



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής στην ακόρεστη ζώνη με χρήση του μοντέλου MIKE SHE. Εφαρμογή πεδίου στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη»

ΤΣΟΛΚΑ ΕΛΕΝΗ

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Χανιά,

Ιούλιος 2012

*Στους γονείς μου,
Παναγιώτα & Βασίλη*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, στην ολοκλήρωση της.

Καταρχήν, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καρατζά για τη συνεργασία μας και την πολύτιμη καθοδήγηση του, καθώς και γι' αυτά που διδάχτηκα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου από αυτόν. Επίσης, τον καθηγητή κ. Νικολαΐδη και τον λέκτορα κ. Παρανυχιανάκη, που δέχτηκαν να είναι στην εξεταστική επιτροπή και να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Νεκτάριο Κουργιαλά από το εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, για τη βοήθεια στην συλλογή των απαραίτητων μετρήσεων, τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τη Χρύσα, την Αντιγόνη και τη Λαμπρινή για τις στιγμές απείρου κάλλους που έχουμε μοιραστεί και το Μιχάλη που με ωθεί κάθε μέρα για αλλαγές προς το καλύτερο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου, Παναγιώτα και Βασίλη, για την αγάπη, την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη για την ευρύτερη προσχωματική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE. Η περιοχή μελέτης είναι κατεξοχήν πεδινή και αποτελεί την πιο παραγωγική αγροτική περιοχή του Ν. Χανίων.

Η περίοδος της προσομοίωσης, με το υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE, καθορίστηκε στους 4 μήνες (Σεπτέμβριος -Δεκέμβριος 2011). Παράλληλα μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκαν σημειακές μετρήσεις εδαφικής υγρασίας σε δύο διαφορετικές περιοχές (Αλικιανός και Πλατανιάς) και για δύο διαφορετικά εδαφικά βάθη.

Μέσω του προγράμματος ArcGIS ψηφιοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούσαν την οριοθέτηση της λεκάνης απορροής, τον προσδιορισμό των σημείων δειγματοληψίας, τον καθορισμό των γεωλογικών και εδαφικών σχηματισμών, των χρήσεων γης, της τοπογραφία και του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μοντελοποίηση προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής Αλικιανού.

Η προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη πραγματοποιήθηκε μέσω του κατάλληλου αλγορίθμου επίλυσης της εξίσωσης Richards, αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-ύδατος (water retention curves) για την περιοχή μελέτης.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση μετρήσεις πεδίου (εδαφική υγρασία σε δύο διαφορετικά βάθη). Επίσης, προκειμένου να ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου στις αλλαγές των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας.

Στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται 1D και 2D γραφήματα της χωρικής μεταβολής της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με το εδαφικό βάθος και το χρόνο προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της παρούσας προσομοίωσης καταδεικνύουν την πολύ καλή συσχέτιση τους με αυτά των μετρήσεων πεδίου.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα μοντελοποίηση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διαχείρισης του υδατικού δυναμικού στην ακόρεστη ζώνη με στόχο τον υπολογισμό της διαθέσιμης ποσότητας νερού στο έδαφος. Επίσης η εργασία αυτή θα μπορούσε να συμβάλλει στον ορθολογικό προγραμματισμό των αρδεύσεων, βελτιστοποιώντας το επίπεδο της γεωργικής παραγωγής με ταυτόχρονη αποφυγή της κατασπατάλησης ύδατος.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the simulation of the subsurface flow in the unsaturated zone for the extended alluvial area of the Keritis River basin, using the hydrological model MIKE SHE. The study area is predominantly flat and is the most productive agricultural region of the Prefecture of Chania.

The simulation period was 4 months (September – December 2011). During the aforementioned time period field measurements of the soil moisture were performed at two different locations (Alikianos and Platanias) and for two different soil depths.

Using the program ArcGIS, data concerning the delineation of the basin, the determination of sampling points, geological formations, land use, topography and the depth of the aquifer were digitized. The meteorological data used in the present study were obtained from the meteorological station located in the area of Alikianos.

The simulation of the subsurface flow in the unsaturated zone was performed using a Richards equation solver, using the characteristic ground-water retention curves for the study area.

The model calibration was based on field measurements (soil moisture at two different depths). A sensitivity analysis was also performed in order to determine the behavior of the model to changes of major parameters, which affect the simulation results.

In the section of the results 1D and 2D graphics of the spatial variation of soil moisture in relation to soil depth and the simulation time are presented. The results of the present simulation showed a very good correlation with the field measurements.

Based on the above, this modeling could be used as a tool for managing the water flow in the unsaturated zone, with an objective to estimate the amount of available water in the soil. This study could also contribute to the rational planning of irrigation, optimizing the level of agricultural production with a water saving approach.

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Κατανομή του συνολικού υδατικού όγκου στον πλανήτη (Μυλόπουλος, 2001)

Πίνακας 4.1: Γενικά στοιχεία Ν. Χανίων (Βοζινάκης & Κουγιάννη, 2004)

Πίνακας 4.2: Δεδομένα βροχόπτωσης στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Ο.Α.ΔΥ.Κ., 1998)

Πίνακας 4.3: Στοιχεία πηγών Πλάτανου-Κολύμπας-Καλαμιώνα

Πίνακας 4.4: Στοιχεία πηγών Μεσκλών

Πίνακας 5.1: Φαινόμενη πυκνότητα σε σχέση με το βάθος της ακόρεστης ζώνης & βάθος στρωμάτων

Πίνακας 5.2: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των υδραυλικών παραμέτρων για διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες (Navin et al., 2010)

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου

Πίνακας 6.2: Μετρήσεις εδαφικής υγρασίας σε Αλικιανό και Πλατανιά

Πίνακας 6.3: Ανάλυση ευαισθησίας – Εύρος τιμών των παραμέτρων

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Κατάταξη υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χωρική τους κλίμακα Gupta et al., 2003)

Εικόνα 2.2: Διαδικασία βαθμονόμησης – παρατηρημένη και προσομοιωμένη χρονοσειρά (Ευστρατιάδης, 2008)

Εικόνα 3.1: Σχηματική παρουσίαση των διεργασιών προσομοίωσης μέσω του μοντέλου MIKE SHE (DHI, 2007)

Εικόνα 3.2: Μικροσκοπική άποψη της τομής ενός ακόρεστου μέσου (Nimmo, 2005)

Εικόνα 4.1: Κατανομή του νερού στις διάφορες χρήσεις για το έτος 1996 (Χατζηευαγγέλου, 2005)

Εικόνα 4.2: Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κερίτη

Εικόνα 4.3: Υψομετρικός χάρτης της λεκάνης του ποταμού Κερίτη

Εικόνα 4.4: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη

Εικόνα 5.1: Περιβάλλον εργασίας του MIKE SHE

Εικόνα 5.2: Χάρτης υποβάθρου

Εικόνα 5.3: Model Domain – περιοχή προσομοίωσης (προσχωματική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη) και τα σημεία δειγματοληψίας

Εικόνα 5.4: Προσδιορισμός των παραμέτρων της προσομοίωσης (διεργασίες, χρονικό βήμα και περίοδος προσομοίωσης)

Εικόνα 5.5: Υψομετρικός χάρτης μορφής (.dfs2)

Εικόνα 5.6: Διάγραμμα βροχόπτωσης

Εικόνα 5.7: Εξατμισιοδιαπνοή καλλιέργειας

Εικόνα 5.8: Απεικόνιση των χρήσεων γης στην περιοχή προσομοίωσης

Εικόνα 5.9: Χωρική κατανομή των εσπεριδοειδών στην περιοχή προσομοίωσης και προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας

Εικόνα 5.10: Εδαφικό προφίλ

Εικόνα 5.11: Τριγωνικό διάγραμμα σύστασης εδαφών με 12 κατηγορίες (Navin et al,2010)

Εικόνα 5.12: Παράμετροι της εξίσωσης Van Genuchten (καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής πίεσης)

Εικόνα 5.13: Παράμετροι της εξίσωσης Van Genuchten (καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής αγωγιμότητας)

Εικόνα 5.14: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-ύδατος για την περιοχή προσομοίωσης

Εικόνα 5.15: Βάθος υδροφόρου ορίζοντα

Εικόνα 6.1: Διαδικασία μέτρηση της εδαφικής υγρασίας

Εικόνα 6.2: Διαδικασία μέτρηση της εδαφικής υγρασίας & αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας, της αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας

Εικόνα 6.3: Εισαγωγή των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας στο MIKE SHE για να χρησιμοποιηθούν κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης

Εικόνα 6.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης, Πλατανιάς, βάθος=5cm

Εικόνα 6.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης, Αλικιανός, βάθος=5cm

Εικόνα 6.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης, Πλατανιάς, βάθος=20cm

Εικόνα 6.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης, Αλικιανός, βάθος=20cm

Εικόνα 6.8: Διάγραμμα Βροχόπτωσης - Διήθησης - Εδαφικής Εξάτμισης (Αλικιανός)

Εικόνα 6.9: Δισδιάστατη απεικόνιση της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη (Αλικιανός)

Εικόνα 6.10: Δισδιάστατη απεικόνιση της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη (Πλατανιάς)

Εικόνα 6.11: Εισαγωγή δεδομένων για την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων μοντελοποίησης

Εικόνα 6.12: Χαρακτηριστικά των παραμέτρων της ανάλυσης ευαισθησίας

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	4
1.2.1 Οι στόχοι της διαχείρισης υδατικών πόρων	5
1.3 ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΔΗΓΙΑ 2000/60/ΕΚ.....	7
1.3.1 Προβλήματα Εφαρμογής στην Ελλάδα.....	8
1.3.2 Προβλήματα Εφαρμογής στην Κρήτη	8
1.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ.....	9
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	10
2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	11
2.1.1 Διαχωρισμός με βάση τη χωρική κλίμακα.....	12
2.1.2 Διαχωρισμός με βάση τη χρονική διακριτότητα.....	14
2.1.3 Διαχωρισμός με βάση τη μαθηματική δομή.....	14
2.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	17
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	19
2.4 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ	20
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MIKE SHE	22
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	23
3.1.1 Πλεονεκτήματα του μοντέλου	25
3.2 Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ	26
3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ & ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΟΚΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE SHE	27
3.3.1 Εξατμισοδιαπνοή.....	27
3.3.2 Ροή στην ακόρεστη ζώνη	29

3.3.2.1 MIKE SHE & Μέθοδοι προσομοίωσης της ροής στην ακόρεστη ζώνη.....	31
3.3.3 Επεξεργασία των ιδιοτήτων της εδαφικής ακόρεστης ζώνης.....	36
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	40
4.1 ΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....	41
4.1.1 Το υδατικό δυναμικό του Ν. Χανίων	42
4.2 ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ.....	43
4.2.1 Βροχόπτωση - Θερμοκρασία - Εξατμισοδιαπνοή	46
4.3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	47
4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ (Π1)	52
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MIKE SHE	53
5.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	54
5.1.1 Διαχείριση Υδατικών Πόρων και ΓΣΠ	55
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MIKE SHE	56
5.2.1 Εμφάνιση βασικού χάρτη (Display)	57
5.2.2 Περιοχή προσομοίωσης (Model Domain) και σημεία δειγματοληψίας	58
5.2.3 Παράμετροι της προσομοίωσης.....	59
5.2.4 Τοπογραφία (Topography).....	60
5.2.5 Βροχόπτωση (Precipitation)	61
5.2.6 Χρήσεις γης (Land Use).....	64
5.2.7 Ροή στην ακόρεστη ζώνη (Unsaturated Flow)	67
5.2.8 Υδροφόρος ορίζοντας (Groundwater table)	72
6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	73
6.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ & ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	74
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	85
7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συντήρηση της ζωής στον πλανήτη και η ανάπτυξη των κάθε είδους ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (οικονομικών, κοινωνικών κλπ) απαιτούν την αδιάλειπτη ύπαρξη γλυκού νερού σε κατάλληλη ποιότητα και ικανή ποσότητα. Πριν από μερικά μόλις χρόνια το νερό στη συνείδηση όλων μας ήταν ένας φυσικός πόρος σε αφθονία που μπορούσε να χρησιμοποιείται σπάταλα, χωρίς καμία συνέπεια. Στην εποχή μας όμως η κατάσταση έχει αλλάξει. Εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης, της μεγάλης ανάπτυξης των τελευταίων ετών στο γεωργικό και βιομηχανικό τομέα και της αύξησης του πληθυσμού της γης, το νερό θεωρείται και είναι πλέον ένα αγαθό εν ανεπάρκεια και σοβαρά προβλήματα προκύπτουν από την κακή διαχείριση και την ανεπαρκή προστασία του. Είναι χαρακτηριστικό πως σήμερα, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, 1,1 δισ. άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό (Έκθεση της UNICEF και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, 2012). Βάσει λοιπόν των παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η ανάγκη εξασφάλισης νερού ικανοποιητικής ποιότητας παντού και για πάντα είναι επιτακτική.

Το σύνολο του νερού πάνω στη γη βρίσκεται σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας μεταξύ των τριών φάσεων του (υγρής, στερεάς και αέριας) και συγχρόνως σε μια κατάσταση διαρκούς κυκλοφορίας γνωστής ως **υδρολογικός κύκλος**. Το νερό που φτάνει στην επιφάνεια της γης εισέρχεται στο υπέδαφος λόγω βαρύτητας, εκεί που τα πετρώματα είναι υδροπερατά, οπότε και δημιουργεί υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Το μέρος εκείνο του νερού που δεν εισέρχεται στο υπέδαφος απορρέει επιφανειακά και δημιουργεί ποτάμια ή ρέματα (χείμαρρους), ή λιμνάζει στην επιφάνεια της γης. Τόσο τα υπόγεια όσο και τα επιφανειακά νερά είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα επιφανειακά νερά κατά τη διαδρομή τους μέσα από υδροπερατά πετρώματα τροφοδοτούν τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και αντίστροφα τα υπόγεια νερά έρχονται στην επιφάνεια μέσω των πηγών δημιουργώντας επιφανειακά ποτάμια συστήματα ή ρέματα. Σε σχέση με τους άλλους υπόγειους φυσικούς πόρους όπως είναι μεταλλεύματα, υδρογονάνθρακες κλπ τα υπόγεια νερά έχουν το πλεονέκτημα της ανανέωσης αλλά και το μειονέκτημα της ρύπανσης. Η ποσοστιαία κατανομή του συνολικού υδατικού όγκου στον πλανήτη φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1):

Πίνακας 1.1: Κατανομή του συνολικού υδατικού όγκου στον πλανήτη (Μυλόπουλος, 2001).

Αποθήκη Νερού	Όγκος (km ³)	Όγκος (%)
Υδρόσφαιρα	145×10^7	100
Θάλασσα	137×10^7	94
Υπόγειοι Υδροφορείς	6×10^7	4
Πολικοί & Μόνιμοι Πάγοι	24×10^6	2
Επιφανειακές Λίμνες	28×10^4	0.02
Ζώνη Ριζών	8×10^4	0.01
Ατμόσφαιρα	14×10^3	0.001
Ποταμοί	12×10^2	0.0001

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το αλμυρό νερό αποτελεί το 94% του νερού στη γη, το οποίο, όσο τουλάχιστον η αφαλάτωση παραμένει οικονομικά ασύμφορη λύση, δεν προσφέρεται για αξιοποίηση και εκμετάλλευση. Το υπόλοιπο 6% είναι γλυκό νερό, αλλά από αυτό, το 1/3 είναι στη μορφή χιονιού και πάγων και κατά συνέπεια, μη αξιοποιήσιμο. Από το ποσοστό που υπολείπεται, όλο το νερό, εκτός μιας μικρής ποσότητας, βρίσκεται στους υπόγειους υδροφορείς. Περίπου η μισή ποσότητα του υπόγειου νερού όμως, βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 800 μέτρων, γεγονός που σημαίνει ότι το νερό αυτό παραμένει πρακτικά αναξιοποίητο. Το νερό που τελικά μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών αποτελεί ένα ελάχιστο ποσοστό του συνολικού.

Το πρόβλημα της ποσοτικής ανεπάρκειας σε νερό εντείνεται καθώς αυξάνεται διαρκώς η κατανάλωσή του. Η αύξηση αυτή έχει δυο συνιστώσες: την αύξηση των αναγκών σε νερό στις αναπτυγμένες χώρες του κόσμου ως αποτέλεσμα της ανόδου του βιοτικού επιπέδου, της αλματώδους ανάπτυξης και της τεχνολογικής εξέλιξης, (αύξηση οικιακών χρήσεων, ραγδαία αύξηση των αρδευόμενων καλλιεργειών, επέκταση βιομηχανικών μονάδων) και τη συνολική αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη. Η ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών πόρων είναι επίσης συνδεδεμένη με την αύξηση του πληθυσμού της γης και την εντατικοποίηση της ανθρώπινης παραγωγικής δραστηριότητας.

Η ποιοτική αυτή υποβάθμιση ευθύνεται για πιθανά ανεπανόρθωτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εκτός αυτών, ευθύνεται και σε μεγάλο βαθμό για τη μείωση των υδατικών αποθεμάτων, καθώς μεγάλες ποσότητες νερού καθίστανται ακατάλληλες προς χρήση για πολλά χρόνια λόγω ρύπανσης ή μόλυνσής τους.

Το υδάτινο δυναμικό μιας χώρας αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την ανάπτυξή της και χρησιμοποιείται για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανικός και άλλους σκοπούς. Η ποιότητά του λοιπόν και η προστασία των αποθεμάτων του πρέπει να αποτελούν μόνιμο μέλημα. Σε πολλές χώρες, ενώ η συνολική ποσότητα νερού φαίνεται να είναι αρκετή, εμφανίζονται περιοχές με έντονα ελλείμματα νερού. Αυτό οφείλεται κυρίως στην άνιση κατανομή

του νερού στο χώρο και το χρόνο, αλλά και στην άνιση κατανομή της ζήτησης σε άνυδρες περιοχές κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου (π.χ. τουρισμός στις παράκτιες και νησιώτικες περιοχές κατά τους θερινούς μήνες). Επίσης, δεδομένου ότι τα υδάτινα ρεύματα δε γνωρίζουν σύνορα, συχνά τα σχετικά με τους υδάτινους πόρους προβλήματα έχουν διακρατικό χαρακτήρα.

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις πλουσιότερες σε νερό χώρες της Μεσογείου, εντούτοις η ανισομερής κατανομή του νερού και της ζήτησής του, καθώς και η έλλειψη σωστής διαχείρισης δημιουργούν πολλά προβλήματα σχετικά με την ποσότητα και την ποιότητά του. Οι πιο σημαντικές δραστηριότητες που απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού είναι κατά σειρά η γεωργία, ο τουρισμός, η οικιακή και βιομηχανική κατανάλωση. Ενδεικτικά, η γεωργία είναι ο σημαντικότερος καταναλωτής νερού στη χώρα μας με ποσοστό 84%. (Πηγή: FAO-AQUASTAT, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>)

1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Σύμφωνα με την παλαιά άποψη, η Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) αναφερόταν στην ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης που απέβλεπαν στη βέλτιστη διάθεση των υδατικών πόρων. Ως μια δυναμική διαδικασία σκοπό είχε την πληρέστερη δυνατή κάλυψη των παροντικών, αλλά και των μελλοντικών αναγκών, για όλες τις χρήσεις και η οποία στηριζόταν σε αντικειμενικά κριτήρια και διαδικασίες, μέσω ενός συνετού προγραμματισμού. (Τσακίρης, 1995).

Η σύγχρονη άποψη όμως είναι διαφορετική από αυτήν που υπήρχε πριν 15 χρόνια. Σήμερα η μεγαλύτερη έμφαση δεν δίνεται στην ποσότητα και στην επάρκεια της ποσότητας των υδατικών πόρων, αλλά στην ποιότητα αυτών. (Τσακίρης, 2006).

Σύμφωνα με τον σύγχρονο ορισμό, Διαχείριση Υδατικών Πόρων είναι το σύνολο των ενεργειών (μέτρα, έργα, κανονιστικές διατάξεις, συμφωνίες, κλπ) για την αρμονική σχέση μεταξύ Υδατικών Πόρων, Περιβάλλοντος και Κέντρων Κατανάλωσης, τόσο στο παρόν, όσο και στο μέλλον, με στόχο τη διατήρηση της ανάπτυξης..

Οι διαστάσεις της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) είναι:

1. Γεωμορφολογική,
2. Υδρολογική / Μετεωρολογική,
3. Κοινωνικό – Οικονομική,
4. Αναπτυξιακή, και
5. Περιβαλλοντική διάσταση.

Για την Ορθολογική Διαχείριση των Υδατικών Πόρων πρέπει να αποφεύγονται οι τομεακές λύσεις και οι μόνο-κριτηριακές προσεγγίσεις. Το κυριότερο σημείο στη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, σήμερα είναι το περιβάλλον με τους περιορισμούς και τις δυνατότητές του. Οι Αρχές που διέπουν τη ΔΥΠ είναι:

- ✓ Η ήπια εκμετάλλευση των Υδατικών Πόρων.
- ✓ Τα έργα να πραγματοποιούνται με βάση το ελάχιστο περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος.
- ✓ Η προστασία των Υδατικών Πόρων και του Περιβάλλοντος.
- ✓ Η συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων / θιγόμενων (επίτευξη της μέγιστης δυνατής συναίνεσης).

1.2.1 Οι στόχοι της διαχείρισης υδατικών πόρων

Οι στόχοι μιας πολιτικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω (Χατζηευαγγέλου, 2005):

- ❖ **Η εξασφάλιση ποσότητας νερού, ποιοτικά κατάλληλου, για την ικανοποίηση της ζήτησης.**

Η γνώση των φυσικών μηχανισμών της ανανέωσης των υδατικών αποθεμάτων στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου, η προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων υδατικών πόρων και η πρόγνωση της συμπεριφοράς τους για διάφορα πιθανά σενάρια μετεωρολογικών και υδρολογικών συνθηκών, οδηγεί στον προσδιορισμό του υπάρχοντος υδατικού δυναμικού και βοηθά στην αντικειμενική εκτίμηση των δυνατοτήτων του. Αποτέλεσμα αυτής της σύνθετης διαδικασίας είναι η καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού αλλά και η δυνατότητα αναζήτησης και εντοπισμού νέων πηγών νερού, προκειμένου να καλυφθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι σημερινές και όσο το δυνατόν, οι μελλοντικές ανάγκες σε νερό. Ο σχεδιασμός και η εκτέλεση έργων συλλογής και αποθήκευσης, αναρρύθμισης και διευθέτησης καθώς και μεταφοράς, διανομής και εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, αποτελεί το τελευταίο στάδιο αυτής της διαδικασίας αξιοποίησης και διευθέτησης της φυσικής προσφοράς του νερού σε σχέση με τη ζήτηση.

- ❖ **Η διευθέτηση της ζήτησης του νερού σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.**

Ο καθορισμός δηλαδή των αναγκών και δραστηριοτήτων που καταναλώνουν νερό, σύμφωνα με τις φυσικές δυνατότητες των υδατικών πόρων. Η καταγραφή των υπαρχουσών χρήσεων του νερού και η γνώση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού μπορεί να συμβάλει τα μέγιστα στη χάραξη μιας ορθολογικής πολιτικής διαχείρισης

υδατικών πόρων προσαρμόζοντας τις σχετικές επενδύσεις στις φυσικές δυνατότητες των υπό μελέτη περιοχών.

❖ **Η προστασία και διατήρηση της ποιότητας του νερού.**

Εκτός της προστασίας του περιβάλλοντος και τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας, η διατήρηση της ποιότητας του νερού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την κάλυψη της ζήτησης και την ικανοποίηση των αναγκών. Στη σύγχρονη νομοθεσία η ρύπανση του νερού λογίζεται ως μια ακόμη ανταγωνιστική χρήση, καθώς πρακτικά έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει τους υδατικούς πόρους και να εμποδίζει την περαιτέρω αξιοποίηση τους. Ο σχεδιασμός λοιπόν των έργων προστασίας ή και αποκατάστασης των υδατικών πόρων καθώς και η εκτίμηση των επιπτώσεων στα υδατικά συστήματα από την εκτέλεση και λειτουργία των υδραυλικών έργων ή και άλλου είδους τεχνικών έργων αποτελεί μείζονος σημασίας πεδίο της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων.

❖ **Η αντιμετώπιση των ανοιγμάτων σε προσφορά και ζήτηση.**

Για τον έγκαιρο εντοπισμό τους και την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους απαιτείται η εκπόνηση υδατικών ισοζυγίων και ισοζυγίων προσφοράς και ζήτησης νερού σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης ή και υδατικού διαμερίσματος.

❖ **Η εξομάλυνση των συγκρούσεων ανάμεσα στις ανταγωνιστικές χρήσεις.**

Οι δραστηριότητες που καταναλώνουν νερό είναι άμεσα ανταγωνιστικές μεταξύ τους, με την έννοια ότι η ικανοποίηση των αναγκών κάποιας από αυτές συνήθως αποκλείει τη δυνατότητα ικανοποίησης των αναγκών κάποιας άλλης, καθώς οι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι ποσοτικά. Συνεπώς, η διαχείριση των υδατικών πόρων ισοδυναμεί με μια διαδικασία αξιολόγησης αναγκών, ιεράρχησης προτεραιοτήτων και επίλυσης διαφορών, προκειμένου να ικανοποιούνται οι ανάγκες κατά τρόπο δίκαιο, ωφέλιμο και ορθολογικό. Πρέπει να σημειωθεί πως απ' όλες τις ανταγωνιστικές δραστηριότητες που καταναλώνουν νερό, αυτή που ικανοποιείται κατά προτεραιότητα είναι η ύδρευση. Η ικανοποίηση της ύδρευσης είναι νομικά κατοχυρωμένη έναντι των υπολοίπων χρήσεων νερού.

❖ **Η πρόληψη των απωλειών του νερού και η αξιοποίηση των πλεονασμάτων.**

Οι απώλειες των τεχνικών έργων και των υδραυλικών δικτύων αποτελούν συχνά περιοριστικό παράγοντα στην πλήρη εκμετάλλευση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, καθώς ανέρχονται σε υψηλά ποσοστά. Από την άλλη πλευρά συμβαίνει, εξαιτίας λανθασμένων υπολογισμών (π.χ. συντηρητική εκτίμηση αναγκών σε νερό) ή μεταβολών σε βασικούς παράγοντες σχεδιασμού, να υπάρχουν πλεονάσματα νερού τα οποία να μην αξιοποιούνται.

1.3 ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΔΗΓΙΑ 2000/60/ΕΚ

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων (2000/60/ΕC).

Οι ρυθμίσεις του ευρωπαϊκού δικαίου για τους υδατικούς πόρους αποτέλεσαν τις πρώτες ρυθμιστικές παρεμβάσεις στο πεδίο του ευρωπαϊκού δικαίου περιβάλλοντος. Οι πρώτες σχετικές οδηγίες θεσπίστηκαν ήδη στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Από τότε μέχρι σήμερα έχει εκδοθεί ένα πλήθος κοινοτικών οδηγιών για την προστασία των υδατικών πόρων.

Σήμερα το ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων καθορίζεται κυρίως από την Οδηγία 2000/60/ΕC στην οποία προτείνεται ένα μοντέλο διαχείρισης των υδατικών πόρων με στόχο τη διατήρηση και βελτίωση της κατάστασης των υδατικών συστημάτων και καθορίζεται το πλαίσιο για την ολοκληρωμένη διαχείρισή τους σε επίπεδο των λεκανών απορροής, με βάση την αειφορία. Παρέχει τη βάση για τη χάραξη και υλοποίηση από πλευράς των κρατών – μελών μιας βιώσιμης πολιτικής για τους υδατικούς πόρους, με στόχο τόσο την ικανοποίηση των αναγκών σε νερό διαχρονικά, όσο και την προστασία και διατήρηση των υδατικών οικοσυστημάτων μέσω της επίτευξης του στόχου για καλή κατάσταση τους έως το 2015. Η οδηγία 2000/60/ΕC ορίζει ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογής υπερβαίνοντας τον αποσπασματικό χαρακτήρα των προηγούμενων ρυθμίσεων, προχωρώντας σε μια ενιαία προσέγγιση του προβλήματος (Χατζηευαγγέλου, 2005).

Η βασική μονάδα της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων είναι η Λεκάνη Απορροής ποταμού. Αυτή ορίζεται σαν μια αυτόνομη εδαφική έκταση από την οποία συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής του νερού, και παροχετεύεται στη θάλασσα με ενιαίο στόμιο ποταμού (Οδηγία Πλαίσιο 60/2000 άρθρο 2, παρ. 13). Τα κράτη – μέλη θα πρέπει να ορίσουν τα υδατικά διαμερίσματα στο πλαίσιο της επικράτειάς τους, με βάση τις επιμέρους λεκάνες απορροής ποταμού και για κάθε λεκάνη απορροής θα πρέπει να καταρτισθεί ένα Σχέδιο Διαχείρισης. Με τα Σχέδια Διαχείρισης δίνεται η δυνατότητα για μια ολοκληρωμένη παρατήρηση, εξέταση και ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών, επιφανειακών και υπόγειων νερών. Επίσης, εξετάζεται η δυνατότητα ικανοποίησης των διαφόρων αναγκών σε νερό αλλά και η εξισορόπηση μεταξύ ανταγωνιστικών αναγκών θέτοντας προτεραιότητες και καταστρώνοντας κατάλληλα διαχειριστικά σενάρια ζήτησης. Επίσης, γίνεται συγχρονισμός των μέτρων προστασίας των υδάτων λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις ιδιαιτερότητες του υδατικού δυναμικού της κάθε λεκάνης απορροής (ποσοτική και ποιοτική κατάσταση), τα προβλήματα που εμφανίζει αλλά και τις ιδιαιτερότητες των αναγκών σε νερό.

Τέλος, ένα νέο στοιχείο που εισάγει η Οδηγία 2000/60 είναι η οικονομική θεώρηση στη διαχείριση των υδατικών πόρων και στη λήψη αποφάσεων υδατικής πολιτικής,

για το χαρακτηρισμό των λεκανών απορροής και για την επιλογή των καταλληλότερων μέτρων. Η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της Οδηγίας βασίζεται σε οικονομικές πολιτικές (η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει»), οικονομικά εργαλεία και τεχνικές (ανάλυση της οικονομικής αποδοτικότητας των μέτρων), καθώς και μέτρα (τιμολόγηση υπηρεσιών ύδατος). Η σημαντικότερη συνεισφορά της Οδηγίας είναι η δημιουργία ενός κοινού πλαισίου διαχείρισης που περιλαμβάνει πολιτικές και μέτρα όπως η τιμολόγηση των υπηρεσιών ύδατος με βάση την ανάκτηση του συνολικού κόστους. Τα μέτρα αυτά καθορίζονται σε επίπεδο λεκανών απορροής με στόχο να αποτυπώσουν τις συγκεκριμένες συνθήκες σε κάθε περιοχή αλλά και τους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν (Τσούτσος, 2002).

1.3.1 Προβλήματα Εφαρμογής στην Ελλάδα

Ωστόσο, η εφαρμογή της Οδηγίας στον Ελλαδικό χώρο είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Ορισμένες ιδιαιτερότητες που υπάρχουν στη χώρα μας είναι η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων, η άνιση κατανομή του πληθυσμού, η εποχιακή ζήτηση, η εκτεταμένη ακτογραμμή που υπάρχει στη χώρα μας, οι πολλές λεκάνες απορροής μικρού μεγέθους που θα πρέπει να τις εντάξουμε μέσα σε κάποια μεγαλύτερη λεκάνη απορροής, ο μεγάλος αριθμός περιοχών με προβλήματα έλλειψης νερού, η υπερεκμετάλλευση και υφαλμύρινση των υπόγειων υδροφορέων που παρουσιάζονται σε ορισμένες περιοχές, η γεωργία ως μεγάλος χρήστης νερού, η ανεπάρκεια που παρατηρείται στις διοικητικές και τεχνικές υποδομές, ο κατακερματισμός των αρμοδιοτήτων, οι οποίες αλληλεπικαλύπτονται, το ελλιπές και μη υλοποιημένο σε μεγάλο βαθμό θεσμικό πλαίσιο που ίσχυε έως σήμερα και η μικρή εμπειρία και ευαισθητοποίηση του κοινού στις συμμετοχικές διαδικασίες. Αυτά τα στοιχεία εμποδίζουν την εφαρμογή της Οδηγίας στα πλαίσια που αυτή απαιτεί και για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν σχέδια εναρμόνισής της στις ελληνικές συνθήκες.

