

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσδιορισμός των Περιοχών Συσσώρευσης
Επιφανειακής Απορροής στη Λεκάνη του Ποταμού
Ταυρωνίτη (Ν. Χανίων) με τη Χρήση του Μοντέλου
MIKE SHE.**

ΜΟΡΙΑΝΟΥ ΓΙΑΣΕΜΗ

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων καθηγητής)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Κουργιαλάς Νεκτάριος

Χανιά,
Σεπτέμβριος 2014

Στους γονείς μου

&

στον αδερφό μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καρατζά Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας μου το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κουργιαλά Νεκτάριο, μέλος του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής και μέλος της εξεταστικής μου επιτροπής για την άριστη συνεργασία μας, την πολύτιμη βοήθεια του και τον χρόνο που διέθεσε για την εργασία μου όλο αυτό το διάστημα.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής τον καθηγητή κ. Νικολαΐδη Νικόλαο.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Γρηγόρη και την φίλη μου Λαμπρινή για τη βοήθεια και τις διορθώσεις τους στο κείμενο της παρούσας εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τις καλές μου φίλες και ομάδα μου σε όλες τις εργασίες στα πέντε χρόνια φοίτησης μου σε αυτή τη σχολή Μαίρη, Ελένη και Βιργινία.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά και αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου, τους γονείς μου Ελένη και Γρηγόρη και τον αδερφό και συγκάτοικο μου στα Χανιά Γιάννη για την ηθική και υλική τους υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους φίλους μου Σαββίνα, Ματίνα, Χριστίνη, Πελαγία, Μυρτώ, Δανάη, Γιώργο και Αποστόλη για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί αλλά και όλους τους συντρόφους της Ενωτικής πρωτοβουλίας για την ελπίδα που μου χάρισαν για ένα διαφορετικό μέλλον.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής στη Λεκάνη του ποταμού Ταυρωνίτη. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη βρίσκεται 20 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης των Χανίων και συμβάλει καταλυτικά στη διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής. Η βαθύτερη γνώση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής είναι πολύ σημαντική για την σωστή και βιώσιμη διαχείριση των υδατικών της πόρων.

Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση θα γίνει χρήση του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE. Το χρονικό διάστημα προσομοίωσης, καθορίστηκε στον έναν χρόνο για την βαθμονόμηση (01/09/2000 – 31/08/2001) και στα δύο χρόνια για την επαλήθευση (01/09/2001 – 31/08/2003).

Αρχικά στο μοντέλο MIKE SHE εισήχθησαν χάρτες, επεξεργασμένοι και ψηφιοποιημένοι στο ArcGIS, οι οποίοι περιείχαν δεδομένα για την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης, το ποτάμι σε ψηφιοποιημένη μορφή, τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών και των σημείων μέτρησης παροχής και πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία, την γεωλογία και τις χρήσεις γης της περιοχής. Επίσης στο μοντέλο εισήχθησαν τα μετεωρολογικά δεδομένα (ημερήσιες βροχοπτώσεις) από πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης (Αλικιανός, Ταυρωνίτης, Πρασσές, Παλαιά Ρούματα και Ζυμβραγού).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου MIKE SHE πραγματοποιήθηκε με βάση το συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης «Net Rainfall Fraction» έτσι ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα δεδομένα παροχών (μετρήσεις πεδίου) στους παραπόταμους Σεμπρονιώτη και Ρουματιανό της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη.

Μετά την βαθμονόμηση του μοντέλου ακολούθησε η επαλήθευση του. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης παρουσιάζονται με τη μορφή χρονοσειρών (ημερήσιων παροχών σε συνάρτηση με τον χρόνο). Με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης η προσομοίωση στους δύο παραπόταμους εμφανίζεται να είναι σε καλή συσχέτιση με τις μετρήσεις πεδίου, με τον συντελεστή αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) να παίρνει τις τιμές 0.60 για τον Ρουματιανό και 0.56 για τον Σεμπρονιώτη για την περίοδο της βαθμονόμησης και τις τιμές 0.58 και 0.51 αντίστοιχα για την περίοδο της επαλήθευσης.

Με τα αποτελέσματα της επαλήθευσης πραγματοποιήθηκε εξαγωγή του δισδιάστατου χάρτη της επιφανειακής απορροής. Στο συγκεκριμένο χάρτη προσδιορίζονται και τα σημεία σημαντικής συσσώρευσης επιφανειακού νερού για τη περιοχή μελέτης.

Με βάση τα αποτελέσματα και τους χάρτες της προσομοίωσης παρουσιάζονται προτάσεις για πιθανές θέσεις εγκατάστασης έργων εκμετάλλευσης επιφανειακών υδάτων (φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών) με στόχο την ικανοποίηση της ζήτησης διαφόρων χρήσεων (ύδρευση, άρδευση, υδροηλεκτρικά έργα κ.ά.) και την προστασία της περιοχής από ακραία υδρολογικά φαινόμενα (πλημμύρες – ξηρασίες) με τελικό στόχο την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the simulation of the surface runoff in the river basin Tavronitis. Tavronitis River basin is located 20 km west of Chania and catalytically contributes in the balance of the water resources of the region. A deeper knowledge of the hydrogeological characteristics of the basin is very important for the proper and sustainable management of its water resources.

For this simulation the hydrological model MIKE SHE was used. For the calibration, a simulation time of one year (01/09/2000 - 31/08/2001) was determined and a two-year period was used for the model verification (01/09/2001 - 31/08/2003).

Initially, software maps processed and digitized with the ArcGIS were introduced in the MIKE SHE model. The maps contained data for the delineation of the study area, the river in digital form, the positions of the meteorological and hydrological stations and information regarding the topography, geology and the land use of the area. Meteorological data (daily rainfall) from five meteorological stations in the study area were also introduced in the model (Alikianos, Tavronitis, Prasses, Palaia Roumata and Zymvragou).

The calibration of the MIKE SHE model was performed estimating the Net Rainfall Fraction so that the model output would approximate as closely as possible the observed data (field measurements) for the tributaries Semproniotis and Roumatianos of the Tavronitis river watershed.

After calibrating the model the next step was validation. The results of calibration and validation are presented in the form of time series (daily water discharge versus time). Based on the results of the statistical analysis, the two tributaries are well simulated, with the evaluation index Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) having a value of 0.60 for Roumatianos and 0.56 for Semproniotis for the calibration period and the values 0.58 and 0.51 respectively for the validation period.

Using the validation results, the two-dimensional map of the overland flow was extracted. On this map the spots of significant surface water accumulation of the study region can be identified.

Based on the results and the simulation maps, proposals for the location of overland water management works (dams and reservoirs) are presented, with the scope of meeting the demand for various uses (water supply, irrigation, hydroelectric

projects, etc.) and to protect the area from extreme hydrological events (floods - droughts), in order to upgrade the life quality of the local community.

ΠΙΝΑΚΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Σκοπός.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Εισαγωγή – Διαχείριση Υδατικών Πόρων.....	8
2.1. Γενικά	8
2.2. Υδρολογικός κύκλος	8
2.3. Ατμοσφαιρικές Κατακρημνίσεις	11
2.4. Επιφανειακή Απορροή	12
2.5. Λεκάνη Απορροής.....	12
2.6. Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ)	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : Υδρολογικά μοντέλα βροχής – απορροής	16
3.1. Εισαγωγή στην έννοια του υδρολογικού μοντέλου.....	16
3.2. Ορισμός Υδρολογικού Μοντέλου και συνιστώσες	16
3.3. Γενική ταξινόμηση υδρολογικών μοντέλων	17
3.4. Ταξινόμηση μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης.....	19
3.5. Περιγραφή υδρολογικού μοντέλου MIKE-SHE	20
3.6. Παρουσίαση του λογισμικού ArcGIS.	21
3.6.1. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.	21
3.6.2. Το ArcGIS	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : Περιγραφή Περιοχής Μελέτης.	23
4.1. Περιγραφή Λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη.....	23
4.2. Γεωλογία περιοχής	26
4.3. Υδρολογικά Χαρακτηριστικά.....	27
4.4. Χρήσεις Γης.....	28
4.5. Κλιματολογικά στοιχεία.	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : Εφαρμογή Υδρολογικού Μοντέλου MIKE-SHE	32
5.1. Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής (MIKE SHE)	32
5.1.1. Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης MIKE-SHE	32
5.1.2. Μαθηματική προσέγγιση της επιφανειακής ροής στο MIKE-SHE.	33
5.2. Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης επιφανειακής απορροής.	40
5.2.1. Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων.....	40
5.2.2. Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων μέσω GIS στο μοντέλο MIKE SHE.....	47
5.2.3. Περιβάλλον εργασίας MIKE Zero για το μοντέλο MIKE-SHE.....	48
5.2.4. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση μοντέλου.	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : Αποτελέσματα.....	61
6.1. Αποτελέσματα Βαθμονόμησης Μοντέλου MIKE-SHE.....	61
6.2. Αποτελέσματα Επαλήθευσης Μοντέλου MIKE-SHE.....	65
6.3. Αποτελέσματα Προσομοιωμένης επιφανειακής απορροής.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : Έργα αξιοποίησης των επιφανειακών υδάτων στην Λεκάνη Απορροής Ταυρωνίτη	69
7.1. Γενικά	69
7.2. Περιβαλλοντικοί Όροι περιοχής – Φυσικό Περιβάλλον	69
7.3. Πρόταση περιοχών εγκατάστασης τεχνικών υδραυλικών έργων στην λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ^ο : Συμπεράσματα	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
Διεθνής Βιβλιογραφία	83
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	84
Διαδίκτυο.....	85

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εικόνα 1. 1. Χάρτης περιοχής έργου, στους κύκλους αναφέρονται οι προτεινόμενες από την ΜΠΕ του έργου θέσεις των υδρογεωτρήσεων και τα πολύγωνα σε δεξαμενές ύδατος και ταμιευτήρες του υβριδικού έργου	7
--	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Εικόνα 2. 1. Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.	10
Εικόνα 2. 2. Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε $1190 \text{ km}^3 / \text{έτος}$. [Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999]	10
Εικόνα 2. 3. Πολύγωνα Thiessen	12
Εικόνα 2. 4. Σχηματική απεικόνιση Λεκάνης Απορροής ποταμού, πηγή: www.whatcom.wsu.edu	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Εικόνα 3. 1. Γενική αναπαράσταση μοντέλου (Τσακίρης, 1995)	16
Εικόνα 3. 2. Μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (Τσακίρης, 1995).	17
Εικόνα 3. 3. Συνεχές μοντέλο (Τσακίρης, 1995).	18
Εικόνα 3. 4. Ενιαίο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).....	18
Εικόνα 3. 5. Κατανεμημένο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).	18
Εικόνα 3. 6. Σχηματική περιγραφή του ομοιώματος MIKE-SHE (MIKE SHE User Manual, 2007).	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Εικόνα 4. 1. Γεωγραφική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη στο Ν. Χανίων (ArcGIS)	23
Εικόνα 4. 2. Υδρογραφικό Δίκτυο Λεκάνης Απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS).....	24
Εικόνα 4. 3. Χωρική απεικόνιση των οικισμών της λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS).....	25
Εικόνα 4. 4. Τοπογραφικό ανάγλυφο λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS).	26
Εικόνα 4. 5. Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη (ArcGIS).	27

Εικόνα 4. 6. Χρήσεις γης λεκάνης Ταυρωνίτη με χρήση βάσης δεδομένων Corine 2000 (ArcGIS).....	29
---	----

Εικόνα 4. 7. Διάγραμμα Υγρασίας σε συνάρτηση με τους μήνες.....	30
---	----

Εικόνα 4. 8. Διάγραμμα Βροχοπτώσεων σε συνάρτηση με τους μήνες.....	31
---	----

Εικόνα 4. 9. Διάγραμμα Έντασης Ανέμου σε συνάρτηση με τους μήνες.....	31
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Εικόνα 5. 1. Σύστημα τετραγωνικού πλέγματος σε μια μικρή περιοχή του μοντέλου MIKE SHE (MIKE SHE User Manual, 2007)	35
---	----

Εικόνα 5. 2. Επιφανειακή ροή στα όρια μεταξύ κελιών (MIKE SHE User Manual, 2007).....	36
---	----

Εικόνα 5. 3. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακής ροής σε ένα επίπεδο (MIKE SHE User Manual 2007).....	37
---	----

Εικόνα 5. 4. Η ψηφιοποιημένη μορφή των χωρικών δεδομένων στο GIS για τη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη.	48
---	----

Εικόνα 5. 5. Περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE.....	49
---	----

Εικόνα 5. 6. Display – Περιοχή μελέτης, λεκάνη απορροής ποταμού Ταυρωνίτη.	50
---	----

Εικόνα 5. 7. Παράμετροι της προσομοίωσης.....	51
---	----

Εικόνα 5. 8. Περίοδος προσομοίωσης	52
--	----

Εικόνα 5. 9. Χρονικό βήμα προσομοίωσης.	52
--	----

Εικόνα 5. 10. Περιοχή προσομοίωσης (Model Domain)	53
---	----

Εικόνα 5. 11. Τοπογραφία (DEM) της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη στο μοντέλο MIKE-SHE.....	54
---	----

Εικόνα 5. 12. Πολύγωνα Thiessen για τους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς στο μοντέλο MIKE-SHE.....	55
---	----

Εικόνα 5. 13. Ψηφιοποιημένη μορφή συντελεστή Manning στο μοντέλο MIKE-SHE	58
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Εικόνα 6. 1. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τον ποταμό Ρουματιανό, έτος 00-01.	62
--	----

Εικόνα 6. 2. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τον ποταμό Σεμπρονιώτη, έτος 00-01.	62
---	----

Εικόνα 6. 3. α & β. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τους ποταμούς Ρουματιανό & Σεμπρονιώτη αντίστοιχα, έτος 01-02.....	66
--	----

Εικόνα 6. 4. α & β. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τους ποταμούς Ρουματιανό και Σεμπρονιώτη αντίστοιχα, έτος 02-03.....	67
--	----

Εικόνα 6. 5. Χάρτης προσομοιωμένων παροχών επιφανειακής απορροής λεκάνης ποταμού Ταυρωνίτη, στις 18/03/2003, όπου φαίνονται οι περιοχές συσσώρευσης επιφανειακού νερού.....	68
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Εικόνα 7. 1. Περιοχές Natura 2000 στη Λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη (http://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/).	70
Εικόνα 7. 2. Προτεινόμενες θέσεις κατασκευής του υδραυλικού έργου	73
Εικόνα 7. 3. Ενδοποτάμιος φραγμός, ανάντη του φράγματος δημιουργείται ο ταμειωτήρας.....	75
Εικόνα 7. 4. Χάρτης Λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη με τις κλίσεις του εδάφους και τους κοντινούς στις προτεινόμενες θέσεις οικισμούς.....	77
Εικόνα 7. 5. Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη.....	78

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

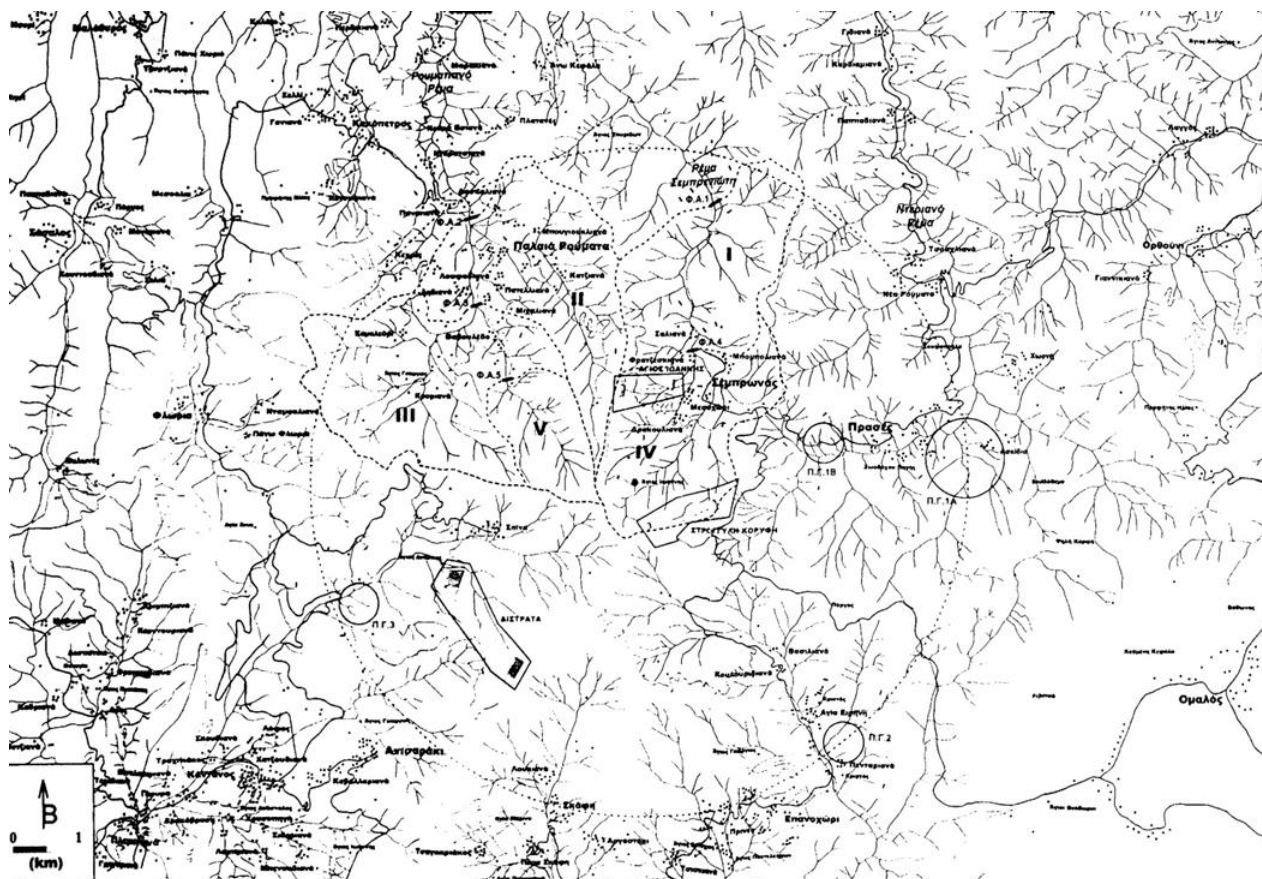
Πίνακας 5. 1. Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή τραχύτητας κατά Manning n και μετατροπή του σε αριθμό Manning M, πηγή (Pestana, 2014).	57
Πίνακας 7. 1. Όγκος νερού σε m ³ ανά έτος, για τα έτη 2001-2002 και 2002-2003 της επαλήθευσης του μοντέλου, για κάθε προτεινόμενη θέση εγκατάστασης.	74
Πίνακας 7. 2. Πίνακας με τις προτεινόμενες θέσεις και τα Κριτήρια που αυτές πληρούν.	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Σκοπός

Είκοσι χιλιόμετρα δυτικά της πόλης των Χανίων, στο Δήμο Πλατανιά, βρίσκεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη. Στην περιοχή έχει προταθεί - σχεδιαστεί η εγκατάσταση αντλιοσταμειακού – υδροηλεκτρικού έργου. Το έργο αυτό συνδυάζει δύο βασικές ιδέες, την αρχική παραγωγή ενέργειας από Αιολικά Πάρκα και την αντλησιοταμίευση, δηλαδή την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας του νερού που αντλείται από ένα κάτω ταμιευτήρα σε έναν άνω, με υψομετρική διαφορά περίπου 564 m. Το έργο έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποθηκεύσει αρχικά, τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του έργου, 60.000 m³ καθαρό όγκο νερού. Στην Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που εκπονήθηκε για το έργο, οι ετήσιες απώλειες του νερού των ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης εκτιμώνται σε 28.112 m³, ενώ η ετήσια ποσότητα νερού που συλλέγεται στους ταμιευτήρες από τη βροχόπτωση εκτιμάται σε 18.811 m³. Άρα η ποσότητα νερού που απαιτείται για την ετήσια επαναπλήρωση των ταμιευτήρων ανέρχεται σε 9.300 m³ (ΜΠΕ υβριδικού έργου, 2010).

Έπειτα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή του έργου, προτάθηκε για την υδροδότηση του έργου η ανόρυξη υδρογεωτρήσεων όπως αυτές φαίνονται στον χάρτη στην Εικόνα 1.1.

Σύμφωνα όμως με το ειδικό σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη που πραγματοποιήθηκε από το Πολυτεχνείο Κρήτης για τον ΟΑΔΥΚ αλλά και με έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ΜΠΕ του υβριδικού έργου από ερευνητική ομάδα με υπεύθυνο τον Ε. Στειακάκη για τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, το μεγαλύτερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης βρίσκεται εντός φυλλιτικών - χαλαζιτικών σχηματισμών. Οι σχηματισμοί αυτοί πρακτικά είναι αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας πολύ μικρής διαπερατότητας (A2) ($k < 10^{-7}$ m/sec), άρα η διήθηση του νερού στον υπόγειο υδροφορέα χαρακτηρίζεται πολύ μικρή έως μηδενική. Έτσι εκτιμάται ότι δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού στον υπόγειο υδροφορέα και επομένως η λύση της διάνοιξης υδρογεωτρήσεων για τις ανάγκες του έργου καθίσταται μη εφικτή.



Εικόνα 1. 1. Χάρτης περιοχής έργου, στους κύκλους αναφέρονται οι προτεινόμενες από την ΜΠΕ του έργου θέσεις των υδρογεωτρήσεων και τα πολύγωνα σε δεξαμενές ύδατος και ταμιευτήρες του υβριδικού έργου

Η επικράτηση της γεωλογικής ενότητας «φυλλιτών – χαλαζιτών», στην λεκάνη του ποταμού Ταυρωνίτη, έχει ως αποτέλεσμα έντονες επιφανειακές απορροές. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής της λεκάνης και ο εντοπισμός των περιοχών συσσώρευσης του επιφανειακού νερού, με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση του για την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων της περιοχής.

Για την εκμετάλλευση της επιφανειακής απορροής, προτείνονται έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων όπως ενδοποτάμιοι ταμιευτήρες και εξωποτάμιοι λιμνοδεξαμενές στις περιοχές με έντονη επιφανειακή απορροή. Τα έργα αυτά προτείνονται με σκοπό την συλλογή των επιφανειακών νερών για την αξιοποίησή τους από τους κατοίκους για άρδευση ή και για την πλήρωση των ταμιευτήρων του υπό εγκατάσταση υβριδικού έργου αλλά και για την προστασία της περιοχής από ακραία υδρολογικά φαινόμενα (πλημμύρες – ξηρασίες).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: Εισαγωγή – Διαχείριση Υδατικών Πόρων

2.1. Γενικά

Το νερό είναι σημαντικό τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο, αποτελεί κοινωνικό αγαθό και έναν από τους βασικότερους πόρους από τους οποίους ο άνθρωπος αντλεί όλα τα αγαθά τα οποία είναι απαραίτητα για τη ζωή του. Επομένως το νερό πρέπει να είναι διαθέσιμο σε όλους διότι είναι αναντικατάστατο για την επιβίωση και την υγεία. Σε παγκόσμιο επίπεδο η κατανάλωση νερού γίνεται για διάφορες χρήσεις (οικιακή - αστική, βιοτεχνική, βιομηχανική, αρδευτική - αγροτική).

Οι υδατικοί πόροι όμως δεν είναι απεριόριστοι. Ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός πληθυσμιακής ανάπτυξης και πολιτιστικής ανάπτυξης της γης, που μεταφράζεται σε αντίστοιχα αυξανόμενο ρυθμό υδατικών αναγκών, σε συνδυασμό με τη μικρή αναλογία διαθέσιμου στον άνθρωπο νερού του υδρολογικού κύκλου, δίνουν μια εικόνα του υδατικού προβλήματος.

Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων έχει σαν στόχους την ικανοποίηση της ζήτησης διαφόρων χρήσεων, την προστασία των υδατικών πόρων από τη ρύπανση, την προστασία της περιοχής από ακραία υδρολογικά φαινόμενα (πλημμύρες - ξηρασίες) και τη διατήρηση και αποκατάσταση του περιβάλλοντος (Παπαμιχαήλ, 2001).

2.2. Υδρολογικός κύκλος

Ο Υδρολογικός κύκλος αποτελεί την σχηματική περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ ατμόσφαιρας ξηράς και θάλασσας. Σε αυτήν την αλυσίδα των εμφανίσεων το νερό παρουσιάζεται μ' όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός), στερεό (χιόνι/ χαλάζι).

Η σειρά των εμφανίσεων του νερού στη φύση δεν έχει πρακτικά αρχή και τέλος. Όμως η αρχή θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού προς τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λπ.

Οι υδρατμοί μεταφέρονται από αέριες μάζες και μπορεί κάτω από κατάλληλες συνθήκες να συμπυκνωθούν σε σύννεφα και στη συνέχεια με μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων να επανεμφανιστούν στην επιφάνεια της γης.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται στο έδαφος και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα και καταλήγει σε λίμνες και θάλασσες. Κατά την πορεία αυτή ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Το υπόλοιπο του νερού που διηθείται, αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα σημεία. Τέλος το νερό της θάλασσας με την εξάτμιση επανέρχεται στην ατμόσφαιρα και με τον τρόπο αυτό κλείνει ο υδρολογικός κύκλος (Εικόνα 2.1.) (Τσακίρης, 1995).

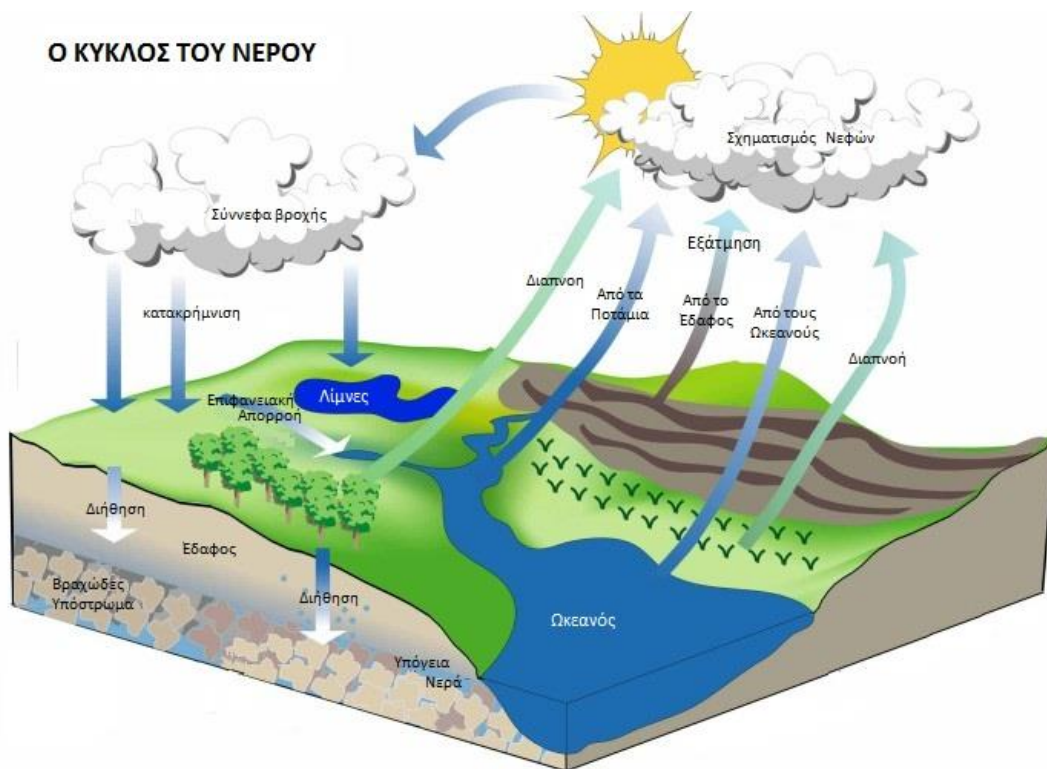
Η μεταβολή της ποσότητας του νερού μπορεί να εκτιμηθεί με μια εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου (Εικόνα 2.2.) που στη γενική της μορφή είναι:

$$\Delta S = I - O$$

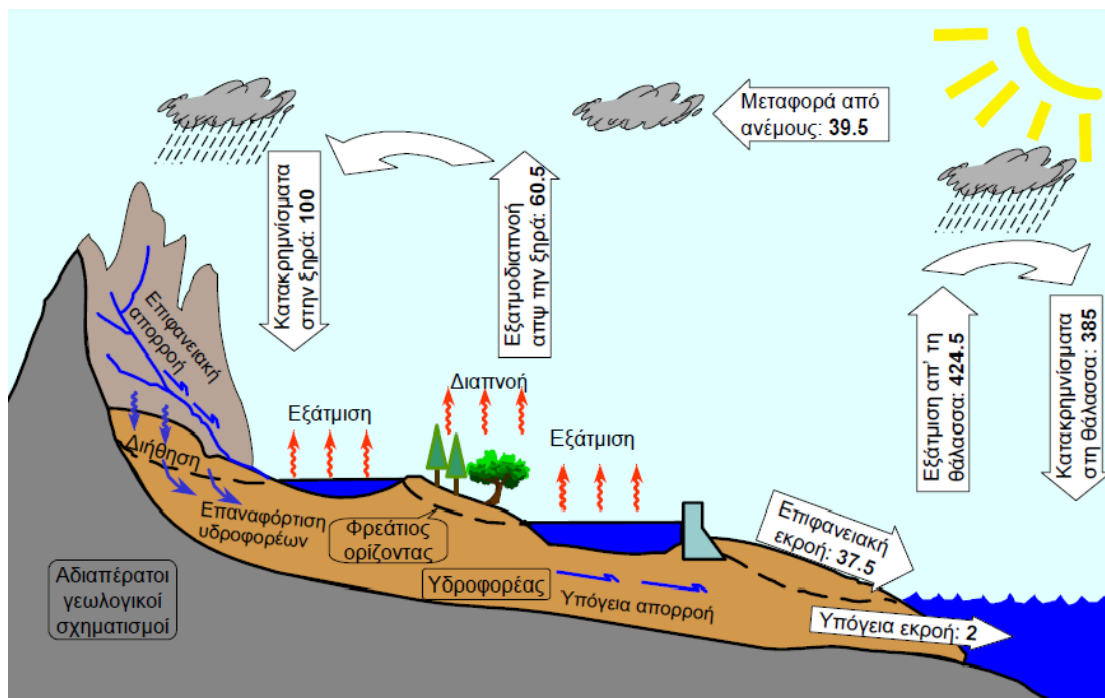
Όπου: I είναι η εισροή νερού σε μια δεδομένη περιοχή κατά τη διάρκεια ορισμένου χρόνου, O είναι η εκροή νερού από την περιοχή στον ίδιο χρόνο και ΔS είναι η μεταβολή του όγκου του νερού στην ίδια περιοχή και στον ίδιο χρόνο. Στην Εικόνα 2.1. παρουσιάζεται μια απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί:

- α. Μεταφορά νερού.
- β. Προσωρινή αποθήκευση.
- γ. Μεταβολή της κατάστασης νερού.



