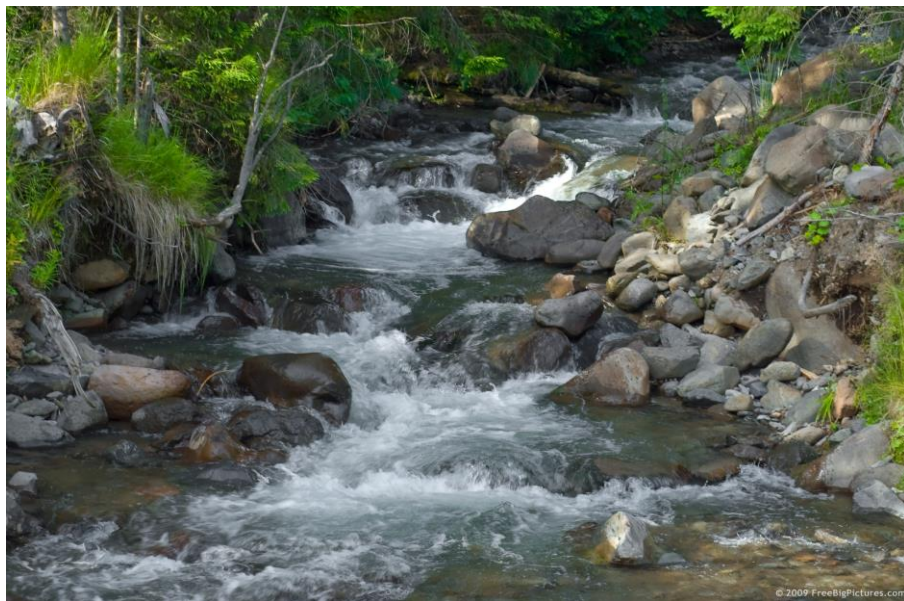




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

**«Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του
ποταμού Μύρτου»**



ΠΑΠΑΔΟΓΙΩΡΓΑΚΗ Ε. ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικολαΐδης Νικόλαος (επιβλέπων)

Καρατζάς Γεώργιος

Τσάνης Ιωάννης

Χανιά, 2016

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Πρωτίστως, ευχαριστώ εγκάρδια τον Καθηγητή του Τμήματος της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της διπλωματικής διατριβής κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τη συνεχή υποστήριξη που έδειξε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Παρά το γεμάτο πρόγραμμά του έδωσε ιδιαίτερη προσοχή και ήταν διαθέσιμος οπότε κι αν τον χρειάστηκα. Οι γνώσεις και η εμπειρία που απέκτησα χάρη στη βοήθεια του θα φανούν πολύ χρήσιμες για τη μετέπειτα πορεία μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τη διδακτορική φοιτήτρια Σοφία Νερατζάκη του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη συνεχή καθοδήγηση της και την υπομονή που είχε σε όλο το διάστημα εκπόνησης και συγγραφής της εργασίας. Οι γνώσεις της πάνω σε όλα τα θέματα διαχείρισης υδάτων, αλλά και λογισμικού (προγραμμάτων) ήταν πολύτιμες. Η συνεργασία και η επικοινωνία μας ήταν άψογη, στεκόταν πάντα στο πλευρό μου και έδινε με όλους τους δυνατούς τρόπους ενθάρρυνση και κουράγιο σε αυτήν την προσπάθεια.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Διονύσιο Ευσταθίου για την υποστήριξή του σε θέματα λογισμικού.

Ευχαριστώ τους Καθηγητές κ. Καρατζά Γεώργιο και κ. Ιωάννη Τσάνη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και για τις γνώσεις υπογείων και επιφανειακών υδάτων που μου μετέδωσαν στα μαθήματά τους στο προπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών..

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Ειρήνη και Ευτύχη, που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν ηθικά και υλικά, στη γιαγιά μου Μαργαρίτα, στους φίλους μου από το Πολυτεχνείο για τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε στα φοιτητικά μας χρόνια και στον Αργύρη Παπαϊωάννου για τη στήριξη που προσέφερε στους προβληματισμούς μου στα τελευταία βήματα του κύκλου σπουδών.

***«Γιατί να λέμε βίαια τα νερά ενός ποταμού και όχι τις όχθες που τα
περιορίζουν;..»***

Μπ. Μπρεχτ

Περιεχόμενα

Περίληψη	8
Abstract	9
1. Εισαγωγή	10
1.1. Γενικά.....	10
1.2. Σκοπός παρούσας διπλωματικής εργασίας – Ανάλυση προβλήματος.....	16
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	16
2.1 Περιβαλλοντικά Μοντέλα	17
2.2. Υδρολογικά Μοντέλα	18
2.2.1 Γενική ταξινόμηση μοντέλων	21
2.2.2 Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου	23
2.2.3. Αξιολόγηση της καταλληλότητας των μοντέλων	25
2.3. Περιγραφή μοντέλου SWAT.....	27
2.3.1 Δεδομένα εισόδου μοντέλου SWAT	29
2.3.2. Προσομοίωση Υδρολογικού Κύκλου SWAT - Ισοζύγιο	29
3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης	34
3.1. Γεωγραφική τοποθέτηση	34
3.2. Γεωμορφολογία.....	35
3.3. Γεωλογία.....	37
3.4. Υδρογεωλογία	41
3.4.1. Περιοχή προσχωματικής λεκάνης Μύρτου.....	44
3.5. Κλιματικά και μετεωρολογικά στοιχεία ευρύτερης περιοχής	46
3.6. Χρήσεις γης.....	48
4. Δεδομένα εισαγωγής	50
4.1. Παροχή	50
4.2. Κλιματικά και μετεωρολογικά στοιχεία	51
4.2.1. Βροχοπτώσεις.....	52
4.2.2. Θερμοκρασία.....	57
4.3. Δεδομένα υδραυλικών απολήψεων	59
4.4. Λοιπά δεδομένα εισαγωγής και χάρτες.....	60
5. Αποτελέσματα	61
5.1. Βαθμονόμηση μοντέλου	61
5.2. Αποτελέσματα βαθμονόμησης	62
5.2.1 Ποσοτικοί Δείκτες.....	64
5.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων παροχής	67
5.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής.....	70

5.5. Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου	76
5.6. Ανάλυση ευαισθησίας.....	80
6. Συμπεράσματα	85
7. Βιβλιογραφία.....	87
7.1. Διεθνής βιβλιογραφία.....	87
7.2. Ελληνική βιβλιογραφία	90
7.3. Διπλωματικές εργασίες	91
8. Παράρτημα	93

Λίστα εικόνων, πινάκων και διαγραμμάτων

<i>i. Εικόνα 2.3.2.1. Υδρολογικός κύκλος SWAT.....</i>	<i>33</i>
<i>ii. Εικόνα 3.1.1: Χάρτης Κρήτης</i>	<i>34</i>
<i>iii. Εικόνα 3.2.1: Η θέση της λεκάνης απορροής Μύρτου στο νομό Λασιθίου.....</i>	<i>36</i>
<i>iv. Εικόνα 3.2.2: Χάρτης κλίσεων γης της λεκάνης απορροής Μύρτου</i>	<i>37</i>
<i>v. Εικόνα 3.3.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί υπεδάφους</i>	<i>40</i>
<i>vi. Εικόνα 3.4.1: Στρωματογραφία περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού Μύρτου</i>	<i>46</i>
<i>vii. Εικόνα 3.6.1: Χάρτης χρήσεων γης</i>	<i>49</i>
<i>viii. Διάγραμμα 4.1.1: Ημερήσια δεδομένα παροχής υδρολογικών ετών 1970-1985</i>	<i>50</i>
<i>ix. Εικόνα 4.2.1: Τοποθεσία βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης απορροής Μύρτου</i>	<i>51</i>
<i>x. Εικόνα 4.2.2: Τοποθεσία μετεωρολογικών σταθμών λεκάνης απορροής Μύρτου</i>	<i>52</i>
<i>xi. Διάγραμμα 4.2.3: Διπλή αθροιστική καμπύλη βροχομετρικών δεδομένων περιόδου 1970-1985</i>	<i>53</i>
<i>xii. Διάγραμμα 4.2.4: Αθροιστικά δεδομένα βροχοπτώσεων και για τους δύο σταθμούς. Έτη 1970-1985.....</i>	<i>54</i>
<i>xiii. Διάγραμμα 4.2.5: Διπλή αθροιστική καμπύλη βροχομετρικών σταθμών κατόπιν διόρθωσης</i>	<i>55</i>
<i>xiv. Διάγραμμα 4.2.6: Αθροιστικά δεδομένα βροχοπτώσεων και για τους δύο σταθμούς κατόπιν διόρθωσης. Έτη 1970-1985.</i>	<i>55</i>
<i>xv. Διάγραμμα 4.2.7: Μέση μηνιαία βροχόπτωση λεκάνης απορροής Μύρτου. Έτη 1961-2010.</i>	<i>56</i>

χνι. Διάγραμμα 4.2.8: Αθροιστική ετήσια βροχόπτωση. Περίοδος 1961-2010.	57
χνii. Διάγραμμα 4.2.9: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για τα έτη 1961-2009.....	58
χνiii. Πίνακας 4.2.1: Μέση θερμοκρασία και υψόμετρο μετεωρολογικών σταθμών	59
χιχ. Διάγραμμα 4.2.9: Θερμοβαθμίδα της λεκάνης απορροής.....	59
χx. Πίνακας 5.2.1: Σημαντικές παράμετροι για τη λειτουργία - απόδοση του μοντέλου και το τυπικό εύρος στη λεκάνη απορροής και το μοντέλο	64
χxi. Πίνακας 5.2.2: Κριτήρια αξιολόγησης της προσομοίωσης βάσει στατιστικών δεικτών (ΠΗΓΗ: Moriasi & Arnold 2007).....	67
χxii. Διάγραμμα 5.3.1: Σύγκριση τιμών παροχής μοντέλου και πεδίου κατά τα υδρολογικά έτη 1977-1981.....	68
χxiii. Διάγραμμα 5.3.3: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή μοντέλου και πεδίου. Υδρολογικά έτη 1977-1981.....	69
χxiv. Διάγραμμα 5.3.2: Συντελεστής προσδιορισμού για προσομοιωμένη και πραγματική παροχή.....	70
χxv. Διάγραμμα 5.4.1: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-2009.....	71
χxvi. Διάγραμμα 5.4.2: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-1975.	72
χxvii. Διάγραμμα 5.4.3: Υπολογισμός προσομοιωμένης παροχής με ημερήσιο βήμα. Έτη 1969-2009.	73
χxviii. Διάγραμμα 5.4.4: Αθροιστική ετήσια παροχή και βροχόπτωση. Έτη 1969-2009.	74
χxix. Διάγραμμα 5.4.5: Εξατμισοδιαπνοή και προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-2009.	75
χxx. Διάγραμμα 6.4.6: Συγκεντρωτικό γράφημα υδρολογικών εισροών και εκροών. Υδατικό ισοζύγιο για τα έτη 1976-2009.	76
χxxi. Εικόνα 5.5.1: Ισοζύγιο λεκάνης απορροής ποταμού Μύρτου	78
χxxii. Πίνακας 5.5.1: Συγκεντρωτικές τιμές παραμέτρων ισοζυγίου	79
χxxiii. Πίνακας 5.6.1: Sensitivity Coefficient για Σεπτέμβριο έτους 1981	83
χxxiv. Πίνακας 8.1: Sensitivity Coefficient παραμέτρου SOL_K για όλους τους μήνες του έτους 1981	93
χxxv. Πίνακας 8.2: Sensitivity Coefficient παραμέτρου SOL_AWC για όλους τους μήνες του έτους 1981.....	94
χxxvi. Πίνακας 8.3: Sensitivity Coefficient παραμέτρου ESCO για όλους τους μήνες του έτους 1981	94
χxxvii. Πίνακας 8.4: Sensitivity Coefficient παραμέτρου EPCO για όλους τους μήνες του έτους 1981	95

xxxviii. Πίνακας 8.5: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QWGMIN για όλους τους μήνες του έτους 1981.....	96
xxxix . Πίνακας 8.6: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QW_REVAP για όλους τους μήνες του έτους 1981.....	96
xl. Πίνακας 8.7: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QW_DELAY για όλους τους μήνες του έτους 1981	97
xli. Πίνακας 8.8: Sensitivity Coefficient παραμέτρου ALPHA_BF για όλους τους μήνες του έτους 1981	98

Περίληψη

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου βρίσκεται στο νότιο – δυτικό τμήμα του Νομού Λασιθίου, στη νήσο Κρήτη. Εκτείνεται από τη νότια πλευρά του όρους Δίκτυ έως το Λιβυκό πέλαγος κι έχει επιφάνεια 96 km². Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης περιοχής είναι ότι στις όχθες του ποταμού Μύρτου συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός από θερμοκήπια. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι οι κύριες δραστηριότητες της περιοχής είναι κτηνοτροφικές και γεωργικές και συνεπώς η σημασία των υδατικών ποσοτήτων είναι υψηλή, οδήγησε στην ανάγκη περεταίρω διερεύνησης του υδρολογικού ισοζυγίου του εν λόγω ποταμού.

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του ημι-κατανεμημένου μοντέλου λεκάνης απορροής, Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012), σε συνδυασμό με περιβάλλον ΓΣΠ (GIS), προκειμένου να μοντελοποιηθεί η υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής. Αρχικά, η περιοχή διαιρέθηκε σε 17 υπολεκάνες και 125 υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs) με αυτοματοποιημένη διαδικασία και χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια και συνεχή μετεωρολογικά δεδομένα από πέντε μετεωρολογικούς και βροχομετρικούς σταθμούς, καθώς επίσης και δεδομένα γεωλογίας και χρήσεων γης.

Ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου για τα υδρολογικά έτη 1976-1981 και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με χρήση διαφόρων στατιστικών δεικτών, όπως οι RMSE, NSE, RSR και PBIAS και η προσομοίωση που έγινε ήταν σχετικά ικανοποιητική. Τέλος, δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν τα συνολικά υδρολογικά ισοζύγια για σαράντα έτη (1969-2009).

Abstract

The study area of this Diploma Thesis is Myrtos river basin, located in Crete, in the prefecture of Lasithi and covers an area of 96 Km². The semi-distributed river basin model Soil and Water Assessment Tool (SWAT 2012) was applied, coupled with a GIS interface (ArcSWAT), in order to assess the hydrological budget of the watershed. The 96 Km² basin was discretized into 17 sub-basins using an automated delineation routine. The multiple hydrologic response unit (HRU) approach was used and the basin was discretized into 125 HRUs.

The model was calibrated using continuous meteorological data, from the hydrologic year 1977 to 1981, obtained from two precipitation stations and three temperature stations as well as runoff measured at two monitoring sites located within the main tributaries of the watershed for the time period between September 1970 and August 1985. Before inserted into the program, precipitation data were processed and corrected by using the Double Mass Curve technique. There is also information about the study area with respect of geology, land use, slopes and elevation bands which is used to calibrate the model.

Calibration results were satisfactory when comparing simulated and measured flow data. The final Model performance was evaluated using several statistical indices, such as the RMSE, NSE, RSR and PBIAS. The main results showed that there is less than 5% difference in the closure between model-simulated and observed flows.

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Το νερό συγκαταλέγεται στους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη και ταυτόχρονα αποτελεί ουσιώδη προϋπόθεση για τη διατήρηση της ζωής (Bobba et al., 2000). Είτε σε υγρή, είτε σε στερεή μορφή καλύπτει το 75% της επιφάνειας της γης. Πρακτικά, υπάρχει παντού, από το εσωτερικό του βραχώδους φλοιού της γης, μέχρι και το εσωτερικό των κυττάρων του ανθρώπινου σώματος (Nasa.gov). Η γη ξεχωρίζει ανάμεσα στους υπόλοιπους πλανήτες του ηλιακού συστήματος, λόγω των τεράστιων αποθεμάτων νερού που διαθέτει, στους ωκεανούς, στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος (Peter H. Gleick et al., 1999).

Παρά την ύπαρξη των τεράστιων ποσοτήτων ύδατος, η διαθεσιμότητα του είναι πεπερασμένη και η κατανομή του στο χώρο και στον χρόνο είναι άνιση. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σήμερα στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως, είναι η υποβάθμιση των υδατικών πόρων, αλλά και η έλλειψη των υδατικών αποθεμάτων (Γιαννιού et al, 2012). Αποτέλεσμα της ανισοκατανομής των υδατικών πόρων είναι κάποιες περιοχές του πλανήτη, να καθίστανται ευνοημένες, εις βάρος άλλων που αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διαθεσιμότητα, τη χρήση και τη διαχείριση των υδάτων, που τελικά καταλήγουν να απειλούν τη βιωσιμότητα της ανάπτυξής τους. Γενικά, οι περισσότερες αναπτυγμένες χώρες βρίσκονται σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου το κλίμα είναι ήπιο και οι βροχοπτώσεις επαρκείς. Φυσικά, υπάρχουν και εξαιρέσεις, όχι μόνο εντός μεγάλων χωρών (όπως Καναδάς, ΗΠΑ και Ρωσία), όπου η κατανομή νερού αλλάζει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή, αλλά αυτό μπορεί να συμβεί και

σε μικρές χώρες. Τα προβλήματα που προκύπτουν συνδέονται άμεσα με τον τρόπο χρήσης των υδάτων και σχετίζονται, τόσο με την ποιότητα (πχ. Καναδάς, ΗΠΑ), όσο και με την ποσότητα (πχ. Κίνα ή Ινδία) του νερού (Bobba et al., 2000).

Πολλές περιοχές της Ευρώπης πλήττονται με προβλήματα που συνδέονται με τη διαθεσιμότητά του. Πρόκειται, είτε για προσωρινή μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, λόγω μειωμένων βροχοπτώσεων (ξηρασία), είτε για μια κατάσταση, κατά την οποία η ζήτηση νερού υπερβαίνει τους εκμεταλλεύσιμους υδάτινους πόρους (λειψυδρία) (Κουτούπα-Ρεγκάκου et al, 2008). Είναι γεγονός, ότι τα αποθέματα σε πόσιμο νερό ανέρχονται σε 2,6% μόνο των συνολικών υδατικών αποθεμάτων της γης (Αραμπατζή, ΠερΔικ 2001). Από το 1950, ως σήμερα ο ΟΗΕ εκτιμά ότι, ενώ ο πληθυσμός της γης έχει διπλασιαστεί, η αντίστοιχη αύξηση της κατανάλωσης νερού έχει εξαπλασιαστεί. Αυτό σημαίνει, ότι κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα, η αύξηση της κατανάλωσης νερού «έτρεξε» τρεις φορές πιο γρήγορα σε σχέση με την αύξηση του πληθυσμού (Ι. Μυλόπουλος et al., 2008).

Οι σύγχρονες κοινωνίες χρησιμοποιούν το νερό για μεταφορές αγαθών, ρυπαντικών φορτίων και θερμότητας, για τη δημιουργία πρώτης ύλης, ενέργειας και προϊόντων ή ακόμα και για άλλες δραστηριότητες (πχ ψυχαγωγίας). Οι απαιτήσεις για χρήση των υδατικών πόρων από τον άνθρωπο είναι τεράστιες. Η παροχή νερού σε νοικοκυριά, δημόσιους οργανισμούς (νοσοκομεία, σχολεία, στρατός) και μικρές επιχειρήσεις με πόσιμο νερό και νερό κατανάλωσης, η εμφιάλωση υδάτων ανώτερης ποιότητας, η εντατική άρδευση συγκεκριμένων περιοχών, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητά τους και η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, είναι μερικές μόνο από τις εντατικές χρήσεις των υπαρχόντων υδατικών πόρων, που μπορούν να αποφέρουν οικονομικά αποτελέσματα (Κ. Σακελλαροπούλου, Ν. Σεκέρογλου et al., 2006).

Η αγροτική ανάπτυξη, με τις υδροβόρες καλλιέργειες και τις σπάταλες αρδευτικές πρακτικές, καταναλώνει σήμερα το μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αποθεμάτων. Ο αγροτικός τομέας είναι υπεύθυνος για το 70% της ετήσιας κατανάλωσης νερού παγκοσμίως. Το ποσοστό αυτό φθάνει το 85% για τη χώρα μας, που θεωρείται πρωταγωνιστής στη μη αποδοτική αγροτική ανάπτυξη (Ι. Μυλόπουλος et al., 2005). Στην Ελλάδα, όπως και σε άλλες χώρες, η ζήτηση νερού είναι η μέγιστη το καλοκαίρι, όταν δηλαδή η προσφορά του στη φύση είναι η

ελάχιστη, με αποτέλεσμα η χρονική κατανομή της προσφοράς και της ζήτησης να είναι αντιστρόφως ανάλογες (Ε. Τροβά et al., 2005). Τα αρνητικά ισοζύγια προσφοράς και ζήτησης του νερού, που διαπιστώνονται σήμερα στις περισσότερες υδρολογικές λεκάνες, με τη ζήτηση να υπερβαίνει την ανανεωτική ικανότητα της φύσης σε νερό, είναι η κύρια αιτία για τις πηγές που στερεούνται, για τα ποτάμια, που η παροχή τους μειώνεται, για τις λίμνες και τους υγροτόπους, που σταδιακά εξαφανίζονται και για τα υπόγεια νερά, που υποβαθμίζονται ποσοτικά και ποιοτικά.

Η βιομηχανία, από την άλλη μεριά, η οποία συμμετέχει με ένα ποσοστό της τάξεως του 20% στην παγκόσμια κατανάλωση νερού σε ετήσια βάση, ευθύνεται επιπλέον και για την ποιοτική υποβάθμιση, που προκαλεί η διάθεση των αποβλήτων της στους φυσικούς αποδέκτες (Ι. Μυλόπουλος et al., 2008). Τα επιφανειακά ύδατα μπορούν να επιβαρυνθούν από την άμεση εισροή ουσιών, όπως αποβλήτων και διάσπαρτων ρύπων. Παράλληλα, σημαντικό πρόβλημα αποτελεί επίσης και η μεγάλη συγκέντρωση των διαφόρων ουσιών στο νερό, όπως για παράδειγμα φώσφορος, νιτρικό οξύ ή αμμωνία, ενώ η εισροή βαρέων μετάλλων (πχ χαλκός, ψευδάργυρος) προσδίδει μια επιπλέον χημική επιβάρυνση (S.-R. Laskowski/C.Ziem et al., 2007).

Τα υπόγεια ύδατα δεν ρέουν κατά κανόνα με χαμηλές ταχύτητες, οπότε απαιτείται πολύς χρόνος για τη μεταφορά ρύπων από τις πηγές. Αυτό σημαίνει ότι ρύπανση που εμφανίστηκε δεκαετίες πριν- και αυτό ανεξαρτήτως προέλευσης, γεωργικής, βιομηχανικής ή ανθρωπογενούς- μπορεί να εξακολουθεί να είναι επικίνδυνη για την ποιότητα των υπογείων υδάτων. Η παρατήρηση και μέτρηση των διεργασιών αυτών δεν είναι εύκολη υπόθεση, ενώ συχνά δεν υπάρχουν ενδείξεις κινδύνων ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Η ρύπανση από οικιακές, γεωργικές και βιομηχανικές πηγές αυξάνεται, είτε άμεσα λόγω απορρίψεων των λυμάτων, είτε έμμεσα με τη χρήση λιπασμάτων ή εξαιτίας των στραγγισμάτων από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης, που εντοπιζόταν μέχρι σήμερα, προερχόταν από σημειακές πηγές ρύπανσης, υπάρχουν ενδείξεις, ότι οι διάχυτες πηγές επηρεάζουν ολοένα και περισσότερο τα υπόγεια ύδατα (COM et al., 2005).

Από όλα τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης, που αποβλέπουν στη βέλτιστη

διάθεση των υδατικών πόρων. Ως 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 εξασφαλίζοντας παράλληλα, τη διατήρηση των πόρων και του περιβάλλοντος. Επομένως, η ΔΥΠ ετοιμάζει σχέδια σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο, που εξασφαλίζουν τη 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 το συντονισμό της κατασκευής των υδραυλικών έργων.

Σε πολλές περιπτώσεις και περιοχές του κόσμου γίνεται διαχείριση υδατικών πόρων ή γίνεται υποτυπώδης διαχείριση. Συνήθως, δεν εφαρμόζεται η ΔΥΠ, όπου υπάρχει χαμηλός κίνδυνος στην έλλειψη νερού και στην ρύπανση των υδατικών πόρων. Αντίθετα, όσο η πίεση για απαιτήσεις μεγαλώνει και η χρήση του νερού δημιουργεί περιβαλλοντικά και άλλα προβλήματα, τόσο η ΔΥΠ αποκτά περιεχόμενο και συγκεντρώνει την προσοχή του κοινού. Επιγραμματικά οι βασικοί κανόνες της διαχείρισης είναι:

- Ισομερής (ισόνομη) κατανομή μεταξύ των χρηστών, με βάση αντικειμενικά κριτήρια.
- Οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης νερού τώρα και στο μέλλον.
- Αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών (όπως καταστροφή πόρων και περιβάλλοντος).
- Βιωσιμότητα της ανάπτυξης (long-term sustainability of development).

Η ανάγκη για την ανεύρεση “βέλτιστων” λύσεων είναι πραγματικά επιτακτική. Οι προοπτικές ανάπτυξης, των διαφόρων χωρών του κόσμου, οριοθετούνται από την έλλειψη νερού επαρκούς ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας, μια έλλειψη, η οποία μόνο σε λίγες περιπτώσεις μπορεί να αντιμετωπισθεί, με ανεύρεση νέων διαθέσιμων υδατικών πόρων. Προκύπτει, συνεπώς, η ανάγκη να εφευρεθούν τρόποι για την καλύτερη χρήση του διαθέσιμου νερού, καθώς και για τη χρήση καλύτερων μεθόδων διατήρησης, διανομής και καθαρισμού του νερού (Γ. Τσακίρης et al., 1995).

Η σοβαρότητα των προβλημάτων αυτών έχει σήμερα αναγνωρισθεί από πολλούς διεθνείς και εθνικούς οργανισμούς, οι οποίοι καταβάλουν προσπάθεια για

την κατάρτιση προγραμμάτων διαχείρισης υδατικών πόρων σε εθνικό επίπεδο ή σε επίπεδο υδατικών διαμερισμάτων. Στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής καταρτίσθηκε η Ευρωπαϊκή Οδηγία των Νερών, που αποφασίστηκε το 2000 και υλοποιείται με αντίστοιχα προγράμματα στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και σε πολλές άλλες χώρες (Γ. Τσακίρης et al., 1995). Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ, αποκαλούμενη οδηγία-πλαίσιο για τα νερά τέθηκε τελικά σε ισχύ, το τέλος του 2007 και βασίστηκε στην υιοθέτηση μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης στο θέμα της διαχείρισης και προστασίας των υδάτινων πόρων και οικοσυστημάτων. Η προσέγγιση αυτή διέπεται από τις αρχές της διατηρησιμότητας και της αειφορίας, με στόχο τη μακροπρόθεσμη προστασία των διαθέσιμων υδατικών πόρων, καθιερώνοντας κατά συνέπεια, την αρχή της αειφορίας, ως βασική αρχή, που θα πρέπει να διέπει τη διαχείριση και την προστασία των υδάτινων πόρων (Κουτούπα-Ρεγκάκου et al, 2008).

Βασικοί στόχοι της οδηγίας είναι η διατήρηση και βελτίωση των υδάτινων οικοσυστημάτων αλλά και η αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης. Αυτό επιτυγχάνεται, με την εξάλειψη των επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας και τη μείωση των υπολοίπων επικίνδυνων ουσιών, την επίτευξη συγκεντρώσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι οποίες για τις φυσικώς απαντώμενες ουσίες θα πρέπει να πλησιάζουν το φυσικό επίπεδο. Γενικά, σκοπός είναι η καλή κατάσταση των υπογείων υδάτων, η αναστροφή κάθε σημαντικής συγκέντρωσης ρύπων, ο έλεγχος άντλησης των υπογείων υδάτων και η κατακράτηση, εάν αυτό απαιτείται για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας των υδάτινων οικοσυστημάτων, ενώ τέλος, η μείωση των δυσμενών συνεπειών από πλημμύρες και ξηρασίες (Β.Καραγεώργου et al., 2010).

