



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας
της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με
χρήση του μοντέλου SWAT»**

ΑΛΔΑΚΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Εξεταστική επιτροπή:

Νικολαΐδης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καρατζάς Γεώργιος

Τζωράκη Ουρανία

Χανιά, Σεπτέμβριος 2014

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους συνέβαλαν σε αυτή την προσπάθεια και στην ολοκλήρωση της αισίως.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για τη βοήθεια στην επιλογή του θέματος και τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια που μου έδινε σε αυτή την προσπάθεια. Οι γνώσεις, εμπειρίες και ο τρόπος δουλειάς που κέρδισα στο διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας είναι πολύ σημαντικές για τη μελλοντική επαγγελματική πορεία μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κ. Γεώργιο Καρατζά για τη συμμετοχή του στην επιτροπή και για τις γνώσεις υπογείων και επιφανειακών υδάτων που μου μετέδωσε στα μαθήματά του στο προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

Επίσης, ευχαριστώ την Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Επιστημών της Θάλασσας του Πανεπιστημίου Αιγαίου και μέλος της εξεταστικής επιτροπής κα. Ουρανία Τζωράκη για τη συμμετοχή της στην επιτροπή και για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στην εκμάθηση και εξοικείωση με το μοντέλο SWAT στο μάθημα «Διαχείριση Υδατικών Πόρων».

Ευχαριστώ θερμά, επίσης, όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών για την αμέριστη βοήθεια που μου έδωσαν οποιαδήποτε ώρα και ημέρα για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη εργασία: Σε θέματα λογισμικού, στις μετρήσεις πεδίου, στις εργαστηριακές αναλύσεις, σε θέματα υδραυλικών και χημικών δεδομένων, σε θέματα μοντελοποίησης. Χωρίς αυτές τις μικρές και μεγάλες βοήθειες αυτή η εργασία δε θα είχε ολοκληρωθεί.

Επιπλέον, ευχαριστώ το Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Δρ. Νεκτάριο Κουργιαλά (Διαχείριση Υδατικών Πόρων και Ακραίων Υδρολογικών Φαινομένων) για τη βοήθειά του σε θέματα χημικών φορτίσεων της λεκάνης απορροής του Κερίτη.

Επίσης, ευχαριστώ τους υπαλλήλους του Ο.Α.Κ. (πρώην Ο.Α.ΔΥ.Κ.) και της Δ.Ε.Υ.Α.Χ. για την άμεση βοήθεια και παροχή δεδομένων για τις πηγές της Αγιάς και των Μεσκλών.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στις φίλες και φίλους μου και φυσικά στην οικογένειά μου για την υπομονή τους και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν στο χρονικό διάστημα εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Περίληψη

Η περιοχή μελέτης της διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, η οποία βρίσκεται στο Νομό Χανίων, στη νήσο Κρήτη και έχει επιφάνεια 180 km². Η συγκεκριμένη περιοχή έχει μελετηθεί αρκετά κατά το παρελθόν, εξαιτίας της μεγάλης σημασίας των υδατικών ποσοτήτων που εκφορτίζονται από τις υπάρχουσες πηγές, καθώς και λόγω των γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης της υδρολογικής απόκρισης και γεωχημείας (νιτρικά) της λεκάνης απορροής με συνδυασμό του μοντέλου SWAT (Soil Water Assessment Tool) σε περιβάλλον GIS και του καρστικού μοντέλου δύο ταμιευτήρων (Nikolaidis et al., 2013). Στην αρχή της εργασίας παρατίθενται κάποιες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης, αναφορικά με την υδρολογία, τη γεωλογία, τα κλιματολογικά στοιχεία, τις χρήσεις γης και τα εδάφη που αποτελούν τη λεκάνη. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του συνδυαστικού μοντέλου (μετεωρολογικά, δεδομένα, παροχής, υδραυλικών απολήψεων, νιτρικά και δεδομένα γεωργίας – κτηνοτροφίας). Έπονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της υδρολογίας και γεωχημείας. Σχετικά με την υδρολογία, πραγματοποιείται μοντελοποίηση των υδάτων των πηγών Αγιάς (βαθμονόμηση για το χρονικό διάστημα 1978 – 1985), των πηγών Μεσκλών (βαθμονόμηση 1978 – 1985 και επαλήθευση 2000 – 2005) και μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής (βαθμονόμηση 2012 – 2013). Αναφορικά με τη γεωχημεία, γίνεται μοντελοποίηση των νιτρικών στις πηγές Αγιάς και Μεσκλών (λίγα δεδομένα πεδίου) και μοντελοποίηση των νιτρικών στα επιφανειακά ύδατα (βαθμονόμηση 2012 – 2013). Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης υποδεικνύουν ότι το συνδυαστικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά την υδρολογία της λεκάνης. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με χρήση συγκριτικών γραφικών παραστάσεων και στατιστικών δεικτών (RMSE, RSR, NSE, PBIAS). Τελικά, το συνδυαστικό μοντέλο (μοντέλο SWAT και καρστικό μοντέλο ρηχού και βαθέος ταμιευτήρα) αποδεικνύεται ένα αξιόπιστο επιστημονικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.

Abstract

The study area of this Diploma Thesis is Keritis river basin, located in Chania prefecture, on the island of Crete and has an area of 180 km². This area has been thoroughly studied in the past, due to the importance of water quantities discharged from existing sources as well as due to the agricultural and livestock uses. In the present work, hydrologic and geochemical data were collected in the field (surface flow of Keritis) and analyzed at the Laboratory of Hydrogeochemical Engineering and Remediation of Soil, Technical University of Crete. Additionally, monitoring of Keritis river was done through the collection and analysis of data from river troll station for 2012 – 2013 hydrologic year. In this study, a combined model is used for modeling the hydrology and geochemistry (nitrates) of the watershed. This model combines the SWAT model (Soil Water Assessment Tool) in GIS environment and the karst model of two reservoirs (Nikolaidis et al., 2013). Firstly, there is information about the study area, with respect to hydrology, geology, climatic data, land use and soils that consist the river basin. Moreover, input data is presented which is necessary for the set up and function of the combined model (meteorological and flow data, hydraulic abstractions, nitrates and data concerning agriculture as well as livestock). Another section of the Thesis contains results of the modeling of hydrologic and geochemistry of river basin. Hydrologic modeling was conducted using data from Meskla and Agia springs and from the station in the main river. The calibration period was from 1978-1985 for Agia and Meskla springs and verification from 2000-2005 for Meskla springs and 2012-2013 for the main station in the river. These dates were determined based on data availability. The hydrologic simulation of the basin was successful. The effectiveness of model was tested with the use of comparative graphs and statistical indexes (RMSE, RSR, NSE, PBIAS). In conclusion, the combined model (SWAT model and karst model of shallow and deep aquifer) is proved to be a reliable scientific tool for hydrologic and geochemical modeling of Keritis river basin.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract	3
1. Εισαγωγή – Ανάλυση προβλήματος.....	6
1.1. Εισαγωγή.....	6
1.2. Ανάλυση του προβλήματος – Σκοπός της εργασίας	8
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1. Περιβαλλοντικά Μοντέλα.....	9
2.2. Υδρολογικά μοντέλα.....	10
2.2.1. Ορισμοί και στάδια κατάστρωσης ενός υδρολογικού μοντέλου	10
2.2.2. Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων.....	11
2.2.3. Βαθμονόμηση και επαλήθευση υδρολογικού μοντέλου	14
2.2. Προηγούμενες μελέτες για τη λεκάνη του Κερίτη	16
2.3. Μοντέλο SWAT.....	17
2.3.1. Δεδομένα εισόδου του μοντέλου SWAT	18
2.3.2. Μεθοδολογία του μοντέλου	18
2.3.3. Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου	20
2.3.4. Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο	21
2.4. Καρστικό Μοντέλο δύο ταμιευτήρων	21
3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	24
3.1. Γενικά.....	24
3.2. Γεωμορφολογία.....	25
3.3. Γεωλογία	28
3.4. Υδρογεωλογία	29
3.5. Υπολεκάνες της λεκάνης απορροής ποταμού Κερίτη	31
3.6. Κλιματολογικά στοιχεία.....	32
3.7. Χρήσεις γης	34
3.8. Εδάφη	35
4. Εισαγωγή δεδομένων της περιοχής μελέτης.....	37
4.1. Μετεωρολογικά δεδομένα	37
4.2. Δεδομένα Παροχής.....	39

4.3. Δεδομένα υδραυλικών απολήψεων	43
4.4. Δεδομένα NO ₃	44
4.5. Κτηνοτροφία – Γεωργία	45
5. Συλλογή δεδομένων στο πεδίο και εργαστηριακές αναλύσεις.....	48
5.1. Δεδομένα πεδίου και υδρολογικός σταθμός.....	48
5.1.1. Δεδομένα πεδίου.....	48
5.1.2. Υδρολογικός σταθμός (troll station)	49
5.2. Εργαστηριακές αναλύσεις	54
6. Αποτελέσματα της μοντελοποίησης	58
6.1. Υδρολογία	58
6.2. Γεωχημεία	71
7. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	78
7.1. Συμπεράσματα	78
7.2. Προτάσεις	79
8. Βιβλιογραφία	80
8.1. Διεθνής Βιβλιογραφία	80
8.2. Ελληνική Βιβλιογραφία	81
8.3. Ηλεκτρονικές Πηγές.....	82

1. Εισαγωγή – Ανάλυση προβλήματος

1.1. Εισαγωγή

Το νερό είναι το κυριότερο είδος τροφής και ανάπτυξης για το ανθρώπινο είδος. Συγχρόνως, συμμετέχει στην υγρή, αέρια ή στερεή του μορφή σχεδόν σε κάθε παραγωγική διαδικασία του ανθρώπινου πολιτισμού. Επιπλέον, το νερό ως φυσική πρώτη ύλη δεν αποτελεί τον καρπό μιας συγκομιδής, καθώς η ανανέωσή του σε ένα συγκεκριμένο χώρο και χρόνο αποτελεί συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών, των ανθρώπινων παρεμβάσεων στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του και της προσφοράς και ζήτησης από τους χρήστες.

Κατά τη διάρκεια της χρήσης του, ο άνθρωπος παρεμβαίνει στα πιο κύρια χαρακτηριστικά του νερού, τα οποία είναι η ποσότητα και η ποιότητα. Κατά συνέπεια, έχουν προκληθεί αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτων. Παραδείγματος χάριν, αναφέρονται τα προβλήματα που οφείλονται στις κακές πρακτικές των αρδευτικών έργων, στις μεταβολές της ποιότητας του επιφανειακού νερού λόγω τεχνικών κατασκευών, τα προβλήματα που σχετίζονται με μεγάλα φράγματα κ.α. (Μήτρακας, 2001) Συνοπτικά, τα προβλήματα διαχείρισης των υδατικών πόρων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- a. Προβλήματα ανισοκατανομής της προσφοράς και ζήτησης του νερού στο χώρο και στο χρόνο.
- b. Προβλήματα που ανακύπτουν από την επιλεγόμενη ανάπτυξη της εθνικής και διεθνούς οικονομίας και θίγουν την ποιότητα των υδάτων.
- c. Προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της έλλειψης ορθής περιβαλλοντικής εκπαίδευσης των παικτών-χρηστών του νερού (αγρότες, πολίτες, εταιρείες, βιομηχανία, διοίκηση)

Αναφορικά με τις πιέσεις που δέχεται το νερό, αυτές οφείλονται κυρίως στις πρακτικές εντατικής ανάπτυξης των αγροτικών καλλιεργειών, οι οποίες απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού ικανοποιητικής ποιότητας. Επίσης, η κλιματική αλλαγή δείχνει να επηρεάζει σταδιακά τον υδρολογικό κύκλο τοπικά και εν δυνάμει σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής πιστεύεται ότι θα είναι πιο δυσμενείς στην περιοχή της Μεσογείου, όπου υπάρχουν αυξημένες πιθανότητες ερημοποίησης μεγάλων εκτάσεων (Alpert et al., 2008).

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, είναι αναμενόμενο μεγάλοι οργανισμοί, όπως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), να θέτουν προτεινόμενες στρατηγικές προστασίας των υδατικών πόρων προς τη διεθνή κοινότητα. Ανάμεσα στα ζητούμενα στρατηγικά αποτελέσματα των προτάσεων που κάνει ο WHO υπάρχουν η αξιόπιστη και σύγχρονη τεχνολογικά συμβουλευτική σχετικά με τη διαχείριση της ποιότητας υδάτων και τα αποδοτικά δίκτυα και συνεργασίες μεταξύ χωρών, με αντικείμενο την ανταλλαγή περιβαλλοντικών πληροφοριών, την ευαισθητοποίηση των κοινωνιών για τα θέματα ορθής διαχείρισης των υδάτων και τη θετική ανταπόκριση σε θέματα ποιότητας των υδάτων και θέματα υγείας (WHO, 2013).

Λαμβανομένης υπόψιν της σοβαρότητας της παρούσας κατάστασης των υδατικών πόρων, καθώς και της μεγάλης πιθανότητας επιδείνωσης της κατάστασης στο εγγύς μέλλον, υπάρχει μεγάλη ανάγκη εφαρμογής βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και περιβαλλοντικά ορθής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αντιλαμβανόμενη τη ζωτική σημασία της διατήρησης και προστασίας των υδατικών πόρων εντός των συνόρων της, προχώρησε και συνεχίζει να καταστρώνει και εφαρμόζει περιβαλλοντικά προγράμματα σχετικά με τη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Ένα από τα πιο σημαντικά νομοθετικά εργαλεία της Ένωσης, το οποίο κυριαρχεί στην εφαρμογή περιβαλλοντικών πολιτικών για το νερό στην Ευρώπη τα τελευταία 13 έτη, είναι η Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά, με κύριο σκοπό την επίτευξη καλής ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. (ΕΕ, 2000)

Η Οδηγία για τα νερά, Οδηγία 2000/60/ΕΚ, επιχειρεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη βιώσιμη διαχείριση του υδάτινου περιβάλλοντος της Ευρώπης. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται στο προοίμιο της Οδηγίας ότι «τα ύδατα είναι, καταρχήν, ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι. Ιδίως η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους...» και «Η καλή ποιότητα του ύδατος θα εξασφαλίσει την παροχή πόσιμου ύδατος στον πληθυσμό». Τα παραπάνω αποσπάσματα της Οδηγίας δείχνουν το αυξημένο επίπεδο σημασίας των υδάτινων αποθεμάτων που εκφράζουν το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ε.Ε. Η Οδηγία – Πλαίσιο για τα ύδατα εισάγεται και εφαρμόζεται στο Ελληνικό Εθνικό Δίκαιο με το Ν. 3119/2003, ο οποίος είναι ο πρώτος νόμος που θέτει τις έννοιες της Οδηγίας της Ε.Ε. στο ελληνικό δίκαιο. Ακολουθεί το Π.Δ. 51/2007, το οποίο εισάγει τις έννοιες της λεκάνης απορροής ποταμού, των περιβαλλοντικών στόχων οι οποίοι πρέπει να θεσπίζονται και των Σχεδίων Διαχείρισης Περιοχών Λεκανών Απορροής Ποταμών της Ελλάδας. Τέλος, ο Ν. 4117/2013 θέτει τροποποιήσεις στον παλαιότερο Ν. 3119/2003 αναφορικά με την τιμολογιακή πολιτική των υπηρεσιών ύδατος και με τους αρμόδιους φορείς κατάρτισης των Σχεδίων Διαχείρισης.

Η συγκεκριμένη Οδηγία υποστηρίζει την έννοια της λεκάνης απορροής ποταμού (River basin) ως το καταλληλότερο πεδίο για την ολοκληρωμένη διαχείριση και προστασία των υδάτων. Πιο ειδικά, η Οδηγία προβλέπει ότι τα κράτη-μέλη της Ένωσης πρέπει να ορίσουν τα υδατικά διαμερίσματα της επικράτειάς τους. Επίσης, για κάθε υδατικό διαμέρισμα καθορίζονται οι απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός συγκεκριμένων προθεσμιών, με στόχο την επίτευξη «καλής κατάστασης» όλων των υδατικών διαμερισμάτων της Ε.Ε. έως το 2015 (ΕΕ, 2000).

Αναφορικά με την εκτέλεση της Οδηγίας, απαιτείται η μαθηματική προσομοίωση των υδραυλικών και γεωχημικών στοιχείων με τη εφαρμογή διαφόρων τύπων μοντέλων. Η χρήση μοντέλων στην εκτέλεση της οδηγίας είναι απαραίτητη, επειδή τα μοντέλα είναι ικανά να προσομοιώσουν την κατάσταση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής για την οποία καταρτίζεται το Διαχειριστικό Σχέδιο Υδάτων. Επιπροσθέτως, τα μοντέλα μπορούν να περιγράψουν τη χημική κατάσταση των λεκανών απορροής, λαμβάνοντας υπόψιν τις σημειακές και διάχυτες ρυπαντικές πιέσεις που υπάρχουν στην περιοχή. Τέλος, τα μοντέλα

έχουν τη δυνατότητα να «τρέξουν» σενάρια για τη μελλοντική κατάσταση στις λεκάνες απορροής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται δυνατή η θέσπιση περιβαλλοντικών μέτρων και στόχων. Το μοντέλο SWAT θεωρείται ότι ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις που επιβάλλει η Οδηγία για τα νερά (Dilks et al., 2003; Dilks et al., 2005).

1.2. Ανάλυση του προβλήματος – Σκοπός της εργασίας

Η Κρήτη, η οποία βρίσκεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, αντιμετωπίζει προβλήματα υπερεκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, κακής διαχείρισης αυτών και κίνδυνο ερημοποίησης μεγάλων εκτάσεων εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής (Koutroulis et al., 2013). Για τους παραπάνω λόγους υπάρχει επιτακτική ανάγκη κατανόησης της επίδρασης των κλιματικών διαφοροποιήσεων και των πρακτικών χρήσεων γης (αγροτική εκμετάλλευση, κτηνοτροφική δραστηριότητα κλπ.) σε σχέση με τους υδατικούς πόρους του νησιού.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, βάσει των παραπάνω, είναι η μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη, έτσι ώστε να είναι εφικτή η κατανόηση του υδραυλικού ισοζυγίου της περιοχής και να δημιουργηθεί κατ'επέκταση ένα αξιόπιστο διαχειριστικό εργαλείο των υδατικών πόρων της περιοχής. Επιπλέον, γίνεται μοντελοποίηση της γεωχημείας της λεκάνης απορροής για να αξιολογήσουμε τις επιπτώσεις των ρυπαντικών φορτίων από αγρο-κτηνοτροφικές δραστηριότητες στα επιφανειακά και υπόγεια νερά. Τέλος, εφαρμόζεται και αξιολογείται το καρστικό μοντέλο της αποφόρτισης των πηγών της λεκάνης απορροής (Μεσκλά και Αγιά), το οποίο λειτουργεί για δύο καρστικούς σχηματισμούς (Nikolaidis et al., 2013).

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Περιβαλλοντικά Μοντέλα

Σε μια λεκάνη απορροής ποταμού λαμβάνουν χώρα ποικίλες φυσικοχημικές διεργασίες, οι οποίες μπορούν να αναπαρασταθούν από περιβαλλοντικά μοντέλα. Τις τελευταίες δεκαετίες, η μεγάλη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη και βελτίωση δεκάδων μοντέλων, τα οποία μπορούν γρήγορα, με μεγάλη ακρίβεια και σημαντική ευελιξία στις ρυθμίσεις τους να πραγματοποιήσουν την αναπαράσταση και μελέτη του φυσικού συστήματος μιας λεκάνης απορροής. Το μεγάλο πλεονέκτημα των περιβαλλοντικών μοντέλων είναι η δυνατότητα αφαίρεσης των λιγότερων σημαντικών στοιχείων που συνθέτουν τη λεκάνη απορροής και απλοποίησης της μελέτης του συστήματός της, χωρίς βεβαίως να χάνεται η ουσία του περιβαλλοντικού συστήματος.

Εν γένει, υπάρχουν δύο κύριες συνιστώσες στις οποίες στηρίζεται η ανάπτυξη των περιβαλλοντικών μοντέλων:

- 1) Η βελτίωση του βαθμού κατανόησης των πολύπλοκων υδρολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στο σύστημα και
- 2) Ο έλεγχος της απόκρισης του συστήματος.

Επιπλέον, τα ερευνητικά μοντέλα είναι πιο περίπλοκα από τα μοντέλα ελέγχου και εφαρμόζονται συχνά, καθώς τα δεδομένα του πεδίου δεν επαρκούν για την εκτίμηση των σεναρίων (Starfield & Cundall, 1988).

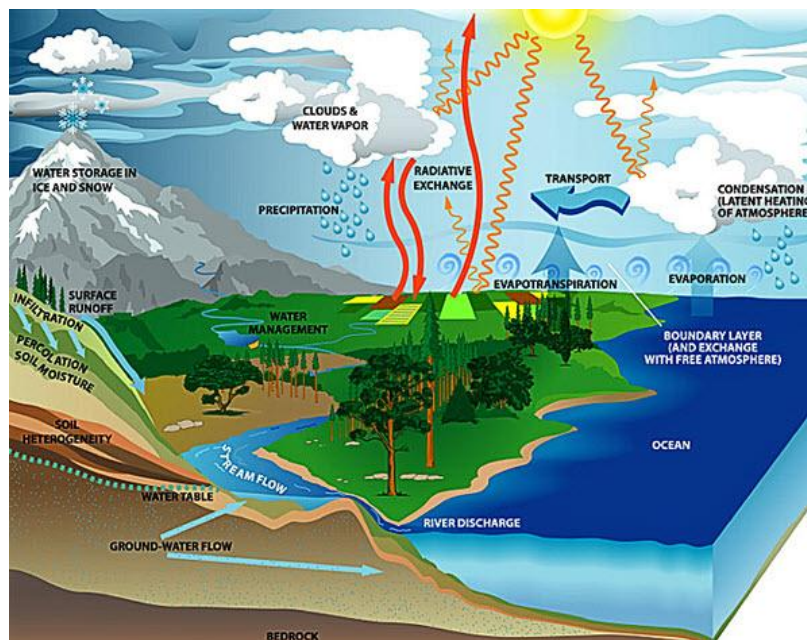
Τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία προηγουμένως (τις περασμένες δεκαετίες) χρησιμοποιούνταν για την αντιμετώπιση προβλημάτων ποιότητας των υδάτων, εφαρμόζονται σήμερα για να προσομοιώσουν όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους (Van Grinsven et al., 1995). Αυτά τα προβλήματα περιλαμβάνουν την προσομοίωση των υδραυλικών απορροών, των στερεοπαροχών, των συγκεντρώσεων χημικών ενώσεων σπουδαίων για την οικολογική κατάσταση των υδάτων (N, P) και την προσομοίωση των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων (Cr, As, Pb κ.α.) σε υδάτινους αποδέκτες. Επίσης, τα μαθηματικά μοντέλα είναι πολύ σημαντικό εργαλείο για τη δημιουργία διαχειριστικών σχεδίων και για τη λήψη αποφάσεων, επειδή μπορούν να προβλέψουν, με κάποιο βαθμό αβεβαιότητας, την απόκριση του συστήματος σε διάφορα σενάρια (πλημμύρες, πυρκαγιές, ρύπανση από αγροβιομηχανικά απόβλητα, υπεράντληση υδάτων, μείωση βροχοπτώσεων κλπ.). Ο βαθμός αβεβαιότητας κάθε μοντέλου σχετίζεται με την ατελή κατανόηση των διεργασιών που διέπουν το υδρολογικό σύστημα, όπως επίσης με την έλλειψη πλήρους γκάμας δεδομένων. Ένας αποτελεσματικός συνδυασμός για την εκτίμηση της ποσότητας και ποιότητας των υδάτων είναι τα καταμετρημένα υδρολογικά μοντέλα και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ, GIS) λόγω της πολυπλοκότητας των υδρολογικών διεργασιών (Di Luzio et al., 2004). Σε κάθε περίπτωση εφαρμογή ενός περιβαλλοντικού μοντέλου, όμως, είναι απολύτως απαραίτητη η προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού ενδιαφέροντος και, στη συνέχεια, η επαλήθευση της προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα λόγω της μοναδικότητας της κάθε λεκάνης.

2.2. Υδρολογικά μοντέλα

2.2.1. Ορισμοί και στάδια κατάστρωσης ενός υδρολογικού μοντέλου

Μοντέλο είναι μια μαθηματική περιγραφή (απεικόνιση) της συμπεριφοράς ενός φυσικού συστήματος. Επίσης, είναι ένα νοητό κατασκευάσμα, το οποίο περιγράφει, πιστοποιεί και αναπαράγει τη συμπεριφορά και απόκριση φυσικών, χημικών ή βιολογικών συστημάτων με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων (Schnoor, 2003).

Ακολουθως, ένα υδρολογικό μοντέλο αποτελείται από μαθηματικές σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, μετεωρολογικά, χημικά κ.α.) και από λογικές υποθέσεις αναφορικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου. Σκοπός ενός τέτοιου μοντέλου είναι η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών στη ζητούμενη από το χρήστη χωρική και χρονική κλίμακα. Βεβαίως, ένα υδρολογικό μοντέλο λαμβάνει υπόψιν αρκετές παραδοχές για να εφαρμοστεί.



Εικόνα 1.1: Υδρολογικές διεργασίες και κύκλος του νερού (Πηγή: <http://intelligentdesignscience.wordpress.com/>)

Ανάμεσα στα υδρολογικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας υδατικών σωμάτων είναι τα ακόλουθα:

- HSPF (Hydrological Simulation Program – Fortran) (Johanson et al., 1980; Bicknell et al., 2001), το οποίο έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας προσομοίωσης και αστικών περιοχών,
- MIKE – SHE (European Hydrological System Model) (Refsgaard 1997; Demetriou and Punthakey, 1998),

- ANSWERS – Continuous (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – Continuous) (Beasley et al., 1980),
- ETD (Enhanced Trickle – Down Model) (Schoor et al., 1984; Nikolaidis et al., 1988), το οποίο έχει τη δυνατότητα επαρκούς περιγραφής όλων των τύπων υδρολογικών συστημάτων σε συστήματα απορροής και αποστράγγισης,
- AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) (Young et al., 1987),
- MT3D (Modular 3-D Multi-Species Transport Model) (Zheng, 1990),
- SURFER (Golden Software Inc., 1989),
- MODFLOW (Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground – Water Flow Model) (Harbaugh and McDonald, 1996),
- ILWAS (Integrated Lake – Watershed Acidification Study) (Chen et al., 1984),
- TMWAM (Turkey – Mersey Watershed Acidification Model) (Lam et al., 1988; Bobba and Lam, 1990),
- RAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation) (Kamari, 1985),
- SWIM (Soil and Water Integrated Model) (Krysanova et al., 1998),
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2002; Gassman et al., 2007; Oeurng et al., 2011), το οποίο είναι κατάλληλο για την προσομοίωση λεκανών απορροής, οι οποίες βρίσκονται σε δασικές και αγροτικές εκτάσεις.

Η δημιουργία και λειτουργία ενός υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Chong – yu, 2002):

1. Επιλογή του τρόπου προσομοίωσης (Conceptualization)
2. Κωδικοποίηση – δημιουργία μοντέλου
3. Βαθμονόμηση μοντέλου (Calibration)
4. Επαλήθευση μοντέλου (Verification)
5. Αξιοπιστία μοντέλου (Validation)
6. Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)
7. Ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty analysis)
8. Εφαρμογή μελλοντικών σεναρίων στο μοντέλο.

2.2.2. Κατηγοριοποίηση υδρολογικών μοντέλων

Η διάκριση των υδρολογικών μοντέλων σε κατηγορίες μπορεί να γίνει βάσει της χρονικής διακριτότητας, της χωρικής κλίμακας, της στοχαστικότητας του μοντέλου και του βαθμού προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Ακολουθως, παραθέτουμε την αναλυτική περιγραφή των διαφόρων κατηγοριών υδρολογικών μοντέλων:

- * Κατηγοριοποίηση με κριτήριο τη χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα ενός υδρολογικού μοντέλου σχετίζεται άμεσα με το σκοπό του. Συγκεκριμένα, μοντέλα τα οποία εφαρμόζονται για διαχειριστικούς σκοπούς υδατικών πόρων χρησιμοποιούν μηνιαία ή, κατ' ελάχιστον, ημερήσια κλίμακα. Από την άλλη πλευρά,

πλημμυρικά ή υδρολογικά – υδροδυναμικά μοντέλα χρησιμοποιούν μικρότερη χρονική κλίμακα, με ελάχιστη την κλίμακα λεπτού και μέγιστη την ημερήσια κλίμακα.

