



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία:

**«Προσομοίωση επιφανειακής απορροής με συνδυασμένη
χρήση των μοντέλων MIKE SHE/MIKE 11 στη λεκάνη
απορροής του ποταμού Κερίτη»**

ΛΑΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Εξεταστική επιτροπή:
Καρατζάς Γ. (Επιβλέπων)
Νικολαΐδης Ν.
Παρανυχιανάκης Ν.

Χανιά
Σεπτέμβριος, 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους ανθρώπους που με βοήθησαν να φέρω εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καρατζά Γεώργιο, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την τιμή που μου έκανε αναθέτοντάς μου το θέμα αυτό της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς μου επιτροπής, τον καθηγητή κ. Νικολαΐδη Νικόλαο και τον Λέκτορα κ. Παρανυχιανάκη Νικόλαο, του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για το χρόνο που διαθέσανε για την εργασία αυτή.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω θερμά το διδάκτορα και μέλος του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Νεκτάριο Κουργιαλά, για τη συνεργασία και τη συνεχή καθοδήγηση του σε όλες τις φάσεις εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την εμπύχωση και την υλική υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη καλή μου φίλη Ελευθερία για τη βοήθεια που μου παρείχε στη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λεκάνη απορροής του Κερίτη βρίσκεται στα κεντρικά του Βόρειου τμήματος του Ν. Χανίων. Έχει υψηλό υδατικό δυναμικό το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη του οικοσυστήματος και στην υδροδότηση του Βόρειου τμήματος του νομού.

Η βαθύτερη γνώση των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, καθώς και ο έλεγχος την ποιότητας των επιφανειακών και υπογείων υδάτων είναι ενέργειες ιδιαίτερα σημαντικές για τη σωστή και ασφαλή διαχείριση του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κερίτη. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου στόχου και λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής έχει σύνθετη γεωμορφολογία χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός υδρολογικών μοντέλων. Αναλυτικότερα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο-σύστημα προσομοίωσης MIKE SHE/MIKE 11 σε συνδυασμό με το καρστικό μοντέλο Maillet και το λογισμικό GIS ArcMap. Η εκπόνηση της εργασίας ακολούθησε τα εξής στάδια:

➤ Συγκέντρωση των δεδομένων

Κατά το στάδιο αυτό συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα που αφορούσαν κλιματικές, εδαφικές, υδρολογικές και γεωλογικές παραμέτρους, στη λεκάνη απορροής του Κερίτη.

➤ Κατασκευή του ψηφιακού ομοιώματος της υδρολογικής λεκάνης του Κερίτη

Ψηφιοποιήθηκε και κατανεμήθηκε χωρικά το περίγραμμα της λεκάνης με τη βοήθεια του GIS ArcMap, σχεδιάστηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί εντός αυτής, ο ποταμός Κερίτης, τα πολύγωνα Thiessen και εισήχθησαν οι βροχομετρικοί σταθμοί και οι ισοϋψείς.

➤ Ρύθμιση του συστήματος

Η ρύθμιση του συστήματος έγινε μέσω της εισαγωγής όλων των απαραίτητων δεδομένων καθώς επίσης και με την επιλογή της κατάλληλης διακριτοποίησης της λεκάνης (δηλαδή του επιπέδου ακρίβειας), ώστε η χωρική απεικόνιση των υδρολογικών στοιχείων να είναι κατά το δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματικότητα. Η προσομοίωση της ροής στο κανάλι έγινε με τη χρήση του μοντέλου MIKE 11. Η παροχή των πηγών εκφόρτισης Αγιάς και Μεσκλών, προσομοιώθηκε μέσω του καρστικού μοντέλου Mailet.

➤ Βαθμονόμηση του μοντέλου

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου MIKE SHE ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα δεδομένα που έχουμε από τις μετρήσεις στο πεδίο.

➤ Αποτελέσματα-Συμπεράσματα-Προτάσεις

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της επιφανειακής απορροής του

ποταμού Κερίτη. Επίσης με βάση τα αποτελέσματα παρουσιάζονται προτάσεις για συμβολή στην ορθολογική διαχείριση του υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	- 10 -
Εισαγωγή	- 10 -
1.2 Υδρολογικός Κύκλος.....	- 11 -
1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο	- 12 -
1.3.2 Επιφανειακή απορροή	- 15 -
1.3.3 Ροή σε ποτάμι.....	- 15 -
1.3.4 Υπόγεια ροή	- 16 -
1.4 Διαχείριση Υδατικών Πόρων	- 16 -
1.5 Εισαγωγή στα Υδρολογικά Μοντέλα	- 18 -
1.5.1 Ορισμός	- 18 -
1.5.2 Γενική ταξινόμηση Υδρολογικών Μοντέλων	- 18 -
1.6 Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής με τη χρήση του μοντέλου MIKE SHE	- 21 -
1.7 Σκοπός της εργασίας.....	- 24 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	- 25 -
Μεθοδολογία	- 25 -
2.1. Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής (MIKE SHE).....	- 25 -
2.1.1 Παρουσίαση του MIKE SHE	- 25 -
2.1.2 Μαθηματική προσέγγιση της επιφανειακής ροής-μοντέλο MIKE SHE	- 27 -
2.2 Μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε ποτάμι (MIKE 11)	- 35 -
2.2.1 Παρουσίαση του MIKE 11.....	- 35 -
2.2.2 Μαθηματική προσέγγιση της ροής σε ποτάμι- μοντέλο MIKE 11-	36 -

2.3 Μοντέλο προσομοίωσης της εκφόρτισης πηγών (Καρστικό μοντέλο Maillet)	39 -
2.3.1 Παρουσίαση του Καρστικού Μοντέλου Maillet	39 -
2.3.2 Μαθηματική προσέγγιση του καρστικού μοντέλου.....	39 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	43 -
Περιοχή Μελέτης.....	43 -
3.1 Γενικά	43 -
3.2 Υδρογεωλογικά στοιχεία	44 -
3.3 Χρήσεις Γης.....	47 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	49 -
4.1 Εφαρμογή Συνδυασμένου Πλαισίου Προσομοίωσης	49 -
4.1.1 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων μέσω GIS στο μοντέλο MIKE SHE	49 -
4.1.2 Μοντέλο MIKE SHE.....	50 -
4.1.3 Υδραυλικό μοντέλο MIKE 11	62 -
4.1.4. Καρστικό Μοντέλο	66 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	69 -
Αποτελέσματα.....	69 -
5.1 Καρστικό Μοντέλο	69 -
5.2 Μοντέλο MIKE SHE/MIKE11	70 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	74 -
Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	74 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου (Oogathoo, 2006)	11 -
Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση λεκάνης απορροής (www.pedrocreek.org)	13 -
Εικόνα 1.3: Μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (Παπαρρίζος, 2012)	19 -
Εικόνα 1.4: Συνεχές μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)	19 -
Εικόνα 1.5: Ενιαίο μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)	20 -
Εικόνα 1.6: Κατανεμημένο μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)	21 -
Εικόνα 2.1: Οι υδρολογικές διεργασίες που προσομοιώνονται από το MIKE SHE (Mike She User Manual, 2007)	26 -
Εικόνα 2.2: Σύστημα τετραγωνικού πλέγματος σε μια μικρή περιοχή του μοντέλου MIKE SHE (Mike She User Manual, 2007)	29 -
Εικόνα 2.3: Επιφανειακή απορροή (Mike She User Manual, 2007)	32 -
Εικόνα 2.4: Το υπολογιστικό πλέγμα του MIKE 11 (Popescu, 2002)	38 -
Εικόνα 3.1: Ο νομός Χανίων χωρισμένος σε δημοτικά διαμερίσματα και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη	44 -
Εικόνα 3.2: Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη	46 -
Εικόνα 4.1: Η ψηφιοποιημένη μορφή των χωρικών δεδομένων στο GIS για τη λεκάνη απορροής του Κερίτη	50 -
Εικόνα 4.2: Περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE	51 -
Εικόνα 4.3: Περιοχή μελέτης	53 -
Εικόνα 4.4: Προδιαγραφές εξομοίωσης	54 -

Εικόνα 4.5: Χρονικό διάστημα προσομοίωσης	55 -
Εικόνα 4.6: Χρονικό βήμα προσομοίωσης.....	55 -
Εικόνα 4.7: Πεδίο και κάνναβος προσομοίωσης	56 -
Εικόνα 4.8: Το Ψ.Μ.Ε. της λεκάνης απορροής του Κερίτη στο μοντέλο MIKE SHE	59 -
Εικόνα 4.9: Πολύγωνα Thiessen και δεδομένα εισόδου της βροχόπτωσης από το σταθμό της Αγιάς	61 -
Εικόνα 4.10: Σχεδιασμός του ποταμού Κερίτη στο μοντέλο MIKE 11, πηγές Αγιάς και Μεσκλών.....	63 -
Εικόνα 4.11: Η διατομή στο σημείο συνάντησης των δύο βρόγχων	65 -
Εικόνα 5.1: Παροχή εκφόρτισης από τις πηγές Αγιάς και Μεσκλών, αρχείο εισόδου στο μοντέλο MIKE 11.....	70 -
Εικόνα 5.2: Υδρογράφημα προσομοίωσης για το κατάντη τμήμα του ποταμού Κερίτη	72 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για την προσομοίωση των πηγών της Αγιάς (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010) .	67 -
Πίνακας 2: Παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για την προσομοίωση των πηγών των Μεσκλών (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010) ..	68 -
Πίνακας 3: Παροχές αντλήσεων για κάθε μήνα του έτους 2006.....	69 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Αναμφίβολα, το νερό είναι ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη, και αποτελεί κοινωνικό αγαθό, αναντικατάστατο για την επιβίωση, την υγεία και την οικονομική ανάπτυξη (Κασσωτάκη, 2011).

Στις μέρες μας, τα υδατικά αποθέματα, συνεχώς μειώνονται λόγω των ραγδαίων κλιματικών αλλαγών αλλά και της υπερκατανάλωσής τους σαν αποτέλεσμα της παγκόσμιας πληθυσμιακής αύξησης.

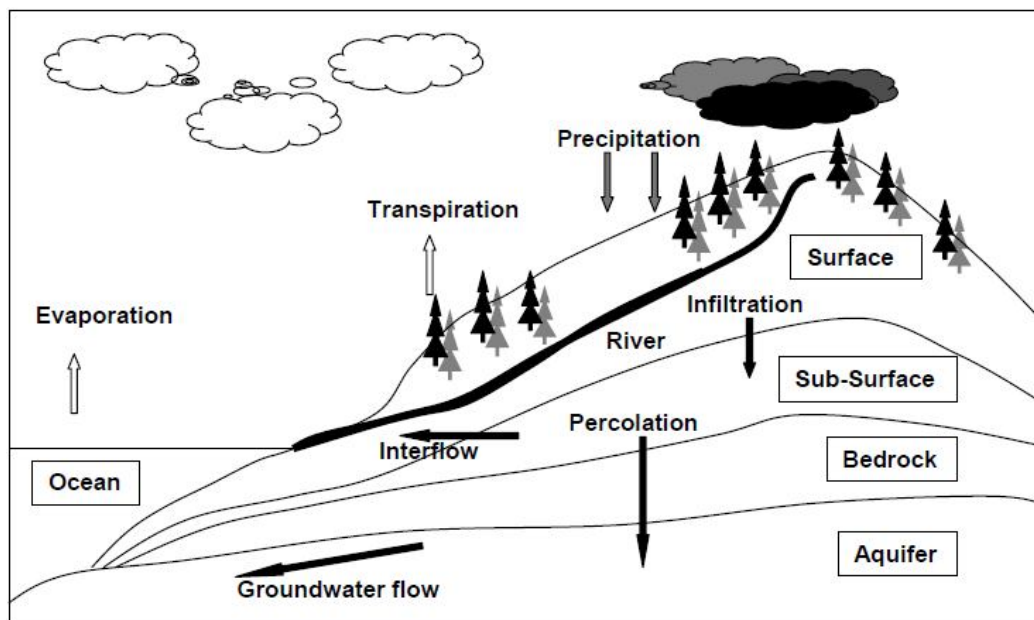
Οι ανάγκες σε νερό και τροφή συνεχώς αυξάνουν και η παγκόσμια ανάπτυξη δημιουργεί νέες δραστηριότητες που με τη σειρά τους αυξάνουν τη ζήτηση για νερό. Αναλογιζόμενοι και το γεγονός ότι η ποσότητα γλυκού νερού στον πλανήτη μας είναι εξαιρετικά περιορισμένη (περίπου 0,33% της συνολικά εκτιμώμενης ποσότητας νερού στη γη), γίνεται επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης που αποβλέπουν στη βέλτιστη διάθεση των υδατικών πόρων, αυτό που σήμερα ονομάζεται Διαχείριση Υδατικών Πόρων.

Στα πλαίσια της διαχείρισης των υδατικών πόρων η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την οδηγία Πλαίσιο για το νερό (2000/60/ΕΚ), κατά τις εργασίες του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000, η οποία θεσπίζει πλαίσιο κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων του

Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου. Σκοπός της άνωθεν οδηγίας είναι η ολοκληρωμένη προστασία και ορθολογική διαχείριση των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και υπογείων νερών (Τσάιμος, 2009).

1.2 Υδρολογικός Κύκλος

Ο κύκλος του νερού — γνωστός και ως υδρολογικός κύκλος — είναι η συνεχής ανακύκλωση του νερού της Γης μέσα στην υδρόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα. Το νερό του πλανήτη αλλάζει συνεχώς φυσική κατάσταση, από τη στερεά μορφή των πάγων στην υγρή μορφή των ποταμών, λιμνών και της θάλασσας και την αέρια κατάσταση των υδρατμών. Το συνεχές της κυκλικής διαδικασίας του κύκλου του νερού επιτυγχάνεται εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου (Oogathoo, 2006)

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα φτάνουν στην επιφάνεια της γης με τη μορφή βροχής, χιονιού, χιονόνερου ή χαλαζιού. Μέρος της βροχόπτωσης εξατμίζεται σε κάποιο βαθμό ή εξολοκλήρου πριν φτάσει την επιφάνεια του εδάφους, ειδικά στη περίπτωση που πέσει πάνω σε βλάστηση. Το νερό που φτάνει την επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να διηθηθεί μέσα στο έδαφος, να εξατμιστεί ή να απομακρυνθεί με τη μορφή επιφανειακής απορροής. Η εξάτμιση μπορεί να λάβει χώρα στην επιφάνεια του εδάφους, των υδάτινων σωμάτων ή μέσα από τα στόματα των φύλων (μέσω της διαδικασίας της διαπνοής). Μέρος του νερού στο έδαφος, διεισδύει στη κορεσμένη ζώνη και την ανατροφοδοτεί και από εκεί διαρρέει πίσω στα ρεύματα και στα ποτάμια ως βασική ροή και καταλήγει στη θάλασσα (Oogathoo, 2006).

1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Υδρολογικό (ή Υδατικό) ισοζύγιο είναι η απεικόνιση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ των εισροών και των εκροών νερού μιας ενιαίας υδατικής περιοχής στην ίδια χρονική περίοδο, αφού ληφθεί υπόψη η εσωτερική διακύμανση των υδατικών αποθεμάτων. Το υδρολογικό ισοζύγιο εκφράζει τη διατήρηση της μάζας του νερού σε μια συγκεκριμένη περιοχή και για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Τσιτσιλώνης, 2006).

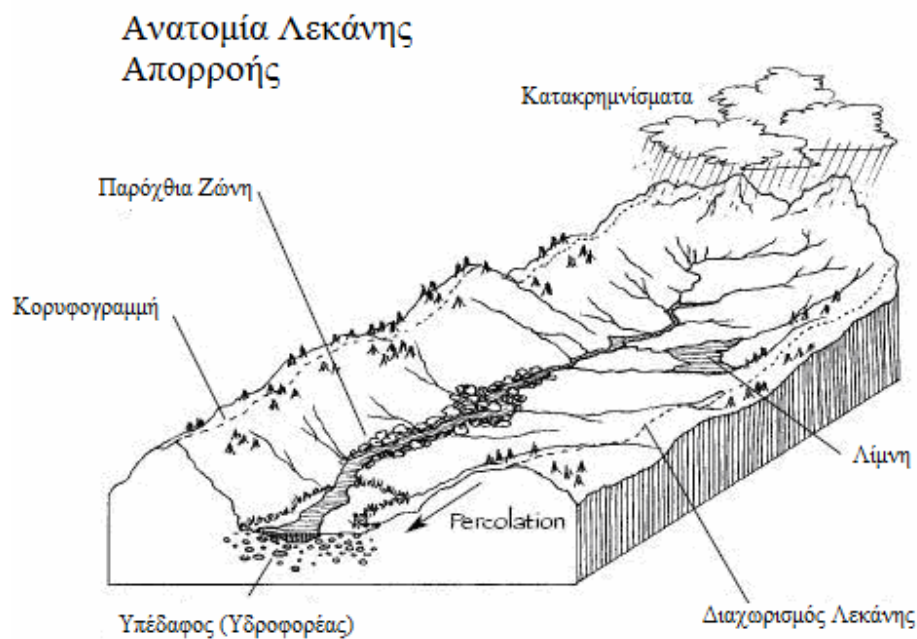
Η βασική έκφραση του ισοζυγίου είναι:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - O \quad (1.1)$$

Όπου $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ η μεταβολή στα αποθέματα του νερού σε έναν όγκο ελέγχου, για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, I η μάζα του νερού που εισρέει στον όγκο ελέγχου και O η μάζα που εκρέει από αυτόν.

1.3.1 Υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής

Η λεκάνη απορροής, που οριοθετείται με βάση το διαχωρισμό της τοπογραφίας, ορίζεται ως η έκταση γης που συμβάλλει με την επιφανειακή απορροή σε ένα ρεύμα ή σε ένα οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος (Oogathoo, 2006).



Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση λεκάνης απορροής
(www.pedrocreek.org)

Κάθε λεκάνη απορροής μπορεί να χωριστεί σε μικρότερες επιμέρους υπο-λεκάνες (π.χ. μια για κάθε παραπόταμο) (Γεωλογική

Υπηρεσία ΗΠΑ). Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (τοπογραφία, γεωλογία και εδαφοκάλυψη) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ποσότητας, της ποιότητας και του χρόνου της ροής του ρεύματος στην έξοδο καθώς και των εκροών των υπόγειων υδάτων. Η θεωρητική αναπαράσταση της υδρολογίας της λεκάνης βασίζεται κυρίως σε φυσικούς νόμους, ιδίως εκείνων της διατήρησης της μάζας, τους νόμους του Νεύτωνα για την κίνηση και το νόμο της θερμοδυναμικής.

