



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού με χρήση του μοντέλου SWAT και προτάσεις διαχείρισης για την μείωση των εξαγόμενων ρύπων



**Καπερώνης Σπυρίδων**

Επιβλέπων καθηγητής: Βασίλειος Α. Τσιχριντζής

Αθήνα, Οκτώβριος 2016









## Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων .....	i
Ευχαριστίες .....	iii
Περίληψη .....	iv
Abstract .....	v
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Χρήσεις γης και ποιότητα εδαφών .....</b>	<b>5</b>
2.1 Αγροτικές περιοχές-Δραστηριότητες .....	5
2.1.1 Καλλιέργειες .....	6
2.1.2 Ζωική παραγωγή.....	9
2.2 Αστικές περιοχές .....	10
<b>3. Υδρολογικά μοντέλα .....</b>	<b>13</b>
3.1.Ιστορική εξέλιξη μοντέλων.....	13
3.2.Παρουσίαση επιλεγμένων μοντέλων.....	14
3.2.1. Το Stanford Watershed Model .....	14
3.2.2.Το μοντέλο CREAMS .....	15
3.2.3.Το μοντέλο AGNPS.....	17
3.2.4.Το μοντέλο HSPF .....	18
3.2.5.Το μοντέλο Moneris.....	20
3.2.5.Το μοντέλο SWAT .....	22
<b>4. Περιγραφή μοντέλου SWAT .....</b>	<b>25</b>
4.1 Υδρολογικός κύκλος .....	25
4.2 Υδρολογικές διαδικασίες .....	26
4.2.1 Επιφανειακή Απορροή.....	27
4.2.2 Διήθηση .....	31
4.2.3 Εξατμισοδιαπνοή .....	32
4.2.4 Υπόγεια νερά .....	34
4.3 Μετεωρολογικές διαδικασίες .....	39
4.4 Θρεπτικά .....	45
4.5 Διάβρωση .....	50
4.6 Εφαρμογές του μοντέλου .....	52
4.7 Επιλογή μοντέλου SWAT.....	55
<b>5. Περιοχή μελέτης.....</b>	<b>57</b>
5.1 Γεωγραφικός προσδιορισμός περιοχής μελέτης .....	57
5.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.....	58
5.2.1 Επιλογή και μέγεθος λεκάνης απορροής.....	60
5.2.2 Χαρακτηριστικά υψόμετρα περιοχής μελέτης .....	60
5.2.3 Σχήμα της λεκάνης .....	61
5.2.4 Ανάγλυφο και κλίσεις εδάφους της λεκάνης απορροής .....	62
5.3. Γεωλογία – Στρωματογραφία της περιοχής μελέτης.....	63
5.4. Το κλίμα της περιοχής μελέτης .....	65
5.4.1. Θερμοκρασία περιοχής μελέτης.....	68
5.4.2. Βροχόπτωση.....	70
5.5 Χρήσεις γης .....	70
5.6 Ανθρωπογενείς επεμβάσεις.....	72

<b>6. Εφαρμογή του μοντέλου SWAT</b> .....	77
6.1 Συλλογή δεδομένων .....	77
6.2 Σχεδιασμός της λεκάνης απορροής .....	79
6.3 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης .....	81
6.4 Ορισμός HRU .....	92
6.5 Εισαγωγή δεδομένων καιρού .....	93
6.6 Συγγραφή πινάκων με δεδομένα εισαγωγής.....	101
6.7 Προσομοίωση του μοντέλου .....	102
6.8 Αρχεία αποτελεσμάτων .....	104
6.9 Βαθμονόμηση του μοντέλου .....	105
6.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την παρούσα κατάσταση .....	111
6.11 Πρακτικές διαχείρισης .....	116
6.11.1 Εναλλακτικά σενάρια με μεταβολή των χρήσεων γης .....	116
6.11.2 Εναλλακτικά σενάρια με μεταβολή καλλιεργειών .....	119
6.12 Επίδραση ύψους βροχής στα αποτελέσματα .....	123
<b>7. Συμπεράσματα</b> .....	125
7.1 Αξιολόγηση του μοντέλου προσομοίωσης .....	125
7.2 Αξιολόγηση της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής .....	127
<b>Αναφορές</b> .....	129
<b>Παράρτημα Α : Πίνακες</b> .....	135
<b>Παράρτημα Β : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων</b> .....	137

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας είναι μια πρωτόγνωρη διαδικασία για κάθε φοιτητή και απαιτεί τόσο τεχνική, όσο και πνευματική υποστήριξη. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Βασίλη Τσιχριντζή, για την καθοδήγησή του και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε σε κάθε στάδιο της έρευνας. Ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε κάθε εμπόδιο που αντιμετώπισα. Ευχαριστώ θερμά, τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής τον κ. Τσακίρη Γεώργιο και τον κ. Αλεξάκη Δημήτριο, για την προσοχή που έδωσαν στον έλεγχο της εργασίας μου και τις χρήσιμες συμβουλές τους. Επιπλέον, θέλω να αναγνωρίσω τη βοήθεια που είχα από τον αγαπητό φίλο κ. Καββαδά Ιωάννη, Τοπογράφο Μηχανικό στην ΕΚΧΑ ΑΕ, για την σημαντική βοήθεια του στη συλλογή δεδομένων. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη διαρκή υποστήριξη τους τόσο στην εκπόνηση της διπλωματικής, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησης μου στη σχολή και ιδιαίτερα την αδερφή μου Ίρια για τη σημαντική βοήθεια της στην επιμέλεια της εργασίας.

Σ. Καπερώνης

## Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία περιλαμβάνει την μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού, στο νομό Αχαΐας. Η μελέτη αυτή έγινε με προσομοίωση της λεκάνης απορροής, με τη χρήση του μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου, που συγκεντρώνει μικρότερα μοντέλα φυσικής βάσης ή εννοιολογικά. Η λειτουργία του SWAT βασίζεται στη χρήση δεδομένων που περιγράφουν την λεκάνη απορροής ως προς το ανάγλυφο, το έδαφος και τις χρήσεις γης. Δεδομένα όπως αυτά, καθώς και μετεωρολογικά συγκεντρώθηκαν και μετά από κατάλληλη επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Με χρήση του μοντέλου οριοθετήθηκε η περιοχή μελέτης και προέκυψαν τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της. Μετά το σχεδιασμό του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις και με μεταβολή παραμέτρων πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα στοιχεία που μελετήθηκαν ως προς την ποιότητα των υδάτων του ποταμού ήταν οι ποσότητες νιτρικών αλάτων, αζώτου, φωσφόρου και φερτών, που καταλήγουν στη θάλασσα. Η τελική φάση της εργασίας ήταν η μελέτη των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με αλλαγές των χρήσεων γης και των καλλιεργειών που λαμβάνουν χώρα στην εξεταζόμενη περιοχή. Στόχος των εναλλακτικών αυτών πρακτικών διαχείρισης ήταν να εντοπιστεί κατά πόσο είναι δυνατός ο περιορισμός των ρύπων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών ήταν ικανοποιητικά καθώς με συγκεκριμένες μεταβολές των καλλιεργειών και των χρήσεων γης παρατηρήθηκαν αισθητές διαφορές στις ποσότητες των ρυπαντών. Συμπερασματικά, η χρήση του μοντέλου SWAT και οι δοκιμές των εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης, δίνουν την δυνατότητα εκτενούς μελέτης της επιρροής των χρήσεων γης σε μια λεκάνη απορροής ενός ποταμού.

## **Abstract**

This report elaborates on the analysis of the water quality of the Volinaios river located in Achaia, Peloponisos, Greece.

The drain basin of the river was simulated by employing the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The SWAT model comprises a complete simulation package of the hydrological cycle involving both physical and technical data. Its function lies upon the use of multiple data describing the the drain basin ; these include the subsidium terrae, the soil quality and the soil use

The basis of the study was the collection of morphological and meteorological data pertaining to the Volinaios river area in an attempt to design the morphologic profile of the area using the SWAT model. When the morphology of the area was clearly defined and optimized by the software, the water quality of the river was evaluated and assessed based on the concentration of several polluting agents ( mainly nitrogen and phosphoric components) emanating from human activity.

By utilizing the model obtained from SWAT, the aforementioned polluting parameters were varied and numerous data were produced to assess the possibility of significant polluting agents abatement in the area. The results demonstrate a high potential to restrain the polluting activity in the Volinaios river area. In the same time, this study highlihghts the flexibility of SWAT and the numerous special features and possibilities as an assessment tool of the drain basin of a river.



## 1. Εισαγωγή

Η επιβλαβής επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας στο φυσικό περιβάλλον, καθώς και οι ενέργειες αποκατάστασής της σχέσης του ανθρώπου με την φύση, αποτελούν αντικείμενο ποικίλων τεχνοοικονομικών μελετών, πολιτικών και κοινωνικών δράσεων. Η αύξηση της βιομηχανικής και αγροτικής δραστηριότητας, συνεπάγεται την εισαγωγή πολυάριθμων ρυπογόνων παραγόντων στο φυσικό περιβάλλον του πλανήτη. Ένας από τους βασικούς αποδέκτες των ρύπων αποτελεί το νερό.

Ιδιαίτερα σημαντική στη διαδικασία μελέτης της ρύπανσης του νερού αποτελεί η ταυτοποίηση των πηγών ρύπανσης. Ειδικότερα, οι πηγές ρύπανσης διακρίνονται σε «σημειακές» και «μη σημειακές».

- Ως **σημειακές** χαρακτηρίζονται όλες οι πηγές που εκβάλλουν ρύπους σε εντοπισμένα σημεία. Αυτά είναι τα άκρα αγωγών, τάφρων ή αποχετευτικών δικτύων που καταλήγουν σε υδάτινους αποδέκτες. Μερικές τέτοιες πηγές είναι οι βιομηχανικές μονάδες, μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και οι πετρελαιοπηγές.
- Η ρύπανση από τις **μη σημειακές πηγές** προκαλείται κυρίως από διάσπαρτες πηγές σε μεγάλες εκτάσεις που σχετίζονται με το φαινόμενο βροχής- απορροής. Μερικές μη σημειακές πηγές ρύπανσης του νερού είναι οι απορροές χημικών ουσιών στα επιφανειακά νερά και η διαρροή τους στο έδαφος μέσα από χωράφια, καλλιέργειες, δάση, δρόμους και αστικές περιοχές (Δημοτικός Οργανισμός Υγείας και Κοινωνικών Θεμάτων).

Γεωγραφικοί, πολιτικοί και οικονομικοί παράγοντες έχουν καθοριστική σημασία στον προσδιορισμό του επιπέδου ρύπανσης του νερού. Στις αναπτυσσόμενες χώρες η ποιότητα του νερού είναι χαμηλή, γεγονός που οφείλεται στην έλλειψη οικονομικών πόρων προκειμένου να εγκατασταθούν μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Στις χώρες αυτές, το νερό ρυπαίνεται και από τα δύο είδη πηγών ρύπανσης έναντι των ανεπτυγμένων που η κύρια πηγή ρύπανσης των υδάτων είναι

οι μη σημειακές πηγές. Σε χώρες με αγροτική παραγωγή, η γεωργική ρύπανση είναι υπεύθυνη για πάνω από το 60% των συνολικών ρύπων που φτάνουν σε ποτάμια και λίμνες. Ο έλεγχος της ρύπανσης αυτού του τύπου είναι δυσχερής, καθώς είναι δύσκολο να εντοπιστούν οι τόσο διαφορετικές και διεσπαρμένες πηγές ρύπανσης.

Ο έλεγχος της ρύπανσης των υδάτων από τις μη σημειακές πηγές έχει απασχολήσει εδώ και αρκετά χρόνια πολλούς ερευνητές. Η ανάπτυξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) έχει απλοποιήσει την μελέτη αυτή. Ο όρος «ΣΓΠ» περιλαμβάνει ένα οργανωμένο σύστημα μηχανικών μερών και λογισμικού κατάλληλου για την συλλογή, αποθήκευση, ενημέρωση, επεξεργασία, ανάλυση και παρουσίαση όλων των τύπων των γεωγραφικών πληροφοριών (Burrough 1986, Maguire 1991). Λόγω της χωρικής και χρονικής φύσης των απαιτούμενων πληροφοριών, αλλά και λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, τα ΣΓΠ έχουν συμβάλει καθοριστικά στην διαχείριση των υδατικών πόρων.

Η μελέτη της ρύπανσης από μη σημειακές πηγές απαιτεί τη συνδυασμένη χρήση διαφορετικών πληροφοριών. Τα ΣΓΠ παρέχουν την εν λόγω δυνατότητα. Ειδικότερα, ο χρήστης των ΣΓΠ, πραγματοποιώντας επικαλύψεις διαφορετικών στρωμάτων πληροφορίας, αναλύει και καθορίζει ρυθμούς ρύπανσης ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζει κρίσιμες περιοχές, χρησιμοποιώντας τις περιγραφικές και χαρτογραφικές ιδιότητες που εισάγονται. Η χρήση των ΣΓΠ βοηθά σημαντικά στη λήψη αποφάσεων για τον έλεγχο των υδάτων από μη σημειακές πηγές, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με το σχεδιασμό της πρόβλεψης της διακύμανσης της ποιότητας του νερού με σχετική ακρίβεια μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η ρύπανση που προκύπτει από τις μη σημειακές πηγές, οφείλεται σε πολυάριθμους ρυπογόνους παράγοντες. Μια σημαντική αιτία είναι οι διάφορες χρήσεις γης της προς μελέτη περιοχής. Η γεωργία, η κτηνοτροφία, τα συστήματα αποχέτευσης, η αστική απορροή προκαλούν ρύπανση στα υδατικά συστήματα. Συνήθεις ρύποι από μη σημειακές πηγές είναι τα ιζήματα, τα θρεπτικά συστατικά, παθογόνοι μικροοργανισμοί, εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα, βαρέα μέταλλα και πάσης φύσης τοξικά απόβλητα. Τα παραπάνω είναι δυνατό να οδηγήσουν σε φαινόμενα



ευτροφισμού, στην αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και κατ' επέκταση στη διαταραχή της ισορροπίας του οικοσυστήματος λόγω συσσώρευσης οργανικού φορτίου και ελάττωσης του διαλυμένου οξυγόνου του υδάτινου αποδέκτη.

Η ποιότητα των υδάτων του ελλαδικού χώρου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας όχι μόνο για την υγεία των ανθρώπων αλλά και για την οικονομία της χώρας. Η οικονομία της Ελλάδας βασίζεται κυρίως στον πρωτογενή και στον τριτογενή τομέα ανάπτυξης, δηλαδή στις καλλιέργειες και στον τουρισμό. Είναι προφανές ότι η κακή ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται στις εν λόγω δραστηριότητες συνεπάγεται την ποιοτική υποβάθμιση των παραγόμενων προϊόντων και υπηρεσιών. Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη ελέγχου της ποιότητας του νερού σε όλες τις περιοχές του ελλαδικού χώρου που αναπτύσσονται δραστηριότητες καλλιέργειας και τουρισμού.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη έ και τον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων του παράκτιου περιβάλλοντος που εκβάλλει ο ποταμός Βολιναίος στο νομό Αχαΐας, όπως αυτή επηρεάζεται από μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα όπως οι χρήσεις γης, το κλίμα, η τοπογραφία της περιοχής, το έδαφος και άλλα στοιχεία που αναλύονται εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια. Βοηθητικό εργαλείο για τον έλεγχο των υδάτων στη έρευνα αυτή είναι ένα ειδικό μαθηματικό υδρολογικό μοντέλο υπολογισμού απορροής και παραγωγής ρύπων, το Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (S.L. Neitsch et al. 2011).

Για την μελέτη της ποιότητας των υδάτων και τον έλεγχο της ρύπανσης τους από μη σημειακές πηγές έχουν αναπτυχθεί πολλά υδρολογικά μοντέλα. Τα περισσότερα χρησιμοποιούν βάσεις δεδομένων που προκύπτουν από Συστήματα Γεωγραφικά Πληροφοριών. Μερικά από αυτά τα μοντέλα είναι τα: Agricultural Non Point Source pollution model (AGNPS), Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), Soil Water Assessment Tool (SWAT), Modeling Nutrient Emission in River Systems (MONERIS), κ.α. Τα υδρολογικά μοντέλα αυτά θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Εν κατακλείδι, η εργασία περιλαμβάνει μια σειρά από ενότητες που αφορούν την χρήση του μοντέλου SWAT στην περιοχή μελέτης. Μερικές από τις ενότητες αυτές αφορούν το μοντέλο κάθε αυτό, δηλαδή με ποιο τρόπο εκτελούνται οι φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην προσομοίωση από το μοντέλο, τα δεδομένα που απαιτεί για να λειτουργήσει, καθώς και πώς αυτό εφαρμόζεται από τους χρήστες. Ακόμη, γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης δηλαδή της τοπογραφίας της, των χρήσεων γης, των εδαφών, των ανθρώπινων παρεμβάσεων που πραγματοποιούνται όπως και του κλίματος της. Βασικό μέρος της εργασίας ήταν η προσομοίωση της υπάρχουσας κατάστασης και ο υπολογισμός των παραγόμενων ρύπων. Τέλος, διατυπώθηκαν εναλλακτικές πρακτικές διαχείρισης της περιοχής, και μέσω του μοντέλου SWAT, έγινε έλεγχος ως προς την αποτελεσματικότητά τους στην μείωση των παραγόμενων ρύπων.

## **2. Χρήσεις γης και ποιότητα εδαφών**

Οι ποταμοί διασχίζουν περιοχές μεγάλης έκτασης, από την πηγή τους μέχρι και την εκβολή τους στην θάλασσα. Η περιοχή αυτή λέγεται λεκάνη απορροής και ότι συμβαίνει σε αυτή έχει επίπτωση στον ποταμό που τη διασχίζει. Η ποιότητα του νερού ενός ποταμού εξαρτάται από τις εισροές ρύπων που δέχεται, που όπως αναφέρθηκε, διακρίνονται σε σημειακές και μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Οι μη σημειακές πηγές ρύπανσης αφορούν κυρίως τις χρήσεις γης της περιοχής.

### **2.1 Αγροτικές περιοχές-Δραστηριότητες**

Η γεωργική έκταση της Ελλάδας καταλαμβάνει περίπου το 29% της συνολικής έκτασης της χώρας και έτσι αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές πηγές ρύπανσης των εγχώριων υδάτων. Οι σύγχρονες τάσεις στην γεωργία προωθούν την χρήση λιπασμάτων, εντομοκτόνων και τη δημιουργία εκτεταμένων συστημάτων άρδευσης καθώς και μονάδων ζωικής παραγωγής. Δεδομένα όπως αυτά μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση, τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων και για το λόγο αυτό, ο έλεγχος τους είναι καθοριστικής σημασίας.

Στην ρύπανση των υδάτων από γεωργικές περιοχές, συνεισφέρουν και διάφορα κλιματικά χαρακτηριστικά. Η βροχόπτωση, ο αέρας καθώς και η επιφανειακή ροή του νερού καθορίζουν την παραγωγή και την κυκλοφορία των ρύπων από τις γεωργικές δραστηριότητες. Σημαντική επίδραση έχουν και άλλοι φυσικοί παράγοντες όπως η τοπογραφία, οι γεωλογικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης ή του εδάφους. Συνεπώς, η απορροή των ρύπων από γεωργικές περιοχές καθορίζεται πολλές φορές από δραστικούς και μη προβλέψιμους παράγοντες.

Οι ρυπογόνοι παράγοντες που προκύπτουν από γεωργικές δραστηριότητες, διακρίνονται σε διάφορα είδη. Ιζήματα, θρεπτικά συστατικά, φυτοφάρμακα, οργανικά υλικά και παθογόνα μικρόβια είναι μερικοί από τους βασικότερους. Ιζήματα που προέρχονται από τη διάβρωση του εδάφους αποτελούν μια από τις

μεγαλύτερες πηγές ρύπανσης των υδατικών πόρων. Οι αγροτικές περιοχές, ειδικά οι καλλιεργούμενες εκτάσεις, θεωρείται ότι συνεισφέρουν αρκετά στην παραγωγή ιζήματος. Πολλές φορές, λεπτόκοκκα ιζήματα μπορεί να μεταφέρουν υπολογίσιμες ποσότητες και άλλων ρύπων. Σημαντική ρύπανση επιφέρουν και τα απόβλητα κτηνοτροφιών τα οποία μπορεί να εξαπλώνονται στις εκτάσεις των αγροκτημάτων μέσω απορροής ή διαρροών. Διάφορα εμπορικά λιπάσματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα από αγρότες ενώ μερικά από τα συστατικά τους μεταφέρονται στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Τα φυτοφάρμακα, τα οποία ρυπαίνουν το νερό και έχουν πολύ μικρή διαλυτότητα σε αυτό, μπορεί μεν να προκαλούν την εξόντωση ορισμένων οργανισμών αλλά να εισέρχονται στις τροφικές αλυσίδες και να έχουν διάφορα αρνητικά αποτελέσματα σε πιο σύνθετους βιολογικούς οργανισμούς. Τέλος, διάφοροι οργανικοί μη σημειακοί ρύποι από γεωργικές δραστηριότητες, που μπορούν να προκύψουν από ζωικά απόβλητα, υπολείμματα καλλιεργειών και άλλες πηγές, φτάνουν στα υδάτινα σώματα και συχνά έχουν αποτέλεσμα την αύξηση της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD).

Τις δύο κύριες «ρυπογόνες» αγροτικές δραστηριότητες αποτελούν οι καλλιέργειες και η ζωική παραγωγή. Κάθε δραστηριότητα προκαλεί τους προαναφερμένους ρύπους με συγκεκριμένους τρόπους. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στους ρύπους και στον τρόπο σύνδεσης τους με τις γεωργικές δραστηριότητες.

### **2.1.1 Καλλιέργειες**

Ο παράγοντας καλλιέργεια, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο ομάδες σχετικά με την ρύπανση που μπορεί να προκαλέσει (R. E. Thronson 1978). Η πρώτη ομάδα είναι οι καλλιεργούμενες εκτάσεις και η δεύτερη είναι οι αρδευόμενες καλλιεργούμενες εκτάσεις. Η ρύπανση που προκαλείται από τις μη αρδευόμενες καλλιέργειες αφορά κυρίως ιζήματα, θρεπτικά συστατικά και εντομοκτόνα, ενώ οργανικά υλικά, συνήθως υπολείμματα καλλιεργειών, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα του νερού. Οι αρδευόμενες περιοχές παρουσιάζουν ομοιότητα ως προς τους ρύπους με τις μη αρδευόμενες. Επιπρόσθετα, οι μη

αρδευόμενες καλλιέργειες προκαλούν ειδικές περιπτώσεις ιζημάτων καθώς και άλατα.

Τα ιζήματα είναι ένας από τους πιο επιβλαβείς παράγοντες για την ποιότητα του νερού. Ο λόγος δημιουργίας τους από τις μη αρδευόμενες καλλιέργειες είναι ότι το έδαφος μένει για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα κάθε χρόνο γυμνό από καλλιέργειες. Έτσι, βρίσκεται εκτεθειμένο στις διαβρωτικές ιδιότητες της βροχής, του αέρα, και συμπαρασύρεται από την απορροή. Στις αρδευόμενες καλλιέργειες η παραγωγή ιζημάτων εξαρτάται από το είδος άρδευσης που χρησιμοποιείται. Στις καλλιέργειες που χρησιμοποιούνται αυλάκια άρδευσης, τα φυτά τοποθετούνται στην διεύθυνση της πλαγιάς έτσι ώστε το νερό να πηγαίνει σε όλο το αγρόκτημα μέσω της βαρύτητας. Αυτή η τεχνική αυξάνει την παραγωγή ιζήματος αφού το νερό του ποτίσματος διαβρώνει το έδαφος και μεταφέρει τα ιζήματα. Μια άλλη μέθοδος άρδευσης είναι μέσω συστημάτων ψεκασμού που όταν το έδαφος είναι γυμνό καθιστούν εξαιρετικά ευαίσθητο το έδαφος στην διάβρωση. Τα συστήματα αυτά, παράλληλα δίνουν τη δυνατότητα να γίνει σχεδιασμός του συστήματος ψεκασμού βάση της τοπογραφίας του εδάφους ακόμα και να αναπτυχθούν τεχνικές ελέγχου της διάβρωσης. Το γεγονός αυτό συνεισφέρει σημαντικά στην πρόληψη της διάβρωσης και της μεταφοράς ιζημάτων.

Η ζημιά που προκαλούν στα υδάτινα οικοσυστήματα μπορεί να είναι καθοριστικής σημασίας και να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις. Όταν τα ιζήματα έρθουν σε επαφή με τα υδάτινα σώματα μπορεί να καλύψουν περιοχές αναπαραγωγής των ψαριών, να φράξουν υδατορέματα ή και να καλύψουν τον πυθμένα μιας λίμνης. Ακόμη, μπορεί να μειώσουν την μετάδοση του φωτός στο νερό, και να αυξήσουν την φόρτωση εντομοκτόνων και θρεπτικών συστατικών μέσω των χημικών που έχουν προσροφήσει. Οι παραπάνω επιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν στην υποβάθμιση της ποιότητας του νερού ακόμα και στην απειλή της υδρόβιας ζωής.

Το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο αποτελούν τα κυριότερα θρεπτικά συστατικά για τα φυτά. Τα περισσότερα εμπορικά λιπάσματα περιέχουν σημαντικές

ποσότητες των παραπάνω συστατικών και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις καλλιέργειες. Πέρα από τα λιπάσματα, σημαντικές ποσότητες, όσο αφορά τις αγροτικές δραστηριότητες, προκύπτουν από φυσικές πηγές όπως το έδαφος ή και από την ανακύκλωση της κοπριάς σαν λίπασμα. Αν μεγάλες ποσότητες αυτών των συστατικών μεταφερθούν από τις περιοχές στις οποίες γίνεται η χρήση τους, μέσω της απορροής στα υδάτινα σώματα μπορεί να αποτελέσουν απειλή για την ποιότητα του νερού, αφού η διαλυτότητά τους στο νερό είναι μικρή και εξαρτάται κάθε φορά από την σύνθεση των υλικών. Τέλος, υψηλές συγκεντρώσεις ορισμένων συστατικών στο νερό μπορεί να είναι τοξικές για τον άνθρωπο ή τα ζώα και επίσης μπορεί να επιταχύνουν το φαινόμενο του ευτροφισμού στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή, γίνεται συχνά χρήση φυτοφαρμάκων. Σε περιοχές που υπάρχει σχέδιο για να αυξηθεί η παραγωγή μπορεί να προκύψουν ασθένειες των φυτών και παράσιτα και έτσι χρησιμοποιούνται αρκετά φυτοφάρμακα. Υπάρχει, επίσης, το ενδεχόμενο πληθυσμοί παρασίτων ή ασθένειες φυτών να αναπτύξουν ανοσία σε ορισμένα φυτοφάρμακα και έτσι να χρειαστεί να γίνει ακόμα πιο εκτεταμένη χρήση τους. Τα φυτοφάρμακα μπορεί να εφαρμοστούν από τον αέρα, από την επιφάνεια ή στο έδαφος. Πολλά από αυτά είθισται να είναι τοξικά για τα ψάρια και για την υδρόβια ζωή ενώ είναι πιθανό να παραμένουν στα υδάτινα σώματα για αρκετά μεγάλες χρονικές περιόδους.

Η απορροή από καλλιεργούμενες εκτάσεις, κυρίως αρδευόμενες, συχνά μεταφέρει μεγάλες ποσότητες αλάτων οι οποίες αποτελούν μια από τις κυριότερες πηγές ρύπανσης των αρδευόμενων εκτάσεων. Η ποσότητα του νερού της άρδευσης πρέπει να είναι ικανή και για τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής των φυτών καθώς και για την έκπλυση της περιοχής των ριζών τους από άλατα. Οι διαδικασίες αυτές της εξατμισοδιαπνοής προκαλούν την αύξηση της περιεκτικότητας του νερού, που δεν χρησιμοποιείται από τις καλλιέργειες, σε άλας. Το νερό αυτό όταν κινείται στην επιφάνεια και στα υπόγεια ύδατα προκαλεί την υποβάθμιση της ποιότητας τους και προκαλεί ρύπανση.

Οργανικοί ρύποι προκύπτουν από υπολείμματα καλλιεργειών και από άλλα υλικά που έχουν προκύψει από τις αγροτικές περιοχές στα υδάτινα σώματα. Μπορεί να προκαλέσουν την αύξηση του BOD (Biochemical Oxygen Demand) και ακόμη να αποτρέψουν την πρόσληψη οξυγόνου από πολλούς υδρόβιους οργανισμούς, και τελικά να πεθάνουν.

### **2.1.2 Ζωική παραγωγή**

Η ζωική παραγωγή με τη σειρά της διακρίνεται σε δύο ομάδες: την περιορισμένη ζωική παραγωγή και την εντατική ζωική παραγωγή με βοσκή.

Οι ρυπογόνοι παράγοντες, από την περιορισμένη ζωική παραγωγή, έχουν κατά καιρούς προκαλέσει μεγάλη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Συνήθως είναι θρεπτικά συστατικά, οργανικά στοιχεία, ιζήματα, άλατα καθώς και παθογόνοι μικροοργανισμοί. Η ρύπανση των υδάτων που προκύπτει κοντά στις περιοχές βόσκησης οφείλεται στο γεγονός ότι η προστατευτική βλάστηση αφαιρείται από την επιφάνεια του εδάφους, το έδαφος ποδοπατείται, συμπυκνώνεται και εν τέλει φθείρεται η δομή του. Επίσης, διάφορες οργανικές ουσίες και άλλοι ρύποι καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, η παραγωγή ιζημάτων, θρεπτικών συστατικών, οργανικών στοιχείων και παθογόνων μικροοργανισμών είναι αναπόφευκτη.

Τόσο η περιορισμένη ζωική παραγωγή όσο και η παραγωγή με βοσκή ρυπαίνουν τα γειτονικά υδάτινα σώματα με τα ιζήματα που δημιουργούνται σε αυτές. Σε εγκαταστάσεις μονάδων ζωικής παραγωγής μπορούν να υπάρξουν οργανικά ιζήματα τα οποία κυρίως δημιουργούνται από κοπριές των ζώων. Συχνά τα ιζήματα είναι συνδεδεμένα με μια ποικιλία άλλων ρύπων όπως τα φυτοφάρμακα ή θρεπτικά συστατικά που προκαλούν επιπλέον ρύπανση και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Περιοχές οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί για βόσκηση και το έδαφος μένει ακάλυπτο και εκτεθειμένο στα στοιχεία της φύσης, αποτελούν μη σημειακές πηγές ρύπανσης. Η διάβρωση του εδάφους οδηγεί στη δημιουργία ιζημάτων που ρυπαίνουν τους υδατικούς πόρους.

Τα θρεπτικά συστατικά απαρτίζουν μια συνηθισμένη μορφή ρύπων που συναντάει κανείς στις ζωικές παραγωγές. Η ποσότητα και ο τύπος αυτών ποικίλει ανάλογα με το είδος των ζώων και στους ρυθμούς τάϊσματος των ζώων. Το άζωτο και ο φώσφορος είναι τα δύο συστατικά που εντοπίζονται κυρίως στις κοπριές των ζώων. Η περιεκτικότητα του αζώτου στα απόβλητα των ζώων ποικίλλει από 0,2% έως 1,8% του συνολικού τους βάρους εξαρτώμενη από πολλές μεταβλητές και κυρίως τον χρόνο. Η περιεκτικότητα σε φώσφορο δεν παρουσιάζει σπουδαίες αλλαγές ανάλογα με τον χρόνο. Όταν διάφορες ενώσεις συστατικών όπως τα ιόντα του αζώτου, της αμμωνίας και του φωσφόρου είναι διαλυμένα στο νερό τότε υπάρχει άμεση απειλή ρύπανσης, ενώ μεταφέρονται ευκολά με την ροή του ποταμού. Επίσης, περίσσεια νιτρικών αλάτων από τις κοπριές των ζώων μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων σε περιοχές που τα ζώα συναθροίζονται.

Τα άλατα και τα φυτοφάρμακα αποτελούν επίσης πιθανούς ρύπους των νερών σε υδάτινα σώματα που βρίσκονται κοντά σε μονάδες ζωικής παραγωγής. Αλατούχα υλικά που σχετίζονται με τις κοπριές των ζώων προκύπτουν από το τάισμα των ζώων με σκοπό την αύξηση του πάχους τους. Ακόμη περίσσεια αλάτων προκύπτει από την τροφή των ζώων που παραμένει στις κοπριές τους. Τα άλατα αυτά παρασύρονται από την απορροή και, σε συνδυασμό με τα άλατα στο έδαφος, προκαλούν την ρύπανση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων. Προκειμένου να αποφευχθούν οι ασθένειες των φυτών και να μείνουν τα παράσιτα σε χαμηλά επίπεδα, γίνεται χρήση φυτοφαρμάκων που μαζί με την κοπριά μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ζημιά στην ποιότητα των υδάτων.

## **2.2 Αστικές περιοχές**

Όπως είναι φυσικό, μια αστική περιοχή δημιουργεί ποικίλους ρύπους που οφείλονται καθαρά και μόνο στην ανθρώπινη παρέμβαση. Από τα νοικοκυριά μέχρι τις μεγάλες βιομηχανίες προκαλούνται ρυπογόνοι παράγοντες που με τα όμβρια ύδατα είναι εύκολο να μεταφερθούν στα υδατορέματα. Η ποσότητα των στερεών αποβλήτων από τις αστικές μη σημειακές πηγές ρύπανσης είναι ιδιαίτερα



σημαντική. Μερικοί τέτοιοι ρύποι είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκόνη από βιομηχανικές δραστηριότητες όπως από την παρασκευή τσιμέντου, τη λειτουργία χαλυβουργείων και από διάφορες χημικές δραστηριότητες. Ακόμη, η σκόνη από την καύση οργανικών καυσίμων μπορεί να προκαλέσει ζημιά. Τέλος, κάποιοι άλλοι ρύποι είναι τα στερεά που προκύπτουν σε μεγάλες ποσότητες από την σκόνη των δρόμων, από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων, από οργανικά υπολείμματα από τα φύλλα των δένδρων και το κούρεμα του χορταριού καθώς και από τα απορρίμματα.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται μερικοί φορτωτικοί συντελεστές για κάποιες χρήσεις γης. Δηλαδή, οι ποσότητες ρύπων που προκύπτουν από την αντίστοιχη χρήση γης σε ετήσιο επίπεδο.

*Πίνακας 2.1 : Παράδειγμα φορτωτικών συντελεστών βάση των χρήσεων γης. Πηγή: M.N. Beaulac, K.H. Reckhow (1982)*

Land Use	Total Phosphorus		Total Nitrogen	
	Median	Range	Median	Range
Urban	1.1	0.2 - 6.2	5.2	2.0 - 38.5
Forest	0.2	0.02 - 0.8	2.2	1.5 - 6.5
Mixed Agriculture	0.9	0.1 - 3.2	14.0	2.5 - 41.5
Pasture	0.85	0.15 - 2.7	5.0	2 - 30.9
Row Crops	2.2	0.15 - 18.6	8.5	3 - 79.6
Non-Row Crops	0.8	0.1 - 2.8	6	1 - 7.5



### **3. Υδρολογικά μοντέλα**

Η ρύπανση του νερού από μη σημειακές πηγές αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο είναι δύσκολο να μελετηθεί, να παρατηρηθεί και να επιλυθεί. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την μελέτη της ρύπανσης αυτής αλλά και με την ανάπτυξη διάφορων μαθηματικών μοντέλων για την επίτευξή των παραπάνω διαδικασιών.

Ως μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης περιβαλλοντικών συστημάτων μπορεί να θεωρηθεί η μαθηματική περιγραφή φυσικών, χημικών, βιολογικών και άλλων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα. Στα μοντέλα αυτά εισάγονται δεδομένα και με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων εξάγονται δεδομένα που περιγράφουν με ακρίβεια τα φαινόμενα που συμβαίνουν στο φυσικό περιβάλλον. Τα μαθηματικά μοντέλα, με κατάλληλη αλλαγή των δεδομένων εισαγωγής, μπορεί να περιγράψουν και τις επιπτώσεις εξωγενών πιέσεων που δέχεται το σύστημα.

Οι μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου περιλαμβάνουν ποικίλες παραμέτρους, τις οποίες ο ερευνητής ρυθμίζει με σκοπό την ελάχιστη απόκλιση από τις τιμές που έχουν προκύψει από μετρήσεις ή παρατηρήσεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται βαθμονόμηση. Απαραίτητη μετά το σχεδιασμό είναι η επαλήθευση του μοντέλου κατά την οποία εισάγονται διαφορετικά δεδομένα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με φυσικές τιμές.

#### **3.1. Ιστορική εξέλιξη μοντέλων**

Τα πρώτα βήματα στην δημιουργία μοντέλων για την ποιότητα του νερού έγιναν το 1925 με την εμφάνιση του μοντέλου που χρησιμοποιεί τις εξισώσεις Streeter-Phelps (H.W. Streeter, E.B. Phelps 1925) και προσομοιώνει τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου σε όλο το μήκος ενός υδατορέματος. Η προσομοίωση

διατηρεί σταθερή την εισαγωγή οργανικού άνθρακα στο υδατόρεμα και κατά συνέπεια προκύπτουν αρχικές συγκεντρώσεις στο σημείο εισόδου της ρύπανσης που μετέπειτα μεταβάλλονται. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε βάση για τη δημιουργία πολλών σημερινών μοντέλων.

Στη δεκαετία του 1950 το Αμερικανικό Υπουργείο Γεωργίας (U.S. Department of Agriculture) αναγνώρισε την ανάγκη να δημιουργηθούν μοντέλα που θα υπολόγιζαν την απορροή από τη βροχόπτωση συναρτήσει των καλλιεργειών, του εδάφους, της υγρασίας καθώς και άλλων παραμέτρων. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το SCS curve number model (SCSCN) (U.S. Soil Conservation Service 1972) το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μια βασική παράμετρο για τον υπολογισμό της απορροής και της διήθησης. Ο αριθμός της καμπύλης παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με την χρήση γης, το υδρολογικό είδος του εδάφους, την κλίση και τις υδρολογικές συνθήκες. Η τεχνική αυτή επιλέγεται από πολλά μοντέλα καθώς συγκεντρώνει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Αποδοτικότητα
- Αξιοπιστία
- Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι διαθέσιμα
- Συσχετίζει την απορροή με το είδος του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης.

Ακόμη, δημιουργήθηκε η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation)(W.H. Wischmeier, D.D. Smith 1965) για τον υπολογισμό της διάβρωσης του εδάφους από το νερό. Η εξίσωση αυτή είναι μια απλή εξίσωση παλινδρόμησης που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από ερευνητές και είναι ενταγμένη σε πολλά νέα μοντέλα.

## **3.2.Παρουσίαση επιλεγμένων μοντέλων**

### **3.2.1. Το Stanford Watershed Model**

Το 1962 δημοσιεύεται από τους Crawford and Linsley (Crawford, Linsley 1962) ένα από τα πρώτα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης που έμεινε γνωστό με το όνομα Stanford Watershed Model. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί απλουστευμένες

εξισώσεις για τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής όπως η επίγεια και υπόγεια απορροή, η ικανότητα αποθήκευσης σε νερό των εδαφικών στρωμάτων, η κατείδυση, καθώς και η εξατμισοδιαπνοή, με σκοπό να υπολογιστεί η ροή του ρέματος από παρατηρήσεις βροχόπτωσης. Φυσικά, το μοντέλο απαιτεί βαθμονόμηση για κάθε λεκάνη απορροής ενώ αρχικά προοριζόταν για να δείχνει πως επηρεάζεται η απορροή από διάφορες αλλαγές στη λεκάνη.

Με βάση το μοντέλο αυτό έγιναν πάρα πολλές μελέτες και πολλοί επιστήμονες προχώρησαν στη βελτιστοποίηση του, κυρίως στις διαδικασίες της βαθμονόμησης. Σημειώνεται ότι πάνω στη δομή του μοντέλου αυτού έχουν δομηθεί πολλά σύγχρονα υδρολογικά μοντέλα μικρής κλίμακας.

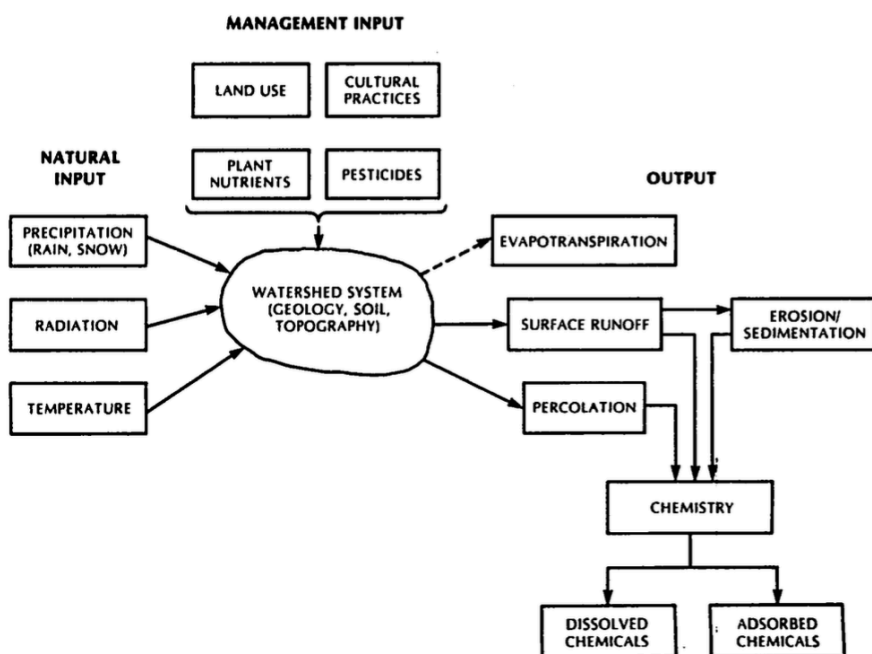
### **3.2.2. Το μοντέλο CREAMS**

Το μοντέλο Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS)(Knisel Jr, Walter G.) βασίζεται στις φυσικές διεργασίες και μπορεί να λειτουργήσει με ημερήσιο χρονικό βήμα. Είναι σε θέση να υπολογίζει την απορροή, την μεταφορά ιζήματος, τα θρεπτικά συστατικά από τα φυτά καθώς και φορτία χημικών ουσιών όπως φυτοφάρμακα και εντομοαπωθητικά σε περιοχές μικρής έκτασης. Το μοντέλο λειτουργεί με δύο τρόπους ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των βροχομετρικών δεδομένων. Στην περίπτωση που διατίθενται ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, για τον υπολογισμό της απορροής εφαρμόζεται το SCSCNM, ενώ αν υπάρχουν ωριαία δεδομένα βροχής χρησιμοποιείται ένα μοντέλο με βασική αρχή τη διήθηση. Και στις δύο περιπτώσεις υπολογίζεται η διήθηση διαμέσου της ζώνης του εδάφους που βρίσκονται οι ρίζες των φυτών.

Όσο αναφορά τη διάβρωση του εδάφους, το μοντέλο χρησιμοποιεί συστατικά από την Universal Soil Loss Equation (USLE) αλλά περιλαμβάνει για την επιφανειακή απορροή, τη μεταφορά ιζήματος. Παράλληλα, το μοντέλο αυτό μπορεί να λάβει υπόψη του τις κατακρατήσεις που συμβαίνουν στη λεκάνη του υδατορέματος αλλά και διαθέτει μια λειτουργία που μπορεί να εξετάζει τη ροή του ιζήματος.

Το μοντέλο CREAMS υποστηρίζει ένα υπό-μοντέλο που είναι υπεύθυνο για τα θρεπτικά συστατικά το οποίο διακρίνεται στα εξής μέρη. Το μέρος του αζώτου που εξετάζει την ορυκτοποίηση, την νιτροποίηση και την απονιτροποίηση. Υπολογίζει την πρόσληψη του αζώτου από τα φυτά καθώς και την ποσότητα που διηθείται στα διάφορα στρώματα του εδάφους. Τόσο το μέρος του αζώτου όσο και του φωσφόρου, που επίσης υπάρχει, χρησιμοποιούν ποσοστά εμπλουτισμού για να υπολογίσουν τις ποσότητες των δύο αυτών χαρακτηριστικών που μεταφέρονται με το ίζημα.

Το μοντέλο διαθέτει, επίσης, και παράρτημα για τις χημικές ουσίες που έχει γίνει η εφαρμογή τους από τον άνθρωπο όπως φυτοφάρμακα και εντομοαπωθητικά. Αυτό το σκέλος εξετάζει την πρόσληψη τους από τα φυτά και τον υποβιβασμό τους στα εδάφη. Όπως και στο κομμάτι του ιζήματος και αυτό το μέρος του προγράμματος χρησιμοποιεί ποσοστά εμπλουτισμού και συντελεστές στεγανοποίησης για να υπολογίσει ξεχωριστά τις περιπτώσεις απώλειας των ουσιών διαμέσου του ιζήματος καθώς και λόγω του νερού (Knisel, Walter G.).



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής του μοντέλου CREAMS για την αξιολόγηση των μη σημειακών πηγών ρύπανσης. Πηγή: Knisel, Walter G

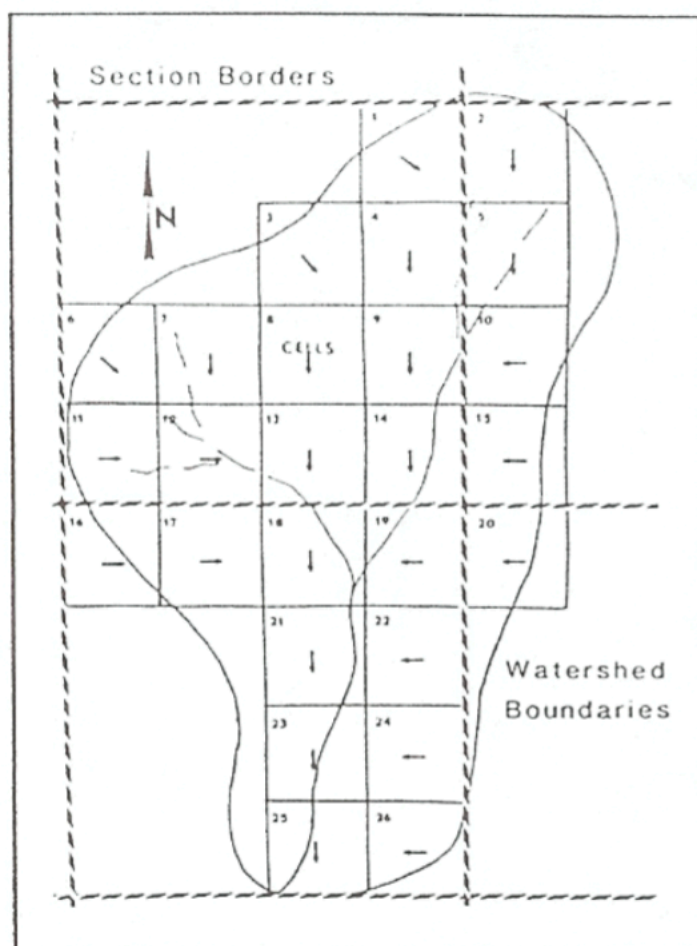
### 3.2.3. Το μοντέλο AGNPS

Το Agricultural Nonpoint Source μοντέλο (R.A. Young et al. 1989) δημιουργήθηκε από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών (ARS) σε συνδυασμό με την Υπηρεσία Ελέγχου Ρύπανσης της Μινεσότα και της SCS (Soil Conservation Service). Το μοντέλο αναπτύχθηκε και υπολογίζει την απορροή και την ποιότητα του νερού για λεκάνες απορροής μέχρι και 50000 στρεμμάτων.

Το AGNPS βασίζεται σε γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη. Προσομοιώνει την απορροή καθώς και τη μεταφορά ιζήματος και θρεπτικών συστατικών από αγροτικές περιοχές. Τα θρεπτικά συστατικά που θεωρείται ότι επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των υδάτων είναι το άζωτο και ο φώσφορος. Το μοντέλο θεωρεί τα ρέματα που πέφτουν στο κυρίως υδατόρεμα ως σημειακές πηγές ιζήματος καθώς και ότι οι περιοχές βοσκής ή άλλες πηγές συνεισφέρουν σε ίζημα, θρεπτικά συστατικά και στη χημική ζήτηση οξυγόνου (COD). Ως χημική ζήτηση οξυγόνου εννοείται η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση των αποβλήτων.

Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρά κελιά και πάνω σε αυτά εφαρμόζονται οι εξισώσεις του μοντέλου, γεγονός που διευκολύνει την ανάλυση σε οποιοδήποτε σημείο της. Οι πιθανοί ρύποι μεταφέρονται από κελί σε κελί μέχρι την έξοδο της λεκάνης και έτσι ελέγχεται η απορροή που εξέρχεται και εισέρχεται αντίστοιχα στα κατάντη κελιά. Φυσικά, η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των κελιών, όσο μικρότερα είναι τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα αλλά μεγαλώνει ο χρόνος υπολογισμού. Αντίθετα, οι υπολογισμοί σε μεγάλα κελιά είναι πιο σύντομοι αλλά τα αποτελέσματα είναι μικρότερης ακρίβειας.

Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές χώρες για την αξιολόγηση διάφορων λεκανών απορροής και για την αναγνώριση της ποιότητας των υδάτων που τις διατρέχουν.



Εικόνα 3.2 : Δείγμα διαχωρισμού λεκάνης απορροής σε μικρότερα κελιά. Πηγή: R.A.Young et al. (1989)

### 3.2.4. Το μοντέλο HSPF

Το Hydrological Simulation Program-Fortran (B.R. Bicknell et al. 1996), όπως αναπτύχθηκε από την Environmental Protection Agency (EPA), αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πακέτο για υδρολογική προσομοίωση λεκανών απορροής καθώς και για την μελέτη της ποιότητας των υδάτων, τόσο από συμβατικούς, όσο και από τοξικούς ρύπους. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει τα μοντέλα Agricultural Runoff Model (ARM) και NonPoint Source (NPS) σε ένα σύστημα ανάλυσης σε κλίμακα λεκάνης απορροής που επεξεργάζεται τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Είναι ένα από τα λίγα μοντέλα που συνδυάζουν την υδραυλική των ρεμάτων, και τη μεταφορά ιζήματος και θρεπτικών για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της απορροής.



Το HSPF περιλαμβάνει συνολικά εννιά ενότητες. Οι τρεις ενότητες από αυτές που αφορούν την εφαρμογή προσομοιώνουν τις υδρολογικές/υδραυλικές παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά που υποδηλώνουν την ποιότητα των υδάτων της λεκάνης. Οι υπόλοιπες έξι είναι βοηθητικές και χρησιμοποιούνται για να αναλύουν και να επεξεργάζονται διάφορα δεδομένα χρονοσειρών .

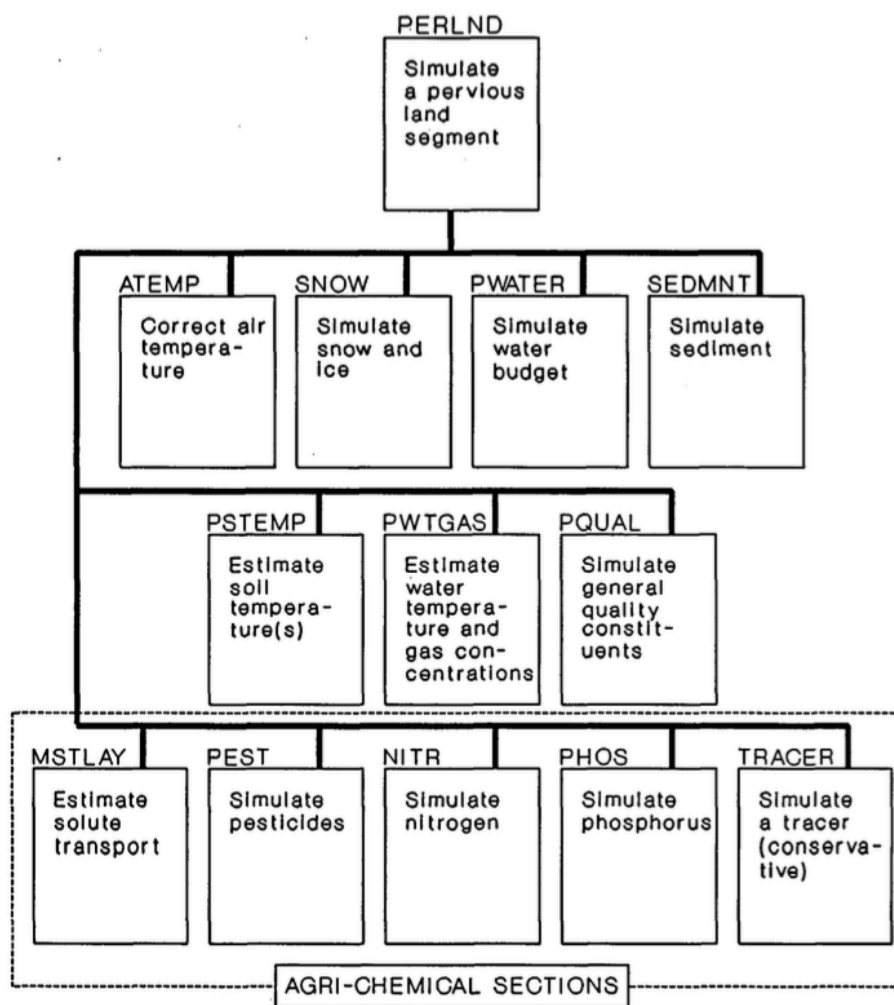
Οι τρεις βασικές ενότητες και οι πρωτεύουσες λειτουργίες τους είναι :

1. PERLND: Προσομοιώνει την απορροή και τις παραμέτρους ποιότητας του νερού των διαπερατών περιοχών της λεκάνης.
2. IMPLND: Προσομοιώνει την απορροή και τις παραμέτρους ποιότητας του νερού των αδιαπερατών περιοχών της λεκάνης.
3. RCHRES: Προσομοιώνει την κίνηση του νερού και την ποιότητα αυτού στα κανάλια και στις περιοχές που λιμνάζει.

Όπως είναι φυσικό το PERLND χρησιμοποιείται πιο συχνά στο HSPF καθώς αφορά στην προσομοίωση των εκτάσεων που είναι πιο ευνοϊκές για την κίνηση του νερού. Για την προσομοίωση των διεργασιών, η ενότητα αυτή θεωρεί τρία πιθανά μονοπάτια του νερού, το επίγειο, το υπόγειο και διαμέσου του εδάφους. Κάθε διαδρομή διαφέρει από τις άλλες ως προς το χρόνο ή και τις αλληλεπιδράσεις του νερού με τα διάφορα συστατικά που συναντάει αυτό στο δρόμο του.

Τέλος, μερικές από τις δυνατότητες του PERLND και κατά συνέπεια του HSPF είναι:

- Ο υπολογισμός της διαθεσιμότητας του νερού και της απορροής
- Η συσσώρευση και το λιώσιμο του χιονιού
- Η παραγωγή και μεταφορά ιζήματος
- Η μεταφορά αζώτου και φωσφόρου
- Η μεταφορά και ανίχνευση εντομοαπωθητικών και παρόμοιων χημικών ουσιών.



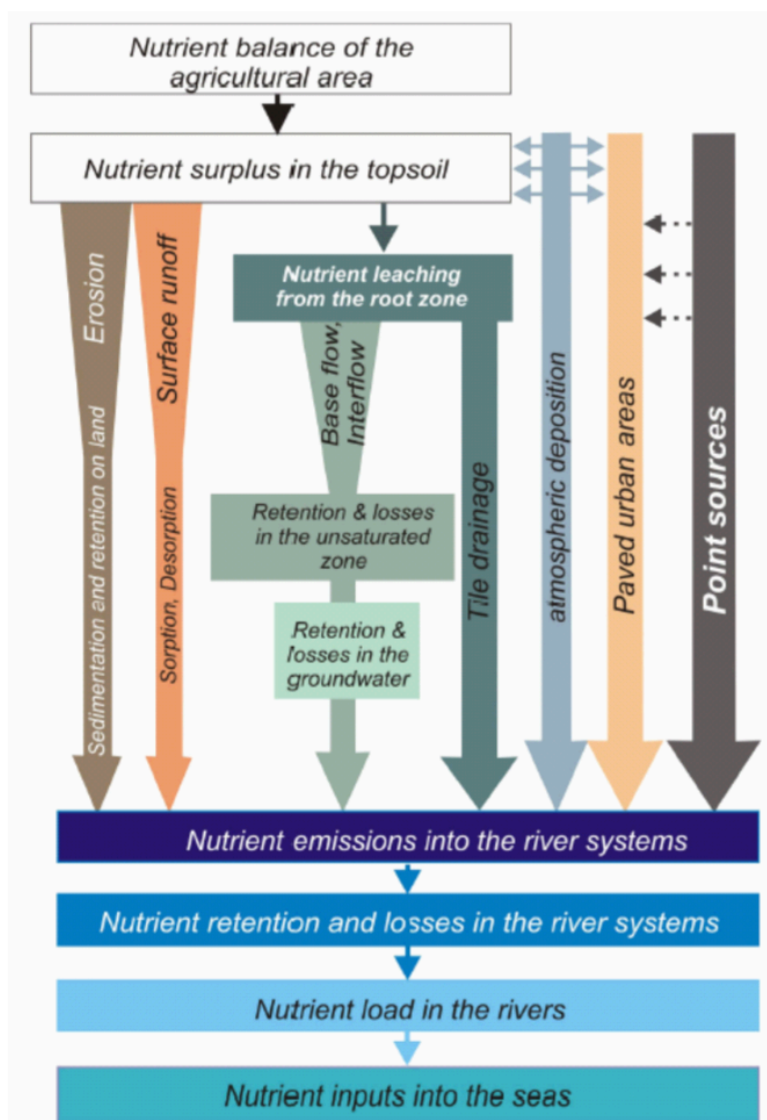
Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα ροής του HSPF PERLND. Πηγή: Aquaterra Consultants (1996)

### 3.2.5. Το μοντέλο Moneris

Ένα ακόμα μοντέλο που προσομοιώνει τη ρύπανση από σημειακές και μη σημειακές πηγές είναι το MOdelling Nutrient Emissions in River Systems (Tsakiris G., Alexakis D. 2012). Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε αρχικά για εφαρμογές στη Γερμανία και στη συνέχεια επεκτάθηκε για να μπορεί να χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε λεκάνη απορροής έκτασης περίπου πάνω από πενήντα τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον Excel και GIS, ενώ οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των αποθέσεων θρεπτικών είναι κυρίως εμπειρικές.

Το μοντέλο υπολογίζει τις αποθέσεις αζώτου, φωσφόρου και πυριτίου μέσα από ένα σύστημα διαφορετικών χωρικών μονάδων και διαδρομών. Υπάρχουν επτά

τέτοιες διαδρομές για την μεταφορά ρύπων οι οποίες είναι: α) οι σημειακές πηγές, β) η ατμοσφαιρική κατακρήμνιση τους, γ) οι αστικές περιοχές, δ) η διάβρωση, ε) τα υπόγεια ύδατα, στ) η αποστράγγιση από τις καλλιέργειες καθώς και ζ) η επιφανειακή απορροή.



Εικόνα 3.4 : Σχηματική λειτουργία του μοντέλου MONERIS. Πηγή : Behrendt et al. (2007)

Συμπερασματικά, το MONERIS αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο μοντέλο παρόλο που εμφανίζει κάποιους περιορισμούς, όπως το γεγονός ότι δεν είναι δυναμικό ή ότι δεν μπορεί να προβλέψει μεταβατικές καταστάσεις, δηλαδή την εναλλαγή σεναρίων. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές λεκάνες της Βαλτικής, σε όλη τη Γερμανία όπως επίσης και σε πολλά άλλα ευρωπαϊκά προγράμματα (Ζαρντάβα et al.).

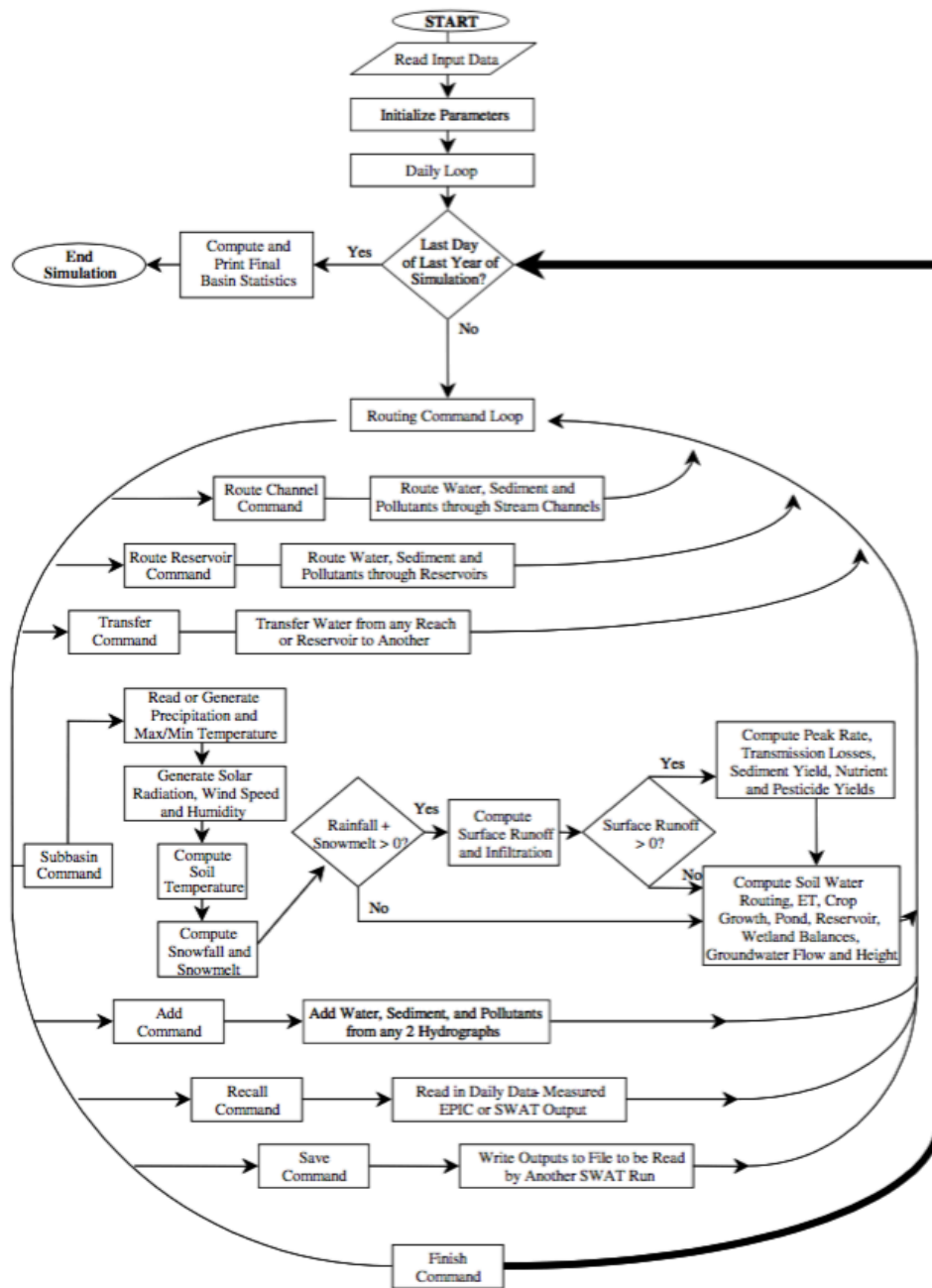
### 3.2.5. Το μοντέλο SWAT

Το Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (S.L. Neitsch et al. 2011) αποτελεί ένα σύνθετο, ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο, με τη δυνατότητα χωρικής παραμετροποίησης που έχει δημιουργηθεί από την U.S. Department of Agriculture (USDA) έπειτα από πολυετή εμπειρία στην ανάπτυξη αντίστοιχων μοντέλων. Ο στόχος του μοντέλου είναι να υπολογίζει την επίδραση της χρήσης γης στην απορροή, στην παραγωγή και μεταφορά ιζήματος και στη μεταφορά αγροτικών χημικών προϊόντων σε λεκάνες απορροής. Το μοντέλο λειτουργεί με ημερήσιο χρονικό βήμα. Το γεγονός ότι είναι ένα μοντέλο που βασίζεται σε εύκολα προσβάσιμα δεδομένα καθώς και ότι μπορεί να προσομοιώσει μεγάλες χρονικές περιόδους σε μεγάλες λεκάνες σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, βοηθάει στην υλοποίηση του στόχου και το καθιστά εύκολο να το επιλέξουν οι μελετητές. Τα βασικά συστατικά του μοντέλου είναι η υδρολογία, ο καιρός, τα εδάφη, η ανάπτυξη των φυτών, τα θρεπτικά συστατικά, τα φυτοφάρμακα και οι χρήσεις γης.

Το μοντέλο λειτουργεί χωρίζοντας την λεκάνη απορροής σε μικρότερα κομμάτια. Αυτές οι υπολεκάνες, ή αλλιώς Hydrologic Response Units (HRU), έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά ως προς την κλίση του εδάφους, το έδαφος και τις χρήσεις γης. Το ισοζύγιο του νερού σε κάθε HRU παρουσιάζεται σε τέσσερα επίπεδα: το χιόνι, το προφίλ του εδάφους, τον ρηχό και τον βαθύ υπόγειο υδροφόρα. Τα εδάφη μπορεί να χωριστούν σε πολλά στρώματα αν έχουν διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικά βάθη. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο έδαφος είναι η εξάτμιση, η διήθηση, η πρόσληψη από τα φυτά, η πλευρική ροή και τέλος η διήθηση σε κατώτερα στρώματα. Όπως είναι φυσικό, η διήθηση στο τελευταίο στρώμα τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφόρα. Τα αποτελέσματα ως προς την απορροή, το ίζημα και την φόρτωση από μη σημειακές πηγές ρύπανσης για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) προστίθενται και καταλήγουν στην έξοδο της λεκάνης μέσω των καναλιών.

Το SWAT έχει επαληθευτεί για την ακρίβειά του σε πολλές εφαρμογές τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής όπου και εφαρμόστηκε πρώτα όσο και στον

υπόλοιπο πλανήτη (V.A.Tsihrintzis et al 1996), (E. Varanou et al. 2002),( M.T. Vu et al. 2012).



Εικόνα 3.5 : Διάγραμμα ροής SWAT 2000. Πηγή : J.G. Arnold (2005)



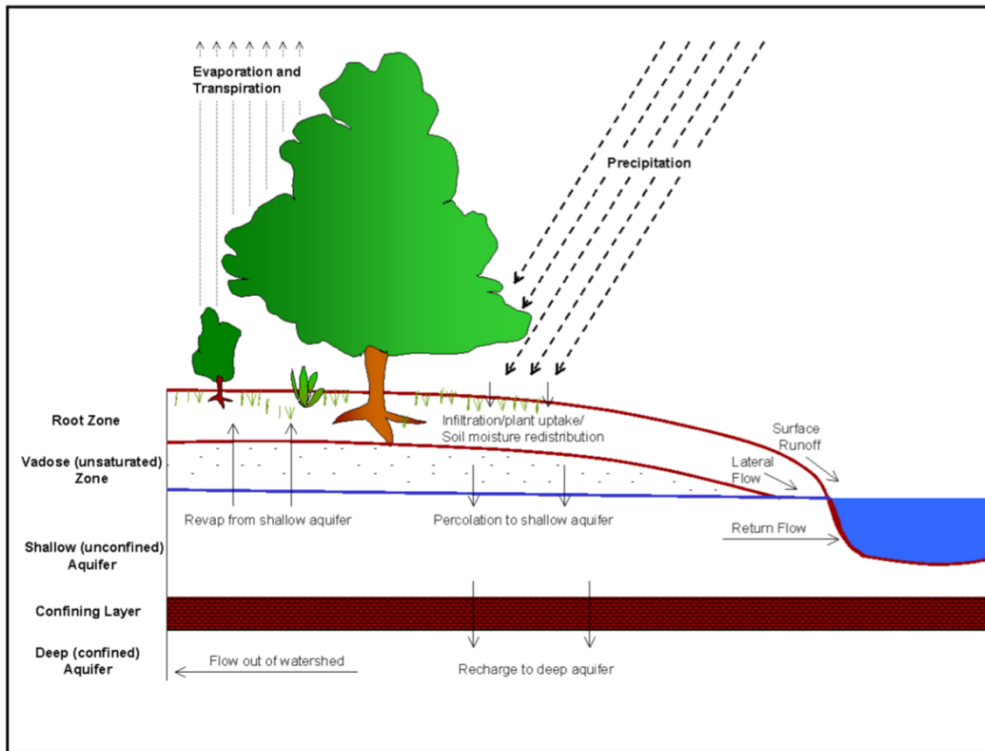
## 4. Περιγραφή μοντέλου SWAT

### 4.1 Υδρολογικός κύκλος

Όπως αναφέρθηκε, το SWAT είναι ένα ολοκληρωμένο σύγχρονο υδρολογικό μοντέλο. Σε κάθε προσομοίωση εκτελούνται διάφορες φυσικές διεργασίες οι οποίες θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Το SWAT λειτουργεί χωρίζοντας την λεκάνη απορροής σε μικρότερες υπολεκάνες. Ο χωρισμός αυτός αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο αφού δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να διαφοροποιεί περιοχές με διαφορετικές χρήσεις γης και ιδιότητες εδαφών. Παράλληλα, είναι βοηθητικό στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και στον χωρικό τους συσχετισμό. Τα δεδομένα εισαγωγής κατηγοριοποιούνται για κάθε υπολεκάνη στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU) , το κλίμα, τα υπόγεια ύδατα, περιοχές με στάσιμα νερά καθώς και το κύριο κανάλι που διασχίζει την λεκάνη.

Σε κάθε εφαρμογή του SWAT, τον πιο καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το υδατικό ισοζύγιο. Ο υδρολογικός κύκλος, όπως προσομοιώνεται από το μοντέλο, είναι υπεύθυνος για τον ακριβή υπολογισμό όλων των αποτελεσμάτων, όπως η κίνηση των χημικών ουσιών, των θρεπτικών ή και των φερτών υλικών. Η προσομοίωση της υδρολογίας της λεκάνης απορροής μπορεί να χωριστεί σε δύο κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι αφορά τις χερσαίες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και είναι υπεύθυνο για την ποσότητα του νερού, των φερτών καθώς και των θρεπτικών και των χημικών ουσιών που καταλήγουν στα κυρίως υδατορεύματα των υπολεκανών. Αντιθέτως, το δεύτερο τμήμα της υδρολογικής προσομοίωσης ασχολείται με τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου από και προς τις υδάτινες περιοχές και αφορά στην κίνηση του νερού και των υπόλοιπων στοιχείων διαμέσου του υδρογραφικού δικτύου προς την έξοδο της λεκάνης.



Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου από χειρσαία τμήματα, Πηγή: Neitsch (2011)

## 4.2 Υδρολογικές διαδικασίες

Ο υδρολογικός κύκλος προσομοιώνεται στο SWAT βασισμένος στην παρακάτω εξίσωση υδατικού ισοζυγίου.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (4.1)$$

όπου:

$SW_t$ : είναι η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm H<sub>2</sub>O)

$SW_o$ : είναι η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm H<sub>2</sub>O)

$t$ : είναι ο χρόνος σε ημέρες (days)

$R_{day}$ : η ημερήσια βροχόπτωση (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{surf}$ : η ημερήσια απορροή (mm H<sub>2</sub>O)

$E_a$ : η εξατμισοδιαπνοή (mm H<sub>2</sub>O)

$w_{seep}$ : η διήθηση (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{gw}$ : η υπόγεια ροή (mm H<sub>2</sub>O)



Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή των μεγεθών τη εξίσωσης 4.1.

#### 4.2.1 Επιφανειακή Απορροή

Η επιφανειακή απορροή προκύπτει όταν η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στην επιφάνεια του εδάφους είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να απορροφήσει το έδαφος.

Για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής το μοντέλο διαθέτει δύο μεθόδους:

- Τη μέθοδο της SCS
- Την Green & Ampt infiltration method (1911)

Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS (U.S. Soil Conservation Service 1972), οι παράμετροι της οποίας αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια. Η επιφανειακή απορροή θα δίνεται από τον τύπο.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (4.2)$$

όπου:

$Q_{surf}$ : η επιφανειακή απορροή (mm H<sub>2</sub>O)

$R_{day}$ : η ημερήσια βροχόπτωση (mm H<sub>2</sub>O)

$I_a$ : οι αρχικές απώλειες (mm H<sub>2</sub>O)

$S$ : παράγοντας κατακράτησης (mm H<sub>2</sub>O)

Ο παράγοντας κατακράτησης αποτελεί μια μεταβλητή τιμή η οποία ποικίλλει ανάλογα με τα εδάφη, τις χρήσεις γης, τη διαχείριση της γης και τις κλίσεις του εδάφους. Προκύπτει από τον τύπο:

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4.3)$$

όπου:

CN: ο αριθμός της καμπύλης.

Οι τιμές του αριθμού καμπύλης προκύπτουν από πίνακες ανάλογα τη χρήση γης, την κατηγορία του εδάφους καθώς και την υδρολογική κατάσταση.

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα πίνακα με τιμές για το CN από το εγχειρίδιο της SCS για αγροτικές περιοχές. Πηγή: Neitsch (2011)

Cover Type	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing <sup>1</sup>	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	----	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element <sup>2</sup>	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm)	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods <sup>3</sup>	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	----	59	74	82	86

Η SCS αναγνωρίζει τρεις διαφορετικές καταστάσεις υγρασίας :

- I : Ξηρή κατάσταση,
- II : Μέση ή κανονική κατάσταση και
- III: Υγρή κατάσταση

Για κάθε κατάσταση από τις παραπάνω θεωρείται ένας διαφορετικός αριθμός καμπύλης  $CN_1$ ,  $CN_2$  και  $CN_3$  αντίστοιχα, που δίνονται από τις εξισώσεις.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)])} \quad (4.4)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0,00673(100 - CN_2)] \quad (4.5)$$

Οι τιμές που προκύπτουν από τους πίνακες του εγχειριδίου της SCS αφορούν κλίσεις εδαφών 5%. Σε κάθε άλλη περίπτωση κλίσης εφαρμόζεται ο τύπος :

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_2 \quad (4.6)$$

όπου:

slp: η μέση κλίση της υπολεκάνης

Από το SWAT2009 και μετά, οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να επιλέξουν μεταξύ δύο μεθόδων για τον υπολογισμό του συντελεστή παρακράτησης. Η μία μέθοδος σχετίζεται με το περιεχόμενο νερού του εδαφικού προφίλ ενώ η άλλη μέθοδος δίνει τη δυνατότητα στον συντελεστή  $s$  να παίρνει τιμές βάσει της εξατμισοδιαπνοής.

Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$S = S_{max} \left( 1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)]} \right) \quad (4.7)$$

όπου:

$S$ : ο συντελεστής παρακράτησης την προκείμενη μέρα (mm)

$S_{max}$ : η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής (mm)

$SW$ : η περιεκτικότητα του νερού στο έδαφος (mm H<sub>2</sub>O)

$w_1, w_2$ : συντελεστές σχήματος

Στην δεύτερη περίπτωση, που ο συντελεστής υπολογίζεται βάσει της εξατμισοδιαπνοής, εφαρμόζεται ο τύπος:

$$S = S_{prev} + E_a \cdot \exp\left(\frac{-cncoeff \cdot S_{prev}}{S_{max}}\right) - R_{day} + Q_{surf} \quad (4.8)$$

όπου:

$S$ : ο συντελεστής παρακράτησης (mm)

$S_{prev}$ : ο συντελεστής παρακράτησης της προηγούμενης μέρας (mm)  
 $E_a$ : δυνητική εξατμισοδιαπνοή για την ημέρα ( $mm\ d^{-1}$ )  
 $S_{max}$ : η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής (mm)  
 $c_{coef}$ : συντελεστής βάρους που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο συντελεστής παρακράτησης για κάθε καμπύλη και εξαρτάται από την εξατμισοδιαπνοή των φυτών  
 $R_{day}$ : η ημερήσια βροχόπτωση ( $mm\ H_2O$ )  
 $Q_{surf}$ : η επιφανειακή απορροή ( $mm\ H_2O$ )

Το μοντέλο διαθέτει και τύπο για τον υπολογισμό του συντελεστή παρακράτησης στην περίπτωση που η επιφάνεια του εδάφους είναι καλυμμένη με πάγο ή χιόνι.

$$S_{frz} = S_{max} [1 - \exp(0,000862 \cdot S)] \quad (4.9)$$

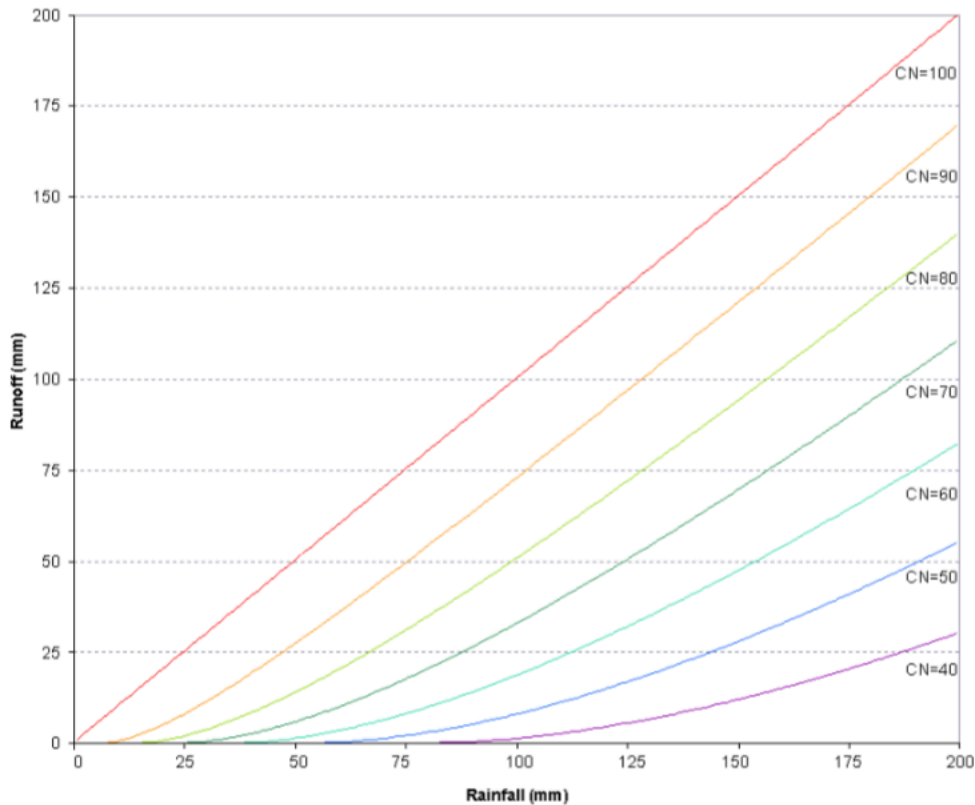
όπου:

$S_{frz}$ : ο συντελεστής παρακράτησης σε συνθήκες πάγου.

Ο συντελεστής απομάκρυνσης του νερού ( $I_a$ ) από τις διαδικασίες διήθησης συνήθως παίρνει τιμές ίσες με το 0,2 του  $S$ . Συνεπώς, η εξίσωση της επιφανειακής απορροής διαμορφώνεται ως εξής :

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (4.10)$$

Παρακάτω, στην Εικόνα 4.2 δίνεται και ένα διάγραμμα που παρουσιάζει πως διαμορφώνεται η απορροή για διαφορετικές καμπύλες και δεδομένα βροχόπτωσης.



Εικόνα 4.2: Σχέση Curve Numbers με απορροή και βροχοπτώση. Πηγή: Neitsch (2011)

#### 4.2.2 Διήθηση

Το μοντέλο υπολογίζει την διήθηση από κάθε στρώμα του εδαφικού προφίλ. Στην περίπτωση που η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από την αποθηκευτικότητα κάθε στρώματος, τότε αυτό διηθείται στα κατώτερα στρώματα.

Η ποσότητα του νερού που πρόκειται να διηθηθεί εκτιμάται ανάλογα με την ήδη υπάρχουσα ποσότητα νερού στο στρώμα.

$$SW_{ly,excess} = \begin{cases} SW_{ly} - FC_{ly} & \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \\ 0 & \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου:

$SW_{ly,excess}$ : ο όγκος νερού που διηθείται από ένα στρώμα σε μια μέρα (mm H<sub>2</sub>O)

$SW_{ly}$ : ο υπάρχων όγκος νερού στο εδαφικό στρώμα την ίδια μέρα (mm H<sub>2</sub>O)

$FC_{ly}$ : η χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος σε νερό (mm H<sub>2</sub>O)

Τελικά, ο τύπος που υπολογίζει την ποσότητα του νερού που μετακινείται από το ένα στρώμα στο άλλο είναι ο παρακάτω.

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (4.12)$$

όπου:

$W_{perc,ly}$ : η ποσότητα του νερού που διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα (mm H<sub>2</sub>O)

$\Delta t$ : το χρονικό βήμα (hrs)

$TT_{perc}$ : ο χρόνος που απαιτείται για την διήθηση (hrs)

Ο χρόνος της διήθησης υπολογίζεται από τον τύπο.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (4.13)$$

όπου:

$SAT_{ly}$ : η ποσότητα του νερού στο στρώμα όταν αυτό είναι εντελώς κορεσμένο (mm H<sub>2</sub>O)

$K_{sat}$ : η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού στρώματος (mm h<sup>-1</sup>)

#### 4.2.3 Εξατμισοδιαπνοή

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή συγκεντρώνει όλες τις διεργασίες με τις οποίες απομακρύνεται το νερό από το έδαφος και γίνεται υδρατμοί. Είναι ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο το νερό απομακρύνεται από την λεκάνη απορροής. Περίπου το 62% του νερού της βροχόπτωσης απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Η ακριβής εκτίμηση της είναι πολύ σημαντική σε εφαρμογές όπως αυτές που ασχολείται το μοντέλο SWAT.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τρεις μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Η πρώτη είναι η μέθοδος Penman-Monteith η οποία

χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου, και τη σχετική υγρασία μεταξύ άλλων. Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή του Hargreaves που χρησιμοποιεί την θερμοκρασία του αέρα και τέλος η Priestley-Taylor που χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα.

Στην εξίσωση 2.14 φαίνεται η εξίσωση που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αν επιλεγεί η μέθοδος Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (4.14)$$

όπου:

$\lambda E$ : η πυκνότητα ροής θερμότητας ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$E$ : το ποσοστό για το βάθος εξάτμισης ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$\Delta$ : η κλίση της καμπύλης πίεσης ατμού-θερμοκρασίας

$H_{net}$ : η καθαρή ακτινοβολία ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$G$ : η πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$\rho_{air}$ : η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_p$ : η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ )

$e_z^o$ : η κορεσμένη πίεση ατμών του αέρα σε ύψος  $z$  (kPa)

$e_z$ : η πίεση υδρατμών του αέρα σε ύψος  $z$  (kPa)

$\gamma$ : η ψυχρομετρική σταθερά ( $\text{kPa °C}^{-1}$ )

$r_a$ : η αεροδυναμική αντίσταση ( $\text{s m}^{-1}$ )

$r_c$ : η αντίσταση του φυτού ( $\text{s m}^{-1}$ )

Το μοντέλο υπολογίζει και την δυνητική εξάτμιση από το έδαφος με τον τύπο:

$$E_s = E_o \text{ cov}_{sol} \quad (4.15)$$

όπου:

$E_s$ : η δυνητική εξάτμιση από το έδαφος ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )

$\text{cov}_{sol}$ : ο δείκτης κάλυψης εδάφους ο οποίος υπολογίζεται συναρτήσει ενός συντελεστή βιομάζας  $CV$  ως εξής:

$$\text{cov}_{sol} = \exp(-5,0 \cdot 10^{-5} \cdot CV) \quad (4.16)$$

όπου:

CV: υπέργεια βιομάζα και υπολείμματα ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

Η μέγιστη ποσότητα όμως του νερού που εξατμίζεται από το έδαφος μειώνεται για περιόδους μεγάλης χρήσης του νερού από τα φυτά.

$$E'_s = \min \left( E_s, \frac{E_s \cdot E'_o}{E_s + E_t} \right) \quad (4.17)$$

#### 4.2.4 Υπόγεια νερά

Το νερό εισέρχεται στα υπόγεια συστήματα μέσω της διήθησης και απομακρύνεται με την εκροή του στα ποτάμια, λίμνες ή τη θάλασσα. Στις κορεσμένες αυτές ζώνες του εδαφικού προφίλ, είναι δυνατόν να βρεθούν συστατικά τόσο με χαμηλή όσο και με υψηλή αγωγιμότητα, που διευκολύνουν την ροή του νερού. Το γεωλογικό σύστημα το οποίο μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα νερού και να το μεταφέρει αρκετά γρήγορα ώστε να έχει υδρολογική σημασία, ονομάζεται υδροφορέας. Διακρίνονται δύο είδη υδροφορέων: ο περιορισμένος υδροφορέας και ο μη περιορισμένος. Ο περιορισμένος είναι αυτός που οριοθετείται από δύο αδιαπερατές στρώσεις γεωλογικών σχηματισμών όπου η αγωγιμότητα τους είναι πολύ πιο μικρή από αυτή του υδροφορέα. Ο μη περιορισμένος υδροφορέας είναι οριοθετημένος μόνο από την κάτω πλευρά και από πάνω τροφοδοτείται από την διήθηση των πρώτων στρωμάτων.

Το SWAT προσομοιώνει δύο υπόγειους υδροφορείς σε κάθε υπολεκάνη, τον ρηχό και τον βαθύ υδροφορέα. Ο ρηχός αποτελεί έναν μη περιορισμένο υδροφορέα που συνεισφέρει στην ροή του ποταμού ή στο ρέμα της κάθε υπολεκάνης. Ο βαθύς υδροφορέας θεωρείται ότι συνεισφέρει στην ροή του ποταμού κάπου έξω από την λεκάνη απορροής. Παρακάτω γίνεται ανάλυση της υπόγειας ροής βάση των δύο αυτών υδροφορέων

- Ρηχός υδροφορέας



Το υδατικό ισοζύγιο για τον ρηχό υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα είναι:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchr,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (4.18)$$

όπου:

$aq_{sh,i}$ : η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένη στον ρηχό υδροφορέα την μέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

$aq_{sh,i-1}$ : η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένη στον ρηχό υδροφορέα την μέρα  $i-1$  (mm H<sub>2</sub>O)

$w_{rchr,sh}$ : η ποσότητα νερού που ανατροφοδοτεί τον υδροφορέα (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{gw}$ : η ροή των υπόγειων υδάτων (mm H<sub>2</sub>O)

$w_{revap}$ : η ποσότητα του νερού που κινείται στην εδαφική ζώνη (mm H<sub>2</sub>O)

$w_{pump,sh}$ : η ποσότητα του νερού που απομακρύνεται από τον υδροφορέα λόγω άντλησης (mm H<sub>2</sub>O)

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των μεγεθων που φαίνονται στην εξίσωση (4.18)

- Ανατροφοδότηση

Το νερό πριν εισέλθει στους υπόγειους υδροφορείς κινείται στη ζώνη διήθησης και απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από το βάθος και τις υδραυλικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών. Το SWAT, για να υπολογίσει την ποσότητα του νερού που εισέρχεται στους υδροφορείς, χρησιμοποιεί μια εξίσωση (Venetis 1969), που τελικά χρησιμοποιήθηκε το 1984 (Sangrey 1984), η οποία λαμβάνει υπόψη της την καθυστέρηση της τροφοδότησης αυτής. Έτσι, η φόρτιση των υδροφορέων προκύπτει από την εξής εξίσωση:

$$w_{rchr,i} = \left(1 - \exp\left(\frac{-1}{\delta_{gw}}\right)\right) \cdot w_{seep} + \exp\left(\frac{-1}{\delta_{gw}}\right) \cdot w_{rchr,i-1} \quad (4.19)$$

όπου:

$\delta_{gw}$ : ο χρόνος καθυστέρησης (days)

$w_{seep}$ : η συνολική ποσότητα νερού που εξέρχεται από τον πυθμένα του εδαφικού προφίλ (mm H<sub>2</sub>O)

Η παραπάνω, όμως, ποσότητα νερού αφορά και τους δύο υδροφορείς οπότε για τον υπολογισμό του  $w_{rechrg,sh}$  που χρειάζεται για το ισοζύγιο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποσότητα του νερού που καταλήγει στον πιο βαθύ.

$$w_{deep} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg} \quad (4.20)$$

όπου:

$w_{deep}$ : η ποσότητα του νερού που μετακινείται στον βαθύ υδροφορέα (mm H<sub>2</sub>O)

$\beta_{deep}$ : ο συντελεστής διήθησης του υδροφορέα

Συνεπώς, η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον υπόγειο υδροφορέα μέσω της ανατροφοδότησης θα είναι:

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg} - w_{deep} \quad (4.21)$$

- Υπόγεια ροή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο ρηχός υδροφορέας συνεισφέρει στην απορροή του ποταμού και για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να υπολογιστεί η ποσότητα αυτή του νερού που καταλήγει στο επιφανειακό υδατόρεμα.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (4.22)$$

όπου:

$Q_{gw}$ : η υπόγεια απορροή (mm H<sub>2</sub>O)

$K_{sat}$ : η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα (mm/day)

$L_{gw}$ : η απόσταση από τον υδροκρίτη (m)

$h_{wtbl}$ : το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα (m)

Πολλές φορές, όμως, είναι πιθανό να υπάρχουν διακυμάνσεις στο ύψος του υδροφορέα όποτε χρησιμοποιείται η εξίσωση :

$$\frac{dh_{wtbl}}{dt} = \frac{w_{rchrg,sh} - Q_{gw}}{800 \cdot \mu} \quad (4.23)$$

όπου:

$\frac{dh_{wtbl}}{dt}$ : η διακύμανση του ύψους του υδροφορέα (mm/day)

$w_{rchrg,sh}$ : η ποσότητα νερού ανατροφοδότησης του υδροφορέα (mm H<sub>2</sub>O)

$\mu$ : η ειδική απόδοση του ρηχού υδροφορέα (m/m)

- Revar

Με τον όρο “revar” χαρακτηρίζεται το νερό που ρέει από τον ρηχό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ και χάνεται με την εξάτμιση ή την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών.

Η εξίσωση που δίνει την μέγιστη ποσότητα του νερού (mm H<sub>2</sub>O) που αφαιρείται από τον υδροφορέα μέσω του “revar” είναι η εξής:

$$w_{revar, mx} = \beta_{rev} \cdot E_o \quad (4.24)$$

όπου:

$\beta_{rev}$ : ο συντελεστής του “revar”

$E_o$ : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm H<sub>2</sub>O)

Στην πραγματικότητα, όμως, για τον υπολογισμό της πραγματικής ποσότητας νερού του υπό εξέταση φαινομένου λαμβάνεται υπόψη και η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένη στον υδροφορέα στην αρχή της μέρας.

$$w_{revap} = \begin{cases} 0 & \text{if } aq_{sh} \leq aq_{shtrr,rvp} \\ w_{revap,mx} - aq_{shtrr,rvp} & \text{if } aq_{shtrr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr} + w_{revap,mx}) \\ w_{revap,mx} & \text{if } aq_{sh} \geq (aq_{shthr} + w_{revap,mx}) \end{cases} \quad (4.25)$$

όπου:

$aq_{sh}$ : η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένη στον υδροφορέα την αρχή της μέρας (mm H<sub>2</sub>O)

$aq_{shthr,rvp}$ : το κατώφλι της ποσότητας του νερού που πρόκειται να εκτεθεί στο “reap” (mm H<sub>2</sub>O)

- Άντληση

Το μοντέλο μπορεί να λάβει υπόψη του περιπτώσεις που το νερό του υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιείται για την άρδευση ή για άλλες χρήσεις όπου υπάρχει κάποια γεώτρηση ή γίνεται κάποια άντληση.

- Βαθύς υδροφορέας

Το υδατικό ισοζύγιο στους βαθείς υπόγειους υδροφορείς είναι το ακόλουθο.

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (4.26)$$

όπου:

$aq_{dp}$ : η ποσότητα νερού στον βαθύ υδροφορέα την μέρα  $i$  (mm H<sub>2</sub>O)

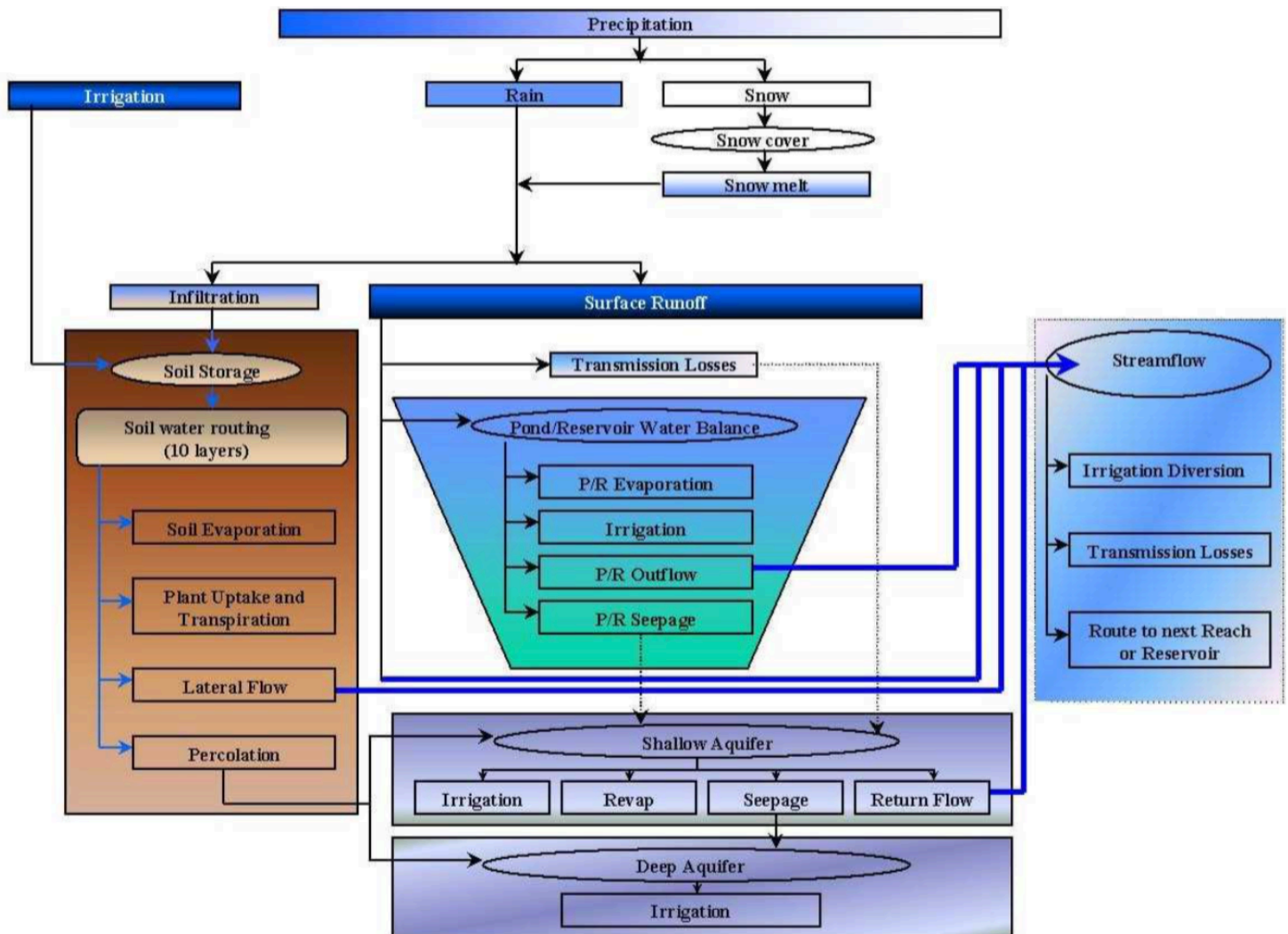
$w_{deep}$ : η ποσότητα νερού που διηθείται από τον ρηχό στον βαθύ υδροφορέα (mm H<sub>2</sub>O)

$w_{pump}$ : η ποσότητα νερού που απομακρύνεται μέσω άντλησης από τον βαθύ υδροφορέα (mm H<sub>2</sub>O)

Το νερό, όμως, του υπόγειου υδροφορέα μεγάλου βάθους σπάνια χρησιμοποιείται και όπως αναφέρθηκε θεωρείται ότι προκύπτει στο κυρίως

υδατόρεμα κάπου έξω από τη λεκάνη, οπότε δεν συμπεριλαμβάνεται σε μελλοντικούς υπολογισμούς ισοζυγίου.

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζονται οι πιθανές διαδρομές του νερού όπως προσομοιώνονται στο SWAT.