Με κριτήριο αναφοράς τη χρονική διακριτότητα, τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται σε δύο τύπους:

1. Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος

Αυτά τα μοντέλα περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

2. Συνεχή μοντέλα

Χαρακτηριστικό ενός συνεχούς μοντέλου είναι η ικανότητα περιγραφής της διαχρονικής εξέλιξης του υδατικού ισοζυγίου μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (Μαμάσης, 2007; Παλαιολόγος, 2010)

* Κατηγοριοποίηση με κριτήριο τη χωρική κλίμακα

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες σχηματοποίησης και παραμετροποίησης βάσει της χωρικής τους διακριτότητας (ακρίβεια), η οποία αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό τους. Επιπλέον, τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις σημειακές διεργασίες σε επιφανειακές, με ολοκλήρωση των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, απορροή, κατείσδυση κ.α.) και με ολοκλήρωση των παραμέτρων οι οποίες περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε πεπερασμένη χωρική κλίμακα. (Szilagyi et al., 1999)

Ακολούθως παρουσιάζονται οι κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χωρική κλίμακα (Schnoor, 2003):

1. Αδιαμέριστα μοντέλα (lumped)

Οι παράμετροι του μοντέλου έχουν την ίδια τιμή σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης απορροής και οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια. Σχετικά με την απορροή στην έξοδο της λεκάνης, αυτή εξάγεται βάσει των κύριων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.

2. Ημι-κατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed)

Γίνεται διάκριση της λεκάνης απορροής σε επιμέρους υπολεκάνες (φυσικές ή χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά) και οι χρονοσειρές φόρτισης καθώς και οι τιμές παραμέτρων λαμβάνουν διαφορετικές τιμές στις διαφορετικές υπολεκάνες. Η απορροή στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει σε συνάρτηση με τους υπολογισμούς που γίνονται σε κάθε υπολεκάνη.

3. Ημι-αδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped)

Θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες, οι οποίες δέχονται διαφορετικού μεγέθους φορτίσεις, αν και οι τιμές των παραμέτρων που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες. Αυτός ο τύπος μοντέλων αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημι-κατανεμημένης σχηματοποίησης (Ghavidelfar et al., 2011).

4. Πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (distributed)

Το φυσικό σύστημα τέμνεται σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες (κύτταρα), οι οποίες αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα. Στα τελευταία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων.

- * Κατηγοριοποίηση με κριτήριο τη στοχαστικότητα του μοντέλου

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες βάσει της στοχαστικής δομής των μεταβλητών τους:

1. Προσδιοριστικά μοντέλα

Δεν υπάρχει καμία στοχαστική δομή των δεδομένων που εισάγονται στις μεταβλητές του μοντέλου. Τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα της πλήρους προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου και των συνιστωσών του. Επιπλέον, αποτελούν μια αρκετά αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος δίνοντας σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα εξόδου. Ένα μειονέκτημα των προσδιοριστικών μοντέλων είναι η έλλειψη πιθανολογικής διάστασης στα αποτελέσματα, που προκύπτει από το μονοσήμαντο χαρακτήρα των αποτελεσμάτων.

2. Στοχαστικά μοντέλα

Στηρίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγική στατιστικής και ενδείκνυνται για περιπτώσεις, στις οποίες η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί (με μεγάλη βεβαιότητα) ανεξάρτητη από κάθε άλλη επανάληψη του ίδιου φαινομένου. Παραδείγματος χάριν, η αιχμή ενός πλημμυρικού φαινομένου ενός ποταμού θεωρείται ανεξάρτητη από κάθε άλλη (επόμενη ή προηγούμενη) πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Είναι ουσιώδες να αναφερθεί ότι τα στοχαστικά μοντέλα δε δίνουν μονοσήμαντα αποτελέσματα, όμως ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Επίσης, τα στοχαστικά μοντέλα εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια και διατηρούν στοιχειώδη συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

- * Κατηγοριοποίηση με κριτήριο το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

Τα υδρολογικά μοντέλα διαχωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες με κριτήριο το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών:

1. Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)

Είναι κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα, τα οποία αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας στηριζόμενα επιστημονικά από τους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής). Παρ'όλα αυτά έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι ένα πολύπλοκο μοντέλο περιγραφής των φυσικών διεργασιών είναι σχεδόν αδύνατον να στηρίζεται σε μια φυσική βάση, επειδή οι ενδιάμεσες λεπτομερείς διεργασίες του κύκλου του νερού και της μεταφοράς των

θρεπτικών δεν είναι τελείως γνωστές. Η χρήση ενός μοντέλου φυσικής βάσης ενδείκνυται, κυρίως, σε επίπεδο λεκάνης απορροής λόγω της μεγάλης απαίτησης του σε δεδομένα.

2. Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual)

Διατυπώνουν παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα (και όχι φυσικούς νόμους) που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες στην μικρότερη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από τη σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Επιπλέον, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models). Ο λόγος είναι ότι το υδραυλικό ανάλογο που εφαρμόζουν, είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους (Carlaw, 2000)

3. Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box)

Τα συγκεκριμένα μοντέλα χρησιμοποιούν διαδοχικούς μη γραμμικούς μετασχηματισμούς σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δύο τύπους μοντέλων που οι εξισώσεις αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου. Το πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης.

2.2.3. Βαθμονόμηση και επαλήθευση υδρολογικού μοντέλου

2.2.3.1. Ορισμός βαθμονόμησης

Βαθμονόμηση (calibration) είναι η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του μοντέλου να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις αντίστοιχες τιμές πεδίου (τιμές παρατήρησης). Προσομοιωμένες αποκρίσεις μπορεί να αναφέρονται σε παροχές νερού, εξατμισοδιαπνοή, στερεοπαροχές και φορτία N και P. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών δεδομένων με τα προσομοιωμένα. Στο θέμα της βαθμονόμησης οι παράμετροι που περιγράφουν τις εσωτερικές διεργασίες δεν είναι πάντοτε γνωστές, οπότε ζητείται βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του μοντέλου με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. Γνωρίζοντας ότι σε ένα μοντέλο φυσικής βάσης όλες οι παράμετροι είναι θεωρητικά μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, μια τέτοια στρατηγική αναιρεί το χαρακτηρισμό του μοντέλου ως φυσικής βάσης, αφού η προσαρμογή έστω και μιας παραμέτρου κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης καθιστά την όλη προσέγγιση εννοιολογική (Ευστρατιάδης, 2008). Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να γίνει προσομοίωση των διαφόρων φυσικών διεργασιών με υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Αυτό γίνεται περισσότερο εφικτό όταν διατίθενται πολλά δεδομένα πεδίου, που όμως η συλλογή τους απαιτεί χρόνο, εξειδικευμένες γνώσεις και έχει σημαντικό κόστος. Επιπροσθέτως, η δυσκολία στη βαθμονόμηση μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές παραμέτρους του μοντέλου που στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας και προσαρμόζονται εμπειρικά.

2.2.3.2. Τύποι βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να γίνει χειροκίνητα, αυτόματα ή ημιαυτόματα.

- * Χειροκίνητη βαθμονόμηση

Η χειροκίνητη βαθμονόμηση βασίζεται στην διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγονται από τον χρήστη και δε συνιστά μια αυστηρά συστηματική διαδικασία. Συγκεκριμένα, ο χρήστης ελέγχει πλήρως την διαδικασία αφού μετά από μία αλλαγή στις παραμέτρους ελέγχει εμπειρικά μέσω γραφημάτων ή στατιστικά με χρήση κάποιου δείκτη ή δεικτών τα αποτελέσματα και αποφαινεται για την επιτυχία (ποσοστό επιτυχίας) της προσομοίωσης. Παρόλο που η διαδικασία είναι

ιδιαίτερα επίπονη, ιδιαίτερα όταν το μοντέλο είναι πολυπαραμετρικό, εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα δεδομένου ότι ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές τιμές παραμέτρων.

- * Αυτόματη βαθμονόμηση

Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις αποκρίσεις πεδίου της λεκάνης απορροής, το οποίο θεωρείται ως η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Ο συγκεκριμένος τύπος βαθμονόμησης προσφέρει τη δυνατότητα πολλαπλών δοκιμών με τυχαίες αλλαγές στις παραμέτρους με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να παρουσιάζουν την επιθυμητή συνέπεια με τα παρατηρημένα. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Αν και η μέθοδος υπόσχεται την εύρεση της βέλτιστης λύσης, χρειάζεται προσοχή ώστε να μην επιτραπεί η ανεξέλεγκτη και χωρίς περιορισμούς μεταβολή παραμέτρων με σκοπό την επίλυση αποκλειστικά ενός μαθηματικού προβλήματος που δεν υπακούει στους νόμους του φυσικού συστήματος.

- * Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση αποτελεί μια διαδραστική μέθοδο που συνδυάζει τις δύο προηγούμενες. Στη διαδικασία αυτή ο χρήστης παρακολουθεί την διαδικασία βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σ' αυτήν μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να οδηγήσει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η εγκυρότητα της προσομοίωσης και ταυτόχρονα επιτρέπεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του μοντέλου να επιτύχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σε μικρό χρόνο. Επομένως, αυτή η μέθοδος θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη και ενδεικνυόμενη ιδιαίτερα στην περίπτωση σύνθετων σχημάτων, όπου υπάρχει έντονη αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων.

Ωστόσο, για να θεωρηθεί μία προσομοίωση επιτυχής, δεν αρκεί η ικανοποιητική, ρεαλιστική και με φυσικό νόημα μεταβολής των παραμέτρων βαθμονόμηση του μοντέλου. Είναι αναγκαίο να διερευνηθεί αν το μοντέλο διαθέτει επαρκή

προγνωστική ικανότητα, δηλαδή αν είναι ικανό να αναπαράγει ένα ευρύ φάσμα των αποκρίσεων της λεκάνης (π.χ. υγρά και ξηρά έτη) και σε περισσότερες της μίας θέσεις ποταμού με ικανοποιητική ακρίβεια. Για το λόγο αυτό, ένα ανεξάρτητο δείγμα παρατηρήσεων που δεν χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση κατά την βαθμονόμηση και αναφέρεται σε διαφορετική χρονική περίοδο ή διαφορετική διατομή ποταμού εντός της λεκάνης, συγκρίνεται εκ των υστέρων με το αντίστοιχο προσομοιωμένο δείγμα (Refsgaard, 1997). Αυτή η σύγκριση, που αποτελεί την διαδικασία της επαλήθευσης, κρίνει τελικά την επιτυχία της προσομοίωσης και καθορίζει την προγνωστική ικανότητα, που είναι επιβεβλημένο να είναι ικανοποιητική για ένα μοντέλο που έχει καταστρωθεί, ώστε αργότερα να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση εναλλακτικών διαχειριστικών πρακτικών σε τμήματα της λεκάνης απορροής.

2.2.3.3. Ορισμός επαλήθευσης

Η επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν.

Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από την βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως διαχωρισμός δεδομένων (data - split), και για να έχει νόημα θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του

συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί), ώστε να εξασφαλιστεί ότι στη λεκάνη ισχύουν συνθήκες στασιμότητας (stationarity).

2.2. Προηγούμενες μελέτες για τη λεκάνη του Κερίτη

Κατά το παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες και εργασίες σχετικά με τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη. Το ενδιαφέρον των μηχανικών και άλλων επιστημόνων εστιάζεται στην περιοχή του Κερίτη, καθώς υπάρχει ανάγκη κάλυψης των υδρευτικών και αρδευτικών απαιτήσεων της περιοχής αλλά και ευρύτερα της περιοχής που εκτείνεται βόρεια και ανατολικά της λεκάνης απορροής (τουριστική ζώνη από Πλατανιά έως Χανιά, πόλη Χανίων κ.α.). Εκτός αυτών, υπάρχει ενδιαφέρον για την οικολογική και χημική κατάσταση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων της λεκάνης. Τα συμπεράσματα κάποιων παλαιότερων μελετών παρατίθενται ακολούθως.

Στη «Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη – Θερίσσου» των Τσαϊμού (Διπλωματική Εργασία) και Δρ. Καρατζά, 2009, εξάγονται ως συμπεράσματα η πολυπλοκότητα του υδρογεωλογικού συστήματος των λεκανών, λόγω του έντονου τεκτονισμού της περιοχής και τονίζεται ότι οι πηγές του συστήματος τροφοδοτούνται από το καρστικό σύστημα που ξεκινά από τα Λευκά Όρη. Αναφορικά με τη χημική, οικολογική και βιολογική κατάσταση του Κερίτη, συμπεραίνονται ότι: 1) Το νερό της περιοχής είναι καλής ποιότητας και παρουσιάζει αυξημένες ποσότητες σε νάτριο και μαγνήσιο, 2) Το νερό του Κερίτη δεν είναι ρυπασμένο από βαρέα μέταλλα σε σχέση με άλλους ελληνικούς ποταμούς, 3) Υπάρχει βιολογική ρύπανση στις λεκάνες, κυρίως, στα βόρεια τμήματα, εξαιτίας της έλλειψης

ολοκληρωμένου συστήματος αποχετευτικών συστημάτων, 4) Οι εισροές σε N και P στη λεκάνη απορροής Κερίτη είναι αντίστοιχα 944 tn/yr και 302 tn/yr, ενώ οι εκροές είναι 75 tn/yr N και 6 tn/yr P. Τέλος, επισημαίνεται η μη ύπαρξη άμεσου προβλήματος ρύπανσης του Κερίτη, αλλά πιθανή ρύπανση του ποταμού θα επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στη θάλασσα περιοχή όπου εκβάλλει (παροχή ποταμού στο Κυρτωμάδο 164 Mm³/yr).

Μια άλλη μελέτη, η «Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου και διαχείριση υδατικών πόρων της υδρολογικής λεκάνης του Κερίτη» (Χατζηευαγγέλου, 2005), υποστηρίζει ότι μπορεί να γίνει μεγαλύτερη εκμετάλλευση ποσοτήτων νερού από την Αγιά τους καλοκαιρινούς μήνες (1-1,5 Mm³/mo) και από τα Μεσκλά κατά τους χειμερινούς μήνες (περίπου 4 Mm³/yr). Επίσης, το διαχειριστικό μοντέλο Ribasim έδειξε ότι η ύδρευση της πόλης των Χανίων μπορεί να εξασφαλιστεί ολοκληρωτικά από τα Μεσκλά κατά το χειμώνα ελαττώνοντας τη χειμερινή απόληψη από την Αγιά. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει εμπλουτισμός των αποθεμάτων της Αγιάς κατά τους χειμερινούς μήνες, ούτως ώστε να είναι εφικτή η περαιτέρω εκμετάλλευση της κατά το καλοκαίρι. Επιπλέον, εξετάστηκε η επάρκεια ή μη του υδατικού δυναμικού για μια σημαντικά αυξημένη μελλοντική ζήτηση και το αποτέλεσμα ήταν ότι στους κρίσιμους μήνες (δηλ. την περίοδο των πολύ μεγάλων αρδευτικών αναγκών) υπάρχει υδατικό έλλειμμα περίπου 4 Mm³. Για την κάλυψη αυτού το ελλείμματος προτάθηκαν δύο λύσεις: Α) Αναρύθμιση πηγών Αγιάς. Αυτή η λύση ορίζει την αύξηση των απολήψεων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο - Αύγουστο από την Αγιά (3.300 L/s) και την παράλληλη μείωση των αντλήσεων από την Αγιά κατά το χειμώνα με περαιτέρω αξιοποίηση των υδάτων των Μεσκλών. Β) Κατασκευή φράγματος στα Μεσκλά. Το συγκεκριμένο φράγμα θα συγκεντρώνει τις χειμερινές εκροές των πηγών των Μεσκλών (περίπου 4 Mm³) τα οποία θα διανέμονται την καλοκαιρινή περίοδο για άρδευση.

Μια ακόμη σπουδαία εργασία για την περιοχή του Κερίτη, το «Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη – Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά» των Καθηγητών Νικολαΐδη και Καρατζά του Πολυτεχνείου Κρήτης μαζί με άλλους επιστήμονες θέτει ως μέτρα που πρέπει να ληφθούν: 1^ο) Αναρύθμιση των πηγών Αγιάς. Η ελάχιστη ετήσια εκφόρτιση των πηγών είναι 55 Mm³ και η σημερινή (δεδομένα 2008) αξιοποίηση των υδάτων είναι 30 Mm³. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει απόληψη επιπλέον 25 Mm³ χωρίς να χρησιμοποιήσουμε τα μόνιμα αποθέματα του υδροφορέα. Επιπλέον, οι μελετητές θέτουν ένα όριο ασφαλείας 10%, που μεταφράζεται σε αξιοποίηση επιπλέον 20 Mm³. 2^ο) Μείωση λιπασμάτων. Το Σχέδιο ορίζει ότι τα λιπάσματα (μη σημειακές πηγές ρύπανσης) πρέπει να χρησιμοποιούνται αυστηρά στην ποσότητα που χρειάζονται τα φυτά για τη θρέψη τους και ανάπτυξη και εφόσον λείπουν από το έδαφος.

2.3. Μοντέλο SWAT

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 καταναμημένο 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 δεν περιλαμβάνει την προσομοίωση μεμονομένων πλημμυρικών γεγονότων (Neitsch et al., 2002), αλλά λαμβάνει υπόψιν τις διεργασίες διαχείρισης στη λεκάνη απορροής καθώς και τις διεργασίες βροχόπτωσης – απορροής με υψηλό βαθμό χωρικής λεπτομέρειας χάρη στη διαίρεση της λεκάνης απορροής σε επιμέρους υπολεκάνες. Το μοντέλο SWAT παρέχει μεταξύ άλλων τη δυνατότητα:

1. προσομοίωσης της βροχόπτωσης και/ή της χιονόπτωσης μέχρι και 10 κλιμάκων υψομέτρου,
2. επαναπροσδιορισμού των εισαχθέντων δεδομένων για προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής και
3. πρόβλεψης των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.

2.3.1. Δεδομένα εισόδου του μοντέλου SWAT

Στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου περιλαμβάνονται το ανάγλυφο της περιοχής λεκάνης απορροής, οι χρήσεις γης, οι τύποι του εδάφους (ιδανικά της ακόρεστης ζώνης), οι χρονοσειρές με τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας του ανέμου καθώς και ηλιακής ακτινοβολίας (η απαίτηση των τριών τελευταίων εξαρτάται από τη μέθοδο προσομοίωσης της χρονοσειράς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής) για όλο το χρονικό διάστημα προσομοίωσης

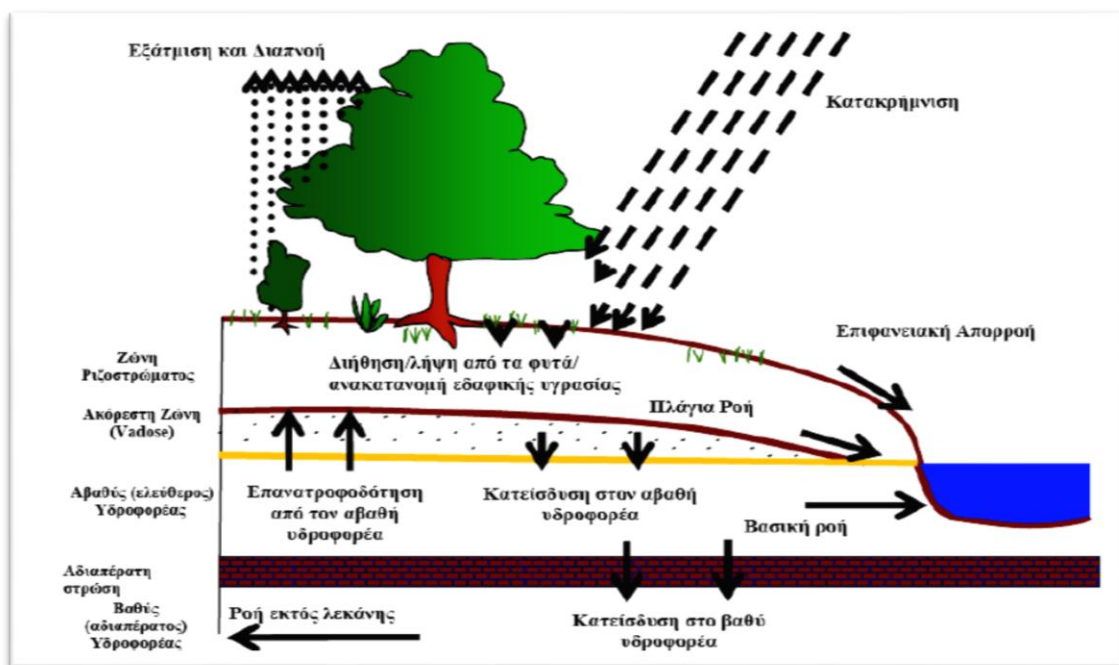
(Gassman et al., 2007b). Ο μέσος όρος της ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα που υπολογίζεται από τα δεδομένα που εισήχθησαν, χρησιμοποιείται για να καθοριστεί αν η βροχόπτωση πρέπει να προσομοιωθεί ως χιονόπτωση, ενώ η ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της ημερήσιας θερμοκρασίας του εδάφους και του νερού. Τα εισαχθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του κλίματος της περιοχής μελέτης με τη βοήθεια 13 μηνιαίων κλιματικών μεταβλητών, οι οποίες αναπτύχθηκαν μετά από χρόνια καταγραφή κλιματικών δεδομένων και είναι καταγεγραμμένες σε πίνακες που διαθέτει το μοντέλο.

2.3.2. Μεθοδολογία του μοντέλου

Στο μοντέλο SWAT μας ενδιαφέρει, κυρίως, να δούμε πως προσομοιώνεται ο υδρολογικός κύκλος. Εξάλλου αυτός ορίζει την ποσότητα νερού,

φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Οι συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου απεικονίζονται στην Εικόνα 2.2 και προσομοιώνονται από το μοντέλο στη χωρική κλίμακα της Υδρολογικής Μονάδας Απόκρισης (HRU) όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.2: Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT (Πηγή: Neitsch et al., 2005)

Το SWAT δέχεται ημερήσια δεδομένα για τα κατακρημνίσματα τα οποία δέχεται η λεκάνη απορροής. Η κατακρήμνιση εμφανίζεται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης, ανάλογα με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Η χιονόπτωση σχηματίζει στρώση χιονιού στο έδαφος, το οποίο τήκεται (λιώνει) όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέψει. Η δε συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Neitsch et al., 2005).

Το νερό της βροχής, που αναλογεί σε κάθε υπολεκάνη, είναι αυτό που έχει καταγραφεί από εκείνον τον μετεωρολογικό σταθμό (μεταξύ αυτών που ορίζει ο χρήστης), που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο βάρους της. Το διαθέσιμο νερό, είτε διηθείται στο έδαφος, όπου διοδεύεται στις διαφορετικές στρώσεις (μέχρι 10), είτε απορρέει επιφανειακά. Το ποσοστό του νερού απορροής ρυθμίζεται από τον συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης. Η εκτίμησή του πραγματοποιείται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) κατά SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται (διαπνοή), υφίσταται εδαφική εξάτμιση, κατεισδύει στον αβαθή υδροφόρα 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 υδροφορέας) 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:

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

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 H_2O)

Q_{surf} : η ημερήσια επιφανειακή απορροή την ημέρα i (mm H_2O)

E_a : η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή την ημέρα i (mm H_2O)

w_{seep} : η ποσότητα νερού που εξέρχεται από την ζώνη ριζοστρώματος και εισέρχεται στη ζώνη vadose την ημέρα i (mm H_2O)

Q_{gw} : η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H_2O)

2.3.3. Δημιουργία υδρολογικού ισοζυγίου

Το μοντέλο SWAT λαμβάνει υπόψιν όλες τις υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής απορροής, του κύκλου και της μεταφοράς των θρεπτικών, της ανάπτυξης της βλάστησης, των χρήσεων γης καθώς και της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο υπολεκάνης (subbasin). Επιπλέον, η λεκάνη απορροής υποδιαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες βάσει του αριθμού των παραποτάμων που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής. Η κάθε υπολεκάνη διαχωρίζεται στη συνέχεια περαιτέρω σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης (Hydrological Response Units, HRUs), καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση από ένα μοναδικό συνδυασμό εδάφους (soil), κλίσης γης (land slope) και χρήσης γης (land use).

Η προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου πραγματοποιείται αρχικά για καθεμία υδρολογική μονάδα απόκρισης ξεχωριστά, στην οποία συνυπολογίζονται το ποσοστό της βροχόπτωσης που συγκρατείται από το φύλλωμα των φυτών και των δέντρων, ο τρόπος καταμερισμού της βροχόπτωσης, το νερό από το λιώσιμο του χιονιού, το νερό άρδευσης μεταξύ της επιφανειακής απορροής και της διήθησης, η αναδιανομή του νερού στο προφίλ του εδάφους, η εξατμισοδιαπνοή, η υπεδάφια απορροή, καθώς και η ροή που επιστρέφει από τους ρηχούς υδροφορείς.

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής, των κύκλων των θρεπτικών, της παραγωγής φερτών υλών και της ανάπτυξης των φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης (HRU), τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συνόλου της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα, οι ροές των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης αθροίζονται και στη συνέχεια διοδεύονται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού (Williams, 1969), είτε τη μέθοδο Muskingum (Neitsch et al., 2005). Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος. Επίσης, αθροίζονται τα φορτία ή οι συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα θρεπτικά, τα φυτοφάρμακα και τα βακτήρια των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης (συμπεριλαμβανομένης της απομάκρυνσης) και στη συνέχεια διοδεύονται μέσω των καναλιών, των λιμναζόντων νερών, των υγροτόπων και των ρεζερβουάρ για να καταλήξουν στην έξοδο της λεκάνης

απορροής. Στους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις στη ροή και τα φορτία λόγω των σημειακών πηγών αλλά και των πιέσεων από τις παρακείμενες αστικές περιοχές (Gassman et al., 2007).

2.3.4. Διαχειριστικές πρακτικές στο μοντέλο

Το μοντέλο SWAT επιτυγχάνει μια ικανοποιητικά λεπτομερειακή προσομοίωση των διαχειριστικών πρακτικών στην αγροτική γη, καθώς οι βασικότερες από αυτές όπως η σπορά, λίπανση, άροση, άρδευση, συγκομιδή, βόσκηση κ.α., μπορούν να οριστούν εύκολα από το χρήστη για κάθε υδρολογική μονάδα. Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού της κατάλληλης ημερομηνίας στην οποία πραγματοποιείται η κάθε διαχειριστική πρακτική στη διάρκεια του έτους. Επιπροσθέτως, ορίζονται λεπτομέρειες εφαρμογής της κάθε διαχειριστικής πρακτικής.

2.4. Καρστικό Μοντέλο δύο ταμιευτήρων

Το (μορφοποιημένο) καρστικό μοντέλο (Nikolaïdis et al., 2013) ενός ανώτερου (upper) και ενός κατώτερου (lower) ταμιευτήρα σχεδιάστηκε και χρησιμοποιείται για να είναι δυνατή η προσομοίωση της συνεισφοράς της εκτεταταμένης καρστικής περιοχής στην υδραυλική αποφόρτιση των πηγών Αγιάς και Μεσκλών. Το συγκεκριμένο καρστικό μοντέλο αποτελεί μια μορφοποιημένη έκδοση του καρστικού μοντέλου απορροής το οποίο περιγράφηκε από τους Τζωράκη και Νικολαΐδη (2007) και από τους Κουργιαλά κ.α. (2010). Οι κύριες τροποποιήσεις που δέχτηκε το μοντέλο σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις είναι:

- A. Η παροχή εισόδου του μοντέλου είναι η παροχή του βαθέος υδροφορέα (deep groundwater) προερχόμενη από το μοντέλο SWAT και
- B. Ο σχηματισμός ενός ισοζυγίου $\text{NO}_3\text{-N}$ το οποίο θέτει ως παραδοχή ότι τα NO_3 είναι συντηρητικές ουσίες (δε συμβαίνει απονιτροποίηση, ούτε καμία άλλη αντίδραση στην οποία συμμετέχουν νιτρικά ιόντα) μέσα στο καρστ.