Με βάση τον ορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου που δόθηκε, συμπεραίνουμε ότι η ισορροπία του νερού σε μια λεκάνη απορροής πετυχαίνεται μέσω των κύριων διεργασιών που σχετίζονται με την επιφανειακή και υπόγεια ροή, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την εκροή μέσω της επιφανειακής και υπόγειας εκροής, την εξάτμιση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και την εξατμισοδιαπνοή. Έτσι, συνοψίζοντας όλες αυτές τις διεργασίες και σύμφωνα τη βασική έκφραση του ισοζυγίου, εξάγεται ότι σε μια λεκάνη, η πλήρης εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου είναι:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - T - Q - G - N \quad (1.2)$$

Όπου P ορίζονται τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα της λεκάνης, με E η εξάτμιση, T η διαπνοή ($E+T = EPT =$ εξατμισοδιαπνοή), με Q η άμεση επιφανειακή απορροή, με G η υπόγεια απορροή και με N οι λοιπές απώλειες (Μιμίκου και Φωτόπουλος, 2004).

1.3.2 Επιφανειακή απορροή

Επιφανειακή απορροή είναι η απορροή κατακρημνισμάτων πάνω από το εδαφικό ανάγλυφο. Μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια, σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή.

Όπως συμβαίνει με όλα τα μέρη του υδρολογικού κύκλου, η σχέση μεταξύ των κατακρημνισμάτων και της επιφανειακής απορροής μεταβάλλεται στο χρόνο και το χώρο. Παρόμοιες βροχοπτώσεις προκαλούν διαφορετικές μορφές επιφανειακής απορροής και αυτό γιατί η επιφανειακή απορροή εξαρτάται τόσο από μετεωρολογικούς παράγοντες, όσο και από τη γεωλογία και το ανάγλυφο της περιοχής. Μόνο το ένα τρίτο περίπου του όγκου των κατακρημνισμάτων που πέφτει πάνω στο έδαφος, απορρέει σε υδατορεύματα. Τα υπόλοιπα δύο τρίτα, εξατμίζονται, ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά (Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ).

1.3.3 Ροή σε ποτάμι

Η ροή στα υδατορεύματα αλλάζει συνεχώς, από μέρα σε μέρα, ή ακόμα από λεπτό σε λεπτό. Φυσικά, ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την παροχή του νερού είναι το ύψος των κατακρημνισμάτων από τη λεκάνη. Συνήθως το μέγεθος ενός ποταμού εξαρτάται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής του. Ποτάμια διαφορετικών μεγεθών, αντιδρούν διαφορετικά σε καταιγίδες και βροχές μιας και η στάθμη των μεγάλων ποταμών αλλάζει πιο αργά από τη στάθμη των μικρών. Σε μια μικρή λεκάνη απορροής, η στάθμη του ποταμού θα ανυψωθεί και θα πέσει μέσα σε μερικά λεπτά ή ώρες. Στα

μεγάλα ποτάμια κάτι τέτοιο μπορεί να πάρει μέρες και πλημμυρικά φαινόμενα μπορεί να διαρκέσουν για πολύ (Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ).

1.3.4 Υπόγεια ροή

Μεγάλες ποσότητες νερού βρίσκονται αποθηκευμένες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το νερό αυτό συνεχίζει να κινείται, αν και συνήθως με πολύ μικρή ταχύτητα, και αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου (Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ). Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του υπόγειου νερού καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων και των στρωμάτων περιορισμού (υπεδάφια στρώματα, τα οποία διαπερνά το νερό πολύ δύσκολα ή σχεδόν καθόλου). Η υπόγεια κίνηση του νερού εξαρτάται από τη διαπερατότητα (πόσο εύκολο ή δύσκολο είναι στο νερό να κινηθεί) και από το πορώδες (την ποσότητα των κενών μέσα στο υλικό) των στρώσεων. Αν το υπεδάφιο στρώμα επιτρέπει στο νερό να κινείται σχετικά γρήγορα, αυτό μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις στη διάρκεια μερικών ημερών (Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ).

1.4 Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Στη διεθνή βιβλιογραφία, απαντώνται περισσότεροι του ενός ορισμοί της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ). Σύμφωνα με το Ν. 1739/1987 του ΥΒΕΤ, ως διαχείριση υδατικών, νοείται το σύνολο των μέτρων και των δραστηριοτήτων που πρέπει να αναπτύσσονται για την κάλυψη των αναγκών σε νερό. Ο Grigg (1996) ορίζει ως διαχείριση υδατικών πόρων την εφαρμογή μέτρων (κατασκευαστικών και μη) για τον έλεγχο των

συστημάτων υδατικών πόρων (φυσικών και τεχνητών) προς όφελος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τον Καραβίτη (2005) ένας πλήρης ορισμός της διαχείρισης υδατικών πόρων είναι αυτός όπου διαχείριση των υδατικών πόρων περιέχει όλες τις οργανωμένες δραστηριότητες, σχετικά με την ανάπτυξη, διατήρηση, προστασία και τον έλεγχο προστασίας των υδατικών πόρων και των έργων τους, κάτω από όλες τις συνθήκες, με την ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος και την αειφορία του πόρου. Η διαχείριση δηλαδή πρέπει να είναι προετοιμασμένη για όλα τα πιθανά συμβάντα και αυτό καθορίζει και τον βαθμό επιτυχίας της (Σταματάκος, 2010).

Η Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) έχει ως στόχους: την προμήθεια νερού επαρκούς ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας για την ικανοποίηση των διαφόρων αναγκών, την προστασία των υδατικών πόρων από τη ρύπανση, τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και του φυσικού περιβάλλοντος, τη προστασία από τα ακραία φαινόμενα (πλημμύρες/ξηρασίες), τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των υδατικών πόρων, τη μέριμνα για τη διατήρηση των αναγκαίων αποθεμάτων στο μέλλον και την αποφυγή μη αναστρέψιμων επεμβάσεων, και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας (περιορισμός της αβεβαιότητας).

Βασικοί κανόνες της ΔΥΠ είναι η ισομερής κατανομή μεταξύ των χρηστών με βάση αντικειμενικά κριτήρια, η οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού σήμερα και στο μέλλον, η αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών (καταστροφή πόρων και περιβάλλοντος) και η βιωσιμότητα της ανάπτυξης (Σταματάκος, 2010).

1.5 Εισαγωγή στα Υδρολογικά Μοντέλα

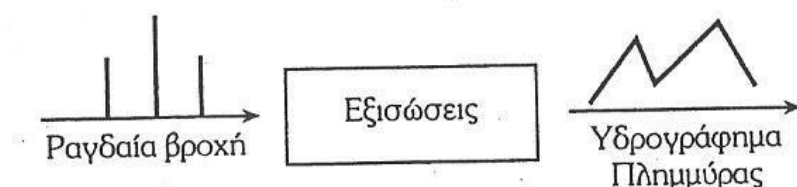
1.5.1 Ορισμός

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι απλουστευμένες απεικονίσεις των πραγματικών υδρολογικών συστημάτων. Προβλέπουν υδρολογικές αποκρίσεις και μας επιτρέπουν να μελετήσουμε τη λειτουργία και την αλληλεπίδραση ποικιλίας παραγόντων και να αποκτήσουμε μια καλύτερη κατανόηση των υδρολογικών συμβάντων. Ο στόχος της υδρολογικής προσομοίωσης είναι να εκτιμηθεί η κατανομή και η κυκλοφορία του νερού επιφανειακά, υπόγεια, κατά τη ροή στα υδατορεύματα, καθώς και η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο υπέδαφος και/ή σε φυσικά υδάτινα σώματα καθώς και την ανταλλαγή νερού μεταξύ αυτών. Μπορούν επίσης να εκτιμήσουν τις μεταβολές στις τιμές και τις ποσότητες με τη πάροδο του χρόνου (Oogathoo, 2006).

1.5.2 Γενική ταξινόμηση Υδρολογικών Μοντέλων

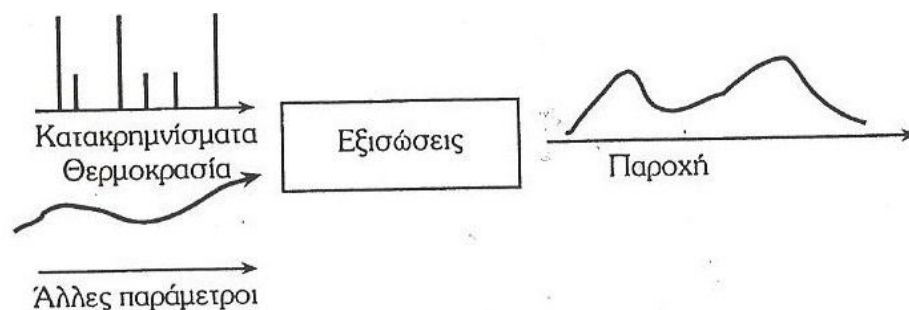
Όπως αναφέρεται στον Παπαρρίζο (2012), τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής (Rainfall-Runoff) ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κ.λ.π.. Ο πλέον συνήθης διαχωρισμός των μοντέλων είναι: α) σε μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και συνεχή μοντέλα και β) σε ενιαία (lumped) και κατανεμημένα (distributed). Συγκεκριμένα:

- Το μοντέλο ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος περιλαμβάνει ως είσοδο ένα μεμονωμένο γεγονός βροχής και ως έξοδο ένα υδρογράφημα πλημμύρας (Εικόνα 1.3).



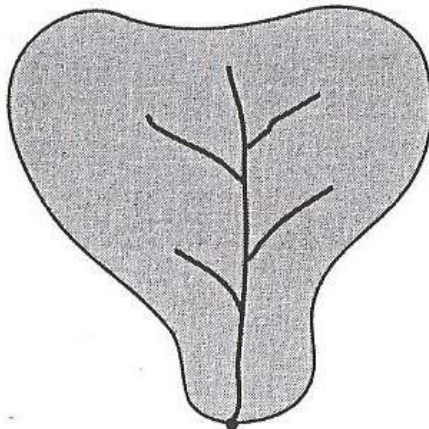
Εικόνα 1.3: Μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (Παπαρρίζος, 2012)

- Το συνεχές μοντέλο περιλαμβάνει ως είσοδο μια ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Συνεχές μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)

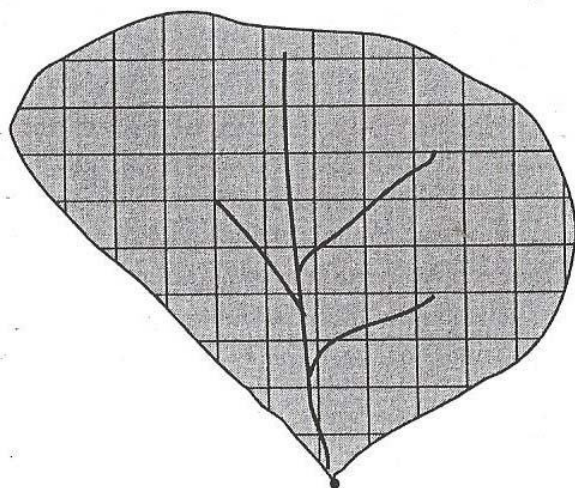
- Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου (βροχόπτωση, κ.λ.π.) και εξόδου (απορροή) (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Ενιαίο μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)

- Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά (Εικόνα 1.6). Σύμφωνα με αυτά τα μοντέλα ο χώρος διαιρείται σε ισομεγέθη κελιά (pixels, cells). Σε κάθε ένα από αυτά τα κελιά αποθηκεύονται τα υδρολογικά χαρακτηριστικά σαν περιγραφικά δεδομένα. Το μέγεθος των κελιών ορίζει την ακρίβεια της αναπαράστασης. Κάθε οντότητα του πραγματικού χώρου, σύμφωνα με το μοντέλο καννάβου, αναπαρίσταται από μία ή περισσότερες ομοιογενείς δομικές μονάδες. Κάθε μία από τις ενότητες, έχει το σύνολο των ιδιοτήτων του αντικειμένου που καθορίζει. Η γενική αρχή των μοντέλων αυτών είναι η δυνατότητα απειριόριστης επέκτασής τους στο χώρο και το αντίστροφο, δηλαδή η δυνατότητα της συνεχούς υποδιαίρεσης του ίδιου σχήματος σε μικρότερες ενότητες που έχουν τις ίδιες ιδιότητες με το αρχικό σχήμα. Υπάρχουν τα ψηφιδωτά μοντέλα

κανονικής και μη κανονικής μορφής. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται περισσότερο από όλα είναι το τετράγωνο-ψηφίδα, λόγω της δυνατότητάς του να υποδιαιρείται σε απεριόριστο αριθμό υπο-περιοχών που έχουν το ίδιο σχήμα, ιδιότητες και λειτουργία. Η τιμή της κάθε ψηφίδας (pixel-cell) θεωρείται κατά σύμβαση ότι αντιστοιχεί σε όλη την περιοχή την οποία αυτό καλύπτει. Το μέγεθος των τετραγώνων ορίζει την ακρίβεια της αναπαράστασης. Έτσι η θέση ενός σημείου, ορίζεται από τη γραμμή και τη στήλη του καννάβου στην οποία εμπίπτει. Τα συστήματα καννάβου είναι συμβατά με άλλα δεδομένα, όπως τα δορυφορικά (Ζουμπούλογλου, 2006).



Εικόνα 1.6: Κατανεμημένο μοντέλο (Παπαρρίζος, 2012)

1.6 Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής με τη χρήση του μοντέλου MIKE SHE

Η βασική μονάδα της διαχείρισης των υδάτων είναι η Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού, η οποία μπορεί να συνδυάζει πολλές Λεκάνες

Απορροής. Η διαδικασία σχεδιασμού ενός σχεδίου διαχείρισης Υδατικών Πόρων σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής πρέπει να προλαμβάνει την μη ορθολογική διαχείριση των υδάτων. Η διαδικασία σχεδιασμού διαιρείται στα ακόλουθα τέσσερα κύρια στάδια:

1. Προσδιορισμός της περιοχής λεκάνης απορροής, των απαραίτητων διοικητικών ρυθμίσεων, καθώς και των ρυθμίσεων για τον συντονισμό.
2. Χαρακτηρισμός της περιοχής και ανάλυση των πιέσεων και επιπτώσεων επί της κατάστασης όλων των επιφανειακών και υπογείων υδάτων και της οικονομικής ανάλυση των χρήσεων ύδατος.
3. Εγκατάσταση αντιπροσωπευτικού δικτύου παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων.
4. Σχεδιασμός της διαχείρισης της λεκάνης απορροής.

Στην προετοιμασία λοιπόν για την εφαρμογή της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής συμπεριλαμβάνεται η δημιουργία και ενεργοποίηση ενός αποτελεσματικού μηχανισμού συλλογής και ανάλυσης της πληροφορίας, η εγκατάσταση κατάλληλων δικτύων παρακολούθησης και η παροχή ευκαιριών στους ενδιαφερόμενους για πληροφόρηση και την συμβουλευτική συμμετοχή (Τσιτσιλώνης, 2006).

Η αειφορική διαχείριση λοιπόν, στα πλαίσια μιας λεκάνης απορροής, επιβάλλει την αξιολόγηση των συνεπειών των δραστηριοτήτων που πρόκειται να λάβουν χώρα εντός αυτής, πράγμα που είναι ζωτικής σημασίας για αυτούς που θα λάβουν τις αποφάσεις και τους σχεδιαστές των έργων. Ο αντίκτυπος των συνεπειών της όποιας δραστηριότητας μπορεί να διερευνηθεί με μετρήσεις στο πεδίο, αν και αυτή η μέθοδος τείνει να είναι χρονοβόρα και ακριβή (Oogathoo, 2006). Ουσιαστική βοήθεια σ' αυτό μπορούν σήμερα να προσφέρουν σύγχρονα επιστημονικά εργαλεία.

Τα εργαλεία αυτά θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν ολοκληρωμένα τη διαχείριση των υδατικών, εδαφικών και υγροτοπικών πόρων, αξιοποιώντας τεχνογνωσία από όλους τους σχετικούς κλάδους (Υδρολογία, Γεωλογία, Εδαφολογία, Οικολογία, Αγροκομία, Δασοκομία, Οικονομικές επιστήμες). Πρέπει, δηλαδή, να μπορούν να προσομοιώσουν την κατάσταση του εδάφους, τις διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου, την ποιότητα του νερού, την ποσότητα του νερού, αλλά και τα βιολογικά γνωρίσματα αυτού, και τελικώς να δίνουν πληροφορίες κατάλληλα επεξεργασμένες, σε επίπεδο υδρολογικό, οικολογικό, οικονομικό και διοικητικό, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Ένα τέτοιο εργαλείο προσομοίωσης είναι και το μοντέλο MIKE SHE. Το MIKE SHE είναι ένα υδρολογικό μοντέλο που είναι βασισμένο στους φυσικούς νόμους, πλήρως κατανεμημένο και περιλαμβάνει τόσο την προσομοίωση ενός μεμονωμένου συμβάντος όσο και τη συνεχή προσομοίωση. Η ευέλικτη δομή του μοντέλου, η κατανεμημένη φύση του και την ικανότητα του να χρησιμοποιεί τους φυσικούς νόμους για την

ερμηνεία των υδρολογικών διεργασιών, του παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υφιστάμενα υδρολογικά μοντέλα, σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το MIKE SHE είναι επίσης μοναδικό γιατί είναι το μόνο υδρολογικό μοντέλο που ενσωματώνει επιφανειακή, υποεπιφανειακή και υπόγεια ροή, κάτι που άλλα μοντέλα δεν κάνουν. Επιπλέον το μοντέλο MIKE SHE έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει το σύνολο της ροής των υδατορευμάτων που περιλαμβάνει την άμεση και τη βασική ροή. Πολλά μοντέλα, είτε δεν προσομοιώνουν, ή χρησιμοποιούν απλοϊκές μεθόδους, για τον προσδιορισμό της βασικής απορροής (Oogathoo, 2006).