Εικόνα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση των διαδρομών του νερού. Πηγή: Neitsch (2011)

### 4.3 Μετεωρολογικές διαδικασίες

Το κλίμα της λεκάνης απορροής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο υδατικό ισοζύγιο και καθορίζει την σχετική σημασία των συστατικών του υδρολογικού κύκλου. Οι κλιματικές μεταβλητές που απαιτούνται στο SWAT είναι η ημερήσια

βροχόπτωση, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου καθώς και η σχετική υγρασία. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο πρόγραμμα ή σε περίπτωση που είναι ελλιπή παράγονται από αυτό μέσω του παραγωγού καιρού. Αυτό το χαρακτηριστικό του προγράμματος έχει τη δυνατότητα να συμπληρώνει τα ελλιπή δεδομένα για κάθε υπολεκάνη μέσω στατιστικών στοιχείων, για κάθε έτος και μετεωρολογικό σταθμό.

- Βροχόπτωση

Ένα μοντέλο που δημιουργήθηκε από τον Nicks (1974) χρησιμοποιείται από το SWAT για να προσομοιώσει βροχομετρικά δεδομένα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης για να χαρακτηρίσει αν μια μέρα είναι υγρή ή ξηρή μέσω πιθανοτήτων που έχουν τεθεί από τον χρήστη για κάθε σταθμό και μήνα.

Στη δημιουργία του αρχείου WGEN ο χρήστης απαιτείται να δώσει την πιθανότητα για κάθε σταθμό και μήνα, μιας υγρής μέρας να ακολουθείται από μια υγρή μέρα  $P(W/W)$  καθώς και την πιθανότητα μιας ξηρής μέρας να προηγείται μιας υγρής  $P(W/D)$ . Από αυτά τα στοιχεία εισόδου το μοντέλο μπορεί και υπολογίζει τις παρακάτω αντίστροφες πιθανότητες:

$$P_i(D/W) = 1 - P_i(W/W) \quad (4.27)$$

$$P_i(D/D) = 1 - P_i(W/D) \quad (4.28)$$

Για κάθε μέρα το μοντέλο παράγει έναν τυχαίο αριθμό. Ο τυχαίος αυτός αριθμός συγκρίνεται με τις αντίστοιχες πιθανότητες υγρής/ξηρής μέρας και αν είναι μεγαλύτερος από την πιθανότητα η μέρα χαρακτηρίζεται ως ξηρή ενώ στην αντίθετη περίπτωση ως υγρή.

Στην περίπτωση που η μέρα χαρακτηριστεί υγρή, με την παραπάνω διαδικασία, εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left( \frac{\left[ \left( \frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left( \frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (4.29)$$

όπου:

$R_{day}$ : η ποσότητα βροχόπτωσης την συγκεκριμένη μέρα (mm H<sub>2</sub>O)

$\mu_{mon}$ : η μέση ημερήσια βροχόπτωση (mm H<sub>2</sub>O)

$\sigma_{mon}$ : η τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης (mm H<sub>2</sub>O)

$SND_{day}$ : η τυπική κανονική απόκλιση που υπολογίζεται για την μέρα

$g_{mon}$ : συντελεστής απόκλισης για την ημερήσια βροχόπτωση του μήνα

Η κανονική τυπική απόκλιση δίνεται από τον τύπο:

$$SND_{day} = \cos(6,283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{(-2 \cdot \ln(rnd_1))} \quad (4.30)$$

όπου:  $rnd_1$  και  $rnd_2$  τυχαία νούμερα από το 0 έως το 1.

- Μέγιστη βροχόπτωση μισής ώρας

Ο χρήστης εισάγει επιπλέον στοιχεία για την βροχόπτωση. Αναγκαίο είναι για το πρόγραμμα, να γνωρίζει δεδομένα για την μέγιστη βροχόπτωση μισής ώρας για όλη τη διάρκεια της περιόδου που πρόκειται να γίνει η προσομοίωση. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η μέγιστη απορροή της κάθε μέρας. Η τιμές αυτές υπολογίζονται μόνο για τις μέρες που έχει παραχθεί επιφανειακή απορροή.

Για τον υπολογισμό πιο αντιπροσωπευτικών και εξομαλυμένων τιμών για το μέγεθος αυτό λαμβάνεται η μέση τιμή των κοντινών μηνών βάση του τύπου:

$$R_{0,5sm(mon)} = \frac{R_{0,5x(mon-1)} + R_{0,5x(mon)} + R_{0,5(mon+1)}}{3} \quad (4.31)$$

όπου:

$R_{0,5sm(mon)}$ : η μέγιστη βροχόπτωση μισής ώρας για τον δοσμένο μήνα (mm H<sub>2</sub>O)

$R_{0,5x}$ : η ακραία μέγιστη βροχόπτωση μισής ώρας για έναν συγκεκριμένο μήνα. (mm H<sub>2</sub>O)

- Ηλιακή ακτινοβολία και Θερμοκρασία

Το μοντέλο χρησιμοποιεί για τους διάφορους υπολογισμούς την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία. Ο τρόπος που υπολογίζονται αυτά τα μεγέθη βασίζεται σε μία στάσιμη διαδικασία παραγωγής. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται κάποια σφάλματα για τον υπολογισμό των ημερήσιων τιμών των μεγεθών αυτών, τα οποία αναγκαίο είναι να είναι αυτοσυσχετιζόμενα. Έτσι, τα σφάλματα αυτά υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\chi_i(j) = A\chi_{i-1}(j) + B\varepsilon_i(j) \quad (4.32)$$

όπου:

$\chi_i(j)$ : μια μήτρα στοιχείων με διαστάσεις 3x1 όπου τα στοιχεία της είναι τα κατάλοιπα, για j=1 της μέγιστης θερμοκρασίας, για j=2 της ελάχιστης και για j=3 της ηλιακής ακτινοβολίας για την μέρα i

$\chi_{i-1}(j)$ : αποτελεί το ίδιο στοιχείο με το από πάνω για την μέρα i-1

$\varepsilon_i$ : είναι μια μήτρα διαστάσεων 3x1 ανεξάρτητων τυχαίων συστατικών

A,B: μήτρες διαστάσεων 3x3 των οποίων τα στοιχεία είναι υπεύθυνα για την διατήρηση της συσχέτισης μεταξύ των καταλοίπων

Τα ημερήσια δεδομένα, λοιπόν, που παράγονται από το μοντέλο με την χρήση των καταλοίπων είναι τα παρακάτω:

$$T_{mx} = \mu mx_{mon} + \chi_i(1) \cdot \sigma mx_{mon} \quad (4.33)$$

$$T_{mn} = \mu mn_{mon} + \chi_i(2) \cdot \sigma mn_{mon} \quad (4.34)$$

$$H_{day} = \mu rad_{mon} + \chi_i(3) \cdot \sigma rad_{mon} \quad (4.35)$$



όπου:

$T_{mx}$ : η μέγιστη θερμοκρασία της μέρας ( $^{\circ}\text{C}$ )

$m_{mx}_{mon}$ : η μέση τιμή μέγιστης θερμοκρασίας του μήνα ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\chi_i(1)$ : το σφάλμα για την μέγιστη θερμοκρασία της μέρας

$\sigma_{mx}_{mon}$ : η τυπική απόκλιση της μέγιστης θερμοκρασίας για όλο το μήνα ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{mn}$ : η ελάχιστη θερμοκρασία της μέρας ( $^{\circ}\text{C}$ )

$m_{mn}_{mon}$ : η μέση τιμή ελάχιστης θερμοκρασίας του μήνα ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\chi_i(2)$ : το σφάλμα για την ελάχιστη θερμοκρασία μέρας

$\sigma_{mn}_{mon}$ : η τυπική απόκλιση της ελάχιστης θερμοκρασίας για όλο το μήνα ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_{day}$ : η ηλιακή ακτινοβολία της μέρας ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$\mu_{rad}_{mon}$ : η μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας του μήνα ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$\chi_i(3)$ : το σφάλμα για την ηλιακή ακτινοβολία της μέρας

$\sigma_{rad}_{mon}$ : η τυπική απόκλιση της ηλιακής ακτινοβολίας για όλο το μήνα ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

Ο χρήστης στην δημιουργία του αρχείου wgen εισάγει τις τυπικές αποκλίσεις των θερμοκρασιών. Η τυπική απόκλιση της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο.

$$\sigma_{rad}_{mon} = \frac{H_{mx} - \mu_{rad}_{mon}}{4} \quad (4.36)$$

όπου:  $H_{max}$ : η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που μπορεί να σημειωθεί στην επιφάνεια της γης για μια μέρα ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

- Σχετική υγρασία

Αρκετά σημαντική για το μοντέλο είναι και η σχετική υγρασία. Αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής καθώς και στον υπολογισμό του ελλείματος της πίεσης στην ανάπτυξη φυτών. Ο χρήστης εισάγει την μέση σχετική υγρασία για κάθε σταθμό και μήνα και από εκεί και πέρα το μοντέλο αναλαμβάνει να υπολογίσει την ημερήσια τιμή. Αυτή η διαδικασία

γίνεται συγκρίνοντας έναν τυχαίο αριθμό που παράγεται, με έναν λόγο διαφοράς τιμών υγρασίας. Ανάλογα το αποτέλεσμα της σύγκρισης λαμβάνεται ο αντίστοιχος τύπος για τον υπολογισμό της ημερήσιας σχετικής υγρασίας. Στην ουσία, η όλη υπολογιστική διαδικασία είναι μια τριγωνική κατανομή στην οποία χρησιμοποιούνται τα όρια των τιμών της υγρασίας.

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή σχετικής υγρασίας που μπορεί να σημειωθεί σε μια μέρα ενός μήνα, υπολογίζεται με τους παρακάτω τύπους.

$$R_{hUmon} = R_{hmon} + (1 - R_{hmon}) \cdot \exp(R_{hmon} - 1) \quad (4.37)$$

$$R_{hLmon} = R_{hmon} \cdot (1 - \exp(-R_{hmon})) \quad (4.38)$$

όπου:

$R_{hUmon}$ : η μέγιστη τιμή σχετικής υγρασίας που μπορεί να παραχθεί σε μία μέρα του μήνα

$R_{hLmon}$ : η ελάχιστη τιμή σχετικής υγρασίας που μπορεί να παραχθεί σε μία μέρα του μήνα

$R_{hmon}$ : η μέση τιμή σχετικής υγρασίας του μήνα

Το επόμενο στάδιο είναι η εφαρμογή των δύο τύπων της τριγωνικής κατανομής για την παραγωγή ημερήσιων δεδομένων σχετικής υγρασίας ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης.

$$\text{Αν } rnd_1 \leq \left( \frac{R_{hmon} - R_{hLmon}}{R_{hUmon} - R_{hLmon}} \right) \text{ τότε εφαρμόζεται ο τύπος :} \quad (4.39)$$

$$R_h = R_{hmon} \cdot \frac{R_{hLmon} + [rnd_1 \cdot (R_{hUmon} - R_{hLmon}) \cdot (R_{hmon} - R_{hLmon})]^{0,5}}{R_{hmon,mean}}$$

$$\text{Ενώ αν } rnd_1 > \left( \frac{R_{hmon} - R_{hLmon}}{R_{hUmon} - R_{hLmon}} \right) \text{ τότε εφαρμόζεται ο τύπος :} \quad (4.40)$$

$$R_h = R_{hmon} \cdot \frac{R_{hUmon} - (R_{hUmon} - R_{hmon}) \cdot \left[ \frac{R_{hUmon} \cdot (1 - rnd_1) - R_{hLmon} \cdot (1 - rnd_1)}{(R_{hUmon} - R_{hmon})} \right]^{0,5}}{R_{hmon,mean}}$$

όπου:

$R_h$ : η μέση σχετική υγρασία της ημέρας

$R_{hmon}$ : η μέση σχετική υγρασία του μήνα

$R_{hLmon}$ : η ελάχιστη τιμή που μπορεί να παραχθεί για τον μήνα

$R_{hUmon}$ : η μέγιστη τιμή που μπορεί να παραχθεί για τον μήνα

$R_{hmon,mean}$ : ο μέσος όρος των  $R_{hmon}$ ,  $R_{hLmon}$ ,  $R_{hUmon}$

$rnd_1$ : ένα τυχαίο νούμερο που παράγεται από το μοντέλο για κάθε μέρα

- Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα ανέμου είναι ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που απαιτείται από το μοντέλο SWAT καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της εξίσωσης Penman-Monteith, για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\mu_{10m} = \mu w n d_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0,3} \quad (4.41)$$

όπου:

$\mu_{10m}$ : η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου ( $m s^{-1}$ )

$\mu w n d_{mon}$ : η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου ( $m s^{-1}$ )

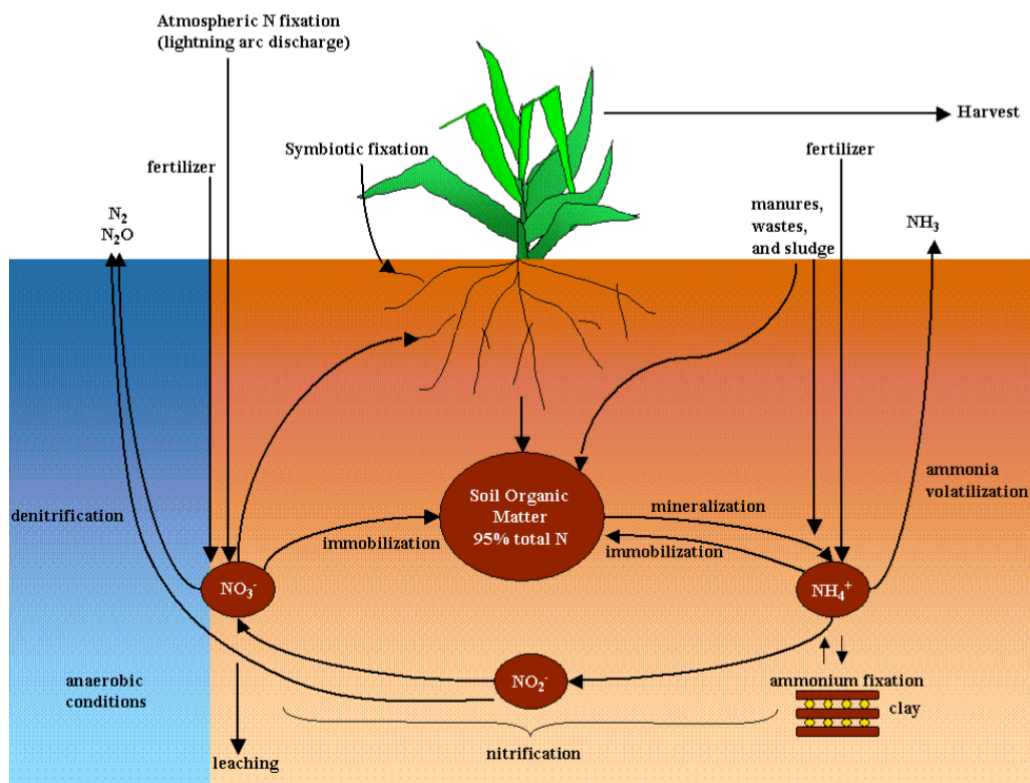
$rnd_1$ : ένας τυχαίος αριθμός που κυμαίνεται από 0 έως 1

#### 4.4 Θρεπτικά

Για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως είναι η μελέτη της ποιότητας του νερού ενός ποταμού ή μια περιοχής, σημαντικό στοιχείο είναι να είναι γνωστές οι ποσότητες των θρεπτικών συστατικών όπως το άζωτο ή ο φώσφορος που υπάρχουν σε αυτό. Το μοντέλο SWAT προσομοιώνει τον κύκλο του αζώτου και του φωσφόρου όπως επίσης και την εφαρμογή των λιπασμάτων.

- Άζωτο

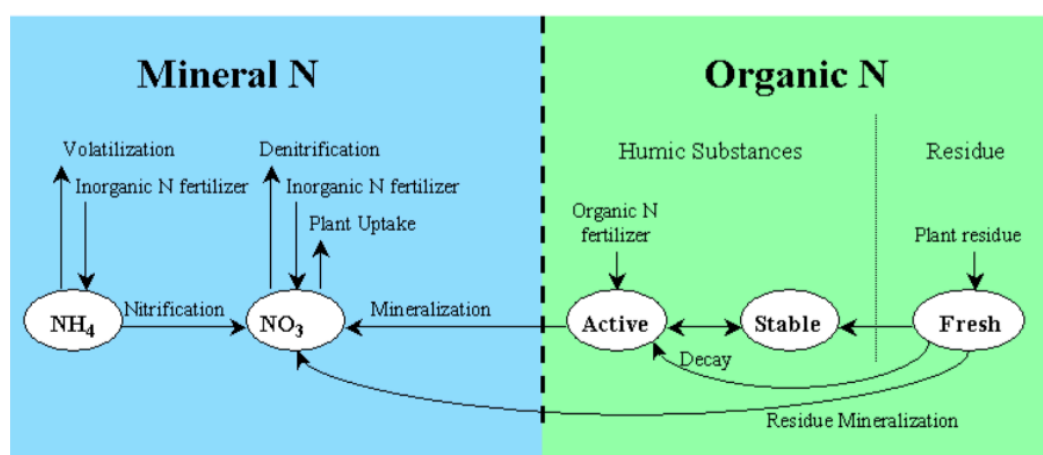
Το άζωτο που αποτελεί έναν σημαντικό ρύπο του νερού μπορεί να βρεθεί σε τρεις μορφές στα ανόργανα εδάφη. Αυτές είναι το οργανικό άζωτο, το άζωτο που συγκρατείται στα εδαφικά κolloειδή καθώς και διαλυμένες μορφές αζώτου. Το άζωτο μπορεί να εισέλθει στο έδαφος μέσω της βροχής, της κοπριάς, της χρήσης φυτοφαρμάκων και απομακρύνεται μέσω της πρόσληψης του από τα φυτά, της απονιτροποίησης ή και της διάβρωσης.



Εικόνα 4.4 : Ο κύκλος του αζώτου. Πηγή: Neitsch (2011)

Το άζωτο συναντάται σε πολλές μορφές κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα κινητικό. Σημαντικό ρόλο στον έλεγχο και την παρατήρηση του διαδραματίζει η ικανότητα πρόβλεψης της κίνησης του από τη μια μορφή στην άλλη. Μερικές από τις μορφές του αζώτου είναι το νιτρικό άλας ( $\text{NO}_3^-$ ), το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), το νιτρώδες άλας ( $\text{NO}_2^-$ ), το μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ), το υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ), το  $\text{N}_2$  αέριο, η υδροξυλαμίνη ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), η υδραζίνη ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) καθώς και η αμμωνία ή το αμμώνιο ( $\text{NH}_3, \text{NH}_4$ ).

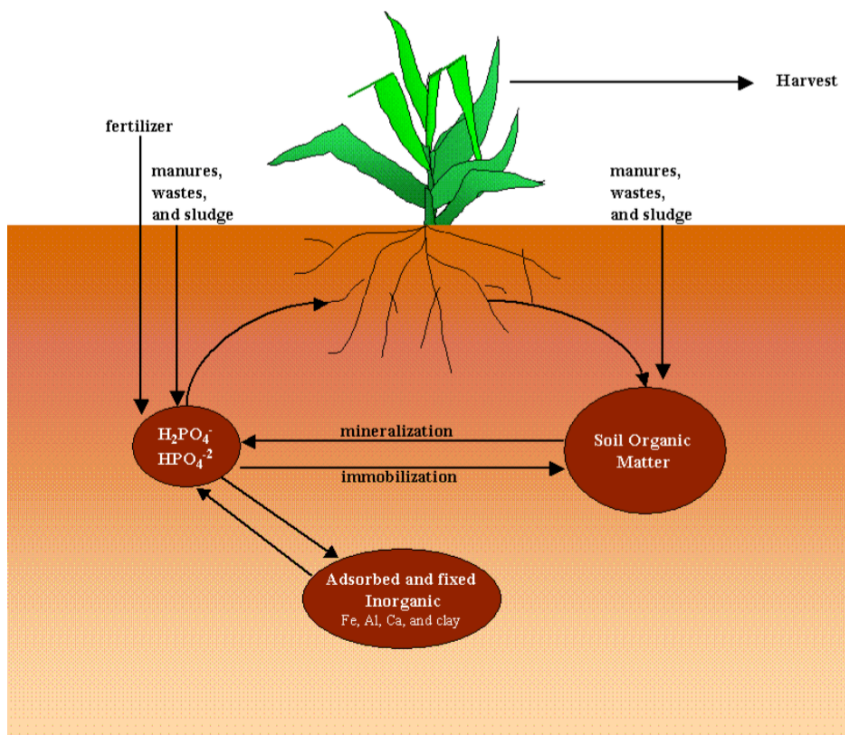
Όπως αναφέρθηκε, η παρατήρηση των μορφών είναι πολύ σημαντική για την μελέτη των επιρροών των στοιχείων αυτών στην ποιότητα του νερού. Το SWAT μπορεί και παρακολουθεί πέντε μορφές αζώτου στο έδαφος. Από τις πέντε αυτές μορφές οι δύο είναι μη οργανικές ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) ενώ οι υπόλοιπες τρεις είναι οργανικές. Σχετικά με τις οργανικές μορφές, το άζωτο συνδέεται με τις καλλιέργειες και την βιομάζα ενώ το ενεργό και το σταθεροποιημένο άζωτο συνδέεται με τις ουσίες που εφαρμόζονται στο έδαφος. Στην παρακάτω εικόνα (4.5) απεικονίζονται οι διεργασίες που σχετίζονται με το άζωτο έτσι όπως προσομοιώνονται στο μοντέλο.



Εικόνα 4.5: Μορφές και διεργασίες αζώτου. Πηγή: Neitsch (2011)

- Φώσφορος

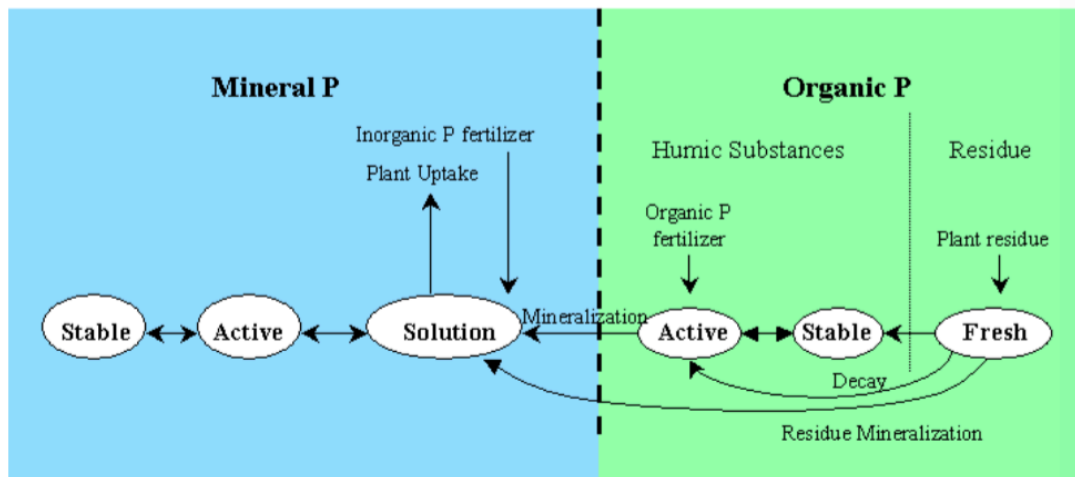
Ο φώσφορος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για διάφορες διεργασίες όπως η μεταφορά και η αποθήκευση ενέργειας. Η φωτοσύνθεση και ο μεταβολισμός των φυτών παράγει ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στις ενώσεις φωσφόρου για μετέπειτα χρήση. Υπάρχουν τρεις βασικές μορφές φωσφόρου στα εδάφη και είναι ο οργανικός φώσφορος, αδιάλυτες μορφές στον ορυκτό φώσφορο καθώς και διαλύματα φωσφόρου που διατίθενται στο έδαφος για να τα παραλάβουν τα φυτά. Ο φώσφορος εισάγεται στο έδαφος μέσω των φυτοφαρμάκων ή της κοπριάς και απομακρύνεται από αυτό μέσω της διάβρωσης ή και της πρόσληψής του από τα φυτά.



Εικόνα 4.6 : Ο κύκλος του φωσφόρου. Πηγή: Neitsch (2011)

Ο φώσφορος σε αντίθεση με το άζωτο δεν είναι τόσο εύκολα μετακινήσιμος. Συνδυάζεται με άλλα ιόντα σχηματίζοντας ενώσεις που παραμένουν στα ψηλά στρώματα του εδάφους και είναι εύκολο να παρασυρθούν από την επιφανειακή απορροή που είναι και ο κύριος τρόπος μεταφοράς του.

Όπως και με το άζωτο, το SWAT αντιλαμβάνεται και ελέγχει μερικές μορφές φωσφόρου. Αυτές είναι τρεις μη οργανικές και άλλες τρεις οργανικές μορφές. Πάλι, ο οργανικός φώσφορος συνδέεται με τις καλλιέργειες και την βιομάζα ενώ ο σταθεροποιημένος και ο ενεργός με τις ουσίες του εδάφους. Ο ανόργανος φώσφορος στο έδαφος χωρίζεται στο διαλυτό, στον ενεργό, που η ισορροπία μεταξύ τους έρχεται πολύ γρήγορα και τέλος στον στάσιμο, που η ισορροπία του με τον ενεργό είναι πιο αργή. Στην Εικόνα 4.7 φαίνονται οι μορφές και οι διεργασίες του φωσφόρου όπως προσομοιώνονται στο SWAT.



Εικόνα 4.7 : Μορφές και διεργασίες φωσφόρου. Πηγή: Neitsch (2011)

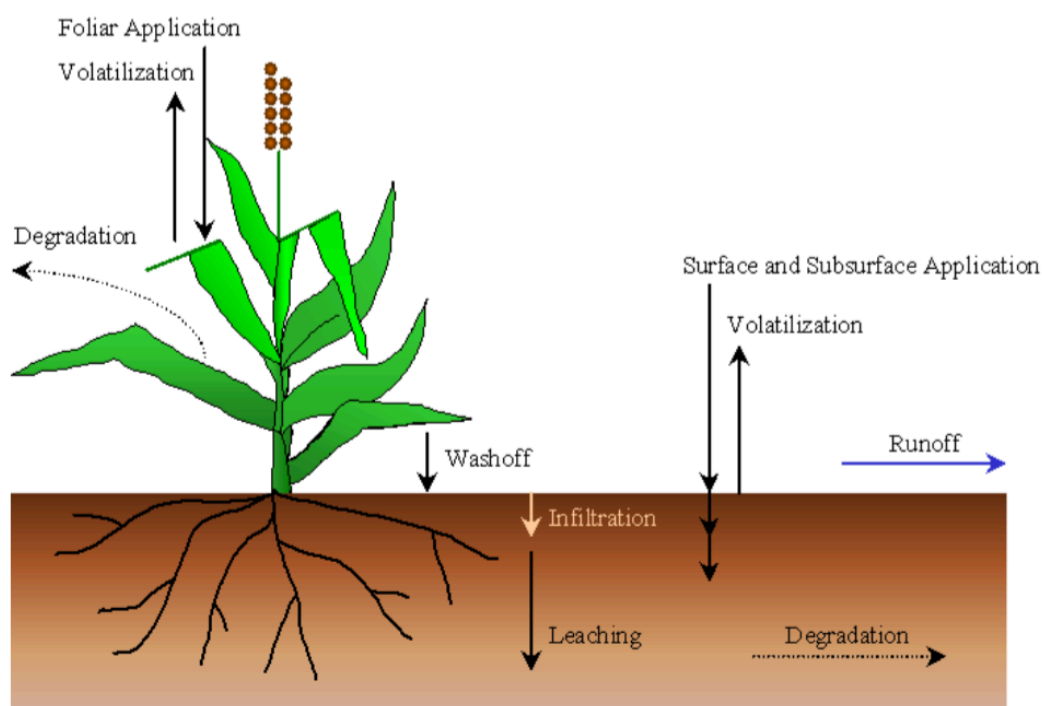
- Παρασιτοκτόνα

Οι παρασιτικοί οργανισμοί απασχολούσαν ανέκαθεν τους αγρότες. Στα πρώτα συστήματα καλλιεργειών, μετά τη συγκομιδή, γινόταν προσπάθεια να μην αφήνονται καθόλου φυτικά υπολείμματα στο έδαφος, έτσι ώστε να μην μπορούν να τραφούν οι οργανισμοί αυτοί και να μην υπάρχουν μέχρι την επόμενη σπορά. Όταν μετέπειτα έρευνες έδειξαν ότι η διαδικασία αυτή, εξαιτίας του γεγονότος ότι άφηνε το έδαφος γυμνό, προκαλούσε την αύξηση της διάβρωσης, οι αγρότες αναγκάστηκαν να αλλάξουν τις μεθόδους τους και να αφήνουν περισσότερα υπολείμματα. Όταν, λοιπόν, οι πρακτικές μέθοδοι για τον έλεγχο των παρασιτοκτόνων άρχισαν να ελαχιστοποιούνται, έκαναν την εμφάνιση τους τα χημικά παρασιτοκτόνα.

Τα χημικά αυτά παρασιτοκτόνα, που είναι από τον σχεδιασμό τους τοξικά, έχουν απασχολήσει τους ερευνητές για την επίδρασή τους στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου. Η διάρκεια ζωής και η μεταφορά των παρασιτοκτόνων σε μια καλλιέργεια εξαρτάται από κάποια χαρακτηριστικά τους όπως η διαλυτότητα τους, η μεταβλητότητα τους ή και η ευκολία στην αποδόμηση τους.

Η εισαγωγή των παρασιτοκτόνων στα HRU's γίνεται από τον αέρα είτε με την πρόσληψη τους από τα φυλλάδια των φυτών, είτε με την επαφή τους στο έδαφος.

Οι ουσίες αυτές μπορούν επίσης να εισέλθουν στο έδαφος με τις καλλιέργειες. Το SWAT μπορεί και εντοπίζει τις ποσότητες παρασιτοκτόνων στα φυλλώματα των φυτών καθώς και σε κάθε εδαφική στρώση. Παρακάτω, στην Εικόνα 4.8 φαίνονται οι διεργασίες και οι πιθανές διαδρομές των παρασιτοκτόνων όπως προσομοιώνονται στο SWAT.



Εικόνα 4.8 : Διεργασίες και διαδρομές παρασιτοκτόνων. Πηγή: Neitsch (2011)

#### 4.5 Διάβρωση

Η διάβρωση είναι η σταδιακή μετακίνηση εδαφικού υλικού με το νερό της βροχής-απορροής. Περιλαμβάνει την αποκόλληση, τη μεταφορά και την εναπόθεση εδαφικών σωματιδίων που προκαλούνται λόγω της κρούσης των σταγόνων της βροχής και της επιφανειακής απορροής. Το ανάγλυφο μιας περιοχής μπορεί να σχηματίζει χαντάκια, χαράδρες, και ρέματα. Τα διαβρωμένα σωματίδια μεταφέρονται από αυτά τα χαντάκια και τα ρέματα σε μεγαλύτερα και μπορούν να καταλήξουν σε μεγάλα ποτάμια συνεχούς ροής. Στη διαδρομή αυτή είναι δυνατό να παρασύρονται επιπλέον σωματίδια ή να εναποτίθενται. Αν η διάβρωση συμβαίνει χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου ονομάζεται γεωλογική διάβρωση. Όταν όμως,



επεμβαίνει ο άνθρωπος, η διάβρωση συμβαίνει πιο γρήγορα και είναι μεγαλύτερη η ποσότητα ιζήματος.

Το μοντέλο SWAT για τον υπολογισμό του παραγόμενου ιζήματος χρησιμοποιεί την Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)(J.R. Williams 1975). Αυτή αποτελεί μια τροποποίηση της εξίσωσης USLE που περιεγράφηκε παραπάνω. Σε αντίθεση με την USLE (W.H. Wischmeier, D.D. Smith 1965) που χρησιμοποιεί έναν παράγοντα βροχόπτωσης, η MUSLE χρησιμοποιεί έναν συντελεστή για την απορροή. Η αλλαγή αυτή έχει ως αποτέλεσμα μια σειρά πλεονεκτημάτων. Αρχικά, βελτιώνεται η πρόβλεψη των παραγόμενων ιζημάτων καθώς η απορροή προκύπτει συναρτήσει προηγούμενων συνθηκών. Επίσης, δίνει την δυνατότητα να εφαρμοσθεί η εξίσωση για μονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης και εξαλείφει την ανάγκη των ρυθμών μεταφοράς. Το τελευταίο συμβαίνει διότι στη MUSLE ο συντελεστής της απορροής αναπαριστά την ενέργεια που χρειάζεται για την αποκόλληση και τη μεταφορά του ιζήματος σε αντίθεση με την USLE που ο συντελεστής βροχόπτωσης αναπαριστούσε την ενέργεια που απαιτούνταν για την αποκόλληση μόνο.

Η τροποποιημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας MUSLE (J.R. Williams 1975) είναι η εξής:

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (4.42)$$

όπου:

sed: το παραγόμενο ίζημα σε μία μέρα (metric tons)

$Q_{surf}$ : η ένταση της επιφανειακής απορροής (mm H<sub>2</sub>O/ha)

$q_{peak}$ : η παροχή αιχμής (m<sup>3</sup>/s)

$area_{hru}$ : το εμβαδόν της μονάδας υδρολογικής απόκρισης (ha)

$K_{USLE}$ : ο συντελεστής διάβρωσης του εδάφους της USLE (0.013metric tons m<sup>2</sup> hr/(m<sup>3</sup>-metric ton cm))

$C_{USLE}$ : ο συντελεστής για τη κάλυψη και διαχείριση γης της USLE

$P_{USLE}$ : παράγοντας διαχείρισης εδάφους κατά της διάβρωσης της USLE

LS<sub>USLE</sub>: τοπογραφικός συντελεστής της USLE

CFRG: ο παράγοντας περιεκτικότητας του εδάφους σε χοντρά θραύσματα

Οι παραπάνω συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση και προκύπτουν από τα δεδομένα της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

#### 4.6 Εφαρμογές του μοντέλου

Το μοντέλο SWAT από τότε που δημιουργήθηκε έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι εφαρμογές που έχουν γίνει στην Αμερική, που είναι και οι περισσότερες, εστιάζουν κυρίως στην επίδραση των χρήσεων γης και πρακτικών διαχείρισης της καθώς και στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους και στην ποιότητα των υδάτων. Αντίστοιχες εφαρμογές έχουν γίνει και στον ευρωπαϊκό χώρο. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές εφαρμογές του μοντέλου SWAT και στην Ελλάδα. Κάποιες από τις δημοσιευμένες εργασίες που έχουν γίνει φαίνονται παρακάτω.

Το 2002 (A. Varanou et al. 2002) το μοντέλο SWAT εφαρμόστηκε για τη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη στη Θεσσαλία που αποτελεί μια υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού. Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 2796 km<sup>2</sup> και καλύπτεται κυρίως από δασώδεις περιοχές και καλλιέργειες. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δεκαπέντε μετεωρολογικούς σταθμούς και παρατηρημένες μετρήσεις για την περίοδο 1970-1993. Σκοπός της προσομοίωσης ήταν η πρόβλεψη των επιπτώσεων από τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής.

Οι G. Gikas et al. (2006) μοντελοποίησαν, χρησιμοποιώντας το SWAT, τη λεκάνη απορροής της λίμνης Βιστωνίδας στη Θράκη. Η λεκάνη έχει συνολική έκταση περίπου 1349 km<sup>2</sup>. Για την εφαρμογή, η λεκάνη χωρίστηκε σε τέσσερις υπολεκάνες που οι εκτάσεις τους κυμαίνονταν από 160 έως 570 km<sup>2</sup>. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από οχτώ σταθμούς για την περίοδο 1980-2000 και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την ροή, το ίζημα και την ποιότητα του νερού σε εννέα σημεία. Σκοπός της εφαρμογής ήταν να ελεγχθεί πόσο ικανοποιητικά μπορεί

να γίνει χρήση του μοντέλου SWAT σε μεσογειακό κλίμα και με τις γεωλογικές ιδιότητες του ελλαδικού χώρου, ώστε να γίνουν μετέπειτα έρευνες και εφαρμογές με αυτό.

Οι V. Pisinaras et al. (2010) δημοσίευσαν μια εργασία για τη μελέτη της υδρολογίας και της ποιότητας του νερού στη λεκάνη του Κόσυνθου ποταμού με τη χρήση του μοντέλου SWAT. Το ποτάμι αυτό έχει μήκος 52 km και εκβάλλει στην λίμνη Βιστωνίδα. Η λεκάνη έχει έκταση 440 km<sup>2</sup> τα οποία καλύπτονται από ορεινές εκτάσεις και αγροτικές και αστικές περιοχές. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς και έγιναν μετρήσεις σε τέσσερα σημεία του υδρογραφικού δικτύου.

Μερικές από τις διπλωματικές και μεταπτυχιακές εργασίες στις οποίες έχει γίνει χρήση του μοντέλου SWAT είναι :

#### Διπλωματικές Εργασίες

Ο ερευνητής Ραμπιάς Ε. (2005) στη διπλωματική εργασία του εξετάζει τις επιπτώσεις της αλλαγής των χρήσεων γης στις απορροές και στερεοαπορροές του ποταμού Αλιάκμονα. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης του ομοιώματος SWAT για τη λεκάνη απορροής Σιατίστας, η οποία αποτελεί τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής του ποταμού Αλιάκμονα.

Στη διπλωματική εργασία του Χριστοφορίδη Α. (2005) εξετάζονται οι υδρολογικές επιπτώσεις που θα επιφέρει η κλιματική αλλαγή στο υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Αράχθου, μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT.

Το 2010 (Ζαχαρία Χ. 2010) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SWAT για την περιγραφή της διασποράς της ρύπανσης, στη κλίμακα της ευρύτερης λεκάνης απορροής του ποταμού Έβρου στην περιοχή Κίρκη, από τα εγκαταλειμμένα μεταλλεία μικτών θειούχων.

Η Αθανασία Γ. (2010) εφάρμοσε το μοντέλο SWAT για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη, στην τοποθεσία Γέφυρα Βαρβαριάδος. Η προσομοίωση, αυτή, αποσκοπούσε στην στατιστική επεξεργασία των εφτάήμερων και μηνιαίων ελάχιστων παροχών ώστε να μελετηθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χαμηλής απορροής της εξεταζόμενης λεκάνης.

Στη διπλωματική εργασία του Μπατέλη Χ.-Σ. (2012) ερευνάται η επίδραση που μπορεί να έχει μια πυρκαγιά στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του Ενιπέα, στη θέση του φράγματος Παλαιοδερλίου, με χρήση του μοντέλου SWAT.

Η διπλωματική εργασία της Δαγαλάκη Ε. (2016) πραγματεύεται την γεωργική διαχείριση στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Με τη βοήθεια τηλεπισκοπικών μεθόδων κατασκευάστηκε χάρτης χρήσεων γης που χρησιμοποιήθηκε σαν δεδομένο εισόδου του SWAT. Με συνδυασμένη χρήση τηλεπισκόπησης και του μοντέλου SWAT εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια γεωργικών πρακτικών στις καλλιέργειες της λεκάνης, με ανάλυση των αλληλεπιδράσεων νερού, γης, τροφής και ενέργειας.

### Μεταπτυχιακές Εργασίες

Ο Πικούνης Μ. (2002) στη μεταπτυχιακή εργασία του ασχολήθηκε με τη δημιουργία ενός εγχειριδίου για τη χρήση του μοντέλου SWAT στον ελλαδικό χώρο. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε το μοντέλο SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων από συγκεκριμένες αλλαγές χρήσεων γης σε τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού στη Θεσσαλία.

Στη μεταπτυχιακή εργασία του, ο Παναγόπουλος Ι. (2004) χρησιμοποιεί το μοντέλο SWAT δίνοντας έμφαση στα δεδομένα εδάφους. Στα πλαίσια της χρήσης αυτής εφάρμοσε μια υδρολογική προσομοίωση, στη τοποθεσία Αλή Εφέντη της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού, και συγκρίνει τα αποτελέσματα αυτής με προσομοιώσεις άλλων μελετητών στις οποίες δεν είχε δοθεί η αντίστοιχη λεπτομέρεια στα δεδομένα για το έδαφος.

Στη μεταπτυχιακή εργασία (Μπεκιάρης Ι. 2004) πραγματοποιείται η αξιολόγηση της χρήσης του μοντέλου SWAT ως προς την εκτίμηση της διάχυσης των θρεπτικών αζώτου και φωσφόρου στα επιφανειακά υδατορέματα της υδρολογικής λεκάνης Ronnea στη Σουηδία.

Το 2005 η Βουμβουλάκη Ε. (2005) στη μεταπτυχιακή εργασία της, στόχευσε στην ρύθμιση και επαλήθευση του μοντέλου SWAT σε ένα τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Αλιάκμονα καθώς και στην εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στη συγκεκριμένη περιοχή.

Η Πολυζώη Ε. (2006) στη μεταπτυχιακή εργασία της, χρησιμοποίησε το μοντέλο SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων στις στερεοαπορροές του ποταμού Αράχθου, μετά από μεταβολές στις πρακτικές διαχείρισης του.

Σε μια άλλη μεταπτυχιακή εργασία (Στεργιούλη Μ. 2007) έγινε χρήση του μοντέλου SWAT με σκοπό τον προσδιορισμό των πηγών προέλευσης και την ποσοτικοποίηση των απωλειών θρεπτικών, υπό την επίδραση διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών στις λεκάνες απορροής του Αλή Εφέντη στη Θεσσαλία και στην Vansjo-Hobol στη Νορβηγία.

Η διπλωματική εργασία της Τσουκαλά Π. (2008) στοχεύει, μέσω της χρήσης του μοντέλου SWAT, στη μελέτη της επίδρασης των γεωργικών πρακτικών στην παραγωγή θρεπτικών. Παράλληλα, μελετήθηκε πως οι συγκεκριμένες γεωργικές πρακτικές επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών. Η έρευνα αυτή έγινε για την περιοχή Αλή Εφέντη, στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού.

#### **4.7 Επιλογή μοντέλου SWAT**

Όπως παρουσιάστηκε, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υδρολογικών μοντέλων που μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει. Μερικά από αυτά έχουν κοινά στοιχεία, αλλά διαφέρουν σε πολλά άλλα. Κρίνεται έτσι, η επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιήσει ο ερευνητής να είναι μια σημαντική απόφαση. Σημαντικές

παράμετροι στην επιλογή αυτή είναι: η χρήση του υπολογιστή, ο διαθέσιμος τύπος υπολογιστών, το λειτουργικό σύστημα, η εμπειρία του χρήστη με υπολογιστές. Παράλληλα, μπορεί κάποιος να συγκρίνει τα μοντέλα με βάση τις απαιτήσεις που έχει το καθένα ως προς τα αποτελέσματα ή ακόμα και με τα δεδομένα που απαιτούν για την προσομοίωση.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SWAT το οποίο έχει δοκιμασθεί και χρησιμοποιηθεί σε όλο το κόσμο. Οι προσωπικοί λόγοι που συνέβαλαν στην επιλογή του μοντέλου αυτού ήταν οι ακόλουθοι:

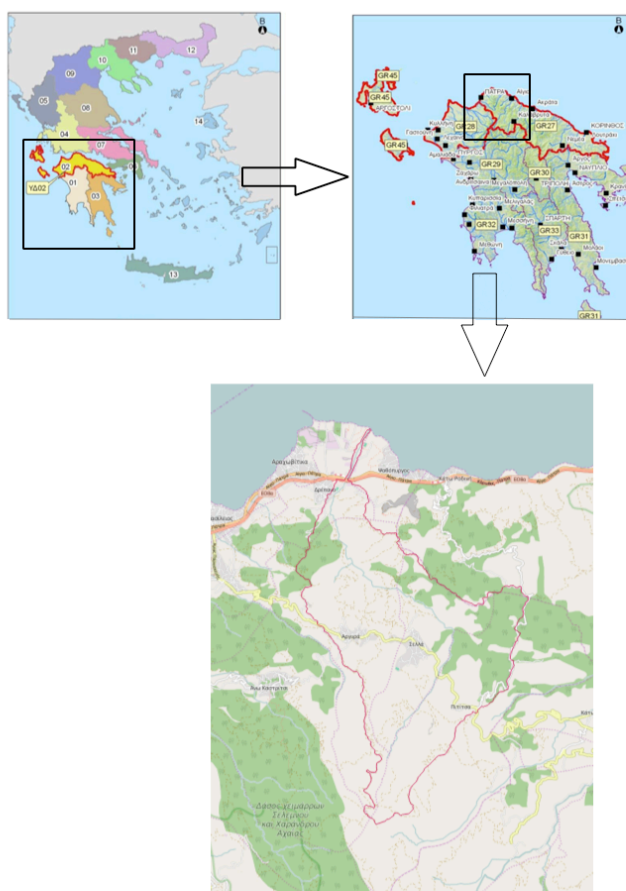
- Συμβατότητα με τον διαθέσιμο υπολογιστή
- Το γεγονός ότι δουλεύει στην πλατφόρμα ArcGIS με την οποία είχα προηγουμένως κάποια εμπειρία και έτσι το περιβάλλον ήταν γνώριμο
- Το γεγονός ότι υπήρχαν εύκολα διαθέσιμα και κατανοητά εγχειρίδια τόσο ως προς την χρήση του μοντέλου όσο και ως προς την αναλυτική περιγραφή των δεδομένων
- Το γεγονός ότι υπήρχαν ομάδες στο διαδίκτυο που μπορεί να αναρτήσει κάποιος, κάποιο πιθανό πρόβλημα και να το συζητήσει με άλλους χρήστες του μοντέλου
- Εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων
- Συμβατότητα των διαθέσιμων δεδομένων

Σε επόμενα κεφάλαια γίνεται αναλυτική περιγραφή των δεδομένων και της χρήσης του μοντέλου.

## 5. Περιοχή μελέτης

### 5.1 Γεωγραφικός προσδιορισμός περιοχής μελέτης

Η περιοχή που μελετάται σε αυτή τη έρευνα είναι η λεκάνη απορροής του Βολιναίου ποταμού. Η λεκάνη βρίσκεται στον νομό Αχαΐας και συγκεκριμένα στο δήμο Ρίου. Ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα Βόρειας Πελοποννήσου (ΥΔ02) και στις λεκάνες απορροής ρεμάτων παραλίας Β. Πελοποννήσου (GR27). Η περιοχή μελέτης οριοθετείται νοτιοδυτικά από την οροσειρά του Παναχαϊκού Όρους με μεγαλύτερο υψόμετρο τα 1928 μέτρα, νότια από την κορυφή Βρωμονέρι με 1394 μέτρα υψόμετρο, δυτικά από την κορυφή Πυργάκι 1000 μέτρα ενώ νότια βρίσκονται οι ορεινοί όγκοι Τρανός, Στάλος, Ψωρόλιθος και Άρτεμες. Στην λεκάνη απορροής του ποταμού υπάρχουν οι οικισμοί Αργυρά, Σελλά και Πιτίτσα. Επίσης, γειτονεύει με τους οικισμούς Αραχωβίτικα, Δρέπανο και Ψαθόπυργος. Ο Βολιναίος ποταμός πηγάζει από το Παναχαϊκό Όρος και εκβάλλει κοντά στο ακρωτήριο του Δρεπάνου.



Created by Paint X

Εικόνα 5.1 : Γεωγραφικός προσδιορισμός περιοχής μελέτης

## 5.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης

Πριν από οποιοδήποτε υπολογισμό, είναι απαραίτητη η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης. Αυτό έγινε με την χάραξη του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής του Βολιναίου ποταμού. Η χάραξη αυτή έγινε με δύο τρόπους και χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς τύπους δεδομένων.

- Φύλλα Χάρτη ΓΥΣ (Ναύπακτος, Χαλανδρίτσα) κλίμακας 1:5000 η λήψη των οποίων έγινε από το Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) το οποίο ελήφθη από την Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε. (ΕΚΧΑ Α.Ε.).

Ο πρώτος τρόπος πραγματοποιήθηκε με χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους το οποίο επεξεργάστηκε στο πρόγραμμα ArcGIS. Οι πολλές εικόνες που συνθέτουν το ψηφιακό μοντέλο ενώθηκαν σε ένα ενιαίο μωσαϊκό και με τη χρήση εντολών της γραμμής εργαλείων «Hydrology» προέκυψε ο υδροκρίτης και ο διαχωρισμός της λεκάνης.

