνυται ότι οι μάργες αυτές περιέχουν απολιθώματα, τα οποία μπορούν να περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την ιστορία της περιοχής και τη γεωλογική εξέλιξή της.

Κροκαλοπαγή: Η παρουσία κροκαλοπαγής υποδηλώνει την παρουσία πετρωμάτων που αποτελούνται από μικρά, στρογγυλά κοκκάλια που συνήθως σχηματίζονται στα ρυάκια κατά τη διάρκεια της εξόδου τους από το βουνό.

Οφιολιθικά συμπλέγματα: Τα οφιολιθικά συμπλέγματα είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιλαμβάνουν ορυκτές πρωτογενείς πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογική ιστορία της περιοχής.

Ιζήματα φλύσχη και ασβεστόλιθοι: Τα φλύσχη είναι αποθέσεις που συνήθως περιλαμβάνουν άμμο και βλάστηση και μπορεί να αποτελούν ενδιαφέρουσες πηγές υδάτων. Ασβεστόλιθοι είναι βραχώδεις σχηματισμοί που περιέχουν ασβέστιο, και μπορεί να επηρεάζουν την ποιότητα του υδρογείου.

Οι γεωλογικοί αυτοί σχηματισμοί είναι σημαντικοί για την κατανόηση της ικανότητας μετάδοσης και αποθήκευσης νερού στην περιοχή, και επηρεάζουν την υδρολογία της περιοχής.



3.4 Κλίμα

Το κλίμα στην Κρήτη είναι τυπικά μεσογειακό με ήπιους βροχερούς χειμώνες και θερμά ξηρά καλοκαίρια. Οι μήνες που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των βροχοπτώσεων είναι από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο κυρίως στα βόρεια και ορεινά τμήματα του νησιού. Η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται γύρω στα 460 με 500 mm, με τις πιο υψηλές τιμές να σημειώνονται στα δυτικά και τις πιο υψηλές τιμές να σημειώνονται στα δυτικά και τις χαμηλότερες στα ανατολικά (Agou, Varouchakis & Hristoulos, 2019). Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα αυξημένη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με πάνω από 2800 ώρες ηλιοφάνειας ετησίως, καθιστώντας την Κρήτη μια από τις πιο φωτεινές περιοχές της Ευρώπης (Politi et al, 2023).

Στην ανατολική Κρήτη, περιοχές όπως η Σητεία και η νότια ακτή όπως τα Μάταλα και ο Λέντας θεωρούνται από τις ξηρότερες περιοχές της Μεσογείου, με ετήσια βροχόπτωση που συχνά δεν υπερβαίνει τα 350-400 mm. Οι θερμοκρασίες παραμένουν υψηλές, με μέση ετήσια τιμή πάνω από 20°C και με μέγιστες θερινές τιμές που φτάνουν τους 40°C κατά τη διάρκεια των θερμικών κυμάτων. Το μικρόκλιμα αυτό συνδέεται με τη γεωμορφολογία και την περιορισμένη επίδραση των βόρειων ανέμων, δημιουργώντας ξηροθερμικές συνθήκες και φτωχότερη βλάστηση σε σχέση με τη δυτική Κρήτη.

Αντίθετα, στα δυτικά τμήματα του νησιού, όπως στους νομούς Χανίων και Ρεθύμνης, το κλίμα είναι πιο υγρό και εύκρατο. Οι βροχοπτώσεις ξεπερνούν συχνά τα 900 mm ετησίως, κυρίως λόγω του ορογραφικού φαινομένου στα Λευκά Όρη. Το καλοκαίρι προσφέρουν φυσική δροσιά, μειώνοντας τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι νότιοι άνεμοι, συχνοί κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο, μεταφέρουν θερμές και ξηρές αέριες μάζες από τη Βόρεια Αφρική. Στην περιοχή αυτή αναπτύσσεται πλουσιότερη βλάστηση, με πυκνά δάση και εύφορες κοιλάδες.

Η κλιματική διαφοροποίηση μεταξύ βόρειας- νότιας και ανατολικής- δυτικής Κρήτης είναι ιδιαίτερα έντονη και επηρεάζει τόσο τη βλάστηση όσο και τις καλλιεργητικές πρακτικές. Η βόρεια ακτή είναι ηπιότερη λόγω της επίδρασης του Αιγαίου, ενώ η νότια ακτή είναι πιο θερμή και ξηρή, με περιορισμένους υδάτινους πόρους. Οι σύγχρονες κλιματικές προβολές δείχνουν ότι η Κρήτη θα αντιμετωπίσει περαιτέρω μείωση των βροχοπτώσεων και αύξηση της θερμοκρασίας τις επόμενες δεκαετίες γεγονός που καθιστά αναγκαία τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και την προσαρμογή της αγροτικής παραγωγής στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον.



3.5 Σεισμικότητα

Η Κρήτη βρίσκεται στην καμπή του Ελληνικού Τόξου, μιας ενεργής τεκτονικής ζώνης που σχηματίζεται από τη σύγκλιση της Ευρασιατικής και της Αφρικάνικης λιθοσφαιρικής πλάκας. Το νότιο τμήμα του νησιού αποτελεί την εξωτερική πλευρά του τόξου, γνωστή ως Ελληνική Τάφρος, όπου σημειώνεται έντονη σεισμική δραστηριότητα. Η συνεχής υποβάθμιση της αφρικάνικης πλάκας κάτω από την Ευρασιατική προκαλεί τη δημιουργία ισχυρών ρηγμάτων και πλήθους σεισμών, κυρίως στη θαλάσσια περιοχή νότια και δυτικά του Νησιού. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες του Ινστιτούτου Γεωδυναμικής (ΕΑΑ, 2023), οι ενεργές τεκτονικές δομές γύρω από την Κρήτη παρουσιάζουν έντονη σεισμικότητα με εστίες που συχνά ξεπερνούν τα 60 km σε βάθος. Η μορφοτεκτονική εξέλιξη του νησιού συνδέεται άμεσα με τη δράση αυτών των ρηγμάτων, καθιστώντας την Κρήτη μια από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της Μεσογείου.

Στο δυτικό τμήμα της Κρήτης, η σχέση μεταξύ σεισμικών εστιών και ενεργών ρηγμάτων είναι περισσότερο εμφανής, ιδιαίτερα στις θαλάσσιες περιοχές μεταξύ Κρήτης και Γαύδου. Σε αντίθεση με το ηπειρωτικό τμήμα του νησιού, τα ρήγματα είναι αβαθή και περιορίζονται κυρίως στα ιζηματογενή πετρώματα του ανώτερου φλοιού, όπως επιβεβαιώνουν τα δεδομένα του Hellenic Unified Seismic Network (HUSN, 2022). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συχνή εκδήλωση επιφανειακών σεισμών μικρού εστιακού βάθους, οι οποίοι παρότι δεν είναι πάντοτε μεγάλης έντασης, προκαλούν έντονη δόνηση στην επιφάνεια. Πρόσφατες γεωφυσικές έρευνες σαν τη Papazachos 2021, Bulletin of the Seismological Society of America) που δείχνουν ότι η σεισμικότητα της Κρήτης παρουσιάζει χωρική ανομοιομορφία και επηρεάζεται από την εσωτερική παραμόρφωση του τόξου.

Στη Κρήτη ο ισχυρότερος σεισμός που έχει καταγραφεί στην περιοχή των Χανίων σημειώθηκε το 1910 με μέγεθος 6,9 richer προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές σε οικισμούς και υποδομές. Παρόμοια γεγονότα καταγράφηκαν και σε μεταγενέστερες περιόδους, όπως οι σεισμοί του 2021 στην Αρκαλοχωρίου με μέγεθος 6 richer και της Ιεράπετρας με μέγεθος 6,4 richer. Σύμφωνα με τα νεότερα στοιχεία του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου ΕΑΑ(2024), η Κρήτη δέχεται ετησίως εκατοντάδες μικροσεισμούς, πολλοί από τους οποίους εντοπίζονται σε βάθη μικρότερα των 20 km. Η συνεχιζόμενη τεκτονική δραστηριότητα καθιστά αναγκαία τη συστηματική παρακολούθηση και επικαιροποίηση των σεισμοτεκτονικών χαρτών του νησιού, προκειμένου να ενισχυθεί η αντισεισμική θωράκιση των τοπικών κοινωνιών.

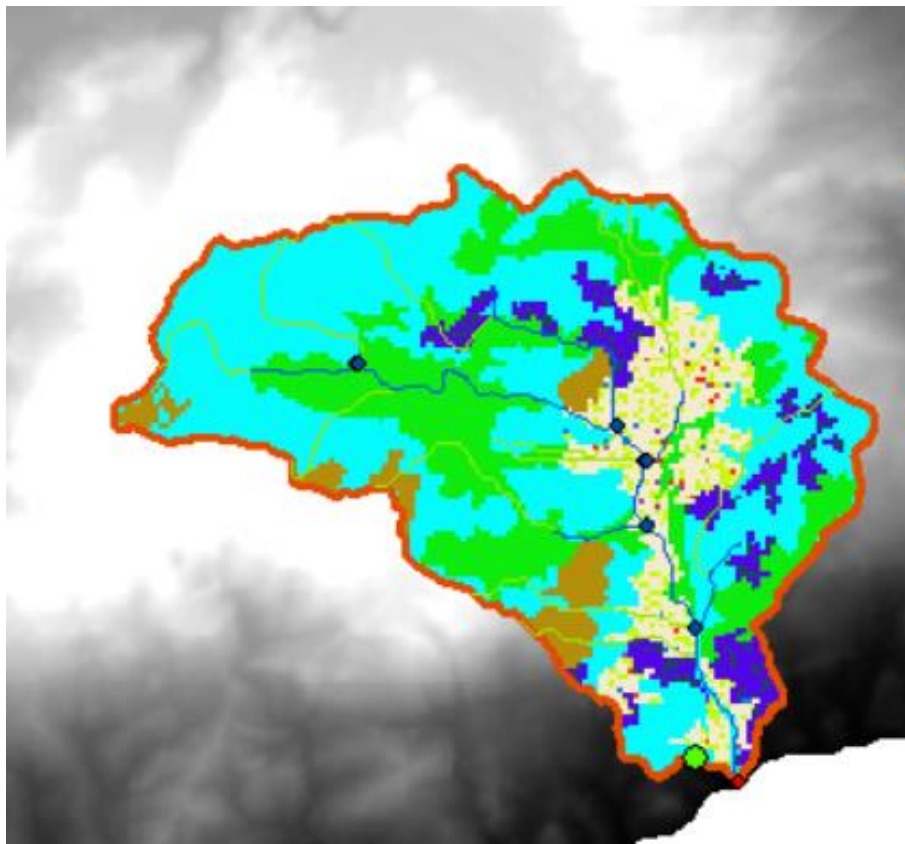
3.6 Χρήσεις Γης

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου κυριαρχούν τα βοσκοτόπια και οι δασικές εκτάσεις σε ποσοστά 52,6% και 23,3% αντίστοιχα. Οι ελαιώνες



εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, γύρω από τη διαδρομή του ποταμού Μύρτου, και καταλαμβάνουν περίπου το 14% της έκτασης. Οι βοσκότοποι εκτείνονται κυρίως στα περιφερειακά τμήματα της λεκάνης, ενώ οι δασικές και θαμνώδεις εκτάσεις εντοπίζονται κυρίως στο δυτικό τμήμα της περιοχής.

Σε μικρότερη έκταση περίπου 8,3% παρατηρούνται γεωργικές καλλιέργειες κυρίως κηπευτικά, ενώ οι άγονες εκτάσεις αποτελούν το 1,8% της συνολικής επιφάνειας. Η χωρική κατανομή των κατηγοριών αυτών αντικατοπτρίζει τη φυσική ποικιλία της λεκάνης και τη στενή σχέση της ανθρώπινης δραστηριότητας με το ανάγλυφο και το μικροκλίμα της περιοχής. Ακολούθως παρουσιάζεται ο χάρτης χρήσεων γης που προέκυψε από επεξεργασία των δεδομένων του Corine Land Cover 2000. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ο αρχικός χάρτης επανακατηγοριοποιήθηκε με τη χρήση του λοιμικού SWAT (**Soil and Water Assessment Tool**), ώστε να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι κατηγορίες κάλυψης και χρήσεων γης, προσαρμοσμένες στις φυσιογραφικές και υδρολογικές ιδιαιτερότητες της περιοχής.



4 Ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου

Για την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των μηνιαίων παροχών για τη περιοχή μελέτης και τα μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών Μάλες και Μύθοι για την βροχόπτωση και Καψάλι και Καστέλι για την θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί περισσότερο για τα δεδομένα εισαγωγής αλλά και η μεθοδολογία για το πως εισαχθήκαν τα δεδομένα στο πρόγραμμα το υδρολογικό μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

4.1 Παροχή

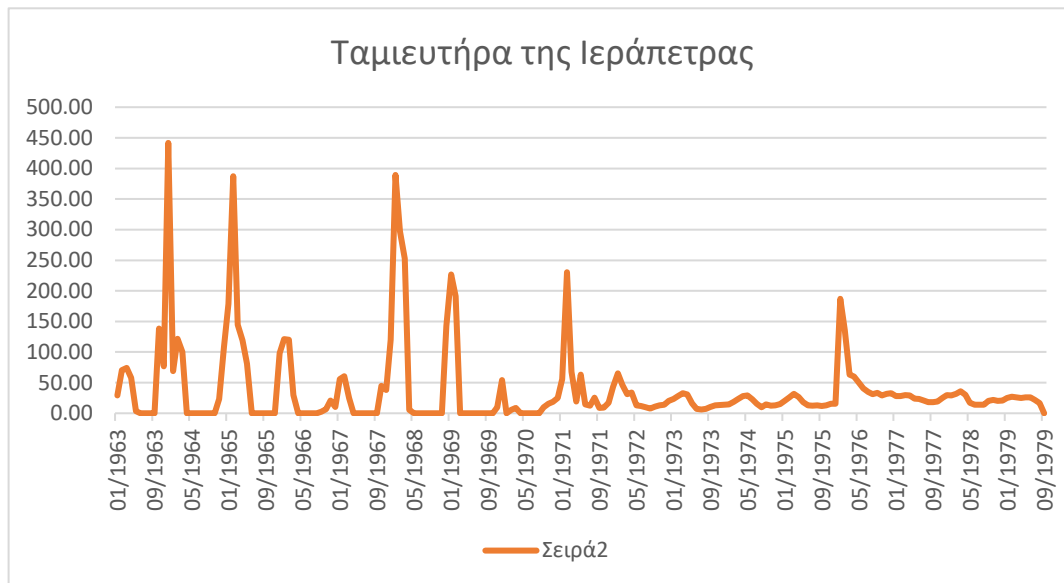
Για την λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου και του ταμιευτήρα της Ιεράπετρας συλλέχθηκαν μηνιαία δεδομένα από την Περιφέρεια της Κρήτης, για τις περιόδους από τον Σεπτέμβριο του 1964 μέχρι τον Ιούνιο του 2008 και για το φράγμα από τον Ιανουάριο του 1963 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 1979. Ωστόσο, για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα των υδρολογικών ετών από το Σεπτέμβριο του 1964 μέχρι το Μάιο του 1981 και από Σεπτέμβριο του 1964 ως το Σεπτέμβριο του 1979 αντίστοιχα. Επίσης οι μετρήσεις των παροχών δεν χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα, αλλά αξιοποιήθηκαν μεταγενέστερα στη διαδικασία της βαθμονόμησης, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις πραγματικές τιμές. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μηνιαίες μετρήσεις για τις παροχές για ολόκληρες τις χρονικές περιόδους που υπάρχουν τα διαθέσιμα δεδομένα και μερικές παρατηρήσεις που έγιναν μετά τη δημιουργία τους.



Στο διαγραμμα παραπάνω παροσαζεται η παροχη του ποταμου Μυρτου μεσα στα χρονια. Παρατηρούνται συχνες και αποτομες αιχμες παροχής οι οποιες φαινεται να υπιρχαν εντονα επεισοδια ισχυρων βροχοπτώσεων και αυξημένης απορροης. Οι μεγαλύτερες κορυφώσεις εμφανίζονται από τα μέσα της δεκαετιας του 1960 μεχρι τις αρχες του 1980 με τη μεγαλυτερη το 1981 με παροχή 6000



m³/s που προκλήθηκε λογο της μεγάλης κακοκαιρίας στις 10 του Ιανουαριου το 1981 στο νομο του Ηρακλειου. Μετα το 1981 ακομα υπαρχουν αιχμες αλλα γενικα χαρακτηριζονται από χαμηλότερο μέγεθος και αραιότερα πρραγμα που συμαινενει αλλαγες στι κλιματικες ή υδρολογικες συνθικες της περιοχης.