1.7 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε έχοντας τους εξής **στόχους**:

1. **Την αξιολόγηση της ικανότητας** της συνδυασμένης χρήσης των μοντέλων MIKE SHE/MIKE 11 και του καρστικού μοντέλου Mailet για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής της σύνθετης γεωμορφολογικά λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.
2. **Το όφελος που θα προκύψει** από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Η ερμηνεία αυτή θα είναι σχετική με τις μεταβολές που πιθανόν να επέλθουν στη λεκάνη, λόγω κλιματικών αλλαγών ή ανθρώπινων παρεμβάσεων και θα συμβάλει στη δημιουργία α) προτάσεων σχετικών με την ορθολογική διαχείριση της λεκάνης και β) ενός σχεδίου δράσης με βάση αυτές, για τη κατάλληλη μακροπρόθεσμη στρατηγική αντιμετώπισης των όποιων προβλημάτων παρουσιαστούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

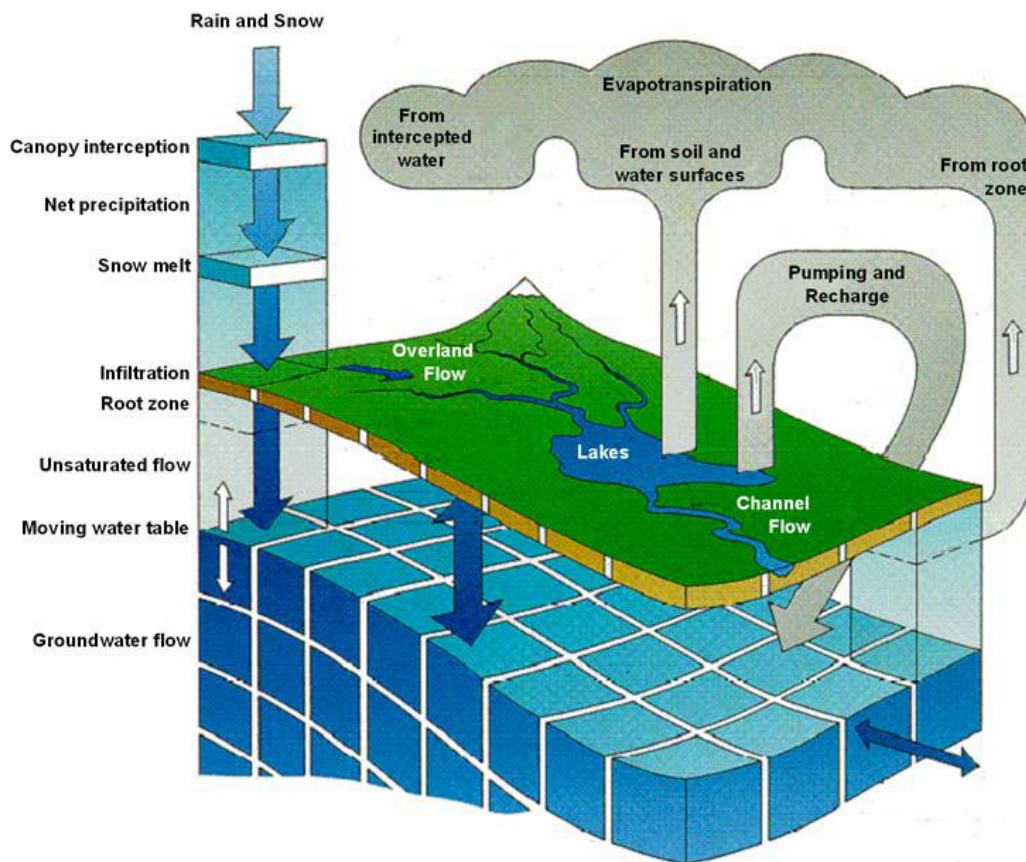
Μεθοδολογία

2.1. Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής (MIKE SHE)

2.1.1 Παρουσίαση του MIKE SHE

Η προσπάθεια περιγραφής της κίνησης του νερού οδήγησε στην ανάπτυξη μοντέλων με σκοπό την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου. Το MIKE SHE (Système Hydrologique Européenne) είναι ένα δυναμικό εργαλείο ολοκληρωμένης προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software.

Το MIKE SHE καλύπτει τις βασικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και περιλαμβάνει μοντέλα διεργασιών για την εξατμισοδιαπνοή, τη χερσαία ροή, την ακόρεστη ροή, τη ροή των υπογείων υδάτων και τη ροή σε κανάλι καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους (Εικόνα 2.1). Κάθε μια από αυτές τις διεργασίες μπορεί να προσομοιωθεί σε διαφορετικό επίπεδο χωρικής κατανομής αλλά και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τον στόχο της προσομοίωσης και την διάθεση ή όχι στοιχείων πεδίου. Τα δεδομένα του μοντέλου καθορίζονται σε μια ποικιλία από μορφές όπως γραμμικά αρχεία και αρχεία κάνναβου. Περιλαμβάνει μια πλήρη γκάμα εργαλείων προ-επεξεργασίας και μετά-επεξεργασίας καθώς και ένα μείγμα προηγμένων και απλών τεχνικών επίλυσης για κάθε μια από τις υδρολογικές διεργασίες.



Εικόνα 2.1: Οι υδρολογικές διεργασίες που προσομοιώνονται από το MIKE SHE (Mike She User Manual, 2007)

Το μοντέλο έχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών σε προβλήματα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς και σε προβλήματα περιβάλλοντος, όπως (Mike She User Manual, 2007):

- Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων
- Προγραμματισμός και διαχείριση λεκανών απορροής
- Σχεδιασμός, διαχείριση και βελτιστοποίηση παροχής νερού
- Άρδρευση και αποστράγγιση
- Επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων
- Συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών

- Διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων
- Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Χαρτογράφηση υδροφορέων
- Δυναμική επανατροφοδοσία υδροφορέων
- Μελέτες πλημμυρών
- Εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές στις χρήσεις γης και στο κλίμα
- Μόλυνση από διάθεση αποβλήτων
- Εκτίμηση επιπτώσεων από γεωργικές πρακτικές

Το MIKE SHE για την προσομοίωσης της ροής μέσα σε ποτάμι χρησιμοποιεί το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11 (Mike She User Manual, 2007).

2.1.2 Μαθηματική προσέγγιση της επιφανειακής ροής-μοντέλο MIKE SHE

Η ροή του νερού στη επιφάνεια του εδάφους, υπολογίζεται από το μοντέλο MIKE SHE με τη χρήση της δισδιάστατης προσέγγισης του διάχυτου κύματος, των εξισώσεων του Saint Venant. Με βάση αυτές τις εξισώσεις το MIKE SHE χρησιμοποιεί δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της ροής. Αυτές είναι:

1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)
2. Μια απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής απορροής βασισμένη στην εξίσωση του Manning (Simplified Overland Flow Routing Method).

1. Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

Έστω ότι $i(\chi, y)$ είναι η ποσότητα της επιφανειακής απορροής (καθαρή βροχόπτωση χωρίς διήθηση). Τότε η αρχή διατήρησης της μάζας μας δίνει:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \chi}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = i \quad (2.1)$$

Και η εξίσωση της ορμής δίνει:

$$S_{f\chi} = S_{o\chi} - \frac{\partial h}{\partial \chi} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial \chi} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{qu}{gh} \quad (2.2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{qv}{gh} \quad (2.3)$$

h = το βάθος της ροής πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (m)

u = η ταχύτητα στη διεύθυνση χ (m/s)

v = η ταχύτητα στη διεύθυνση y (m/s)

S_f = οι κλίσεις τριβής στις χ και y κατευθύνσεις

S_o = η κλίση της επιφάνειας του εδάφους

Οι εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.3) είναι γνωστές ως εξισώσεις του St Venant. Απλοποιήσεις και διαδοχικές αντικαταστάσεις μας δίνουν τις εξισώσεις:

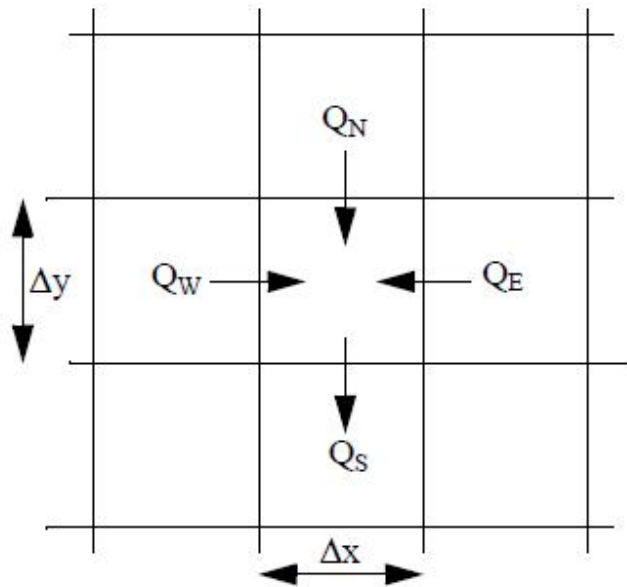
$$uh = K_{\chi} \left(-\frac{\partial z}{\partial \chi} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad (2.4)$$

$$vh = K_y \left(-\frac{\partial z}{\partial y} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad (2.5)$$

Οι ποσότητες uh και vh αναπαριστούν παροχή ανά μονάδα μήκους κατά μήκος του ορίου του κελιού, στη x και y κατεύθυνση αντιστοίχως και K_x και K_y είναι οι συντελεστές τραχύτητας Stickler.

Διατύπωση πεπερασμένων διαφορών

Θεωρούμε την επιφανειακή ροή σε μια μικρή περιοχή (κελί) του καννάβου στο μοντέλο MIKE SHE, με πλευρές μήκους Δx και Δy και βάθος νερού $h(t)$ σε χρόνο t .



Εικόνα 2.2: Σύστημα τετραγωνικού πλέγματος σε μια μικρή περιοχή του μοντέλου MIKE SHE (Mike She User Manual, 2007)

Προκύπτει:

$$\Delta h = h(t + \Delta t) - h(t) = I + \frac{\Sigma Q \Delta t}{\Delta x^2} \quad (2.6)$$

Όπου:

$$I = i\Delta\chi^2$$
$$\Sigma Q = Q_N + Q_S + Q_E + Q_W \quad (2.7)$$

i = η καθαρή εισροή στην επιφανειακή ροή στην εξίσωση (2.1)

Q = οι ροές στο κελί του καννάβου στα βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά όρια, εκτιμώμενα κατά τη χρονική στιγμή t .

Επίσης οι εξισώσεις (2.4) και (2.5) μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ροής Q μεταξύ των κελιών του πλέγματος μέσω της εξίσωσης:

$$Q = \frac{K\Delta\chi}{\Delta\chi^{1/2}} (ZU - ZD)^{1/2} hu^{5/3} \quad (2.8)$$

ZU = τα ψηλότερα επίπεδα νερού σε σχέση με το σημείο αναφοράς

ZD = τα χαμηλότερα επίπεδα νερού σε σχέση με το σημείο αναφοράς.

K = ο κατάλληλος συντελεστής Stickler

hu = το βάθος του νερού που μπορεί να ρέει ελεύθερα μέσα στο επόμενο

Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χερσαίας ροής, χρησιμοποιείται η επαναληπτική τροποποιημένη μέθοδος του Gauss Seidel. Η ροή υπολογίζεται για το υπόλοιπο της κάθε επανάληψης χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.8), όποτε υπάρχει επαρκές νερό σε ένα κελί του καννάβου, δηλαδή, όποτε hu υπερβαίνει το ελάχιστο όριο που καθορίζεται από το χρήστη. Το νερό προστίθεται ή αφαιρείται (λόγω

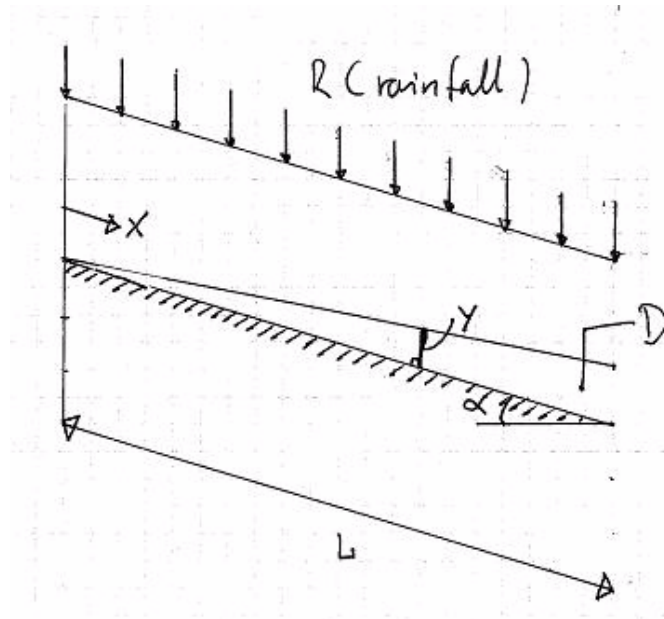
διείσδυσης, εμπλουτισμού ή εξάτμισης) στο νερό της επιφανειακής απορροής στο κάνναβο του μοντέλου, στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος της επιφανειακής απορροής.

Κατά τη διάρκεια της επανάληψης, εφόσον οι εξισώσεις ροής έχουν οριστεί, οι χερσαίες ροές μειώνονται σε ορισμένες περιπτώσεις για να αποφευχθούν λάθη στην ισορροπία του νερού και απόκλιση στη λύση του συστήματος. Επομένως στο εξής, η ροή θα πρέπει να είναι:

$$\sum |Q_{out}| \leq \sum Q_{in} + I + \frac{\Delta \chi^2 h(t)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

2. Απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής απορροής (Simplified Overland Flow Routing Method)

Η απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής απορροής στο μοντέλο MIKE SHE βασίζεται σε μια εμπειρική σχέση μεταξύ βάθους ροής και της επιφανειακής κατακράτησης, που μαζί με την εξίσωση Manning περιγράφουν την αποφόρτιση κάτω από συνθήκες τυρβώδους ροής (Mike She User Manual, 2007).



Εικόνα 2.3: Επιφανειακή απορροή (Mike She User Manual, 2007)

Η εικόνα 2.3 αναπαριστά σχηματικά την επιφανειακή ροή σε μια επίπεδη επιφάνεια άπειρου πλάτους με ομοιόμορφη βροχόπτωση. Η βροχή πέφτει στην επιφάνεια δημιουργώντας ένα πάχος ροής λόγω της επιφανειακής τραχύτητας, και ρέει προς τα κάτω στη θετική κατεύθυνση x . Στην εικόνα 2.3, L είναι το μήκος της επιφάνειας, y είναι το τοπικό βάθος της ροής σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας και α η κλίση. Με βάση αυτά η εξίσωση συνέχειας περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{dq}{dx} = R - \frac{dy}{dt} \quad (2.10)$$

q = ροή

R = βροχόπτωση

Για τυρβώδη ροή σε επίπεδη επιφάνεια με άπειρο πλάτος, η εξίσωση Manning είναι:

$$q = M \cdot y^{\frac{5}{3}} \sqrt{a} [m^2 / s] \quad (2.11)$$

M = ο αριθμός Manning

a = κλίση εδάφους

Όπου το βάθος y , κοντά στην αιχμή του επιπέδου ροής σχετίζεται με το βάθος σε κατάσταση ισορροπίας, y_e με την εξίσωση:

$$y = \left(\frac{t}{t_e} \right) \cdot y_e \quad (2.12)$$

Όπου:

t = χρόνος

t_e = ο χρόνος μέχρι τη κατάσταση ισορροπίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση (2.11) γίνεται:

$$q = M \cdot \left(\frac{t}{t_e} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot y_e^{\frac{5}{3}} \sqrt{a} [m^2 / s] \quad (2.13)$$

Στην ισορροπία, το βάθος δε μεταβάλλεται πια και η ροή είναι σχεδόν ίση με τις τιμές βροχόπτωσης. Κατά την ισορροπία, ο όγκος του νερού που κατακρατείτε στην επιφάνεια, D_e , μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$D_e = \frac{5}{8} \cdot \frac{R^{\frac{3}{5}} \cdot L^{\frac{8}{5}}}{M^{\frac{3}{5}} \cdot a^{\frac{3}{10}}} [m^3 / m] \quad (2.14)$$

Ο χρόνος για τη κατάσταση ισορροπίας περιγράφεται ως εξής:

$$t_e = \frac{8}{5} \cdot \frac{D_e}{R \cdot L} \quad (2.15)$$

Η σχέση μεταξύ του βάθους, y , και του όγκου νερού που κατακρατείται στην επιφάνεια πριν την ισορροπία, D , δίνεται από ένα εμπειρικό μοντέλο

$$y = \frac{D}{L} \left(1 + 3/5 \cdot \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right) [m] \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας την (2.16) στην εξίσωση του Manning (2.11) έχουμε:

$$q = M \cdot \sqrt{a} \cdot \left[\frac{D}{L} \left(1 + 3/5 \cdot \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right) \right]^{5/3} [m^2 / s] \quad (2.17)$$

Στο MIKE SHE η επιφανειακή συγκράτηση νερού υπολογίζεται διαρκώς από την επίλυση της εξίσωσης συνέχειας:

$$D_2 = D_1 + (\bar{q}_{\text{sup ply}} - \bar{q}) \cdot \Delta t \quad (2.18)$$

όπου D_1 είναι ο όγκος του αποθέματος νερού που κατακρατείται στην αρχή του χρονικού βήματος και D_2 είναι ο όγκος του αποθέματος νερού που κατακρατείται στο τέλος του χρονικού βήματος, το q είναι η επιφανειακή απορροή κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος και q_{sup}/y είναι η ποσότητα του νερού που προστίθεται στην επιφανειακή απορροή κατά το χρονικό βήμα. Εφόσον το q είναι συνάρτηση του μέσου κατακρατούμενου αποθέματος νερού, $(D_1 + D_2)/2$, η εξίσωση (2.17) λύνεται επαναληπτικώς μέχρι η λύση να ικανοποιεί και τις δύο εξισώσεις.

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιήθηκε η απλουστευμένη προσέγγιση υπολογισμού της μιας και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται σε αυτή την περίπτωση είναι κατά πολύ μικρότερος της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών.

