



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση υδατικού δυναμικού σε συνθήκες αποδάσωσης: Εφαρμογή
στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα



Φώτης Ανάργυρος-Ελευθέριος

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση υδατικού δυναμικού σε συνθήκες αποδάσωσης: Εφαρμογή
στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα

Φώτης Ανάργυρος-Ελευθέριος

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2015

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xi
Abstract	xii
Κατάλογος συμβόλων	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας	1
2 Υδρολογικά μοντέλα	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων	3
2.3 Άλλα υδρολογικά μοντέλα	4
2.3.1 Μοντέλο MORIN	4
2.3.2 Μοντέλο MERO	4
2.3.3 Μοντέλο STANFORD IV	4
2.3.4 Μοντέλο SHE	5
2.3.5 Μοντέλο ILWAS	6
2.4 Το υδρολογικό μοντέλο SWAT	7
2.4.1 Γενικά στοιχεία	7
2.4.2 Ο υδρολογικός κύκλος	7
2.4.3 Υδρολογικές διεργασίες	8
3 Μεθοδολογία προετοιμασίας δεδομένων	19
3.1 Προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων	19
3.1.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους	19
3.1.2 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης	19
3.1.3 Προετοιμασία δεδομένων χρήσεων γης	21
3.1.4 Προετοιμασία δεδομένων εδαφολογικής σύστασης	26
3.1.5 Χάρτης κλίσεων γης	26
3.2 Προετοιμασία βροχομετρικών δεδομένων	26
3.2.1 Γενικά	26
3.2.2 Έλεγχος ομογένειας	26
3.2.3 Έλεγχος πληρότητας και συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων	28
3.2.4 Μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης	29
3.2.5 Βροχοβαθμίδα – Αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης	30
3.3 Προετοιμασία μετεωρολογικών δεδομένων	30

3.3.1	Θερμοκρασία αέρα.....	30
3.3.2	Ηλιακή ακτινοβολία.....	31
3.3.3	Υγρασία ατμόσφαιρας.....	32
3.3.4	Μέση ταχύτητα ανέμου.....	33
3.4	Εξάτμιση και διαπνοή.....	33
3.4.1	Γενικά.....	33
3.4.2	Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής.....	34
4	Λεκάνη απορροής και δεδομένα	37
4.1	Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.....	37
4.1.1	Γενικά στοιχεία.....	37
4.1.2	Γεωμορφολογικά – Γεωλογικά στοιχεία.....	37
4.1.3	Κλιματολογικά – Υδρολογικά στοιχεία.....	38
4.2	Λεκάνη απορροής Αχελώου.....	39
4.2.1	Γενικά.....	39
4.2.2	Λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα.....	39
4.3	Γεωγραφικά δεδομένα για τη λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα.....	41
4.3.1	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	41
4.3.2	Υψογραφική καμπύλη.....	42
4.4	Υδρολογικά δεδομένα για τη λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα.....	43
4.4.1	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και βροχομετρικοί σταθμοί.....	43
4.4.2	Συσχέτιση υψών βροχόπτωσης – Εκτίμηση χωρικά μέσης βροχόπτωσης.....	44
4.4.3	Έλεγχος ομογένειας.....	46
4.4.4	Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων και μέσο βροχομετρικό ύψος με υψομετρική αναγωγή.....	47
4.4.5	Θερμοκρασία αέρα και αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης.....	48
4.4.6	Απορροές.....	49
4.5	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων χρήσεων γης.....	50
4.6	Εδαφολογικά δεδομένα.....	53
5	Βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT	59
5.1	Εκτέλεση προγράμματος.....	59
5.2	Βαθμονόμηση.....	63
5.3	Έλεγχος αποτελεσμάτων μοντέλου.....	65
5.3.1	Γενικά.....	65
5.3.2	Δείκτες ελέγχου.....	65
5.3.3	Έλεγχος του μοντέλου για την προσομοίωση στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα.....	66
5.3.4	Αποτελέσματα της προσομοίωσης SWAT.....	67
6	Επίδραση αποδάσωσης στην απορροή της λεκάνης της Λίμνης Πλαστήρα	71
6.1	Εισαγωγή.....	71

6.2	Το πρόβλημα της αποδάσωσης	71
6.3	Η κατασκευή των σεναρίων	72
6.4	Σενάριο 1	72
6.5	Σενάριο 2	77
6.6	Σενάριο 3	81
6.7	Μελέτη των μεταβολών για τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου	86
7	Συμπεράσματα	89
	Αναφορές	91
	Στην ελληνική γλώσσα	91
	Ξενόγλωσσες	91
	Διαδικτυακές.....	92
	Παράρτημα Α: Πίνακες	93
	Παράρτημα Β: Σχήματα	95

Ευχαριστίες

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ναλμπάντη, επίκουρο καθηγητή του Ε.Μ.Π για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κουκουβίνο, ερευνητή στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών για τη διάθεση υλικού που χρειάστηκε για την αρχική εκτέλεση του μοντέλου καθώς επίσης και το προσωπικό του Εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σ.Α.Τ.Μ για τις υποδείξεις και την προθυμία τους. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τη συμπαράσταση και την κατανόηση καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στις επιπτώσεις των σεναρίων αλλαγής χρήσης γης στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης της Λίμνης Πλαστήρα στη Θεσσαλία. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζονται σενάρια αποδάσωσης και μετατροπής των περιοχών αυτών σε βοσκοτόπια ώστε να μελετηθεί η επίδραση της αποδάσωσης στην άμεση απορροή της λεκάνης. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται χρήση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Τα στοιχεία εισόδου που ήταν απαιτούνταν για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης, ήταν το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής, οι ψηφιακοί χάρτες των χρήσεων γης και των εδαφών καθώς επίσης και μετεωρολογικά δεδομένα σε ημερήσιο βήμα.

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες και μετρημένες συνολικές απορροές στην έξοδο της λεκάνης στη θέση του φράγματος της Λίμνης Πλαστήρα. Η βαθμονόμηση κρίθηκε επιτυχής, όταν επιτεύχθηκε υψηλός συντελεστής NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τα κριτήρια ελέγχου R^2 και RSR ώστε να ελεγχθεί η τελική επίδοση του μοντέλου.

Κατασκευάστηκαν τρία υποθετικά σενάρια με βάση τα οποία δασικές εκτάσεις μετατρέπονταν σε βοσκοτόπια. Πρακτικά, η παράμετρος που διαφοροποιήθηκε ήταν ο αριθμός καμύλης CN και η έκταση αποδάσωσης για κάθε σενάριο. Για κάθε ένα από τα τρία σενάρια υπολογίστηκαν οι μεταβολές στην απορροή της λεκάνης καθώς και η επίδραση της αποδάσωσης στις υπόλοιπες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου.

Abstract

This study focuses on the effects of land use change scenarios on the water balance of the Lake Plastiras basin in Thessaly, central Greece. More precisely, deforestation scenarios are built in order to explore the direct effect of deforestation on the direct runoff component of the total discharge of the basin. To achieve this, the water balance model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was used. The input features that were required for the simulation of the hydrological cycle of the basin, were the Digital Elevation Model of the area, the land use and soil digital maps as well as the meteorological data on a daily step.