Το παραπάνω διαγραμμα παρουσιαζει τη χρονοσειρά της παροχης για το φραγμα στην Ιεράπετρα για την περιοδο1963-1979, παρουσιαζοντας τις εντονες διακυμάνσης που σημειώθηκαν στα υδρολογικά δεδομένα της περιοχης. Στα πρώτα χρόνια της καταγραφής παρατηρούνται υψηλές και αποτομες κορυφώσεις της παροχής, με ορισμένες τιμες να ξεπερνουν τα 400 m³/s , πρραγμα που υποδηλώνει επεισόδια έντονων βροχοπτώσεων ή πλημμυρικών γεγονότων. Μετα το 1970 οι υψηλες αιχμές εμφανίζονται αραιότερα και σε μικρότερο μέγεθος, δειχνοντας πιο ομαλη και ελεγχόμενη λειτουργία του ταμιευτήρα, καθώς και πιθανή μεταβολη στις βροχοπτώσεις. Υπαρχουν ακομα κάποιες κορυφες και συγκεκριμένα το 71 και το 75 αλλα η γενικη εικονα είναι ότι το συστημα έγινε πιο προβλεψιμο και πιο ελεγχομενο.

4.2 Κλιματικά και Μετεωρολογικά δεδομένα

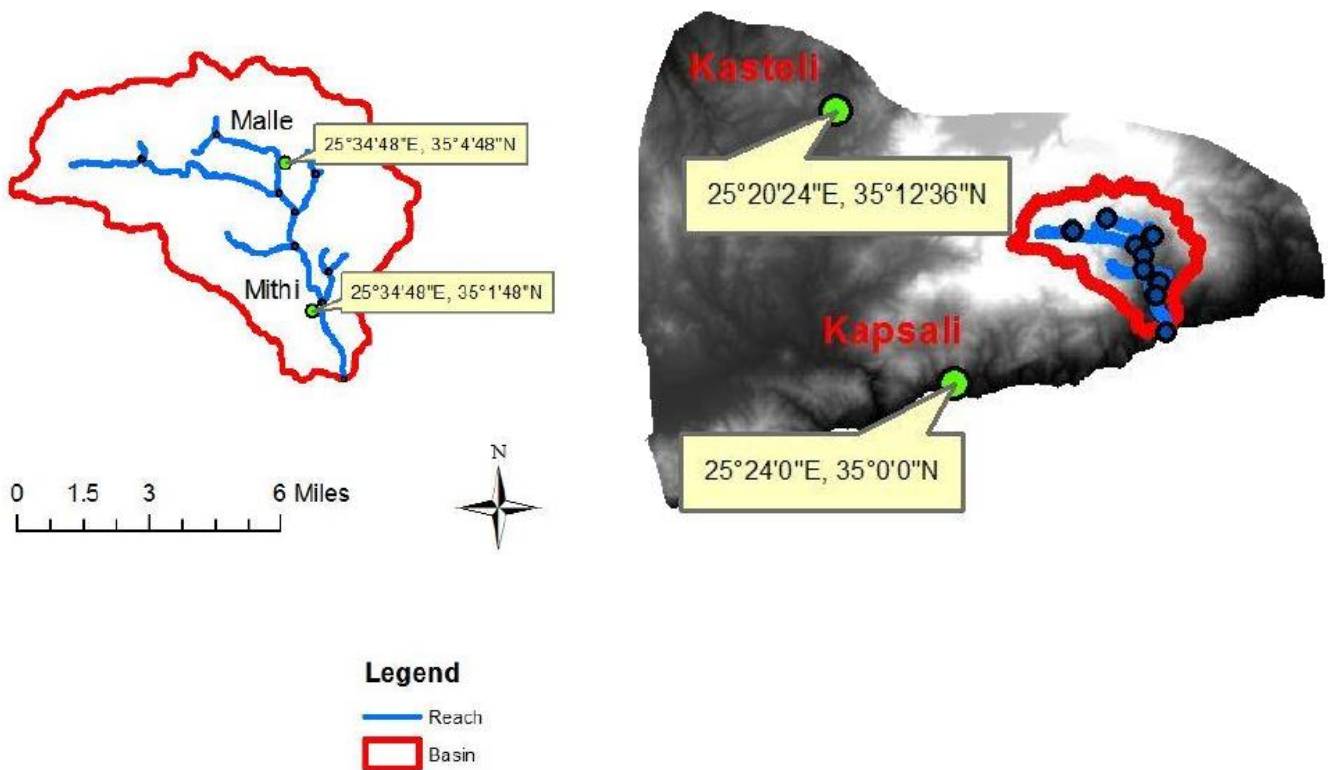
Τα κύρια στοιχεια που καθορίζουν το κλίμα μιας περιοχής είναι η θερμοκρασία (μέγιστη και ελάχιστη) και το ύψος της βροχόπτωσης, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τη διαμόρφωση των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Για την περιοχή μελέτης, δόθηκαν τα ημερήσια δεδομένα για την βροχόπτωση από το υδρολογικό έτος 1981 έως το 2010 από τους δύο βροχομετρικούς σταθμούς Μάλε και Μύθοι.

Οι δύο σταθμοί είναι τοποθετημένοι στο βόρειο- κεντρικό και νότιο- κεντρικο τμήμα της λεκάνης αντίστοιχα, σε υψόμετρο 590 μετρα για τον Μαλε



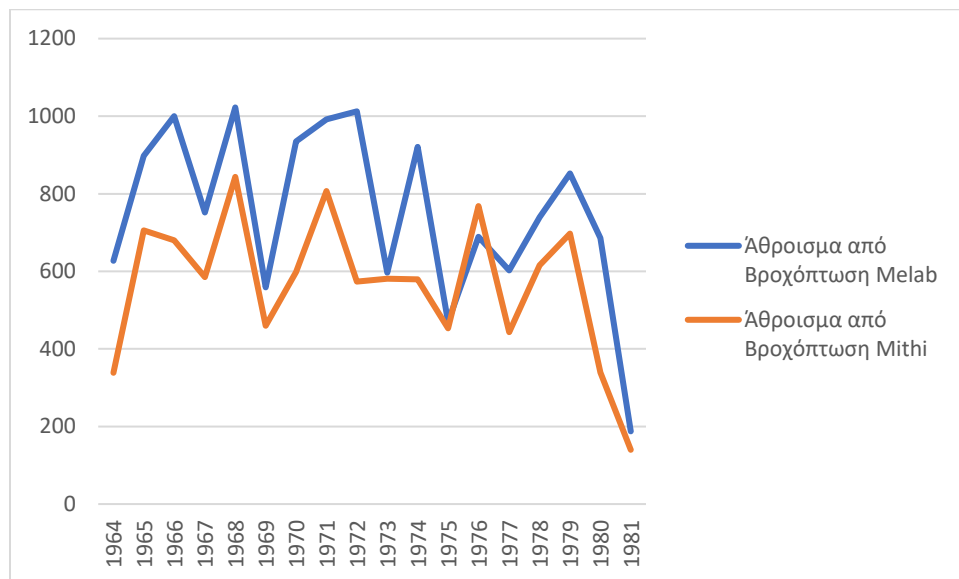
και στα 200 μέτρα για τον Μύθοι, καλύπτοντας έτσι το υψομετρικό εύρος και την εσωτερική κλιματική διαφοροποίηση της λεκάνης. Οι σταθμοί αυτοί αποτελούν τις βασικές πηγές δεδομένων για τη χωρική ανάλυση της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης. Ακόμα, υπάρχουν ημερήσια δεδομένα θερμοκρασίας μεγίστης και ελάχιστης για την ίδια περίοδο 1962-2010, προερχόμενα από τους 2 μετεωρολογικούς σταθμούς Καψάλι και Καστέλι. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται στο δυτικότμήμα εκτός της λεκάνης απορροής, σε υψόμετρο 10 μετρα και 350 μετρα αντίστοιχα. Η χωρική τους κατανομή επιτρέπει την εκτίμηση των θερμοκρασιακών μεταβολών μεταξύ των παράκτιων και ημιορεινών περιοχών της νοτιοανατολικής Κρήτης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τοποθεσίες των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη οι οποίες συνθέτουν ένα αντιπροσωπευτικό δίκτυο παρατήρησης για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου.



4.2.1 Βροχόπτωση

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η αθροιστική βροχόπτωση για κάθε χρόνο και για τους δυο μετεωρολογικούς σταθμούς Μαλε και Μύθοι για τα έτη 1964 με 1981. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι στο σταθμό Μαλε είναι υψηλότερες οι τιμές σε σχέση με το Μύθοι, με αρκετές διακύμανσης από έτος σε έτος. Ιδιαίτερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970 εμφανίζονται κορυφές που ξεπερνούν τα 900 χιλιοστά. Για τον σταθμό Μύθοι παρουσιάζονται μικρότερες ποσότητες βροχής, αλλά εξακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την ίδια τάση, με πτώσεις και ανόδους παρόμοιες με τον Μάλε. Επίσης προς τα τέλη της περιόδου μετά το 1978, παρατηρείται μείωση και για τις δυο περιοχές, με τις τιμές να πέφτουν κάτω από τα 400 χιλιοστά, και με αποκορύφωμα το 1981 όπου καταγράφονται οι χαμηλότερες τιμές. Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει κοινές τάσεις αλλά διαφορές στο ύψος της βροχόπτωσης.



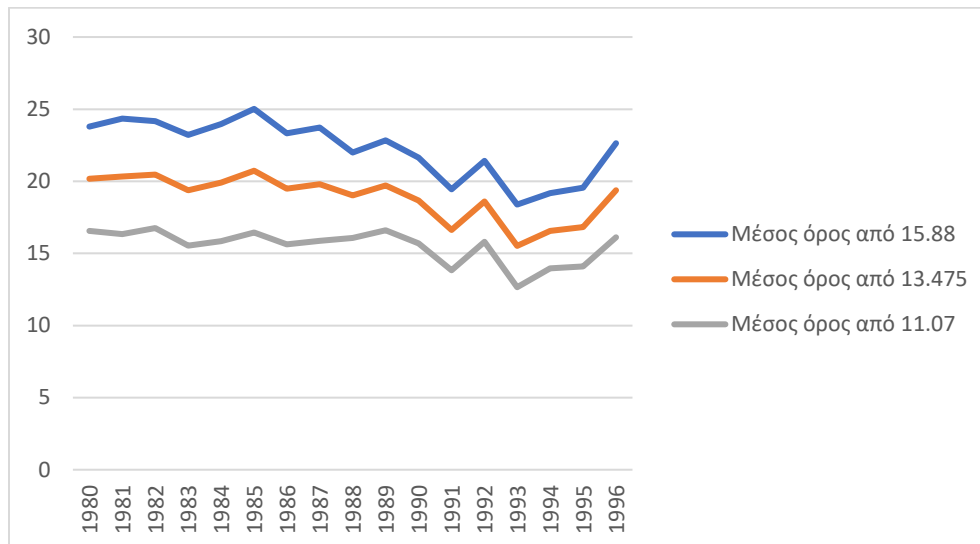
4.1.2 Θερμοκρασία

Το διάγραμμα απεικονίζει την πορεία των θερμοκρασιών από το 1980 έως το 1996.

Η μπλε γραμμή δείχνει τις μέγιστες θερμοκρασίες, η πορτοκαλί τη μέση θερμοκρασία και η γκρι τις ελάχιστες. Στην αρχή της περιόδου (1980) οι τιμές είναι σχετικά υψηλές, με τη μέγιστη γύρω στους 24°C. Η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται κοντά στους 20°C, ενώ η ελάχιστη γύρω στους 16°C. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 παρατηρείται μικρή πτώση και στις τρεις καμπύλες. Μετά το 1988 οι θερμοκρασίες μειώνονται πιο αισθητά, φτάνοντας σε χαμηλά επίπεδα το 1992. Το 1992 φαίνεται να είναι η πιο ψυχρή χρονιά του διαγράμματος. Από το 1993 έως το 1996 σημειώνεται σταδιακή άνοδος σε όλες τις τιμές. Οι διαφορές μεταξύ μέγιστης, μέσης και ελάχιστης θερμοκρασίας παραμένουν



σχετικά σταθερές.
 Η μέγιστη θερμοκρασία έχει μέσο όρο 15.88°C.
 Η μέση θερμοκρασία έχει μέσο όρο 13.475°C.
 Η ελάχιστη θερμοκρασία έχει μέσο όρο 11.07°C.
 Η γενική τάση δείχνει μια ελαφρά μείωση των θερμοκρασιών στις αρχές της δεκαετίας του '90.
 Προς το τέλος της περιόδου, οι θερμοκρασίες αυξάνονται ξανά. Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει εναλλαγές θερμότερων και ψυχρότερων ετών με γενικά ήπια μεταβολή.



Το διάγραμμα παρουσιάζει την εξέλιξη της θερμοκρασίας από το 1980 έως το 1996 για ένα διαφορετικό μετεωρολογικό σταθμό. Η μπλε γραμμή δείχνει τις μέγιστες θερμοκρασίες, η πορτοκαλί τη μέση και η γκρι τις ελάχιστες. Στις αρχές της περιόδου, οι μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνονται γύρω στους 21°C. Η μέση θερμοκρασία είναι περίπου 16°C και η ελάχιστη γύρω στους 10°C. Κατά τη δεκαετία του 1980, οι τιμές παραμένουν σχετικά σταθερές με μικρές διακυμάνσεις. Μετά το 1988 παρατηρείται μια μικρή πτώση, κυρίως στη μέση και στην ελάχιστη θερμοκρασία. Η χαμηλότερη περίοδος καταγράφεται το 1992–1993, όπου οι τιμές φτάνουν στο ελάχιστο σημείο τους. Από το 1994 και μετά διαφαίνεται μια ανοδική τάση, ιδίως προς το 1996. Η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας διατηρείται περίπου στα 7–8°C.

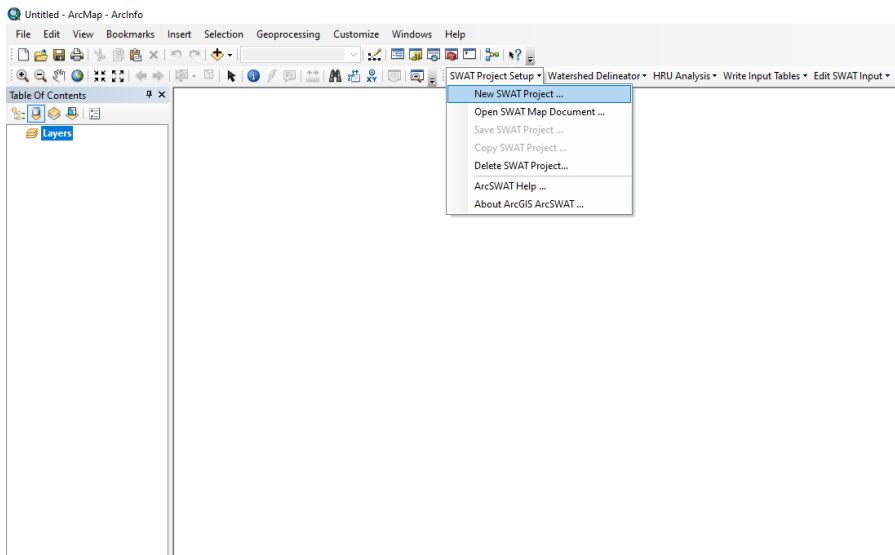
Ο μέσος όρος της μέγιστης θερμοκρασίας είναι 13.31°C.
 Ο μέσος όρος της μέσης θερμοκρασίας είναι 9.26°C.
 Ο μέσος όρος της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι 5.21°C.
 Το κλίμα φαίνεται γενικά σταθερό με ελαφρά πτώση στις αρχές της δεκαετίας του '90.