Βασικές αρχές της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ είναι:

- Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός των υδατικών πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής ποταμού, που περιλαμβάνει τα επιφανειακά, τα υπόγεια, τα μεταβατικά και τα παράκτια νερά
- Η αρχή της ευθύνης του ρυπαίνοντος γνωστή ως «ο ρυπαίνων πληρώνει», που σημαίνει, ότι το κόστος προστασίας του περιβάλλοντος βαρύνει το χρήστη

- Η αρχή της «αναλογικότητας», με βάση την οποία η άδεια λειτουργίας μιας νέας εγκατάστασης δίνεται εφόσον μειώνονται αναλογικά οι εκπομπές ρύπων από τις ήδη λειτουργούσες μονάδες
- Η αρχή της «πρόληψης», κατά την οποία ενδεχόμενη επιστημονική αβεβαιότητα λειτουργεί προς το μέρος της προστασίας του περιβάλλοντος (Γ. Τσακίρης et al., 1995)

Το πλέον βασικό εργαλείο της οδηγίας-πλαίσιο είναι τα σχέδια διαχείρισης, για τα οποία οι σχετικές ρυθμίσεις εμπεριέχονται στο άρθρο 13 της οδηγίας. Στο άρθρο αυτό προβλέπεται ειδικότερα, ότι τα κράτη-μέλη θα πρέπει να συντάσσουν ένα σχέδιο διαχείρισης για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού. Σύμφωνα με αυτό, θα πρέπει καταρχήν, να περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού, κυρίως μέσω της χαρτογράφησης της τοποθεσίας και των ορίων των υδατικών συστημάτων. Περαιτέρω, τα σχέδια διαχείρισης πρέπει να περιέχουν μία συνοπτική καταγραφή και ανάλυση των σημαντικών ανθρωπογενών επιδράσεων (από σημειακές ή διάχυτες πηγές), καθώς επίσης και μία χαρτογράφηση των προστατευόμενων περιοχών αλλά και μία καταγραφή των δικτύων παρακολούθησης. Τέλος, τα βασικά στοιχεία του περιεχομένου των προγραμμάτων διαχείρισης αποτελούν, τόσο η καταγραφή των ποιοτικών στόχων, όσο και μία περίληψη των στρατηγικών που περιέχονται στα προγράμματα μέτρων για την επίτευξη των ποιοτικών περιβαλλοντικών στόχων (Κουτούπα-Ρεγκάκου et al, 2008).

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, καθώς και η ανάγκη εφαρμογής σχεδίων διαχείρισης οδήγησε στην εισαγωγή των υδρολογικών μοντέλων, μαθηματικών δηλαδή προσομοιώσεων, των υδραυλικών και γεωχημικών στοιχείων για τον εντοπισμό των φορτίων ρύπανσης, για ανάλυση επικινδυνότητας και ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα μοντέλα μπορούν να περιγράψουν τη χημική κατάσταση των λεκανών απορροής, λαμβάνοντας υπόψη στις σημειακές και διάχυτες ρυπαντικές πιέσεις που υπάρχουν στην περιοχή. Τέλος, έχουν τη δυνατότητα να «τρέξουν» σενάρια για τη μελλοντική κατάσταση στις λεκάνες απορροής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται δυνατή η θέσπιση περιβαλλοντικών μέτρων και στόχων. Το μοντέλο SWAT θεωρείται, ότι ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις απαιτήσεις, που επιβάλλει η Οδηγία για τα νερά (Dilks et al., 2003; Dilks et al., 2005).

1.2. Σκοπός παρούσας διπλωματικής εργασίας – Ανάλυση προβλήματος

Η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, η επέκταση της γεωργίας και η απόρριψη μιας αυξανόμενης ποσότητας ακατέργαστων λυμάτων σε ποτάμια και λίμνες είναι ανάμεσα στις κύριες αιτίες για την αύξηση της ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Ειδικότερα, η νήσος Κρήτη, που εντοπίζεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, θεωρείται ότι διατρέχει σημαντικότερο κίνδυνο τόσο λόγω των κλιματικών διαφοροποιήσεων όσο και των γεωργικών πρακτικών διαχείρισης. Συνεπώς, κρίνεται σημαντική η ανάγκη κατανόησης των πρακτικών χρήσης γης στους υδατικούς πόρους του νησιού, ιδιαίτερα σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από φαινόμενα λειψυδρίας, όπως αυτή της νοτιοανατολικής Κρήτης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι η προσομοίωση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Μύρτου προκειμένου να επιτευχθεί η κατανόηση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής και να δημιουργηθεί κατ' επέκταση ένα αξιόπιστο διαχειριστικό εργαλείο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την λεπτομερή καταγραφή των γεωλογικών, κλιματικών και υδρολογικών δεδομένων της περιοχής για να δημιουργηθεί στη συνέχεια η βαθμονομημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Περιβαλλοντικά Μοντέλα

Οι περιβαλλοντικοί ρύποι που μεταφέρονται από τον αέρα, το νερό και το έδαφος υφίστανται φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς μετασχηματισμούς. Οι ζωντανοί οργανισμοί εκτίθενται στη ρύπανση με ποικίλους τρόπους και οι επιπτώσεις, που προκαλούνται, εξαρτώνται από το μέγεθος, τη διάρκεια και τη χωρική κατανομή της ρύπανσης. Για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών του φυσικού περιβάλλοντος, καθώς και τις επιπτώσεις που δημιουργούνται από την ανθρώπινη παρέμβαση σε αυτές, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά εργαλεία περιγραφής και πρόβλεψης, γνωστά ως μαθηματικά μοντέλα. Τα μαθηματικά μοντέλα παρέχουν το υπόβαθρο για την κατανόηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που γίνονται στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα εκτιμώντας τις επιπτώσεις από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, είναι σε θέση να προβλέψουν και να αναπαραστήσουν πιθανές αλλαγές, που μπορούν να επέλθουν, κάνοντας διάφορα σενάρια, χωρίς να επηρεάζεται και να διαταράσσεται το φυσικό οικοσύστημα (A.Ramaswami, J.Milford, M.Small et al., 2005).

Τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία προηγουμένως (τις περασμένες δεκαετίες) χρησιμοποιούνταν για την αντιμετώπιση προβλημάτων ποιότητας των υδάτων, εφαρμόζονται πρωτίστως σήμερα, για να προσομοιώσουν όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους (Van Grinsven et al., 1995). Αυτά τα προβλήματα αφορούν την τύχη, τη μεταφορά και τη σταθερότητα των χημικών ενώσεων στο περιβάλλον. Υπάρχουν κλασικά μοντέλα, που αναφέρονται στους συμβατικούς ρύπους, στον ευτροφισμό, στους τοξικούς οργανικούς ρύπους και στα μέταλλα για τα επιφανειακά και υπόγεια νερά. Δεύτερος στόχος των μαθηματικών μοντέλων είναι ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων έκθεσης σε χημικές ουσίες και έχει στενή σχέση με την εκτίμηση των επιπτώσεων των χημικών ρύπων. Νέα κριτήρια ποιότητας νερού εφαρμόζονται για τον καθορισμό των επιπέδων για άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις στην υγεία, σε σχέση με τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης. Τα κριτήρια αυτά συντείνουν στον καθορισμό σταθερών ποιότητας νερού, τα οποία επιβάλλονται από την Νομοθεσία και απαιτούν την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για τον εντοπισμό φορτίων

ρύπανσης, για ανάλυση επικινδυνότητας και ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τέλος, στόχος των μαθηματικών μοντέλων είναι επίσης, η πρόβλεψη μελλοντικών συγκεντρώσεων χημικών ουσιών, σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης ή εναλλακτικές δράσεις διαχείρισης. Σε αυτήν την κατηγορία εμπίπτουν οι κατανομές των φορτίων αποβλήτων και τα μοντέλα έκθεσης για την εκτίμηση επικινδυνότητας (J.Schnoor et al., 1996).

2.2. Υδρολογικά Μοντέλα

Η μοντελοποίηση των υδατικών συστημάτων ασχολείται με τη ροή του νερού και των συστατικών του επάνω αλλά και κάτω από την επιφάνεια της γης. Εξαρτάται από την προσομοίωση του εδάφους και του υπεδάφους, όπου ρέει το νερό. Τα τρία βασικά θέματα, με τα οποία ασχολείται η υδρολογική μοντελοποίηση είναι ο έλεγχος και περιορισμός της ρύπανσης επιφανειακών και υπογείων υδάτων, η χρήση νερού για ύδρευση από τους δήμους, τη γεωργία και τη βιομηχανία, καθώς και ο έλεγχος και μετριασμός ακραίων φαινομένων (όπως ξηρασία ή πλημμύρες).

Σημαντικό κομμάτι για την υδρολογική μοντελοποίηση είναι η εκτίμηση των βροχοπτώσεων, τι ποσοστό κατακρημνισμάτων απορροφάται, διηθείται στο έδαφος, απορρέει, είτε εξατμίζεται. Σημαντικά, επίσης, είναι θέματα μεταφοράς και εναπόθεσης στερεών σωματιδίων. Αυτά περιλαμβάνουν αιωρούμενα, διαλυμένα, είτε καθιζάνοντα στερεά, όπως για παράδειγμα λύπη και έλαια, ιζήματα, τοξικές και χημικές ουσίες (πχ φυτοφάρμακα), οργανικά και θρεπτικά συστατικά. Ο σκοπός των υδρολογικών μοντέλων είναι να προβλέψουν πόσο μακριά και πόσο γρήγορα μπορούν να καταλήξουν ποσότητες ρύπων στα νερά, και όταν αυτό συμβεί τί ποσότητα ρύπου θα απελευθερωθεί στο περιβάλλον (M.Goodchild, B.Parks, L.Steyaert et al. 1993).

Έχουν αναπτυχθεί ποικίλα μοντέλα για την προσομοίωση, τόσο της επιφανειακής όσο και της υπόγειας υδρολογίας, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- ✓ ETD (Enhanced Trickle – Down Model), μπορεί να περιγράψει επαρκώς όλους τους τύπους υδρολογικών συστημάτων σε συστήματα απορροής και αποστράγγισης (Schnoor et al., 1984; Nikolaidis et al., 1988)
- ✓ SWAT (Soil and Water Assessment Tool), μοντέλο κατάλληλο για την προσομοίωση δασικών και αγροτικών λεκανών απορροής (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2002; Gassman et al., 2007; Oeurng et al., 2011)
- ✓ HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran), μοντέλο, που επιπλέον μπορεί να προσομοιώσει και αστικές περιοχές (Johanson et al., 1980; Bicknell et al., 2001)
- ✓ SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), δημιουργήθηκε για την εκτίμηση των επιπτώσεων των διαχειριστικών αποφάσεων σε αγροτικές λεκάνες απορροής (J.Arnold and J.William et al., 2003) κλπ.
- ✓ SWMM (Storm Water Management Model), προτείνεται και χρησιμοποιείται από την EPA των ΗΠΑ για την προσομοίωση της ποσότητας και ποιότητας των επιφανειακών νερών για κυρίως αστικές λεκάνες απορροής (Huber and Dickinson et al., 1988)
- ✓ HMS (Hydrologic Modeling System), περιλαμβάνει την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής, τη δημιουργία της απορροής και τη διόδευση της απορροής (Felman A.D. et al. 2000)
- ✓ ANSWERS - Continuous (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – Continuous) (Beasley et al., 1980)
- ✓ MIKE – SHE (European Hydrological System Model), προσδιοριστικό, κατανεμημένο, φυσικής βάσης σύστημα. Το MIKE – SHE μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος προβλημάτων, που σχετίζονται με τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα (Refsgaard, 1997; Demetriou and Punthakey, 1998)
- ✓ AGNPS (AGricultural Non – Point Source Pollution Model) (Young et al., 1987)
- ✓ SWIM (Soil and Water Integrated Model) (Krysanova et al., 1998)
- ✓ MODFLOW (Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground – Water Flow Model) (Harbaugh and McDonald, 1996)

- ✓ MT3D (Modular 3 – D Multi-Species Transport Model) (Zheng, 1990)
- ✓ SURFER (Golden Software Inc., 1989)
- ✓ TMWAM (Turkey – Mersey Watershed Acidification Model) (Lam et al., 1988; Bobba and Lam, 1990)
- ✓ το ILWAS (Integrated Lake – Watershed Acidification Study) (Chen et al., 1984)
- ✓ το RAINS (Regional Air Pollution INformation and Simulation) (Kamari et al, 1985)
- ✓ Tank Model, σχετικά απλό μοντέλο με τέσσερις δεξαμενές, που τοποθετούνται η μία κάτω από την άλλη. Η βροχή μπαίνει στην πρώτη δεξαμενή και από αυτή βγαίνει η εξάτμιση. Ακολουθούν οι άλλες δεξαμενές με εκροές, που σχετίζονται με μέρη της απορροής (M.Sugara et al., 1984)
- ✓ UBC (Watershed Model), σχεδιάσθηκε κυρίως για πρόβλεψη της απορροής από βροχόπτωση και θερμοκρασία σε ορεινές λεκάνες απορροής (Quick M.C. et al., 1978)
- ✓ PRMS (Precipitation – Runoff Modeling System), πρόκειται για πακέτο, το οποίο έχει σχεδιαστεί σε τμήματα (modular-design) καταμετρημένο, φυσικής βάσης (Leavesley G.H. and Stannard L.G. et al., 1996)
- ✓ NWSRFS (National Weather Service River Forecast System), προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες σε μία λεκάνη απορροής. Σχεδιάστηκε από την υπηρεσία National Weather Service των ΗΠΑ, με την υποβοήθηση του Διεθνούς Μετεωρολογικού Οργανισμού WMO, μετά από πολλούς ελέγχους στις λεκάνες απορροής στις ΗΠΑ (R.Burnash et al., 1996)
- ✓ SLURP Model (Simple Lumped Reservoir Parametric), καταμετρημένο μοντέλο, στο οποίο οι παράμετροι του σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κάλυψης. Το μοντέλο έχει σχεδιασθεί για τη χρήση δορυφορικών στοιχείων εδαφικής κάλυψης, χιονοκάλυψης και ισοδύναμο ύψος νερού από χιόνι. Εκτιμά την εξατμισοδιαπνοή, το ύψος χιονιού και την εδαφική υγρασία για κάθε στοιχείο της διακριτοποιημένης επιφάνειας, ενώ παράγει και υδρογραφήματα απορροής απ' όλη τη λεκάνη απορροής (G.Kite et al., 2000)

- ✓ SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), δημιουργήθηκε για την εκτίμηση των επιπτώσεων των διαχειριστικών αποφάσεων σε αγροτικές λεκάνες απορροής (J.Arnold and J.William et al., 2003) κλπ.

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

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

2.2.1 Γενική ταξινόμηση μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα (ή μοντέλα βροχής – απορροής) ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ. Οι πιο γνωστές κατηγορίες των μοντέλων είναι (α) σε μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και συνεχή μοντέλα και (β) σε ενιαία (lumped) και κατανεμημένα μοντέλα. Συγκεκριμένα:

1. α) Το μοντέλο ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος περιλαμβάνει ως είσοδο, ένα μεμονωμένο γεγονός και ως έξοδο ένα υδρογράφημα απορροής.

1. β) Το συνεχές μοντέλο περιλαμβάνει ως είσοδο μια ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μίας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών.
2. α) Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής, στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου (βροχή κλπ) και εξόδου (απορροή)
2. β) Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στη χωρική κατανομή των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν τη διακριτοποίηση της λεκάνης σε τμήματα, με ομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά.

Ταξινόμηση συνεχών μοντέλων

Τα συνεχή μοντέλα βροχής – απορροής μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια:

- 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)
- Το κριτήριο, το οποίο βασίζεται στο αν λαμβάνεται υπόψη η τυχαιότητα των φαινομένων. Με βάση το κριτήριο αυτό, τα μοντέλα ταξινομούνται σε προσδιοριστικά και στοχαστικά.

α) 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, απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου, τα οποία συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Τέτοια μοντέλα εφαρμόζονται, συνήθως, σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου (πχ μοντέλο SHE).

β) Τα προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα προσομοιώνουν τη σχέση βροχής – απορροής, 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” του μοντέλου. Η διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος συνίσταται στην αλλαγή των τιμών των προσομοιωμένων και των παροχών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες (πχ μοντέλο Sacramento).

γ) Τα προσδιοριστικά μοντέλα «μαύρου κουτιού» βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρημένης απορροής. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα.

δ) Τα στοχαστικά μοντέλα «μαύρου κουτιού» είναι μοντέλα, τα οποία υπολογίζουν τη μεταβλητή εισόδου (πχ βροχή), υπό τον όρο να διατηρούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρημένης παροχής (πχ διάμεσος, διασπορά, συσχέτιση, διασταυρούμενη συσχέτιση κλπ) (πχ μοντέλο ARIMA)

ε) Τα στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα, λαμβάνουν υπόψη στα στοχαστικά χαρακτηριστικά της εισόδου και συγχρόνως περιλαμβάνουν εξισώσεις, οι οποίες απεικονίζουν τις βασικές διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή (Τσακίρης et al., 2013).

2.2.2 Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου

Η βαθμονόμηση (calibration) αποτελεί μία στατιστικά αποδεκτή σύγκριση, μεταξύ των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου και των μετρήσεων πεδίου, ώστε να υπάρχει βεβαιότητα για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Η ρύθμιση ή προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου επιτρέπεται μέσα στα όρια των πειραματικώς προσδιορισμένων τιμών, που πάρθηκαν πειραματικά στη βιβλιογραφία. Συνήθως, απαιτεί δύο σύνολα μετρήσεων πεδίου: ένα για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και ένα για την επαλήθευση σε ελαφρώς διαφορετικές συνθήκες (μετρήσεις από διαφορετική χρονιά ή σε άλλο μέρος).

Η βαθμονόμηση του μοντέλου περιλαμβάνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων πεδίου. Οι συντελεστές του μοντέλου και οι σταθερές ρυθμών θα πρέπει αρχικά να επιλεγθούν με βάση τη βιβλιογραφία ή από εργαστηριακές μελέτες. Για τη λειτουργία του μοντέλου είναι επίσης απαραίτητοι οι ρυθμοί των εισροών. Αφού πραγματοποιηθεί το μοντέλο, γίνεται μία στατιστική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις μεταβλητές κατάστασης (συγκεντρώσεις χημικών ουσιών) και των μετρήσεων πεδίου. Εάν τα σφάλματα κυμαίνονται μέσα σε ένα αποδεκτό επίπεδο ανοχής, το μοντέλο θεωρείται ως βαθμονομημένο. Εάν τα σφάλματα δεν είναι αποδεκτά, τότε οι σταθερές ρυθμού και οι συντελεστές θα πρέπει να μεταβληθούν συστηματικά (ρύθμιση του μοντέλου), μέχρι να επιτευχθεί μια αποδεκτή προσομοίωση. Οι παράμετροι δε θα πρέπει να καθοριστούν έξω από τα όρια των πειραματικά προσδιορισμένων τιμών, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτό βαθμονομείται το μοντέλο.

Τα στατιστικά κριτήρια για την αποδοχή της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης ενός μοντέλου θα πρέπει να ορίζονται εξ αρχής, πριν ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις. Το πόσο “καλά” είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου εξαρτάται από την αποδοχή κάποιας βαθμονόμησης ή επαλήθευσης. Για παράδειγμα, ένα κριτήριο για την αποδοχή μιας βαθμονόμησης μοντέλου μπορεί να είναι το εξής: «Η πρόβλεψη της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο ρεύμα θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια του $\pm 0,5 \text{ mg/L}$, τουλάχιστον στο 90% των παρατηρήσεων. Υπάρχουν αρκετοί τύποι στατιστικών κριτηρίων, που μπορούν να δημιουργούν.

- ✓ Στατιστικά κριτήρια “καταλληλότητας της προσαρμογής”, τα οποία χρησιμοποιούν την κατανομή χ^2 ή τα test Kolmogorov – Smirnov (τεστ της κατανομής δειγματοληψίας της διακύμανσης).
- ✓ Ταυτόχρονες δοκιμές t ανά ζεύγη των παρατηρήσεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων από το πεδίο (δοκιμή του μέσου).
- ✓ Γραμμική παρεμβολή δεδομένων ανά ζεύγη για προβλέψεις του μοντέλου και παρατηρήσεις του πεδίου ταυτόχρονα.
- ✓ Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, με τις μετρήσεις πεδίου και την κανονική απόκλιση (ή γεωμετρική απόκλιση, εάν είναι κατάλληλη).

- ✓ Τεχνικές εκτίμησης παραμέτρων, όπως οι γραμμικές παλινδρομήσεις για την προσέγγιση καμπύλης (σταθμισμένες ή μη) ή τα φίλτρα Kalman, για το βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου (πχ ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των υπολειμμάτων).

2.2.3. Αξιολόγηση της καταλληλότητας των μοντέλων

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου είναι απαραίτητη η στατιστική σύγκριση, μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και ενός δευτέρου συνόλου δεδομένων πεδίου. Οι συντελεστές και οι σταθερές ρυθμού, δεν επιτρέπεται να αλλάξουν από τη στιγμή που γίνει η βαθμονόμηση. Η διαδικασία αυτή παρέχει μια βεβαιότητα ότι το μοντέλο αποδίδει σε αποδεκτά επίπεδα. Τα κριτήρια απόδοσης μπορεί να είναι πολύ ελαστικά, όπως “τα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε μία τάξη μεγέθους των συγκεντρώσεων πεδίου σε κάθε χρονική στιγμή”, ή πολύ αυστηρά, “όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολειμμάτων (διαφορά μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και αποτελεσμάτων του μοντέλου) θα πρέπει να είναι μία ελάχιστη προκαθορισμένη ή βέλτιστη τιμή” (J.Schnoor et al., 2003).

Τα κυριότερα στατιστικά κριτήρια είναι:

A) Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean absolute error, MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n}$$

O_i είναι η μέτρηση στο χρονικό βήμα i .

P_i είναι η αντίστοιχη πρόβλεψη από το μοντέλο στο χρονικό βήμα i .

N ο αριθμός των χρονικών βημάτων.

Το MAE έχει ελάχιστη τιμή μηδέν.

B) Σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Relative root mean square error, RRMSE).

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\bar{O}}$$

Όπου \bar{O} είναι ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών στο διάστημα 1 μέχρι n. Το RRMSE έχει ελάχιστη τιμή το μηδέν.

Γ) Βαθμός απόδοσης του μοντέλου (Model efficiency, EF).

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Ο EF παίρνει τιμές από το $-\infty$ μέχρι το 1. Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε άριστο αποτέλεσμα.

Δ) Συντελεστής προσδιορισμού (Coefficient of determination, CD)

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

Ο CD έχει ελάχιστη τιμή το μηδέν χωρίς άνω όριο.

Ε) Καταλληλότητα προσαρμογής (Goodness of fit, R^2)

$$EF = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

\bar{P} είναι ο μέσος όρος των τιμών που προβλέπονται από το μοντέλο για όλο το διάστημα 1 μέχρι n.

Ο R^2 παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Η τιμή ερμηνεύεται ως απόλυτη σύμπτωση των τιμών του μοντέλου με τις μετρηθείσες τιμές.

Η αποδοχή της βαθμονόμησης μοντέλου της επαλήθευσης δεν σημαίνει απαραίτητα, ότι επαληθεύεται το ίδιο το μοντέλο. Είναι πιθανό το μοντέλο να λειτουργεί σωστά, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, αλλά λανθασμένα, υπό άλλες. Όσο το μοντέλο εφαρμόζεται σε διαφορετικές καταστάσεις, σε διάφορες τοποθεσίες, αποκτάμε όλο και μεγαλύτερη εμπιστοσύνη σ' αυτό και την ευρωστία του. Η ακριβής στιγμή, κατά την οποία το μοντέλο θεωρείται επαληθευμένο είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Πρόκειται για μία σταδιακή διαδικασία. Όσο χρησιμοποιείται το μοντέλο "κάμπτεται" όλο και περισσότερο και με διαφορετικούς τρόπους, θέτοντας σε δοκιμή την αξιοπιστία και τη διατύπωση του. Εκ των υστέρων, η λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αποτελεί μία σημαντική δοκιμή της χρησιμότητάς του. Οι εξετάσεις αυτές γίνονται, αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι προβλέψεις από το μοντέλο και καθώς τα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα με την πάροδο του χρόνου. Ελάχιστα παραδείγματα μετέπειτα λεπτομερούς εξέτασης έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία και θεωρείται, ότι χρειάζονται σίγουρα περισσότερα.

Η επαναλαμβανόμενη δοκιμή του μοντέλου είναι ζωτικής σημασίας στην απόκτηση εμπιστοσύνης προς το μοντέλο και στην κατανόηση των περιορισμών του (J.Schnoor et al., 2003).

2.3. Περιγραφή μοντέλου SWAT

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών των ΗΠΑ (USDA – ARS, Agricultural Research Service), με σκοπό να αξιολογήσει τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των πρακτικών διαχείρισης σε λεκάνες απορροής, με μικρό αριθμό σταθμών παρακολούθησης και να προσομοιώσει την επίδρασή τους στον υδρολογικό κύκλο, τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών, τα ιζήματα και την παραγωγή

χημικών. Είναι ένα χρονικά συνεχές, κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, το οποίο λειτουργεί με ημερήσιο βήμα (Arnold et al., 1998, Neitsch et al., 2001). Η αποτελεσματικότητά του, το κατέστησε διεθνώς αποδεκτό, ως ένα από τα πλέον κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής, με διάφορους τύπους εδάφους, χρήσεων γης και συνθηκών διαχείρισης (Arnold and Fohrer, 2005; Behera and Panda, 2006; Gassman et al., 2007a).

Τα κυριότερα στοιχεία, τα οποία απαρτίζουν το μοντέλο, αφορούν τον καιρό, την υδρολογία, τη θερμοκρασία του εδάφους, την ανάπτυξη των φυτών, τα θρεπτικά συστατικά, τα φυτοφάρμακα, τη διαχείριση της γης, τα βακτηρίδια και τέλος τους παθογόνους οργανισμούς (Arnold et al., 1998, Gassman et al., 2007, Neitsch et al., 2005). Το μοντέλο αυτό, λαμβάνει υπόψη δεδομένα σχετικά με το έδαφος, τις χρήσεις γης και το κλίμα σε μια λεκάνη και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά υλικά και τις ποιοτικές παραμέτρους του επιφανειακού νερού, τις χημικές (συγκεντρώσεις ενώσεων N και P) και τις βιολογικές (BOD, DO) στην έξοδο της λεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσα σημεία. Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου περιγράφεται από εξισώσεις παλινδρόμησης (Magdali et al., 2012).

Στο SWAT, η προς εξέταση λεκάνη απορροής χωρίζεται σε πολλαπλές επιμέρους υπολεκάνες, οι οποίες στη συνέχεια υποδιαιρούνται σε υδρολογικές μονάδες απόκρισης, καθεμία από τις οποίες εμφανίζει ίδια χαρακτηριστικά εδάφους, ίδια κλίση καθώς και ίδια χρήση γης, σε όλη της την έκταση. Αφού γίνει αυτός ο διαχωρισμός, υπολογίζεται η επιφανειακή απορροή, οι κύκλοι των θρεπτικών, η παραγωγή φερτών υλών και η ανάπτυξη των φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης και στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση όλου του ποτάμιου συστήματος συνολικά. Εναλλακτικά, η προς εξέταση λεκάνη απορροής μπορεί να υποδιαιρεθεί σε μόνο μια υπολεκάνη και θα περικλείει ενιαία χαρακτηριστικά χρήσης γης και τύπου εδάφους σε όλη την έκτασή της (Gassman, Reyes, Green, Arnold et al, 2007).

2.3.1 Δεδομένα εισόδου μοντέλου SWAT

Στα κλιματικά δεδομένα εισαγωγής περιλαμβάνεται η ημερήσια βροχόπτωση, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η σχετική υγρασία και δεδομένα ταχύτητας ανέμου, τα οποία μπορούν είτε να επιλεχθούν από καταγεγραμμένα αρχεία που υπάρχουν μέσα στο μοντέλο είτε να εισαχθούν από το χειριστή βάσει των δεδομένων που έχει συλλέξει για την περιοχή που μελετάται. Η εισαγωγή δεδομένων για τη σχετική υγρασία απαιτείται μόνο αν χρησιμοποιηθεί η εξίσωση των Penman-Monteith (Monteith, 1965) ή των Priestly-Taylor (Priestly and Taylor, 1972) για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, ενώ η εισαγωγή δεδομένων για τον αέρα απαιτείται μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Penman-Monteith (η μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται σε περίπτωση προσομοίωσης σεναρίων κλιματικής αλλαγής διότι δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των επιπέδων του CO₂ στην ατμόσφαιρα) (Gassman, Reyes, Green, Arnold et al, 2007).