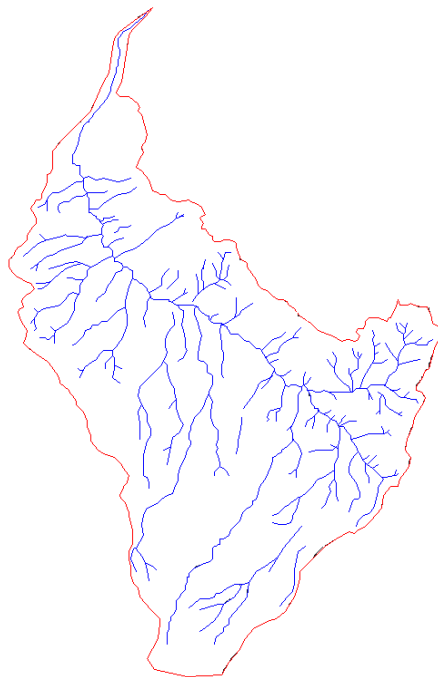
Ο δεύτερος τρόπος έγινε με σκοπό την επαλήθευση του αποτελέσματος από την πρώτη μέθοδο. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα φύλλα χάρτη της ΓΥΣ τα οποία γεωαναφέρθηκαν σε πραγματικές συντεταγμένες. Κατόπιν, έγινε ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Βολιναίου και σχεδιάστηκε ο υδροκρίτης.

Στις εικόνες 5.2 και 5.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.





*Εικόνα 5.2 : Λεκάνη απορροής από ArcMap*



*Εικόνα 5.3 : Λεκάνη απορροής από AutoCAD*

### 5.2.1 Επιλογή και μέγεθος λεκάνης απορροής

Όπως συμπεραίνεται από την παραπάνω ανάλυση, διαφαίνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στο σχήμα της λεκάνης. Οι διαφορές προκύπτουν λόγω της καλύτερης ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Οι διαφορές στα δύο εμβαδά είναι σχετικά μικρές με τη διαφορά να είναι της τάξεως του  $1 \text{ km}^2$ .

- $E_{\alpha, \text{τρόπου}}: 28.269.088 \text{ m}^2$
- $E_{\beta, \text{τρόπου}}: 27.233.101 \text{ m}^2$

Για τον υπολογισμό, λοιπόν, των μορφομετρικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε η λεκάνη που προέκυψε με τον πρώτο τρόπο καθώς έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και ταυτόχρονα αποφεύγονται τα σφάλματα από τον σχεδιασμό. Με βάση τις παραδοχές που αναφέρθηκαν, το τελικό εμβαδό της λεκάνης απορροής και κατά συνέπεια της περιοχής μελέτης είναι 28,27 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Σημειώνεται ότι στην εφαρμογή της έρευνας με τη χρήση του προγράμματος ArcSWAT, η διαδικασία προσδιορισμού του υδροκρίτη επαναλήφθηκε με χρήση του DEM με εργαλεία αυτού του προγράμματος.

### 5.2.2 Χαρακτηριστικά υψόμετρα περιοχής μελέτης

Λόγω επιλογής αυτοματοποιημένης μεθόδου, δε χρειάστηκε να γίνουν οι υπολογισμοί του μέσου υψόμετρου με τον παραδοσιακό τρόπο κατά τον οποίο μετρείται το εμβαδό κάθε επιφάνειας που ορίζει η κάθε ισούψης γραμμή. Το πρόγραμμα υπολόγισε βάση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής. Τα χαρακτηριστικά υψόμετρα της λεκάνης είναι τα ακόλουθα:

- $H_{\min}: 0 \text{ m}$
- $H_{\text{mean}}: 574 \text{ m}$
- $H_{\max}: 1618 \text{ m}$

### 5.2.3 Σχήμα της λεκάνης

Καθοριστικής σημασίας για τους υδρολογικούς υπολογισμούς στη λεκάνης απορροής είναι το σχήμα της λεκάνης απορροής. Το σχήμα που έχει η λεκάνη επηρεάζει το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και κατά συνέπεια την παροχή στην λεκάνη. Οι λεκάνες μπορεί να διαχωριστούν σε αυτές που τείνουν να έχουν περίπου κυκλικό σχήμα και σε άλλες που είναι πιο επιμήκεις. Όπως είναι λογικό, στις κυκλικές λεκάνες απορροής ο χρόνος συγκέντρωσης είναι αρκετά μικρότερος σε σύγκριση με πιο επιμήκεις λεκάνες και με συγκρίσιμες τις άλλες παραμέτρους, όπως το έδαφος, η κάλυψη, τα εδάφη, σημειώνονται μεγαλύτερες αιχμές απορροής. Προκειμένου να διαπιστωθεί το σχήμα της λεκάνης, αντικείμενο που δύσκολα προσδιορίζεται παρά την σημαντικότητά του, χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες.

Ο δείκτης Cravelius (Τσακίρης Γ. 2013) που εκφράζει το σχήμα της λεκάνης με χρήση του τύπου:

$$K_C = \frac{\text{περίμετρος λεκάνης με εμβαδό } A}{\text{περίμετρος κύκλου με ίσο εμβαδό } A} \quad (5.1)$$

όπου:  $K_C$ : δείκτης συγκέντρωσης

Για την υπό εξέταση λεκάνη ισχύουν τα παρακάτω δεδομένα:

Εμβαδό εξεταζόμενης λεκάνης: 28.269.088 m<sup>2</sup>

Περίμετρος εξεταζόμενης λεκάνης: 47.032 m

Περίμετρος κύκλου με ίδιο εμβαδό: 18.847,807 m

Έτσι ο δείκτης  $K_C$  παίρνει την τιμή 2,49 που απέχει αρκετά από την τιμή 1 άρα συμπεραίνεται ότι η λεκάνη είναι επιμήκης και όχι κυκλικού τύπου.

Πέρα από τον δείκτη αυτό υπάρχουν και οι δείκτες κυκλικότητας και επιμήκυνσης από τους Miller και Sctiumm (Τσακίρης Γ. 2013) αντίστοιχα.

$$R_c = \frac{\text{Εμβαδό της λεκάνης}}{\text{Εμβαδό κύκλου με περίμετρο ίση με αυτή της λεκάνης}} \quad (5.2)$$

$$R_L = \frac{\text{Διάμετρος κύκλου με εμβαδόν ίσο με εκείνο της λεκάνης}}{\text{Μήκος της λεκάνης}} \quad (5.3)$$

όπου:

$R_c$ : δείκτης κυκλικότητας

$R_L$ : δείκτης επιμήκυνσης

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό των παραπάνω δεικτών προκύπτουν ως εξής:

Εμβαδό της λεκάνης: 28.269.088 m<sup>2</sup>

Εμβαδό κύκλου με περίμετρο ίση με της λεκάνης: 176.026.085 m<sup>2</sup>

Διάμετρος κύκλου με περίμετρο ίση με αυτή της λεκάνης: 5.999,44 m

Μήκος της λεκάνης: 11.062,76 m

Με τα παραπάνω νούμερα προκύπτουν για την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής οι τιμές των δεικτών.

$R_c$ : 0,16

$R_L$ : 0,54

#### 5.2.4 Ανάγλυφο και κλίσεις εδάφους της λεκάνης απορροής

Σε μια λεκάνη απορροής, το ανάγλυφο και οι κλίσεις του εδάφους διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις διεργασίες βροχής-απορροής. Αυτό μπορεί εύκολα να επαληθευτεί σε μια λεκάνη απορροής με ομαλό ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις όπου ο χρόνος περισεύματος της βροχής είναι αισθητά μικρότερος και η πιθανότητα διήθησης είναι μειωμένη από ότι σε μια λεκάνη με αντίθετες συνθήκες.

Για την παρουσίαση των κλίσεων και την κατανομή του ανάγλυφου κατασκευάστηκε χάρτης κλίσεων γης με την βοήθεια του προγράμματος ArcSWAT. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο όπως και η παρουσίαση του χάρτη κλίσεων.

### **5.3. Γεωλογία – Στρωματογραφία της περιοχής μελέτης**

Η λεκάνη απορροής του Βολιναίου ποταμού δομείται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς της Πίνδου και Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας αποθέσεις. Η τεκτονική δομή και η λιθολογία της περιοχής έχουν επηρεάσει την εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου και την μορφολογία του ανάγλυφου της λεκάνης. Το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Βολιναίου καταλαμβάνεται από Τεταρτογενείς σχηματισμούς ενώ το υπόλοιπο δομείται από τη γεωτεκτονική ενότητα Ολωνού-Πίνδου. Πιο αναλυτικά οι Αλπικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται με σειρά χρονολογίας είναι οι εξής (Παγωνάς Μ. 2009):

- Ασβεστόλιθοι ηλικίας Ιουρασικού: Τα πετρώματα αυτά είναι ερυθρίζοντα, λευκά, μικροκρυσταλικά, ωλιθικά με τρηματοφόρα και ασβεστοφύκη καθώς επίσης και παρεμβολές ερυθρών ραδιολαριτών. Καταλαμβάνουν μια μικρή έκταση στο κεντρικό και νότιο τμήμα της εξεταζόμενης λεκάνης.
- Ραδιολαρίτες ηλικίας Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού: Αυτά τα πετρώματα αποτελούνται από ολοπυριτικές στρώσεις μικρού πάχους στο κατώτερο τμήμα τους. Παρουσιάζουν κόκκινο, πράσινο και κίτρινο χρώμα με συχνές παρεμβολές πυριτικών και γεωδών αργίλων. Το γεώδες τμήμα των ραδιολαριτών είναι πλούσιο σε ακτινόζωα. Τόσο οι ολοπυριτικές στρώσεις όσο και οι γεώδεις είναι συχνά εμπλουτισμένες με μαγγάνιο ή περιέχουν κονδύλους μαγγανίου, Μέσα στη μάζα των ραδιολαριτών και κυρίως στο ενδιάμεσο τμήμα και στην κορυφή τους βρίσκονται τραπεζοειδείς σχηματισμοί μικρολατυποπαγών ασβεστόλιθων. Μέσα στη μάζα των ραδιολαριτών, απαντούν διαβασικοί τόφοι που στην περιοχή Κομινάριο

έχουν την μεγαλύτερη εμφάνιση. Το μέγιστο πάχος των ραδιολαριτών φτάνει τα 250 m. Η επιφανειακή εξάπλωση του σχηματισμού περιορίζεται στο νότιο τμήμα της λεκάνης.

- Κερατόλιθοι και ασβεστόλιθοι ηλικίας Κατώτερου-Ανώτερου Κρητιδικού: Στα κατώτερα στρώματα επικρατούν ερυθροί κερατόλιθοι που εναλλάσσονται με αργιλικούς σχιστόλιθους. Στα ανώτερα στρώματα, επικρατούν πολυγενείς μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι που εναλλάσσονται με θραύσματα ρουδιστών. Ο σχηματισμός αυτός καταλαμβάνει μια μικρή έκταση στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής.
- Πελαγικοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού: Τα πετρώματα αυτά χαρακτηρίζονται ως λεπτοπλακώδη έως μεσοστρωματώδη. Το πάχος κάθε πλάκας δεν ξεπερνά τα 15 εκατοστά και υπάρχουν παρεμβολές λεπτών στρώσεων από πυριτικό υλικό πάχους 1-2 εκατοστών. Στους πελαγικούς ασβεστόλιθους, συχνά παρατηρούνται στρώματα από μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους, που έχουν πάχος 30-50 εκατοστά και περιέχουν κομμάτια από ρουδιστές. Στη βάση τους τα στρώματα των πελαγικών ασβεστόλιθων είναι πλούσια σε πυριτικό υλικό που ελαττώνεται προοδευτικά και χάνεται τελικά στην κορυφή τους.
- Φλύσχης ηλικίας Μαιστρίχτιου – Παλαιοκαινού: Αυτός ο σχηματισμός αποτελείται από στρώματα κυρίως ψαμμιτικά και σπανιότερα μαργαϊκά που εναλλάσσονται με λεπτοπλακώδεις πελαγικούς ασβεστόλιθους πάχους περίπου 50 μέτρων. Μέσα στις ασβεστολιθικές πλάκες παρατηρείται συχνά πυριτικό υλικό μαύρου χρώματος. Το πάχος αυτού φτάνει τα 500 μέτρα και η επιφανειακή έκταση, που καταλαμβάνει ο σχηματισμός αυτός στην λεκάνη απορροής, είναι μικρή στο νότιο τμήμα, λίγο μεγαλύτερη στο κεντρικό και ανατολικό και σχετικά μικρή στο κεντρικό και δυτικό της τμήμα.
- Κυανές μάργες και αμμούχοι άργιλοι ηλικίας Πλειοκαινού – Πλειστοκαινού: Στον σχηματισμό αυτό, παρατηρούνται εναλλαγές λεπτόκοκκων ψαμμιτών

και κροκαλοπαγών χαλαρής και συχνά ισχυρής συνοχής. Τη μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνουν αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας και πρόκειται για κροκαλοπαγείς ελαφρώς συνεκτικοποιημένες αποθέσεις μάργες και άμμους. Το πάχος αυτών των αποθέσεων ξεπερνούν τα 100 μέτρα. Οι σχηματισμοί, αυτοί καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης και εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα αυτής. Αποτελούν παλιές αποθέσεις δελταϊκών ριπιδίων που έχουν ανυψωθεί λόγω της τεκτονικής ανόδου της βόρειας Πελοποννήσου.

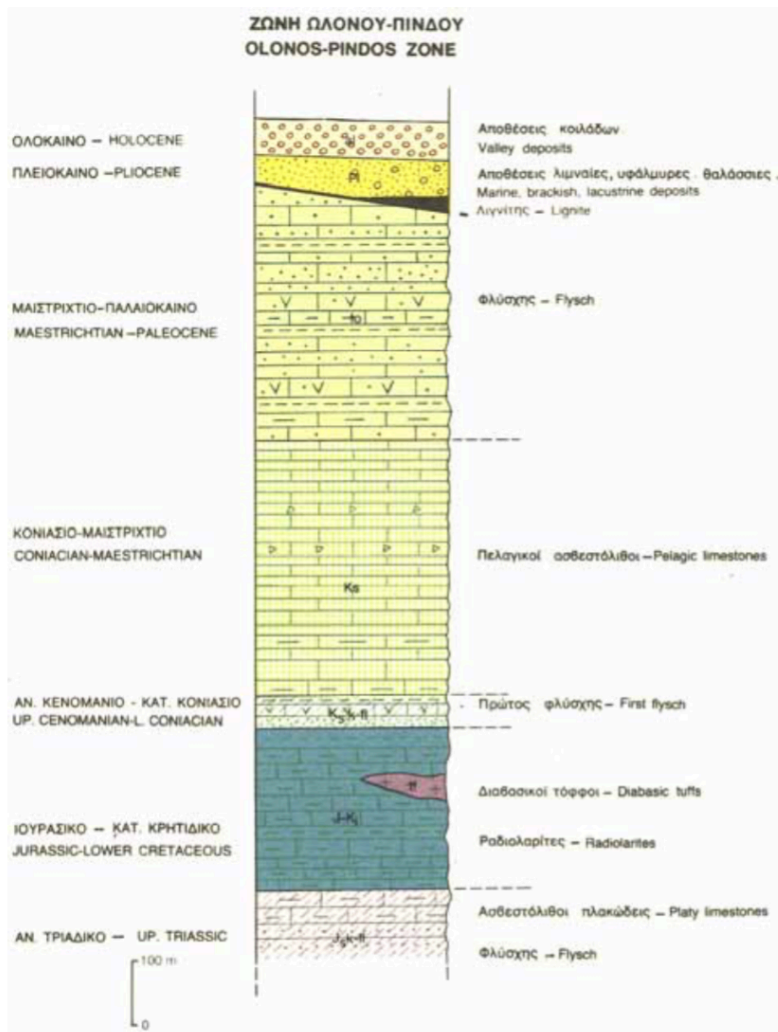
- Πλευρικά κορήματα: Τα κορήματα αυτά είναι Τεταρτογενούς ηλικίας σχηματισμοί και καταλαμβάνουν μια σχετικά μικρή περιοχή στο κέντρο της λεκάνης απορροής. Τα πλευρικά κορήματα είναι μορφές που οφείλονται στην κίνηση υλικών λόγω βαρύτητας. Αποτελούνται από πολύ μικρά γωνιώδη υλικά, που είναι και τα παλαιότερα και από χαλαρά και ασύνδετα που είναι και τα νεότερα και καλύπτουν τις απόκρημνες πλαγιές των ορεινών όγκων.

Η λιθοστρωματική στήλη της ζώνης Ολωνού Πίνδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4

#### **5.4. Το κλίμα της περιοχής μελέτης**

Προκειμένου να εξεταστεί το κλίμα της περιοχής που ερευνάται πρέπει να μελετηθεί το κλίμα του νομού Αχαΐας. Ο νομός αυτός βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο της Πελοποννήσου και βρέχεται από το Ιόνιο Πέλαγος και από τον Πατραϊκό και Κορινθιακό κόλπο. Πέρα από τις παράκτιες περιοχές, το εσωτερικό του νομού καλύπτεται από ορεινούς όγκους με υψόμετρα που φτάνουν τα 2000 μέτρα. Γενικότερα, το κλίμα του νομού θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως Μεσογειακό στα παράκτια τμήματα και ηπειρωτικό στο εσωτερικό και ορεινό τμήμα του νομού.

Πιο συγκεκριμένα, το κλίμα είναι τυπικό μεσογειακό με ήπιους χειμώνες, πιο υγρούς στα δυτικά και λιγότερα στα ανατολικά. Χαρακτηρίζεται από θερμά, ξηρά καλοκαίρια με κάποιες βροχοπτώσεις στα δυτικά και στα ανατολικά. Για τις



Εικόνα 5.4 : Λιθοστρωματική στήλη της ζώνης Ολωνού-Πίνδου, Πηγή: Παγώνας Μ. (2009)

περιοχές αυτές, η μέση θερμοκρασία του έτους είναι περίπου 17-18 °C. Στο εσωτερικό του νομού και όσο πιο πολύ αυξάνεται το υψόμετρο, το κλίμα είναι πιο ψυχρό με δριμύτερους χειμώνες και πιο δροσερά καλοκαίρια που χαρακτηρίζονται από περισσότερες βροχοπτώσεις κυρίως στα ορεινά.

Για την μελέτη του κλίματος της περιοχής μελέτης, έγινε συλλογή και ανάλυση δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς σχετικούς με την θερμοκρασία του αέρα, την βροχόπτωση, την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Η συλλογή, η στατιστική επεξεργασία και η περιγραφή των κλιματικών αυτών στοιχείων θεωρείται απαραίτητη στην ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής ενός ποταμού αφού αποτελούν έναν από τους βασικότερους παράγοντες που συμβάλουν στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου.



Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών μέσω της ιστοσελίδας [meteo.gr](http://meteo.gr) καθώς και από ένα ιδιωτικό σταθμό μέσω της ιστοσελίδας [www.ozia.net/W](http://www.ozia.net/W). Χρησιμοποιήθηκαν πρωτογενή δεδομένα από πέντε συνολικά σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται κοντά στην περιοχή μελέτης και βρίσκονται στους οικισμούς Παναγοπούλα, Ρίο, Καστρίτσι, Έξω Αγιά και ένας στο Παναχαϊκό όρος. Τα δεδομένα που βρέθηκαν αφορούν χρονικές περιόδους από το 2010, το 2013 και το 2015 μέχρι τον Μάιο του 2016 που ολοκληρώθηκε η συλλογή τους. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί και οι πληροφορίες για το υψόμετρο τους, τη χρονική περίοδο που καλύπτουν και την θέση τους παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (5.1) και χάρτη (Εικόνα 5.5).

*Πίνακας 5.1 : Χαρακτηριστικά μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται κοντά στην περιοχή μελέτης*

Σταθμός	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο σταθμού (m)	Χρονολογικές περιόδους
Έξω Αγιά	38,2713	21,7522	32	2010-2016
Καστρίτσι	38,2716	21,8347	511	2013-2016
Ρίο	38,30933	21,78169	2	2010-2016
Παναχαϊκό	38,2535	21,87016	1588	2013-2016
Παναγοπούλα	38,32706	21,92759	15	2015-2016



Εικόνα 5.5: Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών

#### 5.4.1. Θερμοκρασία περιοχής μελέτης

Μετά από μελέτη των μετεωρολογικών δεδομένων παρατηρείται ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας είναι φυσιολογική με υψηλές θερμοκρασίες τους καλοκαιρινούς μήνες και χαμηλότερες του χειμερινούς. Επίσης, παρατηρούνται οι διαφορετικές τάξεις θερμοκρασιών στους σταθμούς με διαφορετικά υψόμετρα. Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μέσων θερμοκρασιών για κάθε μήνα και κάθε σταθμό. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για κάθε σταθμό.

Πίνακας 5.2 : Μέσες θερμοκρασίες μετεωρολογικών σταθμών

Σταθμός	Μεταβλητή	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Ρίο	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	14,160	14,548	16,230	20,068	23,625	27,849	31,331	32,374	28,384	22,749	19,489	15,526
	Απόλυτη μέση θερμοκρασία	11,306	11,676	13,217	16,543	19,966	23,995	27,231	28,134	25,296	19,660	16,559	12,580
	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	8,452	8,805	10,203	13,019	16,308	20,141	23,131	23,895	22,208	16,570	13,629	9,633
Έξω Αγία	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	14,406	15,101	16,818	20,706	24,437	28,591	32,001	32,993	28,899	23,517	20,038	15,959
	Απόλυτη μέση θερμοκρασία	11,522	12,183	13,727	17,208	20,810	24,859	27,956	28,818	25,293	20,153	16,748	12,985
	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	8,639	9,264	10,636	13,710	17,183	21,128	23,911	24,643	21,686	16,789	13,457	10,011
Κασσίτρι	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	13,462	15,468	17,111	21,352	23,333	28,503	31,181	32,474	27,653	21,952	19,167	15,634
	Απόλυτη μέση θερμοκρασία	10,153	11,674	12,637	15,799	18,385	22,689	26,310	27,823	23,928	18,644	15,964	12,265
	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	6,844	7,881	8,164	10,247	13,437	16,874	21,440	23,173	20,203	15,336	12,761	8,897
Παναχαϊκό	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	2,783	4,568	5,571	10,709	13,577	17,251	20,898	21,523	17,770	12,860	8,971	5,502
	Απόλυτη μέση θερμοκρασία	1,003	2,598	2,955	7,647	10,313	13,921	17,292	17,905	14,348	10,076	6,534	2,892
	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	-0,777	0,627	0,340	4,584	7,048	10,590	13,687	14,287	10,927	7,292	4,098	0,283
Παναγοπούλα	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	14,123	17,421	16,442	22,383	23,887	29,445	33,281	33,300	29,900	23,000	19,800	15,284
	Απόλυτη μέση θερμοκρασία	11,316	14,324	13,223	18,297	19,627	24,805	28,303	28,700	25,897	20,250	16,797	12,429
	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία	8,510	11,228	10,003	14,210	15,368	20,164	23,326	24,100	21,893	17,500	13,793	9,574

#### **5.4.2. Βροχόπτωση**

Η βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης επηρεάζεται από τους βροχοφόρους ανέμους δυτικής διεύθυνσης και τις υφέσεις που κινούνται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, χαρακτηριστικά που αφορούν γενικότερα την περιοχή της βορειοδυτικής Πελοποννήσου. Στη βόρεια περιοχή της περιοχής το ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 700 έως 820 mm ενώ στο εσωτερικό τμήμα της, το οποίο είναι πιο ορεινό, το ετήσιο ύψος αυξάνεται. Παρατηρείται, επίσης, ότι ακόμα και στην ξηρή περίοδο του καλοκαιριού, δηλαδή τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, σημειώνονται κάποιες περιπτώσεις ραγδαίων θερμικών καταιγίδων. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης των πέντε διαθέσιμων σταθμών. Στο παράρτημα Β δίνονται διαγράμματα για τις βροχοπτώσεις των σταθμών.

#### **5.5 Χρήσεις γης**

Η λεκάνη απορροής του Βολιναίου ποταμού μπορεί να θεωρηθεί ως αγροτική περιοχή με κάποια στοιχεία αστικής δόμησης. Ως προς τις αγροτικές δραστηριότητες στην περιοχή, υπάρχουν καλλιέργειες που αποτελούνται κυρίως από αμπέλια, λεμονιές και ελιές. Παράλληλα, διατηρείται μικρή κτηνοτροφική μονάδα η οποία συντηρεί κυρίως αιγοπρόβατα. Μεγάλη έκταση καλύπτουν δασώδεις εκτάσεις ή εκτάσεις με χαμηλή βλάστηση ανάμεικτη με καλλιέργειες. Το αστικό περιβάλλον της περιοχής συνθέτουν οι οικισμοί που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή προέκυψαν από το χαρτογραφικό υπόβαθρο Corine Land Cover.

Το υπόβαθρο Corine ξεκίνησε το 1985 από την Ευρωπαϊκή Ένωση με σκοπό τη συλλογή και τον συντονισμό των χρήσεων γης καθώς και άλλων στοιχείων του περιβάλλοντος. Το υπόβαθρο αποτελεί ένα πρωτότυπο σχέδιο με πεδίο δράσης πολλά περιβαλλοντικά ζητήματα. Η βάση δεδομένων του Corine διαθέτει 44 κατηγορίες χρήσεων γης και είναι διαθέσιμη για τις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης. Οι 44 αυτές κατηγορίες υπάγονται σε 5 συνολικά μεγαλύτερες κατηγορίες χρήσεων γης οι οποίες είναι:

Πίνακας 5.3 : Μέσες τιμές μηνιαίων και ετήσιων βροχοπτώσεων για κάθε σταθμό

Σταθμός	Βροχόπτωση (mm)												Έτος
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	
Ρίο	106,69	110,33	76,00	47,63	34,20	10,73	6,17	2,20	42,10	117,08	81,87	105,27	740,26
Παναχαΐκό	283,20	169,23	163,73	106,40	78,50	32,07	20,27	13,40	93,07	220,73	255,33	137,80	1573,72
Κασρίτσι	137,97	99,47	107,13	57,33	31,80	13,80	11,63	8,90	111,27	162,03	204,97	93,51	1039,81
Παναγοπούλα	160,00	51,60	138,60	57,00	35,40	2,20	13,60	2,00	18,00	119,60	150,00	0,80	748,80
Έξω Αγιά	120,11	121,54	86,26	47,60	32,23	11,40	6,27	4,60	53,17	127,00	92,57	121,90	824,64

- Τεχνητές επιφάνειες
- Γεωργικές περιοχές
- Δάση και ημι-φυσικές περιοχές
- Υγρές ζώνες
- Υδάτινες επιφάνειες

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης όπως προκύπτουν από τα στοιχεία του Corine ενώ στην Εικόνα 5.6 φαίνεται ο χάρτης αυτών.

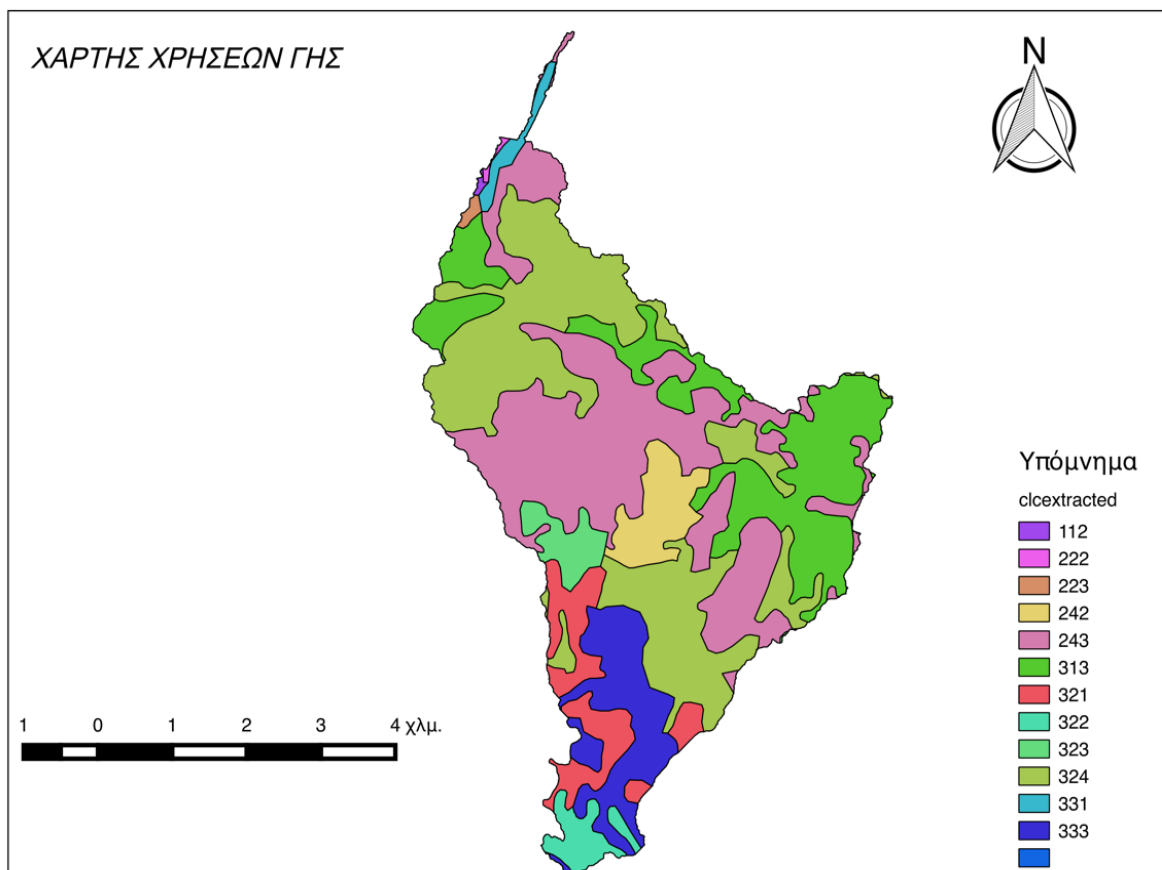
*Πίνακας 5.4: Κωδικοί του Corine Land Cover*

Κωδικός	Περιγραφή
112	Ασυνεχής αστικός ιστός
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
223	Ελαιώνες
242	Σύνθετες καλλιέργειες
243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστηση
313	Μικτό δάσος
321	Φυσιικοί βοσκότοποι
322	Θάμνοι και χερσότοποι
323	Σκληροφυλλική βλάστηση
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση

## 5.6 Ανθρωπογενείς επεμβάσεις

Οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις που έχουν γίνει στην περιοχή μελέτης αφορούν κυρίως το παράκτιο κομμάτι της λεκάνης απορροής. Οι επεμβάσεις αυτές έχουν να κάνουν με βιομηχανική δραστηριότητα καθώς και με τα εργοτάξια της κατασκευής της Νέας Εθνικής Οδού Κορίνθου-Πατρών.

Σε μικρή απόσταση από τα όρια τη περιοχής μελέτης, βρίσκεται ένα εγκαταλελειμμένο εργοστάσιο αμιάντου της εταιρίας «Αμιαντί». Το εργοστάσιο έκλεισε το 2000 και ξαναλειτούργησε λίγο καιρό αργότερα μέχρι που κήρυξε τελικά πτώχευση λόγω οικονομικών προβλημάτων. Το πρόβλημα, όμως, που εξακολουθεί



Εικόνα 5.6: Χάρτης χρήσεων γης

να υπάρχει μέχρι και σήμερα, είναι ότι στο χώρο του εργοστασίου, υπάρχουν επικίνδυνα απόβλητα που λόγω της τοξικότητάς τους δεν επιτρέπεται να μεταφερθούν σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), αλλά μόνο σε ειδικά διαμορφωμένους Χώρους Ταφής Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΧΥΤΕΑ). Να σημειωθεί ότι δεν είναι λίγες οι έρευνες που έχουν γίνει και έχουν συνδέσει τον αμιάντο με πολλές σοβαρές ασθένειες, όπως η αμιάντωση και ο καρκίνος. Το εργοστάσιο αυτό βρίσκεται κοντά στο βορειοδυτικό όριο της περιοχής και με τους συχνούς βορειοδυτικούς ανέμους που επικρατούν στην περιοχή μπορεί ευκολά να μεταφερθούν σκόνη και άλλα τοξικά στοιχεία στην λεκάνη απορροής του ποταμού που μπορούν κάλλιστα να καταλήξουν στο κυρίως υδατόρεμα. Παρακάτω φαίνονται μερικές φωτογραφίες από προσωπικές λήψεις του εργοστασίου.





*Εικόνα 5.7 : Εικόνες του εγκαταλελειμμένου εργοστασίου Αμιαντίτ. Πηγή :  
Προσωπική λήψη*

Μια ακόμα βιομηχανική μονάδα που υπάρχει γειτονικά της εξεταζόμενης περιοχής, είναι η τσιμεντοβιομηχανία Τιτάν Α.Ε. Το εργοστάσιο λειτουργεί στην περιοχή από το 1968 και από τότε επεκτείνεται συνεχώς. Σε γενικές γραμμές το εργοστάσιο έχει λάβει μέτρα για την μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί από τους κατοίκους των γειτονικών οικισμών η δημιουργία και η μεταφορά με τον αέρα σκόνης, που όταν κατακάθεται στις επιφάνειες έχει γκριζό χρώμα. Όπως είναι φυσικό, αυτή η σκόνη μεταφέρεται και στην λεκάνη απορροής του ποταμού και μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των υδάτων του.



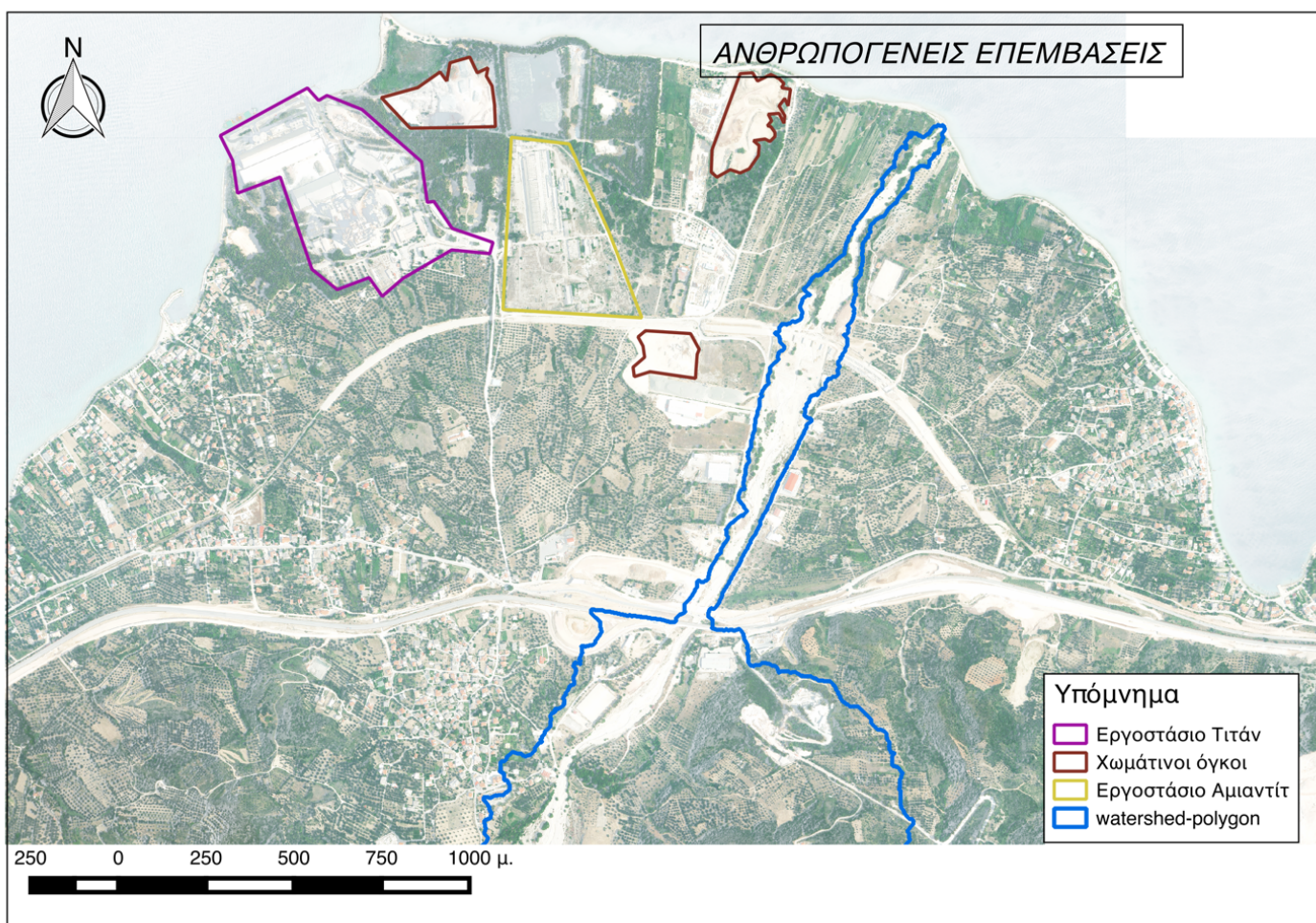
*Εικόνα 5.8 : Εργοστάσιο Τιτάν. Πηγή : διαδίκτυο*

Τέλος, στα πλαίσια της κατασκευής του νέου δρόμου Πατρών-Κορίνθου, η υλοποίηση του οποίου έχει αρχίσει από το 2007, έχουν δημιουργηθεί κάποιου



βοηθητικοί χώροι γειτονικά της περιοχής μελέτης. Μερικοί τέτοιοι χώροι είναι σωροί από χώματα που χρησιμοποιούνται για τα χωματουργικά που απαιτούνται για τον δρόμο. Οι σωροί αυτοί είναι εκτεθειμένοι στους αέρηδες και στην βροχόπτωση και έτσι είναι λογικό να υπάρχει μεταφορά ποσοτήτων χώματος και όποιων στοιχείων περιλαμβάνονται μέσα σε αυτό προς την περιοχή μελέτης. Το γεγονός αυτό ενισχύει την μεταφορά ιζήματος και κατά συνέπεια την στερεοπαροχή του ποταμού.

Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 5.9) φαίνονται οι σχετικές θέσεις των παραπάνω επεμβάσεων σε σχέση με την βορειοδυτικό άκρο της λεκάνης απορροής του Βολιναίου ποταμού.



Εικόνα 5.9 : Χάρτης με τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις της περιοχής



## 6. Εφαρμογή του μοντέλου SWAT

### 6.1 Συλλογή δεδομένων

Μετά την επιλογή του λογισμικού έγινε η συλλογή των δεδομένων. Αυτή η συλλογή αποτέλεσε μια δύσκολη διαδικασία καθώς λίγα στοιχεία είναι διαθέσιμα για την περιοχή που εκβάλλει ο Βολιναίος Ποταμός. Οι ελλείψεις χρονοσειρές βροχόπτωσης και ο κακός χρονικός συντονισμός των μετεωρολογικών σταθμών αποτέλεσε ένα σημαντικό εμπόδιο και χρειάστηκε να δοθούν ορισμένες προσεγγιστικές τιμές. Όσο αφορά την παροχή του ποταμού, δε βρέθηκαν δεδομένα αφού δεν έχουν γίνει ποτέ μετρήσεις. Το γεγονός αυτό δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα ως προς τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Σε αντιδιαστολή, στα χωρικά δεδομένα, δεν υπήρξε τόσο σημαντικό πρόβλημα στην εύρεση των δεδομένων εκτός των εδαφολογικών στοιχείων. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ελήφθη από την ΕΚΧΑ Α.Ε. Οι χρήσεις γης της περιοχής προέκυψαν από το υπόβαθρο Corine με ικανοποιητική ακρίβεια. Σχετικά με τις πληροφορίες που αφορούν τη γεωλογία της περιοχής, δεν ήταν δυνατή η εύρεση πολύ αναλυτικού υποβάθρου που να δίνει τα στοιχεία απαραίτητα για το μοντέλο. Τελικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το European Soil Data Centre (ESDAC).

Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα εφαρμογής του μοντέλου. Τα βήματα αυτά προκύπτουν από την κάθε ομάδα εντολών του προγράμματος. Η έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **ArcSWAT 2012.10.2.18**. Η βασική γραμμή εργαλείων περιλαμβάνει τις εξής επιλογές:

- SWAT Project Setup
- Watershed Delineation
- HRU Analysis
- Write input Tables
- Edit SWAT Input

- SWAT Simulation

Στην πρώτη ομάδα εντολών, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί τα projects με τα οποία έχει ασχοληθεί. Μπορεί να προχωρήσει στη δημιουργία ενός νέου project, για το οποίο ορίζει που θα αποθηκευτεί και από ποια βάση δεδομένων θα λαμβάνει στοιχεία. Επίσης, από το μενού αυτό δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης, αντιγραφής και διαγραφής ενός project.

Το δεύτερο μενού εντολών αφορά τον σχεδιασμό της λεκάνης απορροής του ποταμού και γίνεται εισαγωγή των δεδομένων για το υψόμετρο. Πραγματοποιείται εντοπισμός του υδρογραφικού δικτύου και η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε μικρότερες υπολεκάνες. Το μενού μπορεί να δώσει αναφορές που αφορούν σε τοπογραφικά χαρακτηριστικά κάθε υπολεκάνης.

Το τρίτο μενού σχετίζεται με τον διαχωρισμό της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η διακριτοποίηση, εισάγονται από τον χρήστη δεδομένα για τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις της περιοχής μελέτης.

Τα δύο επόμενα μενού αφορούν στην κατασκευή και επεξεργασία δεδομένων που είναι απαραίτητα για να τρέξει το μοντέλο. Τα δεδομένα αυτά κατασκευάζονται από το μοντέλο, διαδικασία που μπορεί να γίνει και μαζικά. Η επεξεργασία τους είναι αναγκαία σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης και μπορεί να υλοποιηθεί πολύ εύκολα μέσα από μενού του προγράμματος.

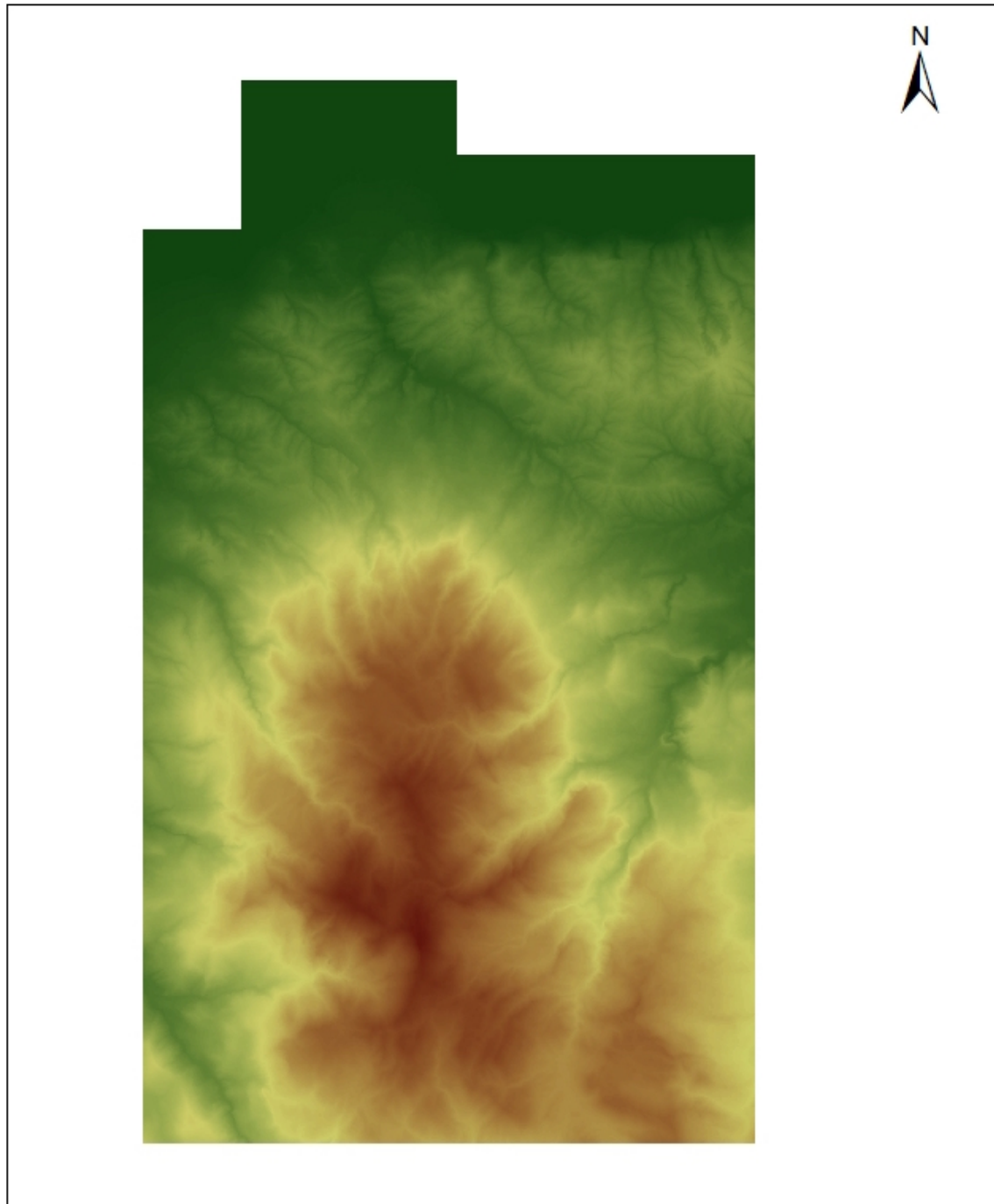
Τέλος, το μενού που ακολουθεί, έχει να κάνει με την προσομοίωση του μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι λεπτομέρειες και οι προτιμήσεις του χρήστη για την προσομοίωση, διαβάζονται τα αποτελέσματα και μπορεί να πραγματοποιηθεί και μια βαθμονόμηση με επιλογές του χρήστη.