Το υδραυλικό ισοζύγιο όπως περιγράφεται στο παρόν καρστικό μοντέλο είναι:

$$Q_{karstic} = (1 - a2) * Q_1 + Q_2 \text{ [2.4.1.]}$$

Όπου

$Q_{karstic}$: Η συνολική απορροή του καρστ (m^3/s)

$(1 - a2) * Q_1$: Ο όρος του πάνω ταμιευτήρα

Q_2 : Ο όρος του κάτω ταμιευτήρα

Για να φθάσουμε στην εξίσωση 2.4.1. πρέπει να ξεκινήσουμε από τα ισοζύγια μάζας ύδατος (υδραυλικά ισοζύγια) του ανώτερου και κατώτερου ταμιευτήρα. Ισχύουν

Υδραυλικό ισοζύγιο ανώτερου ταμιευτήρα:

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_{in,1} - Q_1 \text{ [2.4.2.]}$$

Υδραυλικό ισοζύγιο κατώτερου ταμιευτήρα:

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_{in,2} - Q_2 \quad [2.4.3.]$$

Όπου

$$Q_{in,1} = \alpha_1 * Q_{in,deepGW} \quad [2.4.4.]$$

$$Q_{in,2} = (1 - \alpha_1) * Q_{in,deepGW} + \alpha_2 * Q_1 \quad [2.4.5.]$$

$$Q_1 = K_u * V_1 \quad [2.4.6.]$$

$$Q_2 = K_l * V_2 \quad [2.4.7.]$$

Με

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

α_1 : Λόγος της παροχής του καρστικού στον ανώτερο ταμιευτήρα,

α_2 : Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο ταμιευτήρα,

K_u : Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα (1/day),

K_l : Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα (1/day).

Για σταθερά $Q_{in,1}$ και $Q_{in,2}$ (ημερήσιο χρονικό βήμα) οι αναλυτικές λύσεις των διαφορικών εξισώσεων [2.4.2.] και [2.4.3.] είναι:

$$Q_1 = Q_{1,0} * e^{-K_u * t} + Q_{in,1} * (1 - e^{-\alpha_1 * K_u * t}) \quad [2.4.8.]$$

$$Q_2 = Q_{2,0} * e^{-K_l * (1 - \alpha_2) * t} + (1 - \alpha_1) * Q_{in,2} * (1 - e^{-K_l * (1 - \alpha_2) * t}) \quad [2.4.9]$$

Με παρόμοιο τρόπο το ισοζύγιο μάζας NO_3-N περιγράφεται ως εξής:

Ισοζύγιο NO_3-N ανώτερου ταμιευτήρα:

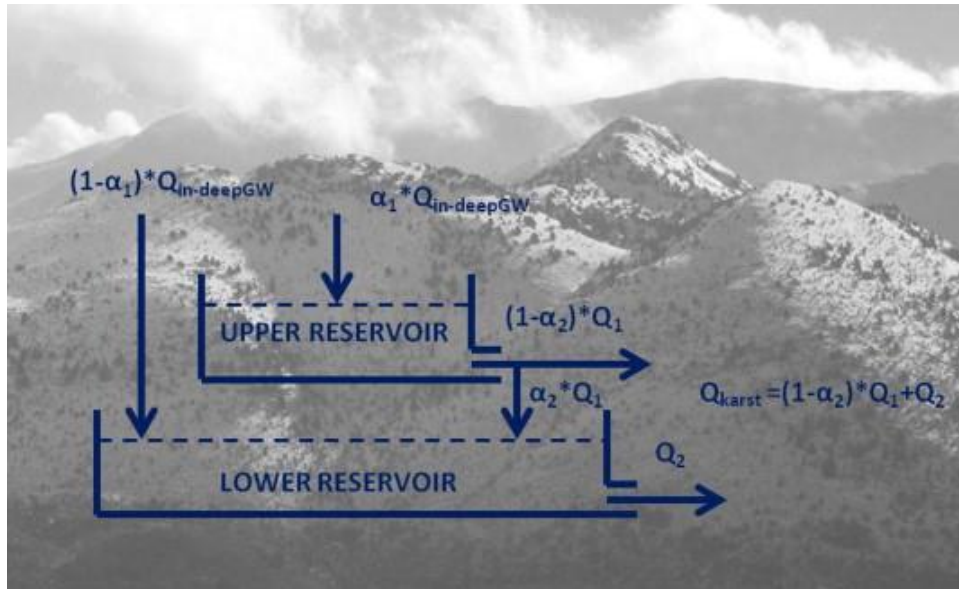
$$\frac{d(V_1 * C_1)}{dt} = \alpha_1 * Q_{in,1} * C_{in,1} - Q_1 * C_1 \quad [2.4.10.]$$

Ισοζύγιο NO_3-N κατώτερου ταμιευτήρα:

$$\frac{d(V_2 * C_2)}{dt} = (1 - \alpha_1) * Q_{in,deepGW} * C_{in,deepGW} + \alpha_2 * Q_1 * C_1 - Q_2 * C_2 \quad [2.4.11.]$$

Δεδομένου ότι ο όγκος των δύο ταμιευτήρων αντανakλά τον ημερήσιο όγκο ο οποίος συνεισφέρει στην αποφόρτιση των πηγών και δε σχετίζεται με το μόνιμο απόθεμα υδάτων που

υπάρχει στους καρστικούς σχηματισμούς κάτω από το επίπεδο των πηγών, εισήχθη ένας νέος παράγοντας, ο παράγοντας του βαθέος καρστ (deep karst factor). Ο παράγοντας βαθέος καρστ χρησιμοποιείται στην εξίσωση του κατώτερου ταμιευτήρα λαμβάνοντας υπόψιν την επιπλέον διάλυση των εισαγόμενων στο καρστ χημικών φορτίων. Με αυτό τον τρόπο παρέχει έναν υπολογισμό του συνολικού όγκου του καρστ.



Εικόνα 2.3: Εννοιολογική σχηματοποίηση του μορφοποιημένου καρστικού μοντέλου (Πηγή: Nikolaidis et al., 2013)

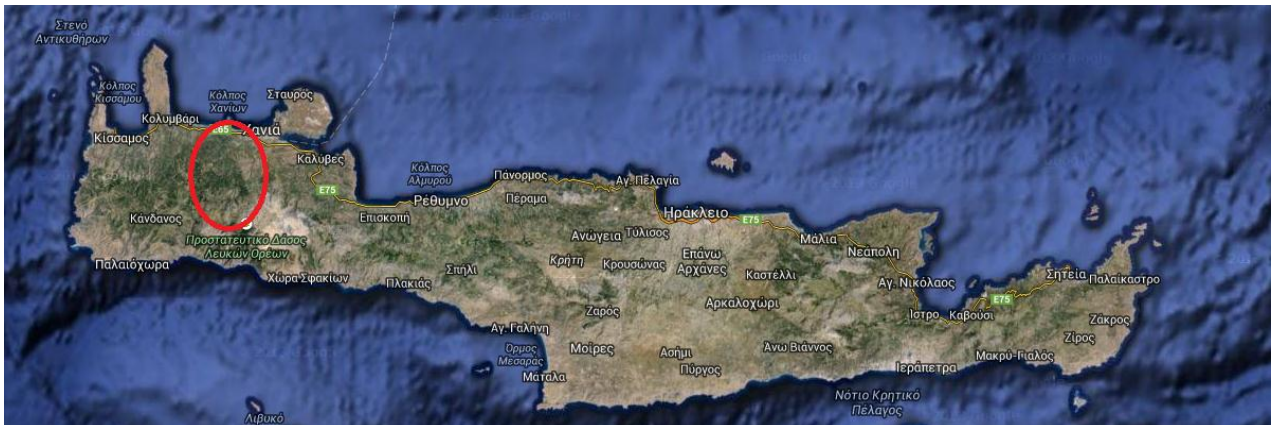
3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1. Γενικά

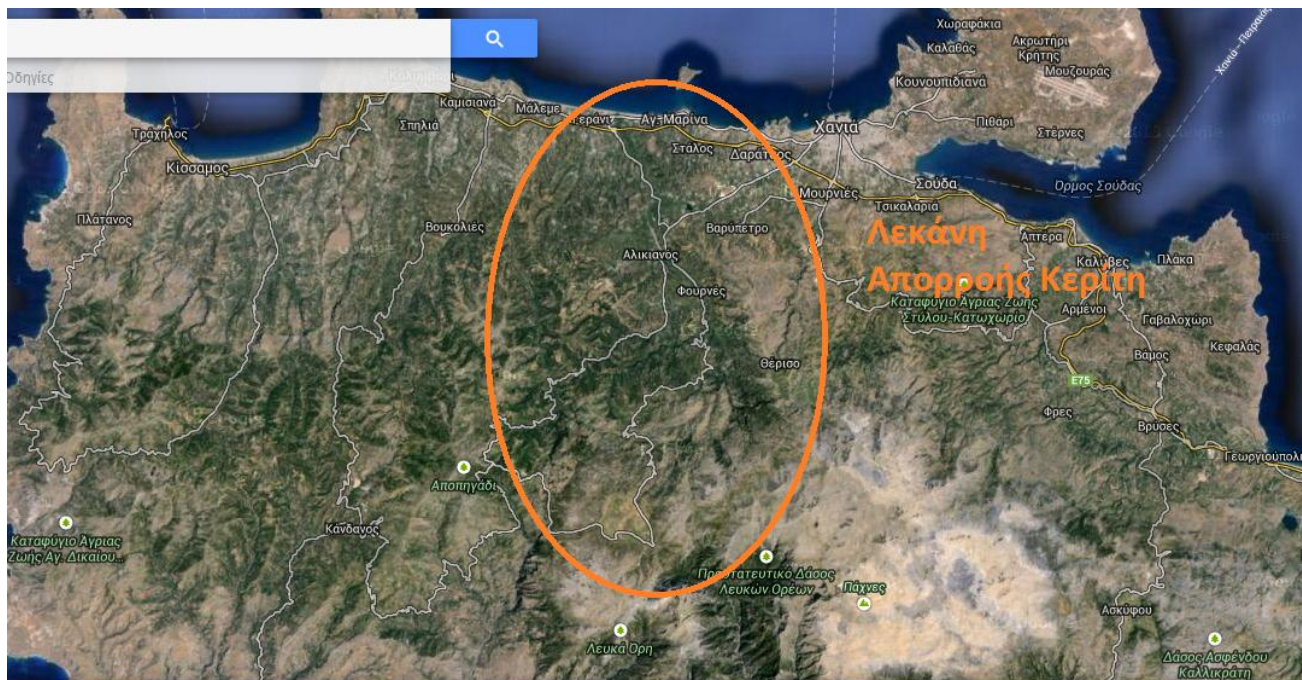
Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, η οποία ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης και διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Χανίων της Περιφέρειας Κρήτης. Συγκεκριμένα, η λεκάνη απορροής του Κερίτη βρίσκεται στα κεντρικά του Βόρειου τμήματος του Νομού Χανίων. Η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής μαζί με τις λεκάνες Κοιλιάρη και Θερίσσου έχουν μεγάλο μερίδιο συμβολής στη διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού της περιοχής του Ν. Χανίων. Άρα είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Κερίτη και τον τρόπο με τον οποίο κινούνται τα υπόγεια ύδατα έως ότου βγουν στις πηγές που βρίσκονται στη λεκάνη και ακολούθως διοχετευτούν στο ποτάμι του Κερίτη. Επιπλέον, είναι σημαντικό στην ανάλυση που κάνουμε, να αναφέρουμε ότι αρκετά τμήματα (ιδίως τα νότια) της λεκάνης του Κερίτη ανήκουν σε προστατευόμενες περιοχές (Natura 2009). Η συγκεκριμένη πληροφορία αναδεικνύει την οικολογική ευαισθησία της μελετώμενης λεκάνης και της προσοχής που πρέπει να δοθεί από τους αρμόδιους φορείς κατά τη διαχείριση του υδατικού δυναμικού της. (Nikolaidis & Karatzas, 2010)

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-1) παρουσιάζεται η Κρήτη και η περιοχή στην οποία βρίσκεται η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, ενώ στην εικόνα 3-2

παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής πιο συγκεκριμένα. Οι παραπάνω εικόνες είναι από δορυφορική λήψη.



Εικόνα 3.1: Η Κρήτη και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 3.2: Η θέση της λεκάνης απορροής στο Νομό Χανίων (Πηγή: Google Earth)

3.2. Γεωμορφολογία

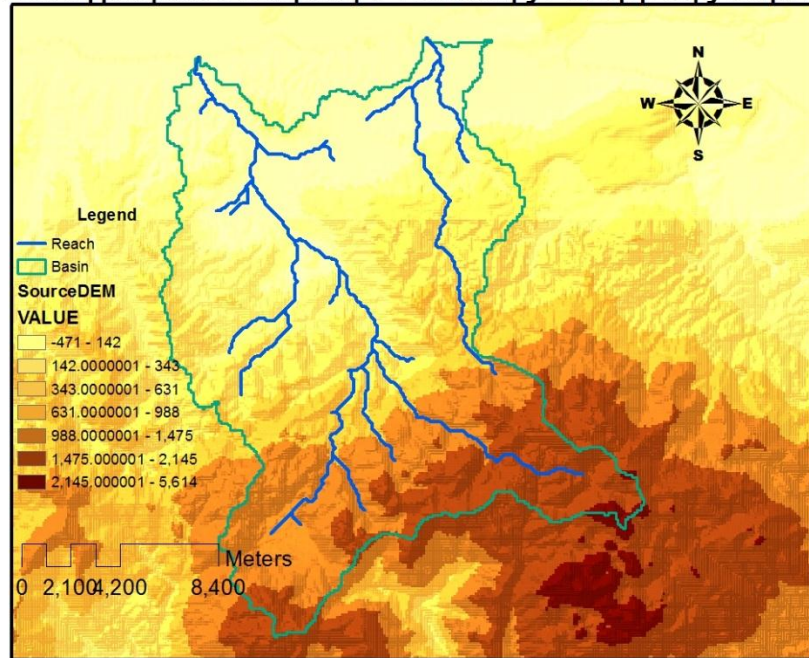
Η λεκάνη απορροής του Κερίτη βρίσκεται νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων και αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές υδρολογικές λεκάνες του Νομού. Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Κερίτη ξεκινάει να σχηματίζεται από τα Λευκά Όρη σε υψόμετρο περίπου 2100 m και φτάνει μέχρι το Κρητικό Πέλαγος, όπου τα νερά του ποταμού εκβάλλουν. Επιπλέον, οι εκβολές του ποταμού στον Πλατανιά και η λίμνη της Αγιάς είναι προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο Natura 2000. Η επιφάνεια που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής υπολογίζεται στα 180 km² με διεύθυνση τον άξονα Νότος-Βορράς. Απέχει από τα Χανιά περίπου 15 km και ανήκει διοικητικά στο δήμο Πλατανιά, κατά το μεγαλύτερο μέρος και στο δήμο Χανίων κατά ένα μικρό μέρος. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής υπάρχουν 19 οικισμοί: Αλικιανός, Βατόλακκος, Κουφός, Αγιά, Μεσκλά, Πλατανιάς, Λάκκοι (κ.α.-βλ. Εικόνα 3.3).



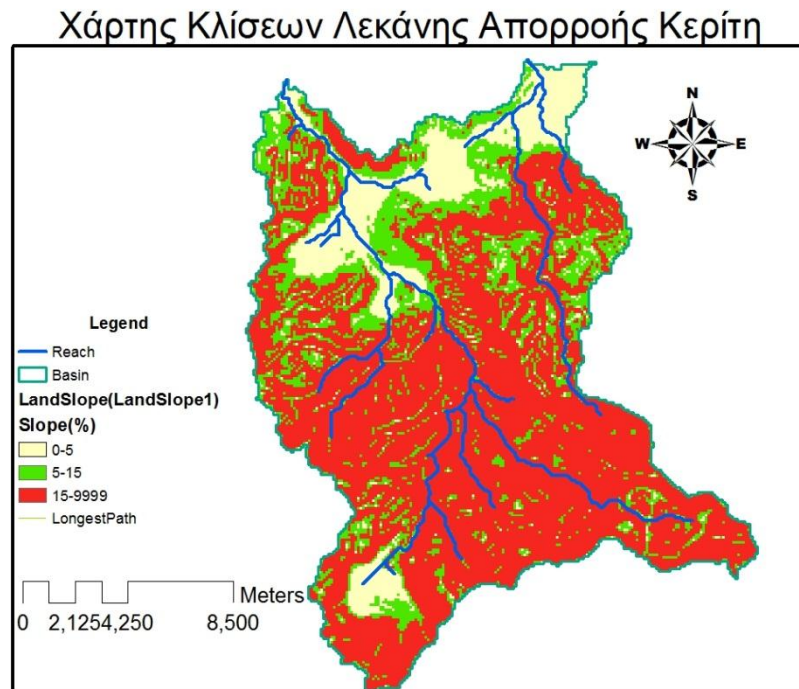
Εικόνα 3.3: Οικισμοί της λεκάνης απορροής του Κερίτη

Αναφορικά με την τοπογραφία της περιοχής μελέτης, το ανάγλυφο της περιοχής της λεκάνης παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις ξεκινώντας από το μέγιστο υψόμετρο στα 2100m (Λευκά Όρη) στο νότιο τμήμα και φτάνοντας στο επίπεδο της θάλασσας (0 m) στο βόρειο τμήμα. Μια απεικόνιση του τοπογραφικού ανάγλυφου παρατίθεται στην εικόνα 3.4. Επίσης, για την καλύτερη κατανόηση των κλίσεων εδάφους που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής του Κερίτη ακολουθεί η εικόνα 3.5.

Τοπογραφικό Ανάγλυφο Λεκάνης Απορροής Κερίτη



Εικόνα 3.4: Η τοπογραφία της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση των κλίσεων (Digital Elevation Model) στον Κερίτη

3.3. Γεωλογία

Σχετικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που αποτελούν τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, αυτοί χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Ανθρακικά πετρώματα: Βρίσκονται στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης και επεκτείνονται αρκετά νοτιότερα και πέρα από τα όρια της λεκάνης, μέχρι τον κύριο ασβεστολιθικό όγκο των Λευκών Ορέων. Επίσης, υπάρχει μια μικρή επιφανειακή εμφάνιση του καρστικού συστήματος δυτικά του χωριού Κουφός. Σημειώτεον ότι το συγκεκριμένο καρστικό σύστημα τροφοδοτεί τις πηγές του Κουφού στην τοποθεσία Βλυχάδες. Τα υπάρχοντα ανθρακικά πετρώματα αποτελούνται από ασβεστολίθους και δολομίτες και κατατάσσονται στους καρστικούς σχηματισμούς. Χαρακτηριστικό των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η υψηλή υδροπερατότητα και απόρροια της ύπαρξής τους είναι η δημιουργία υπόγειων υδροφορέων.
2. Φυλλίτες – Χαλαζίτες: Η θέση τους είναι στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής και στο βόρειο τμήμα καλύπτουν μικρότερη έκταση. Εν γένει, είναι μη υδατοπερατοί σχηματισμοί και αποτελούν τα όρια των υπογείων υδάτων.
3. Νεογενείς σχηματισμοί: Έχουμε νεογενείς σχηματισμούς νότια της λίμνης Αγιάς (κροκαλοπαγή πετρώματα) και στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής, στην περιοχή Γερανίου και Βρυσών. Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί είναι ανθρακικής προέλευσης με ανθρακικό συνδετικό υλικό. Έχουν την ιδιότητα να είναι υδροπερατοί.

Επιπλέον, υπάρχουν νεογενή πετρώματα (μάργες, μαργαιακοί ασβεστόλιθοι, γύψοι κ.α.)

4. Τεταρτογενείς σχηματισμοί: Είναι οι νεότερες, χρονικά, αποθέσεις και συντίθενται κυρίως από αδρομερή υλικά, όπως επίσης άργιλο και άμμο. Αυτοί οι σχηματισμοί καταλαμβάνουν ένα σημαντικό τμήμα της λεκάνης απορροής στις περιοχές Αγιάς, Βατόλακκου, Σκηνέ, Κουφού και Αλικιανού. Έχουν σημαντικό πάχος και ικανοποιητική υδροφορία, η οποία τροφοδοτείται από το καρστικό σύστημα και τις βροχοπτώσεις της περιοχής.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες σχηματισμών μπορούν να ενταχθούν σε μια, στους προσχωματικούς σχηματισμούς, εξαιτίας των παρεμφερών χαρακτηριστικών τους. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η γεωλογική σύσταση της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 3.6: Η γεωλογική σύσταση της λεκάνης Κερίτη

3.4. Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες καθορίζονται στην περιοχή του Κερίτη από τους κάτωθι παράγοντες (Τσαϊμός, 2009):

- Γεωλογία

- Ύψος βροχής
- Τεκτονική δομή
- Θερμοκρασία
- Κλίσεις εδάφους

Οι υπάρχοντες γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής αναλύθηκαν παραπάνω (Ανθρακικά πετρώματα – σύστημα καρστ, φυλλίτες – χαλαζίτες, τεταρτογενείς αποθέσεις και νεογενείς αποθέσεις) και είναι υπεύθυνοι για την κατεύθυνση και ροή των υπογείων υδάτων. Βεβαίως, πέραν των γεωλογικών σχηματισμών, η τεκτονική δομή, δηλαδή ο τρόπος τοποθέτησης των γεωλογικών δομών στο χώρο, είναι ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλλει στη διαμόρφωση του υδρογεωλογικού προφίλ της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.

Το υδρογεωλογικό προφίλ της λεκάνης αποτελείται από δύο κύρια υδρογεωλογικά συστήματα και ένα δευτερεύων:

- 1) Υπόγειο υδρογεωλογικό σύστημα (κύριο) διαπερατών ανθρακικών σχηματισμών οι οποίοι βρίσκονται στην ανατολική πλευρά της λεκάνης (Μυλωνιανά – Φουρνές – Μεσκλά). Η κύρια τροφοδοσία τους συστήματος πραγματοποιείται από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που τοποθετούνται νοτιότερα και φτάνουν μέχρι τον κύριο ανθρακικό όγκο των Λευκών Ορέων. Ο συγκεκριμένος ανθρακικός σχηματισμός διακόπτεται στο βόρειο τμήμα του, τεκτονικά με ρήγμα διεύθυνσης Ανατολή – Δύση. Ως αποτέλεσμα δημιουργείται πλευρική επαφή του ανθρακικού σχηματισμού με τον αδιαπέρατο φυλλιτικό σχηματισμό, ο οποίος τοποθετείται βορειότερα. Έτσι δημιουργούνται οι πηγές υπερπλήρωσης της Αγιάς σε υψόμετρο 40 m (Πλάτανος – Κολύμπα – Καλαμιώνας). Πέραν των πηγών υπερπλήρωσης που εκφορτίζουν σημαντικές ποσότητες νερού ετησίως (Μέση ετήσια παροχή 1970-1984 περίπου 7.855 m³/h), είναι σημαντικό να αναφερθεί η ύπαρξη ενός μόνιμου αποθέματος στη λεκάνη τροφοδοσίας των πηγών. Ο όγκος υδάτων, το μέγεθος και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά δεν είναι ακόμη γνωστά για το συγκεκριμένο απόθεμα.
- 2) Επιφανειακό υδρογεωλογικό σύστημα (κύριο) φυλλιτών-χαλαζιτών στην κεντρική περιοχή της λεκάνης. Οι φυλλίτες – χαλαζίτες λόγω της μη υδροπερατότητας τους ευθύνονται για τη συγκέντρωση των υδάτων, τα οποία προέρχονται από τις βροχοπτώσεις που δέχονται οι χείμαρροι Μαύρος ποταμός, Βαλσαμιώτης, Φαζάς, Αλικιανιώτης και συγκλίνουν στον Κερίτη, επιφανειακά. Επίπλέον, αυτό το υδρογεωλογικό σύστημα δέχεται επιφανειακή απορροή από τις πηγές των Μεσκλών (Μέση ετήσια παροχή 1970-1993 περίπου 3.452 m³/h) . Οι πηγές Μεσκλών (Παναγιά – Κεφαλοβρύσια – Νικολιανά) ευρίσκονται ΝΑ των φυλλιτών κοντά στο ομώνυμο χωριό και σε υψόμετρο 210 m. Αυτές οι πηγές τροφοδοτούνται από τους καρστικούς ασβεστολιθικούς σχηματισμούς.
- 3) Υπόγειο υδρογεωλογικό σύστημα (δευτερεύων) των τεταρτογενών αποθέσεων. Βρίσκεται βόρεια των φυλλιτών – χαλαζιτών του κεντρικού τμήματος της λεκάνης και πλησίον των χωριών Σκηνές, Αλικιανός, Φουρνές, Κουφός και Βατόλακκος. Η υδάτινη τροφοδοσία γίνεται από τον Κερίτη, από την απευθείας επιφανειακή απορροή των

νοτιότερων φυλλιτών και από υπόγειες πλευρικές μεταγγίσεις των ανθρακικών σχηματισμών που βρίσκονται ανατολικά. Το παρόν υδρογεωλογικό σύστημα παρουσιάζει διαφορετική ποιότητα υδάτων στην περιοχή Σκηνέ – Αλικιανού σε σχέση με τα νερά του Κουφού, κάτι που είναι ιδιαίτερο και υποδεικνύει την ύπαρξη δύο υπολεκανών στην περιοχή. Τέλος, έχουμε εκμετάλλευση των υδατικών πόρων του συστήματος με αρκετές γεωτρήσεις μεγάλων παροχών με εμφάνιση μικρών πτώσεων, γεγονός που επισημαίνει τη δυναμικότητα του υδροφορέα (Πίνακας 3.1).