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

2.3.2. Προσομοίωση Υδρολογικού Κύκλου SWAT - Ισοζύγιο

Ο υδρολογικός κύκλος στο SWAT είναι αυτός, ο οποίος διέπει την ποσότητα νερού, φερτών υλών και θρεπτικών στοιχείων, που εγκαταλείπουν το έδαφος και καταλήγουν στο υδρογραφικό δίκτυο, στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Το SWAT δέχεται δεδομένα εισόδου, για την κάθε υπολεκάνη απορροής, σχετικά με το κλίμα, την υδρολογία, μονάδες HRU (μονάδες με συγκεκριμένα

χαρακτηριστικά χρήσεων γης, κλίσης και εδάφους) και τα κατηγοριοποιεί ανάλογα με το περιεχόμενό τους. Τα δεδομένα για τα κατακρημνίσματα σχετίζονται με τις εισροές από ρέματα, τα επιφανειακά ύδατα και τις βροχοπτώσεις.

Οι εισροές από επιφανειακά ύδατα αφορούν την επιφανειακή απορροή, κατά μήκος του κεκλιμένου εδάφους. Αξιοποιώντας ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, το SWAT προσομοιώνει την επιφανειακή απορροή και τη μέγιστη απορροή για κάθε HRU, κάνοντας χρήση της μεθόδου Green & Ampt. Βάση των παραπάνω δεδομένων, με τη μέθοδο Green & Ampt υπολογίζεται ο ρυθμός διήθησης, συναρτήσει του δυναμικού κατακράτησης και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η διήθηση στον υπόγειο υδροφόρα γίνεται, όταν η υγρασία του εδάφους ξεπεράσει την εδαφική, υδατική, ικανότητα συγκράτησης. Το νερό, το οποίο δεν διηθείται, απορρέει επιφανειακά (Neitsch et al., 2005).

Το ποσοστό του νερού απορροής ρυθμίζεται από τον συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη χρήση γης. Η εκτίμησή του πραγματοποιείται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN (Curve Number) κατά SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972). Η μέθοδος Curve Number είναι συνάρτηση της διηθητικότητας του εδάφους, των χρήσεων γης και της επικρατούσας εδαφικής υγρασίας, ενώ παράλληλα χρειάζεται αναπροσαρμογή, ανάλογα με την κλίση του εδάφους (Kontogeorgos et al, 2014).

Το εδαφικό νερό προσλαμβάνεται από τη βλάστηση και διαπνέεται, υφίσταται εδαφική εξάτμιση, κατεισδύει στον αβαθή υδροφόρα ή συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την ενδιάμεση απορροή (lateral flow). Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής γίνεται βάση των τριών μεθόδων, που ακολουθούν: Penman-Monteith, Priestley-Taylor και Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1972). Η εξίσωση Penman-Monteith αφορά κυρίως το ποσοστό νερού, που εξατμίζεται από τα επιφανειακά στρώματα (Arnold, Srinivasan, Muttiah, Williams et al, 1998).

Ένα μέρος του υπόγειου νερού από τον αβαθή υδροφόρα (shallow aquifer) θεωρείται, ότι φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (deep aquifer) και χάνεται από το σύστημα. Οι απώλειες μετάδοσης (transmission losses) υπολογίζονται βάσει του SCS Hydrology Handbook (Lane et al, 1983), με τη χρησιμοποίηση ενός ποσοστιαίου συντελεστή.

Το νερό, το οποίο τελικά καταλήγει στο ποτάμι, είναι το άθροισμα της επιφανειακής, ενδιάμεσης και υπόγειας απορροής και διοδεύεται μέχρι τον επόμενο ταμιευτήρα ή λίμνη ή μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο επιτρέπει ακόμα, την αφαίρεση νερού από κάθε σημείο του συστήματος (υδατόρρευμα, ταμιευτήρας, λίμνη, αβαθής και βαθύς υδροφορέας) για ανθρωπογενείς χρήσεις (Μιμίκου, 2006).

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

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

Όπου,

SW_t : η τελική περιεκτικότητα υγρασίας του εδάφους την ημέρα t

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

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

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

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

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

Q_w : η υπόγεια ροή την ημέρα i (mm H₂O)

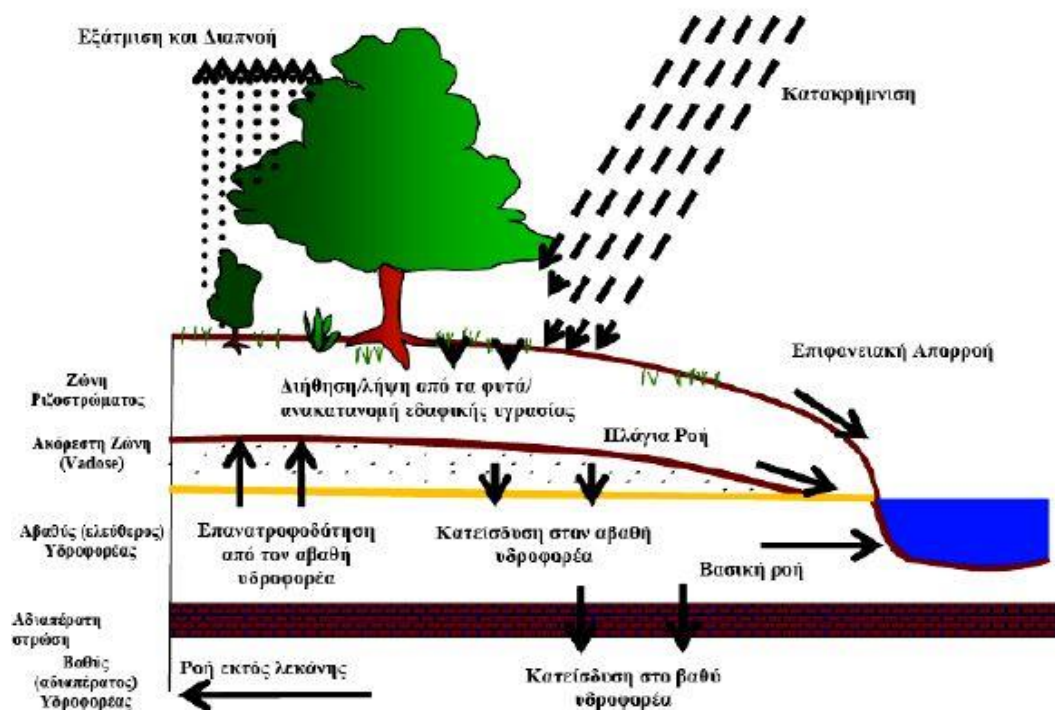
Η λεκάνη απορροής στο SWAT υποδιαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες, βάσει του αριθμού των παραποτάμων. Ο αριθμός και το μέγεθος των υπολεκανών ποικίλει, ανάλογα με το υδρογραφικό δίκτυο και το μέγεθος της λεκάνης απορροής. Η κάθε υπολεκάνη διαχωρίζεται στη συνέχεια περαιτέρω, σε υδρολογικές μονάδες

απόκρισης (Hydrological Response Units, HRUs), καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση, από ένα μοναδικό συνδυασμό των υποκείμενων γεωγραφικών χαρτών (εδάφη, κλίσεις, χρήσεις γης).

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

Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής, των κύκλων των θρεπτικών, της παραγωγής φερτών υλών και της ανάπτυξης των φυτών για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση όλου του ποτάμιου συστήματος συνολικά. Οι ροές των υδρολογικών μονάδων απόκρισης, της κάθε υπολεκάνης, αθροίζονται και στη συνέχεια διοδεύονται μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας, είτε τη μέθοδο αποθήκευσης μεταβλητού ρυθμού (Williams, 1969), είτε τη μέθοδο Muskingum (Neitsch et al., 2005), που είναι και οι δύο παραλλαγές της προσέγγισης του κινηματικού κύματος (Εικόνα2.3.2.1) .

Επίσης, αθροίζονται τα φορτία ή οι συγκεντρώσεις από τα ιζήματα, τα θρεπτικά, τα φυτοφάρμακα και τα βακτήρια των υδρολογικών μονάδων απόκρισης της κάθε υπολεκάνης (αφού συνυπολογιστεί η απομάκρυνση) και στη συνέχεια διοδεύονται μέσω των καναλιών, των λιμναζόντων νερών, των υγροτόπων και των ρεζερβουάρ, για να καταλήξουν στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Στους υπολογισμούς, λαμβάνονται υπόψη οι διαφοροποιήσεις στη ροή και τα φορτία λόγω των σημειακών πηγών αλλά και των πιέσεων από τις αστικές περιοχές (Gassman et al., 2007b).

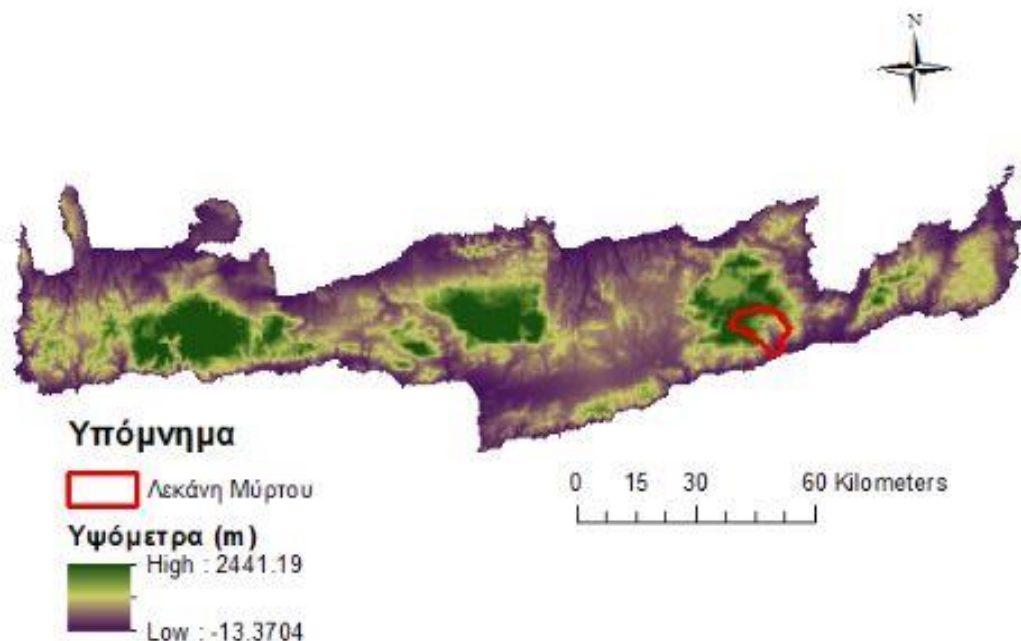


Ι. Εικόνα 2.3.2.1. Υδρολογικός κύκλος SWAT

3. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

3.1. Γεωγραφική τοποθέτηση

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του Μύρτου η οποία βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του νομού Λασιθίου και υπάγεται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης (Εικόνα 3.1.1). Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής είναι περίπου 96 km². Εκτείνεται από τη νότια πλευρά του όρους Δίκτυ έως το Λιβυκό πέλαγος, με τα συνολικά όρια της λεκάνης να πιάνουν τις κορυφές Ρούσο Ξύλο και Μεγάλη Κορυφή, ενώ τα δυτικά τις κορυφές Αφέντης Χριστός, Ψαρί Μαδάρα, Σαρακινό Καραβί, Κυλιάρα και Αγία Αικατερίνη.



ii. Εικόνα 3.1.1: Χάρτης Κρήτης

3.2. Γεωμορφολογία

Χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης του ανάγλυφου του νομού Λασιθίου είναι η κατά μήκος του άξονα ύπαρξη των ορεινών όγκων Δίκτης (2.148 m), Θρύπτης (1.476 m) και ορεινών όγκων ανατολικής Σητείας (819 m) που διαχωρίζουν τις πεδινές εκτάσεις μεταξύ των βόρειων και νότιων παραλιών, αφήνοντας ένα χαρακτηριστικό πέρασμα μεταξύ Παχιάς Άμμου και Ιεράπετρας και άλλο ένα μεταξύ Σητείας και Μακρού Γιαλού (Χάρτης ευρύτερης περιοχής της λεκάνης: Εικόνα 3.2.1) .

Το οροπέδιο Λασιθίου είναι το μεγαλύτερο από τα οροπέδια της Κρήτης και αποτελείται από μια εύφορη και καλλιεργήσιμη πεδιάδα περικυκλωμένη από τις κορφές της Δίκτης: Σελένα, Λάζαρος, Σπαθί κλπ, στους πρόποδες των οποίων βρίσκονται 17 μικρά, όμως πολύ γραφικά χωριά. Εκτός από την πεδιάδα αυτή, το κύριο Οροπέδιο Λασιθίου, στη Δίκτη υπάρχουν επίσης μερικά μικρότερα οροπέδια, όπως του Καθαρού (1140), του Λιμνάκαρου (1125), του Ομαλού της Βιάννου (1325) κ.α.

Οι κυριότερες πεδινές εκτάσεις συναντώνται στην περιοχή της Ιεράπετρας και στην περιοχή της Σητείας, ενώ σημαντικά πεδινά τμήματα αποτελούν τα οροπέδια και λεκανοπέδια του νομού, δηλαδή τα Οροπέδια Λασιθίου και Καθαρού και τα Λεκανοπέδια Φουρνής και Αρμένων-Χανδρά.

Η λεκάνη απορροής έχει ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα, πλατύτερο στο βόριο μέρος της και στενότερο προς τα νότια, με αναλογία μήκους προς πλάτος 1,5:1. Το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 2013 m και διακρίνονται τρεις ζώνες η πεδινή ζώνη της λεκάνης, η ημιορεινή και η ορεινή ζώνη. Ο ποταμός Μύρτος που διασχίζει τη λεκάνη έχει ολικό μήκος μέχρι και τη ζώνη εκβολών του 20,8 km και κατά τη διαδρομή του δέχεται τα νερά πολλών χειμάρρων και πηγών (Χριστού, Μαλλών, Μύθων, Ζωναρίου, Μουζάκαινας, Ψωριάρη κλπ) και έχει διαμορφωθεί από το ποτάμιο σύστημα του Μυρτού, του οποίου ο κύριος κλάδος έχει σχεδόν μόνιμη ροή από ΒΒΔ προς ΝΝΑ (Δριβέλας, 2009).

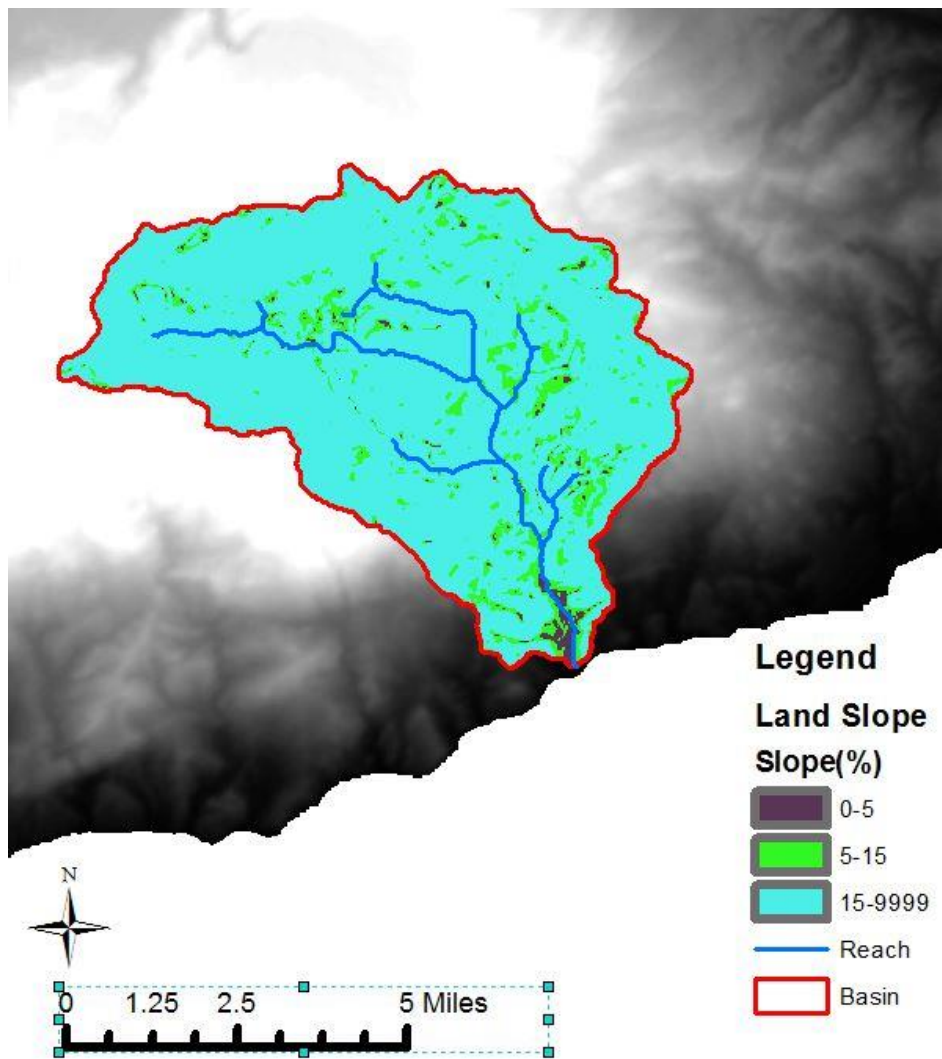
Πρόκειται για ένα έντονα διακλαδισμένο δίκτυο απορροής που αποτελείται από βαθιές χαραδρώσεις V-γεωμετρίας, με εύρος έως και 1000 m στην κορυφή,

εύρος ποταμού μικρότερο των 50 m και κλίση της κοίτης από $20^\circ - 5^\circ$ για τους μικρότερης και μεγαλύτερης τάξης κλάδους, αντίστοιχα. Οι χαραδρώσεις αυτές στο δυτικό τμήμα της λεκάνης έχουν βάθος έως 400 m και οι πλευρές κλίση $20^\circ - 40^\circ$. αντίθετα στο ανατολικό τα χαρακτηριστικά αυτά γίνονται ηπιότερα και δεν υπερβαίνουν τις τιμές των 200 m και 20° αντίστοιχα. Τόσο στη λεκάνη απορροής όσο και κατά μήκος του ποταμού διακρίνονται όλες οι ζώνες, επικρατούν όμως ισχυρώς επικλινείς επιφάνειες καθώς και απόκρημνες. Οριζόντιες επιφάνειες βρίσκονται μόνο στο νότιο πεδινό τμήμα (Εικόνα 3.2.2: Χάρτης κλίσεων γης της λεκάνης απορροής Μύρτου).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο Μύρτος χαρακτηρίζεται από έντονα χειμαρρικά φαινόμενα και η λεκάνη του είναι από τις πιο χειμαρρόπληκτες περιοχές της Κρήτης.



iii. Εικόνα 3.2.1: Η θέση της λεκάνης απορροής Μύρτου στο νομό Λασιθίου



ΙV. Εικόνα 3.2.2: Χάρτης κλίσεων γης της λεκάνης απορροής Μύρτου

3.3. Γεωλογία

Η λεκάνη απορροής του Μύρτου δομείται από σχηματισμούς αλπικού υποβάθρου, σειρές Μειοκαινικών κροκαλοπαγών και αποθέσεις νεογενείς και τεταρτογενείς (Εικόνα 3.3.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί υπεδάφους). Η περιγραφή των παραπάνω λιθολογικών τύπων δίνεται στη συνέχεια από τους νεότερους προς τους παλαιότερους:

Τεταρτογενείς σχηματισμοί

Αμμοχαλκώδεις αποθέσεις προϊόντων διάβρωσης των κροκαλοπαγών του σχηματισμού Μάλες. Αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, άμμων, κροκαλοπαγών, αργίλων και χαλίκων ασύνδετων έως ελαφρά συγκολλημένων. Εμφανίζονται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, όπου τροφοδοτούνται από την ισχυρή μορφολογία των κροκαλοπαγών και συσσωρεύονται κατά μήκος της επαφής (των κροκαλοπαγών) με τις υποκείμενες λεπτομερέστερες φάσεις του σχηματισμού (Δριβέλας, 2009).

Νεογενείς σχηματισμοί

Στους νεογενείς σχηματισμούς συγκαταλέγονται οι ακόλουθοι Ανώτερο Μειόκαινο, συνεκτικά κροκαλοπαγή με παρεμβολές μαργών και άμμων. Ανώτερο Σερραβάλιο – Κατώτερο Τορτόνιο, σχετικά καλά διαβαθμισμένα πολύμικτα κροκαλοπαγή εναλλασσόμενα ακανόνιστα με ψαμμίτες και αργιλούχες μάρχες. Τα περισσότερα συστατικά προέρχονται από την προνεογενή σειρά της Πίνδου. Ανώτερο Σερραβάλιο – Κατώτερο Τορτόνιο: κροκαλοπαγή με ελαφρά στρογγυλωμένες κροκάλες ερυθρού ή τέφρου χρώματος. Τα συστατικά είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος πολύχρωμα εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα κυρίως χαλαζίτες τα περισσότερα από τα οποία φαίνεται ότι προέρχονται από το προνεογενές υπόβαθρο.

Αλλόχθονες σειρές

Σχηματισμοί του τεκτονικού καλύμματος εσωτερικών ζωνών: Συνθέτουν το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα των αλπικών σχηματισμών της Κρήτης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ολίσθηση ενός οφιολιθικού συμπλέγματος που είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φλυσχικού mélange και την συνύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών τύπων. Οι σχηματισμοί του καλύμματος εμφανίζονται στο ΝΔ/κό τμήμα της λεκάνης απορροής και περιλαμβάνουν (Δριβέλας, 2009).:

- Ισχυρά λατυποποιημένα οφιολιθικά πετρώματα (βασάλτες, σερπεντινιωμένους περιδοτίτες) και αργιλικούς σχιστόλιθους με παρεμβολές ψαμμιτών

- Βραχώδη οφιολιθικά σώματα (βασάλτες, δολερίτες, γάββροι)
- Ασβεστόλιθους, οι οποίοι απαντώνται είτε ως ολισθόλιθοι επί των οφιολίθων ή παρενστρωμένοι εντός των σχιστολίθων.

Προγεογενείς σχηματισμοί

Το τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Πίνδου αποτελείται από Φλύσχη (Παλαιόκαινο – Ηώκαινο) και Ασβεστόλιθους (Μαστρίχτιο).

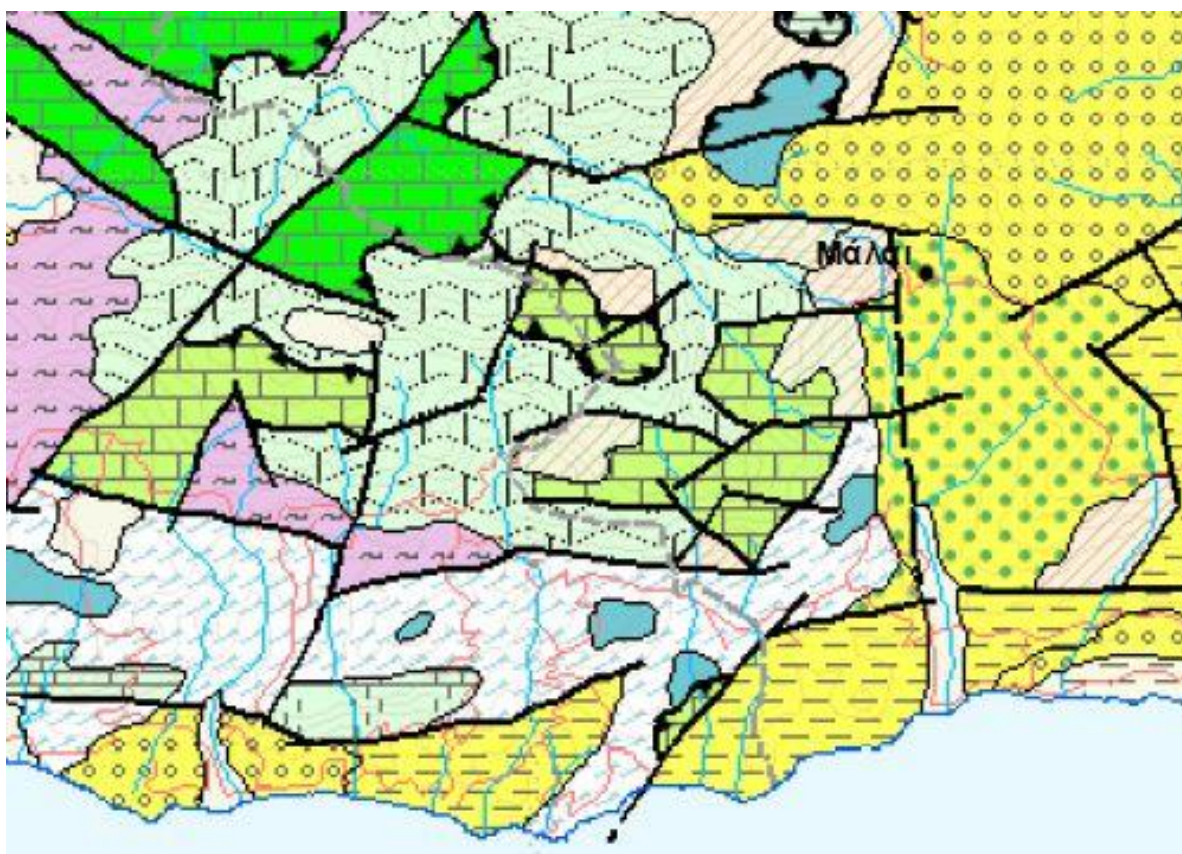
- Φλύσχης (Παλαιόκαινο –Ηώκαινο): Ψαμμιτοπηλτικός φλύσχης με ενστρώσεις καιολισθολίθους ασβεστολίθων, καθώς και με παρεμβολές βασικών εκρηξιγενών. Απαντάται στην δεξιά πλευρά της κοιλάδας του Μύρτου ανάντη του χειμάρρου.
- Ασβεστόλιθοι (Μαιστρίχτιο): Λεπτοστρωματώδεις, λευκότεφροι ασβεστόλιθοι κατά θέσεις λατυποπαγείς. Καταλαμβάνουν τα ανώτερα τοπογραφικά σημεία της λεκάνης απορροής δυτικά της κοίτης του χείμαρου Μύρτου.

Κατόπιν το τεκτονικό κάλυμμα της ζώνης Τρίπολης αποτελούν οι Φλύσχης (Ανώτερο Ηώκαινο – Ολογόκαινο) και Ασβεστόλιθοι (Τριαδικό – Μέσο Ηώκαινο).

- Φλύσχης (Ανώτερο Ηώκαινο – Ολιγόκαινο): Εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών. Έχει περιορισμένη εμφάνιση στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης στην περιοχή του οικισμού Μάλες.
- Ασβεστόλιθοι (Τριαδικό – Μέσο Ηώκαινο): μέσο – παχυστρωματώδεις, τεφροί ασβεστόλιθοι και δολιμίτες. Απαντώνται στο ΒΔ/κό τμήμα της λεκάνης απορροής (Δριβέλας, 2009).

Σειρά φυλλιτών – χαλαζιτών

Αποτελείται από περμοτριάδικούς αργιλικούς σχιστολίθους, φυλλίτες, χαλαζιακούς φυλλίτες και χαλαζίτες και εμφανίζεται κυρίως στο κέντρο της λεκάνης.