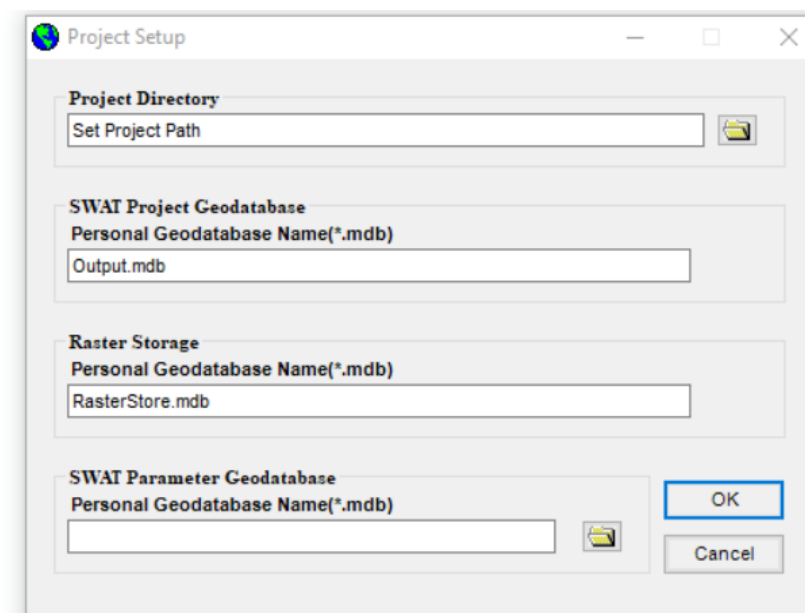
Προς το τέλος της περιόδου, υπάρχει σαφής άνοδος, δείγμα θερμότερων ετών. Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει ήπιες μεταβολές θερμοκρασίας με τάση ανάκαμψης μετά το 1994.

4.2 Πρόγραμμα και δεδομένα εισόδου

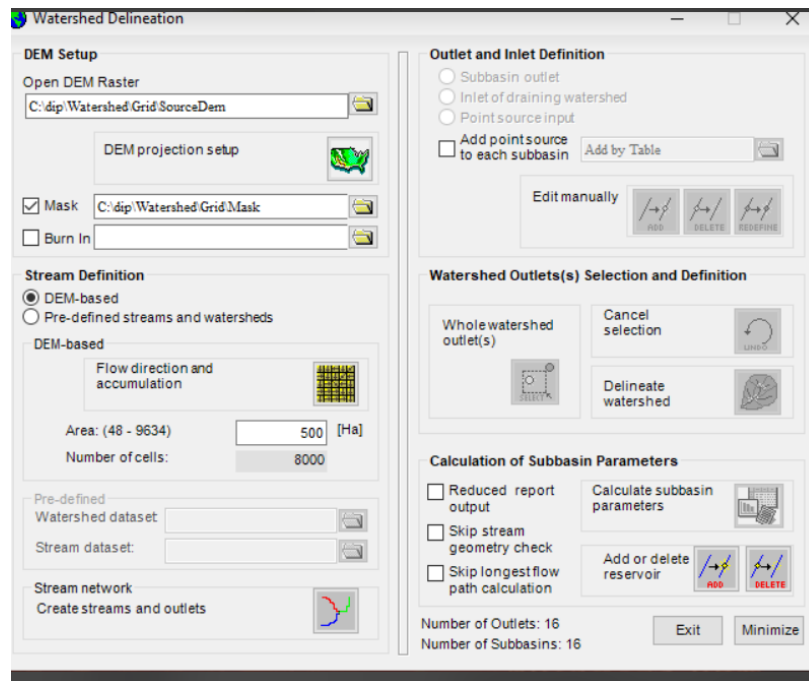
Δημιουργήθηκε ένα Νέο SWAT Project, στο φάκελο εργασίας και βάση γεωδεδομένων από το SWAT Project Setup menu και στη συνέχεια το New SWAT Project button.



Στην ένδειξη **Project Directory** εισάχθηκε το αρχείο με τα δεδομένα, το οποίο δημιουργείται στον σκληρό δίσκο C.



Εφόσον επιλεχθεί η ένδειξη OK δημιουργούνται δυο φάκελοι με ονόματα Scenarios, Watershed, δυο βάσεις γεωδεδομενων και ένας .mxd φάκελος. Ακολούθως επιλέγεται η ένδειξη Automatic Watershed Delineation από το μενού Watershed Delineator, εμφανίζεται το παράθυρο Watershed Delineation, το οποίο χωρίζεται στις επιλογές: DEM Setup, Stream Definition, Outlet and Inlet Definition, Watershed Outlet(s) Selection and Definition, Calculation of Subbasin Parameters. Επιλέχθηκε το εικονίδιο του φακέλου για να προστεθεί το DEM grid που θα χρησιμοποιηθεί για την διπλωματική εργασία. Στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέχθηκε το load from disk για να εισαχθεί ο φάκελος που έχει αποθηκευτεί το DEM grid. Στην συνέχεια, έχοντας φορτώσει το DEM grid, ενεργοποιείται το DEM projection setup και επιλέγοντάς το παρουσιάζεται ένα νέο παράθυρο με τις πληροφορίες σχετικά με το DEM. Για τις μονάδες του z επιλέχθηκαν τα μέτρα (m) ως μονάδα μέτρησης έτσι ώστε να είναι συμβατό με το X-Y Unit.



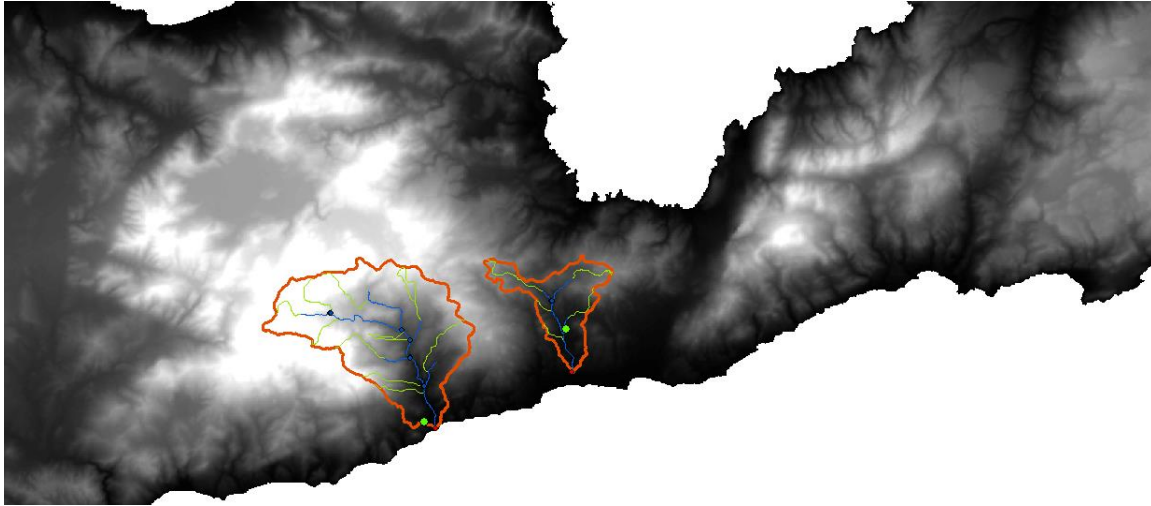
Επίσης κάνοντας κλικ στην ένδειξη Mask και στη συνέχεια στον φάκελο, εστιάζεται η περιοχή μελέτης που μας ενδιαφέρει. Επιλέχθηκε το create mask manually και εμφανίζεται το tool mask και μετά το draw, ώστε να σχηματιστεί το πολύγωνο ορισμού της περιοχής μελέτης.

Ακολούθως, επιλέχθηκε έκταση περιοχής 500 εκτάρια και επιλέγοντας την ένδειξη stream network εμφανίζονται τα ρέματα και το δίκτυο των ρεμάτων (Stream Definition) με τη μέθοδο DEM – based, για την επεξεργασία του δικτύου ρεμάτων και outlets. Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού του δικτύου ρεμάτων παρουσιάζεται στον DEM grid χάρτη. Τα σημεία που δεν αντιστοιχούν στο watershed της περιοχής μελέτης αφαιρούνται με επιλογή αυτών ενώ μπορούν και να προστεθούν επιπρόσθετα. Εμφανίζεται το παράθυρο Watershed Delineation



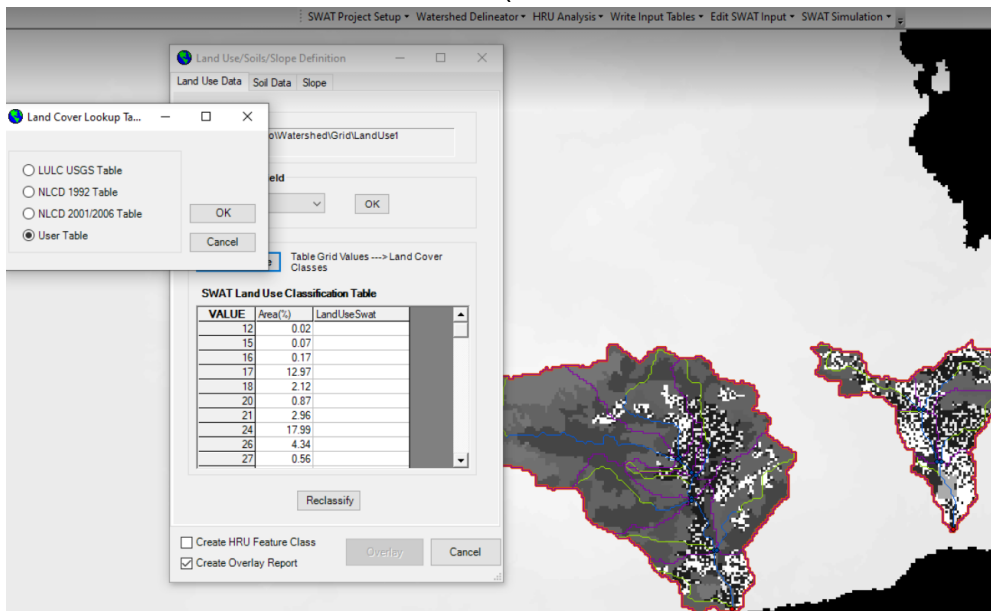
και τελικά οριοθετούμε την περιοχή, σχεδιάζοντας ένα πλαίσιο που περιβάλλει το watershed outlet. Επιλέγοντας την ένδειξη Whole watershed outlet ενεργοποιείται η ένδειξη Delineate Watershed.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Watershed Delineation βάση με τα παραπάνω.

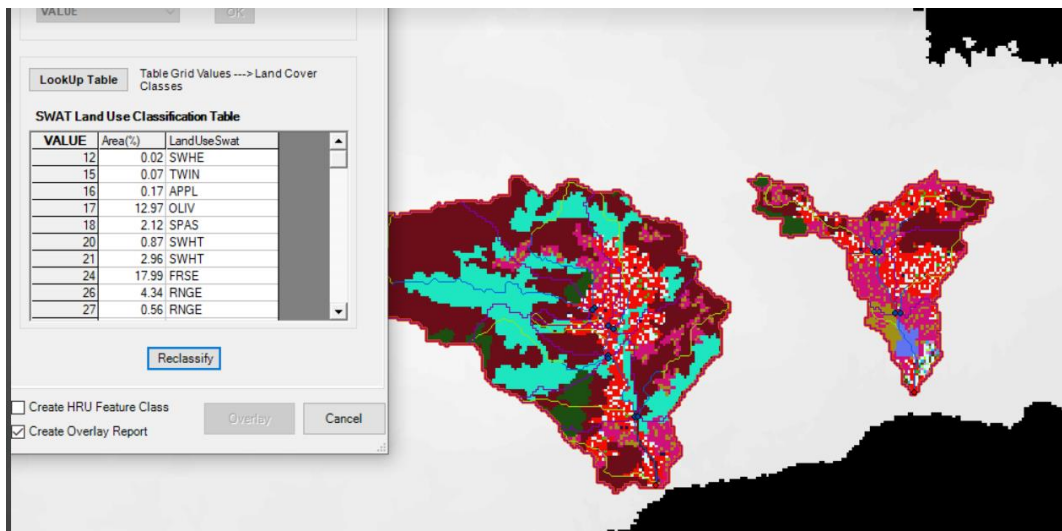


Στη συνέχεια, πηγαίνουμε στο μενού HRU Analysis και επιλέχθηκε το κουμπί Land Use/Soils/Slope Definition το οποίο ανοίγει ένα παράθυρο για να εισαχθούν τα δεδομένα για τις χρήσεις γης, το έδαφος και την κλίση του εδάφους. Στον φάκελο Land Use Grid επιλέχθηκε το αρχείο Watershed μετα Grid, LandUse, και αφού φορτωθεί το αρχείο στο παράθυρο που ανοίγει (δείχνει πληροφορίες και λεπτομέρειες για το land use grid) και μετά το OK. Στην επιλογή Choose Grid Field μετα Value και τέλος το OK. Θα χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για να καθοριστούν οι τύποι των χρήσεων γης. Τότε θα δημιουργηθεί ένας πίνακας 3 στηλών: η πρώτη στήλη VALUE περιέχει τις μοναδικές τιμές από το Grid field πάνω, η δεύτερη στήλη δείχνει την περιοχή κάθε τύπου χρήσης γης και η τρίτη στήλη περιέχει τα αντίστοιχα ονόματα χρήσεων γης στην βάση δεδομένων του





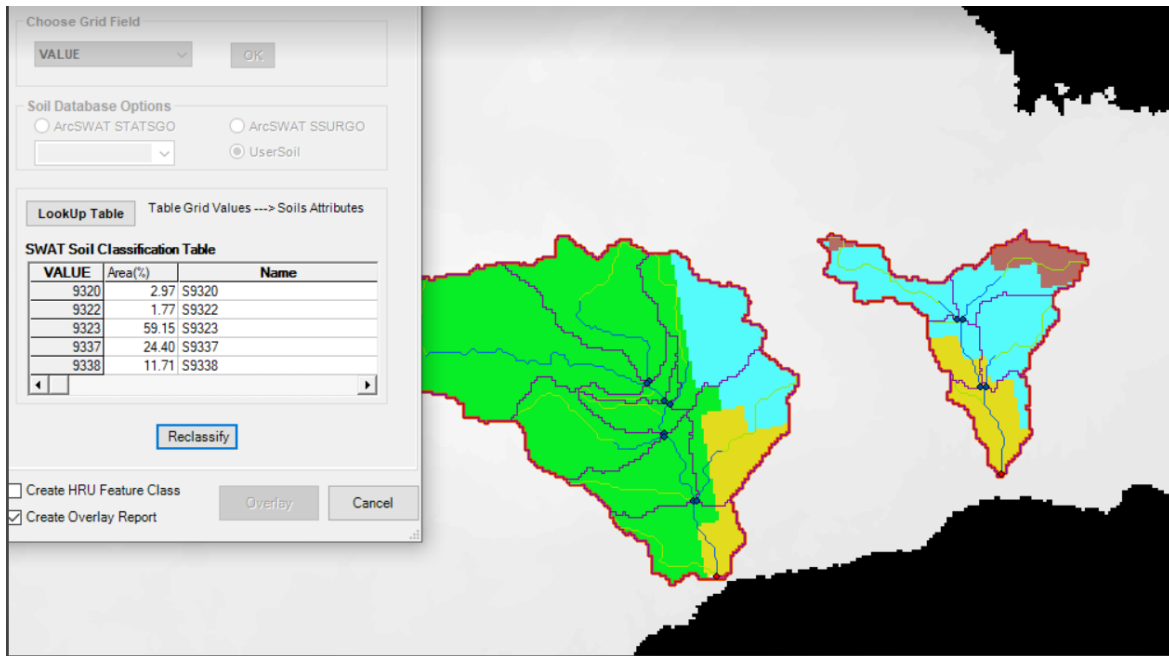
Για να συμπληρωθεί η τρίτη στήλη επιλέγεται το Look – up Table ακολούθως το User Table και στο τέλος OK. Αφού φορτώθηκε το αρχείο cropuse.txt επιλέγεται το Reclassify και OK.