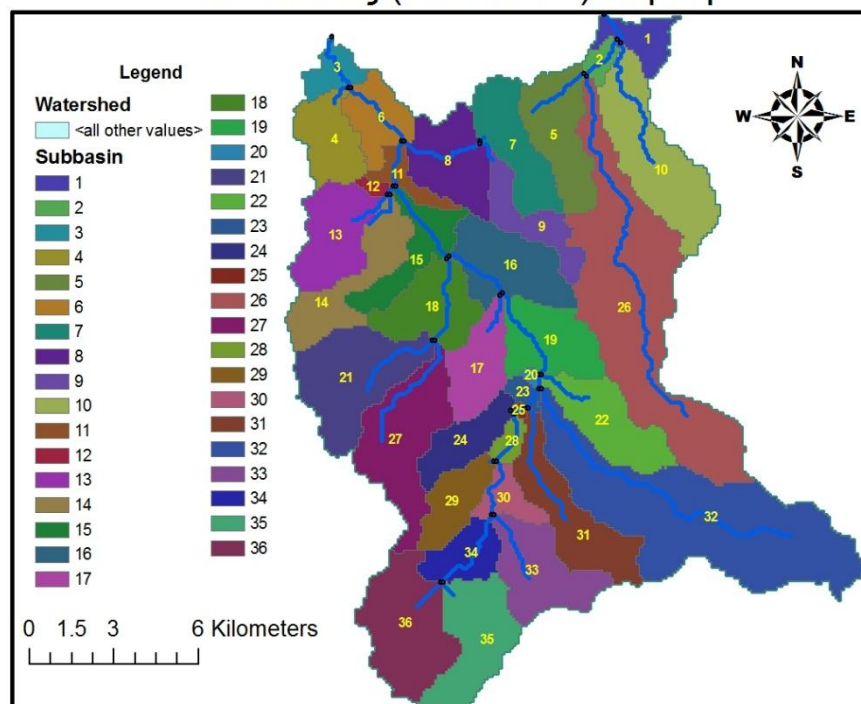
Πίνακας 3.1: Γεωτρήσεις και υδροληψίες του υδρολογικού συστήματος των τεταρτογενών αποθέσεων

Γεωτρήσεις-υδροληψίες	Πλήθος γεωτρήσεων	Παροχή (m ³ /h)
Τεταρτογενή	19	2.350
Ασβεστόλιθοι	7	1.000
Υδροληψία ΤΟΕΒ Μεσκλών	2 πηγές	350
Υδροληψία ΤΟΕΒ Φουρνέ	1 πηγή	350
ΣΥΝΟΛΟ	29	4.050

3.5. Υπολεκάνες της λεκάνης απορροής ποταμού Κερίτη

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη χωρίζεται στις ακόλουθες υπολεκάνες με τη χρήση του μοντέλου SWAT. Ο παρακάτω χάρτης παρουσιάζει τις υπολεκάνες του Κερίτη (Εικόνα 3.7):

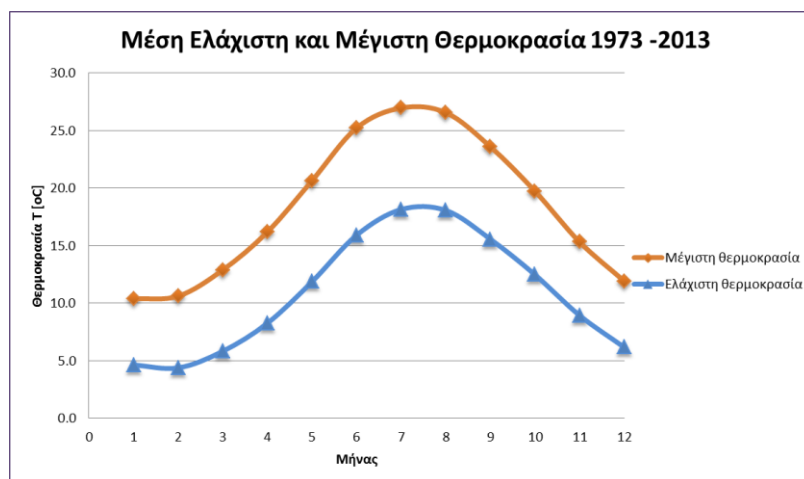
Υπολεκάνες (subbasins) Κερίτη



Εικόνα 3.7: Οι υπολεκάνες του ποταμού Κερίτη

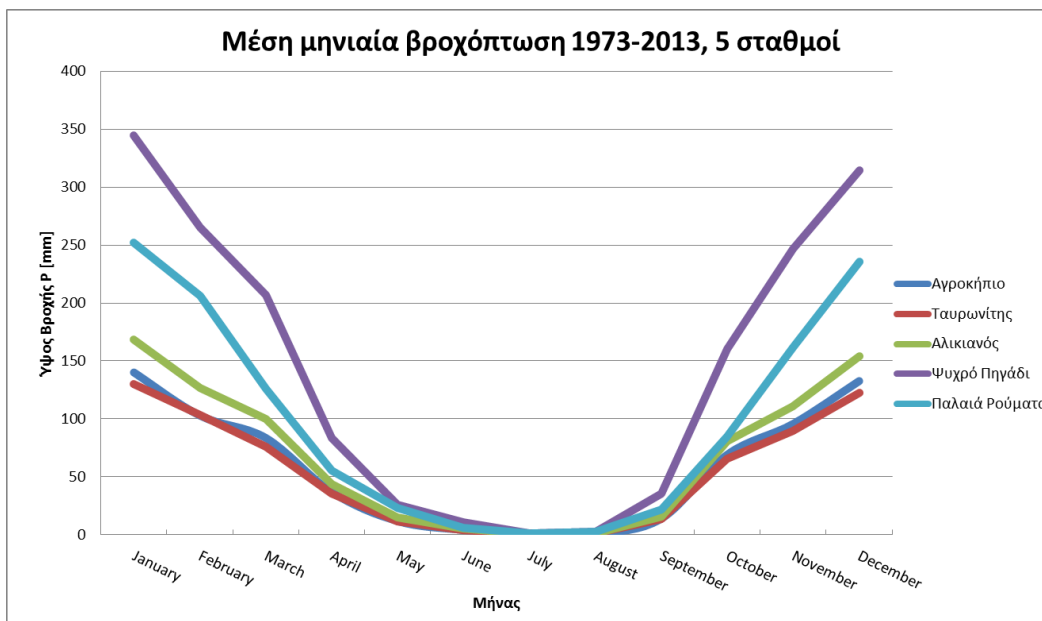
3.6. Κλιματολογικά στοιχεία

Το κλίμα της περιοχής του Κερίτη είναι Μεσογειακό, το οποίο συνεπάγεται ήπιους και υγρούς χειμώνες και ξηρά και θερμά καλοκαίρια. Κύρια στοιχεία καθορισμού του κλίματος μιας περιοχής είναι η θερμοκρασία (μέγιστη και ελάχιστη) και το ύψος της βροχής. Παρακάτω παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας θερμοκρασίας στο Ψυχρό Πηγάδι (Διάγραμμα 3.1) καθώς και τα διαγράμματα για τα μηνιαία ύψη των βροχοπτώσεων για 5 μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής (Αγροκήπιο, Ταυρωνίτης, Αλικιανός, Ψυχρό Πηγάδι και Παλαιά Ρούματα, Διαγράμματα 3.2 – 3.6). Να σημειωθεί ότι για όλες τις κάτωθι γραφικές παραστάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα της χρονικής περιόδου 1973 – 2013. Επομένως, έχουμε στη διάθεση μας μετεωρολογικές χρονοσειρές της τελευταίας 40ετίας, πληροφορία σημαντική, χρήσιμη και ικανοποιητικά επαρκής για τη μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.



Διάγραμμα 3.1: Μέση ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία στο Ψυχρό Πηγάδι

Το Διάγραμμα 3.1 μας δείχνει τις μέσες ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες που επικρατούν στο σημείο Ψυχρό Πηγάδι (1000 m υψόμετρο). Είναι χαρακτηριστικές οι χαμηλές θερμοκρασίες για το καλοκαίρι (18 °C ελάχιστη και 27 °C μέση μέγιστη θερμοκρασία) και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες του χειμώνα (4 °C ελάχιστη και 11 °C μέση μέγιστη θερμοκρασία).



Διάγραμμα 3.2: Μέση μηνιαία βροχόπτωση 1973 – 2013, Συγκριτική Γραφική Παράσταση

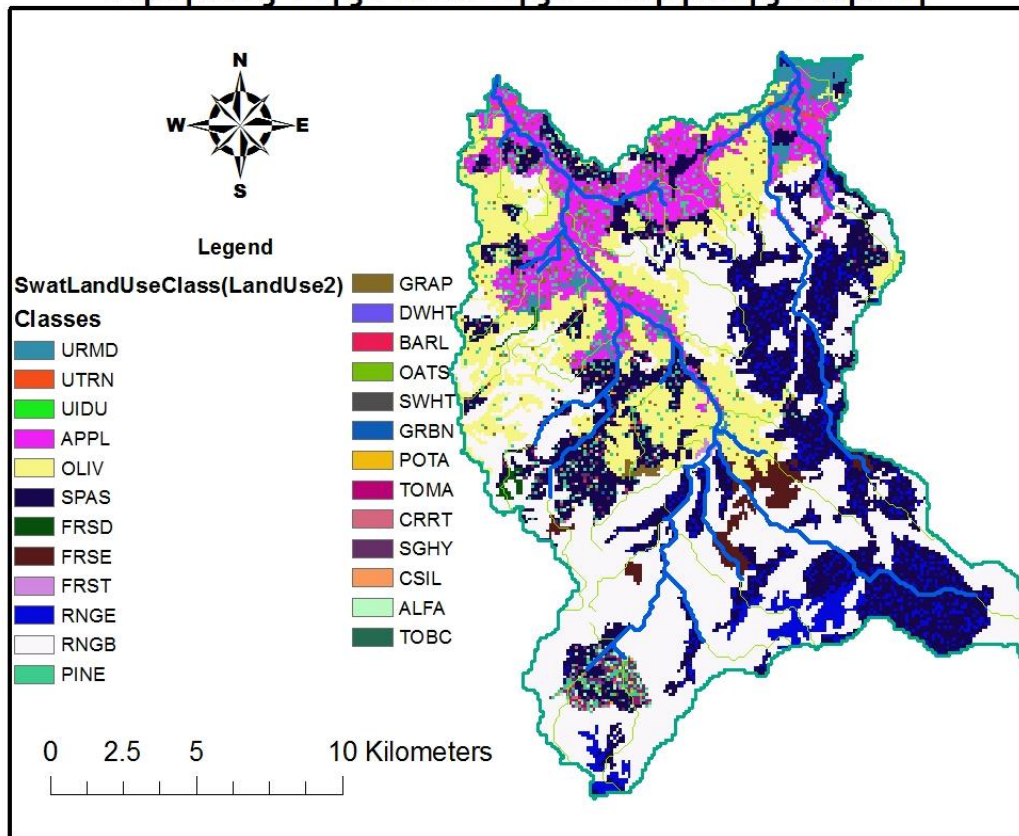
Παρατηρώντας το συγκριτικό γράφημα των μέσων μηνιαίων βροχοπτώσεων για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης, διαπιστώνουμε ότι έχουμε πράγματι αρκετά υγρούς χειμώνες (Ιανουάριος 130 – 350 mm βροχής) και ξηρά καλοκαίρια (Ιούλιος 0.4 – 1 mm βροχής). Επιπλέον, είναι ενδιαφέρουσα η μεγάλη διαφορά του ύψους της βροχής που

υπάρχει ανάμεσα στα σημεία που βρίσκονται σε χαμηλά σε σχέση με τα σημεία που βρίσκονται σε υψηλά υψόμετρα. Για παράδειγμα, το μήνα Φεβρουάριο στην περιοχή του Αλικιανού έχουμε 125 mm βροχής, ενώ στο Ψυχρό Πηγάδι η μέση τιμή βροχόπτωσης αγγίζει τα 265 mm βροχής. Αυτό σημαίνει ότι στο Ψυχρό Πηγάδι έχουμε 112% παραπάνω βροχή. Αυτό είναι αξιοσημείωτο για να γίνει κατανοητή η μεγάλη διακύμανση των βροχοπτώσεων ανάλογα με το υψόμετρο στη λεκάνη.

3.7. Χρήσεις γης

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη κυριαρχούν η φρυγανώδης βλάστηση (RNGB) με 103 km² (37% της λεκάνης), ακολουθούν τα φυσικά λειβάδια και θερινά βοσκοτόπια (SPAS) καταλαμβάνοντας επιφάνεια 62 km² (22% της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης) και τα ελαιόδενδρα (OLIV) με 42 km² (15% της λεκάνης). Ακολουθώντας, υπάρχουν εκτάσεις που καλύπτονται από μηλιές, αστικές εκτάσεις μέσης πυκνότητας, βιομηχανικές εκτάσεις, πυκνά και αραιά δάση, αμπελώνες, χέρσες εκτάσεις και εκτάσεις καλλιέργειας κηπευτικών. Στο χάρτη που ακολουθεί (Εικόνα 3.8) παρουσιάζεται η κατανομή των χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του Κερίτη.

Χρήσεις Γης Λεκάνης Απορροής Κερίτη

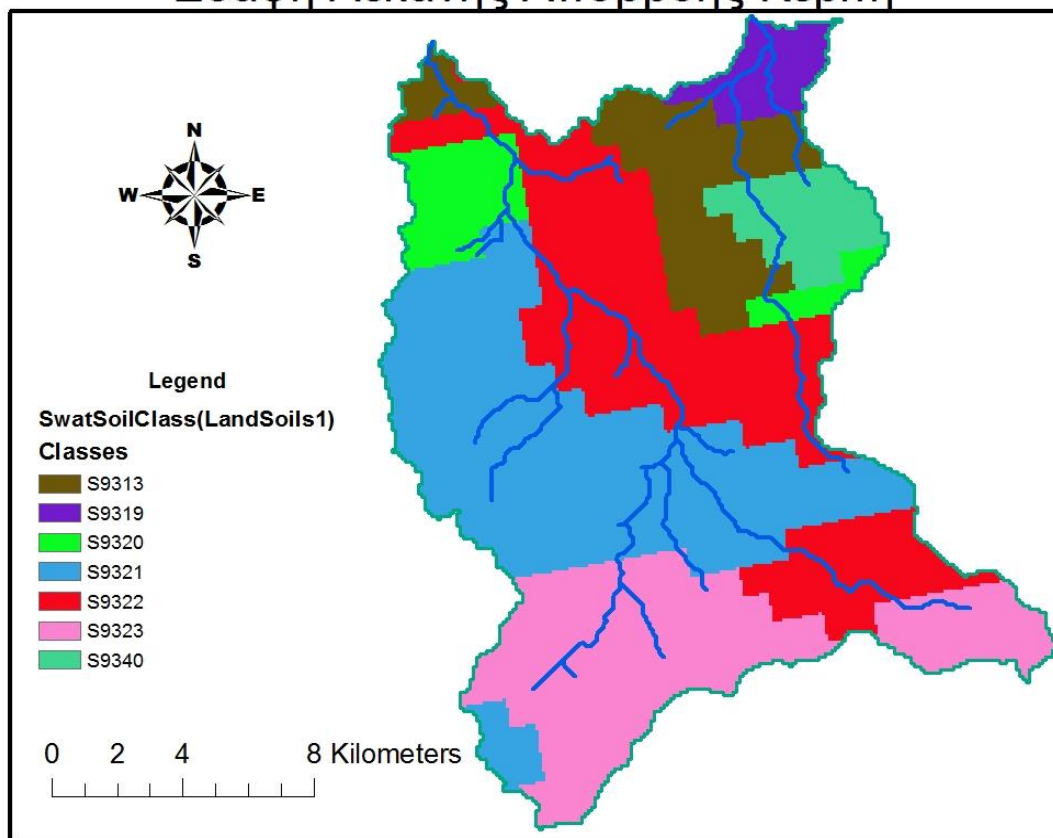


Εικόνα 3.8: Χρήσεις Γης στη Λεκάνη του Κερίτη

3.8. Εδάφη

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη χωρίζεται σε επτά εδαφολογικούς σχηματισμούς, όπως φαίνεται στο χάρτη που ακολουθεί (Εικόνα 3.9). Οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν είναι ασβεστολιθικοί, αλλουβιακοί, φλύσχη και σχιστόλιθοι, βάσει των οποίων διακρίνονται τα εδάφη.

Εδάφη Λεκάνης Απορροής Κερίτη



Εικόνα 3.9: Εδαφολογικοί σχηματισμοί στη Λεκάνη του Κερίτη

4. Εισαγωγή δεδομένων της περιοχής μελέτης

Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα δεδομένα της περιοχής μελέτης τα οποία είναι απαραίτητα για να λειτουργήσει το μοντέλο SWAT, το καρστικό μοντέλο και να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. Τα δεδομένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τον τρόπο συλλογής τους: 1) Δεδομένα τα οποία έχουμε λάβει από επιστημονικούς φορείς (Πολυτεχνείο Κρήτης, Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων, πρώην Ο.Α.ΔΥ.Κ. κ.α.). και αφορούν τη χρονική περίοδο 1973-2013. 2) Δεδομένα τα οποία συλλέξαμε στο πεδίο και επεξεργαστήκαμε εργαστηριακά και αφορούν τη χρονική περίοδο 2012-2013. Επιπροσθέτως, τα δεδομένα χωρίζονται σε κατηγορίες βάσει του τύπου τους (μετεωρολογικά, χρήσεων γης, γεωχημικά, υδρολογικά κλπ.).

4.1. Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία είναι απαραίτητα στο μοντέλο SWAT είναι κυρίως η ημερήσια βροχόπτωση, η ημερήσια ελάχιστη και ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία.

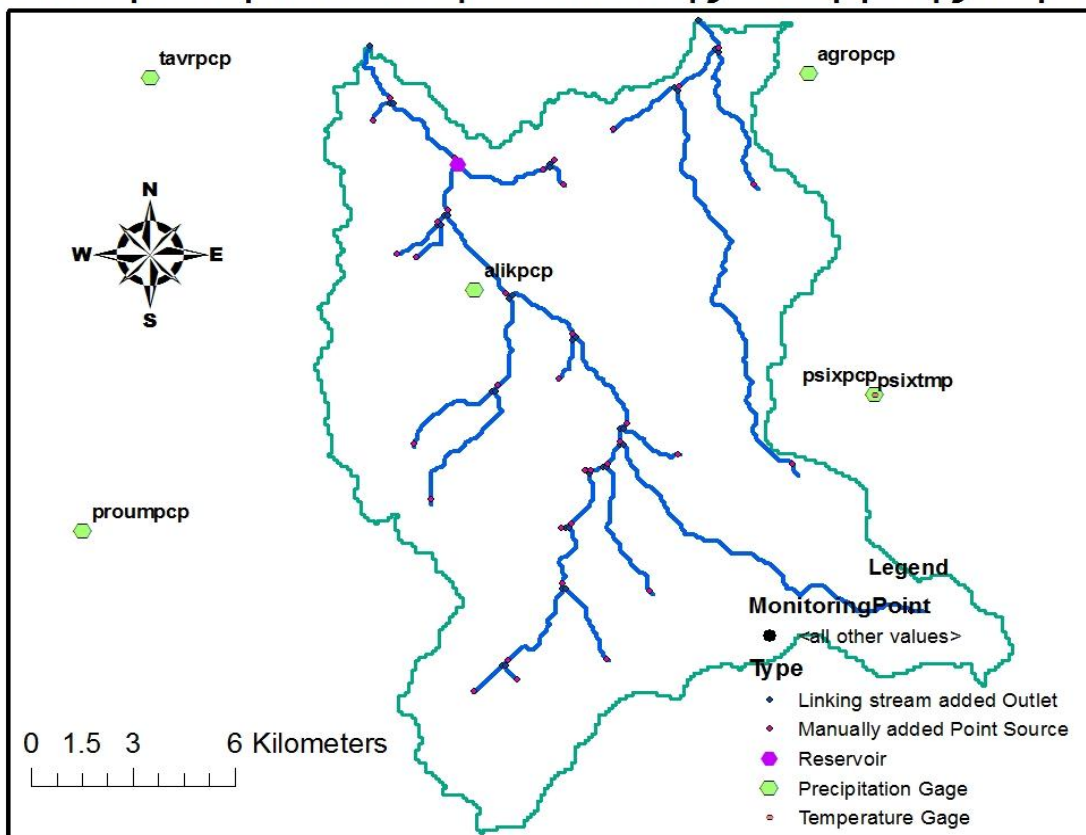
Τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και ημερήσια δεδομένα ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας προέρχονται συνολικά από 5 σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 4.1: Μετεωρολογικοί σταθμοί της περιοχής μελέτης

Σταθμός	Γ. Μήκος	Γ. Πλάτος	Υψόμετρο (m)	Φορέας
Αγροκήπιο	24°2'47.45"E	35°29'37.79"N	7	Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων
Ταυρωνίτης	23°49'14.69"E	35°31'54.19"N	10	Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων
Αλικιανός	23°54'35.54"E	35°27'19.92"N	50	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Ψυχρό Πηγάδι	24° 1' 48" E	35°23'44"N	1000	Πολυτεχνείο Κρήτης
Παλαιά Ρούματα	23° 46'11.99"E	35°23'44"N	375	Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων

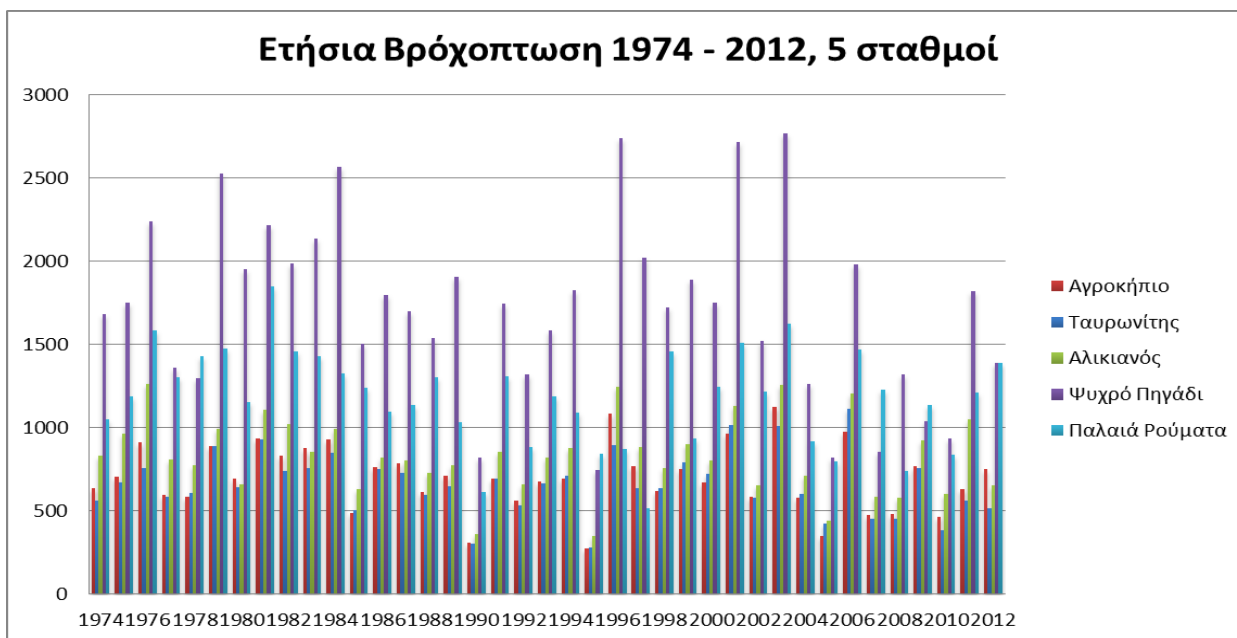
Οι μετεωρολογικοί σταθμοί παρουσιάζονται στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 4.1).

Μετεωρολογικοί Σταθμοί Λεκάνης Απορροής Κερίτη



Εικόνα 4.1: Χάρτη μετεωρολογικών σταθμών στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής

Παρακάτω, παρατίθεται η γραφική παράσταση με τις ετήσιων βροχοπτώσεων για το χρονικό διάστημα 1974 – 2012 για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης.

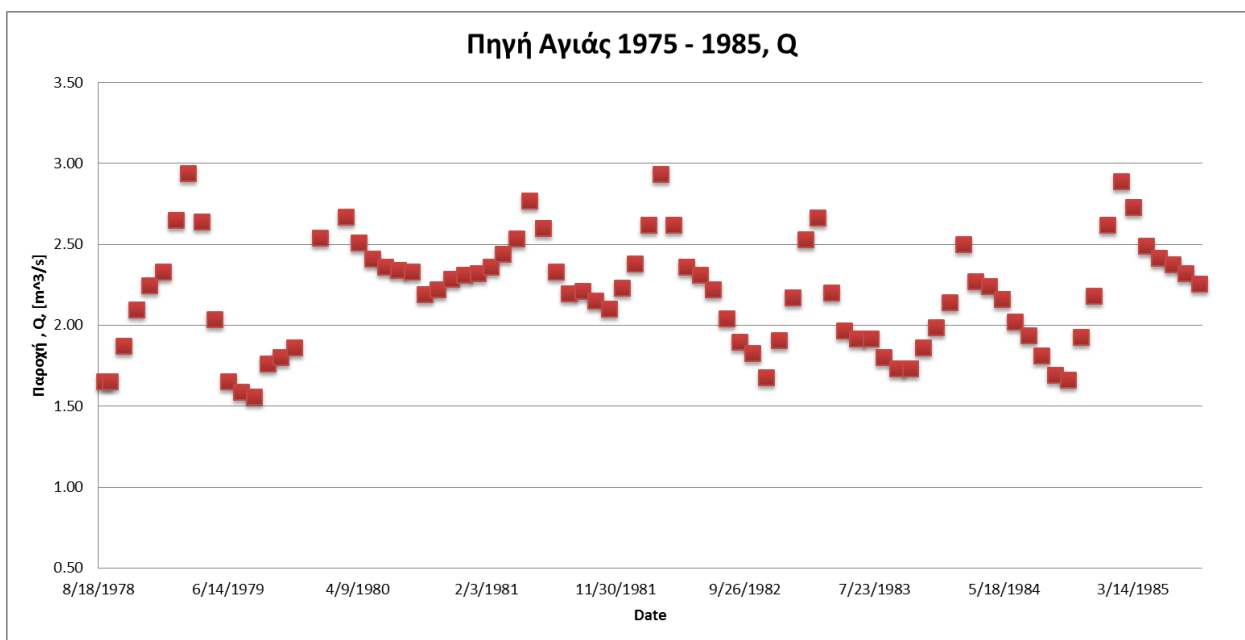


Διάγραμμα 4.1: Μέση ετήσια βροχόπτωση στο Αγροκήπιο

4.2. Δεδομένα Παροχής

Τα δεδομένα της παροχής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη είναι απαραίτητα για να γίνει η σύγκριση των παροχών που εξάγει το μοντέλο SWAT με αυτά, καθώς και το καρστικό μοντέλο. Αναφορικά με τα δεδομένα των πηγών (Αγιά και Μεσκλά), οι χρονοσειρές υδρολογικών δεδομένων καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1978 – 1985 για τις πηγές Αγιάς και το χρονικό διάστημα 1978 – 2005 για τις πηγές Μεσκλών (πηγή δεδομένων: πρώην Περιφερειακή Διεύθυνση Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων Κρήτης – Υ.Ε.Β.), ενώ για την παροχή του ποταμού Κερίτη επιφανειακά υπάρχουν δεδομένα για το χρονικό διάστημα 2012 – 2013 (πηγή δεδομένων: Πολυτεχνείο Κρήτης).

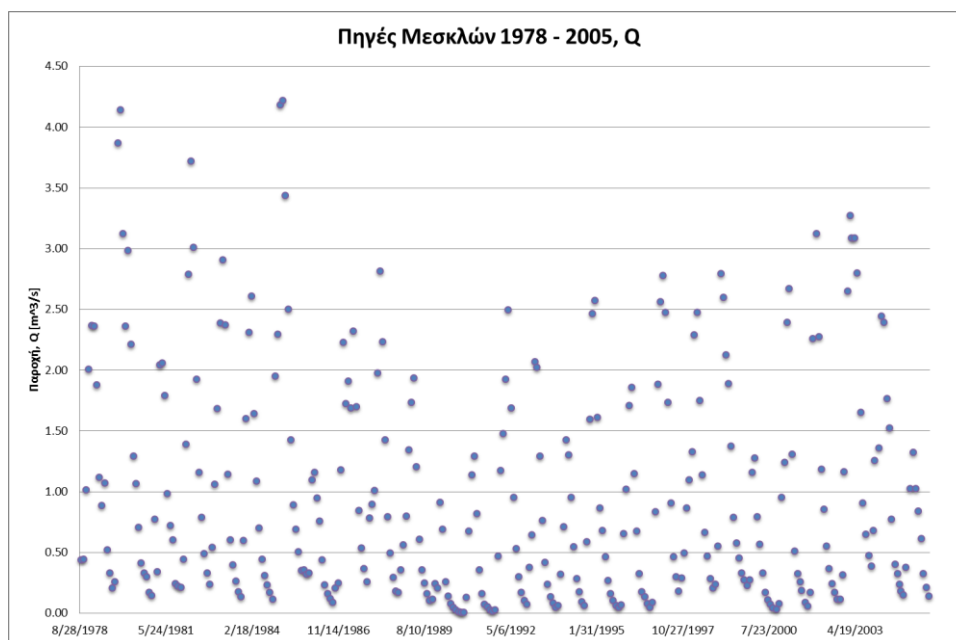
Ακολουθούν γραφικές παραστάσεις των χρονοσειρών που διαθέτουμε για τις πηγές και για την επιφανειακή απορροή του ποταμού Κερίτη στο σημείο που είναι τοποθετημένος ο υδρολογικός σταθμός του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης (Γεωγραφικό Πλάτος: 35°29'47.0"N, Γεωγραφικό Μήκος: 23°54'23.6"E).



Διάγραμμα 4.6: Γραφική παράσταση ημερήσιας παροχής Αγιάς, 1978 – 1985 (Πηγή δεδομένων: ΥΕΒ)

Η παραπάνω γραφική παράσταση μας δείχνει ότι οι ποσότητες νερού που εκφορτίζονται από την Αγιά (υψόμετρο από +33 m έως +40 m από το επίπεδο της θάλασσας) παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα στο χειμώνα και το καλοκαίρι. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που εκρέουν από τις πηγές της Αγιάς τόσο το χειμώνα (οπότε έχουμε φόρτιση του καρστ από τις βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις), όσο και το καλοκαίρι υποδεικνύουν ότι υπάρχει μεγάλος όγκος νερού σε μόνιμο απόθεμα. Η μέση ετήσια εκφόρτιση των πηγών της Αγιάς είναι 70 Mm³/yr με διακύμανση των παροχών 56 – 76 Mm³/yr για τα υδρολογικά έτη 1971-1985. Είναι σημαντικό για την κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος της Αγιάς να επισημανθεί ότι το καρστικό σύστημα που τροφοδοτεί τις πηγές της Αγιάς αποτελείται από πλακώδεις ασβεστόλιθους (κατώτερος ταμιευτήρας με αργή εκφόρτιση) καθώς και από ασβεστόλιθους της ζώνης Τρυπαλίου, οι οποίοι επικάθονται στους πλακώδεις ασβεστόλιθους. Οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρυπαλίου σχηματίζουν τον ανώτερο και πιο έντονα καρστικοποιημένο ταμιευτήρα με γρήγορη εκφόρτιση. Η επιφάνεια του ανώτερου ταμιευτήρα είναι περίπου 80 km² (νοτιοδυτικά των πηγών) και 10 km² του κατώτερου ταμιευτήρα (νότια των πηγών).