## 6.2 Σχεδιασμός της λεκάνης απορροής

Πρώτο βήμα επεξεργασίας για το πρόγραμμα είναι ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής του ποταμού με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Τα δεδομένα, που συλλέχθηκαν για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αποτελούνταν από μια σειρά εικόνων τύπου TIFF που όταν τοποθετούνταν σε περιβάλλον GIS δημιουργούσαν ένα μωσαϊκό, δηλαδή ένα σύμπλεγμα εικόνων σε πραγματικές συντεταγμένες. Προκειμένου να γίνει η ένωσή τους και η διαχείριση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ως ένα μοναδικό αρχείο, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGIS και η εντολή «Mosaic to New Raster» από την εργαλειοθήκη «Raster Dataset». Με αυτό το τρόπο, προέκυψε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ως ένα αρχείο, έτοιμο να χρησιμοποιηθεί από το πρόγραμμα. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1

Όταν δημιουργηθεί το project από το SWAT Project Setup, ο χρήστης καλείται να σχηματίσει την λεκάνη απορροής. Σε πρώτο στάδιο, εισάγει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο χρήσιμο θα είναι να είναι γεωαναφερμένο, όπως είναι στην συγκεκριμένη περίπτωση στο ΕΓΣΑ 87. Εξαιρετικά βοηθητικό για το μοντέλο είναι να δοθεί η μονάδα μέτρησης του υψομέτρου για το μοντέλο που έχει εισαχθεί. Το μενού για τη διαδικασία αυτή, προέρχεται από το κουμπί DEM projection setup. Προφανώς επιλέχθηκαν τα μέτρα, μιας και αυτή ήταν η μονάδα μέτρησης των υψομέτρων στο DEM. Στη συνέχεια, με την επόμενη εντολή, το πρόγραμμα αναγνωρίζει την διεύθυνση της ροής των υδάτων καθώς και που αυτά συσσωρεύονται. Επόμενο βήμα, είναι η δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου, η οποία γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Για να σχεδιαστεί η λεκάνη, απαραίτητο είναι να δοθεί το σημείο εξόδου της λεκάνης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ή να δημιουργήσει ένα καινούριο σημείο στο οποίο θέλει να «κλείνει» η λεκάνη. Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε ένα καινούριο σημείο εκεί που ο Βολιναίος ποταμός συναντά τη θάλασσα. Μετά την επιλογή του σημείου, έγινε η σχεδίαση της λεκάνης απορροής και των υπολεκανών και στο τέλος υπολογίστηκαν κάποιες τοπογραφικές παράμετροι για τις λεκάνες που

# ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ



0 0.5 1 2 3 4 Miles

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

DEM

Value

High : 1926.51



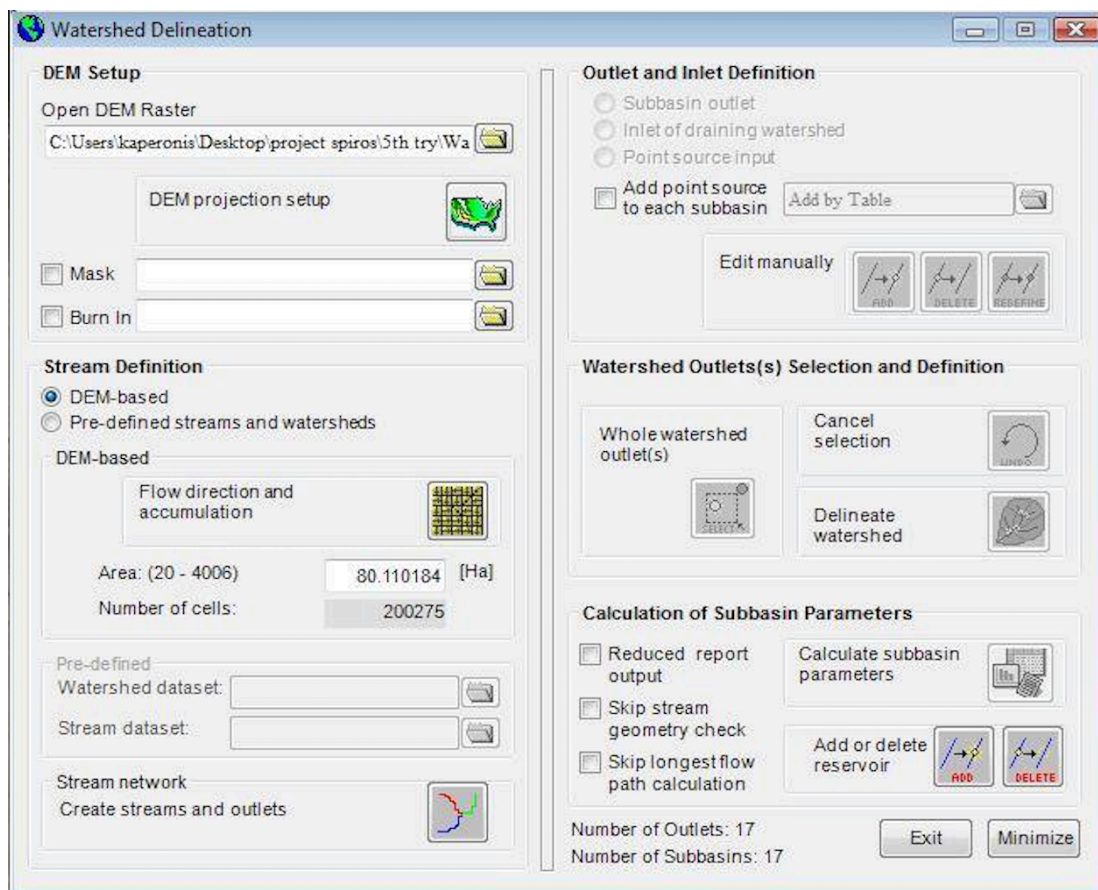
Low : -2.16

Εικόνα 6.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους



δημιουργήθηκαν. Όταν πραγματοποιήθηκαν οι εντολές προέκυψε η χάραξη του υδροκρίτη της και έγινε ο χωρισμός της σε 17 υπολεκάνες.

Το παράθυρο που είναι υπεύθυνο για τον διαχωρισμό της λεκάνης και για την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους φαίνεται στην Εικόνα 6.2.



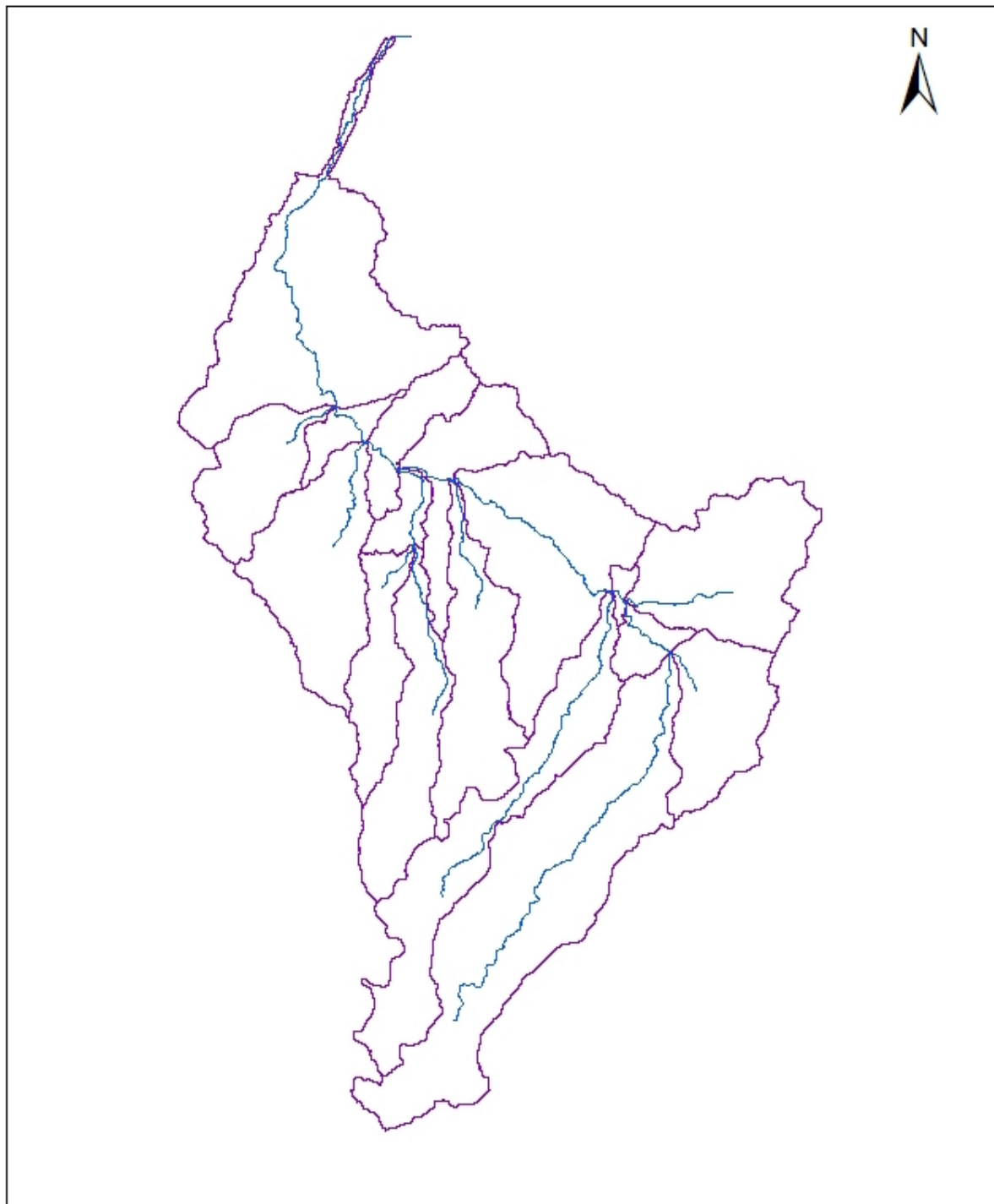
Εικόνα 6.2: Παράθυρο του μενού "Watershed delineation"

Στην εικόνα 6.3 φαίνεται ο χάρτης που αποτυπώνει τις υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης με το πρόγραμμα ArcSWAT.

### 6.3 Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης

Μετά το σχεδιασμό της λεκάνης απορροής ακολουθεί η δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU). Όπως αναφέρθηκε και στα κεφάλαια 3 και 4, τα HRU's αποτελούν περιοχές με συγκεκριμένες και κοινές ιδιότητες ως προς τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις. Προκειμένου λοιπόν, να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε HRU, αναγκαίο είναι να γίνει εισαγωγή των δεδομένων χρήσεων γης και εδάφους και να δοθούν οδηγίες για την κατασκευή του χάρτη κλίσεων του εδάφους.

# ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ



0 0.3 0.6 1.2 1.8 2.4 Miles

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

— Reach

□ Watershed

Εικόνα 6.3: Υπολεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Βολιναίου ποταμού

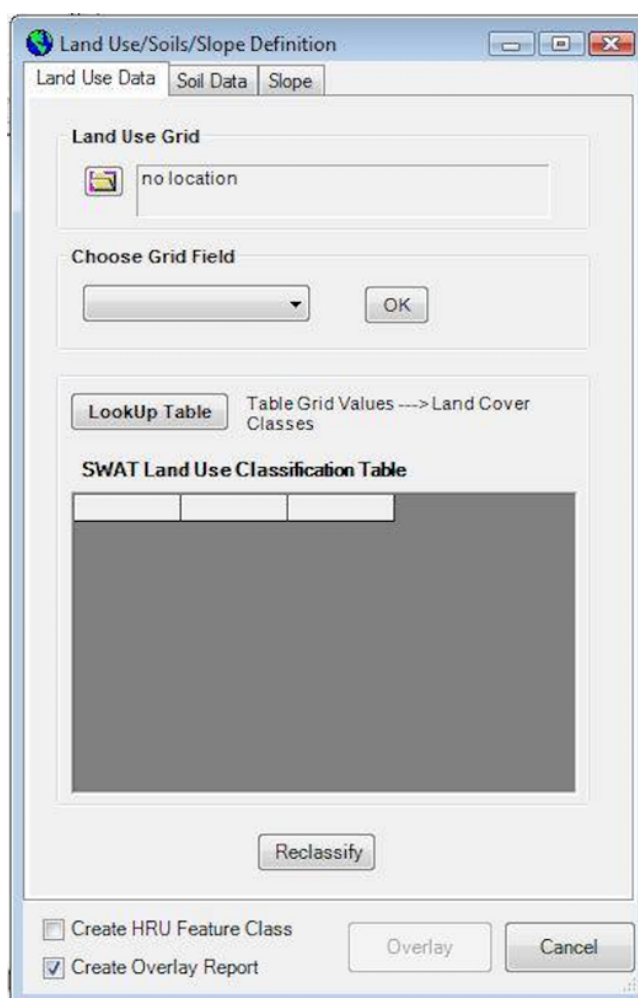


Μόλις δοθούν όλα τα στοιχεία, ο χρήστης επιλέγει και ορίζει κάποια «κατώφλια» που δίνουν το βάρος κάθε ενός στοιχείου που έγινε η εισαγωγή του, στο προηγούμενο βήμα, στην δημιουργία των HRU.

Το πρώτο, λοιπόν, μενού εντολών που αφορά στην ανάλυση των HRU είναι το «Land Use/Soil/Slope Definition» .

### 6.3.1 Input 1: Χρήσεις γης

Αρχικά, ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα που αφορούν τις χρήσεις γης της περιοχής μέσω του παρακάτω μενού (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: Μενού για εισαγωγή υποβάθρου χρήσεων γης

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για την εν λόγω έρευνα σχετικά με τις χρήσεις γης προέρχονται από το χαρτογραφικό υπόβαθρο Corine Land Cover. Για να μειωθεί ο εκτελεστικός χρόνος του προγράμματος, το υπόβαθρο Corine

περιορίστηκε στην περιοχή μελέτης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής “Extract by Mask” μέσω της ομάδας εντολών “Spatial Analyst Tools”.

Το πρόγραμμα διαθέτει στη βάση δεδομένων του κάποιες καταχωρημένες χρήσεις γης οι οποίες μπορεί να ταυτίζονται με αυτές του Corine αλλά να έχουν διαφορετική ονομασία. Συνεπώς, προκειμένου να γίνει η αντιστοίχιση, δημιουργείται και χρησιμοποιείται ένα “lookup table” το οποίο εισάγεται στο αντίστοιχο παράθυρο. Στο Παράρτημα Α είναι διαθέσιμος ο πίνακας με τις χρήσεις γης για αγροτικές περιοχές που διαχειρίζεται το μοντέλο.

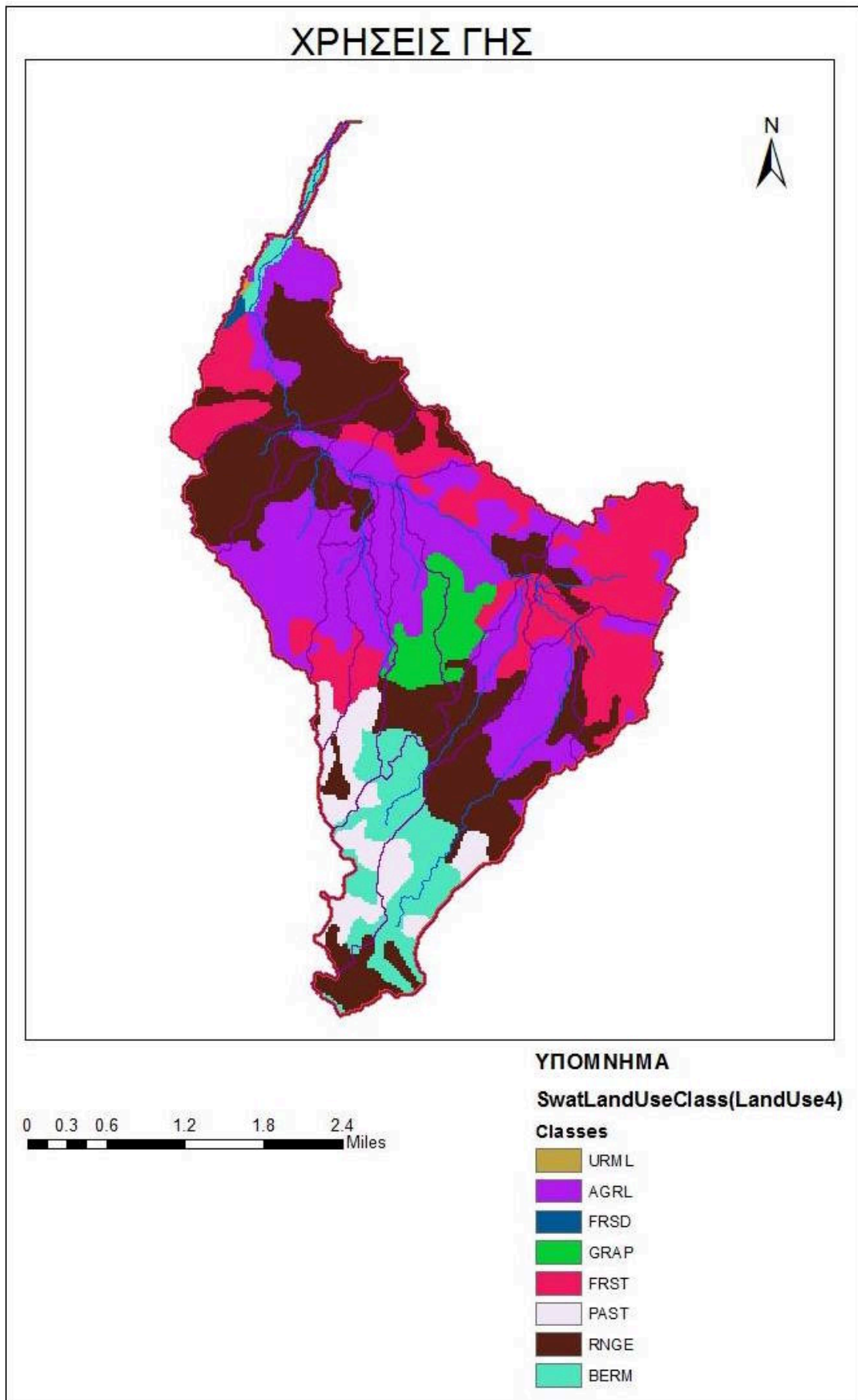
Πίνακας 6.1: Αντιστοίχιση χρήσεων γης Corine με αυτές του SWAT

Α/Α	CORINE		SWAT	
	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ
1	112	Ασυνεχής αστικός ιστός	URML	Residential-Med/Low Density
2	222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	AGRL	Agricultural land
3	223	Ελαιώνες	FRSD	Forest Desiduous
4	242	Σύνθετες καλλιέργειες	GRAP	Grapes
5	243	Γεωργική γη με τμήματα φυσικής βλάστησης	AGRL	Agricultural land
6	313	Μικτό δάσος	FRST	Forest Mixed
7	321	Φυσικοί βοσκότοποι	PAST	Pasture
8	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	Forest Mixed
9	324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	RNGE	Range-Grasses
10	331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	BERM	Bermuda
11	333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	BERM	Bermuda

Όταν γίνει η αντιστοίχιση των χρήσεων γης, δημιουργείται ένα καινούριο layer στην επιφάνεια εργασίας του ArcSWAT στο οποίο παρουσιάζονται οι χρήσεις γης της λεκάνης. Ο χάρτης με τις χρήσεις γης που δημιουργήθηκαν από το μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.5.

### 6.3.2 Input 2: Δεδομένα εδάφους

Μετά τις χρήσεις γης, ο χρήστης καλείται να εισάγει τα δεδομένα του εδάφους. Αυτή η ενέργεια αποτέλεσε μια χρονοβόρα διαδικασία εξαιτίας της δυσκολίας στην εύρεση των δεδομένων. Κατά την αναζήτηση γεωλογικού χάρτη της περιοχής δεν συναντήθηκαν δυσκολίες. Αντιθέτως, δεν ήταν δυνατή η συλλογή υδρολιθικών δεδομένων που είναι απαραίτητα από το πρόγραμμα. Τελικά, μετά από δοκιμές



Εικόνα 6.5: Χάρτης χρήσεων γης

διαθέσιμων δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το υπόβαθρο από την European Soil Data Centre.

Η Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Εδάφους που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει τέσσερα ξεχωριστά στοιχεία τα οποία είναι:

- Η γεωγραφική βάση δεδομένων εδάφους της Ευρασίας σε κλίμακα 1:1.000.000
- Η αναλυτική βάση δεδομένων για τα εδαφικά προφίλ της Ευρώπης
- Η βάση δεδομένων για τις υδραυλικές ιδιότητες των ευρωπαϊκών εδαφών
- Η βάση δεδομένων με άλλα χαρακτηριστικά των εδαφών

Το υπόβαθρο της ευρωπαϊκής αυτής βάσης δεδομένων εισήχθη στο μοντέλο, αλλά το σημαντικό μέρος ήταν να δημιουργηθεί η βάση δεδομένων για τα εδάφη με χαρακτηριστικά που αναγνωρίζει το πρόγραμμα. Το ArcSWAT για τα εδάφη χρειάζεται δεδομένα τόσο ως προς το βάθος που συναντάται το κάθε πέτρωμα και την υφή που έχει, όσο και ως προς υδραυλικές του ιδιότητες. Αυτές είναι η αγωγιμότητα του, η χωρητικότητα του σε νερό καθώς επίσης και μεταβλητές της εξίσωσης MUSLE.

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μια απόπειρα αποσαφήνισης των διαφορετικών ονομασιών και στοιχείων, που η γνώση τους είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή των χαρακτηριστικών που απαιτούνται από το SWAT. Αυτή η διαδικασία ήταν δύσκολη διότι αφενός δεν υπήρχε σχετική εμπειρία με τα χαρακτηριστικά των εδαφών και αφετέρου χρειάστηκε ένας μεγάλος όγκος χαρτογραφικών υποβάθρων μικρής κλίμακας όπως και κειμένων και πινάκων. Μετά τη μετάφραση των στοιχείων πραγματοποιήθηκε συγγραφή μιας βάσης δεδομένων για τα εδάφη σύμφωνα με τα πρότυπα που έχει το ArcSWAT. Η δημιουργία της βάσης αυτής, βοήθησε στην αντιστοίχιση των εδαφών της ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων με αυτών που έχει το πρόγραμμα καταχωρημένα στη δική του βάση SWAT2012, που πραγματοποιήθηκε για να λειτουργήσει το μοντέλο.

Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται οι τύποι των δεδομένων που υπάρχουν στη βάση δεδομένων εδαφών του SWAT.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά εδαφών που απαιτούνται από το ArcSWAT

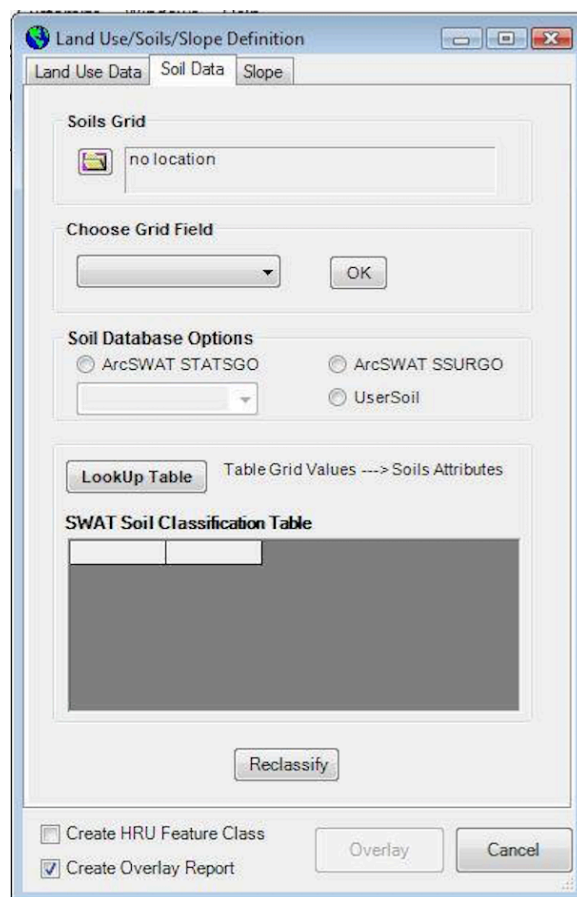
Μεταβλητή	Περιγραφή
NLAYERS	Αριθμός στρωμάτων στο έδαφος
HYDRGP	Υδρολογική κατηγορία εδάφους
SOL_ZMX	Μέγιστο βάθος ριζοστρώματος
ANION_EXCL	Κλάσμα του πορώδους
SOL_CRK	Πιθανότητα θράυσης του εδαφικού προφίλ
TEXTURE	Υφή του εδάφους
SOL_Zi	Βάθος του στρώματος i
SOL_Bdi	Ειδικό βάρος για υγρό έδαφος
SOL_AWCi	Διαθέσιμη εδαφική υγρασία
SOL_Ki	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
SOL_CBNi	Ποσοστό οργανικού άνθρακα
CLAYi	Περιεκτικότητα σε άργιλο
SILTi	Περιεκτικότητα σε ιλύ
SANDi	Περιεκτικότητα σε άμμο
ROCKi	Ποσοστό ύπαρξης βράχου
SOL_ALBi	Ειδική σταθερά albedo
USLE_Ki	Συντελεστής διαβρωσιμότητας της εξίσωσης USLE
SOL_Eci	Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα κριτήρια με τα οποία έγινε η αντιστοίχιση των εδαφών αυτών ήταν:

- το βάθος του κάθε στρώματος,
- η υδραυλική αγωγιμότητα και πρωτίστως
- η κατηγοριοποίηση τους σε υδραυλικές κατηγορίες.

Ένα έδαφος κατατάσσεται σε μια κατηγορία βάσει κάποιων χαρακτηριστικών όπως ο ρυθμός με τον οποίο απορροφά το νερό ή η ικανότητα αποθήκευσης υδάτινου όγκου. Αν η χωρητικότητα του εδάφους είναι μεγάλη, το έδαφος χαρακτηρίζεται κατηγορίας A, ενώ αν ισχύει το αντίθετο, κατηγορίας Δ. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατηγοριοποίηση των εδαφών βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

Στην Εικόνα 6.6 φαίνεται η φόρμα εισαγωγής των δεδομένων εδαφών.



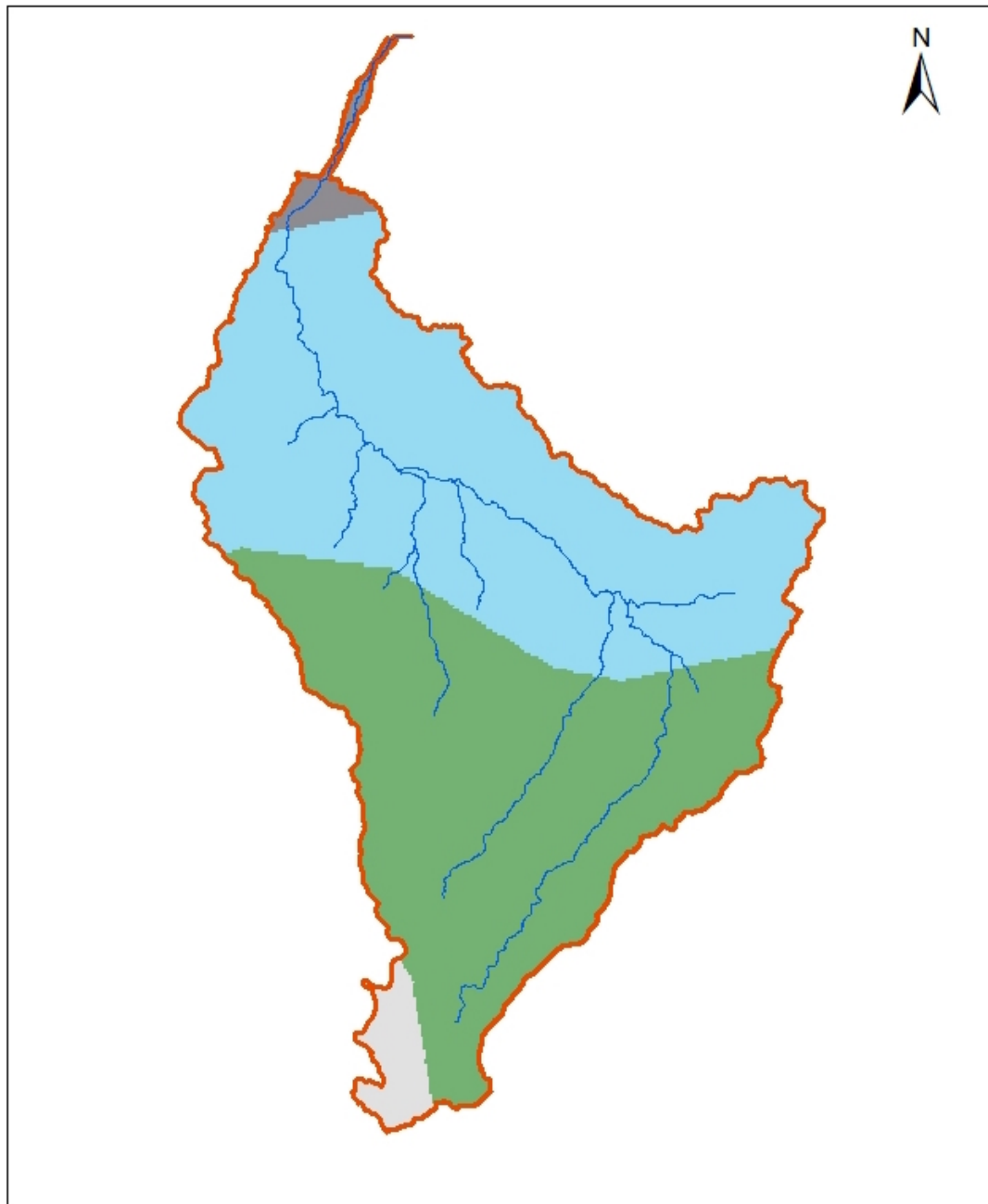
Εικόνα 6.6: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων εδάφους

Όταν επιλέχθηκε το υπόβαθρο για τα εδάφη και έγινε η αντιστοίχιση μέσω ενός “LookUp Table” προέκυψε ένα καινούριο layer που περιέχει τα τέσσερα εδάφη. Ο χάρτης με τα εδάφη της λεκάνης απορροής φαίνεται στην Εικόνα 6.7.

### 6.3.3 Input 3: Κλίσεις

Καθοριστικής σημασίας για τις διεργασίες βροχόπτωσης και απορροής είναι το ανάγλυφο και οι κλίσεις της λεκάνης απορροής. Το ανάγλυφο μιας λεκάνης επηρεάζει αισθητά το χρόνο συγκέντρωσης του νερού ο οποίος αυξάνεται όταν οι κλίσεις είναι μικρές και το ανάγλυφο μη ομαλό και την αποκόλληση και μεταφορά φερτών υλικών προς το κύριο υδατόρευμα. Για την λεκάνη απορροής του Βολιναίου

# ΕΔΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ




0 0.3 0.6 1.2 1.8 2.4 Miles


## ΥΠΟΜΝΗΜΑ


 Basin


### SwatSoilClass(LandSoils2)

#### Classes

 FARMINGTON

 ABRAM

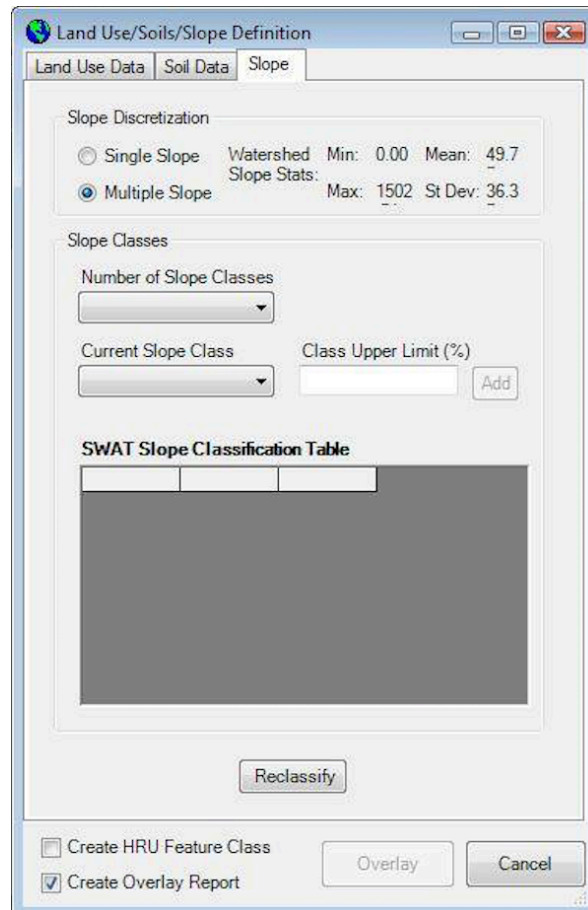
 BENSON

 HUBBARDTON

Εικόνα 6.7: Εδάφη περιοχής μελέτης

ποταμού, η αναπαράσταση των κλίσεων έγινε με χάρτη κλίσεων που δημιουργήθηκε από το ArcSWAT και από το μενού Slope του HRU Analysis.

Η φόρμα που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα φαίνεται στην Εικόνα 6.8 :



Εικόνα 6.8: Φόρμα εισαγωγής κλίσεων εδάφους

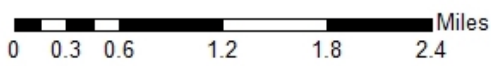
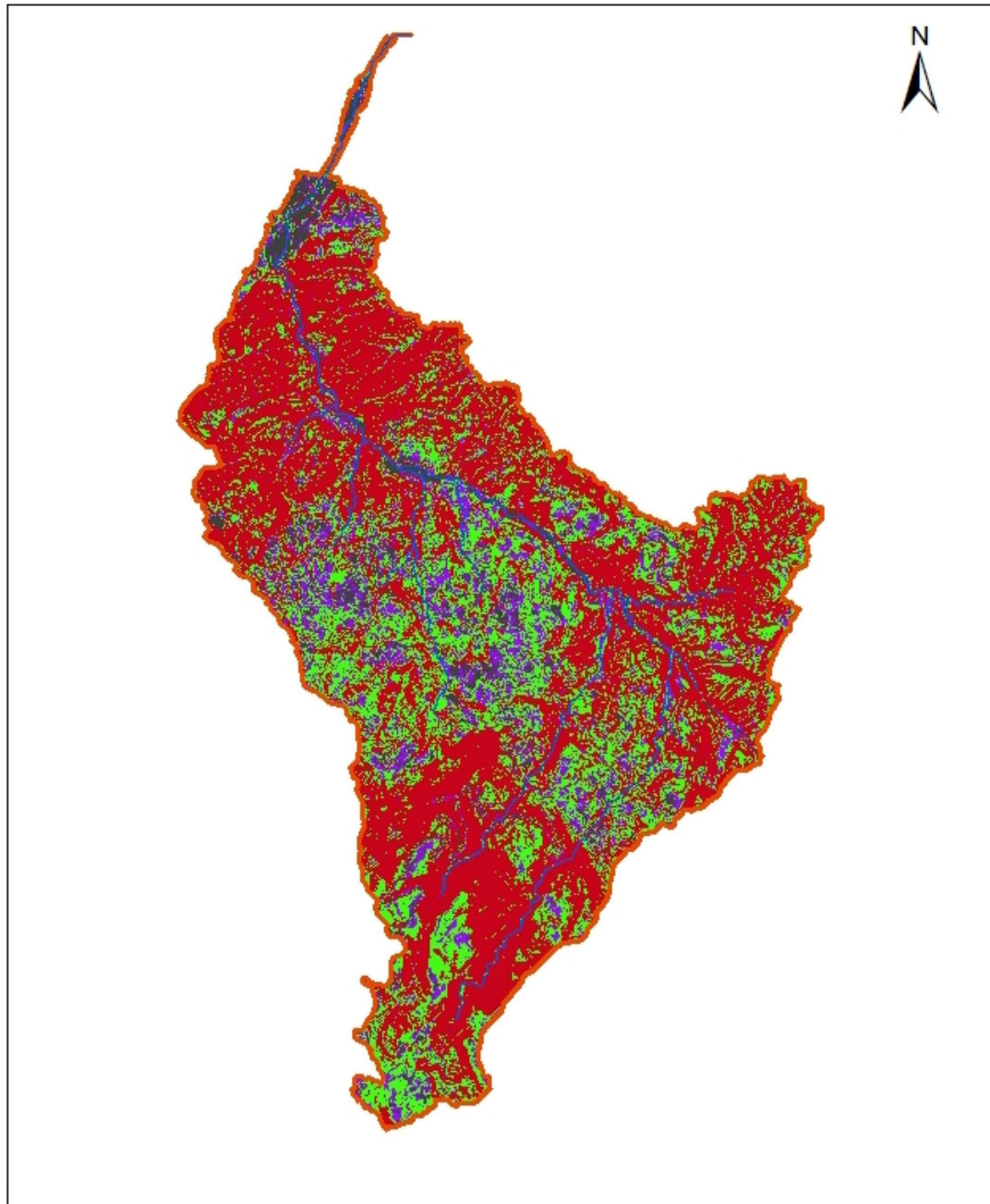
Το πρόγραμμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.8, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει σε πόσες κατηγορίες κλίσεων θέλει να κατατάξει την λεκάνη που μελετάται. Το μέγιστο όριο είναι 5 κατηγορίες και ο χρήστης δίνει τιμές για τα όρια των κατηγοριών. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν οι εξής κατηγορίες:

- 0-10
- 10-20
- 20-40
- 40 και πάνω

Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκε το καινούριο layer με τον χάρτη κλίσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.9.



# ΚΛΙΣΕΙΣ ΓΗΣ



## ΥΠΟΜΝΗΜΑ


 Basin

**LandSlope(LandSlope2)**

**Slope(%)**

 0-10

 10-20

 20-40

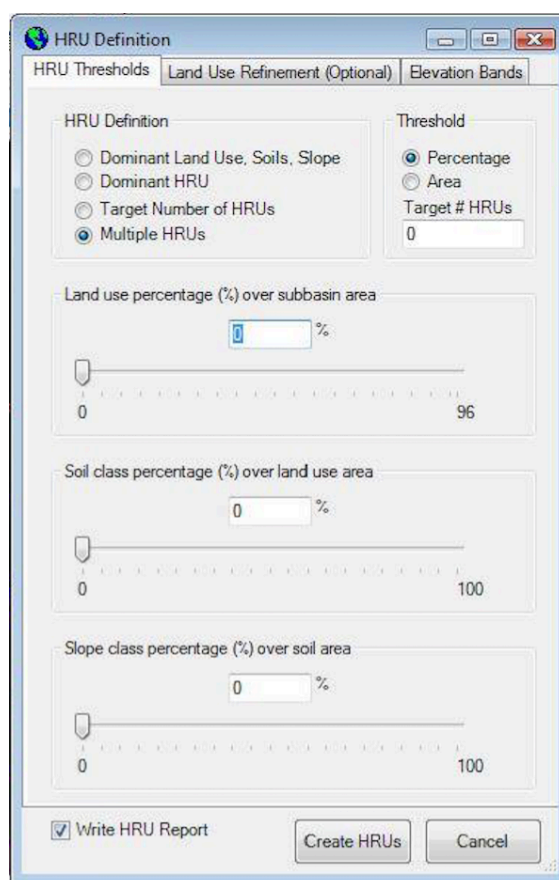
 40-9999

Εικόνα 6.9: Χάρτης κλίσεων της λεκάνης απορροής

## 6.4 Ορισμός HRU

Μόλις εισαχθούν τα υπόβαθρα των χρήσεων γης, των εδαφών και των κλίσεων, το πρόγραμμα χωρίζει την λεκάνη απορροής και τις υπολεκάνες σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Η διαδικασία αυτή γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω υπόβαθρα. Ο χρήστης έχει την επιλογή είτε να χρησιμοποιήσει ένα HRU σε κάθε υπολεκάνη, επιλογή που προτιμάται σε περιπτώσεις με μεγάλο αριθμό υπολεκανών, είτε να δημιουργηθούν πολλαπλά HRU για κάθε υπολεκάνη. Στη φόρμα του μοντέλου, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει κάποια ποσοστά για τις χρήσεις γης, το έδαφος και τις κλίσεις που υποδηλώνουν το ελάχιστο ποσοστό της υπολεκάνης που πρέπει να καταλαμβάνει το αντίστοιχο στοιχείο ώστε να δημιουργηθεί μια ξεχωριστή μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Γενικότερα, η διαδικασία αυτή καθορίζει πόσο συγκεντρωτική ή κατανεμημένη μορφή αποκτά το μοντέλο.

Η φόρμα που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον διαχωρισμό των HRU φαίνεται στην Εικόνα 6.10



Εικόνα 6.10: Φόρμα διαχωρισμού υπολεκανών σε HRU

Για τη λεκάνη απορροής του Βολιναίου χρησιμοποιήθηκε μεγάλη ανάλυση σε HRU. Τα ελάχιστα ποσοστά που τέθηκαν για τον ορισμό των μονάδων ήταν 10% στις χρήσεις γης, 10% στα εδάφη και 10% στις κλίσεις. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να μην θέσει κάποιο ποσοστό, όμως για λόγους ευκρίνειας και σαφούς ορισμού των HRU's δόθηκε η τιμή 10% και για τις τρεις παραμέτρους. Τελικά, δημιουργήθηκαν 166 μονάδες υδρολογικής απόκρισης βάσει των δεδομένων από τα υπόβαθρα όπως παρουσιάζονται στον χάρτη 6.11.

## 6.5 Εισαγωγή δεδομένων καιρού

Ο χρήστης καλείται να εισάγει επιπλέον τα δεδομένα του καιρού. Η εισαγωγή αυτή γίνεται από την φόρμα "Weather Stations" που βρίσκεται στην κατηγορία «Write Input Tables» του κεντρικού μενού. Σε αυτή τη φόρμα εισάγονται δύο τύποι στοιχείων, ένας πίνακας που περιέχει πληροφορίες για κάθε μετεωρολογικό σταθμό (wgen file) και οι χρονοσειρές για την βροχόπτωση, την θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου σε μορφή κειμένου.

Τα χαρακτηριστικά του πίνακα wgen είναι τα ακόλουθα:

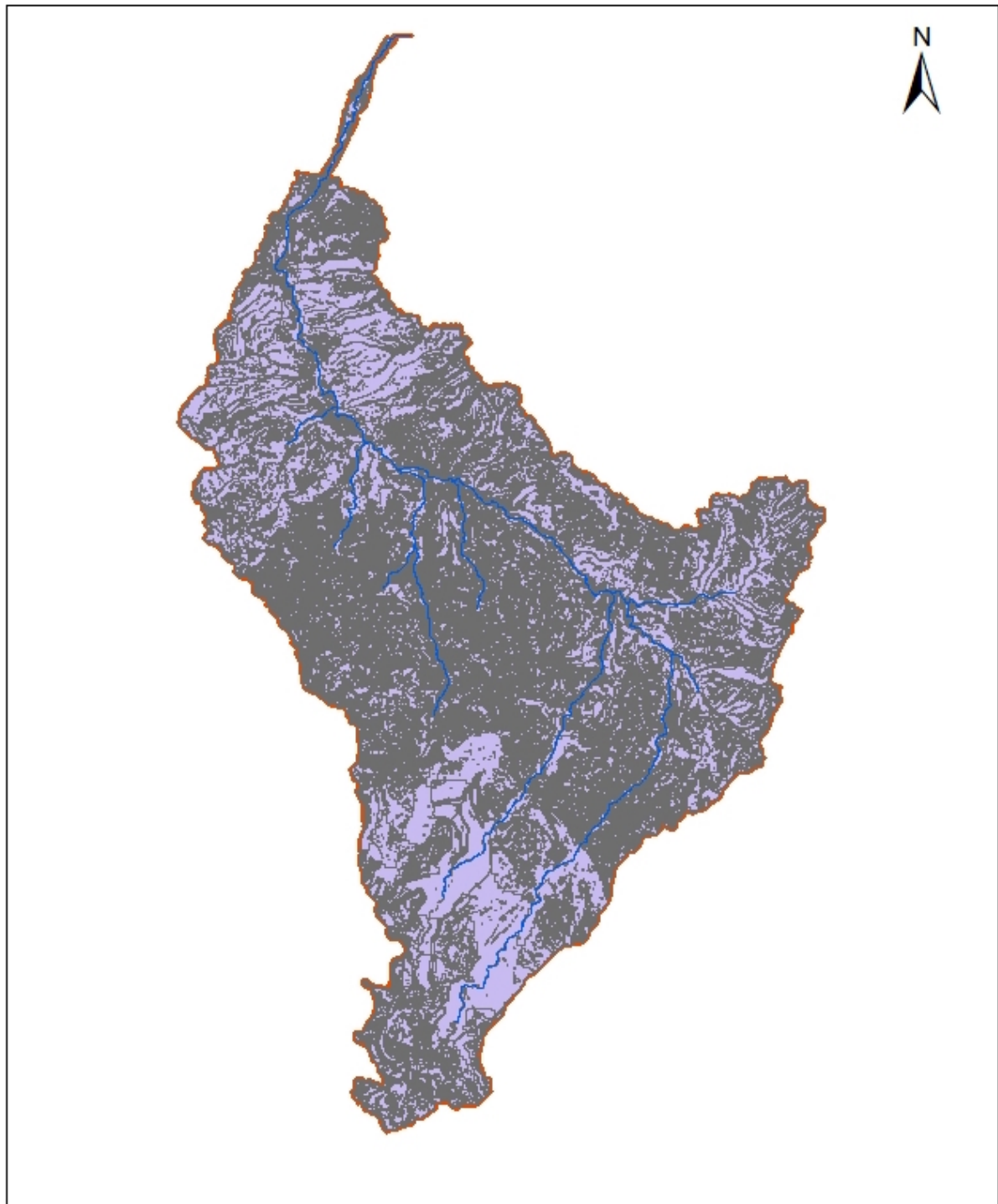
- TITLE: Όνομα του μετεωρολογικού σταθμού
- WLATITUDE: Γεωγραφικό πλάτος μετεωρολογικού σταθμού (degrees)
- WLONGTITUDE: Γεωγραφικό μήκος μετεωρολογικού σταθμού (degrees)
- WELEV: Υψόμετρο σταθμού (m)

Τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από τις πληροφορίες για τον κάθε σταθμό.

- RAIN\_YRS: Πλήθος χρόνων που υπήρξε μέγιστη βροχόπτωση μισής ώρας (yrs).

Προέκυψε με αναγνώριση των βροχομετρικών δεδομένων

# ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ



0 0.3 0.6 1.2 1.8 2.4 Miles

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- FullHRU
- Basin

Εικόνα 6.11: Οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης της λεκάνης του Βολιναίου

- T<sub>MPMX</sub>: Μέση μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (°C)
- T<sub>MPMN</sub>: Μέση ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία (°C)

Υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό με χρήση των τύπων:

$$\mu_{mx_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N} \quad (6.1)$$

$$\mu_{mn_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N} \quad (6.2)$$

όπου:

$\mu_{mx}$ : η μέση μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία για τον μήνα (°C)

$\mu_{mn}$ : η μέση ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία για τον μήνα (°C)

$T_{mx,mon}$ : η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία την ημέρα d (°C)

$T_{mn,mon}$ : η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία την ημέρα d (°C)

N: το πλήθος των ημερών

- T<sub>MPSTDMX</sub>: Τυπική απόκλιση για την μέγιστη θερμοκρασία
- T<sub>MPSTDMN</sub>: Τυπική απόκλιση για την ελάχιστη θερμοκρασία

Υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό με χρήση των τύπων:

$$\sigma_{mx_{mon}} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - \mu_{mx_{mon}})^2}{N-1}\right)} \quad (6.3)$$

$$\sigma_{mn_{mon}} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mon} - \mu_{mn_{mon}})^2}{N-1}\right)} \quad (6.4)$$

όπου:

$\sigma_{mx_{mon}}$ : τυπική απόκλιση για τη μέγιστη θερμοκρασία του μήνα (°C)

$\sigma_{mn_{mon}}$ : τυπική απόκλιση για την ελάχιστη θερμοκρασία του μήνα (°C)

- PCPMM: Μέση μηνιαία βροχόπτωση.

Υπολογίστηκε με χρήση του τύπου

$$R_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day,mon}}{yrs} \quad (6.5)$$

όπου:

$R_{mon}$ : η μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm H<sub>2</sub>O)

$R_{day,mon}$ : η ημερήσια βροχόπτωση τη μέρα d (mm H<sub>2</sub>O)

yrs: το πλήθος των χρόνων που υπάρχουν δεδομένα για το σταθμό

- PCPSTD: Η τυπική απόκλιση για την ημερήσια βροχόπτωση του μήνα.

Υπολογίστηκε με χρήση του τύπου

$$\sigma_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - R_{mon})^2}{N-1}\right)} \quad (6.6)$$

όπου:  $\sigma_{mon}$ : η τυπική απόκλιση (mm H<sub>2</sub>O)

- PCPSKW : Συντελεστής συμμετρίας βροχόπτωσης.

Υπολογίζεται με χρήση του τύπου

$$g_{mon} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - R_{mon})^3}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot \sigma_{mon}^3} \quad (6.7)$$

όπου:  $g_{mon}$ : ο συντελεστής

- PR\_W(1,mon): Πιθανότητα διαδοχής μιας υγρής μέρας από μια ξηρή.

Η μεταβλητή αυτή υπολογίστηκε με καταμέτρηση των περιπτώσεων και με εφαρμογή του τύπου

$$P_i(W/D) = \frac{days_{w,i}}{days_{dry,i}} \quad (6.8)$$

όπου:

$P(w/d)$ : η εξεταζόμενη πιθανότητα

$days_{w/d}$ : το πλήθος των περιπτώσεων που συμβαίνει η διαδοχή αυτή

$days_{dry}$ : το πλήθος των ξηρών ημερών στον μήνα για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης

- PR\_W(2,mon): Πιθανότητα διαδοχής μιας υγρής μέρας από μια υγρή.

Η μεταβλητή αυτή υπολογίστηκε με καταμέτρηση των περιπτώσεων και με εφαρμογή του τύπου

$$P_i(W/W) = \frac{days_w}{day_{wet,i}} \quad (6.9)$$

όπου:

$P(w/w)$ : η εξεταζόμενη πιθανότητα

$days_w/w$ : το πλήθος των περιπτώσεων που συμβαίνει η διαδοχή αυτή

$days_{wet}$ : το πλήθος των υγρών ημερών στον μήνα για ολόκληρη την περίοδο προσομοίωσης

- PCPD: Μέση τιμή υγρών ημερών του μήνα. Η παράμετρος αυτή υπολογίστηκε μέσω του τύπου

$$d_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs} \quad (6.10)$$

όπου:

$d_{wet,i}$ : η εξεταζόμενη μέση τιμή

- RAINHHMX: Μέγιστες ποσότητες βροχής που σημειώθηκαν σε διάρκεια μισής ώρας.

Τα δεδομένα αυτά δεν υπήρχαν και έτσι τέθηκαν προσεγγιστικές τιμές που προέκυψαν από εκτίμηση της βροχόπτωσης του μήνα, των ημερών και λαμβάνοντας υπόψη την συχνότητα εναλλαγής από ξηρή σε υγρή μέρα.

- SOLARAV: Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα. Τα δεδομένα αυτά δεν υπήρχαν και έτσι τέθηκαν οι τιμές για την ευρύτερη περιοχή του νομού Αχαΐας.
- DEWPT: Μέση ημερήσια τιμή για το σημείο δρόσου.