Εικόνα 2. 1. Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (<http://plemenosem.wikispaces.com/>).

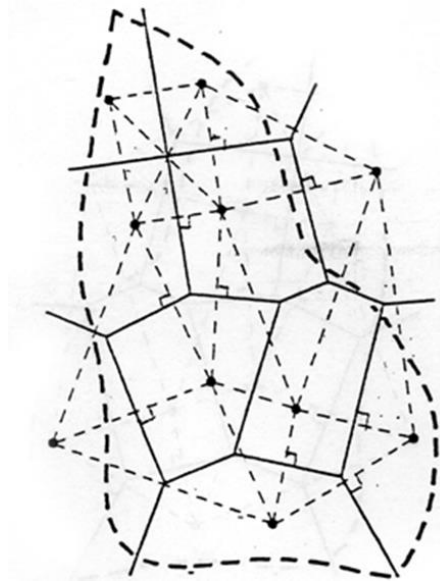


Εικόνα 2. 2. Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε $1190 \text{ km}^3 / \text{έτος}$. [Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999]

2.3. Ατμοσφαιρικές Κατακρημνίσεις

Ο όρος ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις περικλείει όλες τις μορφές των μετεωρικών υδάτων που καταπίπτουν στη γη, δηλαδή τη βροχή, το χιόνι, το χαλάζι και το χιονόνερο. Συνηθίζεται όλες οι μορφές κατακρημνίσεων να ανάγονται, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, σε ισοδύναμο ύψος βροχής. Το ύψος βροχής αναφέρεται στο ιδεατό ύψος όπου θα έφθανε η στάθμη του νερού από τις κατακρημνίσεις επάνω από μια αδιαπέρατη επίπεδη οριζόντια επιφάνεια, εάν δεν υπήρχε η δυνατότητα να απορρεύσει ή να εξατμιστεί μέσα στην περίοδο που γίνεται η μέτρηση. (Βαφειάδης, 2000)

Η μέτρηση των βροχοπτώσεων, αλλά και όλων των κατακρημνίσεων, γίνεται με τα βροχόμετρα και τους βροχογράφους. Για την παρούσα εργασία αντλήσαμε τα δεδομένα μας (ημερήσιο ύψος βροχής σε mm) από μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν βροχόμετρα. Τα βροχόμετρα είναι τυποποιημένα δοχεία συλλογής των κατακρημνίσεων. Οι μετρήσεις όμως που δίνουν τα όργανα αυτά είναι σημειακές. Μια εξαιρετικά απλή μέθοδος για τον υπολογισμό του μέσου ισοδύναμου ύψους κατακρημνίσεων σε μία περιοχή είναι η **μέθοδος των πολυγώνων Thiessen**. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η συνολική επιφάνεια S χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής S_i , μία για κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό. Τα όρια των ζωνών προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους σταθμούς, έτσι σχεδιάζονται τα πολύγωνα Thiessen. (Εικόνα 2.3.) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)



Εικόνα 2. 3. Πολύγωνα Thiessen

2.4. Επιφανειακή Απορροή

Ως επιφανειακή απορροή (Surface runoff) χαρακτηρίζεται εκείνο το μέρος των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων το οποίο ρέει αρχικά στην επιφάνεια του εδάφους και στην συνέχεια διέρχεται δια μέσου του συστήματος των υπορρευμάτων μέχρις ότου καταλήξει στην έξοδο της Λεκάνης απορροής.

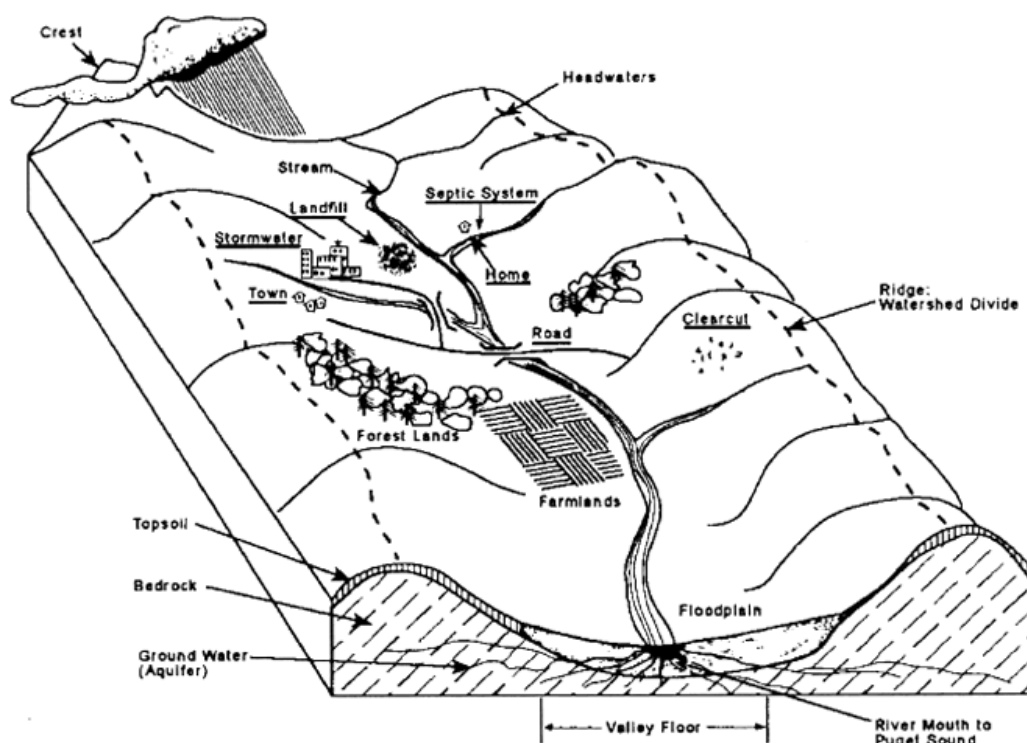
Για να λάβει χώρα απορροή πρέπει προηγουμένως να πραγματοποιηθούν ορισμένες άλλες διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου. Έτσι με την έναρξη της βροχόπτωσης, αρχίζει η συγκράτηση (Interception) μέρους των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων από τη βλάστηση. Στην συνέχεια καλύπτονται οι ανάγκες της διηθήσεως (Infiltration), όταν δε η ένταση της βροχής γίνει μεγαλύτερη από την ταχύτητα διηθήσεως του νερού στο έδαφος τότε αρχίζει η ικανοποίηση των αναγκών της επιφανειακής αποθήκευση (Depression storage) εντός των μικροκοιλοτήτων του εδάφους. Μετά την ικανοποίηση όλων των ως άνω αναγκών αρχίζει η δημιουργία της επιφανειακής απορροής (Σακκάς, 2007)

2.5. Λεκάνη Απορροής

Ως Λεκάνη Απορροής (Drainage Basin, Watershed) (Εικόνα 2.4.) ορίζεται το σύνολο της τοπογραφικής επιφάνειας στο οποίο αποστραγγίζεται ένα υδατόρρευμα

και οι παραπόταμοί του και από το οποίο η όλη επιφανειακή απορροή διέρχεται από μια διατομή του κύριου ρεύματος. Η διατομή αυτή χαρακτηρίζεται ως η έξοδος της Λεκάνης Απορροής. Κάθε λεκάνη απορροής περιορίζεται και χωρίζεται από τις άλλες που την περιβάλλουν από μια κλειστή γραμμή, καλούμενη **υδροκρίτης**, η οποία ενώνει τα υψηλότερα σημεία του εδαφικού ανάγλυφου. (Βαφειάδης, 2012 και Σακκάς, 2007)

Κάθε λεκάνη απορροής μπορεί να χωριστεί σε μικρότερες επιμέρους υπολεκάνες (π.χ. μία για κάθε παραπόταμο). Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (τοπογραφία, γεωλογία και οι χρήσεις γης) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ποσότητας, της ποιότητας και του χρόνου της ροής του ρεύματος στην έξοδο, των εκροών των υπόγειων υδάτων καθώς και των περιοχών συσσώρευσης επιφανειακής απορροής.



Εικόνα 2. 4. Σχηματική απεικόνιση Λεκάνης Απορροής ποταμού, πηγή: www.whatcom.wsu.edu.

2.6. Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ)

Μπορούμε να διαχωρίσουμε δύο ειδών δραστηριότητες που αφορούν τους υδατικούς πόρους. Η πρώτη δραστηριότητα αφορά τα «έργα» και αναφέρεται στα

έργα ανάπτυξης υδατικών πόρων (δίκτυα υδρεύσεως, γεωτρήσεις, κ.λπ.) καθώς και στα έργα διατήρησης και ελέγχου των υδατικών πόρων (αντιπλημμυρικά έργα, έργα βιολογικού καθαρισμού). Η δεύτερη δραστηριότητα αφορά τη διαχείριση υδατικών πόρων για την εξασφάλιση της βέλτιστης χρήσης νερού σήμερα αλλά και στο μέλλον.

Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) νοείται μια δυναμική διαδικασία που αποβλέπει στην πληρέστερη δυνατή κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών, για κάθε χρήση με βάση έναν ορθολογικό προγραμματισμό που στηρίζεται σε αντικειμενικά κριτήρια και διαδικασίες. Επομένως η ΔΥΠ ετοιμάζει σχέδια σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο που εξασφαλίζουν την βέλτιστη χρήση του νερού σήμερα αλλά και στο μέλλον. Επίσης έχει την ευθύνη της εφαρμογής των σχεδίων με διοικητικά μέτρα και κανονισμούς καθώς και με τον συντονισμό της κατασκευής των υδραυλικών έργων (Τσακίρης, 1995).

Στα πλαίσια της διαχείρισης των υδατικών πόρων η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την οδηγία Πλαίσιο για το νερό (2000/60/EK), η οποία θεσπίζει πλαίσιο κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου. Σκοπός της παραπάνω οδηγίας είναι η ολοκληρωμένη προστασία και ορθολογική διαχείριση των επιφανειακών, των παράκτιων και υπογείων νερών.

Κάθε Περιφέρεια εκπονεί Σχέδιο Διαχείρισης των λεκανών απορροής ποταμών αρμοδιότητάς της, το οποίο ισχύει για έξι χρόνια. [ΦΕΚ Αρ. Φυλ 280, 12/2003]. Η εκπόνηση ειδικού σχεδίου διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας λεκάνης απορροής, έχει ως στόχο την ολοκληρωμένη και βιώσιμη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων, ώστε να συμβάλλει στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος, στην κοινωνική συνοχή, στην οικονομική προστιθέμενη αξία και γενικότερα στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Οι επιμέρους στόχοι είναι:

1. Αξιολόγηση της υπάρχουσας κατάστασης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης βάσει των υπαρχόντων δεδομένων και μελετών, έπειτα από σύνθεση.
2. Χαρακτηρισμός των υδάτινων συστημάτων (water bodies) με βάση της Οδηγία Πλαίσιο 2000/60.
3. Ανάλυση των περιβαλλοντικών πιέσεων και επιπτώσεων της ρύπανσης.
4. Αξιολόγηση της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των υδάτινων συστημάτων.

5. Αξιολόγηση των εναλλακτικών περιβαλλοντικών μέτρων και δημόσια ενημέρωση κοινωνικών εταίρων για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων.
6. Ιεράρχηση των περιοχών παρέμβασης (προτάσεις περιβαλλοντικών μέτρων).
7. Στρατηγικό σχέδιο βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων.
(Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2012)

Βασικοί κανόνες της ΔΥΠ είναι η ισομερής κατανομή μεταξύ των χρηστών με βάση αντικειμενικά κριτήρια, η οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού σήμερα και στο μέλλον, η αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών (καταστροφή πόρων και περιβάλλοντος) και η βιωσιμότητα της ανάπτυξης (Τσακίρης, 1995).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: Υδρολογικά μοντέλα βροχής – απορροής

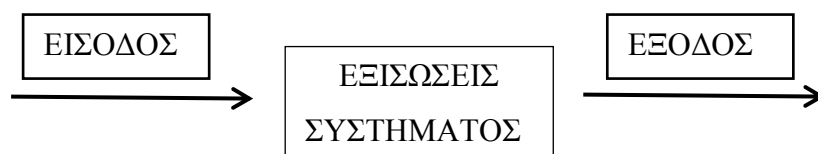
3.1. Εισαγωγή στην έννοια του υδρολογικού μοντέλου

Η σωστή αξιοποίηση και η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων προϋποθέτουν την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου, που οδηγεί στην αξιόπιστη αναπαράσταση των σχέσεων βροχής – απορροής. Η διερεύνηση των σχέσεων βροχής - απορροής γίνεται με την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων (Παπαμιχαήλ, 2001).

Η εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων ενδείκνυται κυρίως στις περιπτώσεις ποταμών για την εκτίμηση της απορροής και την απόκτηση δεδομένων παροχής τους, με τη βοήθεια δεδομένων βροχόπτωσης και άλλων μετεωρολογικών στοιχείων. Η σημασία τους είναι πολύ μεγάλη, εξαιτίας του γεγονότος ότι σε πολλά ποτάμια στην Ελλάδα δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι υδρομετρικοί σταθμοί και τα δεδομένα παροχών είναι ελάχιστα. Αντίθετα το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών είναι αρκετά πυκνό και οι μετρήσεις τους καλύπτουν αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα.

3.2. Ορισμός Υδρολογικού Μοντέλου και συνιστώσες

Το υδρολογικό μοντέλο ορίζεται σαν ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή. Σχηματικά ένα υδρολογικό μοντέλο αναπαρίσταται ως:



Εικόνα 3. 1. Γενική αναπαράσταση μοντέλου (Τσακίρης, 1995)

Όπου:

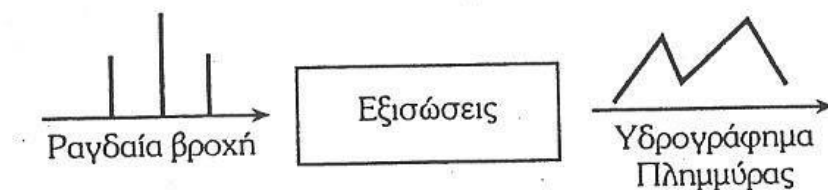
- **Είσοδος:** Μετεωρολογικές μεταβλητές (κατακρημνίσεις, θερμοκρασία, άνεμος κ.λπ.).

- **Εξισώσεις συστήματος:** Σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή (κατακράτηση, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδιάμεση απορροή, εδαφική υγρασία, αποθήκευση υπόγειου ορίζοντα). Τα τελευταία χρόνια, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διαδικασιών.
- **Έξοδος:** Απορροή.

3.3. Γενική ταξινόμηση υδρολογικών μοντέλων

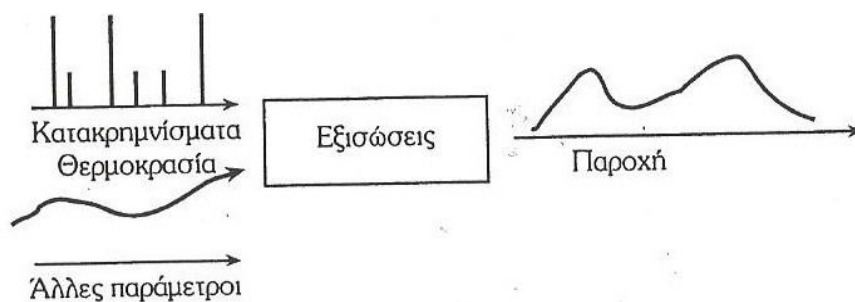
Τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής (Rainfall - Runoff) ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κ.λπ.. Ο πλέον συνήθης διαχωρισμός των μοντέλων είναι πρώτον σε μοντέλα **μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος** και **συνεχή** μοντέλα και δεύτερον σε **ενιαία** (lumped) και **κατανεμημένα** (discrete) (Παπαρρίζος, 2012). Συγκεκριμένα:

1α. Το **μοντέλο ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος** περιλαμβάνει ως είσοδο ένα μεμονωμένο γεγονός βροχής και ως έξοδο ένα υδρογράφημα πλημμύρας (Εικόνα 3.2.).



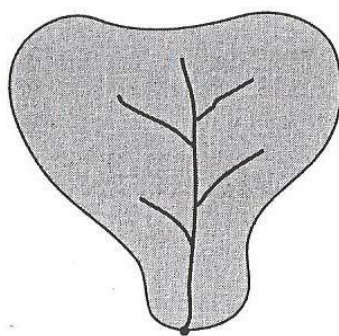
Εικόνα 3. 2. Μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (Τσακίρης, 1995).

1β. Το **συνεχές μοντέλο** περιλαμβάνει ως είσοδο μια ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μιας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών (Εικόνα 3.3.).



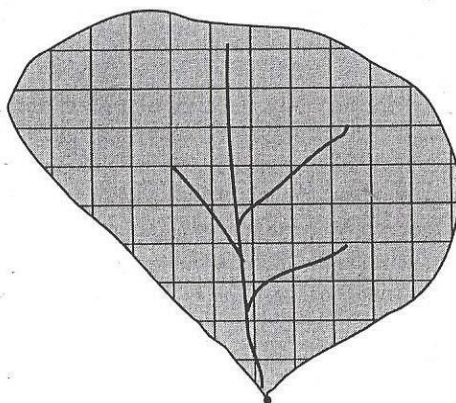
Εικόνα 3. 3. Συνεχές μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

2α. Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου (βροχόπτωση, κ.λπ.) και εξόδου (απορροή) (Εικόνα 3.4.).



Εικόνα 3. 4. Ενιαίο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

2β. Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά (Εικόνα 3.5.).



Εικόνα 3. 5. Κατανεμημένο μοντέλο (Τσακίρης, 1995).

3.4. Ταξινόμηση μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης

Τα συνεχή μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής (Rainfall - Runoff) μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια:

A. Το κριτήριο του είδους εξισώσεων. Με βάση το κριτήριο αυτό, τα μοντέλα ταξινομούνται σε φυσικά ή **φυσικής βάσης** (physically – based), **παραμετρικά** ή εννοιολογικά (conceptual) και μοντέλα **μαύρου κουτιού** (black box).

B. Το κριτήριο που βασίζεται στο αν λαμβάνεται υπ' όψιν η τυχαιότητα των φαινομένων. Με βάση το κριτήριο αυτό, τα μοντέλα ταξινομούνται σε **προσδιοριστικά** και **στοχαστικά**. (Παπαμιχαήλ, 2001). Και αυτά με τη σειρά τους χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Τα **προσδιοριστικά φυσικά μοντέλα** βασίζονται στις εξισώσεις της φυσικής, δηλαδή, στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν ένα σύνολο περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων και συνήθως περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Επίσης τα μοντέλα αυτά απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Τέτοια μοντέλα εφαρμόζονται κυρίως σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου (π.χ. μοντέλο MIKE SHE).

Τα **προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα** προσομοιώνουν τη σχέση βροχόπτωσης-απορροής (Rainfall - Runoff), βασιζόμενα σε ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ διαδεδομένα και περιλαμβάνουν παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται από τη διαδικασία «ρύθμισης» (**calibration & validation**), του μοντέλου. Η διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου, είναι ο αλγόριθμος ο οποίος συνίσταται στην αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, έτσι ώστε οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων παροχών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες (π.χ. μοντέλο Stanford IV, μοντέλο Sacramento κ.λπ.).

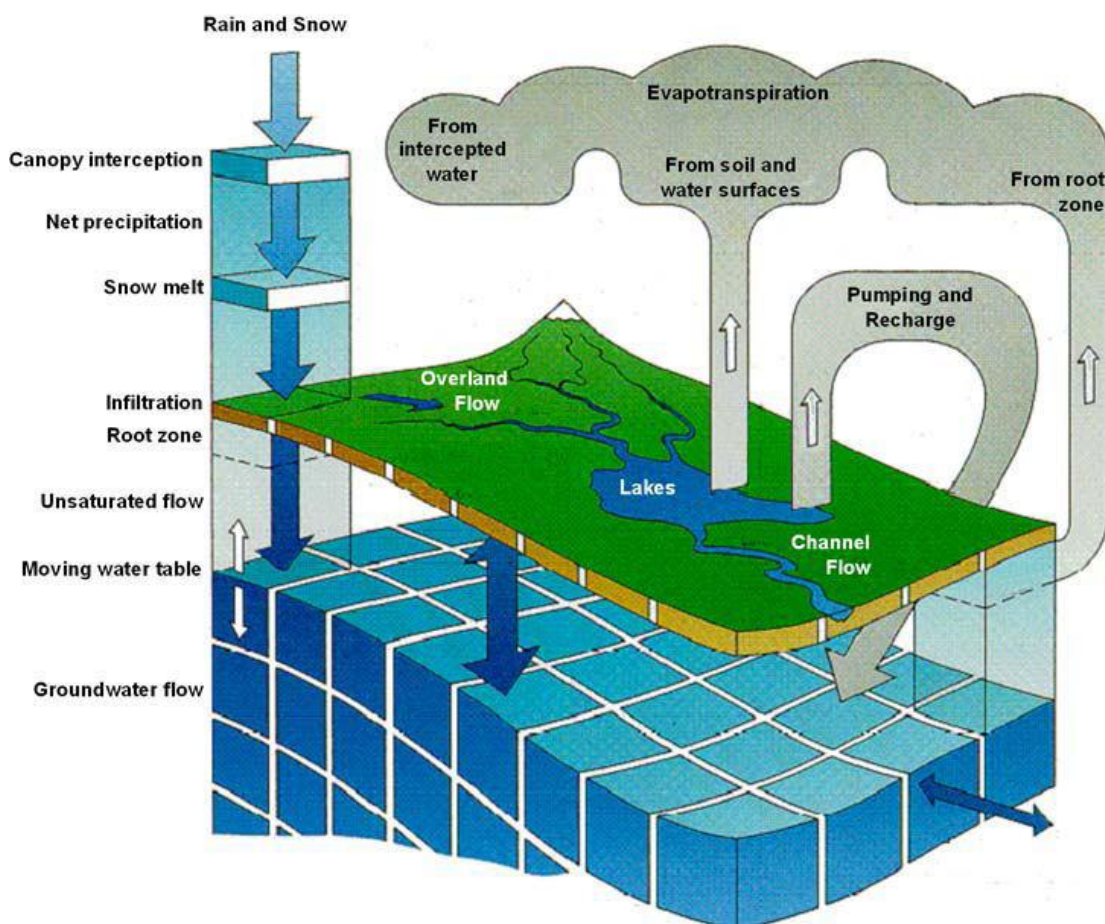
Τα **προσδιοριστικά μοντέλα «μαύρου κουτιού»** βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρημένης παροχής. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Τα **στοχαστικά μοντέλα «μαύρου κουτιού»** είναι μοντέλα τα οποία υπολογίζουν τη μεταβλητή εξόδου (απορροή) λαμβάνοντας υπ' όψιν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής εισόδου (βροχή), υπό τον όρο να διατηρούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρημένης παροχής (π.χ. μέσος, διασπορά, αυτοσυσχέτιση, διασταυρούμενη συσχέτιση, κ.λπ.) (π.χ. μοντέλο ARIMA).

Τα στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα λαμβάνουν υπ' όψιν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εισόδου και συγχρόνως περιλαμβάνουν εξισώσεις που απεικονίζουν τις βασικές διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 1995).

3.5. Περιγραφή υδρολογικού μοντέλου MIKE-SHE

Το υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE (Système Hydrologique Européen) είναι ένα καταναμημένο μοντέλο φυσικής βάσης που προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις 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. Περιλαμβάνει μοντέλα διεργασιών για την εξατμισοδιαπνοή, τη χερσαία ροή, την ακόρεστη ροή, τη ροή των υπογείων υδάτων και τη ροή σε κανάλι καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους. Οι φάσεις που προσομοιώνονται δίνονται στην Εικόνα 3.6, όπου φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MIKE SHE.



Εικόνα 3. 6. Σχηματική περιγραφή του ομοιώματος MIKE-SHE (MIKE SHE User Manual, 2007).

3.6. Παρουσίαση του λογισμικού ArcGIS.

3.6.1. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Σύμφωνα με τον Μανιάτη (1996) ο ακριβέστερος ορισμός για τα Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών έχει δοθεί από την F.I.G. (Federation Internationale des Geometres) το 1983. Σύμφωνα με αυτόν, Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π) είναι ένα εργαλείο για λήψη αποφάσεων νομικής, διοικητικής και οικονομικής φύσης. Είναι ένα εργαλείο που αποτελείται από τη μία από μία Βάση Δεδομένων που περιέχει για μια έκταση στοιχεία προσδιορισμένα στο χώρο και τα οποία σχετίζονται με τη γη και από την άλλη (αποτελείται) από διαδικασίες και τεχνικές για τη συστηματική συλλογή, ενημέρωση, επεξεργασία και διανομή των στοιχείων. Η βάση ενός Γ.Σ.Π. είναι ένα ενιαίο σύστημα (γεωγραφικής) αναφοράς, το

οποίο επίσης διευκολύνει τη σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους καθώς και με άλλα συστήματα που περιέχουν στοιχεία για τη γη.

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π) ή κατά την ξένη ορολογία Geographic Information System (GIS) είναι ένα σύστημα βασισμένο σε υπολογιστικό εξοπλισμό (computer) το οποίο χαρτογραφεί και αναλύει «αντικείμενα» που υφίστανται στην επιφάνεια της γης (και όχι μόνο) καθώς και γεγονότα που συμβαίνουν σε δεδομένη χρονική βάση στον γεωγραφικό χώρο. (Τσουχλαράκη και Αχίλλεως, 2010)

3.6.2. Το ArcGIS

Το ArcGIS είναι ένα σύστημα – εργαλείο, προϊόν της ESRI (Environmental Systems Research Institute), με σκοπό τη χωρική ανάλυση και τη διαχείριση δεδομένων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ArcGIS Desktop 9.3 (2008) η οποία υποστηρίζει πολυάριθμα γεωγραφικά δεδομένα, τα με σημαντικότερα τα εξής:

- Σχηματικά αρχεία (shapefiles) - Διανυσματικού τύπου αρχεία

Περιέχουν γεωγραφικά και περιγραφικά δεδομένα τα οποία μπορούν να διορθωθούν μέσα από το περιβάλλον του ArcView. Μπορεί να περιέχουν μόνο σημεία, ή μόνο γραμμές, ή τέλος μόνο πολύγωνα. Χρησιμοποιούνται ως αρχεία ανταλλαγής χωρικών δεδομένων με άλλα λογισμικά χωρικής διαχείρισης.

- Αρχεία θεματικών επιπέδων (ARC/INFO Coverage) - Διανυσματικού τύπου

Είναι αρχεία παρόμοια με τα shapefiles, εμπεριέχουν όμως επιπλέον πληροφορίες. Μπορεί να περιέχουν γραμμές και πολύγωνα, σημεία και γραμμές αλλά όχι σημεία και πολύγωνα ταυτόχρονα.

- Ψηφιδωτά αρχεία (ARC/INFO Grids)

Τα αρχεία αυτά αποτελούνται από ψηφιδωτά (raster) δεδομένα, κατάλληλα για να περιγράψουν γεωγραφικά φαινόμενα τα οποία διαφέρουν συνεχώς στο χώρο.

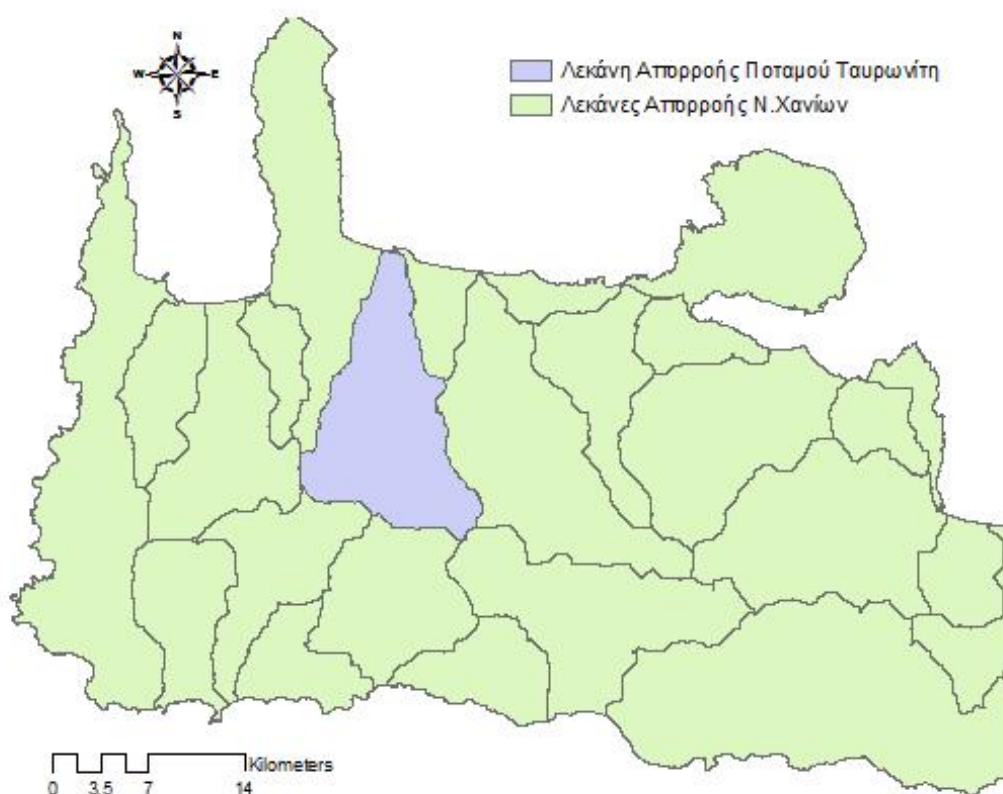
- Εικόνες (Images)

Μπορούν να προστεθούν αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και σαρωμένα έντυπα μέσα στο περιβάλλον του ArcGIS. Οι εικόνες αυτές αφού προηγουμένως διορθωθούν γεωμετρικά, μπορούν να αποτελέσουν ένα ιδανικό υπόβαθρο για την παραγωγή σχηματικών αρχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Περιγραφή Περιοχής Μελέτης.