Σχετικά με τις πηγές Μεσκλών, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα (δεδομένα που έχουν συλλεχθεί) για τη χρονική περίοδο 1978 – 2005.



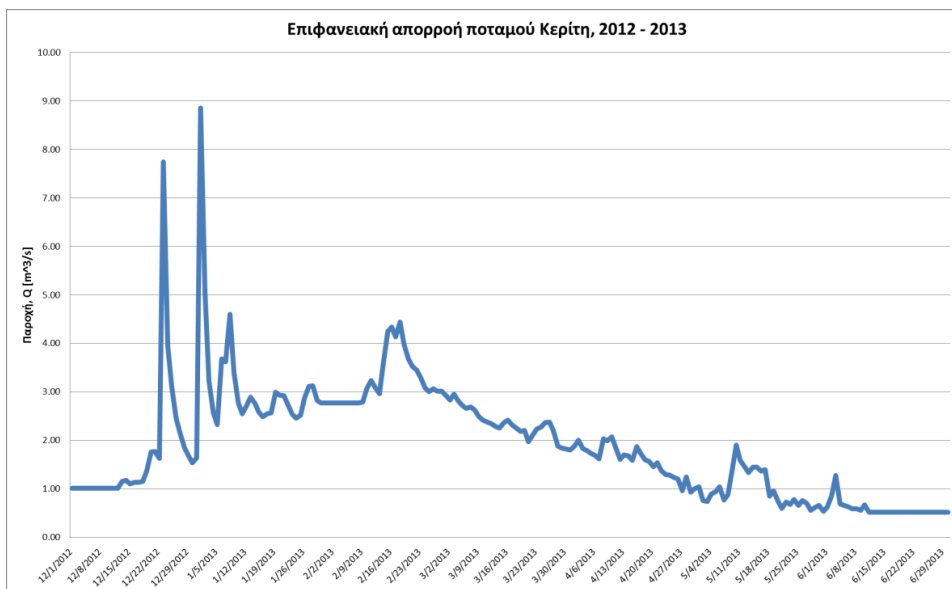
Διάγραμμα 4.7: Γραφική παράσταση ημερήσιας παροχής Μεσκλών, 1978 – 2005 (Πηγή δεδομένων: ΥΕΒ)

Παρατηρώντας την παραπάνω γραφική παράσταση των καταγεγραμμένων δεδομένων για τις πηγές των Μεσκλών είναι σαφές ότι υπάρχουν μεγάλες τιμές παροχής κατά τους χειμερινούς μήνες (πλημμυρικές παροχές) οι οποίες φθάνουν σε πάνω από 2 – 2,5 m³/s τους περισσότερους χειμώνες της διαθέσιμης χρονικής περιόδου. Επίσης, φαίνεται ότι οι εκφορτίσεις ύδατος ελαχιστοποιούνται κατά τους θερινούς μήνες και σε κάποιες περιπτώσεις (βλ. Καλοκαίρι 1990, 2000) αγγίζουν μηδενικές τιμές. Άρα οι πηγές των Μεσκλών, οι οποίες τοποθετούνται σε υψόμετρο +210m, εκφορτίζουν σημαντικές ποσότητες υδάτων κατά τους χειμερινούς μήνες (ιδίως το Φεβρουάριο και Μάρτιο), ενώ κατά το θέρος παρέχουν λιγότερο νερό ή στερεύουν σε κάποιες περιπτώσεις. Η μέση ετήσια εκφόρτιση των πηγών των Μεσκλών είναι 32 Mm³/yr.

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι παροχές που καταγράφηκαν το υδρολογικό έτος 1980 – 1981 στις πηγές Μεσκλών στο κάτωθι διάγραμμα (Διάγραμμα 4.8), για να γίνει περισσότερο εμφανής η εποχιακή διακύμανση της υδραυλικής εκφόρτισης.



Διάγραμμα 4.8: Γραφική παράσταση ημερήσιας παροχής Μεσκλών, 1980 – 1981 (Πηγή δεδομένων: ΥΕΒ)



Διάγραμμα 4.8: Γραφική παράσταση επιφανειακής απορροής ποταμού Κερίτη, 2012 – 2013

Αναφορικά με την επιφανειακή υδραυλική απορροή του ποταμού Κερίτη, παρατίθεται το υδρογράφημα του υδρολογικού έτους 2012 – 2013.

Σχολιάζοντας το διάγραμμα 4.8, παρατηρούμε κάποιες πλημμυρικές απορροές (κορυφές) κατά τη χειμερινή περίοδο (ειδικά Δεκέμβριο και Ιανουάριο) οι οποίες φτάνουν στη μέγιστη τιμή του υδρολογικού έτους, περίπου $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Επιπροσθέτως, υπάρχει μια σχετική σταθερότητα του υδρογραφήματος στο διάστημα μέσα Ιανουαρίου – αρχές Μαρτίου (με μερικές εξαιρέσεις κατά το τέλος Φεβρουαρίου). Έπειτα, καταγράφεται σταδιακά μια ομαλή πτώση της παροχής του ποταμού μέχρι το τέλος του Ιουνίου 2013. Η μέση παροχή του ποταμού βρίσκεται στα $7000 \text{ m}^3/\text{hr}$ και η ελάχιστη στα $1900 \text{ m}^3/\text{hr}$ και παρατηρείται από το Μάιο και μετά. Τέλος, η παροχή του Κερίτη είναι $61,3 \text{ Mm}^3/\text{yr}$.

4.3. Δεδομένα υδραυλικών απολήψεων

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη αποτελεί σημαντική πηγή ύδρευσης και άρδευσης της ευρύτερης περιοχής. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1) παρουσιάζονται τα κύρια υδραυλικά έργα της περιοχής (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010). Σχετικά με τις απολήψεις που πραγματοποιήθηκαν από τη λεκάνη απορροής το χρονικό διάστημα 2012 – 2013 το οποίο μελετάμε, αυτές είναι οι παρακάτω κατανεμημένες μηνιαίως (Πίνακες 4.3 και 4.4). Παρατηρώντας τα δεδομένα του πίνακα 4.3, οι ΟΑΔΥΚ και ΔΕΥΑΧ αντλούν σημαντικές ποσότητες νερού για άρδευση και ύδρευση καθ'όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους 2012 – 2013. Ο ΟΑΔΥΚ αντλεί συνολικά $12,6 \text{ Mm}^3$, ενώ η ΔΕΥΑΧ φθάνει στην άντληση περίπου $9,5 \text{ Mm}^3$ νερού. Οι ΤΟΕΒ της περιοχής αντλούν ποσότητες νερού για αρδευτικές χρήσεις κυρίως κατά τους θερινούς μήνες και λιγότερο άνοιξη και φθινόπωρο. Οι συνολικές απολήψεις των ΤΟΕΒ αγγίζουν τα $6,7 \text{ Mm}^3/\text{yr}$.

Αναφορικά με τις υδραυλικές απολήψεις από τις πηγές Μεσκλών (Πίνακας 4.4), αυτές είναι καταφανώς μικρότερες σε ωριαία παροχή και σε συνολική ποσότητα σε σχέση με τις απολήψεις από την Αγιά. Επιπροσθέτως, δεν πραγματοποιούνται απολήψεις κατά τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ούτε και το Σεπτέμβριο, καθώς αυτούς τους μήνες οι παροχές των πηγών είναι πολύ μικρές και κάποιες ημέρες δεν εκφορτίζουν καθόλου νερό. Συνολικά, ο ΟΑΔΥΚ αντλεί $2,25 \text{ Mm}^3/\text{yr}$.

Πίνακας 4.2: Υδραυλικά έργα στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη

A/A	Υδραυλικό έργο	Φορέας Διαχείρισης
1	Υδραυλικό έργο ύδρευσης – άρδευσης	ΟΑΔΥΚ
2	Αρδευτικά έργα ΤΟΕΒ	ΤΟΕΒ
3	Υδρευτικό έργο Δήμου Χανίων	ΔΕΥΑΧ
4	Μικρά υδροαρδευτικά έργα Δήμων	Δήμος Χανίων, Δήμος Πλατανιά

Πίνακας 4.3: Υδραυλικές απολήψεις από τις πηγές Αγιάς, 2012 – 2013 [m^3/h]

Μήνας	Q(ΔΕΥΑΧ)	Q(ΤΟΕΒ)	Q(ΟΑΔΥΚ)
Σεπτέμβριος 2012	904.3	2150	2588.4
Οκτώβριος 2012	1075.4	950	2325.7

Νοέμβριος 2012	1204.8	0	1448.9
Δεκέμβριος 2012	1264.7	0	533.7
Ιανουάριος 2013	910.6	0	233.4
Φεβρουάριος 2013	831.7	0	157.0
Μάρτιος 2013	961.3	0	174.7
Απρίλιος 2013	1178.4	0	250.1
Μάιος 2013	1255.7	950	1666.7
Ιούνιος 2013	1268.7	950	2320.2
Ιούλιος 2013	1267.9	2150	2889.4
Αύγουστος 2013	1052.5	2150	2871.9

Πίνακας 4.4: Υδραυλικές απολήψεις από τις πηγές Μεσκλών, 2012 – 2013 [m³/h]

Μήνας	Q(ΟΑΔΥΚ)
Σεπτέμβριος 2012	0
Οκτώβριος 2012	110
Νοέμβριος 2012	202
Δεκέμβριος 2012	349
Ιανουάριος 2013	404
Φεβρουάριος 2013	404
Μάρτιος 2013	551
Απρίλιος 2013	441
Μάιος 2013	441
Ιούνιος 2013	221
Ιούλιος 2013	0
Αύγουστος 2013	0

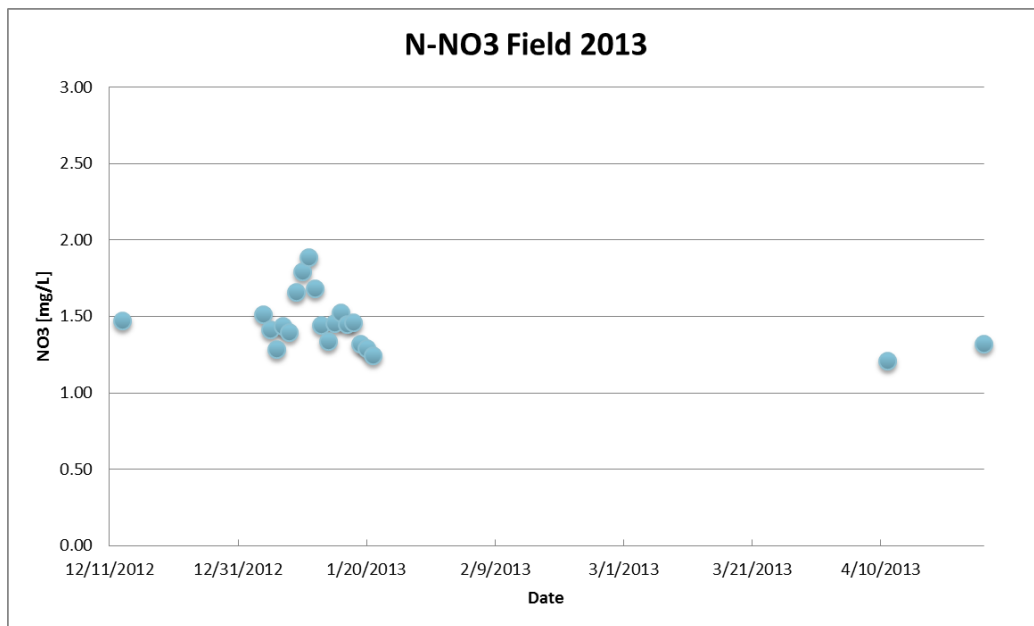
4.4. Δεδομένα NO₃

Για τη μοντελοποίηση της γεωχημείας είναι απαραίτητη η συλλογή και εισαγωγή στο μοντέλο δεδομένων NO₃. Στη συγκεκριμένη εργασία έχουμε χρονοσειρές συγκεντρώσεων νιτρικών για τις πηγές Αγιάς και Μεσκλών και συγκεντρώσεις νιτρικών για την επιφανειακή απορροή στην υπολεκάνη 6 (troll station). Σε όλες τις περιπτώσεις τα δεδομένα είναι λίγα.

Σχετικά με τις πηγές Αγιάς, χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις του Γραμματικάκη (2012). Είναι εμφανές ότι οι μετρημένες τιμές νιτρικών στις πηγές Αγιάς είναι αρκετά χαμηλές (Πίνακας 4.5):

Πίνακας 4.5: Δεδομένα N-NO₃, πηγές Αγιάς

Ημερομηνία	N-NO ₃ (mg/L)
1/3/2010	1.3
4/26/2010	0.72
6/5/2010	0.76
5/25/2010	1.3
7/6/2010	1.04
10/18/2010	0.44
2/28/2011	1.3



Διάγραμμα 4.9: Γραφική παράσταση δεδομένων N-NO₃, 2013

4.5. Κτηνοτροφία - Γεωργία

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη συμπεριλαμβάνονται περιοχές με αναπτυγμένη κτηνοτροφία (μη σημειακή πηγή φόρτισης). Στους οικισμούς Θέρισσο, Βατόλακκος, Μεσκλά, Ομαλός και στις ευρύτερες περιοχές αυτών υπάρχουν χιλιάδες ζώα (Πρόβατα, Αμνοί και Κατσίκες) τα οποία συμβάλλουν στη φόρτιση της λεκάνης απορροής με άζωτο, καθώς τα κόπρωνα τους καταλήγουν στο έδαφος και αυτά με τη σειρά τους αποσυντίθενται και δρουν ως λίπασμα. Δηλαδή, το N που μας ενδιαφέρει για τη μοντελοποίηση των νιτρικών στην περιοχή εισχωρεί στο υπέδαφος και κινείται προς τον υπόγειο βαθύ υδροφόρα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.6) αναλύονται οι αριθμοί των υπαρχόντων κτηνοτροφικών ζώων, τα είδη τους και οι περιοχές στις οποίες ζουν και αναπτύσσονται. Στον Πίνακα 4.7 οι ποσότητες των

ζώων μετατρέπονται σε κιλά κοπριάς που παράγεται σε κάθε περιοχή. Ακολούθως, η μάζα της κοπριάς που φορτίζει τη λεκάνη κατανέμεται στις υπολεκάνες και γίνεται ο υπολογισμός της εφαρμοζόμενης μάζας κοπριάς ανά εκτάριο ανά ημέρα. Το αποτέλεσμα του τελευταίου υπολογισμού μας ενδιαφέρει, επειδή αυτό το μέγεθος εισάγεται στο μοντέλο SWAT στην καρτέλα .mgt (Management), υποκαρτέλα Scheduled Management Operations. Έτσι η παραγόμενη κοπριά από τα ζώα της περιοχής επηρεάζει τη μοντελοποίηση των νιτρικών και τις συγκεντρώσεις νιτρικών που εξάγει το μοντέλο SWAT και στη συνέχεια το μορφοποιημένο καρστικό μοντέλο.

Πίνακας 4.6: Δεδομένα ζώων στην περιοχή μελέτης

Αριθμός,είδη ζώων και εισαγόμενες ποσότητες αζώτου στη λεκάνη Κερίτη					
Χωριό	Πρόβατα	Αμνοί	Κατσίκια	Σύνολο [hd]	Ποσότητες αζώτου που εισάγονται (tn N)
Μουρνιές	630	740	1480	2850	29
Αγυιά	225	203	290	718	7
Αλικιανός	160	200	680	1040	10
Βατόλακκος	200	200	1280	1680	17
Θέρισσος	8270	7550	4760	20580	206
Κουφός	0	100	230	330	3
Λάκκοι	1600	1900	2300	5800	58
Μεσκλά	4450	4350	4050	12850	129
Περιβόλια	530	470	1150	2150	22
Ομαλός	4400	1280	5200	10880	109
Σύνολο	20465	16993	21420	58878	589

Πίνακας 4.7: Υπολογισμός μάζας κοπριάς που φορτίζει τις υπολεκάνες του Κερίτη

Subbasins	Κοπριά ανά ζώο [kg man/(hd*yr)]	Κοπριά ανά περιοχή [tn man/yr] (A)	Subbasin area [ha] (B)	Manure kg [kg/(ha*d ay)] (A/B)
10	260	741	1356	1.5
11	260	187	246	2.1
15	260	270	594	1.2
14	260	437	818	1.5
32	260	5351	3258	4.5
13	260	86	825	0.3
36	260	1508	1229	3.4
34	260	3341	448	20.4
26	260	559	3209	0.5
36	260	2829	1229	6.3
		15308		

Οι γεωργικές δραστηριότητες στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη είναι ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στη γεωχημεία της περιοχής. Οι γεωργικές δραστηριότητες εντάσσονται στις μη σημειακές πηγές φόρτισης της λεκάνης απορροής και επιδρούν στη

γεωχημική κατάσταση της περιοχής μελέτης με τις απώλειες των θρεπτικών που πραγματοποιούνται μέσω της επιφανειακής απορροής, της διάβρωσης του εδάφους, της τεχνητής αποστράγγισης και της εκχύλισης γεωργικών εδαφών. Στην παρούσα εργασία για να υπολογιστούν στο μοντέλο SWAT οι απώλειες θρεπτικών από τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και κατά συνέπεια οι φορτίσεις που δέχεται η λεκάνη απορροής, εισάγονται στην καρτέλα .mgt (Management) τα λιπάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες καλλιέργειες. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής υπάρχουν:

1. Ελαιόδενδρα
2. Αμπελώνες
3. Μηλιές
4. Πατάτες
5. Τομάτες
6. Άλλες καλλιέργειες.

Σε όλες τις παραπάνω καλλιέργειες χρησιμοποιείται, κατά κανόνα, λίπασμα τύπου 30-15-0 (30% άζωτο, 15% φώσφορος, 0% κάλιο). Επιπλέον, υπολογίζεται από τις ποσότητες λιπασμάτων τα οποία εισάγονται στην καρτέλα Management (Διαχείριση υπολεκάνης) ότι εισάγονται συνολικά περίπου 593 tn N / yr.

5. Συλλογή δεδομένων στο πεδίο και εργαστηριακές αναλύσεις

5.1. Δεδομένα πεδίου και υδρολογικός σταθμός

5.1.1. Δεδομένα πεδίου

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα συλλεγόμενα δεδομένα από το πεδίο, ο τρόπος συλλογής τους και τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επίσης, παρατίθενται οι εργαστηριακές αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία και τα αποτελέσματα αυτών.

Τα συλλεγόμενα δεδομένα πεδίου είναι:

- Παροχή, Q
- Στάθμη ποταμού, H
- Θερμοκρασία υδάτων ποταμού, T
- pH ποταμού, pH
- Διαλυμένο οξυγόνο, DO
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα, EC
- Ολικά διαλυμένα στερεά, TDS
- Αλατότητα, Sal
- Πίεση, P

Ο τρόπος συλλογής (μεθοδολογία) των δεδομένων πεδίου είναι ο ακόλουθος για κάθε παράμετρο:

Η παροχή του ποταμού υπολογίζεται με χρήση της μεθόδου χωρισμού της διατομής του ποταμού σε επιμέρους τραπέζια για τα οποία υπολογίζεται το εμβαδόν τους. Στη συγκεκριμένη διατομή του ποταμού η οποία προσπαθήσαμε να είναι ακριβώς η ίδια για όλη τη χρονική περίοδο συλλογής δεδομένων, μετρούσαμε το μήκος της διατομής και χωρίζαμε τη διατομή σε επιμέρους μήκη 0,5 m τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του εμβαδού του νερού. Επίσης, ανάλογα με το μήκος της διατομής του ποταμού (το οποίο αυξομειώνεται ανάλογα με τον όγκο των υδάτων που περνούν από το σημείο σε κάθε χρονική στιγμή) διαμορφώνεται και τα επιμέρους τραπέζια i . Συγκεκριμένα, η παροχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = u * A = \sum_{i=1}^n (u_i * A_i) \quad [5.1.1]$$

Με

Q : Παροχή ποταμού για συγκεκριμένη διατομή

u_i : Ταχύτητα νερού για το τραπέζιο i . Η συγκεκριμένη ταχύτητα υπολογίζεται από μαθηματική σχέση η οποία συσχετίζει τις στροφές της φτερωτής μιλίσκου που μετρώνται για συγκεκριμένο

χρονικό διάστημα (περίπου 20 δευτερόλεπτα για τη μεγάλη προπέλα και περίπου 40 δευτερόλεπτα για τη μικρή προπέλα)

A_i : Εμβαδόν νερού για το τραπέζιο i . Το συγκεκριμένο εμβαδόν υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_i = \frac{1}{2} * \left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) * x_i \text{ [5.1.2.]}$$

Όπου

$\left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)$: Το άθροισμα των μέσων σταθμών κάθε παράλληλης πλευράς του τραπεζίου i . Οι στάθμες h_{i-1} , h_i , h_{i+1} μετρώνται με το χάρακα που υπάρχει πάνω στην κάθετη ράβδο του μιλίσκου.

x : Μήκος του τραπεζίου i , ορίζεται 0,5m. Το μήκος μετρείται με ταινία μέτρησης.

Η στάθμη του ποταμού μετρείται με χρήση του χάρακα του troll station. Ο προαναφερόμενος χάρακας βρίσκεται μόνιμα τοποθετημένος στην όχθη του ποταμού στην οποία βρίσκεται ο υδρολογικός σταθμός.

Η θερμοκρασία υδάτων, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα ολικά διαλυμένα στερεά, η αλατότητα και η πίεση μετρώνται από την πολυπαραμετρική συσκευή GPS Aquameter της Aquaread με απευθείας τοποθέτηση του μετρητικού δέκτη της συσκευής στα επιφανειακά ύδατα του ποταμού Κερίτη.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου:

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις πεδίου 2012 – 2013

A/A	Ημερομηνία	Q(m ³ /s)	T(°C)	pH	DO(mg/L)	EC(μS/cm)	TDS(mg/L)	Sal(ppt)	P(mbar)	Στάθμη (cm)
1	11/30/2012	1.42	16.3	8.02	5.65	816	624	-	1006	29
2	12/13/2012	1.67	14.7	8.25	2.45	534	418	0.32	1020	33
3	1/22/2013	3.26	14.5	8.74	9.47	587	466	0.35	1009	43
4	1/29/2013	3.43	14.2	8.24	11.7	584	464	0.34	1013	49
5	2/14/2013	3.71	13.5	8.56	7.26	470	379	0.29	1003	55
6	2/25/2013	3.62	14.8	8.63	11.51	476	374	0.28	1012	48
7	3/11/2013	2.74	17.6	8.39	9.01	704	526	0.4	1001	43
8	3/27/2013	1.90	15.8	-	-	-	-	-	-	42
9	4/11/2013	1.74	-	-	-	-	-	-	-	36
10	4/26/2013	1.28	-	-	-	-	-	-	-	27

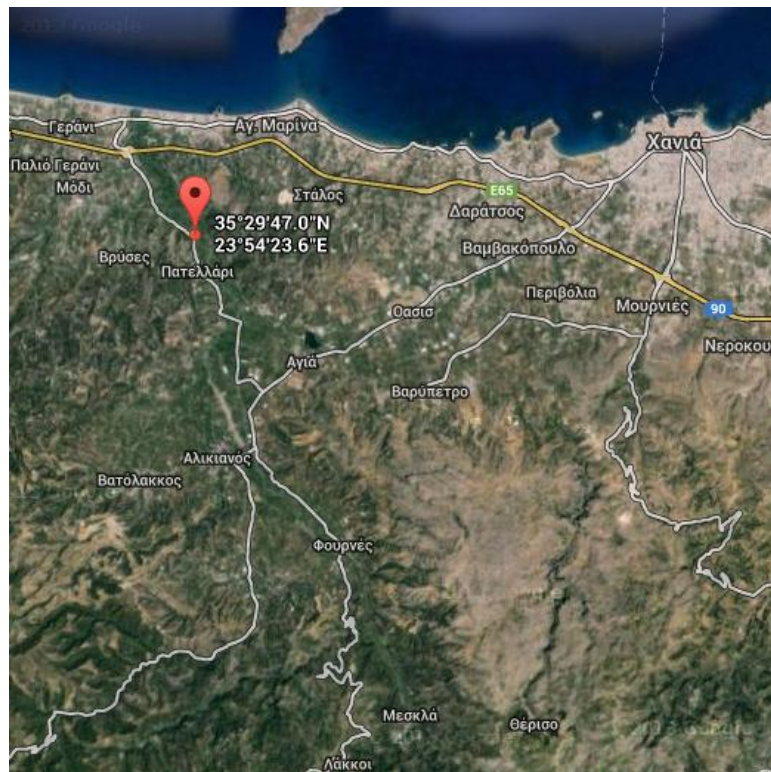
5.1.2. Υδρολογικός σταθμός (troll station)

Ο υδρολογικός σταθμός Κερίτη βρίσκεται τοποθετημένος στην όχθη του ποταμού Κερίτη μέσα σε προστατευτικό κουβούκλιο στο σημείο με Γεωγραφικό Πλάτος: 35°29'47.0"N και Γεωγραφικό Μήκος: 23°54'23.6"E. Ανήκει στο Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών και μετράει τα παρακάτω δεδομένα:

1. Στάθμη κοίτης ποταμού, H, σε m
2. Διαλυμένο οξυγόνο, D.O., σε mg/L
3. Οξύτητα, pH

4. Θερμοκρασία υδάτων, T, σε °C
5. Νιτρικά, NO₃⁻, σε ppm

Η θέση του σταθμού (βορειοδυτικά της Λίμνης Αγιάς και νότια του Πλατανιά) είναι σημαντική, καθώς βρίσκεται στην υπολεκάνη 6 του SWAT, μια από τις τελευταίες υπολεκάνες που διασχίζει ο ποταμός Κερίτης πριν φθάσει στις εκβολές του, στον Πλατανιά. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός λαμβάνει και καταγράφει δείγματα νερού το οποίο προέρχεται από την επιφανειακή ροή, από τις εκφορτίσεις των πηγών Αγιάς και από τις εκφορτίσεις των πηγών Μεσκλών. Κατά συνέπεια, ο συγκεκριμένος σταθμός είναι αυτός που επιλέγεται στη συγκεκριμένη εργασία να προσομοιώσει το συνολικό σύστημα του Κερίτη (σύστημα καρστικών σχηματισμών και υδρολογικό σύστημα όπως ορίζεται από το SWAT). Η θέση του σταθμού και η φωτογραφική απεικόνιση του ποταμού από το σημείο που είναι τοποθετημένος ο σταθμός παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες:



Εικόνα 5.1: Η θέση του υδρολογικού σταθμού Κερίτη (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 5.2: Άποψη του ποταμού από το σημείο στο οποίο είναι τοποθετημένος ο σταθμός (Πηγή: panoramio.com)



Εικόνα 5.3: Υδρολογικός σταθμός Κερίτη σε διαδικασία συντήρησης και βαθμονόμησης του Troll 9500

Από τα δεδομένα που καταμετρεί ο σταθμός με το σύστημα Troll 9500 μας ενδιαφέρουν η στάθμη της κοίτης και τα νιτρικά. Σχετικά με τη στάθμη της κοίτης, από αυτά τα δεδομένα μπορούμε να φτάσουμε στην παροχή. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η παρακάτω:

Αρχικά, λαμβάνουμε τα δεδομένα στάθμης από τον υδρολογικό σταθμό και τα καταγράφουμε σε excel αρχείο.