Στο παράθυρο Land Use/Soils/Slope Definition επιλέχθηκε η καρτέλα Soil Data, Soils Grid file μετά Load Soils Dataset(s) ,from disk, Open, Yes. Αφού φορτωθούν τα έγγραφα των εδαφών στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγεται το OK, Value option και πάλι το OK. Τότε θα δημιουργηθεί ένας πίνακας 3 στηλών: η



πρώτη στήλη VALUE περιέχει τις μοναδικές τιμές από το Grid field πάνω, η δεύτερη στήλη δείχνει την περιοχή κάθε τύπου εδάφους και η τρίτη στήλη περιέχει τα αντίστοιχα ονόματα εδαφών στην βάση δεδομένων του SWAT (SWAT database). Για να συμπληρωθεί η τρίτη στήλη, Look – up Table ακολουθώντας το User Table, OK και φορτώθηκε το αρχείο LKNAME.txt ,Reclassify και OK.



Στο παράθυρο Land Use/Soils/Slope Definition επιλέχθηκε η καρτέλα Slope tab → Multiple Slope για να δημιουργηθούν οι διαφορετικοί τύποι κλίσης.

Στον αριθμό των Slope Classes προστέθηκε η τιμή 3 και για κάθε τύπο κλίσης τα κατώτερα και ανώτερα όρια είναι τα εξής:

- Class 1: (Lower Limit: 0, Upper Limit 5)
- Class 2: (Lower Limit: 5, Upper Limit 15)
- Class 3: (Lower Limit: 15, Upper Limit 9999)



Land Use/Soils/Slope Definition

Land Use Data | Soil Data | **Slope**

Slope Discretization

☐ Single Slope Watershed Min: 0.25 Mean: 40.0
Slope Stats: Max: 125 St Dev: 20.1

☒ Multiple Slope

Slope Classes

Number of Slope Classes
3

Current Slope Class
2

Class Upper Limit (%)
15

Add

SWAT Slope Classification Table

Class	> Lower Limit	<= Upper Limit
1	0	5
2	5	15
3	15	9999

Reclassify

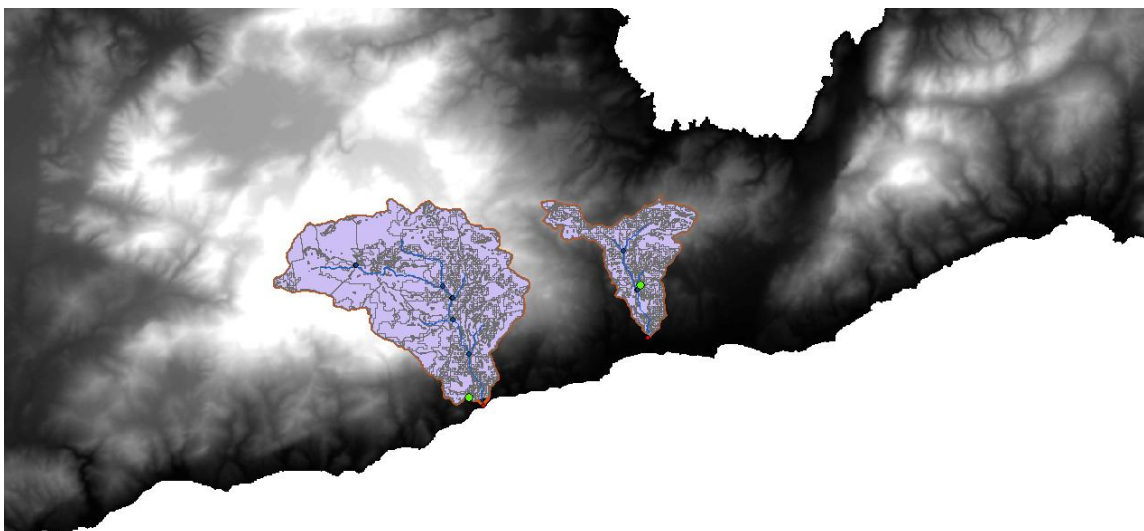
☒ Create HRU Feature Class

☒ Create Overlay Report

Overlay Cancel

Επιλέχθηκε το Reclassify για να προστεθεί η ταξινομημένη στρώση κλίσης στον χάρτη OK. Όταν οι στρώσεις για τα Landuse, Soils και Slope είναι ταξινομημένες → Create HRU Feature Class και Create Overlay Report → OVERLAY → OK. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα σχηματίζεται μια στρώση των HRUs με έναν μοναδικό συνδυασμό των χρήσεων γης, εδάφους και κλίσης.

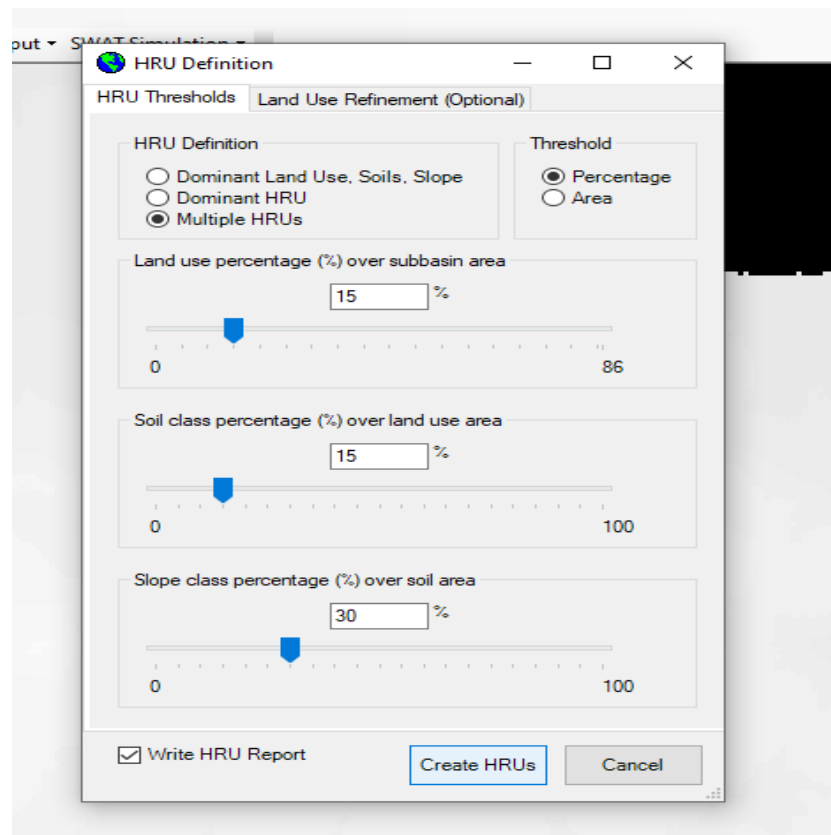




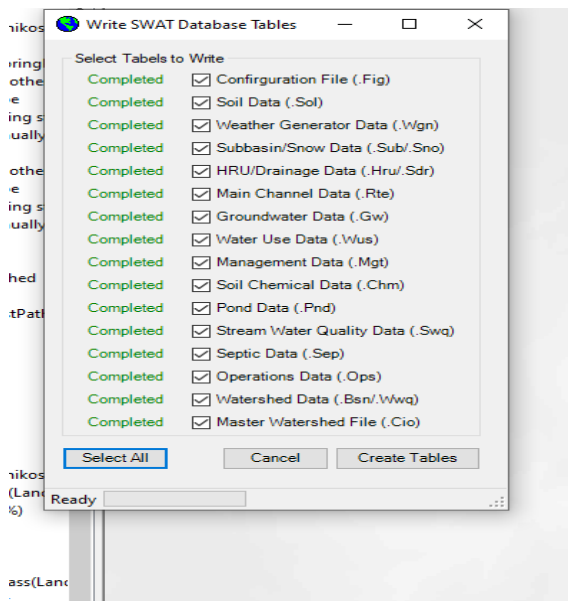
Μετα πρέπει να προστεθούν τα εδάφη γιατί το μοντέλο swat δεν μπορεί να τα ορίσει μόνο του οπότε με την εντολήedit SWAT Input>Databases>user Soils>add new και προθέτονται τα εδάφη που έχουν δημιουργηθεί από το soil data.

Αφού ολοκληρώθηκε η εισαγωγή των δεδομένων των χρήσεων γης και εδαφών επιλέχθηκε από το μενού του arcswat το HRU Analysis > HRU Definition και συμπληρώθηκαν τα ποσοστά για τις χρήσεις γης, το έδαφος και κλίσεις, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



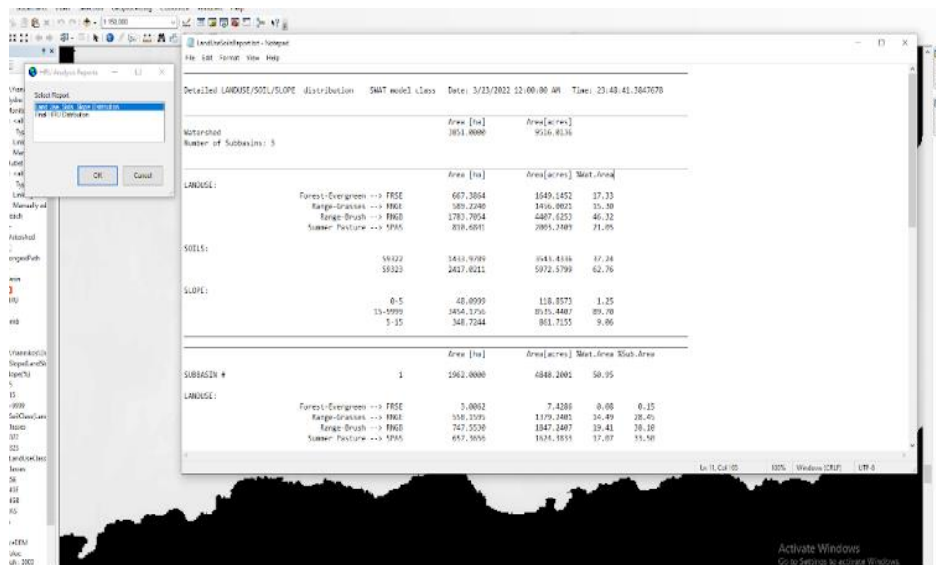


Τώρα πρέπει να προστεθούν οι πίνακες στο μοντέλο με την επιλογή Write Input Tables → Write SWAT Input Tables → Select all → create tables και όπως φαίνεται και από τις ακόλουθες εικόνες.

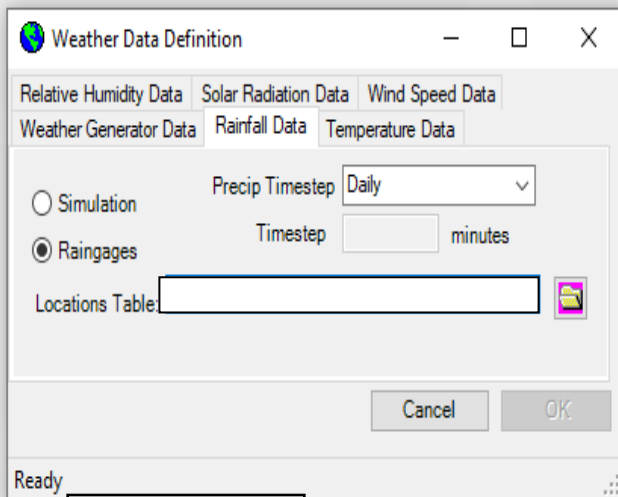


Στη συνέχεια, με την επιλογή HRU Analysis Reports που βρίσκεται και αυτή στο μενού HRU Analysis δημιουργείται ένα αρχείο .txt (παρακάτω εικόνα) στο οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε τμήματος της λεκάνης απορροής (χρήσης γης, εδάφη, κλίσεις).

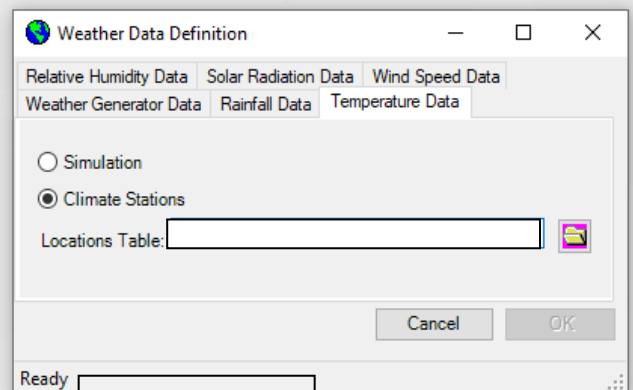




Έπειτα, προστέθηκαν τα δεδομένα για την θερμοκρασία και την βροχόπτωση, ενώ πρώτα συμπληρώθηκε το write input tables → weather data definition → weather generator data → locations table → WGEN_user. Μόλις συμπληρωθεί, γίνεται και η συμπλήρωση του Rainfall Data με την εισαγωγή του πίνακα από το locations table και επιλέχθηκε το αρχείο rcrfork.txt (εικόνα 1). Αφού ολοκληρώθηκε το Rainfall Data, σειρά έχει η θερμοκρασία, οπότε από την επιλογή Temperature Data προστέθηκε ο πίνακας από το locations table και επιλέχθηκε το αρχείο tmprfork.txt (εικόνα 2) και πατάμε OK.