The model was calibrated by comparing the simulated and observed flows of the basin at the dam named after Plastiras. The calibration finally came to an end when a satisfying value of the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient was achieved. The R^2 and the RSR criteria were also used for determining the final performance of the model. Three hypothetical scenarios were built, which correspond to clearing forest areas and transforming them into pasture areas. Practically, the parameter that was altered for each scenario was the CN value and the area that the deforested area covered. For each one of the three scenarios, the mean monthly and yearly changes on direct runoff were calculated as well as the effect of the deforestation on other components of the hydrologic cycle.

Κατάλογος συμβόλων

SW_t	Η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό
SW_0	Η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό
t	Ο χρόνος σε ημέρες
R	Η ημερήσια βροχόπτωση
Q	Η ημερήσια επιφανειακή απορροή
ET	Η εξατμισοδιαπνοή
P	Η διήθηση
QR	Η υπόγεια ροή
s	Μια παράμετρος κατακράτησης
CN_{2S}	Η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στην εκάστοτε κλίση
CN_3	Ο αριθμός καμπύλης για υγρές υδρολογικές συνθήκες
S	Η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής
s_1	Η τιμή της παραμέτρου από την σχέση (2.3)
SW	Το ποσοστό εδαφικής υγρασίας
w_1, w_2	Παράμετροι σχήματος
s_{prev}	Η παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας
O	Ο ρυθμός διήθησης σε mm νερού/ημέρα
SW_0	Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρα σε mm
Δt	Το χρονικό βήμα (24 h)
TT	Ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από το στρώμα i (σε h)
H_i	Η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/h
FC_i	Η υδατοικανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού

O_{i-1}	Η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/d
TT_{ci}	Ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από τη ρωγμή σε ώρες
S	Ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη
t	Ο χρόνος σε ώρες
q_{lat}	Η υποδερμική ροή (m^3/h)
i	Ο ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h
L	Το μήκος της μισγάγγειας (m)
v	Η ταχύτητα ροής στην έξοδο της λεκάνης
w	Το πλάτος της μισγάγγειας
H_0	Το πάχος της κορεσμένης ζώνης κάθετα προς την κλίση στην έξοδο (mm/mm)
K_s	Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
θ_d	Η ικανότητα αποστράγγισης του εδάφους (mm/mm)
q_{lat}	Η ενδιάμεση απορροή (mm/ημέρα)
V_{sa}	Η αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα
R_c	Η επαναφόρτιση
re_{vap}	Η ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ
q_{rf}	Η υπόγεια ροή
$perc_{qw}$	Το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα και χάνεται
WU_{SA}	Η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα
K_d	Η υδραυλική αγωγιμότητα
L	Το μήκος πεδίου ροής
h	Το ύψος του νερού
ET_{act}	Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ
βr	Ο συντελεστής re_{vap}
$re_{vap_{st}}$	Η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος

can_{day}	Η μέγιστη ποσότητα νερού που παγιδευεται στα φυλλώματα μια ημέρα
can_{mx}	Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παγιδευτεί στα φυλλώματα όταν αυτά είναι ήδη αναπτυγμένα
LAI	Ο δείκτης φυλλωμάτων
λ	Λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης ($MJ\ kg^{-1}$)
E_0	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/d)
H_0	Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)
α	Συντελεστής αναγωγής
λ_1	Κλίση του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος της αθροιστικής καμπύλης
λ_2	Κλίση του δεύτερου ευθύγραμμου τμήματος της αθροιστικής καμπύλης
T_{mx}	Η μέγιστη θερμοκρασία αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)
T_{mn}	Η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)
\bar{T}_{av}	Η μέση θερμοκρασία του αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)
E_p	Μέγιστη διαπνοή για μια συγκεκριμένη μέρα (mm H ₂ O)
E'_0	Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για εξάτμιση νερού από φυλλώματα (mm H ₂ O)
E_S	Ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/μερα
EA	Ο δείκτης εδάφους, οποίος βρίσκεται από τη σχέση
CV	Το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha
SNO_{mlt}	Η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/ημέρα
b_{mlt}	Ο παράγοντας τήξης χιονιού για την μέρα εκείνη (mm/day- $^{\circ}C$)
sno_{cov}	Το ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι
T_{snow}	Η θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε ($^{\circ}C$)
T_{mx}	Η μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη ($^{\circ}C$)
T_{mlt}	Η θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού

b_{mlt6}	Παράγοντας τήξης χιονιού για την 21 ^η Ιουνίου
b_{mlt12}	Παράγοντας τήξης χιονιού για την 21 ^η Δεκέμβρη
E_c	Ο δείκτης κυκλικότητας
S	Η επιφάνεια της λεκάνης
P	Η περίμετρος της λεκάνης
E'_c	Ο δείκτης Cravelius
E_L	Ο δείκτης επιμήκυνσης
L	Χαρακτηριστικό μήκος της λεκάνης
z_m	Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
z_i	Το μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής
A_i	Το εμβαδό της κάθε υποπεριοχής
x_i	Το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για το σταθμό βάσης
y_i	Το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για τον εξεταζόμενο σταθμό
\bar{x}	Το αντίστοιχο μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος για το σταθμό βάσης
\bar{y}	Το αντίστοιχο μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος για τον εξεταζόμενο σταθμό
X_i	Το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i
i	Το υδρολογικό έτος i
$i + 1$	Τάξη του παλαιότερου κατα 1 έτος στοιχείου
P_Y	Το ύψος βροχόπτωσης για το σταθμό Y
k	Το πλήθος των γειτονικών σταθμών
P_i	Το αντίστοιχο ύψος βροχής για καθένα από τους γειτονικούς σταθμούς
N_Y	Η κανονική βροχόπτωση του υπο συμπλήρωση σταθμού
N_i	Η (κανονική) μέση βροχόπτωση στους γειτονικούς σταθμούς
w_i	Ο συντελεστής επιρροής
d_i	Η απόσταση του εκάστοτε σταθμού i από τον σταθμό Y

b	Εκθέτης με τυπική τιμή 2
S_i	Εμβαδό ζώνης επιρροής i
S_i	Οι εκτάσεις μεταξύ των ισοϋέτιων καμπυλών
$\bar{P}_{i-1,i}$	Το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δυο ισοϋέτιων καμπυλών
β	Η βροχοβαθμίδα
P_0	Το μέσο βροχομετρικό ύψος
\bar{z}	Ο σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν την λεκάνη
A_h	Απόλυτη υγρασία
R_h	Σχετική υγρασία
e	Εκατοστιαία αναλογία της πραγματικής τάσης υδρατμών
e_s	Εκατοστιαία αναλογία της μέγιστης τάσης υδρατμών
r	Αναλογία μείγματος
M_U	Μάζα υδρατμών
M_d	Μάζα του ξηρού αέρα
P_w	Κατακρημνίσιμη ποσότητα νερού
q	Ειδική υγρασία
T_d	Η θερμοκρασία σημείο δρόσου ($^{\circ}\text{C}$)
f	Η σχετική υγρασία (%)
T	Η μέση μηνιαία θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)
E	Η εξάτμιση σε mm/ημέρα
γ	Η ψυχομετρική σταθερά ($\gamma=0.485 \text{ mmHg}/^{\circ}\text{C}$)
f	Συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας
R	Η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής

R_A	Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμοσφαιρας σε mm/ημέρα
N	Η μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια
n	Οι ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας
σ	Η σταθερά Stephan-Boltzman ($2.01 \cdot 10^{-9}$ mm/ημέρα)
T_{AK}	Η θερμοκρασία του αέρα σε K
r	Ο αριθμός albedo
E_α	Η παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών
Δ	Η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C
L	Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
E	Ο ρυθμός της εξάτμισης
G	Η πυκνότητα ροής της θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος
ρ	Η πυκνότητα του αέρα
C_p	Η ειδική θερμότητα του αέρα υπο σταθερή πίεση
R_N	Η πυκνότητα ροής της καθαρά εισερχόμενης ακτινοβολίας
e_s	Ο κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας
e_a	Η τάση των υδρατμών κορεσμένου αέρα
Δ	Η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας
r_a	Η αεροδυναμική αντίσταση
r_c	Η αντίσταση της καλλιέργειας
E_{rc}	Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/ημέρα
S_0	Η εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ/(m ² d)
λ	Η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης σε kJ/kg
T_a	Η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C
λ	Ο συντελεστής αναγωγής

β	Η βροχοβαθμίδα
P_0	Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση
$Q_{\text{παρ}}$	Οι παρατηρημένες μηνιαίες παροχές
$Q_{\text{εκτ}}$	Οι εκτιμημένες μηνιαίες παροχές
$\hat{Q}_{\text{εκτ}}$	Ο μέσος όρος των παρατηρημένων μηνιαίων παροχών
K_{usle}	Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Το πρόβλημα της αποδάσωσης δασικών εκτάσεων και η μετατροπή τους σε χορτολιβαδικές εκτάσεις ή βοσκοτόπια αποτελεί ένα ζήτημα που έχει πάρει διαστάσεις τον τελευταίο αιώνα στη χώρα μας. Οι επιπτώσεις που δημιουργεί τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε υδρολογικό επίπεδο είναι μεγάλες. Η βλάστηση και ειδικότερα το δάσος βοηθά στην διήθηση του νερού στο έδαφος, συγκρατεί μέρος της βροχής στις ρίζες και στη φυτοκόμη και αποτρέπει τη δημιουργία χειμαρρικών απορροών, ενώ, παράλληλα, υποβαθμίζει αρκετά τα πλημμυρικά γεγονότα και τις κατολισθήσεις σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε 6 κεφάλαια μέσα από τα οποία γίνεται αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών και των επεξεργασιών που έγιναν για την περάτωσή της. Πιο αναλυτικά η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: «Εισαγωγή»

Κεφάλαιο 2: «Υδρολογικά μοντέλα». Γίνεται παρουσίαση διαφόρων τύπων υδρολογικών μοντέλων, ενώ γίνεται εκτενής αναφορά στο μοντέλο SWAT και στις διεργασίες του και εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο τις επιτελεί.

Κεφάλαιο 3: «Μεθοδολογία προετοιμασίας δεδομένων». Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι και οι διαδικασίες με τις οποίες προετοιμάζονται τα δεδομένα εισόδου μιας προσομοίωσης SWAT.

Κεφάλαιο 4: «Λεκάνη απορροής και συλλογή δεδομένων». Εδώ γίνεται πλήρης παρουσίαση της περιοχής μελέτης και αναλύεται η συλλογή των δεδομένων για την λεκάνη απορροής που έχει επιλεγεί.

Κεφάλαιο 5: «Εκτέλεση, βαθμονόμηση και έλεγχος του μοντέλου». Παρουσιάζεται η εισαγωγή των δεδομένων εισόδου στο μοντέλο, η εκτέλεσή του ενώ αναλύεται επίσης η βαθμονόμηση και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων του.

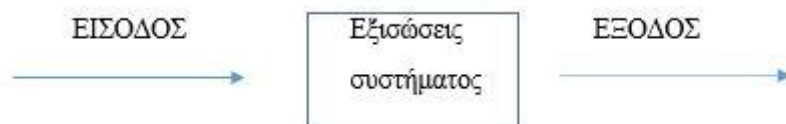
Κεφάλαιο 6: «Επίδραση αποδάσωσης στη λεκάνη και κατασκευή σεναρίων». Κατασκευάζονται τρία σεναρία αποδάσωσης και μελετάται η μεταβολή της επιφανειακής απορροής αλλά και η συμπεριφορά των υπολοίπων συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου και εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

2 Υδρολογικά μοντέλα

2.1 Γενικά

Ως μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής ορίζεται ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων, είτε αλγεβρικών είτε διαφορικών εξισώσεων ή λογικών σχέσεων, που συσχετίζουν τη βροχόπτωση με την απορροή (Ναλμπάντης, 2007). Ως υδρολογική προσομοίωση ορίζεται η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η ταχύτητα ανέμου κ.λ.π θεωρούνται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής. Στην συνέχεια γίνεται χρήση ενός συνόλου μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή. Τα τελευταία χρόνια το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διεργασιών. Τέλος, η επίλυση του μοντέλου δίνει την απορροή και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού (Τσακίρης, 2006).



Σχήμα 2.1: Απλή αναπαράσταση υδρολογικού μοντέλου

Οι φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η κατακράτηση, η εξατμισοδιαπνοή, η διήθηση, η εδαφική υγρασία, η επιφανειακή, η ενδιάμεση και η υπόγεια απορροή.

2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων

Τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής ταξινομούνται σε κατηγορίες με κριτήρια όπως η χωρική μεταβλητότητα διεργασιών, το είδος των εξισώσεων που περιλαμβάνουν, ο χειρισμός της αβεβαιότητας, το χρονικό τους βήμα, τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο κλπ.

Τα μοντέλα που ταξινομούνται με κριτήριο το είδος των εξισώσεων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μοντέλα «μαύρου κουτιού», (black box). Περιγράφονται με σχέσεις της θεωρίας της ανάλυσης συστημάτων, χωρίς θεώρηση φυσικών νόμων ούτε και εμπειρικών σχέσεων.
- Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual). Περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο.
- Φυσικής βάσης. Περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις που αναπαριστούν φυσικούς νόμους.

Με κριτήριο τη χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών, χωρίζονται:

- Αδιαμέριστα (lumped). Η λεκάνη θεωρείται μια χωρική ενότητα με ενιαία υδρολογικά μεγέθη και λοιπά χαρακτηριστικά.
- Κατανεμημένα (distributed). Η λεκάνη διασπάται σε τμήματα με διαφορετικά υδρολογικά μεγέθη.