Υ. Εικόνα 3.3.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί υπεδάφους

Υπόμνημα

ΝΕΟΓΕΝΕΣ – ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

Πλειόκαινο - Πλειστόκενο



Μάργες, μαργαικοί ασβεστόλιθοι, άργιλοι, ψαμίτες, κροκαλοπαγή με παρεμβολές λιγνιτών

Ανώτερο Μειόκαινο



Κροκαλοπαγή, μάργες, βιογενείς ασβεστόλιθοι, άμμοι, λιγνίτες, συνεκτικά κροκαλοπαγή με παρεμβολές μαργών και άμμων



Κροκαλοπαγή-συνεκτικά, πολύμικτα με ενστρώσεις αργιλούχων μαργών, ψαμμιτών και αργίλων

ΖΩΝΗ ΠΕΛΑΓΩΝΙΚΗ

Ανώτερο Ιουρασικό – Κατώτερο Κρητιδικό



Α. Οφιόλιθοι, β. Σχιστο-ψαμμιτική-κερατολιθική ακολουθία

ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ

Ανώτερο Κρητιδικό



Ασβεστόλιθοι

Μέσο Τριαδικό – Κατώτερο Ιουρασικό



Ασβεστόλιθοι ανακρυσταλλωμένοι

ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ

Ανώτερο Κρητιδικό-Ανώτερο Ηώκαινο



Φλύσχης

3.4. Υδρογεωλογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην λεκάνη απορροής παρουσιάζουν διαφορετική ικανότητα μεταβίβασης και αποθήκευσης του νερού. Η μεταβίβαση του νερού καθορίζεται από τα διάκενα (πρωτογενές πορώδες) και τις ρηγματώσεις (δευτερογενές πορώδες) που υπάρχουν στη μάζα του πετρώματος και κατά συνέπεια εξαρτάται από τη λιθολογική σύσταση και την τεκτονική καταπονισή του σχηματισμού. Η ικανότητα αποθήκευσης νερού και ανάπτυξης

υδροφορίας εντός του πετρώματος έχει σχέση με την διαδοχή και το πάχος των σχηματισμών, την τροφοδοσία, τις διαφυγές κ.α (Δριβέλας, 2009).

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι σχηματισμοί της λεκάνης απορροής διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες με διαφορετικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά:

Καρστικοί σχηματισμοί

- Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1)

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

- Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Κ2)

Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

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

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

Κοκκώδεις σχηματισμοί

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

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

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

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

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

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

Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

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

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

- *Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (Α2)*

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

3.4.1. Περιοχή προσχωματικής λεκάνης Μύρτου

Στο νότιο και πεδινό κομμάτι της λεκάνης απορροής του χείμαρρου Μύρτους εντοπίζεται η προσχωματική λεκάνη του Μύρτους. Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στη περιοχή, καθώς και υδρογεωλογική τους συμπεριφορά.

Γενικά στην περιοχή εμφανίζονται σχηματισμοί του τεταρτογενούς, του νεογενούς καθώς και σχηματισμοί αλπικοί με τη μορφή καλυμμάτων. Η περιγραφή τους όπως εμφανίζονται από νότο προς βορρά έχει ως εξής:

Τεταρτογενές

- Αλλούβια (Ολόκαινο): Αλλουβιακές αποθέσεις κοιλάδας ανοικτής προς τη θάλασσα.

Νεογενές

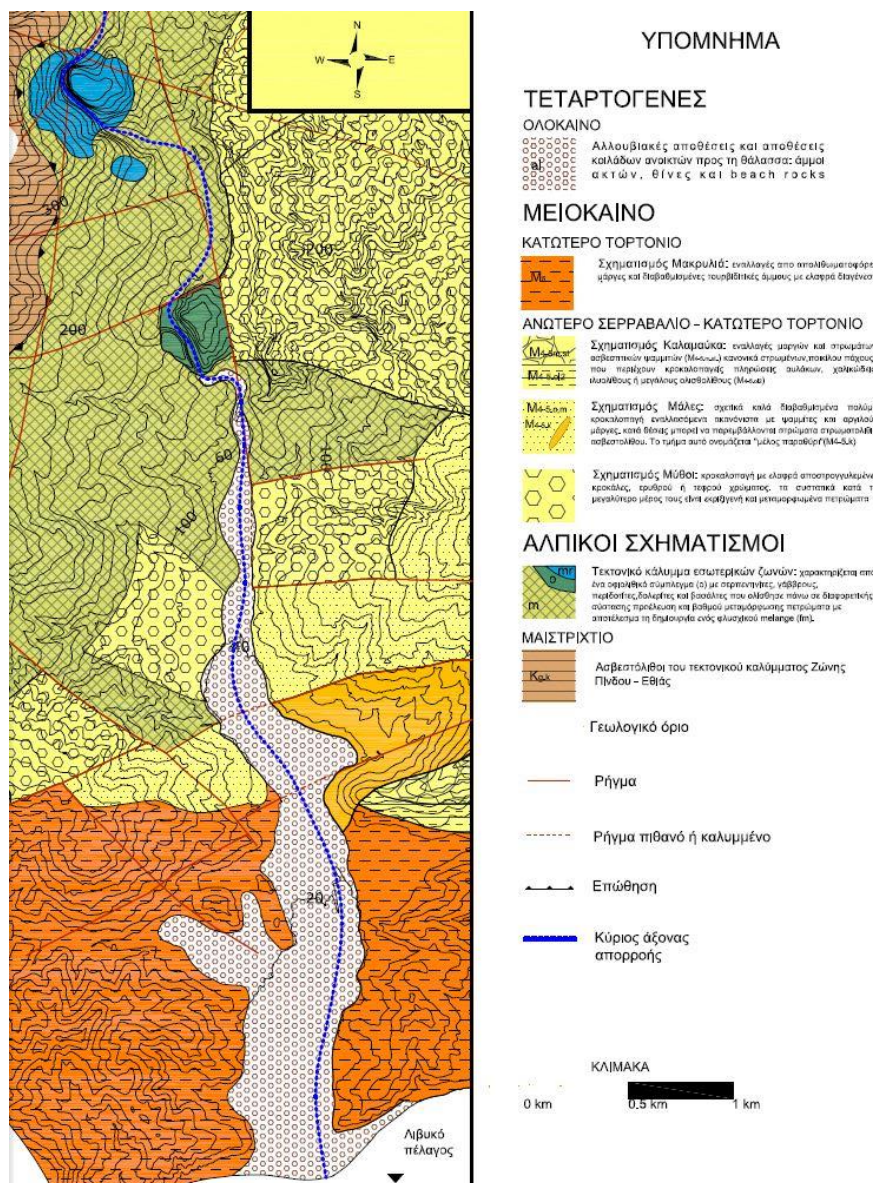
- Σχηματισμός Μακρυλιά (Κατώτερο Τορτόνιο): πρόκειται για εναλλαγές απωλιθωματοφόρων μαργών και διαβαθμισμένων τουρβιδιτικών άμμων (ΙΓΜΕ, 1993). Αναλυτικότερα ο σχηματισμός απαρτίζεται από μπλε-γκρί μάργες και ακολουθίες ιλυολυθικών και ψαμμιτικών πάγκων πάχους μερικών εκατοστών ως και ένα μέτρο, χρώματος ανοικτού καφέ ή γκρί.
- Σχηματισμός Μάλλες (Ανώτερο Σερραβάλιο – κατώτερο Τορτόνιο): πρόκειται για σχετικά καλά διαβαθμισμένα πολύμεικτα κροκαλοπαγή καστανού χρώματος με καλά στρογγυλεμένα στοιχεία, εναλλασόμενα ακανόνιστα με ψαμμίτες και αργιλούχες μάργες. Τα συστατικά του κροκαλοπαγούς προέρχονται από την προνεογενή σειρά της ενότητας της

Πίνδου. Κατά θέσεις δύναται να παρεμβάλλονται στρώματα στρωματολιθικού ασβεστολίθου με φύκη.

- Σχηματισμός Μύθοι (Ανώτερο Σερραβάλιο – Κατώτερο Τορτόνιο): ο σχηματισμός των Μύθων σχηματίζει τη βάση του Νεογενούς. Αποτελείται κυρίως από πολύμικτα συνεκτικά κροκαλοπαγή με ελαφρά αποστρογγυλεμένες κροκάλες, ερυθρού ή τεφρού χρώματος. Τα συστατικά του κατά το μεγαλύτερο μέρος είναι πολύχρωμα εκριξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία πιθανά να προέρχονται από το προνεογενές υπόβαθρο. Το συνδετικό τους υλικό είναι αμμώδες και εμφανίζεται τσιμεντοποιημένο.
- Σχηματισμός Καλαμαύκα (Ανώτερο Σερραβάλιο – Κατώτερο Τορτόνιο): αφορά εναλλαγές μαργών και στρωμάτων ασβεστιτικών ψαμμιτών κανονικά στρωμένων, ποικίλου πάχους. Επιπρόσθετα περιέχουν κροκαλοπαγείς πληρώσεις αυλάκων. Το πάχος της ενότητας αυτής δεν ξεπερνά τα 300 m. Η εμφανισή της στην περιοχή είναι μικρή και εντοπίζεται στα ΝΑ ανάντι του σχηματισμού Μακρυλιά.

Προνεογενείς σχηματισμοί

- Φλυσχικό mélange: Η περιγραφή του είναι όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.3. Σαφής διαχωρισμός των σχηματισμών που το αποτελούν δεν έχει πραγματοποιηθεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.1 εξαπλώνεται επιφανειακά δυτικά των προσχώσεων και ανάντι των σχηματισμών Μακρυλιά, Μαλλών και Μύθων. Ο διαχωρισμός των σχηματισμών του οφιολιθικού καλύματος με τα πετρώματα του φλύσχη δεν να είναι ακριβής. Ανατολικά των προσχώσεων στο βόρειο τμήμα τους εμφανίζεται ως υπόβαθρο του σχηματισμού των Μύθων με την μορφή καστανών αργιλικών σχιστολίθων. Πάντως τα πετρώματα των οφιολίθων (βασάλτες – περιδοτίτες) εμφανίζονται κυρίως στα δυτικά των προσχώσεων ισχυρά λατυποποιημένα από τεκτονική καταπόνιση, ενώ ανάντι των προσχώσεων ως βραχώδη σώματα βασαλτών – δολεριτών και γάββρων.
- Ασβεστόλιθοι (Μαιστρίχτιο): λεπτομεσοστρωματώδεις, λευκότεφροι ασβεστόλιθοι. Ανήκουν στο τεκτονικό κάλυμμα Πίνδου. Στο σχήμα 3.4.1 εμφανίζονται στο ΒΔ τμήμα με το φλυσχικό mélange επωθημένο σε αυτούς (Δριβέλας, 2009).



VI. Εικόνα 3.4.1: Στρωματογραφία περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού Μύρτου

3.5. Κλιματικά και μετεωρολογικά στοιχεία ευρύτερης περιοχής

Ο καιρός στην Κρήτη είναι μεσογειακό και χαρακτηρίζεται από τους ήπιους, βροχερούς χειμώνες και σχετικά ξηρά, θερμά καλοκαίρια. Η ανατολική Κρήτη περιλαμβάνει τις περισσότερες άνυδρες, θερμές και ηλιόλουστες περιοχές της Ευρώπης. Οι βροχές στα νότια και ανατολικά δεν ξεπερνούν τα 400 χιλιοστά το

χρόνο, η μέση θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τους 20°C και η ηλιοφάνεια είναι η μεγαλύτερη της Ευρώπης. Οι αντίστοιχες τιμές στα Χανιά, για παράδειγμα, είναι τουλάχιστον 700 χιλιοστά βροχής και 18,9°. Οι βροχές όταν εκδηλώνονται είναι έντονες και περιορίζονται στο διάστημα Οκτωβρίου - Μαρτίου. Τα μελτέμια που κυριαρχούν τους καλοκαιρινούς μήνες μετριάζουν τη θερμοκρασία, ενώ το χειμώνα οι νότιοι άνεμοι είναι εξίσου συχνοί με τους βόρειους. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι βόρειοι άνεμοι δημιουργούν ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες, επηρεαζόμενες από την εξασθένηση των χαμηλών βαρομετρικών στην Ανατολική Μεσόγειο και διακόπτονται μόνο από τοπικές καταιγίδες τροπικού τύπου. Τα καλοκαιρινά κύματα καύσωνα διαρκούν αρκετά, επηρεαζόμενα από νότιους ανέμους που πνέουν από την Αφρική. Η εποχιακή διακύμανση της θερμοκρασίας είναι μεγάλη καθώς κατά το χειμώνα η θερμοκρασία στα χαμηλά κυμαίνεται λίγο πιο πάνω από τους 0oC ενώ το καλοκαίρι μπορεί να ξεπεράσει και τους 40oC (Chartzoulakis et al, 2001).

Στην Κρήτη η χωρική διακύμανση των βροχοπτώσεων είναι ορεογραφικά εξαρτώμενη. Η χρονιά 1989-1990 υπήρξε η πιο ξηρή για την περίοδο 1967-1997 ενώ η μείωση των βροχοπτώσεων κατά την ίδια περίοδο αν και μικρής αρνητικής τάσης, ήταν πιο έντονη σε μεγαλύτερα υψόμετρα (Naoum and Tsanis, 2003). Πιο γενικά, η περίοδος 1987-1994 χαρακτηρίζεται ως επιτεινόμενης ξηρασίας ενώ άλλοι περίοδοι ξηρασίας ήταν το 1973-74, 1976-77, 1985-86 και το 1999-2000 (Koutroulis et al, 2010).

Το ανατολικό μέρος της Κρήτης (περιοχή της Σητείας) είναι ξηρότερο και θερμότερο από το δυτικό μέρος (περιοχή Χανιά). Αυτό είναι προφανές στη βλάστηση. Τα Χανιά είναι πολύ πιο πράσινα από την ξηρή περιοχή της Σητείας. Η ίδια διαφορά παρατηρείται μεταξύ της βόρειας και της νότιας ακτής της Κρήτης, με τη νότια ακτή να είναι ξηρότερη και θερμότερη (Περιβαλλοντικά στοιχεία Νομού Λασιθίου, periballon.doc).

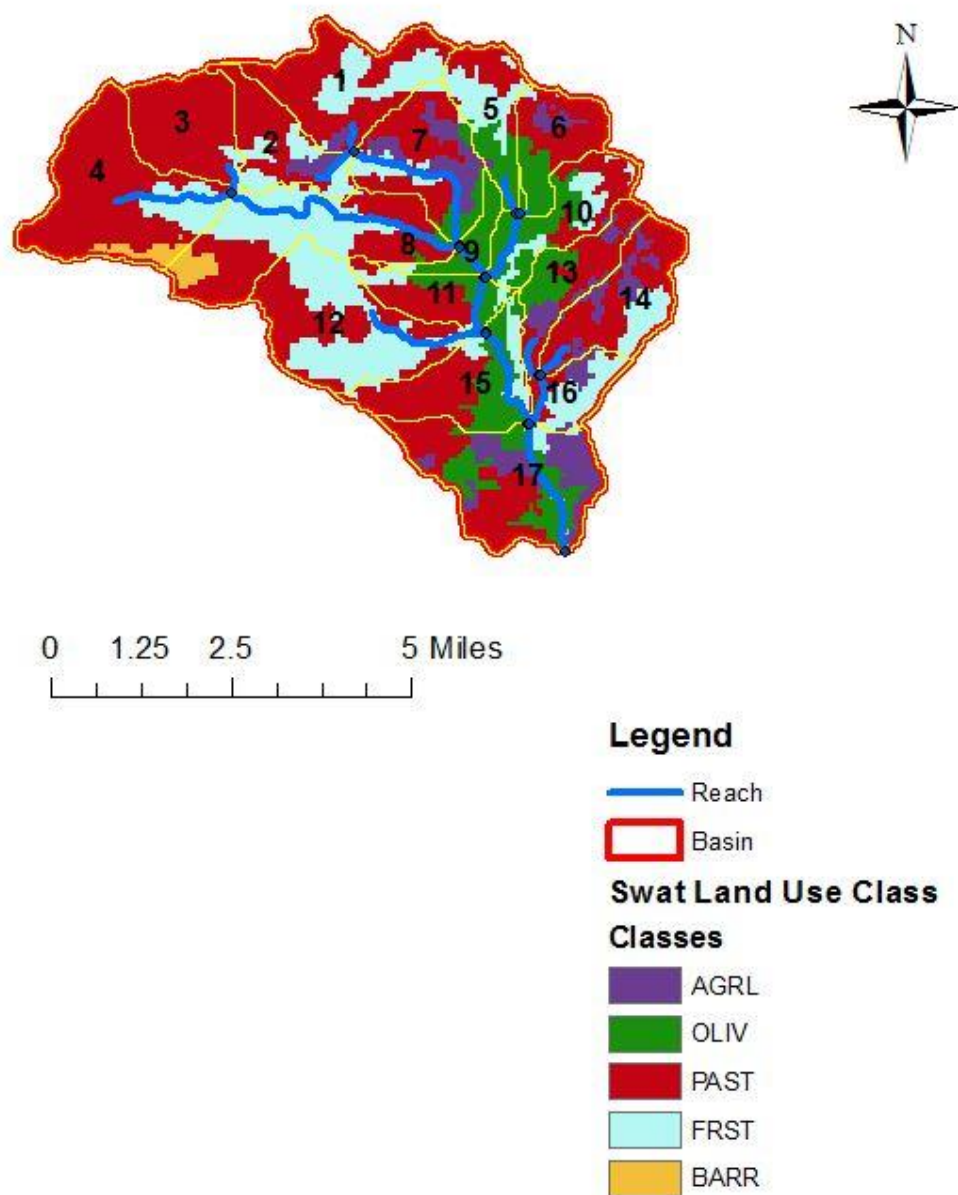
Για την περιοχή μελέτης διαθέτουμε ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από το υδρολογικό έτος 1961-1962 μέχρι και το υδρολογικό έτος 2009-2010 από δύο σταθμούς, Μάλες και Μύθοι. Επιπλέον, διατίθενται και ημερήσια δεδομένα μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών από το υδρολογικό έτος 1961-1962 έως το υδρολογικό έτος 2009-2010 από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς Άβδου, Καψάλι

και Καστέλι. Αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα των αποτελεσμάτων των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.6. Χρήσεις γης

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου κυριαρχούν τα βοσκοτόπια και οι δασικές εκτάσεις σε ποσοστά 52,6% και 23,3% αντίστοιχα. Οι ελαιώνες συναντώνται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (σε ποσοστό 14,0%) γύρω από το πέρασμα του ποταμού Μύρτου, ενώ οι βοσκότοποι καλύπτουν το περιφερειακό κομμάτι της λεκάνης. Οι δασικές και θαμνώδης εκτάσεις καλύπτουν το δυτικό τμήμα της περιοχής. Τέλος σε μικρότερο ποσοστό (8,3%) υπάρχουν ορισμένες εκτάσεις καλλιέργειας κηπευτικών (γεωργικές εκτάσεις), ενώ άγονο έδαφος είναι μόλις το 1,8% της περιοχής.

Ο χάρτης χρήσεων γης (Εικόνα 3.6.1) προέκυψε από επεξεργασία του χάρτη επιφανειακής κάλυψης του προγράμματος Corine Land Cover 2000, στη συνέχεια στα πλαίσια της μελέτης επανακατηγοριοποιήθηκε μέσω του SWAT.



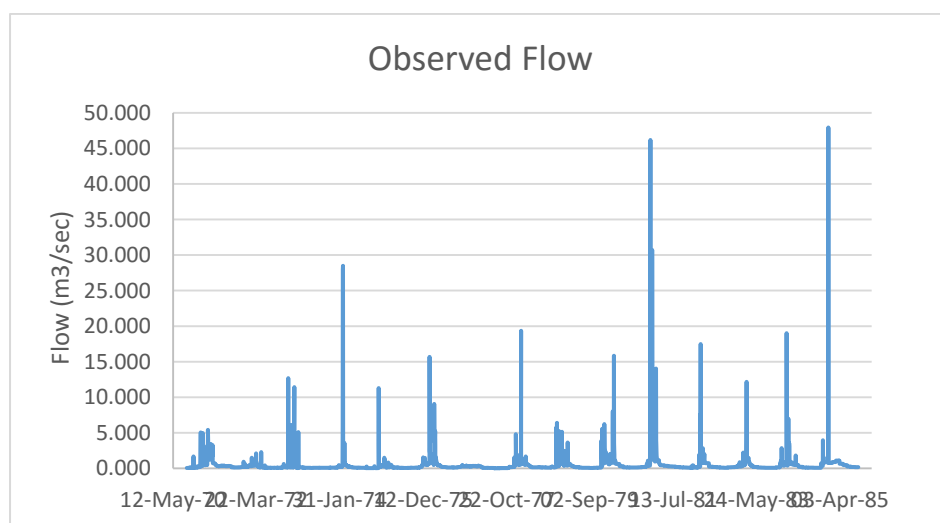
vii. Εικόνα 3.6.1: Χάρτης χρήσεων γης

4. Δεδομένα εισαγωγής

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ArcMap 10, Service Pack 5, με επίπεδο άδειας ArcInfo και η έκδοση του SWAT 2012.10_0.15 (6/20/2014).

4.1. Παροχή

Για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου έχουν συλλεχθεί ημερήσια δεδομένα μέτρησης παροχής για τα υδρολογικά έτη 01/09/1970 έως και 31/08/1985 από την υπηρεσία της Περιφέρειας Κρήτης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν τελικά για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν αυτά μεταξύ των υδρολογικών ετών 01/09/1977 και 31/08/1981. Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα μετρήσεων των παροχών δε χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα, αλλά χρειάστηκαν κατόπιν στη διαδικασία της βαθμονόμησης για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο παρακάτω γράφημα (Διάγραμμα 4.1.1) εμφανίζονται η ημερήσιες μετρήσεις παροχής για όλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που διατέθηκαν δεδομένα.

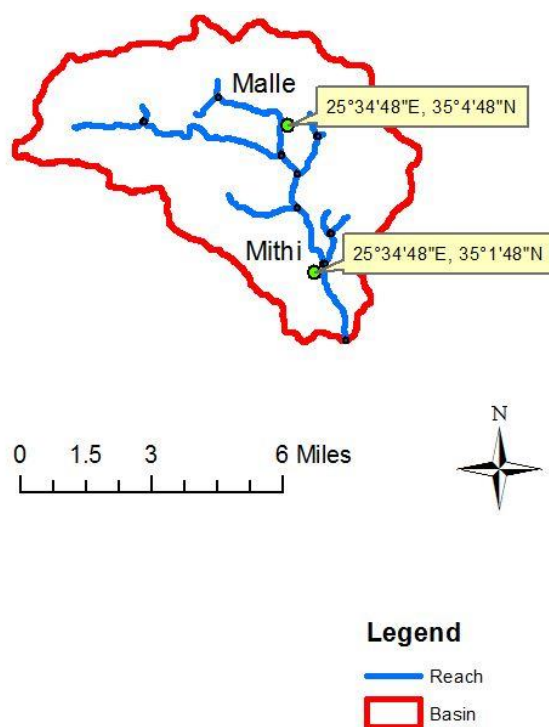


viii. Διάγραμμα 4.1.1: Ημερήσια δεδομένα παροχής υδρολογικών ετών 1970-1985

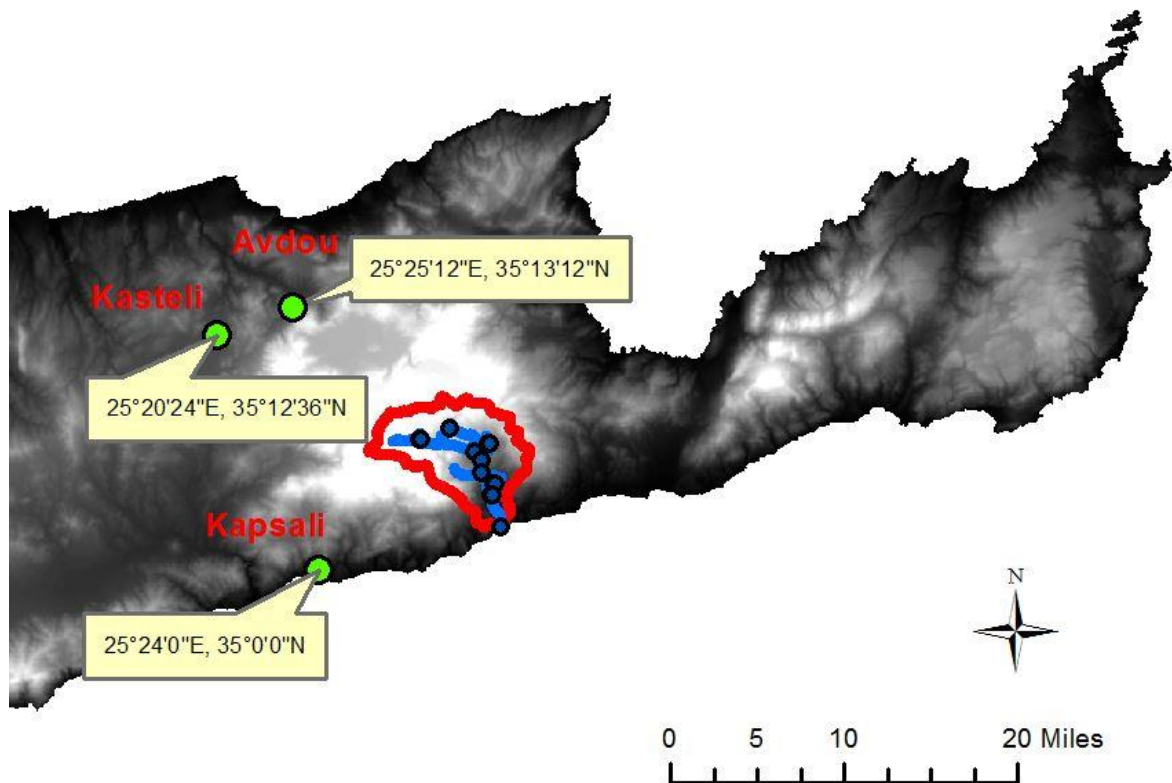
4.2. Κλιματικά και μετεωρολογικά στοιχεία

Κύρια στοιχεία καθορισμού του κλίματος μιας περιοχής είναι η θερμοκρασία (μέγιστη και ελάχιστη) και το ύψος της βροχής. Για την περιοχή μελέτης διαθέτουμε ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης από το υδρολογικό έτος 1961-1962 μέχρι και το υδρολογικό έτος 2009-2010 από δύο σταθμούς, Μάλες και Μύθοι. Οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε υψόμετρο 590 m και 200 m και τοποθετούνται στο βόριο κεντρικό και νότιο κεντρικό τμήμα της λεκάνης αντίστοιχα (Εικόνα 4.2.1: Τοποθεσία βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης απορροής Μύρτου).

Επιπλέον, διατίθενται και ημερήσια δεδομένα μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών από το υδρολογικό έτος 1961-1962 έως το υδρολογικό έτος 2009-2010 από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς Άβδου, Καψάλι και Καστέλι. Οι σταθμοί βρίσκονται στο δυτικό τμήμα εκτός της λεκάνης απορροής και τοποθετούνται σε υψόμετρο 230 m, 10 m και 350 m αντίστοιχα. Ακολουθώντας, παρατίθενται η σχετικοί χάρτες με τις ακριβείς τοποθεσίες των μετεωρολογικών σταθμών παρατήρησης (Εικόνα 4.2.2: Τοποθεσία μετεωρολογικών σταθμών λεκάνης απορροής Μύρτου).