1.3.2 Προβλήματα Εφαρμογής στην Κρήτη

Συγκεκριμένα η Κρήτη παρουσιάζει πολλές ιδιαιτερότητες και προβλήματα ως προς την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας. Παρόλο που ως υδατικό διαμέρισμα είναι πλεονασματική σε υδατικούς πόρους σε σύγκριση με τις ανάγκες της, πολλοί παράγοντες συντελούν όχι μόνο στη σημαντική μείωση της πραγματικής διαθέσιμης ποσότητας υδάτων αλλά και δυσχεραίνουν την αξιοποίησή τους. Συνοπτικά, ως σημαντικότεροι παράγοντες μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- Η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων γεωγραφικά, καθώς έχουμε διαφοροποίηση τόσο στο ύψος των βροχοπτώσεων από περιοχή σε περιοχή, όσο και στην κατανάλωση νερού.

- Η ανομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης ύδατος στο χρόνο, η οποία μάλιστα αυξάνεται την ξηρή περίοδο (αρδευτική περίοδος, διπλασιασμός ποσότητας ύδρευσης κατά την τουριστική περίοδο).
- Η γεωμορφολογία της Κρήτης, η οποία χαρακτηρίζεται από πολλά μικρά υδατορέματα – χειμάρρους και επιφανειακή απορροή μικρής διάρκειας.
- Η γεωλογική δομή της, που λόγω της ανθρακικής σύστασης των ορεινών όγκων, ευνοεί την κατείσδυση και αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού στους υπόγειους καρστικούς υδροφορείς.
- Η υφαλμύρινση αφενός των μεγάλων καρστικών πηγών της ανατολικής ακτής (Αλμυρός Ηρακλείου, Αλμυρός Αγίου Νικολάου, πηγές Μαλαύρας κλπ) από φυσικά αίτια και αφετέρου των παράκτιων υδροφορέων λόγω της εντατικής εκμετάλλευσης.
- Η υπερεκμετάλλευση των προσχωματικών λεκανών του νησιού με την συνακόλουθη πτώση της στάθμης των υπόγειων υδροφόρων.
- Η ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων από διάφορους ανθρωπογενείς παράγοντες (γεωργία, βιομηχανία κ.α.).

1.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

Το υδατικό ισοζύγιο της ακόρεστης εδαφικής ζώνης αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων. Η ακόρεστη ζώνη ως συνδετικός κρίκος μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων θεωρείται ως ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που καθορίζει τη διαθεσιμότητα των επιφανειακών υδάτων μέσω της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ εξατμισοδιαπνοής και βροχόπτωσης. Επίσης το πάχος, η σύσταση και οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στον ρυθμό επαναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων και του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Ακόμη, η γνώση των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-υγρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση της ροής στην ακόρεστη ζώνη ως παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη της βλάστησης και της αγροτικής παραγωγής.

Επίσης με την ακριβή κατανόηση των φυσικών διαδικασιών που επηρεάζουν τη ροή στην ακόρεστη ζώνη μπορούν να σχεδιαστούν καλύτερα συστήματα άρδευσης και στράγγισης ώστε να διατηρηθεί η υγρασία του εδάφους σε επιθυμητά επίπεδα για τη βέλτιστη γεωργική παραγωγή με γνώμονα πάντα την ορθή διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης, εκτιμούν τη δίαιτα της σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα εν λόγω μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1989).

Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών αναγκών αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των διεργασιών. Στην πρώτη περίπτωση, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, με σκοπό την εκτίμηση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης. Στην δεύτερη περίπτωση, προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας.

Ωστόσο, αν και η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών είναι λιγότερο συχνή, αυτή θεωρείται επιβεβλημένη όταν υπάρχουν συνδυασμένες χρήσεις νερού και σημαντική συνεισφορά του υπόγειου δυναμικού στην συνολική απορροή της λεκάνης. Για να είναι αποδοτική από πλευράς υπολογιστικού φόρτου, η συνδυασμένη προσομοίωση προϋποθέτει, αναγκαστικά, λιγότερο λεπτομερή περιγραφή του φυσικού συστήματος. Παρά ταύτα, παρέχει μια πιο ρεαλιστική εικόνα των υδρολογικών διεργασιών. Για παράδειγμα, η κατεύσδυση από τη βροχόπτωση, που αποτελεί την κύρια φόρτιση του υδροφορέα, υπολογίζεται από το ίδιο το μοντέλο και δεν ορίζεται, κατά αυθαίρετο τρόπο, από τον χρήστη. Επιπλέον, οι παράμετροι του μοντέλου που σχετίζονται με τις επιφανειακές και υπόγειες διεργασίες εκτιμώνται συνδυαστικά, αξιοποιώντας μετρήσεις που αναφέρονται τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια νερά.

Η μεθοδολογία για την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου συνήθως συμπεριλαμβάνει τα εξής βήματα (Bloschel & Sivapalan, 1995):

- Συλλογή και ανάλυση των δεδομένων
- Ανάπτυξη ενός αντιληπτικού μοντέλου με βάση τις γνώσεις και εμπειρία του ερευνητή, για την περιγραφή των σημαντικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, των υδρολογικών διεργασιών καθώς και τις συσχετίσεις των υδρολογικών μεταβλητών.

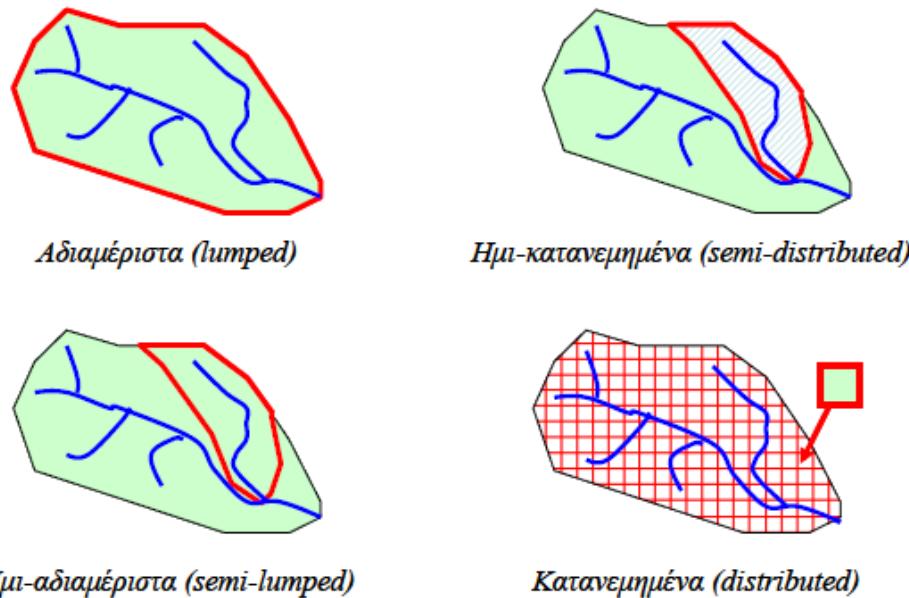
- Μετάφραση – Μετατροπή αντιληπτικού μοντέλου σε μαθηματικές σχέσεις και μοντελοποίηση των συσχετίσεων των υδρολογικών μεταβλητών.
- Καθορισμός των παραμέτρων μοντελοποίησης και επιλογή των σημαντικότερων με βάση το σκοπό μοντελοποίησης.
- Βαθμονόμηση των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου με τη χρήση τμήματος των ιστορικών δεδομένων.
- Επαλήθευση του μοντέλου με χρήση των υπόλοιπων ιστορικών δεδομένων.

Γενικά, η δομή των υδρολογικών μοντέλων είναι η εξής :

- Δεδομένα εισόδου: Συνήθως μετεωρολογικές μεταβλητές (βροχόπτωση, θερμοκρασία, εξάτμιση, άνεμος κτλ), υδρο-μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (ανάγλυφο, γεωλογία, χρήσεις γης κ.α.)
- Εξισώσεις του συστήματος: Το σύνολο των μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις υδρολογικές διεργασίες και εκτίμηση των παραμέτρων του υδρολογικού συστήματος.
- Έξοδος: Συνήθως είναι επιφανειακή απορροή, μπορεί επίσης να είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, η εδαφική υγρασία, η συσσώρευση χιονιού κ.α.

2.1.1 Διαχωρισμός με βάση τη χωρική κλίμακα

Τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις σημειακές διεργασίες (point processes) σε επιφανειακές, ολοκληρώνοντας τις υδρολογικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση), καθώς και τις παραμέτρους που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, σε κάποια πεπερασμένη χωρική κλίμακα. Η χωρική διακριτότητα αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων, με βάση την οποία προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες σχηματοποίησης και παραμετροποίησης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1 (Gupta et al., 2003):



Εικόνα 2.1: Κατάταξη υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χωρική τους κλίμακα (Gupta et al., 2003).

- Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική (lumped):

Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.

- Ημι-κατανεμημένη (semi-distributed):

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

- Ημι-αδιαμέριστη (semi-lumped):

Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες (Ajami et al., 2004).

- Κατανεμημένη (distributed):

Γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας (κύτταρα), που προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα. Σε κάθε

περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων).

2.1.2 Διαχωρισμός με βάση τη χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

Η μικρή χρονική κλίμακα επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης μετρητικής υποδομής στη λεκάνη, από καταγραφικά όργανα σε συνεχή χρόνο, όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους. Ακόμη, στις μικρές χρονικές κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα, ώστε να αποτυπώνουν τους πραγματικούς χρόνους υστέρησης.

2.1.3 Διαχωρισμός με βάση τη μαθηματική δομή

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται με βάση τη μαθηματική τους δομή, στις παρακάτω κατηγορίες (Ευστρατιάδης, 2006):

➤ Μοντέλα φυσικής βάσης

Τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based) είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή της ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες.

Επειδή η χωρική ανάλυση των μοντέλων αυτών είναι πυκνή, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών τους είναι εξαιρετικά μεγάλο. Θεωρητικά, τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους, οπότε είναι δυνατό να εκτιμηθούν με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, καθώς και από παρατηρήσεις πεδίου. Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα, αφού η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών προϋποθέτει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε όσο το δυνατό πιο λεπτομερή χωρική

κλίμακα (ειδικά όταν η μελέτη γίνεται για μικρές λεκάνες και σχετικά ξηρά κλίματα).

Είναι τα μοναδικά μοντέλα που δεν βασίζονται σε μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, για την προσαρμογή των παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται κατάλληλα για την εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες χωρίς μετρητικές υποδομές, κάτι που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των υδρολογικών επιστημών τα τελευταία έτη.

Συνήθως, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες έρευνες, όπως η εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλίμα, τη φυτοκάλυψη ή τις χρήσεις γης, ενώ συχνά συνδυάζονται με υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων στο νερό και το έδαφος, καθώς και μοντέλα μεταφοράς φερτών.

Η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την πρόβλεψη της απορροής μιας λεκάνης, όχι μόνο είναι υπολογιστικά ασύμφορη, αλλά και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προβλέψεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα (Grayson et al., 1992; Ye et al., 1997; Boyle et al., 2001).

➤ Εννοιολογικά μοντέλα

Τα εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Συγκεκριμένα, θεωρούν όγκους ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται χωρικά και χρονικά οι μεταβλητές κατάστασης και οι ροές του συστήματος, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα κλίμακας που εισάγουν τα μοντέλα φυσικής βάσης (Nash and Sutcliffe, 1970). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Τα εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές διακριτότητες και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας (10 έως 20 παραμέτρους για άνυδρες ή ημιάνυδρες λεκάνες, έως ελάχιστες παραμέτρους για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό). (Alley, 1984; Makhlouf and Michel, 1994; Ye et al., 1997; Xu and Singh, 1998).

➤ Στατιστικά - Στοχαστικά μοντέλα

Τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα, βασίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού.

Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεθόδους της επαγωγικής στατιστικής, και είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.

Τα στοχαστικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων, είναι πληρέστερα, καθώς λαμβάνουν υπόψη και τη χρονική αλληλεπίδραση ή αλλιώς στοχαστική δομή των φαινομένων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Οι παράμετροί των παραπάνω μοντέλων εξαρτώνται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων δειγμάτων, τα οποία και αναπαράγουν, και όχι από τα ίδια τα δείγματα. Σε απλές δομές μοντέλων, η εκτίμηση των παραμέτρων τους γίνεται αναλυτικά, ενώ σε πιο σύνθετες δομές χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσαρμογής αντίστοιχες των εννοιολογικών μοντέλων, με τη διαφορά ότι δεν επιδιώκεται η αναπαραγωγή της ίδιας της απόκρισης αλλά των στατιστικών χαρακτηριστικών της.

Σε αντίθεση με την καθαρά προσδιοριστική προσέγγιση που υιοθετούν τα μοντέλα φυσικής και εννοιολογικής βάσης, τα πιθανολογικά μοντέλα δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Αναπαράγοντας τα στατιστικά μεγέθη των παρατηρημένων δειγμάτων, όχι μόνο εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια, αλλά διατηρούν και μια στοιχειώδη, έστω, συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

➤ Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box)

Στα μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box), οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης.

Στην υδρολογία, ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα νευρωνικά δίκτυα, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους (Govindaraju and Rao, 2002). Η δομή (αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων) και οι παράμετροί τους δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο, και προκύπτουν μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής που βασίζεται στη χρήση γενετικών, συνήθως, αλγορίθμων και είναι γνωστή ως εκπαίδευση (training) του δικτύου. Στην πράξη, το νευρωνικό δίκτυο

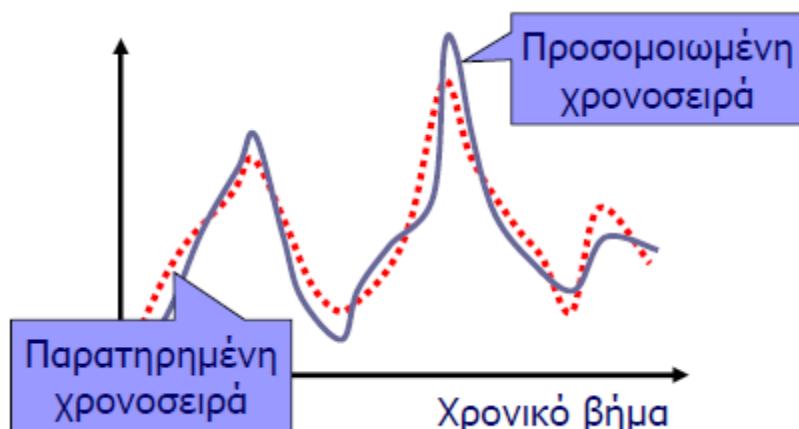
είναι ένας κρυφός υπολογιστικός κώδικας, στον οποίο δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης.

Άλλη κατηγορία μοντέλων μαύρου κουτιού είναι τα μοντέλα γενετικού προγραμματισμού, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και επίσης δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε προσεγγίζουν περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων (Ευστρατιάδης, 2008).

Η διάδοση των νευρωνικών δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και η συνηθέστερη εφαρμογή τους είναι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων (Zealand et al., 1999; Brath et al., 2002; Giustolisi and Laucelli, 2005). Ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων, και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών (Liou et al., 2002).

2.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Οι παράμετροι των υδρολογικών μοντέλων μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται βαθμονόμηση (calibration). Η βαθμονόμηση γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή (Εικόνα 2.2). Η βαθμονόμηση αναφέρεται σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα (Ευστρατιάδης, 2008).



Εικόνα 2.2: Διαδικασία βαθμονόμησης - παρατηρημένη και προσομοιωμένη χρονοσειρά (Ευστρατιάδης, 2008).

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία των εννοιολογικών μοντέλων εξαρτάται σε εξαιρετικά σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης. Αυτή χαρακτηρίζεται επιτυχής όταν ικανοποιεί τα ακόλουθα δύο κριτήρια: (α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, ή αλλιώς μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια, και (β) οι εκτιμημένες τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια.

Αν και τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων, το πρόβλημα εξακολουθεί να θεωρείται ένα από τα πλέον δύσκολα, καθώς όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, τόσο η εύρεση της θεωρητικά βέλτιστης λύσης καθίσταται ανέφικτη. Μάλιστα, στην περίπτωση σύνθετων μοντέλων, το πλήθος των δοκιμών αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης. Συνεπώς, αυτό που επιζητείται είναι η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό πλήθος δοκιμών.

Η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009):

➤ **Εμπειρική βαθμονόμηση**

Πρόκειται για μία αυστηρά συστηματική διαδικασία, που βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει ο μελετητής σύμφωνα με την κρίση και εμπειρία του. Η τελική επιλογή των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας «με το μάτι» την προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα. Αν και η εμπειρική μέθοδος είναι μη αντικειμενική (αφού η επιλογή δεν βασίζεται σε κάποιο αριθμητικό κριτήριο σφάλματος) και εξαιρετικά επίπονη (ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι σχετικά μεγάλος), εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα από ορισμένους υδρολόγους. Αυτό γίνεται με το σκεπτικό ότι η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

➤ **Αυτόματη βαθμονόμηση**

Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Το προφανές πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευκολία και η αντικειμενικότητά της, ενώ το κύριο μειονέκτημά της είναι η πλήρης εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα που μεταφέρονται από τα δεδομένα, τις υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές

αβεβαιότητας. Για τους παραπάνω λόγους, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα υδρολογικό μοντέλο, παρόλο που δείχνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις, στην πραγματικότητα μπορεί να λειτουργεί υπό μορφή «μαύρου κουτιού», με παραμέτρους που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράγει όλο το επιθυμητό φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης.

➤ Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, βάσει της οποίας ο μελετητής παρακολουθεί την πορεία της βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης, και θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων (Boyle et al., 2000; Mazi et al., 2004).

Ανεξάρτητα από τη στρατηγική που υιοθετείται, η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον:

- το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράξει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια, και
- στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα πρώτο βήμα για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, ώστε να εντοπιστούν οι παράμετροι που έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην προσομοίωση. Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η αξιολόγηση της απόκρισης του μοντέλου στις αλλαγές των παραμέτρων εισόδου, καθώς και η ποσοτικοποίηση της πιθανής αβεβαιότητας του βαθμονομημένου μοντέλου που προκύπτει από τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις παραμέτρους εισόδου και τις οριακές συνθήκες. Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των παραμέτρων που απαιτούν πιο ακριβείς μετρήσεις (Anderson and Woessner, 1992; Zheng and Bennett, 1995). Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται μεταβάλλοντας συστηματικά τις βαθμονομημένες παραμέτρους και προσδιορίζοντας το αποτέλεσμα που μπορεί να έχουν αυτές οι αλλαγές στα στοιχεία που παρατηρούμε στην έξοδο του μοντέλου.

Η ευαισθησία (S_s) μαθηματικά ορίζεται με τον συντελεστή ευαισθησίας S_s :

$$S_s = \frac{df}{dx} \quad (2.1)$$

Όπου το f αναπαριστά τη μεταβλητή εξόδου που μας ενδιαφέρει και το x αναπαριστά την παράμετρο εισόδου (McCuen, 1973).

Η τιμή του συντελεστή ευαισθησίας S_s έχει μονάδες που σχετίζονται με τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη τη σύγκριση της ευαισθησίας για διαφορετικές παραμέτρους εισόδου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση της σχετικής ευαισθησίας, S_r , που δίνεται από τη σχέση:

$$S_r = S\left(\frac{x}{f}\right) \quad (2.2)$$

Η σχετική ευαισθησία (S_r), η οποία είναι αδιάστατος αριθμός, δίνει την ποσοστιαία μεταβολή ανταποκρινόμενη σε κάθε αλλαγή των παραμέτρων εισόδου. Εάν η απόλυτη τιμή του συντελεστή (S_r) είναι μεγαλύτερη από 1, η απόλυτη τιμή της σχετικής μεταβολής στο αποτέλεσμα του μοντέλου θα είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της σχετικής μεταβολής της παραμέτρου εισόδου. Εάν η απόλυτη τιμή του συντελεστή (S_r) είναι μικρότερη από 1, η απόλυτη τιμή της σχετικής μεταβολής στην έξοδο του μοντέλου θα είναι μικρότερη από την απόλυτη τιμή της σχετικής αλλαγής στην είσοδο (Nofziger et al., 1994).

2.4 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

Γενικά, με τον όρο επαλήθευση (validation) νοείται μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν.

Παραδοσιακά, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρήσεις. Η προσέγγιση 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 του χρονικού ορίζοντα ελέγχου του μοντέλου (περίοδοι βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί). Διαφορετικά, οι παράμετροι πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, γεγονός που περιορίζει δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του μοντέλου.

Μια επιτυχής βαθμονόμηση δεν συνεπάγεται απαραίτητα επιτυχή επαλήθευση του μοντέλου. Πράγματι, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα κατά την περίοδο βαθμονόμησης, ενώ αντίθετα κατά την περίοδο επαλήθευσης η επίδοσή του είναι κατά πολύ χαμηλότερη (Giustolisi and Laucelli, 2005).

Ως μέτρο σφάλματος τόσο κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης όσο και κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης χρησιμοποιείται ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination), που είναι το τυπικό μέτρο καλής προσαρμογής υδρολογικών μοντέλων (Nash and Sutcliffe, 1970). Ο εν λόγω συντελεστής ορίζεται ως:

$$R = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

όπου x_i είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά, \bar{x} η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς, y_i η προσομοιωμένη χρονοσειρά και n ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου.

Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Τιμές μεταξύ του 0.80 - 0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές, ενώ τιμές της τάξης του 0.60 - 0.70 θεωρούνται οριακές για την αποδοχή ενός μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του φυσικού συστήματος. Σε περίπτωση αρνητικής τιμής η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση παρατηρημένη τιμή (Freer et al., 1996).

**3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
MIKE SHE**

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο κύκλος του νερού, γνωστός επίσης και ως υδρολογικός κύκλος περιγράφει την συνεχή κίνηση του νερού πάνω και κάτω από την επιφάνεια της γης. Κατά τον υδρολογικό κύκλο, το νερό εξατμίζεται από τους ακεανούς, τις λίμνες, τα ποτάμια, το χώμα και διαπνέεται από τα φυτά. Αυτοί οι υδρατμοί μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα και επιστρέφουν πίσω στη Γη με τη μορφή βροχής ή χιονιού. Έτσι, το νερό διεισδύει στα υπόγεια ύδατα και στη συνέχεια απορρέει σε ρέματα και ποτάμια ή επιστρέφει πίσω στους ακεανούς. Ο υδρολογικός κύκλος λοιπόν αποτελεί ένα κλειστό κύκλωμα και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις δεν απομακρύνουν το νερό, απλά επηρεάζουν την κίνηση και την μεταφορά του νερού μέσα στον υδρολογικό κύκλο.

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 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):

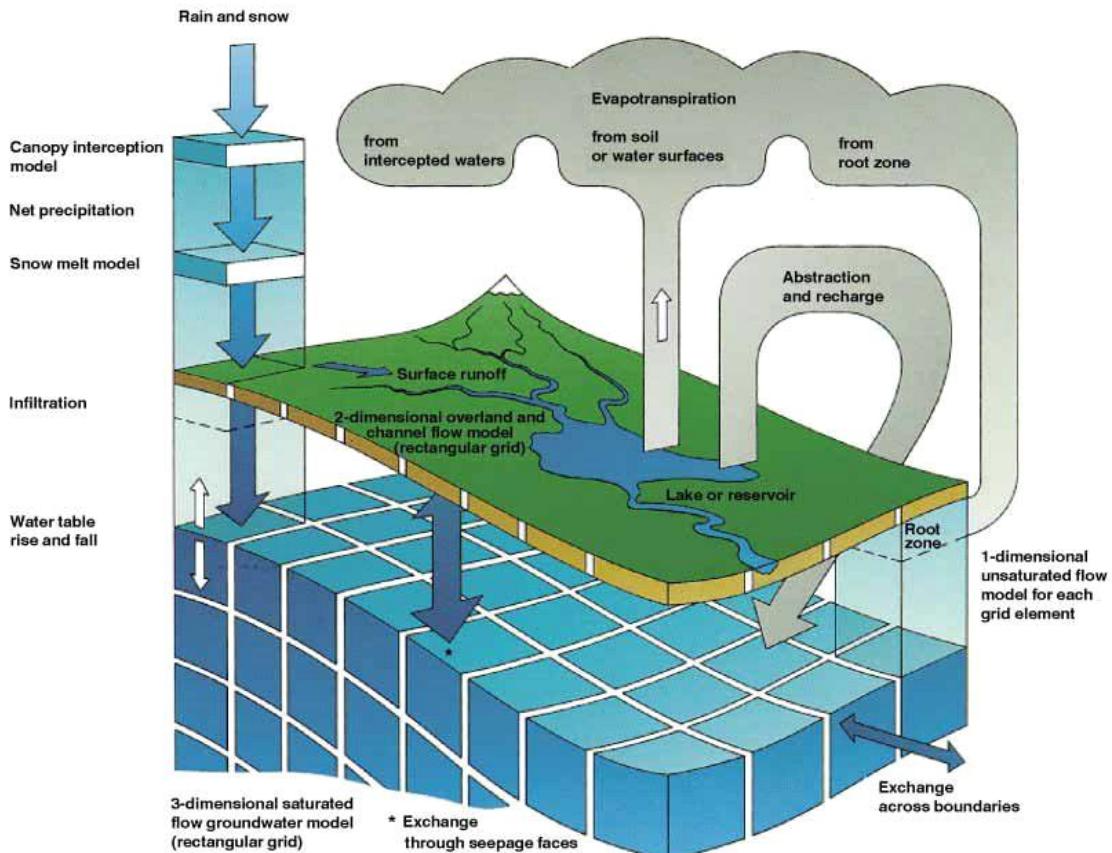
- Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων
- Προγραμματισμός και διαχείριση λεκανών απορροής
- Σχεδιασμός, διαχείριση και βελτιστοποίηση παροχής νερού
- Άρδευση και αποστράγγιση
- Επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων
- Συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- Διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων
- 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 μοντέλο αναπαριστά τις ακόλουθες διεργασίες:

- κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιονόπτωση)

- εξατμισοδιαπνοή
- επιφανειακή απορροή
- ροή σε υδατορεύματα / ανοιχτούς αγωγούς
- ακόρεστη ροή στο έδαφος
- κορεσμένη υπόγεια ροή

Η Εικόνα 3.1 δίνει μια σχηματική απεικόνιση των προαναφερθέντων υδρολογικών διεργασιών. Το MIKE SHE αποτελείται από διάφορα επιμέρους εργαλεία και υπομοντέλα προσομοίωσης όπως αυτό της επιφανειακής και υπόγειας ροής του νερού (WM), της μεταφοράς και διασποράς ρύπων(AD) για την ποιότητα του νερού, της διάβρωσης (SE) για τη μεταφορά των ιζημάτων, καθώς και πλήθος άλλων διεργασιών προσομοίωσης όπως γεωχημικές διεργασίες (GC), ανάπτυξη καλλιεργειών και προσομοίωσης του κύκλου αζώτου (CN), καθώς και της άρδευσης των καλλιεργειών (IR). Η προσομοίωση της κίνησης του νερού στο MIKE SHE έχει πολλές συνιστώσες, καθεμία από της οποίες περιγράφει μια συγκεκριμένη φυσική διαδικασία. Αυτές περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή ροή σε κανάλι (OC), την ακόρεστη ζώνη (UZ), την κορεσμένη ζώνη (SZ), και την δυναμική ανταλλαγή μεταξύ υδροφόρου ορίζοντα και ποταμιών συστημάτων.



Εικόνα 3.1: Σχηματική παρουσίαση των διεργασιών προσομοίωσης μέσω του μοντέλου MIKE SHE (DHI, 2007).

Το MIKE SHE στην αρχική διατύπωσή του μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα φυσικώς θεμελιωμένο, ντετερμινιστικό και πλήρως χωρικά κατανεμημένο μοντέλο. Αναπτύχθηκε ως μια πλήρως ολοκληρωμένη εναλλακτική λύση στα πιο παραδοσιακά εννοιολογικά μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής (Graham and Butts, 2005).

Η μορφή του μοντέλου και η επίλυση των καταστατικών εξισώσεων γίνεται σε επίπεδο ψηφίδας (cell), το οποίο επιτρέπει τη λειτουργία του μοντέλου ως πλήρως χωρικά κατανεμημένου. Το μοντέλο αυτό θεωρείται ως ένα –state of the art– μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου και χρησιμοποιείται πλέον συχνά και για τις ελληνικές συνθήκες για την υδρολογική προσομοίωση τόσο απλών όσο και σύνθετων υδρολογικών συστημάτων.

Για κάθε διεργασία, το MIKE SHE παρέχει εναλλακτικούς τρόπους μαθηματικής περιγραφής, που κυμαίνονται από απλές, συγκεντρωτικές προσεγγίσεις έως εξελιγμένες, κατανεμημένες προσεγγίσεις φυσικής βάσης. 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 (Graham and Butts, 2005). Τα δεδομένα του μοντέλου καθορίζονται σε μια ποικιλία από μορφές όπως γραμμικά αρχεία και αρχεία κανάβου. Την στιγμή που «τρέχει» το μοντέλο τα χωρικά δεδομένα συνδέονται με τον αριθμητικό κάναβο πράγμα που κάνει εύκολη την αλλαγή στην διακριτοποίηση του χώρου.

3.1.1 Πλεονεκτήματα του μοντέλου

Οι υδάτινοι πόροι σε ολόκληρο τον κόσμο βρίσκονται κάτω από αυξανόμενη πίεση λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης, κατάσταση η οποία επιδεινώνεται από την έλλειψη συντονισμένης διαχείρισης (UNESCO, 2003). Ωστόσο, επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, κατά την παράδοση, διαχειρίζονται σε ξεχωριστούς κλάδους. Αναγνωρίζεται, όμως, ότι πλέον τα προβλήματα των υδάτινων πόρων δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν μεμονωμένα. Η μετάβαση σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απαιτεί νέα και πιο εξελιγμένα εργαλεία. Τα παραδοσιακά υδρολογικά μοντέλα δεν έχουν σχεδιαστεί για να απαντούν σε ερωτήσεις που σχετίζονται με την συνδετική χρήση υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, με τις επιπτώσεις της ποιότητας νερού σε υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, με τις επιπτώσεις των αλλαγών από τις χρήσεις γης και την αστική ανάπτυξη και τέλος την διαχείριση των πλημμυρικών περιοχών και των υγροτόπων. Απαιτούνται, λοιπόν, μοντέλα που να περιγράφουν ολοκληρωμένα τη συμπεριφορά της λεκάνης απορροής, συμπεριλαμβάνοντας την κίνηση των ιζημάτων, των χημικών ουσιών και των θρεπτικών συστατικών διαμέσου του

νερού, καθώς επίσης και τον ρόλο τους στο περιβάλλον και την οικολογία της λεκάνης απορροής.

Επίσης, η αυξανόμενη ζήτηση για υδάτινους πόρους απαιτεί την κατανόηση και την περιγραφή των βασικών υδρολογικών διεργασιών. Επιπρόσθετα, η εγγενής ετερογένεια των φυσικών συστημάτων καθιστά δύσκολη την ακριβή αναπαράσταση αυτών των διεργασιών (Grayson, 2000).

Το μοντέλο MIKE SHE δύναται να διαχειριστεί ζητήματα υδάτινων πόρων με ολοκληρωμένο τρόπο σε ένα μεγάλο εύρος χωρικής και χρονικής κλίμακας. Περιλαμβάνει μια σειρά εργαλείων επεξεργασίας, καθώς και έναν ευέλικτο συνδυασμό τόσο απλών όσο και προηγμένων τεχνικών επίλυσης για κάθε υδρολογική διεργασία. Τα δεδομένα ορίζονται σε διάφορες μορφές κατά το «χτίσιμο» του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων των εγγενών μορφών των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφόρησης (GIS). Κατά το «τρέξιμο» του μοντέλου, τα χωρικά δεδομένα χαρτογραφούνται πάνω στο αριθμητικό πλέγμα, γεγονός που καθιστά εύκολη την αλλαγή της χωρικής διακριτοποίησης.