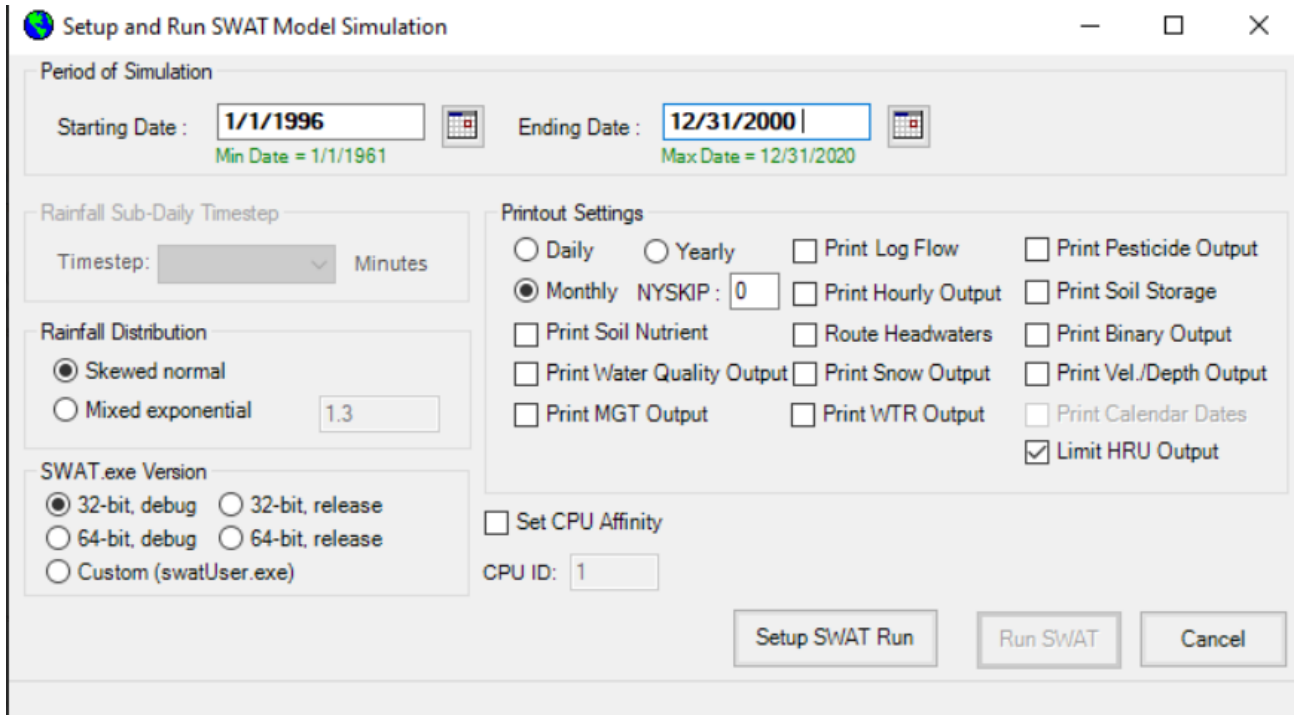
Εικόνα 1



Εικόνα 2

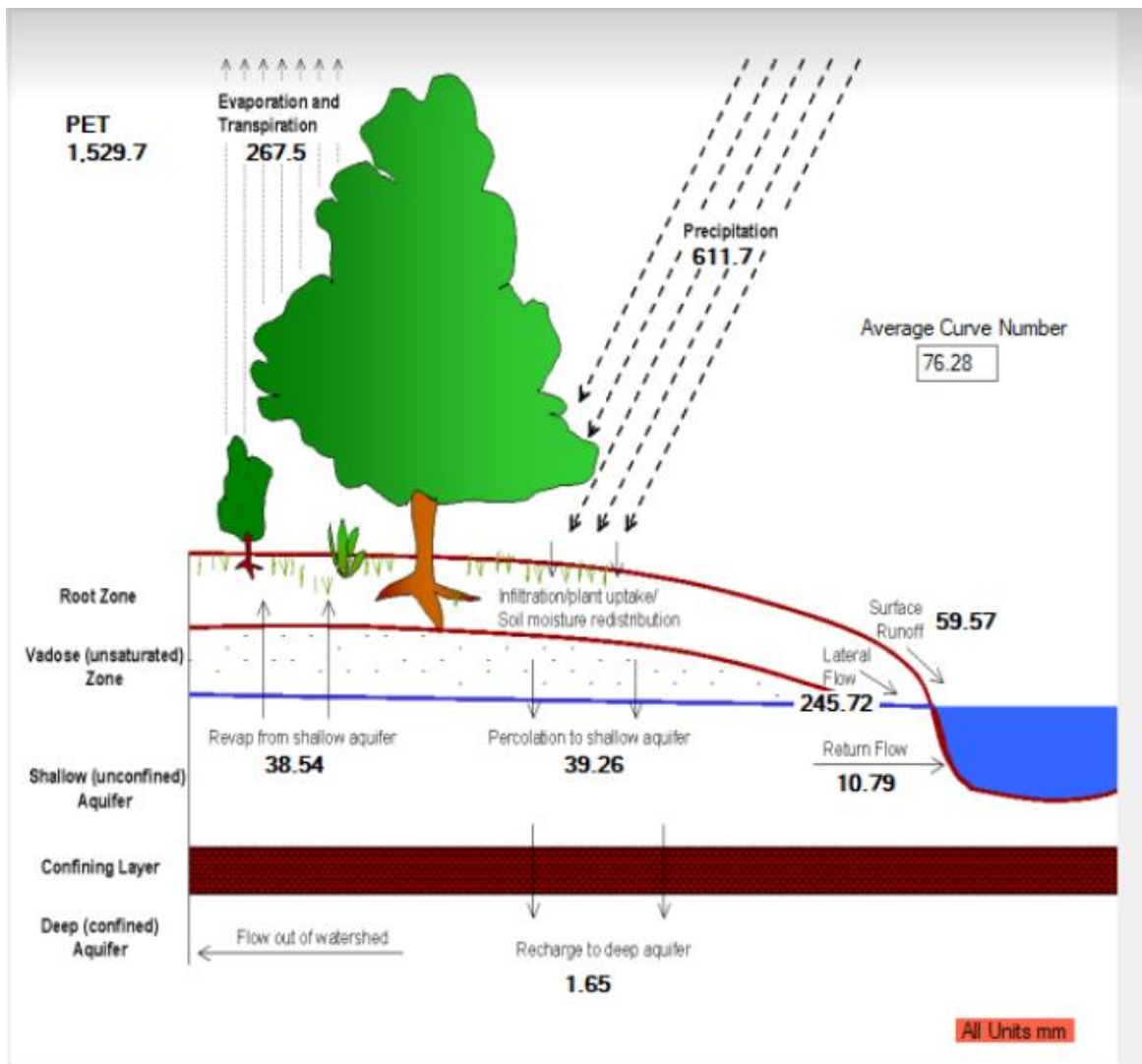


Τέλος, εκτελέστηκε το μοντέλο για τις παρακάτω ημερομηνίες από το SWAT Simulation → Run SWAT Setup Swat Run → Run SWAT και δημιουργήθηκε το υδρολογικό ισοζύγιο το οποίο παρουσιάζεται στα αποτελέσματα. Η ακόλουθη εικόνα παρουσιάζει το τρόπο που εκτελέστηκε το μοντέλο.



Παρακάτω απεικονίζεται το υδρολογικό ισοζύγιο για την λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου και του ταμιευτήρα της Ιεράπετρας.





4.3 Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του μοντέλου

Για την βαθμονόμηση έπρεπε να τροποποιηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τον υδρολογικό κύκλο του μοντέλου. Κάθε φορά που άλλαζε κάποια παράμετρος εκτυπωνόταν από το SWAT η προσομοιωμένη παροχή εξόδου και τοποθετιόταν πάνω στο διάγραμμα και ταυτόχρονα υπολογίζονταν και οι στατιστικοί δείκτες. Η αλλαγή των παραμέτρων σταματούσε όταν τουλάχιστον 2 από τους 3 δείκτες ήταν στα όρια του ικανοποιητικού και πάνω άλλα και το διάγραμμα να πλησίαζε όσο μπορούσε της πραγματικές τιμές. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα μετά την βαθμονόμηση, ο πίνακας των παραμέτρων μετά την βαθμονόμηση και τα αποτελέσματα των δεικτών όπως υπολογίστηκαν από το excel.



Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι παράμετροι που άλλαξαν κατά την βαθμονόμηση του ποταμού Μύρτο.

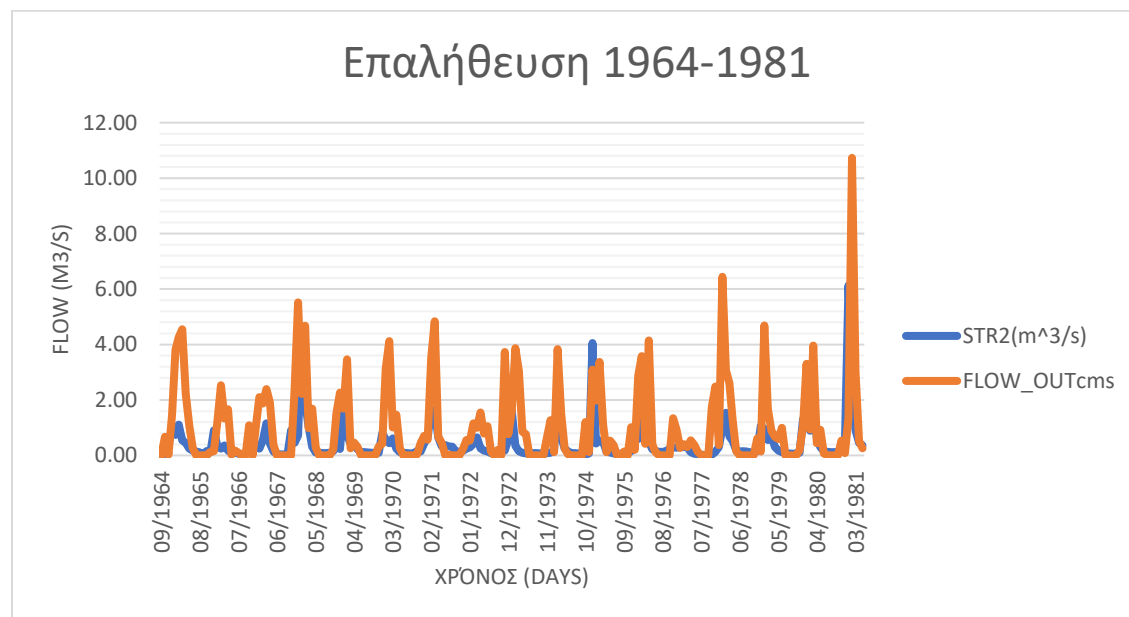
Πίνακας 2

Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή που επιλέχθηκε
Soils (.Sol)		
SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία (mm H ₂ O/mm εδάφους)	
SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (mm/hr)	
SOL_Z	Βάθος Εδάφους(mm)	
Subbasin (.Sub)		
CH_K1	Υδραυλική αγωγιμότητα από την επιφανειακή ροή προς το αλλούβιο	
TLAPS	Θερμοβαθμίδα(mm/hr)	
CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels	
HRU (.Hru)		
SLSOIL	Manning's "n" value for the tributary channels	
CANMX	Μέγιστη συγκράτηση από τη Φυτοκάλυψη(mm H ₂ O)	
ESCO	Συντελεστής εξάτμισης εδάφους,	
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	
Groundwater (.Gw)		
GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπογείου νερού(days)	
ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπογείου νερού(days)	
REVAPMN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η επανατροφοδότηση, Threshold depth of water	



	in the shallow aquifer for reap to occur (mm)	
<i>GW_REVAP</i>	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού	
<i>GWQMIN</i>	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιστρέψει η ροή στην επιφάνεια(mm H ₂ O)	
Management (.Mgt)		
<i>CN2</i>	Αριθμός καμπύλης απορροής (Curve Number) που αφορά στην υδρολογική κατάσταση 2	

Το διάγραμμα που απεικονίζεται παρακάτω είναι το διάγραμμα μετα την βαθμονόμηση του μοντέλου όπου παρουσιάζονται οι μοντελοποιημένες παροχές εξόδου σε σχέση με τις πραγματικές παροχές εξόδου για την περίοδο 1964-1981 του ποταμού Μυρτού.



Απο το διαγραμμα της επαλήθευσης παατιριται ότι το μντελο ακολουθει ικανοποιιπικα το υδρογράφιμα με εξερεση τις περιπτώσεις ακραίων παροχών. Στις χρονιες 64,68,78 και 81 παρατηρούνται υψηλότερες οι προσομοιωμένες τιμες σε σχεση με τις πραγματικες γεγονος που δημιουργει μεγαλυτερες αποκλίσεις κατά τη διάρκεια έντονων υδρολογικών επεισοδίων. Αντιθετα, στις



υπολιπτες χρονιες οι κορυφές του μοντελου βρίσκονται πολύ κοντά στις παρατηρήμενες τιμές δειχνοντας ότι η προσομοίωση αποδίδει ικανοποιητικά τα μεσαίες και χαμηλές παροχές. Η περιοδος

Τα αποτελέσματα των διεικτών για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης είναι:

Nse=2,69
PBIAS=-2,50
RSR=0,09

Οι πρώτοι δυο δείκτες(Nse , PBIAS) είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια βάση με τον πίνακα 1 που βρίσκεται στην εισαγωγή ενώ ο δείκτης RSR είναι μη ικανοποιητικός. Συγκεκριμένα ο Nse=0,92 άρα είναι πολύ καλός γιατί είναι στο εύρος $0,75 < NSE < 1,00$ ο PBIAS είναι ικανοποιητικός γιατί ανήκει στο διάστημα $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$ και τέλος ο RSR που ανήκει στο εύρος $0,70 < RSR$ που είναι άκυρος.

Γενικά η αξιολόγηση της βαθμονόμησης που έγινε με την μετατροπή των παραμέτρων (πίνακας 2) στο μοντέλο του SWAT ότι είναι αρκετά καλό γιατί οι 2 από τους 3 δείκτες είναι στα πλαίσια του ικανοποιητικά και πάνω και το διάγραμμα είναι αρκετά κοντά στις πραγματικές τιμές.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι παράμετροι που άλλαξαν κατά την βαθμονόμηση του ποταμού Σεμπρωνιώτη.

Πίνακας 2

Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή που επιλέχθηκε
Soils (.Sol)		
SOL_AWC	Διαθέσιμη υγρασία (mm H ₂ O/mm εδάφους)	0,9
SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (mm/hr)	17,6
SOL_Z	Βάθος Εδάφους(mm)	50
Subbasin (.Sub)		
CH_K1	Υδραυλική αγωγιμότητα από την επιφανειακή ροή προς το αλλούβιο	40
TLAPS	Θερμοβαθμίδα(mm/hr)	-7,5
CH_N1	Manning's "n" value for	30

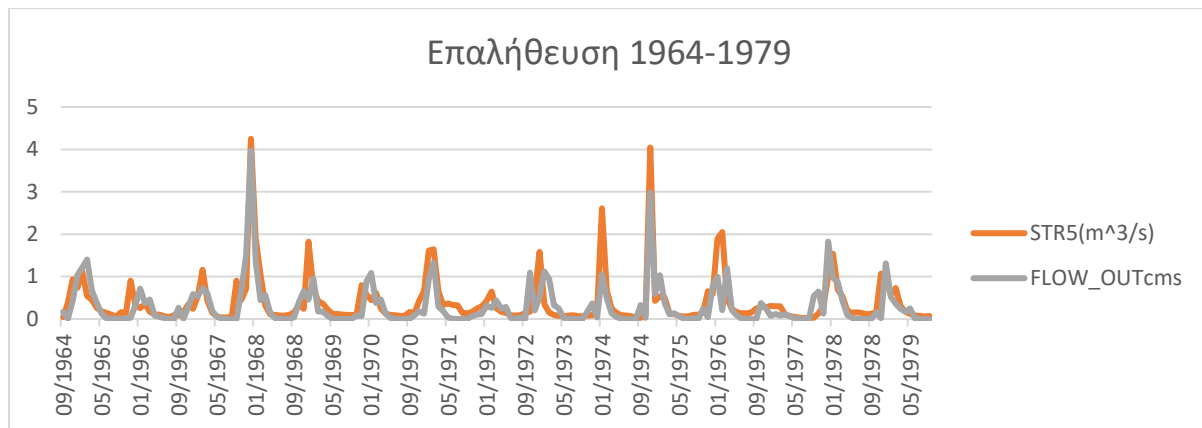


	the tributary channels	
HRU (.Hru)		
SLSOIL	Manning's "n" value for the tributary channels	150
CANMX	Μέγιστη συγκράτηση από τη Φυτοκάλυψη(mm H2O)	30
ESCO	Συντελεστής εξάτμισης εδάφους,	0,3
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	250
Groundwater (.Gw)		
GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπογείου νερού(days)	19
ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπογείου νερού(days)	0,8
REVAPMN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιτραπεί η επανατροφοδότηση, Threshold depth of water in the shallow aquifer for revas to occur (mm)	15
GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού	0,2
GWQMIN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιστρέψει η ροή στην επιφάνεια(mm H2O)	1500
Management (.Mgt)		
CN2	Αριθμός καμπύλης απορροής (Curve Number) που αφορά στην υδρολογική κατάσταση 2	40

Το διάγραμμα που απεικονίζεται παρακάτω είναι το διάγραμμα μετα την βαθμονόμηση του μοντέλου όπου παρουσιάζονται οι μοντελοποιημένες



παροχές εξόδου σε σχέση με τις πραγματικές παροχές εξόδου για την περίοδο 2001-2005 του ποταμού Σεμπρωνιώτη.



Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το μοντέλο ακολουθεί ικανοποιητικά το υδρογράφημα, εκτός από τις ακραίες παροχές, όπως για τις χρονιές του 2002-2003 που παρατηρήθηκαν υψηλότερες παροχές από τις προσομοιωμένες, ενώ τις υπόλοιπες χρονιές οι κορυφές του μοντέλου είναι πολύ κοντά στις παρατηρημένες. Την περίοδο του 2002-2003 είχε αρκετές βροχοπτώσεις, που θα είχαν αυξήσει την παροχή του ποταμού, επομένως πιθανώς να υπήρξε κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις οπότε γι'αυτό να υπάρχει τόσο μεγάλη διαφορά με τις μοντελοποιημένες τιμές της παροχής. Τέλος ένας άλλος λόγος για τον οποίο υπάρχει μερική απόκλιση είναι ότι σε κάποιες χρονιές έλειπαν δεδομένα ή υπήρχαν μετρήσεις ανά δέκα ημέρες.

Τα αποτελέσματα των διεικτών για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης είναι:

Nse=0,68
PBIAS=-0,41
RSR=0,07

Οι πρώτοι δυο δείκτες (Nse, PBIAS) είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια βάση με τον πίνακα 1 που βρίσκεται στην εισαγωγή ενώ ο δείκτης RSR είναι μη ικανοποιητικός. Συγκεκριμένα ο Nse=0,92 άρα είναι πολύ καλός γιατί είναι στο εύρος $0,75 < NSE < 1,00$ ο PBIAS είναι ικανοποιητικός γιατί ανήκει στο διάστημα $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$ και τέλος ο RSR που ανήκει στο εύρος $0,70 < RSR$ που είναι άκυρος.

Γενικά η αξιολόγηση της βαθμονόμησης που έγινε με την μετατροπή των παραμέτρων (πίνακας 2) στο μοντέλο του SWAT ότι είναι αρκετά καλό γιατί οι 2 από τους 3 δείκτες είναι στα πλαίσια του ικανοποιητικά και πάνω και το διάγραμμα είναι αρκετά κοντά στις πραγματικές τιμές.