ΙΧ. Εικόνα 4.2.1: Τοποθεσία βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης απορροής Μύρτου

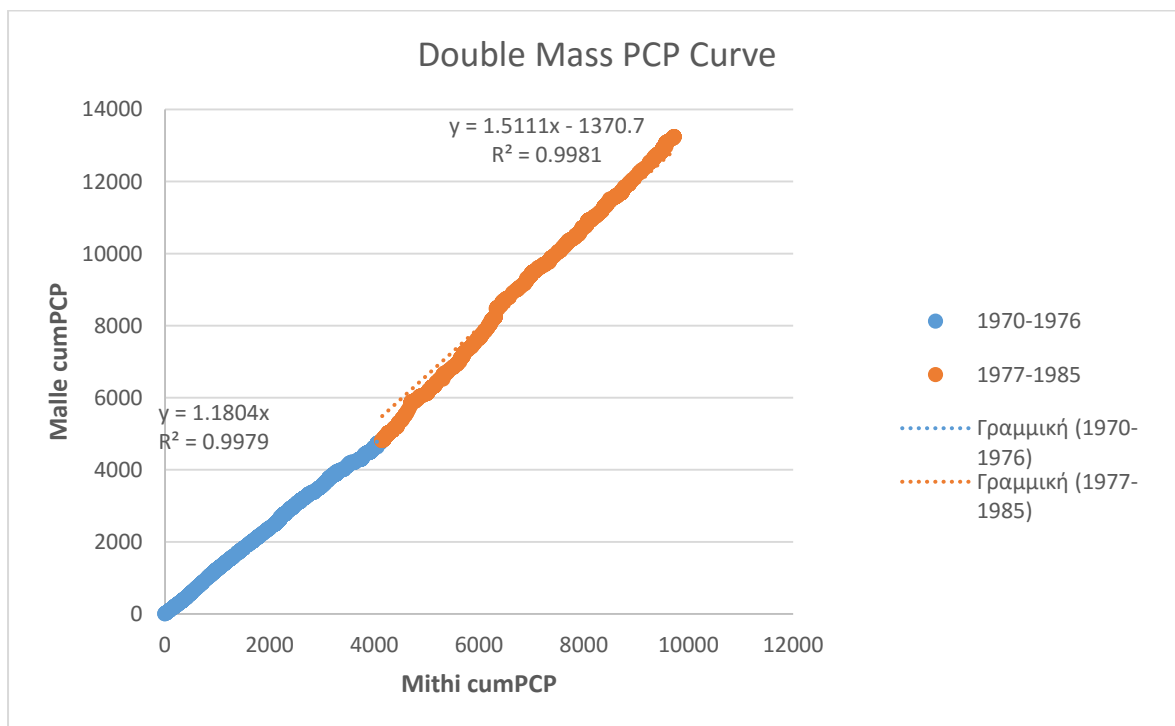


Χ. Εικόνα 4.2.2: Τοποθεσία μετεωρολογικών σταθμών λεκάνης απορροής Μύρτου

4.2.1. Βροχοπτώσεις

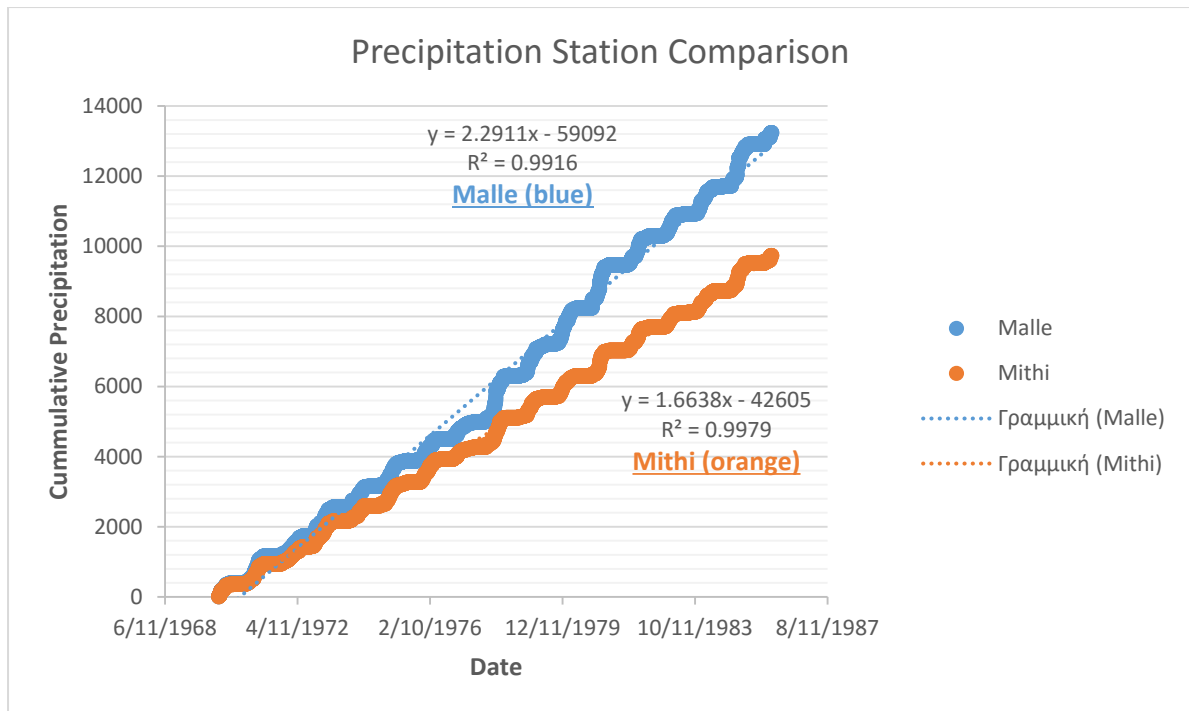
Η επεξεργασία των δεδομένων βροχόπτωσης εστιάζεται στα έτη 1970 - 1985, καθώς εκείνη την περίοδο πρόκειται να γίνει η βαθμονόμηση της υδρολογίας του μοντέλου. Αρχικά εξετάσθηκε η ομοιογένεια των βροχομετρικών παρατηρήσεων με χρήση της τεχνικής της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Η διπλή αθροιστική καμπύλη εξάγεται αθροίζοντας τα ημερήσια δεδομένα του κάθε ενός από τους δύο σταθμούς (Μαλλέ και Μύθοι) μέχρι το έτος παρατήρησης (στην προκειμένη περίπτωση είναι το 1985). Έτσι εξάγονται οι αθροιστικές χρονοσειρές των δύο σταθμών. Κατά την τεχνική αυτή συγκρίνονται τα ετήσια ύψη βροχής μεταξύ των σταθμών. Σημαντική αλλαγή στην κλίση της προκύπτουσας καμπύλης απαιτεί διόρθωση των δεδομένων.

Ακολουθεί το διάγραμμα 4.2.3 με τη διπλή αθροιστική καμπύλη ημερήσιας βροχόπτωσης για τους δύο σταθμούς, Μύθοι και Μαλλέ. Από το παρακάτω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι από το έτος 1977 κι έπειτα η κλίση της διπλής αθροιστικής καμπύλης αλλάζει σημαντικά και συνεπώς τα δεδομένα για έναν από τους δύο σταθμούς θα χρειαστεί να διορθωθούν.



χι. Διάγραμμα 4.2.3: Διπλή αθροιστική καμπύλη βροχομετρικών δεδομένων περιόδου 1970-1985

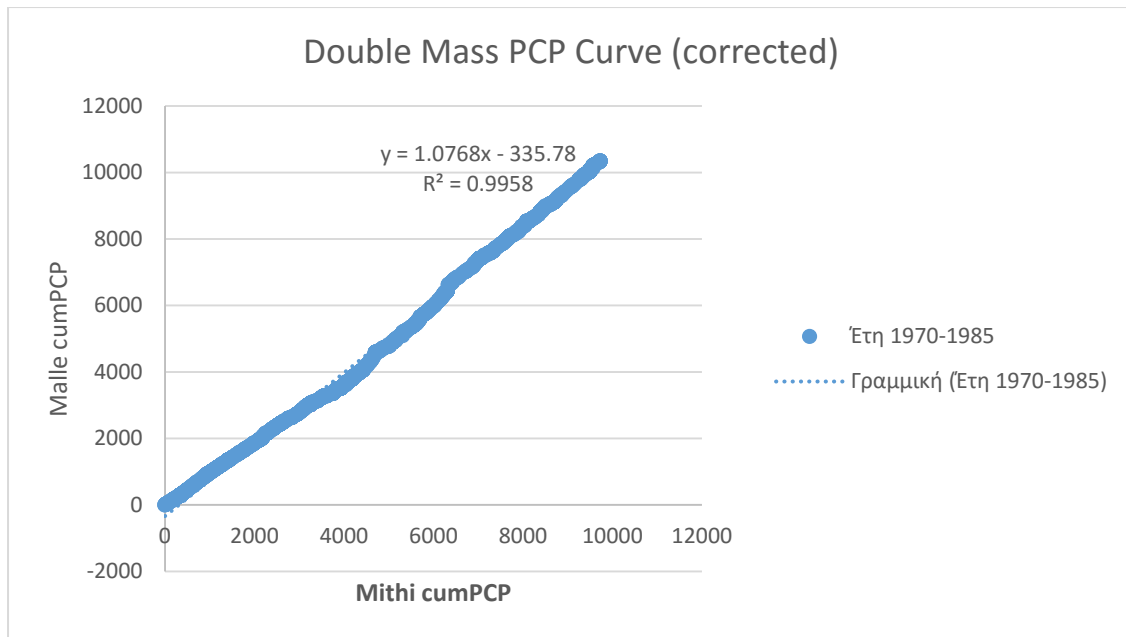
Κατόπιν, ακολουθεί το διάγραμμα 4.2.4 όπου γίνεται σύγκριση των αθροιστικών δεδομένων για τους δύο σταθμούς στη διάρκεια της περιόδου 1970-1985. Όπως προκύπτει από αυτό, από το έτος 1977 κι έπειτα η καμπύλη των δεδομένων των παρατηρήσεων του σταθμού Μαλλέ παρουσιάζει απόκλιση κι επομένως τα δεδομένα απαιτούν διόρθωση.



xii. Διάγραμμα 4.2.4: Αθροιστικά δεδομένα βροχοπτώσεων και για τους δύο σταθμούς. Έτη 1970-1985.

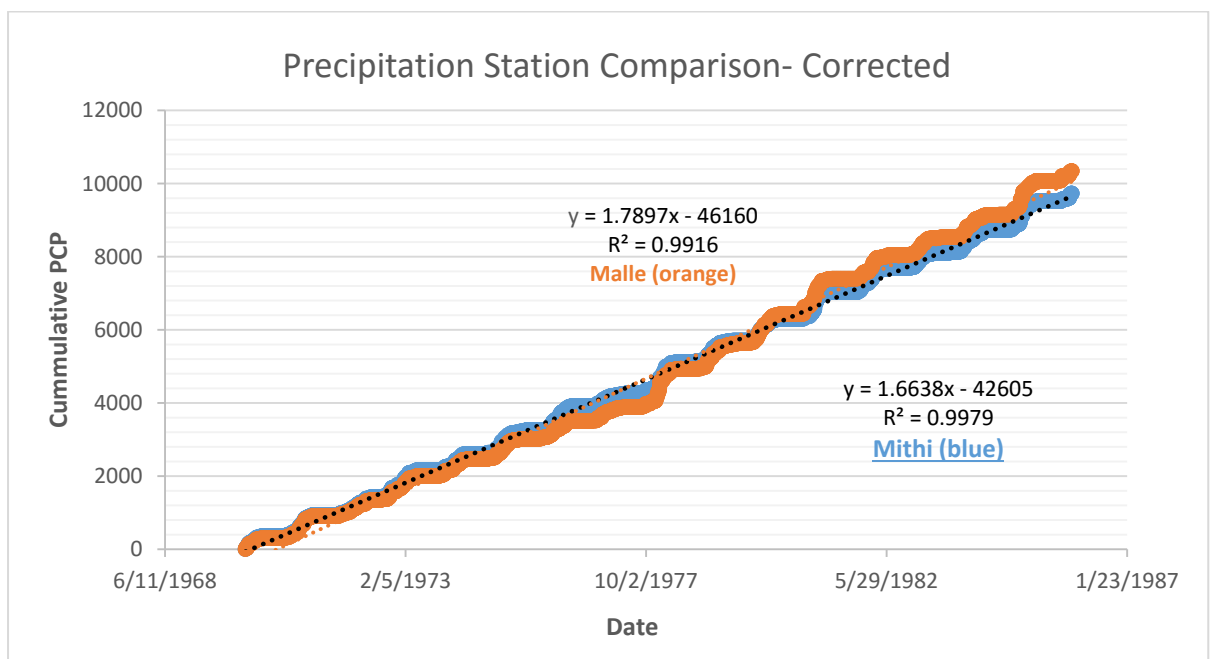
Η διόρθωση επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό των αρχικών στοιχείων του σταθμού Μαλλέ επί το λόγο των κλίσεων των δύο τμημάτων της αθροιστικής καμπύλης (της κλίσης του νεότερου προς την κλίση του παλαιότερου, Διάγραμμα 4.4). Ο λόγος των κλίσεων των δύο διαγραμμάτων αποτελεί το διορθωτικό συντελεστή και ισούται με $\frac{1,1804}{1,511} = 0,78$. Έτσι, εξάγονται τα νέα δεδομένα για τις παρατηρήσεις βροχόπτωσης του σταθμού Μαλλέ, όπου μετά υπολογίζονται και οι νέες αθροιστικές τιμές για τον εν λόγω σταθμό.

Ακολούθως, παρουσιάζεται το διάγραμμα 4.2.5 της διπλής αθροιστικής καμπύλης για τους δύο σταθμούς, με τα διορθωμένα πλέον δεδομένα των παρατηρήσεων βροχόπτωσης.



xiii. Διάγραμμα 4.2.5: Διπλή αθροιστική καμπύλη βροχομετρικών σταθμών κατόπιν διόρθωσης

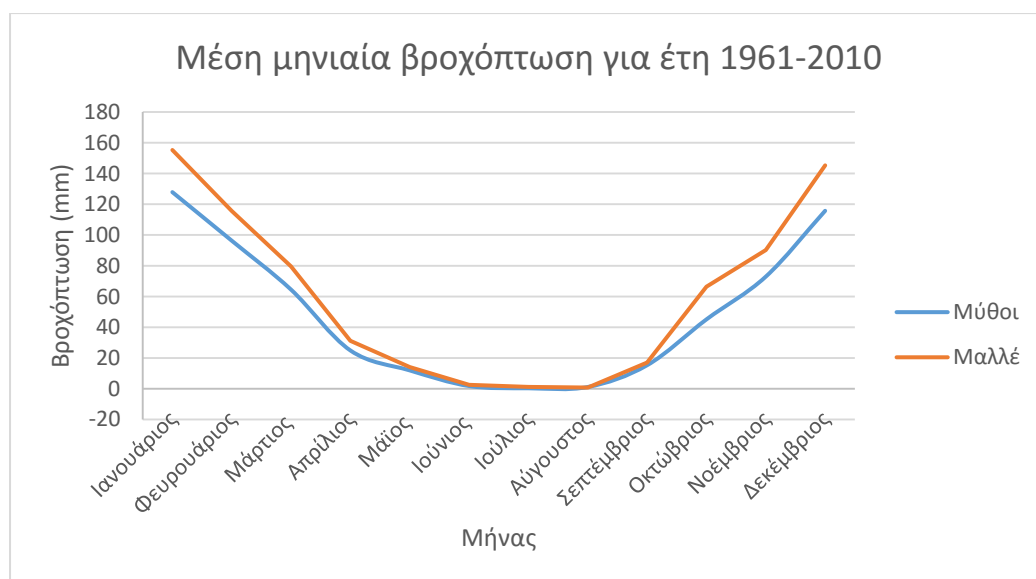
Τέλος, γίνεται επαλήθευση για τα νέα δεδομένα με το διάγραμμα 4.2.6 αθροιστικών καμπυλών για τους δύο σταθμούς, Μαλλέ και Μύθοι στα έτη 1970-1985. Καθίσταται εμφανές πλέον ότι οι βροχομετρικές παρατηρήσεις για τους δύο σταθμούς σχεδόν ταυτίζονται.



xiv. Διάγραμμα 4.2.6: Αθροιστικά δεδομένα βροχοπτώσεων και για τους δύο σταθμούς κατόπιν διόρθωσης. Έτη 1970-1985.

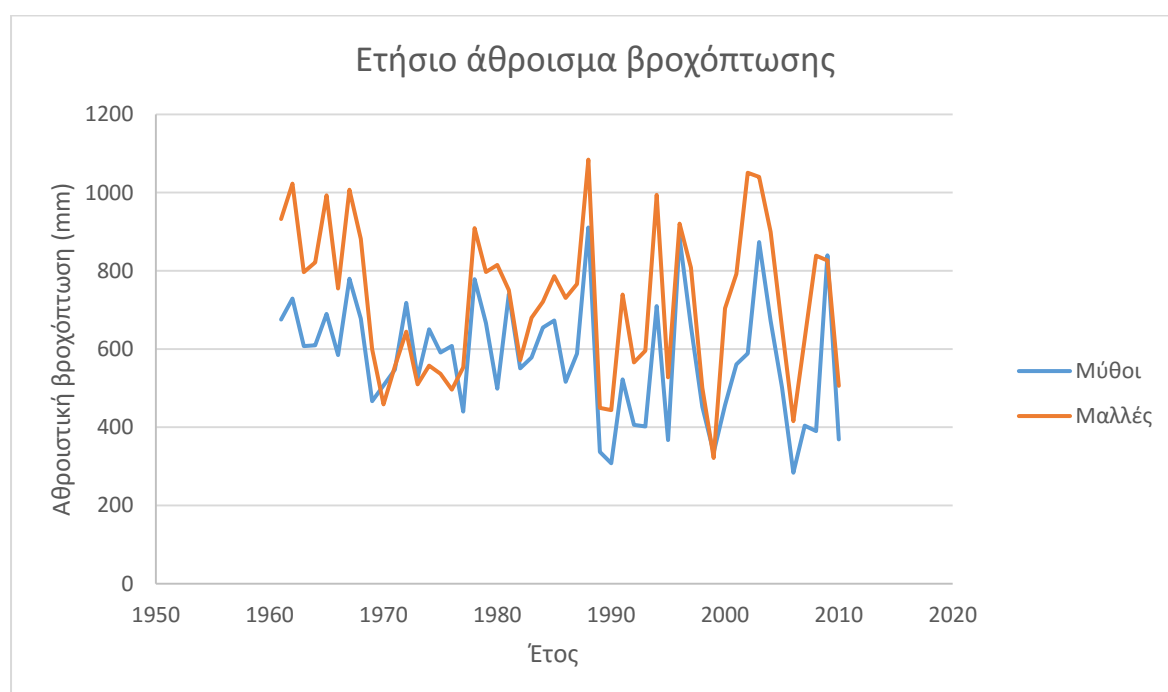
Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, όπως για παράδειγμα η αντικατάσταση οργάνου, αλλαγή της θέσεως του, λήψη των μετρήσεων από διαφορετικό παρατηρητή κλπ. Συνεπώς, για να είναι οι βροχομετρικές παρατηρήσεις ομογενείς, οι παράγοντες αυτοί πρέπει να παραμένουν αμετάβλητοι, πράγμα που πολλές φορές είναι αδύνατο να συμβεί. Έτσι δημιουργούνται σφάλματα στις μετρήσεις για τη διόρθωση των οποίων απαιτείται χρήση της προαναφερθείσας μεθόδου.

Το Διάγραμμα 4.2.7 παρουσιάζει τις μέσες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με τις μετρήσεις των δύο σταθμών, Μαλλές και Μύθοι. Όπως προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα οι περισσότερες βροχοπτώσεις σημειώνονται κατά τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο ενώ κατά τους θερινούς μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο οι βροχοπτώσεις είναι μηδενικές. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και τους μήνες που υπάρχουν βροχοπτώσεις το ύψος τους είναι σχετικά χαμηλό, με μέγιστο αυτό της τάξεως των 130-160mm. Τέλος, παρατηρείται μία μικρή διαφορά στο ύψος της βροχόπτωσης καθώς ο σταθμός Μαλλές έδωσε παρατηρήσεις με ελαφρώς μεγαλύτερα ύψη βροχής απ' ότι ο σταθμός Μύθοι. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στη διαφορά υψομέτρου, λόγω του ορεογραφικού φαινομένου, καθώς ο σταθμός Μαλλές βρίσκεται στα 590 m, σε αντίθεση με τον άλλο που τοποθετείται σε υψόμετρο 200m.



XV. Διάγραμμα 4.2.7: Μέση μηνιαία βροχόπτωση λεκάνης απορροής Μύρτου. Έτη 1961-2010.

Αναλύοντας τις ετήσιες μετρήσεις αθροιστικών βροχοπτώσεων παρατηρείται ότι ο μέγιστες και ελάχιστες ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά και για τους δύο σταθμούς. Και σε αυτήν την περίπτωση ο σταθμός Μαλλές δίνει μετρήσεις με μεγαλύτερα ύψη βροχοπτώσεων το οποίο όπως προαναφέρθηκε πιθανώς να συμβαίνει λόγω του ορογραφικού φαινομένου. Τέλος, το ετήσιο ύψος υετού δεν παρουσιάζει κάποια αυξητική είτε μειωτική συμπεριφορά. Αντιθέτως, σημειώνει διάφορες αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια της μελετώμενης περιόδου 1961-2010 με ελάχιστη τιμή τα 300 mm και μέγιστη τα 900 mm. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις εμφανίζονται στο διάγραμμα 4.2.8 που ακολουθεί.

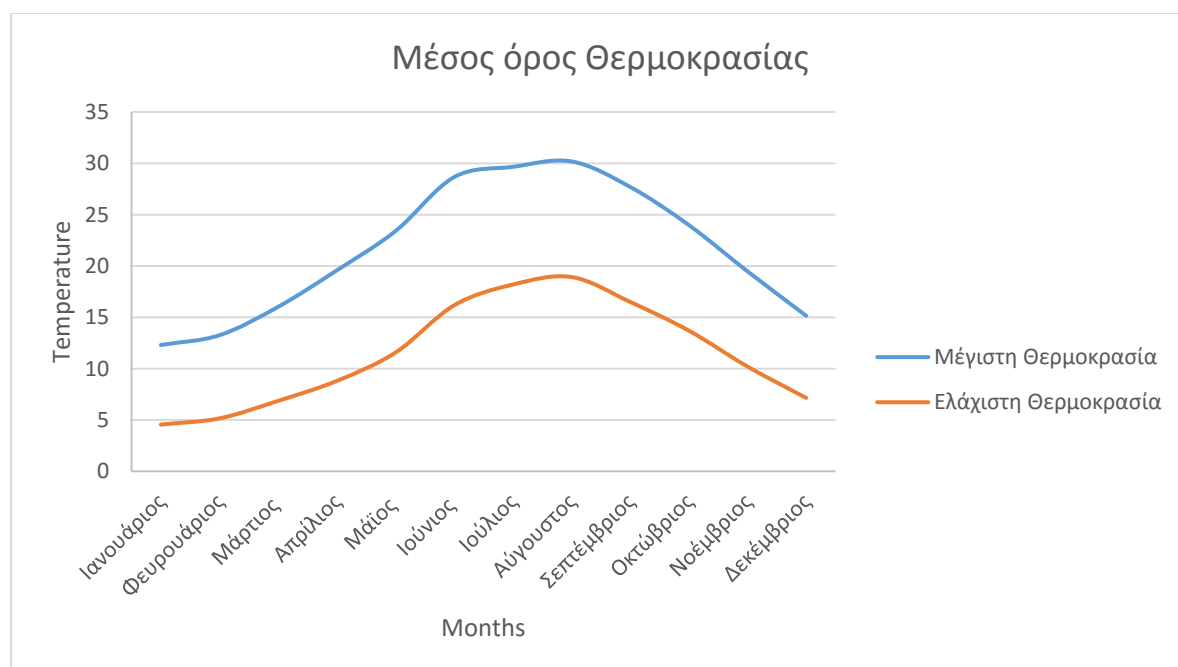


ΧVΙ. Διάγραμμα 4.2.8: Αθροιστική ετήσια βροχόπτωση. Περίοδος 1961-2010.

4.2.2. Θερμοκρασία

Κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων θερμοκρασίας, παρατίθενται τα διαγράμματα για τη μέση μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (°C) για τους σταθμούς Αβδού, Καψάλι και Καστέλι κατά την περίοδο 1961 έως 2009.

Παρατηρώντας το διάγραμμα 4.2.9 συμπεραίνουμε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες σημειώνονται τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ οι ελάχιστες κατά τους μήνες Δεκέμβριο έως και Φεβρουάριο.



xvii. Διάγραμμα 4.2.9: Μέση μηνιαία θερμοκρασία για τα έτη 1961-2009

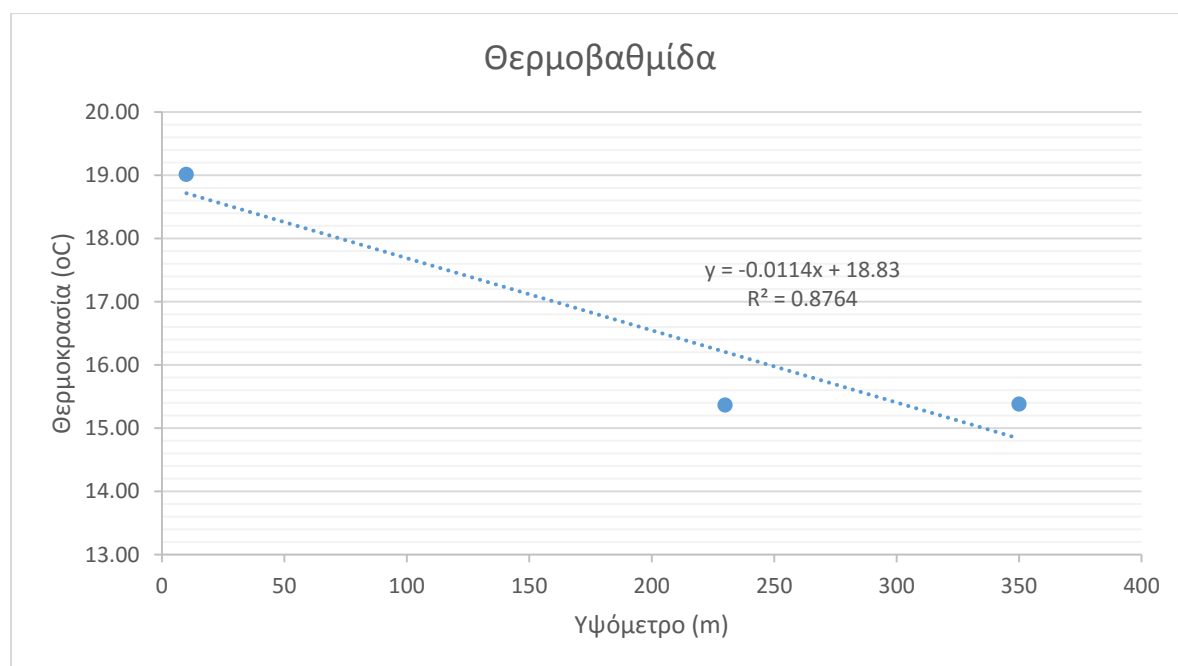
- **Θερμοβαθμίδα**

Για την παρούσα μελέτη έγινε υπολογισμός της θερμοβαθμίδας της περιοχής της λεκάνης απορροής. Οι διαθέσιμοι μετεωρολογικοί σταθμοί είναι τρεις Αβδού, Καψάλι και Καστέλι. Η θερμοβαθμίδα υπολογίστηκε με βάση την ετήσια θερμοκρασία του κάθε σταθμού για τα υδρολογικά έτη 1961-1962 έως 1984-1985 και το υψόμετρο του σταθμού (Διάγραμμα 4.2.9). Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του υψομέτρου και προσαρμόστηκε η γραμμική παλινδρόμηση δεδομένου ότι η καμπύλη αυτή ερμηνεύει με τον καλύτερο τρόπο το φαινόμενο στη συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, προέκυψε ότι η μέση μείωση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο είναι $-11,4^{\circ}\text{C}$ ανά 1000 m. Η τιμή αυτή της θερμοβαθμίδας δεν ταυτίζεται με τη θερμοβαθμίδα της Κρήτης. Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι η θερμοβαθμίδα για αδιαβατικές συνθήκες είναι $-6^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$. Επειδή στην προκειμένη περίπτωση η ευρεθείσα τιμή της θερμοβαθμίδας δεν αντιστοιχεί στα τοπικά δεδομένα και αυτό θα

δημιουργούσε πρόβλημα στη βαθμονόμηση του μοντέλου ως τελική τιμή θερμοβαθμίδας λήφθηκε αυτή των $-6^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$.

Σταθμός	Αβδού	Καψάλι	Καστέλι
Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	15.36	19.01	15.38
Υψόμετρο (m)	230	10	350

χviii. Πίνακας 4.2.1: Μέση θερμοκρασία και υψόμετρο μετεωρολογικών σταθμών



χix. Διάγραμμα 4.2.9: Θερμοβαθμίδα της λεκάνης απορροής

4.3. Δεδομένα υδραυλικών απολήψεων

Για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Μύρτου έχουμε λάβει δεδομένα αρδεύσεων από την Περιφέρεια Κρήτης τα οποία είναι στο Διαχειριστικό Σχέδιο Κρήτης. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι αντλείται νερό από την υπολεκάνη 15 (η οποία αποτελείται από ελαιώνες) και αξιοποιείται για τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής.