Με κριτήριο το χειρισμό της αβεβαιότητας, τα μοντέλα χωρίζονται:

- Αιτιοκρατικά (deterministic). Τα υδρολογικά μεγέθη έχουν σταθερές τιμές χωρίς αβεβαιότητα.
- Στοχαστικά (stochastic). Ορισμένα εκ των υδρολογικών μεγέθη, έχουν αβεβαιότητα.

Τέλος, με κριτήριο τη λειτουργία τους σε σχέση με το χρόνο.

- Μοντέλα υδρολογικού γεγονότος (event based). Λειτουργούν ανά πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγουν μόνον τις κύριες φυσικές διεργασίες των πλημμυρών.
- Μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time). Αναπαριστούν την πλήρη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών και σε υγρές και σε ξηρές περιόδους.

2.3 Άλλα υδρολογικά μοντέλα

2.3.1 Μοντέλο MORIN

Το μοντέλο αυτό είναι αντιπροσωπευτικό παράδειγμα απλού προσδιοριστικού μοντέλου. Τα στάδια των υπολογισμών που εκτελούνται είναι τα εξής:

1. Ποσότητα νερού από την τήξη χιονιού
2. Εξατμισοδιαπνοή
3. Διήθηση
4. Ενδιάμεση απορροή
5. Υπόγεια απορροή
6. Επιφανειακή απορροή
7. Αποθήκευση στη άνω στρώμα
8. Αποθήκευση στο κάτω στρώμα
9. Ολική ποσότητα νερού διαθέσιμη για την απορροή
10. Απορροή

Το μοντέλο περιλαμβάνει 17 παραμέτρους και η ρύθμιση είναι είτε χειροκίνητη είτε αυτόματη με πρόγραμμα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης στόχου. (Αθανασιά, 2010)

2.3.2 Μοντέλο MERO

Είναι ένα προσδιοριστικό παραμετρικό μοντέλο, το οποίο δέχεται ως δεδομένα εισόδου ημερήσιες τιμές υψών βροχής P (mm) και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής E_p (mm) ενώ μπορεί να παράγει συνθετικές χρονοσειρές ημερησίων τιμών απορροής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Το μοντέλο περιέχει 7 άγνωστες παραμέτρους που προσδιορίζονται μετά από βαθμονόμηση, χρησιμοποιώντας μετρημένα στοιχεία υψών απορροής.

2.3.3 Μοντέλο STANFORD IV

Είναι ένα προσδιοριστικό, αδρομερές, παραμετρικό μοντέλο. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται είναι η ωριαία βροχόπτωση, η ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή και η ημερήσια θερμοκρασία και ακτινοβολία για τον υπολογισμό της απορροής από την τήξη χιονιού. Η λεκάνη απορροής, διαιρείται σε υποπεριοχές που είναι ομογενείς σε σχέση με τον

τύπο εδάφους, βλάστησης, τοπογραφίας κ.λ.π. Ο αριθμός των υποπεριοχών είναι συνήθως ίσος με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων βροχομετρικών σταθμών.

Η κατακράτηση στη φυτοκάλυψη προσομοιώνεται μέσω της αποθηκευτικής ικανότητας κατακράτησης, η οποία θεωρείται ότι είναι μεταξύ 0 και 5 mm. Η βροχόπτωση κατακρατείται στη φυτοκάλυψη μέχρι πληρώσεως της αποθηκευτικής ικανότητάς της, η οποία εκκενώνεται από τη δυνητική εξάτμιση. Η εξάτμιση κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχής αυξάνει τις απώλειες κατακράτησης στη φυτοκάλυψη.

Η αδιαπέρατη περιοχή μιας λεκάνης προσομοιώνεται με εκτροπή ενός σταθερού ποσοστού της βροχόπτωσης προς το υδατόρευμα. Το ποσοστό αυτό είναι ίσο με το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής της λεκάνης.

Η διήθηση στο έδαφος μεταβάλλεται γραμμικά, σαν συνάρτηση του λόγου της υγρασίας της κατώτερης εδαφικής ζώνης προς την ονομαστική αποθήκευση της ζώνης αυτής. Η υπεδάφια ροή αυξάνει όσο αυξάνει η εδαφική υγρασία. Αποθηκεύεται και ένα τμήμα της απελευθερώνεται προς το υδατόρευμα σε κάθε χρονικό βήμα.

Η επιφανειακή απορροή είτε αποθηκεύεται στην άνω εδαφική ζώνη, είτε μετατρέπεται σε ροή στην επιφάνεια του εδάφους υπολογιζόμενη από μια απλή εξίσωση συνέχειας.

Η ποσότητα νερού που εισέρχεται στο υπόγειο στρώμα είτε προωθείται προς την βαθιά ή αδρανή υπόγεια αποθήκευση μη συνεισφέροντας στην απορροή ως υπόγεια απορροή. του υδατορεύματος, είτε προωθείται προς την υπόγεια αποθήκευση από την οποία στη συνέχεια εισέρχεται στο υδατόρευμα.

2.3.4 Μοντέλο SHE

Το μοντέλο SHE είναι ένα καταναμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης που προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

Κατακράτηση στη φυτοκάλυψη. Η συνιστώσα αυτή υπολογίζει την καθαρή βροχόπτωση που φτάνει στο έδαφος, την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στη φυτοκάλυψη καθώς και την εξάτμιση.

Εξάτμιση. Η προσομοίωση της δυνητικής και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους οι οποίες δίνουν στο μοντέλο την ελαστικότητα να προσαρμόζεται στα δεδομένα των εκάστοτε τοπικών συνθηκών.

Επιφανειακή απορροή. Για τον υπολογισμό της υιοθετείται μια δισδιάστατη λύση βασισμένη στις εξισώσεις Saint Venant, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Ποτάμια ροή. Ο υπολογισμός της ροής του υδατορεύματος βασίζεται επίσης στις εξισώσεις Saint Venant οι οποίες επιλύονται σε μονοδιάστατη μορφή.

Ακόρεστη υπεδάφια ροή. Η συνιστώσα αυτή του μοντέλου υπολογίζει την εδαφική υγρασία και την κατανομή της πίεσης στην ακόρεστη ζώνη, η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα.

Κορεσμένη υπεδάφια ροή. Αυτή η συνιστώσα υπολογίζει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και τη ροή η οποία θεωρείται μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση στην ακόρεστη ζώνη.

Τήξη χιονιού. Ο σκοπός της συνιστώσας αυτής είναι να προσομοιώσει το πάχος του στρώματος χιονιού, όπως αυτό επηρεάζεται από τα κατακρημνίσματα και την τήξη και να προσομοιώσει

το ρυθμό απόληξης από το έδαφος του νερού που προέρχεται από την τήξη του χιονοστρώματος.

Το γεγονός ότι οι προαναφερθείσες παράμετροι βασίζονται ή προέρχονται από μετρήσεις, μειώνει την ανάγκη για βελτιστοποίηση στις περισσότερες παραμέτρους του μοντέλου.