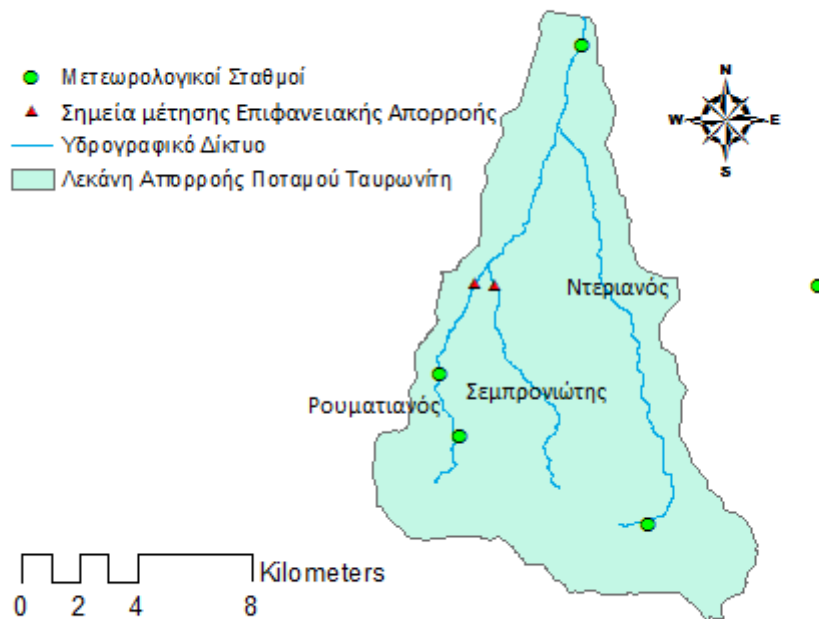
4.1. Περιγραφή Λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη βρίσκεται οριοθετείται με συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους μεταξύ 35ο 19' 12'' και 35ο 32' 05'' και γεωγραφικού μήκος 23ο 44' 54'' και 24ο 01' 05''. Έπειτα από την εφαρμογή του σχεδίου «Καλλικράτης» για την ενοποίηση των δήμων, ανήκει διοικητικά στο Δήμο Πλατανιά. Η έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Ταυρωνίτη είναι περίπου 141 km². Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη συμβάλει καταλυτικά στη διαμόρφωση του υδατικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του Ν. Χανίων. Στις εκβολές του ποταμού έχει δημιουργηθεί ένας αξιόλογος υδροβιότοπος ο οποίος φιλοξενεί πλούσια χλωρίδα και πανίδα ενώ τμήματα της λεκάνης, στο Βόρειο και Νότιο άξονα, ανήκουν σε προστατευμένες περιοχές Natura 2000.



Εικόνα 4. 1. Γεωγραφική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη στο Ν. Χανίων (ArcGIS)

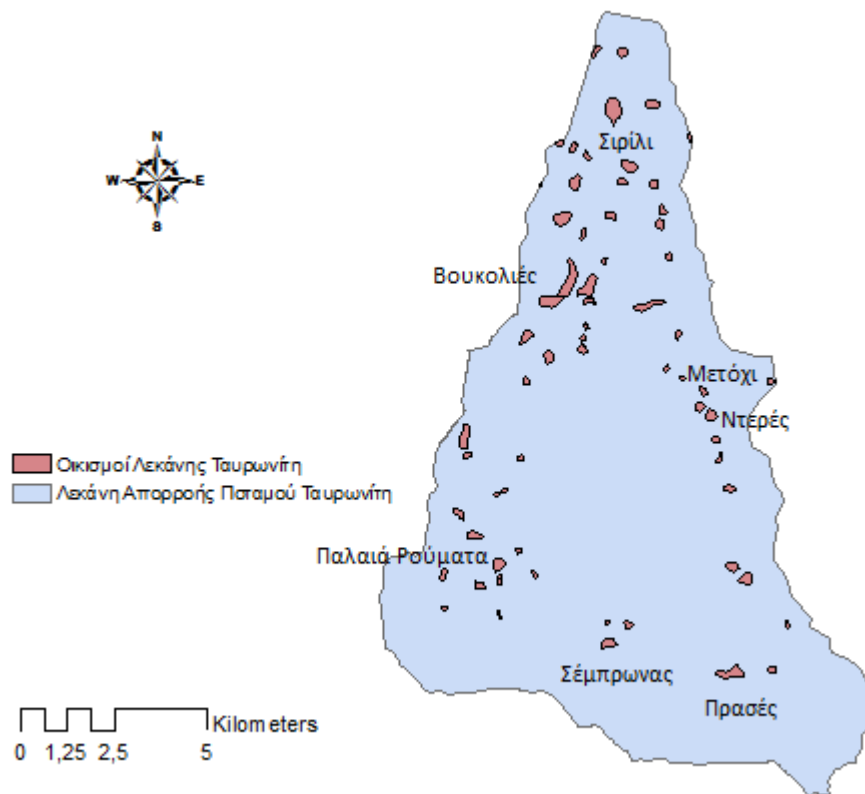
Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Ταυρωνίτη ξεκινάει από τα Λευκά Όρη σε υψόμετρο 1400m και εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του ποταμού Ταυρωνίτη αποτελείται από τρεις κύριες υπολεκάνες παραποτάμων - χείμαρρων: α) του παραπόταμου Σεμπρωνιώτη που ξεκινάει - πηγάζει από το χωριό Σέμπρωνας, β) του παραπόταμου Ρουματιανού που ξεκινάει από το χωριό Παλαιά Ρούματα, και γ) του παραπόταμου Ντεριανού όπου οι πηγές του βρίσκονται στο χωριό Πρασσές. Οι δυο πρώτοι παραπόταμοι καταλήγουν να ενώνονται κοντά στο χωριό Βουκολιές όπου διαμορφώνεται η κύρια κοίτη του ποταμού Ταυρωνίτη. Ο Ντεριανός εκφορτίζεται στο χωριό Συρίλι όπου ενώνεται με την κύρια κοίτη του ποταμού Ταυρωνίτη 3 χιλιόμετρα περίπου πριν την θάλασσα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2 (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2012).



Εικόνα 4. 2. Υδρογραφικό Δίκτυο Λεκάνης Απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS)

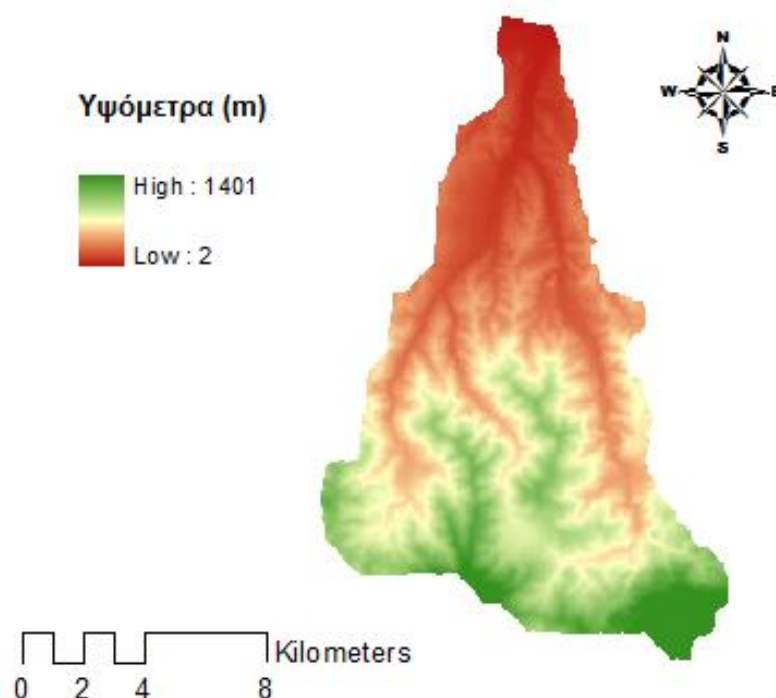
Η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής περιλαμβάνει πλήθος μεγάλων και μικρότερων οικισμών. Η θέση και η γεωγραφική έκταση των παραπάνω οικισμών φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Οι μόνιμοι κάτοικοι της περιοχής είναι 19.019 (απογραφή

2001) και οι ανάγκες ύδρευσης ανέρχονται σε περίπου $1,1 \cdot 10^6$ m³/έτος νερού (Στειακάκης και Μανούτσογλου, 2010)



Εικόνα 4. 3. Χωρική απεικόνιση των οικισμών της λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS).

Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη (Εικόνα 4.4.) ποικίλει, με το μέγιστο υψόμετρο να φτάνει γύρω στα 1400m στο νότιο τμήμα της και το ελάχιστο στο βόρειο κομμάτι της, στην ακτογραμμή, με υψόμετρο 0 m, όπου και εκβάλλει ο ποταμός Ταυρωνίτης. Το νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής αποτελεί τμήμα του ορεινού όγκου των Λευκών Ορέων.

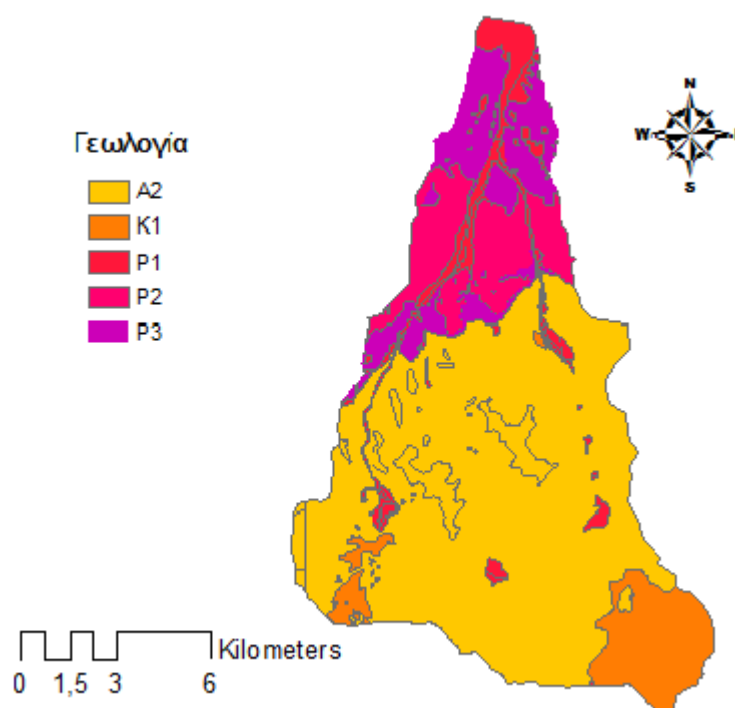


Εικόνα 4. 4. Τοπογραφικό ανάγλυφο λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη (ArcGIS).

4.2. Γεωλογία περιοχής

Με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS, υπολογίστηκε χωρικά η έκταση που καταλαμβάνει κάθε γεωλογικός σχηματισμός που συναντάται στην υδρολογική λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη. Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης, περίπου 85 km², αναπτύσσεται εντός φυλλιτικών - χαλαζιτικών σχηματισμών, οι οποίοι τοπικά καλύπτονται από αλλούβια και υλικά τεταρτογενών αναβαθμίδων μικρής έκτασης και πάχους (Στειακάκης και Μανούτσογλου, 2010). Οι σχηματισμοί αυτοί πρακτικά είναι μη υδατοπερατοί ή μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2) και αποτελούν συνήθως το κάτω όριο των υπογείων υδροφορέων. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί που συναντώνται στα ανάντη νότια τμήματα της λεκάνης (υπολεκάνες Ντεριανού και Ρουματιανού) καλύπτουν περίπου 13 km². Οι σχηματισμοί αυτοί είναι υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (k1). Στο κατάντη τμήμα της λεκάνης αναπτύσσονται νεογενής σχηματισμοί (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, μάργες κ.ά.) σε έκταση περίπου 15 km². Οι σχηματισμοί αυτοί είναι μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (p3). Επίσης έκταση περίπου 14 km² καλύπτεται από

αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (p2). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού. Έκταση επίσης 10 km² αντιστοιχεί σε ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και τεταρτογενείς αποθέσεις αναβαθμίδων και σύγχρονων αλλούβιων σχηματισμών οι οποίοι καταλαμβάνουν τα όρια της ευρύτερης κοίτης του ποταμού Ταυρωνίτη μέχρι το ύψος του οικισμού Βουκολιών και του παραπόταμου Ντεριανού. Οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (p1). (Εικόνα 4.5.) (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2012).



Εικόνα 4. 5. Υδρογεωολογικοί σχηματισμοί περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού Ταυρωνίτη (ArcGIS).

4.3. Υδρολογικά Χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα των Στειακάκη και Μανούτσογλου, 2010, με βάση την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιεί η Περιφέρεια Κρήτης, η μέση ετήσια απορροή υδατορευμάτων για την περίοδο 1977-97, ήταν $12,2 \cdot 10^6$ m³ για τον Σεμπρονιώτη και $5,8 \cdot 10^6$ m³ για τον Ρουματιανό. Από τις υπάρχουσες μετρήσεις εκτιμάται ότι οι μέσες ετήσιες ποσότητες της λεκάνης Ταυρωνίτη που απορρέουν

επιφανειακά και εκφορτίζονται στην θάλασσα είναι της τάξης των $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (περίοδος 1977-97).

Στην περιοχή της λεκάνης του Ταυρωνίτη έχουν απογραφεί 55 σημεία εμφάνισης νερού από τα οποία τα 16 αναφέρονται σε γεωτρήσεις, τα 38 σε πηγάδια και το 1 σε πηγή. Πολλά από τα πηγάδια κατά την ξηρή περίοδο στερεύουν. (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2012). Ερευνητική ομάδα με Επιστημονικό Υπεύθυνο τον Ε. Στειακάκη το 2010 πραγματοποίησε μια σύντομη απογραφή των σημείων νερού στην λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη και επισήμανε ότι σύμφωνα με μελέτες του ΙΓΜΕ το 1989 στην περιοχή εκφορτίζει μεγάλος αριθμός μικροπηγών. Σε κάποιες θέσεις παρατηρήθηκαν πηγές με αυξημένες παροχές. Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του Σέμπρωνα εκδηλώνονται έξι πηγές με παροχές από 15 έως $50 \text{ m}^3/24\text{h}$. Επίσης στον Πρασσέ, Ν. Ρούματα και Χωστή εντοπίζονται αντίστοιχα τρεις πηγές με παροχές έως και $24 \text{ m}^3/24\text{h}$. Η πιο σημαντική είναι αυτή του Πρασσέ οι παροχές της οποίας ανέρχονται σε $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Τέλος αξιόλογη υδροφορία παρουσιάζεται στην Αγ. Ειρήνη με παροχές των πηγών της τάξης των $48 \text{ m}^3/24\text{h}$.

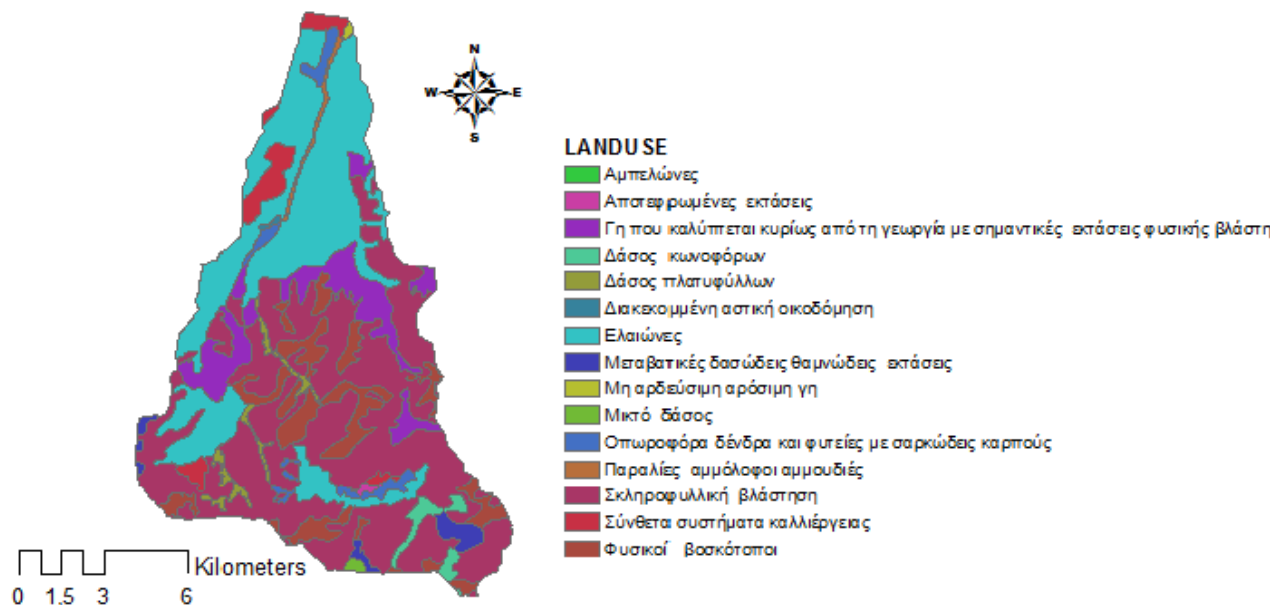
4.4. Χρήσεις Γης

Χρησιμοποιώντας στοιχεία της βάσης δεδομένων Corine 2000 και με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS, υπολογίστηκαν χωρικά οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη. Αναλυτικότερα παρακάτω περιγράφονται το εμβάδο και η ποσοστιαία αναλογία των πιο σημαντικών χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης (Εικόνα 4.6).

- Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από σκληρόφυλλη βλάστηση (κωδικός 323), καταλαμβάνουν έκταση 61km^2 με ποσοστό 43.3% των συνολικών χρήσεων γης της λεκάνης (141.13 km^2).
- Οι περιοχές με διακεκομμένη αστική δόμηση (κωδικός 112) έχουν έκταση 0.14km^2 και καταλαμβάνουν το 0.10%,
- Οι περιοχές με οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς (κωδικός 222) το 2 % με 2.9 km^2 .
- Οι ελαιώνες (κωδικός 223) έχουν ποσοστό ίσο με 28.1% και έκταση 39.7 km^2 .
- Τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας (κωδικός 242) έχουν έκταση 4.4km^2 με ποσοστό περίπου 3% του συνολικού.

- Η γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (κωδικός 243) 8,5% με περίπου 12 km².
- Οι φυσικοί βοσκότοποι (κωδικός 321) 9.43% με 13.3 km².
- Τα μικτά δάση (κωδικός 324) με 0.2% και 0.27 km².
- Η μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη (κωδικός 211) με ποσοστό 0.11% και έκταση 0.15 km²
- Οι περιοχές με αμπελώνες (κωδικός 221) σε πολύ μικρή έκταση(0.06km²).
- Το δάσος κωνοφόρων (κωδικός 312) με 1.40% και εμβαδό 1.97 km² και
- Το δάσος πλατύφυλλων με 1.37% και εμβαδό 1.92 km².

Όλα τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.6



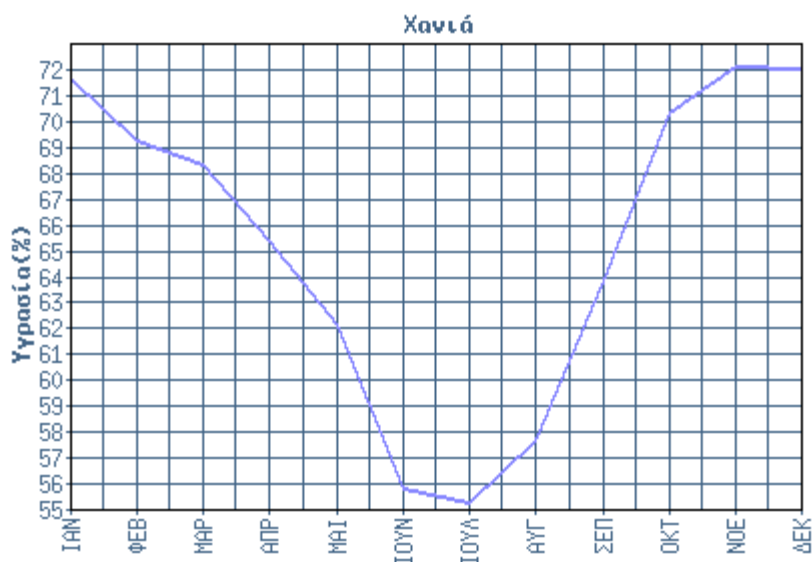
Εικόνα 4. 6. Χρήσεις γης λεκάνης Ταυρωνίτη με χρήση βάσης δεδομένων Corine 2000 (ArcGIS).

4.5. Κλιματολογικά στοιχεία.

1. Το κλίμα της περιοχής είναι το ήπιο θαλάσσιο μεσογειακό με έντονη την επίδραση της θάλασσας, χαρακτηρίζεται από πολύ ήπιο, βροχερό χειμώνα, άνοιξη με λίγες βροχοπτώσεις, έντονο ξηροθερμικό καλοκαίρι και φθινόπωρο αρκετά θερμό με λίγες κατά κανόνα βροχοπτώσεις. Κύρια χαρακτηριστικά του μικροκλίματος είναι: η μακρά ξηρά περίοδος από το Μάιο μέχρι και τον Σεπτέμβριο, η μεγάλη ηλιοφάνεια η οποία συνολικά τον χρόνο πλησιάζει τις ώρες ηλιοφάνειας των νότιων παραλιακών περιοχών του νομού, όλη η περιοχή έχει 2900 ώρες ηλιοφάνειας το χρόνο. Τα ευνοϊκά αυτά χαρακτηριστικά του μικροκλίματος της περιοχής, οφείλονται στην έντονη επίδραση της κοντινής θάλασσας. Επικρατούντες άνεμοι και ιδιαίτερα κατά την περίοδο του χειμώνα στην περιοχή είναι οι βόρειοι άνεμοι, οι βόρειοι ανατολικοί και οι βόρειοι δυτικοί (Ε.Μ.Υ.: <http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology>).

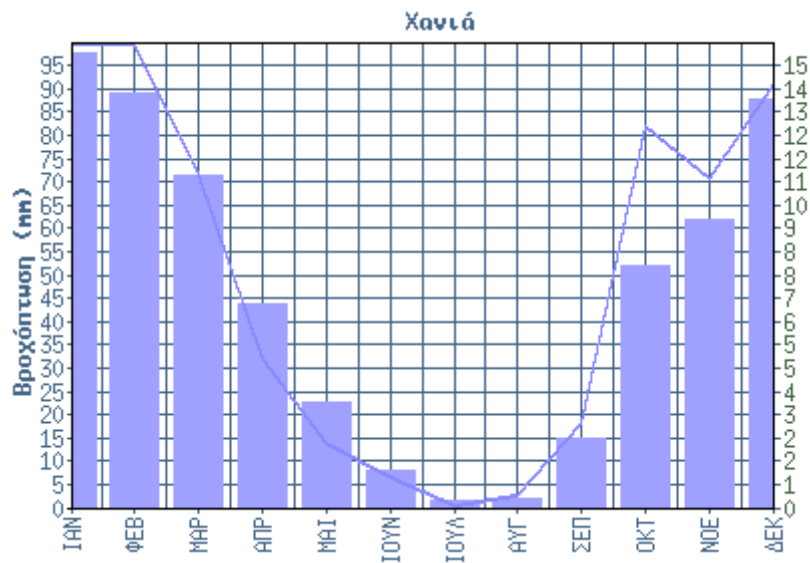
Παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα ορισμένα μετεωρολογικά στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για το νομό Χανίων (Χανιά: Γ. Μήκος (Lon) 24°7'0" / Γ.Πλάτος (Lat) 35°29'0"/Ύψος 150μ.)

Στοιχεία υγρασίας:



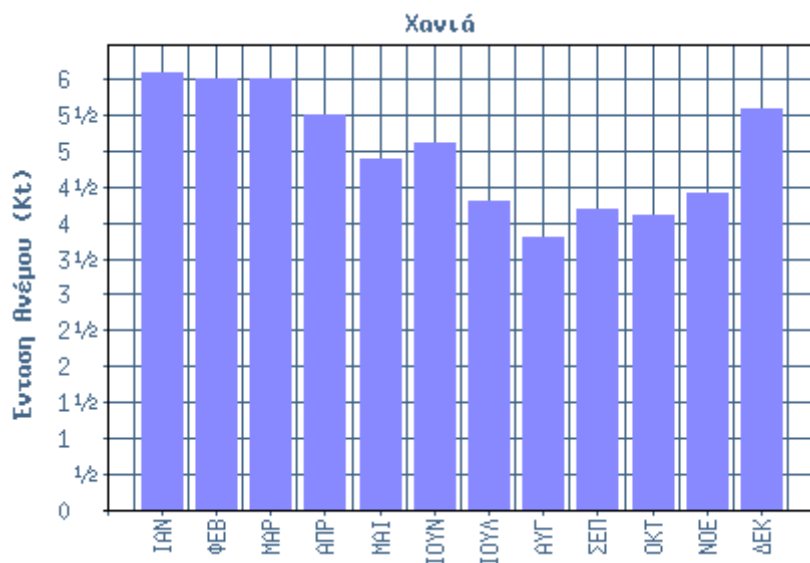
Εικόνα 4. 7. Διάγραμμα Υγρασίας σε συνάρτηση με τους μήνες

Στοιχεία βροχόπτωσης:



Εικόνα 4. 8. Διάγραμμα Βροχοπτώσεων σε συνάρτηση με τους μήνες

Στοιχεία έντασης και κατεύθυνσης ανέμου:



Εικόνα 4. 9. Διάγραμμα Έντασης Ανέμου σε συνάρτηση με τους μήνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Εφαρμογή Υδρολογικού Μοντέλου MIKE-SHE

5.1. Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακής απορροής (MIKE SHE)

5.1.1. Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης MIKE-SHE

Το υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης MIKE SHE χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως είναι η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η διαχείριση των υδάτινων πόρων, αλλά και για περιβαλλοντικά και οικολογικά προβλήματα που συνδέονται με επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, όπως: (MIKE SHE User Manual, 2007)

- Διαχείριση και σχεδιασμό λεκάνης απορροής ποταμού
- Σχεδιασμό Ύδρευσης, διαχείριση και βελτιστοποίηση της
- Άρδευση και Αποχέτευση
- Έδαφος και διαχείριση των υδάτων
- Επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά από άντλησης των υπόγειων υδάτων
- Συνδυασμένη χρήση υπόγειων και επιφανειακών υδάτων
- Προστασία και αποκατάσταση υγροτόπων
- Οικολογικές αξιολογήσεις
- Διαχείριση των υπόγειων υδάτων
- Εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Χαρτογράφηση υδροφορέα
- Μόλυνση από τη διάθεση αποβλήτων
- Αποκατάσταση ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων υδάτων
- Μελέτες πλημμύρας
- Επιπτώσεις των χρήσεων γης και της αλλαγής του κλίματος
- Επιπτώσεις από τη γεωργία (άρδευση, αποστράγγιση, θρεπτικές ουσίες και φυτοφάρμακα, κ.λπ.)

5.1.2. Μαθηματική προσέγγιση της επιφανειακής ροής στο MIKE-SHE.

Όταν το καθαρό ποσοστό βροχόπτωσης υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης του εδάφους, το νερό συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το νερό είναι διαθέσιμο ως επιφανειακή απορροή και δρομολογείται προς το ποτάμιο σύστημα. Η ακριβής διαδρομή και η ποσότητα του νερού καθορίζονται από την τοπογραφία και την αντίσταση ροής, καθώς και από τις απώλειες λόγω εξάτμισης και διήθησης κατά μήκος της διαδρομής ροής. Η ροή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται από την Overland Flow Module του MIKE SHE, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση διάχυσης κύματος με τις εξισώσεις Saint Venant, ή χρησιμοποιώντας μια ημικαταμεμημένη προσέγγιση με βάση τις εξισώσεις του Manning.

Με βάση αυτές τις εξισώσεις το MIKE SHE χρησιμοποιεί δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της ροής:

1. Την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method), χρησιμοποιείται όταν μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός των λεπτομερειών για την επιφανειακή ροή.
2. Μια απλουστευμένη μέθοδος υπολογισμού της επιφανειακής απορροής βασισμένη στην εξίσωση του Manning (Simplified Overland Flow Routing Method), όπου οι λεπτομέρειες για την επιφανειακή ροή δεν είναι απαραίτητες.

Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)

Προσέγγιση Διάχυτου Κύματος (Diffusive Wave Approximation)

Χρησιμοποιώντας ορθογώνιες καρτεσιανές (x, y) συντεταγμένες στο οριζόντιο επίπεδο, ορίζουμε το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους ως ZO (x, y), το βάθος ροής (πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ως h (x, y), και οι ταχύτητες ροής στην x- και y-κατευθύνσεις ως u (x, y) και v (x, y) αντίστοιχα. Έστω i (x, y) είναι η καθαρή εισροή επιφανειακής απορροής (καθαρή βροχόπτωση - λιγότερη διείσδυση). Στη συνέχεια, η διατήρηση της μάζας δίνει:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = i \quad (5.1)$$

Και η εξίσωση ορμής δίνει:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{qu}{gh} \quad (5.2a)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{qv}{gh} \quad (5.2b)$$

όπου S_f είναι οι κλίσεις τριβής στις x και y κατευθύνσεις και S_o είναι η κλίση της επιφάνειας του εδάφους. Οι εξισώσεις (5.1), (5.2a) και (5.2b) είναι γνωστές ως οι εξισώσεις του Saint Venant και όταν λυθούν αποδίδουν μια πλήρως δυναμική περιγραφή του βάθους, (δύο διαστάσεων) ροή ελεύθερης επιφάνειας.

Η δυναμική επίλυση των εξισώσεων St. Venant είναι αρκετά πολύπλοκη, γι αυτό προχωράμε σε απλοποιήσεις των τριών τελευταίων όρων της εξίσωσης ορμής.