Σύμφωνα με αυτά, η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση ισούται με:

$$\begin{aligned} \text{Υψος ύδατος} \cdot \text{Εμβαδό λεκάνης} &= \\ 144 \text{ mm/year} \cdot 0,35 \text{ km}^2 &= \\ 0,144 \text{ m/year} \cdot 0,35 \cdot 10^6 \text{ m}^2 &= 50400 \text{ m}^3/\text{year} \end{aligned}$$

4.4. Λοιπά δεδομένα εισαγωγής και χάρτες

Για τη μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής εκτός από τα ημερήσια δεδομένα παροχής και τα μετεωρολογικά - κλιματικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν και τα εξής δεδομένα:

- ✓ Το ψηφιακό ανάγλυφο της Κρήτης, DEM (25x25) (Digital Elevation Model), το οποίο πρώτα κόπηκε από το αντίστοιχο της Ελλάδας. Κατόπιν έγινε εστίαση στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του ποταμού Μύρτου.
- ✓ Ο χάρτης χρήσεων γης Κρήτης όπως επεξεργάστηκε από το χάρτη επιφανειακής κάλυψης του Corine Land Cover 2000.
- ✓ Τοπογραφικός χάρτης με δεδομένα Elevation Bands τα οποία αναφέρονται σε κάθε 200 m υψόμετρο και βάσει της κλίσης, της θερμοκρασίας υπολογίζεται από το μοντέλο η βροχόπτωση/χιονόπτωση, καθώς και η αλλαγή της εξατμισοδιαπνοής.
- ✓ Ο υδρογεωλογικός χάρτης της Κρήτης στο σύστημα συντεταγμένων ETRS 1989 LAEA

5. Αποτελέσματα

5.1. Βαθμονόμηση μοντέλου

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Γίνεται με τη μεταβολή των τιμών των διάφορων παραμέτρων μέχρι οι τιμές του μοντέλου και του πεδίου να συγκλίνουν ικανοποιητικά. Οι παράμετροι οι οποίες συνήθως επιλέγονται είναι εκείνες με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Επιπλέον, επιλέγονται εκείνες με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή παραμέτρους για τις οποίες δεν υπάρχει ούτε ικανοποιητική μέτρηση στο πεδίο αλλά ούτε ικανοποιητική φυσική ερμηνεία (Aldakos, 2014).

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η χειρωνακτική βαθμονόμηση του μοντέλου με τη μεταβολή σε παραμέτρους που παίζουν τον σπουδαιότερο ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών, ενώ ταυτόχρονα δεν υφίσταται συγκεκριμένη γνώση για το μέγεθός τους (Magdali, 2012). Σκοπός της είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρήσεων. Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση συντελείται μία μεταβολή τη φορά που συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στο ποτάμι (trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel et al., 2007).

Γενικά, η βαθμονόμηση του μοντέλου δεν υπήρξε ιδιαίτερα ευθύγραμμη διαδικασία. Ανασταλτικός παράγον ήταν η ακρίβεια των υδρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν με αποτέλεσμα η διαδικασία της βαθμονόμησης να γίνει αρκετά χρονοβόρα και να μην επιτευχθεί η άριστη συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων του μοντέλου και του πεδίου. Πιθανά αίτια αυτού του προβλήματος σχετίζονται με την καταλληλότητα της θέσης του υδρομετρικού σταθμού, τον τύπο και την κατάσταση λειτουργίας του οργάνου των μετρήσεων και τέλος με την αξιοπιστία και τη γνώση του παρατηρητή που είναι υπεύθυνος για τις μετρήσεις. Γενικά, οι μετρήσεις στάθμης παροχής θα πρέπει να γίνονται τακτικά και κυρίως σε

περιόδους υψηλών ροών για την επίτευξη καλύτερης και πιο ενημερωμένης καμπύλης στάθμης-παροχής. Εάν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό τα αποτελέσματα που εξάγει ο υδρομετρικός σταθμός ενδεχομένως παρουσιάσουν ελλείψεις κι έτσι καθίσταται δύσκολη η διαδικασία αναπαράστασής τους.

Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με το μειονέκτημα του SWAT να δίνει ίδια αποτελέσματα με πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων (equifinality problem) και το γεγονός ότι οι ποσοτικοί δείκτες (NSE, RSR, PBIAS) εμφάνιζαν αποδεκτές τιμές για βαθμονομήσεις οι οποίες με βάση τα υδρογραφήματα απέκλιναν, ανάγκασαν το μελετητή να επαναξιολογήσει αρκετές προτάσεις βαθμονόμησης τις οποίες είχε ολοκληρώσει, ώστε η καταληκτική να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα τις φυσικές διεργασίες αλλά και να μπορεί να προβλέπει όσο το δυνατόν ακριβέστερα σε βάθος χρόνου και ποικιλία περιπτώσεων.

5.2. Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Για τον ποταμό Μύρτο, ως περίοδος βαθμονόμησης επιλέχθηκε τελικά το διάστημα μεταξύ των υδρολογικών ετών 1976 έως 1981 με ημερήσιο βήμα. Η λεκάνη απορροής συνολικής έκτασης 96 km² χωρίστηκε σε 17 υδρολογικές μονάδες απόκρισης, καθεμία από τις οποίες εμφανίζει ίδια χαρακτηριστικά εδάφους, ίδια κλίση, καθώς και ίδια χρήση γης, σε όλη της την έκταση. Για την ίδια χρονική περίοδο εξετάστηκαν οι ποσοτικοί δείκτες (NSE, RSR, PBIAS) και δημιουργήθηκαν τα σχετικά υδρογραφήματα ώστε να εξετασθεί η επιτυχία προσομοίωσης του μοντέλου. Η διαδικασία ξεκίνησε αρχικά μεταβάλλοντας τις παραμέτρους για όλες τις υπολεκάνες (HRUs) ώστε να καταφέρουν οι προβλέψεις του μοντέλου να πλησιάσουν κάπως τις πραγματικές τιμές, καθώς η απόκλιση αρχικά ήταν αρκετά σημαντική. Κατόπιν, έγινε μεταβολή σε ορισμένες παραμέτρους σε συγκεκριμένες υπολεκάνες ανάλογα με τις χρήσεις γης και τον τύπο εδάφους της κάθε μίας. Αφότου έγινε αυτή η διαφοροποίηση των υπολεκανών, υπολογίστηκε η επιφανειακή απορροή για κάθε υδρολογική μονάδα απόκρισης και στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση όλου του ποτάμιου συστήματος συνολικά. Οι κύριες παράμετροι που μεταβλήθηκαν χειρωνακτικά κατά τη βαθμονόμηση παρατίθενται στον πίνακα 5.2.1 που ακολουθεί.

Παράμετρος	Περιγραφή	Εύρος τιμών στο SWAT	Εύρος τιμών στη λεκάνη απορροής
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: Soils (.sol)			
SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	0 - 3500	100-1000
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/h)	0 - 2000	5.65 - 11.54
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0 - 1	0.9
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: Subbasin (.Sub)			
TLAPS	Temperature laps rate (°C/km)	-50 - 50	-6
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: HRU (.Hru)			
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0 - 1	0.55
EPCO	Plant uptake compensation factor	0 - 1	0.9
OV_N	Manning's value for overland flow	0.01 - 30	1
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0 - 180	15
SLSOIL	Slope length for subsurface flow (m)	0 - 150	50 - 100
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: Groundwater (.Gw)			
GWQMIN	Threshold depth water of shallow aquafer required for return flow to occur (mm)	0 - 5000	4800
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient (mm)	0.02-0.2	0.1
GW_DELAY	Groundwater delay	0 - 500	15

RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction (fraction)	0 - 1	0 - 0.27
ALPHA_BF	Base flow alpha factor	0 - 1	0.7
SHALLST	Initial depth of water in the swallow aquifer	0 - 5000	700
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: Management (.Mgt)			
CN2	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	35 - 98	45 - 70
Πίνακας εισαγωγής δεδομένων: General Watershed Parameters			
TRNSRCH	Fraction of transmission losses for the main channel that enter the main aquifer. The remainder if the transmission losses enter bank storage.	0 - 1	0

XX. Πίνακας 5.2.1: Σημαντικές παράμετροι για τη λειτουργία - απόδοση του μοντέλου και το τυπικό εύρος στη λεκάνη απορροής και το μοντέλο

5.2.1 Ποσοτικοί Δείκτες

Μεταξύ των διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων συγκαταλέγεται ο δείκτης αποδοτικότητας Nash - Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS - PBIAS), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE) καθώς και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root Mean Square Error – Standard deviation of measured data Ratio - RSR). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν για τη σύγκριση των προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής κατά τη διάρκεια των υδρολογικών ετών της βαθμονόμησης.

- Δείκτης NSE

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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Όπου,

$Q_{sim,i}$: η προσομοιωμένη χρονοσειρά

$Q_{obs,i}$: η παρατηρημένη χρονοσειρά

$\overline{Q_{obs}}$: ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς

n : το μήκος της χρονοσειράς

Η βέλτιστη και ταυτόχρονα μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και λαμβάνεται όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις προσομοιωμένες. Οι τιμές που παίρνει είναι από το $-\infty$ έως τη μονάδα και για να θεωρούνται έμπιστα τα αποτελέσματα του μοντέλου για την παροχή, πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 0.5.

- Δείκτης PBIAS

Ο δείκτης PBIAS μετρά την μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρημένες και έχει την δυνατότητα να καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999). Ο δείκτης έχει τη μορφή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$PBIAS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \cdot 100\%}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})}$$

Όπου,

Q_{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

Q_{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

Για να θεωρηθεί βαθμονομημένο το μοντέλο, πρέπει η απόλυτη τιμή του δείκτη να είναι μικρότερη του 25.

- Δείκτες RMSE και RSR

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

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2} \right]}{\left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}{n}} \right]}$$

Για να είναι αποδεκτές οι προσομοιώσεις του μοντέλου για τη ροή του ποταμού, πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του 0.7.

Συνοψίζοντας, τα επιτρεπτά όρια των δεικτών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.2:

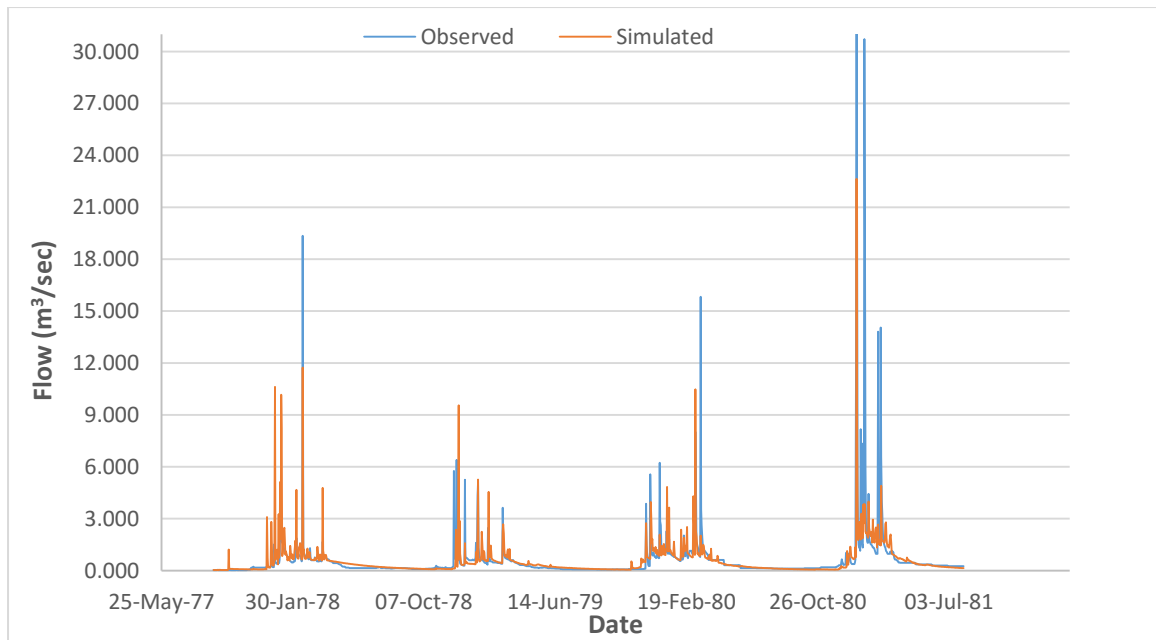
Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.60 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.50$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

xxί. Πίνακας 5.2.2: Κριτήρια αξιολόγησης της προσομοίωσης βάσει στατιστικών δεικτών (ΠΗΓΗ: Moriasi & Arnold 2007)

5.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων παροχής

Για τη λεκάνη του Μύρτου υπάρχουν διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα παροχής για την περίοδο 1970 έως 1985. Αρχικά εξετάστηκε η παροχή καθ' όλη τη διάρκεια του διαστήματος αυτού, κατά πόσο καλά μπορεί να προσαρμοστεί στα πραγματικά δεδομένα. Τελικά, η χρονοσειρά βαθμονόμησης επιλέχθηκε να είναι η περίοδος μεταξύ των υδρολογικών ετών 1977 έως 1981, ενώ υπήρξε μια περίοδος 7 χρόνια πριν για προθέρμανση του μοντέλου (ξεκίνησε να τρέχει και να δίνει ημερήσια αποτελέσματα από το 1970). Η περίοδος αυτή, μεταξύ των υδρολογικών ετών 1977 έως 1981, ήταν το μοναδικό διάστημα που η παροχή του μοντέλου προσομοίωνε σχετικά καλά την πραγματική μέσα στα 15 έτη που διατείθονταν τα δεδομένα.

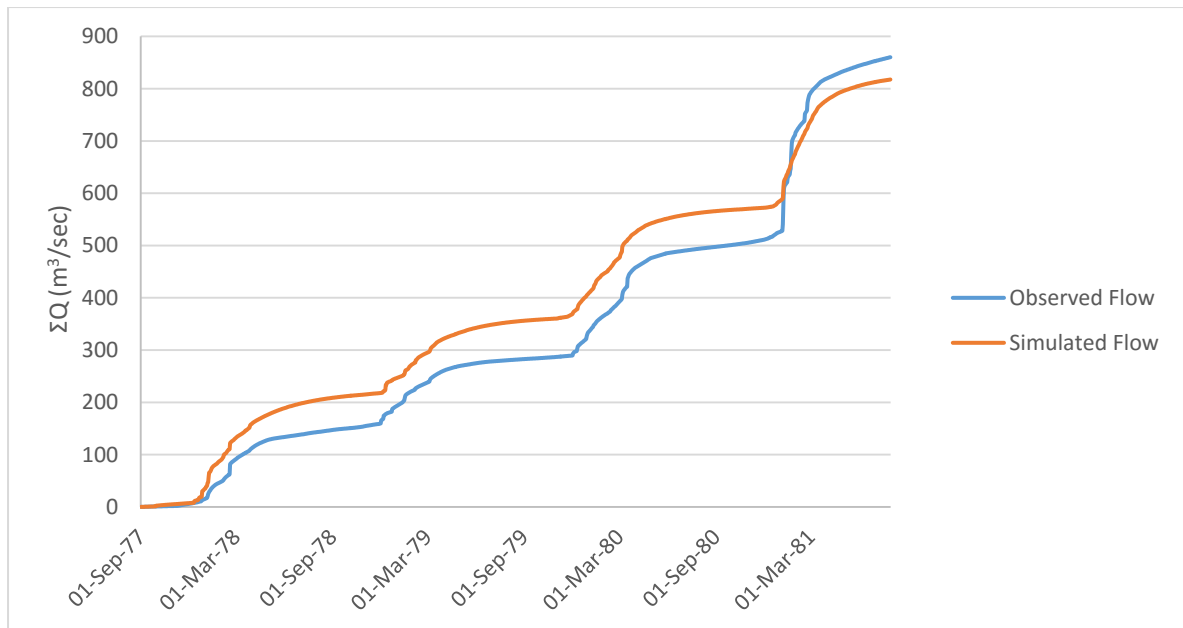
Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ήταν σχετικά ικανοποιητικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω υδρογράφημα (Διάγραμμα 5.3.1). Το ίδιο επαληθεύεται και από το δείκτη $\text{PBIAS} = +4,89$ ο οποίος δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και συνεπώς επαληθεύεται μεγάλη προγνωστικότητα του μοντέλου. Σχετικά με τους άλλους δύο υπό εξέταση δείκτες, πλησιάζουν αλλά δεν καταφέρνουν να φτάσουν τα όρια του ικανοποιητικού. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τον κάθε ένα είναι $\text{RSR} = 0,73$ και $\text{NSE} = 0,47$, οι οποίες κρίνονται ως μη ικανοποιητικές για την προσομοίωση, πλησιάζουν όμως αρκετά στα όρια να θεωρηθούν ικανοποιητικές (τα οποία είναι $\text{RSR} \leq 0,70$ και $\text{NSE} > 0,50$).



χχιί. Διάγραμμα 5.3.1: Σύγκριση τιμών παροχής μοντέλου και πεδίου κατά τα υδρολογικά έτη 1977-1981

Στο γράφημα 5.3.2. εμφανίζονται οι αθροιστικές παροχές μοντέλου και πεδίου συναρτήσει του χρόνου για τα υδρολογικά έτη 1977-1981. Χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια δεδομένα παροχής σε m^3/sec και υπολογίστηκε το άθροισμά τους. Και σε αυτήν την περίπτωση βάση του διαγράμματος υποδεικνύεται καλή σχέση μεταξύ των δεδομένων των δύο παροχών με τελική απόκλιση στις δύο καμπύλες της τάξεως του 4,9%. Όπως φαίνεται και στο γράφημα, κατά το τέλος του 1977 μέχρι και τέλος του 1980, από το μοντέλο υπάρχει μία υπερεκτίμηση της πραγματικής παροχής και οι τιμές των αποτελεσμάτων είναι ελαφρώς πιο αυξημένες. Ωστόσο βλέπουμε ότι οι δύο καμπύλες ακολουθούν την ίδια κλίση πράγμα που δείχνει ότι η πρόβλεψη μπορεί να ανταποκριθεί στα πραγματικά δεδομένα με ένα μικρό υπέρ-υπολογισμό αυτών, ο οποίος φαίνεται να εξαλείφεται στην τελευταία χρονιά της βαθμονόμησης.

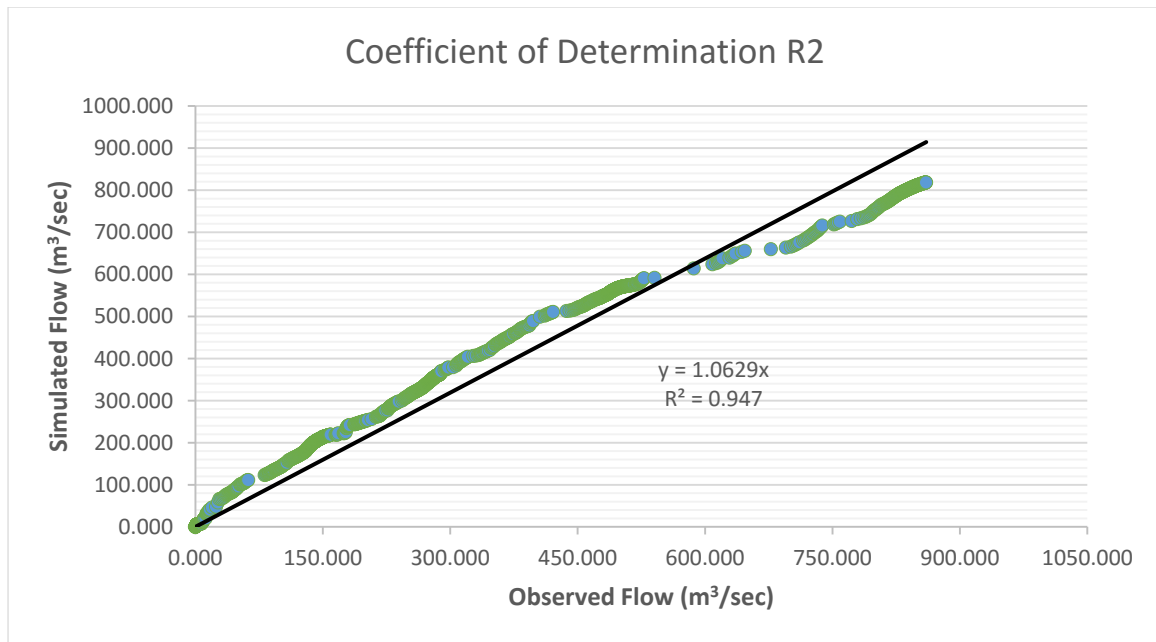
Πιθανά αίτια αυτής της υπερεκτίμησης στην παροχή είναι τα δεδομένα των βροχοπτώσεων από τους δύο βροχομετρικούς σταθμούς, που εισάχθηκαν στο μοντέλο, τα οποία και αυτά με τη σειρά τους ενδεχομένως να μην υπολογίστηκαν με ακρίβεια, είτε απλώς η πραγματική παροχή να μη μετρήθηκε από αξιόπιστα μέσα. Σχετικά με τη συνάφεια των δεδομένων παροχής και βροχόπτωσης γίνεται λόγος σε παρακάτω διάγραμμα του παρόντος κεφαλαίου.



XXiii. Διάγραμμα 5.3.2: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή μοντέλου και πεδίου. Υδρολογικά έτη 1977-1981.

Η γραφική σύγκριση των χρονοσειρών καθώς και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.3.3. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των ημερήσιων αθροιστικών παροχών για τα υδρολογικά έτη 1977-1978 έως 1980-1981. Όπως επαληθεύεται και με το συντελεστή $R^2 = 0,947$ και την κλίση η οποία πλησιάζει αρκετά τη μονάδα, παρατηρείται καλή συσχέτιση των δεδομένων του μοντέλου με αυτά του πεδίου, κάτι που επίσης υποδεικνύει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στα σημεία που φαίνεται να «διακόπτεται» η καμπύλη του γραφήματος δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή και εξετάστηκαν περαιτέρω και οι τιμές των βροχοπτώσεων τις ίδιες ημερομηνίες. Τα σημεία αντιστοιχούν στις ημερομηνίες 18/02/1978, 06/01/1981, 07/01/1981, 08/01/1981, 09/01/1981 και 23/01/1981. Στις εν λόγω ημερομηνίες εμφανίζονται απότομα υψηλότερες τιμές παροχής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται απότομα και η αθροιστική παροχή, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερα κενά μεταξύ των προηγούμενων και επόμενων τιμών παροχής. Το παραπάνω συμπέρασμα φάνηκε να επιβεβαιώνεται και από τις βροχοπτώσεις. Εκείνες τις ημερομηνίες μετρήθηκαν να είναι ιδιαίτερα αυξημένες και αν ληφθεί υπόψη ότι όλα τα σημεία αναφέρονται σε χειμερινούς μήνες (και ότι οι δύο σταθμοί κατέγραψαν κοντινές τιμές ύψους βροχόπτωσης), δε μπορεί να γίνει λόγος ότι υπήρξε κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις των βροχοπτώσεων.



ΧΧΙΝ. Διάγραμμα 5.3.3: Συντελεστής προσδιορισμού για προσομοιωμένη και πραγματική παροχή

5.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων βροχοπτώσης και εξατμισοδιαπνοής

Στο κάτωθι διάγραμμα εμφανίζεται η αθροιστική καμπύλη της προσομοιωμένης παροχής η οποία προκύπτει αθροίζοντας ετησίως τις εν λόγω τιμές παροχής κατά χρονολογική σειρά σε πέρασ 40 χρόνων (έτη 1969-2009). Η καμπύλη που προκύπτει αφορά την απορροή στο σημείο εξόδου της λεκάνης (υπολεκάνη 17) και καλείται αθροιστική καμπύλη απορροής. Η αθροιστική καμπύλη απορροής σε κάθε χρονική στιγμή παρέχει το συνολικό όγκο νερού που πέρασε από το σημείο εξόδου της λεκάνης από την έναρξη των ετών παρακολούθησης.

Η αθροιστική καμπύλη εκφράζεται από την εξίσωση:

$$V = \int_{1969}^{2009} Q(t)dt = \sum_{1969}^{2009} Q(t)dt$$

Όπου,

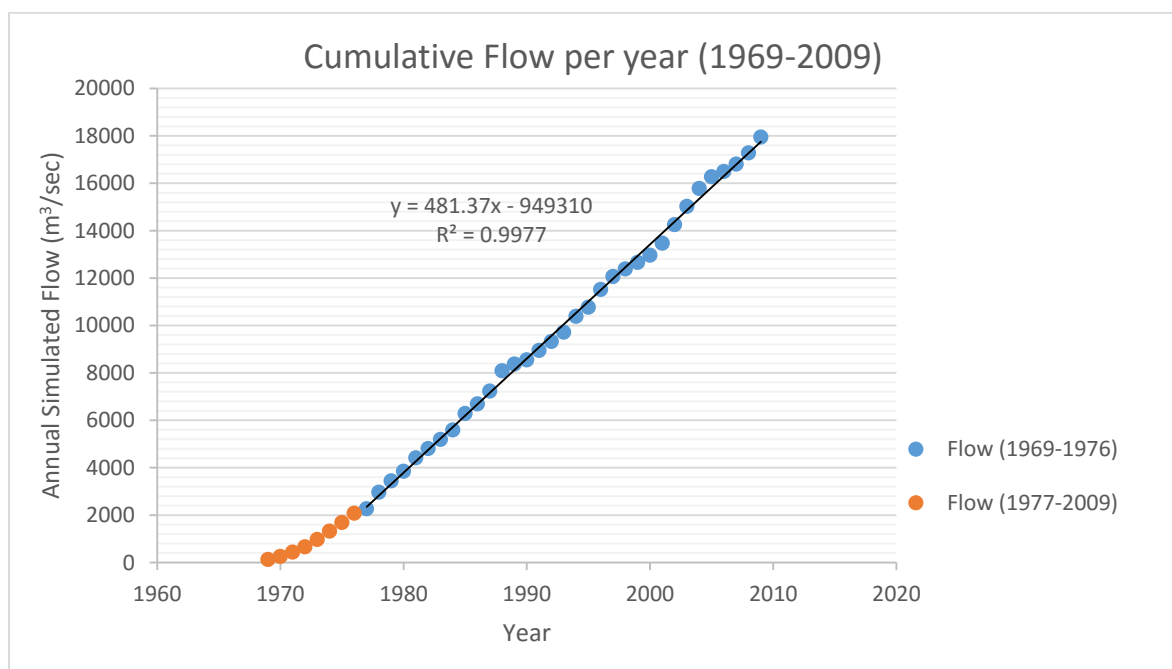
V: ο συνολικός όγκος νερού

Q(t): η παροχή και η ολοκλήρωση γίνεται στο διάστημα από έτος 1969 έως 2009

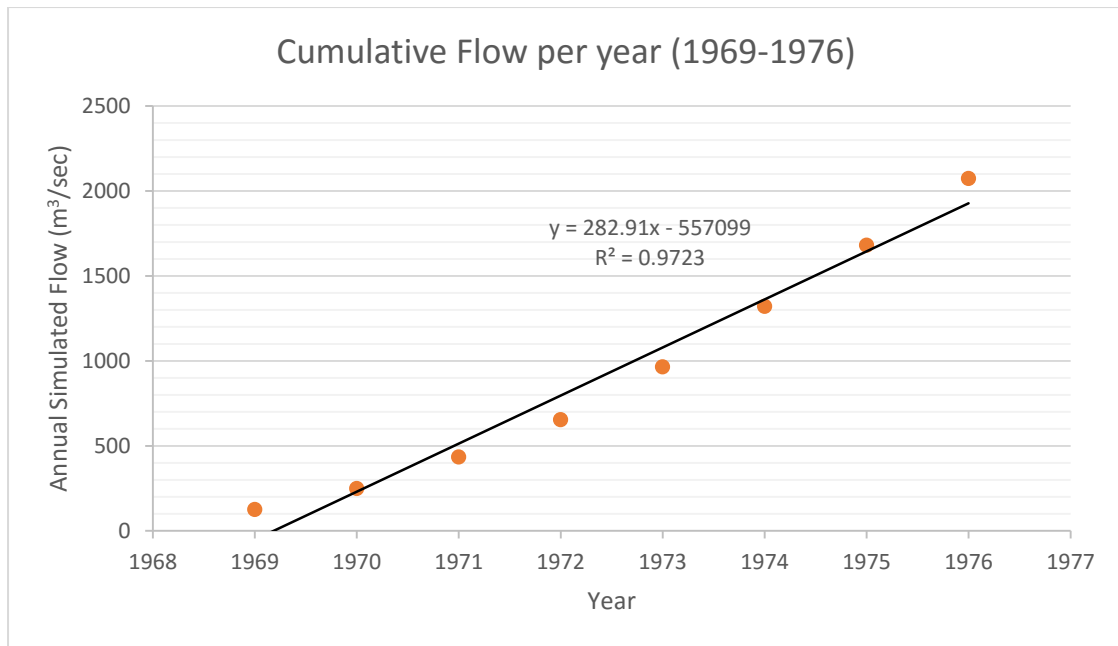
Όπως υποδηλώνει και το διάγραμμα στην προκειμένη περίπτωση έχουμε συνολική απορροή για τα 40 μελετώμενα έτη $17.941 \text{ m}^3/\text{sec}$.

$$V = \frac{17.941 \text{ m}^3/\text{sec}}{40 \text{ έτη}} = 448 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{έτος} = 14.145 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$$

Η ετήσια απορροή από την έξοδο της λεκάνης είναι 14.1 εκατομ. m^3 . Γενικά, τα δεδομένα όπως φαίνεται χαρακτηρίζονται από μεγάλη γραμμικότητα με πιο έντονες αυξομειώσεις παροχής μετά το πέρας του έτους 1975. Όσο περνούν τα χρόνια παρατηρείται αυξητική τάση στην απορροή της λεκάνης. Τα πρώτα επτά έτη (1969-1976) ακολουθούν πιο ομαλή πορεία και έτσι υποδηλώνεται σταθερή παροχή απόληψης. Παράλληλα, στο συγκεκριμένο διάστημα η κλίση που ακολουθεί η αθροιστική παροχή διαφέρει από αυτή των επόμενων ετών όπως φαίνεται και στα δύο παρακάτω γραφήματα 5.4.1 και 5.4.2.