2.2 Μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε ποτάμι (MIKE 11)

2.2.1 Παρουσίαση του MIKE 11

Το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11 αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Υδραυλικής της Δανίας (DHI) για την προσομοίωση της ροής, της μεταφοράς ιζημάτων και της ποιότητας του νερού σε εκβολές, ποτάμια συστήματα και αρδευτικά συστήματα. Είναι ένα εργαλείο για το σχεδιασμό, τη διαχείριση και λειτουργία των λεκανών απορροής ποταμών και των δικτύων-καναλιών. Μπορεί να περιγράψει υποκρίσιμες καθώς και υπερκρίσιμες συνθήκες ροής μέσα από ένα αριθμητικό σύστημα το οποίο προσαρμόζεται ανάλογα με τις

τοπικές συνθήκες ροής (στο χώρο και το χρόνο).

Τυπικές εφαρμογές του MIKE 11 είναι οι:

- Ανάλυση πλημμυρών και σχεδιασμός αντιπλημμυρικής προστασίας
- Πρόβλεψη πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο
- Ανάλυση θραύσης φραγμάτων
- Βελτιστοποίηση υδραυλικών έργων
- Οικολογική και ποιοτική αξιολόγηση του νερού σε ποτάμια και υγροτόπους
- Μελέτες πάνω στη μεταφορά ιζημάτων και τη μορφολογία των ποταμών
- Εισχώρηση υφάλμυρου νερού σε ποταμούς και εκβολές ποταμών
- Μελέτες αποκατάστασης Υγροτόπων

2.2.2 Μαθηματική προσέγγιση της ροής σε ποτάμι- μοντέλο MIKE 11

Η υδρολογική προσομοίωση με το μοντέλο MIKE SHE είναι άμεσα συνδεδεμένα με το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11. Η ζεύξη του MIKE SHE με το MIKE 11 ενεργοποιεί τη μονοδιάστατη προσομοίωση της ροής των ποταμών με χρήση των πλήρως δυναμικών εξισώσεων του Saint Venant. Το MIKE 11 χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές για τον υπολογισμό των ασταθών ροών σε ποταμούς και εκβολές ποταμών.

Οι εξισώσεις του υδραυλικού μοντέλου MIKE 11, περιγράφονται με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας και της ορμής ως εξής:

Αρχή Διατήρησης της Μάζας:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2.19)$$

Αρχή Διατήρησης της Ορμής:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{ngQ|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2.20)$$

Η περιγραφή της ροής γίνεται από τη μονοδιάστατη εξίσωση του Διάχυτου Κύματος, η οποία παράγεται με τη διαγραφή των δύο πρώτων όρων της εξίσωσης (2.20):

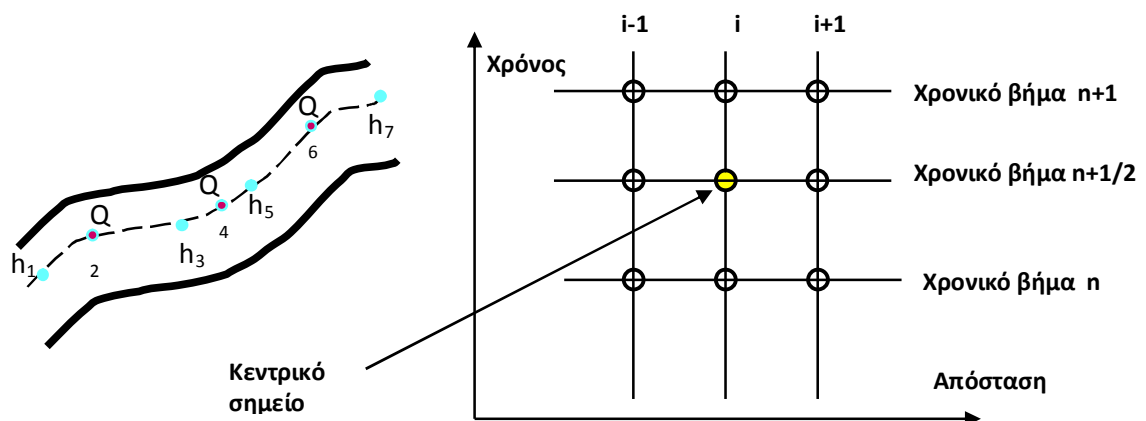
$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2.21)$$

και με την εξίσωση του Κινηματικού Κύματος (σχετικά απότομα ποτάμια χωρίς το φαινόμενο στάσιμων νερών), η οποία παράγεται με τη διαγραφή των τριών πρώτων όρων της εξίσωσης (2.20):

$$\frac{ngQ|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2.22)$$

όπου Q είναι η εκφόρτιση (m^3 / s), A είναι το εμβαδόν της διατομής, q είναι η πλευρική εισροή (m^2 / s), h είναι η στάθμη του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (m), x είναι η κατεύθυνση ροής του ρεύματος (m), t είναι ο χρόνος (s), n είναι ο συντελεστής αντίστασης του Manning ($s / m^{1/3}$), το R είναι η υδραυλική ακτίνα ή ακτίνα αντίσταση (m), g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2 / s) και α είναι ο συντελεστής κατανομής της ορμής (e), που εισήχθη για να αντιπροσωπεύσει τη μη ομοιόμορφη κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας σε ένα δεδομένο τμήμα.

Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από εναλλασσόμενα σημεία Q και h κατά μήκος του ποταμού (δηλαδή, σημεία όπου η εκφόρτιση, Q , και το επίπεδο του νερού, h , υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα). Το μοντέλο αυτόματα παράγει ένα υπολογιστικό πλέγμα επί τη βάσει της μέγιστης απόσταση Δx , που ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων h (Doulgeris, 2010).



Εικόνα 2.4: Το υπολογιστικό πλέγμα του MIKE 11 (Popescu, 2002)

2.3 Μοντέλο προσομοίωσης της εκφόρτισης πηγών (Καρστικό μοντέλο Maillet)

2.3.1 Παρουσίαση του Καρστικού Μοντέλου Maillet

Το μοντέλο του Maillet βασίζεται στην εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου κατά την περίοδο στείρευσης (χωρίς βροχοπτώσεις) και υποθέτει ότι οι πηγές εκφορτίζουν σε διακριτά σημεία και όχι σε μέτωπο, καθώς και ότι η συσχέτιση μεταξύ όγκου και παροχής εκφόρτισης είναι γραμμική.

Οι Stamati et. al. (2006), Tzoraki et. al. (2007) και Kourgialas et. al (2010) μελέτησαν την λειτουργία των καρστικών πηγών στην ευρύτερη περιοχή του Ν. Χανίων και πρότειναν ένα ‘δύο ταμιευτήρων’ τύπου Maillet μοντέλο, που αντιπροσωπεύει τους δυο ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (ανώτερος-γρήγορης εκφόρτισης, και κατώτερος-αργής εκφόρτισης ταμιευτήρας). Το ‘δύο ταμιευτήρων’ καρστικό μοντέλο εκφόρτισης πηγών μπορεί να προσομοιώσει την εκφόρτιση καρστικών πηγών, καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους.

2.3.2 Μαθηματική προσέγγιση του καρστικού μοντέλου

Το υδατικό ισοζύγιο που αντιστοιχεί στον ανώτερο και στον κατώτερο ταμιευτήρα περιγράφονται στις εξισώσεις (2.23 και 2.24). Η μεταβολή του όγκου του νερού στον ανώτερο (V_1) και στον κατώτερο (V_2) ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου ισούται με την διαφορά της ημερήσιας εκροής νερού (Q_1, Q_2) από τον ταμιευτήρα από την ημερήσια εισροή νερού ($Q_{in,1}, Q_{in,2}$) σε αυτόν:

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_{in,1} - Q_1 \quad (2.23)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_{in,2} - Q_2 \quad (2.24)$$

Η εισροή νερού στον ανώτερο ταμιευτήρα αντιπροσωπεύει την άμεση βροχόπτωση στο καρστ ή την τήξη του χιονιού. Η εισροή στο καρστ υπολογίζεται μέσω του υδατικού ισοζυγίου μάζας του χιονιού σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dV_s}{dt} = (P_s - M_s) * \varepsilon * A_{karst} \quad (2.25)$$

Όπου:

V_s = ισοδύναμος όγκος νερού του χιονιού,

P_s = ημερήσια βροχόπτωση που πέφτει ως χιόνι (όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή) σε m/d,

M_s = ημερήσιος ρυθμός τήξης του χιονιού σε m/d,

ε = διορθωτικός παράγοντας που λαμβάνει υπόψη τις υδατικές απώλειες από το χιόνι,

A_{karst} = επιφάνεια του καρστ σε m².

Ο ημερήσιος ρυθμός τήξης του χιονιού υπολογίζεται με τη χρήση εμπειρικών εξισώσεων που έχουν αναπτυχθεί από το Τμήμα Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ και έχουν εφαρμοστεί σε μοντέλα λεκανών απορροής.

Η εξίσωση (2.26) υπολογίζει την τήξη του χιονιού υπό ξηρό καιρό, χωρίς βροχή και η εξίσωση (2.27) όταν υπάρχει βροχή στο χιόνι:

$$M_s = C_{m1} * (1.8 * T_a)^{n+1} / 1000 \quad (2.26)$$

$$M_s = C_{m2} * (0.007 * P_w + 0.074) * T_a * 1.8 + 0.05) * 0.254 / 1000 \quad (2.27)$$

Όπου:

n = συντελεστής που συνήθως παίρνει την τιμή 0.25,

P_w = ημερήσια υγρή κατακρήμνιση σε m/d,

T_a = μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε °C,

C_{m1}, C_{m2} = αδιάστατοι διορθωτικοί συντελεστές που προσαρμόζουν τις εξισώσεις στις τοπικές συνθήκες.

Η εξίσωση (2.25) επιλύεται με τη μέθοδο του Euler για ημερήσιο χρονικό βήμα. Έπειτα, οι ημερήσιες εισροές νερού στον ανώτερο και στον κατώτερο ταμιευτήρα του καρστ μπορούν να υπολογιστούν με την εξίσωση (2.28) και (2.29), όπως φαίνεται παρακάτω:

$$Q_{in,1} = (1 - f) * (P_w + M_s) * \varepsilon * A_{karst} \quad \text{και} \quad (2.28)$$

$$Q_{in,2} = f * (P_w + M_s) * \varepsilon * A_{karst} \quad (2.29)$$

Όπου:

f = το ποσοστό της συνολικής παροχής (βροχόπτωση και τήξη χιονιού) που εισέρχεται στον κατώτερο ταμιευτήρα.

Η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων (2.23) και (2.24) για σταθερό $Q_{in,1}$ είναι οι ακόλουθες:

$$Q_1 = Q_{1,0}e^{-a_1t} + Q_{in,1}(1 - e^{-a_1t}) \quad (2.30)$$

$$Q_2 = Q_{2,0}e^{-a_2t} + Q_{in,2}(1 - e^{-a_2t}) \quad (2.31)$$

Όπου:

a_1, a_2 = οι συντελεστές στείρευσης (1/d) για τον ανώτερο και τον κατώτερο ταμιευτήρα αντίστοιχα.

Έτσι, η συνολική καρστική εκφόρτιση είναι το άθροισμα των δύο εκφορτίσεων (γρήγορη και αργή), των δύο ταμιευτήρων:

$$Q_{karstic} = (1 - a)Q_1 + Q_2 \quad (2.32)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Περιοχή Μελέτης

3.1 Γενικά

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κερίτη βρίσκεται στο βορειοκεντρικό τμήμα της επαρχίας Κυδωνίας του Νομού Χανίων, με διεύθυνση τον άξονα Βορράς – Νότος και σε μέση απόσταση από την πόλη των Χανίων 15 km (Εικόνα 3.1). Η έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη υπολογίστηκε σε 178,6 km². Εκτείνεται στο βορρά από το Γεράνι έως τον Γαλατά, φτάνοντας νοτίως μέχρι τις κορυφές των Λευκών Ορέων (2300m). Το δέλτα του ποταμού, που είναι στη τουριστική περιοχή Πλατανιά, καθώς και η τεχνητή λίμνη στην περιοχή Αγυιά, είναι προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο Natura 2000. Η λεκάνη του Κερίτη ανήκει κατά το μεγαλύτερο μέρος της στο δήμο Πλατανιά. Περιλαμβάνει 19 οικισμούς, σημαντικότερα των οποίων είναι τα χωριά Φουρνές, Σκηνές, Αλικιανός, Βατόλακκος, Κουφός, Αγυιά, Πατελάρι, Πλατανιάς, Γεράνι, Λάκκοι, Βαρύπετρο και Μεσκλά (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

.



Εικόνα 3.1: Ο νομός Χανίων χωρισμένος σε δημοτικά διαμερίσματα και η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη

3.2 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Γεωλογικά η λεκάνη του Κερίτη χαρακτηρίζεται από τέσσερις κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς (Βοζινάκης και Κουγιάννη 2004), (Εικόνα 3.2):

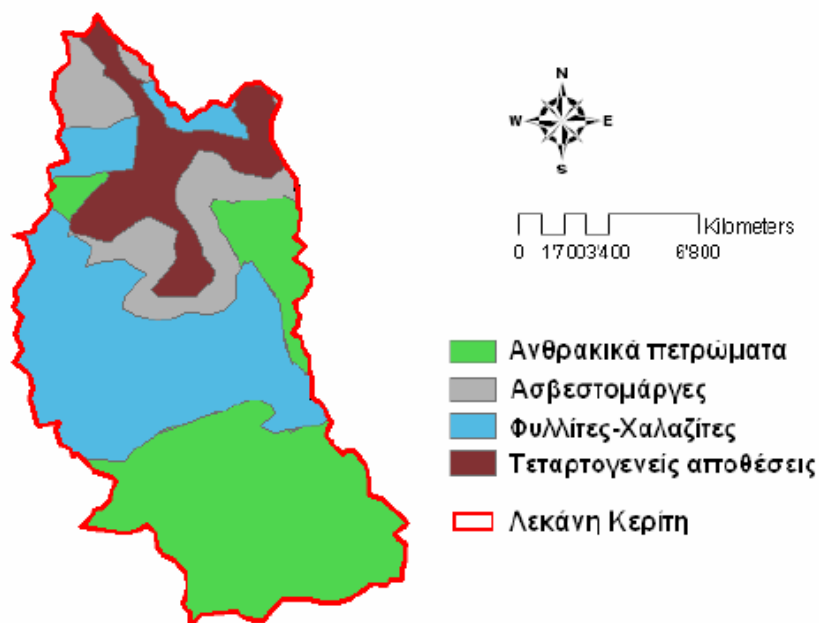
Α. Ανθρακικά πετρώματα: Καταλαμβάνουν το ΝΑ τμήμα της, και επεκτείνονται πολύ νοτιότερα, και πέραν των ορίων της εν λόγω υδρολογικής λεκάνης, έως τον κύριο ασβεστολιθικό όγκο των Λευκών

Ορέων. Επίσης μικρή επιφανειακή εμφάνιση του καρστικού συστήματος βρίσκεται δυτικά του οικισμού Κουφός το οποίο τροφοδοτεί τις πηγές υπερχήλισης Κουφού (τοποθεσία Βλυχάδες). Αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα και μπορούν να ομαδοποιηθούν γενικότερα σε καρστικούς σχηματισμούς. Χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλή υδροπερατότητα και η ύπαρξη τους ευνοεί δημιουργία υπόγειων υδροφορέων.

Β. Φυλλίτες -Χαλαζίτες: Συναντώνται στο κεντρικό-δυτικό τμήμα της λεκάνης και εμφανίζονται σε μικρότερη έκταση και στο βόρειο τμήμα της. Είναι γενικά μη υδατοπερατοί σχηματισμοί και αποτελούν συνήθως τα όρια των υπογείων υδάτων.

Γ. Νεογενείς σχηματισμοί: Στην λεκάνη Κερίτη αναπτύσσονται νεογενείς σχηματισμοί στο βόρειο παραλιακό τμήμα της λεκάνης (μαργαικοί ασβεστόλιθοι, μάργες, γύψοι κ.ά.).

Δ. Τεταρτογενείς σχηματισμοί: Είναι οι νεότερες αποθέσεις και αποτελούνται από αδρομερή εν γένει υλικά, καθώς και αργίλους, άμμους και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό τμήμα της λεκάνης στην περιοχή Αγυιάς, Αλικιανού, Βατόλακκου, Σκηνέ, Κουφού, με σημαντικό πάχος και αξιόλογη υδροφορία. Η υδροφορία αυτών των σχηματισμών είναι αξιόλογη τροφοδοτούμενη από το καρστικό σύστημα και τις βροχοπτώσεις.



Εικόνα 3.2: Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη

Σύμφωνα με την μελέτη για την αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού Δυτικής Κρήτης (ΟΑΔΥΚ), κυριότερες πηγές εκφόρτισης για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη είναι:

➤ Οι καρστικές πηγές Μεσκλών (Κεφαλοβρύσια, Παναγιά, Νικολιανά)

Η μέση ετήσια απορροή είναι της τάξης των $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ νερού. Εμφανίζονται σε απόλυτο υψόμετρο 210m. Το υδρογράφημα των πηγών δείχνει τη γρήγορη απορροή με πλημμυρικές αιχμές που ελαχιστοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες. Η μέση παροχή των πηγών για το μήνα Μάρτιο είναι $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ και η μέση παροχή το Σεπτέμβριο $650 \text{ m}^3/\text{h}$. Από τις παραπάνω πηγές τροφοδοτούνται με

νερό ο Τ.Ο.Ε.Β. Μεσκλών, ο Τ.Ο.Ε.Β. Φουρνέ, ο Ο.Α.ΔΥ.Κ., ο Δήμος Χανίων, ο Δήμος Μουσούρων κ.α.