4.4 Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση αποτελεσμάτων για την παροχή εξόδου του ύδατος από τη λεκάνη απορροής του Μύρτου, τη βροχόπτωση και την εξατμισοδιαπνοή ακολουθεί η κατάστρωση του υδρολογικού ισοζυγίου.

Η τυπική τιμή της βροχόπτωσης ετησίως και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για το χρονικό διάστημα 1969-2009 είναι:

$$P = 692,40 \text{ mm}$$

$$PET = 718,90 \text{ mm}$$

Η συνολική εξατμισοδιαπνοή και η ποσότητα που εξατμίζεται από τον ρηχό υδροφορέα αντίστοιχα είναι:

$$ET = 222,90 \text{ mm}$$

$$Revap = 71,89 \text{ mm}$$

Η διήθηση στο ρηχό και η κατείσδυση στο βαθύ υδροφορέα είναι:

$$Gw \text{ (Shall Aq)} = 460,67 \text{ mm}$$

$$RCRG \text{ (Deep Aq)} = 67,77 \text{ mm}$$

Τέλος, η επιφανειακή, η πλάγια απορροή και η απορροή που επιστρέφει από το ρηχό υδροφορέα είναι:

$$\text{Surface Runoff} = 49,90 \text{ mm}$$

$$\text{Lateral Flow} = 12 \text{ mm}$$

$$\text{Return Flow} = 233,48 \text{ mm}$$

Στην εικόνα 5.5.1 φαίνεται σχηματικά το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής.

Ετήσιο ισοζύγιο της λεκάνης απορροής προς την επιφάνεια:

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

$$= 692,40 - (49,90 + 12 + 233,48 + 222,90 + 71,89 + 67,77)$$

$$= 34,46 \text{ mm, δηλαδή η ποσότητα νερού στο σύστημα αυξάνεται}$$

όπου

P : η βροχόπτωση

Q_{sur} : η επιφανειακή συμβολή στο κανάλι



Q_{lat} : η πλευρική ροή στο κανάλι

Q_{rtn} : η συμβολή του ρηχού υδροφορέα στο κανάλι

ET : η εξατμισοδιαπνοή

Revar : η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη

ET + Revar : Η ετήσια πρόσληψη από τα φυτά

Q_{deep} : η ποσότητα νερού που απορρέει στον υπόγειο υδροφορέα

Πολλαπλασιαζόμενα τα παραπάνω μεγέθη με τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής η οποία είναι 96 km² δίνουν τα συνολικά κυβικά πρόσληψης και απόληψης ύδατος από το σύστημα για κάθε έτος. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του ισοζυγίου καθώς και τα συνολικά κυβικά κατά την περίοδο 1969-2009:

Παράμετρος	Τιμή (mm/year)	Τιμή (Mm ³ /year)
Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή PET		
Επιφανειακή Βροχόπτωση P		
Εξατμισοδιαπνοή ET		
Εξάτμιση και διαπνοή		
Διήθηση στο ρηχό υδροφορέα GW (SHALL AQ)		
Κατείσδυση στο βαθύ υδροφορέα (RCRG (Deer Aq)		
Επιφανειακή απορροή (SUR RUNOFF)		
Πλάγια απορροή (LATERAL FL)		
Απορροή από το ρηχό υδροφορέα(RETURN FL)		



4.5 Αναλυση και συμπληρωση νεων μετεωρολογικων δεδομενων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συμπλήρωσης των πιο πρόσφατων μετεωρολογικών δεδομένων για την περίοδο 2000-2020, καθώς και η μεθοδολογία που έγινε για την ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων στην εργασία αυτή. Αρχικά έγινε προσπάθεια αξιοποίησης των ίδιων μετεωρολογικών σταθμών που είχαν χρησιμοποιηθεί στο ArcSwat για τον υπολογισμό της παροχής του ποταμού Μύρτου. Ωστόσο, λόγω παύσης λειτουργίας των σταθμών Καψαλού και Μύθη τα τελευταία χρόνια (2010- ως σήμερα), κρίθηκε αναγκαίο να αναζητηθούν νέοι σταθμοί με επαρκή χρονική κάλυψη και κανονποιητικό βαθμό συσχέτισης με τα παλαιότερα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε συνέχεια του μετεωρολογικού αρχείου, επιτρέποντας πιο αξιοπίστη και ολοκληρωμένη εκτίμηση της παροχής του ποταμού Μύρτου. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία μόνο για τους σταθμούς Μύθη που εν τέλει επιλεχθηκαν για τη συμπλήρωση των μετεωρολογικών δεδομένων.

Μεθοδολογία

Αρχικά βρέθηκαν όλοι οι ενεργοί μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην περιοχή μελέτης. Η εικόνα που ακολουθεί προέρχεται από το λογισμικό Google Earth Pro και απεικονίζει τη χωρική κατανομή των μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.



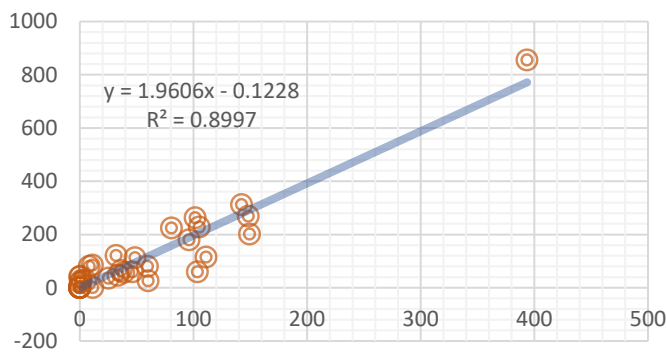
Ακολουθώντας με τη χρήση του αρχείου που παρασχέθηκε από το Πολυτεχνείο Κρήτης, το οποίο περιλαμβάνει τα μετεωρολογικά δεδομένα της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας για όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Κρήτης,



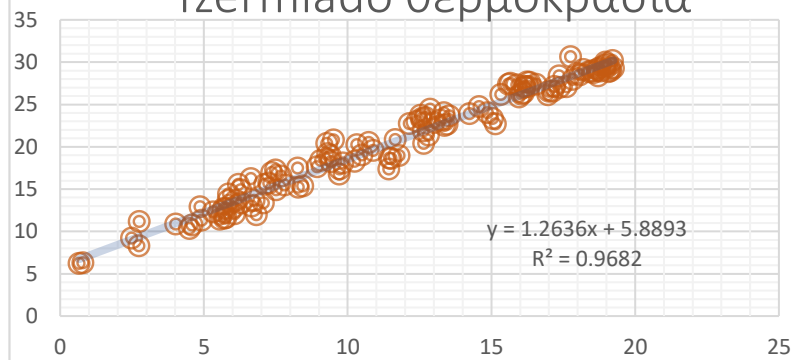
πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δεδομένων με τον μετεωρολογικό σταθμό Μύθη. Η σύγκριση αφορούσε την περίοδο από την 1^η του Ιανουαρίου το 2000 ως τις 31^η του Δεκέμβριου του 2009 η οποία αντιστοιχεί και στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ήταν διαθέσιμες οι τελευταίες μετρήσεις του σταθμού Μύθη.

Η σύγκριση των μετεωρολογικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετράγωνων. Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης για όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για τον μετεωρολογικό σταθμό Τζερμιαδο που είναι και εν τέλη ο σταθμός που επιλέχθηκε για τη συνέχεια της ανάλυσης.

Tzermiado_PCP



Tzermiado θερμοκρασια



Από τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση των δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας μεταξύ του σταθμού Μύθη και του Τζερμιαδού για την περίοδο 2000-2009. Η σύγκριση όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω έγινε με τα ελάχιστα τετράγωνα με σκοπό την αξιολόγηση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων των δυο σταθμών. Από τα διαγράμματα προκύπτει υψηλός βαθμός συσχέτισης R γεγονός που υποδηλώνει ότι ο μετεωρολογικός σταθμός Τζερμιαδου μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός για την περιοχή μελέτης και γιαυτό επιλέχθηκε για τη συνέχεια της υδρολογικής ανάλυσης.

Στη συνέχεια, αφού βρέθηκε ο σταθμός που θα χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή τους στο υδρολογικό μοντέλο SWAT με τη εφαρμογή της κατάλληλης διόρθωσης στα δεδομένα της βροχόπτωσης. Η διόρθωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα EXCEL όπου υπολογιστηκε ο συντελεστή αναγωγής ως ο λόγος του αθροίσματος της βροχόπτωσης του αρχικού μετεωρολογικού δηλαδή του Μύθη προς το αντιστοιχο αθροισμα της βροχοπτωσης του νέου μετεωρολογικου σταθμου (Τζερμιαδού) και στο τέλος για κάθε νέα ημερισια τιμη του Τζερμιαδου έγινε πολλαπλασιασμος με τον συντελεστη διωρθωσης. Αντιστοιχα πραγματοποιηθηκε η ιδια διαδικασια και για τα δεδομενα της μεγιστης και ελαχιστης θερμοκρασιας,



ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια και η συμβατότητα τους με το υδρολογικό μοντέλο SWAT. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές θερμοκρασίας του επιλεγμένου σταθμού (Τζερμιαδού) προσαρμόστηκαν με τη χρήση κατάλληλου συντελεστή αναγωγής, ο οποίος υπολογίστηκε με βάση τη σχέση του αθροίσματος της μέγιστης/ελαχίστης θερμοκρασίας του αρχικού μετεωρολογικού δηλαδή του Μύθη προς το αντιστοιχό αθροίσμα της μέγιστης/ελαχίστης θερμοκρασίας του νέου μετεωρολογικού σταθμού (Τζερμιαδού) και στο τέλος για κάθε νέα ημερίδα μέτρηση του Τζερμιαδού έγινε πολλαπλασιασμός με τον συντελεστή διωρθωσης.

Στο τέλος για τη συμπλήρωση μέσα στο πρόγραμμα SWAT υπήρχε ένα χάος γιατί το ίδιο το πρόγραμμα διαβάζει αρχεία κειμένου



5 Ταμιευτήρας Ιεράπετρας και υδατικοί πόροι της περιοχής

5.1 Γενικά

Ο ταμιευτήρας Μπραμιανών αποτελεί το σημαντικότερο υδατικό έργο της περιοχής της Ιεράπετρας και έναν από τους πλέον κρίσιμους ταμιευτήρες της Ανατολικής Κρήτης. Είναι πολύ σημαντικός για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της τοπικής γεωργίας, τη ρυθμισμό της υδατικής διαθεσιμότητας και τη μείωση της πίεσης στους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα υπεράντλησης (Μιμίκου Μ. 2006 ΕΜΠ). Βρίσκεται περίπου 5km βορειοδυτικά της πόλης της Ιεράπετρας και εντάσσεται στο υδατικό σύστημα της νοτιοανατολικής Κρήτης, μιας περιοχής με έντονη θερμομεσογειακή γεωργική δραστηριότητα και υψηλή εποχική ζήτηση αρδευτικού νερού. Η λειτουργία του βασίζεται στη συγκράτηση επιφανειακών απορροών κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών και στη διαθεση του αποθηκευμένου νερού κατά την αρδευτική περίοδο, συμβάλλοντας στη ρύθμιση της έντονης εποχική μεταβλητότητας της υδατικής διαθεσιμότητας (FAO, 2000 *Dams and reservoirs*).



Το φράγμα είναι τυπου χωμάτινου με μήκος στρέψης περίπου 560 μετρα και υψος 43 μετρων με επιφάνεια να ανέρχεται περισπου σε 1050 στρεματα (1,05 km²). Ενώ η συνολική αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα εκτιμαται σε 16 εκατομια κυβικα, κατάσσοντας τον στα εργα μικρήε έως μεσαιας κλίμακας (Μιμίκου &Κουμάντακη ,2008). Ένα συμαντηκό στοιχείο για τη λειτουργία του ταμιευτηρα αποτελει η απώλεια του νερου λόγω της εξάτμησης οποια εξαιτιας των κλιματικών συνθικών της περιοχης μειωνει το διαθέσιμο ωφελιο απόθεμα. Τελος η υδρολογικη τροφοδοσία του ταμιευτηρα επιτυγχάνται μέσω πρσαγωγων από την περιοχή της Καλαμαυκας και τον ποταμο Μύρτο καθώς κα από τις πηγες και γεωτρήσεις της ευριτερη περιοχης.





5.2 Ισοζύγιο Φράγματος

5.2.1 Απεικόνιση ισοζυγίου των Μπραμιανων

Όπως αναφερθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο το υδατικό ισοζύγιο των ταμιευτηρων υπολογίζονται για ετήσιο κύκλο λειτουργίας, ο οποίος περιλαμβάνει την απόθηκευση νερού κατά τη διάρκεια των υγρών μηνών και την και απόδοση του αποθηκευμένου νερού κατά τους ξηρούς μήνες. Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον ωφέλιμο όγκο του, καθώς προβλεπται ένας νεκρός όγκος στον πυθμένα που θα γεμίσει με το χρόνο από τα φερτά υλικά, και ένας επιπλέον όγκος πάνω από τον ωφέλιμο, για ανάσχεση πλημμυρικών παροχών.

Το γενικευμένο ισοζύγιο για τον σχεδιασμό ενός φράγματος με μηνιαίο χρονικό βήμα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Vi=Vi-1+Qini+ P \cdot A - PET \cdot A - Qeco - Qirr \quad (1)$$

Όπου:

Vi : ο αποθηκευμένος όγκος νερού τον μήνα i (m^3)

$Vi-1$: ο αποθηκευμένος όγκος νερού τον μήνα $i-1$ (m^3)

$Qini$: η εισροή στον ταμιευτήρα κατά τον μήνα i (m^3)

P : η ποσότητα βροχόπτωσης το μήνα i (m)

A : η επιφάνεια του φράγματος (m^2)

PET : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή τον μήνα i (m)

$Qeco$: η οικολογική παροχή ή παροχή υπερχειλίσης τον μήνα i (m^3)

$Qirr$: η ποσότητα που χρησιμοποιείται για αρδευτικούς ή υδρευτικούς σκοπούς τον μήνα i (m^3)



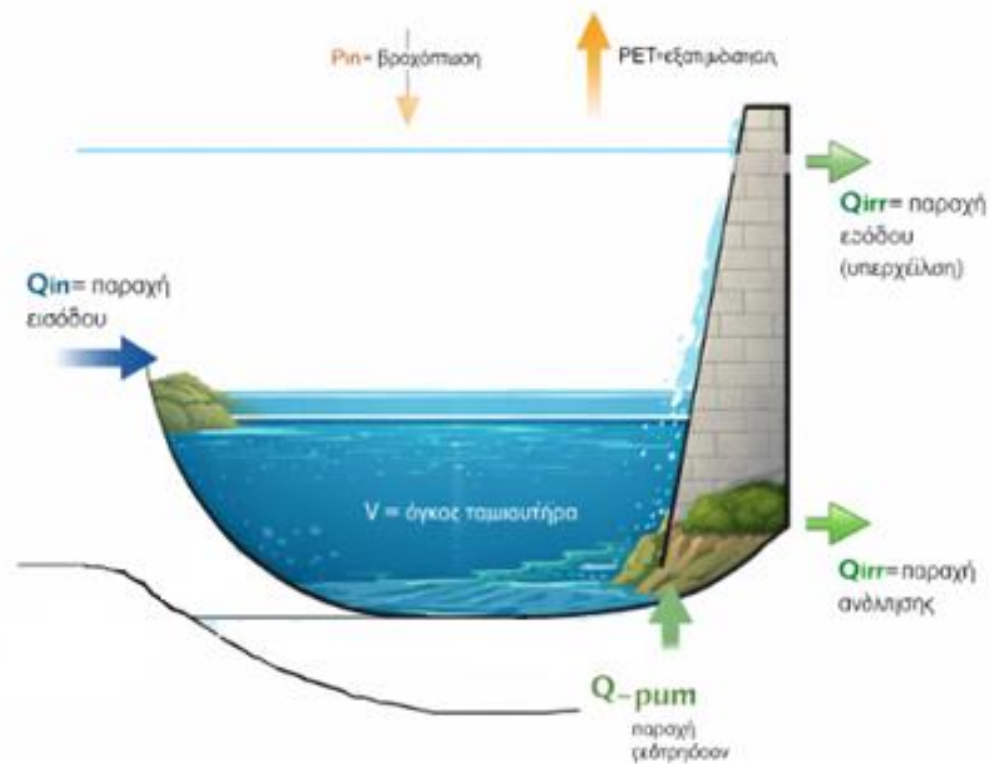
Για τον ταμιευτήρα των Μπραμιανων η γενικευμένη εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου τροποποιείται καθώς στη λειτουργία του συστήματος συμμετέχουν και γεωτρήσεις που συμβάλουν στην τροφοδοσία του ταμιευτήρα. Οποτε στον όρο των εισροών προστίθεται ο νέος όρος Q_{pum} ο οποίος αντιστοιχεί στη συνολική παροχή νερού από τις γεωτρήσεις κατά τον μήνα i .

$$(1) \Rightarrow V_i = V_{i-1} + Q_{ini} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{eco} - Q_{irr} - Q_{pum} \quad (2)$$

Άρα

$$\Delta V = Q_{ini} + P \cdot A - PET \cdot A - Q_{eco} - Q_{irr} - Q_{pum} \quad (3)$$

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα στην Ιεράπετρα και οι βασικοί οροί που το αποτελούν:



5.2.2 Μεθοδολογία

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμών των επιμέρους ορών του υδατικού ισοζυγίου καθώς και το διαγραμμα της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου ΔV ως προς το χρόνο. Παράλληλα αναλυεται η



αδυναμία προσδιορισμού του όρου *Qirr* λόγω έλλειψης διαθέσιμων και αξιόπιστων δεδομένων.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα από τον Κατάλογο Ανοιχτών Δεδομένων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης για το έτος 2015 μέχρι και σήμερα όπου περιλαμβάνουν τον ημερήσιο αποθηκευμένο όγκο του ταμιευτήρα καθώς και τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης. Στη συνέχεια η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) αλλά και η ημερησια παροχή του ποταμού Μύρτου (*Qin*) παρθηκαν από τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης του μοντελου SWAT για το έτος 2015 μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου του 2020 όπου είναι και η τελευταία μέτρηση που μπορεί να δώσει το μοντελο.