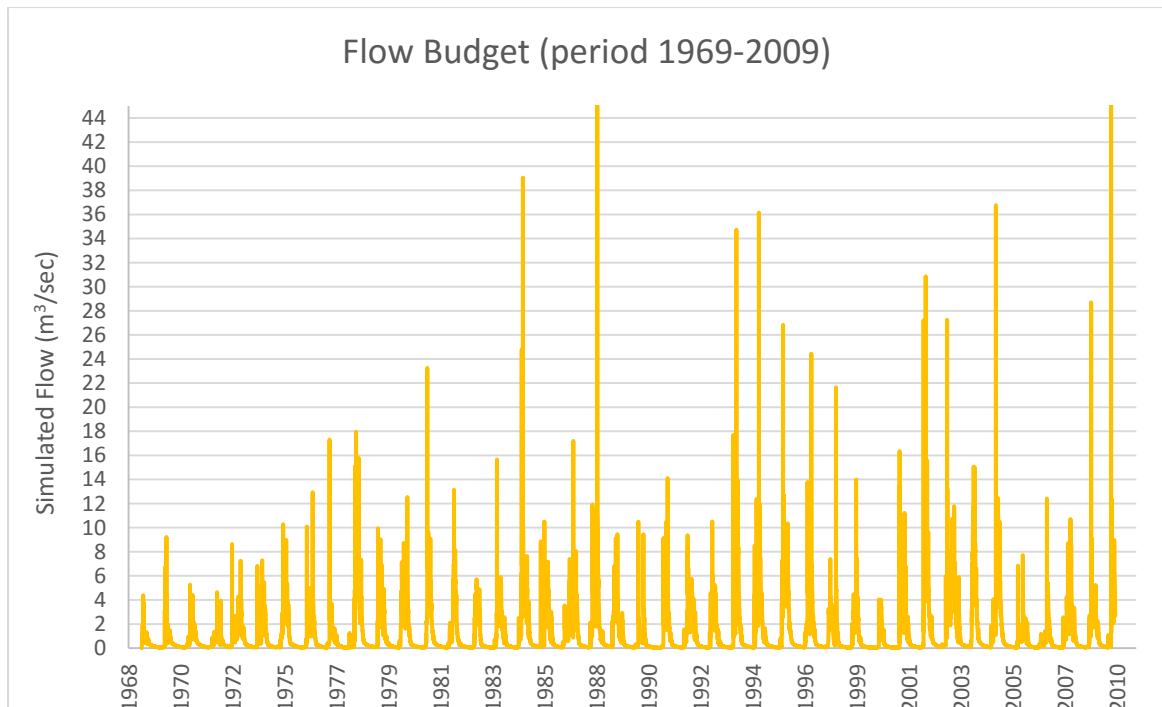


xxv. Διάγραμμα 5.4.1: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-2009.



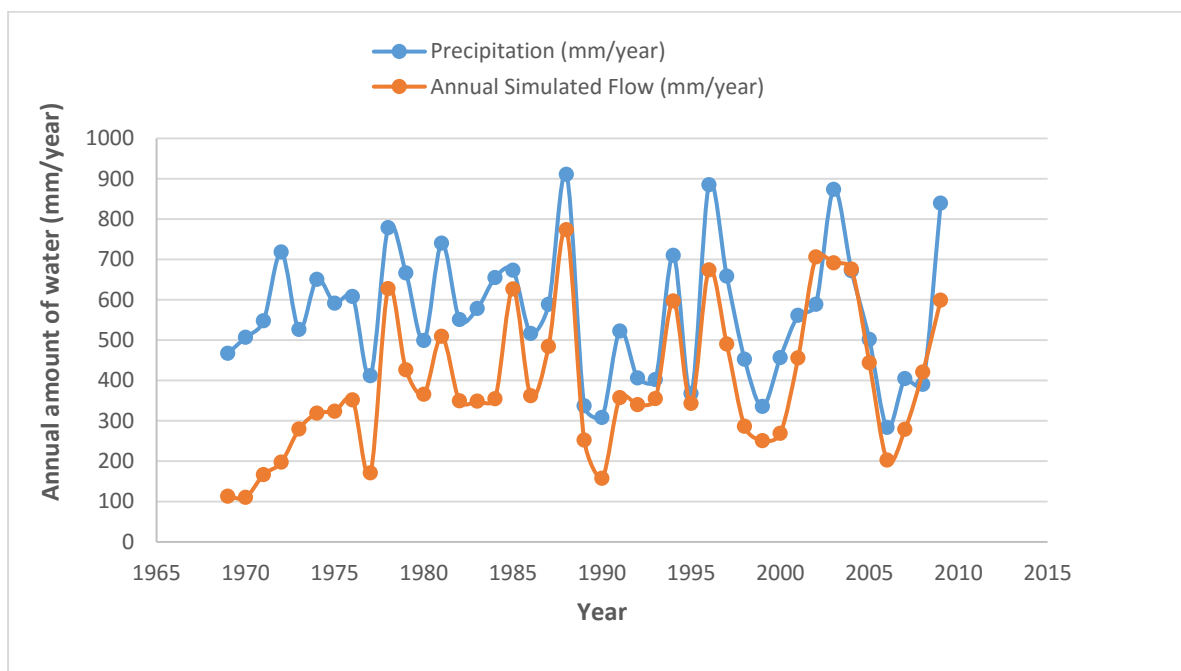
XXVI. Διάγραμμα 5.4.2: Αθροιστική προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-1975.

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το παρακάτω διάγραμμα 5.4.3 ημερήσιας καταγραφής της προσομοιωμένης παροχής για το χρονικό διάστημα 1969-2009. Από το τέλος του έτους 1976 δηλαδή η μεταβολή της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα του συστήματος εμφανίζει μεγαλύτερες εποχικές διακυμάνσεις. Όπως θα γίνει λόγος και παρακάτω, οι τιμές αυτές πιθανόν να παρουσιάζουν σφάλμα.



xxvii. Διάγραμμα 5.4.3: Υπολογισμός προσομοιωμένης παροχής με ημερήσιο βήμα. Έτη 1969-2009.

Περεταίρω διερεύνηση γίνεται σχετικά με τη συμπεριφορά των βροχοπτώσεων και το πώς επηρεάζεται η συνολική απορροή της λεκάνης. Ακολουθώς, εμφανίζεται το διάγραμμα 5.4.4 ετήσιας αθροιστικής βροχόπτωσης (mm/year) και της ετήσιας αθροιστικής παροχής ανά τετραγωνικό χιλιόστο έδαφους (mm/year) για τα έτη 1969-2009. Για την επταετία 1969-1976 είναι εμφανές ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις παροχής, καθώς οι υψηλές τιμές βροχοπτώσεων δε φαίνεται να έχουν κανένα αντίκτυπο στη συμπεριφορά της παροχής η οποία παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Ένα άλλο πιθανό συμπέρασμα που θα μπορούσε να εξαχθεί από αυτό είναι ότι το έδαφος συγκρατεί υψηλά ποσοστά νερού και γι' αυτό εκείνο το διάστημα η απορροή είναι σχετικά πιο χαμηλή. Κατόπιν, τα επόμενα χρόνια μέχρι και το 2009 παρατηρούνται γενικά πιο μεγάλα αθροιστικά ύψη βροχοπτώσεων και αντίστοιχα πιο χαμηλά, με εναλλαγές. Όπως φαίνεται και στο γράφημα εκείνα τα χρόνια η συμπεριφορά της καμπύλης της παροχής ακολουθεί σε γενικές γραμμές αυτήν της βροχόπτωσης. Λόγω των απότομων αυτών αυξομειώσεων και των έντονων πλημμυρικών φαινομένων, το έδαφος δεν προλαβαίνει να απορροφήσει όλο το ποσοστό βροχής που εισέρχεται σε αυτό κι επομένως το μεγαλύτερο μέρος του φεύγει ως απορροή.

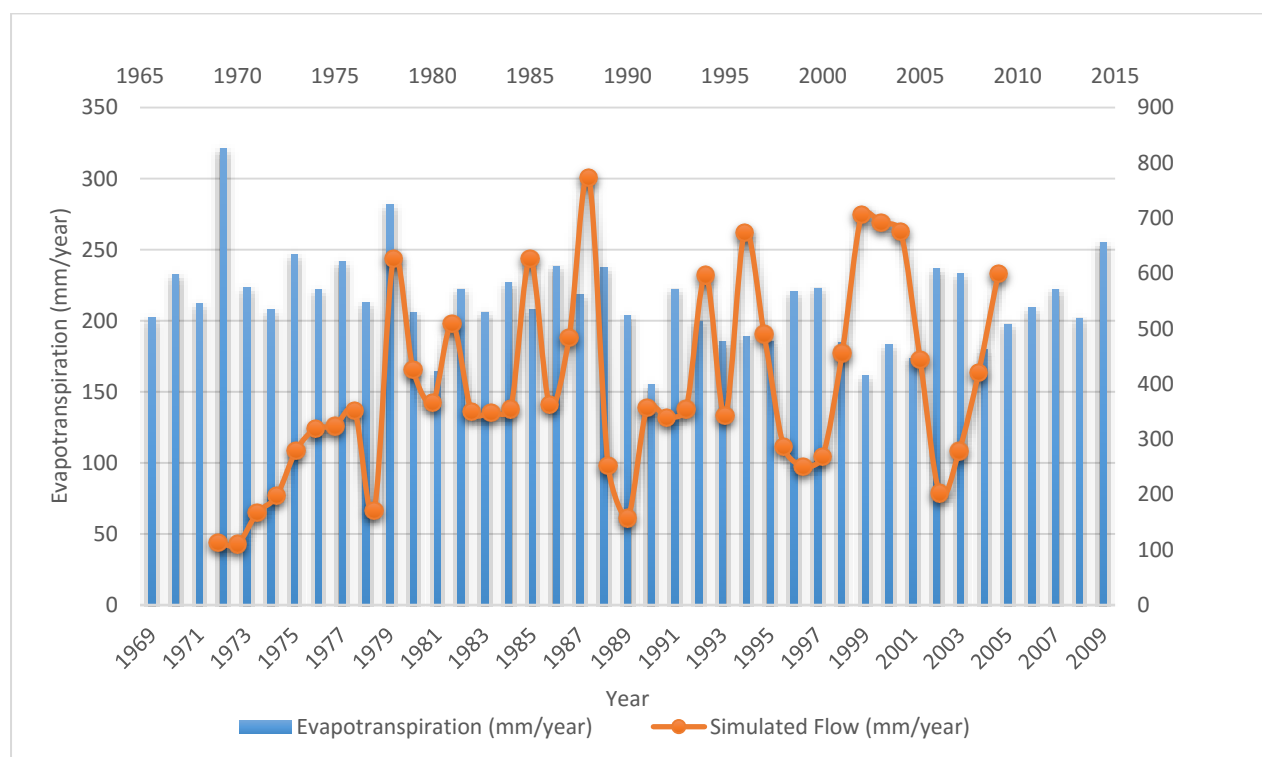


xxviii. Διάγραμμα 5.4.4: Αθροιστική ετήσια παροχή και βροχόπτωση. Έτη 1969-2009.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πορεία της εξατμισοδιαπνοής σε mm/year στο σύνολο των υπολεκανών του ποταμού Μύρτου κατά τη διάρκεια του μελετώμενου χρονικού διαστήματος 1969-2009. Τα αποτελέσματα της εξατμισοδιαπνοής εξήχθησαν με τον παρακάτω τρόπο. Για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε ο μέσος όρος εξατμισοδιαπνοής σε mm ο οποίος πολλαπλασιάστηκε με το εμβαδό της σε mm². Στη συνέχεια έγινε το ετήσιο άθροισμα των παραπάνω γινομένων (εξατμισοδιαπνοή λεκάνης (mm) x εμβαδό (mm²)) και διαιρέθηκε με τη συνολική έκταση της λεκάνης σε mm². Έτσι, για κάθε χρόνο λαμβάνουμε μία μέση τιμή εξατμισοδιαπνοής από όλη την έκταση της λεκάνης απορροής σε mm/year.

Η ροή των υδρατμών στην ατμόσφαιρά στο SWAT περιγράφεται από τις εξισώσεις Penman-Monteith και Priestley-Taylor. Στην προκειμένη περίπτωση η «αντίσταση της επιφάνεια» υπολογίζεται από την αντίσταση των στομάτων του φυτού και έναν δείκτη φυλλικής κάλυψης. Η αντίσταση των στομάτων εκτιμάται συναρτήσει του υδατικού δυναμικού στο φυτό, του φωτός, της θερμοκρασίας και της υγρασίας (Jarvis, 1976).

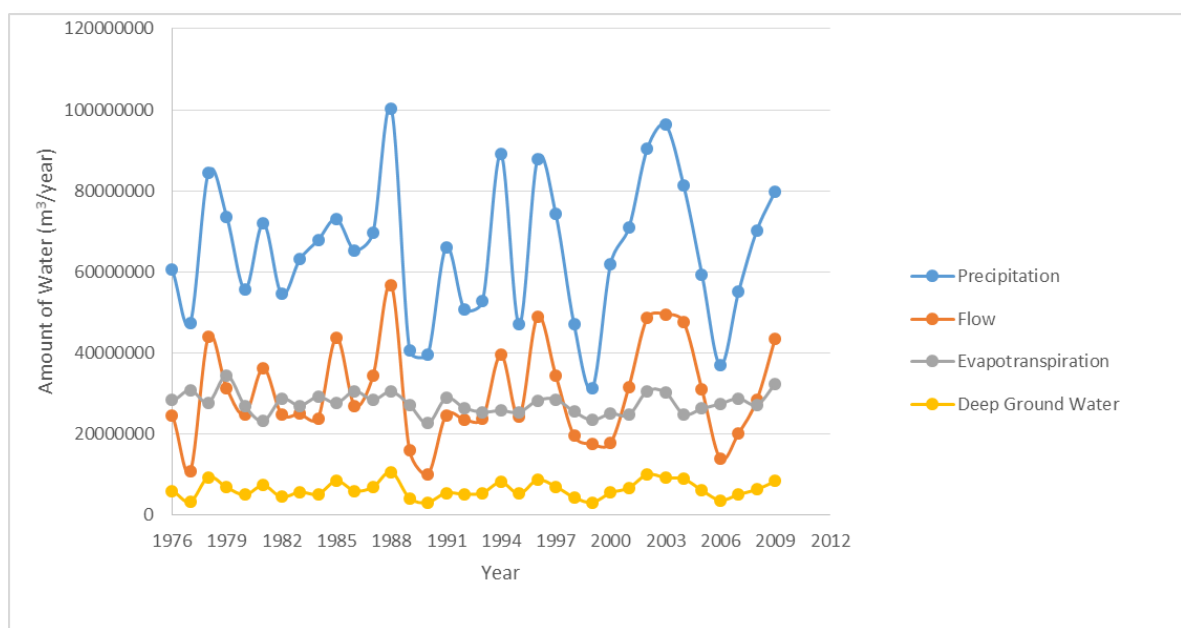
Στο γράφημα 5.4.5 τοποθετείται επιπλέον και η προσομοιωμένη παροχή ανά τετραγωνικό χιλιοστό εδάφους, η οποία αθροίζεται ετησίως στο σημείο εξόδου της λεκάνης. Σε γενικές η εξατμισοδιαπνοή εμφανίζει μια σχετικά σταθερή συμπεριφορά μέχρι το έτος 1988, με εξαίρεση τη χρονολογία 1972. Από το τέλος του 1988 κι έπειτα παρατηρούνται πιο απότομες εναλλαγές στην ποσότητα νερού που εξατμίζεται από και διαπνέεται από τη βλάστηση και το έδαφος. Εν αντιθέσει η παροχή εξόδου του ύδατος από τη λεκάνη απορροής ακολουθεί διαφορετική πορεία με έντονες διακυμάνσεις σε όλο το εύρος του μελετώμενου χρονικού διαστήματος.



xxix. Διάγραμμα 5.4.5: Εξατμισοδιαπνοή και προσομοιωμένη παροχή. Έτη 1969-2009.

Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά το γράφημα (Διάγραμμα 5.4.6) του ισοζυγίου της λεκάνης απορροής για τα μελετώμενα έτη (1976-2009) στο οποίο απεικονίζονται οι ετήσιες ποσότητες των ατμοσφαιρικών κατακρίμνισμάτων, του νερού που καταναλώνεται ως εξατμισοδιαπνοή, η ετήσια παροχή ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους και η ετήσια ποσότητα του κατεισδύοντος ύδατος στο βαθύ υδροφορέα. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι ποσότητες των κατακρίμνισμάτων (βροχοπτώσεων) λαμβάνουν υψηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες. Το νερό που

κατεισδύει στο έδαφος με μορφή κατακριμνισμάτων κατά ένα ποσοστό περίπου 43% εξατμίζεται και διαπνέεται από τη βλάστηση, το 43% περίπου ρέει ως βασική παροχή στο ποτάμι και 10% περίπου εισέρχεται στο βαθύ υδροφορέα. Όπως φαίνεται επίσης από το διάγραμμα τα μεγέθη της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στο χρόνο. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια ενός ξηρού έτους το ισοζύγιο μπορεί να παρουσιάσει μεταβολές εις βάρος της απορροής.



xxx. Διάγραμμα 5.4.6: Συγκεντρωτικό γράφημα υδρολογικών εισροών και εκροών. Υδατικό ισοζύγιο για τα έτη 1976-2009.

5.5. Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση αποτελεσμάτων για την παροχή εξόδου του ύδατος από τη λεκάνη απορροής του Μύρτου, τη βροχόπτωση και την εξατμισοδιαπνοή ακολουθεί η κατάστρωση του υδρολογικού ισοζυγίου (Εικόνα 5.5.1).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

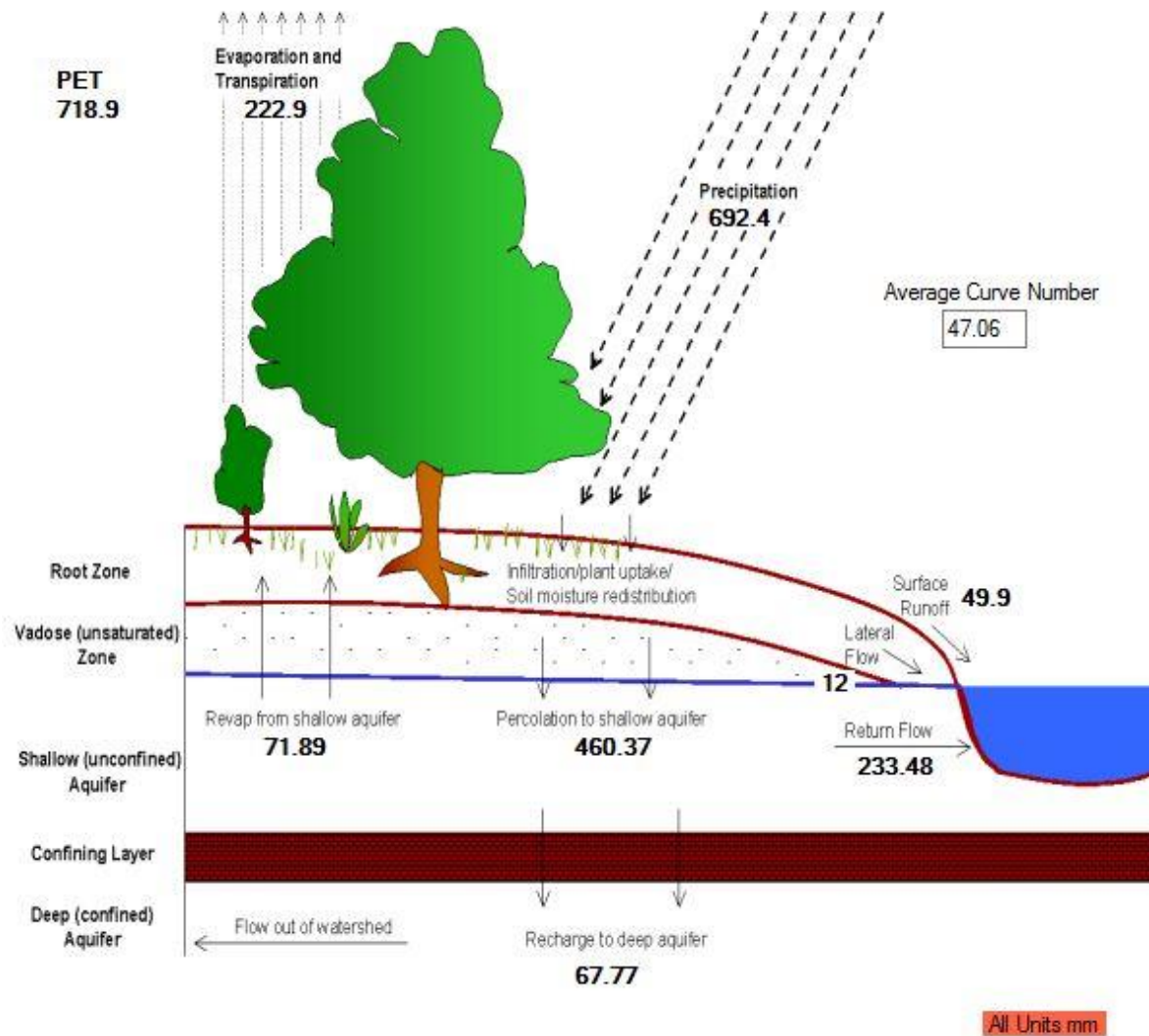
Τέλος, η επιφανειακή, η πλάγια απορροή και η απορροή που επιστρέφει από το ρηχό υδροφορέα είναι:

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

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

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

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



xxxι. Εικόνα 5.5.1: Ισοζύγιο λεκάνης απορροής ποταμού Μύρτου

Ετήσιο ισοζύγιο της λεκάνης απορροής προς την επιφάνεια:

$$\begin{aligned}
 \Delta S &= P - (Q_{sur} + Q_{lat} + Q_{rtn} + ET + Revap + Q_{deep}) \\
 &= 692,40 - (49,90 + 12 + 233,48 + 222,90 + 71,89 + 67,77) \\
 &= 34,46 \text{ mm, δηλαδή η ποσότητα νερού στο σύστημα αυξάνεται}
 \end{aligned}$$

όπου

P : η βροχόπτωση

Q_{sur} : η επιφανειακή συμβολή στο κανάλι

Q_{lat} : η πλευρική ροή στο κανάλι

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

ET : η εξατμισοδιαπνοή

Revar : η επιστροφή νερού στην ακόρεστη ζώνη

ET + Revar : Η ετήσια πρόσληψη από τα φυτά

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

Πολλαπλασιαζόμενα τα παραπάνω μεγέθη με τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής η οποία είναι 96 km² δίνουν τα συνολικά κυβικά πρόσληψης και απόληψης ύδατος από το σύστημα για κάθε έτος. Στον πίνακα 5.5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του ισοζυγίου καθώς και τα συνολικά κυβικά κατά την περίοδο 1969-2009:

Έκταση λεκάνης απορροής = 96 km ² = 96,3 · 10 ⁶ m ²		
Παράμετρος	Τιμή (mm/year)	Τιμή (Mm ³ /year)
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή PET	718.90	69.2
Επιφανειακή βροχόπτωση PRECIP	692.40	66.7
Εξατμισοδιαπνοή ET	222.90	21.5
Εξάτμιση και διαπνοή REVAR	71.89	6.9
Διήθηση στο ρηχό υδροφορέα GW (SHALL AQ)	460.37	44.3
Κατείσδυση στο βαθύ υδροφορέα RCRG (Deep Aq)=	67.77	6.5
Επιφανειακή απορροή SUR RUNOFF	49.90	4.8
Πλάγια απορροή LATERAL FL	12.00	1.2
Απορροή από το ρηχό υδροφορέα RETURN FL	233,48	22.5

xxxi. Πίνακας 5.5.1: Συγκεντρωτικές τιμές παραμέτρων ισοζυγίου

5.6. Ανάλυση ευαισθησίας

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων και υπολογισμών. Οι παράμετροι αυτοί παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος και σχετίζονται με την κίνηση του νερού και των ιζημάτων, την περιγραφή του εδάφους, της θερμοκρασίας, των καιρικών συνθηκών, την ανάπτυξη των φυτών και των θρεπτικών ουσιών, την κίνηση των φυτοφαρμάκων, τη διαχείριση της γης κλπ. Λόγω της χωρικής μεταβλητότητας, οι τιμές των παραμέτρων και των δεδομένων εισόδου περιέχουν αβεβαιότητα σε κάποιο βαθμό. Ωστόσο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις τιμές σε κάθε μία από αυτές κι έτσι επιτυγχάνεται μια σαφή κατανόηση όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο και καθώς και των αποτελεσμάτων που εξάγονται (T. Lenhart *, K. Eckhardt, N. Fohrer, H.-G. Frede, et al 2002).

Η συγκεκριμένη διαδικασία επιλέχθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, η χειροκίνητη δηλαδή βαθμονόμηση του μοντέλου με μεταβολή των παραμέτρων που παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών. Στη χειροκίνητη βαθμονόμηση συντελείται μία μεταβολή τη φορά που συνοδεύεται από γραφική και στατιστική σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποτελεσμάτων στο ποτάμι (trial and error process). Παρόλο που είναι υποκειμενική και χρονοβόρα, η χειροκίνητη βαθμονόμηση αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο να ελεγχθεί ο τρόπος μεταβολής των πιο ευαίσθητων και αβέβαιων παραμέτρων (Engel et al., 2007).

Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων που μεταβάλλονται εκφράζεται από έναν αδιάστατο δείκτη S (Sensitivity Coefficient). Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως η αναλογία μεταξύ της σχετικής μεταβολής των δεδομένων εξόδου του μοντέλου (στην προκειμένη περίπτωση η παροχή) και της σχετικής αλλαγής της παραμέτρου που εξετάζεται. Η σχετική μεταβολή της παραμέτρου x λαμβάνεται $\pm 10\%$ της αρχικής τιμής της x_0 , ανεξάρτητα από το δυναμικό εύρος της παραμέτρου αυτής. Η μαθηματική έκφραση του συντελεστή είναι η εξής:

$$S_{+10\%} = \frac{\frac{Q^+ - Q}{Q}}{10\% \cdot X + X}$$

Όπου,

$S_{+10\%}$: ο συντελεστής ευαισθησίας (Sensitivity Coefficient)

X : η υπό εξέταση παράμετρος

Q : η παροχή που ως δεδομένο εξόδου με την τιμή της παραμέτρου X

Q^+ : η παροχή που λαμβάνεται ως δεδομένο εξόδου με την αύξηση 10% της παραμέτρου x

$$S_{-10\%} = \frac{\frac{Q^- - Q}{Q}}{-10\% \cdot X + X}$$

Όπου,

$S_{+10\%}$: ο συντελεστής ευαισθησίας (Sensitivity Coefficient)

X : η υπό εξέταση παράμετρος

Q : η παροχή που ως δεδομένο εξόδου με την τιμή της παραμέτρου X

Q^- : η παροχή που λαμβάνεται ως δεδομένο εξόδου με τη μείωση 10% της παραμέτρου x

Το πρόσημο του δείκτη δείχνει αν το μοντέλο αντιδρά ανάλογα, είτε αντιστρόφως ανάλογα με την αλλαγή της παραμέτρου εισόδου. Παραδείγματος χάρη αν μια αύξηση της τιμής της παραμέτρου εισόδου οδηγεί σε αύξηση των δεδομένων εξόδου και μείωση της ίδιας παραμέτρου οδηγεί σε μείωση των δεδομένων εξόδου ή και αντιστρόφως (Engel et al., 2007).