Έπειτα, μετράμε τη στάθμη του ποταμού και την αντίστοιχη παροχή in-situ με τη μεθοδολογία, η οποία αναλύεται προηγουμένως και καταγράφουμε τα δεδομένα στο ίδιο excel αρχείο:

Πίνακας 5.2: Δεδομένα πεδίου στάθμης και παροχής, Κερίτης troll station

A/A	Ημερομηνία	Στάθμη, h (cm)	Παροχή Q (m ³ /s)
1	11/30/2012	27	1.28
2	12/13/2012	29	1.42
3	1/22/2013	33	1.67
4	1/29/2013	36	1.74
5	2/14/2013	42	1.9
6	2/25/2013	43	3.26
7	3/11/2013	43	2.74
8	3/27/2013	48	3.62
9	4/11/2013	49	3.43
10	4/26/2013	55	3.71

Ακολουθως, προσπαθούμε να παραστήσουμε γραφικά τη συσχέτιση στάθμης του ποταμού με την παροχή. Επιλέγουμε να τα συσχετίσουμε εκθετικά και μετά από κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία (διαδικασία ελαχιστοποίησης του RMSE ανάμεσα στις παροχές που μετρώνται στο πεδίο και στις παροχές που εξάγει η εκθετική συνάρτηση που καταστρώνεται στο excel) καταλήγουμε στη σχέση:

$$Q = a * h^n \text{ [5.1.3.]}$$

Με

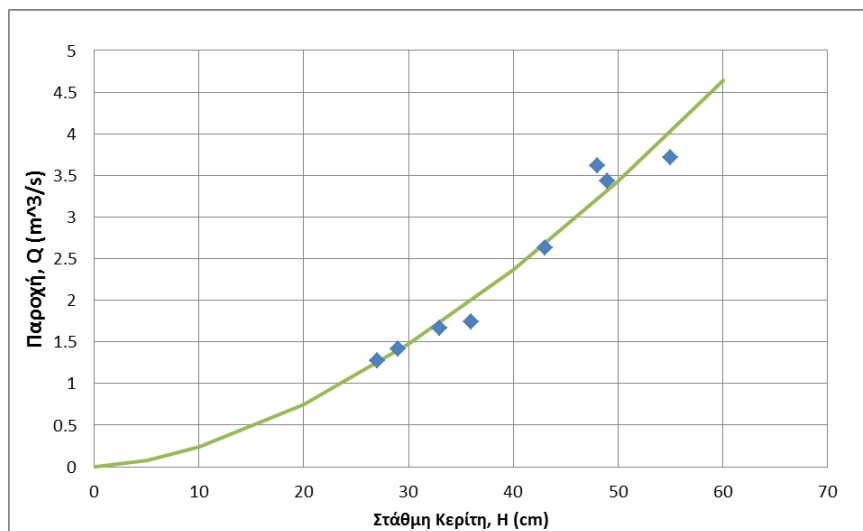
Q : Παροχή ποταμού

h : Στάθμη ποταμού

a : Συντελεστής με τιμή 0.00522

n : Συντελεστής με τιμή 1.65835

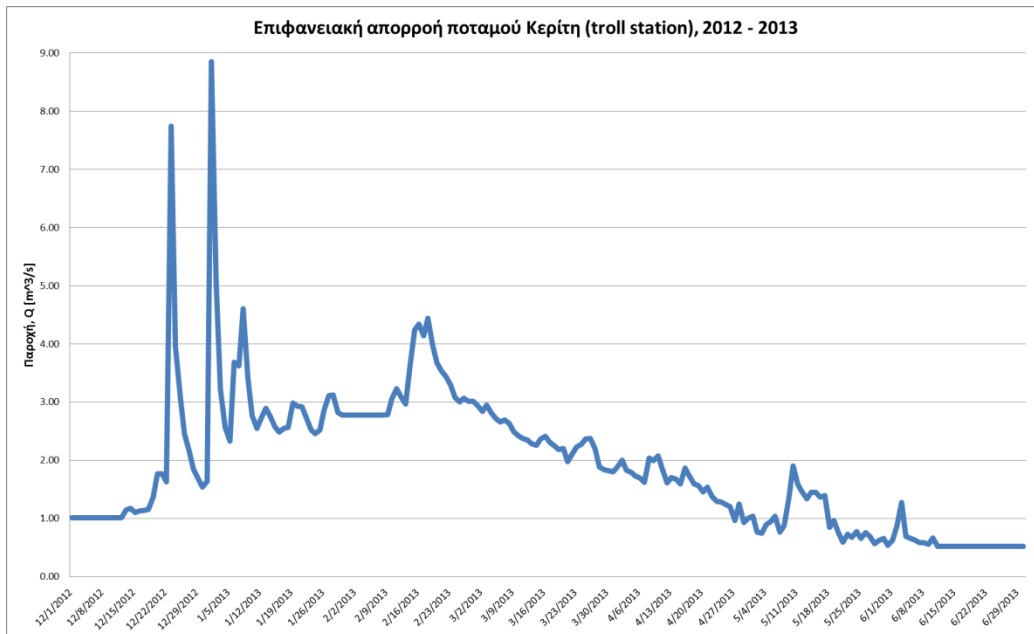
Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση $Q=f(h)$ στην οποία συμπεριλαμβάνονται τα δεδομένα πεδίου (σημεία) και η γραφική παράσταση της εκθετικής συνάρτησης [5.1.3]:



Διάγραμμα 5.1: Η συνάρτηση συσχέτισης Στάθμης – Παροχής στη διατομή του ποταμού που βρίσκεται ο υδρολογικός σταθμός.

Επισημαίνεται ότι το RMSE για τα δεδομένα παροχής πεδίου και τα δεδομένα παροχής που εξάγει η [5.1.3] ισούται με $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$, τιμή πολύ καλή.

Στη συνέχεια, μπορούμε να μετατρέψουμε τη στάθμη που μετράει το troll σε παροχή με χρήση της [5.1.3.]:



Διάγραμμα 5.2: Το υδρογράφημα που προκύπτει από τη μετατροπή της στάθμης που μετράει το troll σε παροχή.

Σχετικά με την ορθή λειτουργία και συντήρηση του υδρολογικού σταθμού, κάθε φορά που πηγαίναμε στο πεδίο κατά την περίοδο συλλογής δεδομένων 2012 – 2013 πραγματοποιούσαμε

βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων τις οποίες μετράει το Troll 9500 με χρήση προτύπων διαλυμάτων τα οποία είχαν προηγουμένως παρασκευαστεί στο Εργαστήριο. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε η αξιοπιστία των μετρήσεων τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας.

5.2. Εργαστηριακές αναλύσεις

Εργαστηριακές αναλύσεις δειγμάτων του ποταμού Κερίτη έγιναν για τις ακόλουθες παραμέτρους:

- $N - NO_3^-$
- $N - NH_3$
- $P - PO_4^{3-}$
- TSS
- TOC
- IC
- TC
- TN
- COD
- TKN

Οι εργαστηριακές αναλύσεις που έγιναν στα δείγματα νερού του ποταμού Κερίτη (τα οποία λαμβάνονταν στο πεδίο και μεταφέρονταν σε μικρό χρονικό διάστημα από τη συλλογή τους στο Εργαστήριο για αναλύσεις, ώστε να αποφευχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο κίνδυνος αλλίωσης της σύστασής τους) για να ευρευθούν οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων είναι:

Τα $N - NO_3^-$, νιτρικό άζωτο, υπολογίζονται με τη χρήση φασματοφωτομέτρου HACH DR – 2800, μέθοδος 8039 [Cd reduction-High Range]. Το εύρος συγκεντρώσεων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι 0,3 – 30 mg / L.

Τα $N - NH_3$, αμμωνιακό άζωτο, υπολογίζονται με τη χρήση φασματοφωτομέτρου HACH DR – 2800, μέθοδος 8038 [Nessler Method]. Το εύρος συγκεντρώσεων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι 0,02 – 2,50 mg / L.

Τα $P - PO_4^{3-}$, φωσφορικά ιόντα, υπολογίζονται με τη χρήση φασματοφωτομέτρου HACH DR – 2800, μέθοδος 8048 [Ascorbic Acid]. Το εύρος συγκεντρώσεων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι 0,007 – 0,815 mg $P - PO_4^{3-}$ / L ή 0,02 – 2,50 mg PO_4^{3-} .

Για να πραγματοποιηθούν οι φωτομετρικές αναλύσεις για τις τρεις παραπάνω παραμέτρους παρασκευάσαμε δύο διαλύματα σε κάθε ανάλυση και ένα blank διάλυμα. Οπότε η συγκέντρωση της αναλυόμενης παραμέτρου προέκυπτε από το μέσο όρο των συγκεντρώσεων των 2 διαλυμάτων. Αυτό γινόταν με σκοπό τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των αναλύσεων και για να βεβαιωθούμε ότι ακολουθούμε σωστά όλα τα βήματα της μεθοδολογίας.

Τα TSS, ολικά αιωρούμενα στερεά, μετρώνται με μέθοδο διήθησης και ξήρανσης δείγματος πεδίου. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται δείγμα 2 L από το πεδίο και μεταφέρεται στο Εργαστήριο. Το φίλτρο πριν τη διήθηση ξηραίνεται στους 40 °C για 30 λεπτά και ζυγίζεται, $m_{\text{πριν,bl}}$. Ακολούθως, το δείγμα διηθείται με φίλτρο Whatman N5 και το φίλτρο ξηραίνεται στους 40 °C για 30 λεπτά και ζυγίζεται, $m_{\text{μετά}}$. Κατά συνέπεια

$$TSS = \frac{m_{\text{μετά}} - m_{\text{πριν,bl}}}{2} \quad [5.3.]$$

Οι παραμέτροι TOC (ολικός οργανικός άνθρακας), IC (ανόργανος άνθρακας), TC (Ολικός άνθρακας), TN (Ολικό άζωτο) αναλύονται με Combustion with 2100S of Analytic Jena.

Το COD, χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, υπολογίζεται με LCK test (Cr^{+6} reduction).

Τέλος, το TKN, ολικό Kjeldahl άζωτο, αναλύεται με μέθοδο χώνευσης Kjeldahl και ακολούθως η συγκέντρωση υπολογίζεται με τη χρήση σπεκτροφωτομέτρου HACH DR – 2800, μέθοδος 875 [Nessler method]. Το εύρος συγκεντρώσεων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι 1 – 150 mg / L.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων:

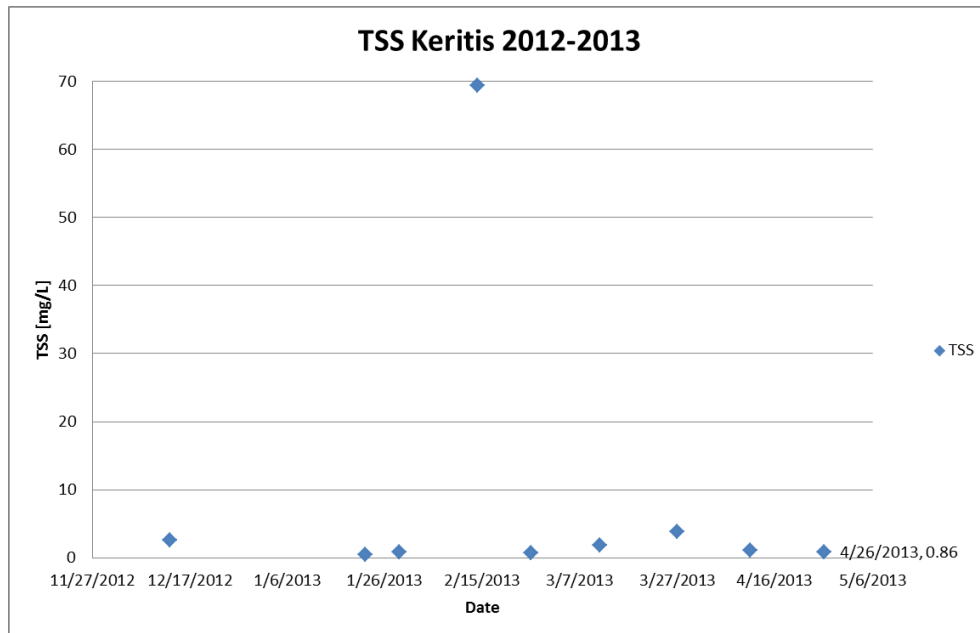
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων 1, 2012 – 2013

A/A	Ημερομηνία	TSS(mg/L)	TOC(mg/L)	IC(mg/L)	TC(mg/L)	P-PO4(-3)(mg/L)
1	11/30/2012	-	3.06	24.90	27.96	-
2	12/13/2012	2.55	1.33	32.51	33.84	0.06
3	1/22/2013	0.50	1.33	26.67	28.00	0.06
4	1/29/2013	0.85	1.93	27.05	28.98	0.05
5	2/14/2013	69.45	2.52	24.58	27.10	0.05
6	2/25/2013	0.70	2.85	27.31	30.16	0.03
7	3/11/2013	1.89	2.65	23.37	26.02	0.01
8	3/27/2013	3.78	1.95	25.37	27.32	0.04
9	4/11/2013	1.08	1.93	24.45	26.38	0.04
10	4/26/2013	0.86	2.17	26.71	28.88	0.01

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων 2, 2012 – 2013

A/A	Ημερομηνία	TKN(mg/L)	N-NH ₃ (mg/L)	N-NO ₃ -(mg/L)
1	11/30/2012	-	-	-
2	12/13/2012	2.79	0.05	1.47
3	1/22/2013	2.19	0.02	2.68
4	1/29/2013	2.08	0.04	2.41
5	2/14/2013	3.23	0.03	2.41
6	2/25/2013	2.94	0.02	2.85
7	3/11/2013	-	0.01	2.26
8	3/27/2013	2.21	0.06	2.12
9	4/11/2013	1.38	0.08	1.21
10	4/26/2013	1.46	0.06	1.32

Για το χρονικό διάστημα 2012 – 2013 οι τιμές TSS πεδίου έχουν ελάχιστη τιμή τα 0,5 mg / L και μέγιστη τιμή τα 69,45 mg / L. Η συγκεκριμένη τιμή, η οποία είναι σημαντικά μεγάλη, υποδηλώνει πραγματοποίηση μεταφοράς μεγάλης μάζας φερτών υλικών και ύπαρξη διάβρωσης στις περιοχές από τις οποίες διέρχεται ο Κερίτης. Επιπλέον, η μέση τιμή TSS είναι 9,07 mg / L, όμως χωρίς να λάβουμε υπόψη την κορυφή (69,45 mg/L), η μέση τιμή διαμορφώνεται στα 1,53 mg / L. Τέλος, η τυπική απόκλιση είναι 21,37.

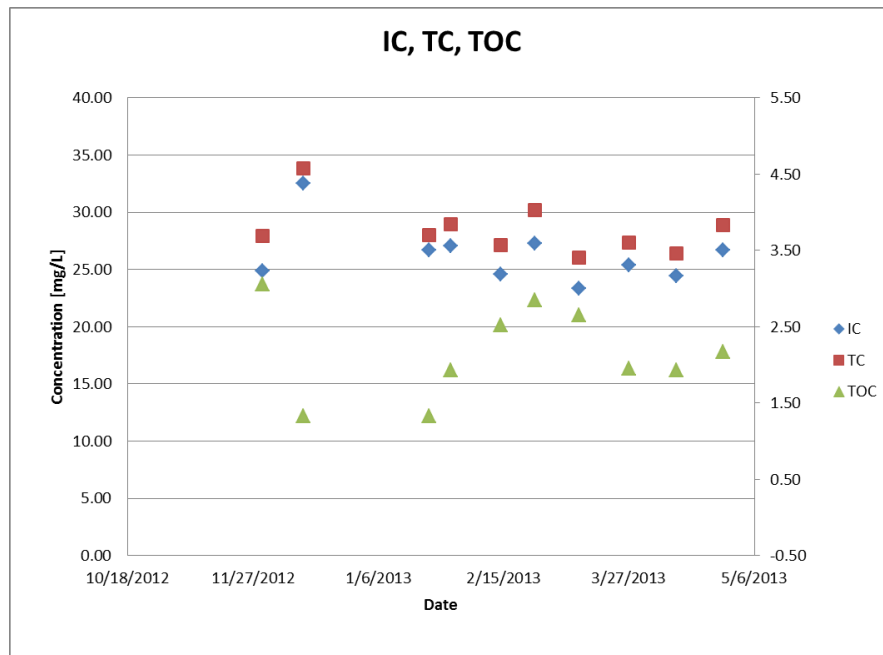


Διάγραμμα 5.3: Γραφική παράσταση συγκεντρώσης TSS στον Κερίτη, 2012-2013

Επιπλέον, παρουσιάζεται η κατάσταση των συγκεντρώσεων άνθρακα στις μορφές IC, TC και TOC στο ακόλουθο διάγραμμα. Οι συγκεντρώσεις του ολικού οργανικού άνθρακα είναι χαμηλές και κυμαίνονται μεταξύ 1-3 mg /L. Επίσης, οι συγκεντρώσεις του ανόργανου άνθρακα, οι οποίες προέρχονται από τη διάβρωση των ανθρακικών πετρωμάτων και ιζημάτων, κυμαίνονται

σε υψηλότερα επίπεδα με ελάχιστη τιμή IC τα 23 mg / L και μέγιστη τα 33 mg / L. Αναφορικά με το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, COD, το οποίο υπολογίζεται στο εργαστήριο, έχουμε τιμές COD χαμηλότερες από το όριο εντοπισμού (detection limit) σε όλη τη χρονική περίοδο μελέτης. Αυτό υποδεικνύει ότι τα επιφανειακά ύδατα του Κερίτη δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα ύπαρξης οργανικών ρύπων.

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.4 με τις συγκεντρώσεις των διαφόρων μορφών αζωτούχων ενώσεων, μπορούμε να υπολογίσουμε κάποιους στατιστικούς δείκτες για τις τιμές συγκεντρώσεων:



Διάγραμμα 5.4: Γραφική παράσταση συγκεντρώσεων IC, TC, TOC στον Κερίτη, 2012-2013

Πίνακας 5.5: Στατιστικοί δείκτες για TKN, N-NH₃, N-NO₃

	TKN	N-NH ₃	N-NO ₃
Average (mg/L)	2.28	0.04	2.08
Stdev	0.63	0.02	0.57
Range (mg/L)	1.85	0.07	1.64
Max (mg/L)	3.23	0.08	2.85
Min (mg/L)	1.38	0.01	1.21

6. Αποτελέσματα της μοντελοποίησης

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης διακρίνονται στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της υδρολογίας (παροχές υδάτων) και της γεωχημείας (κατάσταση νιτρικών) στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη. Στις δύο παραπάνω κατηγορίες αποτελεσμάτων μοντελοποιούμε τις πηγές της Αγιάς και των Μεσκλών, καθώς και επιφανειακά τον ποταμό Κερίτη.

6.1. Υδρολογία

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της υδρολογίας στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη, ακολουθούμε την εξής διαδικασία στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία:

1. Βαθμονόμηση (calibration) των παραμέτρων του SWAT και του καρστικού μοντέλου.
2. Τρέξιμο του SWAT και του καρστικού μοντέλου για να δούμε την απόκριση των πηγών Αγιάς και Μεσκλών.
3. Επαλήθευση (validation) του μοντέλου (SWAT + καρστικό).
4. Μοντελοποίηση των επιφανειακών υδάτων του Κερίτη στο σημείο του υδρολογικού σταθμού (troll station).
5. Κατάστρωση υδραυλικού ισοζυγίου για τη λεκάνη απορροής Κερίτη.

Ακολουθως, αναλύουμε τη διαδικασία και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα αυτής:

Η βαθμονόμηση γίνεται με τη μεταβολή των τιμών των διάφορων παραμέτρων μέχρι οι τιμές του μοντέλου και του πεδίου να συγκλίνουν ικανοποιητικά. Οι παράμετροι οι οποίες συνήθως επιλέγονται είναι εκείνες με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Επιπλέον, επιλέγονται εκείνες με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή παραμέτρους για τις οποίες δεν υπάρχει ούτε ικανοποιητική μέτρηση στο πεδίο αλλά ούτε ικανοποιητική φυσική ερμηνεία.

Στη μελέτη του Κερίτη επιλέγεται η χειροκίνητη βαθμονόμηση του μοντέλου με μεταβολή των πιο σημαντικών παραμέτρων που παίζουν σπουδαίο ρόλο στην προσομοίωση τόσο της υδρολογίας όσο και της χημείας με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρήσεων. Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση συντελείται μία μεταβολή τη φορά που συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στον ποταμό Κερίτη. Η συγκεκριμένη μέθοδος βαθμονόμησης αποτελεί μια μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (trial-error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel, Storm, White, Arnold, & Arabi, 2007).

Αρχικά έγινε η βαθμονόμηση του εδάφους. Στη συνέχεια έγινε βαθμονόμηση παραμέτρων που επηρέαζαν τη ροή του νερού και γενικά το υδατικό ισοζύγιο (πόσο φεύγει στο υπέδαφος, πόσο φεύγει με τη μορφή εξατμισοδιαπνοής κτλ.) με στόχο την καλύτερη

προσομοίωση του. Ακολουθως, παρουσιάζονται οι παράμετροι του μοντέλου SWAT που μεταβλήθηκαν μέχρι να βαθμονομηθούν οι παροχές πηγών Αγιάς και Μεσκλών, καθώς και η επιφανειακή απορροή στον κεντρικό σταθμό (υπολεκάνη 6).

Πίνακας 6.1: Παράμετροι του SWAT που μεταβλήθηκαν για να γίνει η βαθμονόμηση

A/A	Παράμετρος	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης	Τυπικό Εύρος στο SWAT	Εύρος τιμών στον Κερίτη
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Soils (.sol)					
1	SOL_AWC	Διαθέσιμη χωρητικότητα στο στρώμα εδάφους -Available water capacity of the soil layer	mm H ₂ O/mm εδάφους	0-1	0.11 – 0.5
2	SOL_K	Το μέτρο της κορεσμένη υδραυλικής -αγωγιμότητας Saturated hydraulic conductivity	mm / h	0-2000	5.2 – 20.6
3	SOL_Z	Βάθος Εδάφους - Depth from soil surface to bottom of layer	mm	0-3500	300 – 1000
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Groundwater (.gw)					
4	GW_DELAY	Συντελεστής καθυστέρησης υπογείου νερού - Groundwater Delay time	days	0-500	40
5	ALPHA_BF	Παράγοντας ύφεσης της παροχής του υπογείου νερού - Baseflow alpha factor	days	0-1	0.01
6	GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης υπογείου νερού - Groundwater Revap coefficient	-	0.02-0.2	0.2

7	RCHRG_DP	Ποσοστό ποσότητας νερού που από τον αβαθή κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα - Deep aquifer percolation factor	-	0-1	0 – 1
8	GWQMIN	Ελάχιστο βάθος νερού στον αβαθή υδροφορέα για να επιστρέψει η ροή στην επιφάνεια – Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	mm H ₂ O	0-5000	50 – 5000
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Subbasin (.sub)					
9	CH_K1	Υδραυλική αγωγιμότητα από την επιφανειακή ροή προς το αλλούβιο - Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium	mm/hr	0-300	30
10	TLAPS	Θερμοβαθμίδα – Temperature lapse rate	°C/km	0-50	-5.7
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: HRU (.hru)					
11	CANMX	Μέγιστη συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη - Maximum canopy storage	mm H ₂ O	0-100	15
12	ESCO	Soil evaporation compensation factor	-	0-1	0.1
13	EPCO	Plant uptake compensation factor	-	0-1	1
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Management (.mgt)					

14	CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	-	35-98	45 – 51
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: General Data (.bsn)					
15	SFTMP	Θερμοκρασία Χιονόπτωσης - Snowfall temperature	°C	-5°C – 5°C	5
16	SMTMP	Θερμοκρασία που λιώνει το χιόνι - Snow melt base temperature	°C	-5°C – 5°C	5
17	SMFMX	Συντελεστής ρυθμού που λιώνει το χιόνι το θερινό ηλιοστάσιο - Maximum melt rate for snow during the year (summer solstice)	mm H ₂ O / (°C*day)	0-10	4.5
18	SMFMN	Συντελεστής ρυθμού που λιώνει το χιόνι το χειμερινό ηλιοστάσιο Minimum melt rate for snow during the year (winter solstice)	mm H ₂ O / (°C*day)	0-10	1.5

Βαθμονόμηση της υδρολογίας των πηγών Αγιάς

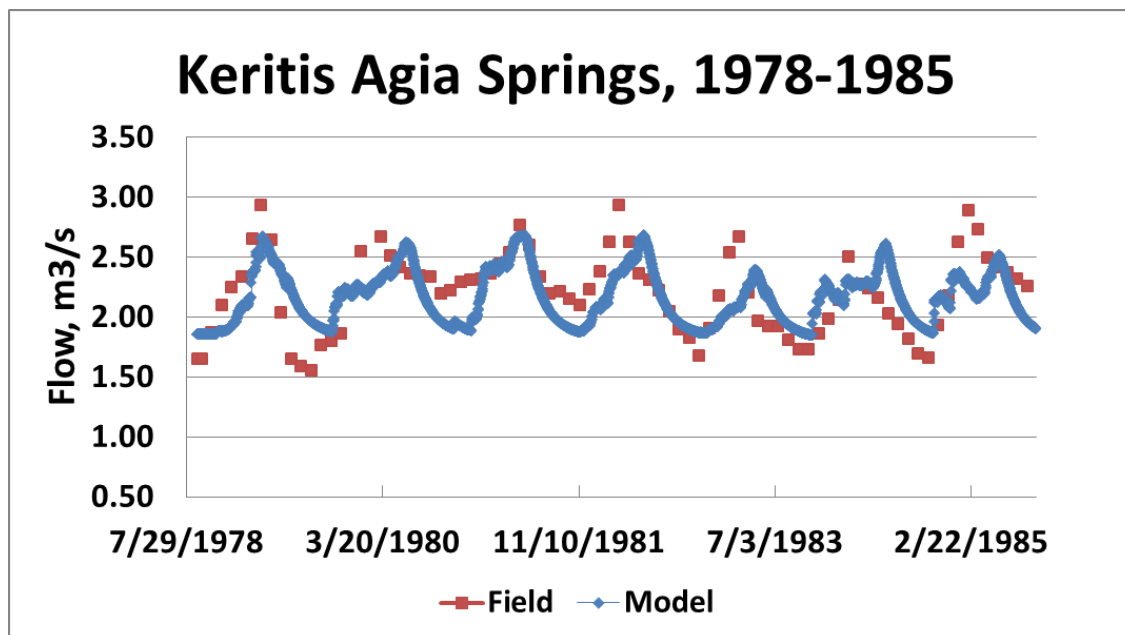
Αναφορικά με τη βαθμονόμηση του καρστικού μοντέλου (Αγιά), παρατίθενται οι παράμετροι του καρστικού μοντέλου για τις πηγές Αγιάς με τις τελικές τιμές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των εκφορτίσεων της Αγιάς.

Πίνακας 6.2: Παράμετροι του καρστικού μοντέλου για τις πηγές Αγιάς

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
Αρχική εισροή στο καρστ, Q _{ko}	m ³ /day	160000
Λόγος των εισροών στον ανώτερο ταμιευτήρα, α1		0.33

Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα, k_u	1/day	0.02
Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα, k_l	1/day	0.0001
Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο, α_2		0.55
Συνολικός χρόνος προσομοίωσης	days	12784
RMSE (Karstic Flow)	m^3/s	0.28
Χρόνος παραμονής στον ανώτερο ταμιευτήρα	days	50
Χρόνος παραμονής στον κατώτερο ταμιευτήρα	days	10000

Παρατηρώντας τις τιμές των παραμέτρων του καρστικού συστήματος το οποίο τροφοδοτεί τις πηγές της Αγίας, είναι χαρακτηριστικό για τη λειτουργία των δύο καρστικών σχηματισμών – ταμιευτήρων ότι ο ανώτερος ταμιευτήρας έχει υδραυλικό χρόνο παραμονής 50 ημερών, ενώ ο κατώτερος ταμιευτήρας παρουσιάζει έναν πολύ μεγαλύτερο χρόνο παραμονής, 10.000 ημέρες. Επιπροσθέτως, ο δείκτης RMSE (ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων του λάθους) έχει αρκετά ικανοποιητική τιμή, $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$. Σημειωτέον ότι στη βαθμονόμηση του καρστικού συστήματος έγινε προσπάθεια ελαχιστοποίησης του δείκτη RMSE με τη χρήση της εφαρμογής Solver του Microsoft Excel 2010.



Διάγραμμα 6.1: Βαθμονόμηση της υδρολογίας των πηγών Αγίας

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, υπάρχει μια σχετικά ικανοποιητική προσομοίωση των παροχών του πεδίου με τις παροχές του μοντέλου (SWAT και καρστικό μοντέλο). Η ικανοποιητική προσομοίωση επιβεβαιώνεται από τους στατιστικούς δείκτες οι οποίοι υπολογίστηκαν για την περίοδο βαθμονόμησης. Οι τιμές τους φαίνονται παρακάτω (Πίνακας

5.3) και συγκρίνονται με τις αποδεκτές τιμές των συγκεκριμένων δεικτών που έχουν τεθεί από το Moriasi (2007).