Συγκεκριμένα, το MIKE SHE έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει το σύνολο της ροής των υδατορευμάτων συμπεριλαμβανομένου της άμεσης και της βασικής απορροής. Το μοντέλο εξετάζει επίσης τις διαφορετικές χρήσεις γης και τον τύπο των εδαφών στην προσομοίωση, επιτρέποντας την αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης. Εκτός αυτού, το MIKE SHE λαμβάνει υπ' όψιν υδρολογικά, μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία σε συνδυασμό με γεωλογικά και εδαφολογικά στοιχεία. Όλα αυτά αποτελούν ένα σημαντικό υπόβαθρο για τη σωστή προσομοίωση όλων των φυσικών διαδικασιών. Συνολικά, το μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου αρκετά καλά σε ετήσια, εποχική, μηνιαία και ημερήσια χρονική βάση (DHI, 2007).

3.2 Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ ΓΙΑ ΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη μοντελοποίηση της ροής στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί τη διεπιφάνεια μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Το μοντέλο ακόρεστης ροής του MIKE SHE είναι ένα μοντέλο εδαφικού προφίλ, που αλληλεπιδρά τόσο με την επιφανειακή όσο και με την υπόγεια ροή (αφού η στάθμη του υδροφορέα αποτελεί την κατώτατη οριακή συνθήκη της ακόρεστης ζώνης).

Η ακόρεστη ζώνη παίζει κρίσιμο ρόλο στις υδρολογικές μελέτες, καθώς ως ένα μέσο αποθήκευσης, το νερό που βρίσκεται σε αυτήν είναι άμεσα διαθέσιμο στην

βιόσφαιρα. Αν και ο όγκος νερού που αποθηκεύεται δεν είναι πολύ μεγάλος, η ακόρεστη ζώνη ενεργεί ως δίαυλος για τη ροή του νερού. Η δυναμική του υδροφόρου ορίζοντα εξαρτάται από τις διεργασίες της ροής και της αποθήκευσης στην ακόρεστη ζώνη. Ως ουδέτερη ζώνη μεταξύ της επιφάνειας της γης και του υπόγειου υδροφορέα, η ακόρεστη ζώνη καθορίζει τη μεταφορά των ρυπαντών και την επαναφόρτιση του υδροφορέα. Επιστημονικά, η ακόρεστη ζώνη είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και πρέπει να μελετάται στα πλαίσια μιας διεπιστημονικής προσέγγισης. Υπάρχει πολύ μεγάλη παραλακτικότητα και ποικιλία μεταξύ της δομής και της φυσικής σύστασης της ακόρεστης ζώνης η οποία δύναται να αποτελείται από εδάφη, πετρώματα, νερό, αέρα, φυτά και μικροοργανισμούς (Nimmo, 2005).

Η κατανόηση της κίνησης του νερού μέσα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους έχει λοιπόν, μεγάλη σημασία για την εκτίμηση της μεταφοράς των ρύπων, τη διαχείριση των γεωργικών εκτάσεων, και την προστασία των φυσικών πόρων. Προαπαιτούμενο για τη ορθή διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων είναι η σε βάθος γνώση της διεργασίας διήθησης του νερού μέσα στο έδαφος σε χωροχρονική βάση.

Αντικειμενικός σκοπός της άρδευσης είναι ο εφοδιασμός των καλλιεργειών με το απαραίτητο νερό για την κανονική ανάπτυξη και βέλτιστη απόδοσή τους, σε συνδυασμό με την υψηλή ποιότητα των παραγομένων προϊόντων. Μέσω της αποτελεσματικής προσομοίωσης της ροής στην ακόρεστη ζώνη, η ποσοτική εκτίμηση του νερού που εν τέλει είναι διαθέσιμο στο φυτό μπορεί να γίνει γνωστή, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για την σωστή εφαρμογή και τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, όπως επίσης και για τη μελέτη και σχεδιασμό των αρδευτικών δικτύων.

3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ & ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE SHE

Στη συνέχεια περιγράφονται μαθηματικά οι σημαντικότερες υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακόρεστη ζώνη στα πλαίσια του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE:

3.3.1 Εξατμισοδιαπνοή

Μία καλλιεργούμενη έκταση χάνει νερό με τη διαδικασία της διαπνοής από τα φυτά και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Ακόμη, μετά από βροχή ή άρδευση με καταιονισμό, το νερό που συγκρατείται από το υπέργειο μέρος των φυτών εξατμίζεται προς την ατμόσφαιρα. Αθροιστικά, το νερό που χάνεται από μία αγροτική έκταση μέσω της διαπνοής από τα φυτά, εξάτμισης από το έδαφος και εξάτμισης από το φύλλωμα, όταν αυτό είναι υγρό, αναφέρεται ως εξατμισοδιαπνοή

ET και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των φυτών και του εδάφους, τη διαθέσιμη ενέργεια και τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα.

Η εξάτμιση του νερού απαιτεί μεγάλες σχετικά ποσότητες ενέργειας. Η εξατμισοδιαπνοή, ET, είναι μια διαδικασία που κυριαρχείται από την ανταλλαγή ενέργειας στη φυτική επιφάνεια και έχει σαν περιοριστικό παράγοντα την ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας. Εξ αιτίας αυτού του περιορισμού, είναι δυνατό να προγνωστεί η ένταση της ET από το καθαρό ισοζύγιο των ροών ενέργειας στο σύστημα που αποκαλούμε καλλιέργεια.

Οι κύριοι ενεργειακοί παράγοντες που προμηθεύουν (ή αφαιρούν) ενέργεια από τη φυτική επιφάνεια είναι η καθαρή ακτινοβολία που προέρχεται από την ατμόσφαιρα, Rn, η αισθητή θερμότητα στην ατμοσφαιρική στρώση που βρίσκεται σε επαφή και πάνω από τη φυτική επιφάνεια (οριακή στιβάδα), H, και η αισθητή θερμότητα του εδάφους, G.

Το ισοζύγιο ενέργειας, με βάση τους παράγοντες αυτούς, που εκφράζονται σε μονάδες cal cm⁻¹day⁻¹, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση (Bastiaanssen et al., 2005):

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (3.1)$$

όπου λET είναι η πυκνότητα ροής λανθάνουσας θερμότητας (cal cm⁻¹day⁻¹) που είναι θετική προς τα πάνω από την φυτική επιφάνεια.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το είδος της φυτικής επιφάνειας διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της εξατμισοδιαπνοής. Η όποια σχέση υπολογισμού της ET πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της φυτοκόμης. Επειδή το γεγονός αυτό θα οδηγούσε σε μια μεγάλη ποικιλία σχέσεων, αλλά και σε μεγάλες δυσκολίες ή και αδυναμίες για την πειραματική επιβεβαίωσή τους, η τάση που σήμερα επικρατεί είναι η διαμόρφωση σχέσεων που αναφέρονται σε καλλιέργειες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, οι οποίες αναφέρονται σαν καλλιέργειες αναφοράς. Σαν τέτοιες καλλιέργειες χρησιμοποιούνται ο αειθαλής χορτοτάπητας και η μηδική. Η ET που υπολογίζεται για τις καλλιέργειες αυτές είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ETr.

Προσπαθώντας να ορίσουν με ακρίβεια τις διαδικασίες μέτρησης και υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής, οι Doorenbos and Pruitt (1977) και οι Jensen et al., (1990) ομαδοποίησαν τους ορισμούς που παραθέτονται παρακάτω:

Εξάτμιση E, είναι η φυσική διαδικασία με την οποία ένα στερεό ή υγρό σώμα, μεταπίπτει στην αέρια φάση. Στις αρδεύσεις η εξάτμιση περιορίζεται στην μεταβολή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση.

Εξατμισοδιαπνοή ET, είναι η συνδυασμένη διαδικασία με την οποία νερό μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα με την διαπνοή από τα φυτά και την εξάτμιση

από την επιφάνεια του εδάφους και την επιφάνεια των φύλλων, όταν αυτά είναι υγρά.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (ή βάσης) ETr, είναι η ένταση με την οποία νερό, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας αναφοράς. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή απλώς, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, λETr, είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου, ETr.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ETc, είναι η ένταση με την οποία νερό, εφ' όσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας που αναπτύσσεται δυναμικά και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος που αναπτύσσεται.

Με τον όρο δυναμική ανάπτυξη μιας καλλιέργειας, εννοούμε τη διαδικασία κατά την οποία η καλλιέργεια είναι ελεύθερη από ασθένειες και οποιουσδήποτε άλλους παράγοντες που λειτουργούν ανασταλτικά για την πλήρη ανάπτυξη της.

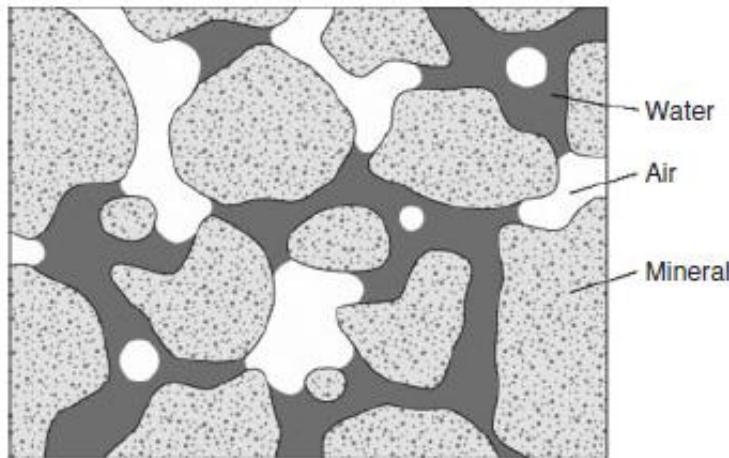
Στη συνέχεια (Κεφάλαιο 5) θα περιγράψουμε τη μέθοδο την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής.

3.3.2 Ροή στην ακόρεστη ζώνη

Η ακόρεστη ζώνη (vadose or unsaturated) ή μερικά κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της ζώνης του επιφανειακού εδάφους ως και τη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης (το άνω όριο του υποκείμενου υπόγειου υδροφορέα). Η ζώνη του επιφανειακού εδάφους μπορεί να φιλοξενεί και περιοχές ελεύθερου νερού καθώς και μία επιπλέον περιοχή ανάπτυξης φυτών (ριζόσφαιρα).

Στην ακόρεστη ζώνη, οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό συγχρόνως (εκτός από περιπτώσεις που προσωρινά καταλαμβάνονται μόνο με νερό – περίπτωση πλημμύρας).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2, το νερό βρίσκεται μέσα σε ένα ακόρεστα πορώδες μέσο μαζί με αέρα και στερεά. Η συνήθης τάση του νερού είναι να προσκολλάται σε στερεές επιφάνειες και σε καμπύλες διεπιφάνειες αέρα – νερού. Οι υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβάνουν την κίνηση οποιουδήποτε από αυτά τα υλικά. Συνεπώς, η μεταφορά μέσα σε ένα ακόρεστο μέσο, είναι πάντα υπόθεση πολυφασικής μεταφοράς, όπου ο όρος «πολυφασική» χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις στις οποίες στερεές, υγρές ή αέριες φάσεις λαμβάνονται υπόψη (Nimmo, 2005).



Εικόνα 3.2: Μικροσκοπική άποψη της τομής ενός ακόρεστου μέσου (Nimmo, 2005).

Διάφορα υλικά αποτελούν τον στερεό ιστό της ακόρεστης ζώνης, συμπεριλαμβάνοντας χώμα, λίθους, πορώδη πετρώματα και οργανική ύλη. Μία κοινή διάκριση είναι μεταξύ κοκκωδών μέσων, όπου τα σωματίδια είναι ξεχωριστά το ένα με το άλλο, και μικτών μέσων, όπου τα σωματίδια ενοποιούνται.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των πετρωμάτων που σχετίζονται με την ροή στην ακόρεστη ζώνη περιλαμβάνουν την σύσταση, τη δομή και το περιεχόμενο σε οργανικά και ανόργανα στοιχεία. Η σύσταση, εφαρμοζόμενη σε ένα κοκκώδες μέσο, αναφέρεται στην κατανομή των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος. Η δομή αναφέρεται στη διάταξη των στερεών συστατικών του υλικού. Οι βασικοί δομικοί παράγοντες της ακόρεστης ζώνης περιλαμβάνουν το πορώδες, τη συσσωμάτωση των σωματιδίων και την κατανομή των μακροπόρων. Η δομή συχνά, παράλληλα με την σύσταση του εδάφους, θεωρείται ένας πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει τους πόρους του υλικού (Nimmo, 2005).

Στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η υδροστατική πίεση του νερού των πόρων είναι μηδέν (δηλαδή ίση με την ατμοσφαιρική). Κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η υδροστατική πίεση του νερού των πόρων είναι θετική (δηλαδή ανώτερη της ατμοσφαιρικής). Αντίθετα, στην ακόρεστη ζώνη η υδροστατική πίεση είναι αρνητική, λόγω των επιφανειακών τάσεων των μηνίσκων του νερού των πόρων που σχηματίζονται στα εδαφικά κενά με τη βοήθεια των τριχοειδών δυνάμεων. Στις τριχοειδείς δυνάμεις οφείλεται και η ζώνη πλήρους κορεσμού που παρατηρείται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και στην οποία αναπτύσσονται αρνητικές υδροστατικές πίεσεις. Αυτή η ζώνη πλήρους κορεσμού υπό αρνητική πίεση (capillary fringe), που σχηματίζεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, μπορεί να εκτείνεται για αρκετά μέτρα στους αργιλικούς σχηματισμούς, ενώ στους αμμώδεις μπορεί και να αμεληθεύει μιας και είναι της τάξης των εκατοστών (Rippey et al., 1972).

Η ακόρεστη ζώνη είναι συνήθως ετερογενής και χαρακτηρίζεται από κυκλικές διακυμάνσεις της υγρασίας του εδάφους, καθώς η εδαφική υγρασία αναπληρώνεται από τις βροχοπτώσεις και απομακρύνεται από την εξατμισοδιαπνοή και την επαναφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα. Η ροή στην ακόρεστη ζώνη θεωρείται ότι είναι κυρίως κάθετη, δεδομένου ότι η βαρύτητα κυριαρχεί της διήθησης.

Ως εκ τούτου, για την μείωση του υπολογιστικού φόρτου, το MIKE SHE υπολογίζει τη ροή στην ακόρεστη ζώνη μόνο κάθετα. Αν και αυτό είναι αρκετό για τις περισσότερες εφαρμογές, μπορεί να περιορίσει την εγκυρότητα της περιγραφής της ροής σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε απότομες βουνοπλαγιές, ή σε μικρής κλίμακας μοντέλα με πλευρική ροή στην ακόρεστη ζώνη. Η εγγενής ετερογένεια των φυσικών εδαφών σημαίνει ότι οποιαδήποτε περιγραφή της ροής στην ακόρεστη ζώνη πρέπει είτε να αγνοεί τις επιμέρους υπόγειες μεταβολές και διεργασίες ή να σχεδιάσει στρατηγικές ώστε να τις συνυπολογίσει (Refsgaard and Butts, 1999).

3.3.2.1 MIKE SHE & Μέθοδοι προσομοίωσης της ροής στην ακόρεστη ζώνη

Το μοντέλο ακόρεστης ροής συνδέεται με το μοντέλο εξατμισοδιαπνοής, η οποία εκτιμάται με βάση τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και τα χαρακτηριστικά της χλωρίδας.

Το MIKE SHE παρέχει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της κατακόρυφης ροής στην ακόρεστη ζώνη (Mike She User Manual, 2007).

Συγκεκριμένα:

(α) ένα πλήρες μοντέλο επίλυσης της εξίσωσης Richards, το οποίο απαιτεί σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-ύδατος.

(β) ένα απλοποιημένο μοντέλο ροής με βάση τη βαρύτητα, το οποίο υποθέτει μια ενιαία κατακόρυφη κλίση, αγνοώντας τις τριχοειδείς δυνάμεις.

(γ) ένα απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που υποθέτει διακριτοποίηση της ακόρεστης ζώνης σε δύο στρώσεις και εφαρμόζεται σε ρηχούς υδροφορείς.

Σύγκριση των μεθόδων επίλυσης:

▪ **Εξίσωση Richards**

Η πλήρης εξίσωση Richards είναι η πιο απαιτητική, όσον αφορά στους υπολογισμούς, αλλά και η πιο ακριβής, όταν η ακόρεστη ροή είναι δυναμική. Με τη χρήση διάφορων εξισώσεων υπολογίζουμε την υδραυλική αγωγιμότητα και σχεδιάζουμε την καμπύλη διατήρησης της υγρασίας. Με αυτή την εξίσωση λαμβάνουμε υπ' όψιν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του εδάφους σε διαφορετικά βάθη, χωρίζοντας την ακόρεστη ζώνη σε διακριτές ζώνες. Η μη γραμμικότητα της ροής στην ακόρεστη ζώνη δημιουργεί μεγάλες μεταβολές στην πίεση του εδάφους και στην εδαφική υγρασία, κατά τη διάρκεια της διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής, οι οποίες περιγράφονται με επαρκή ακρίβεια με τη χρήση αυτής της εξίσωσης.

▪ **Εξίσωση ροής με βαρύτητα**

Είναι πιο απλοποιημένη εξίσωση σε σχέση με την Richards, καθώς στον υπολογισμό μεταβολής του υδραυλικού ύψους αγνοείται ο όρος της πίεσης και λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η βαρύτητα, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται δηλαδή οι τριχοειδείς δυνάμεις. Δίνει κατάλληλα αποτελέσματα όταν μας ενδιαφέρει κυρίως το πώς αλλάζει ο χρόνος επαναφόρτισης του υδροφόρου ορίζοντα, βασιζόμενοι κυρίως στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή και βροχόπτωση και όχι στη δυναμική της ακόρεστης ζώνης.

▪ **Υδατικό ισοζύγιο δύο στρώσεων**

Με αυτήν την μέθοδο θεωρούμε πως έχουμε τα ίδια εδαφικά χαρακτηριστικά σε όλο το βάθος της ακόρεστης ζώνης, γι' αυτό το λόγο είναι κατάλληλο σε περιοχές όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ρηχός και το βάθος της ακόρεστης ζώνης μικρό. Η μέθοδος αυτή δεν συνυπολογίζει τη σχέση μεταξύ της υδραυλικής αγωγιμότητας και του ποσοστού εδαφικής υγρασίας, και συνεπώς την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει νερό στις ρίζες. Η μέθοδος συμπεριλαμβάνει τις διεργασίες της παρακράτησης, της διήθησης, της εξατμισοδιαπνοής και της επαναφόρτισης των υπόγειων υδάτων. Θεωρώντας πως ολόκληρη η ακόρεστη ζώνη χωρίζεται σε δύο στρώματα, ο κύριος σκοπός της μεθόδου είναι να υπολογίσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή και την ποσότητα του νερού που φορτίζει την ακόρεστη ζώνη.

Κατά την προσομοίωση, κάθε κελί του μοντέλου αντιστοιχεί σε μία ζώνη του εδάφους για την οποία απαιτείται ο προσδιορισμός ενός εδαφικού προφίλ. Αν το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα χωρίζεται επίσης σε ζώνες ίσου βάθους, τότε η ακόρεστη ροή χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο μία φορά για κάθε περιοχή με το ίδιο προφίλ εδάφους και το ίδιο βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Τέτοιου είδους ομαδοποίηση μπορεί να μειώσει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο. Ωστόσο, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι δυναμικός και χωρικά μεταβλητός, είναι απαραίτητη η

λύση των εξισώσεων της ακόρεστης ροής για κάθε κελί του μοντέλου, χρησιμοποιώντας την πλήρη λύση της εξίσωσης Richards.

Στην παρούσα εργασία, με τη χρήση του μοντέλου MIKE SHE, η προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του πλήρους μοντέλου επίλυσης της εξίσωσης Richards με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Περιγραφή της εξίσωσης Richards

Η κίνηση του νερού στο έδαφος προκαλείται από τις διαφορές δυναμικής ενέργειας του νερού εντός του εδάφους, οι οποίες οφείλονται στη βαρύτητα, στην υδροστατική πίεση και στο φαινόμενο της ώσμωσης. Η δυναμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου εδαφικού νερού αποδίδεται με τον όρο δυναμικό του εδαφικού νερού, το οποίο αντιπροσωπεύει τις προαναφερθείσες διαφορές δυναμικής ενέργειας. Ο όρος υδραυλικό δυναμικό αντιπροσωπεύει το άθροισμα του δυναμικού βαρύτητας και του δυναμικού υδροστατικής πίεσης. Αν αυτό εκφραστεί σε μονάδες μήκους, τότε καλείται υδραυλικό ύψος ψ [L] και οι συνιστώσες του, ύψος πίεσης h [L] και ύψος θέσεως z [L]. Έτσι:

$$\psi = h + z \quad (3.2)$$

όπου: το ύψος θέσης (z) σε κάποιο σημείο είναι το υψόμετρο του σημείου πάνω από το μηδενικό επίπεδο αναφοράς (με τον άξονα z θετικό προς τα πάνω). Αντίστοιχα για το ύψος πίεσης (h) το επίπεδο αναφοράς είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Κάτω από ακόρεστες συνθήκες το ύψος πίεσης (h) είναι αρνητικό εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων και των μικρής ακτίνας δράσης δυνάμεων προσρόφησης ανάμεσα στα μόρια του νερού και τα εδαφικά σωματίδια. Αυτές οι δυνάμεις είναι υπεύθυνες για τη συγκράτηση του νερού στο έδαφος. Καθώς είναι δύσκολο να μελετηθούν ξεχωριστά, συγχωνεύονται κάτω από τον ίδιο όρο. Σύμφωνα με το νόμο του Darcy ισχύει:

$$q_x = -K_x \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3.3)$$

όπου q_x , q_y , q_z οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής, q [LT^{-1}], του εδαφικού νερού (όγκος νερού προς την επιφάνεια – πυκνότητα ροής) ως προς τους τρεις άξονες. Επιπλέον, η εξίσωση συνέχειας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

Όπου: $\theta = \text{εδαφική υγρασία} [L^3 L^{-3}]$
 $t = \text{χρόνος} [T]$

Η γενική εξίσωση ροής του νερού στο έδαφος προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (3.3) και (3.4), η οποία είναι η εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

όπου: $K = \text{υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους} [L T^{-1}]$

Όταν το έδαφος δεν είναι κορεσμένο με νερό και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3.2), η εξίσωση (3.5) μετατρέπεται στη γενική εξίσωση ροής σε ακόρεστα εδάφη:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_z(h)}{\partial z} \quad (3.6)$$

Υποθέτοντας επιπλέον ότι το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο, θα ισχύει:

$$K_x(h) = K_y(h) = K_z(h) = K(h) \quad (3.7)$$

Άρα, η εξίσωση (3.6) γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (3.8)$$

Αν εισαχθεί η έννοια της υδραυλικής χωρητικότητας του εδάφους (differential moisture capacity), $C(h) [L^{-1}]$:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (3.9)$$

τότε ο αριστερός όρος της εξίσωσης (3.8) γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.10)$$

και τελικά η εξίσωση (3.8) παίρνει την τελική μορφή:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (3.11)$$

Η παραπάνω μερική διαφορική εξίσωση (3.11) είναι η **εξίσωση Richards** (Richards, 1931) και περιγράφει την κίνηση του νερού στο έδαφος υπό ισόθερμες και ισοβαρείς συνθήκες. Η εξίσωση Richards ισχύει για κορεσμένες και για ακόρεστες συνθήκες και μπορεί να εφαρμοστεί σε διαστρωματωμένα εδάφη. Η επίλυσή της δίνει την κατά βάθος κατανομή του ύψους πίεσης στο έδαφος για κάθε χρονική στιγμή και μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (XKY) κάθε εδαφικής στρώσης, την κατ' όγκο εδαφική υγρασία (θ).

Αν και η κίνηση του νερού στο έδαφος γίνεται σε τρεις διαστάσεις, οι παραπάνω αριθμητικές μέθοδοι εφαρμόζονται συνήθως στη μονοδιάστατη εκδοχή της εξίσωσης Richards. Η απλουστευμένη μονοδιάστατη έκφραση της εξίσωσης Richards για την κατακόρυφη ροή είναι η ακόλουθη:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (3.12)$$

όπου: h = ύψος πίεσης του εδαφικού νερού [L]

t = χρόνος [T]

$C(h)$ = υδραυλική χωρητικότητα του εδάφους [L^{-1}]

θ = εδαφική υγρασία κατ' όγκο [$L^3 L^{-3}$]

z = κατακόρυφη συντεταγμένη με θετική φορά προς τα κάτω και με αρχή την επιφάνεια του εδάφους [L]

$K(h)$ = ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}]

Στην περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με ένα καλλιεργούμενο έδαφος θα πρέπει στην εξίσωση συνέχειας να συμπεριλάβουμε και την πρόσληψη του νερού από τα φυτά. Η πρόσληψη του νερού από τα φυτά είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως η πυκνότητα, η κατανομή και το μήκος των ριζών, το είδος του εδάφους και το είδος του φυτού. Η ακριβής επίδραση αυτών των παραγόντων δεν έχει κατανοηθεί πλήρως μέχρι σήμερα. Ο προσδιορισμός αυτών των επιδράσεων συνεπάγεται πολυδάπανο και χρονοβόρο πειραματισμό, ο οποίος όμως με τη σειρά του δε θα μπορούσε να οδηγήσει σε συμπεράσματα και ακριβείς περιγραφές των διαδικασιών που περιλαμβάνονται στην πρόσληψη του νερού από τα φυτά. Έτσι έχουν προταθεί πιο απλές εκφράσεις για να περιγράψουν την πρόσληψη του νερού από τις ρίζες των φυτών. Οι εκφράσεις αυτές δεν απαιτούν γνώση των πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που σχετίζονται με την απορρόφηση του εδαφικού νερού από τις ρίζες και εφαρμόζονται σε μια πιο 'μακροσκοπική' κλίμακα, θεωρώντας το ριζικό σύστημα και το έδαφος που το περιβάλλει σαν ένα ενιαίο κομμάτι. Σ' αυτήν την περίπτωση, η πρόσληψη του νερού από τις ρίζες των φυτών ανά μονάδα όγκου εδάφους και στη μονάδα χρόνου περιγράφεται από μια συνεχή συνάρτηση (sink term), $S(h,z,t)$, η οποία προστίθεται απλά στην εξίσωση Richards. Έτσι, η (3.12) καταλήγει να γράφεται απλά στην εξίσωση Richards:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S(h, z, t) \quad (3.13)$$

όπου: $S(h,z,t)$ είναι η πρόσληψη του νερού από τις ρίζες του φυτού [T^{-1}].

Η παραπάνω μερική διαφορική εξίσωση (3.13) είναι η εξίσωση που περιγράφει το φυσικό πρόβλημα της κίνησης του εδαφικού νερού με την ταυτόχρονη πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα των φυτών. Η επίλυσή της δίνει την κατά βάθος κατανομή του ύψους πίεσης στο έδαφος για κάθε χρονική στιγμή και μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας (XKY) κάθε εδαφικής στρώσης, την κατ' όγκο εδαφική υγρασία (θ) σε ένα καλλιεργούμενο έδαφος για κάθε χρονική στιγμή.

3.3.3 Επεξεργασία των ιδιοτήτων της εδαφικής ακόρεστης ζώνης

Για την επίλυση της εξίσωσης Richards απαιτούνται για όλους τους τύπους εδάφους δύο σημαντικές υδραυλικές συναρτήσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν τα επιμέρους προφίλ του εδάφους εντός της περιοχής μελέτης (Mike She User Manual, 2007):

- α)** Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικού ύψους, και
- β)** Η καμπύλη υδραυλικής αγωγιμότητας vs υδραυλικού ύψους.

Υπάρχει πλήθος εμπειρικών εξισώσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι παραπάνω καμπύλες-παράμετροι. Στην παρούσα εργασία θα εφαρμοστούν οι αντίστοιχες εμπειρικές εξισώσεις του Van Genuchten.

Αναλυτικότερα:

✓ Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικού ύψους

Η σχέση μεταξύ της υγρασίας (θ) και του υδραυλικού ύψους (ψ) είναι γνωστή ως χαρακτηριστική καμπύλη εδαφικής υγρασίας, η οποία κυρίως ορίζεται από την σύσταση και τη δομή του εδάφους. Επίσης, η ποσότητα και το είδος της οργανικής ύλης μπορεί να έχει επίδραση στην καμπύλη. Χαρακτηριστικά, το ύψος της πίεσης μειώνεται ραγδαία καθώς μειώνεται το περιεχόμενο της υγρασίας. Το φαινόμενο της υστέρησης είναι επίσης συχνό, γεγονός που σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ υγρασίας και υδραυλικού ύψους εξαρτάται από το αν το περιεχόμενο της υγρασίας αυξάνεται ή μειώνεται. Το MIKE SHE δε λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης, δηλαδή υποθέτουμε πως η σχέση μεταξύ θ και ψ είναι μοναδική.

Η χαρακτηριστική καμπύλη της υγρασίας μπορεί να μετρηθεί εργαστηριακά ή να υπολογιστεί από τυπικές τιμές για εδάφη με παρόμοια χαρακτηριστικά. Αν είναι διαθέσιμα εργαστηριακά δεδομένα, τότε οι μετρηθείς τιμές θ - ψ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο.

Εναλλακτικά, οι μετρηθείς τιμές μπορούν να τοποθετηθούν σε συναρτήσεις του μοντέλου. Οι κατάλληλες παράμετροι των συναρτήσεων μπορούν να εισαχθούν κατευθείαν στο μοντέλο ή μπορούν να δημιουργηθούν σε εξωτερικά αρχεία (π.χ. υπολογιστικό φύλλο του Excel) και να εισαχθούν στο μοντέλο ως πίνακες δεδομένων.

Περιγραφή της εξίσωσης Van Genuchten

Η περιγραφή της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Υγρασίας (XKY) γίνεται συνήθως με τη βοήθεια της εξίσωσης Van Genuchten (Van Genuchten, 1980), η οποία περιλαμβάνει τέσσερις παραμέτρους: θ_s , θ_r , α και n . Συνεπώς, οποιαδήποτε διαφοροποίηση της XKY μέσα σε μια περιοχή αντιστοιχεί σε διαφοροποίηση αυτών των τεσσάρων παραμέτρων στην περιοχή αυτή. Οι παράμετροι θ_s (υγρασία κορεσμού) και θ_r (υπολειμματική υγρασία) μπορούν να μετρηθούν εργαστηριακά, ενώ οι α και n αποτελούν παραμέτρους προσαρμογής. Όμως λόγω αδυναμιών των μεθόδων μέτρησης των θ_s και θ_r , αυτές μπορούν να θεωρούνται (είτε μια από αυτές ή και οι δυο ταυτόχρονα), ως παράμετροι προσαρμογής μαζί με τις α και n (Van Genuchten and Nielsen, 1985; Luckner et al., 1989).

Η εξίσωση Van Genuchten (1980) προσδιορίζεται ως εξής:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (ah)^n]^m} \quad (3.14)$$

όπου: θ = η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία κατ' όγκο [$L^3 L^{-3}$]

θ_r = η υπολειμματική υγρασία [$L^3 L^{-3}$]

θ_s = η υγρασία κορεσμού [$L^3 L^{-3}$]

α = παράμετρος προσαρμογής [L^{-1}], η οποία προσδιορίζεται από την σχέση:

$$a = \frac{1}{h} (2^{1/m} - 1)^{1-m}$$

n = παράμετρος προσαρμογής [αδιάστατη], όπου συνδέεται με την παράμετρο, m , με τη σχέση: $m = 1 - (1/n)$

Η εξίσωση (3.14) περιγράφει τη σχέση μεταξύ εδαφικής υγρασίας θ και εδαφικής πίεσης h αρκεί να είναι γνωστές οι τέσσερις παράμετροι θ_s , θ_r , α , n , που μπορούν να εκτιμηθούν από δεδομένα συγκράτησης νερού – εδάφους.

Η υπολειμματική υγρασία θ_r αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα εδαφικού νερού, η οποία δεν κινείται διαμέσου των εδαφικών πόρων λόγω ισχυρής προσρόφησης στη στερεή φάση του εδάφους. Από μαθηματικής σκοπιάς, η υπολειμματική υγρασία είναι η περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία για την οποία σε μεγάλες τιμές πίεσης ισχύει ότι $d\theta/dh \rightarrow 0$ και $K \rightarrow 0$.