2.3.5 Μοντέλο ILWAS

Σκοπός του μοντέλου ILWAS είναι ο προσδιορισμός τόσο των ποσοτικών (παροχές στο υδατόρευμα, απορροές από κάθε εδαφικό στρώμα) όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών (pH, συγκεντρώσεις ιόντων κλπ) της απορροής. Με τον τρόπο αυτό, εκτιμάται η επίδραση ανθρωπογενών αλλαγών και διαχειριστικών αποφάσεων τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα της απορροής.

Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά υπο-μοντέλα:

1. Υδρολογικό υπο-μοντέλο
 - Διαχωρισμός βροχής και χιόνος
 - Δυνητική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη
 - Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
 - Πραγματική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη και πραγματική εξάτμιση
 - Υπεδάφια και υπόγεια ροή
 - Ροή στην επιφάνεια του εδάφους
 - Διόδευση κατά μήκος του υδατορεύματος
2. Χημικό υπο-μοντέλο
 - Χημικές συγκεντρώσεις ιόντων ενδορροής
 - α) Ξηρή εναπόθεση στη φυτοκάλυψη
 - β) Φυλλική έκχυση
 - γ) Οξείδωση
 - Χημικές διαδικασίες οργανικού στρώματος
 - α) Φυλλόπτωση
 - β) Απορρόφηση τροφικών συστατικών
 - γ) Ριζική αναπνοή
 - Χημικές διαδικασίες εδαφικού στρώματος
 - α) Νιτροποίηση
 - β) Απορρόφηση ιόντων
 - γ) Ανταλλαγή κατιόντων
 - δ) Αποσύνθεση πετρωμάτων

2.4 Το υδρολογικό μοντέλο SWAT

2.4.1 Γενικά στοιχεία

Το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής SWAT (Soil & Water Assessment Tool), αποτελεί την ένωση των δύο προγενέστερων προγραμμάτων υδρολογικής προσομοίωσης, του SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) και του ROTO (Routing Outputs to Outlets).

Πρόκειται για ένα υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης, το οποίο αναπτύχθηκε το 1995, από τη συνεργασία του Αμερικανικού Υπουργείου Γεωργίας (U.S Department of Agriculture) με το πανεπιστήμιο του Τέξας.

Έχει ως αντικείμενο την προσομοίωση της ποιότητας και της ποσότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και την πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις χρήσεις γης, τις πρακτικές διαχείρισης γης και την κλιματική αλλαγή. Το SWAT χρησιμοποιείται ευρέως για την πρόληψη και τον έλεγχο της διάβρωσης των εδαφών, τον έλεγχο της ρύπανσης και τις πρακτικές της περιφερειακής διαχείρισης μεγάλων λεκανών απορροής. (<http://swat.tamu.edu>).

Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί κατα βάση κυρίως υδρομετεωρολογικά στοιχεία και έχει τις εξής ιδιότητες:

1. Έχει φυσική βάση
2. Χρησιμοποιεί έτοιμα, ευρέως διαθέσιμα δεδομένα
3. Είναι υπολογιστικά οικονομικό ώστε να εφαρμόζεται σε μεγάλες λεκάνες και να απαιτεί λογικό χρόνο

Είναι μοντέλο συνεχούς χρόνου, ικανό να προσομοιώνει μακρές περιόδους, για τον υπολογισμό των επιπτώσεων από αλλαγές διαχείρισης. (Neitsch et al., 1999)

Πιο συγκεκριμένα, δέχεται ως δεδομένα εισόδου στοιχεία σχετικά με τις εδαφικές ιδιότητες, τη διαχείριση και τη χρήση της γης, στοιχεία τοπογραφίας, στοιχεία κλιματολογικά και υπολογίζει μέσω κατάλληλων εξισώσεων και υπολογισμών, αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά και τα αγροχημικά στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι για την σωστή υδρολογική προσομοίωση, το μοντέλο χωρίζει τη λεκάνη απορροής σε υπολεκάνες μέσω των οποίων κατευθύνονται τα υδατορεύματα. Οι υπομονάδες των υπολεκανών που έχουν δημιουργηθεί, αναφέρονται ως Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης ή HRU (Hydrologic Response Units). Τα HRU παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά εδαφών, χρήσεων γης και κλίσεων και καθορίζονται από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες. Το αποτέλεσμα είναι μια πιο λεπτομερής αναπαράσταση των διεργασιών στη λεκάνη (Ναλμπάντης και Τσακίρης, 2006).

2.4.2 Ο υδρολογικός κύκλος

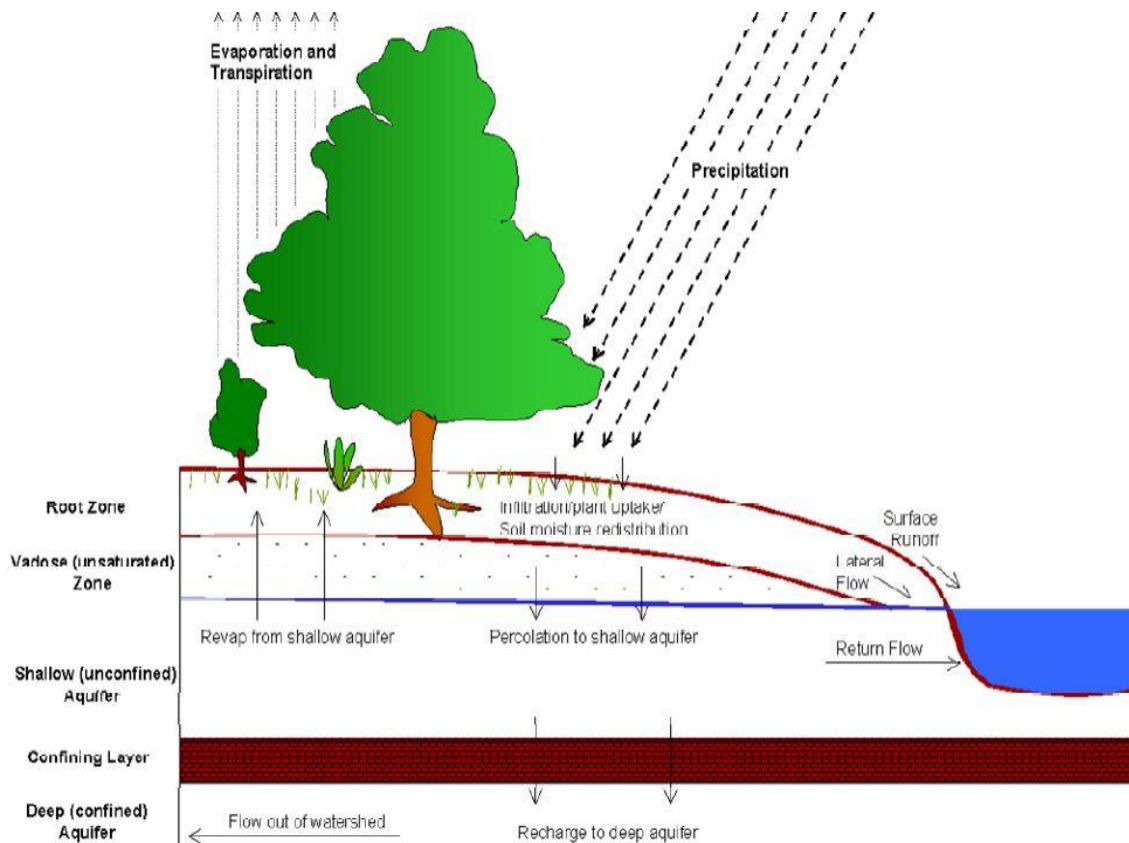
Χρησιμοποιούνται δεδομένα για τα κατακρημνίσματα, που έχουν συλλεχθεί από κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ παράλληλα το πρόγραμμα διαθέτει τη δυνατότητα να παράγει συνθετικά κατακρημνίσματα σε περίπτωση που δε διατίθενται στοιχεία γι'αυτά, χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης και αυτά εμφανίζονται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης στο έδαφος (Arnold et al , 1999).