Πίνακας 6.3: Στατιστικοί δείκτες για την περίοδο βαθμονόμησης των πηγών Αγιάς

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών δεικτών βάσει Moriasi (2007)
RMSE	0.36	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.34	Μη ικανοποιητικό
PBIAS	-6.74	Πολύ καλό
RSR	0.58	Καλό

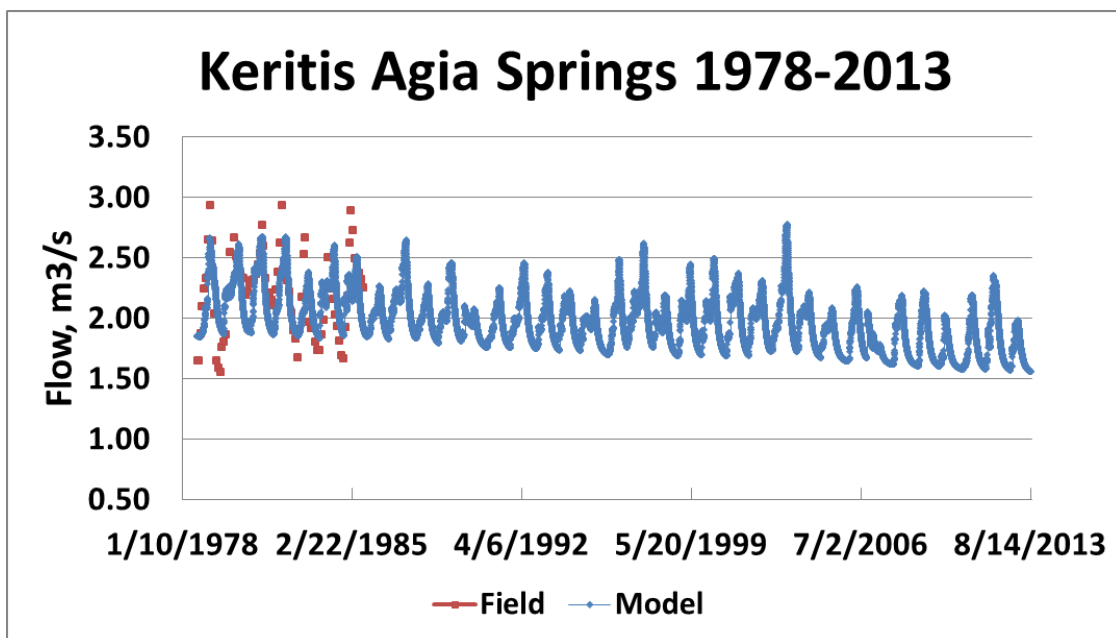
Η αξιολόγηση της προσομοίωσης μέσω στατιστικών δεικτών (Moriasi et al., 2007) πραγματοποιείται με τη χρήση του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.3: Αξιολόγηση προσομοίωσης παροχής με χρήση στατιστικών δεικτών

Performance Rating	RSR	NSE	Streamflow
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Παρατηρώντας τον πίνακα 6.3, οι τιμές των δεικτών RMSE, PBIAS και RSR είναι αποδεκτές, ενώ η τιμή του NSE δεν είναι αποδεκτή για τη βαθμονόμηση.

Ακολούθως, γίνεται η προσομοίωση της υδραυλικής εκφόρτισης των πηγών Αγιάς για το χρονικό διάστημα 1978 – 2013 χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT και το καρστικό μοντέλο, με ίδιες τις τιμές των παραμέτρων με αυτές της βαθμονόμησης. Η συγκεκριμένη προσομοίωση εκτελείται για να έχουμε τις τιμές των παροχών εξόδου από τις πηγές το υδρολογικό έτος 2012 – 2013, χρονική περίοδος για την οποία θα γίνει η μοντελοποίηση της επιφανειακής ροής του ποταμού Κερίτη στον κεντρικό σταθμό της λεκάνης.



Διάγραμμα 6.2: Προσομοίωση της εκφόρτισης πηγών Αγιάς για το χρονικό διάστημα 1978 -2013

Σχολιάζοντας το διάγραμμα 6.2, η μέση ημερήσια παροχή για το σύνολο των ετών είναι 1.97 m³/s. Επιπλέον, οι εκφορτιζόμενες υδραυλικές ποσότητες από τις πηγές Αγιάς εμφανίζουν πτώση με την πάροδο των ετών, ξεκινώντας από τα 67 Mm³ το υδρολογικό έτος 1978 – 1979 και φθάνοντας στα 54 Mm³ κατά το υδρολογικό έτος 2012 – 2013.

Βαθμονόμηση της υδρολογίας των πηγών Μεσκλών

Αναφορικά με τη βαθμονόμηση του καρστικού μοντέλου των πηγών Μεσκλών, παρατίθενται οι παράμετροι του καρστικού μοντέλου με τις τελικές τιμές που προέκυψαν.

Πίνακας 6.4: Παράμετροι του καρστικού μοντέλου για τις πηγές Μεσκλών

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
Αρχική εισροή στο καρστ, Qko	m ³ /day	45000
Λόγος των εισροών στον ανώτερο ταμιευτήρα, a1		0.95
Σταθερά στείρευσης του ανώτερου ταμιευτήρα, ku	1/day	0.08
Σταθερά στείρευσης του κατώτερου ταμιευτήρα, kl	1/day	0.01
Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο, a2		0.01
Συνολικός χρόνος προσομοίωσης	days	12784
RMSE (Karstic Flow)	m ³ /s	0.71

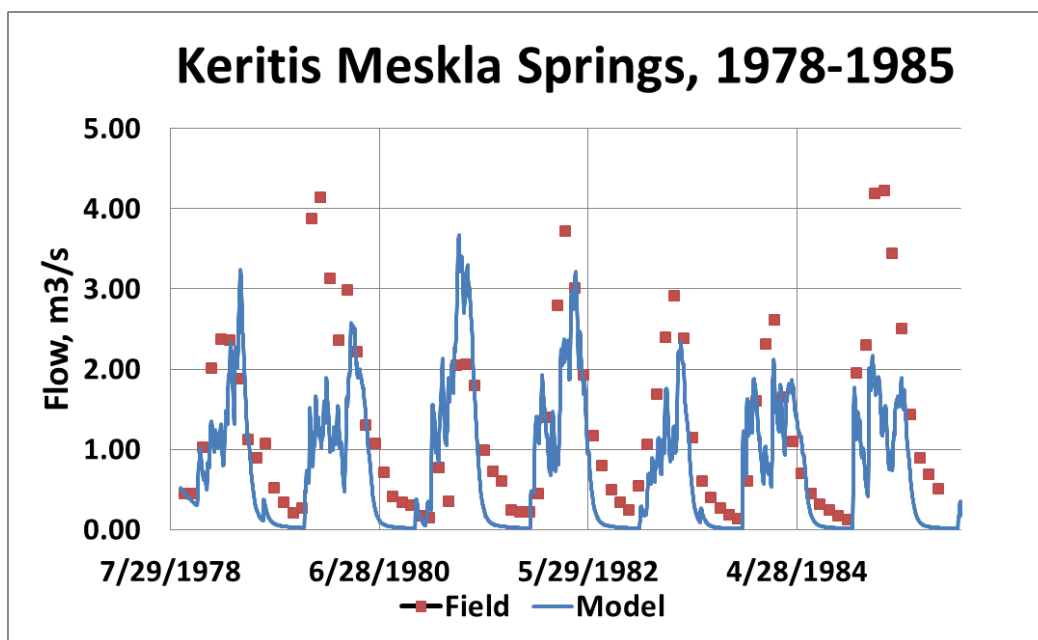
Χρόνος παραμονής στον ανώτερο ταμιευτήρα	days	13
Χρόνος παραμονής στον κατώτερο ταμιευτήρα	days	100

Παρατηρώντας τις τιμές των παραμέτρων του καρστικού συστήματος το οποίο τροφοδοτεί τις πηγές των Μεσκλών, είναι χαρακτηριστικό για τη λειτουργία των δύο καρστικών σχηματισμών – ταμιευτήρων ότι ο ανώτερος ταμιευτήρας έχει υδραυλικό χρόνο παραμονής 13 ημερών (το νερό παραμένει σε αυτόν για λίγο χρονικό διάστημα – γρήγορη εκφόρτιση), ενώ ο κατώτερος ταμιευτήρας παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής, 100 ημέρες (το νερό μένει σε αυτόν περισσότερο χρονικό διάστημα – βραδεία εκφόρτιση). Επιπροσθέτως, ο δείκτης RMSE (ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων του λάθους) έχει ικανοποιητική τιμή, 0.71 m³/s. Σημειωτέον ότι στη βαθμονόμηση του καρστικού συστήματος έγινε προσπάθεια ελαχιστοποίησης του δείκτη RMSE με τη χρήση της εφαρμογής Solver του Microsoft Excel 2010. Η συγκεκριμένη εφαρμογή επιλύει προβλήματα ελαχιστοποίησης συναρτήσεων με γραμμικό ή μη τρόπο.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, υπάρχει μια σχετικά ικανοποιητική προσομοίωση των παροχών πηγών Μεσκλών του πεδίου με τις παροχές του μοντέλου (SWAT και καρστικό μοντέλο). Η ικανοποιητική προσομοίωση επιβεβαιώνεται από τους στατιστικούς δείκτες οι οποίοι υπολογίστηκαν για την περίοδο βαθμονόμησης. Η αξιολόγηση των τιμών των δεικτών γίνεται, όπως και για την Αγιά, με τις αποδεκτές τιμές του Moriasi (2007).

Παρατηρώντας τον πίνακα 6.5, οι τιμές των δεικτών RMSE, PBIAS και RSR είναι αποδεκτές, ενώ η τιμή του NSE δεν είναι αποδεκτή για τη βαθμονόμηση.

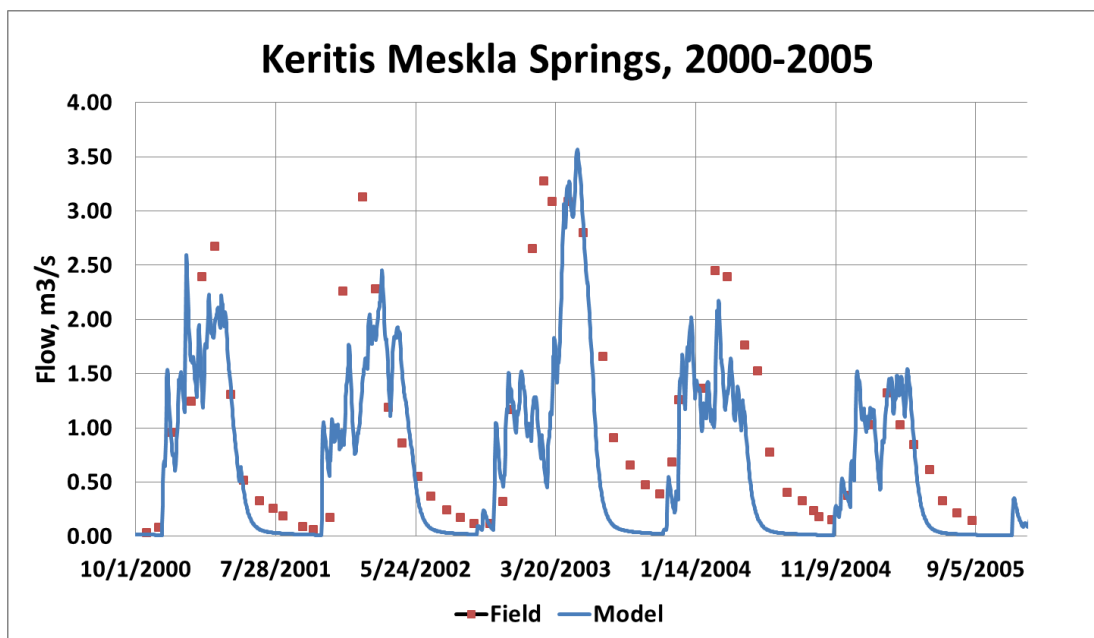
Ακολούθως, γίνεται επαλήθευση της υδραυλικής εκφόρτισης των πηγών Μεσκλών για το χρονικό διάστημα 200 – 2005 χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT και το καρστικό μοντέλο, με ίδιες τις τιμές των παραμέτρων με αυτές της βαθμονόμησης. Αυτό το ανεξάρτητο σετ δεδομένων από το προηγούμενο μας δείχνει πόσο ικανοποιητικά λειτουργεί το συνδυαστικό μοντέλο, βάσει της βαθμονόμησης που του έχει γίνει.



Διάγραμμα 6.3: Βαθμονόμηση της υδρολογίας πηγών Μεσκλών

Πίνακας 6.5: Στατιστικοί δείκτες για την περίοδο βαθμονόμησης των πηγών Μεσκλών

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών δεικτών βάσει Moriasi (2007)
RMSE	0.29	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.16	Μη ικανοποιητικό
PBIAS	-13.7	Καλό
RSR	0.68	Ικανοποιητικό



Διάγραμμα 6.4: Επαλήθευση της υδρολογίας πηγών Μεσκλών

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.4, υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική προσομοίωση των παροχών πηγών Μεσκλών του πεδίου με τις παροχές του μοντέλου (SWAT και καρστικό μοντέλο). Η ικανοποιητική προσομοίωση επιβεβαιώνεται και από τους στατιστικούς δείκτες οι οποίοι υπολογίστηκαν για την περίοδο επαλήθευσης.

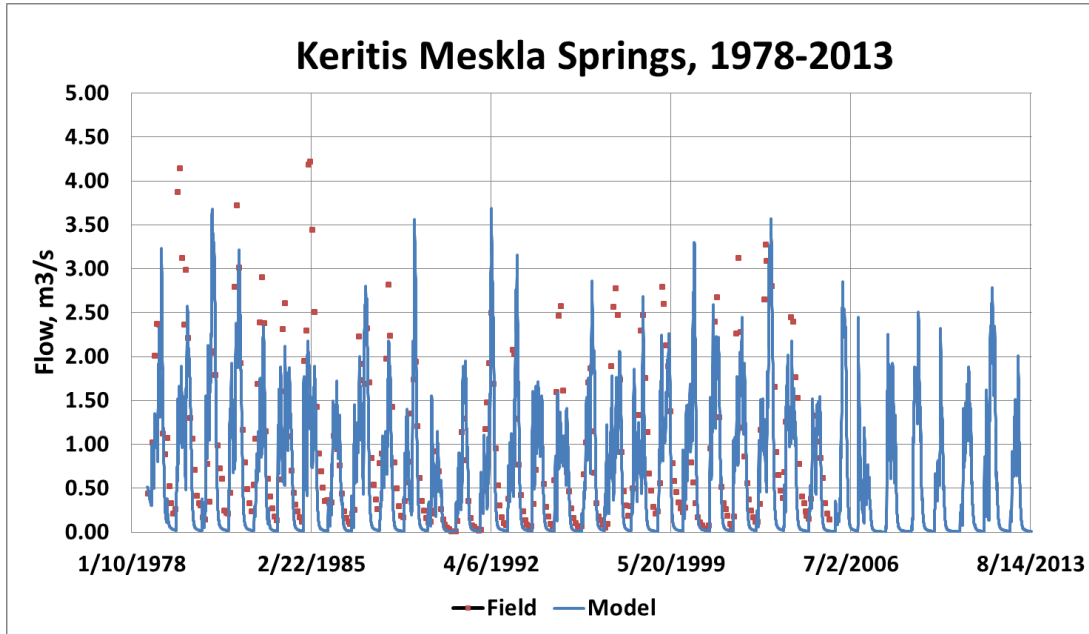
Πίνακας 6.6: Στατιστικοί δείκτες για την περίοδο επαλήθευσης των πηγών Μεσκλών

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών δεικτών βάσει Moriasi (2007)
RMSE	0.22	Αρκετά ικανοποιητικό
NSE	0.57	Ικανοποιητικό
PBIAS	-16.5	Ικανοποιητικό
RSR	0.54	Καλό

Η αξιολόγηση της επαλήθευσης της υδρολογίας για τις πηγές Μεσκλών αποδεικνύει ότι η βαθμονόμηση που έγινε παραπάνω είναι ορθή και αποδεκτή καθώς οι τιμές των δεικτών RMSE, PBIAS, NSE και RSR.

Ακολουθώς, γίνεται η προσομοίωση της υδραυλικής εκφόρτισης των πηγών Μεσκλών για το χρονικό διάστημα 1978 – 2013 χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT και το καρστικό μοντέλο, με ίδιες τις τιμές των παραμέτρων με αυτές της βαθμονόμησης και επαλήθευσης. Η συγκεκριμένη προσομοίωση εκτελείται για να έχουμε τις τιμές των παροχών εξόδου από τις πηγές το

υδρολογικό έτος 2012 – 2013, χρονική περίοδος για την οποία θα γίνει η μοντελοποίηση της επιφανειακής ροής του ποταμού Κερίτη στον κεντρικό σταθμό της λεκάνης.



Διάγραμμα 6.5: Προσομοίωση της εκφόρτισης των πηγών Μεσκλών για το χρονικό διάστημα 1978 - 2013.

Σχολιάζοντας το διάγραμμα 6.5, η μέση ημερήσια παροχή για το σύνολο των ετών είναι 0.64 m³/s. Επιπλέον, οι εκφορτιζόμενες υδραυλικές ποσότητες από τις πηγές Μεσκλών εμφανίζουν μείωση με μικρή κλίση με την πάροδο των ετών, ξεκινώντας από τα 26 Mm³ το υδρολογικό έτος 1978 – 1979 και φθάνοντας στα 16 Mm³ κατά το υδρολογικό έτος 2012 – 2013.

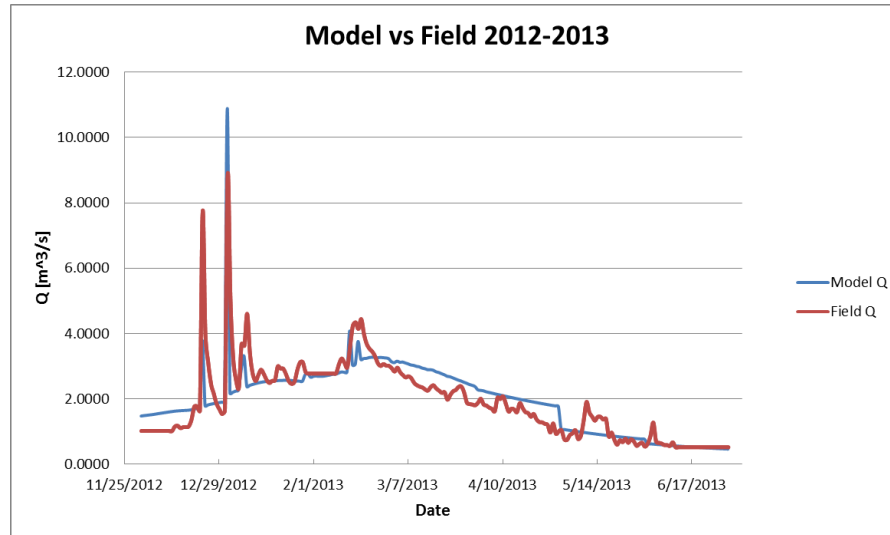
Επόμενο βήμα της μοντελοποίησης της υδρολογίας είναι η μοντελοποίηση των επιφανειακών υδάτων του Κερίτη στο σημείο του υδρολογικού σταθμού (troll station). Στο συγκεκριμένο σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να γίνει η συγκεκριμένη προσομοίωση της παροχής υδάτων, ελήφθησαν υπόψιν:

1. Η κυρίως παροχή του ποταμού Κερίτη στην υπολεκάνη 6, $Q_{\text{mod},6}$: Αυτή η παροχή προέρχεται από τα αρχεία εξόδου του SWAT (Flow_out, sub 6).
2. Η παροχή (εκφόρτιση) των πηγών Αγιάς, $Q_{\text{ΑΓΙΑ}}$: Η συγκεκριμένη παροχή προέρχεται από το καρστικό μοντέλο και αφού αφαιρεθούν οι υδραυλικές απολήψεις που πραγματοποιούν οι φορείς ΟΑΔΥΚ, ΤΟΕΒ και ΔΕΥΑΧ.
3. Η παροχή (εκφόρτιση) των πηγών Μεσκλών, $Q_{\text{ΜΕΣΚΛΑ}}$: Η συγκεκριμένη παροχή προέρχεται από το καρστικό μοντέλο και αφού αφαιρεθούν οι υδραυλικές απολήψεις που πραγματοποιεί ο ΟΑΔΥΚ.

Επομένως, η παροχή του μοντέλου, Q_{mod} προκύπτει από το παρακάτω άθροισμα:

$$Q_{mod} = Q_{mod,6} + Q_{ΑΓΙΑ} + Q_{ΜΕΣΚΛΑ} \quad [6.1.1]$$

Ακολούθως, στο διάγραμμα 6.6 γίνεται γραφική σύγκριση της προσομοιωμένης παροχής (παροχή μοντέλου, Q_{mod}) με την παροχή του πεδίου. Η παροχή του πεδίου προέρχεται από το υποκεφάλαιο 4.2.



Διάγραμμα 6.6: Προσομοίωση της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη

Η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.6, φαίνεται πολύ καλή, καθώς το συνδυασμένο μοντέλο προσομοιώνει τις μεγάλες κορυφές των παροχών κατά το τέλος του Δεκεμβρίου 2012 και στις αρχές του Ιανουαρίου 2013. Οι συγκεκριμένες κορυφές (peaks) προέρχονται από περιοδικά πλημμυρικά φαινόμενα των ημερών (flash floods) και αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από τα μετεωρολογικά δεδομένα των ημερών, τα οποία καταγράφουν μεγάλες ποσότητες κατακρυσμνήσεων τις συγκεκριμένες ημέρες. Συνεχίζοντας, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά μια ακόμη κορυφή που παρατηρείται στα μέσα του Φεβρουαρίου 2013. Εν συνεχεία, από τις αρχές Μαρτίου 2013 έως τις αρχές Μαΐου 2013 το μοντέλο αρχίζει να εξάγει μειωμένες παροχές στο ποτάμι, καθώς μειώνονται και οι βροχοπτώσεις της χειμερινής περιόδου.

Μια επιπλέον αξιολόγηση γίνεται με τους στατιστικούς δείκτες και παρατίθεται παρακάτω (Πίνακας 6.7).

Πίνακας 6.7: Στατιστικοί δείκτες για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής του Κερίτη, 2012 -2013

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών δεικτών βάσει Moriasi (2007)
RMSE	0.29	Αρκετά ικανοποιητικό

NSE	0.48	Μη ικανοποιητικό
PBIAS	-15.6	Ικανοποιητικό
RSR	0.59	Καλό

Η αξιολόγηση της προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής βεβαιώνει ότι η προσομοίωση στον κεντρικό υδρολογικό σταθμό είναι καλή καθώς οι τιμές των δεικτών RMSE, PBIAS και RSR είναι αποδεκτές, ενώ ο δείκτης NSE λαμβάνει μη αποδεκτή τιμή.

Έχοντας ολοκληρώσει την προσομοίωση της εκφόρτισης των πηγών Αγιάς και Μεσκλών και την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη, προχωρούμε στη δημιουργία του υδραυλικού ισοζυγίου:

Η συνολική βροχόπτωση, (εξατμισοδιαπνοή)ET για το χρονικό διάστημα 2012 – 2013 στη λεκάνη απορροής (από αρχεία εξόδου SWAT) είναι:

$$P = 710 \text{ mm}$$

$$ET = 340 \text{ mm}$$

Η παροχή εκφόρτισης των πηγών Μεσκλών έχει υπολογιστεί στο παρών υποκεφάλαιο στην προσομοίωση της υδρολογίας Μεσκλών και προκύπτει για το υδρολογικό έτος 2012 – 2013 :

$$Q_{MEΣKΛA} = 16 * 10^6 m^3 \Rightarrow H_M = \frac{Q_{MEΣKΛA}}{A_{Kερίτη}} * 1000 \frac{mm}{m}$$

$$= \frac{16 * 10^6 m^3}{180 km^2} * 1000 \frac{mm}{m} \cong 89 \text{ mm}$$

Οι υδραυλικές απολήψεις από τις πηγές Μεσκλών έχουν υπολογιστεί στο υποκεφάλαιο 4.3 και προκύπτει για το υδρολογικό έτος 2012 – 2013 :

$$W_{MEΣKΛA} = 2,25 * 10^6 m^3 \Rightarrow W_M = \frac{W_{MEΣKΛA}}{A_{Kερίτη}} * 1000 \frac{mm}{m} \cong 13 \text{ mm}$$

Η παροχή εκφόρτισης των πηγών Αγιάς έχει υπολογιστεί στο παρών υποκεφάλαιο στην προσομοίωση της υδρολογίας Αγιάς και προκύπτει για το υδρολογικό έτος 2012 – 2013 :

$$Q_{AΓIA} = 54 * 10^6 m^3 \Rightarrow H_A = \frac{Q_{AΓIA}}{A_{Kερίτη}} * 1000 \frac{mm}{m} \cong 300 \text{ mm}$$

Οι υδραυλικές απολήψεις από τις πηγές Αγιάς έχουν υπολογιστεί στο υποκεφάλαιο 4.3 και προκύπτει για το υδρολογικό έτος 2012 – 2013 :

$$W_{AΓIA} = 29 * 10^6 m^3 \Rightarrow W_A = \frac{W_{AΓIA}}{A_{Kερίτη}} * 1000 \frac{mm}{m} \cong 161 \text{ mm}$$

Τέλος, η παροχή υδάτων στον Κερίτη (υδρολογικός σταθμός, περίπου στις εκβολές του ποταμού στη θάλασσα) για το 2012 – 2013 είναι (από δεδομένα πεδίου, υποκεφάλαιο 4.2):

$$Q_{\text{ΚΕΡΙΤΗΣ}} = 61 * 10^6 \text{ m}^3 \Rightarrow H_K = \frac{Q_{\text{ΚΕΡΙΤΗΣ}}}{A_{\text{Κερίτη}}} * 1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cong 339 \text{ mm}$$

Πίνακας 6.8: Υδραυλικό ισοζύγιο 2012 -2013

Βροχόπτωση, P [mm]	710
Εξατμισοδιαπνοή, ET [mm]	340
Παροχή Μεσκλών, Q _M [mm]	89
Απολήψεις Μεσκλών, W _M [mm]	13
Παροχή Αγιάς, Q _A [mm]	300
Απολήψεις Αγιάς, W _A [mm]	161
Επιφανειακή απορροή Κερίτη στην έξοδο, Q _{ΚΕΡΙΤΗΣ} [mm]	339

Συζητώντας για το υδραυλικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής Κερίτη, παρατηρούμε ότι για τις πηγές Μεσκλών έχουμε απολήψεις 13 mm από τα 89 mm συνολικής εκφόρτισης (Ποσοστό 15% της ετήσιας εκφόρτισης). Επίσης, για τις πηγές της Αγιάς υπάρχουν 161 mm από τα 300 mm τα οποία εκφορτίζονται (Εκμετάλλευση 54% των ετήσιων ποσοτήτων υδάτων). Επίσης, στην έξοδο του Κερίτη συνεισφέρουν (Q_M-W_M)+(Q_A-W_A)= 215 mm, ενώ η συνολική ποσότητα εξόδου είναι 339 mm. Κατά συνέπεια, η υδραυλική συμμετοχή των καρστικών πηγών στην έξοδο της επιφανειακής απορροής είναι 63%.

6.2. Γεωχημεία

Η μοντελοποίηση της γεωχημείας στη λεκάνη του ποταμού Κερίτη, ακολουθούμε την εξής διαδικασία στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία:

1. Βαθμονόμηση (calibration) των παραμέτρων του SWAT και του καρστικού μοντέλου, οι οποίες σχετίζονται με τις συγκεντρώσεις των νιτρικών στη λεκάνη.
2. Τρέξιμο του SWAT και του καρστικού μοντέλου για να δούμε την απόκριση των συγκεντρώσεων N-NO₃ των πηγών Αγιάς και Μεσκλών.
3. Μοντελοποίηση της συγκέντρωσης N-NO₃ στα επιφανειακά ύδατα του Κερίτη στο σημείο του υδρολογικού σταθμού (troll station).