Όσον αφορά στην υγρασία κορεσμού, θ_s , αυτή αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να περιέχει ένας όγκος εδάφους, όταν το εδαφικό νερό καλύψει κάθε κενό πόρο αυτού. Μια τέτοια περίπτωση, όπου η κατ' όγκο περιεχόμενη εδαφική υγρασία ισούται με τον όγκο των κενών πόρων του εδάφους, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στη φύση είτε λόγω του εγκλωβισμού αέρα στους μικροπόρους του εδάφους είτε λόγω του διαλυμένου αέρα μέσα στο εδαφικό νερό. Στο εργαστήριο με προσεκτική διύγρανση των δειγμάτων, ο εγκλωβισμένος όγκος αέρα μπορεί να είναι πρακτικά μηδενικός, χωρίς ωστόσο να παύει να υφίσταται. Συνεπώς η θ_r και ίσως η θ_s , θα μπορούσαν να μην προσδιορίζονται εργαστηριακά, αποτελώντας έτσι σταθερές της Εξίσωσης (3.14), αλλά θα πρέπει να εξετάζεται ο υπολογισμός τους μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης όπως και οι παράμετροι α και n της εξίσωσης αυτής (Van Genuchten and Nielsen, 1985).

✓ Καμπύλη υδραυλικής αγωγιμότητας vs υδραυλικού ύψους

Η εξίσωση που περιγράφει τη ροή στην ακόρεστη ζώνη απαιτεί πληροφορίες για την εξίσωση υδραυλικής αγωγιμότητας $K(\theta)$ και την καμπύλη διατήρησης εδαφικής υγρασίας $\psi(\theta)$. Η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά, καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία θ . Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη δεδομένου ότι η συνολική επιφάνεια που είναι διαθέσιμη για τη ροή μειώνεται καθώς οι πόροι γεμίζουν με αέρα. Επιπλέον, όταν ένα μικρότερο μέρος των πόρων του εδάφους είναι διαθέσιμο για την εκτέλεση της ροής, οι διαδρομές ροής γίνονται πιο περίπλοκες. Επίσης, υπάρχει μια αύξηση του ιξώδους του νερού, όταν οι μικρής εμβέλειας προσροφητικές δυνάμεις κυριαρχούν σε σχέση με τις τριχοειδείς δυνάμεις (Mike She User Manual, 2007).

Η πειραματική διαδικασία για τη μέτρηση της $K(\theta)$ είναι μάλλον δύσκολη και όχι πολύ αξιόπιστη. Εναλλακτικά, έχουν προταθεί διάφορες διαδικασίες για να εξαχθεί η εξίσωση της υδραυλικής αγωγιμότητας από πιο εύκολα μετρήσιμες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το έδαφος ή που απλά βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις.

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα $K(h)$, περιγράφεται από το μοντέλο του Mualem (1976) ως εξής:

$$K(S_e) = K_s S_e^{-l} \left[\frac{f(S_e)}{f(1)} \right]^2 \quad (3.15)$$

Όπου:

$$f(S_e) = \int_0^{S_e} \frac{1}{h(x)} dx \quad (3.16)$$

Όπου: S_e = αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού

Σύμφωνα με τον Van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (ah)^n]^m} \quad (3.17)$$

όπου:

θ = περιεχόμενη στο έδαφος υγρασία κατ' όγκο $[L^3 L^{-3}]$,

θ_r = υπολειμματική υγρασία $[L^3 L^{-3}]$ και

θ_s = υγρασία κορεσμού $[L^3 L^{-3}]$.

α = εμπειρική παράμετρος $[L^{-1}]$

n = εμπειρική παράμετρος [αδιάστατη]

m = εμπειρική παράμετρος, $[m = 1 - (1/n)]$

K_s = υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό $[L T^{-1}]$

l = παράμετρος (pore-connectivity), που ο Mualem υπολόγισε ότι κατά μέσο όρο στα διάφορα εδάφη είναι ίση με $\frac{1}{2}$.

$h(x)$ = η συνάρτηση που θα προκύψει από την επίλυση της (3.16) ως προς την πίεση h .

Από το συνδυασμό των (3.15) και (3.17) προκύπτει ότι η υδραυλική αγωγιμότητα δίνεται από τη σχέση (Van Genuchten, 1980):

$$K(h) = K_s \frac{\{1 - (ah)^{mn}[1 + (ah)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (ah)^n]^{m/2}} \quad (3.18)$$

Συνεπώς, η πλήρης γνώση σχετικά με την εξίσωση της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι διαθέσιμη και παραμένει μόνο άγνωστη η παράμετρος n , η οποία εκτιμάται συνήθως είτε βιβλιογραφικά είτε κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής n είναι συνήθως μικρός για αμμώδη εδάφη (2-5) και μεγάλος για αργιλώδη εδάφη (10-20). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του εκθέτη n θα επηρεάσει το ποσοστό διήθησης στο έδαφος και επομένως τον πραγματικό ρυθμό εξάτμισης.

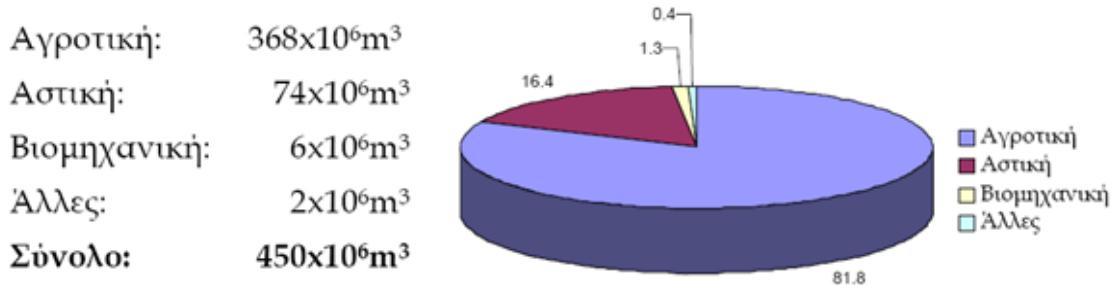
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 ΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Το υδατικό διαμέρισμα Κρήτης αποτελεί ένα από τα 14 υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. Περιλαμβάνει τους νομούς Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου και Λασιθίου. Έχει συνολική έκταση 8.335 km^2 και καλύπτει το 6,3% της συνολικής έκτασης της χώρας. (Περλέρος κ.ά., 2004)

Δέχεται κατά μέσο όρο $8.074 \times 10^6 \text{ m}^3$ νερού από κατακρημνίσματα. Το έντονο ανάγλυφο της Κρήτης και η πολύπλοκη γεωλογική δομή της δημιουργούν ποικιλία στη διακίνηση του νερού, τόσο του επιφανειακού, όσο και του υπόγειου. Ως αποτέλεσμα αυτών, παρατηρείται η ανάπτυξη πολλών μικρών υδρολογικών λεκανών που η έκταση τους όμως δεν ξεπερνά τα 600 km^2 . Το πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, χειμαρρώδους χαρακτήρα παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση των παροχών του. Τα κυριότερα υδατορέματα είναι: ο Γεροπόταμος (Ν. Ηρακλείου), ο Κερίτης (Ν. Χανίων), ο Κουρταλιώτης (Ν. Ρεθύμνου) και ο Κοιλιάρης (Ν. Χανίων) που διατηρούν μόνιμη ροή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου. Επίσης, μεγάλος αριθμός ρεμάτων σε όλη την έκταση του νησιού εμφανίζουν χειμαρρώδη-παροδική ροή. Υπάρχουν επίσης δυο μικρές λίμνες, στο Ν. Χανίων, του Κουρνά και της Αγυιάς (τεχνητή λίμνη).

Σύμφωνα με μελέτη του ΤΕΕ που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του κοινοτικού προγράμματος Leonardo Da Vinci, το ετήσιο υδατικό δυναμικό της Κρήτης εκτιμάται σε $2.600 \times 10^6 \text{ m}^3$ από το οποίο $1.300 \times 10^6 \text{ m}^3$ αποτελούν το επιφανειακό υδατικό δυναμικό (συμπεριλαμβανομένων των πηγών που τροφοδοτούν τα επιφανειακά) και $1.300 \times 10^6 \text{ m}^3$ το υπόγειο. Στην ίδια μελέτη εκτιμάται ότι η ετήσια διαθεσιμότητα είναι 4.800 m^3 /κάτοικο, ενώ η κατανομή του νερού στις διάφορες χρήσεις για το έτος 1996 περιγράφεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 4.1.



**Εικόνα 4.1: Κατανομή του νερού στις διάφορες χρήσεις για το έτος 1996
(Χατζηναγγέλου, 2005).**

Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει το υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης είναι η αντιστρόφως ανάλογη κατανομή των υδατικών πόρων του στο χώρο με τη διαμορφωμένη ζήτηση. Το μεγαλύτερο ποσοστό του υδατικού δυναμικού εμφανίζεται στο δυτικό τμήμα, ενώ στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα, όπου οι

ανάγκες είναι πολύ μεγαλύτερες (μεγάλες γεωργικές εκτάσεις, θερμοκήπια), εμφανίζονται μεγάλα ελλείμματα. Το γεγονός αυτό προκάλεσε και την εντατικοποίηση των αντλήσεων, στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα με αποτέλεσμα την υπερεκμετάλλευση και την υποβάθμιση της στάθμης των υδροφορέων με συνέπεια την υφαλμύρινσή τους σε ορισμένες παράκτιες περιοχές.

4.1.1 Το υδατικό δυναμικό του Ν. Χανίων

Ο νομός Χανίων είναι ο πλουσιότερος σε υδάτινο δυναμικό νομός της Κρήτης. Ετησίως, λόγω των κατακρημνισμάτων σε όλη της έκταση του Ν. Χανίων πέφτουν $2,5 \times 10^9$ m³ νερού, ενώ το μέσο ύψος βροχής κυμαίνεται στα 1100 mm/έτος (Πίνακας 4.1). Από αυτά, το 55% επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ($1,4 \times 10^9$ m³/έτος), το 15% απορρέει επιφανειακά ($0,35 \times 10^9$ m³/έτος) και το 30% απορρέει υπόγεια ($0,75 \times 10^9$ m³/έτος), με μεγάλη χρονική υστέρηση στην απορροή του. Η τελευταία ιδιότητα έχει πρακτικό ενδιαφέρον, δεδομένης της άνισης χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης στο νομό, 95% το χειμώνα και 5% το θέρος.

Πίνακας 4.1: Γενικά στοιχεία Ν. Χανίων (Βοζινάκης & Κουγιάννη, 2004).

Μέγεθος	Τιμή
Συνολική έκταση (στρέμματα)	2.320.000
Συνολική γεωργική γη (στρέμματα)	600.000
Συνολική αρδρευόμενη έκταση (στρέμματα)	258.000
Υδατικές ανάγκες αρδευόμενης έκτασης (10⁶ m³/έτος)	130
Υδατικές ανάγκες αρδευθείσας έκτασης* (10⁶ m³/έτος)	300
Διαθέσιμο υδατικό δυναμικό (10⁹ m³/έτος)	1.1
Πλεόνασμα (10⁹ m³/έτος)	0.97

* Αρδευθείσα έκταση: Έκταση δυνάμενη να αρδευτεί.

Οι μόνιμοι κάτοικοι του νομού είναι 156.220 (απογραφή 2011). Η ύδρευση του νομού απαιτεί περίπου 11×10^6 m³ νερού/έτος. Επίσης οι τουριστικές κλίνες στο νομό είναι 42.706 (ΕΟΤ 2003) και η κάλυψη των αναγκών σε νερό για την τουριστική χρήση είναι περίπου $4,5 \times 10^6$ m³/έτος.

Το υδατικό δυναμικό του νομού Χανίων οφείλεται τόσο στο μεγάλο ετήσιο ύψος βροχής του, όσο και κυρίως στην ύπαρξη του σημαντικού ορεινού συγκροτήματος των Λευκών Ορέων που δομούνται κατά κύριο λόγο από ανθρακικούς υδροπερατούς σχηματισμούς. Τα ανθρακικά πετρώματα των Λευκών Ορέων είναι

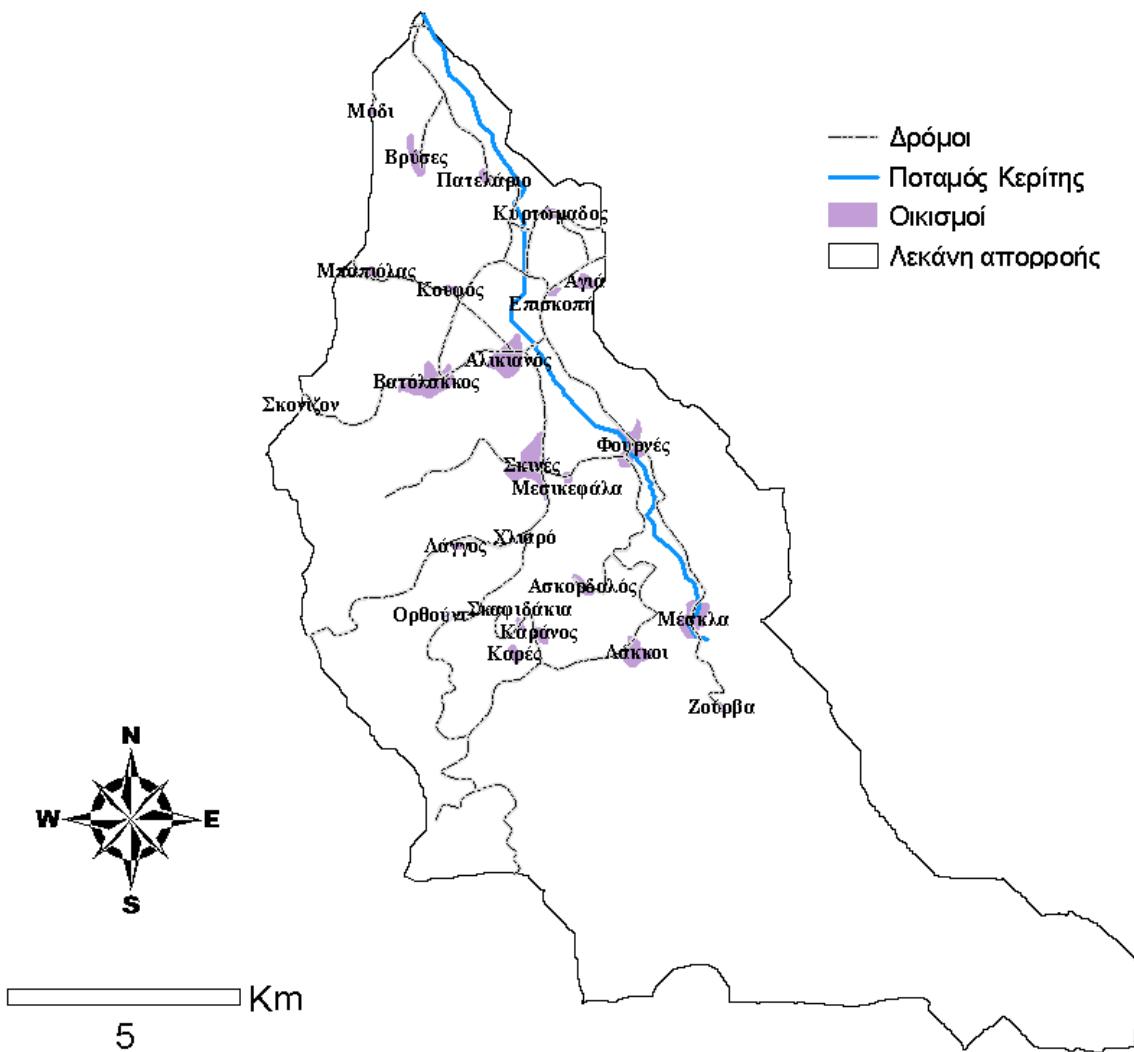
έντονα τεκτονισμένα και καρστικοποιημένα, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτει σε αυτά, να κατεισδύει και στη συνέχεια να κινείται υπόγεια και να εμφανίζονται περιμετρικά πηγές γλυκού νερού, ενώ παράλληλα δημιουργούνται σημαντικοί υπόγειοι υδροφορείς.

4.2 ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ

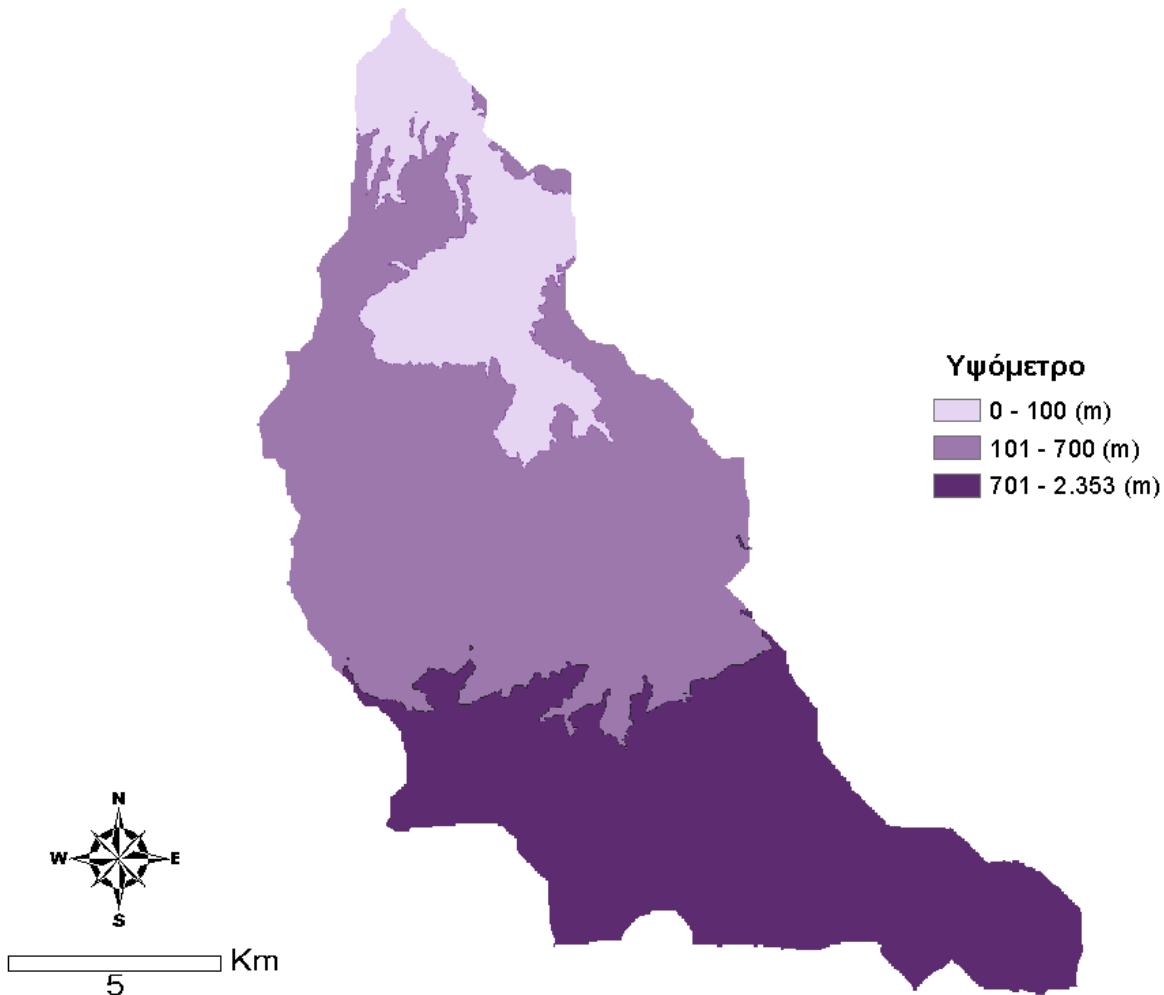
Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κερίτη βρίσκεται στο βορειοκεντρικό τμήμα της επαρχίας Κυδωνίας του Νομού Χανίων, με διεύθυνση τον άξονα Βορράς – Νότος και σε μέση απόσταση από την πόλη των Χανίων 15 km. Η έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη υπολογίστηκε σε 178,6 km². Εκτείνεται στο βορρά 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 ποταμού Κερίτη ανήκει κατά το μεγαλύτερο μέρος της στο δήμο Πλατανιά. Περιλαμβάνει 19 οικισμούς, σημαντικότερα των οποίων είναι τα χωριά Φουρνές, Σκηνές, Ασκόρδαλος, Αλικιανός, Βατόλακκος, Κουφός, Αγυιά, Πατελάρι, Πλατανιάς, Γεράνι, Λάκκοι, Βαρύπετρο και Μεσκλά.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης της υδρολογικής λεκάνης και το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Κερίτη με τους αντίστοιχους οικισμούς (Εικόνα 4.2). Η λεκάνη απορροής, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία για το νερό (2000/60/ΕΕ), δύναται να διαιρεθεί σε 3 διαφορετικά γεωγραφικά διαμερίσματα με βάση τις υψομετρικές ζώνες της περιοχής (πεδινή, ημιορεινή και ορεινή περιοχή), (Εικόνα 4.3).

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη συμβάλλει καταλυτικά στην διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του Ν. Χανίων. Ως εκ τούτου, η βαθύτερη γνώση των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, καθώς και ο έλεγχος την ποιότητας των επιφανειακών και υπογείων υδάτων είναι ενέργειες ιδιαιτέρα σημαντικές για τη σωστή και ασφαλή διαχείριση του υδατικού δυναμικού της περιοχής.



Εικόνα 4.2: Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κερίτη.



Εικόνα 4.3: Υψομετρικός χάρτης της λεκάνης του ποταμού Κερίτη.

Σύμφωνα με την μελέτη για την αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού Δυτικής Κρήτης (ΟΑΔΥΚ), οι 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 30×10^6 m³ 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 m³/h και η μέση παροχή το Σεπτέμβριο 650 m³/h. Από τις παραπάνω πηγές τροφοδοτούνται με νερό ο Τ.O.E.B. Μεσκλών, ο Τ.O.E.B. 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 $70*10^6$ m³/έτος. Η μέση παροχή το μήνα Μάρτη είναι 9000 m³/h ενώ για το μήνα Σεπτέμβρη είναι της τάξης των 6600 m³/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 m³ νερού. Από τις πηγές αξιοποιούνται περί τα $35*10^6$ m³/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 $14*10^6$ m³/έτος, παρουσιάζουν ποιοτική επιβάρυνση με θειϊκά ιόντα.

4.2.1 Βροχόπτωση - Θερμοκρασία - Εξατμισοδιαπνοή

Το σύνολο των κατακρημνίσεων λαμβάνει χώρα μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου-Μαρτίου, με τους πιο βροχερούς μήνες να είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος. Αντίθετα, ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής. Ο μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής κυμαίνεται από 0,3 έως 15 ημέρες για Δεκέμβριο-Ιανουάριο αντίστοιχα. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής εκτιμάται σε 90 ημέρες περίπου. Στο ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη παρατηρούνται σημαντικά ύψη χιονόπτωσης. Όσον αφορά στις θερμοκρασίες, γενικά η περιοχή παρουσιάζει το καλοκαίρι υψηλές σχετικά θερμοκρασιακές συνθήκες και το χειμώνα επίσης η διακύμανση των θερμοκρασιών είναι οιμαλή. Στην πεδινή ζώνη της λεκάνης απορροής η μέση ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζεται τους μήνες Ιανουάριο-Φεβρουάριο και είναι της τάξης των 9,2°C, ενώ η μέση μέγιστη εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο και φθάνει τους 30,3°C.

Στον Πίνακα 4.2, που ακολουθεί δίνονται οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές βροχόπτωσης, η μέση τιμή ημερών βροχής κατά μήνα και έτος καθώς και η εξάτμιση, όπως υπολογίσθηκε από παρατηρήσεις 50 ετών στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα βροχόπτωσης στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Ο.Α.ΔΥ.Κ., 1998).

Μήνες	Μέσες Μηνιαίες Βροχοπτώσεις (mm)	Ημέρες Βροχής	Εξάτμιση (mm/day)
Ιανουάριος	176,4	15,3	15
Φεβρουάριος	137	14,3	40
Μάρτιος	119,5	10,5	67
Απρίλιος	52,8	7	117
Μάιος	9,9	3,4	175
Ιούνιος	5,8	0,9	235
Ιούλιος	0,9	0,5	246
Αύγουστος	4,9	0,6	207
Σεπτέμβριος	24,3	2,7	142
Οκτώβριος	82,1	7,8	81
Νοέμβριος	111,2	11,4	3
Δεκέμβριος	125,9	14,5	30
Μ.Ο	850,7	89	1412

4.3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

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

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 υπερχείλισης 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 τη 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 (μαργαϊκοί 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 οποία τροφοδοτείται από το καρστικό σύστημα και τις βροχοπτώσεις.

Στην υδρολογική λεκάνη του Κερίτη οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν διαφορετική υδρολογική συμπεριφορά, που μαζί με την τεκτονική τους, δηλαδή τον τρόπο τοποθέτησής τους στο χώρο, καθορίζουν το υδρογεωλογικό τους καθεστώς στην περιοχή. Σύμφωνα με το «Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη» (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010), επισημαίνεται η παρουσία δύο βασικών υδρογεωλογικών συστημάτων και ενός δευτερεύοντος (ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους και όχι ως προς την δυναμικότητά τους). Τα συστήματα αυτά είναι:

- ❖ Το υπόγειο υδρογεωλογικό σύστημα των περατών ανθρακικών σχηματισμών, που βρίσκονται στην ανατολική πλευρά της λεκάνης Μυλωνιανά - Φουρνές - Μεσκλά, με κύρια τροφοδοσία από τους νοτιότερα ευρισκόμενους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που επεκτείνονται έως τον κύριο ορεινό ανθρακικό όγκο των Λευκών Ορέων. Στο βόρειο τμήμα του ο ανθρακικός αυτός σχηματισμός διακόπτεται τεκτονικά με ρήγμα διεύθυνσης Α-Δ που έχει σαν αποτέλεσμα την πλευρική επαφή με τον αδιαπέρατο φυλλιτικό σχηματισμό (που βρίσκεται βορειότερα), και τη δημιουργία των πηγών υπερπλήρωσης της Αγιαίς σε υψόμετρο 40 m. Τα υδρολογικά στοιχεία των πηγών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Στοιχεία πηγών Πλάτανου-Κολύμπας-Καλαμιώνα.

Μέση ετήσια παροχή 1970-1984	Μέση παροχή εξαμήνου Μάιος-Οκτώβριος 1970- 1984	Μέση παροχή Αυγούστου 1970-1984
7.855 m ³ /h	7.772 m ³ /h	6.750 m ³ /h
Συνολικός ετήσιος όγκος	Συνολικός θερινός όγκος	Συνολικός όγκος Αυγούστου
69.000.000 m ³	33.500.000 m ³	4.860.000 m ³

Εκτός του συνολικού όγκου νερού των ετησίων απορροών των πηγών Αγιαίς, πρέπει να τονίσουμε την ύπαρξη ενός μονίμου αποθέματος στην λεκάνη τροφοδοσίας των πηγών, του οποίου το μέγεθος, η ποσότητα ύδατος και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του δεν είναι γνωστά.

- ❖ Ένα επιφανειακό υδρογεωλογικό σύστημα των φυλλιτών-χαλαζιτών στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, οι οποίοι σαν αδιαπέρατος σχηματισμός δικαιολογούν την υδροφορία τους συγκεντρώνοντας την επιφανειακή απορροή από τους χείμαρρους Μαύρο ποταμό, Βαλσαμίωτη, Φαζάς, Αλικιανιώτης οι οποίοι συγκλίνουν στον Κερίτη, στο ύψος του Σκηνέ-Αλικιανού. Στοιχεία για τις απορροές αυτών των παραποτάμων του Κερίτη, δεν υπάρχουν. Στο ΝΑ τμήμα των φυλλιτών στο χωριό Μεσκλά και στην τεκτονική επαφή τους με τους

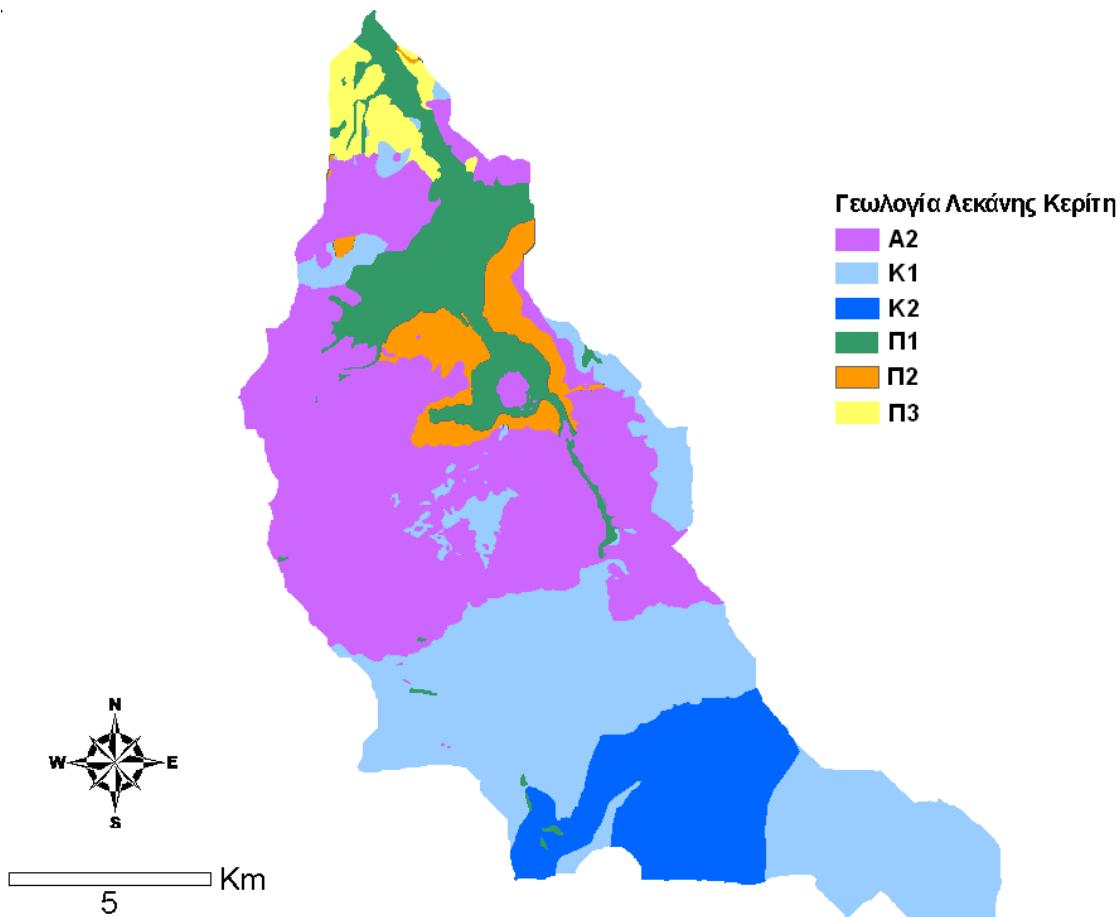
ασβεστόλιθους, που επεκτείνονται νοτιότερα σε υψόμετρο 210 m, εμφανίζονται οι πηγές των Μεσκλών (Παναγιά -Κεφαλοβρύσια-Νικολιανά) με τροφοδοσία από τους ασβεστόλιθους και απορροή επιφανειακά επί των φυλλιτών του Κερίτη (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Στοιχεία πηγών Μεσκλών.