➤ Οι καρστικές πηγές υπερχείλισης της Αγυιάς (Καλαμιώνας, Πλάτανος, Κολύμπα)

Εμφανίζονται σε απόλυτο υψόμετρο 40m, στον οικισμό Αγυιά. Το ετήσιο ισοζύγιο των πηγών υπερβαίνει τα $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Η μέση παροχή το μήνα Μάρτη είναι $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ ενώ για το μήνα Σεπτέμβρη είναι της τάξης των $6600 \text{ m}^3/\text{h}$. Το υδρογράφημα των πηγών δείχνει μικρές διακυμάνσεις των παροχών μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού. Οι σταθερές παροχές των πηγών σε ετήσια βάση υποδηλώνουν ότι οι πηγές εκφορτίζουν νερό ακόμη και την περίοδο του θέρους. Τα υδρολογικά αυτά στοιχεία μαρτυρούν ότι υπάρχει μεγάλος όγκος νερού σε μόνιμο απόθεμα. Ο όγκος νερού του μόνιμου αποθέματος δεν είναι γνωστός εκτιμάται όμως σε αρκετές δεκάδες εκατομμύρια m^3 νερού. Από τις πηγές αξιοποιούνται περί τα $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ (όγκος θερινής εκροής). Από αυτά το 50% λαμβάνεται από τα σημεία εκροής των πηγών και το υπόλοιπο 50% από την υπόγεια καρστική λεκάνη, ανάντη των πηγών (περιοχή Μυλωνιανά, Φουρνέ). Οι πηγές του Καλαμιώνα, με ετήσιο ισοζύγιο περίπου $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$, παρουσιάζουν ποιοτική επιβάρυνση με θειικά ιόντα.

3.3 Χρήσεις Γης

Σύμφωνα με τη διαχειριστική μελέτη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Νικολαΐδη και Καρατζάς 2010) και τη χρήση στοιχείων

του Υπουργείου Γεωργίας και της βάσης δεδομένων Corine 2000, υπολογίστηκε ότι στη λεκάνη του Κερίτη οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από σκληρόφυλλη βλάστηση (κωδικός 323), καταλαμβάνουν έκταση 61,88km² με ποσοστό 34,98% των συνολικών χρήσεων γης της λεκάνης. Οι μη συνεχείς αστικές περιοχές (κωδικός 112) καταλαμβάνουν το 0,45% με έκταση 0,79 km² , περιοχές με βλάστηση καρποφόρων δέντρων (κωδικός 222) το 10,26% με έκταση 18,15 km² , ελαιώνες (κωδικός 223) με ποσοστό ίσο με 7,37% με έκταση 13,3 km² , σύνθετες πρότυπες καλλιέργειες (κωδικός 242) με 10,28% και έκταση 18,19 km² , αγροτικές εκτάσεις (κωδικός 243) 10,75% με 19 km² , φυσικά λιβάδια (κωδικός 321) 7,21% με 12,76 km² , δασώδεις εκτάσεις (κωδικός 324) με 3,48% και 6,16 km² , άγονες περιοχές/ χερσότοποι (κωδικός 322) το 10,17% με 17,99 km² , περιοχές με αραιή βλάστηση(κωδικός 333) το 4,46% με 8,25 km² και ακροθαλασσιές/ αμμουδιές (κωδικός 331) το 0,39% με 0,64 km². Το υπόλοιπο της συνολικής έκτασης καταλαμβάνουν τα επιφανειακά ύδατα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Εφαρμογή Συνδυασμένου Πλαισίου Προσομοίωσης

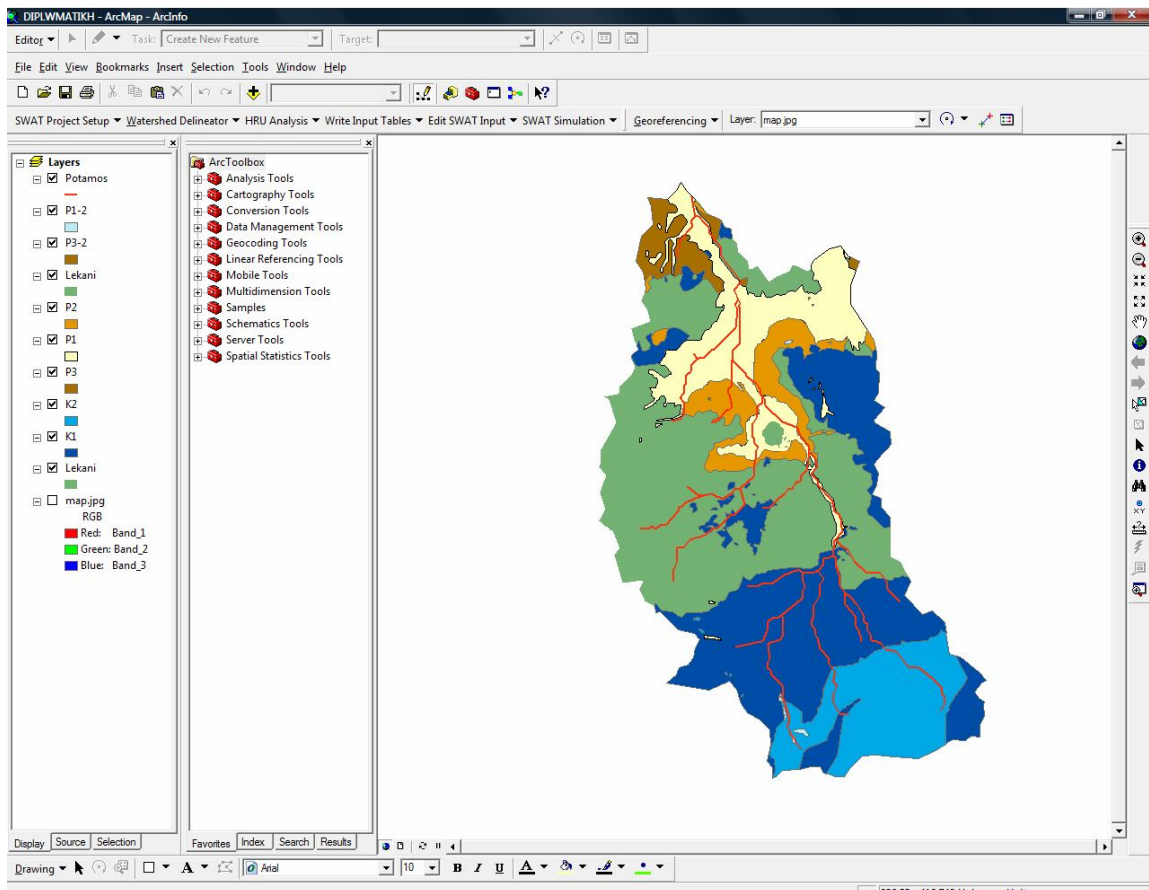
4.1.1 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων μέσω GIS στο μοντέλο MIKE SHE

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ESRI ArcGIS Desktop 9.1 που παρέχει πολυάριθμες εφαρμογές όσον αφορά στον προσδιορισμό γεωγραφικών και περιγραφικών δεδομένων και ειδικότερα εφαρμογών σχετικά με την υδρολογία. Το συγκεκριμένο λογισμικό πακέτο δημιουργεί, αναλύει, διαχειρίζεται και καταγράφει γεωγραφικές πληροφορίες.

Το ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE έχει σχεδιαστεί για να είναι απόλυτα συμβατό με τα αρχεία του ArcGIS. Το ArcGIS έχει την δυνατότητα να δημιουργεί σχηματικά αρχεία με την κατάληξη .shp (shape files). Ο τύπος του shape file εξαρτάται από το είδος των δεδομένων (σημειακά, γραμμικά ή πολυγωνικά). Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα κατανεμημένα χωρικά δεδομένα μπορούν να εισαχθούν άμεσα στο μοντέλο MIKE SHE. Με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ψηφιοποιήθηκαν και εισήχθησαν στο μοντέλο MIKE SHE τα εξής αρχεία (.shp) (Εικόνα 4.1):

- Λεκάνη απορροής
- Ποταμός Κερίτης
- Γεωλογικοί σχηματισμοί
- Σημεία μετρήσεων επιφανειακής απορροής

- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).
- Χρήσεις γης
- Οι πηγές εκφόρτισης
- Οι βροχομετρικοί σταθμοί και τα πολύγωνα Thiesen

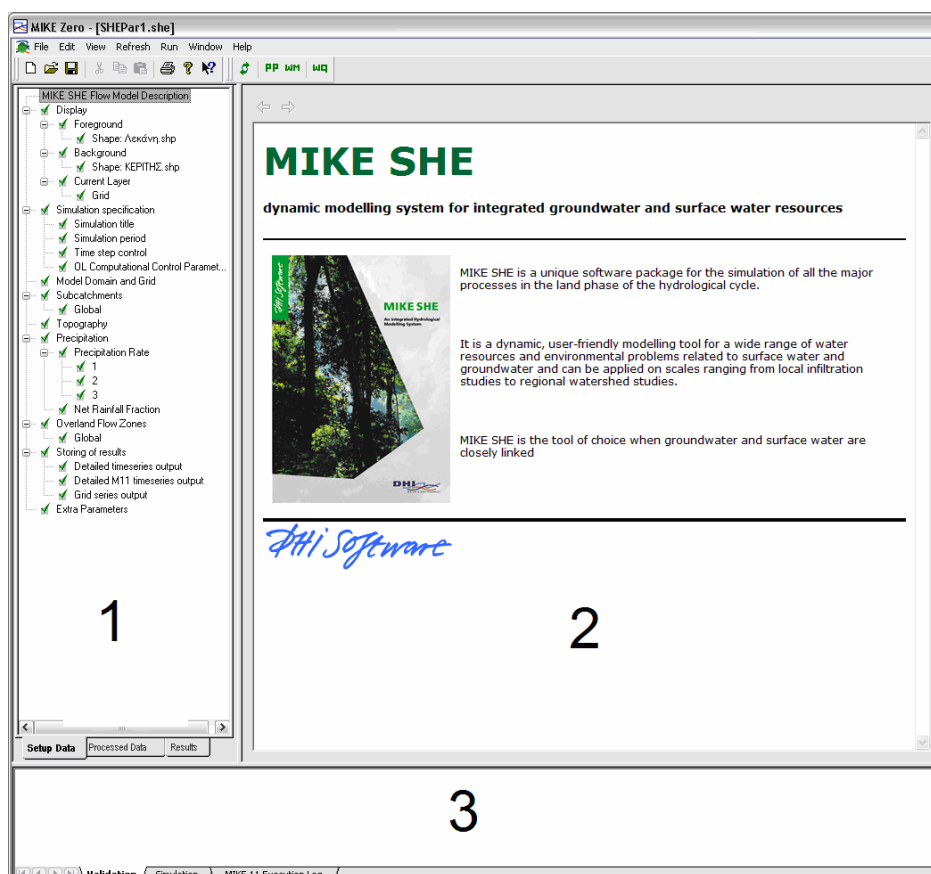


Εικόνα 4.1: Η ψηφιοποιημένη μορφή των χωρικών δεδομένων στο GIS για τη λεκάνη απορροής του Κερίτη

4.1.2 Μοντέλο MIKE SHE

Σε κάθε εφαρμογή μοντελοποίησης υπάρχουν τρία στάδια: (α) η δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου (set up of the model), (β) η εκτέλεση της προσομοίωσης (run the model), και (γ) η αποτίμηση των αποτελεσμάτων (assess of the results). Στην περίπτωση του υδρολογικού

μοντέλου MIKE SHE τα παραπάνω τρία στάδια μοντελοποίησης περιέχονται στο πλαίσιο εργασίας MIKE Zero, στο οποίο γίνεται η διαχείριση των αρχείων εισόδου και εξόδου της προσομοίωσης (Κουργιαλάς, 2010). Το περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Στην αριστερή πλευρά της συγκεκριμένης εικόνας βλέπουμε χαρακτηριστικά την περιοχή διαχείρισης των δεδομένων εισόδου σε μορφή δενδρώδους διαγράμματος (περιοχή 1). Στη δεξιά πλευρά της ίδια εικόνας, γίνεται βήμα προς βήμα η επεξεργασία των δεδομένων που επιλέγουμε από το δενδρώδες διάγραμμα των δεδομένων εισόδου (περιοχή 2), ενώ η αξιολόγηση των εισαγόμενων δεδομένων γίνεται στην περιοχή 3.



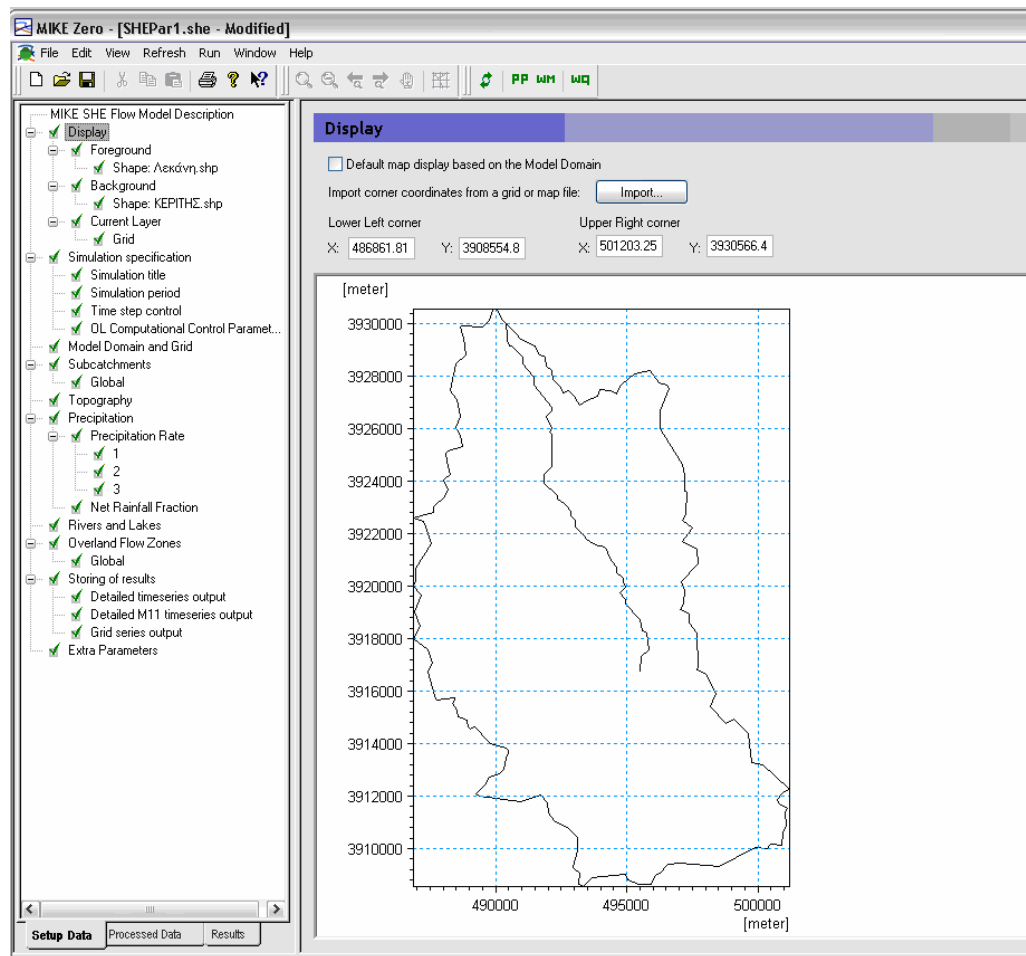
Εικόνα 4.2: Περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE

Η δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου γίνεται μέσω του δέντρου δεδομένων (data tree – περιοχή 1). Το δέντρο δεδομένων είναι δυναμικό, δηλαδή αλλάζει σχετικά με το τρόπο που θα κτίσουμε το μοντέλο μας και οργανώνεται κατακόρυφα, με την έννοια ότι τα δεδομένα εισάγονται με συγκεκριμένη σειρά από την κορυφή του δέντρου δεδομένων προς το κάτω. όπου όταν έχουμε φτάσει θα είμαστε πια έτοιμοι να τρέξουμε το μοντέλο και να εξάγουμε αποτελέσματα. Για τη δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου είναι απαραίτητη η συγκέντρωση και επεξεργασία όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, σε σχηματικά αρχεία (shapefiles) και σε χρονοσειρές (timeseries). Αναλόγως με το σημείο του δέντρου δεδομένων που επεξεργαζόμαστε, εισάγουμε και τα αντίστοιχα αρχεία και δεδομένα (περιοχή 2) των οποίων την εγκυρότητα βλέπουμε στην περιοχή 3, με την εκτέλεση της προσομοίωσης του μοντέλου.

Τα επιμέρους στάδια τα οποία ακολουθήσαμε για τη δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου (δέντρο δεδομένων) περιγράφονται παρακάτω:

A) Εμφάνιση βασικού χάρτη (Display)

Στο μοντέλο MIKE SHE αρχικά γίνεται καθορισμός της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό εισάγεται το shapefile της περιοχής μελέτης. Προκύπτει έτσι η Εικόνα 4.3, η οποία περιγράφει έναν βασικό χάρτη υποβάθρου (background map) για την περιοχή μελέτης και τον κύριο ρου του ποταμού Κερίτη.