Το νερό της βροχής είτε απορρέει επιφανειακά, είτε διηθείται στο έδαφος. Ο συντελεστής απορροής C, ο οποίος καθορίζεται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τις χρήσεις γης, καθορίζει τελικά το ποσοστό του νερού της βροχής που θα απορρεύσει και εκτιμάται με μια τροποποιημένη μέθοδο SCS. Συνολικά το μοντέλο χωρίζει το έδαφος σε 4 όγκους ελέγχου, την

επιφάνεια, το εδαφικό προφίλ του ριζοστρώματος, και τους δύο υδροφορείς, επιφανειακό και βαθύ.

Το νερό που απορρέει επιφανειακά, καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες και είναι αυτό που αποτελεί τον πλημμυρικό όγκο του επεισοδίου. Το νερό που διηθείται, ακολουθεί κατακόρυφη ή οριζόντια διαδρομή μέσα στο έδαφος, το οποίο χωρίζεται από το μοντέλο σε τρεις στρώσεις:

1. Το εδαφικό προφίλ
2. Τον επιφανειακό ή αβαθή υδροφορέα
3. Το βαθύ υδροφορέα



Σχήμα 2.2: Ο υδρολογικός κύκλος κατά το μοντέλο SWAT (Neitsch et al., 2005)

2.4.3 Υδρολογικές διεργασίες

Ο υδρολογικός κύκλος όπως προσομοιώνεται από το SWAT στηρίζεται στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (2.1)$$

Όπου,

SW_t : η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό

SW_0 : η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό

t : ο χρόνος σε ημέρες

- R : η ημερήσια βροχόπτωση
- Q : η ημερήσια επιφανειακή απορροή
- ET : η εξατμισοδιαπνοή
- P : η διήθηση
- QR : η υπόγεια ροή

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά όλες οι υδρολογικές διεργασίες που διενεργούνται από το SWAT:

Επιφανειακή απορροή: Το μοντέλο χρησιμοποιώντας ημερήσια ύψη βροχόπτωσης, είναι σε θέση να υπολογίσει και να προσομοιώσει την επιφανειακή απορροή με μια τροποποιημένη μέθοδο SCS (USDA, 1972)

Τα προτερήματα αυτής της τεχνικής είναι:

A) Είναι δοκιμασμένη μέσω πολυετών πειραμάτων και είναι αρκετά αξιόπιστη

B) Η υπολογιστική της επίδοση

Γ) Τα απαιτούμενα δεδομένα είναι εύκολα προσβάσιμα

Δ) Συσχετίζει την απορροή με το έδαφος, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης, οι οποίες αναφέρονται σε δεδομένα για τη σπορά, το θερισμό, την άρδευση των καλλιεργειών, ακόμα και με στοιχεία για την εφαρμογή θρεπτικών και φυτοφαρμάκων στις καλλιεργείες.

Ο αριθμός καμπύλης CN είναι γενικά συνάρτηση των παρακάτω:

- Υδρολογικού τύπου εδάφους
- Αρχικής υγρασίας
- Κατανομής χρήσεων γης στην λεκάνη

Στην Ελλάδα όμως, λόγω της έλλειψης δεδομένων όσον αφορά την κατάταξη των εδαφολογικών τύπων σε κατηγορίες (A, B, C, D) με βάση τα υδρολογικά τους χαρακτηριστικά, η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιείται ευρέως ή με τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Η επιφανειακή απορροή ως συνάρτηση της ημερήσιας βροχόπτωσης με χρήση καμπυλών SCS, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q = \frac{(R-0.2S)^2}{R+0.8S}, \quad R \geq 0.2 \quad (2.2)$$

$$R = 0, \quad R < 0.2S$$

Όπου:

- Q : η ημερήσια απορροή
- R : η ημερήσια βροχόπτωση
- S : μια παράμετρος κατακράτησης

Η παράμετρος S που εκφράζει τις συνολικές απώλειες με βάση τον αριθμό καμπύλης CN και μεταβάλλεται από υπολεκάνη σε υπολεκάνη, μπορεί να βρεθεί με την εξίσωση:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (mm) \quad (2.3)$$

Ο αριθμός καμπύλης CN αναφέρεται σε αρχικές συνθήκες υγρασίας κατηγορίας II (και λαμβάνεται από τους πίνακες στο ειδικό εγχειρίδιο του SWAT (SWAT-IO-Documentation-2012) είτε στο εγχειρίδιο υδρολογίας της SCS (USDA, 1972) οι οποίοι λαμβάνουν υπόψιν τις χρήσεις γης και την κατηγορία του εδάφους από υδρολογική άποψη.

Για αρχική κατάσταση υγρασίας κατηγορίας I (ξηρές συνθήκες), ή για κατάσταση υγρασίας κατηγορίας III (υγρές συνθήκες), οι αντίστοιχοι αριθμοί καμπύλης μπορούν να εξαχθούν απ' τις ακόλουθες σχέσεις:

$$CN_1 = \frac{4.2CN_2}{10 - 0.058CN_2} \quad (2.4)$$

$$CN_3 = \frac{23CN_2}{10 + 0.13CN_2} \quad (2.5)$$

Επιπροσθέτως, ο αριθμός CN_2 αναφέρεται σε κλίσεις εδάφους 5% ενώ για διαφορετική κλίση χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$CN_{2s} = \frac{1}{3} (CN_3 - CN_2) [1 - 2 \exp(-13.86s)] + CN_2 \quad (2.6)$$