Μέση ετήσια παροχή 1970-1993	Μέση παροχή εξαμήνου Μάιος-Οκτώβριος 1970- 1993	Μέση παροχή Αυγούστου 1970-1993
3.452 m ³ /h	1.875 m ³ /h	1.166 m ³ /h
Συνολικός ετήσιος όγκος	Συνολικός όγκος εξαμήνου Μάιος- Οκτώβριος	Συνολικός όγκος Αυγούστου
30.000.000 m ³	8.100.000 m ³	840.000 m ³

- ❖ Ένα δευτερεύον υδρογεωλογικό σύστημα των τεταρτογενών αποθέσεων, βόρεια των φυλλιτών του κεντρικού τμήματος της λεκάνης Κερίτη και στα χωριά Σκηνές, Αλικιανός, Φουρνές, Βατόλακκος, Κουφός, η τροφοδοσία του οποίου γίνεται από τον Κερίτη, από την απευθείας επιφανειακή απορροή των φυλλιτών, που βρίσκονται νοτιότερα, και από υπόγειες πλευρικές μεταγγίσεις των ανθρακικών σχηματισμών που βρίσκονται ανατολικά.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με βάση τις κατηγορίες των γεωλογικών σχηματισμών:



Εικόνα 4.4: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην Κρήτη ταξινομήθηκαν με βάση την υδατοπερατότητά τους στις εξής κατηγορίες:

Καρστικοί σχηματισμοί

- *Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (K1)*

Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

- *Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (K2)*

Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων,

κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

- *Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (Κ3)*

Παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες και φιλοξενούν σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

Κοκκώδεις σχηματισμοί

- *Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1)*

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρυνσης.

- *Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2)*

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

- *Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3)*

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θεικών ιόντων.

Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

- *Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1)*

Περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και τα ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα των διαφόρων ζωνών. Κατά θέσεις εντός των στρωμάτων του φλύσχη αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού.

- *Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2)*

Συμμετέχουν στην κατηγορία αυτή τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων. Κατά θέσεις στους σχηματισμούς αυτούς, τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της πετρολογικής σύνθεσής τους (π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών, μαρμάρων) αναπτύσσονται επιμέρους, τοπικού χαρακτήρα, υδροφορίες.

4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ (Π1)

Στην παρούσα εργασία επιλέγουμε να μελετήσουμε το κομμάτι των προσχωματικών σχηματισμών, οι οποίοι περιγράφονται ως κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1).

Το κομμάτι αυτό είναι το κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Εικόνα 4.4). Η περιοχή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι όντας πεδινή στο μεγαλύτερο μέρος της, αποτελεί σημαντική αγροτική περιοχή του Ν. Χανίων. Στην περιοχή αυτή η χρήση γης που κυριαρχεί είναι αυτή των εσπεριδοειδών, τα προϊόντα των οποίων καλύπτουν όχι μόνο την εγχώρια αλλά και τη διεθνή αγορά. Η συγκεκριμένη καλλιέργεια είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε κατανάλωση νερού ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες γεγονός που κάνει επιτακτική την ανάγκη ορθής διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων στην περιοχή μελέτης.

Με βάση τα παραπάνω, το υδατικό ισοζύγιο της ακόρεστης εδαφικής ζώνης αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης διότι μπορεί να προσδιοριστεί η διαθέσιμη ποσότητα νερού στον εδαφικό ορίζοντα και συνεπώς στις καλλιέργειες σε σχέση με το χρόνο και την εποχή. Επίσης, η μελέτη της ροής στην ακόρεστη ζώνη και η διαθέσιμη υγρασία είναι πολύ σημαντική για το υπόγειο υδατικό δυναμικό ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, όπου στην Κρήτη επικρατεί ανομβρία και αντλούνται μεγάλες ποσότητες νερού από γεωτρήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Συνολικά, η μελέτη του υδατικού ισοζυγίου συμβάλλει στην ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, των οποίων οι διαθέσιμες ποσότητες βρίσκονται παγκοσμίως σε καθοδική πορεία.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MIKE SHE

5.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) αποτελούν ένα αναλυτικό εργαλείο πληροφορικής με κύρια λειτουργία την χωρική συσχέτιση των γεωγραφικών οντοτήτων. Η αποθήκευση των χαρτών δεν γίνεται με τη συμβατική έννοια, ούτε με την αποθήκευση μιας συγκεκριμένης εικόνας ή άποψης του γεωγραφικού χώρου. Αντίθετα η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί μία θεματική ενότητα που θα χρησιμεύσει σε συγκεκριμένους σκοπούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ESRI ArcGISDesktop 9.1 που παρέχει πολυάριθμες εφαρμογές όσον αφορά στον προσδιορισμό γεωγραφικών και περιγραφικών δεδομένων και ειδικότερα εφαρμογών σχετικά με την υδρολογία. Το ArcMap, που αποτελεί την κεντρική εφαρμογή για την εισαγωγή των δεδομένων στο περιβάλλον του GIS, δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν χάρτες από επίπεδα χωρικής πληροφορίας, να αναλυθούν χωρικές σχέσεις και να επιλεγούν μέσα από αναζητήσεις χωρικά και μη χωρικά στοιχεία (Κουτσόπουλος και Ανδρουλάκης, 2005).

Αναλυτικότερα, κάθε έκδοση του ArcGIS Desktop περιέχει τις εξής τρεις βασικές εφαρμογές:

- Arc Map

Περιέχει πληθώρα εργαλείων για την κατασκευή διαγραμμάτων και γραφικών, σε συνδυασμό με εργαλεία για τη δημιουργία και την επεξεργασία νέων χωρικών οντοτήτων, καθώς και ένα πλήρες πρόγραμμα δημιουργίας αναφορών. Αποτελεί το περιβάλλον επεξεργασίας δεδομένων, δημιουργίας και εξαγωγής υψηλής ποιότητας χαρτοσυνθέσεων και προϊόντων εκτύπωσης.

- Arc Catalog

Αποτελεί την εφαρμογή που επιτρέπει τη διαχείριση των αρχείων στα οποία είναι αποθηκευμένα τα χωρικά και περιγραφικά δεδομένα. Με τον ArcCatalog μπορούμε να παρακολουθήσουμε με διαφορετικούς τρόπους (μικρό-εικόνες, λεπτομέρειες κτλ) το περιεχόμενο των καταλόγων στους οποίους έχουμε αποθηκεύσει τα γεωγραφικά μας αρχεία. Έχουμε την δυνατότητα να λάβουμε άμεσα μια προεπισκόπηση των χωρικών και περιγραφικών στοιχείων των αρχείων μας, ή να δημιουργήσουμε και να επεξεργαστούμε τα μετά-δεδομένα που συνδέονται με τα αρχεία αυτά.

- Arc Toolbox

Ένα πλήρες περιβάλλον για την εκτέλεση γεωγραφικών επεξεργασιών και χωρικών αναλύσεων, για τη μετατροπή δεδομένων από έναν τύπο δεδομένων σε έναν άλλο και για τη διαχείριση των δεδομένων σε ότι αφορά στο σύστημα συντεταγμένων τους, την τοπολογία κτλ.

Επίσης εκτός των βασικών εφαρμογών του ArcGIS υπάρχει μια σειρά από προαιρετικά εργαλεία όπως:

- Spatial Analyst
- 3D Analyst
- Geostatistical Analysis
- Arc Press

5.1.1 Διαχείριση Υδατικών Πόρων και ΓΣΠ

Η διαχείριση Υδατικών Πόρων απαιτεί μια καλή κατανόηση των γεωγραφικών και χωρικών πληροφοριών όπως οι πηγές ύδατος, το ανάγλυφο του εδάφους, ο υδροκρίτης, η κάλυψη και η χρήση του εδάφους, οι βροχοπτώσεις, η θερμοκρασία, η υγρασία, η εδαφολογική σύνθεση, η γεωλογία και οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Η ακριβής γνώση του ανάγλυφου βοηθά να καταλάβουμε και να διαμορφώσουμε τις περισσότερες υδρολογικές διαδικασίες. Τα δεδομένα που εισάγονται στα ΓΣΠ ανάλογα με το περιεχόμενό τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

A) Τα χωρικά δεδομένα τα οποία διατίθενται με ολοένα αυξημένους ρυθμούς σε ψηφιακή μορφή. Τα δεδομένα αυτά είναι συνήθως διαθέσιμα από κυβερνητικές υπηρεσίας (ΓΥΣ, ΙΓΜΕ). Η χωρική πληροφορία συνήθως αναπαρίσταται από σημεία (π.χ. γεωτρήσεις, δέντρα), από γραμμές (π.χ. ποτάμια) και από πολύγωνα (περιοχές). Ένα από τα πιο κοινά ψηφιακά αρχεία είναι το ανάγλυφο του εδάφους ή αλλιώς ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).

Τα ΨΜΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένο εισόδου από το οποίο προκύπτουν:

- οι λεκάνες απορροής
- το υδρογραφικό δίκτυο
- οι κλίσεις των πρανών
- τα υψόμετρα

Με βάση τα παραπάνω μπορούν στη συνέχεια να προσδιοριστούν οι περιοχές στις οποίες έχουν εκδηλωθεί φαινόμενα κατολισθήσεων, να προβλεφθούν οι περιοχές με λιμνάζοντα νερά ή να χαραχθούν οι αντιπλημμυρικές ζώνες.

B) Τα μη χωρικά δεδομένα που περιγράφουν τις ιδιότητες των αντικειμένων. Παραδείγματος χάριν, ένα μη χωρικό δεδομένο που σχετίζεται με ένα ποτάμι μπορεί να είναι το όνομα του, το πλάτος του, το μήκος του, κ.τ.λ. Τα μη χωρικά δεδομένα αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων ξεχωριστά από το γραφικό τμήμα του χάρτη. Τα λογισμικά πακέτα του GIS διατηρούν εσωτερικούς δεσμούς κάθε γραφικής οντότητας του χάρτη με τη γραφική πληροφορία (Καρατζάς και Κουργιαλάς, 2011).

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MIKE SHE

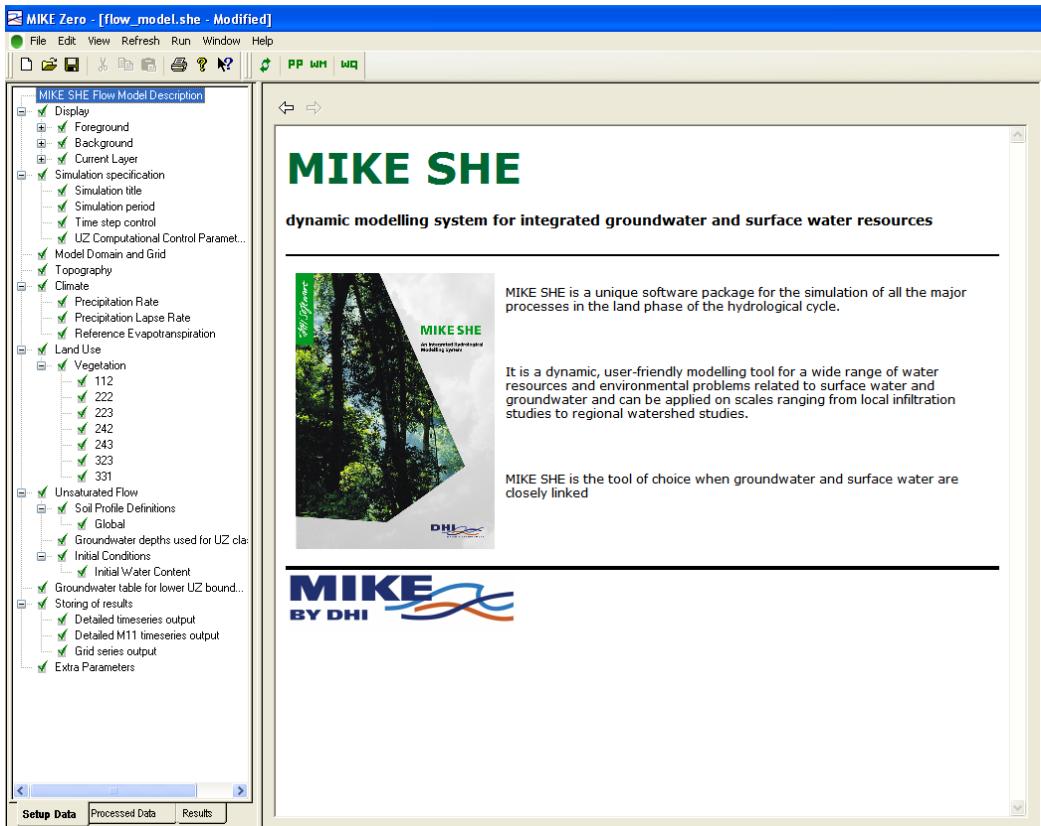
Το ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE έχει σχεδιαστεί για να είναι απόλυτα συμβατό με τα αρχεία του ArcGIS. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα το ArcGIS έχει την δυνατότητα να δημιουργεί σχηματικά αρχεία με την κατάληξη .shp (shape files). Ο τύπος του shape file εξαρτάται από το είδος 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):

- ✓ Λεκάνη απορροής
- ✓ Γεωλογικοί – Εδαφικοί σχηματισμοί
- ✓ Σημεία δειγματοληψίας
- ✓ Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).
- ✓ Χρήσεις γης
- ✓ Βάθους υδροφόρου ορίζοντα

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. Τα δεδομένα τα οποία εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE μέσω του MIKE Zero μπορεί να είναι συνδυασμός στατικών και δυναμικών δεδομένων καθώς επίσης χωρικών και μη χωρικών δεδομένων. Τα δεδομένα εισόδου μπορεί να είναι σε μορφή γραμμικών αρχείων - shape file (*.shp), σε μορφή κάνναβου – raster (*.dfs2, *.dfs3) και σε μορφή αρχείων χρονοσειρών (*.dfs0), (Κουργιαλάς, 2010).

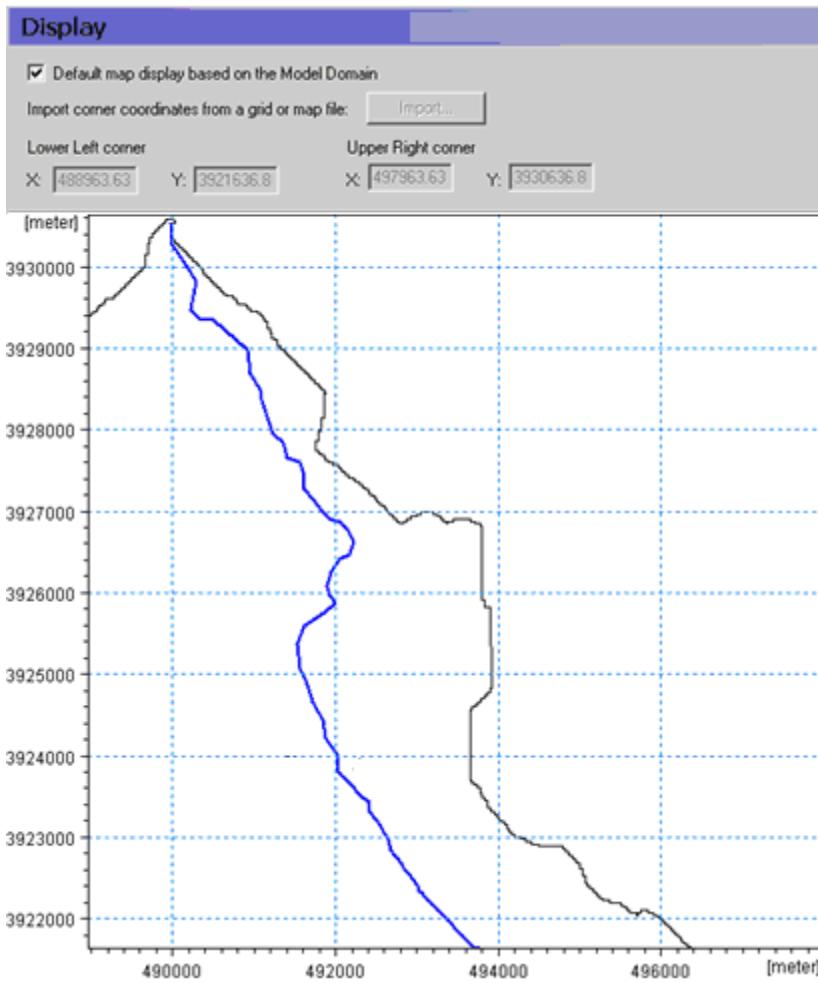
Το περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Στην αριστερή πλευρά της συγκεκριμένης εικόνας βλέπουμε χαρακτηριστικά την περιοχή διαχείρισης των δεδομένων εισόδου σε μορφή δενδρώδους διαγράμματος. Στη δεξιά πλευρά της ίδια εικόνας, γίνεται βήμα προς βήμα η επεξεργασία των δεδομένων που επιλέγουμε από το δενδρώδες διάγραμμα των δεδομένων εισόδου.



Εικόνα 5.1: Περιβάλλον εργασίας του MIKE SHE.

5.2.1 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 5.2, η οποία περιγράφει έναν βασικό χάρτη υποβάθρου (background map) για την περιοχή μελέτης, όπου η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη αντιστοιχεί στην μαύρη κλειστή γραμμή, ενώ η μπλε γραμμική απεικόνιση περιγράφει τον κύριο ρού του ποταμού Κερίτη.



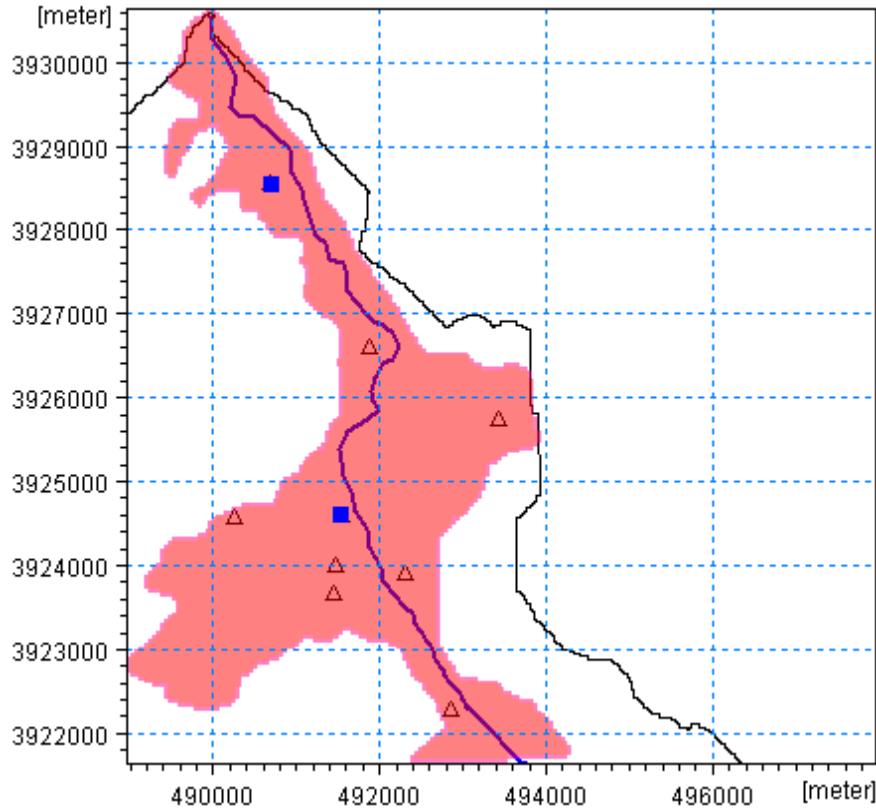
Εικόνα 5.2: Χάρτης υποβάθρου.

5.2.2 Περιοχή προσομοίωσης (Model Domain) και σημεία δειγματοληψίας

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα από όλη τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη έχει επιλεχθεί να μελετηθεί η κατάντη προσχωματική περιοχή (Π1), διότι αυτή παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, όσον αφορά την μελέτη της ροής στην ακόρεστη ζώνη, καθώς η συγκεκριμένη περιοχή είναι έντονα αγροτική με σημαντικές εκτάσεις εσπεριδοειδών. Με βάση τα παραπάνω δημιουργείται ο κάνναβος (Model Domain) όπου θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για την επιλεχθείσα περιοχή μελέτης (Εικόνα 5.3).

Στην συγκριμένη περιοχή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου όσον αφορά στο ποσοστό εδαφικής υγρασίας σε 9 διαφορετικά σημεία (Εικόνα 5.3), στην παρούσα όμως εργασία και για τις απαιτήσεις της βαθμονόμησης του μοντέλου θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τις μετρήσεις από 2 σημεία-τοποθεσίες (Αλικιανός και

Πλατανιάς), καθώς τα συγκριμένα σημεία είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά της μελετώμενης προσχωματικής περιοχής και επιπλέον στα συγκεκριμένα σημεία είχαμε τον μεγαλύτερο όγκο δεδομένων. Τα 2 αυτά επιλεχθέντα σημεία φαίνονται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5.3 με μπλε χρωματισμό.



Εικόνα 5.3: Model Domain – περιοχή προσομοίωσης (προσχωματική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη) και τα σημεία δειγματοληψίας.

5.2.3 Παράμετροι της προσομοίωσης

Το MIKE SHE επιτρέπει την προσομοίωση των συνόλου των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου, συμπεριλαμβάνοντας στην κίνηση του νερού τα εξής:

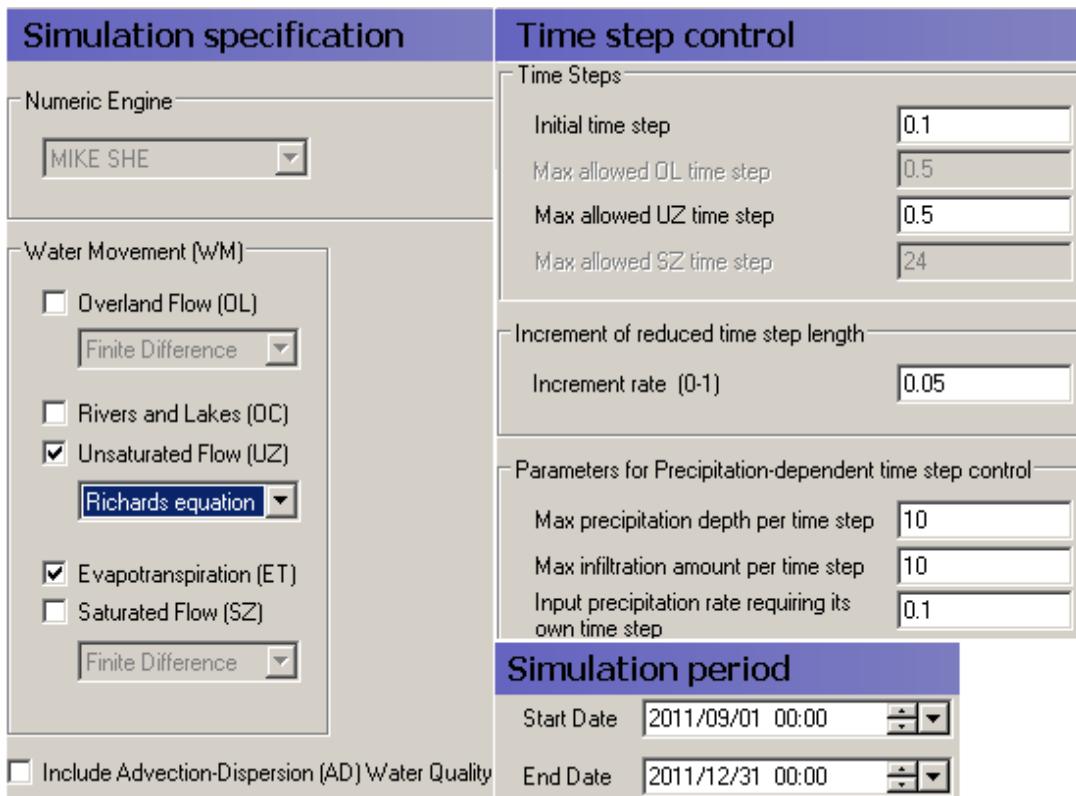
- Επιφανειακή απορροή
- Ροή σε ποτάμια και λίμνες
- Ροή στην ακόρεστη ζώνη
- Εξατμισοδιαπνοή
- Ροή στην κορεσμένη ζώνη

Στη παρούσα εργασία, προκειμένου να προσομοιώσουμε την ροή στην ακόρεστη ζώνη επιλέγουμε τα παρακάτω υπομοντέλα προσομοίωσης του μοντέλου MIKE SHE:

1. Ροή στην ακόρεστη ζώνη (UZ), με χρήση της Richards Equation
2. Εξατμισοδιαπνοή (ET)

Στη συνέχεια καθορίστηκαν διάφορες επιμέρους παράμετροι προσομοίωσης όπως η περίοδος προσομοίωσης, το χρονικό βήμα κλπ. (Εικόνα 5.4).

Επιλέγουμε σχετικά μικρό χρονικό βήμα, ώστε να έχουμε από την μία πιο σταθερή αριθμητική λύση και από την άλλη να μην αυξήσουμε υπερβολικά τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης.

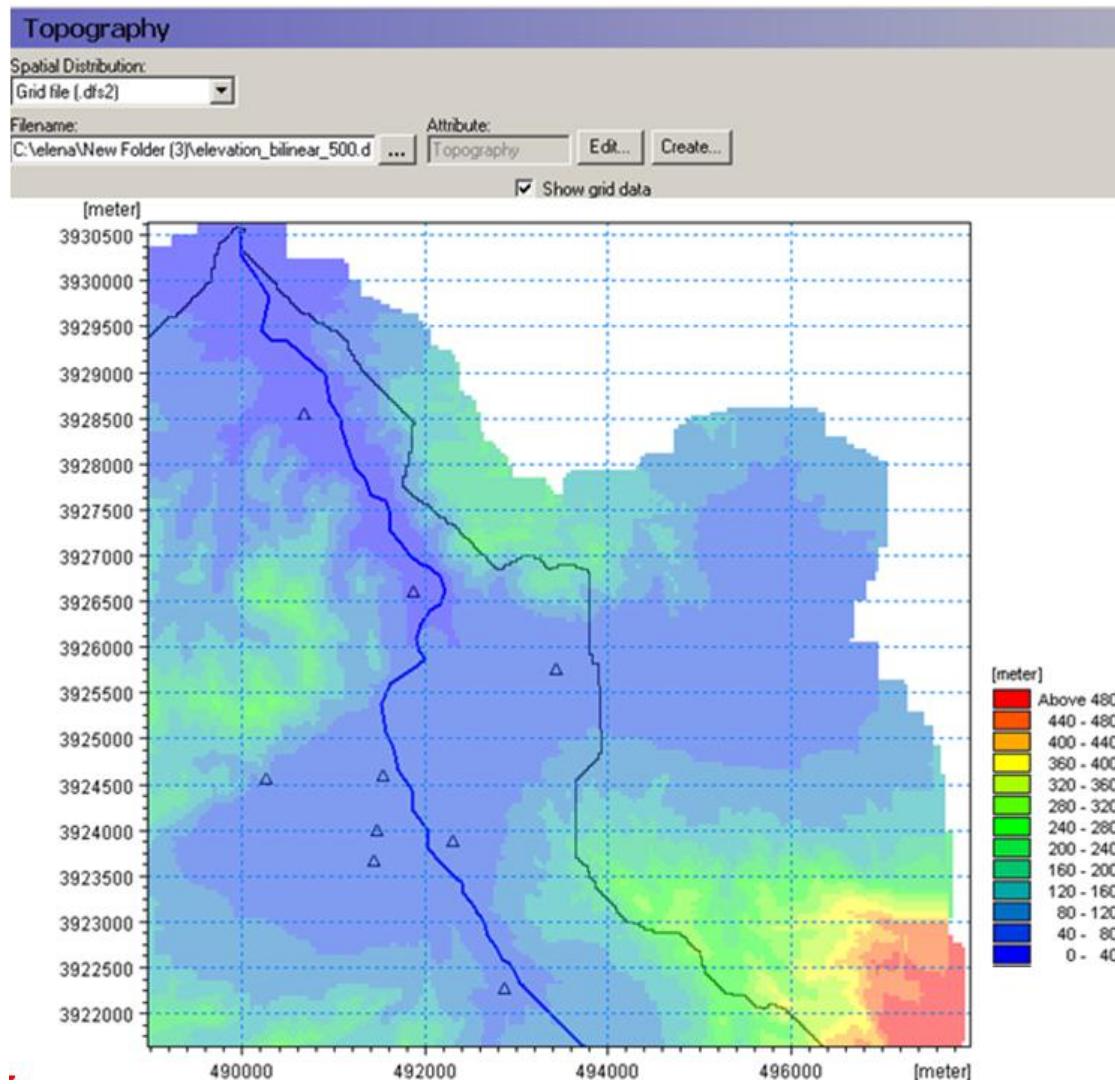


Εικόνα 5.4: Προσδιορισμός των παραμέτρων της προσομοίωσης (διεργασίες, χρονικό βήμα και περίοδος προσομοίωσης).

5.2.4 Τοπογραφία (Topography)

Μετά τον καθορισμό των παραπάνω παραμέτρων προσομοίωσης εισάγεται στο μοντέλο μας ένα shapefile που περιέχει τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής. Το συγκεκριμένο shapefile προέκυψε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και χρησιμοποιείται για να αναπαρασταθεί το ανάγλυφο της περιοχής. Το αρχείο shapefile με τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης μετατρέπεται σε αρχείο μορφής

κανάβου (.dfs2) (Εικόνα 5.5) και έτσι σε κάθε σημείο του δημιουργούμενου αρχείου μορφής raster βλέπουμε το απόλυτο υψόμετρο. Παρατηρούμε έτσι ότι η διακύμανση των υψομέτρων στην περιοχή προσομοίωσης (Model Domain) κινείται από 0-120 m.



Εικόνα 5.5: Υψομετρικός χάρτης μορφής (.dfs2).

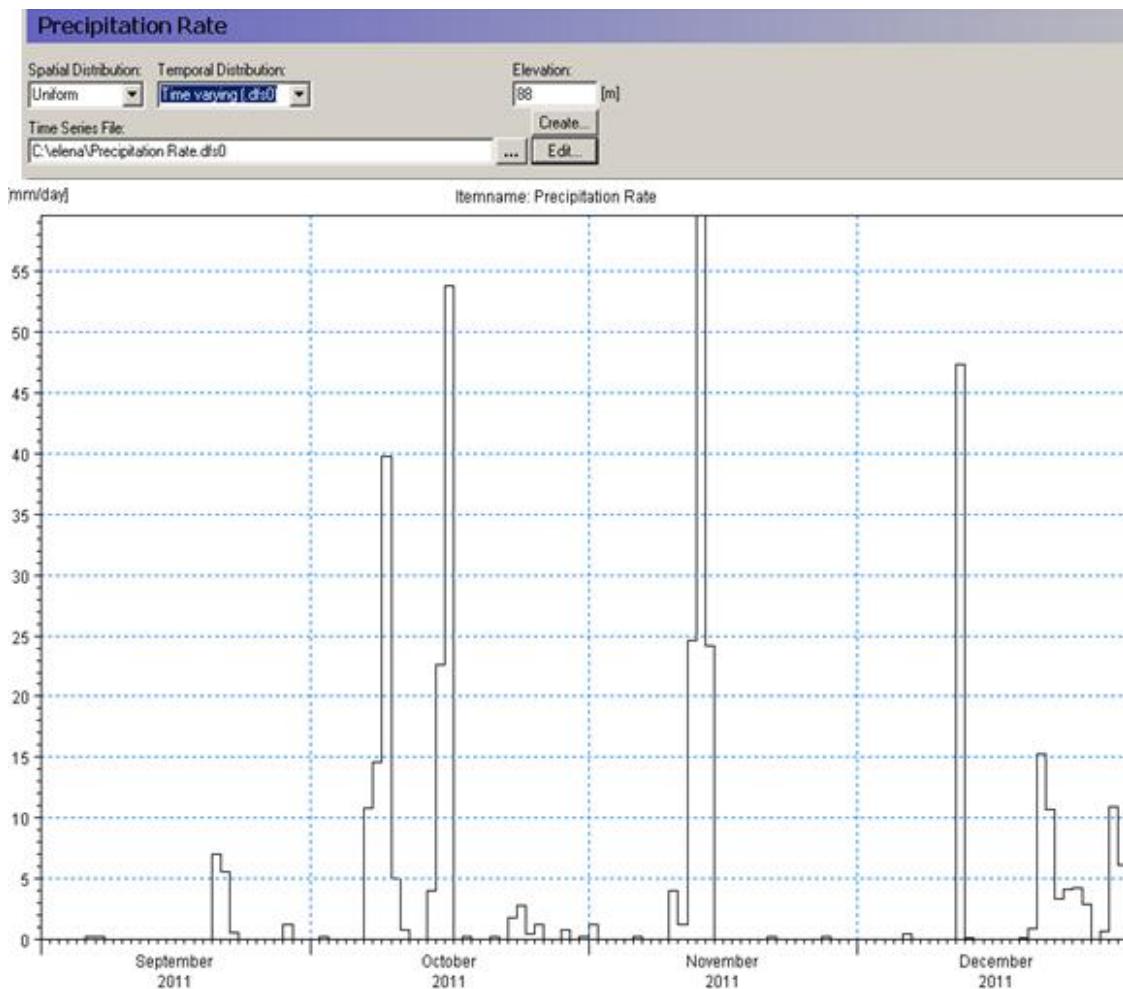
5.2.5 Βροχόπτωση (Precipitation)

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή της βροχόπτωσης. Στην ρουτίνα προσομοίωσης της βροχόπτωσης υπάρχουν 3 πεδία που πρέπει να προσδιοριστούν:

- Ο ρυθμός βροχόπτωσης (Precipitation Rate)
- Ο συντελεστής βροχοβαθμίδας (Precipitation Lapse Rate)
- Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (Crop Reference Evapotranspiration)

➤ Precipitation Rate

Τα δεδομένα της βροχόπτωσης τα οποία χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα προσομοίωση προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού. Ο σταθμός του Αλικιανού (Lat 35.45 και Lon 23.91) βρίσκεται σε υψόμετρο 88 m, και είναι υπό την εποπτεία του Ινστιτούτου Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων το οποίο ανήκει στο Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ). Τα δεδομένα βροχόπτωσης τα οποία μας παραχωρήθηκαν από το ΕΘΙΑΓΕ αντιστοιχούσαν στο χρόνο προσομοίωσης του μοντέλου μας, 4 μήνες (Σεπτέμβριος-Δεκέμβριος 2011), με χρονικό βήμα ημερήσιο (mm/day). Τα δεδομένα βροχής εισάγονται μέσα στο μοντέλο σε μορφή αρχείου (.dfs0), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα βροχόπτωσης.