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής αναγκαίο ήταν να βρεθούν οι ημερήσιες τιμές για το σημείο δρόσου από κάθε σταθμό αφού δεν υπήρχαν στα δεδομένα. Για τον υπολογισμό αυτό έγινε εφαρμογή του τύπου:

$$T_{dew} = \frac{243,5 \cdot \left( \ln(RH) + \frac{17,67 \cdot T}{243,5 + T} \right)}{17,67 - \ln(RH) - \frac{17,67 \cdot T}{243,5 + T}} \quad (6.11)$$

όπου:

$T_{dew}$ : σημείο δρόσου ( $^{\circ}C$ )

T: θερμοκρασία ημέρας ( $^{\circ}C$ )

RH: σχετική υγρασία

Με τη γνώση των θερμοκρασιών dew point και με τη χρήση του παρακάτω τύπου έγινε η συμπλήρωση των δεδομένων στο wgen αρχείο

$$\mu_{dew_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{dew,mon}}{N} \quad (6.12)$$

όπου:

$\mu_{dew_{mon}}$ : μέση ημερήσια τιμή θερμοκρασιών σημείου δρόσου ( $^{\circ}C$ )

N: το σύνολο των καταγραφών θερμοκρασιών για τον μήνα.

- WNDAY: η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου του μήνα.

Η μεταβλητή αυτή υπολογίστηκε με χρήση του τύπου

$$\mu_{wnd_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N \mu_{wnd,mon}}{N} \quad (6.13)$$

όπου:

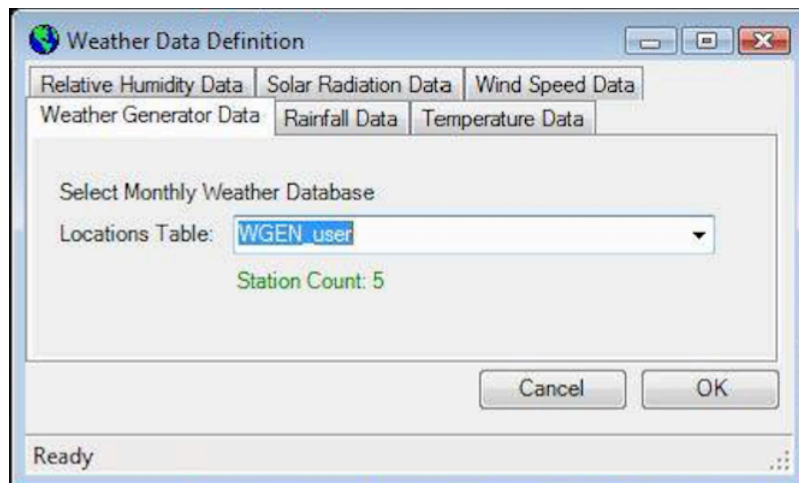
$\mu_{wnd_{mon}}$ : η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου του μήνα (m/s)

$\mu_{wnd,mon}$ : η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου της ημέρας (m/s)

N: το σύνολο των καταγραφών ταχύτητας ανέμου για τον μήνα.

Μόλις τα αρχεία αυτά περάστηκαν στην βάση δεδομένων του ArcSWAT έγινε η εισαγωγή τους με χρήση της φόρμας του προγράμματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.12.





Εικόνα 6.12: Φόρμα εισαγωγής μετεωρολογικών στοιχείων

Στην παραπάνω φόρμα, εισάγονται επίσης, και οι χρονοσειρές για τη βροχόπτωση, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τιμές προσομοίωσης έναντι μετρημένων τιμών. Τιμές προσομοίωσης δόθηκαν για την ηλιακή ακτινοβολία και την σχετική υγρασία για τις οποίες δεν υπήρχαν καθόλου μετρημένες τιμές.

Ο χρήστης για να εισάγει τα δεδομένα των χρονοσειρών καλείται να κατασκευάσει δύο κατηγορίες αρχείων σε απλό επεξεργαστή κειμένου για κάθε κατηγορία.

- Η πρώτη κατηγορία αφορά σε ένα αρχείο που περιέχει έναν κωδικό για κάθε σταθμό, τις γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο τους.
- Η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με ένα αρχείο για κάθε σταθμό που περιέχει την χρονοσειρά. Το όνομα των αρχείων της δεύτερης κατηγορίας πρέπει να είναι ίδιο με τον κωδικό που χρησιμοποιήθηκε στο αρχείο της πρώτης κατηγορίας.

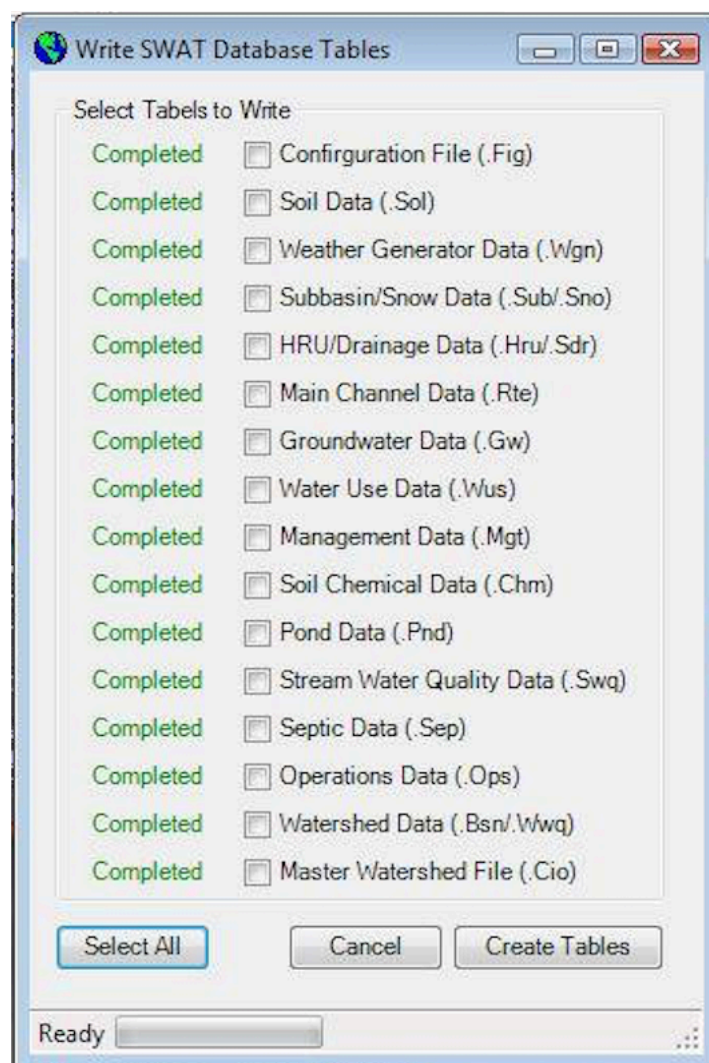
Στις Εικόνες 6.13 και 6.14 φαίνονται παραδείγματα από τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν.



Η λογική στη συγγραφή των αρχείων αυτών είναι να εισάγεται η ημερομηνία της πρώτης καταγραφής και από κάτω να ακολουθούν οι τιμές για την βροχόπτωση, την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου κάθε ημέρας αντίστοιχα, για κάθε αρχείο.

## 6.6 Συγγραφή πινάκων με δεδομένα εισαγωγής

Όταν ολοκληρωθεί η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων, το πρόγραμμα δημιουργεί πίνακες που περιέχουν απαραίτητα δεδομένα για να λειτουργήσει το μοντέλο. Ο χρήστης επιλέγει την εντολή «Write SWAT Input Tables» και εμφανίζεται η παρακάτω φόρμα (Εικόνα 6.15).

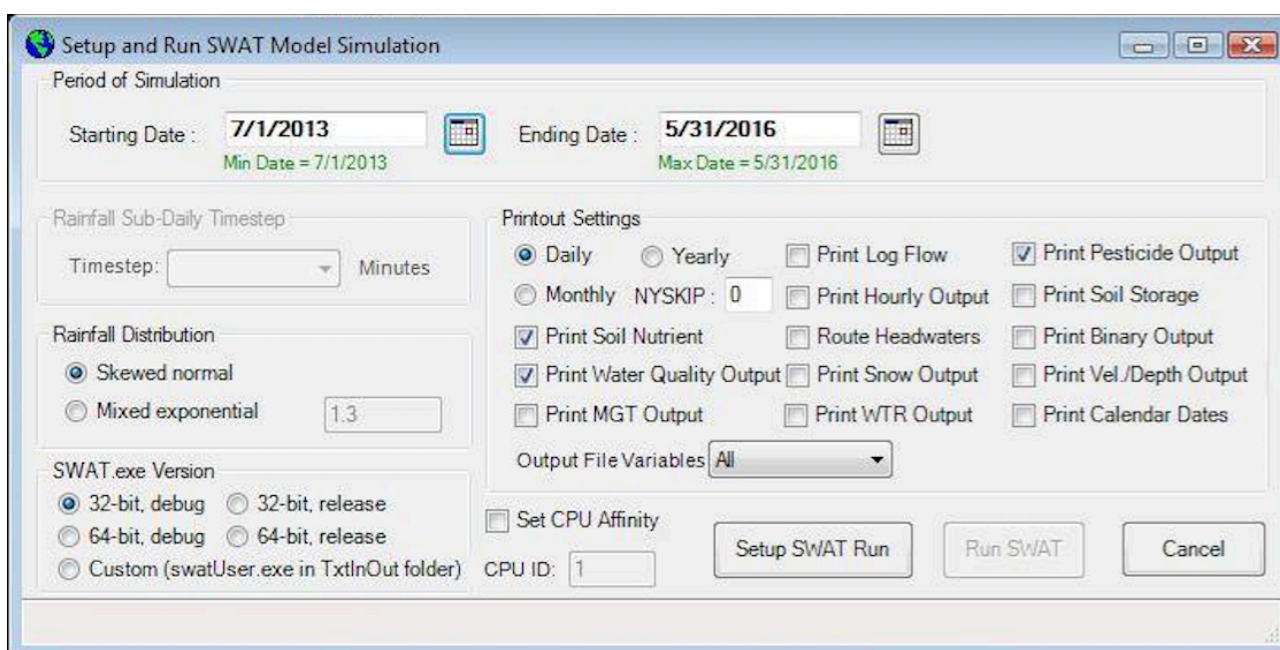


Εικόνα 6.15: Φόρμα για δημιουργία πινάκων εισαγωγής δεδομένων

Το πλήθος κάθε τύπου αρχείου είναι ίσο με τον αριθμό των υπολεκανών, άρα στην εξεταζόμενη περίπτωση υπάρχουν 17 υπολεκάνες. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να προβεί σε αλλαγές των τιμών των παραμέτρων ή των σταθερών, μπορεί εύκολα να τις αλλάξει μέσω του μενού “Edit SWAT Input”.

## 6.7 Προσομοίωση του μοντέλου

Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία των πινάκων από το πρόγραμμα, ακολουθεί η προσομοίωση με το τρέξιμο του μοντέλου. Η αρχική προσομοίωση γίνεται με σκοπό να διακριβωθεί ότι όλα τα δεδομένα έχουν εισαχθεί με επιτυχία στο πρόγραμμα και δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα. Εάν το πρόγραμμα λειτουργήσει κανονικά, τότε ακολουθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης.

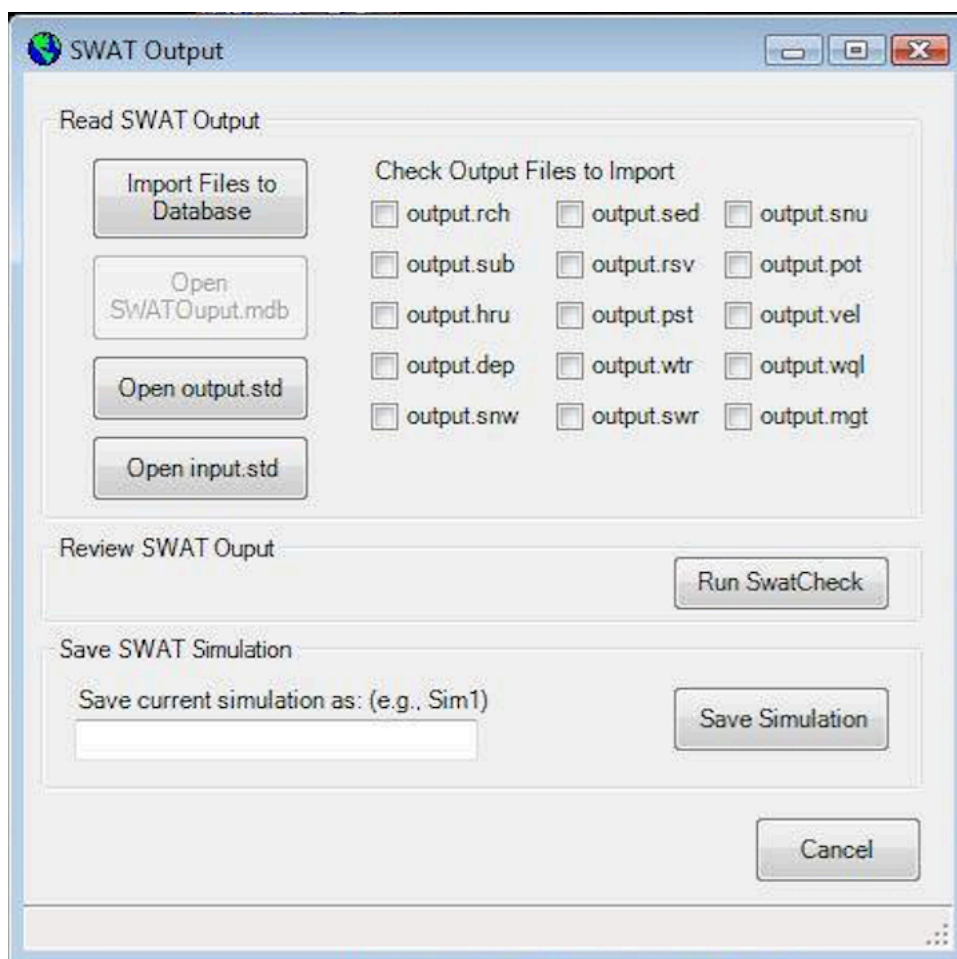


Εικόνα 6.16: Φόρμα για την ρύθμιση της προσομοίωσης του μοντέλου

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.16, που παρουσιάζει την φόρμα του προγράμματος για την εκκίνηση της προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις ημερομηνίες εκκίνησης και τέλους της προσομοίωσης όπως επίσης και να ορίσει πόσα χρόνια θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να γίνει «ζέσταμα» του προγράμματος. Το εν λόγω «ζέσταμα» αποτελεί μια περίοδο κατά την οποία



γίνονται αρχικοί υπολογισμοί για τον υδρολογικό κύκλο ή και για την αποκατάσταση των μόνιμων συνθηκών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε για να γίνει η προσομοίωση ήταν από τη 1/7/2013 έως τις 31/5/2016 που ήταν και οι κοινές ημερομηνίες βροχομετρικών δεδομένων από τους σταθμούς. Λόγω του μικρού αυτού εύρους τέθηκε ένας μόνο χρόνος για «ζέσταμα» έτσι ώστε το πρόγραμμα να τρέξει χωρίς να δώσει αποτελέσματα. Ο χρήστης, επιπλέον, μπορεί να επιλέξει το είδος των αρχείων που θα εξάγει το πρόγραμμα μετά την προσομοίωση. Όταν ο χρήστης είναι έτοιμος, επιλέγει την εντολή “Setup SWAT Run” και μετά το “Run SWAT”. Το πρόγραμμα θα προχωρήσει στην προσομοίωση και μόλις η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί, ο χρήστης θα είναι σε θέση να κάνει ανάγνωση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6.17: Φόρμα επιλογής ανάγνωσης αποτελεσμάτων προσομοίωσης

## 6.8 Αρχεία αποτελεσμάτων

Με την παραπάνω φόρμα, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει τι είδους αρχεία επιθυμεί να αναγνώσει. Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα να αποθηκευτούν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης σε ειδικό φάκελο. Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά των αρχείων που αναγνώσθηκαν και μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

- *Αρχείο output.std*

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για την προσομοίωση στην έξοδο της λεκάνης. Οι πληροφορίες αυτές περιγράφουν το υδατικό ισοζύγιο, τα θρεπτικά και τα φερτά. Η χρησιμότητα αυτού του αρχείου είναι ότι δίνει κάποιες μέσες τιμές για τα δεδομένα, αλλά όχι αναλυτικές πληροφορίες. Επίσης, παρέχει την δυνατότητα να γίνει ένας πρώτος έλεγχος των αποτελεσμάτων.

- *Αρχείο output.rch*

Πρόκειται για ένα αρχείο που εξετάζει το ισοζύγιο εισόδου και εξόδου σε κάθε υδατόρεμα. Δίνει πληροφορίες τόσο για τα ποιοτικά όσο και για τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του υδατορέματος. Κάποια από τα δεδομένα που εξετάζει είναι η παροχή εισόδου και εξόδου, τα φερτά που εισέρχονται και εξέρχονται, το άζωτο, ο φώσφορος. Είναι αρκετά χρήσιμο αρχείο αφού επιτρέπει στον χρήστη να γνωρίζει τα στοιχεία του υδατορέματος σε κάθε λεκάνη.

- *Αρχείο output.sub*

Το αρχείο αυτό δίνει στοιχεία και πληροφορίες για κάθε υπολεκάνη. Σε αντίθεση με το προηγούμενο αρχείο, ο χρήστης δεν βλέπει τι περιέχει το υδατόρεμα αλλά τι συνεισφέρει η κάθε υπολεκάνη στο υδατόρεμα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο. Περιέχει δεδομένα για την απορροή, τα φερτά, τα υπόγεια νερά καθώς και για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

- *Αρχείο output.hru*

Αποτελεί παρόμοιο αρχείο με το προηγούμενο με την διαφορά ότι η μελέτη πλέον γίνεται σε επίπεδο μονάδας υδρολογικής απόκρισης. Το αρχείο αυτό βοηθάει

τον χρήστη να συμπεράνει κατά πόσο επηρεάζουν οι διαφορετικές χρήσεις γης και τα εδάφη στα αποτελέσματα. Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει περίπου τα ίδια αρχεία με αυτά του αντίστοιχου αρχείου για τις υπολεκάνες.

- *Αρχείο output.sed*

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τα φερτά υλικά. Το αρχείο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθώς δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να γνωρίζει τις ποσότητες φερτών υλικών που μεταφέρονται σε κάθε απόσπασμα υδατορέματος. Κάποια από τα δεδομένα που υπάρχουν στο αρχείο αυτό είναι η ποσότητα των φερτών που εισέρχεται και εξέρχεται από το κομμάτι του υδατορέματος ακόμα και τα αντίστοιχα ποσοστά συγκέντρωσης για την άμμο, την άργιλο και την ιλύ.

- *Αρχείο output.wql*

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού. Είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο αρχείο, καθώς δίνει πληροφορία για κάθε κομμάτι του υδατορέματος. Μερικά από τα στοιχεία που περιγράφονται στο αρχείο αυτό είναι η θερμοκρασία του νερού, η περιεκτικότητα άλγης, και η περιεκτικότητα σε άζωτο, άλλες ενώσεις αζώτου και φώσφορο.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων και είναι εύκολη η διαχείριση τους με μεταφορά σε υπολογιστικό φύλλο excel.

## **6.9 Βαθμονόμηση του μοντέλου**

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μετά την πρώτη προσομοίωση του μοντέλου ακολουθεί η βαθμονόμηση του. Με τον όρο βαθμονόμηση εννοούμε την διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου με βάση μετρήσεις των υδρολογικών μεγεθών εισόδου και εξόδου (Τσακίρης Γ. 2006). Οι παράμετροι αυτές αφορούν τις φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην λεκάνη απορροής και επηρεάζουν μεγέθη όπως η απορροή, και η παραγωγή και μεταφορά θρεπτικών και ιζημάτων. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που υπάρχουν μετρημένες

τιμές για κάποιο μέγεθος από τα παραπάνω. Ένα βοηθητικό μέγεθος για την βαθμονόμηση είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα MSE το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιορίζεται η τιμή της κάθε παραμέτρου. Όταν το MSE είναι χαμηλό τότε επιλέγεται για την παράμετρο η συγκεκριμένη τιμή. Ακόμη, πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο συντελεστής προσδιορισμού Nash-Sutcliffe E. Όταν ο συντελεστής E τείνει στην μονάδα τότε το μοντέλο παρουσιάζει καλή προσαρμογή, ενώ όταν η τιμή του είναι αρνητική το μοντέλο δεν γίνεται αποδεκτό. Τα δύο αυτά μεγέθη δίνονται από τους τύπους :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t - QE_t)^2 \quad (6.14)$$

$$E = 1 - \frac{MSE}{Var[Q]} \quad (6.15)$$

όπου:

$Q_t$ : Μετρημένη απορροή ( $m^3/s$ )

$QE_t$ : Υπολογισμένη απορροή ( $m^3/s$ )

N: Συνολική διάρκεια της χρονοσειράς (d)

Var(Q): Διασπορά των μετρημένων απορροών

Λόγω έλλειψης μετρημένων τιμών, δεν ήταν δυνατή η βαθμονόμηση του μοντέλου. Ωστόσο, για τη παραγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, έγινε αναζήτηση μελετών για τους ποταμούς της γύρω περιοχής με στόχο τη γνώση της τάξης των μεγεθών. Παράλληλα, μελετήθηκαν, από άλλες δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν στη βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT στον ελλαδικό χώρο (Gikas et al., 2006),(Αγραφιώτη, 2011), οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Για τις παραμέτρους αυτές δόθηκαν διάφορες τιμές μέχρι να προκύψει λογικό αποτέλεσμα που να πλησιάζει ικανοποιητικά την ποσότητα παραγόμενων ρύπων των γειτονικών ποταμών. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε ο ποταμός Χάραδρος που βρίσκεται ανατολικά του Βολιναίου ποταμού και η έκταση που καλύπτει η λεκάνη απορροής του είναι  $37 \text{ km}^2$ . Οι ποσότητες ρύπων για τον ποταμό Χάραδρο παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2011).



Πίνακας 6.3: Ποσότητες ρύπων στον ποταμό Χάραδρο βάση διάφορων πηγών  
ρύπανσης

Πηγή	Συνολική ποσότητα Αζώτου (tons/year)	Συνολική ποσότητα Φωσφόρου (tons/year)
Κτηνοτροφία	10.38	0.38
Γεωργία	1.72	0.09
Αστική Περιοχή	7.4	0.19
Φυσικά Αίτια	1.94	0.03

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παρακάτω.

- 1) Παράγοντας Άλφα (ALPHA\_BF) (1/days): Η παράμετρος αυτή ρυθμίζει την καμπύλη στέρησης της παροχής του υπογείου νερού. Παίρνει τιμές από το 0 έως το 1. Όταν η τιμή της παραμέτρου αυτή πλησιάζει το 0 η καμπύλη αποκτά απότομη κλίση
- 2) Διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL\_AWC)(mm H<sup>2</sup>O/mm soil): Πρόκειται για μία σημαντική παράμετρο του υδατικού ισοζυγίου καθώς αφορά στον όγκο του νερού που διατίθεται στα φυτά, όταν το έδαφος βρίσκεται σε υδατοϊκανότητα.
- 3) Χρόνος υστέρησης υπογείου νερού (GW\_DELAY)(d): Η παράμετρος αυτή υποδηλώνει τον χρόνο που απαιτείται για να φύγει το νερό από τον πυθμένα του ριζοστρώματος μέχρι να φτάσει στον επιφανειακό υδροφορέα. Η τιμή της παραμέτρου αυτή είναι σε μέρες και η διακύμανσή της είναι από το 0 μέχρι τις 500 ημέρες.
- 4) Συντελεστής επανατροφοδότησης (GW\_REVAP): Είναι η μεταβλητή που ελέγχει τον όγκο του νερού που θα κινηθεί από τον ρηχό υδροφορέα προς τη ζώνη ριζοστρώματος λόγω της έλλειψης εδαφικής υγρασίας και της πρόσληψης νερού από δέντρα και θάμνους με βαθιές ρίζες. Η τιμή της μεταβάλλεται από το 0.02 έως το 0.2 με τις μικρότερες τιμές να περιορίζουν την κίνηση του νερού.
- 5) Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG\_DP): Αφορά το ποσοστό του νερού της ζώνης ριζοστρώματος το οποίο τροφοδοτεί τον βαθύ υδροφορέα. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1.

- 6) Όριο νερού επανατροφοδότησης (REVAPMN)(mm H<sup>2</sup>O): Η παράμετρος αυτή ορίζει το ελάχιστο ύψος νερού στον επιφανειακό υδροφορέα ώστε να πραγματοποιηθεί κίνηση του νερού από αυτόν προς τη ζώνη ριζοστρώματος.
- 7) Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)(mm H<sup>2</sup>O): Πρόκειται για το όριο του νερού στο ρηχό υδροφορέα που απαιτείται να συμβεί επιστρέφουσα ροή. Η ροή του υπόγειου νερού στο υδατόρευμα επιτρέπεται μόνο αν το βάθος του νερού στον επιφανειακό υδροφορέα είναι ίσο ή μεγαλύτερο από την παράμετρο αυτή.
- 8) Συντελεστής ESCO: Ο συντελεστής αυτός αποτελεί μια παράμετρο που ρυθμίζει την κατανομή της εξάτμισης από το έδαφος με το βάθος. Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1 και όσο μικρότερη είναι η τιμή, τόσο πιο εύκολα, θεωρεί το μοντέλο, ότι μπορεί να αντληθεί νερό από τα χαμηλότερα στρώματα του εδάφους.
- 9) Συντελεστής EPCO: Ο συντελεστής αυτός περιγράφει την ικανότητα των φυτών να αντλούν νερό από μεγάλα βάθη. Μπορεί να πάρει τιμές από 0.01 μέχρι 1. Οι τιμές που πλησιάζουν το 1 επιτρέπουν την άντληση νερού από μεγαλύτερο βάθος.
- 10) Αριθμός καμπύλης CN<sub>II</sub>: Αφορά στον αριθμό καμπύλης CN που αναφέρεται στην υδρολογική κατάσταση II, δηλαδή την κανονική κατάσταση υγρασίας (βλ. κεφάλαιο 4.2). Ο αριθμός, αυτός, ποικίλλει ανάλογα με τη χρήση γης που επικρατεί στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, οι αριθμοί αυτοί προσαρμόζονται στις συνθήκες που επικρατούν. Η παράμετρος αυτή επηρεάζει κατά πολύ την επιφανειακή απορροή και όσο πιο μεγάλη τιμή της δοθεί τόσο πιο αυξημένη θα είναι η απορροή.
- 11) Συντελεστής διήθησης νιτρικών (NPERCO): Ο συντελεστής αυτός ελέγχει την ποσότητα των νιτρικών που απομακρύνεται από την επιφανειακή απορροή σε σχέση με την ποσότητα που απορροφάται από το έδαφος. Λαμβάνει τιμές από το 0.01 έως το 1. Όσο ο συντελεστής τείνει στο 0, η συγκέντρωση των νιτρικών της απορροής πλησιάζει το 0. Η τιμή που θέτει το πρόγραμμα είναι 0.20.

- 12) Παράμετρος πρόσληψης αζώτου (N\_UPDIS): Ο συντελεστής αυτός ελέγχει την ποσότητα αζώτου που προσλαμβάνεται από τα εδαφικά στρώματα. Το πρόγραμμα για τη μεταβλητή αυτή θέτει την τιμή 20.
- 13) Συντελεστής απονιτροποίησης (CDN): Ο συντελεστής αυτός επιτρέπει στον χρήστη να ελέγχει τον ρυθμό απονιτροποίησης. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 3 ενώ αν ο χρήστης δεν εισάγει κάποια τιμή το πρόγραμμα θα θέσει την τιμή 1.4.
- 14) Παράμετρος πρόσληψης φωσφόρου (P\_UPDIS): Ο συντελεστής αυτός ελέγχει την ποσότητα φωσφόρου που προσλαμβάνεται από τα εδαφικά στρώματα. Η τιμή που εισάγει το πρόγραμμα είναι 20.
- 15) Συντελεστής διήθησης φωσφόρου (PPERCO)(m<sup>3</sup>/Mg): Ο συντελεστής αυτός ελέγχει την ποσότητα φωσφόρου που απομακρύνεται από την επιφανειακή απορροή σε σχέση με την ποσότητα που απορροφάται από το έδαφος. Λαμβάνει τιμές από το 10 έως το 17.5. Το πρόγραμμα θέτει την τιμή 10 σε περίπτωση που ο χρήστης δεν επέμβει στην τιμή του.
- 16) Συντελεστής προσαρμογής ρυθμού για την δρομολόγηση ιζημάτων στο κυρίως κανάλι (PRF) : Η δρομολόγηση του ιζήματος είναι συνάρτηση της αιχμής της απορροής και της μέσης ημερήσια απορροής, έτσι η μεταβλητή αυτή επιτρέπει την προσαρμογή της επιρροής της απορροής αιχμής στην δρομολόγηση των φερτών. Η τιμή που τίθεται από το πρόγραμμα είναι 1.
- 17) Συντελεστής προσαρμογής ρυθμού για την δρομολόγηση ιζημάτων στην υπολεκάνη (ADJ\_PKR): Η δρομολόγηση του ιζήματος είναι συνάρτηση της αιχμής της απορροής και της μέσης ημερήσια απορροής, έτσι η μεταβλητή αυτή επιτρέπει την προσαρμογή της επιρροής της απορροής αιχμής στην δρομολόγηση των φερτών. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στην εξίσωση MUSLE και επιδρά στην ποσότητα φερτών που παράγονται στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Αν δεν δοθεί κάποια τιμή το πρόγραμμα θεωρεί αυτόματα την τιμή 1.
- 18) Παράγοντας υποστήριξης πρακτικών εξίσωσης USLE (USLE\_P): Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως το ποσοστό απώλειας εδάφους που επηρεάζεται από τις πρακτικές και τις κλίσεις του. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής αυτό ποικίλουν ανάλογα την κλίση και το είδος του εδάφους.

Πίνακας 6.4: Τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων

Παράμετρος	Εύρος	Τιμή που χρησιμοποιήθηκε
<b>Για την απορροή</b>		
Αριθμός καμπύλης CN	15-95	<u>Χρήσεις Γης</u> Αγροτική Περιοχή 38 Γυμνή έκταση 39 Μικτό Δάσος 33 Αμπελώνες 32 Βοσκότοποι 40 Θαμνώδης έκταση 43
SOL_AWC		<u>Εδάφη</u> Abram 0.175 Benson 0.16 Farmington 0.16 Hubbardton 0.1
ALPHA_BF	0-1	0.4
GW_DELAY	0-500	200
GW_REVAP	0.02-0.2	0.02
RCHRG_DP	0-1	0.7
REVAPMN		1
GWQMN		2
ESCO	0-1	0.95
EPCO	0.01-1	1
<b>Για τα θρεπτικά</b>		
N_PERCO	0.01-1	0.2
N_UPDIS		5
CDN	0-3	2.8
P_PERCO	10-17.5	10
P_UPDIS		5
<b>Για το ίζημα</b>		
PRF	Default : 1	0.03
ADJ_PKR	Default : 1	0.5
USLE_P	0.1-1	<u>Κλίση εδάφους</u> 0-10 0.15 10--20 0.15 20-40 0.16 >40 0.20

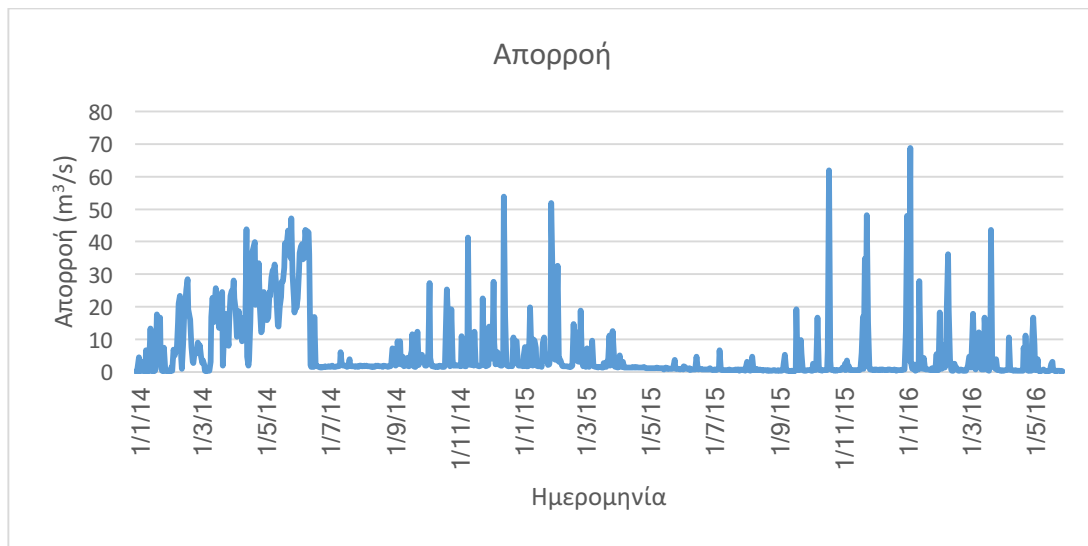
Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Η εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων προέκυψε μετά από πολλές δοκιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον πίνακα. Πραγματοποιήθηκαν πολλές προσομοιώσεις και γινόταν έλεγχος των αποτελεσμάτων σε ημερήσιο επίπεδο ελέγχοντας πολλαπλά μεγέθη.

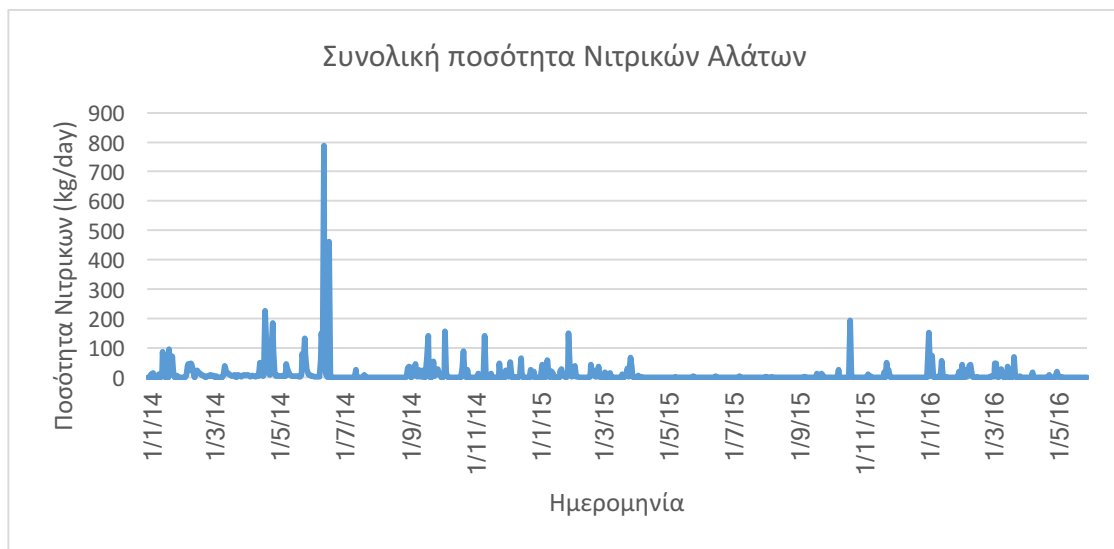
### **6.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την παρούσα κατάσταση**

Μετά την χρήση των παραμέτρων προέκυψαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που περιγράφουν την υπάρχουσα κατάσταση στην λεκάνη απορροής του Βολιναίου. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στην χρονική περίοδο που πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση, με εξαίρεση το πρώτο έτος που χρησιμοποιήθηκε για «ζέσταμα», δηλαδή 1/7/2014 με 31/5/2016. Τα μεγέθη που εξετάζονται προκύπτουν από το αρχείο output.rch και είναι η απορροή, η ποσότητα νιτρικών αλάτων, η συνολική ποσότητα αζώτου, η συνολική ποσότητα φωσφόρου, όπως επίσης και η ποσότητα φερτών υλικών. Τα μεγέθη αυτά ελέγχονται στο σημείο εκβολής του ποταμού στη θάλασσα.

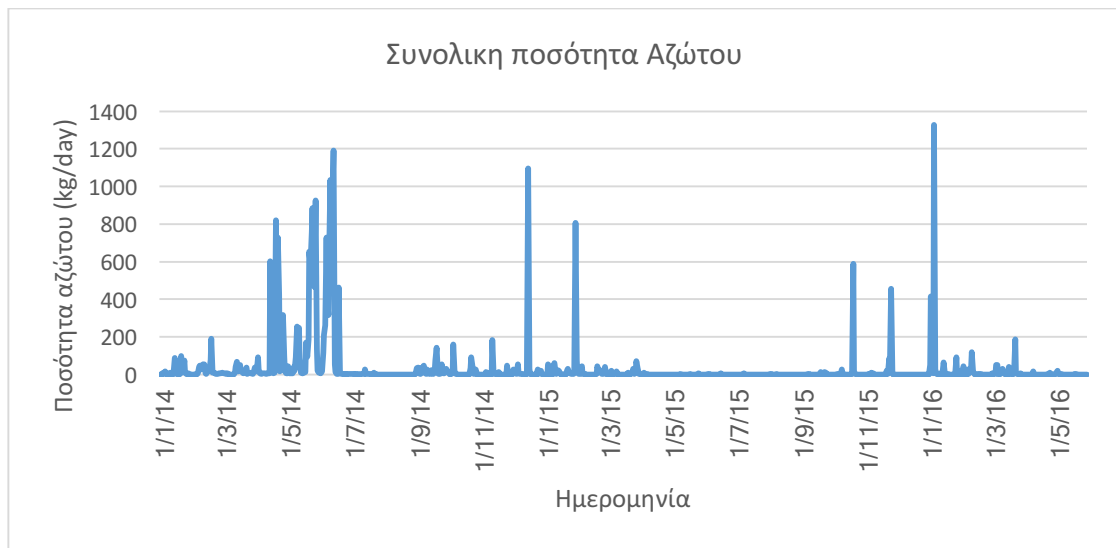
Στις εικόνες 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 παρουσιάζονται τα παραπάνω μεγέθη όπως προέκυψαν από την προσομοίωση σε ημερήσια βάση για τα διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα.



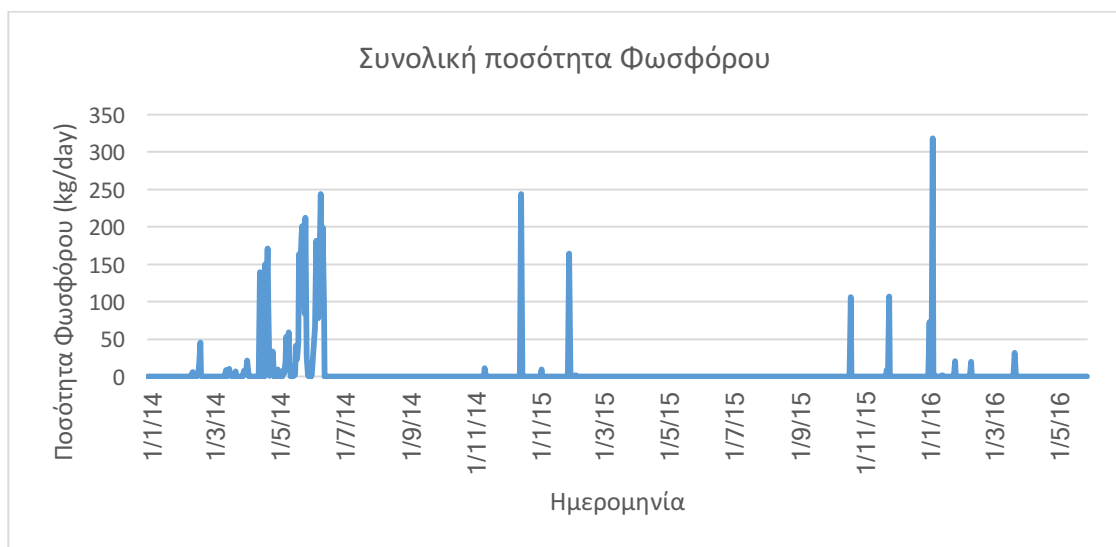
Εικόνα 6.18: Προσομοιωμένη απορροή για την περίοδο 7/1/13-31/5/16 στο σημείο που εκβάλει ο ποταμός στη θάλασσα



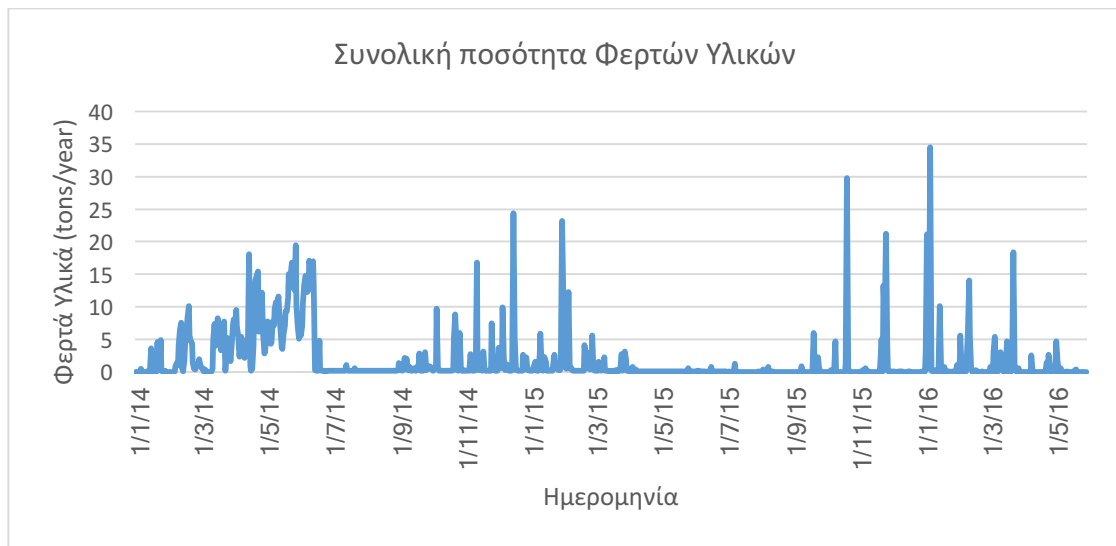
Εικόνα 6.19: Ημερήσια ποσότητα νιτρικών αλάτων για την περίοδο 7/1/13-31/5/16 στο σημείο που εκβάλει ο ποταμός στη θάλασσα



Εικόνα 6.20: Ημερήσια ποσότητα συνολικού αζώτου για την περίοδο 7/1/13-31/5/16 στο σημείο που εκβάλλει ο ποταμός στη θάλασσα



Εικόνα 6.21: Ημερήσια ποσότητα φωσφόρου για την περίοδο 7/1/13-31/5/16 στο σημείο που εκβάλλει ο ποταμός στη θάλασσα



Εικόνα 6.22: Ημερήσια ποσότητα φερτών υλικών για την περίοδο 7/1/13-31/5/16 στο σημείο που εκβάλλει ο ποταμός στη θάλασσα

Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι οι τιμές που προκύπτουν για τα διάφορα μεγέθη, σημειώνουν μέγιστες τιμές σε κοινές ημερομηνίες. Στις ημερομηνίες αυτές σημειώνονται έντονες βροχοπτώσεις και συνεπώς έντονες τιμές της προσομοιωμένης απορροής.

Στον Πίνακα 6.5 φαίνονται συγκεντρωμένες οι τιμές που παίρνουν τα εξεταζόμενα μεγέθη σε κάθε έτος στην υπάρχουσα κατάσταση. Το έτος 2016 έχει προσομοιωθεί μέχρι και το τέλος του Μαΐου και έτσι οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε μισό έτος.

Στον Πίνακα 6.6 συνοψίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεγεθών για ολόκληρη την λεκάνη απορροής καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.6, στα περισσότερα μεγέθη, η μέγιστη τιμή έχει εμφανιστεί την ημέρα που σημειώθηκε η μέγιστη απορροή. Από την παρατήρηση αυτή βγαίνει εύκολα το συμπέρασμα ότι οι ποσότητες των ρύπων εξαρτώνται άμεσα από την απορροή του ποταμού.



6.5: Αποτελέσματα υπάρχουσας κατάστασης

Έτος	Αποτελέσματα Υπάρχουσας Κατάστασης				
	Μέγεθος				
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Νιτρικών (kg/year)	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	845273	5877	21510	3922	1043
2015	255928	1448	3069	409,1	250,4
2016	356767	985	2827	473,2	179,7

6.6: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεγεθών και οι ημερομηνίες εμφάνισής τους

Μέγεθος	Μονάδα	Τιμή			
		Ελάχιστη	Ημ/νία Εμφάνισης	Μέγιστη	Ημ/νία Εμφάνισης
Απορροή Νιτρικά	m <sup>3</sup> /s kg/day	0.074 0.007	2/2/14 19/9/15	68.7 787.3	7/1/16 15/6/14
Συνολικό Άζωτο	kg/day	0.023	31/5/16	1328.0	7/1/16
Συνολικός Φώσφορος	kg/day	0	-	318.5	7/1/16
Φερτά Υλικά	tons/day	0.001	2/2/14	34.4	7/1/16

## **6.11 Πρακτικές διαχείρισης**

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται κάποιες πιθανές πρακτικές διαχείρισης στην λεκάνη απορροής, με στόχο την μείωση των εξαγόμενων ρύπων με τη δεδομένη βροχόπτωση. Τα εναλλακτικά σενάρια εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα με μεταβολή των χρήσεων γης και των καλλιεργειών. Στο σημείο αυτό, τα μεγέθη συγκρίνονται σε ετήσιο επίπεδο για τις χρονιές 2014, 2015 και 2016. Σημειώνεται ότι, οι τιμές των μεγεθών για το έτος 2016 δεν είναι ετήσιες καθώς η προσομοίωση του μοντέλου έχει χρονικό όριο τις 31/5/2016.

### **6.11.1 Εναλλακτικά σενάρια με μεταβολή των χρήσεων γης**

Ένα μέρος των προτάσεων διαχείρισης που έγιναν για την πιθανή μείωση των ρύπων, αφορούσε στο πώς οι χρήσεις γης επηρεάζουν την ποιότητα του νερού. Στη παρούσα διπλωματική, εξετάστηκε κυρίως σε τι βαθμό οι αγροτικές χρήσεις γης επηρεάζουν την παραγωγή ρύπων και συνεπώς εκτελέστηκαν σενάρια με κατάργηση κάποιων αγροτικών εκτάσεων. Μελετάται, δηλαδή, ποιες θα ήταν οι ποσότητες των ρύπων με χρήσεις γης διαφορετικές από αυτές της λεκάνης απορροής, αλλά με τα πραγματικά βροχομετρικά δεδομένα.

#### **Σενάριο 1: Κατάργηση χρήσης γης καλλιέργειας αμπελιών**

Μια από τις χρήσεις γης που συναντάται στην εξεταζόμενη περιοχή είναι οι καλλιέργειες αμπελιού. Οι καλλιέργειες αυτές, σύμφωνα με το υπόβαθρο Corine Land Cover, καταλαμβάνουν συνολική έκταση περίπου 1.20 km<sup>2</sup>, δηλαδή, το 4.2 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Στο συγκεκριμένο σενάριο, πραγματοποιήθηκε δοκιμή να καταργηθούν οι καλλιέργειες αυτές. Η εν λόγω δοκιμή πραγματοποιήθηκε με αλλαγή της χρήσης γης Grapes σε αυτή του Range που υποδηλώνει θαμνώδη περιοχή με φυσική βλάστηση, όπως θα ήταν δηλαδή η περιοχή αν σταματούσε η καλλιέργεια. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα Σεναρίου 1: Κατάργηση καλλιέργειας αμπελιών

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	833965	21340	3904	1044
2015	246317	3037	405,2	250,5
2016	348852	2773	465,6	179,9

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι δυνατός ο εντοπισμός κάποιων διαφορών ως προς την εκπομπή των ρύπων. Η κατάργηση της χρήσης γης της καλλιέργειας αμπελιού, οδήγησε στη μείωση των εκπομπών του φωσφόρου και του αζώτου αλλά δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην παραγωγή και μεταφορά φερτών υλικών. Οι ποσοστιαίες μεταβολές φαίνονται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8: Ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών για το Σενάριο 1

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-0,79	-0,46	0,10	-1,34
2015	-1,04	-0,95	0,04	-3,76
2016	-1,91	-1,61	0,11	-2,22

## Σενάριο 2: Κατάργηση καλλιεργειών με μεγαλύτερο υψόμετρο

Στο σενάριο αυτό, έγινε δοκιμή με την κατάργηση ενός τμήματος καλλιεργειών. Οι καλλιέργειες που καταργήθηκαν είναι αυτές που βρίσκονται στην ορεινή περιοχή της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα για τις υπολεκάνες από 8 έως 17. Η έκταση που καλύπτουν αυτές οι εκτάσεις είναι περίπου 4.8 km<sup>2</sup> δηλαδή περίπου το 17% της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής. Στη δοκιμή αυτή, επιλέχθηκε η αλλαγή της χρήσης γης από Agricultural Land σε Range δηλαδή θαμνώδη περιοχή όπως και στο προηγούμενο σενάριο. Ακολουθεί ο Πίνακας 6.9 με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα Σεναρίου 2: Κατάργηση ορεινών καλλιεργειών

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	835096	17280	2983	1007
2015	246317	2614	290,1	250,9
2016	348569	2215	309,6	180,3

Στο σενάριο αυτό είναι φανερό και από τα διαγράμματα, η μεταβολή στην εκπομπή ρύπων. Οι ποσότητες του αζώτου και του φωσφόρου είναι σημαντικά μειωμένες. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι καλλιεργείες σε ορεινές περιοχές μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη παραγωγή και μεταφορά θρεπτικών. Λόγω των πιο μεγάλων κλίσεων το νερό κυλάει και δεν μένει τόσο στάσιμο όπως σε πεδινές περιοχές, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η διήθηση του. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών.