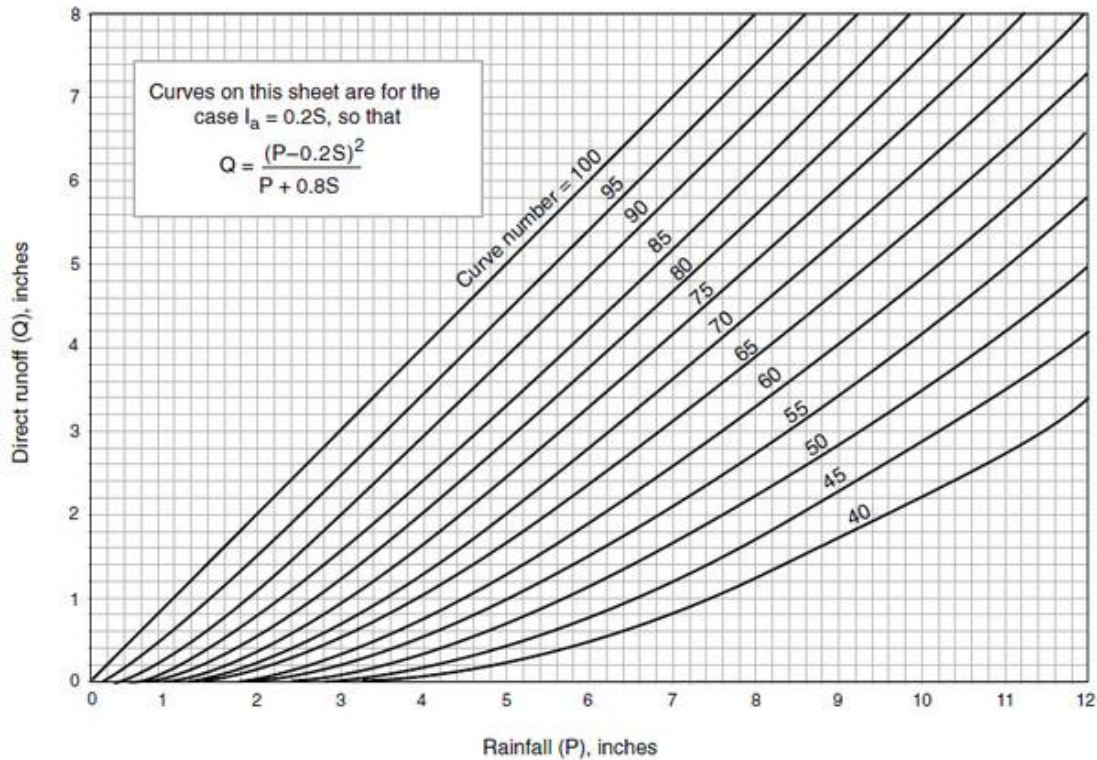
Όπου:

CN_{2s} : η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στην εκάστοτε κλίση

CN_3 : ο αριθμός καμπύλης για υγρές υδρολογικές συνθήκες

s : η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής

Ο αριθμός καμπύλης πρακτικά κυμαίνεται από 30 έως 100, με τα μεγαλύτερα νούμερα να δείχνουν μεγάλη επιφανειακή απορροή και αδιαπέρατα εδάφη ενώ τα μικρότερα νούμερα μικρότερη απορροή και εδάφη περατά (Σχ. 2.3).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα αριθμού καμπύλης κατά SCS

Τέλος, όσον αφορά το μοντέλο, αυτό χρησιμοποιεί δύο μεθόδους υπολογισμού της παραμέτρου S , μία με βάση τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία και μία με βάση την καθημερινή εξατμισοδιαπνοή των φυτών.

Η εξίσωση για την πρώτη μέθοδο (με βάση την εδαφική υγρασία):

$$S = s_1 \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp[w_1 - w_2(SW)]} \right) \quad (2.7)$$

Όπου:

s_1 : η τιμή της παραμέτρου από την σχέση (2.3)

SW : το ποσοστό εδαφικής υγρασίας

w_1, w_2 : παράμετροι σχήματος

Η εξίσωση για τη δεύτερη μέθοδο (με βάση την εξατμισοδιαπνοή):

$$s = s_{prev} + ET_i * \left[\exp \left(\frac{-cnccoef - s_{prev}}{s_1} - R_i - Q_i \right) \right] \quad (2.8)$$

Όπου:

s_{prev} : η παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας

Διήθηση: Η διήθηση αναφέρεται στην είσοδο του νερού από την επιφάνεια του εδάφους στο επόμενο εδαφικό στρώμα. Όσο το νερό που διηθείται προχωράει, το έδαφος γίνεται όλο και πιο υγρό με συνέπεια ο ρυθμός διήθησης διαρκώς να μειώνεται συναρτήσει του χρόνου, μέχρι να σταθεροποιηθεί. Ο αρχικός ρυθμός διήθησης εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα του

εδάφους σε υγρασία, πριν την βροχόπτωση. Ο τελικός ρυθμός διήθησης αντιστοιχεί στην κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους.

Το SWAT υπολογίζει τη ροή του νερού μέσα από κάθε στρώμα. Όταν ένα εδαφικό στρώμα κορεστεί τότε το νερό διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα εδάφους. Η ποσότητα του νερού που διηθείται από το κορεσμένο στρώμα προς τα κάτω υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$O_i = SW_{0i} [1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right)] \quad (2.9)$$

Όπου:

- O : ο ρυθμός διήθησης σε mm νερού/ημέρα
- SW_0 : η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρας σε mm
- Δt : το χρονικό βήμα (24hr)
- TT : ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από το στρώμα i (σε ώρες)

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στο τέλος της ημέρας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$SW_i = SW_{0i} \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (2.10)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η διήθηση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αφαιρώντας την τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (SW_i) από την αρχική (SW_0).

Ο χρόνος διόδευσης TT υπολογίζεται για κάθε εδαφικό στρώμα χωριστά, με την ακόλουθη γραμμική εξίσωση αποθήκευσης:

$$TT_i = \frac{SW_i - FC_i}{H_i} \quad (2.11)$$

Όπου:

- H_i : η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/ώρα
- FC_i : η υδατοικανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού

Η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i}\right)^{\beta_i} \quad (2.12)$$

Όπου:

SC_i είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το στρώμα i σε mm/ώρα και β_i είναι η παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάσει στο 0 καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i . Η ροή διαμέσου των ρωγμών δίνεται από σχέσεις παρόμοιες με αυτές που αναλύθηκαν παραπάνω. Η ποσότητα του διηθήματος που προκαλείται από κίνηση μέσα από μια ρωγμή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$O_i = O_{i-1} \left[\exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{ci}}\right) \right] \quad (2.13)$$

Όπου:

- O_{i-1} : η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/d

TT_{ci} : ο χρόνος διόδου του νερού μέσα από τη ρωγμή σε ώρες.

Ενδιάμεση απορροή: Όταν η επιφάνεια του εδάφους έχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα ενώ το κατώτερο στρώμα του εδάφους έχει μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και είναι σχετικά αδιαπέρατο, τότε η ποσότητα νερού της βροχής θα ξεκινήσει να διαχέεται κάθετα μέχρι να φτάσει σε αυτό το κατώτερο αδιαπέρατο στρώμα. Συνεπώς, δεν επιτυγχάνεται η κατείσδυση του νερού στον αβαθή υδροφορέα και το νερό κινείται οριζόντια (ενδιάμεση ή υποδερμική ροή).

Το SWAT περιλαμβάνει ένα μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης για την ενδιάμεση ροή και βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας της μάζας.