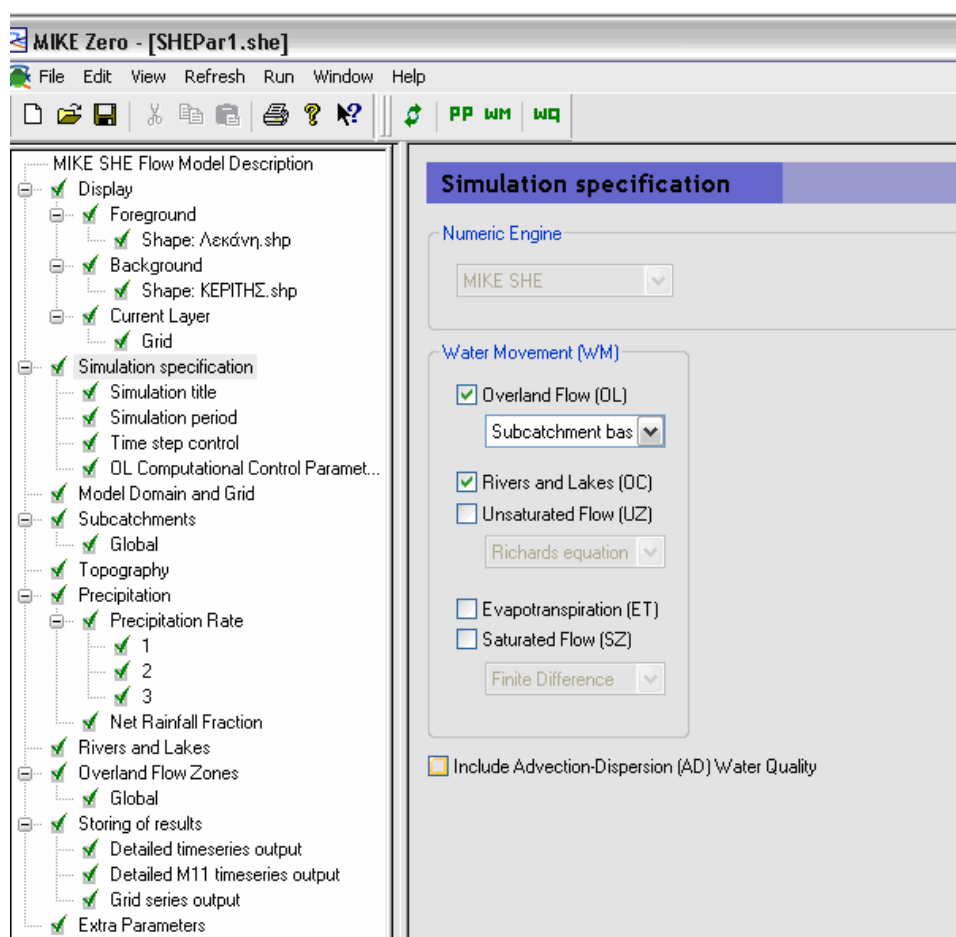


Εικόνα 4.3: Περιοχή μελέτης

B) Παράμετροι της προσομοίωσης (*Simulation Specification*)

Το στάδιο αυτό για την δημιουργία του μοντέλου μας είναι ιδιαίτερα κρίσιμο. Μέσω αυτού προσδιορίζεται σαν πρώτο βήμα η μέθοδος - δηλαδή οι εξισώσεις - με τις οποίες το MIKE SHE επιλύει- περιγράφει την επιφανειακή απορροή. Εδώ έπρεπε να επιλέξουμε ανάμεσα στις επιλογές “Overland Flow” και “Subcatchment based” που αντιστοιχούν -όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2- στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και στην απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού

της επιφανειακής απορροής, αντιστοίχως. Επιλέγουμε την απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής απορροής “Subcatchment based”, για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου (Εικόνα 4.4). Μετέπειτα προσδιορίζεται το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης και το χρονικό βήμα. Στην παρούσα εργασία το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης καθορίστηκε από 2006/01/01 έως 2006/12/31, ενώ το χρονικό βήμα καθορίστηκε στις 24 ώρες (Εικόνες 4.5 και 4.6). Η εισαγωγή των υδραυλικών δεδομένων του ποταμού με την επιλογή “Rivers and Lakes”, η οποία γίνεται μέσω του μοντέλου MIKE 11.



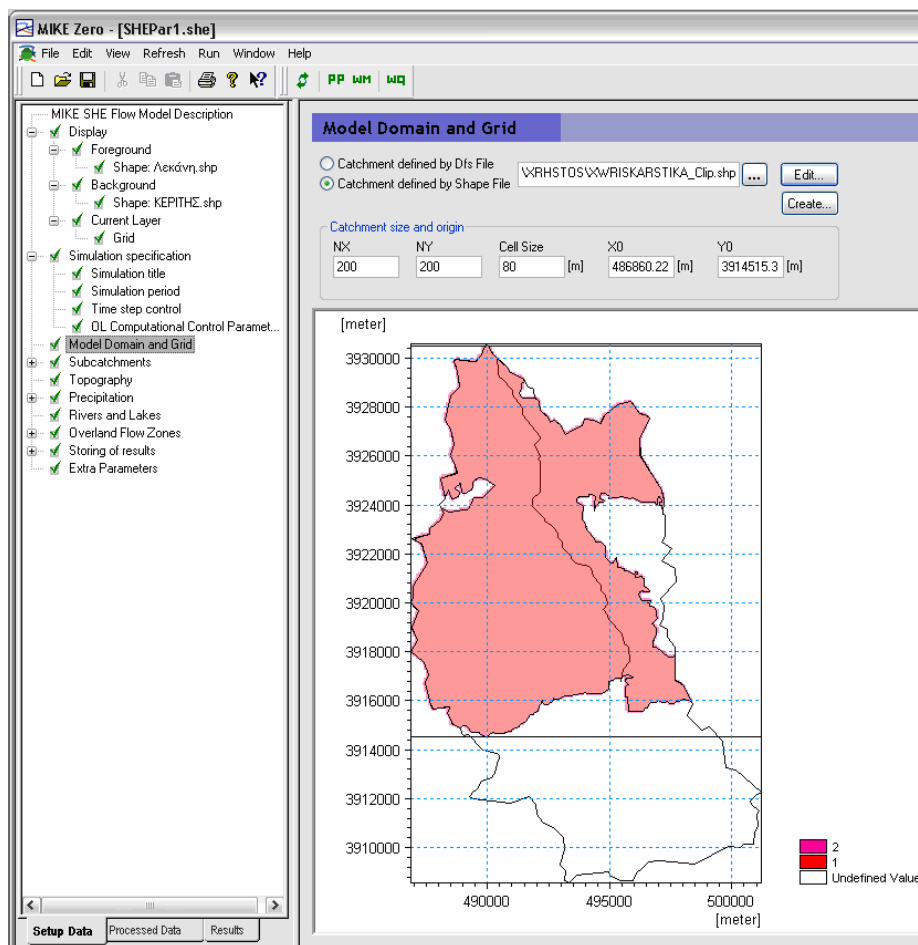
Εικόνα 4.4: Προδιαγραφές εξομοίωσης

Εικόνα 4.5: Χρονικό διάστημα προσομοίωσης

Εικόνα 4.6: Χρονικό βήμα προσομοίωσης

Γ) Περιοχή προσομοίωσης (*Model Domain*)

Το Model Domain, που στην περίπτωση μας καθορίζεται από την έγχρωμη περιοχή της εικόνας υποδηλώνει την επιφάνεια της λεκάνης απορροής του ποταμού του Κερίτη, όπου πραγματοποιείται η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής με το μοντέλο MIKE SHE (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Πεδίο και κάνναβος προσομοίωσης

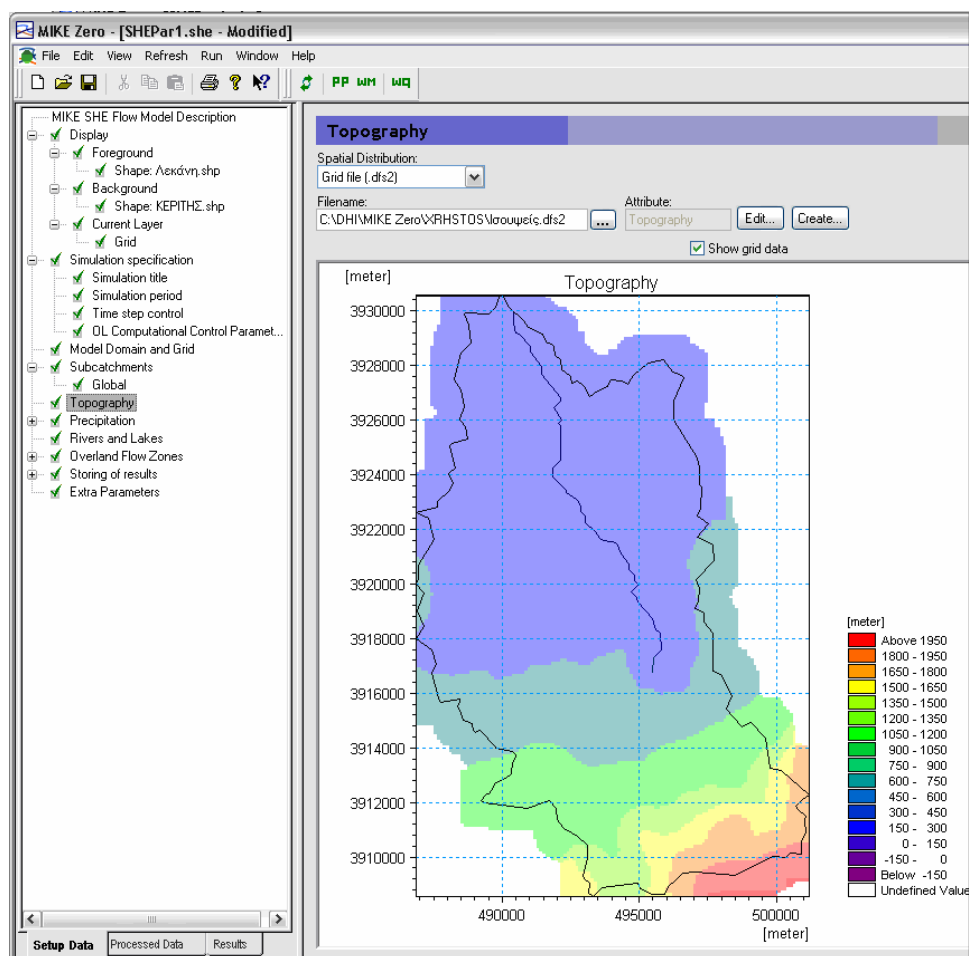
Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η περιοχή αυτή δεν αποτελεί το σύνολο της λεκάνης, αλλά αφαιρέθηκε από αυτήν η καρστική περιοχή. Στην καρστική περιοχή ορίζουμε την απουσία επιφανειακής απορροής καθώς όλος ο όγκος της βροχόπτωσης εισέρχεται στο καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο και εκφορτίζεται σημειακά στις 2 σημαντικότερες πηγές της περιοχής μελέτης (πηγές Αγίας και Μεσκλών). Η παροχή εκφόρτισης μέσω των δυο πηγών Αγίας και Μεσκλών υπολογίζεται με τη χρήση του καρστικού μοντέλου Mailet (βλ. παράγραφο 4.3).

Στην περιοχή προσομοίωσης ορίζεται επιπλέον το μέγεθος της κυψέλης του καννάβου προσομοίωσης. Όλες οι διεργασίες του ομοιώματος γίνονται στο επίπεδο τετραγωνικών κυψελών όμοιας διάστασης που καλύπτουν πλήρως το πεδίο προσομοίωσης. Η διάσταση της κυψέλης μπορεί να ποικίλλει και συνήθως κυμαίνεται από 10-100 m περίπου για λεπτομερείς προσομοιώσεις, στην περίπτωση μας ορίσαμε ως χωρική διακριτοποίηση του καννάβου προσομοίωσης τα 80 m. Το μέγεθος του καννάβου επηρεάζει την ταχύτητα της προσομοίωσης και αποτελεί έναν βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας της αναπαράστασης για την προσομοιωμένη έκταση και της ταχύτητας της εκτελούμενης προσομοίωσης (Παπαρρίζος, 2012). Η εισαγωγή της περιοχής προσομοίωσης έγινε με τη χρήση των αρχείων GIS.

Δ) Τοπογραφία (Topography)

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους θεωρείται κάθε «ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του αναγλύφου στο χώρο». Ο όρος DEM είναι πιο ειδικός και αναφέρεται μόνο στη ψηφιακή αναπαράσταση του αναγλύφου (Ζουμπούλογλου, 2006). Σε αντίθεση με τους ψηφιακούς χάρτες, στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους η πληροφορία του υψομέτρου αποθηκεύεται σε μορφή καννάβου (raster), δηλαδή ο χάρτης διαιρείται κανονικά σε ορθογώνια εικονοστοιχεία (pixels) όπου αποθηκεύεται η ανύψωση κάθε εικονοστοιχείου (Ζουμπούλογλου, 2006). Τα εικονοστοιχεία έχουν ορισμένο και προεπιλεγμένο βήμα (διάσταση) και η τιμή κάθε εικονοστοιχείου υπολογίζεται από τις τιμές των υψομέτρων των γειτονικών σημείων (Σταματάκος, 2010). Τα ψηφιακά μοντέλα

εδάφους απεικονίζουν συνεχή χωρικά φαινόμενα, με πιο συνηθισμένο παράδειγμα το ανάγλυφο. Σε αυτά τα μοντέλα, σε κάθε σημείο με συντεταγμένες x, y , αντιστοιχεί μια τιμή της μεταβλητής Z . Πράγματι το υψόμετρο μιας περιοχής έχει μια συνεχή κατά το χώρο μεταβολή αυτού του είδους (Ζουμπούλογλου, 2006). Η τοπογραφία αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεταβλητές του μοντέλου MIKE SHE. Στην επιλογή αυτή δίδεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ) του πεδίου προσομοίωσης το οποίο περιγράφει τα υψομετρία της περιοχής μελέτης. Το ΨΜΕ στο MIKE SHE είναι μορφής DEM. Ο ρόλος που παίζει η τοπογραφία έγκειται στον καθορισμό του άνω ορίου του μοντέλου και της επιφάνειας αποστράγγισης της χερσαίας ροής. Η τοπογραφική πληροφορία εισήχθηκε στο μοντέλο MIKE SHE ως αρχείο shapefile των ισοϋψών (20x20m), ακολούθησε η μετατροπή του αρχείου των ισοϋψών σε αρχείο κάνναβου, τύπου raster, όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε μια τιμή υψομέτρου (Εικόνα 4.8).

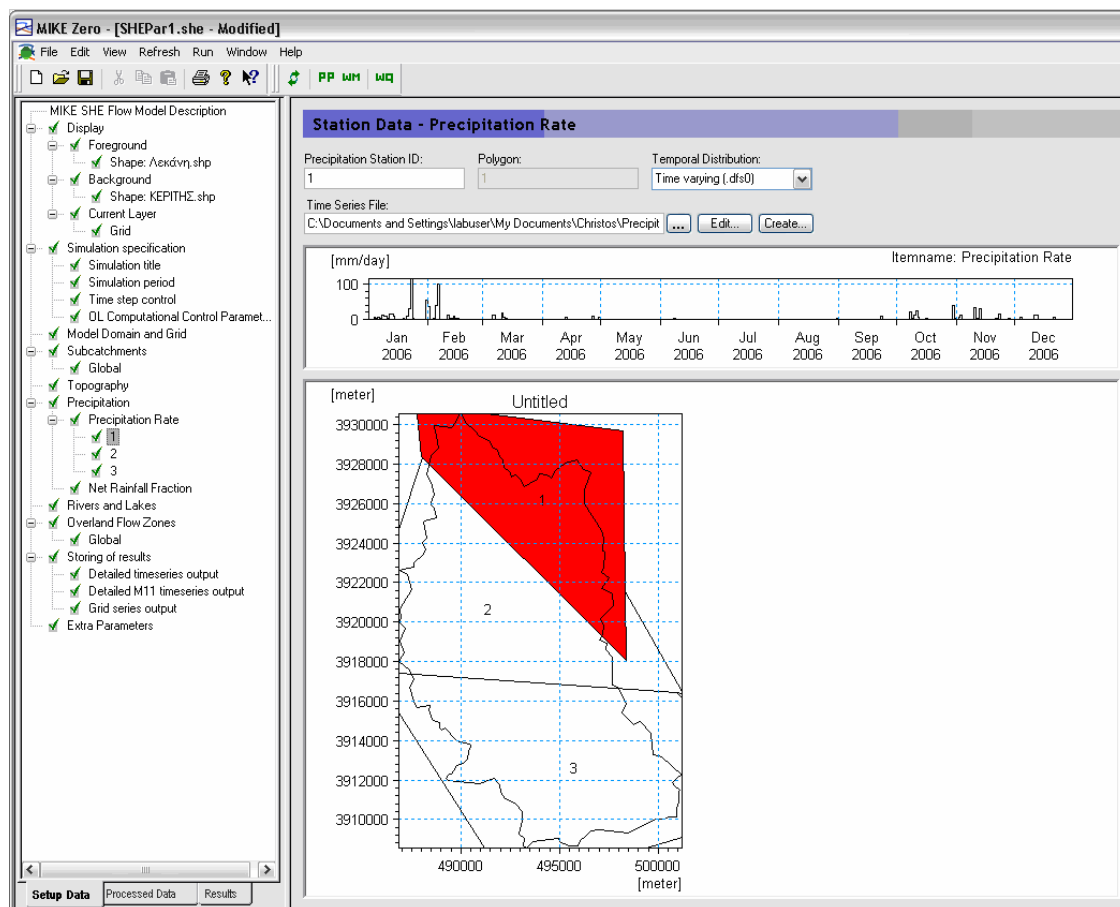


Εικόνα 4.8: Το Ψ.Μ.Ε. της λεκάνης απορροής του Κερίτη στο μοντέλο MIKE SHE

Ε) Βροχόπτωση (Precipitation)

Ο χωρικός προσδιορισμός της βροχόπτωσης έγινε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από τρεις βροχομετρικούς σταθμούς της Αγιάς, του Αλικιανού και του Ομαλού. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο των πολυγώνων Thiessen, η συνολική επιφάνεια της λεκάνης απορροής χωρίστηκε γεωμετρικά σε τρεις ζώνες επιρροής, μία για κάθε βροχομετρικό σταθμό, έτσι ώστε η έκταση των τριών αυτών ζωνών να μας δίνει το σύνολο της επιφάνειας. Οι ζώνες

επιρροής προσδιορίστηκαν έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του κάθε σταθμού να απέχει από τη θέση αυτού λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί άμεσα σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Προκύπτουν έτσι τα γνωστά πολύγωνα Thiessen (Εικόνα 4.9). Για την εισαγωγή της κάθε μιας από τις τρεις χρονοσειρές βροχόπτωσης που μας παρείχαν τα δεδομένα των σταθμών, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά αρχεία χρονοσειρών ρυθμού βροχόπτωσης (dfs0), τα οποία εισήχθησαν στο μοντέλο MIKE SHE. Στην εικόνα 4.9 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η ζώνη επιρροής του βροχομετρικού σταθμού της Αγιάς καθώς και το υετογράφημα (mm/day) που προέκυψε από τα δεδομένα εισόδου της βροχόπτωσης από το σταθμό της Αγιάς, για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (αρχείο χρονοσειράς ρυθμού βροχόπτωσης *.dfs0).