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\partial z_g}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.3)$$

Με περεταίρω απλοποίηση της εξίσωσης (5.3) με τη χρήση του $z = z_g + h$ γίνεται για την κατεύθυνση x :

$$S_{fx} = -\frac{\partial}{\partial x}(z_g + h) = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (5.4a)$$

Ενώ για την κατεύθυνση y γίνεται:

$$S_{fy} = -\frac{\partial}{\partial y}(z_g + h) = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (5.4b)$$

Με χρήση του νόμου Strickler / Manning για κάθε τύπου κλίση τριβής, με τους συντελεστές Strickler K_x και K_y στις δύο κατευθύνσεις έχουμε:

$$S_{fx} = \frac{u^2}{K_x^2 h^{4/3}} \quad (5.5a)$$

$$S_{fy} = \frac{v^2}{K_y^2 h^{4/3}} \quad (5.5b)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (5.4a) και (5.4b) στις εξισώσεις (5.5a) και (5.5b) έχουμε:

$$\frac{u^2}{K_x^2 h^{4/3}} = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (5.6a)$$

$$\frac{v^2}{K_y^2 h^{4/3}} = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (5.6b)$$

Μετά την απλοποίηση των εξισώσεων (5.6a) και (5.6b) και πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη των εξισώσεων με h , η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων και των βαθών μπορεί να γραφεί ως:

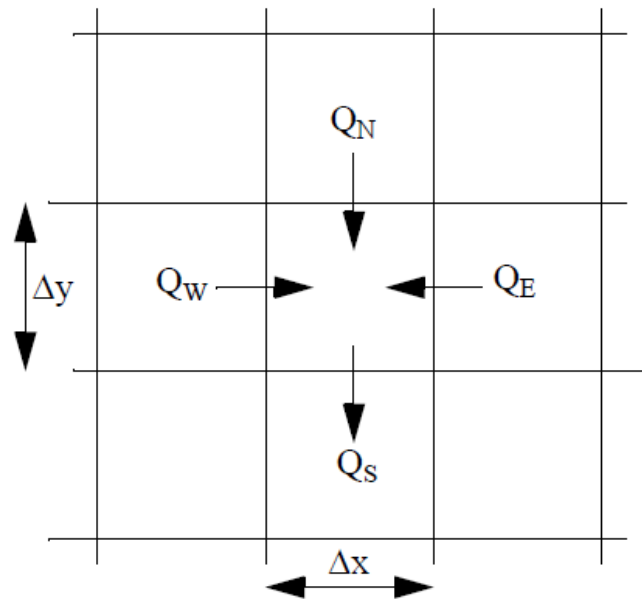
$$uh = K_x \left(-\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}} \quad (5.7a)$$

$$vh = K_y \left(-\frac{\partial z}{\partial y} \right)^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}} \quad (5.7b)$$

Σημειώνουμε ότι οι ποσότητες uh και vh αντιπροσωπεύουν παροχή ανά μονάδα μήκους κατά μήκος του ορίου του κελιού, στις x και y κατευθύνσεις αντίστοιχα. Ο αριθμός Manning M είναι το αντίστροφο αυτού που χρησιμοποιείται συνήθως ως συντελεστή τραχύτητας Manning's n . Η τιμή του n είναι τυπικά στην περιοχή από 0,01 (λεία κανάλια) έως 0,10 (κανάλια με πυκνή βλάστηση), που αντιστοιχούν σε τιμές του M μεταξύ 100 και 10 αντίστοιχα. (MIKE SHE User Manual, 2007)

Διατύπωση Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Formulation)

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



Εικόνα 5. 1. Σύστημα τετραγωνικού πλέγματος σε μια μικρή περιοχή του μοντέλου MIKE SHE (MIKE SHE User Manual, 2007)

Έχουμε τη εξίσωση:

$$\Delta h = h(t + \Delta t) - h(t) = I + \frac{\Sigma Q \Delta t}{\Delta x^2} \quad (5.8)$$

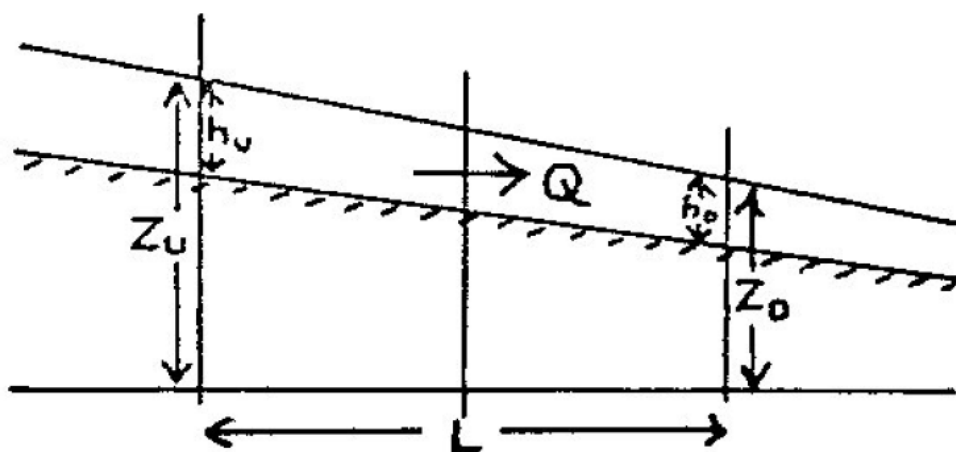
Όπου:

$$I = i \Delta x^2,$$

$$\Sigma Q = Q_N + Q_S + Q_E + Q_W$$

και όπου, i είναι η καθαρή εισροή στην επιφανειακή απορροή και Q οι ροές στο κελί του κάναβου στα βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά όρια, εκτιμώμενες κατά τη χρονική στιγμή t .

Ας δούμε τώρα τη ροή σε οποιοδήποτε όριο μεταξύ κελιών (βλέπε Εικόνα 5.2), όπου Z_U και Z_D είναι το ανώτερο και κατώτερο επίπεδο του νερού. Έστω το βάθος του νερού στο κελί κάναβου που αντιστοιχεί στο Z_U ότι είναι h_u και ότι στο κελί που αντιστοιχεί το Z_D είναι h_D .



Εικόνα 5. 2. Επιφανειακή ροή στα όρια μεταξύ κελιών (MIKE SHE User Manual, 2007).

Οι εξισώσεις (5.7a) και (5.7b) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ροής, Q , μεταξύ των κελιών του κάναβου:

$$Q = \frac{K \Delta x}{\Delta x^{1/2}} (Z_U - Z_D)^{1/2} h_u^{5/3} \quad (5.9)$$

Όπου

K είναι ο κατάλληλος συντελεστής Strickler και h_u , είναι το βάθος του νερού το οποίο μπορεί να ρέει ελεύθερα μέσα στο επόμενο κελί. Αυτό το βάθος είναι ίσο με το πραγματικό βάθος του νερού αποθήκευσης μείον την κράτηση νερού το οποίο παγιδεύεται σε ρηχά κοιλάματα της επιφάνειας. Στην εξίσωση (5.9) η επιφανειακή ροή στο εσωτερικό του κελιού θα είναι μηδέν εάν το ανάντη βάθος είναι μηδέν.

Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χειρσαίας ροής, χρησιμοποιείται η επαναληπτική τροποποιημένη μέθοδος του Gauss - Seidel. Η ροή υπολογίζεται για το υπόλοιπο της κάθε επανάληψης χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.9), όποτε υπάρχει επαρκές νερό σε ένα κελί του κάναβου, δηλαδή, όποτε h_u υπερβαίνει το ελάχιστο όριο που καθορίζεται από το χρήστη. Το νερό προστίθεται ή αφαιρείται (λόγω διείσδυσης, εμπλουτισμού ή εξάτμισης) στο νερό της επιφανειακής απορροής στον

κάναβο του μοντέλου, στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος της επιφανειακής απορροής. Κατά τη διάρκεια της επανάληψης, εφόσον οι εξισώσεις ροής έχουν οριστεί, οι χερσαίες ροές μειώνονται σε ορισμένες περιπτώσεις για να αποφευχθούν λάθη στην ισορροπία του νερού και απόκλιση στη λύση του συστήματος. Επομένως στο εξής, η ροή θα πρέπει (από εξίσωση 5.8) να είναι:

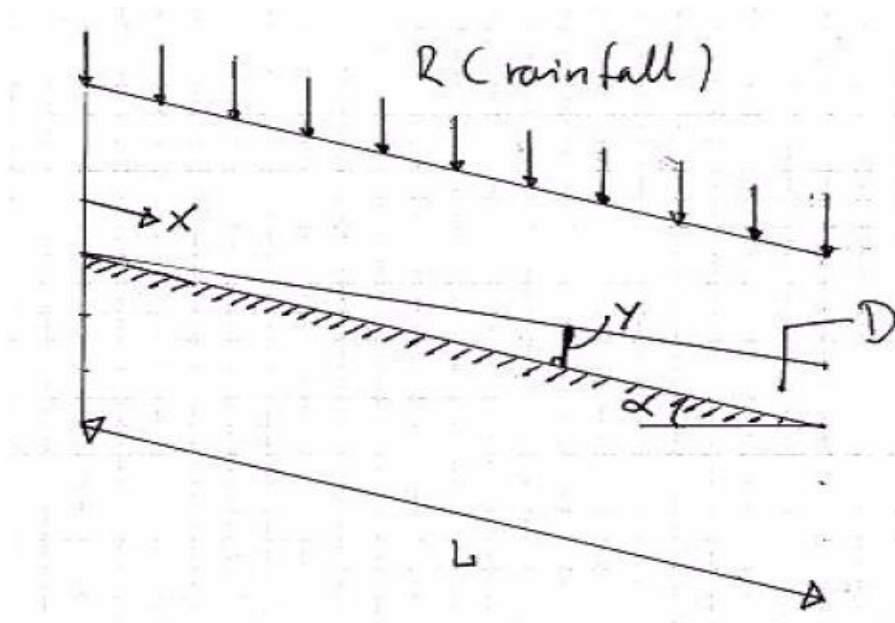
$$\Sigma|Q_{out}| \leq \Sigma Q_{in} + I = \frac{\Delta x^2 h(t)}{\Delta t} \quad (5.10)$$

Για να εξασφαλιστεί ότι οι εισροές, ΣQ_{in} , έχουν αθροιστεί πριν από τον υπολογισμό ΣQ_{out} , τα τετράγωνα του πλέγματος χρησιμοποιούνται με σειρά επιπέδων εδάφους κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης (MIKE SHE User Manual, 2007).

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

Η εννοιολογική αναπαράσταση της δεξαμενή της επιφανειακής απορροής στο MIKE SHE βασίζεται σε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του βάθους ροής και της επιφάνειας κράτησης, σε συνδυασμό με την εξίσωση Manning που περιγράφει την παροχή υπό συνθήκες τυρβώδους ροής (MIKE SHE User Manual, 2007).

Ακολουθεί, η περιγραφή των αρχών πίσω από το μοντέλο και των εξισώσεων που εφαρμόζονται και επιλύονται στο MIKE SHE. Είναι μια έμμεση παραδοχή ότι οι εξισώσεις που προκύπτουν για μια πλαγιά λόφου μπορεί να εφαρμοστούν για να περιγράψουν επιφανειακή ροή σε όλη την λεκάνη.



Εικόνα 5. 3. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακής ροής σε ένα επίπεδο (MIKE SHE User Manual 2007)

Η Εικόνα 5.3 αναπαριστά μία σχηματική απεικόνιση της επιφανειακής ροής σε μία επίπεδη επιφάνεια με άπειρο πλάτος υπό ομοιόμορφη βροχόπτωσης. Η κατακρήμνιση πέφτει στο επίπεδο και έχοντας ως αντίσταση την τραχύτητα της επιφάνειας ρέει προς τα κάτω με κλίση προς τη θετική διεύθυνση X. Στο σχήμα (Εικόνα 5.3.), το L είναι το μήκος της πλαγιάς, Y είναι το τοπικό βάθος του νερού από την επιφάνεια σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της επιφάνειας και α είναι η κλίση. Στη συνέχεια, από την εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = R - \frac{\partial y}{\partial t} \quad (5.11)$$

όπου το q είναι η ειδική παροχή.

Για την τυρβώδη ροή σε ένα επίπεδο απείρου πλάτους, η εξίσωση Manning είναι:

$$q = M \cdot y^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{a} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (5.12)$$

Όπου

M: ο αριθμός Manning

a: η κλίση του εδάφους

Το βάθος, y, κοντά στην αιχμή του επιπέδου ροής μπορεί να σχετίζεται με την βάθος σε ισορροπία y_e , με την εξίσωση:

$$y = \left(\frac{t}{t_e} \right) \cdot y_e \quad (5.13)$$

Όπου:

t = χρόνος

t_e = ο χρόνος μέχρι τη κατάσταση ισορροπίας

Σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση (5.12) γίνεται:

$$q = M \left(\frac{t}{t_e} \right)^{\frac{5}{3}} \cdot y_e^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{a} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (5.14)$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό όγκο που απορρίπτεται, Q, (ανά μονάδα πλάτους του επιπέδου) με την εξίσωση:

$$Q = \frac{3}{8} \cdot M \cdot y_e^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{a} \cdot t_e \quad [m^2] \quad (5.15)$$

Στην ισορροπία, το βάθος δε μεταβάλλεται πια και η ροή είναι σχεδόν ίση με τις τιμές βροχόπτωσης. Ο όγκος του νερού που κατακρατείται στην επιφάνεια, D_e , μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$D_e = \frac{5}{8} \cdot \frac{R^{\frac{3}{5}} \cdot L^{\frac{8}{5}}}{M^{\frac{3}{5}} \cdot a^{\frac{3}{10}}} \left[\frac{m^3}{m} \right] \quad (5.16)$$

Από (5.14), σε κατάσταση ισορροπίας, ($t = t_e$), το βάθος του νερού στο άνω άκρο του επιπέδου ($x = L$) είναι:

$$q = M \cdot y_e^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{a} = R \cdot L \quad \Rightarrow \quad y_e^{\frac{5}{3}} = \frac{R \cdot L}{M \cdot \sqrt{a}} \left[\frac{m^{\frac{5}{3}}}{m^{\frac{5}{3}}} \right] \quad (5.17)$$

Στη συνέχεια, ο συνολικός όγκος των εισροών μέχρι την ισορροπία πρέπει να ισούται με την συνολική εκροή μείον το ποσό που παρακρατήθηκε στην επιφάνεια. Έτσι:

$$\text{Εισροή} - \text{Εκροή} = \text{Επιφανειακή αποθήκευση}$$

η οποία από τις εξισώσεις (5.15) και (5.16) μας δίνει:

$$(R \cdot L \cdot t_e) - \left(\frac{3}{8} \cdot M \cdot y_e^{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{a} \cdot t_e \right) = \left(\frac{5}{8} \cdot \frac{R^{\frac{3}{5}} \cdot L^{\frac{8}{5}}}{M^{\frac{3}{5}} \cdot a^{\frac{3}{10}}} \right) \quad (5.18)$$

η οποία, όταν απλοποιηθεί, δίνει το χρόνο σε ισορροπία:

$$t_e = \frac{L^{\frac{3}{5}}}{R^{\frac{2}{5}} \cdot M^{\frac{3}{5}} \cdot a^{\frac{3}{10}}} = \frac{8}{5} \cdot \frac{D_e}{R \cdot L} \quad (5.19)$$

Η σχέση μεταξύ του βάθους, y , και του όγκου του νερού που κατακρατείται στην επιφάνεια πριν την ισορροπία, D , δίνεται από το εμπειρικό μοντέλο του Fleming, 1975 και Crawford- Linsley, 1966:

$$y = \frac{D}{L} \left(1 + \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right) [m] \quad (5.20)$$

Αντικαθιστώντας την (5.20) στην εξίσωση του Manning (5.12) έχουμε:

$$q = M \cdot \sqrt{a} \cdot \left[\frac{D}{L} \left(1 + \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right) \right]^{\frac{5}{3}} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (5.21)$$

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

$$D_2 = D_1 + (\bar{q}_{supply} - \bar{q}) \cdot \Delta t \quad (5.22)$$

όπου D_1 είναι ο όγκος του αποθέματος νερού που κατακρατείται στην αρχή του χρονικού βήματος και D_2 είναι ο όγκος του αποθέματος νερού που κατακρατείται στο

τέλος του χρονικού βήματος, το q είναι η επιφανειακή απορροή κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος Δt και q_{supply} είναι η ποσότητα του νερού που προστίθεται στην επιφανειακή απορροή κατά το χρονικό βήμα. Εφόσον το q είναι συνάρτηση του μέσου κατακρατούμενου αποθέματος νερού, $(D_1+D_2)/2$, η εξίσωση (5.21) λύνεται επαναληπτικώς μέχρι η λύση να ικανοποιεί και τις δύο εξισώσεις. (MIKE SHE User Manual, 2007)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

5.2. Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης επιφανειακής απορροής.

Σε κάθε εφαρμογή μοντελοποίησης υπάρχουν τρία στάδια: (α) η δημιουργία – κτίσιμο του μοντέλου (set up of the model), (β) η εκτέλεση της προσομοίωσης (run the model), και (γ) η αποτίμηση των αποτελεσμάτων (assess of the results). Στην περίπτωση του υδρολογικού μοντέλου MIKE SHE τα παραπάνω τρία στάδια μοντελοποίησης περιέχονται στο πλαίσιο εργασίας MIKE Zero, στο οποίο γίνεται η διαχείριση των αρχείων εισόδου και εξόδου της προσομοίωσης (Κουργιαλάς, 2010).

5.2.1. Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας συλλέξαμε βροχομετρικά δεδομένα από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής (Αλικιανός, Πρασσές και Παλαιά Ρούματα) και παροχές σε m^3/sec από δύο σημεία μέτρησης παροχής στους παραπόταμους Ρουματιανό και Σεμπρονιώτη οι οποίοι βρίσκονται στην ημιορεινή ζώνη και έχουν παροδική ροή.

Συμπλήρωση βροχομετρικών δεδομένων με την μέθοδο της Βροχοβαθμίδας

Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται επίσης και οι μετεωρολογικοί σταθμοί Ταυρωνίτης και Ζυμβραγού των οποίων τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την χάραξη των πολύγωνων Thiessen στην περιοχή και την εισαγωγή αυτών στο ομοίωμα MIKE SHE.

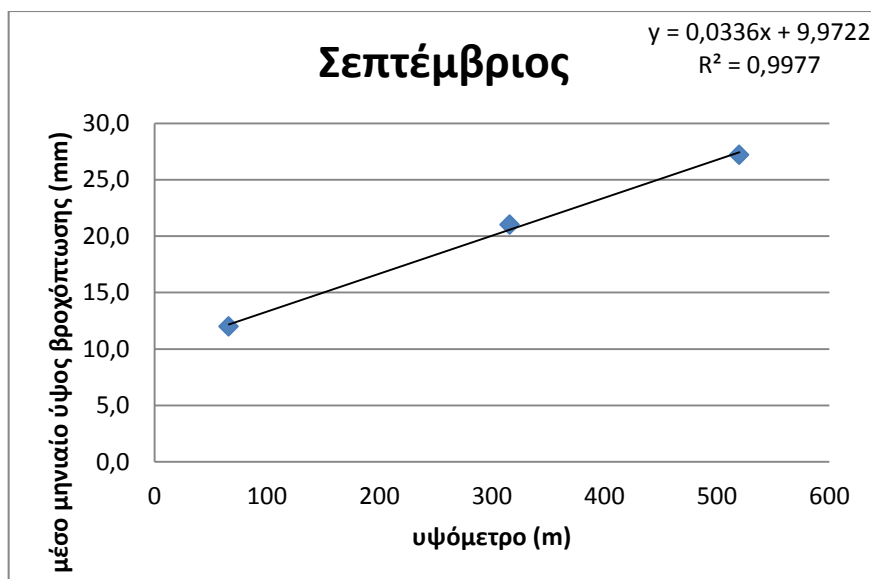
Η κατανομή των βροχοπτώσεων καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, καθοριστικότερος των οποίων είναι το υψόμετρο της περιοχής. Έτσι μπορούμε να διερευνήσουμε τη συσχέτιση των δυο προαναφερόμενων και τη σύνδεση τους με μια γραμμική μαθηματική σχέση. Σε τοπική κλίμακα είναι δυνατόν βέβαια να παρατηρηθούν διαφοροποιήσεις που έχουν να κάνουν με δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των βροχοπτώσεων, όπως π.χ. το ανάγλυφο, που όμως σε γενικές γραμμές δεν επηρεάζουν τη γενική εικόνα. (Δημητροπούλου, 2008)

Η μέθοδος της βροχοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου. Επομένως βροχοβαθμίδα είναι ο όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά 100m αύξηση υψομέτρου (Παπαμιχαήλ, 2001). Η μαθηματική σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη 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. Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση της βροχοβαθμίδας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του βροχομετρικού χάρτη μιας περιοχής. 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 0,7. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής σε οποιοδήποτε υψόμετρο.

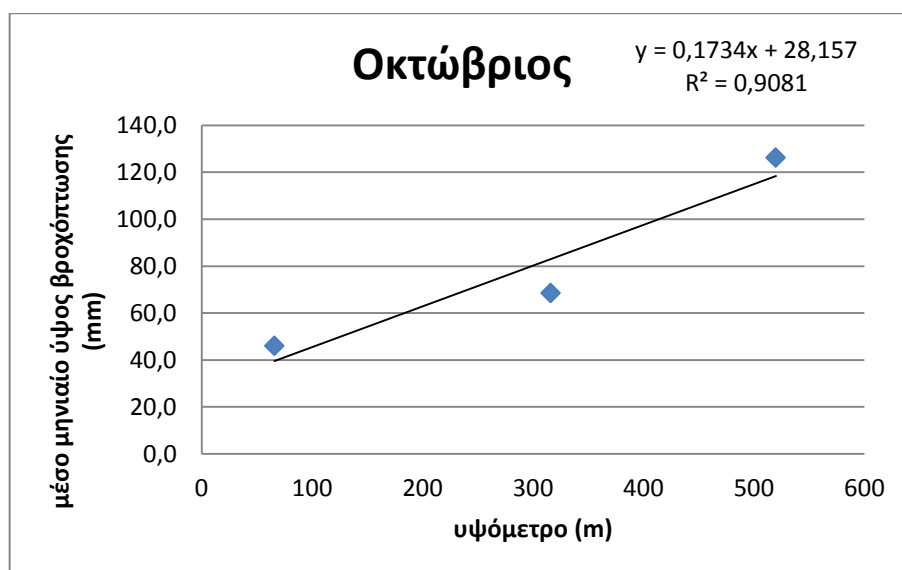
Για το υπολογισμό της εξίσωσης της βροχοβαθμίδας για την Λεκάνη του ποταμού Ταυρωνίτη επιλέξαμε μια κοινή περίοδο δεδομένων (2000 – 2003) για τους μετεωρολογικούς σταθμούς των οποίων διαθέτουμε και τα αντίστοιχα βροχομετρικά δεδομένα (Αλικιανός, Παλαιά Ρούματα, Πρασσές).

Αρχικά υπολογίσαμε το μέσο όρο βροχοπτώσεων όλων των ετών για κάθε μήνα, σε όλους τους σταθμούς. Έτσι προσδιορίστηκε η βροχοβαθμίδα για κάθε μήνα σε όλους τους σταθμούς:

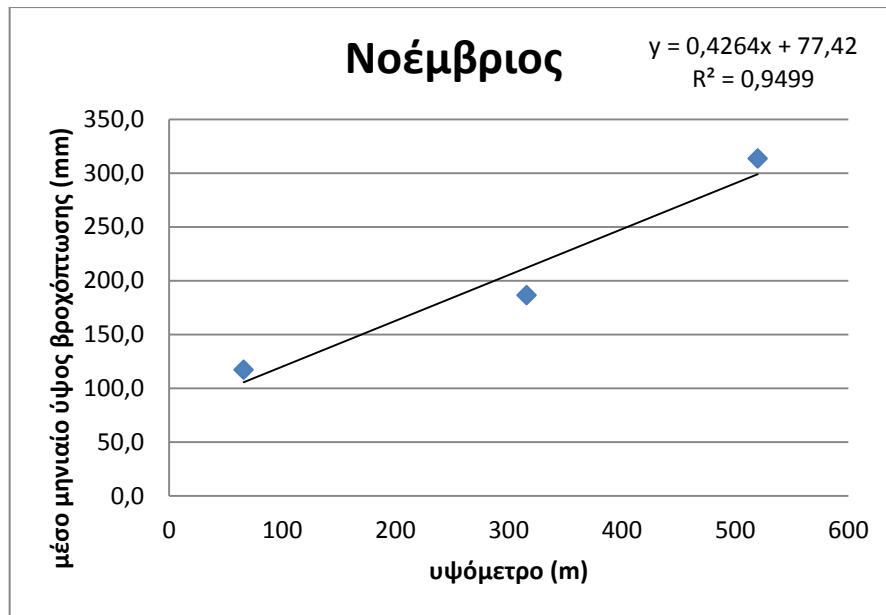
<u>Σεπτέμβριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	12,0
Παλ. Ρούματα	316	21,0
Πρασσές	520	27,2



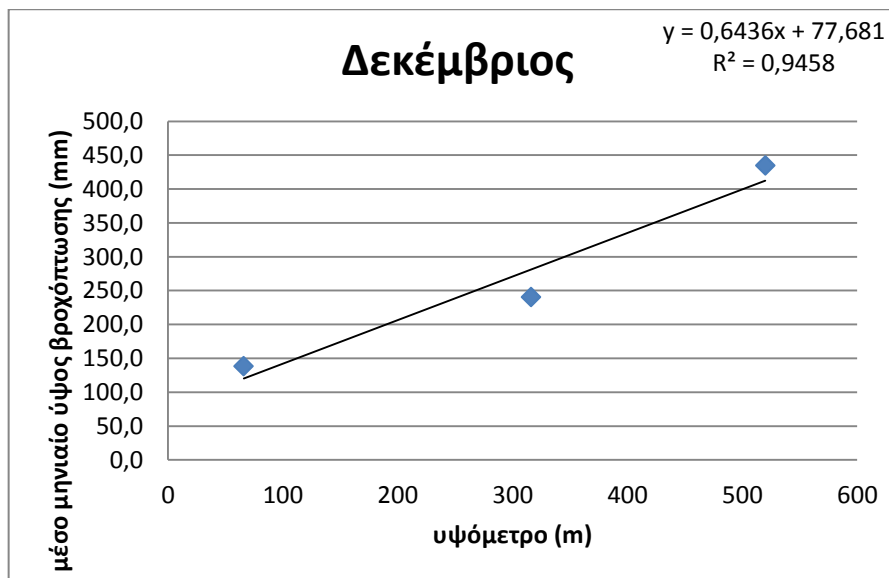
<u>Οκτώβριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	46,1
Παλ. Ρούματα	316	68,5
Πρασσές	520	126,3



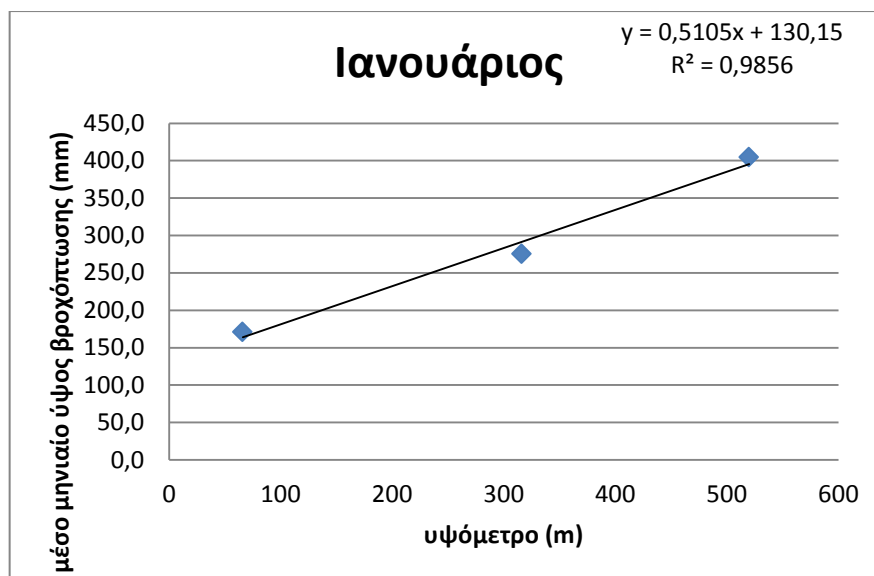
<u>Νοέμβριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	117,1
Παλ. Ρούματα	316	186,5
Πρασσές	520	313,3



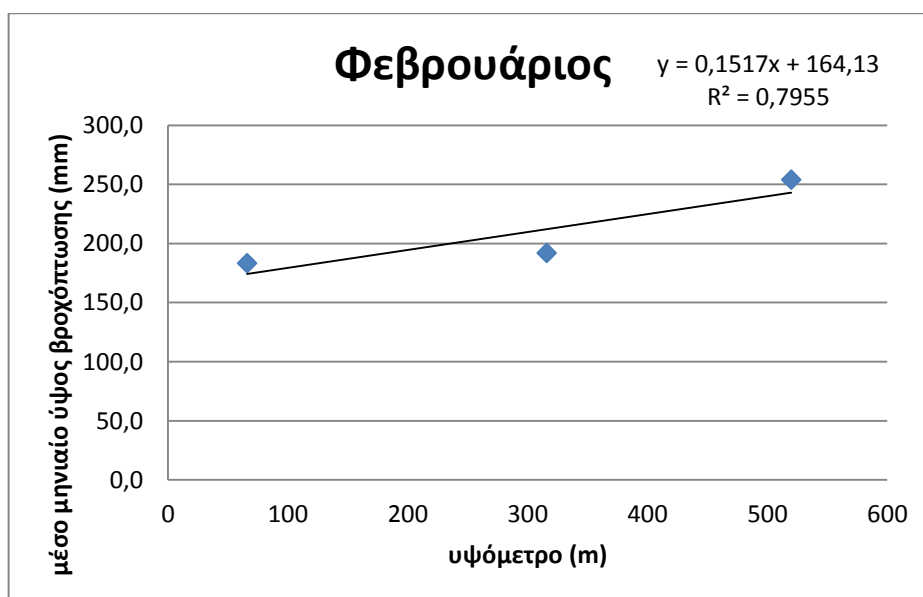
<u>Δεκέμβριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	138,3
Παλ. Ρούματα	316	240,7
Πρασσές	520	434,6