Ακολουθως, αναλύουμε τη διαδικασία και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα αυτής:

Η βαθμονόμηση των νιτρικών στο μοντέλο SWAT και στο καρστικό μοντέλο πραγματοποιείται χειροκίνητα (όπως και στη βαθμονόμηση της υδρολογίας). Ακολουθως, παρατίθεται ο πίνακας με τις παραμέτρους του μοντέλου SWAT που μεταβλήθηκαν κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των νιτρικών:

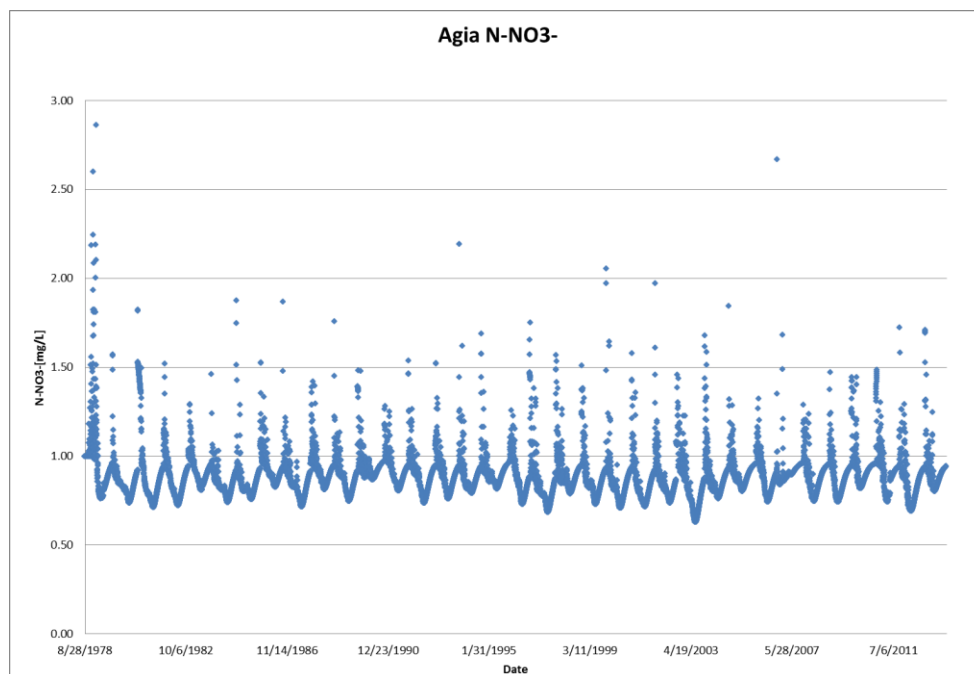
Πίνακας 6.8: Παράμετροι βαθμονόμησης της γεωχημείας

A/A	Παράμετρος	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης	Τυπικό Εύρος στο SWAT	Εύρος τιμών στον Κερίτη
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: General Watershed Data (.bsn)					
1	RCN_SUB	Ατμοσφαιρική Εναπόθεση NO ₃ - Atmospheric deposition of nitrate	mg NO ₃ / L	0-2	0.91
2	RCN	Συγκέντρωση N στη βροχόπτωση - Nitrogen concentration in rainfall	mg N / L	0-15	2.11
3	N_UPDIS	Παράμετρος κατανομής πρόσληψης N - Nitrogen uptake distribution parameter	-	0-100	10
4	HLIFE_NGW_BS N	Χρόνος ημιζωής N στον υπόγειο υδροφόρα - Half-life of nitrogen in groundwater	days	0-500	30
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Groundwater (.gw)					
5	SHALLST_N	Συγκέντρωση NO ₃ στον αβαθή υδροφόρα - Nitrate concentration in shallow aquifer	mg N / L	0-1000	0.6 – 5
6	HLIFE_NGW	Χρόνος ημιζωής NO ₃ στον αβαθή υδροφόρα - Half-life of nitrate in shallow aquifer	days	0-200	5 – 30
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Soil Chemical (.Chm)					
7	SOL_NO3	Αρχική συγκέντρωση NO ₃ στο έδαφος - initial NO ₃ concentration in the soil layer	mg NO ₃ / kg soil	0-100	0 – 25
8	SOL_ORGN	Αρχική συγκέντρωση οργανικού N στο έδαφος - initial organic N concentration in the soil layer	mg Org-N / kg soil	0-100	0 – 38
Πίνακας Εισαγωγής δεδομένων: Stream Water Quality (.Swq)					
9	BC1	Σταθερά ρυθμού οξείδωσης του NH ₄ σε NO ₂ στο ποτάμι στους 20°C - Rate constant for biological oxidation of NH ₄ to NO ₂ in the reach at 20°C	day ⁻¹	0.1-1	0.55
10	BC2	Σταθερά ρυθμού οξείδωσης του NO ₂ σε NO ₃ στο ποτάμι στους 20°C - Rate constant for biological oxidation of NO ₂ to NO ₃ in the reach at 20°C	day ⁻¹	0.2-2	1.1

Βαθμονόμηση της γεωχημείας των πηγών Αγιάς

Αναφορικά με τη βαθμονόμηση του καρστικού μοντέλου (Αγιά) ως προς το χημικό μέρος του, η παράμετρος του καρστικού μοντέλου η οποία μεταβλήθηκε για να βαθμονομηθεί το καρστικό μοντέλο για τα νιτρικά είναι το

Nitrate Mixing Factor (Dilution Factor) = 30



Διάγραμμα 6.7: Προσομοίωση των συγκεντρώσεων N-NO_3^- για τις πηγές Αγιάς

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση N-NO_3 για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης 1978 – 2013 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η προσομοίωση των νιτρικών μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή, καθώς οι παρατηρημένες τιμές πεδίου που υπάρχουν (Πίνακας 4.5) προσεγγίζονται καλά από την παραπάνω μοντελοποίηση. Η ύπαρξη, όμως, λίγων δεδομένων πεδίου μας οδηγεί στη διαπίστωση ότι είναι απαραίτητη η συλλογή και καταγραφή χρονοσειρών N-NO_3 για τις πηγές Αγιάς.

Πίνακας 4.5: Δεδομένα N-NO_3 , πηγές Αγιάς

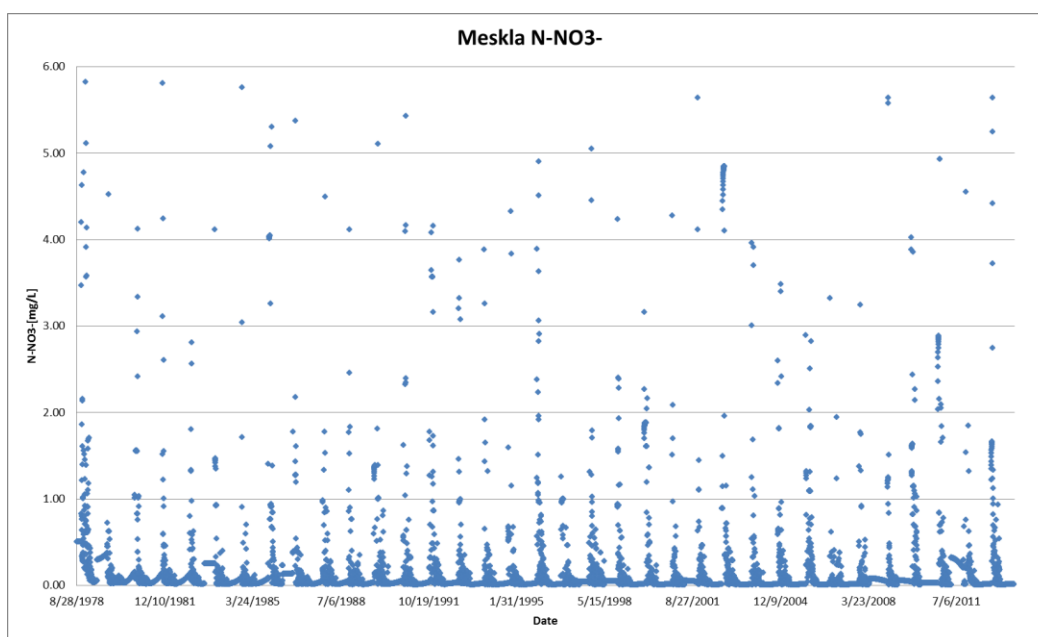
Ημερομηνία	N-NO_3 (mg/L)
1/3/2010	1.3
4/26/2010	0.72
6/5/2010	0.76
5/25/2010	1.3
7/6/2010	1.04

10/18/2010	0.44
2/28/2011	1.3

Βαθμονόμηση της γεωχημείας των πηγών Μεσκλών

Αναφορικά με τη βαθμονόμηση του καρστικού μοντέλου (Μεσκλά) ως προς το χημικό σκέλος, η παράμετρος του καρστικού μοντέλου η οποία μεταβλήθηκε για να βαθμονομηθεί το καρστικό μοντέλο για τα νιτρικά είναι το

Nitrate Mixing Factor (Dilution Factor) = 25



Διάγραμμα 6.8: Προσομοίωση των συγκεντρώσεων $N-NO_3^-$ για τις πηγές Μεσκλών

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση $N-NO_3$ για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης 1978 – 2013 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η προσομοίωση των νιτρικών μπορεί να θεωρηθεί σχετικά καλή, καθώς οι παρατηρημένες τιμές πεδίου τις οποίες έχουμε αποδεκτεί στο υποκεφάλαιο 4.4 προσεγγίζονται καλά από την παραπάνω μοντελοποίηση. Όμως, η ύπαρξη ανεπαρκών δεδομένων πεδίου επιτάσσει μια νέα μελλοντική συλλογή και καταγραφή χρονοσειρών $N-NO_3$ για τις πηγές Μεσκλών, με στόχο μια περισσότερο αξιόπιστη μοντελοποίηση.

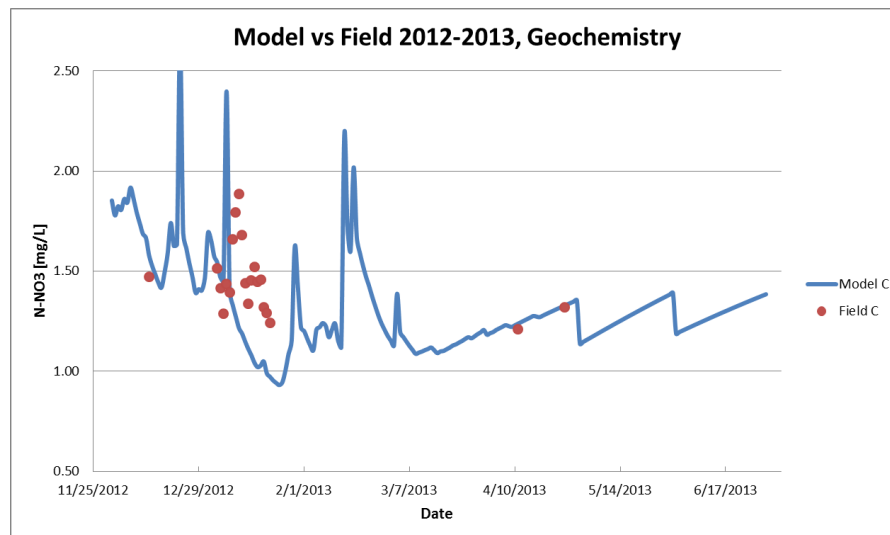
Επόμενο βήμα της μοντελοποίησης της γεωχημείας είναι η μοντελοποίηση των νιτρικών στα επιφανειακά ύδατα του Κερίτη στο σημείο του υδρολογικού σταθμού (troll station). Στο συγκεκριμένο σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να γίνει η συγκεκριμένη προσομοίωση της παροχής υδάτων, ελήφθησαν υπόψιν:

1. Η κυρίως παροχή του ποταμού Κερίτη στην υπολεκάνη 6, $Q_{mod,6}$: Αυτή η παροχή προέρχεται από τα αρχεία εξόδου του SWAT (Flow_out, sub 6).
2. Η παροχή (εκφόρτιση) των πηγών Αγιάς, $Q_{ΑΓΙΑ}$: Η συγκεκριμένη παροχή προέρχεται από το καρστικό μοντέλο και αφού αφαιρεθούν οι υδραυλικές απολήψεις που πραγματοποιούν οι φορείς ΟΑΔΥΚ, ΤΟΕΒ και ΔΕΥΑΧ.
3. Η παροχή (εκφόρτιση) των πηγών Μεσκλών, $Q_{ΜΕΣΚΛΑ}$: Η συγκεκριμένη παροχή προέρχεται από το καρστικό μοντέλο και αφού αφαιρεθούν οι υδραυλικές απολήψεις που πραγματοποιεί ο ΟΑΔΥΚ.
4. Η συγκέντρωση των N-NO₃ στην έξοδο της υπολεκάνης 6, $C_{mod,6}$: Προέρχεται από τα αρχεία εξόδου του SWAT.
5. Η συγκέντρωση των N-NO₃ στις πηγές Αγιάς, $C_{ΑΓΙΑ}$: Προέρχεται από το καρστικό μοντέλο.
6. Η συγκέντρωση των N-NO₃ στις πηγές Μεσκλών, $C_{ΜΕΣΚΛΑ}$: Προέρχεται από το καρστικό μοντέλο.

Επομένως, η συγκέντρωση του μοντέλου, C_{mod} προκύπτει από τον παρακάτω σταθμισμένο όρο συγκεντρώσεων (weighted average :

$$C_{mod} = \frac{Q_{mod,6} * C_{mod,6} + Q_{ΑΓΙΑ} * C_{ΑΓΙΑ} + Q_{ΜΕΣΚΛΑ} * C_{ΜΕΣΚΛΑ}}{Q_{mod,6} + Q_{ΑΓΙΑ} + Q_{ΜΕΣΚΛΑ}} \quad [6.2.1]$$

Ακολούθως, στο διάγραμμα 6.9 γίνεται γραφική σύγκριση της προσομοιωμένης συγκέντρωσης νιτρικών (C_{mod}) με τις συγκεντρώσεις του πεδίου. Η παροχή του πεδίου προέρχεται από το υποκεφάλαιο 4.4.



Διάγραμμα 6.9: Προσομοίωση των συγκεντρώσεων N-NO₃⁻ για τα επιφανειακά ύδατα του ποταμού Κερίτη

Η προσομοίωση των νιτρικών στην κοίτη του ποταμού Κερίτη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.9, κρίνεται, καθώς το συνδυασμένο μοντέλο προσομοιώνει τις μεγάλες κορυφές των

συγκεντρώσεων κατά το τέλος του Δεκεμβρίου 2012 και στις αρχές του Ιανουαρίου 2013. Οι συγκεκριμένες κορυφές (peaks) προέρχονται από περιοδικά πλημμυρικά φαινόμενα των ημερών (flash floods) και τη συνακόλουθη διάβρωση και μεταφορά μεγάλων μαζών αζωτούχων ενώσεων από τις γεωργικές και κτηνοτροφικές εκτάσεις της λεκάνης απορροής στην κοίτη του ποταμού Κερίτη. Συνεχίζοντας, το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά τις τιμές πεδίου κατά το μήνα Απρίλιο 2013.

Μια επιπλέον αξιολόγηση γίνεται με τους στατιστικούς δείκτες και παρατίθεται παρακάτω (Πίνακας 6.9).

Πίνακας 6.9: Στατιστικοί δείκτες για την προσομοίωση των $N-NO_3^-$ στην επιφανειακή απορροή του Κερίτη, 2012-2013

Δείκτης	Τιμή	Αξιολόγηση τιμών δεικτών βάσει Moriasi (2007)
RMSE	0.17	Ικανοποιητικό
NSE	0.52	Ικανοποιητικό
PBIAS	-68.82	Μη ικανοποιητικό
RSR	7.45	Μη ικανοποιητικό

Η αξιολόγηση της προσομοίωσης των νιτρικών στην επιφανειακή ροή υπογραμμίζει ότι η προσομοίωση στον κεντρικό υδρολογικό σταθμό είναι μέτρια, καθώς οι τιμές των δεικτών RMSE και NSE είναι αποδεκτές, ενώ οι δείκτες PBIAS και RSR λαμβάνουν μη αποδεκτές τιμές.

Έχοντας ολοκληρώσει την προσομοίωση της γεωχημείας μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα προσεγγιστικό ισοζύγιο αζώτου στη λεκάνη απορροής του Κερίτη. Σημειώνουμε ότι το ισοζύγιο είναι προσεγγιστικό, καθώς δε λαμβάνει υπόψιν την εισαγωγή N από τα υπάρχοντα ελαιουργεία και από τα υγρά αστικά απόβλητα τα οποία καταλήγουν στη λεκάνη (λόγω απωλειών φορτίων από σηπτικούς βόθρους):

Οι εισαγόμενες ποσότητες N στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, από τις κτηνοτροφικές και αγροτικές δραστηριότητες (βλ. Υποκεφάλαιο 4.5), για το έτος 2012 – 2013 είναι

$$N_{in,agr} = 593 \text{ tn/yr}$$

$$N_{in,liv} = 589 \text{ tn/yr}$$

Η ποσότητα N (σε ολικό άζωτο) στον Κερίτη (επιφανειακή απορροή, έξοδος λεκάνης) υπολογίζεται από το σταθμισμένο μέσο όρο των μηνιαίων συγκεντρώσεων ολικού αζώτου TN :

$$TN_{flux,out,ker} = 145 \frac{tn}{yr}$$

Πίνακας 3: Γεωχημικό ισοζύγιο 2012 -2013

$N_{in,agr}$ [tn/yr]	593
$N_{in,liv}$ [tn/yr]	589
Συνολική μάζα N στην είσοδο [tn/yr]	1182
Συνολική μάζα N στην έξοδο [tn/yr]	145

Σχολιάζοντας τον παραπάνω πίνακα, από τη συνολική ποσότητα ολικού αζώτου που εισάγεται στη λεκάνη απορροής λόγω γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων η οποία είναι 1182 tn/yr, στην έξοδο του συστήματος έχουμε 265 tn/yr. Αυτό σημαίνει ότι πολύ μεγάλες ποσότητες από τις ποσότητες αζώτου κατακρατώνται από τα φυτά, τα οποία χρειάζονται το άζωτο για τη θρέψη τους. Επιπλέον, μεγάλες ποσότητες νιτρικών ιόντων απονιτροποιούνται και εξάγονται από τη λεκάνη απορροής με τη μορφή αέριου αζώτου. Τέλος, σημαντικές ποσότητες ολικού αζώτου έχουν αφαιρεθεί από τη λεκάνη του Κερίτη λόγω των απολήψεων υδάτων, οι οποίες παραγαμοποιούνται στις πηγές Μεσκλών και Αγιάς.

7.Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1. Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη μας οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ❖ Το μοντέλο SWAT μαζί με το καρστικό μοντέλο περιγράφουν αρκετά ικανοποιητικά το ισοζύγιο της υδρολογίας της περιοχής. Οι αποκλίσεις κάποιων στατιστικών δεικτών από τα αναμενόμενα μεγέθη είναι αποδεκτές ως ένα βαθμό.
- ❖ Η μοντελοποίηση των νιτρικών στη λεκάνη απορροής είχε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις πηγές Μεσκλών και Αγιάς λόγω της έλλειψης δεδομένων πεδίου. Αντιθέτως, η μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής είναι περισσότερη ικανοποιητική. Βέβαια θα μπορούσε να είναι ακόμα καλύτερη εφόσον είχαμε μεγαλύτερη χρονοσειρά συγκεντρώσεων N-NO₃.
- ❖ Υπάρχει σταθερότητα στη λειτουργία του καρστικού συστήματος κατά τη χρονική περίοδο 1978 – 2013 (36 έτη). Αυτό επιβεβαιώνεται από τη μοντελοποίηση της υδρολογίας της επιφανειακής απορροής η οποία περιλαμβάνει τις υδραυλικές φορτίσεις των πηγών Αγιάς και Μεσκλών καθώς και τον όγκο νερού της κυρίως κοίτης του Κερίτη. Η μοντελοποίηση της περιόδου 2012 – 2013 πραγματοποιείται με τη χρήση δεδομένων 1978 – 1985 για τις πηγές της Αγιάς. Η ορθή λειτουργία του καρστικού μοντέλου και του μοντέλου SWAT για όλη αυτή τη χρονική περίοδο φανερώνουν ότι το υπόγειο και επιφανειακό υδραυλικό σύστημα της λεκάνης του ποταμού Κερίτη παρουσιάζει μια σταθερότητα τα τελευταία περίπου 40 έτη.
- ❖ Τα εκμεταλλεζόμενα ποσοστά υδάτων των πηγών κατά το υδρολογικό έτος 2012 – 2013 είναι 15% και 54% για τα Μεσκλά και την Αγιά αντιστοίχως. Άρα υπάρχουν δυνατότητες αναρρύθμισης των πηγών Μεσκλών με μεγαλύτερες απολήψεις υδάτων κατά τους χειμερινούς μήνες, έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες σε υδάτινο δυναμικό άρδευσης της ευρύτερης περιοχής.

7.2. Προτάσεις

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη χρειάζεται περαιτέρω μελέτη για να γίνει κατανοητή, κυρίως, η συμπεριφορά των χημικών σε αυτήν. Γι'αυτό το λόγο προτείνονται τα ακόλουθα:

- Λειτουργία του σταθμού του Κερίτη για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (5-10 έτη), καλή συντήρηση αυτού και συλλογή των δεδομένων στάθμης, νιτρικών, D.O. κ.α. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε μια πιο πλούσια «εικόνα» της κατάστασης στα επιφανειακά ύδατα του ποταμού Κερίτη.
- Σχεδιασμός και τρέξιμο διαχειριστικών σεναρίων για τη λεκάνη του ποταμού Κερίτη.
- Μοντελοποίηση των διαλυμένων στερεών (TSS) του ποταμού.
- Συλλογή δεδομένων νιτρικών στις πηγές Αγιάς και Μεσκλών από τα σημεία που γίνονται οι υδραυλικές απολήψεις για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι σημαντικό για να αποκτήσουμε μεγάλες χρονοσειρές νιτρικών και να γίνει πιο ικανοποιητική μοντελοποίηση της γεωχημείας.
- Συλλογή αξιόπιστων υδραυλικών δεδομένων για τις πηγές Αγιάς και Μεσκλών.

8. Βιβλιογραφία

8.1. Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I., 2008. Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean, *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 163–170.
2. Arnold J.G., J.R. Kiniry, J.R. Williams, R. Srinivasan, E.B. Haney, S.L. Neitsch, 2011. Soil and Water Assessment Tool – Input / Output File Documentation – Version 2009, Texas A&M University, Texas, USA.
3. Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS-a model for watershed planning. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 23, 938–944.
4. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle Jr., J.L., Jobes, T.H., Donigan Jr., A.S., 2001. User's Manual for Hydrological Simulation Program-FORTRAN, HSPF, Version 12. User's manual. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California, USA, 873 pp.
5. Chong – yu, X., 2002. Hydrologic Models, Uppsala University, Sweden.
6. Demetriou, C., Punthakey, J.F., 1998. Evaluating sustainable groundwater management options using the MIKE-SHE integrated hydrogeological modeling package. *Environmental Modelling & Software* 14, (2-3), 129-140.
7. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2004. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. *Transactions in GIS* 8 (1), 113-136.
8. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., 2003. Benchmarking models for the Water Framework Directive: evaluation of SWAT for use in the Ythan catchment, UK. In: Arnold, J., et al. (eds.), *Condensed Abstracts of the 2nd International SWAT Conference*, 1-4 July 2003, p. 63-66, Bari, Italy.
9. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., in: Srinivasan, R., Jacobs, J., Day, D., Abbaspour, K. (Eds.), *Evaluation of SWAT for use in Development of a River Basin Management Plan for the Ythan Catchment, UK*. 3rd International SWAT Conference, Zurich, 11-15 July, 2005.
10. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., Arabi, M. 2007. A Hydrologic/Water Quality Model Application. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5), 1223–1236.
11. HACH Company, 2013. DR 2800 User Manual, Edition 4, Germany.
12. In – Situ Inc., 2009. Multi – Parameter TROLL 9500 Operator's Manual, USA.
13. Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Davis, H.H., 1980. Users' Manual for the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) version No. 5.0, EPA-600/9-80-105, US EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
14. Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., Jacob, D, 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece, *Journal of Hydrology*, 479, 146–158.
15. Moraetis, D., Stamati, F., Kotronakis, M., Fragia, T., Paranychnianakis, N., Nikolaidis, N.P., 2011. Identification of hydrologic and geochemical pathways using high frequency

- sampling, REE aqueous sampling and soil characterization at Koiliaris Critical Zone Observatory, Crete. *Applied Geochemistry*, 26 (SUPPL.), pp. S101-S104.
16. Moriasi D. N., J. R. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R.D. Harmel, R. D., T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *ASABE*, Vol (50) 3 : p. 885 – 900.
 17. Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. D., & Veith, T., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
 18. Neitsch S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, 2011. *Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation – Version 2009*, Texas A&M University, Texas, USA.
 19. Nikolaidis, N.P, F. Bouraoui. and G. Bidoglio, 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, *Journal of Hydrology*.
 20. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgankakos, K.P., 1988. A generalized soft water acidification model. *Water Resources Res.* 24, 1983-96.
 21. Refsgaard, J.C., 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198 (1-4), 69-97.
 22. Schnoor, J. L., 2003. Περιβαλλοντικά Μοντέλα – Τύχη και μεταφορά ρύπων στον αέρα, νερό και έδαφος (Μεταφρασμένο), Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
 23. Schnoor, J.L., Palmer, W.D., Jr & Glass, G.E., 1984. Modeling impacts of acid precipitation for northeastern Minnesota. In *Modeling of Total Acid Precipitation Impact*, ed. J. L. Schnoor. Butterworth, Boston, MA, 155-73.
 24. Starfield, A.M., Cundall, P.A., 1988. Towards a methodology for rock mechanics modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* vol. 25, p. 99-106.
 25. Van Grinsven, H.J.M., Driscoll, C.T., Tiktak, A., 1995. Workshop on comparison of Forest-Soil-Atmospheric models: Preface. *Ecological Modelling* vol 83, p.1-6.
 26. WHO, 2013. *Water Quality and Health Strategy, 2013 – 2020*, www.who.int
 27. Winchell M., R. Srinivasan, M. Di Luzio, J. Arnold, 2010. *ArcSWAT Interface for SWAT 2009 – User’s Guide*, Texas, USA.
 28. Xie H., L. Longuevergne, C. Ringler, and B. R. Scanlon, 2012. Calibration and evaluation of a semi-distributed watershed model of Sub-Saharan Africa using GRACE data.

8.2. Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Γραμματικάκης, Γ., 2012. Αξιολόγηση και μοντελοποίηση της κατάστασης ευτροφισμού της λίμνης της Αγιάς, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ε.Ε., 2000. Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα Νερά.
3. Κουτούπα – Ρεγκάκου, Ε., 2008. Δίκαιο του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα.
4. Λάλος, Χ., 2012. Προσομοίωση επιφανειακής απορροής με συνδυασμένη χρήση των μοντέλων MIKE SHE / MIKE 11 στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διπλωματική Εργασία, Χανιά.
5. Μανούτσου, Ε., 2007. Σημειώσεις του μαθήματος Εισαγωγή στις Γεωεπιστήμες – Περιβαλλοντική Γεωλογία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

6. Μήτρακα, Μ., 2001. Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
7. Νικολαΐδης, Ν., 2005. Υδατική Χημεία – Θεωρία, Μοντέλα και Περιβαλλοντικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα.
8. Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2010. Ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερίτη – Θερίσσου και Κουλιάρη, Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
9. Οικονομόπουλος, Α., Οικονομοπούλου, Μ., 2005. Ρύπανση και έλεγχος ρύπανσης νερών, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
10. Παπαβασιλείου, Μ., 2007. Μεταβολές ανόργανου αζώτου σε εδαφικά συστήματα – Ο ρόλος των βακτηρίων *Nitrosomonas* sp και *Nitrobacter* sp, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, σελ. 12 – 22.
11. Τσαΐμος, Γ., Καρατζάς, Γ., 2009. Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη – Θερίσσου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
12. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

8.3. Ηλεκτρονικές Πηγές

1. www.hydroscope.gr
2. <https://maps.google.gr/>
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/>
4. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/survey/class/taxonomy/>
5. <http://meteo.gr>
6. <http://www.oadyk.gr/site/index.php>
7. <http://swat.tamu.edu/>
8. www.ypeka.gr
9. www.panoramio.com
10. <http://intelligentdesignscience.wordpress.com/>