Πίνακας 6.10: Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 2

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-19,67	-23,94	-3,45	-1,20
2015	-14,83	-29,09	0,20	-3,76
2016	-21,65	-34,57	0,33	-2,30

### Σενάριο 3: Κατάργηση χρήσης γης καλλιεργειών

Μετά τα δύο προηγούμενα σενάρια, εφαρμόστηκε ένα τελευταίο σχετικά με τις μεταβολές στις χρήσεις γης. Το σενάριο αυτό περιγράφει την ολοκληρωτική κατάργηση της χρήσης γης των καλλιεργειών στην λεκάνη απορροής. Στο σενάριο αυτό, οι καλλιεργούμενες εκτάσεις που καταλαμβάνουν έκταση 8.3 km<sup>2</sup>, το 29.2% της λεκάνης απορροής, αντικαταστάθηκαν με την χρήση γης FRST που περιλαμβάνει εκτάσεις μικτού δάσους, δηλαδή άγριας βλάστησης. Στον παρακάτω Πίνακα 6.11 φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα Σεναρίου 3: Κατάργηση καλλιεργειών

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	833965	16220	2746	969,2
2015	246543	2638	294,6	250,7
2016	347721	2293	335,6	179,3

Στο σενάριο αυτό, τα μεγέθη είναι παρόμοια με αυτά του προηγούμενου σεναρίου. Παρατηρούνται μειωμένα τα μεγέθη του αζώτου και του φωσφόρου, ενώ στα ίδια επίπεδα παραμένει η παραγωγή φερτών υλικών. Συγκρίνοντας τα σενάρια 2 και 3, είναι εμφανές ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων τους δεν έχουν μεγάλη διαφορά, αλλά απέχουν από αυτές της παρούσας κατάστασης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι ορεινές καλλιέργειες είναι αυτές που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή και μεταφορά θρεπτικών. Ακολουθεί ο Πίνακας 6.12 με τις ποσοστιαίες μεταβολές του σεναρίου 3 με την υπάρχουσα κατάσταση.

Πίνακας 6.12: Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 3

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-24,59	-29,98	-7,08	-1,34
2015	-14,04	-27,99	0,12	-3,67
2016	-18,89	-29,08	-0,22	-2,54

### 6.11.2 Εναλλακτικά σενάρια με μεταβολή καλλιεργειών

Μετά την εναλλαγή των χρήσεων γης, πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών που εστιάζουν στην μεταβολή του είδους των καλλιεργειών. Στην περιοχή μελέτης παράγονται και καλλιεργούνται κυρίως λεμόνια, ελιές και αμπέλια. Τα παρακάτω σενάρια ασχολούνται είτε με συνδυασμούς καλλιέργειας των αγαθών αυτών είτε με την αποκλειστική καλλιέργεια τους. Τα αποτελέσματα προβλέπεται να είναι διαφορετικά από αυτά της υπάρχουσας κατάστασης, καθώς με την μεταβολή των καλλιεργειών μεταβάλλονται και οι πρακτικές καλλιέργειας, οι ποσότητες των

λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιούνται όπως επίσης και οι ημερομηνίες σποράς και συγκομιδής τους.

#### Σενάριο 4: Συνδυασμός καλλιεργειών

Το παρόν σενάριο εστιάζει στην μεταβολή των καλλιεργούμενων αγαθών. Συνδυάζονται οι καλλιέργειες της περιοχής και ορίζεται μια καλλιέργεια για κάθε υπολεκάνη. Συγκεκριμένα, έχουν οριστεί για τις υπολεκάνες 1 έως 5 να υπάρχουν εκτάσεις με λεμονιές και για τις υπολεκάνες από 6 έως 17 να καλύπτονται από ελαιώνες. Η επιλογή αυτή έγινε με στόχο την μειωμένη εκπομπή ρύπων, λαμβάνοντας υπόψη και το υψόμετρο των υπολεκανών. Πιο αναλυτικά, οι ελαιώνες και οι λεμονιές αποτελούν καλλιέργειες που δεν απαιτούν υψηλή ποσότητα λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων και έτσι η παραγωγή ρύπων είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό οι ορεινές περιοχές, που όπως αποδείχθηκε παραπάνω είναι υπεύθυνες για υψηλή παραγωγή ρύπων, καλύπτονται με ελαιώνες. Η πεδινή έκταση της εξεταζόμενης περιοχής καλύφθηκε από λεμονιές. Στον παρακάτω Πίνακα 6.13 φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα Σεναρίου 4: Συνδυασμός καλλιεργειών

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	833400	9610	1412	785,7
2015	246627	2285	174,6	250,5
2016	345459	2188	261,7	177,7

Στο σενάριο αυτό πράγματι τα μεγέθη μειώθηκαν κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Οι ποσότητες αζώτου και φωσφόρου παρουσιάζουν αισθητή μείωση ενώ το ίδιο συμβαίνει για τα φερτά μόνο τον χρόνο 2014. Η διαφορά μεταξύ των ετών οφείλεται κυρίως στη μεγάλη διαφορά που υπάρχει στην απορροή του έτους 2014 έναντι των υπολοίπων. Στον παρακάτω Πίνακα 5.12 φαίνονται οι ποσοστιαίες μεταβολές.

Πίνακας 6.14: Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 4

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-55,32	-64,00	-24,67	-1,40
2015	-25,55	-57,32	0,04	-3,63
2016	-22,60	-44,70	-1,11	-3,17

### Σενάρια 5,6,7: Αποκλειστικές καλλιέργειες αγαθών

Τα σενάρια για τα οποία θα γίνει περιγραφή στο σημείο αυτό, βασίζονται στην καλλιέργεια και παραγωγή μόνο ενός αγαθού στην καλλιεργούμενη έκταση της λεκάνης απορροής. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις μια για κάθε καλλιέργεια. Η πρώτη από αυτές, το σενάριο 5, εκτελέστηκε με μοναδική καλλιέργεια τις λεμονιές. Στο σενάριο 5, δεν έγινε αλλαγή της χρήσης στις ορεινές υπολεκάνες καθώς δεν είναι δυνατή η καλλιέργεια λεμονιάς σε μεγάλο υψόμετρο. Η δεύτερη με ελαιώνες και αντίστοιχα η τρίτη με αμπέλια. Οι δοκιμές αυτές γίνονται με στόχο να διαλευκανθεί ποια καλλιέργεια είναι αυτή που προκαλεί την μεγαλύτερη ρύπανση για την λεκάνη απορροής με την συγκεκριμένη βροχόπτωση. Παρακάτω δίνονται οι πίνακες με τα αποτελέσματα των παραπάνω σεναρίων όπως και με τις ποσοστιαίες μεταβολές από την υπάρχουσα κατάσταση.

- Σενάριο 5: Αποκλειστική καλλιέργεια λεμονιάς

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα Σεναρίου 5: Αποκλειστική καλλιέργεια λεμονιάς

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	834813	8737	1341	764,5
2015	247080	1963	149,7	251,2
2016	347438	1594	153,3	179

Πίνακας 6.16: Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 5

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-59,38	-65,81	-26,70	-1,24
2015	-36,04	-63,41	0,32	-3,46
2016	-43,62	-67,60	-0,39	-2,61

- Σενάριο 6: Αποκλειστική καλλιέργεια ελιάς

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα Σεναρίου 6: Αποκλειστική καλλιέργεια ελιάς

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	833682	9380	1376	774,6
2015	246656	2194	159,7	250,6
2016	346025	1826	187,3	178

Πίνακας 6.18: Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 6

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-56,39	-64,92	-25,73	-1,37
2015	-28,51	-60,96	0,08	-3,62
2016	-35,41	-60,42	-0,95	-3,01

- Σενάριο 7: Αποκλειστική καλλιέργεια αμπελιού

Πίνακας 6.19 : Αποτελέσματα Σεναρίου 7: Αποκλειστική καλλιέργεια αμπελιού

Έτος	Μέγεθος			
	Απορροή (m <sup>3</sup> )	Ποσότητα Αζώτου (kg/year)	Ποσότητα Φωσφόρου (kg/year)	Ποσότητα Φερτών (tons/year)
2014	835661	20150	2275	901,6
2015	247052	2791	234,8	250,6
2016	347438	2309	273,2	179,1



Πίνακας 6.20 : Ποσοστιαίες μεταβολές μεγεθών για το Σενάριο 7

Έτος	Μέγεθος			
	Ποσότητα Αζώτου	Ποσότητα Φωσφόρου	Ποσότητα Φερτών	Απορροή
2014	-6,32	-41,99	-13,56	-1,14
2015	-9,06	-42,61	0,08	-3,47
2016	-18,32	-42,27	-0,33	-2,61

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα και τους πίνακες μπορεί να προκύψουν εύκολα συμπεράσματα ως προς την παραγωγή ρύπων. Το σενάριο 5 για το οποίο έχει γίνει η επιλογή να καλλιεργούνται μόνο λεμονιές δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και για τα τρία μεγέθη. Τα αμέσως επόμενα αποτελέσματα προκύπτουν για το σενάριο 6 με τους ελαιώνες και τέλος την μεγαλύτερη παραγωγή ρύπων προκαλούν οι καλλιέργειες αμπελιών.

Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, καθώς η καλλιέργεια αμπελιού αποτελεί σύνθετη μορφή καλλιέργειας. Σε κάποια στάδια καλλιέργειας των αμπελιών απαιτείται η χρήση χημικών όπως λιπάσματα και εντομοαπωθητικά πλούσια σε άζωτο και φώσφορο.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων για κάθε εξεταζόμενο μέγεθος.

## 6.12 Επίδραση ύψους βροχής στα αποτελέσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα μπορεί κανείς να διαπιστώσει την μεγάλη διαφορά των ποσοτήτων των ρύπων στο έτος 2014 με τα δύο επόμενα έτη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό έγκειται στο γεγονός ότι το 2014 αποτέλεσε ένα πολύ πιο υγρό έτος σε σχέση με τα επόμενα δύο με αποτέλεσμα να παρατηρείται αρκετά πιο μεγάλη απορροή. Λόγω της πιο μεγάλης ετήσιας απορροής σημειώνονται και οι αυξημένες ποσότητες θρεπτικών και φερτών υλικών.

Στους Πίνακες 6.21, 6.22 φαίνονται τα ετήσια μεγέθη βροχόπτωσης για τέσσερις σταθμούς της περιοχής καθώς και οι προσομοιωμένες ετήσιες τιμές

της απορροής για την υπάρχουσα κατάσταση . Είναι φανερή η εν λόγω διαφορά των τιμών της βροχόπτωσης αλλά και της απορροής μεταξύ των ετών 2014 και 2015 για τα οποία έχουν συμπεριληφθεί και οι δώδεκα μήνες για την προσομοίωση.

*Πίνακας 6.21: Ετήσια ύψη βροχής για τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν*

Έτος	Μετεωρολογικός Σταθμός (mm)			
	Ρίο	Έξω Αγιά	Παναχαϊκό	Καστρίτσι
2014	813,4	847,6	1651,6	547,1
2015	737,6	773,8	1158,2	712,9

*Πίνακας 6.22 : Ετήσιες προσομοιωμένες απορροές*

Έτος	Απορροή (m <sup>3</sup> )
2014	845273
2015	255928

## 7. Συμπεράσματα

### 7.1 Αξιολόγηση του μοντέλου προσομοίωσης

Είναι κοινά αποδεκτό ότι, κατά την εκπόνηση υδρολογικών μελετών, η συλλογή των δεδομένων και η διαμόρφωση τους σε κατάλληλη μορφή για χρήση είναι μια αρκετά επίπονη διαδικασία. Ακόμη, ανεξάρτητα από την εγκυρότητα των δεδομένων και την αποτελεσματικότητα του μοντέλου, η διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών του υδρολογικού κύκλου μπορεί να περιέχει μεγάλη αβεβαιότητα. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας και ο τρόπος με τον οποίο επιλύθηκαν προκειμένου να λειτουργήσει επιτυχώς το μοντέλο και να παραχθούν ορθά αποτελέσματα.

Ένα από τα πιο σημαντικά δεδομένα για τη λειτουργία του μοντέλου είναι τα δεδομένα βροχόπτωσης. Η ανεπαρκής παρακολούθηση της βροχόπτωσης των σταθμών στον άξονα του χρόνου, αποτέλεσε έναν ανασταλτικό παράγοντα στη διαδικασία εφαρμογής του μοντέλου. Ένας τέτοιος σταθμός είναι και αυτός στην Παναγοπούλα, για τον οποίο υπήρχαν δεδομένα για το διάστημα 9/2015 έως σήμερα. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, τέθηκαν οι τιμές (-99) για το προηγούμενο διάστημα της προσομοίωσης και έτσι το πρόγραμμα δημιούργησε βάσει των στατιστικών του καιρού, προσομοιωμένα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή έγινε για όλες τις περιπτώσεις που υπήρχαν ελλιπή δεδομένα για την βροχόπτωση.

Ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα, προέκυψε να είναι η διαδικασία της συλλογής και διαμόρφωσης των εδαφολογικών δεδομένων όπως και των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν εξαιτίας αυτών σε μετέπειτα διαδικασίες του προγράμματος.

Το μοντέλο SWAT απαιτεί, πέρα από την εισαγωγή χαρτογραφικού υποβάθρου σε μορφή raster, υδρολιθικά δεδομένα. Πρώτη προσπάθεια για τα εδαφικά δεδομένα ήταν η γεωαναφορά και ψηφιοποίηση ενός γεωλογικού χάρτη της περιοχής. Η έλλειψη, όμως, των δεδομένων αυτών, καθώς δεν υπήρχε η σχετική

πληροφορία από τον χάρτη, ακύρωσε το υπόβαθρο αυτό. Σε επόμενη φάση έγινε χρήση δεδομένων από το European Soil Database. Μετά από σχετική αίτηση παραχωρήθηκε μια βάση δεδομένων, που περιλάμβανε γεωλογικό χαρτογραφικό υπόβαθρο για όλη την Ευρώπη και για την περιοχή μελέτης. Επίσης, στην βάση αυτή ήταν διαθέσιμες και υδρολιθικές πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές είχαν διαφορετική ονομασία από αυτή που είχε το μοντέλο και έτσι ήταν απαραίτητη η «μετάφρασή» τους στον κώδικα που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα. Λόγω αδυναμίας του μοντέλου να αναγνωρίσει και να επεξεργαστεί δύο από τα τέσσερα εισαγόμενα εδάφη, το αποτέλεσμα ήταν η ανεπαρκής δημιουργία των υδρολογικών μονάδων απόκρισης και αρνητικές επιπτώσεις στη διαδικασία συγγραφής των πινάκων εισαγωγής. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε, όταν έγινε η ταύτιση των διαθέσιμων εδαφών με κάποια που είχε ενσωματωμένα το μοντέλο στη βάση δεδομένων του με κοινές ιδιότητες. Στα νέα αυτά εδάφη έγινε επεξεργασία και δόθηκαν οι τιμές που είχαν βρεθεί από τα δεδομένα.

Επόμενο εμπόδιο στην διπλωματική αυτή ήταν ότι η πρώτη προσομοίωση που έγινε δεν ολοκληρώθηκε καθώς στον δεύτερο χρόνο το πρόγραμμα οδήγησε σε σφάλμα λόγω μεγάλης απορροής. Βασική αιτία ήταν το γεγονός ότι ορισμένα μεγέθη του αρχείου wgen δεν αναγνωρίζονταν ορθά κατά την μετατροπή του πληκτρολογίου από ελληνικό σε αμερικάνικο και με τα σύμβολα της υποδιαστολής. Μόλις διορθώθηκαν κάποιες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης το μοντέλο λειτούργησε κανονικά.

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που υπήρξε ήταν η έλλειψη δεδομένων μετρημένης απορροής. Χωρίς μετρημένες τιμές δε δύναται να γίνει η σύγκριση με αυτές που προσομοιώθηκαν και συνεπώς δεν προσδιορίζονται οι δείκτες που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αποτέλεσμα ήταν η αδυναμία βαθμονόμησης του μοντέλου.

Απόρροια του παραπάνω προβλήματος, ήταν η ασυμβατότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης λεκάνης. Για παράδειγμα, η ποσότητα αζώτου, μια συγκεκριμένη μέρα υπολογίστηκε στους 32

τόνους, τιμή που δεν ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές μετρήσεις. Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, έγινε μελέτη παρόμοιων δημοσιευμένων εργασιών και χρησιμοποιήθηκαν ανάλογες τιμές σε ορισμένες παραμέτρους. Μετά από αυτή τη επεξεργασία βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων, το πρόγραμμα έδωσε λογικά αποτελέσματα.

Στις διάφορες δοκιμές που έγιναν με εναλλαγή των παραμέτρων, παρατηρήθηκε ότι μερικές επηρέασαν περισσότερο τα αποτελέσματα έναντι κάποιων άλλων. Ως προς τις τιμές της απορροής, κρίσιμη είναι η συμβολή των μεταβλητών των υπόγειων νερών (ALPHA\_BF, GW\_DELAY, RCHRG\_DP) όπως επίσης και των τιμών για τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και του αριθμού καμπύλης CN<sub>II</sub>. Στην παραγωγή και μεταφορά θρεπτικών, σημαντικές ήταν οι παράμετροι CDN, NPERCO και PPERCO, ενώ για τα φερτά καθοριστική σημασία είχαν οι παράμετροι PRF, ADJ\_PKR καθώς και η μεταβλητή USLE\_P που έλαβε διάφορες τιμές για κάθε κλίση και χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα στην εξίσωση MUSLE.

Ο παράγοντας που έχει τον σημαντικότερο ρόλο είναι η βροχόπτωση. Το έτος στο οποίο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη βροχόπτωση δηλαδή το 2014 (Πίνακας 6.21) καταγράφηκαν οι μεγαλύτερες τιμές στην απορροή (Πίνακας 6.22) και κατά συνέπεια οι μεγαλύτερες ποσότητες των εξεταζόμενων μεγεθών. Τέλος, με βάση τα σενάρια που εξετάστηκαν, συμπεραίνεται ότι σημαντικές μεταβλητές στην διαμόρφωση των αποτελεσμάτων είναι και οι χρήσεις γης και οι κλίσεις του εδάφους.

## **7.2 Αξιολόγηση της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής**

Η χρήση ενός μοντέλου όπως το SWAT είναι μια διαδικασία, που παρά τις δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπίσει ο χρήστης, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα παρακολούθησης και εξέλιξης υδρολογικών και ποιοτικών παραμέτρων όπως αυτά προκύπτουν από κλιματικές αλλαγές, ανθρωπογενείς επεμβάσεις ή ακόμα και από

διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης. Η έρευνα αυτή αξιοποιεί το πλεονέκτημα αυτό και έτσι μπόρεσαν να μελετηθούν ποικίλα ποιοτικά χαρακτηριστικά του Βολιναίου ποταμού.

Η λεκάνη απορροής που μελετήθηκε, προκαλεί χαμηλές εκπομπές ρύπων καθώς οι καλλιέργειες αποτελούνται από φυτά που δεν απαιτούν έντονη γεωργική δραστηριότητα. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν περιπτώσεις που σημειώθηκαν μεγαλύτερες ποσότητες ρυπαντών οι οποίες οφείλονται σε μεμονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν, οδήγησαν σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των χρήσεων γης και των καλλιεργειών στην ποιότητα των υδάτων του ποταμού. Παρατηρήθηκε ότι αλλάζοντας την παράμετρο καλλιέργεια, σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη (μέχρι και 50%). Συνεπώς, η ποιότητα του υδατορέματος εξαρτάται άμεσα από την παραγωγή ρύπων που σχετίζεται με τις καλλιέργειές και τις γεωργικές μεθόδους που εφαρμόζονται. Επίσης, με την μεταβολή των χρήσεων γης οι διαφορές που σημειώθηκαν στις ποσότητες ρύπων ήταν ιδιαίτερα αισθητές και γίνεται έτσι αντιληπτή η συνεισφορά των χρήσεων γης στην ποιότητα του νερού ενός ποταμού.

Τέλος, σημειώνεται ότι η μελέτη μιας λεκάνης απορροής μπορεί να αποβεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Η ανάπτυξη και χρήση μοντέλων όπως το SWAT έχει σαν πλεονέκτημα τον περιορισμό του χρόνου εργασίας αλλά και την αύξηση των δυνατοτήτων του χρήστη. Η δοκιμή των διάφορων σεναρίων που εφαρμόστηκαν για την λεκάνη απορροής στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε δυνατή εξαιτίας του μοντέλου SWAT, ένα μοντέλο που προτείνεται για κάθε μελετητή.

## Αναφορές

### Αναφορές στην αγγλική γλώσσα

1. M.N. Beaulac, K.H. Reckhow (1982): An examination of land use-nutrient export relationships. Water Resources Bulletin, pp 1013-1024)
2. B.R. Bicknell, A.S. Donigan, Jr. T. J. Hobes, R.V. Chinnaswamy, A. M. Lumb, T. O. Barnwell (1996): Modeling nitrogen cycling and export in forested watersheds using HSPF.
3. N.H. Crawford, R.K. Linsley (1962): The synthesis of continuous streamflow hydrographs on a digital computer. Stanford University, Department of Civil Engineering, Technical Report No. 12. Stanford, Calif.
4. For ESDB v2.0: The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN, 2004.
5. G.D. Gikas, T. Yiannakopoulou, V.A. Tsihrintzis (2006): Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin, Environmental Modelling and assessment 11:219-233
6. Knisel Jr, Walter G., CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 26 , 640 pp. , illus.
7. M.D.Luzio, J.G.Arnold, R.Srinivasan (2004): A GIS-Coupled Hydrological Model System for the Watershed Assessment of Agricultural Nonpoint and Point Sources of Pollution, Transactions in GIS, 8(1):113-136
8. S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.K. Kiniry, J.R. Williams (2011): Soil and Water Assessment Tool ,Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406
9. S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Williams, R. Srinivasan, E.B. Haney: Soil and Water Assessment Tool ,Input/Output Documentation Version 2012, Texas Water Resources Institute No. 439
10. A.D. Nicks (1974): Stochastic generation of the occurrence pattern and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. In Proc. Symp.

- Statistical Hydrology, Aug-Sep. 1971, Tuscon, AZ. U.S. Department of Agriculture, Misc.Publ.No.1275
11. Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. (2012) *Land Use Policy*, 29 (2), pp. 329-338.  
doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
  12. Panagos Panos. The European soil database (2006) *GEO: connexion*, 5 (7), pp. 32-33.
  13. V. Pisinaras, C.Petalas, G.D.Gikas, A.Gemitzi, V.A. Tsihrintzis (2010): Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), *Desalination* 250 274-286
  14. D. Sangrey, K. Harrop-Williams, J. Klaimer (1984): Predicting Grout-Water Response to Precipitation. *J. Geotech. Engrg.*, 10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:7(957), 957-975
  15. H.W. Streeter, E.B. Phelps (1925): A study of the pollution and natural purification of the Ohio river, *Public Health Bulletin No. 146*, Washington D.C.: United States Public Health Service.
  16. R.E. Thronson (1978): Nonpoint source control guidance, agricultural activities,EPA – 440/3-78-001
  17. G.Tsakiris , D.Alexakis: Water quality models: An overview, *European Water* 37: 33-46,2012 E.W. Publications
  18. V.A.Tsihrintzis, H.R. Fuentes, R.Gadipudi (1996): Modeling prevention alternatives for nonpoint source pollution at a wellfield in Florida, *Water Resources Bulletin* ,Vol 32, No 2
  19. V.A.Tsihrintzis, H.Fuentes, R.K.Gadipudi (1997): GIS-Aided Modeing of Nonpoint Source Pollution Impacts on Surface and Ground Waters, *Water Resources Mangement* 11:207-218
  20. U.S. Soil Conservation Service (1972): *SCS National Engineering Handbook*, Sec. 4, Hydrology. 548 pp.
  21. U.S. Soil Conservation Service (1972): *SCS National Engineering Handbook*, Sec. 4, Hydrology. 548 pp.



22. E. Varanou, E. Gkouvatsou, E. Baltas, M. Mimikou (2002): Quantity and Quality Integrated Catchment Modeling under Climate Change with use of Soil and Water Assessment Tool Model, Journal of Hydrologic Engineering 7:228-244
23. C. Venetis (1969) : A Stochastic Model of Monthly Reservoir Storage. Water Resources Research, Vol 5, Issue 3, 729-734
24. M.T. Vu, S.V. Raghavan, S.Y. Liong (2012): SWAT use of gridded observations for simulating runoff – a Vietnam river basin study. Hydrol. Earth. Sci., 16, 2801-2811
25. J.R. Williams (1975): Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. p. 244-252. In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources : Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972.ARS-S-40
26. M. Winchell, R. Srinivasan, M. Di Luzio, J. Arnold (2013): ArcSWAT Interface for SWAT2012, User's Guide
27. W.H. Wischmeier, D.D. Smith (1965): Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains—Guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 282. 47 pp.
28. R.A. Young, C.A. Onstad, D.D. Bosch, W.P. Anderson (1989): AGNPS : A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds.

#### Αναφορές στην ελληνική γλώσσα

29. Αθανασιά Γ. (2010): Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη με χρήση του μοντέλου SWAT, Σχ. Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών
30. Βουμβουλάκη Ε. (2005): Ρύθμιση και επαλήθευση ομοιώματος SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στις απορροές του ποταμού Αλιάκμονα, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ

31. Δαγαλάκη Β. (2016): Βιώσιμη γεωργική διαχείριση στη λεκάνη του Πηνειού με χρήση τηλεπισκόπησης, προσομοίωση σε SWAT και ανάλυση αλληλεπιδράσεων νερού-γης-τροφής-ενέργειας, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
32. Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2011): Ανάλυση Ανθρωπογενών πιέσεων και των επιπτώσεων τους στα επιφανειακά και στα υπόγεια υδατικά συστήματα, Παραδοτέο 8.
33. Ζαχαρία Χ. (2010): Περιγραφή διασποράς ρύπων από εγκαταστάσεις μεταλλευτικών αποβλήτων με σύγχρονα λογισμικά εργαλεία, Σχ. Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών.
34. Κ. Ζαρντάβα, Χ. Κιουρτσίδης, Ι. Γκανούλης: Προσομοίωση Ρύπανσης από μη Σημειακά Νιτρικά Φορτία σε Λεκάνες Απορροής. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων 215-220
35. Δ. Π. Καλυβάς: Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών στη διαχείριση των υδατικών πόρων.
36. Μπατέλης Χ.,Σ. (2012): Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας, Σχ. Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών
37. Μπεκιάρης Ι. (2004): Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων υδρολογικών λεκανών, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
38. Παγωνάς Μ. (2009): Γεωλογία και διαχείριση των σύγχρονων αποθέσεων και των υδατικών πόρων στους χειμάρρους της Β/Δ Πελοποννήσου, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών
39. Παναγόπουλος Ι. (2004): Εδαφολογική διερεύνηση για τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου SWAT στην εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στην πεδιάδα της Θεσσαλίας, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
40. Πικούνης Μ. (2002): Εφαρμογή και ποιοτικός έλεγχος του ομοιώματος SWAT στην εκτίμηση των υδρολογικών επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
41. Πολυζώνη Ε. (2006): Χρήση ομοιώματος SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων από αλλαγές στις πρακτικές διαχείρισης γης στις απορροές του ποταμού Αράχθου, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ

42. Ράμπιας Ε. (2005): Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αλλαγών χρήσης γης στις απορροές και στερεοαπορροές του ποταμού Αλιάκμονα, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
43. Στεργιούλη Μ.βλ.(2007): Προσδιορισμός πηγών προέλευσης και ποσοτικοποίηση απωλειών θρεπτικών με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT, υπό την επίδραση διαφορετικών κλιματολογικών, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
44. Τσακίρης Γ. (2013) : Υδατικοί Πόροι : Ι. Τεχνική υδρολογία και Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
45. Τσακίρης Γ. (2006) : Υδραυλικά Έργα , Σχεδιασμός και διαχείριση. Τόμος II : Εγγειοβελτιωτικά Έργα, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
46. Τσοτσώνης Γ. (2000): Εφαρμογή του ολοκληρωμένου ημερήσιου μοντέλου SWAT στη Θεσσαλία κάτω από συνθήκες κλιματικής αλλαγής, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
47. Τσουκαλά Π. (2008): Χρήση του υδρολογικού ομοιώματος SWAT για τη διερεύνηση της επίδρασης των γεωργικών πρακτικών στην παραγωγή θρεπτικών και στις αποδόσεις των καλλιεργειών στη λεκάνη του Πηνειού Θεσσαλίας, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ
48. Χριστοφορίδης Α. (2005): Εφαρμογή του μοντέλου SWAT για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδατικό ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Αράχθου, Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ



## Παράρτημα Α : Πίνακες

Πίνακας Α.1.Κωδικοί χρήσεων γης όπως είναι καταχωρημένοι στο μοντέλο SWAT

A/A	CODE	CROPNAME	A/A	CODE	CROPNAME
1	AGRL	Agricultural Land-Generic	59	LIMA	Lima Beans
2	AGRR	Agricultural Land-Row Crops	60	LENT	Lentils
3	AGRC	Agricultural Land-Close-grown	61	PNUT	Peanut
4	ORCD	Orchard	62	FPEA	Field Peas
5	HAY	Hay	63	PEAS	Garden or Canning Peas
6	FRST	Forest-Mixed	64	SESB	Sesbania
7	FRSD	Forest-Deciduous	65	FLAX	Flax
8	FRSE	Forest-Evergreen	66	COTS	Upland Cotton-harvested with
9	WETL	Wetlands-Mixed	67	COTP	Upland Cotton-harvested with
10	WETF	Wetlands-Forested	68	TOBC	Tobacco
11	WETN	Wetlands-Non-Forested	69	SGBT	Sugarbeet
12	PAST	Pasture	70	POTA	Potato
13	SPAS	Summer Pasture	71	SPOT	Sweetpotato
14	WPAS	Winter Pasture	72	CRRT	Carrot
15	RNGE	Range-Grasses	73	ONIO	Onion
16	RNGB	Range-Brush	74	SUNF	Sunflower
17	SWRN	Southwestern US (Arid) Range	75	CANP	Spring Canola-Polish
18	WATR	Water	76	CANA	Spring Canola-Argentine
19	CORN	Corn	77	ASPR	Asparagus
20	CSIL	Corn Silage	78	BROC	Broccoli
21	SCRN	Sweet Corn	79	CABG	Cabbage
22	EGAM	Eastern Gamagrass	80	CAUF	Cauliflower
23	GRSG	Grain Sorghum	81	CELR	Celery
24	SGHY	Sorghum Hay	82	LETT	Head Lettuce
25	JHGR	Johnsongrass	83	SPIN	Spinach
26	SUGC	Sugarcane	84	GRBN	Green Beans
27	SWHT	Spring Wheat	85	CUCM	Cucumber
28	WWHT	Winter Wheat	86	EGGP	Eggplant
29	DWHT	Durum Wheat	87	CANT	Cantaloupe
30	RYE	Rye	88	HMEL	Honeydew Melon
31	BARL	Spring Barley	89	WMEL	Watermelon
32	OATS	Oats	90	PEPR	Bell Pepper
33	RICE	Rice	91	STRW	Strawberry
34	PMIL	Pearl Millet	92	TOMA	Tomato
35	TIMO	Timothy	93	APPL	Apple
36	BROS	Smooth Bromegrass	94	PINE	Pine
37	BROM	Meadow Bromegrass	95	OAK	Oak
38	FESC	Tall Fescue	96	POPL	Poplar
39	BLUG	Kentucky Bluegrass	97	MESQ	Honey Mesquite
40	BERM	Bermudagrass	98	GRAP	Vineyard
41	CWGR	Crested Wheatgrass	99	WBAR	Winter Barley

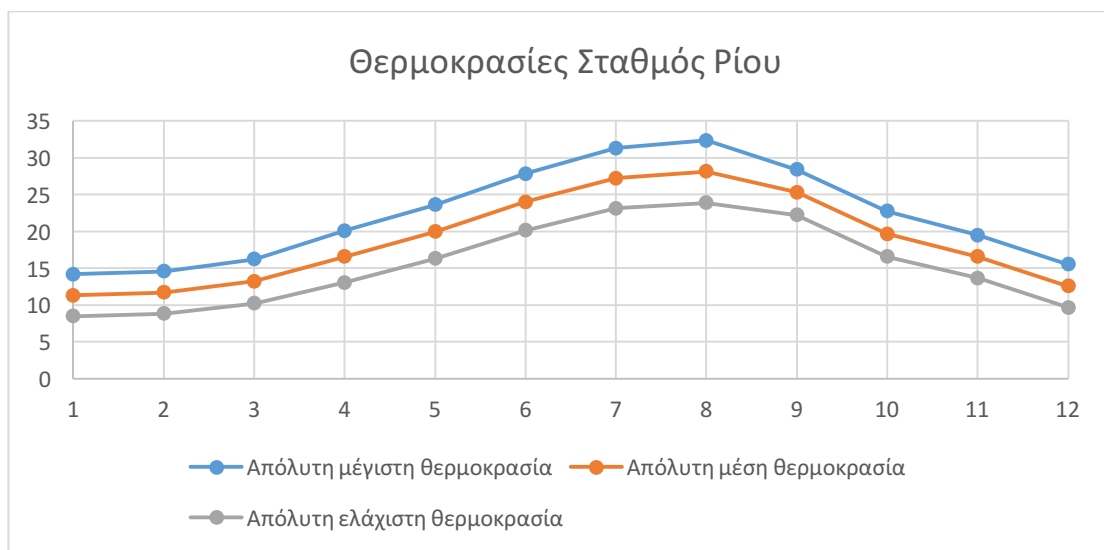
42	WWGR	Western Wheatgrass	100	OILP	Oil Palm
43	SWGR	Slender Wheatgrass	101	RUBR	Rubber Trees
44	RYEG	Italian (Annual) Ryegrass	102	BANA	Bananas
45	RYER	Russian Wildrye	103	TEFF	Eragrostis Teff
46	RYEA	Altai Wildrye	104	COFF	Coffee
47	SIDE	Sideoats Grama	105	PTBN	Pinto Beans
48	BBLS	Big Bluestem	106	ALMD	Almonds
49	LBLS	Little Bluestem	107	GRAR	Grarigue
50	SWCH	Alamo Switchgrass	108	OLIV	Olives
51	INDN	Indiangrass	109	ORAN	Orange
52	ALFA	Alfalfa	110	SEPT	Septic Area
53	CLVS	Sweetclover	111	COCO	Coconut
54	CLVR	Red Clover	112	CASH	Cashews
55	CLVA	Alsike Clover	113	PAPA	Papayas
56	SOYB	Soybean	114	PINP	Pineapple
57	CWPS	Cowpeas	115	PLAN	Plaintains
58	MUNG	Mung Beans	116	PEPP	Peppers
59	LIMA	Lima Beans	117	WILL	Willow
60	LENT	Lentils	118	BARR	Barren

Πίνακας Α.2. Κατηγοριοποίηση εδαφών σύμφωνα με την USDA. Πηγή: SWAT input/output documentation 2012

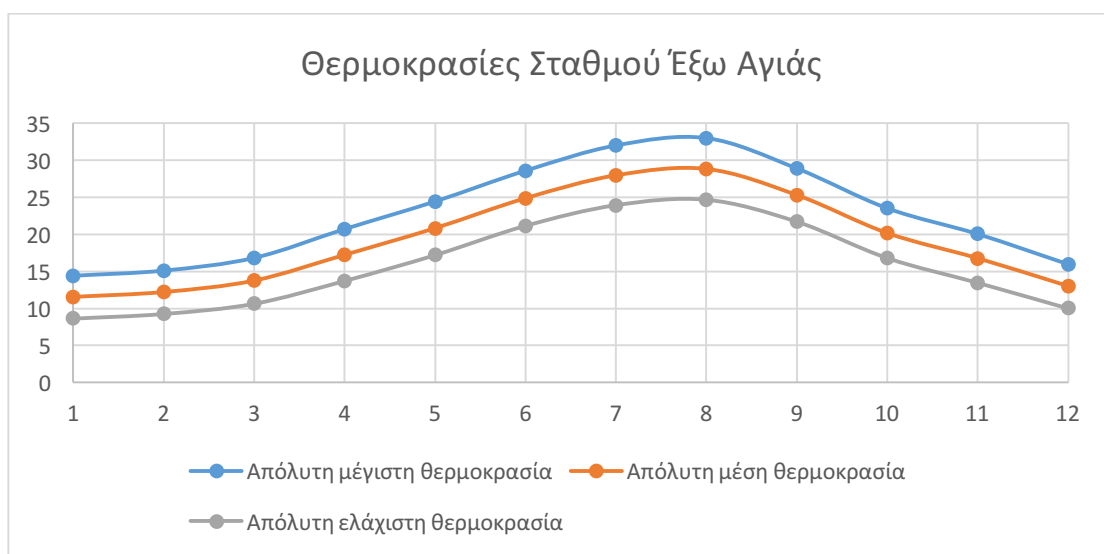
Criteria*	Hydrologic Soil Groups			
	A	B	C	D
Final constant infiltration rate (mm/hr)	7.6-11.4	3.8-7.6	1.3-3.8	0-1.3
Mean permeability: surface layer (mm/hr)	> 254.0	84.0-254.0	8.4-84.0	< 8.4
Mean permeability: most restrictive layer below the surface layer to a depth of 1.0 m (mm/hr)	> 254.0	84.0-254.0	8.4-84.0	< 8.4
Shrink-swell potential: most restrictive layer**	Low	Low	Moderate	High, Very High
Depth to bedrock or cemented pan (mm)	> 1016	> 508	> 508	< 508
<b>DUAL HYDROLOGIC GROUPS</b>	<b>A/D</b>	<b>B/D</b>	<b>C/D</b>	
Mean depth to water table (m)	< 0.61	< 0.61	< 0.61	

## Παράρτημα Β : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων

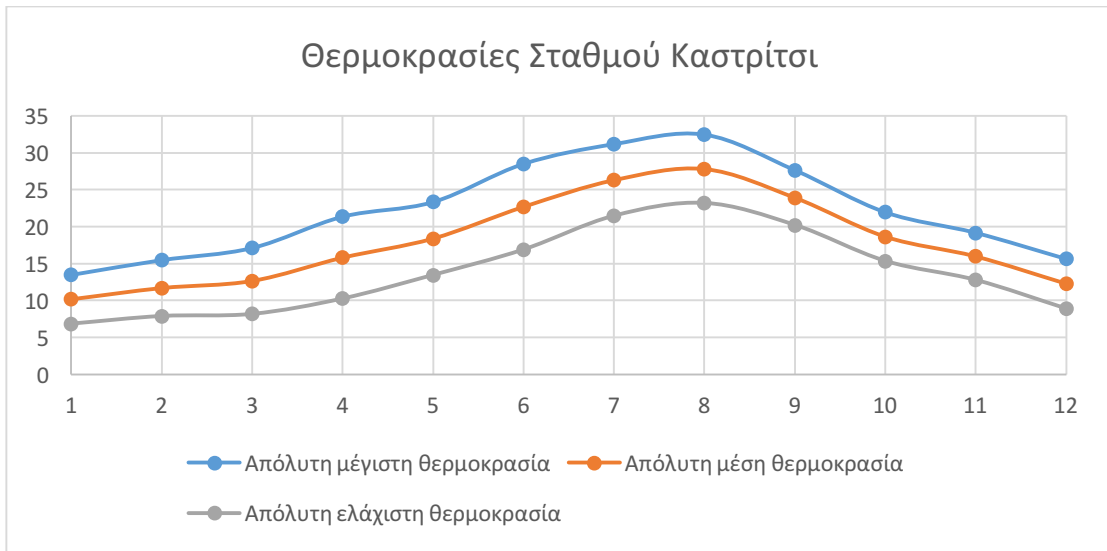
### Διαγράμματα θερμοκρασιών των μετεωρολογικών σταθμών



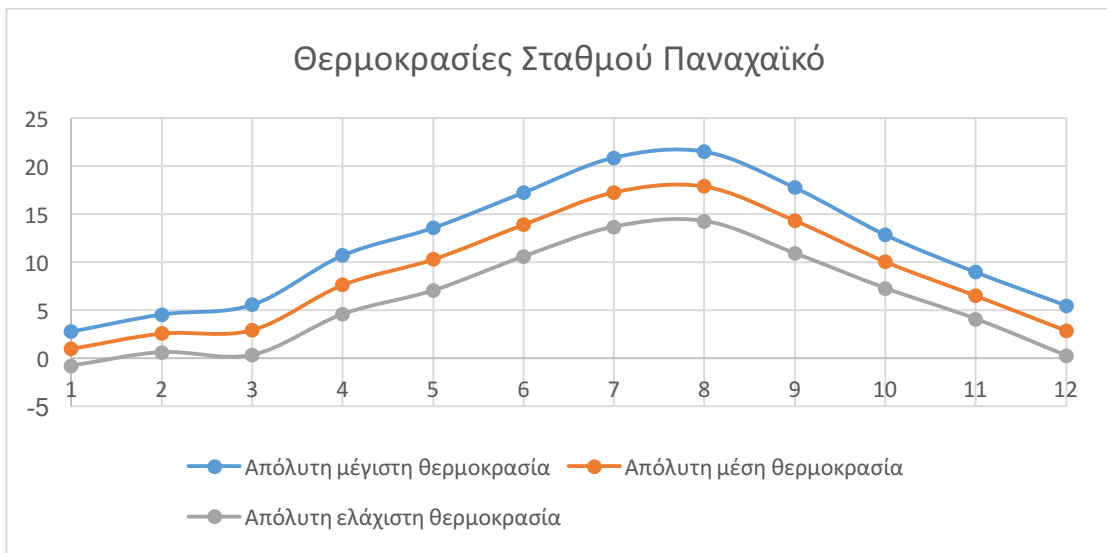
Εικόνα Β.1: Θερμοκρασίες Σταθμού Ρίο



Εικόνα Β.2: Θερμοκρασίες Σταθμού Έξω Αγιά

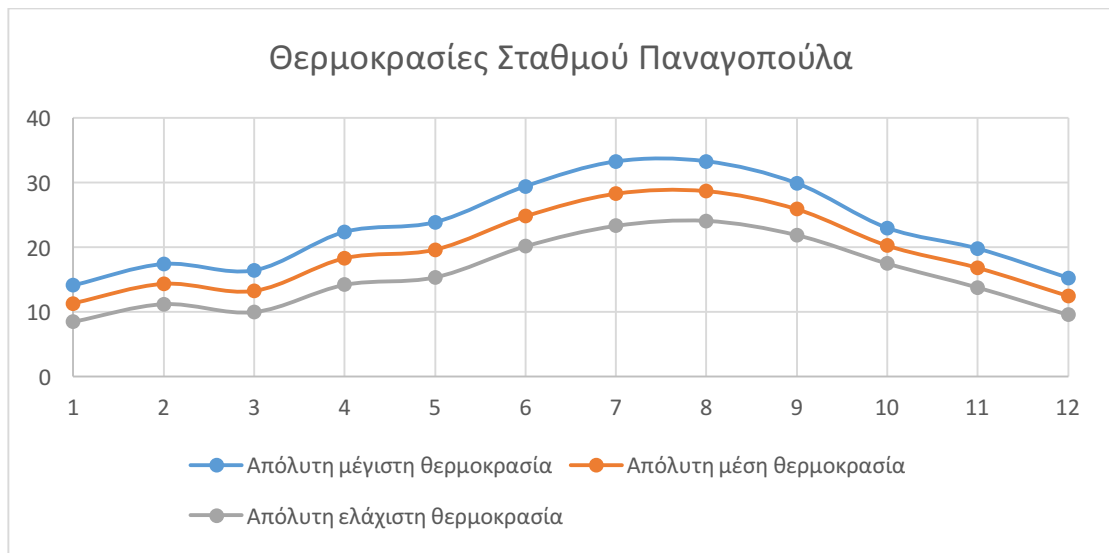


*Εικόνα Β.3: Θερμοκρασίες Σταθμού Καστρίτσι*



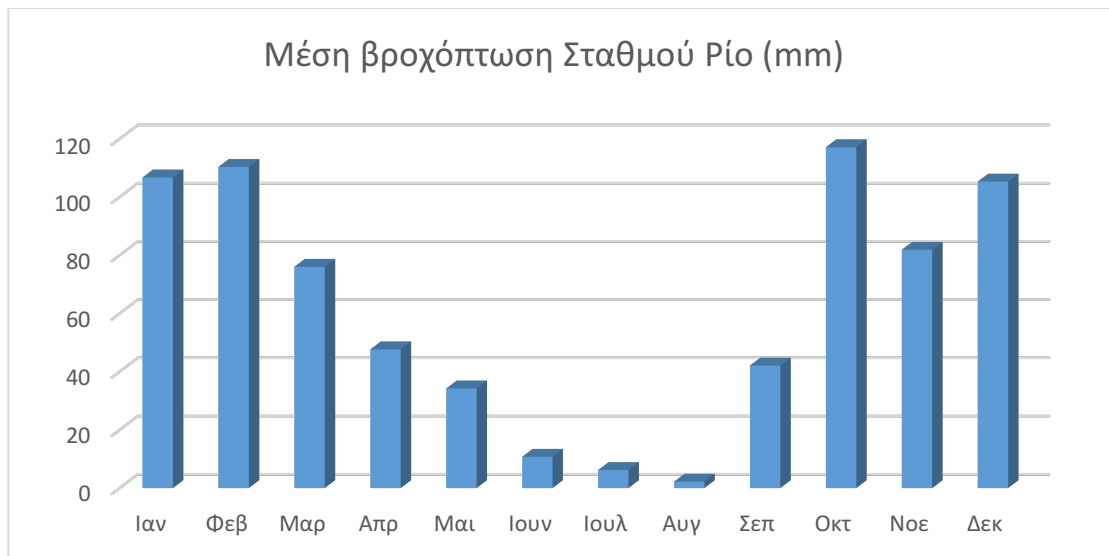
*Εικόνα Β.4: Θερμοκρασίες Σταθμού Παναχαϊκό*