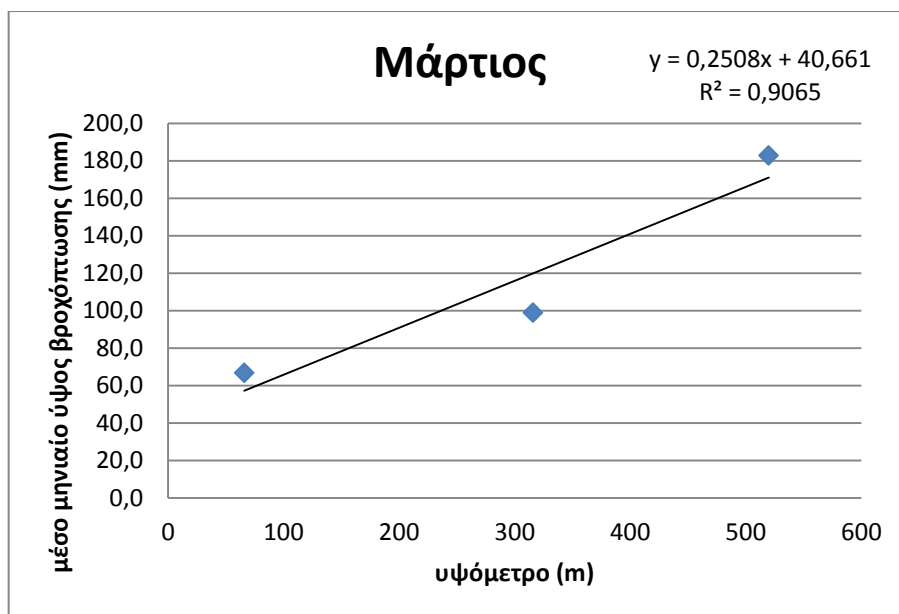
<u>Ιανουάριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	171,1
Παλ. Ρούματα	316	275,3
Πρασσές	520	404,5



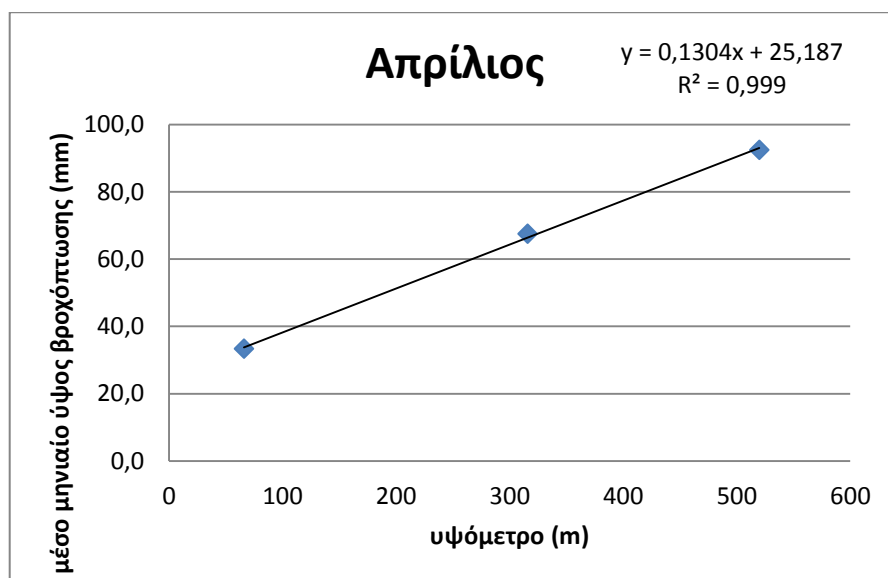
<u>Φεβρουάριος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	183,2
Παλ. Ρούματα	316	191,9
Πρασσές	520	254,1



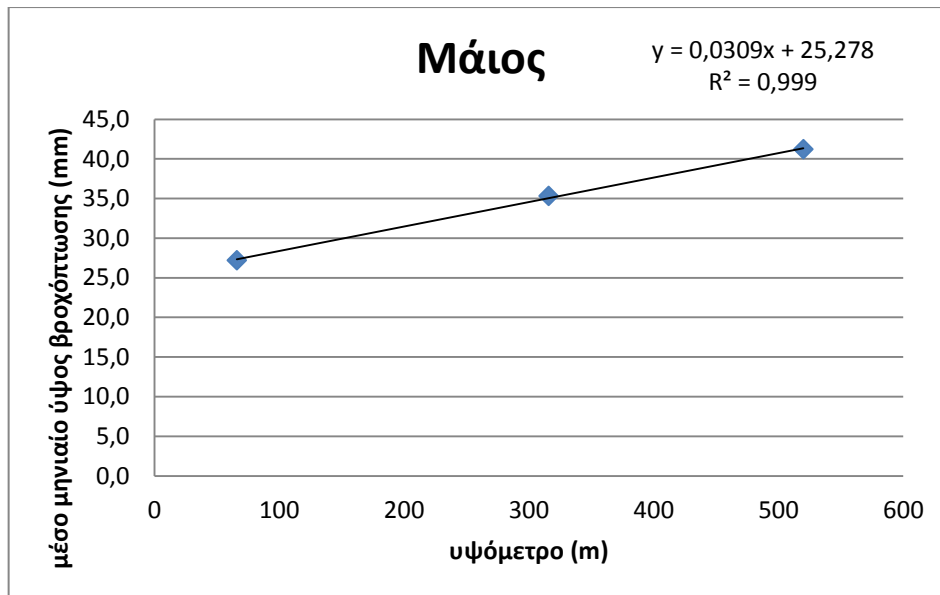
<u>Μάρτιος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	66,7
Παλ. Ρούματα	316	98,8
Πρασσές	520	182,7



<u>Απρίλιος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	33,3
Παλ. Ρούματα	316	67,5
Πρασσές	520	92,4



<u>Μάιος</u>		
σταθμός	υψόμετρο (m)	μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Αλικιανός	66	35,3
Παλ. Ρούματα	316	27,2
Πρασσές	520	41,2



Για τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της έλλειψης βροχοπτώσεων, δεν ήταν δυνατό να προσδιορίσουμε τη βροχοβαθμίδα διότι ο συντελεστής προσαρμογής (R^2) που προέκυπτε από την παλινδρόμηση ήταν πολύ μικρότερος από 0,7.

Η συμπλήρωση των δεδομένων συνήθως γίνεται αντικαθιστώντας το x στην εξίσωση $y = ax + b$ με το υψόμετρο του σταθμού (m). Επομένως το y μας δίνει το ύψος βροχής (mm).

Με τη βοήθεια της μεθόδου της βροχοβαθμίδας συμπληρώσαμε το ύψος βροχόπτωσης σε (mm) για κάθε μήνα για τα έτη 2000-2003 στους σταθμούς Ταυρωνίτης και Ζυμβραγού, για τους οποίους δεν διαθέταμε τα αντίστοιχα δεδομένα, ως εξής:

Αρχικά υπολογίζαμε τον συντελεστή συσχέτισης της βροχοβαθμίδας για κάθε μήνα μεταξύ ενός σταθμού για τον οποίο είχαμε δεδομένα και ενός σταθμού που δεν είχαμε δεδομένα. Ο συντελεστής αυτός προκύπτει διαιρώντας την βροχόπτωση του άγνωστου σταθμού προς τον γνωστό. Για παράδειγμα ο συντελεστής βροχοβαθμίδας για τον μήνα Σεπτέμβριο μεταξύ των σταθμών Πρασσές και Ζυμβραγού είναι:

$$\frac{y}{y_n} = \frac{0.0336 * 235 + 9.9722}{0.0336 * 520 + 9.9722} = 0.7$$

Όπου:

- y: το ύψος βροχής (mm) του άγνωστου σταθμού (Ζυμβραγού)
- y_n : το ύψος βροχής (mm) του γνωστού σταθμού (Πρασσές)
- 520: το υψόμετρο στον σταθμό Πρασσές

- 235: το υψόμετρο στον σταθμό Ζυμβραγού

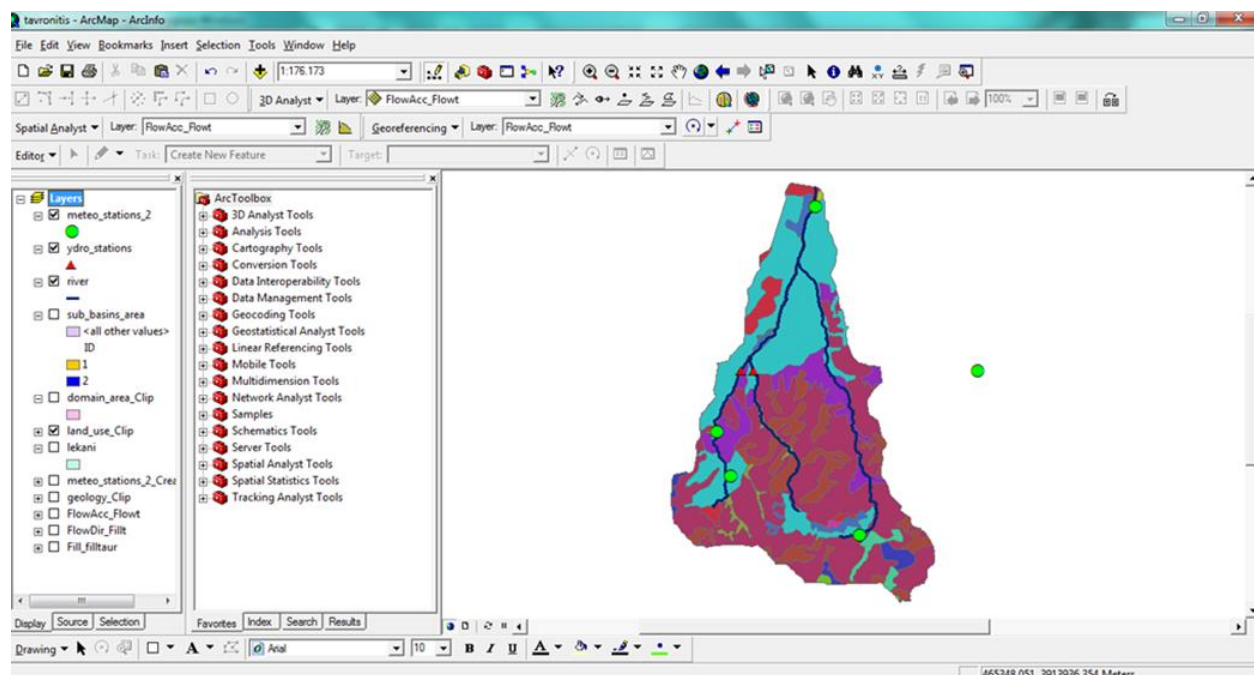
Έπειτα πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή αυτό για κάθε μέρα του μήνα με το ύψος βροχής (mm) στον γνωστό σταθμό (Πρασσές στο παράδειγμα μας) και προκύπτουν τα αντίστοιχα ύψη βροχής (mm) για τον άγνωστο σταθμό (Ζυμβραγού).

5.2.2. Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων μέσω GIS στο μοντέλο MIKE SHE.

Το ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο MIKE SHE έχει σχεδιαστεί για να είναι απόλυτα συμβατό με τα αρχεία του ArcGIS. Τα σχηματικά αρχεία με την κατάληξη .shp (shape files) στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορούν να εισαχθούν άμεσα στο μοντέλο MIKE SHE. Έτσι με τη βοήθεια του ArcGIS ψηφιοποιήθηκαν και εισήχθησαν στο μοντέλο τα εξής αρχεία (.shp):

- Λεκάνη Απορροής Ταυρωνίτη
- Ποταμός Ταυρωνίτης (με τους παραπόταμους Ρουματιανό, Σεμπρονιώτη, Ντεριανό)
- Κύρια Περιοχή μελέτης (model domain)
- Δύο σημεία μέτρησης παροχής (στους παραπόταμους Ρουματιανό και Σεμπρονιώτη)
- Μετεωρολογικοί σταθμοί
- Τοπογραφία λεκάνης
- Γεωλογία λεκάνης
- Χρήσεις Γης λεκάνης

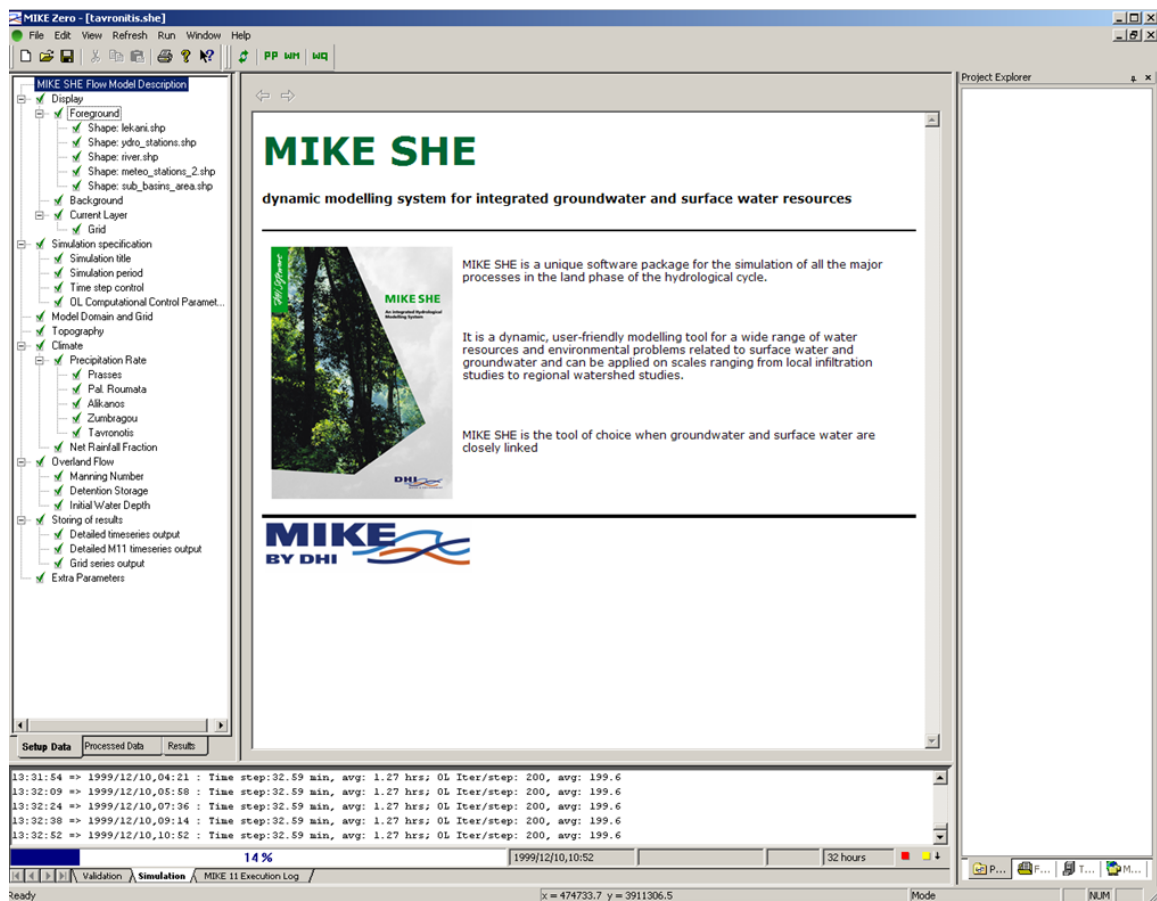
Η ψηφιοποιημένη μορφή των παραπάνω χωρικών δεδομένων στο ArcGIS για τη Λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5. 4. Η ψηφιοποιημένη μορφή των χωρικών δεδομένων στο GIS για τη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη.

5.2.3. Περιβάλλον εργασίας MIKE Zero για το μοντέλο MIKE-SHE.

Το περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE φαίνεται στην Εικόνα 5.5. Στο αριστερό μέρος της εικόνας βλέπουμε 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, ενώ η αξιολόγηση των εισαγόμενων δεδομένων γίνεται στο κάτω μέρος της εικόνας.



Εικόνα 5. 5. Περιβάλλον εργασίας (MIKE Zero) του μοντέλου MIKE SHE

Το στήσιμο του μοντέλου γίνεται στο δενδρώδες διάγραμμα (data tree), όπου εισάγουμε αρχεία και αλλάζουμε τιμές σε παραμέτρους. Τα δεδομένα εισάγονται με συγκεκριμένη σειρά από την κορυφή του διαγράμματος προς τα κάτω. Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων εισόδου στο μοντέλο μας ακολουθεί η εκτέλεση – τρέξιμο του μοντέλου MIKE SHE. Τα αρχεία που εισάγουμε συνήθως στο MIKE SHE είναι σχηματικά (shapefiles), χρονοσειρές (timeseries) και ψηφιακά αρχεία (raster). Η επεξεργασία των αρχείων αυτών γίνεται στην δεξιά πλευρά του περιβάλλοντος του MIKE Zero.

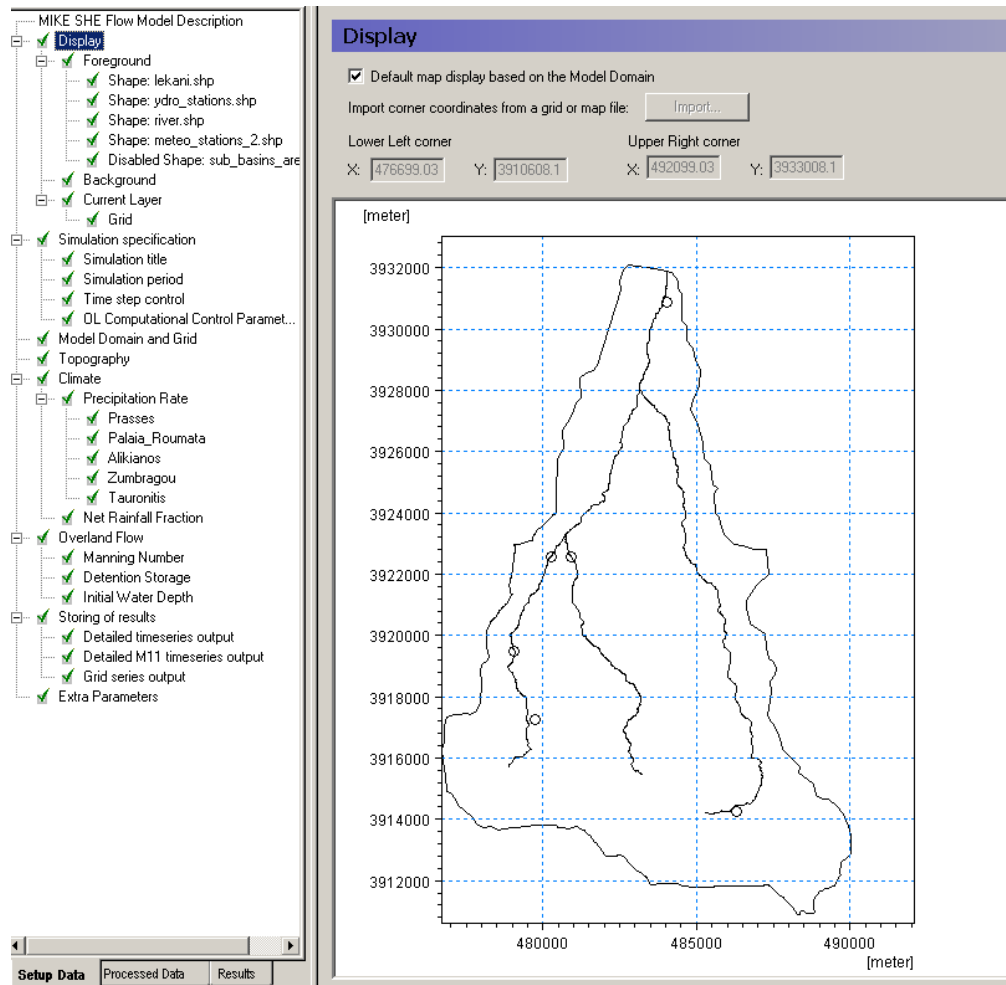
Τα επιμέρους τμήματα του δενδρώδους διαγράμματος στο μοντέλο MIKE SHE περιγράφονται παρακάτω.

➤ Display - Εισαγωγή χάρτη περιοχής μελέτης.

Στο μοντέλο MIKE SHE αρχικά γίνεται καθορισμός της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό εισάγεται στο Foreground το shapefile της λεκάνης απορροής του

ποταμού Ταυρωνίτη, καθώς και τα shapefile του ποταμού, των μετεωρολογικών σταθμών και των σημείων μέτρησης παροχών. Έτσι προκύπτει η Εικόνα 5.6.

Το κομμάτι Current Layer – Grid αναφέρεται στο στοιχείο του πλέγματος που εμφανίζεται η τρέχουσα προβολή χάρτη και το Transparency χρησιμοποιείται για να ελέγχει τον τρόπο με τον οποίο τα χρώματα των pixel μετριάζονται για την εμφάνιση εικόνων που επικαλύπτουν η μία την άλλη. (MIKE SHE User Manual, 2007)



Εικόνα 5. 6. Display – Περιοχή μελέτης, λεκάνη απορροής ποταμού Ταυρωνίτη.

➤ **Simulation Specification - Παράμετροι της προσομοίωσης**

Μέσω αυτού του σταδίου προσδιορίζεται σαν πρώτο βήμα η μέθοδος - δηλαδή οι μαθηματικές εξισώσεις - με τις οποίες το MIKE SHE επιλύει - περιγράφει την επιφανειακή απορροή. Όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 5.7., επιλέξαμε το Overland Flow και σε αυτό την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference) η οποία, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, μας παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια από την

απλουστευμένη μέθοδο υπολογισμού της επιφανειακής απορροής (Subcatchment based), καθώς εξετάζει την επιφανειακή απορροή σε μια μικρή περιοχή (κελί) του κάναβου και όχι στην έκταση υπολεκανών. Πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών που έχουμε επιλέξει αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος.

Simulation specification

Numeric Engine

MIKE SHE

Water Movement (WM)

☒ Overland Flow (OL)
Finite Difference

☐ Rivers and Lakes (OL)

☐ Unsaturated Flow (UZ)
Richards equation

☐ Evapotranspiration (ET)

☐ Saturated Flow (SZ)
Finite Difference

☐ Include Advection-Dispersion (AD) Water Quality

Εικόνα 5. 7. Παράμετροι της προσομοίωσης

Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης και το χρονικό βήμα. Στην παρούσα εργασία το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση καθορίστηκε από 01/09/2000 έως 31/08/2001 και για την επαλήθευση από 01/09/2001 έως 31/08/2003, ενώ το χρονικό βήμα καθορίστηκε στις 24 ώρες (Εικόνες 5.8 και 5.9).

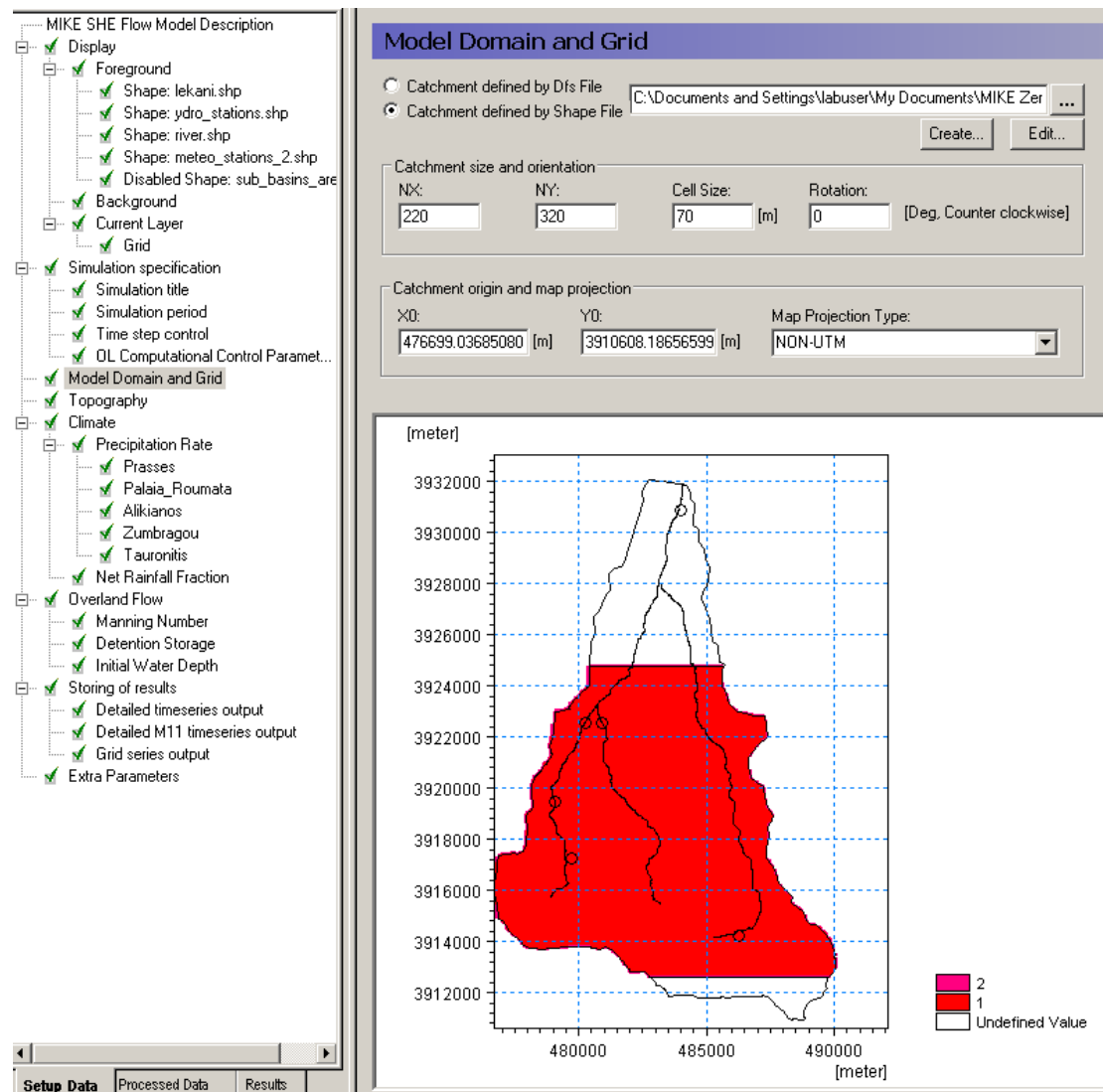
Εικόνα 5. 8. Περίοδος προσομοίωσης

Εικόνα 5. 9. Χρονικό βήμα προσομοίωσης.

➤ **Model Domain and Grid – Περιοχή προσομοίωσης**

Στην επιλογή αυτή ορίζεται ο γεωγραφικός χώρος μεταξύ των ορίων της προσομοιωμένης περιοχής, στην περίπτωση μας είναι η κόκκινη περιοχή (Εικόνα 5.10). Η εισαγωγή γίνεται υπό τη μορφή αρχείου πολυγώνου (GIS shapefile) και μετατρέπεται από το μοντέλο στη μορφή αρχείου κάναβου της DHI (dfs2). Το πεδίο

προσομοίωσης στην παρούσα εργασία είναι η περιοχή γύρω από το χώρο εγκατάστασης του υβριδικού έργου και αποτελεί κομμάτι της ημιορεινής περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη (δίνεται στην Εικόνα 5.10. όπως έχει εισαχθεί στο μοντέλο).