Εικόνα 4.9: Πολύγωνα Thiessen και δεδομένα εισόδου της βροχόπτωσης από το σταθμό της Αγιάς

Net Rainfall Fraction

Στην παρούσα εργασία επειδή δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο της προσομοίωσης (2006/01/01 έως 2006/12/31), χρησιμοποιήσαμε εναλλακτικά το συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης «Net Rainfall Fraction», που αντιπροσωπεύει το καθαρό κλάσμα της βροχόπτωσης που διατίθεται για τη διήθηση και την επιφανειακή απορροή. Ουσιαστικά ο συντελεστής «Net Rainfall Fraction» είναι ένα εναλλακτικός τρόπος καθορισμού των απωλειών λόγω εξατμισοδιαπνοής, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για αυτήν

(Mike She User Manual, 2007). Ενδεικτικές τιμές διακύμανσης του συγκεκριμένου συντελεστή στον Ελλαδικό χώρο, όπου έχουν υψηλές τιμές εξατμισοδιαπνοής, προσδιορίζονται μεταξύ των τιμών 0.15-0.4. Οι τιμές αυτές καθορίζουν ότι το 15-40% της βροχόπτωσης χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής. Στην παρούσα προσομοίωση ο συγκριμένος συντελεστής λόγω της αβεβαιότητας προσδιορισμού του επιλέχτηκε ο παράμετρος βαθμονόμησης του μοντέλου MIKE SHE.

Ζ) Ποτάμια και Λίμνες (River and Lakes)

Προκειμένου να προσδιορίσουμε η ροή εντός του ποταμού Κερίτη, χρησιμοποιήσαμε το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11. Η χρήση του MIKE 11 έγινε με την ενεργοποίηση της μηχανής προσομοίωσης «Rivers and Lakes».

Αναλυτικότερα για το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11:

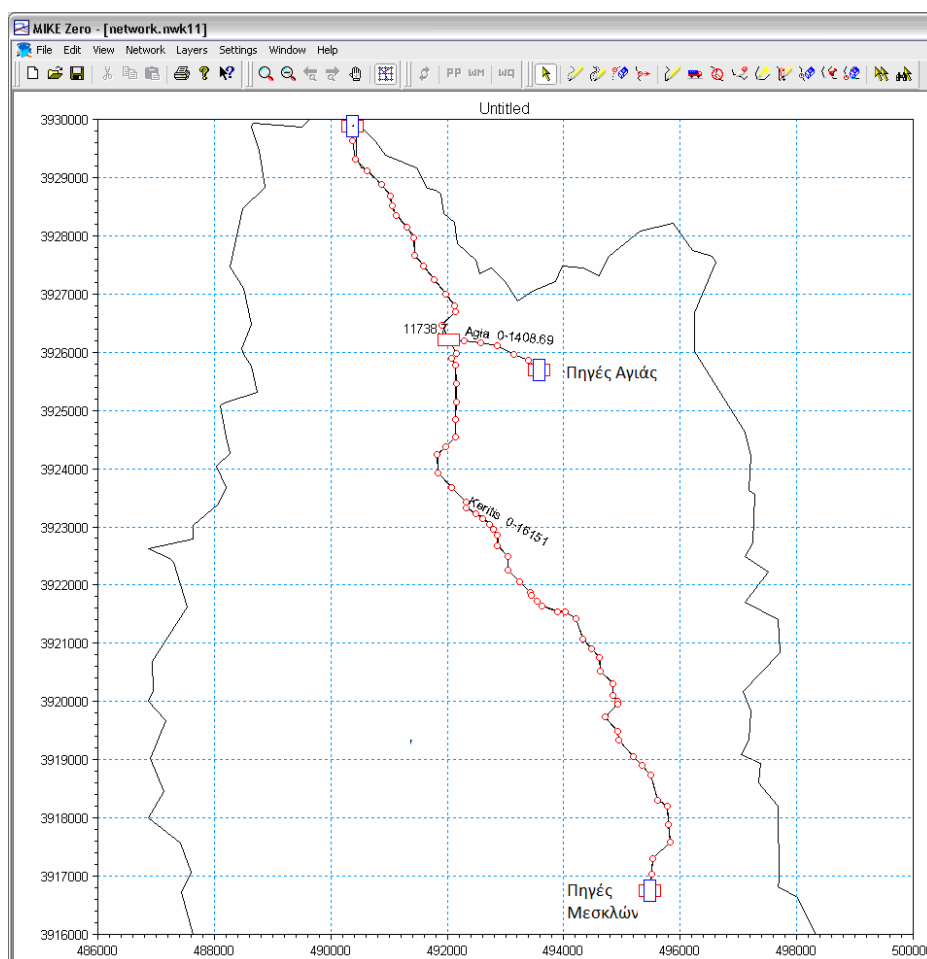
4.1.3 Υδραυλικό μοντέλο MIKE 11

Η δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου MIKE 11 προϋποθέτει τη δημιουργία και επεξεργασία τριών βασικών αρχείων: α) το σχεδιασμό του ποτάμιου συστήματος, β) την εισαγωγή των στοιχείων των διατομών, και γ) την εισαγωγή στοιχείων για τις οριακές συνθήκες.

α) Σχεδιασμός του Υδρογραφικού Δικτύου

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τη ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου και της σύνδεσης των κλάδων, τον καθορισμό των τεχνικών έργων (φραγμάτων, οχετοί κ.λπ.), τον ορισμό των σημείων εισροής- εκροής, των

σημείων που θα δοθούν οι διατομές και οι οριακές συνθήκες για το ποτάμι. (Mike 11 User Guide, 2007). Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν δύο κλάδοι ως τα τμήμα του υδραυλικού μοντέλου του ποταμού Κερίτη. Ο ένας κλάδος είναι ο κύριος ρους του ποταμού, με ονομασία “Keritis”, ο συγκεκριμένος κλάδος ξεκινά από τις πηγές των Μεσκλών (ανάντη σημείο) και καταλήγει στην εκβολή του ποταμού στη θάλασσα (κατάντη σημείο). Ο δεύτερος κλάδος είναι ο παραπόταμος που συνδέει τις πηγές της Αγιάς με τον κύριο ρου, του ποταμού Κερίτη, με την ονομασία “Agia” (Εικόνα 4.10).

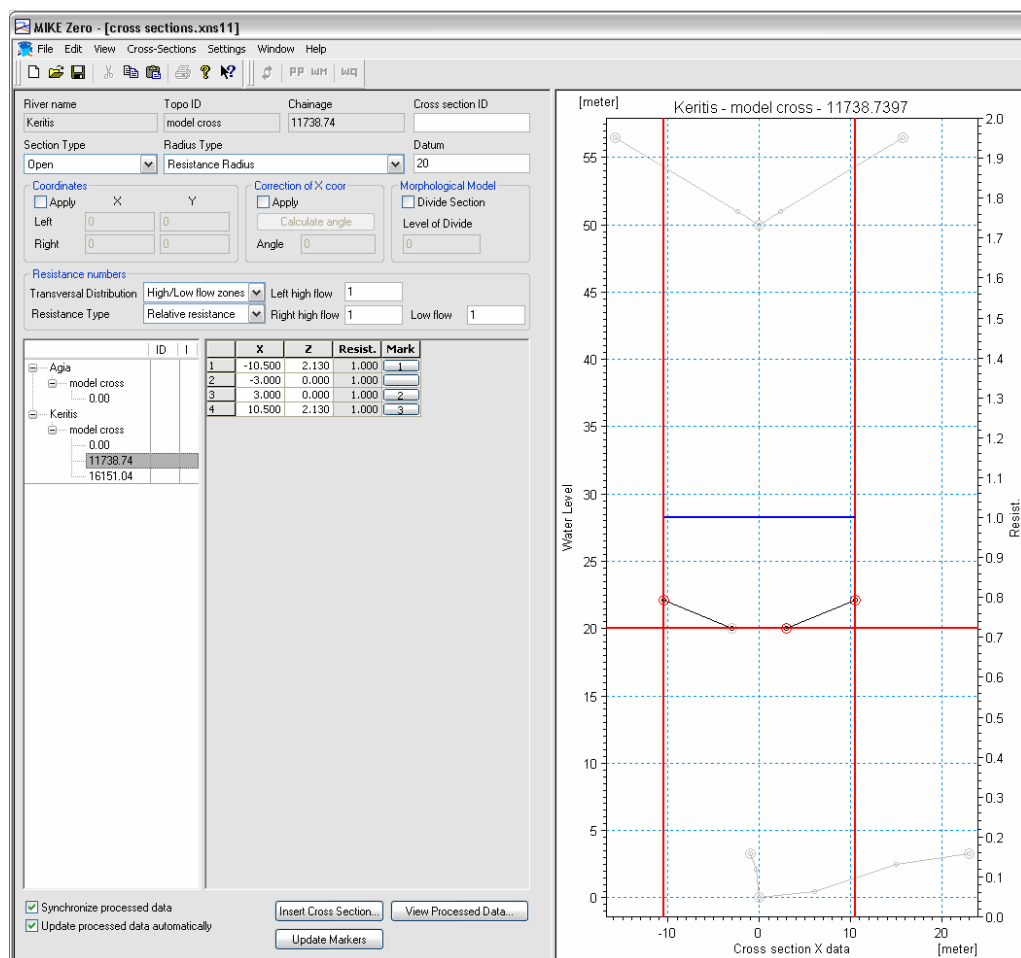


Εικόνα 4.10: Σχεδιασμός του ποταμού Κερίτη στο μοντέλο MIKE 11, πηγές Αγιάς και Μεσκλών

Οι δύο κλάδοι σχεδιάζονται και παρουσιάζονται ως μια αλυσίδα που αποτελείται από σημεία στα οποία έχουμε τη δυνατότητα να εισάγουμε τα δεδομένα από το πεδίο. Οι δυο κλάδοι “Keritis” και “Agia” σχεδιάστηκαν με βάση το ΨΜΕ της λεκάνης απορροής που χρησιμοποιείται από το MIKE SHE. Αυτό σημαίνει πως η μορφή, η θέση και η κλίση του κλάδου διαβεβαιώνουν την απόλυτη υδραυλική συμβατότητα μεταξύ MIKE SHE και MIKE 11.

β) Σχεδιασμός των διατομών

Λόγω της έλλειψης πολλών δεδομένων σχετικά με τη γεωμετρία του ποταμού Κερίτη, στην παρούσα εργασία για το προσδιορισμό της γεωμετρίας του ποταμού, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διατομές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Γρυλλάκης, 2006). Οι διατομές αυτές αντιστοιχούν στην αρχή και στο τέλος των κλάδων “Keritis” και “Agia”. Για το “σχεδιασμό” της κάθε διατομής σαν πρώτο βήμα επιλέγουμε το σημείο της αλυσίδας του υδρογραφικού δικτύου στο οποίο αντιστοιχεί και στη συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα (γεωμετρία) για τη κάθε διατομή. Υπάρχουν δύο είδη δεδομένων για τις διατομές του ποταμού. Τα αρχικά δεδομένα και τα δεδομένα που προέρχονται από τη διαδικασία της επεξεργασίας. Τα αρχικά δεδομένα περιγράφουν το σχήμα-γεωμετρία της διατομής και προέρχονται από μετρήσεις πεδίου. Τα δεδομένα της επεξεργασίας περιέχουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την υδραυλική του ποταμού όπως το υψόμετρο της διατομής, η υδραυλική ακτίνα και ο συντελεστής αντίστασης (Chalkidis, 2004). Στην Εικόνα 4.11, βλέπουμε χαρακτηριστικά τις διατομές του κλάδου “Keritis”.



Εικόνα 4.11: Η διατομή στο σημείο συνάντησης των δύο βρόγχων

γ) Οριακές συνθήκες

Για την ολοκληρωθεί το κτίσιμο του μοντέλου MIKE 11, απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών. (Chalkidis, 2004). Στην παρούσα εργασία οι οριακές συνθήκες που εισήχθησαν στο μοντέλο MIKE 11, αφορούσαν την ημερήσια εκφόρτιση από τις πηγές της Αγιάς και Μεσκλών στα ανάντη των δύο κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Η παροχή εκφόρτισης από τις πηγές των Μεσκλών και της Αγιάς, εισήχθησαν στο μοντέλο MIKE 11 ως αρχείο χρονοσειράς, για το χρονικό διάστημα της

προσομοίωσης (2006/01/01 έως 2006/12/31). Οι συγκεκριμένες παροχές εκφόρτισης προσδιορίστηκαν με τη χρήση του καρστικού μοντέλου Maillet. Γίνεται φανερό λοιπόν η σύνδεση των μοντέλων MIKE 11 και καρστικού μοντέλου Maillet μιας και τα αποτελέσματα του καρστικού μοντέλου Maillet χρησιμοποιήθηκαν σαν αρχείο εισόδου-οριακών συνθηκών στο μοντέλο MIKE 11. Θα πρέπει να επισημάνουμε εδώ ότι στις παροχές εκφόρτισης των δύο πηγών, που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες στο μοντέλο MIKE 11, αφαιρέθηκαν οι παροχές αντλήσεων που προέκυψαν από δεδομένα των φορέων ΔΕΥΑΧ, ΤΟΕΒ και ΟΑΔΥΚ.

4.1.4. Καρστικό Μοντέλο

Το εν λόγω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την ορθή μοντελοποίηση των εκφορτίσεων των πηγών κι επομένως για την πρόβλεψη των ελάχιστων παροχών των πηγών και την δυνατότητα που υπάρχει για τις «ορθολογικά» απολήψιμες ποσότητες νερού. Το συγκριμένο μοντέλο έχει βαθμονομηθεί σε προηγούμενες μελέτες τόσο για τις πηγές Αγιάς όσο και των Μεσκλών (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Πηγές Αγιάς

Με τη χρήση του καρστικού μοντέλου Maillet προσδιορίστηκε η κανονικοποιημένη επιφάνεια του καρστ που συνεισφέρει στις πηγές της Αγιάς στα 80 Km². Αν υποθέσουμε απώλειες της τάξεως του 5 με 10% λόγω μικρής βλάστησης στην περιοχή και έντονης καρστικοποίησης, τότε η πραγματική επιφάνεια συνεισφοράς του καρστ εκτιμάτε στα 90 Km². Χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες

αέρα από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, μπορούμε με το καρστικό μοντέλο Maillet να υπολογίσουμε τις εκφορτίσεις των πηγών. Οι παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για τις πηγές Αγιάς περιγράφονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 1: Παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για την προσομοίωση των πηγών της Αγιάς (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

	Μονάδες	Τιμή
Κανονικοποιημένη επιφάνεια του καρστ, A_k	Km^2	80
Λόγος των εισροών στον κατώτερο ταμιευτήρα, a_1		0.1
Σταθερά στείρευσης ανώτερου ταμιευτήρα, k_u	1/d	0.0017
Σταθερά στείρευσης κατώτερου ταμιευτήρα, k_l	1/d	0.0004
Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο, a_2		0

Πηγές Μεσκλών

Με τη χρήση του καρστικού μοντέλου Maillet προσδιορίστηκε ότι η κανονικοποιημένη επιφάνεια του καρστ που συνεισφέρει στις πηγές είναι της τάξεως των 50 Km^2 . Αν υποθέσουμε και πάλι απώλειες της τάξεως του 10 με 20%, τότε η πραγματική επιφάνεια συνεισφοράς του καρστ είναι περίπου $55\text{-}60 \text{ Km}^2$. Οι παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για τις πηγές των Μεσκλών περιγράφονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 2: Παράμετροι βαθμονόμησης του Καρστικού Μοντέλου για την προσομοίωση των πηγών των Μεσκλών (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

	Μονάδες	Τιμή
Κανονικοποιημένη επιφάνεια του Καρστ, $\varepsilon \cdot A_{\text{karst}}$	Km ²	50
Λόγος των εισροών στον ανώτερο ταμιευτήρα, a_1	-	0.9
Συντελεστής στείρευσης ανώτερου ταμιευτήρα, k_u	1/d	0.02
Συντελεστής στείρευσης κατώτερου ταμιευτήρα, k_l	1/d	0.0004
Λόγος της παροχής του ανώτερου ταμιευτήρα που εισρέει στον κατώτερο, a_2	-	0.05

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα

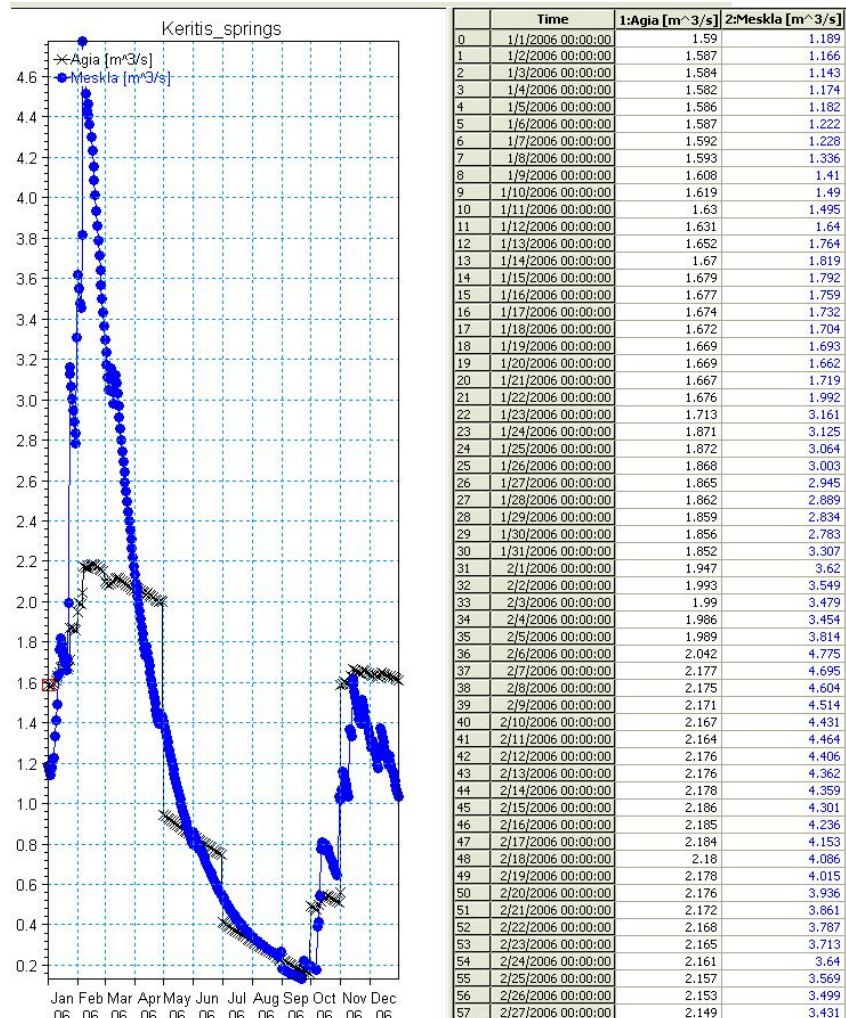
5.1 Καρστικό Μοντέλο

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του καρστικού μοντέλου για τον προσδιορισμό των παροχών εκφόρτισης στις δύο πηγές Αγίας και Μεσκλών, για την περίοδο προσομοίωσης 2006/01/01 έως 2006/12/31 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στις χρονοσειρές αυτές, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες στο μοντέλο MIKE 11, έχουν αφαιρεθεί οι παροχές αντλήσεων που προέκυψαν από δεδομένα των φορέων ΔΕΥΑΧ, ΤΟΕΒ και ΟΑΔΥΚ. Οι παροχές αντλήσεων για κάθε μήνα του έτους 2006 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 για κάθε μια από τις δύο πηγές. Η παροχή άντλησης από την πηγή των Μεσκλών θεωρήθηκε σταθερή για όλους του μήνες του έτους μιας και ο ΟΑΔΥΚ αντλεί 2.500.000 m³/γ με σταθερή φυσική ροή καθόλη τη διάρκεια του έτους.