➤ Precipitation Lapse Rate

Για να προσαρμόσουμε το ύψος της βροχής σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης, χρησιμοποιούμε την εξίσωση της βροχοβαθμίδας για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη, με βάση την οποία δημιουργείται ο βροχομετρικός χάρτης της περιοχής. Η μαθηματική σχέση που συνδέει το υψόμετρο με το ύψος της βροχής είναι μία εξίσωση πρώτου βαθμού, της μορφής $y = ax + b$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το απόλυτο υψόμετρο των σταθμών και εξαρτημένη μεταβλητή το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της σχέσης αυτής γίνεται με τον υπολογισμό του συντελεστή προσαρμογής R των δύο μεγεθών, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η σχέση αυτή θεωρείται ικανοποιητική εφόσον ο συντελεστής προσαρμογής (R^2) είναι μεγαλύτερος από 0.8 (Coulibaly and Baldwin, 2005).

Στην περίπτωση μας δεδομένα που αφορούν την εξίσωση της βροχοβαθμίδας για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη και η τιμή του αντίστοιχου συντελεστή προσαρμογής (R^2) προήλθε από το «Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά» (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Με βάση την εξίσωση της βροχοβαθμίδας για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, ο συντελεστής Precipitation Lapse Rate καθορίζεται στην τιμή 0,8385.

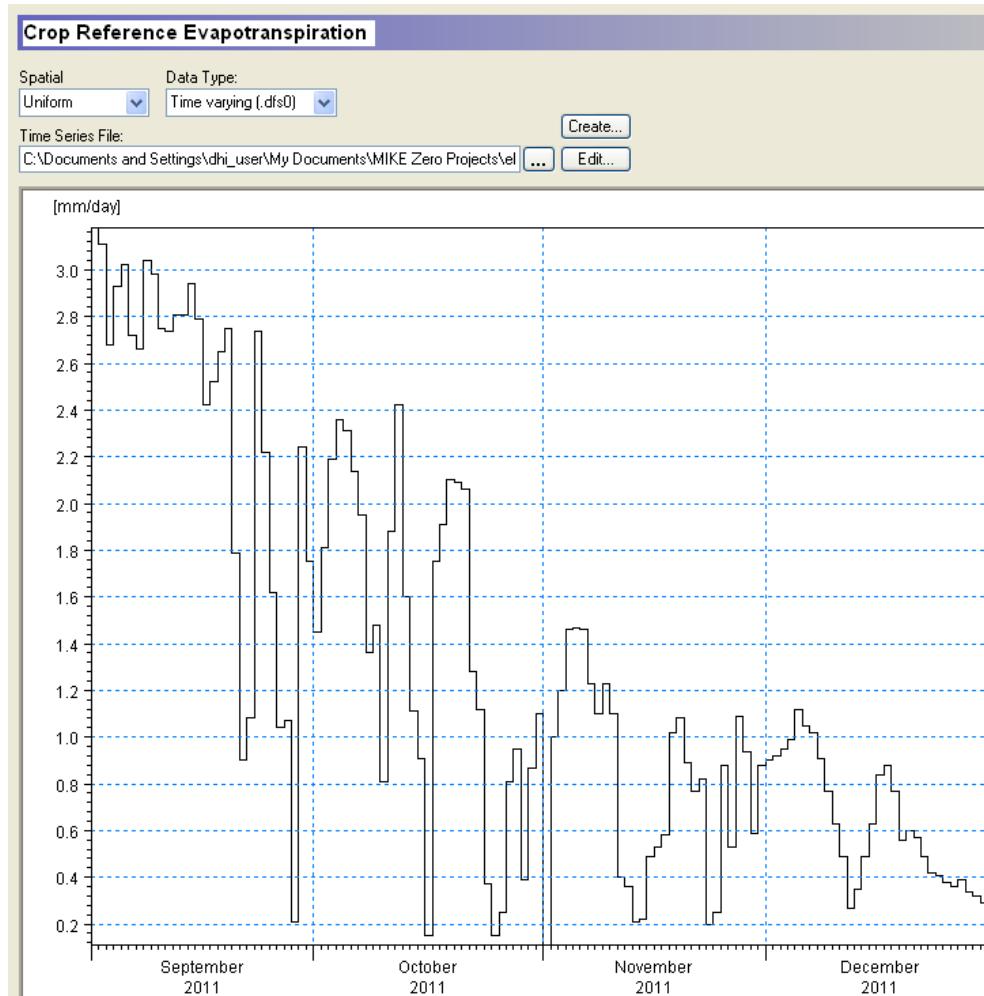
➤ Crop Reference Evapotranspiration

Χρησιμοποιώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό του Αλικιανού και πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o για το χρόνο της προσομοίωσης προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Crop Reference Evapotranspiration) ET. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET είναι δυνατό να προσδιοριστεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Τσακίρης, 1995):

$$ET = k_c \cdot ET_o \quad (5.1)$$

Ο φυτικός συντελεστής (k_c) στην παραπάνω εξίσωση εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας και κυμαίνεται από 0,1 έως 1,2. Ο συγκεκριμένος συντελεστής μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου. Στην περίπτωσή μας λαμβάνοντας υπόψη ότι στην περιοχή προσομοίωσης η κυρίαρχη καλλιέργεια είναι αυτή των εσπεριδοειδών, ο συντελεστής K_c καθορίστηκε σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές στην τιμή 0,7. [Πηγή: FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY (Irrigation water management, Irrigation water needs), <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>]. Με βάση τα παραπάνω εισάγονται οι τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ET, για το

χρονικό διάστημα των τεσσάρων μηνών της προσομοίωσης, στο μοντέλο σε μορφή αρχείου (.dfs0), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7: Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας.

5.2.6 Χρήσεις γης (Land Use)

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο εισόδου στο μοντέλο μας είναι ο καθορισμός των χρήσεων γης στην περιοχή προσομοίωσης. Οι χρήσεις γης χρησιμεύουν για να καθοριστούν τα στοιχεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους και επηρεάζουν καταλυτικά την επιφανειακή απορροή και τη ροή στην ακόρεστη ζώνη. Η συγκεκριμένη ρουτίνα προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE SHE έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της τυχόν άρδευσης και των αντίστοιχων πρακτικών άρδευσης για την κάθε μελετώμενη καλλιέργεια. Στην περιοχή μελέτης και για την περίοδο προσομοίωσης των τεσσάρων μηνών (Σεπτέμβριο έως Δεκέμβριο 2011) στις συνήθεις γεωργικές πρακτικές δεν εντάσσεται η άρδευση των καλλιεργειών (εσπεριδοειδή) οπότε στην παρούσα προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη.

Οι χρήσεις γης καθορίστηκαν από το Corine 2000. Έτσι στην περιοχή προσομοίωσης η χρήση γης που κυριαρχεί είναι αυτή των εσπεριδοειδών με κωδικό (222), (Εικόνα 5.8). Οι υπόλοιπες εκτάσεις της περιοχής προσομοίωσης καλύπτονται από τις ακόλουθες χρήσεις γης με τους αντίστοιχους κωδικούς:

- 112 – Ασυνεχής αστικός ιστός
- 223 – Ελαιώνες
- 242 – Συμπλέγματα καλλιεργειών
- 243 – Φυσική βλάστηση
- 321 – Βοσκοτόπια
- 323 – Σκληρόφυλλη βλάστηση
- 331 – Παραλίες και αμμώδεις εκτάσεις

Στην συγκριμένη ρουτίνα προσομοίωσης καθορίστηκαν οι παρακάτω 2 συντελεστές των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κάθε χρήσης γης (Εικόνα 5.9):

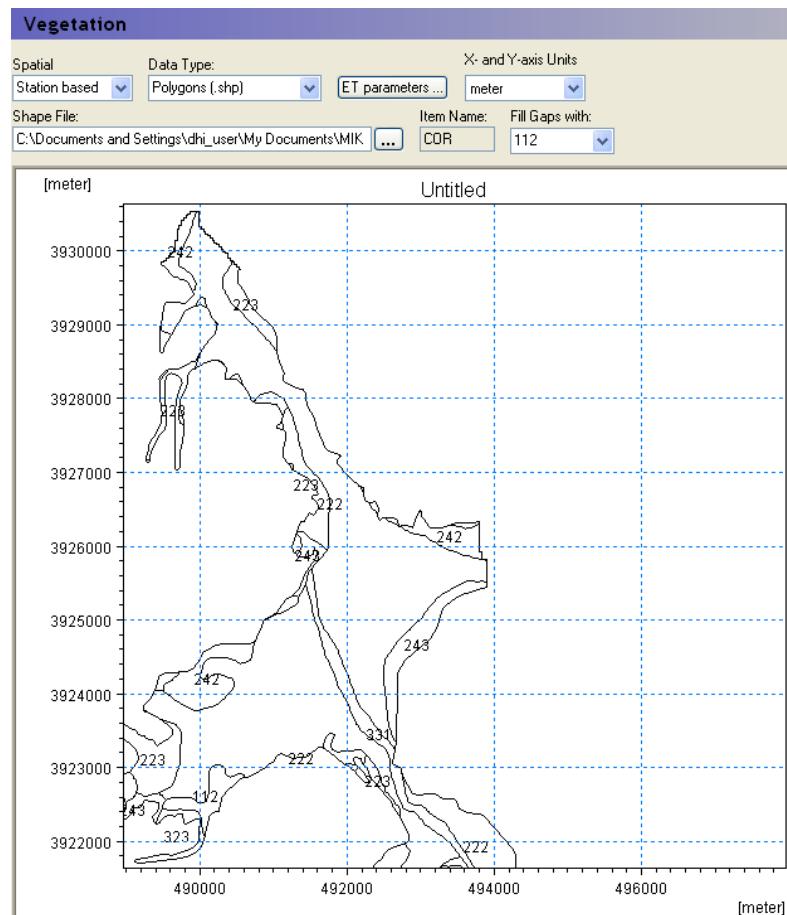
- **RD: Rooting Depth**

Ο συντελεστής RD περιγράφει το βάθος του ριζικού συστήματος για την κάθε χρήση γης. Για μονοετείς καλλιέργειες ο συντελεστής αυτός έχει διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή, και τα αντίστοιχα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας. Για πολυετείς καλλιέργειες όπως είναι στην περίπτωσή μας τα εσπεριδοειδή, επιλέξαμε να είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

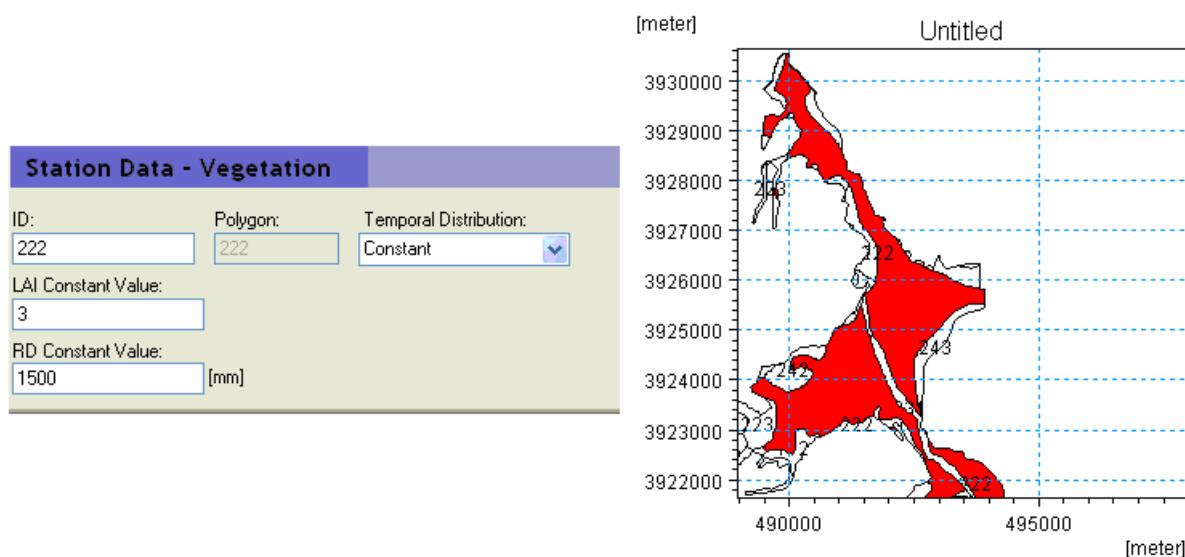
Για την περίπτωση της χρήσης γης των εσπεριδοειδή, η τιμή του συντελεστή RD καθορίστηκε στην τιμή των 1500mm (Εικόνα 5.9).

- **LAI: Leaf Area Index**

Ο δείκτης LAI (δείκτης φυλλικής επιφάνειας) είναι μέτρο του ποσοστού της κάλυψης του εδάφους με φύλλωμα. Θεωρείται ως μια σημαντική παράμετρος για την παρακολούθηση και μοντελοποίηση της αύξησης διάφορων οικοσυστημάτων και σχετίζεται με μια σειρά από φυσιολογικές διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση, διαπνοή, εξάτμιση (Pierce και Running 1988) και την καθαρή πρωτογενή παραγωγή (Monteith 1972). Η διακύμανση του συγκεκριμένου συντελεστή προσδιορίζεται μεταξύ των τιμών 0-7 (Mike She User Manual, 2007). Με την τιμή του συντελεστή ίση με 7 για χρήσεις γης με πολύ μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας όπως δασικές εκτάσεις. Στην περίπτωση των εσπεριδοειδών ο συντελεστής αυτός προσδιορίστηκε στην τιμή 3 (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση των χρήσεων γης στην περιοχή προσομοίωσης.



Εικόνα 5.9: Χωρική κατανομή των εσπεριδοειδών στην περιοχή προσομοίωσης και προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας.

5.2.7 Ροή στην ακόρεστη ζώνη (Unsaturated Flow)

Όπως έχει προαναφερθεί, η προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη θα γίνει με τη χρήση της εξίσωσης Richards.

Στην ενότητα της ακόρεστης ζώνης, υπάρχουν 2 κύρια πεδία που πρέπει να προσδιοριστούν:

- Καθορισμός του εδαφικού προφίλ (Soil profile definitions)
- Αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας (Initial conditions)

Καθορισμός του εδαφικού προφίλ (Soil profile definitions)

Το πρώτο βήμα για τον καθορισμό του εδαφικού προφίλ είναι ο διαχωρισμός της ακόρεστης εδαφικής ζώνης σε διαστρωματώσεις με τις ίδιες ή διαφορετικές εδαφικές ιδιότητες-χαρακτηριστικά (Εικόνα 5.10).

UZ Soil Profile Definition				
Profile ID:	Global			
Soil Profile:				
	From depth	To depth	Soil name	UZ Soil property file
1	0	0.2	1	C:\elena\UzSoilProp1.uzs
2	0.2	1	1	C:\elena\UzSoilProp2.uzs
3	1	12	1	C:\elena\UzSoilProp3.uzs
Vertical Discretization:				
	From depth	To depth	Cell height	No of cells
1	0	0.2	0.1	2
2	0.2	1	0.2	4
3	1	6	0.5	10
4	6	12	0.5	12

Εικόνα 5.10: Εδαφικό προφίλ.

Σύμφωνα με εδαφικούς χάρτες και δεδομένα στάθμης υπογείων υδάτων στην περιοχή προσομοίωσης το βάθος της ακόρεστης ζώνης φτάνει μέχρι και τα 12 μέτρα από την εδαφική επιφάνεια. Σύμφωνα με τα παραπάνω χωρίζουμε την ακόρεστη ζώνη σε 3 στρώματα (Εικόνα 5.10 & Πίνακας 5.1). Τα εδαφικά βάθη για κάθε ένα από τα 3 στρώματα φαίνονται χαρακτηριστικά στον Πίνακα 5.1. Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου διαχωρισμού ήταν:

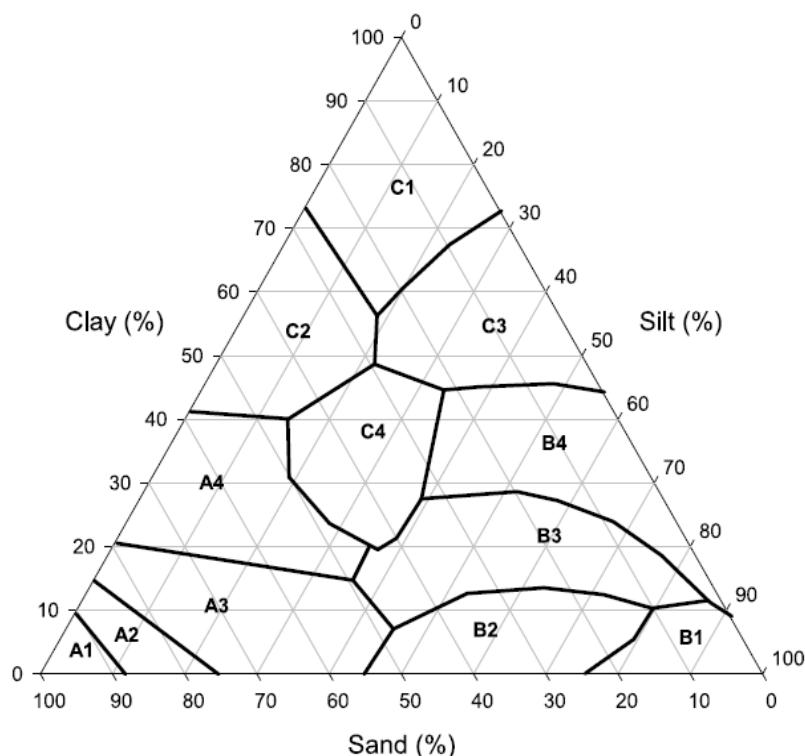
A) Η αλλαγή του συντελεστή της φαινόμενης πυκνότητας (bulk density) με το εδαφικό βάθος. Η φαινόμενη πυκνότητα είναι ένα μέτρο του βάρους του εδάφους ανά μονάδα όγκου. Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας είναι μικρότερη στα ανώτερα στρώματα της ακόρεστης ζώνης και μεγαλώνει με το βάθος λόγω της συμπίεσης.

B) Η κάθετη διακριτοποίηση του εδαφικού βάθους έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα ανώτερα στρώματα της ακόρεστης ζώνης, όπου έχουμε και τις πιο σημαντικές μεταβολές στην ροή.

Πίνακας 5.1: Φαινόμενη πυκνότητα σε σχέση με το βάθος της ακόρεστης ζώνης & βάθος στρωμάτων.

Βάθος ακόρεστης ζώνης (m)	Bulk Density (kg/m ³)
0 έως 0.2	1350
0.2 έως 1	1500
1 έως 12	1800

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Van Genuchten, για τον σχεδιασμό της καμπύλης διατήρησης της καμπύλης υγρασίας εδάφους vs υδραυλικού ύψους και της καμπύλης υδραυλικής αγωγιμότητας vs υδραυλικού ύψους. Για να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους οι οποίες είναι απαραίτητες για τη χρήση της εξίσωσης Van Genuchten, πρέπει να γνωρίζουμε τη σύσταση του εδάφους η οποία καθορίζεται κατά την διάρκεια κοκκομετρικών αναλύσεων από τις σχετικές αναλογίες άμμου, υλούς και αργίλου. Στο παρακάτω τριγωνικό διάγραμμα φαίνεται η ταξινόμηση των εδαφών σε 12 κατηγορίες, με βάση την σύστασή τους (Εικόνα 5.12), (Navin et al., 2010).



Εικόνα 5.11: Τριγωνικό διάγραμμα σύστασης εδαφών με 12 κατηγορίες (Navin et al,2010).

Μια μέση τιμή ποσοστιαίας εδαφικής σύστασης στην περιοχή προσομοίωσης (προσχωματική περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη) σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων (ΕΘΙΑΓΕ) είναι:

- 51.5% άμμος (sand)
- 33.9% πηλός (clay)
- 14.6% ιλύς (silt)

Σύμφωνα λοιπόν με τη μέση εδαφική σύσταση στην περιοχή προσομοίωσης σε συνδυασμό με την Εικόνα 5.12, το έδαφος μας ανήκει στην κατηγορία A4, η οποία περιγράφεται ως αμμώδης αργιλικός πηλός (sandy clay loam).

Με βάση την ταξινόμηση των εδαφών σε 12 κατηγορίες (Εικόνα 5.12), οι Navin et al., 2010, προσδιόρισαν μια μέση τιμή και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση των υδραυλικών παραμέτρων για κάθε ένα τύπο εδάφους. Με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι το έδαφος της περιοχής προσομοίωσης ανήκει στην κατηγορία A4, προσδιορίζονται οι τιμές των αντίστοιχων υδραυλικών παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την επίλυση της εξίσωσης Van Genuchten (Πίνακας 5.2, Εικόνα 5.12 & 5.34).

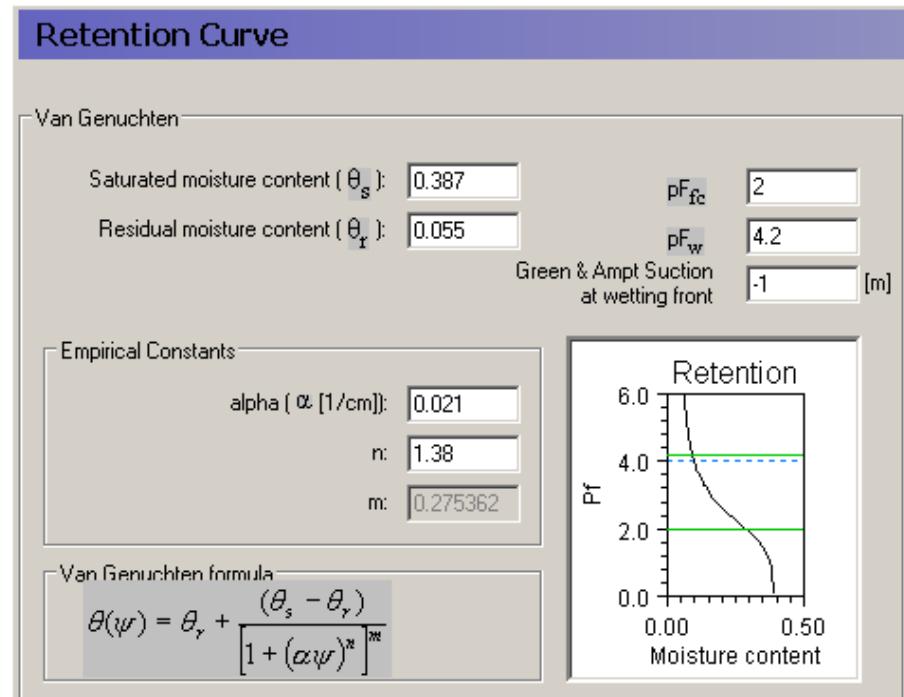
Οι παράμετροι αυτές είναι:

- θ_s = ογκομετρική περιεκτικότητα ύδατος (υγρασία) σε κατάσταση κορεσμού
- θ_r = ελάχιστη τιμή περιεκτικότητας ύδατος
- K_s = κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- m = παράμετρος που εκτιμάται από την καμπύλη εδάφους-ύδατος
- n = παράμετρος προσαρμογής, $n = 1/(1-m)$
- a = παράμετρος προσαρμογής

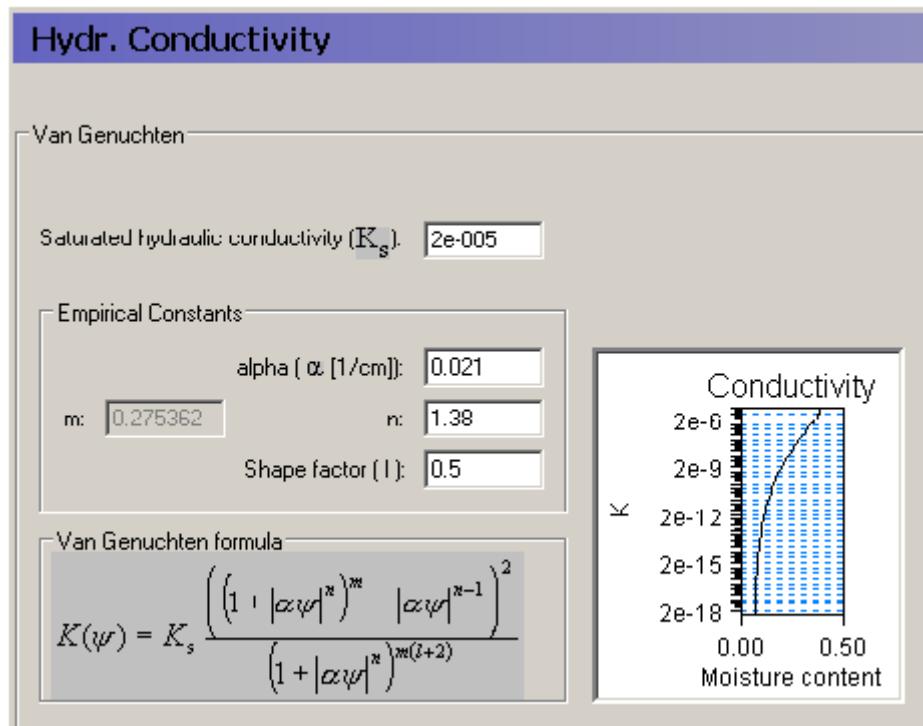
Πίνακας 5.2: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των υδραυλικών παραμέτρων για διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες (Navin et al., 2010).

Soil Hydraulic Class	θ_r	θ_s	$\log_{10}(a)$ in $\log_{10}(\text{cm}^{-1})$	$\log_{10}(n)$	$\log_{10}(K_s)$ in $\log_{10}(\text{cm/d})$
A1	0.055 (0.002)	0.374 (0.008)	-1.479 (0.036)	0.511 (0.06)	2.853 (0.544)
A2	0.053 (0.002)	0.386 (0.007)	-1.474 (0.076)	0.276 (0.055)	2.093 (0.696)
A3	0.051 (0.002)	0.382 (0.01)	-1.54 (0.176)	0.171 (0.015)	1.641 (0.659)
A4	0.055 (0.003)	0.387 (0.009)	-1.672 (0.183)	0.14 (0.019)	1.242 (0.764)
B1	0.057 (0.011)	0.487 (0.031)	-2.034 (0.045)	0.208 (0.009)	1.641 (0.273)
B2	0.053 (0.003)	0.425 (0.03)	-2.278 (0.124)	0.206 (0.024)	1.714 (0.594)
B3	0.056 (0.007)	0.413 (0.026)	-2.234 (0.193)	0.186 (0.021)	1.197 (0.757)
B4	0.073 (0.015)	0.47 (0.026)	-2.016 (0.141)	0.16 (0.024)	1.115 (0.805)
C1	0.072 (0.012)	0.475 (0.013)	-1.94 (0.07)	0.135 (0.01)	1.206 (0.11)
C2	0.091 (0.013)	0.436 (0.025)	-1.444 (0.174)	0.106 (0.008)	1.263 (0.649)
C3	0.069 (0.016)	0.5 (0.037)	-1.888 (0.057)	0.124 (0.01)	1.324 (0.972)
C4	0.064 (0.005)	0.421 (0.012)	-1.83 (0.068)	0.137 (0.017)	0.642 (1.09)

^aStandard deviations are given in parentheses.

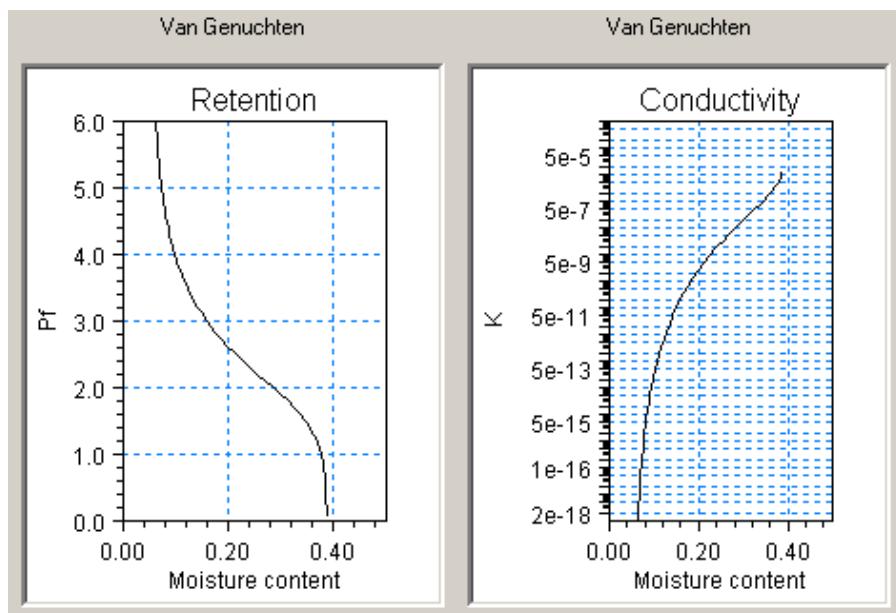


Εικόνα 5.12: Παράμετροι της εξίσωσης Van Genuchten (καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής πίεσης).



Εικόνα 5.13: Παράμετροι της εξίσωσης Van Genuchten (καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής αγωγιμότητας).

Προσδιορίζεται έτσι η αντίστοιχη καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής πίεσης και η καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής αγωγιμότητας (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-ύδατος για την περιοχή προσομοίωσης.

Με βάση την καμπύλη υγρασίας εδάφους vs υδραυλικής πίεσης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το περιεχόμενο της υγρασίας, το ύψος της πίεσης μειώνεται. Όταν το περιεχόμενο της υγρασίας πλησιάσει τη μέγιστη τιμή του, δηλαδή όταν $\theta=\theta_s$, τότε βρισκόμαστε στην κορεσμένη ζώνη και το ύψος της υδραυλικής πίεσης (pF) μειώνεται κατακόρυφα. Αντίθετα το υδραυλικό ύψος (ψ) αυξάνεται σημαντικά μιας και ισχύει η σχέση $pF = \log_{10}(-100\psi)$.

Με βάση την καμπύλη της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατηρούμε ότι όσο μικρότερο είναι το περιεχόμενο σε υγρασία (θ), τόσο μικρότερη είναι και η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (K). Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως στην ακόρεστη ζώνη η συνολική επιφάνεια που είναι διαθέσιμη για τη ροή μειώνεται καθώς οι πόροι γεμίζουν με αέρα και οι διαδρομές που ακολουθεί το νερό γίνονται πιο περίπλοκες. Γι' αυτόν τον λόγο, καθώς προχωράμε προς την κορεσμένη ζώνη, η υδραυλική αγωγιμότητα αυξάνεται σημαντικά.

Αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας (Initial Conditions)

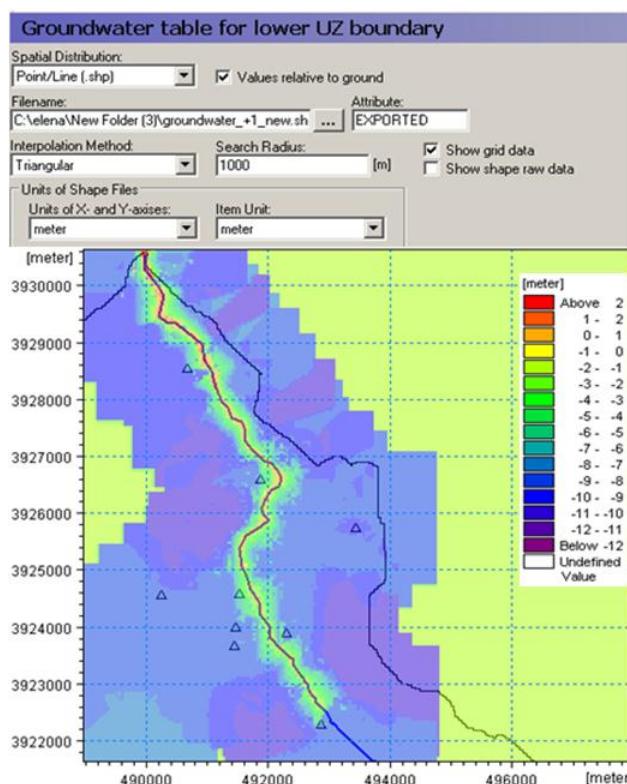
Θεωρούμε το αρχικό περιεχόμενο σε υγρασία ομοιόμορφο για όλη την περιοχή. Επειδή η περίοδος της προσομοίωσης ξεκινάει τον Σεπτέμβριο, η υγρασία του εδάφους είναι σχετικά χαμηλή, οπότε οι τιμές της αρχικής υγρασίας δύναται να κυμανθούν σε επίπεδα μεταξύ 0,12 έως 0,19. Το αρχικό περιεχόμενο της εδαφικής υγρασίας είναι μία από τις παραμέτρους του μοντέλου την οποία βαθμονομήσαμε,

διαδικασία με την οποία προέκυψε μια μέση τιμή αρχικής εδαφικής υγρασίας ίση με 0.16.

5.2.8 Υδροφόρος ορίζοντας (Groundwater table)

Ένα άλλο ιδιαίτερα σημαντικό αρχείο εισόδου στο μοντέλο μας είναι ο προσδιορισμός του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα. Σε αυτό το πεδίο παρέχονται πληροφορίες για το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα με τη μέθοδο της παρεμβολής (interpolation). Έχοντας ιστορικά δεδομένα μετρήσεων στάθμης από γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή της προσομοίωσης, με τη βοήθεια του GIS και της μεθόδου παρεμβολής (Triangular), δημιουργήσαμε ένα χάρτη προσδιορισμού του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.15, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα ποικίλει από 2 μέχρι και -12 μέτρα από την εδαφική επιφάνεια. Οι θετικές τιμές του βάθους του υδροφόρου υποδηλώνουν τα σημεία εντός του κύριου ρου του ποταμού Κερίτη που παρουσιάζουν μόνιμη επιφανειακή ροή. Στις παραποτάμιες περιοχές το βάθος του υδροφόρου ξεκινάει να γίνεται αρνητικό με τιμές κυματινόμενες από 0 έως -6. Καθώς απομακρυνόμαστε από το ποτάμι, ο υδροφόρος ορίζοντας βαθαίνει, φτάνοντας τελικά σε κάποια σημεία τα -12 μέτρα όπου συναντάμε την κορεσμένη ζώνη.



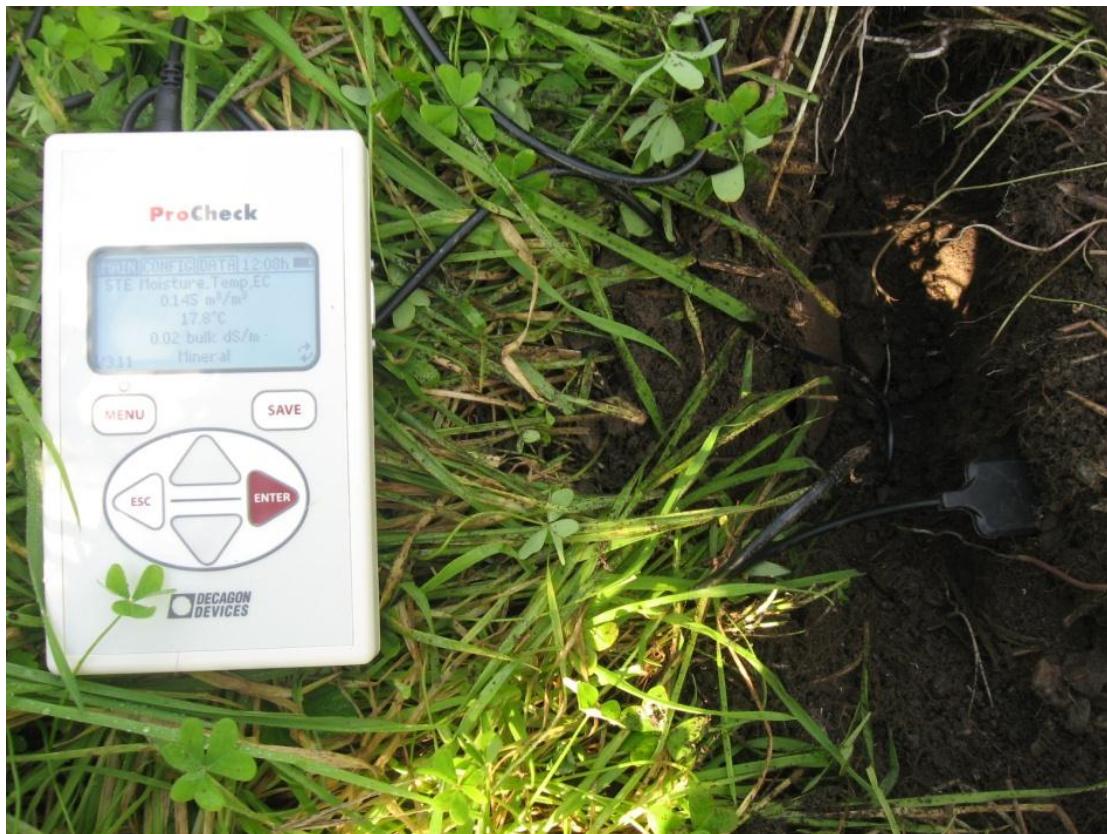
Εικόνα 5.15: Βάθος υδροφόρου ορίζοντα.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ & ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η βαθμονόμηση του μοντέλου MIKE SHE πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας που πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές του Αλικιανού και Πλατανιά, όπως περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 5.2.2. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μηνών από Νοέμβρη έως και Δεκέμβρη 2011. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της χωροχρονικής προσομοίωσης της εδαφικής υγρασίας στην περιοχή μελέτης.

Το όργανο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις (Εικόνα 6.1) είναι του οίκου Decagon και είναι ένας αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας, της αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας εδάφους και υποστρωμάτων. Ο αισθητήρας έχει υψηλή ακρίβεια και είναι σχεδιασμένος για ταυτόχρονη μέτρηση των παραπάνω παραμέτρων σε κάθε είδους εδαφικό υπόστρωμα.



Εικόνα 6.1: Διαδικασία μέτρησης της εδαφικής υγρασίας.



Εικόνα 6.2: Διαδικασία μέτρησης της εδαφικής υγρασίας & αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας, της αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας.

Η μέθοδος μέτρησης της υγρασίας είναι ηλεκτρομαγνητική, μέσω του προσδιορισμού της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Η περιοχή μέτρησης της υγρασίας είναι από εντελώς ξηρό έως κορεσμένο, έχοντας ακρίβεια 3% χωρίς βαθμονόμηση και 1-2% με βαθμονόμηση. Η περιοχή μέτρησης της αγωγιμότητας είναι από 0 έως 25dS/m, με ανάλυση 0.01 dS/m και ακρίβεια 10%, ενώ η περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από -40 έως +50°C, με ανάλυση 0.1°C και ακρίβεια 1°C. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου.

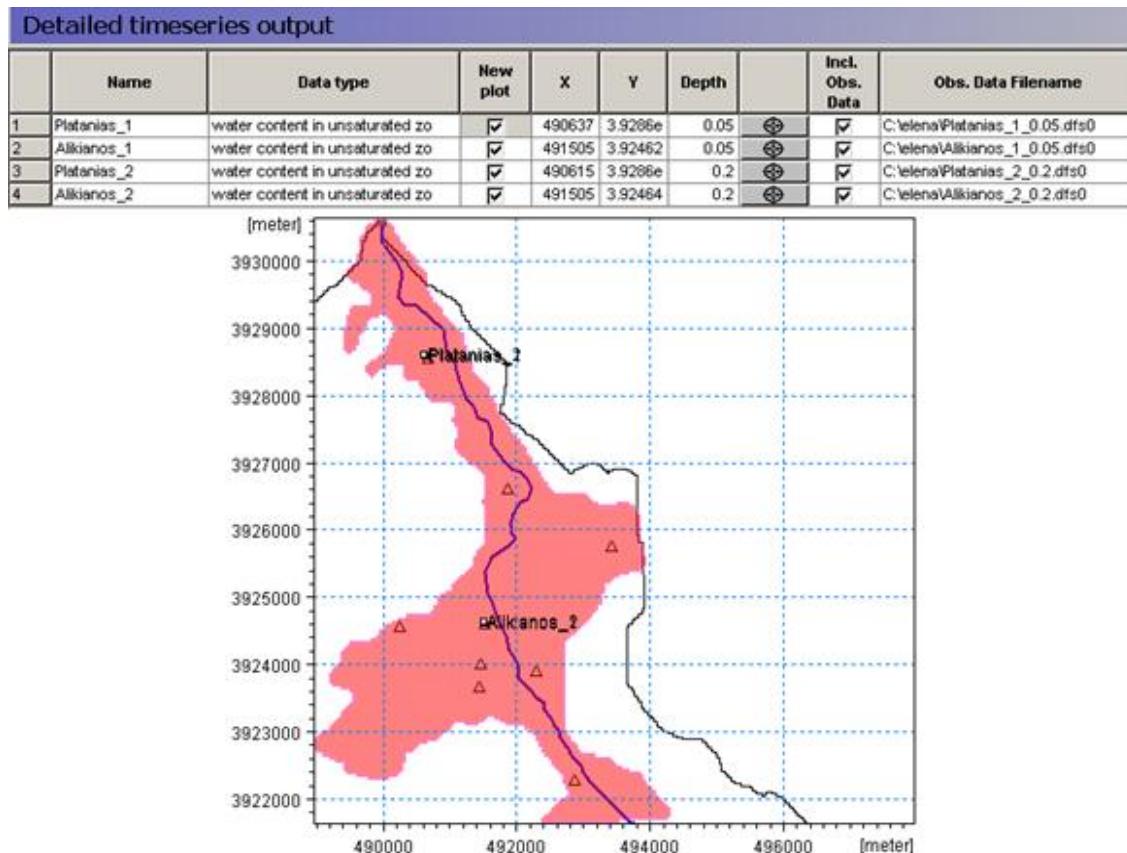
Διαστάσεις	10cm x 3.2cm x 0.7cm
Μήκος αισθητήριου τμήματος	5.2cm
Συχνότητα μέτρησης	70MHz
Χρόνος μέτρησης	150ms
Έξοδος	RS-232 ή SDI 12
Μήκος καλωδίου	5m
Μονάδες μέτρησης εδαφικής υγρασίας	m ³ /m ³
Μονάδες μέτρησης εδαφικής αγωγιμότητας	dS/m
Μονάδες μέτρησης εδαφικής θερμοκρασίας	°C

Η διαδικασία των μετρήσεων περιλαμβάνει τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας σε δύο διαφορετικά βάθη των 5 cm (επιφανειακό στρώμα) και των 20 cm και τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δύο διαφορετικές περιοχές του Αλικιανού και του Πλατανιά φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Μετρήσεις εδαφικής υγρασίας σε Αλικιανό και Πλατανιά

Σημεία \ Υγρασία	20/11/11		28/11/11		10/12/11		14/12/11		26/12/11	
	5 cm	20 cm								
Πλατανιάς	-	-	0.180	0.186	0.164	0.180	0.250	0.220	0.220	0.210
Αλικιανός	0.229	0.235	0.210	0.220	0.190	0.200	0.260	0.270	0.240	0.230

Το μοντέλο MIKE SHE μας επιτρέπει να κάνουμε εισαγωγή των χωροχρονικών δεδομένων- μετρήσεων εδαφικής υγρασίας για τα δύο διαφορετικά εδαφικά βάθη (5 και 20cm). Συγκεκριμένα, πάνω στην περιοχή προσομοίωσης 'στοχεύουμε' με την εισαγωγή των συντεταγμένων τα 2 σημεία δειγματοληψίας (Πλατανιάς και Αλικιανός) και δίνουμε τις τιμές των δεδομένων για το περιεχόμενο της υγρασίας στα δύο διαφορετικά εδαφικά βάθη (Εικόνα 6.3). Στη συνέχεια έχουμε την δυνατότητα μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης να συγκρίνουμε τις προσομοιωμένες τιμές της μοντελοποίησης όσον αφορά στην εδαφική υγρασία σε σχέση με τις παρατηρούμενες. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης παρουσιάζονται στο 7^ο Κεφάλαιο.



Εικόνα 6.3: Εισαγωγή των μετρήσεων εδαφικής υγρασίας στο MIKE SHE για να χρησιμοποιηθούν κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης.

Το επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης αφορά το τελικό «τρέξιμο» του μοντέλου. Στο περιβάλλον εργασίας MIKE Zero του μοντέλου MIKE SHE υπάρχει ένα σετ εικονιδίων το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του μοντέλου σε δύο επιμέρους στάδια:

1. *Το εικονίδιο PP ξεκινά την προεπεξεργασία και όλα τα δεδομένα του μοντέλου μετατρέπονται σε δυαδική μορφή. Αυτή η προεπεξεργασία των δεδομένων είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου.*

2. *Το εικονίδιο WM ξεκινά την τελική διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου.*

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου επιλέχθηκαν να βαθμονομηθούν λόγω της αυξημένης αβεβαιότητας στον ακριβή προσδιορισμό τους οι εξής τρεις παράμετροι:

- Ο συντελεστής (n) της εξίσωσης Van Genuchten
- Το αρχικό περιεχόμενο σε εδαφική υγρασία (Initial water content), και
- Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (k_s)

Οι τρεις άνωθεν παράμετροι βαθμονομήθηκαν έτσι ώστε να βρούμε εκείνες τις τιμές τους με τις οποίες επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ των μετρούμενων τιμών εδαφικής υγρασίας και των αντίστοιχων προσομοιωμένων.

Τα όρια τιμών των παραμέτρων (n) και (k_s) κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης προέρχονται από τον πίνακα των τιμών των υδραυλικών εδαφικών παραμέτρων για τους διάφορους εδαφικούς τύπους (Πίνακας 5.2). Οι παράμετροι (n) και (k_s) λοιπόν βαθμονομήθηκαν σύμφωνα με τις τυπικές αποκλίσεις που δίνονται στον Πίνακα 5.2. Όσον αφορά στο αρχικό περιεχόμενο της εδαφικής υγρασίας, έγιναν αρκετές δοκιμές μεταξύ του εύρους τιμών από 0.13 έως 0.19.

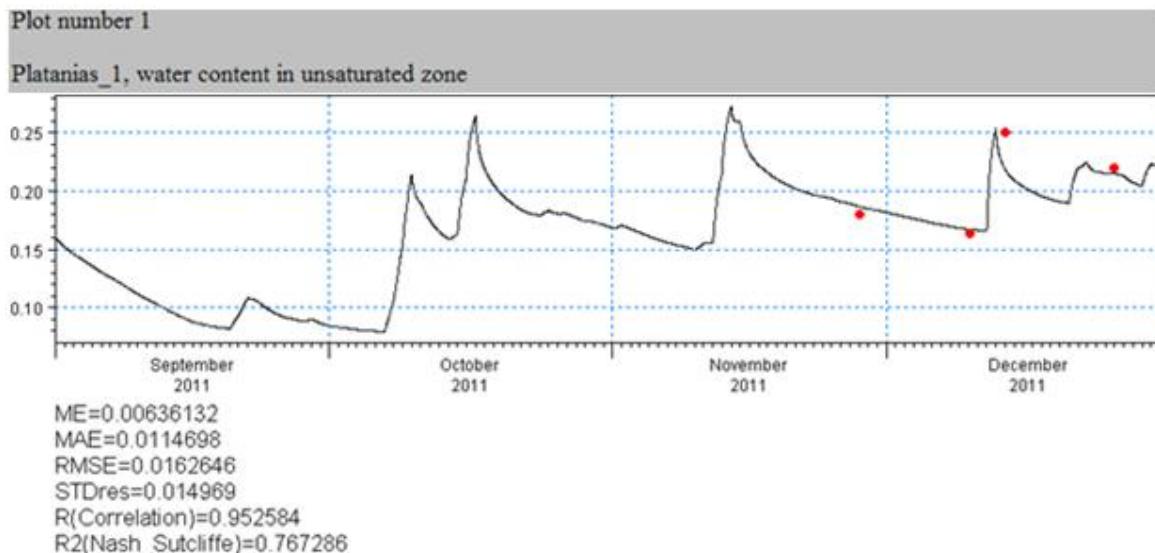
Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης έδειξαν οι τιμές των παραμέτρων $n = 1.38$, $k_s = 17.46 \text{ cm/day}$, και Initial water content = 0.16 έδωσαν το καλύτερο βαθμό συσχέτισης μεταξύ δεδομένων πεδίου και αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Αναλυτικότερα:

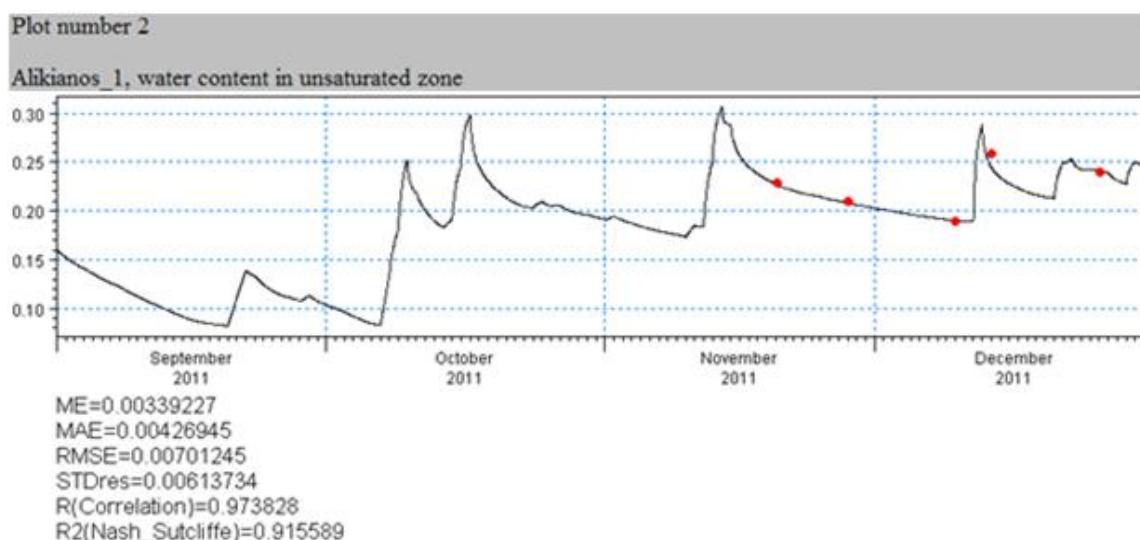
Η πολύ καλή συσχέτιση των μετρήσεων πεδίου με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται χαρακτηριστικά στα διαγράμματα του περιεχομένου στης εδαφικής υγρασίας σε σχέση με το χρόνο. Για καθένα από τα 2 σημεία μετρήσεων (Αλικιανός και Πλατανιάς) έχουμε 2 διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν την εδαφική υγρασία στα 5 και στα 20 cm εδαφικού βάθους. Σε κάθε ένα διάγραμμα (Εικόνα 6.4, 6.5, 6.6, 6.7) παρουσιάζονται και διάφοροι στατιστικοί δείκτες προσαρμογής του μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου. Οι τιμές των δεικτών αυτών επαληθεύουν το πολύ καλό επίπεδο βαθμονόμησης του μοντέλου. Ενδεικτικά αναφέρουμε το συντελεστή συσχέτισης R (Correlation Coefficient) όπου

οι τιμές του σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνονται από 0.87 μέχρι 0.97, γεγονός που αποδεικνύει πως η βαθμονόμηση του μοντέλου μας είναι επιτυχής σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό.

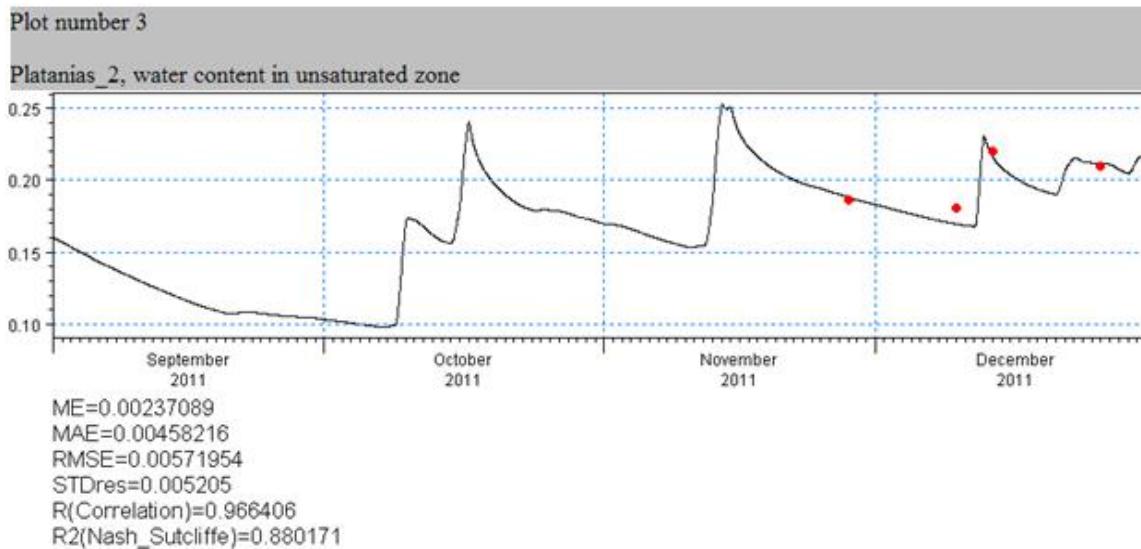
Βλέπουμε επίσης πως οι μετρήσεις του πεδίου συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης στις περιόδους σχετικής ανομβρίας στην περίοδο προσομοίωσης (π.χ.: τέλη Οκτωβρίου έως αρχές Νοεμβρίου & τέλη Νοεμβρίου έως αρχές Δεκεμβρίου), καθώς επίσης και σε ημέρες όπου η βροχόπτωση είναι πολύ έντονη (π.χ.: 13 Δεκεμβρίου), συνεπώς και η εδαφική υγρασία παρουσιάζει κορυφή (peak).



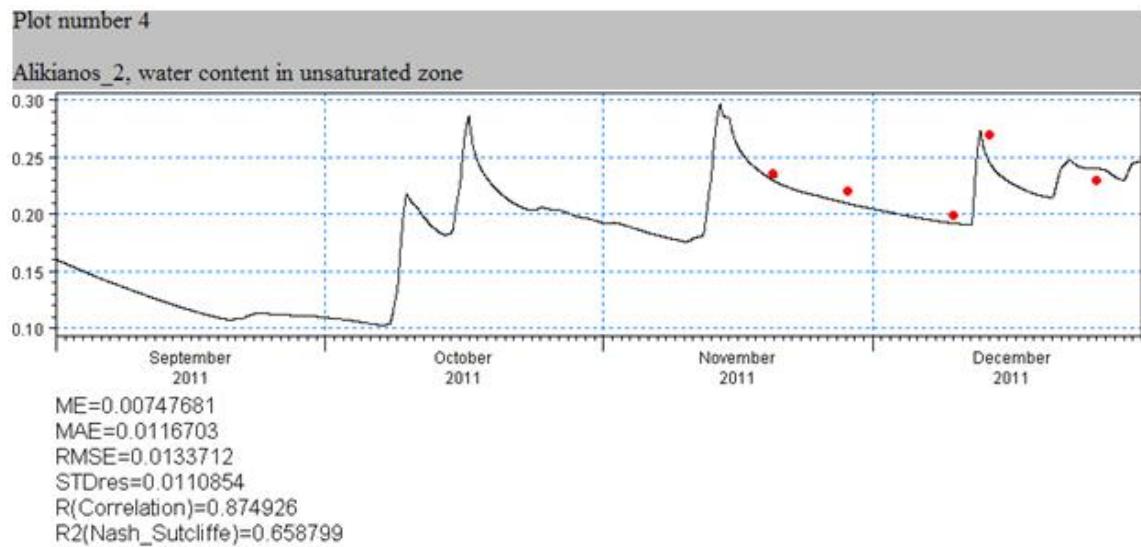
Εικόνα 6.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης Πλατανιάς, βάθος=5cm.



Εικόνα 6.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης Αλικιανός, βάθος=5cm.



**Εικόνα 6.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης
Πλατανιάς, βάθος=20cm.**



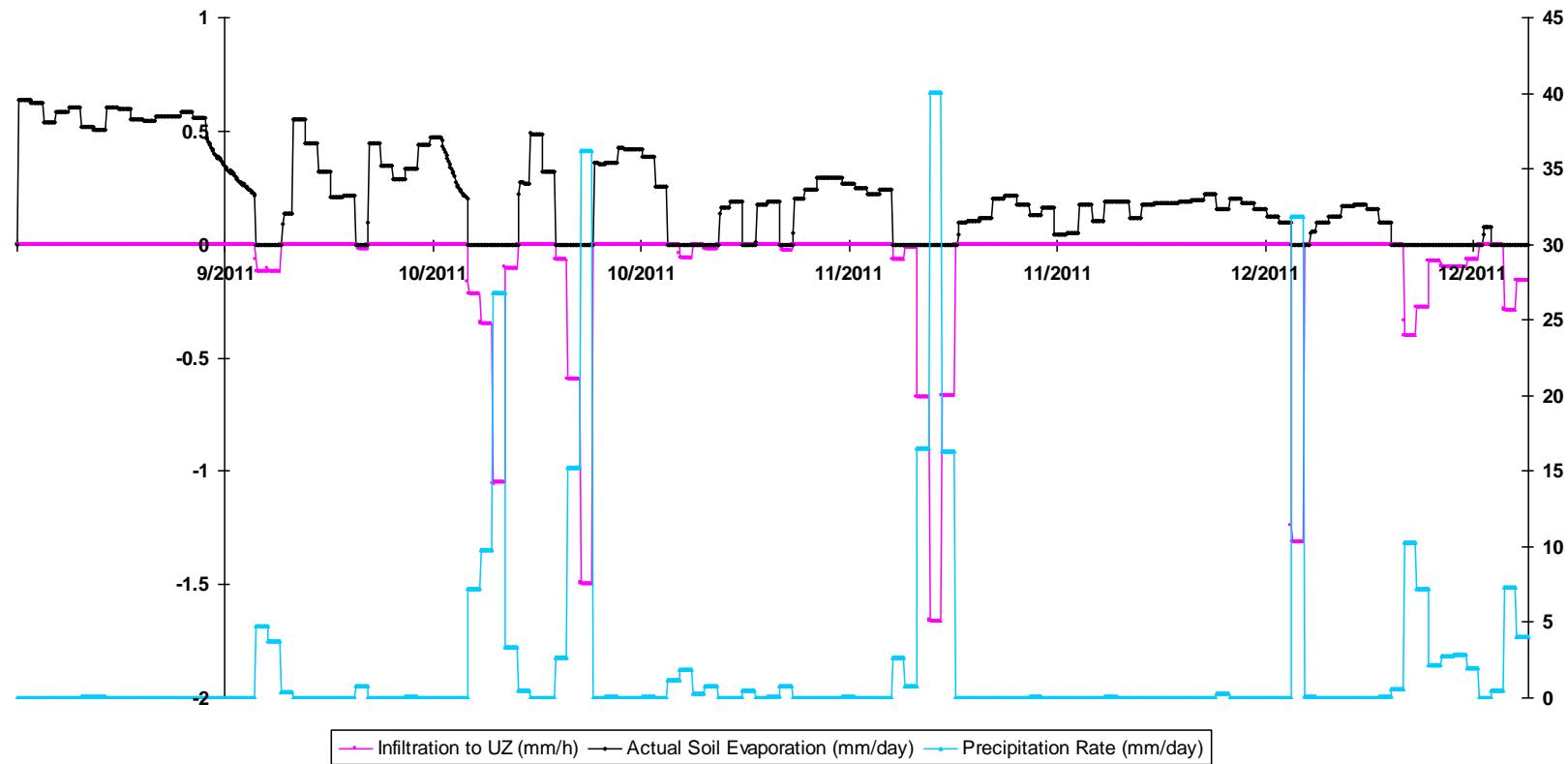
**Εικόνα 6.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων πεδίου και προσομοίωσης
Αλικιανός, βάθος=20cm.**

Επίσης όπως φάνηκε και από τα διαγράμματα των Εικόνων 6.4 - 6.7 το μήνα Σεπτέμβριο η εδαφική υγρασία είναι σχετικά χαμηλή, ενώ τους επόμενους μήνες που ο ρυθμός των βροχοπτώσεων μεγαλώνει, η εδαφική υγρασία αυξάνεται κατά πολύ και παρουσιάζει κορυφές (peaks) τις ημέρες όπου η βροχόπτωση είναι έντονη.

Στην Εικόνα 6.8 παρατίθενται επιπλέον αποτελέσματα από την προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη. Αναλυτικότερα στην συγκεκριμένη εικόνα μπορούμε να δούμε συνδυαστικά τη χρονική διακύμανση της βροχόπτωσης, της διήθησης και της εδαφικής εξάτμισης στην περιοχή του Αλικιανού κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα ο ρυθμός βροχόπτωσης (precipitation rate) μετριέται σε mm/day και οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 40 mm/day. Η εδαφική εξάτμιση (actual soil evaporation) μετριέται σε mm/day και οι τιμές της κυμαίνονται από 0 έως 0.65 mm/day. Ενώ τέλος η διήθηση στην ακόρεστη ζώνη (infiltration to UZ) μετριέται σε mm/h και οι τιμές της κυμαίνονται από 0 έως -1.8. Οι τιμές της διήθησης είναι αρνητικές διότι έχουν σχέση με το βάθος της ακόρεστης ζώνης του εδάφους μέσα στο οποίο διηθείται το νερό.

Καταρχάς, παρατηρούμε ότι οι τιμές της εξάτμισης είναι αρκετά υψηλές στις αρχές του Σεπτεμβρίου, καθώς η βροχόπτωση είναι σχεδόν μηδενική. Προχωρώντας προς τον Οκτώβριο και το Νοέμβριο, οι τιμές της εξάτμισης μειώνονται σταδιακά, παρουσιάζοντας μηδενικές τιμές, όταν ο ρυθμός της βροχόπτωσης είναι πολύ έντονος. Από τα μέσα μέχρι και το τέλος του Δεκεμβρίου, παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές τιμές εξάτμισης λόγω της συνεχόμενης βροχόπτωσης.