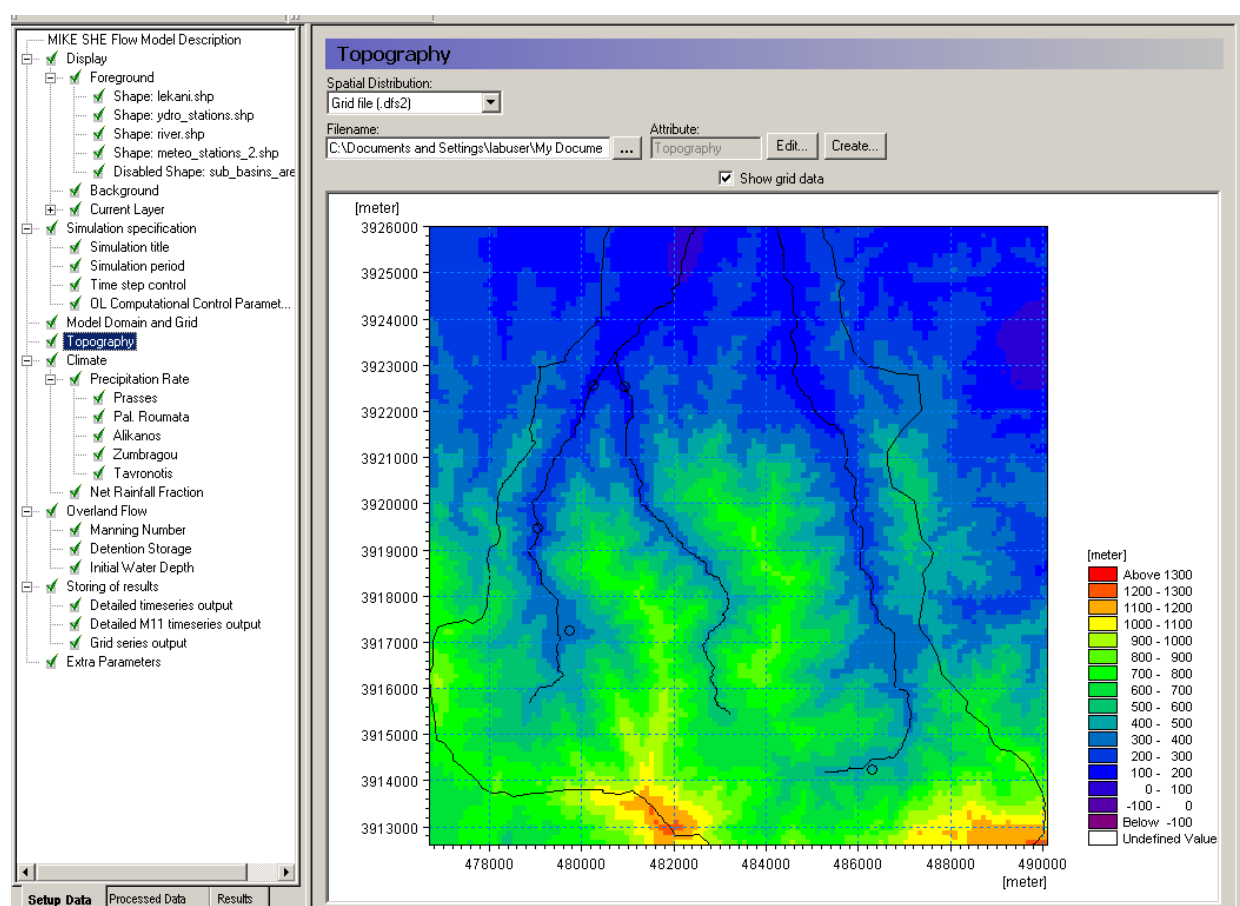
Εικόνα 5. 10. Περιοχή προσομοίωσης (Model Domain)

➤ Topography – Τοπογραφία

Στην επιλογή αυτή δίδεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) του πεδίου προσομοίωσης το οποίο περιγράφει την υψομετρία και το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) είναι μια διατεταγμένη σειρά από αριθμούς που αναπαριστά τη χωρική κατανομή των υψόμετρων πάνω από κάποιο αυθαίρετο σημείο αναφοράς σε ένα τοπίο. Μπορεί να αποτελείται από υψόμετρα του

δείγματος σε διακριτά σημεία ή το μέσο υψόμετρο πάνω από ένα συγκεκριμένο τμήμα του τοπίου.(Moore, 1990)

Το DEM χρησιμοποιείται για την διόδευση της άμεσης απορροής προς τα υδατορεύματα καθώς και για τον καθορισμό του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους όταν διενεργείται λεπτομερής προσομοίωση της υπόγειας υδροφορίας. (Παπαρρίζος, 2012) Το DEM προέρχεται από ισοϋψείς χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού οι οποίοι έχουν ψηφιοποιηθεί. Η τοπογραφία εισήχθη στο μοντέλο MIKE SHE ως αρχείο shapefile των ισοϋψών ακολούθησε η μετατροπή του αρχείου των ισοϋψών σε δυαδικό αρχείο του DHI (dfs2), Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5. 11. Τοπογραφία (DEM) της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη στο μοντέλο MIKE-SHE

➤ Climate – Κλίμα

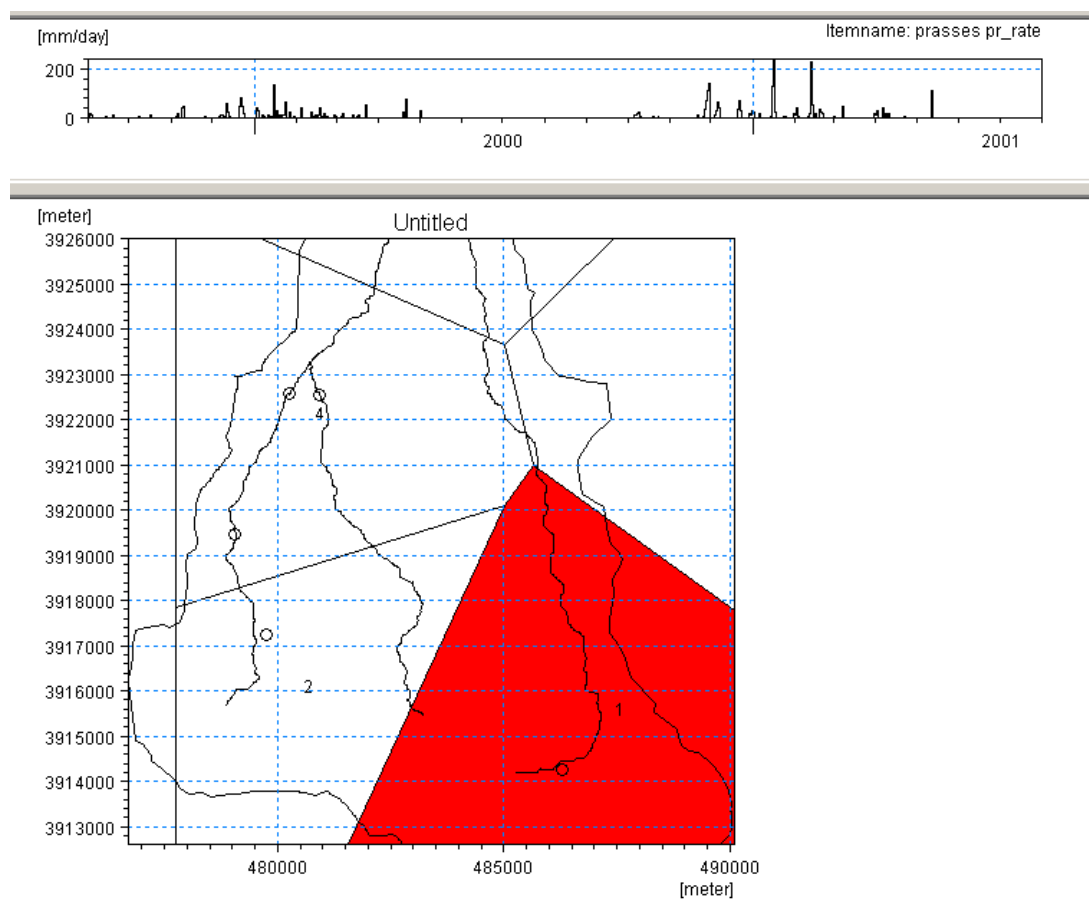
Βροχόπτωση (Precipitation rate)

Ο χωρικός προσδιορισμός του μέσου ισοδύναμου ύψους κατακρημνίσεων στην περιοχή μας έγινε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και χρησιμοποιήθηκαν

ημερήσια δεδομένα από πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής, στα Παλαιά Ρούματα, στον Ταυρωνίτη, στη Ζυμβραγού, στον Πρασσέ και στον Αλικιανό.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η συνολική επιφάνεια χωρίζεται γεωμετρικά σε μικρότερες ζώνες επιρροής, μία για κάθε μετεωρολογικό σταθμό. Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης ενός σταθμού να απέχει από τη θέση του σταθμού λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό. Με βάση τα παραπάνω, η περιοχή μελέτης μας χωρίστηκε σε πέντε ζώνες. Για την εισαγωγή της κάθε μιας από τις πέντε χρονοσειρές βροχόπτωσης που μας παρείχαν τα δεδομένα των σταθμών, δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικά αρχεία χρονοσειρών βροχόπτωσης (dfs0), τα οποία και εισήχθησαν στο μοντέλο μας.

Στην εικόνα 5.12 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η ζώνη επιρροής του μετεωρολογικού σταθμού στον Πρασσέ καθώς και το γράφημα (mm/day), στο πάνω μέρος, που προέκυψε από τα δεδομένα εισόδου της βροχόπτωσης που μας δόθηκαν από το σταθμό, για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης.



Εικόνα 5. 12. Πολύγωνα Thiessen για τους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς στο μοντέλο MIKE-SHE

Συντελεστής επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης (Net Rainfall Fraction)

Στις περιπτώσεις που δεν έχουμε στοιχεία εξατμισοδιαπνοής, μπορούμε να χρησιμοποιήσαμε εναλλακτικά το συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης «Net Rainfall Fraction», που αντιπροσωπεύει το καθαρό κλάσμα της βροχόπτωσης που έχει απομείνει διαθέσιμο για επιφανειακή απορροή και διήθηση μετά την εξατμισοδιαπνοή (MIKE SHE ReferenceGuide, 2007). Στην παρούσα προσομοίωση ο συγκριμένος συντελεστής λόγω της αβεβαιότητας προσδιορισμού του επιλέχτηκε ως παράμετρος βαθμονόμησης του μοντέλου MIKE SHE.

➤ Overland Flow – Επιφανειακή απορροή

Manning Number

Ο αριθμός Manning M είναι το αντίστροφο του γνωστού Manning's n . Η τιμή του n τυπικά κυμαίνεται από 0,01 (λεία κανάλια) έως 0,10 (κανάλια με πυκνή βλάστηση). Αυτό αντιστοιχεί σε τιμές του M μεταξύ 100 και 10, αντίστοιχα. Γενικά, χρησιμοποιούνται χαμηλότερες τιμές Manning M για την επιφανειακή απορροή σε σχέση με τη ροή σε κανάλι (MIKE SHE ReferenceGuide, 2007).

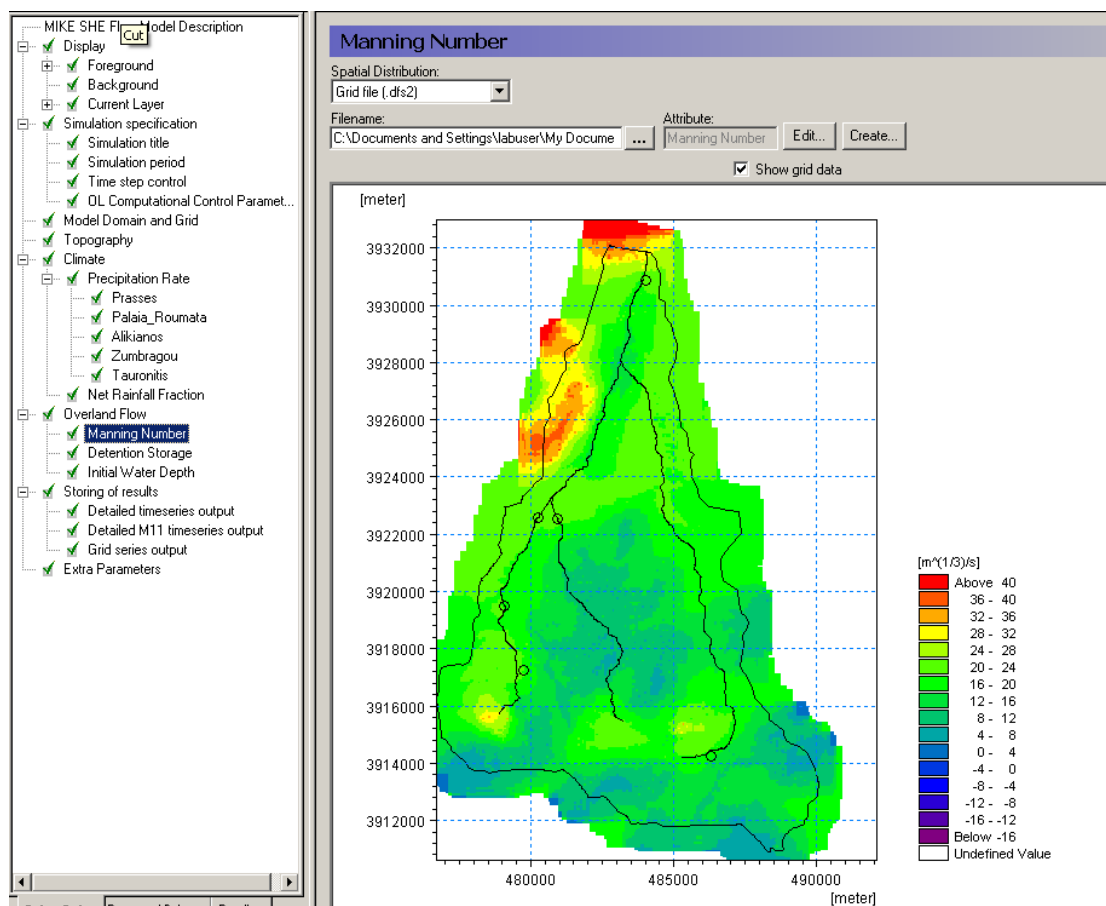
Ο συντελεστής n υπολογίζεται με την βοήθεια του χάρτη των χρήσεων γης. Για το λόγο αυτό δημιουργήσαμε στο GIS το σχηματικό αρχείο (landuse) το οποίο περιέχει πολύγωνα χρήσεων γης. Ανάλογα με τις χρήσεις γης η τιμή του συντελεστή τραχύτητας Manning, εισάγεται στους υπολογισμούς της επιφανειακής απορροής (Παππάς, 2011).

Η αντίστοιχη τιμή του n για κάθε πολύγωνο εκτιμάται από τον Πίνακα 5.1. (Pestana, 2014) και μετατρέπεται στον Αριθμό Manning M για να εισαχθεί στο μοντέλο:

Πίνακας 5. 1. Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τον συντελεστή τραχύτητας κατά Manning n και μετατροπή του σε αριθμό Manning M , πηγή (Pestana, 2014).

Χρήσεις γης	Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning n [m ^{-1/3} ·s]	Αριθμός Manning $M = 1/n$ [m ^{1/3} /s]
Διακεκομμένη Αστική Δόμηση	0.115	8.70
Μη αρδευόμενη γη	0.043	23.26
Αμπελώνες	0.043	23.26
Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	0.043	23.26
Ελαιώνες	0.043	23.26
Φυσικοί βοσκότοποι	0.298	3.36
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.023	43.48
Γεωργία./ σημαντική φυσική βλάστηση	0.058	17.24
Δάσος πλατύφυλλων	0.230	4.35
Δάσος κωνοφόρων	0.127	7.87
Μικτό δάσος	0.230	4.35
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.058	17.24
Μεταβατικές θαμνώδεις εκτάσεις	0.058	17.24
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.138	7.25
Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.104	9.62

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή στο μοντέλο του αρχείου dfs2 με τις αντίστοιχες τιμές Manning M (m^{1/3}/s) του Πίνακα 5.1., όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13.



Εικόνα 5. 13. Ψηφιοποιημένη μορφή συντελεστή Manning στο μοντέλο MIKE-SHE

Detention Storage

Ο «Detention Storage» είναι ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται για να περιορίσει την ποσότητα του νερού που μπορεί να ρέει πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Για παράδειγμα, εάν η αποθήκευση κράτησης τίθεται ίση με 2 mm, τότε το βάθος του νερού πάνω στην επιφάνεια πρέπει να υπερβαίνει τα 2 mm για να μπορεί να ρέει ως επιφανειακή ροή. Κάτω από 2 mm μπορεί να θεωρηθεί παγιδευμένο σε μικρές κοιλότητες που σχηματίζει το έδαφος. (MIKE SHE ReferenceGuide, 2007). Στην παρούσα εργασία τέθηκε ίσος με μηδέν.

Initial Water Depth

Ο παράγων «Initial water depth» ορίζεται ως το αρχικό βάθος του νερού στην επιφάνεια του εδάφους. Το αρχικό βάθος νερού στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ίσο με μηδέν μιας και κατά την έναρξη της προσομοίωσης (1/9/2000) δεν υπάρχει αρχικό ύψος νερού στη μελετώμενη περιοχή. Το αρχικό βάθος του νερού για την

επιφανειακή ροή είναι επίσης η οριακή συνθήκη για την επιφανειακή ροή. (MIKE SHE Reference Guide, 2007).

➤ **Storing of results – Αποθήκευση αποτελεσμάτων**

Detailed timeseries output.

Στο σημείο αυτό εισάγουμε τις συντεταγμένες των δύο σημείων μέτρησης παροχής για τα δύο ποτάμια (Ρουματιανού και Σεμπρονιώτη) και τις χρονοσειρές των παρατηρημένων παροχών (observed data), με μορφή αρχείου dfs0, σε m^3/s , όπως αυτές μας δόθηκαν από το τμήμα Έγγειων Βελτιώσεων της Περιφέρειας Κρήτης. Με την εντολή αυτή καθορίζουμε το σημείο που θέλουμε το μοντέλο να μας δώσει χρονοσειρές προσομοίωσης παροχών οι οποίες θα συγκριθούν με τις χρονοσειρές των παρατηρούμενων παροχών για τις ανάγκες της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης.

5.2.4. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση μοντέλου.

Βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου προσομοίωσης MIKE-SHE είναι η διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης ενός ή περισσότερων παραμέτρων του μοντέλου (έξοδος) σε συγκεκριμένες συνθήκες, με τα δεδομένα των παρατηρήσεων – μετρήσεων των αντίστοιχων παραμέτρων στις ίδιες συνθήκες.

Η επικύρωση – επαλήθευση (validation) του μοντέλου περιλαμβάνει τη διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων του βαθμονομημένου μοντέλου με αυτών του πεδίου σε άλλες συνθήκες. Για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης αλλά και της επαλήθευσης του μοντέλου χρησιμοποιούμε διάφορους στατιστικούς δείκτες. (Sahoo, 2004)

Η βαθμονόμηση του μοντέλου MIKE SHE γίνεται έτσι ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα δεδομένα των σημείων μέτρησης παροχών του Σεμπρονιώτη και του Ρουματιανού. Τα δεδομένα αυτά είναι ημερήσιες παροχές σε m^3/s .

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η βαθμονόμηση έγινε με εκτίμηση του συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείδσδυσης «Net Rainfall Fraction», που χρησιμοποιείται όταν δεν έχουμε διαθέσιμα στοιχεία για την εξατμισοδιαπνοή και αντιπροσωπεύει το καθαρό κλάσμα της βροχόπτωσης που είναι διαθέσιμο για διήθηση και επιφανειακή απορροή (Guittared, 2014).

Σύμφωνα με το MIKE SHE ReferenceGuide, 2007 με τον συντελεστή αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την καθαρή τροφοδοσία του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από την σχέση:

$$R_{net} = Prec \cdot Rainfall_{net} \cdot Infil_{frac}$$

Όπου:

Prec: οι κατακρημνίσεις

Rainfall_{net}: ο συντελεστής επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης

Infil_{frac}: το κλάσμα - μέρος των κατακρημνίσεων που διηθείται

Επομένως η επιφανειακή απορροή θα είναι:

$$runoff = Prec \cdot Rainfall_{net} - R_{net}$$

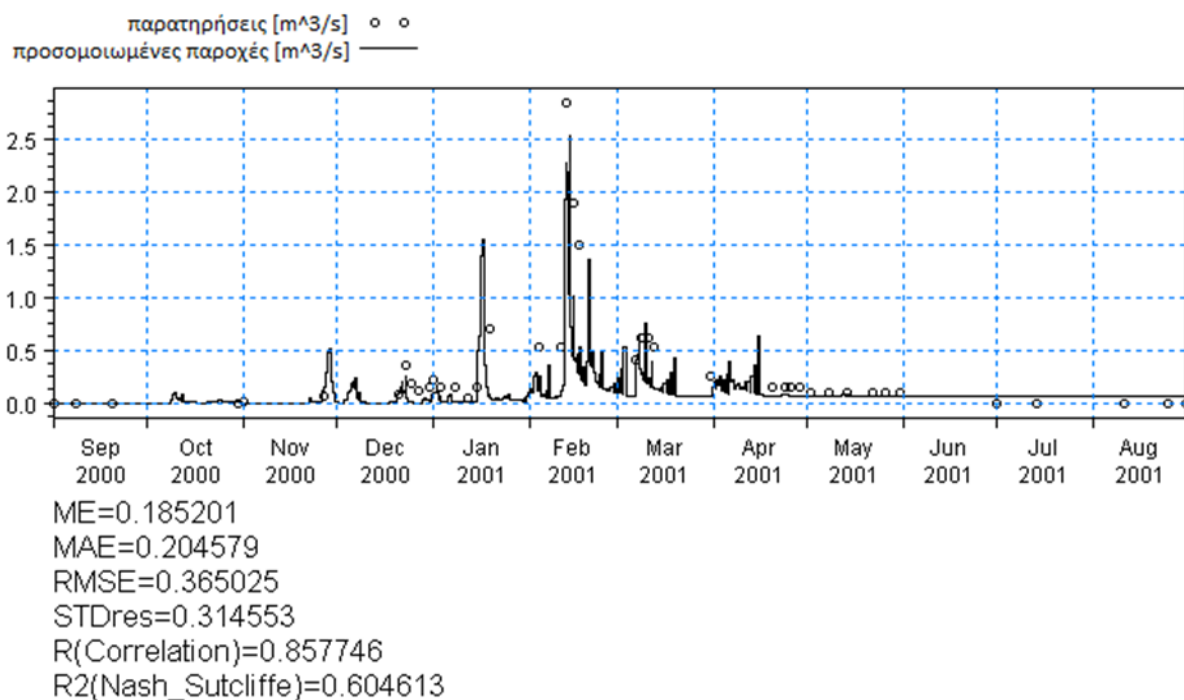
Θα πρέπει εδώ να επισημάνουμε ότι στην παρούσα μελέτη οι τιμές του συντελεστή «Net Rainfall Fraction» δύναται - αναμένεται να είναι αρκετά υψηλές μιας και στην περιοχή μελέτης η παρουσία βλάστησης είναι σχετικά περιορισμένη (ημιορεινή βραχώδης ζώνη) περιορίζοντας έτσι σημαντικά και τον παράγοντα της εξατμισοδιαπνοής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Αποτελέσματα

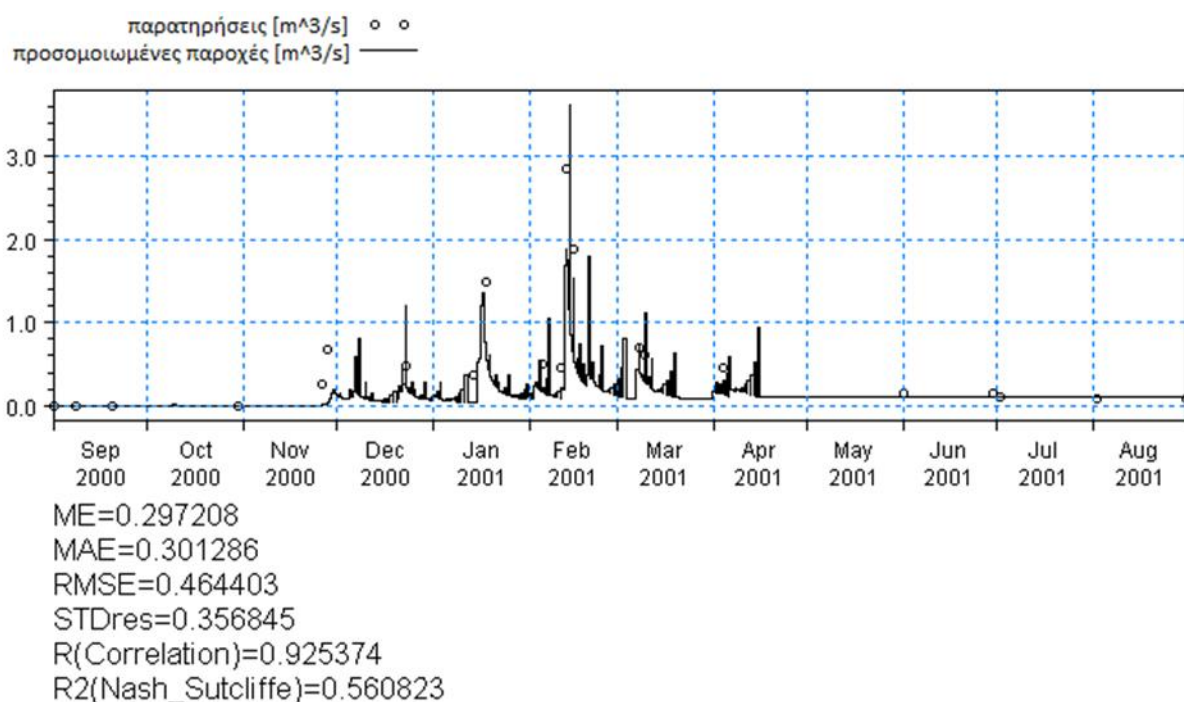
6.1. Αποτελέσματα Βαθμονόμησης Μοντέλου MIKE-SHE

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου προσομοίωσης MIKE SHE είναι μία επαναληπτική διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων του μοντέλου συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου με τα δεδομένα των παρατηρήσεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για το έτος 01/09/2000 – 31/08/2001 εκτιμώντας το συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης (Net Rainfall Fraction).

Για τη βαθμονόμηση της συγκεκριμένης προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής από τους ποταμούς Σεμπρονιώτη και Ρουματιανό. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προήλθαν από την υπηρεσία Έγγειων Βελτιώσεων της Περιφέρειας Κρήτης. Οι τιμές διακύμανσης της παραμέτρου Net Rainfall Fraction είναι μεταξύ 0 και 1. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο έδινε πολύ χαμηλές τιμές παροχών σε σχέση με αυτές των παρατηρούμενων για τιμές της παραμέτρου μικρότερες του 0.9. Αυτό εξηγείται, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, από το γεγονός ότι στο μεγαλύτερο μέρος της η περιοχή ενδιαφέροντος είναι ημιορεινή, βραχώδης με μικρή βλάστηση κυρίως ελαιόδεντρων και επομένως η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρή. Τελικά προέκυψε ότι η τιμή 0.92 για τον συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης (Net Rainfall Fraction) δίνει τα πλέον ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις Εικόνες 6.1 και 6.2 για τα ποτάμια Ρουματιανός και Σεμπρονιώτης αντίστοιχα. Στις ίδιες εικόνες περιγράφονται και οι αντίστοιχοι στατιστικοί δείκτες.



Εικόνα 6. 1. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τον ποταμό Ρουματιανό, έτος 00-01.



Εικόνα 6. 2. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τον ποταμό Σεμπρονιώτη, έτος 00-01.

Παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές της παροχής παρουσιάζονται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο και κυμαίνονται από 1.5 m³/s έως 3 m³/s. Οι δε χαμηλότερες παροχές εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες και το Σεπτέμβριο όπου κατά τη διάρκεια τους η παροχή είναι σχεδόν μηδενική.

Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν πλήθος στατιστικών δεικτών, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης βαθμονόμησης.

Μεταξύ διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων είναι:

- ο δείκτης αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE),
- η ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος (Root Mean Squared Error – RMSE) και
- ο συντελεστής συσχέτισης (R correlation)

Δείκτης Nash-Sutcliffe (NSE): Ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) είναι ένας κανονικοποιημένος στατιστικός δείκτης που καθορίζει το μέτρο της ποιότητας του μοντέλου σε σχέση με την αντιπροσωπευτικότητα της διακύμανσης των δεδομένων (Nash and Sutcliffe, 1970). Ο NSE δείχνει πόσο καλά η πλοκή των παρατηρούμενων δεδομένων σε σχέση με τα δεδομένα προσομοίωσης ταιριάζει στη γραμμή 1:1. Ο NSE υπολογίζεται από τη σχέση (6.1):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (6.1)$$

Όπου:

Y_i^{obs} : η παρατήρηση i

Y_i^{sim} : η i-προσομοίωση

Y^{mean} : ο μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων και

n: η συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

Ο δείκτης NSE κυμαίνεται μεταξύ $-\infty$ και 1.0, με NSE=1 να είναι η βέλτιστη τιμή. Τιμές μεγαλύτερες του 0.5 θεωρούνται γενικά ως αποδεκτά επίπεδα απόδοσης, ενώ οι τιμές <0.0 δείχνουν ότι η μέση τιμή των δεδομένων που παρατηρήθηκαν είναι

ένας καλύτερος προγνωστικός δείκτης από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου, οι οποίες αποδεικνύουν πολύ κακή απόδοση (Moriasi, 2007). Στην παρούσα υδρολογική προσομοίωση ο δείκτης NSE για την περίοδο της βαθμονόμησης είναι 0.60 για τον Ρουματιανό και 0.56 για τον Σεμπρονιώτη.

Η Ρίζα του Μέσου Τετραγώνου του Σφάλματος (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi, 2007). Μηδενική τιμή του RMSE σημαίνει μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση. Για το συγκεκριμένο στατιστικό δείκτη, ενδεικτικές τιμές ικανοποιητικής προσομοίωσης στην περίπτωση προσομοίωσης παροχών σε ποτάμια συστήματα θεωρούνται αυτές με $RMSE < 3.0$ (Coulibaly and Baldwin, 2007). Ο RMSE υπολογίζεται από τη σχέση (6.2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{n}} \quad (6.2)$$

Όπου:

Y_i^{obs} : η παρατήρηση i

Y_i^{sim} : η i-προσομοίωση

n: η συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

Στην παρούσα υδρολογική προσομοίωση ο δείκτης RMSE για την περίοδο της βαθμονόμησης είναι 0.36 για τον Ρουματιανό και 0.30 για τον Σεμπρονιώτη.

Ο συντελεστής συσχέτισης R(correlation), είναι ένα μέτρο της ακρίβειας ή του βαθμού στον οποίο συμφωνούν οι μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές. Ο συντελεστής R περιγράφεται από την εξίσωση (6.3):

$$R(correl) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y^{mean})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}} \quad (6.3)$$

Όπου:

Y_i^{obs} : η παρατήρηση i

Y_i^{sim} : η i-προσομοίωση

Y^{mean} : ο μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων

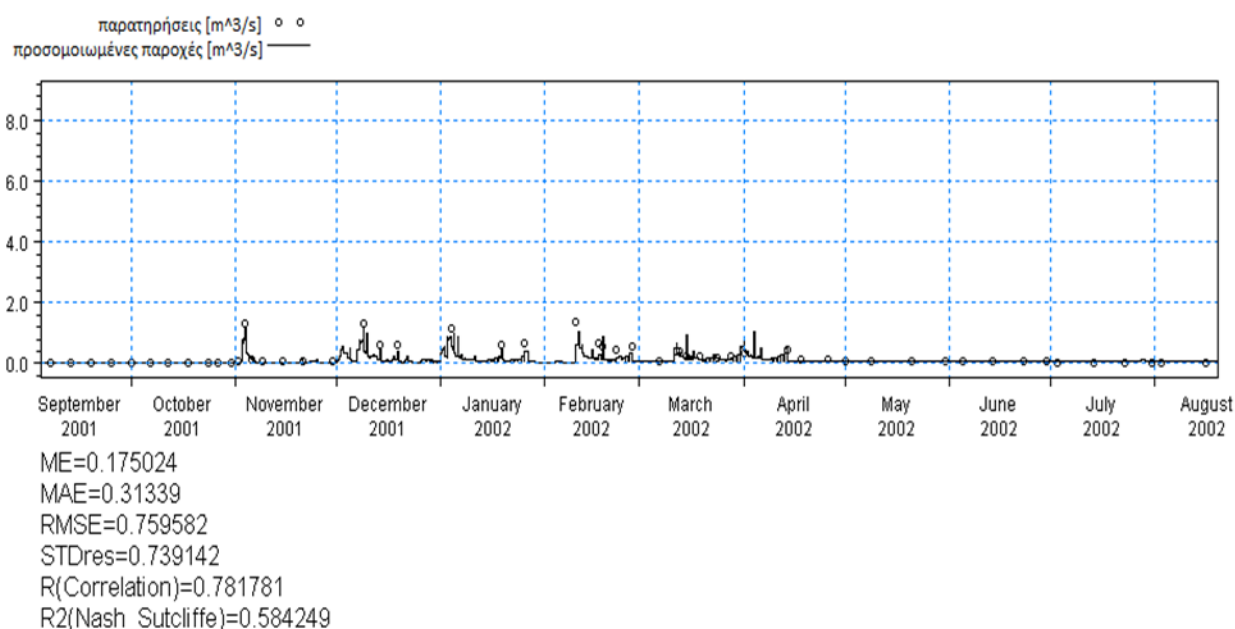
Ο συντελεστής συσχέτισης είναι καθαρός αριθμός, δηλαδή δεν εκφράζεται σε συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης και για τις τιμές του ισχύει:

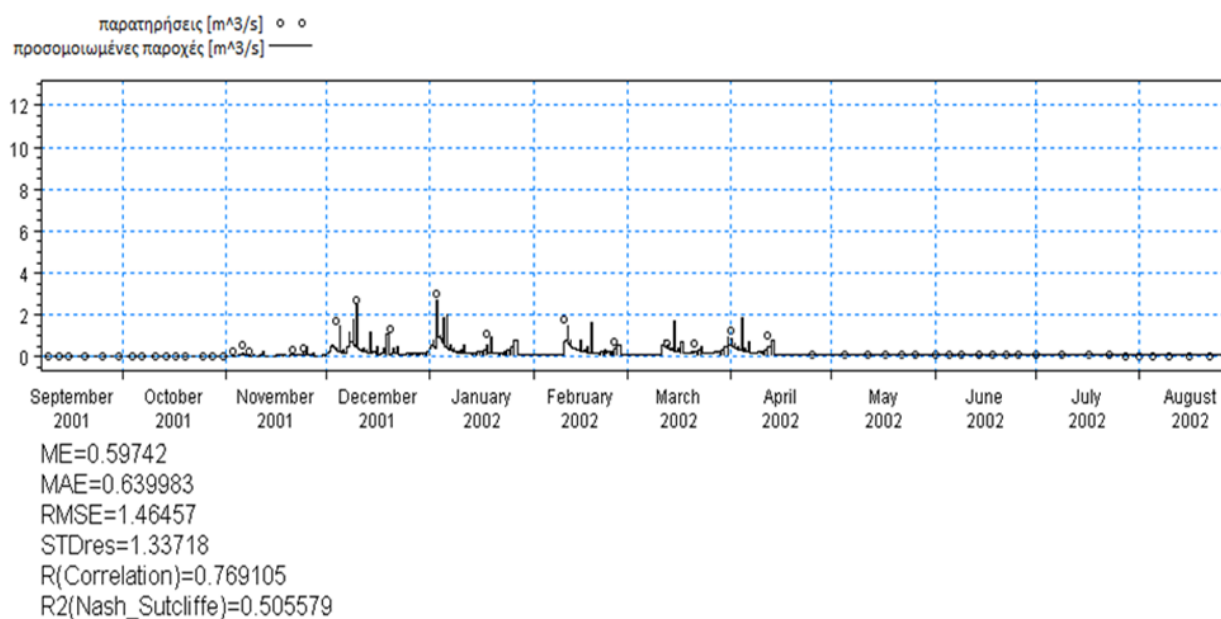
$$-1 < R < +1$$

Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση μας όταν $R=+1$ τότε έχουμε τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση των δύο χρονοσειρών. Αποδεκτές για την βαθμονόμηση του μοντέλου θεωρούμε τιμές μεγαλύτερες του 0.8. Στην παρούσα υδρολογική προσομοίωση ο δείκτης $R(\text{correl})$ για την περίοδο της βαθμονόμησης είναι 0.86 για τον Ρουματιανό και 0.92 για τον Σεμπρονιώτη.