Ακολουθως υπολογίζεται η μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου (ΔV) που υπολογίστηκε σε ημερήσια βάση ως η διαφορά του αποθηκευμένου όγκου του ταμιευτήρα μεταξύ δυο διαδοχικών ημερων συμφωνα με την σχέση:

$$\Delta V_i = V_i - V_{i-1}$$

Επίσης κατασκευαστικε το αθροιστικο διαγραμμα της μεταβολης του όγκου (ΔV) σε μηνιαια βάση που παρουσιαζεται παρακατω με σκοπο την αποτύπωση της μακροχρόνιας εξέλιξης του όγκου του ταμιευτηρα και την αξιολογηση των διαχρονικών τάσεων στη λειτουργια του.



Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο όγκος του ταμιευτηρα παρουσιάζει σημαντικες διακυμανσης μεταξύ των ετων με τις μεγαλητερες να καταγράφονται το 2015 και περιπου 11 εκ. κυβικα(m³) και το 2019 με 10 εκ. κυβικα(m³). Οι περιοδοι κατά τις οποίες το ΔV εμφανίζει αρνητικές τιμές είναι λόγω περιορισμένης διαθεσιμοτητας δεδομένων από τους αρμόδιους φορείς. Πιο συγκεκριμενα οι περιοδοι αυτοι αφορουν το 2016 με 2017 και το διαστημα 2018 μεχρι τα μεσα του Μαρτη του 2019. Ως αποτελεσμα δεν καθισταται δυνατη η εξαγωγή ασφαλους



συμπερασματος σχετικά με το εάν ο ταμιευτήρας αδειάζει κατά τη θερινή περίοδο ή κατά πόσο καλυπτει επαρκώς τις υδατικές ανάγκες της περιοχής.

Στη συνέχεια τα δεδομένα να καταστούν συμβατά με τη μορφή του υδατικού ισοζυγίου οι μεταβλητές που εκφράζονται ως υψηλό νερό δηλαδή η βροχοπτώση P και η εξατμισοδιαπνοή PET πολλαπλασιασθηκαν με το εμβαδόν του ταμιευτήρα. Επίσης η παροχή του ποταμού Μύρτου από το πρόγραμμα του SWAT δώθηκε σε cms οπότε επρεπε να γίνει και σε αυτή μετατροπή με στόχο οι μονάδες μέτρησης να γίνουν κυβικά μετρα ανα μερα (m^3/d). Με τον τρόπο αυτό όλοι οι όροι του ισοζυγίου έχουν ίδιες μονάδες μέτρησης δηλαδή κυβικά μετρα. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία μετατροπής μονάδων για την 16^η γραμμή στην ακολουθής εικόνας που παρουσιάζει τα αποτελέσματα των όρων του ισοζυγίου.

	A	B	C	D	E	F	G	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Date	MPRAMIANA DUM VOLUME(m^3)	ΔV	P(mm)	P(m)	A(m^3)	P*A	A(m^3)	P*A	PETmm	PET(m)	PET*A	FLOW_OUTcms	FLOW_OUT m^3/d	Qirr-Qpum			
2	11/6/2015	*	0	11.3	0.0113	1050000	11865	1050000	11865	2.542	0.002542	2669.1	0.07043	6085.152	9195.97			
3	11/7/2015	*	0	0	0		0		0	2.542	0.002542	2669.1	0.06549	5658.336	-2669			
4	11/8/2015	*	0	0	0		0		0	2.542	0.002542	2669.1	0.06105	5274.72	-2669.04			
5	11/9/2015	*	0	0	0		0		0	2.542	0.002542	2669.1	0.05702	4926.528	-2669.04			
6	11/10/2015	*	0	0	0		0		0	2.542	0.002542	2669.1	0.05334	4608.576	-2669.05			
7	11/11/2015	*	0	0	0		0		0	2.542	0.002542	2669.1	0.04994	4314.816	-2669.05			
8	11/12/2015	*	0	0	0		0		0	1.745	0.001745	1832.25	0.04675	4039.2	-1832.2			
9	11/13/2015	*	0	0	0		0		0	1.745	0.001745	1832.25	0.0438	3784.32	-1832.21			
10	11/14/2015	*	0	0	0		0		0	1.745	0.001745	1832.25	0.041	3542.4	-1832.21			
11	11/15/2015	*	0	0	0		0		0	1.745	0.001745	1832.25	0.03838	3316.032	-1832.21			
12	11/16/2015	*	0	0	0		0		0	1.745	0.001745	1832.25	0.03596	3106.944	-1832.21			
13	11/17/2015	*	0	0.2	0.0002		210		210	2.553	0.002553	2680.65	0.03361	2903.904	-1622.22			
14	11/18/2015	*	0	5.6	0.0056		5880		5880	2.553	0.002553	2680.65	0.03151	2722.464	-1599.382			
15	11/19/2015	11071007	11071007	0	0		0		0	2.553	0.002553	2680.65	0.02949	2547.936	-15712.6			
16	11/20/2015	11084039	13032	0	0		0		0	2.553	0.002553	2680.65	0.02763	2387.232	-15712.6			
17	11/21/2015	11071007	13032	0	0		0		0	2.553	0.002553	2680.65	0.02591	2238.624	-15712.6			
18	11/22/2015	11071007	13032	0	0		0		0	2.553	0.002553	2680.65	0.02424	2094.336	-15712.6			
19	11/23/2015	11071007	13032	0	0		0		0	2.553	0.002553	2680.65	0.02272	1963.008	-15260.6			

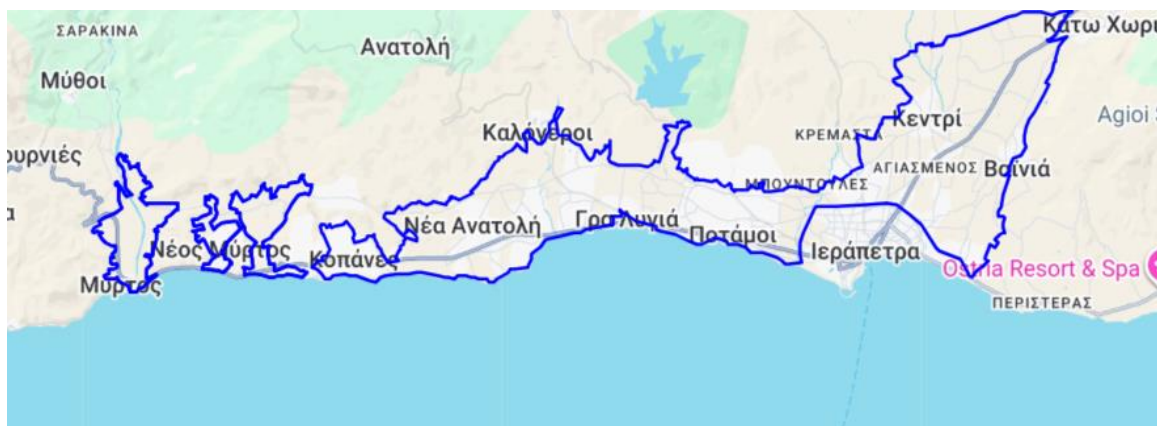
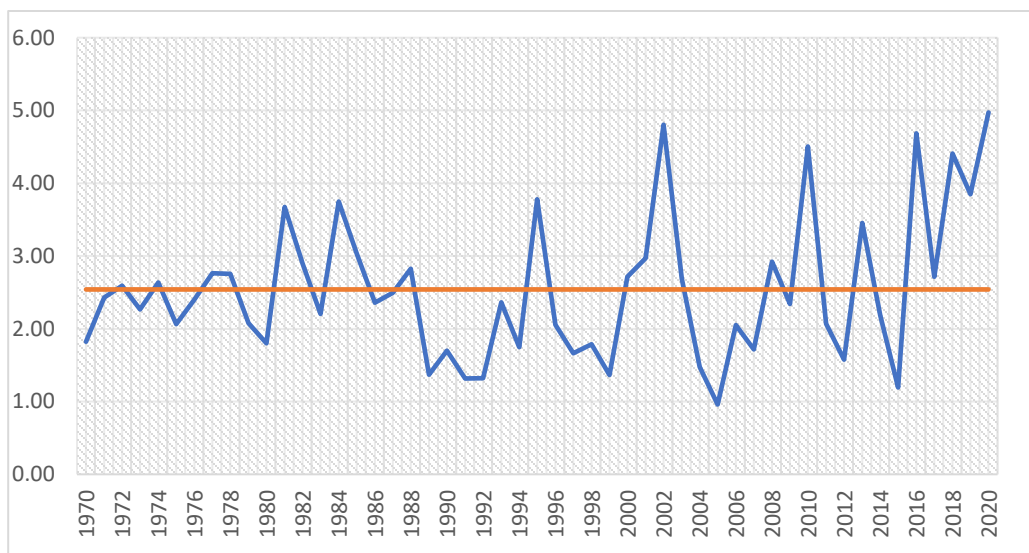
$$\Delta V =$$

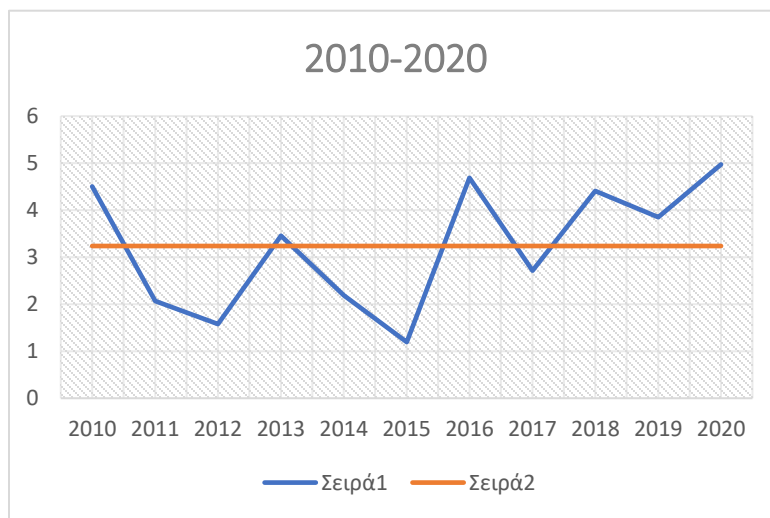
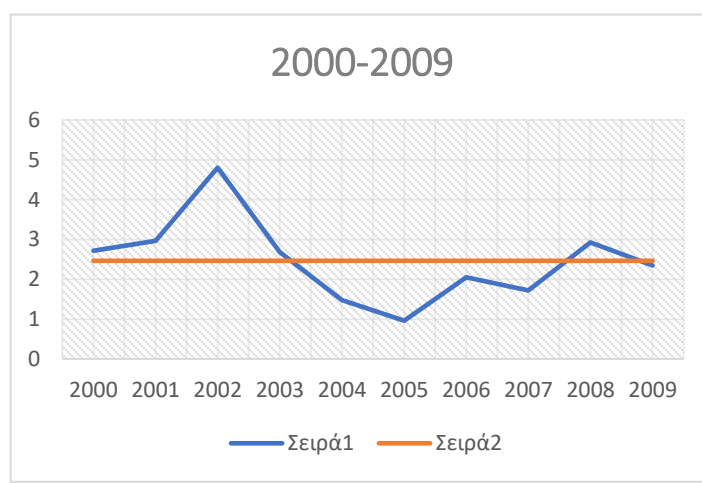
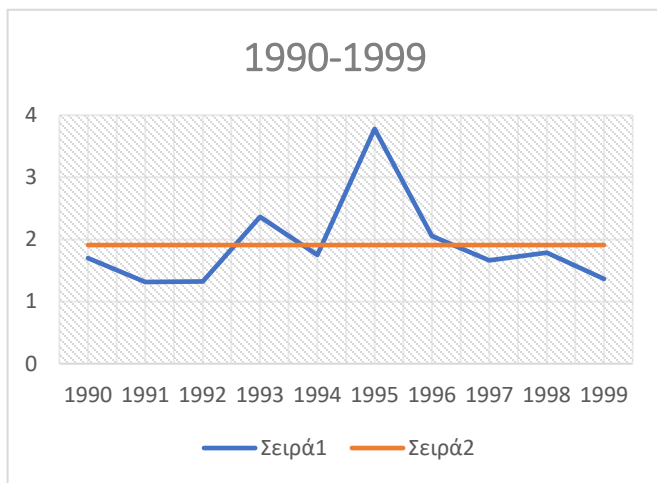
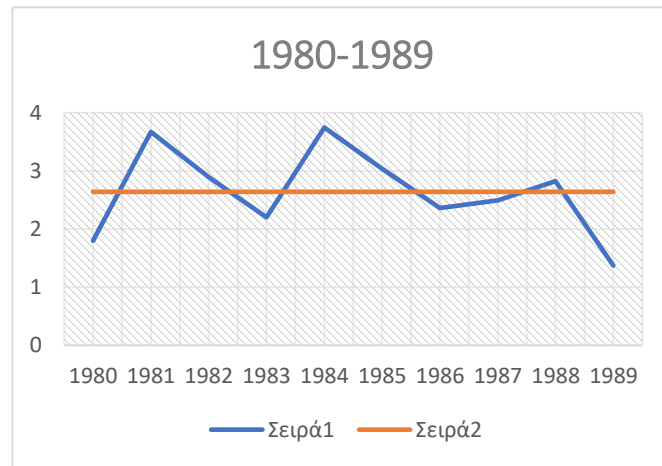
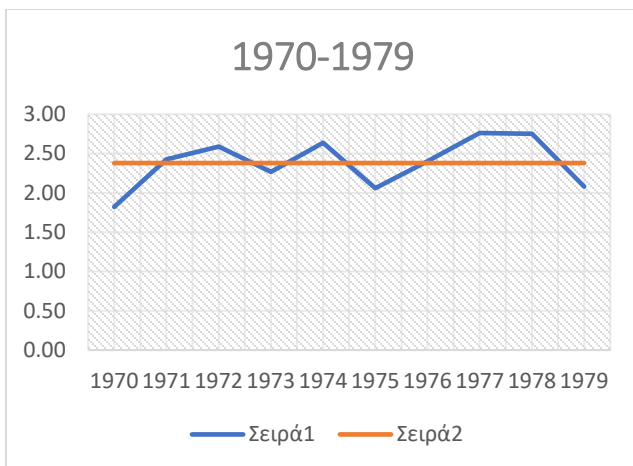


Τελος αφού υπολογιστικαν ολοι οι υπολοιποι όροι του ισοζυγίου πρεπει να βρεθει το *Q_{irr}* που αντοιιστιχει στις αδρευτικές και υδρευτικές απολήψης από την διαφορα *Q_{irr} - Q_{rum}*. Όμως υπαρχει ένα προβλημα δεν μπορει να προσδιοριστεί λογο ότι δεν υπαρχουν διαθεσιμα και αξιοπιστα δημοσια δεδομενα σχετικά με τον αριθμο των γεωτρησεων, τη νομιμοτητα τους και τις πραγματικές ποσοτητες νερου που αντλυνται από αυτες.