Όσον αφορά στη διήθηση, παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τον ρυθμό της βροχόπτωσης. Κατά τη διάρκεια των ημερών με μηδενική βροχόπτωση, είναι μηδενική και η διήθηση, όπως είναι αναμενόμενο. Αντίθετα, όταν ο ρυθμός της βροχόπτωσης αυξάνεται, τότε μεγαλώνουν και οι τιμές της διήθησης στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα Βροχόπτωσης - Διήθησης - Εδαφικής Εξάτμισης (Αλικιανός)

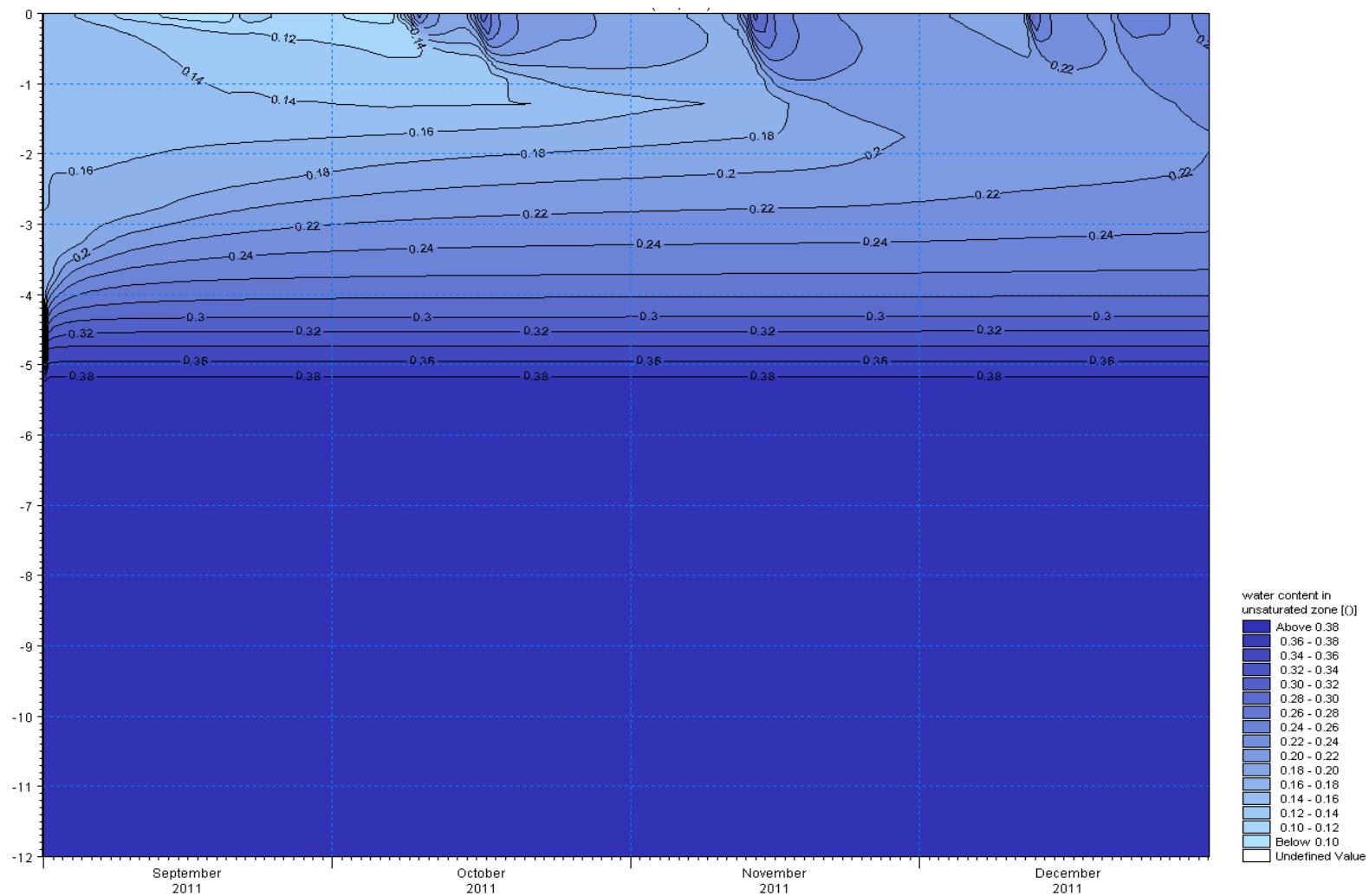
Στα παρακάτω δισδιάστατα διαγράμματα, βλέπουμε την χωροχρονική κατανομή της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη αρχικά για την περιοχή του Αλικιανού (Εικόνα 6.9) και στη συνέχεια για την περιοχή του Πλατανιά (Εικόνα 6.10). Στον κάθετο άξονα, απεικονίζεται το βάθος της ακόρεστης ζώνης (1-12m), ενώ στον οριζόντιο, έχουμε την περίοδο της προσομοίωσης. Οι γραμμές που εμφανίζονται στο γράφημα είναι οι ισοϋψεις της εδαφικής υγρασίας και ξεκινούν από 0.10 φτάνοντας έως το 0.38 δηλαδή σε επίπεδα κορεσμένης ζώνης.

Καταρχάς, παρατηρούμε πως στην περιοχή του Αλικιανού ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αρκετά πιο ψηλά σε σχέση με την δεύτερη περιοχή δειγματοληψίας του Πλατανιά. Αυτό συμβαίνει διότι το σημείο δειγματοληψίας του Αλικιανού βρίσκεται αρκετά κοντά στον κύριο ρου του ποταμού Κερίτη και αυτό αντικατοπτρίζεται στην εδαφική υγρασία. Αυτό σημαίνει πως στο έδαφος του Αλικιανού επέρχεται πιο εύκολα ο κορεσμός με νερό, σε σχέση με το σημείο στον Πλατανιά, στο οποίο το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα ανέρχεται στα περίπου 8.5 μέτρα, σε σύγκριση με τα 5.2 περίπου μέτρα του Αλικιανού.

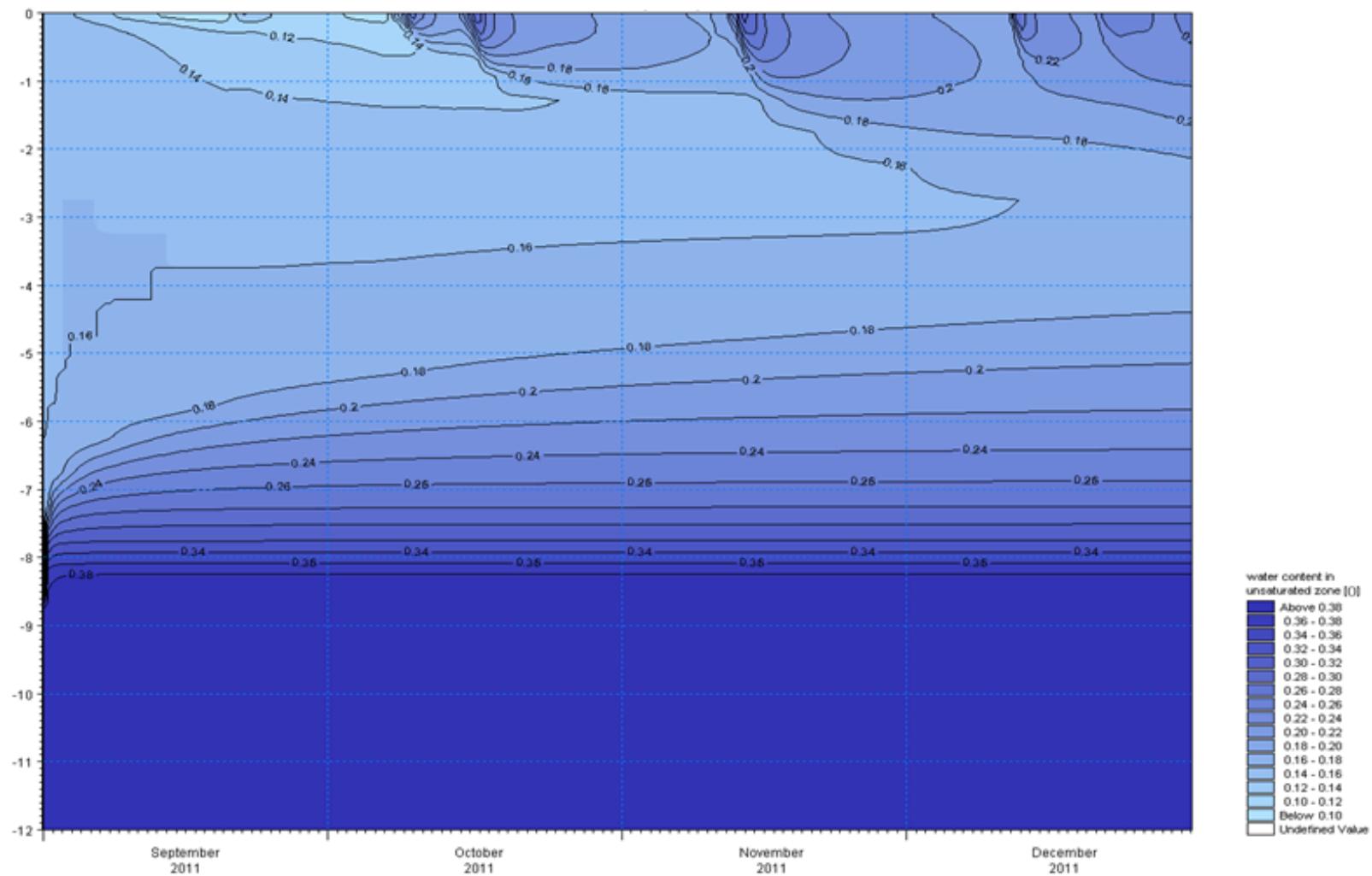
Στις Εικόνες 6.9 και 6.10 παρατηρούμε επίσης τις διακυμάνσεις της εδαφικής υγρασίας μέσα στο χρόνο της προσομοίωσης. Το Σεπτέμβριο όπου οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες η υγρασία παίρνει πολύ χαμηλές τιμές στα ανώτερα στρώματα της ακόρεστης ζώνης. Καθώς προχωράμε προς το χειμώνα και λόγω των βροχοπτώσεων, η υγρασία αυξάνεται στα ανώτερα στρώματα, ενώ στο κατώτερο στρώμα της ακόρεστης ζώνης, δηλαδή από τα κάτω από τα 4 μέτρα για τον Αλικιανό και κάτω από τα 7 μέτρα για τον Πλατανιά, η εδαφική υγρασία παραμένει σχεδόν σταθερή με ίσως μια μικρή ανοδική τάση στο χρόνο της προσομοίωσης αυξάνοντας έστω και για λίγα εκατοστά το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα στο χρόνο της προσομοίωσης.

Επίσης μέσα από τις Εικόνες 6.9 και 6.10 μπορούμε να διακρίνουμε τις περιόδους όπου η βροχόπτωση είναι πολύ έντονη, παρατηρώντας τα σημεία στα οποία συγκλίνουν οι ισοϋψεις της εδαφικής υγρασίας. Σε αυτά τα σημεία (δηλαδή μέσα Οκτωβρίου, μέσα Νοεμβρίου και μέσα Δεκεμβρίου), η εδαφική υγρασία λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της (από 0.22 έως 0.30), όσον αφορά στα ανώτερα στρώματα της ακόρεστης ζώνης.

Τέλος, παρατηρούμε ότι τα μεσαία στρώματα της ακόρεστης ζώνης χαρακτηρίζονται από μια αύξηση των τιμών εδαφικής υγρασίας σε σχέση με το χρόνο με μια όμως σχετική χρονοκαθυστέρηση σε σχέση με τα αντίστοιχα γεγονότα βροχής, γεγονός που οφείλεται στο χρόνο διήθησης του νερού από την επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα. Έτσι καθώς διηθείται το νερό των βροχοπτώσεων του φθινοπώρου, έχουμε μια σταδιακή άνοδο του ποσοστού της εδαφικής υγρασίας μέσα στα στρώματα αυτά, η οποία βέβαια επηρεάζεται από τις αλλαγές της υγρασίας στα ανώτερα στρώματα.



Εικόνα 6.9: Δισδιάστατη απεικόνιση της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη (Αλικιανός).



Εικόνα 6.10: Δισδιάστατη απεικόνιση της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη (Πλατανιάς).

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μια μέθοδο με την οποία συμπεραίνουμε ποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου ασκούν μικρότερη ή μεγαλύτερη επιρροή στα τελικά αποτελέσματα. Η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους, είτε μεταβάλλοντας την τιμή μιας και μόνο παραμέτρου διατηρώντας όλες τις άλλες σταθερές και να παρατηρήσουμε τις διαφοροποιήσεις στα τελικά αποτελέσματα είτε μεταβάλλοντας ταυτόχρονα πολλές παραμέτρους. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος στα πλαίσια διαφόρων αλγορίθμων προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE SHE.

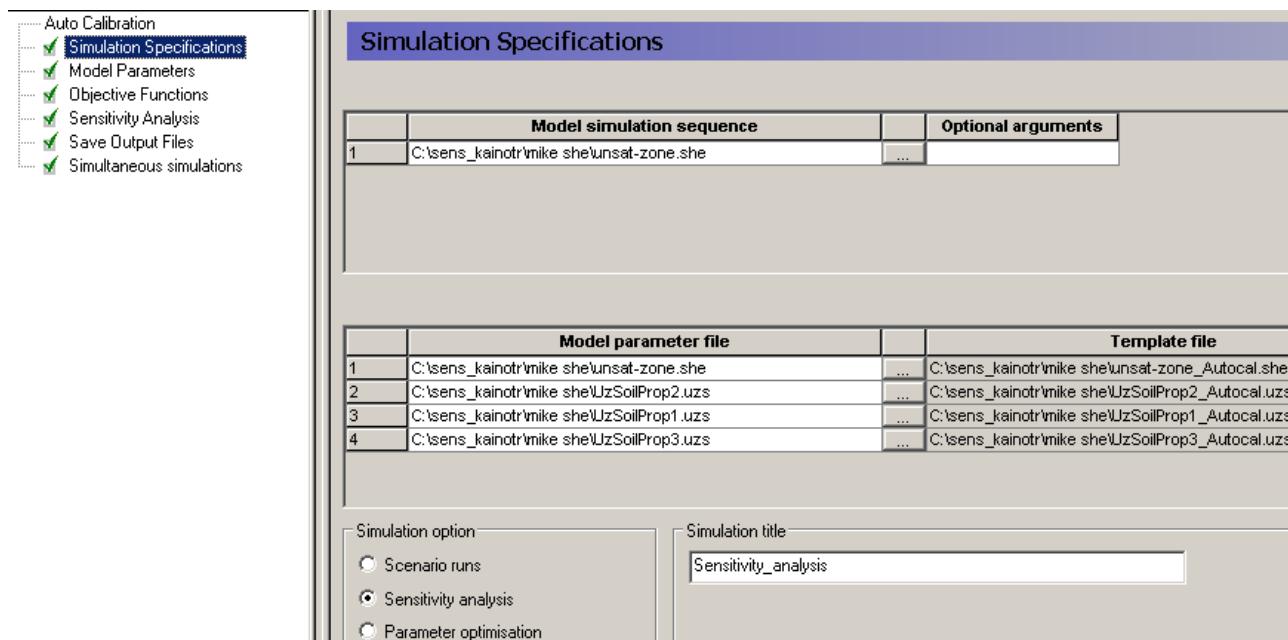
Το MIKE SHE πραγματοποιεί την ανάλυση ευαισθησίας με το εργαλείο AUTOCAL. Το AUTOCAL είναι ένα γενικό εργαλείο για την εκτέλεση αυτόματης βαθμονόμησης, την βελτιστοποίηση των παραμέτρων και την ανάλυση ευαισθησίας. Το AUTOCAL παράγει ένα αρχείο που περιέχει το αποτέλεσμα των συντελεστών ευαισθησίας RMSE που υπολογίζονται για κάθε παράμετρο. Οι συντελεστές RMSE καταδεικνύουν την κατάταξη των παραμέτρων, όσον αφορά στη σημαντικότητά τους για το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης. Οι υψηλότερες απόλυτες τιμές στην κλίμακα της ευαισθησίας, υποδεικνύουν πιο ευαίσθητες παραμέτρους. Κατά γενικό κανόνα, οι παράμετροι θεωρούνται μη ευαίσθητοι αν η τιμή της ευαισθησίας τους είναι μικρότερη από περίπου 0,01 έως 0,02 φορές της μέγιστης τιμής στην κλίμακα της ευαισθησίας (απόλυτη τιμή). Δεδομένου ότι οι συντελεστές ευαισθησίας υπολογίζονται μόνο γύρω από το αρχικό σύνολο παραμέτρων, είναι φανερό ότι αντανακλούν μόνο την τοπική ευαισθησία. Αυτό σημαίνει ότι σε άλλες εφαρμογές του μοντέλου, η σειρά ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου ενδέχεται να είναι πολύ διαφορετική. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση ευαισθησίας παρέχει πληροφορίες ως προς την σχετική ευαισθησία του μοντέλου στις παρούσες συνθήκες, και δεν αντανακλά απαραίτητα την πραγματική ευαισθησία του συστήματος.

Το περιβάλλον εργασίας του υπομοντέλου AUTOCAL στο οποίο είναι δυνατό να εκτιμήσουμε την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων τις μοντελοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.11.

Στο πεδίο των χαρακτηριστικών της προσομοίωσης επιλέγουμε την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας. Στη συνέχεια επιλέγονται οι παράμετροι εισόδου του μοντέλου οι οποίες πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση και για τις οποίες είναι απαραίτητο να οριστούν τα παρακάτω:

- **Όνομα παραμέτρου**
- **Τύπος της παραμέτρου:** μπορεί να οριστεί ως μεταβλητή παράμετρος, ως σταθερή παράμετρος, ή ως εξαρτημένη μεταβλητή.
- **Αρχική τιμή της παραμέτρου**

- **Κατώτερο όριο:** καθορίζει την κατώτατη τιμή που είναι δυνατόν να πάρει η παράμετρος.
- **Ανώτερο όριο:** καθορίζει την ανώτερη τιμή που είναι δυνατόν να πάρει η παράμετρος.
- **Μετασχηματισμός:** ορίζεται το πεδίο μετασχηματισμού ως πραγματικό ή λογαριθμικό. Το λογαριθμικό συνίσταται όταν το εύρος της παραμέτρου διαφέρει πολλές τάξεις μεγέθους.
- **Εξίσωση:** αν μια παράμετρος ορίζεται ως εξαρτημένη μεταβλητή, τότε πρέπει να δοθεί μια εξίσωση για τον καθορισμό της παραμέτρου σε συνάρτηση με τις διαθέσιμες μεταβλητές παραμέτρους.



Εικόνα 6.11: Εισαγωγή δεδομένων για την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων μοντελοποίησης.

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση ευαισθησίας και στην Εικόνα 6.12 φαίνονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων αυτών.

Πίνακας 6.3: Ανάλυση ευαισθησίας - Εύρος τιμών των παραμέτρων.

Παράμετρος	Εύρος τιμών
LAI	2-5
Upper zone bulk density [kg/m ³]	1000-2000
Moderate zone bulk density [kg/m ³]	1000-2000
Lower zone bulk density [kg/m ³]	1400-2500
A [L ⁻¹]	0.00537-0.0338
n	1.258-3.235
θ _r [L ³ L ⁻³]	0.051-0.091
θ _s [L ³ L ⁻³]	0.374-0.5
K _s [cm/day]	4.6*10 ⁻⁷ -2.193*10 ⁻⁵
Initial water content	0.13-0.19

Model Parameters								
	ID value	Name	Parameter type	Initial value	Lower bound	Upper bound	Transformation	Equation
1	1.02e-035	LAI	Variable	3	2	5	Logarithmic	
2	1.01e-035	Initial	Variable	0.16	0.13	0.19	Logarithmic	
3	1.06e-035	a	Variable	0.021	0.00537	0.0338	Logarithmic	
4	1.07e-035	n	Variable	1.38	1.258	3.235	Logarithmic	
5	1.05e-035	eff	Variable	0.055	0.051	0.091	Logarithmic	
6	1.04e-035	s	Variable	0.387	0.374	0.5	Logarithmic	
7	1.1e-035	Ks	Variable	2e-005	4.6e-007	8.193e-005	Logarithmic	
8	1.03e-035	Bulk_Moderat	Variable	1500	1000	2000	Logarithmic	
9	1.11e-035	Bulk_Upper	Variable	1350	1000	2000	Logarithmic	
10	1.12e-035	Bulk_Lower	Variable	1800	1400	2500	Logarithmic	

Εικόνα 6.12: Χαρακτηριστικά των παραμέτρων της ανάλυσης ευαισθησίας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για την παρούσα προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη:

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Parameter	Total RMSE
LAI	-8*10 ⁻⁸
Upper zone bulk density	~0
Moderate zone bulk density	~0
Lower zone bulk density	~0
a	3.22*10 ⁻⁵
n	-5.09*10 ⁻³
θ _r	1.7*10 ⁻⁵
θ _s	8.36*10 ⁻⁵
K _s	-9.28*10 ⁻⁴
Initial water content	-1.49*10 ⁻⁴

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας το μοντέλο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην παράμετρο (n) της εξίσωσης Van Genuchten και ακολουθούν το αρχικό περιεχόμενο σε εδαφικής υγρασία (Initial water content) και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (k_s). Παράμετροι οι οποίοι είναι σχετικά μη ευαίσθητοι είναι η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density) και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI).

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η διαχείριση του υδατικού δυναμικού καθιστά απαραίτητη τη μελέτη της ροής στην ακόρεστη ζώνη. Ο προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας είναι σημαντικός για την ακριβή εκτίμηση των αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών. Είναι γεγονός ότι το υφιστάμενο σήμερα καθεστώς στον τομέα των αρδεύσεων οδηγεί σε μεγάλη σπατάλη νερού, καθώς η άρδευση των γεωργικών εκτάσεων στον ελλαδικό χώρο γίνεται συνήθως εμπειρικά, με αποτέλεσμα η αρδευτική αποδοτικότητα να είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

Με την εισαγωγή της τεχνολογίας και τη χρήση μαθηματικών μοντέλων είναι δυνατός ο ορθολογικός προγραμματισμός των αρδεύσεων και η καλύτερη διαχείριση του αρδευτικού νερού. Το ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους έτσι ώστε στο ενδεικυόμενο επίπεδο εδαφικής υγρασίας να εφαρμόζεται η απαιτούμενη ποσότητα αρδευτικού νερού. Η σύνδεση της απόδοσης της καλλιέργειας με την υγρασιακή κατάσταση του εδάφους μπορεί να δώσει μία νέα θεώρηση στο πρόγραμμα άρδευσης, οδηγώντας στην εξοικονόμηση νερού και ταυτόχρονα βοηθώντας τους παραγωγούς αγροτικών προϊόντων να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή τους.

Η παρούσα μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση ενός πολύ δύσκολου εγχειρήματος που είναι η μοντελοποίηση της ροής στην ακόρεστη ζώνη. Η ευελιξία του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE και το γεγονός πως περιλαμβάνει μια σειρά εργαλείων επεξεργασίας σε συνδυασμό είτε με απλές είτε με προηγμένες τεχνικές επίλυσης για κάθε υδρολογική διεργασία, προσφέρει ένα ισχυρό πλεονέκτημα, καθώς η μοντελοποίηση μπορεί να προσαρμοστεί σύμφωνα με τους στόχους της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων του πεδίου.

Οι δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν κατά την εφαρμογή της προσομοίωσης σχετίζονται με τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο, καθώς και με την διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου.

Για τον επιτυχή προσδιορισμό της εδαφικής υγρασίας, είναι απαραίτητος ο σωστός προσδιορισμός των κλιματολογικών δεδομένων (π.χ.: βροχόπτωση και εξατμισοδιαπνοή). Επιπλέον, σημαντικός είναι και ο ακριβής καθορισμός των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του εδάφους (π.χ.: χρήσεις γης, συντελεστές φυλλικής επιφάνειας και ριζικού συστήματος ανάλογα με την καλλιέργεια), καθώς επίσης και η επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων για την περιγραφή της ροής στην ακόρεστη ζώνη.

Όσον αφορά στη βαθμονόμηση του μοντέλου, τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά, καθώς οι μετρήσεις πεδίου παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι στατιστικοί δείκτες προκειμένου να επιβεβαιώσουν την παραπάνω πολύ καλή συσχέτιση. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις αρκετά ικανοποιητικές τιμές του συντελεστή

συσχέτισης R, όπου οι τιμές του σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνονται από 0.87 μέχρι 0.96. Επιπρόσθετα είναι χρήσιμο να επισημάνουμε τη συμφωνία των μετρήσεων πεδίου με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης τόσο σε περιόδους ανομβρίας, όσο και σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης.

Στην παρούσα εργασία, προσδιορίστηκε επίσης το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, το οποίο διαφέρει σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περίπτωση διάνοιξης γεωτρήσεων για άντληση νερού από τον υπόγειο υδροφορέα.

Ως αντικείμενο μελλοντικής μελέτης θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση της ροής στην ακόρεστη ζώνη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε να υπάρχει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας για κάθε μια εποχή του έτους. Η περίοδος που προσομοιώθηκε στην παρούσα μελέτη δεν περιλάμβανε την επιλογή της άρδευσης, καθώς κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, οι καλλιέργειες εσπεριδοειδών δεν αρδεύονται στην περιοχή μελέτης. Αν όμως στην περίοδο προσομοίωσης συμπεριληφθεί και το καλοκαίρι, τότε θα είναι δυνατή η πραγματοποίηση σεναρίων άρδευσης, με σκοπό την καλύτερη δυνατή διαχείριση του αρδευτικού νερού και την βελτιστοποίηση της παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Ajami, N. K., Gupta, H., Wagener, T., Sorooshian, S., 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298, 112-135.
- Alley, W. M., 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*, 20, 1137-1149.
- Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992. Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport. Academic Press, New York.
- Beven, K. J., 1989. Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Bloschl, G., and Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modeling. *Hydrological Press*
- Boyle, D. P., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., Smith, M., 2001. Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling. *Water Resources Research*, 37(11), 2749-2760.
- Brath, A., Montanari, A., Toth, E., 2002. Neural networks and non-parametric methods for improving real-time flood forecasting through conceptual hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 627-639.
- Coulibaly, P., and Baldwin, C.K., 2005. Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *J. Hydrology*, 307: 164-174.
- DHI, 2007. Mike SHE: an integrated hydrological modelling system. Documentation and users guide.
- 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
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., 1977. Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage.
- Dullien, F.A.L., 1979. Porous media fluid transport and pore structure. Academic Press, San Diego, CA.
- Freer, J., Beven, K. J., Ambroise, B., Bayesian, 1996. Estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resources Research*, 32(7), 2161- 2173.
- Giustolisi, O., and Laucelli, D., 2005. Improving generalization of artificial neural networks in rainfall -runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 50(3) 439-457.

Govindaraju, R. S., and Rao, A. R., 2002. Artificial Neural Networks in Hydrology, Kluwer Academic, Boston.

Graham, D. N., and Butts, M. B., 2005. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE in Watershed Models. Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert.

Grayson, R. B., Moore, I. D., McMahon, T. A., 1992. Physically-based modeling 2: is the concept realistic?. Water Resources Research, 26(10), 2659-2666.

Grayson, R., and Blöschl, G., 2000. Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press.

Gupta, H. V., Khodatalab, N., Wagener, T., Sorooshian, S., 2003. Advances in semi-distributed watershed modeling. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, European Geophysical Society, American Geophysical Union, Nice.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, Am. Soc. Civil Engr., New York, NY.

Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. Hydrological Sciences Journal, 31, 13-24.

Liong, S. Y., Gautam, T. R., Khu, S. T., Babovic, V., Keijzer, M., and Muttgil, N., 2002. Genetic programming: a new paradigm in rainfall runoff modeling. Journal of the American Water Resources Association, 38(2), 705-718.

Luckner, L., Van Genuchten, M. Th., and Nielsen, D.R., 1989. A consistent set of parametric models for the two - phase flow of immiscible fluids in the subsurface. Water Resour. Res. 25, 2187 – 2193.

Makhoul, Z., and Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. Journal of Hydrology, 162, 299-318.

Mazi, A., Kouassis, A. D., Restrepo, P. J., Koutsoyiannis, D., 2004. A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimization method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin. Journal of Hydrology, 290, 243-258.

McCuen, R., 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modelling. J. Hydrol., 18, 37-53.

Monteith, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied. Ecology, 9: 747-766.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12:513–522.

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282-290 .

Nielsen, D. R., Van Genuchten, M. Th., Biggar, J.W., 1986. Water flow and Solute Transport Processes in the unsaturated zone. Water Resources, Research, 22(9), 89S – 108S.

Nimmo, J. R., 2005. Unsaturated Zone Flow Processes. In Anderson, M.G., and Bear, J., eds., Encyclopedia of Hydrological Sciences: Part 13--Groundwater: Chichester, UK, Wiley.

Nofziger, D. L., Chen J. S., and Haan C. T., 1993. Evaluation of unsaturated/vadose zone models for superfund sites. EPA/600/R-93/184. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK.

Pierce, L. L., Running S. W., 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, 69(6): 1762-1767.

Report by UNICEF and the World Health Organization, March 6, 2012. New York / Geneva.

Refsgaard, J. C., and Butts, M. B., 24-26 November 1999. Determination of grid scale parameters in catchment modelling by upscaling local scale parameters (Invited Paper), in Modelling of transport processes in soils. International Workshop of EurAgEng's Field of Interest in Soil and Water, eds. Feyen, J. and Wiyo, K. Leuven, Belgium.

Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.

Ripple, C. D., Rubin, J., and Van Hylckama, T. E. A., 1972. Estimating Steady-State Evaporation Rates from Bare Soils under Conditions of High Water Table.

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane W. L., 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

Schaap, M. G., Leij F. J., and Van Genuchten, M. Th., 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251(3 -4), 163-176.

Twarakavi, N. K . C., Simunek, J., and Schaap, M. G., 2010. Can texture-based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics?

Van Genuchten, M. Th., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 44, 892 – 898.

Van Genuchten, M.Th., and Nielsen D.R., 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil. *Ann. Geophys.* 3, 615 – 628.

Xu, C. Y., and Singh, V. P., 1998. A review of monthly water balance models for water resources investigations, *Water Resources Management*, 12, 31-50.

Ye, W., Bates, B. C., Vinley, N. R., Sivapalan, M., and Jackeman, A. J., 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33(1), 153-166.

Zealand, C. M., Burn, D. H., and Simonovic, S. P., 1999. Short term streamflow forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 214, 32-48.

Zheng, C., and Bennett, G.D., 1995. Applied contaminant transport modeling: theory and practice. Van Nostrand Reinhold, New York.

Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., and Allen, R. G., 2005. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βοζινάκης, Κ., και Κουγιάννη Σ., 2004. Υδατικοί Πόροι Νομού Χανίων και Διαχείρισή τους. Χανιά.

Ευστρατιάδης, Α., 2006. Στρατηγικές και αλγόριθμοι πολυκριτηριακής βαθμονόμησης σύνθετων υδρολογικών μοντέλων. Κύκλος παρουσιάσεων ερευνητικών δραστηριοτήτων ΤΥΠΥΘΕ, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, (<http://itia.ntua.gr/g/docinfo/705>)

Ευστρατιάδης, Α., 2008. Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ευστρατιάδης, Α., Ρόζος, Ε., Κουκουβίνος, Α., 2009. ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ – Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης, Θεωρητική τεκμηρίωση. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Καλλέργη, Γ. Α., 1986. Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία.

Καρατζάς, Γ., 2009. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης.

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.

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.

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσόπουλος, Κ., και Ανδρουλάκης Ν., 2005. Εφαρμογές του Λογισμικού ArcGIS9x, Εκδ. Παπασωτηρίου.

Μυλόπουλος, Ν., 2001. Σημειώσεις για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2010. Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη. Χανιά.

Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης (Ο.Α.ΔΥ.Κ.), 1998. Διαχειριστικό σχέδιο για τον υγρότοπο της Αγυιάς. Χανιά.

- Παλαιολόγος, Ε., 2008. Σημειώσεις Παραδόσεων Υδρολογίας. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Περλέρος, Β., Παπαμαστοράκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ., Δρακοπούλου, Ε., και Παναγόπουλος, Α., 2004. Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης - Προβλήματα και προοπτικές. Θεσσαλονίκη.
- Τσακίρης, Γ., 1995. Συμμετρία «Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία».
- Τσακίρης, Γ., 2006. Συμμετρία «Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός & Διαχείριση. Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά έργα».
- Τσούτσος, Θ., 2002. Σημειώσεις για την Αειφόρο Ανάπτυξη. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Χατζηευαγγέλου, Δ. Κ., 2005. Μεταπτυχιακή Διατριβή με θέμα «Εκτίμηση υδατικού Ισοζυγίου και Διαχείριση Υδατικών Πόρων της Υδρολογικής Λεκάνης του Κερίτη». Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Διαδικτυακές πηγές

www.minenv.gr/nera

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>

CORINE 2000, NUTSv9 and EEA reference grid for Greece: EEA, Copenhagen, 2007,
<http://www.eea.europa.eu>