Συνολικά υπάρχουν 44 ξεχωριστές παράμετροι εισόδου που έχουν να κάνουν με την επιφανειακή απορροή, την κλίση του καναλιού, το συντελεστή Manning, τον αριθμό CN (Curve Number), την πυκνότητα και αγωγιμότητα του εδάφους κλπ. Οι αρχικές τιμές των αριθμών καμπύλης CN για τους διάφορους συνδυασμούς χρήσης γης και εδαφών, αντλήθηκαν από τους πίνακες της SCS (USDA, Soil Conservation Service, 1972) και μεταβλήθηκαν κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι παράμετροι της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας (SOL_K) και της διαθέσιμης υγρασίας (SOL_AWC) του εδάφους καθορίστηκαν σε αναλογία με την υδρολογική ομάδα στην οποία ανήκει το κάθε έδαφος. Η

αγωγιμότητα αυξάνει με την περατότητα, σε αντίθεση με την διαθέσιμη υγρασία που μειώνεται (Magdali, 2012).

Πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα βρίσκεται η ριζική ζώνη και οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι κυρίως αυτές που ρυθμίζουν την κίνηση και ποσότητα του νερού από τον υδροφορέα στη ζώνη αυτή καθώς και την γενικότερη συνεισφορά του υπόγειου νερού στην παροχή του ποταμού. Η κατανομή του βάθους της κάλυψης του εδάφους και η επίδραση των τριχοειδών περιγράφεται από την μεταβλητή ESCO. Η ποσότητα του νερού πρόσληψης από τα φυτά και την εξάτμιση εκφράζεται με το συντελεστή EPCO και διαφέρει ανάλογα με το αν το νερό λαμβάνεται από τα χαμηλότερα ή υψηλότερα στρώματα του εδάφους. Οι παράμετροι ESCO και EPCO καθορίζονται ανάλογα με τα HRUs της λεκάνης απορροής.

Δύο ακόμα παράμετροι για τις οποίες κρίνεται σκόπιμο να γίνει μνεία είναι ο συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP) και το όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMIN). Η πρώτη είναι ο συντελεστής που ρυθμίζει τη ροή του νερού από τον αβαθή υδροφορέα προς τη ριζική ζώνη λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας και πρόσληψης νερού από τα φυτά με βαθιές ρίζες. Κυμαίνεται μεταξύ 0.02 και 0.2 και μικρές τιμές περιορίζουν το φαινόμενο. Η δεύτερη εκφράζει το όριο νερού στον αβαθή υδροφορέα (mm) που απαιτείται για ύπαρξη επιστρέφουσας ροής. Όταν το βάθος του νερού στον αβαθή υδροφορέα ξεπεραστεί, επιτρέπεται ροή προς το υδατόρρευμα (Magdali, 2012).

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης αποδόθηκαν τιμές σε όλες τις παραπάνω παραμέτρους ώστε να περιγραφούν οι ιδιότητες που συνάδουν με την γενικότερη και αναμενόμενη σχετική συμπεριφορά τους και να επιτευχθεί η ικανοποιητική προσομοίωση της συμπεριφοράς ολόκληρης της λεκάνης απορροής. Κατόπιν, αφού αποθηκεύτηκαν τα δεδομένα εξόδου (παροχή) βάσει αυτών των τιμών, έγινε μεταβολή $\pm 10\%$ στις παραμέτρους εισόδου για να εξεταστεί και το ενδεχόμενο της ποσοστιαίας αύξησης και μείωσης και να ελεγχθεί ποια είναι η επίδραση αυτής της μεταβολής στην παροχή εξόδου. Η διαδικασία αυτή έγινε για το έτος 1981 (σχετικοί πίνακες καταγράφονται στο παράρτημα), ενώ έμφαση δόθηκε στο μήνα Σεπτέμβριο που παρουσιάζονται χαμηλές παροχές και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα 5.6.1 που ακολουθεί.

SOL_K	SOL_K ⁺	SOL_K ⁻	Sensitivity Coefficient S ⁺ (10%)	Sensitivity Coefficient S ⁻ (10%)
7.5	8.25	6.75	0	0
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09042	0.09042		
SOL_AWC	SOL_AWC⁺	SOL_AWC⁻	0	0
0.9	0.99	0.81		
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09042	0.09042	0.02101	0.01990
ESCO	ESCO⁺	ESCO⁻		
0.55	0.605	0.495		
Q	Q ⁺	Q ⁻	0	0
0.09042	0.09061	0.09024		
EPCO	EPCO⁺	EPCO⁻		
0.9	0.99	0.81	0	0
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09042	0.09042		
GWQMIN	GWQMIN⁺	GWQMIN⁻	0	0
4800	5000	4320		
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09042	0.09042	-	0
GW_REVAP	GW_REVAP⁺	GW_REVAP⁻		
0.1	0.11	0.09		
Q	Q ⁺	Q ⁻	0.19133	0.18469
0.09042	0.09042	0.09042		
GW_DELAY	GW_DELAY⁺	GW_DELAY⁻		
15	16.5	13.5	0	0
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09215	0.08875		
ALPHA_BF	ALPHA_BF⁺	ALPHA_BF⁻	0	0
0.7	0.77	0.63		
Q	Q ⁺	Q ⁻		
0.09042	0.09042	0.09042	-0.03318	-0.02654
CN2	CN2⁺	CN2⁻		
45	49.5	40.5		
Q	Q ⁺	Q ⁻	-0.03318	-0.02654
0.09042	0.09012	0.09066		

xxxiii. Πίνακας 5.6.1: Sensitivity Coefficient για Σεπτέμβριο έτους 1981

Όπως είναι φανερό και στις δύο περιπτώσεις οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι αυτοί που αφορούν την κίνηση του νερού στο βαθύ υδροφορέα (GW_DELAY), τον αριθμό Curve Number (CN2) και τέλος την κίνηση του πάνω από το ρηχό υδροφορέα και την επίδραση των τριχοειδών (ESCO). Σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις για χαμηλή παροχή η μεταβολή 10% στην παράμετρο παρουσιάζει αλλαγή στο συντελεστή ευαισθησίας S (Sensitivity Coefficient), εν αντιθέσει με όλες τις υπόλοιπες μεταβολές στις οποίες ο συντελεστής παραμένει 0.

6. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής διατριβής ήταν η προσομοίωση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ποταμού Μύρτου προκειμένου να επιτευχθεί η κατανόηση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής και να δημιουργηθεί κατ' επέκταση ένα αξιόπιστο διαχειριστικό εργαλείο. Για το σκοπό αυτό συλλέχθηκαν γεωλογικά, κλιματικά και υδρολογικών δεδομένα και κατόπιν έγινε έλεγχος της αξιοπιστίας τους. Έγιναν αναλύσεις και διορθώσεις των βροχομετρικών δεδομένων με χρήση της μεθόδου διπλής αθροιστικής καμπύλης και κατόπιν χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της λεκάνης απορροής.

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης παρουσιάστηκαν ορισμένοι περιορισμοί οι οποίοι αφορούσαν τις μετρήσεις των παροχών και δεν επέτρεψαν την άριστη προσομοίωση της υδρολογίας της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκαν διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα μετρήσεων παροχής για δεκαπέντε έτη (1970-1985) και παράλληλα βροχομετρικά δεδομένα για 48 έτη (1961-2009). Αυτό έθετε ως περιορισμό να βρεθεί και να χρησιμοποιηθεί για βαθμονόμηση ένα διάστημα (μέσα σε αυτά τα δεκαπέντε έτη που διατίθενται δεδομένα και παροχής και βροχοπτώσης) στο οποίο υπήρχε καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων. Τη διαδικασία έκανε πιο δύσκολη το γεγονός ότι τα δεδομένα παροχών και βροχοπτώσεων δεν ανακρινόντουσαν σε μία λογική συσχέτιση κι επομένως ήταν σχεδόν αδύνατον να βρεθεί ένα μεγάλο και συνεχές διάστημα πάνω στο οποίο θα στηριζόταν η βαθμονόμηση της λεκάνης.

Αν και γενικά υπήρχαν χρόνιες αναξιοπιστίες στις μετρήσεις των παροχών, βρέθηκε μια τετραετία (υδρολογικά έτη 1977-1981) στην οποία οι μετρήσεις παροχών ήταν ικανοποιητικές και η συσχέτισή τους με τις αντίστοιχες των βροχοπτώσεων ήταν λογική. Η βαθμονόμηση της λεκάνης βασίστηκε επάνω σε αυτό το διάστημα και σύμφωνα με τους δείκτες NSE, RSR και PBIAS αξιολογήθηκε ικανοποιητική. Το παραπάνω συμπέρασμα, πέρα από τους δείκτες επιβεβαίωσαν και τα διαγράμματα που εμφανίζονται οι δύο παροχές, αυτή που λήφθηκε ως δεδομένη από το πεδίο και η παροχή της προσομοίωσης.

Βάσει του συνολικού υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης για το σύνολο 40 ετών (1969-2009) υπολογίστηκε ότι η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί περίπου το 43% της

συνολικής βροχόπτωσης, ενώ η απορροή περίπου το 43%. Το υπόλοιπο 10% αναφέρεται σε κατείσδυση ύδατος στο βαθύ υδροφορέα. Γενικά, η λεκάνη απορροής δε φαίνεται να παρουσιάζει κάποια μόνιμη αλλαγή στη συμπεριφορά της και η ποσότητες ύδατος που εξέρχονται από αυτή δεν εμφανίζουν μείωση. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη διάρκεια των ετών ξηρασίας όπου σε αυτήν την περίπτωση το ισοζύγιο ενδέχεται να παρουσιάσει κάποιες μεταβολές εις βάρος της απορροής.

Η μελέτη και η κατανόηση της υδρολογίας της λεκάνης θα επιτρέψει στους αρμόδιους φορείς την λήψη συγκεκριμένων πρωτοβουλιών για την βέλτιστη και αίθροική διαχείριση των υδάτων της ευρύτερης περιοχής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, γίνεται κατανοητή η αναγκαιότητα ανάπτυξης ελεγκτικών μηχανισμών στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, βασική ανάγκη είναι η δημιουργία ενός δικτύου παρακολούθησης, με εγκατάσταση σταθμών καταγραφής της παροχής σε διάφορες θέσεις εντός της λεκάνης απορροής. Καλό θα ήταν να υπάρχει συνεχής επίβλεψη των σταθμών από εξειδικευμένο προσωπικό και οργανισμούς για την αποφυγή λάθος μετρήσεων και κατόπιν αποστολή των αποτελεσμάτων στις αρμόδιες αρχές (πχ Περιφέρεια).

Επιπλέον, εγκατάσταση μετεωρολογικών σταθμών (κυρίως για τις μετρήσεις θερμοκρασίας) εντός ή πλησίον της περιοχής της λεκάνης για την εξασφάλιση όλων των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων ούτως ώστε να δημιουργηθεί ένα καλύτερο σύστημα παρακολούθησης για την κλιματική αλλαγή της περιοχής. Τέλος, καταγραφή ακριβούς θέσεις των γεωτρήσεων και των χαρακτηριστικών τους (παροχή, περίοδος λειτουργίας) για τον πλήρη έλεγχο των αρδεύσεων στην περιοχή.

7. Βιβλιογραφία

7.1. Διεθνής βιβλιογραφία

1. Bobba, A.G., Singh, V.P., Bengtsson, L., 2000. Application of environmental models to different hydrological systems. *Ecological Modeling* 125 (2000),
2. Follow the Water: Finding a Perfect Match for Life. 04.16.2007.
(www.Nasa.gov)
3. Gleick, P.H. 1998. The World's Water 1998-1999: The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press, Washington, D.C.
4. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and T. L. Veith. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900.
5. J. Hansen, 2005: Efficacy of climate forcings, *Jurnal of Geophysical research, Atmospheres*, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776
6. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., 2003. Benchmarking models for the Water Framework Directive: evaluation of SWAT for use in the Ythan catchment, UK. In: Arnold, J., et al. (eds.), *Condensed Abstracts of the 2nd International SWAT Conference*, 1-4 July 2003, p. 63-66, Bari, Italy.
7. Dilks, C.F., Dunn, S.M., Ferrier, R.C., in: Srinivasan, R., Jacobs, J., Day, D., Abbaspour, K. (Eds.), *Evaluation of SWAT for use in Development of a River Basin Management Plan for the Ythan Catchment, UK*. 3rd International SWAT Conference, Zurich, 11-15 July, 2005.
8. Ramaswami, A., J. Milford, and M. Small (2005), *Integrated Environmental Modeling: Pollutant Transport, Fate, and Risk in the Environment*, 688 pp., John Wiley, New York.
9. Van Grinsven, H.J.M., Driscoll, C.T., Tiktak, A., 1995: Workshop on comparison of Forest-Soil-Atmospheric models: Preface. *Ecological Modelling* vol 83, p.1-6.
10. Van Grinsven, H.J.M., Driscoll, C.T., Tiktak, A., 1995. Workshop on comparison of Forest-Soil-Atmospheric models: Preface. *Ecological Modelling* vol 83, p.1-6.

11. Goodchild, M. F., Parks, B. O., & Steyaert, L. T. ,1993: Geographic information systems and environmental modelling. Oxford: Oxford University Press.
12. Nikolaidis, N.P., Rajaram, H., Schnoor, J.L., Georgakakos, K.P., 1988: A generalized soft water acidification model. Water Resources Res. 24, 1983-96.
13. Arnold J.G., J.R. Kiniry, J.R. Williams, R. Srinivasan, E.B. Haney, S.L. Neitsch, 2011: Soil and Water Assessment Tool – Input / Output File Documentation – Version 2009, Texas A&M University, Texas, USA.
14. Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Davis, H.H., 1980: Users' Manual for the Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) version No. 5.0, EPA-600/9-80-105, US EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
15. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle Jr., J.L., Jobes, T.H., Donigan Jr., A.S., 2001. User's Manual for Hydrological Simulation Program-FORTRAN, HSPF, Version 12. User's manual. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California, USA, 873 pp.
16. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle Jr., J.L., Jobes, T.H., Donigan Jr., A.S., 2001. User's Manual for Hydrological Simulation Program-FORTRAN, HSPF, Version 12. User's manual. AQUA TERRA Consultants, Mountain View, California, USA, 873 pp.
17. Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R., 1995: Continuous – time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering 121 (2), 171-183.
18. Golden Software Inc., 1989. Surfer Version 4 Reference Manual: Golden Software Inc., Golden, Colorado, 534 p.
19. Chen, C.W., Gherini, S.A., Dean, J.D., Hudson, R.J.M., Goldstein, R.A., 1984. Hydrologic analysis of acid and alkaline lakes. Water Resour. Res. 20, 1875-1882
20. Kamari, J., 1985. A model for analyzing lake water acidification on a regional scale. Report # CP-85-48. International Institute for Applied Systems Analysis, 2361 Laxenberg, Austria
21. Chong – yu, X., 2002. Hydrologic Models, Uppsala University, Sweden

22. Schnoor, J.L., Palmer, W.D., Jr & Glass, G.E., 1984. Modeling impacts of acid precipitation for northeastern Minnesota. In *Modeling of Total Acid Precipitation Impact*, ed. J. L. Schnoor. Butterworth, Boston, MA, 155-73.
23. J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha, SWAT: Model Use, Calibration and validation.
24. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development. *J. American Water Resources Assoc.* 34 (1), 73-89.
25. USDA, Soil Conservation Service, 1972: *National Engineering Handbook Hydrology*, Chapter 12
26. Lane, L. J. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. In *Soil Conservation Service. National Engineering Handbook*, section 4: Hydrology. U.S. Government Printing
27. Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani. 1982. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1: 96-99.
28. Williams, J.R., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12 (1), 100-103.
29. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007b. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASAE* 50 (4), 1211–1250.
30. Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., and I. N. Daliakopoulos. 2010. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology* 394: 90-100.
31. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., Arabi, M., 2007. A Hydrologic/ Water Quality Model Application Protocol. *Journal of the American Water Resources Association* 43 (5), 1223-1236.
32. Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4 (2)
33. Richard McCUEN, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, 1972: The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling, *Journal of Hydrology* 18

34. A. van Griensven, T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio, R. Srinivasan, 2005: A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models, *Journal of Hydrology* 324 (2006) 10–23.
35. T. Lenhart, K. Eckhardt, N. Fohrer, H.-G. Frede, 2002: Comparison of two different approaches of sensitivity analysis, Pergamon, Institut fur Landeskultur, Justus-Liebig-Universitaet Giessen, *Physics and Chemistry of the Earth* 27 (2002) 645–654.
36. A. Jackson, *Discharge & Hydrographs*, Geography AS Notes.
37. A. Laeven, J. Riskey, 1997: *Precipitation-Runoff and Streamflow-Routing, Models for the Willamette River Basin*, Portland, Oregon, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Water-Resources Investigations Report 95–4284
38. H.M. Raghunath, 2006: *HYDROLOGY Principles, Analysis, Design*, New Age International (P) Ltd., Publishers
39. Dejian Zhang, Xingwei Chen, Huaxia Yao, Bingqing Lin, 2015: Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dry seasons, *Journal of Hydrology, Ecological Modelling* 301 (2015) 54–61.
40. A. Knapp, D. Hoover, K. Wilcox, M. Avolio, S. Koerner, K. Pierre, M. Loik, M. Smith, 2015: Characterizing differences in precipitation regimes of extreme wet and dry years: implications for climate change experiments, *Global Change Biology* (2015) 21, 2624–2633

7.2. Ελληνική βιβλιογραφία

1. Κουτούπα-Πεγκάκου, Ε., 2008. *Δίκαιο του Περιβάλλοντος*. Γ' έκδοση επαυξημένη, Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα – Θεσσαλονίκη, 2008.
2. Γ. Αραμπατζής, ΠερΔικ 2001, σ. 192 – 207: Θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση και ανάπτυξη των υδατικών πόρων στην Ελλάδα. Ηλεκτρονικό περιοδικό Νόμος και Φύση (www.Nomophysis.org.gr)
3. Ι. Μυλόπουλος, 2008: «Πράσινη» ανάπτυξη και για το νερό, Περιοδ. Υδροοικονομία, 20.06.2008.
4. Κ. Σακελλαροπούλου, Ν. Σεκέρογλου, 2006: Η βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, Ηλεκτρονικό περιοδικό Νόμος και Φύση (www.Nomophysis.org.gr)

5. Ε. Τροβά: Η προστασία των υδατικών πόρων σύμφωνα με το κοινοτικό δίκαιο και το Σύνταγμα, ΠερΔικ 09/2005
6. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
7. Β. Καραγεώργου, 2003: Η οδηγία-πλαίσιο για το νερό: Ένας σημαντικός σταθμός για το ευρωπαϊκό δίκαιο περιβάλλοντος, Ηλεκτρονικό περιοδικό Νόμος και Φύση (www.Nomorphysis.org.gr)
8. Γιαννιού et al, 2012
9. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Γ' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.
10. Κ. Χαρτζουλάκης, 2001: Βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων στη γεωργία σε ξηροθερμικές συνθήκες, ΕΛΓΟ, Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών
11. Β. Καρακίσιος, Υδρογεωλογική μελέτη και καθορισμός ζωνών περιμετρικής προστασίας των πηγών Κρύας Ιωαννίνων – Αποτελέσματα
12. Περιβαλλοντικά στοιχεία Νομού Λασιθίου, 1205441259_75_NΟΜΟΣ ΛΑΣΙΘΙΟΥ_periballon
13. Έρευνα και μελέτη για την αναθεώρηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ) περιφερειακής Κρήτης, Κεφ. 5 Γενικά χαρακτηριστικά Περιφέρειας Κρήτης
14. Η διάρκεια της ξηρής περιόδου στον Ελλαδικό χώρο (www.meteoclub.gr)
- 15.

7.3. Διπλωματικές εργασίες

1. Δημητρίου, 2015: Υδρολογική και γεωχημική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη, Πολυτεχνείο Κρήτης
2. Μαγδάλη, 2012: Μοντελοποίηση της υδρολογίας της λεκανής απορροής του ποταμού Γεροπόταμου, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. Αλδάκος, 2014: Μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με χρήση του μοντέλου SWAT, Πολυτεχνείο Κρήτης

4. Κοντεγεώργος, 2014: Μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής ποταμού Γιόφυρου, Πολυτεχνείο Κρήτης
5. Κουρή, 2015: Μοντελοποίηση της υδρολογίας του ποταμού Ταυρωνίτη και αξιολόγηση του προτεινόμενου φράγματος Σεπρωνιώτη, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. Δριβέλας, 2009: Διερεύνηση του αλλουβιακού υδροφορέα του Μυρτους Λασιθίου για τη δημιουργία υπόγειου ταμιευτήρα με διαφραγματικό τοίχο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
7. Μπελιβάνη, 2015: Ιζηματολογική και γεωχημική ανάλυση-δυναμικό γένεσης υδρογονανθράκων στο νότιο τμήμα της κεντρικής Κρήτης, Πανεπιστήμιο Πατρών

8. Παράρτημα

Πίνακες μεταβολών ευαίσθητων παραμέτρων, Sensitivity Analysis.

Year	SOL_K	SOL_K+	SOL_K-	Sens Coef	Sens Coef
1981	7.5	8.25	6.75	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	3.037	3.057	-0.026273	-0.039409
2	2.15	2.149	2.149	-0.004651	0.0046512
3	1.315	1.311	1.316	-0.030418	-0.007605
4	0.5718	0.5721	0.5715	0.0052466	0.0052466
5	0.3396	0.3396	0.3395	0	0.0029446
6	0.2377	0.2377	0.2377	0	0
7	0.1685	0.1685	0.1685	0	0
8	0.1228	0.1228	0.1228	0	0
9	0.09042	0.09042	0.09042	0	0
10	0.06649	0.06649	0.06649	0	0
11	0.0798	0.08012	0.07949	0.0401003	0.0388471
12	0.5601	0.562	0.5582	0.0339225	0.0339225

xxxiv. Πίνακας 8.1: Sensitivity Coefficient παραμέτρου SOL_K για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	SOL_AWC	SOL_AWC+	SOL_AWC-	Sens Coef	Sens Coef
1981	0.9	0.99	0.81	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	3.045	3.045	0	0
2	2.15	2.15	2.15	0	0
3	1.315	1.314	1.314	-0.0076	0.007605

4	0.5718	0.5718	0.5718	0	0
5	0.3396	0.3396	0.3396	0	0
6	0.2377	0.2377	0.2377	0	0
7	0.1685	0.1685	0.1685	0	0
8	0.1228	0.1228	0.1228	0	0
9	0.09042	0.09042	0.09042	0	0
10	0.06649	0.06649	0.06649	0	0
11	0.0798	0.0798	0.0798	0	0
12	0.5601	0.5601	0.5601	0	0

xxxv. Πίνακας 8.2: Sensitivity Coefficient παραμέτρου SOL_AWC για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	ESCO	ESCO+	ESCO_	Sens Coef	Sens Coef
1981	0.55	0.605	0.495	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	3.057	3.037	0.0394089	0.0262726
2	2.15	2.156	2.146	0.027907	0.0186047
3	1.315	1.326	1.302	0.0836502	0.0988593
4	0.5718	0.5758	0.5694	0.0699545	0.0419727
5	0.3396	0.3406	0.3387	0.0294464	0.0265018
6	0.2377	0.2382	0.2372	0.0210349	0.0210349
7	0.1685	0.1689	0.1682	0.0237389	0.0178042
8	0.1228	0.123	0.1225	0.0162866	0.02443
9	0.09042	0.09061	0.09024	0.0210131	0.0199071
10	0.06649	0.06663	0.06635	0.0210558	0.0210558
11	0.0798	0.08016	0.07947	0.0451128	0.0413534
12	0.5601	0.579	0.5391	0.3374397	0.374933

xxxvi. Πίνακας 8.3: Sensitivity Coefficient παραμέτρου ESCO για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	EPCO	EPCO+	EPCO-	Sens Coef	Sens Coef
1981	0.9	0.99	0.81	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	3.045	3.046	0	-0.0032
2	2.15	2.15	2.15	0	0
3	1.315	1.314	1.316	-0.0076	-0.0076
4	0.5718	0.5718	0.5719	0	-0.0017
5	0.3396	0.3395	0.3396	-0.0029	0
6	0.2377	0.2376	0.2377	-0.0042	0
7	0.1685	0.1685	0.1686	0	-0.0059
8	0.1228	0.1228	0.1228	0	0
9	0.09042	0.09042	0.09042	0	0
10	0.06649	0.06648	0.06649	-0.0015	0
11	0.0798	0.07979	0.07981	-0.0012	-0.0012
12	0.5601	0.5582	0.5628	-0.0339	-0.0482

xxxvii. Πίνακας 8.4: Sensitivity Coefficient παραμέτρου EPCO για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	GWQMIN	GWQMIN+	GWQMIN-	Sens Coef	Sens Coef
1981	4800	5000	4320	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	2.783	4.826	-2.06502	-5.84893
2	2.15	2.017	4.527	-1.48465	-11.0558
3	1.315	1.241	2.449	-1.35057	-8.62357
4	0.5718	0.5474	0.7873	-1.02413	-3.7688
5	0.3396	0.339	0.3446	-0.04240	-0.14723
6	0.2377	0.2377	0.2377	0	0
7	0.1685	0.1685	0.1685	0	0
8	0.1228	0.1228	0.1228	0	0

9	0.09042	0.09042	0.09042	0	0
10	0.06649	0.06649	0.06649	0	0
11	0.0798	0.0798	0.0798	0	0
12	0.5601	0.4674	0.9329	-	-
				3.972148	6.655954

xxxviii. Πίνακας 8.5: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QWGMIN για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	GW_REVAP	GW_REVAP+	GW_REVAP-	Sens Coef	Sens Coef
1981	0.1	0.11	0.09	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	2.933	3.132		-0.28571
2	2.15	2.127	2.231		-0.37674
3	1.315	1.244	1.515		-1.52091
4	0.5718	0.5465	0.6058		-0.59461
5	0.3396	0.3376	0.3422		-0.07656
6	0.2377	0.2373	0.2381		-0.01683
7	0.1685	0.1685	0.1685		0
8	0.1228	0.1228	0.1228		0
9	0.09042	0.09042	0.09042		0
10	0.06649	0.06649	0.06649		0
11	0.0798	0.0798	0.0798		0
12	0.5601	0.4592	0.6712		-1.98357

xxxix. Πίνακας 8.6: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QW_REVAP για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	GW_DELAY	GW_DELAY+	GW_DELAY-	Sens Coef	Sens Coef
1981	15	16.5	13.5	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		

1	3.045	2.994	3.099	-0.167488	-0.17734
2	2.15	2.151	2.146	0.0046512	0.0186047
3	1.315	1.334	1.289	0.1444867	0.1977186
4	0.5718	0.5932	0.5524	0.3742567	0.3392795
5	0.3396	0.3459	0.334	0.1855124	0.1648999
6	0.2377	0.2419	0.2334	0.1766933	0.1809003
7	0.1685	0.1717	0.1655	0.189911	0.1780415
8	0.1228	0.1251	0.1205	0.1872964	0.1872964
9	0.09042	0.09215	0.08875	0.19133	0.18469
10	0.06649	0.06776	0.06525	0.1910062	0.1864942
11	0.0798	0.0806	0.07907	0.1002506	0.0914787
12	0.5601	0.5341	0.5876	-0.464203	-0.490984

ΧΙ. Πίνακας 8.7: Sensitivity Coefficient παραμέτρου QW_DELAY για όλους τους μήνες του έτους 1981

Year	ALPHA_BF	ALPHA_BF+	ALPHA_BF-	Sens Coef	Sens Coef
1981	0.7	0.77	0.63	S (+10%)	S (-10%)
Month	Q	Q+	Q-		
1	3.045	3.049	3.041	0.013136	0.013136
2	2.15	2.147	2.154	-0.01395	-0.0186
3	1.315	1.312	1.318	-0.02281	-0.02281
4	0.5718	0.5716	0.5721	-0.0035	-0.00525
5	0.3396	0.3396	0.3396	0	0
6	0.2377	0.2377	0.2377	0	0
7	0.1685	0.1685	0.1685	0	0
8	0.1228	0.1228	0.1228	0	0

9	0.09042	0.09042	0.09042	0	0
10	0.06649	0.06649	0.06649	0	0
11	0.0798	0.0798	0.0798	0	0
12	0.5601	0.5615	0.5583	0.024996	0.032137

Χλῖ. Πίνακας 8.8: Sensitivity Coefficient παραμέτρου ALPHA_BF για όλους τους μήνες του έτους 1981