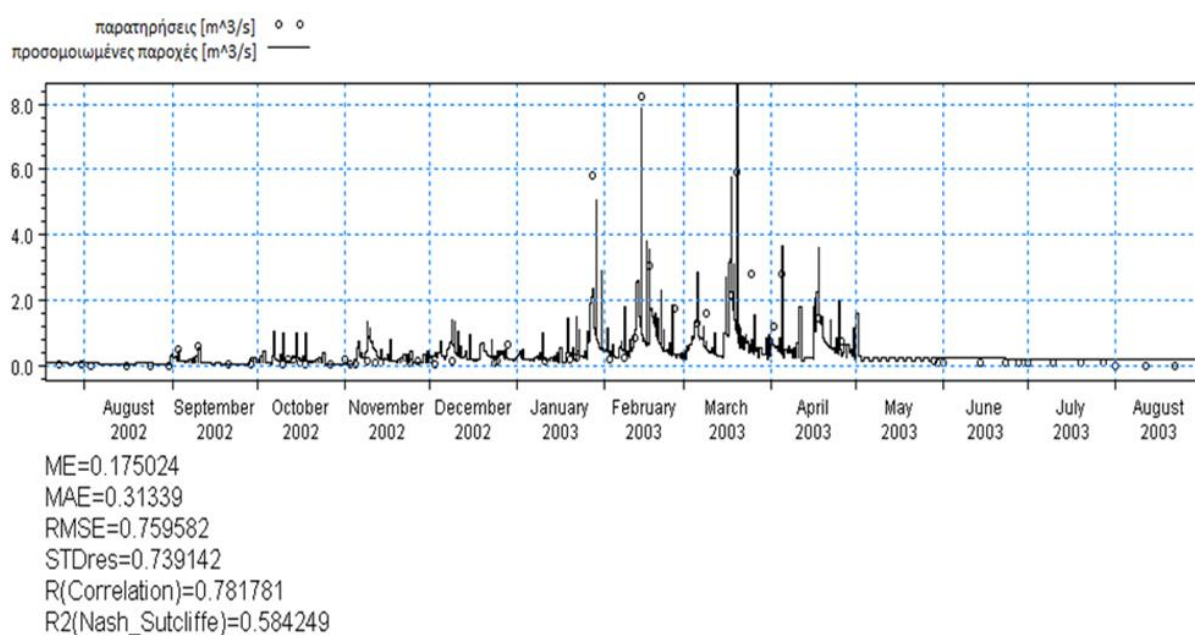
6.2. Αποτελέσματα Επαλήθευσης Μοντέλου MIKE-SHE

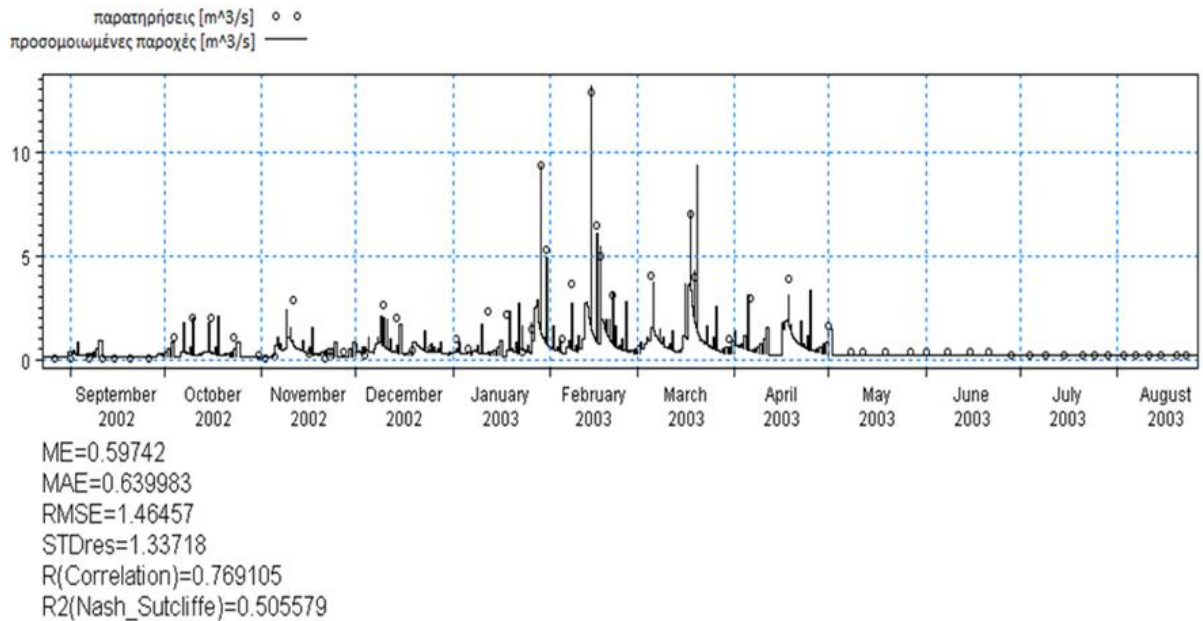
Η επικύρωση – επαλήθευση (validation) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη τιμή της παραμέτρου που βαθμονομήσαμε (συντελεστής επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης = 0.92) για τα έτη 01/09/2001 - 31/08/2003 όπως φαίνεται στις εικόνες 6.3.a - 6.3.b και 6.4.a – 6.4.b για τον Ρουματιανό και τον Σεμπρονιώτη αντίστοιχα. Στις ίδιες εικόνες περιγράφονται και οι αντίστοιχοι στατιστικοί δείκτες.





Εικόνα 6. 3. α & β. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τους ποταμούς Ρουματιανό & Σεμπρονιώτη αντίστοιχα, έτος 01-02.





Εικόνα 6. 4. α & β. Υδρογράφημα προσομοίωσης ημερήσιων παροχών μοντέλου MIKE SHE και παρατηρούμενων παροχών για τους ποταμούς Ρουματιανό και Σεμπρονιώτη αντίστοιχα, έτος 02-03.

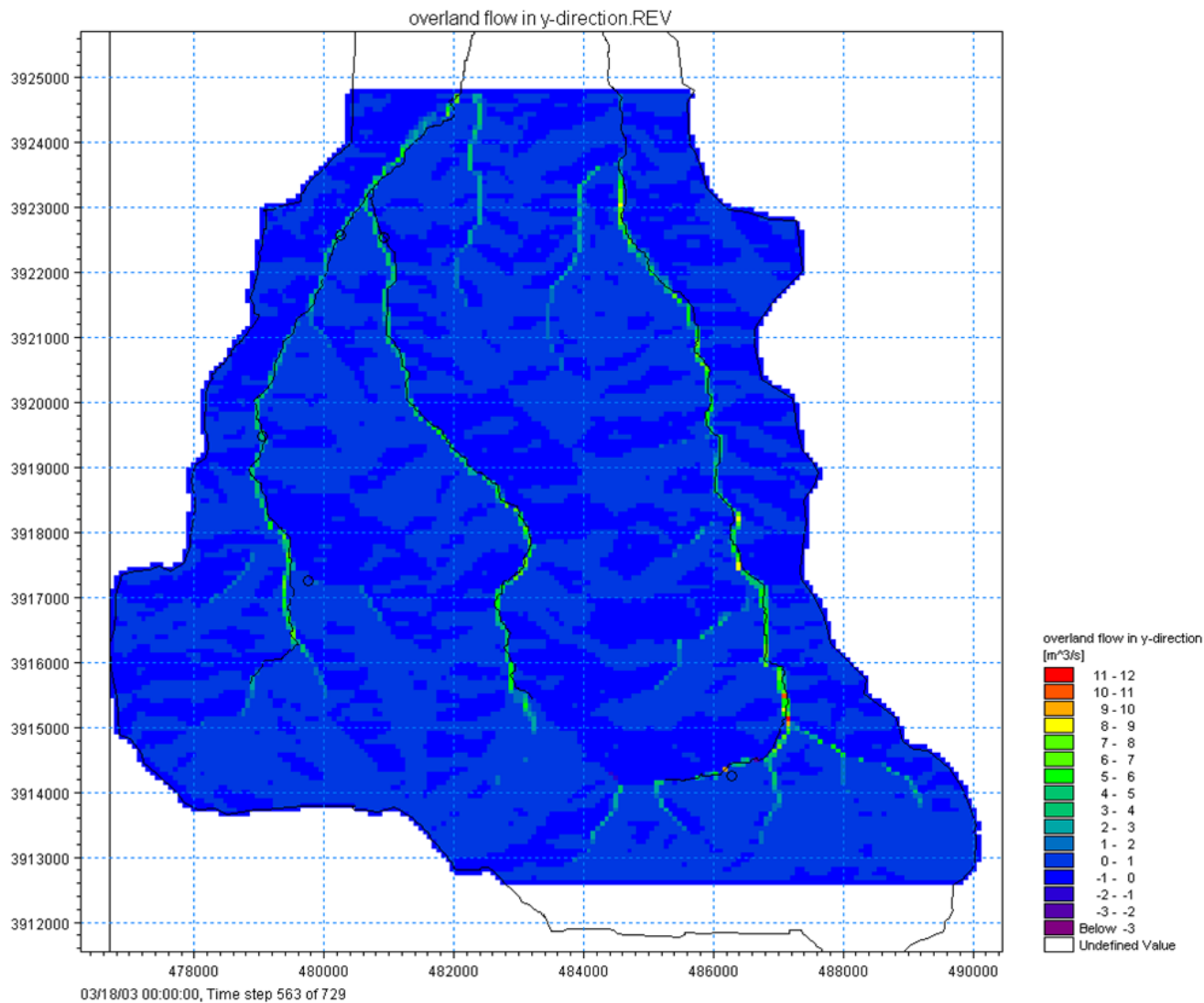
Για την χρονική περίοδο της επαλήθευσης (validation time period). Οι παραπάνω στατιστικοί δείκτες προσδιορίστηκαν ως εξής: Για τον Ρουματιανό, NSE = 0.58, RMSE = 0.76 και R correlation = 0.78 και για τον Σεμπρονιώτη NSE = 0.51, RMSE = 1.46 και R correlation = 0.77.

6.3. Αποτελέσματα Προσομοιωμένης επιφανειακής απορροής.

Στη συνέχεια, για την χρονική περίοδο της επαλήθευσης εξαγάγαμε τον δισδιάστατο χάρτη της επιφανειακής απορροής (overland flow). Στην εικόνα 6.5 επιλέξαμε μία χειμερινή μέρα της προσομοίωσης (12/03/2003) με έντονες επιφανειακές απορροές έτσι ώστε να είναι ορατές στο χάρτη όλες οι περιοχές συσσώρευσης επιφανειακών υδάτων εκτός των ποταμών αλλά και τα σημεία με μέγιστες παροχές εντός των ποταμών.

Στις περιοχές συσσώρευσης οι παροχές του νερού που αρχικά ρέει στην επιφάνεια του εδάφους φτάνουν μέχρι και τα $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Στη συνέχεια το νερό αυτό διέρχεται δια μέσου των παραπόταμων όπου η παροχή σε κάποια σημεία φτάνει έως και τα $12 \text{ m}^3/\text{s}$ και τελικά καταλήγει στην έξοδο της Λεκάνης απορροής. Οι παροχές αυτές είναι αρκετά υψηλές γι αυτό και είναι χρήσιμη η συλλογή και η αξιοποίηση του

επιφανειακού νερού με την κατασκευή τεχνικών υδραυλικών έργων (π.χ. φράγματα, λιμνοδεξαμενές).



Εικόνα 6. 5. Χάρτης προσομοιωμένων παροχών επιφανειακής απορροής λεκάνης ποταμού Ταυρωνίτη, στις 18/03/2003, όπου φαίνονται οι περιοχές συσσώρευσης επιφανειακού νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: Έργα αξιοποίησης των επιφανειακών υδάτων στην Λεκάνη Απορροής Ταυρωνίτη

7.1. Γενικά

Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων έχει στόχο την ικανοποίηση της ζήτησης διαφόρων χρήσεων (ύδρευση, άρδευση κ.λπ.), την προστασία της περιοχής από ακραία υδρολογικά φαινόμενα (πλημμύρες – ξηρασίες) και τη διατήρηση και αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Η απορροή αποτελεί τη βασικότερη υδρολογική παράμετρο για μια σειρά από έργα, τα οποία γίνονται για την αξιοποίηση των υδατικών πόρων (ταμιευτήρες, λιμνοδεξαμενές κ.λπ.) (Παπαμιχαήλ, 2001).

Με την κατασκευή τεχνικών υδραυλικών έργων επιτυγχάνουμε τη συλλογή του νερού αλλά και τη ρύθμιση της ροής του υδάτινου φορέα για την αποφυγή των καταστροφικών τους συνεπειών. Τέτοια έργα είναι τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές. Τα φράγματα κατασκευάζονται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος, για να ανακόψουν τη συνέχεια της ροής, με σκοπό την αποθήκευση του νερού για μελλοντική του χρήση. Με την κατασκευή ενός φράγματος σε ένα υδατόρευμα δημιουργείται ανάντη μία τεχνητή λίμνη που ονομάζεται ταμιευτήρας (reservoir) και αποτελεί χώρο αποθήκευσης του νερού του υδατορεύματος. Υπάρχουν όμως και ταμιευτήρες που δημιουργούνται σε φυσικούς ή τεχνητούς εξωποτάμιους υποδοχείς (κοιλώματα), που συνήθως λέγονται λιμνοδεξαμενές (Σακκάς, 2007).

Σε περιοχές ορεινές, ημιορεινές και νησιωτικές όπως είναι και η περιοχή μελέτης μας, όπου αυτές παρουσιάζουν τις κατάλληλες τοπογραφικές συνθήκες, για υδρευτικούς και αρδευτικούς κυρίως σκοπούς, μπορεί να αναπτυχθεί η κατασκευή μικρών λιμνοδεξαμενών. Αυτές μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρές κοιλάδες μεταξύ λόφων (εξωποτάμιες) ή στις κοίτες μικρορεμάτων - χειμάρρων, με την κατασκευή μικρών χωμάτινων φραγμάτων ύψους 5 - 15 m για τη συλλογή και την αποθήκευση των χειμερινών απορροών (Παπαμιχαήλ, 2001).

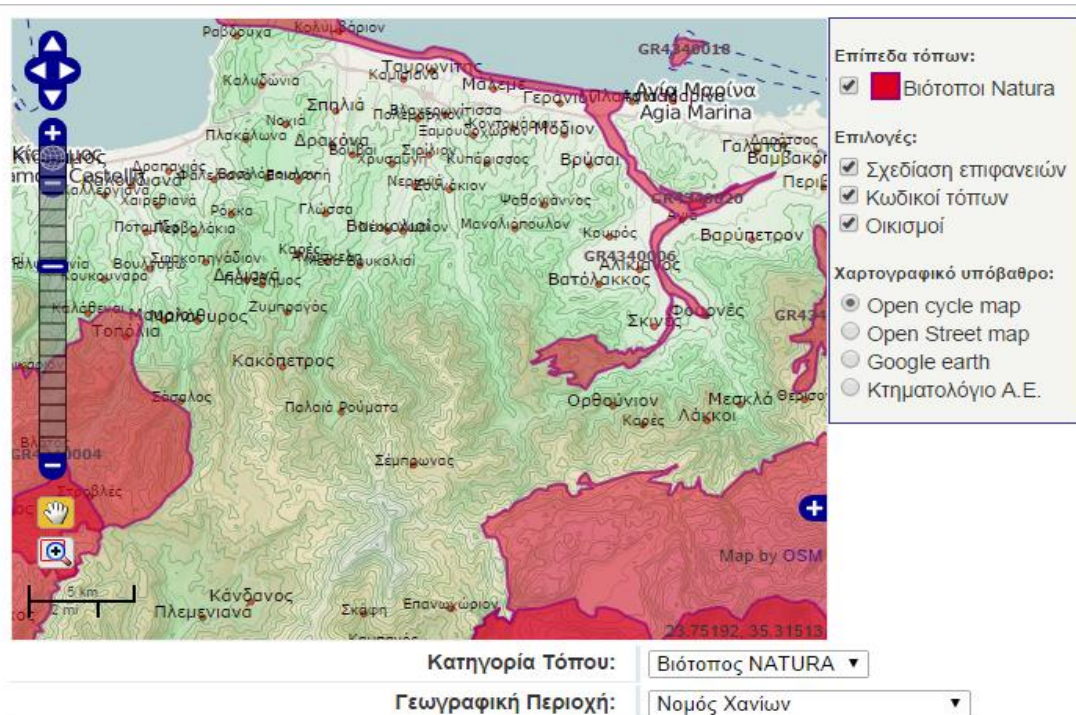
7.2. Περιβαλλοντικοί Όροι περιοχής – Φυσικό Περιβάλλον

Πριν κατατεθεί πρόταση για τις θέσεις εγκατάστασης έργων αξιοποίησης επιφανειακών υδάτων στην Λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη, είναι απαραίτητη η

εξέταση των Περιβαλλοντικών όρων της περιοχής και η αναλυτική περιγραφή του φυσικού – οικολογικού της περιβάλλοντος.

Περιοχές Natura 2000

Στην υδρολογική λεκάνη του Ταυρωνίτη συναντώνται δύο πολύ μικρές περιοχές του δικτύου Natura 2000 (Εικόνα 7.1.). Είναι ένα πολύ μικρό τμήμα των εκβολών του ποταμού σε πλάτος 300-500 μέτρα από την ακτή, που ανήκει στη περιοχή Χερσόνησος Ροδωπού - Παραλία Μάλεμε (GR430003) και οι νοτιοανατολικές παρυφές της λεκάνης, η περιοχή Λευκά Όρη (GR4340008). Η τελευταία αυτή περιοχή έχει βαθιές χαράδρες, απότομες κλίσεις και ελάχιστη έως πολύ αραιά βλάστηση (π.χ. ξηροφυτικοί θάμνοι, μεμονωμένα κωνοφόρα δένδρα, φυσικά λιβάδια αγροστωδών). Βορειότερα στο ημιορεινό και λοφώδες τμήμα της υδρολογικής λεκάνης η βλάστηση είναι πιο πλούσια, με κυρίαρχα τα κυπαρίσσι, τραχεία πεύκη, σφενδάμι, πλάτανος, πουρνάρι, αριά (π.χ. σκληρόφυλλη βλάστηση, κωνοφόρα δένδρα, φυσικά λιβάδια αγροστωδών), καθώς οι κλίσεις του εδάφους εξακολουθούν να είναι απότομες έως λιγότερο απότομες και το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνότερο. Τέλος το βόρειο τμήμα της λεκάνης είναι πεδινό με εκτεταμένες καλλιεργούμενες εκτάσεις με πλουσιότερη φυσική βλάστηση, αλλά και αρκετά νερά (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2012 & <http://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/>).



Εικόνα 7. 1. Περιοχές Natura 2000 στη Λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη (<http://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/>).

Χλωρίδα και Πανίδα

Σύμφωνα με το Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των υδατικών πόρων για τη Λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη που συντάχθηκε για τον ΟΑΔΥΚ. Ως προς τη χλωρίδα συναντώνται αγρωστώδη, όπου κυριαρχεί η Αμμοφίλα (*Ammophila arenaria*). Μέσα στο ποταμό και στην κοίτη του και όπου υπάρχει νερό συναντάται υδρόβια βλάστηση αναρριχώμενη, επιπλέουσα και ριζωμένη. Υπάρχει επίσης μια μεγάλη ποικιλία υγροτοπικών ειδών (ιτιές, πλατάνια, αρμυρίκια, καλάμια και ευκάλυπτοι). Εδώ συναντάται και το ενδημικό μικρόσωμο ελληνικό καλάμι (*Arundo hellenica* ή *A. plinii*), μαζί με το γιγαντιαίο καλάμι (*Arundo donax*). Ακόμη, παρατηρούνται τα αγρωστώδη *Scirpus cerneus*, αλλά και πολλά βρύοφυτα στις υγρές και σκιασμένες περιοχές. Από τα περιδόφυτα, εντυπωσιακή ανάπτυξη παίρνουν οι γιγαντιαίες φτέρες (*Woodwardia radicans*) (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2010).

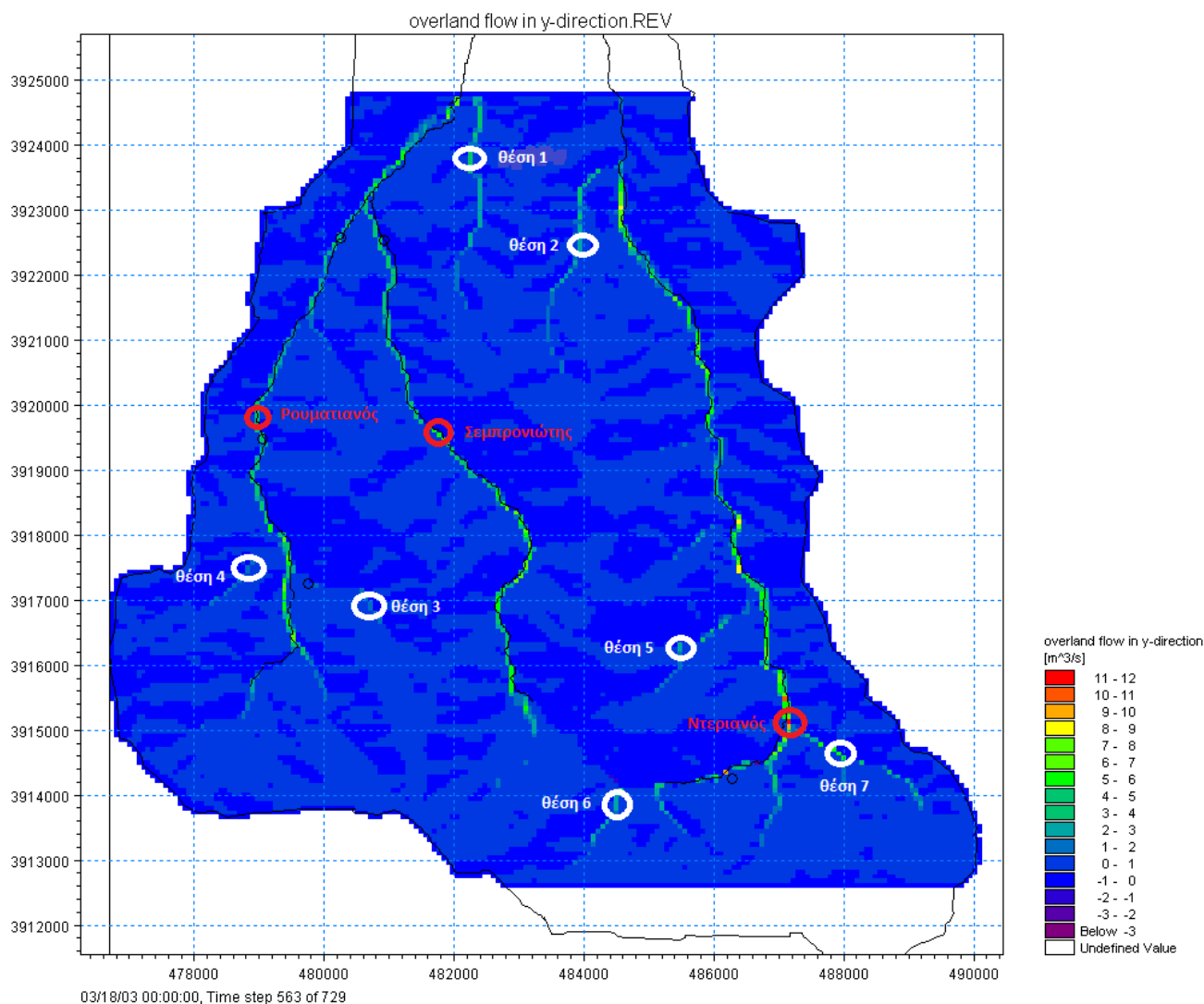
Ως προς την πανίδα αξιόλογα θηλαστικά που συναντώνται στην περιοχή είναι οι Σκαντζόχοιροι (*Erinaceus europaeus drozdovskii*, *Erinaceus europaeus nesiotes*, *Erinaceus concolor*, *Erinaceus europaeus rhodius* - Σκαντζόχοιρος της Ρόδου, *Erinaceus europaeus roumanicus* - Σκαντζόχοιρος ο Ρουμάνικος, *Erinaceus europaeus transcaucasicus* - Σκαντζόχοιρος ο ανατολικός), η Ζουρίδα ή Κουνάβι (*Martes foina*) η Μυγαλή (*Crocidura suaveolens*), η Νανογαλή (*Suncus etruscus*), ο Λαγός (*Lepus europaeus*), ο Δασοποντικός (*Apodemus sylvaticus*), ο Ποντικός (*Mus musculus*), ο Αρουραίος (*Rattus rattus*), ενώ στη παραλία έρχεται και η θαλάσσια χελώνα *Caretta caretta* για να εναποθέσει τα αβγά της για επώαση (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2010).

Από τα ερπετά και αμφίβια αξιόλογα της περιοχής είναι η Δενδρογαλιά (*Columba gemonensis*), η Οχέντρα ή Φίδι λεοπάρδαλη (*Elaphe situla*), το Νερόφιδο (*Natrix tessellata*), το Αγιόφιδο (*Telescopus fallax*), η Τρανόσαυρα η κιτρινόγραμμη (*Lacerta trilineata citrovittata*), το Λιακόνι (*Chalcides ocellatus*), το Σπιτικό σαμιαμίδι ή Τουρκική σαύρα (*Hemidactylus turcicus*), η Πράσινη σαύρα των Βαλκανίων (*Lacerta trilineata*), η Ποταμοχελώνα (*Mauremys caspica rivulata*), ο Λιμνοβάτραχος Δ. Ελλάδας (*Rana ridibunda ridibunda*), ο Κρητικός Λιμνοβάτραχος (*Rana cretensis*), ο κοινός Δενδροβάτραχος (*Hyla rónos* (*Bufo viridis*) και άλλα. Επίσης ως προς την ιχθυοπανίδα έχουν βρεθεί στον Ταυρωνίτη τα είδη: Χέλι (*Anguilla anguilla*), Κουνουπόψαρο (*Gambusia holbrooki*) και Αθερίνα (*Alosa fallax*) (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2010).

Σημαντική για τα μεταναστευτικά πουλιά είναι η εκβολή του ποταμού Ταυρωνίτη και η γειτονική θαμνώδης περιοχή. Αλλά και ολόκληρη η κοιλάδα του ποταμού και των παραποτάμων του, έχει ενδιαφέρον από ορνιθολογική άποψη λόγω της δεινρόδους ανάπτυξης της βλάστησης. Επίσης, σημαντικούς βιοτόπους δημιουργούν τα καλάμια (*Arundo hellenica* και *A. donax*) με τους καλαμιώνες και στις δύο κοίτες του ποταμού. Εκεί βρίσκουν καταφύγιο ερωδιοί, μυγοχάφτες, τσιροβάκοι, ποταμίδες φυλλοσκόποι και άλλα πουλιά. Αξιόλογα πτηνά της περιοχής αναφέρονται τα εξής: Νεροποταμίδα (*Acrocephalus paludicola*), Μεκατσίνι (*Gallinago gallinago*), Μαυρολαίμης (*Saxicola torquata*), Μαυροσκούφης (*Sylvia atricapilla*) και Μαυρότριγγας (*Tringa erythropus*). Στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ των ειδών που έχουν καταγραφεί είναι και τα πουλιά: σταυραετός, φιδαιτός, σφηκιάρης, τσίφτης, μαυροπετρίτης, μαυροκιρκίνεζο, θαλασσοσφυριχτής, πετριτρίλιδα, σταχτοτσικνιάς, μικροτσικνιάς, κιστικόλη, μαυρολαίμης, τρυποφράχτης, αρτέμης, κορμοράνος, ακτίτης, ψευδοαηδόνη και άλλα (Καρατζάς και Νικολαΐδης, 2010 & http://ornithologiki.gr/page_iba.php?aID=180/).

7.3. Πρόταση περιοχών εγκατάστασης τεχνικών υδραυλικών έργων στην λεκάνη απορροής Ταυρωνίτη

Όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 6, σύμφωνα με την προσομοίωση των επιφανειακών υδάτων για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη, που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προέκυψε ο χάρτης της Εικόνας 6.5 όπου και φαίνονται τα σημεία συσσώρευσης υψηλών επιφανειακών απορροών μια χειμερινή μέρα (12/03/2003). Στον χάρτη της Εικόνας 7.2. σημειώνονται οι προτεινόμενες θέσεις τοποθέτησης του υδραυλικού έργου.