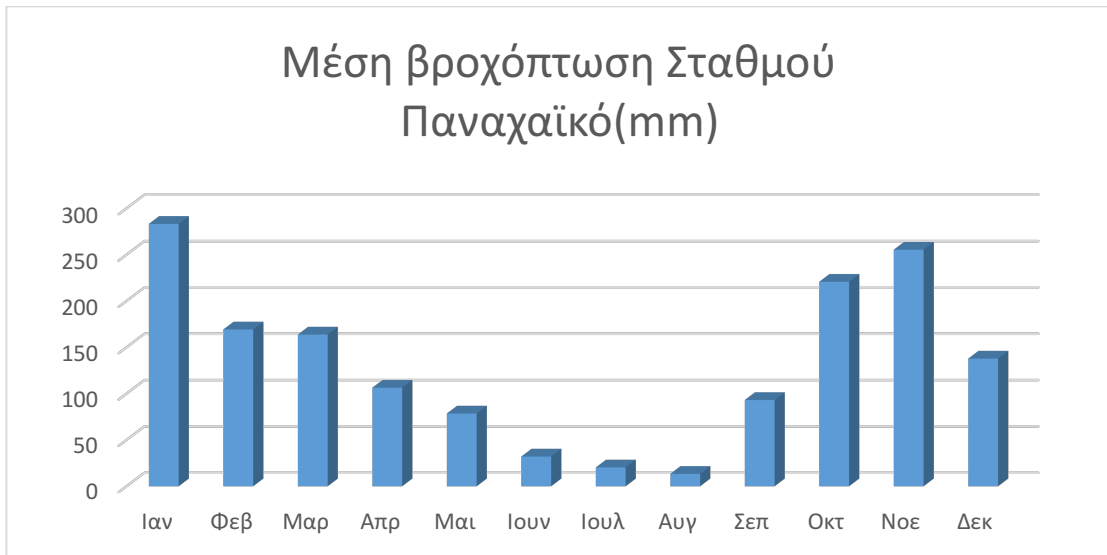


*Εικόνα Β.5: Θερμοκρασίες σταθμού Παναγοπούλα*

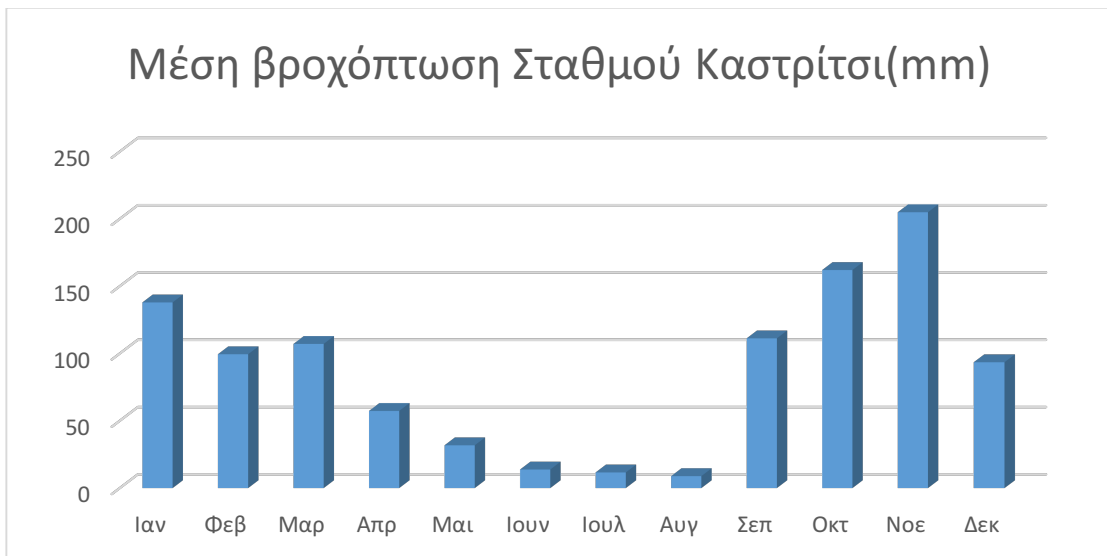
Διαγράμματα βροχοπτώσεων για κάθε σταθμό



*Εικόνα Β.6: Βροχόπτωση σταθμού Ρίο*

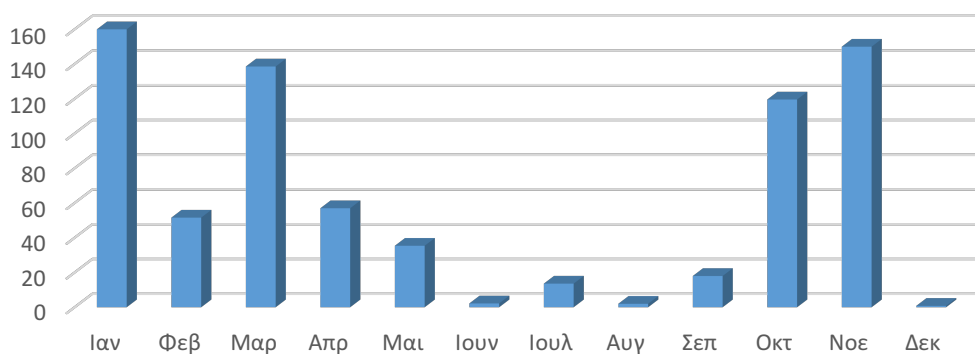


*Εικόνα Β.7: Βροχόπτωση σταθμού Παναχαϊκό*



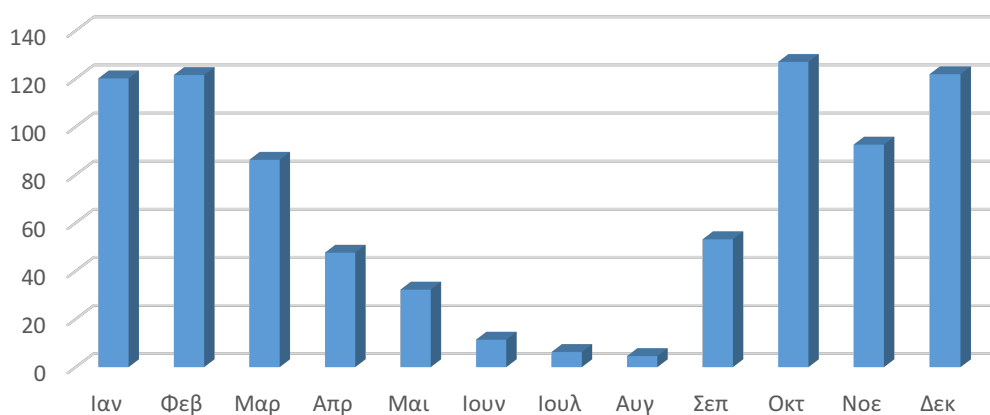
*Εικόνα Β.8: Βροχόπτωση σταθμού Καστρίτσι*

### Μέση βροχόπτωση Σταθμού Παναγοπούλα (mm)

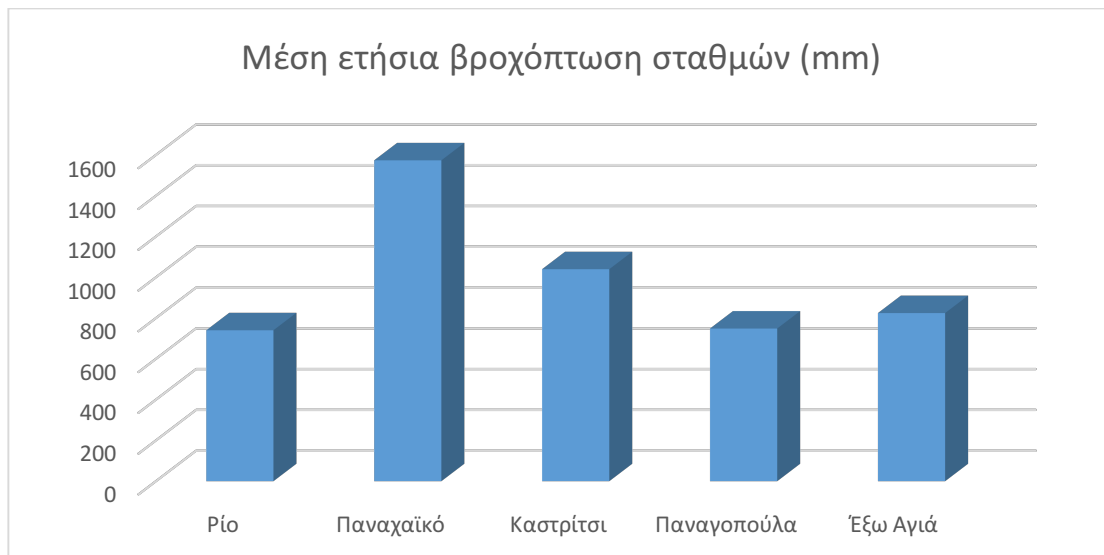


Εικόνα Β.9: Βροχόπτωση σταθμού Παναγοπούλα

### Μέση βροχόπτωση Σταθμού Έξω Αγιά (mm)

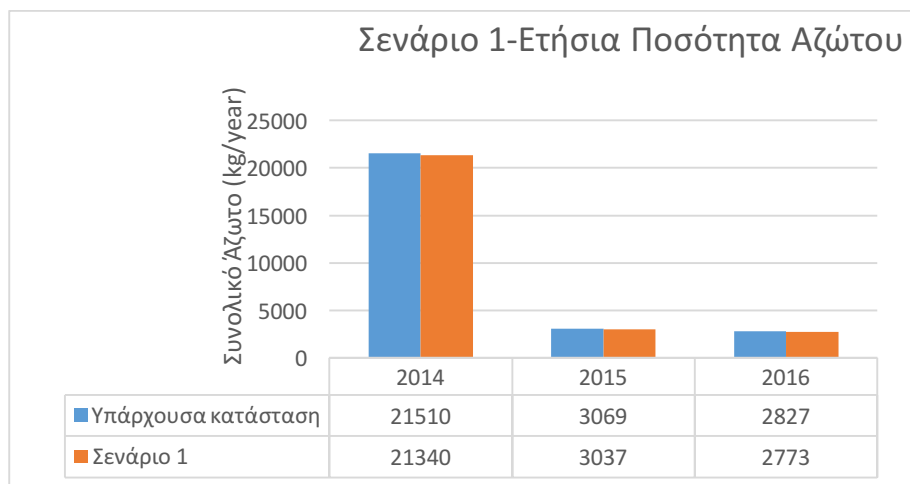


Εικόνα Β.10: Βροχόπτωση σταθμού Έξω Αγιά

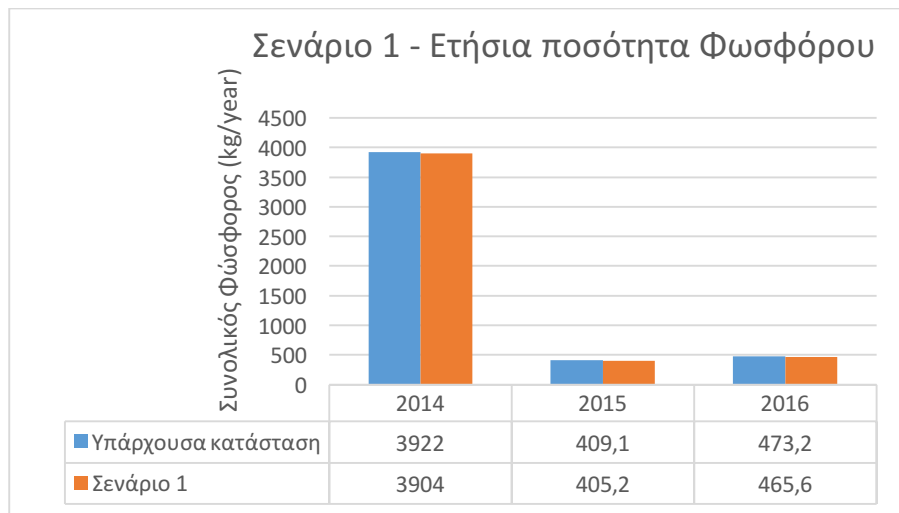


Εικόνα Β.11: Μέση ετήσια βροχόπτωση σταθμών

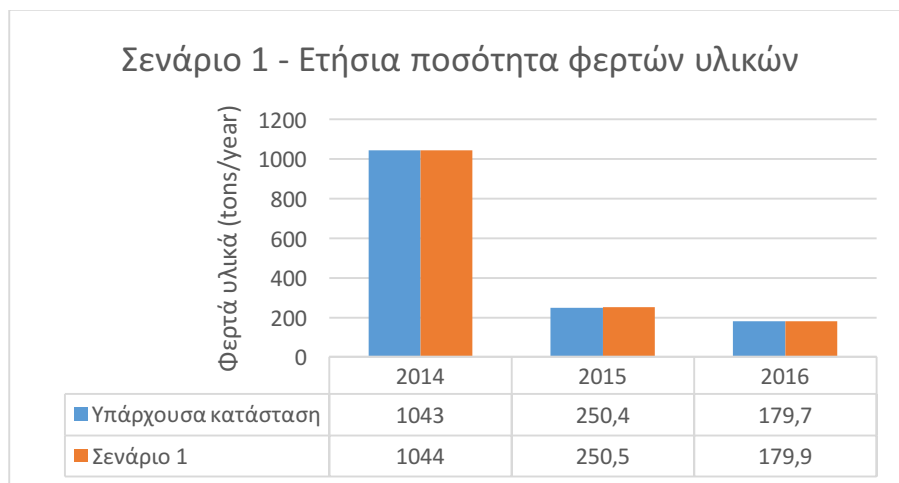
Διαγράμματα Σεναρίου 1: Κατάργηση καλλιέργειας αμπελιού



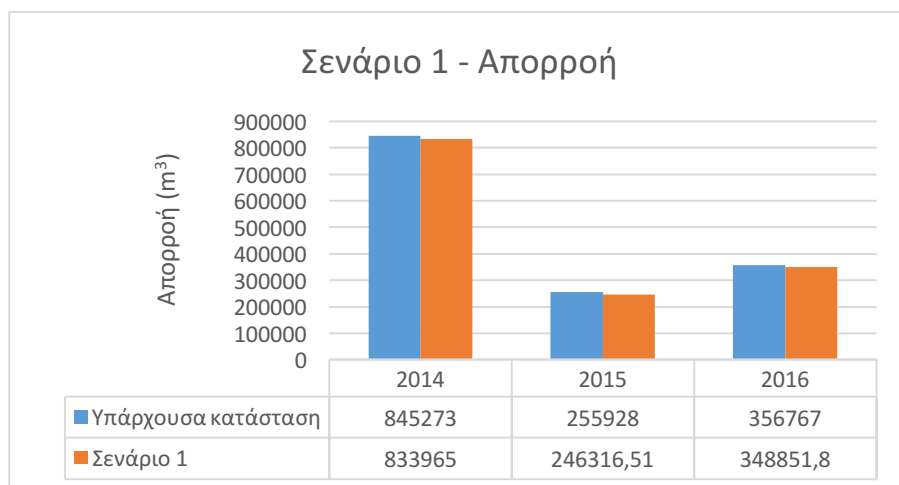
Εικόνα Β.12: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το σενάριο 1



Εικόνα Β.13: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 1

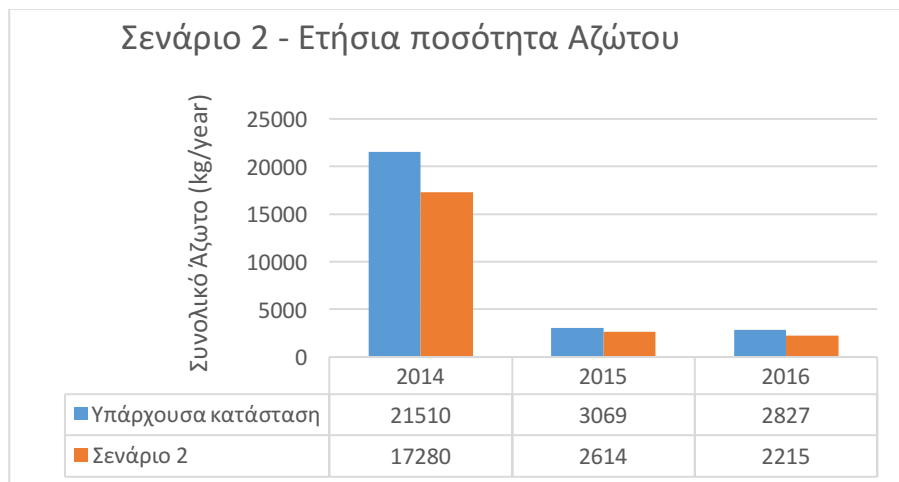


Εικόνα Β.14: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 1

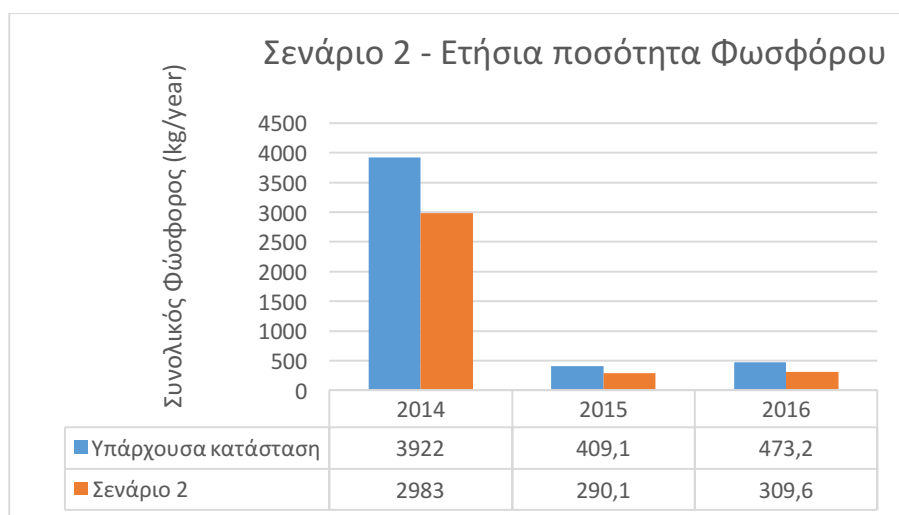


Εικόνα Β.15: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 1

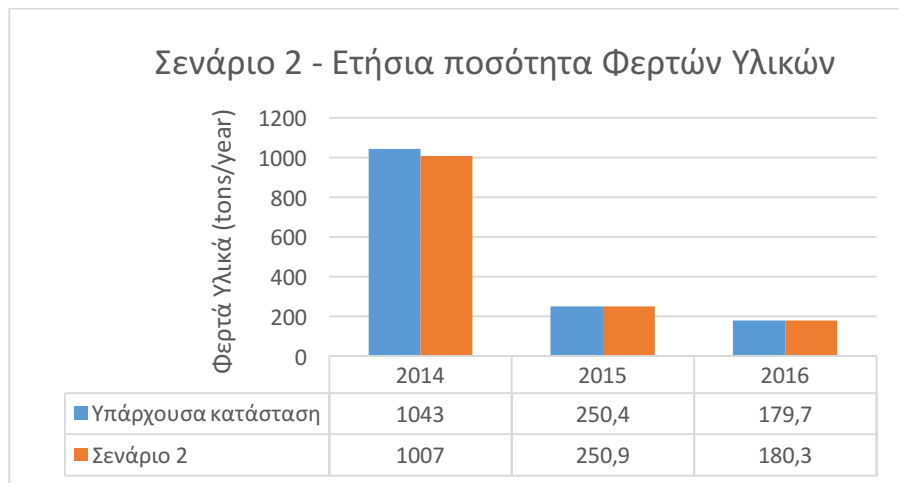
Διαγράμματα Σεναρίου 2: Κατάργηση ορεινών καλλιεργειών



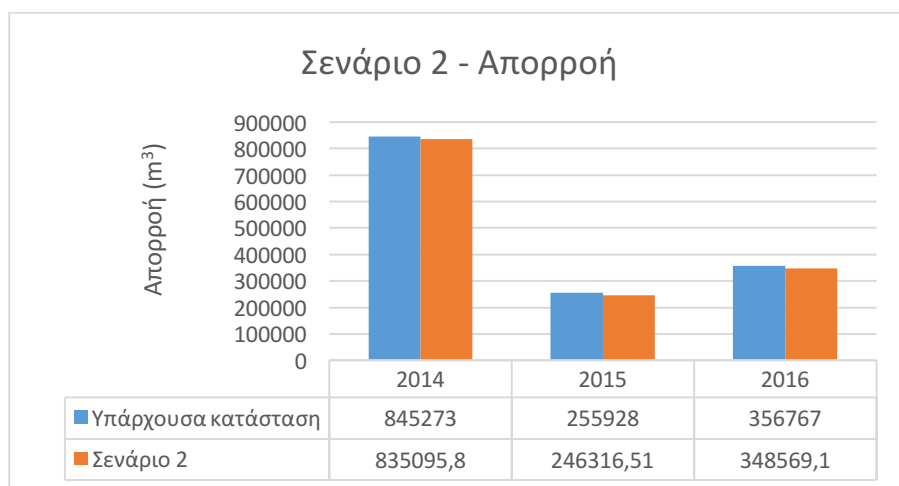
Εικόνα Β.16: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 2



Εικόνα Β.17: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 2

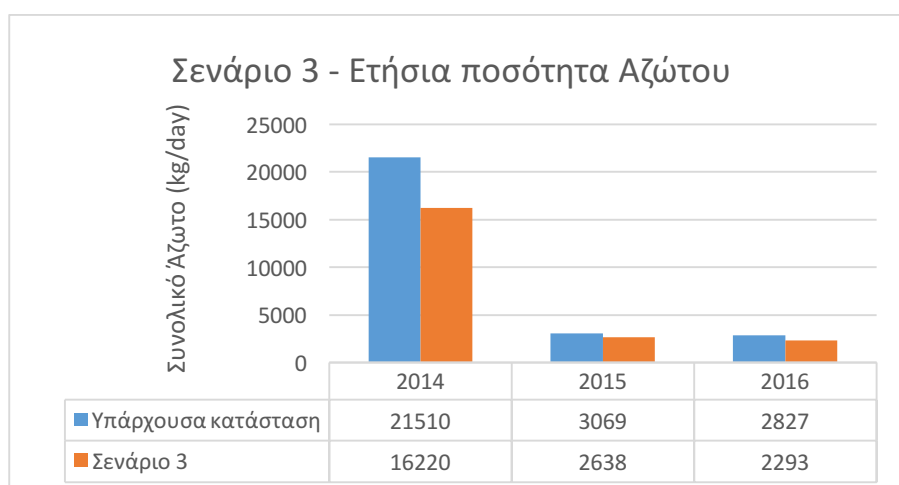


Εικόνα Β.18: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 2

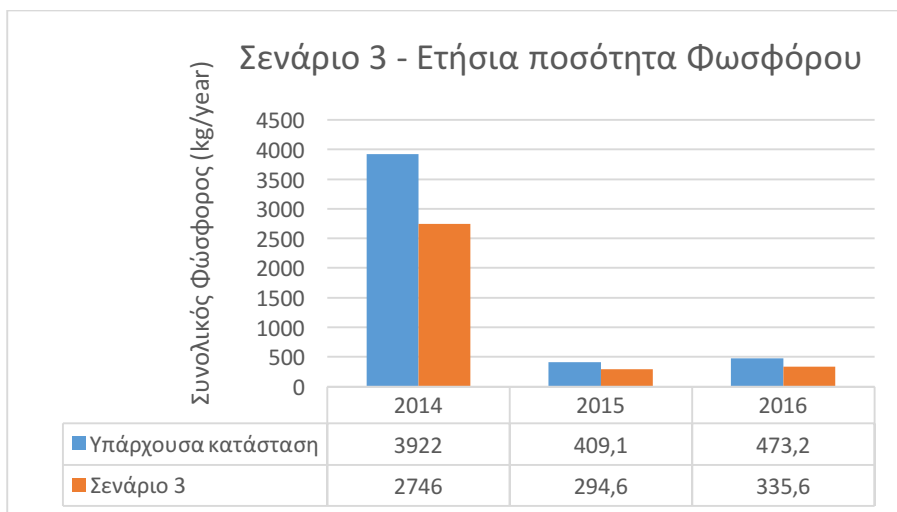


Εικόνα Β.19: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 2

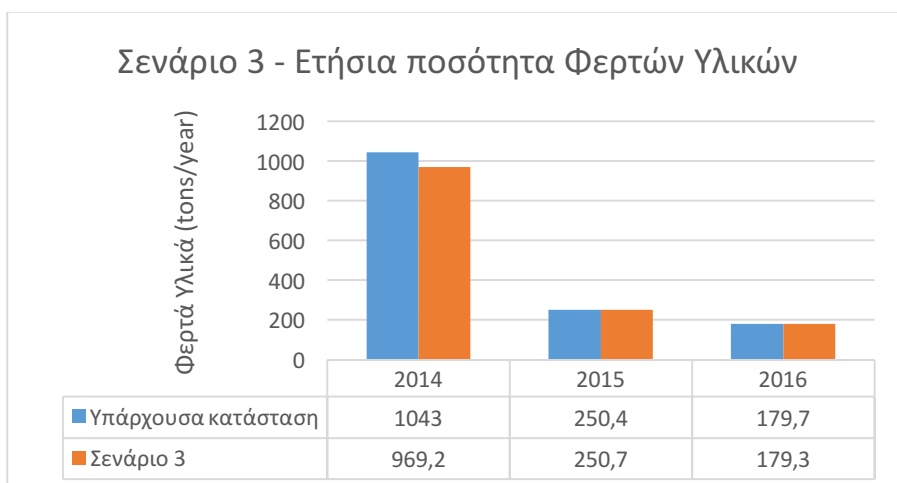
### Διαγράμματα Σεναρίου 3: Κατάργηση καλλιεργειών



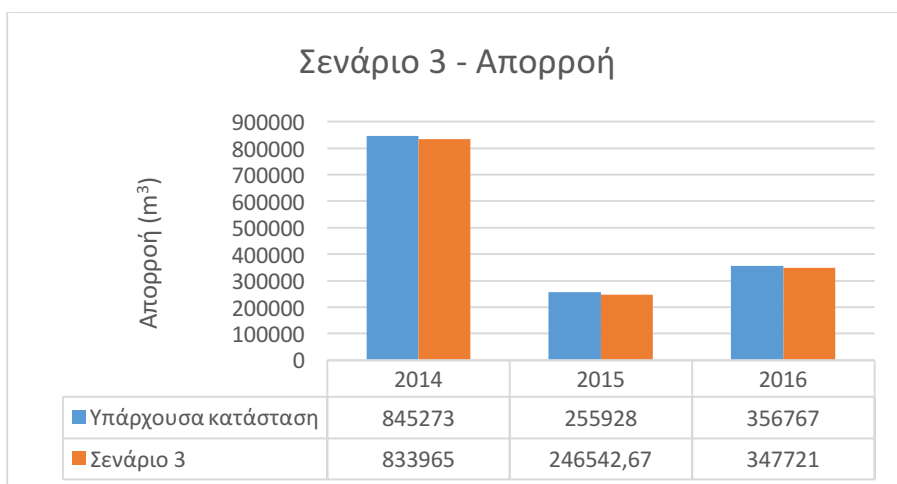
Εικόνα Β.20: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 3



Εικόνα Β.21: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 3



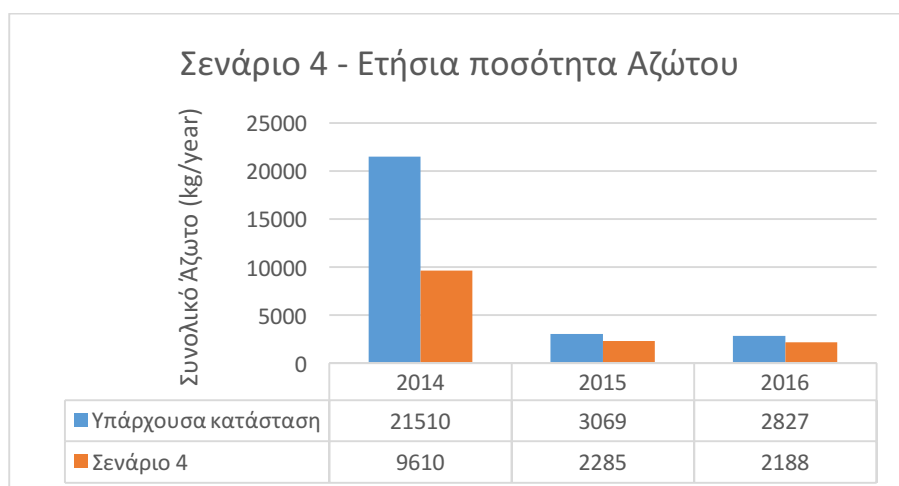
Εικόνα Β.22: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 3



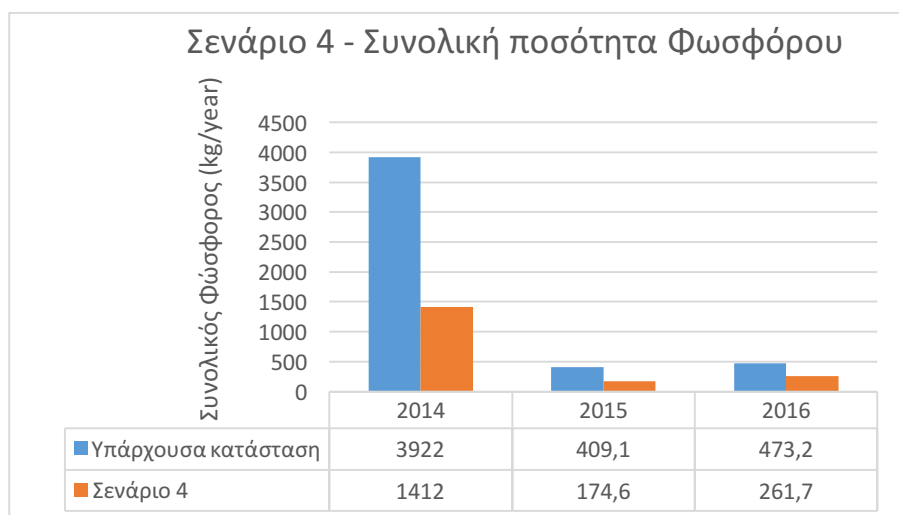
Εικόνα Β.23: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 3



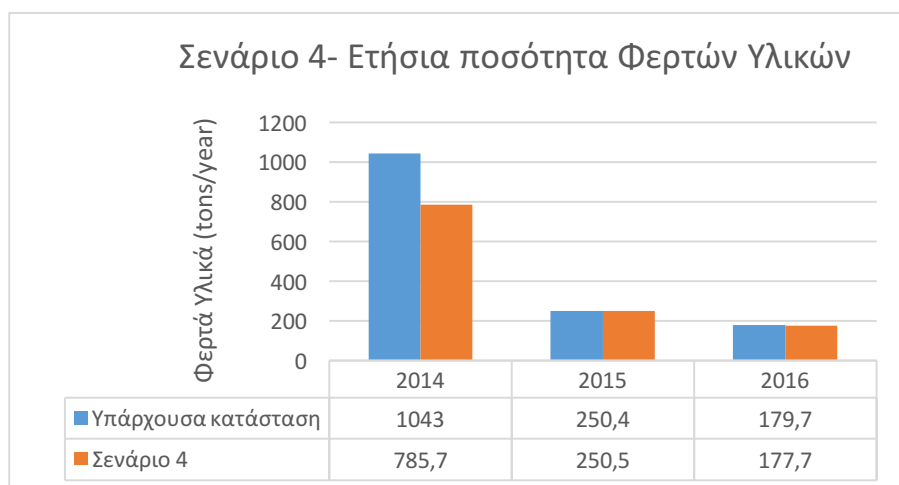
## Διαγράμματα Σεναρίου 4: Συνδυασμός καλλιεργειών



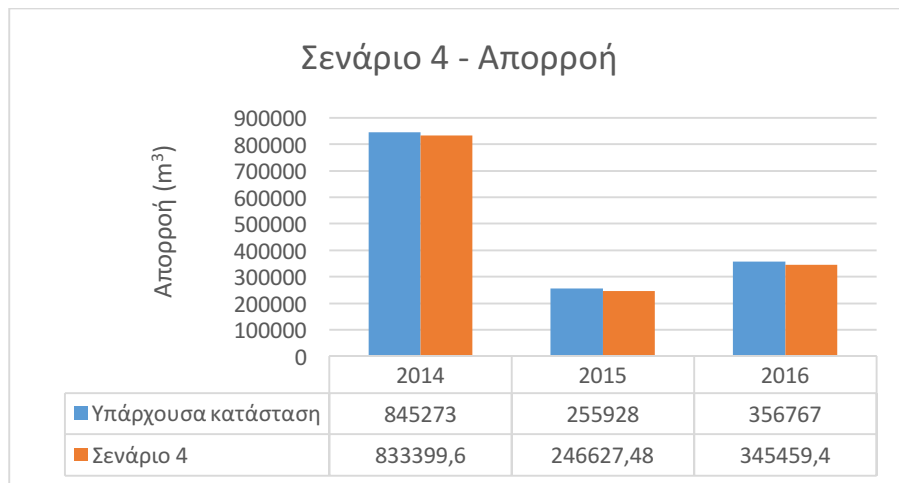
Εικόνα Β.24: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 4



Εικόνα Β.25: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 4

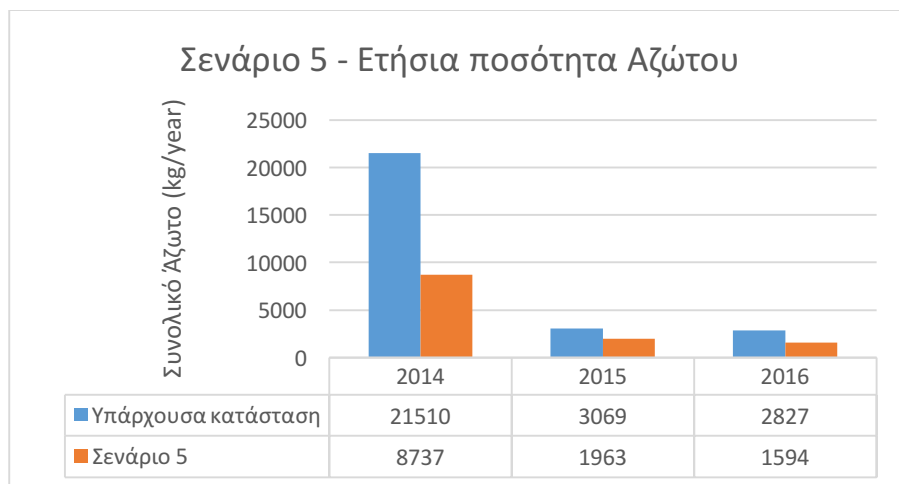


Εικόνα Β.26: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 4

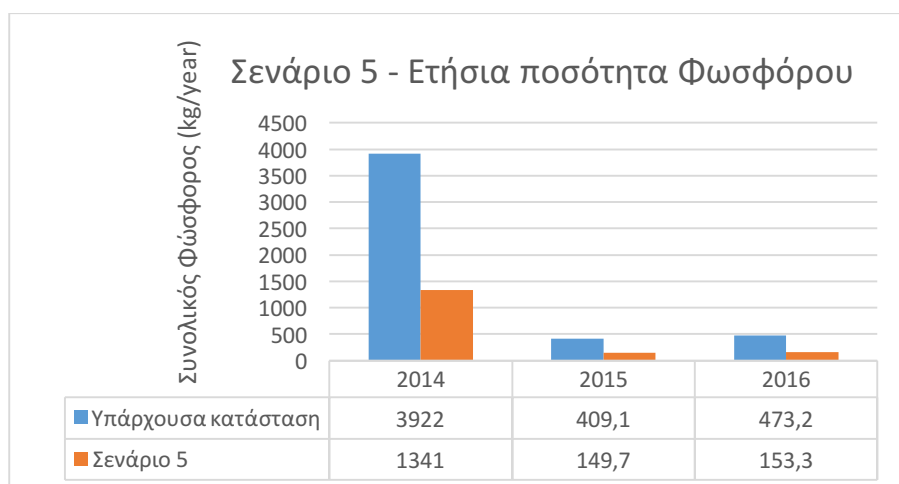


Εικόνα Β.27: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 4

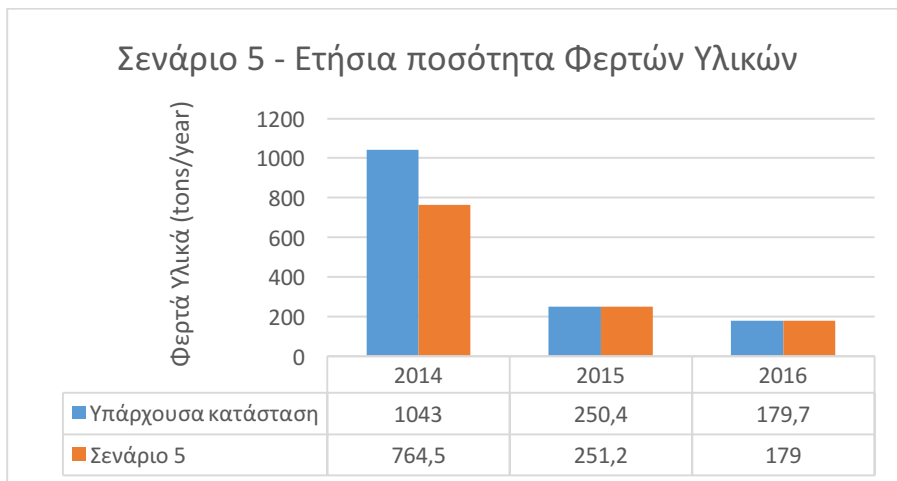
### Διαγράμματα Σεναρίου 5: Αποκλειστική καλλιέργεια λεμονιάς



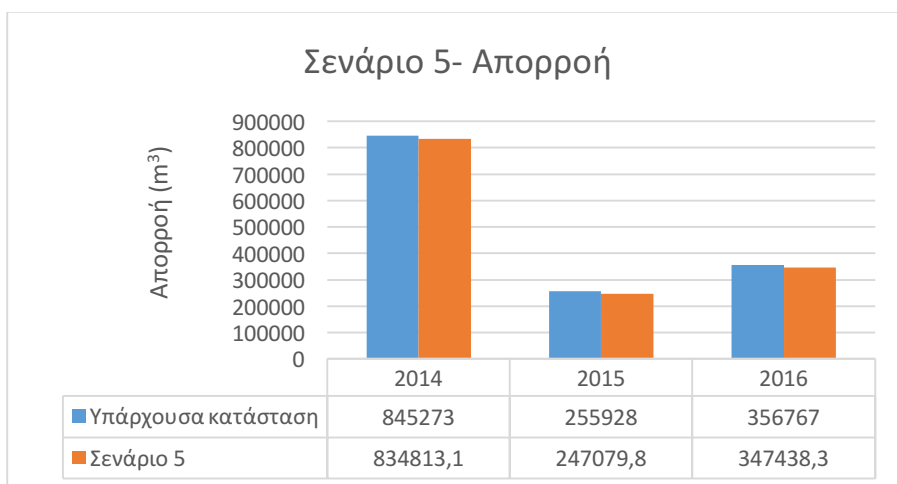
Εικόνα Β.28: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 5



Εικόνα Β.29: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 5

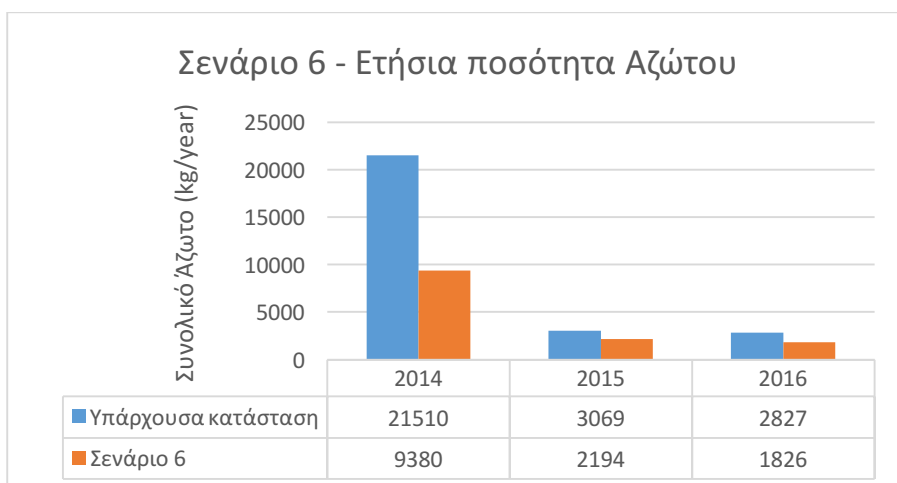


Εικόνα Β.30: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 5

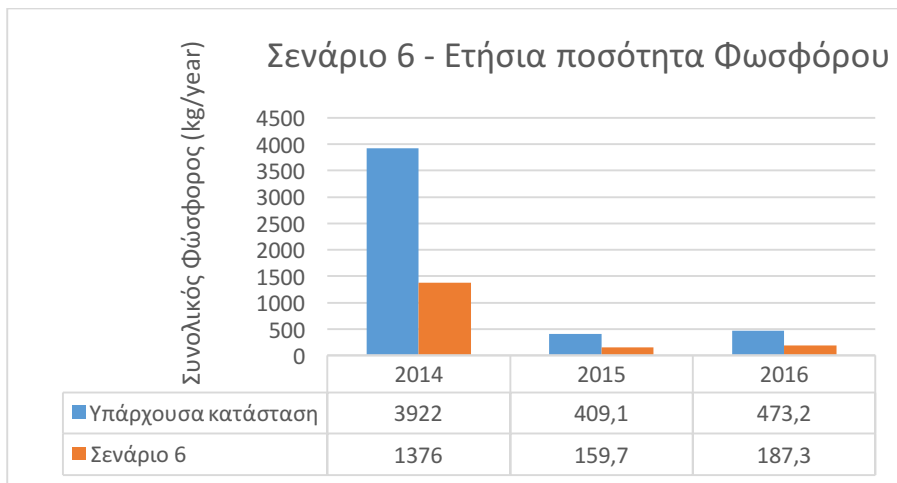


Εικόνα Β.31: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 5

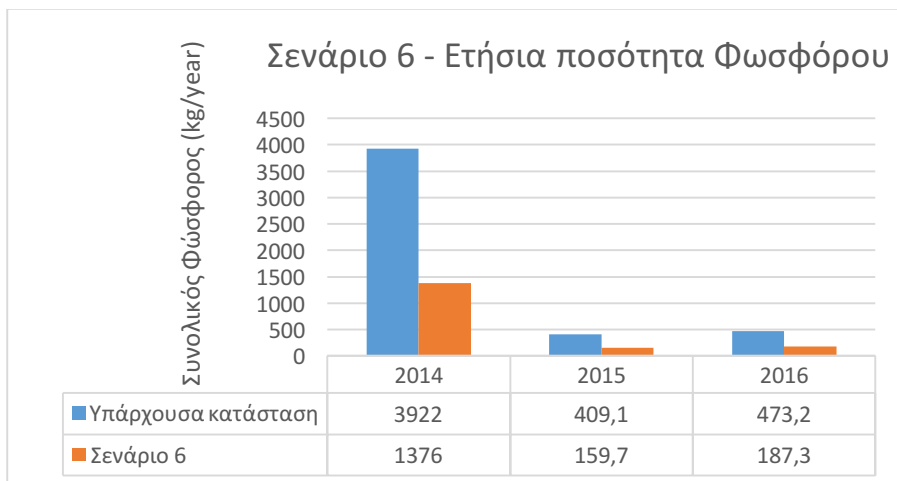
#### Διαγράμματα Σεναρίου 6: Αποκλειστική καλλιέργεια ελιάς



Εικόνα Β.32: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 6



Εικόνα Β.33: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 6

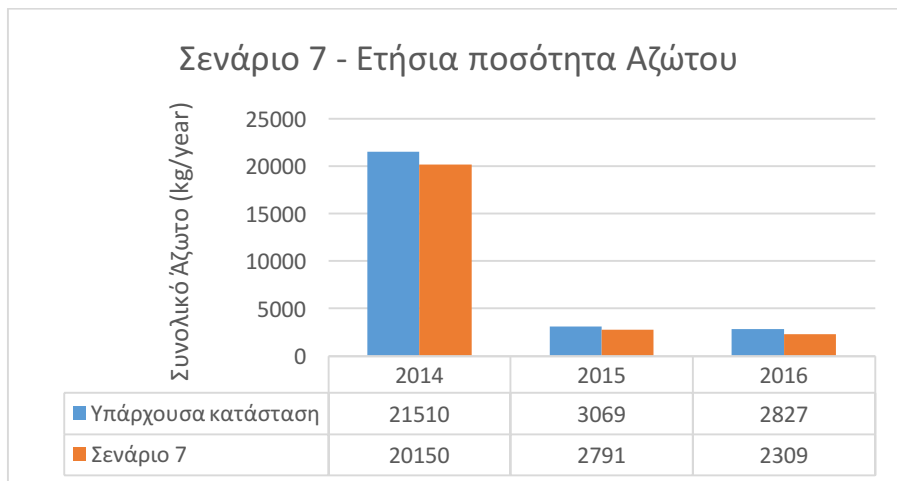


Εικόνα Β.34: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 6

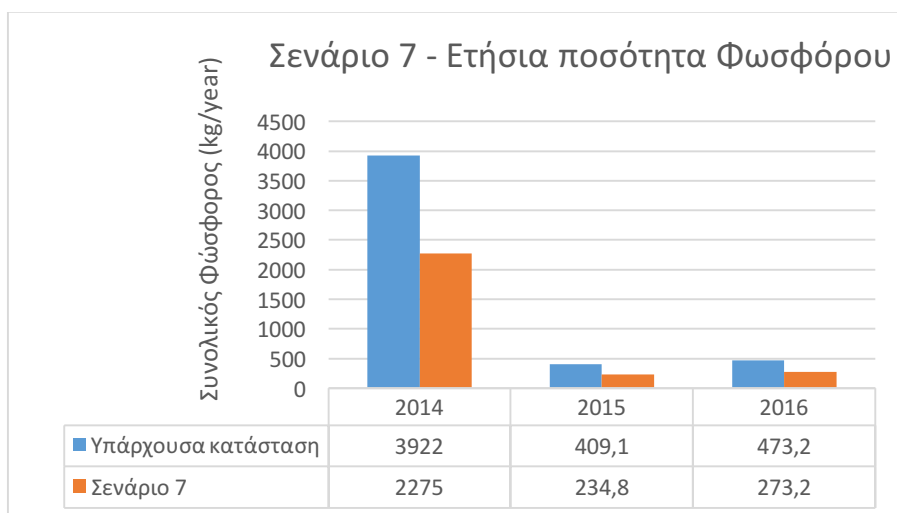


Εικόνα Β.35: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 6

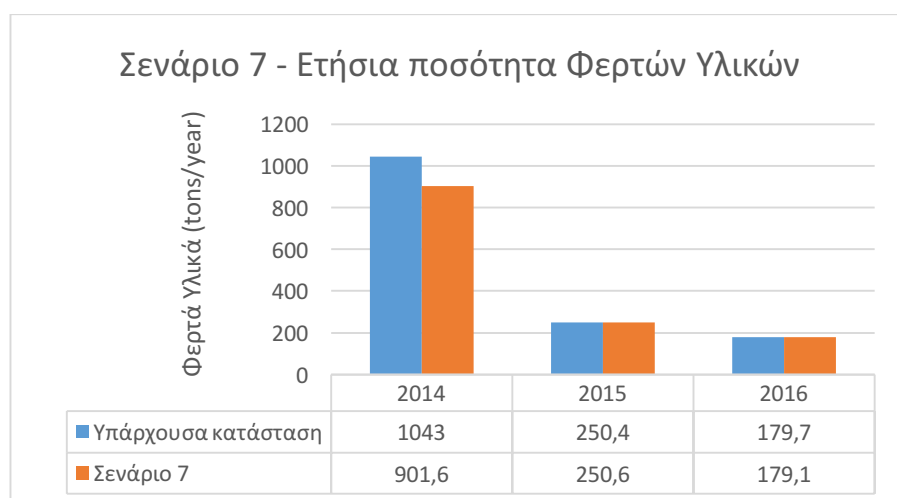
### Διαγράμματα Σεναρίου 7: Αποκλειστική καλλιέργεια αμπελιού



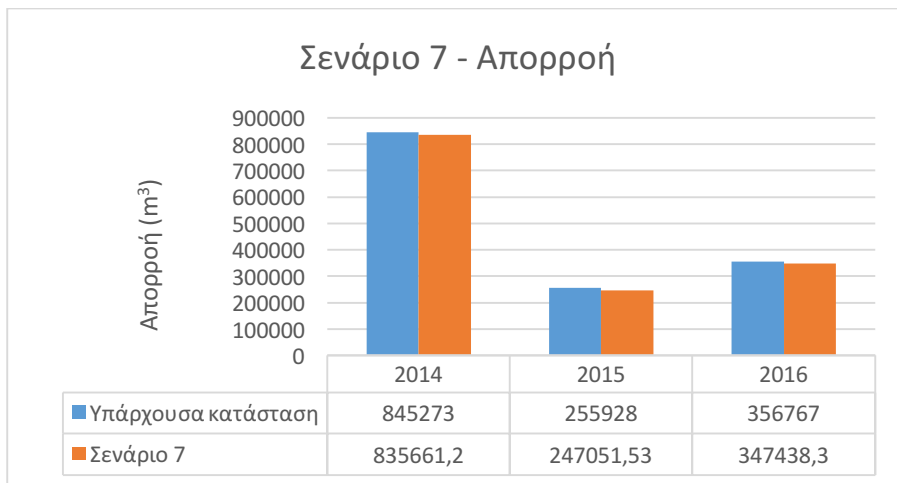
Εικόνα Β.36: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας αζώτου για το Σενάριο 7



Εικόνα Β.37: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φωσφόρου για το Σενάριο 7



Εικόνα Β.38: Συγκριτικό διάγραμμα ποσότητας φερτών υλικών για το Σενάριο 7



Εικόνα Β.39: Συγκριτικό διάγραμμα απορροής για το Σενάριο 7