Για τον λόγο αυτό η παρουμεα διπλωματική εργασία στα δυο τελευταία υποκεφαλαια του κεφαλαιου 5 επικεντρώνεται στην αξιολογηση της περιοχης του ποταμου Μύρτου, καθώς και στη διευρέυνηση του φαινομινου της πιθανής υφαλμήρινσης των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής το οποίο συνδεεται άμεσα με την εκτεταμένη και σε μεγάλο βαθμο ανεξέλεγκτη χρήση των γεωτρησεων.

5.3 Καληψη υδατικών αναγκων με τη βοθηα του ποταμου Μύρτου

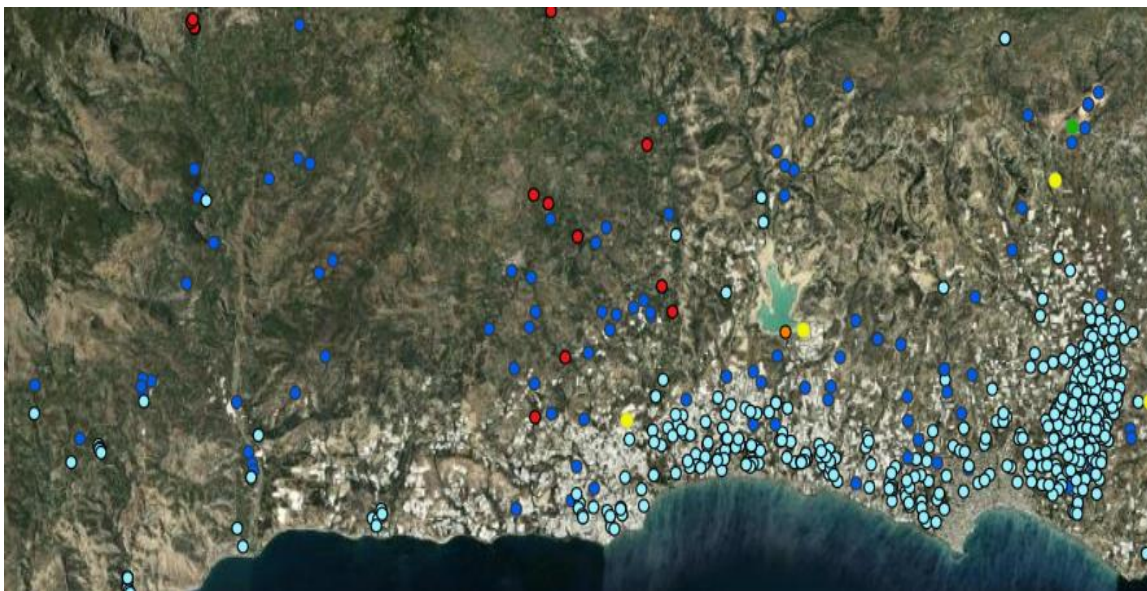




5.4 Υφαλμήριση

Όπως αναφερθηκε και στο κεφάλαιο 2.8 η υφαλμυρίση είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα διαχείρισης των υδατικών πόρων σε παράκτιες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα το φαινόμενο αναφέρεται στη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υδροφορίες του γλυκού νερού που αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας και την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Στην Κρήτη το φαινόμενο αυτό αποτελεί ένα διαχρονικό και εκτεταμένο πρόβλημα, λόγω της γεωγραφικής θέσης της και της μεγάλης εξάρτησης από τους υδατικούς πόρους. Επιπρόσθετα η περιορισμένη παρουσία μόνιμων επιφανειακών υδατικών συστημάτων, η έντονη εποχικότητα των βροχοπτώσεων και την αυξημένη ζήτηση νερού για γεωργικές και τουριστικές δραστηριότητες οδήγησε στην αύξηση των γεωτρήσεων ιδιαίτερα στις παράκτιες ζώνες. Ως αποτέλεσμα πολλοί παράκτιοι υδροφορίες του νησιού έχουν καταγραφεί ως ευάλωτοι ή ήδη επιβαρυνμένοι από την υφαλμυρίση.

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της υφαλμυρίσης για την περιοχή της Ιεράπετρας με βάση ποιοτικά κριτήρια και τη χωρική κατανομή των υδροληψιών. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης κατανομής των γεωτρήσεων, πηγαδιών και λοιπών υδατικών στοιχείων που παρθηκε από το Υπουργείο Περιβάλλον και Ενέργειας που απεικονίζει την υφιστάμενη κατάσταση εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Από τον χάρτη προκύπτει ότι οι περισσότερες γεωτρήσεις βρίσκονται κυρίως στο παράκτιο τμήμα της περιοχής, όπου οι συγκεντρώνονται οι περισσότερες



αρδευτικές και υδρευτικές δραστηριότητες. Αφού υπάρχουν τόσες πολλές γεωτρήσεις και πηγάδια που βρίσκονται κοντά με την παράκτια ζώνη είναι θεωρητικά ένα πολύ καλό σενάριο για να δημιουργηθεί το φαινόμενο της δημιουργηθεί ιδιαίτερα κατά τις περιόδους αυξημένη άντληση. Σε αντίθεση με το ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Μύρτου όπου από το χάρτη παρατηρείται μικρότερος αριθμός πηγαδιών και γεωτρήσεων γεγονός που περιορίζει την πιθανότητα διείσδυσης θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Επίσης λόγω των γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής που αναφερθήκαν στο κεφάλαιο 3 βοηθάνε ώστε να μην αναπτυχθεί το φαινόμενο της υφαλμήρισης.

Τώρα βάση με τα στοιχεία παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων στην Κρήτη από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών σε ορισμένους παράκτιους υδροφορίες έχουν καταγραφεί αυξημένες συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου που παρουσιάστηκαν λόγω σε υπεραντλήσεις και θαλασσιά διείσδυση συμπεριλαμβανομένων περιοχών της νότιας Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής της Ιεράπετρας (ΕΑΓΜΕ, 2022). Βάση με τα παραπάνω δεν υπάρχει σοβαρό θέμα υφαλμήρισης ακόμα για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου και για την περιοχή που είναι το φράγμα των Μπραμιανών αλλά υπάρχει υφαλμήριση τοπικά σε παράκτιες ζώνες της Ιεράπετρας.

Εν κατακλείδι από την παρούσα ανάλυση με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία από τους αρμοδίους φορείς καθώς και τη χωρική απεικόνιση των υδροληψιών στην περιοχή μελέτης δεν αποδεικνύεται γενικευμένος κίνδυνος δημιουργηθεί. Όμως η ύπαρξη μεγάλου αριθμού πηγαδιών και γεωτρήσεων πολύ κοντά μεταξύ τους και κοντά στη παράκτια ζώνη καθιστά αναγκαία την παρακολούθηση της ποιοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, ιδιαίτερα σε μελλοντικά σενάρια αυξημένης ζήτησης και κλιματικής αλλαγής.



6 Συζήτηση

Στοχος της παρουςας διπλωματικής εργασίας ηταν η διερευνηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της περιοχής του ποταμού Μύρτου και του ταμιευτήρα των Μπραμιανων, με στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας της κάλυψης των υδατικών αναγκών της περιοχής και την εκτημηση των συνεπειών της διαχείρησης των υδάτικών πόρων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιηθηκε το υδρολογικό μοντελο SWAT, το οποίο επετρεψε την εκτιμηση βασικών υδρολογικών μεγεθων και την αναλυση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης.

Στο πλαίσιο της μελετης συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν μετεωρολογικά, υδρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα από τους σταθμους Καστελι και Μυθοι. Ιδιαίτερη εμφαση δόθηκε στον ελεγχο και τη διορθωση των μετεωρολογικών δεδομένων προκειμένου να καταστούν κατάλληλα για την εφαρμογη στο μοντελο SWAT. Παρά τις προσπάθειες αυτές κατά τη διάρκεια της αναλυσης προέκυψαν σημαντικοι περιορισμοι που αφορούσαν τη διαθεσιμότητα και τη συνέχεια των δεδομένων. Από την ανάλυση της παροχής του ποταμου Μύρτου προεκυψε ότι η ετησια συμβολη του ανερχεται σε περίπου $3,4 \text{ hm}^3/\text{year}$, ποσοτητα η οποία δεν επαρκει για την καλυψη των υδατικών αναγκων της περιοχής. Παράλληλα ο ταμιευτήρας των Μπραμιανων ακομη και σε ευνοικες υδρολογικές συνθικες δυναται να αποδώσει περίπου $12 \text{ hm}^3/\text{year}$ παρα το γεγονός ότι η μεγιστη χωριτικότητα του ανέρχεται σε συνολοκες υδατικες αναγκες της περιοχής, οι οποίες είναι $16 \text{ hm}^3/\text{year}$.



Βιβλιογραφία

- Abbaspour, K. C., et al. (2015). *A continental-scale hydrology and water quality model for Europe*. Environmental Modelling & Software, 75, 1–18.
- European Commission (EC) (2012). *Report on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC)*.
- European Environment Agency (EEA) (2021). *European waters – Assessment of status and pressures 2021*.
- FAO (2016). *AQUASTAT Main Database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Global Water Partnership (GWP) (2013). *Integrated Water Resources Management in Practice*.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP) (2019). *The United Nations World Water Development Report 2019*.
- UNESCO (2021). *Groundwater: Making the invisible visible*.
- IGME (2020). Geological Map of Crete, Sheet Ierapetra. Athens: Institute of Geological and Mineral Exploration.
- Pavlopoulos, K., Panagos, P., & Petropoulos, G. (2021). Hydro-geomorphological characteristics and flash flood potential in small Mediterranean catchments of Crete. Catena, 203, 105342.
- Zervakis, M., & Vrontaki, A. (2023). River morphology and sediment transport in steep Mediterranean basins: the case of southeastern Crete. Environmental Earth Sciences, 82(5), 211.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Kannan, N. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491–1508.
- EEA (European Environment Agency). (2000). Corine Land Cover 2000 (CLC2000) – Technical Guidelines. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.



- Fassoulas, C., & Iliopoulos, G. (2022). Geomorphological evolution and active tectonics of southern Crete (Greece): insights from fluvial terraces and drainage analysis. *Geomorphology*, 405, 108211.
- IGME (2020). Geological Map of Crete, Sheet Ierapetra. Athens: Institute of Geological and Mineral Exploration.
- Pavlopoulos, K., Panagos, P., & Petropoulos, G. (2021). Hydro-geomorphological characteristics and flash flood potential in small Mediterranean catchments of Crete. *Catena*, 203, 105342.
- Zervakis, M., & Vrontaki, A. (2023). River morphology and sediment transport in steep Mediterranean basins: the case of southeastern Crete. *Environmental Earth Sciences*, 82(5), 211.
- Tzanakakis, V. A., & συν. (2022). The Case Study of Municipality of Sfakia, Crete, Greece — μελέτη που περιλαμβάνει στοιχεία για τις βροχοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή της Σφακιάς, καθώς και την κατανομή των κλιματικών ζωνών στην Κρήτη.
- Zanis, P., Georgoulas, A. K., Velikou, K., Akritidis, D., Kalisoras, A., & Melas, D. (2024). Future Projections of Precipitation Extremes for Greece Based on an Ensemble of High-Resolution Regional Climate Model Simulations. *Atmosphere*, 15(5), 601. — προβλέψεις για ακραίες τιμές βροχοπτώσεων στο μέλλον, συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης.
- Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Nastos, P. T. κ.ά. (2023). High resolution projections for extreme temperatures and precipitation over Greece — μαθηματικά μοντέλα (WRF) για θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις, με αναφορές στις μελλοντικές αλλαγές, και ειδικά επιπτώσεις στα νησιά, συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης.
- Agou, V. D., Varouchakis, E. A., & Hristopulos, D. T. (2019). Geostatistical analysis of precipitation in the island of Crete (Greece) based on a sparse monitoring network. *Environmental Monitoring and Assessment*. — αν και ξεκινάει πριν το 2015, είναι πολύ σχετικό γιατί αναλύει την κατανομή των βροχοπτώσεων στην Κρήτη και τις χωρικές διαφοροποιήσεις (Δυτικά — Ανατολικά).
- Agou, V. D., Varouchakis, E. A., & Hristopulos, D. T. (2019). Geostatistical analysis of precipitation in the island of Crete (Greece) based on a sparse monitoring network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 298. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7435-7>
- Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Nastos, P. T., Zanis, P., & Kapsomenakis, J. (2023). High-resolution projections for extreme



- temperatures and precipitation over Greece. *Climate Dynamics*, 60(3–4), 841–857. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06590-w>
- Tzanakakis, V. A., Paranychanakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2022). The case study of the Municipality of Sfakia, Crete, Greece. *Water*, 14(3), 462. <https://doi.org/10.3390/w14030462>
 - Zanis, P., Georgoulas, A. K., Velikou, K., Akritidis, D., Kalisoras, A., & Melas, D. (2024). Future projections of precipitation extremes for Greece based on an ensemble of high-resolution regional climate model simulations. *Atmosphere*, 15(5), 601.
 - Fassoulas, C., & Iliopoulos, G. (2022). Geomorphological evolution and active tectonics of southern Crete (Greece): insights from fluvial terraces and drainage analysis. *Geomorphology*, 405, 108211.
 - IGME (2020). Geological Map of Crete, Sheet Ierapetra. Athens: Institute of Geological and Mineral Exploration.
 - Pavlopoulos, K., Panagos, P., & Petropoulos, G. (2021). Hydro-geomorphological characteristics and flash flood potential in small Mediterranean catchments of Crete. *Catena*, 203, 105342.
 - Zervakis, M., & Vrontaki, A. (2023). River morphology and sediment transport in steep Mediterranean basins: the case of southeastern Crete. *Environmental Earth Sciences*, 82(5), 211.
 - Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Kannan, N. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
 - EEA (European Environment Agency). (2000). Corine Land Cover 2000 (CLC2000) – Technical Guidelines. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
 - Fassoulas, C., & Iliopoulos, G. (2022). Geomorphological evolution and active tectonics of southern Crete (Greece): insights from fluvial terraces and drainage analysis. *Geomorphology*, 405, 108211.
 - IGME (2020). Geological Map of Crete, Sheet Ierapetra. Athens: Institute of Geological and Mineral Exploration.
 - Pavlopoulos, K., Panagos, P., & Petropoulos, G. (2021). Hydro-geomorphological characteristics and flash flood potential in small Mediterranean catchments of Crete. *Catena*, 203, 105342.
 - Zervakis, M., & Vrontaki, A. (2023). River morphology and sediment transport in steep Mediterranean basins: the case of southeastern Crete. *Environmental Earth Sciences*, 82(5), 211.



- ACI (2019). Roller Compacted Concrete. American Concrete Institute.
- Chanson, H. (2020). Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. CRC Press.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Μιμίκου, Μ. (2006). Υδρολογία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μιμίκου, Μ., & Κουμάντακη, Ε. (2008). Έργα Ρύθμισης και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λουκάς, Α., & Βαφειάδης, Μ. (2011). Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Ελλάδα. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- Κοντεγεώργος, 2014: Μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής ποταμού Γιόφυρου, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Κουρή, 2015: Μοτελοποίηση της υδρολογίας του ποταμού Ταυρωνίτη και αξιολόγηση του προτεινόμενου φράγματος Σεπρωνιώτη, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Δριβέλας, 2009: Διερεύνηση του αλλουβιακού υδροφορέα του Μυρτους Λασιθίου για τη δημιουργία υπόγειου ταμιευτήρα με διαφραγματικό τοίχο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