Εικόνα 7. 2. Προτεινόμενες θέσεις κατασκευής του υδραυλικού έργου

Στον παραπάνω χάρτη (Εικόνα 7.2.) έχουμε σημειώσει με λευκό κύκλο τα σημεία – θέσεις (1 έως 7) οι οποίες προτείνονται για την τοποθέτηση εξωποτάμιων λιμνοδεξαμενών και με κόκκινο χρώμα τις θέσεις εντός των ποταμών για την κατασκευή ταμιευτήρα με φράγμα (Ρουματατιανός, Σεμπρονιώτης, Ντεριανός). Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν στο χάρτη της Εικόνας 6.5 στα σημεία που υποδήλωναν αυξημένη παροχή.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται για κάθε προτεινόμενη θέση ο όγκος νερού σε m³ ανά έτος, για τα υδρολογικά έτη 2001-2002 και 2002-2003 της επαλήθευσης του μοντέλου. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι το έτος 01-02 δεν είχαμε έντονες βροχοπτώσεις, σε αντίθεση με το έτος 02-03. Αυτό φαίνεται και στα διαγράμματα της επαλήθευσης στις Εικόνες 6.3.a & b και 6.4.a & b.

Πίνακας 7. 1. Όγκος νερού σε m^3 ανά έτος, για τα έτη 2001-2002 και 2002-2003 της επαλήθευσης του μοντέλου, για κάθε προτεινόμενη θέση εγκατάστασης.

Σημείο εγκατάστασης έργου	έτος 01-02	έτος 02-03
Εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές		
θέση 1	1.783.330,327 m^3	3.790.531,438 m^3
θέση 2	1.426.234,040 m^3	2.128.398,946 m^3
θέση 3	755.041,581 m^3	1.092.951,922 m^3
θέση 4	492.253,024 m^3	2.131.458,076 m^3
θέση 5	1.413.479,184 m^3	2.074.221,289 m^3
θέση 6	2.372.526,204 m^3	3.558.883,466 m^3
θέση 7	3.232.757,791 m^3	6.499.316,744 m^3
Ενδοποτάμιοι ταμιευτήρες		
Ρουματιανός	796.345,942 m^3	3.853.576,017 m^3
Σεμπρονιώτης	1.960.706,974 m^3	6.651.435,718 m^3
Ντεριανός	4.130.429,385 m^3	14.866.043,500 m^3

Στον πίνακα 7.1. παρατηρούμαι ότι στη θέση Ντεριανός μπορεί να συλλεχθεί ο μεγαλύτερος όγκος νερού εντός ποταμού, ενώ εκτός ποταμού ο μεγαλύτερος όγκος νερού μπορεί να συλλεχθεί από τη θέση 7 (περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση παροχών). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι όγκοι αυτού του πίνακα είναι το άθροισμα των προσομοιωμένων παροχών (m^3/s) κάθε ημέρας του έτους που έχουν μετατραπεί σε ετήσιες παροχές ($m^3/year$), επομένως αν σε αυτά τα σημεία υπήρχαν ταμιευτήρες οι όγκοι νερού δεν θα ήταν τόσο μεγάλοι λόγω των απωλειών (κυρίως από την εξάτμιση).

Για την επιλογή θέσης και την κατασκευή ενός τεχνικού υδραυλικού έργου, εκτός από την συσσώρευση παροχής, θα πρέπει να τηρούνται και κάποιες άλλες προϋποθέσεις:

- Οι ταμιευτήρες αποθήκευσης επιφανειακών υδάτων θα πρέπει να κατασκευάζονται κοντά στις εκτάσεις που πρόκειται να αρδευθούν ή σε έργα (π.χ. υδροηλεκτρικά) που θα αξιοποιήσουν το νερό τους. Ακόμη η θέση του έργου πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε η άρδευση να γίνεται με τη βαρύτητα

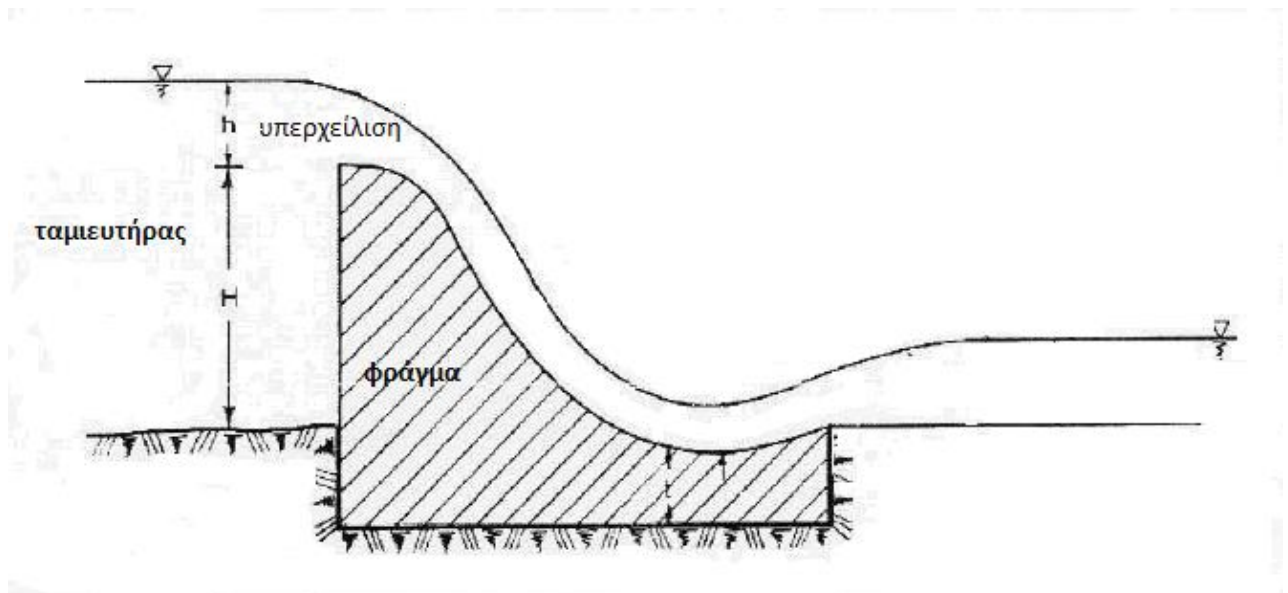
χωρίς τη μεσολάβηση αντλιοστασίου το οποίο επιβαρύνει το κόστος κατασκευής του.

- Οι ταμιευτήρες πρέπει επίσης να τοποθετούνται σε περιοχές με ήπιες κλίσεις και γαιώδη εδάφη έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται το έργο με επιπλέον χωματουργικές εργασίες (Εικόνα 7.4.) (Φωτόπουλος, 2007).
- Επίσης τα τεχνικά υδραυλικά έργα δεν θα πρέπει να βρίσκονται κοντά σε προστατευόμενες περιοχές (περιοχές Natura – Εικόνα 7.1.) και να ασκούν πιέσεις στο φυσικό περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής.

Ενδοποτάμιοι ταμιευτήρες

Οι ενδοποτάμιοι ταμιευτήρες γενικώς κατασκευάζονται στο ορεινό τμήμα της Λεκάνης απορροής ενός ποταμού για να προστατεύονται οι ευαίσθητες περιοχές, που συνήθως βρίσκονται στο πεδινό τμήμα, από καταστροφικές πλημμύρες. Για αποτελεσματική αντιπλημμυρική προστασία σε μια μεγάλη Λεκάνη απορροής απαιτείται η κατασκευή ταμιευτήρων στους κυριότερους παραπόταμους του κύριου ρεύματος (Σακκάς, 2007 και Λουκάς, 2007).

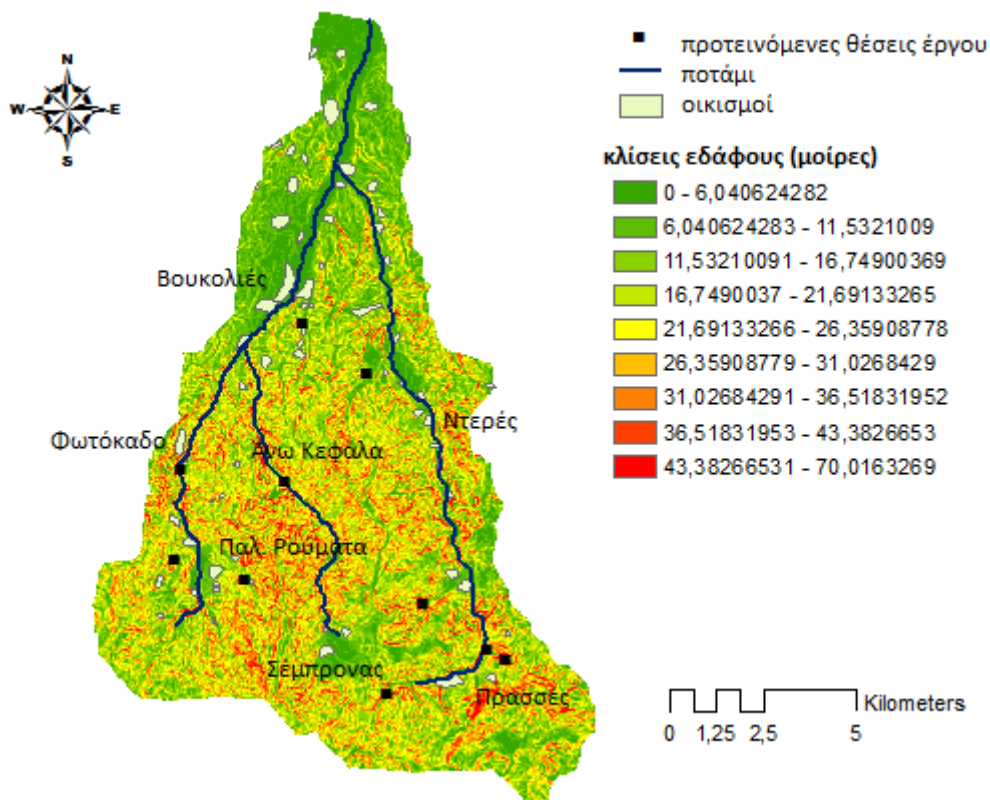
Οι ενδοποτάμιοι φραγμοί θα πρέπει να συλλέγουν ένα μέρος μόνο του νερού του ρεύματος για να μην δημιουργούνται συνθήκες ξηρασίας κατάντη του φράγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.3.



Εικόνα 7. 3. Ενδοποτάμιος φραγμός, ανάντη του φράγματος δημιουργείται ο ταμιευτήρας

Για την εκμετάλλευση των επιφανειακών απορροών της Λεκάνης του ποταμού Ταυρωνίτη, έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς διάφορες προτάσεις. Ανάμεσα τους ξεχωρίζει η πρόταση για την κατασκευή τριών φραγμάτων στους τρεις χείμαρρους του ποταμού Ταυρωνίτη, τα φράγματα του Ντεριανού, του Σεμπρονιώτη και του Ρουματιανού. Οι ταμιευτήρες που θα κατασκευαστούν θα παρακρατούν με φράγματα το 50% του νερού. Η υπόλοιπη ποσότητα νερού που θα υπερχειλίζει και θα συνεχίζει την πορεία του στον Ταυρωνίτη χαρακτηρίζεται επαρκής για την προστασία της οικολογίας και τη διατήρηση του υδρογεωλογικού καθεστώτος στην κατάντη των φραγμάτων περιοχή (Στειακάκης και Μανούτσογλου, 2010).

Σύμφωνα με την προσομοίωση του μοντέλου, οι μεγαλύτερες παροχές και το μεγαλύτερο ύψος νερού στους τρεις παραπόταμους είναι στα σημεία που σημειώθηκαν στο χάρτη της Εικόνας 7.2. (Ρουματιανός, Σεμπρονιώτης, Ντεριανός). Για τον Ντεριανό η θέση του φράγματος προτείνεται βόρεια του χωριού Πρασές. Η θέση του φράγματος του Ρουματιανού χωροθετείται κοντά στο χωριό Φωτοκάδο και το φράγμα του Σεμπρονιώτη νοτιανατολικά του χωριού Άνω Κεφάλια (Εικόνα 7.4.). Τα σημεία αυτά συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα σημεία που ήδη έχουν προταθεί από προηγούμενες μελέτες και μπορούν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες για ύδρευση των κοντινών οικισμών. Στην Εικόνα 7.5 μπορούμε να δούμε πως οι θέσεις όπου προτείνονται τα φράγματα του Ντεριανού και του Ρουματιανού, βρίσκονται πολύ κοντά σε γεωργικές εκτάσεις και σε εκτάσεις με οπωροφόρα δέντρα, επομένως ένα μέρος του νερού των αντίστοιχων ταμιευτήρων μπορεί να αξιοποιηθεί για άρδευση των εκτάσεων αυτών χωρίς την επιβάρυνση του κόστους μεταφοράς του νερού. Το φράγμα του Ντεριανού βρίσκεται επίσης πολύ κοντά στο προτεινόμενο υβριδικό έργο.



Εικόνα 7. 4. Χάρτης Λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη με τις κλίσεις του εδάφους και τους κοντινούς στις προτεινόμενες θέσεις οικισμούς.

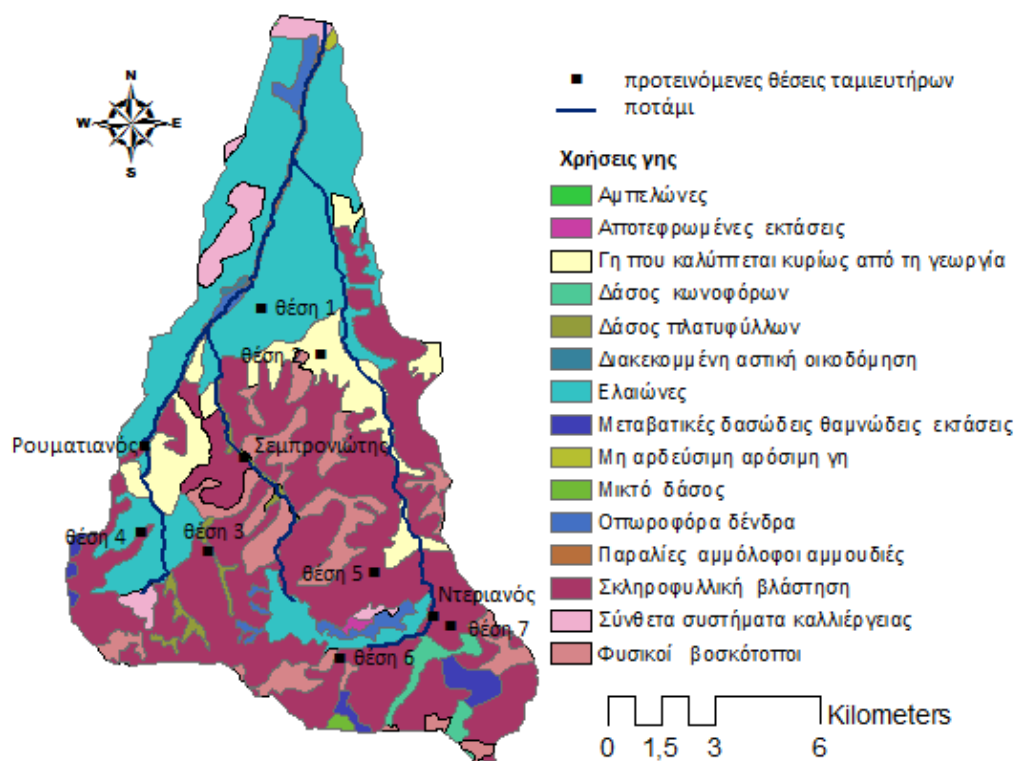
Εξωποτάμιες Λιμνοδεξαμενές

Οι λιμνοδεξαμενές συνήθως τοποθετούνται σε κοιλάδες μεταξύ λόφων. Μια λιμνοδεξαμενή μπορεί να κατασκευασθεί και σε επίπεδες εκτάσεις αλλά η εκσκαφή τέτοιων δεξαμενών και η κατασκευή περιφερειακών αναχωμάτων απαιτεί υπερβολικές χωματουργικές εργασίες (Παπαμιχαήλ, 2001).

Οι προτεινόμενες θέσεις 1, 2 και 4 της Εικόνας 7.1, βρίσκονται κοντά σε εκτάσεις που καλύπτονται κυρίως από γεωργία (Εικόνα 7.5.), επομένως μια λιμνοδεξαμενή θα ήταν χρήσιμη για αρδευτικούς σκοπούς.

Όπως προαναφέρθηκε όμως στο Κεφάλαιο 1, στην περιοχή σχεδιάζεται η κατασκευή ενός υβριδικού έργου κοντά στο χωριά Πρασσές και Σέμπρωνας. Το έργο θα χρειαστεί αρχικά για την πλήρωση των ταμιευτήρων του 60.000 m³ καθαρό όγκο νερού. Ετησίως θα απαιτούνται για την επαναπλήρωση των ταμιευτήρων λόγω απωλειών 9.300 m³ νερού (ΜΠΕ υβριδικού έργου, 2010). Οι θέσεις 3, 5, 6 και 7 της Εικόνας 7.2. είναι αυτές που βρίσκονται στην περιοχή εγκατάστασης του υβριδικού έργου, από αυτές η θέση 7 κατά τον πίνακα 7.1 έχει τις μεγαλύτερες επιφανειακές

απορροές. Για το σημείο αυτό η προσομοίωση του μοντέλου μας δίνει όγκο νερού 3.232.757,791 (περίπου $3.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) για το σχετικά ξηρό έτος 01-02 και 6.499.316,744 m^3 (περίπου $6.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) για το υγρό έτος 02-03. Επομένως σε κάθε περίπτωση, με συνυπολογισμένες τις απώλειες λόγω εξάτμισης, μια λιμνοδεξαμενή με υπερχείλιση (που θα αποθηκεύει το 50% του νερού) στη θέση 7 μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του υβριδικού έργου αλλά και άλλες ανάγκες της περιοχής (ύδρευση οικισμών, άρδευση, κ.λπ.).



Εικόνα 7. 5. Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάστηκε ο συνολικός Πίνακας 7.2. με τα Κριτήρια που πληροί η κάθε προτεινόμενη θέση εγκατάστασης του έργου.

Πίνακας 7. 2. Πίνακας με τις προτεινόμενες θέσεις και τα Κριτήρια που αυτές πληρούν.

Θέσεις	Κριτήρια				
	Κοντά σε αρδευόμενες περιοχές	Κοντά στο υπό εγκατάσταση υβριδικό έργο	Μικρές κλίσεις εδάφους	Μακριά από προστατευόμενες περιοχές	Συσώρευση παροχών *
Ενδοποτάμιοι ταμιευτήρες					
Ρουματιανός	√			√	√√
Σεμπρονιώτης				√	√√√
Ντεριανός	√	√			√√√
Εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές					
θέση 1	√		√	√	√√
θέση 2	√		√	√	√
θέση 3		√		√	√
θέση 4				√	√
θέση 5	√	√		√	√
θέση 6		√		√	√√
θέση 7		√			√√√

*Στη τελευταία στήλη στο Κριτήριο Συσώρευση παροχών με ένα (√) είναι σημειωμένες οι θέσεις με χαμηλή συσώρευση παροχών ($<3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$), με δύο (√√) οι θέσεις με μέτρια συσώρευση παροχών ($3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ έως $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$) και (√√√) οι θέσεις με υψηλή συσώρευση παροχών ($>6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$). Η κατηγοριοποίηση έγινε με βάση τις παροχές του υδρολογικού έτους 02-03 (Πίνακας 7.1.).

Από τον Πίνακα 7.2 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη συσώρευση παροχών σημειώνεται στη θέση 7 (για Λιμνοδεξαμενή) και στις προτεινόμενες θέσεις φραγμάτων Ντεριανός και Σεμπρονιώτης. Η προτεινόμενη θέση 7 βρίσκεται κοντά στο υπό εγκατάσταση υβριδικό έργο, είναι όμως μια θέση με έντονες κλίσεις εδάφους και αρκετά κοντά σε προστατευόμενες περιοχές Natura (Εικόνες 7.1 και 7.4.). Το προτεινόμενο φράγμα του Ντεριανού βρίσκεται επίσης σε μικρή απόσταση από το σχεδιαζόμενο υβριδικό αλλά και σε αρδευόμενες περιοχές, δεν απέχει όμως κι αυτό αρκετά από τις προστατευόμενες περιοχές Natura. Τέλος το προτεινόμενο φράγμα του Σεμπρονιώτη απέχει αρκετά από προστατευόμενες περιοχές και μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ύδρευσης των γειτονικών οικισμών.

Επιπλέον, από τον Πίνακα 7.2. μπορούμε να διακρίνουμε ότι στην προτεινόμενη θέση 1, για Λιμνοδεξαμενή, σημειώνεται μεν μέτρια συσώρευση παροχής, έχει όμως τα πλεονεκτήματα να βρίσκεται σε περιοχή με ήπιες κλίσεις

εδάφους, κοντά σε αρδευόμενες - γεωργικές περιοχές και μακριά από περιοχές Natura.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο: Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Ταυρωνίτη και ο εντοπισμός των περιοχών συσσώρευσης του επιφανειακού νερού με στόχο την εκμετάλλευση του αλλά και για την προστασία της περιοχής από ακραία υδρολογικά φαινόμενα.

Για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής στην υδρολογική Λεκάνη του ποταμού Ταυρωνίτη χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό ομοίωμα MIKE SHE. Για τη λειτουργία του μοντέλου ήταν απαραίτητη η συλλογή και επεξεργασία μεγάλου αριθμού δεδομένων, καθώς το μοντέλο περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές που αφορούν το σύνολο της γεωμορφολογίας της περιοχής μελέτης. Το μεγάλο πλήθος όμως αυτών των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα εισόδου, αυξάνουν την αξιοπιστία του μοντέλου, σε σύγκριση με άλλα παρόμοια μοντέλα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας συλλέξαμε και συμπληρώσαμε βροχομετρικά δεδομένα από πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής και ημερήσιες παροχές σε m^3/sec από δύο σημεία μέτρησης παροχής στους παραπόταμους Ρουματιανό και Σεμπρονιώτη.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου προσομοίωσης αξιολογήθηκαν οι στατιστικοί δείκτες αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE), η ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος (Root Mean Squared Error – RMSE) και ο συντελεστής συσχέτισης (R correlation) και προσδιορίστηκαν ως ικανοποιητικοί.

Ως παράμετρος βαθμονόμησης προσδιοριστικό ο συντελεστή επιφανειακής απορροής και κατείδυσης «Net Rainfall Fraction» με τιμή ίση με 0.92, κάτι που υποδηλώνει μικρές απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής και πολύ έντονες επιφανειακές απορροές. Με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για την παραπάνω τιμή έχουμε καλή προσομοίωση στους δύο παραπόταμους, με τον συντελεστή αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) να παίρνει τις τιμές 0.60 για τον Ρουματιανό και 0.56 για τον Σεμπρονιώτη για την περίοδο της βαθμονόμησης και τις τιμές 0.58 και 0.51 αντίστοιχα για την περίοδο της επαλήθευσης.

Από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου προκύπτει επίσης ότι η παροχή του ποταμού Ταυρωνίτη είναι πάρα πολύ χαμηλή (σχεδόν μηδενική) τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, ενώ τους χειμερινούς μήνες παρατηρούμε

πολύ έντονες επιφανειακές απορροές που κυμαίνονται από 1.5 m³/s έως 3 m³/s με αποτέλεσμα να πλημμυρίζουν περιοχές της Λεκάνης.

Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να έχει απ' ευθείας κάποιο αντίκτυπο στο οικοσύστημα του ποταμού και στις προστατευμένες περιοχές Natura.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αλλά και για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής σε ύδρευση και άρδευση διατυπώθηκαν προτάσεις θέσεων για την κατασκευή τεχνικών υδραυλικών έργων στη Λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη (Κεφάλαιο 7). Με τα έργα αυτά επιτυγχάνουμε τη συλλογή - αποταμίευση του νερού αλλά και τη ρύθμιση της ροής του υδάτινου φορέα για την αποφυγή των καταστροφικών του συνεπειών.

Από τις προτεινόμενες θέσεις εγκατάστασης ξεχωρίσαμε την περιοχή μεταξύ των οικισμών Λάκκοι και Γεργουσιανά (θέση 1) και την περιοχή μεταξύ των οικισμών Ασκίδα και Χωστή (θέση 7) για την εγκατάσταση – κατασκευή Λιμνοδεξαμενής. Για την κατασκευή ταμιευτήρα με φράγμα ξεχωρίσαμε τη θέση Ντεριανός που βρίσκεται βόρεια του χωριού Πρασσές και τη θέση Σεμπρονιώτη νοτιανατολικά του χωριού Άνω Κεφάλαια.

Η επιλογή των παραπάνω θέσεων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη συσσώρευση παροχών, τις κλίσεις του εδάφους και την απόσταση τους από αρδευόμενες περιοχές, το σχεδιαζόμενο υβριδικό έργο και τις περιοχές Natura 2000.

Για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής, πέρα από τα έργα που προτάθηκαν, πρέπει συνδυαστικά να ληφθούν και τα εξής μέτρα:

- Καταγραφή της κατανάλωσης νερού, έτσι ώστε να είναι γνωστές οι πραγματικές ανάγκες για ύδρευση των οικισμών και άρδευση της περιοχής.
- Επαναχρησιμοποίηση νερού από βιολογικούς καθαρισμούς στην άρδευση γεωργικών εκτάσεων.
- Αλλαγή στη τιμολογιακή πολιτική του νερού με βάση την κατανάλωση, και όχι την έκταση της γεωργικής γης και τα τετραγωνικά μέτρα των σπιτιών, για την αποτροπή της άσκοπης σπατάλης νερού.
- Συχνή ενημέρωση του κόσμου για την σημασία και τους τρόπους της εξοικονόμησης νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Coulibary, P., and Baldwin, C.K., 2005. Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *Journal of Hydrology* 307: 164 - 174.
2. Fry, L. M., Hunter, T. S., Phanikumar, M. S., Fortin, V., and Gronewold, A. D., 2013. Identifying stream gage networks for maximizing the effectiveness of regional water balance modeling. *Water Resources Research*, VOL. 49, 1–12.
3. Guittared., A, 2014. Hydrological analysis and modeling, Distributed hydrological model development-MIKE SHE.
4. Kourgialas, N., Karatzsas, G., 2011. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas - a case study. *Hydrological Sciences Journal*
5. Kourgialas, N., Karatzsas, G., Nikolaidis, N., 2009. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology* 381 (2010): 308-321.
6. Mike She User Manual, DHI, 2007. Volume 1&2 User Guide.
7. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.
8. Moore, D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R, 1990. Digital Terrain Modeling: A review of Hydrological, Geomorphological and Biological applications. *Hydrological Processes*, Vol. 5, 3-30 (1991)
9. Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Araújo, A., Roque, D., Van Zeller, E., Trigo-Teixeira, A., Ferreira, R., Oliveira, R., Heleno, S., 2006. Calibration of 2D hydraulic models in the FloodPlain region of the lower Tagus river.
10. Sahoo, G., B., Ray, C., E.H., De Carlo, 2004. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream. *Journal of Hydrology* (2006) 327, 94– 109.

Ελληνική Βιβλιογραφία

11. Βαφειάδης, Μ., 2000. Εισαγωγή στην Επιφανειακή Υδρολογία.
12. Βοζινάκης, Κ., και Κουγιάννη Σ., 2004. Υδατικοί Πόροι Νομού Χανίων και Διαχείρισή τους. Χανιά.
13. Βουδούρης, Κ., Αντωνάκος, Α., Κουμαντάκης, Ι., Συμβολή στην Εκτίμηση του Υδατικού Δυναμικού της Λεκάνης του Ασωπού Ποταμού του Νομού Κορινθίας.
14. Δημητροπούλου, Ι., 2008. Ποιοτική εκτίμηση της σχέσης κατολισθήσεων και βροχοπτώσεων στην βόρεια Πελοπόννησο, στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών.
15. Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2012. Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Ταυρωνίτη, Χανιά, Τεχνική Έκθεση προς ΟΑΔΥΚ, Χανιά
16. 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.
17. 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.
18. Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
19. Λουκάς, Α., 2007. Σημειώσεις Μαθήματος *Φράγματα*, Υπόδειγμα Εκτίμησης Επιφανειακού Δυναμικού και Μηνιαίας Υδρολογικής Προσομοίωσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
20. Μανιάτης, Γ., 1996. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
21. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο « Αιολικό – Αντλητικό – Υδροηλεκτρικό Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στη θέση Στρογγυλή κορυφή Ν. Χανίων», 2010.
22. Μπούρα, Β., 2010. Προσδιορισμός Συστημάτων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων στην Κρήτη, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

23. Παναγόπουλος, Ι., 2010. Λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων μέτρων για την προστασία της χημικής κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος από μη σημειακές πηγές ρύπανσης, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
24. Παπαμιχαήλ, Μ., 2001. Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.
25. Παπαρρίζος, Σ., 2012. Μελέτη του χειμαρρικού περιβάλλοντος του ποταμού Σπερχειού, με το ολοκληρωμένο, υδρολογικό, φυσικής βάσης μοντέλο MIKESHE και χρήση GIS, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
26. Παππάς, Χ., Παπαθεοδώρου, Κ., Φουντούλης, Ι., 2011. Εκτίμηση πλημμυρικού Κινδύνου στην πόλη των Σερρών με την χρήση μορφομετρικών και υδραυλικών μοντέλων, ΧΩΡΟγραφίες.
27. Σακκάς, Ι., 2007. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη.
28. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
29. Τσουχλαράκη, Α., Αχχιλέως, Γ., 2010. Μαθαίνοντας τα GIS στην πράξη, το ArcGIS 9.3, Εκδόσεις ΔΙΣΙΓΜΑ, Χανιά.
30. Φωτόπουλος, Φ., 2007, Σκοπιμότητα, Σχεδιασμός & Υλοποίηση Μικρών Φραγμάτων – Λιμνοδεξαμενών στη ν. Ζάκυνθο.

Διαδίκτυο

31. ΙΤΕ- Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών <http://emeric.ims.forth.gr/>
32. Corine 2000 <http://geodata.gov.gr/>
33. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία: <http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology>
34. Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία: http://ornithologiki.gr/page_iba.php?aID=180
35. Washington State University: <http://whatcom.wsu.edu/>
36. ΦΙΛΟΤΗΣ, Βάση Δεδομένων για την Ελληνική Φύση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: <http://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/>
37. ΔιΧηNET: <http://plemenosem.wikispaces.com/>