Πίνακας 3: Παροχές αντλήσεων για κάθε μήνα του έτους 2006

Μήνες	Παροχή αντλήσεων Αγίας (m ³ /sec/day)	Παροχή αντλήσεων Μεσκλών (m ³ /sec/day)
Ιαν-06	0.29	0.079
Φεβ-06	0.27	0.079
Μαρ-06	0.31	0.079
Απρ-06	0.29	0.079
Μαϊ-06	1.35	0.079
Ιουν-06	1.35	0.079
Ιουλ-06	1.67	0.079

Αυγ-06	1.67	0.079
Σεπ-06	1.67	0.079
Οκτ-06	1.33	0.079
Νοε-06	0.31	0.079
Δεκ-06	0.31	0.079



Εικόνα 5.1: Παροχή εκφόρτισης από τις πηγές Αγιάς και Μεσκλών, αρχείο εισόδου στο μοντέλο MIKE 11

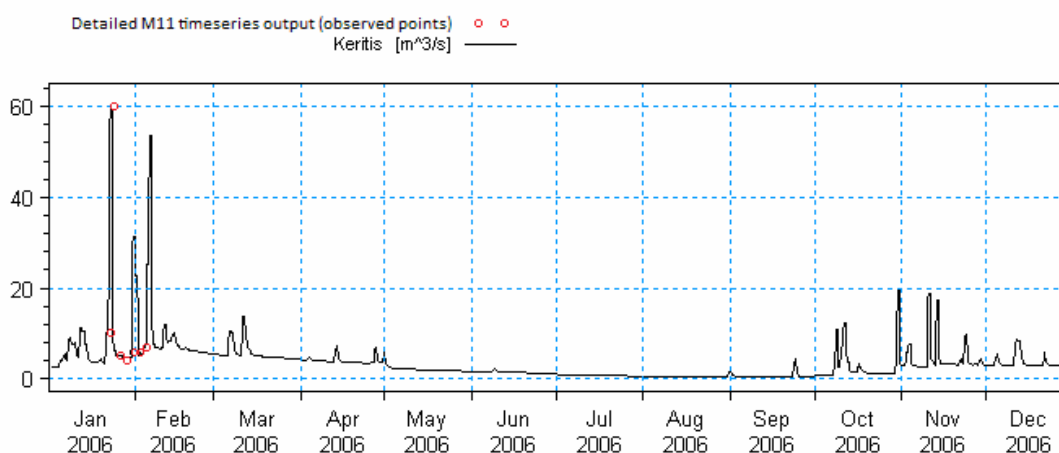
5.2 Μοντέλο MIKE SHE/MIKE11

Τα καταναμεημένα μοντέλα απαιτούν κατάλληλη βαθμονόμηση και επαλήθευση, πράγμα το οποίο έχει αναγνωριστεί και έχει τονιστεί από

τους χρήστες και τους προγραμματιστές των υδρολογικών μοντέλων. Συνήθως, οι υδρολογικές επιδόσεις των μοντέλων αξιολογούνται μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων τιμών εκφόρτισης-παροχής, με τις παρατηρούμενες τιμές. Σε αρκετές περιπτώσεις η εκφόρτιση-παροχή μετράτε στο σημείο εξόδου της συνολικής λεκάνης απορροής, λόγω των περιορισμένων πόρων όσον αφορά το πολύπλοκο εξοπλισμό μέτρησης, το χρόνο και το προσωπικό. Θεωρητικά, ένα τέλειο μοντέλο, δεχόμενο τις διεγέρσεις του πραγματικού συστήματος, οφείλει να παράγει παρόμοια απόκριση με αυτό. Στην πράξη βεβαίως, η προσομοιωμένη απόκριση ενός μοντέλου αποκλίνει πάντοτε από την απόκριση του πραγματικού συστήματος, καθώς εισάγεται πληθώρα σφαλμάτων και αβεβαιοτήτων στη μαθηματική δομή, τα δεδομένα και τις παραμέτρους του μοντέλου.

Για τη βαθμονόμηση της συγκεκριμένης προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κερίτη. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προήλθαν από βιβλιογραφικές πηγές (Γρυλλάκης, 2006) για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο του 2006. Η παράμετρος βαθμονόμησης για το μοντέλο MIKE SHE/MIKE11 όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, ήταν ο συντελεστής επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης «Net Rainfall Fraction». Οι τιμές διακύμανσης του συγκεκριμένου συντελεστή είναι μεταξύ 0 και 1. Στην περίπτωση και κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης δοκιμάστηκαν τιμές μεταξύ 0.15-0.4 ως πιο αντιπροσωπευτικές στις κλιματικές συνθήκες της Κρήτης. Σκοπός μας ήταν να επιλέξουμε εκείνη τη τιμή του συντελεστή «Net Rainfall Fraction», η οποία θα μας δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε σχέση με τις μετρήσεις παροχής στο κατάντη του ποταμού Κερίτη

(βιβλιογραφικά δεδομένα πεδίου). Έτσι προέκυψε ότι η τιμή 0.37 για το συντελεστή «Net Rainfall Fraction». Η συγκεκριμένη τιμή μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στο υδατογράφημα της Εικόνας 5.2. Στην συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται η ικανοποιητική συσχέτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτών των μετρήσεων.



R(Correlation)=0.861319

Εικόνα 7.2: Υδρογράφημα προσομοίωσης για το κατάντη τμήμα του ποταμού Κερίτη

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση το συντελεστή συσχέτισης “R”. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι ένα μέτρο της ακρίβειας ή του βαθμού στον οποίο συμφωνούν οι μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές. Ο συντελεστής R περιγράφεται από την Εξίσωση (5.1):

$$R = \sqrt{\frac{\sum_t (Calc_{i,t} - \overline{Obs}_{i,t})^2}{\sum_t (Obs_{i,t} - \overline{Obs}_{i,t})^2}} \quad (5.1)$$

Όπου

i = το σημείο της μέτρησης,

t = χρόνος,

$Calc$ = οι τιμές των παροχών όπως προκύπτουν από το ομοίωμα,

Obs = οι τιμές των παρατηρημένων παροχών, και

$\overline{Obs}$ = η μέση τιμή των παρατηρούμενων παροχών

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2 η τιμή του συντελεστή “R” είναι σχετικά κοντά στο 1 με τιμή 0.86 και αυτό σημαίνει πως οι παρατηρούμενες τιμές προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις τιμές του μοντέλου. Οι υψηλότερες τιμές της παροχής παρουσιάζονται τον Ιανουάριο – Φεβρουάριο και κυμαίνονται από περίπου 3 m³/s έως και τα 60 m³/s. Οι χαμηλότερες παροχές εμφανίζονται τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο όπου κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών η παροχή κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα της τάξεως του 0.5 m³/s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα - Προτάσεις

Με την εισαγωγή των κατάλληλων δεδομένων και τη χρήση του υδραυλικού μοντέλου ποταμού, MIKE 11, το MIKE SHE έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει σε αρκετά μεγάλο βαθμό την επιφανειακή απορροή εντός μιας λεκάνης απορροής και σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της ροής. Επομένως έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τις μεταβολές που προκαλεί στο υδατικό ισοζύγιο η ανθρώπινη παρέμβαση. Η δυνατότητά του αυτή το καθιστά κατάλληλο εργαλείο στη προσπάθεια για ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων μιας λεκάνης απορροής.

Συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε ως πολύ ικανοποιητική η συνδυασμένη χρήση των μοντέλων MIKE SHE/MIKE 11 και του καρστικού μοντέλου Mailet για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής της σύνθετης γεωμορφολογικά λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. Η βαθμονόμηση του συνδυασμένου μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση το συντελεστή συσχέτισης “R”, ο οποίος προσδιορίστηκε ίσος με 0.86.

Σε κάποια τμήματα του ποταμού η οικολογική ποιότητα ταυτίζεται με την ύπαρξη νερού και η έλλειψή του ισοδυναμεί με την οικολογική υποβάθμισή τους. Από τις τιμές του μοντέλου προκύπτει –όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη παράγραφο– ότι η παροχή στα κατάντη του ποταμού Κερίτη δε μηδενίζεται ποτέ αλλά τους μήνες Ιούλιο-

Αύγουστο-Σεπτέμβριο, η παροχή είναι πολύ χαμηλή. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να έχει απ' ευθείας κάποιο αντίκτυπο στο οικοσύστημα του ποταμού και στο προστατευόμενο από το δίκτυο NATURA, δέλτα του ποταμού. Είναι απαραίτητο να διατηρείται η χλωρίδα και η πανίδα του γι' αυτό θα πρέπει η παροχή του να μη μηδενίζεται κατά τους θερινούς μήνες από την υπεράντληση, παράλληλα όμως θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ύπαρξη νερού για τη κάλυψη των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση.

Μια δέσμη μακροπρόθεσμων έργων για την ύδρευση και άρδευση τα οποία θα εστίαζαν στην αύξηση του διαθέσιμου νερού αλλά και στη μείωση της κατανάλωσης, είναι:

Ύδρευση

- Καταγραφή της κατανάλωσης νερού, έτσι ώστε να είναι γνωστές τόσο οι πραγματικές ανάγκες σε κατανάλωση, να ανιχνεύονται έγκαιρα οι διαρροές του δικτύου και να αποφεύγονται οι απώλειες.
- Δημιουργία ενός δικτύου αγωγών που θα συνδέει τις κατοικημένες περιοχές οι οποίες υδροδοτούνται από τη λεκάνη απορροής του Κερίτη ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων.
- Εύρεση εναλλακτικών πηγών ύδρευσης για να μην εξαντληθούν τα αποθέματα του υδροφορέα και να διατηρείται μια οικολογική παροχή.
- Εφαρμογή μιας κατάλληλης τιμολογιακής πολιτικής που θα αποτρέπει την άσκοπη σπατάλη νερού.

- Συχνή ενημέρωση του κόσμου για την σημασία και τους τρόπους της εξοικονόμησης νερού.

Άρδευση

- Δημιουργία κλειστών δικτύων άρδευσης για να περιορίζονται οι απώλειες.
- Αλλαγή στη τιμολογιακή πολιτική με βάση την κατανάλωση και όχι με βάση την αρδευόμενη έκταση.
- Υπολογισμός των πραγματικών αναγκών άρδευσης και χρήση αυτόματου συστήματος ενημέρωσης των αγροτών. Σε άλλες χώρες αλλά και πιλοτικά σε περιοχές της Ελλάδας με προβλήματα επάρκειας νερού έχουν αναπτυχθεί συστήματα ειδοποίησης των αγροτών που ανάλογα με την υγρασία που καταγράφεται στο έδαφος προτείνουν ή όχι να γίνει άρδευση.
- Η ανακύκλωση νερού που προέρχεται από το βιολογικό καθαρισμό και τα επεξεργασμένα απόβλητα των ελαιοουργείων της λεκάνης, θα μπορούσε να καλύψει μεγάλες αρδευτικές ανάγκες με ελάχιστο κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Chalkidis, I., D. Papadimos, Ch. Mertzianis, (2004). Strymonas Basin Integrated Surface Water & Groundwater Model, Phase I, Input Data and Model Set up. Greek Biotope/Wetland Centre (EKBY). Thermi, Greece. 56 p.
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of European Communities, 22.12.2000 L 327/1. Brussels
3. Doulgeris, C., Pantazis, G., Papadimos, D., Papamichail, D., (2010). Ecosystem approach to water resources management using the MIKE 11 modeling system in the Strymonas River and Lake Kerkini.
4. Grigg, N. S., (1996). Water Resources Management, McGraw-Hill, New York.
5. Kourgialas, N.N., G.P. Karatzas, and N.P. Nikolaidis, 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin, *Journal of Hydrology* 381, 308-321.
6. Maillet E (1905) 'Essais d' hydraulique sonteraine et fluviaie', 218 pp. Herman, Paris.
7. Mike She User Manual, DHI, (2007). Volume 1&2 User Guide.

8. Mike 11 User Guide, DHI, (2007). A modelling system for Rivers and Channels.
9. Oogathoo, S., (2006). Runoff Simulation in the Canagagigue Creek Watershed Using the MIKE SHE Model, McGill University, Master of Science Thesis, Montreal, Canada
10. Stamati, F., Nikolaidis, N., Bozinakis, K., Papamastorakis, D., Kritsotakis, M., 2006. Stochastic Modeling of the Karstic System of western Apokoronas in Crete. In VIII International Conference Protection and restoration of the environment VIII, Chania Greece, 184-192.
11. Tzoraki, O. and N.P. Nikolaidis, 2007. A Generalized Framework for Modeling the Hydrologic and Biogeochemical Response of a Mediterranean Temporary River Basin. *Journal of Hydrology* 346, 112-121.

Ελληνική Βιβλιογραφία

12. Αθανασάκης, Μ., (2008). Διαχείριση του Υδατικού Συστήματος του βόρειου τμήματος του νομού Χανίων με χρήση Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, Ε.Μ.Π., Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα.
13. Αθανασάκης, Μ., (2006). Προσδιορισμός χρήσεων γης για την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κερίτη με τη χρήση τεχνολογιών GPS και δορυφορικών φωτογραφιών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Πτυχιακή Εργασία, Χανιά.

- 14.Βοζινάκης, Σ., (2007). Προσομοίωση Υπογείου Υδροφορέα του Κάμπου των Χανίων με τη Χρήση του Λογισμικού MODFLOW, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Πτυχιακή Εργασία, Χανιά.
- 15.Βοζινάκης, Κ., και Κουγιάννη Σ., 2004. Υδατικοί Πόροι Νομού Χανίων και Διαχείρισή τους. Χανιά.
- 16.Γρυλλάκης Ε., 2006 Μελέτη και Προσομοίωση της Επιφανειακής Απορροής της Υδρολογικής Λεκάνης του Ποταμού Κερίτη, με Χρήση Δεδομένων Πεδίου. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 17.Ζουμπούλογλου, Κ., (2006). Μορφομετρική Ανάλυση των Υδρολογικών Λεκανών των Ποταμών Κερίτη και Ταυρωνίτη με τη Χρήση των Γεωμετρικών Συστημάτων Πληροφοριών(GIS), Τ.Ε.Ι. Κρήτης-Παράρτημα Χανίων, Διπλωματική Εργασία, Χανιά.
- 18.Καραβίτης, Χ., (2005). Διαχείριση Περιβάλλοντος, Γ.Π.Α., Αθήνα.
- 19.Καρατζάς Γ., Κουργιαλάς Ν., 2011. «Γενικές Γνώσεις Εφαρμογής GIS», πανεπιστημιακές σημειώσεις στα πλαίσια του μεταπτυχιακού μαθήματος: Μοντέλα Ρύπανσης και Εξυγίανσης Υπογείων Υδάτων. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης.
- 20.Κασσωτάκη, Ε., (2011). Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού ολικών μέγιστων ημερήσιων φορτίων με τη χρήση στατιστικής υδρολογίας και σύνθετων υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης λεκάνης απορροής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Χανιά.
- 21.Κουργιαλάς Ν., 2010. «Ολοκληρωμένη διαχείριση - πρόβλεψη & αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων σε σύνθετες

- γεωμορφολογικά περιοχές με χρήση μαθηματικών μοντέλων και GIS», Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης.
- 22.Μιμίκου, Μ.Α., Φωτόπουλος, Φ.Σ., (2004). Σημειώσεις στο Μεταπτυχιακό Μάθημα Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Ε.Μ.Π., Αθήνα, <http://www.survey.ntua.gr/environ/6433/simeioseis.pdf>.
- 23.Νικολαΐδης, Ν.Π., Καρατζάς, Γ., (2010). Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κουλιάρη, Χανιά, Τεχνική Έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Χανιά.
- 24.Παπαρρίζος, Σ., (2012). Μελέτη του Χειμαρρικού Περιβάλλοντος του Ποταμού Σπερχειού, με το Ολοκληρωμένο, Υδρολογικό, Φυσικής Βάσης Μοντέλο MIKE-SHE και Χρήση GIS, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ορεστιάδα.
- 25.Σταματάκος, Δ.Β., (2010). Εφαρμογή του μοντέλου MIKE SHE σε περιόδους κλιματικής αλλαγής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Αθήνα.
- 26.Τσάιμος, Γ., (2009). Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη-Θερίσου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική Εργασία, Χανιά.

- 27.Τσιτσιλώνης, Σ.Κ., (2006). Ανάλυση Υδατικού Ισοζυγίου της Λεκάνης του Κερίτη με Σύγχρονη Μελέτη Επιφανειακών και Υπόγειων Απορροών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική Εργασία, Χανιά.

Internet

- 28.Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ (USGS), Ο Υδρολογικός Κύκλος,
<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>.
- 29.Popescu, I., (2002). Modelling Tools – MIKE 11,
<http://www.hydroeurope.org/jahia/webdav/site/hydroeurope/shared/Lecture%20Notes/Introduction%20to%20Mike%2011/Mike11%20equations.ppt>
30. <http://www.dhisoftware.com/Products/WaterResources/MIKE11.aspx>
- 31.<http://www.pedrocreek.org/watershed.html>