Πιο αναλυτικά η εξίσωση συνέχειας που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι:

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = iL - \frac{q_{lat1} - q_{lat2}}{2} \quad (2.14)$$

Όπου:

S : ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη

t : ο χρόνος σε ώρες

q_{lat} : η υποδερμική ροή (m^3/h)

i : ο ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h

L : το μήκος της μισγάγγειας (m)

Η υποδερμική ροή στην έξοδο της μισγάγγειας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{lat} = H_0 * v * w \quad (2.15)$$

Όπου:

v : η ταχύτητα ροής στην έξοδο της λεκάνης

w : το πλάτος της μισγάγγειας

H_0 : το πάχος της κορεσμένης ζώνης κάθετη προς την κλίση στην έξοδο (mm/mm)

Η ταχύτητα στην έξοδο υπολογίζεται από :

$$v = K_s \sin a \quad (2.16)$$

Όπου K_s η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Τελικά, προκύπτει ότι η ενδιάμεση απορροή μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω σχέση:

$$q_{lat} = 0.024 \frac{2SK_s \sin a}{\theta_d L} \quad (2.17)$$

Όπου:

θ_d : η ικανότητα αποστράγγισης του εδάφους (mm/mm)

q_{lat} : η ενδιάμεση απορροή (mm/ημέρα)

Υπόγεια απορροή: Το SWAT προσομοιώνει δύο υδροφορείς για κάθε υπολεκάνη. Ο ένας είναι ο επιφανειακός υδροφορέας και συνεισφέρει στη βασική ροή επιστρέφοντας ποσότητα νερού στο ποτάμι, ενώ, αντίθετα, το νερό που κατεισδύει στο βαθύ υδροφορέα χάνεται εκτός της λεκάνης απορροής.

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου για τον επιφανειακό υδροφορέα περιγράφεται παρακάτω:

$$Vsa_i = Vsa_{i-1} + R_c - revar - q_{rf} - perc_{qw} - WU_{SA} \quad (2.18)$$

Όπου:

- Vsa : η αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα
- R_c : η επαναφόρτιση
- $revar$: η ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ
- q_{rf} : η υπόγεια ροή
- $perc_{qw}$: το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα και χάνεται
- WU_{SA} : η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα

Η υπόγεια ροή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{rf} = \frac{8K_d}{L^2} h \quad (2.19)$$

Όπου:

- K_d : η υδραυλική αγωγιμότητα
- L : το μήκος πεδίου ροής
- h : το ύψος του νερού

Revar: Με τον όρο revar περιγράφεται το νερό που ρέει από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ και ενδέχεται να χαθεί μέσω εξάτμισης ή να απορροφηθεί από τις ρίζες δέντρων και φυτών. Η ποσότητα του νερού αυτού, δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} revar &= \beta r ET_{act}, \text{ αν } revar > revar_{st} \\ revar &= 0.0, \text{ αν } revar < revar_{st} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Όπου:

- ET_{act} : η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ
- βr : ο συντελεστής revar
- $revar_{st}$: η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος

Εξατμισοδιαπνοή: Το μοντέλο χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικές μεθόδους για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής.

1. Μέθοδος Penman-Monteith (1965). Απαιτεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία , τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία.
2. Μέθοδος Priestley-Taylor (1972). Απαιτεί ως δεδομένα την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα.
3. Μέθοδος Hargreaves (1985). Χρησιμοποιεί μόνο τη θερμοκρασία του αέρα.(ελάχιστη/μέγιστη)

Το μοντέλο διαχωρίζει τον υπολογισμό της εξάτμισης από τον υπολογισμό της διαπνοής των φυτών. Η εξάτμιση από το έδαφος και τα φυτά επίσης υπολογίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο.

Η αποθήκευση βρόχινου νερού στα φυλλώματα των δέντρων παίζει σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς διότι καθορίζει την ποσότητα νερού που θα φτάσει στο έδαφος. Η μέγιστη αποθήκευση νερού στα φυλλώματα έτσι όπως τη χειρίζεται το SWAT, διαφέρει από μέρα σε μέρα και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$can_{day} = can_{mx} \frac{LAI}{3}, \quad 0 \leq LAI \leq 3 \quad (2.21)$$

Όπου:

- can_{day} : η μέγιστη ποσότητα νερού που παγιδεύεται στα φυλλώματα μια ημέρα
- can_{mx} : η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παγιδευτεί στα φυλλώματα όταν αυτά είναι ήδη αναπτυγμένα
- LAI : ο δείκτης φυλλωμάτων

Με βάση την μέθοδο Hargreaves η οποία επιλέχθηκε τελικά και σε αυτή τη διπλωματική, το SWAT χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda E_0 = 0.0023 H_0 (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (2.22)$$

Όπου:

- λ : λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης ($MJ \text{ kg}^{-1}$)
- E_0 : δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/d)
- H_0 : εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
- T_{mx} : η μέγιστη θερμοκρασία αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)
- T_{mn} : η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)
- \bar{T}_{av} : η μέση θερμοκρασία του αέρα για μια συγκεκριμένη μέρα ($^{\circ}C$)

Όσον αφορά την διαπνοή των φυτών, πάλι με βάση τη μέθοδο Hargreaves το SWAT την υπολογίζει ως εξής:

$$E_p = \frac{E'_0 LAI}{3}, \quad 0 \leq LAI \leq 3$$

$$E_p = E'_0, \text{ LAI} > 3 \quad (2.23)$$

Όπου:

E_p : η μέγιστη διαπνοή για μια συγκεκριμένη μέρα (mm H₂O)

E'_0 : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για εξάτμιση νερού από φυλλώματα (mm H₂O)

LAI : ο δείκτη φυλλώματος

Η εξάτμιση του νερού από το έδαφος υπολογίζεται και το εδαφικό κάλυμμα:

$$E_s = (E_0)(EA) \quad (2.24)$$

Όπου:

E_s : ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/μέρα

EA : ο δείκτης εδάφους, οποίος βρίσκεται από τη σχέση

$$EA = \exp(-5 * 10^{-5} * CV) \quad (2.25)$$

όπου CV το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha

Τήξη χιονιού: Η τήξη του χιονιού καθορίζεται από τον άνεμο και τη θερμοκρασία της ανώτερης στρώσης του χιονιού. Η ποσότητα του τηγμένου χιονιού υπολογίζεται από το SWAT με βάση τη συνάρτηση:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} * sno_{cov} \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (2.26)$$

Όπου:

SNO_{mlt} : η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/ημέρα

b_{mlt} : ο παράγοντας τήξης χιονιού για την μέρα εκείνη (mm/day-°C)

sno_{cov} : το ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι

T_{snow} : η θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε (°C)

T_{mx} : η μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη (°C)

T_{mlt} : η θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού

Ο παράγοντας τήξης του χιονιού είναι διαφορετικός ανάλογα με την εποχή. Παίρνει τη μέγιστη τιμή το καλοκαίρι και την ελάχιστη το χειμώνα:

$$b_{mlt} = \frac{b_{mlt6} + b_{mlt12}}{2} + \frac{b_{mlt6} - b_{mlt12}}{2} * \sin \left[\left(\frac{2\pi}{365} \right) (d_n - 81) \right] \quad (2.27)$$

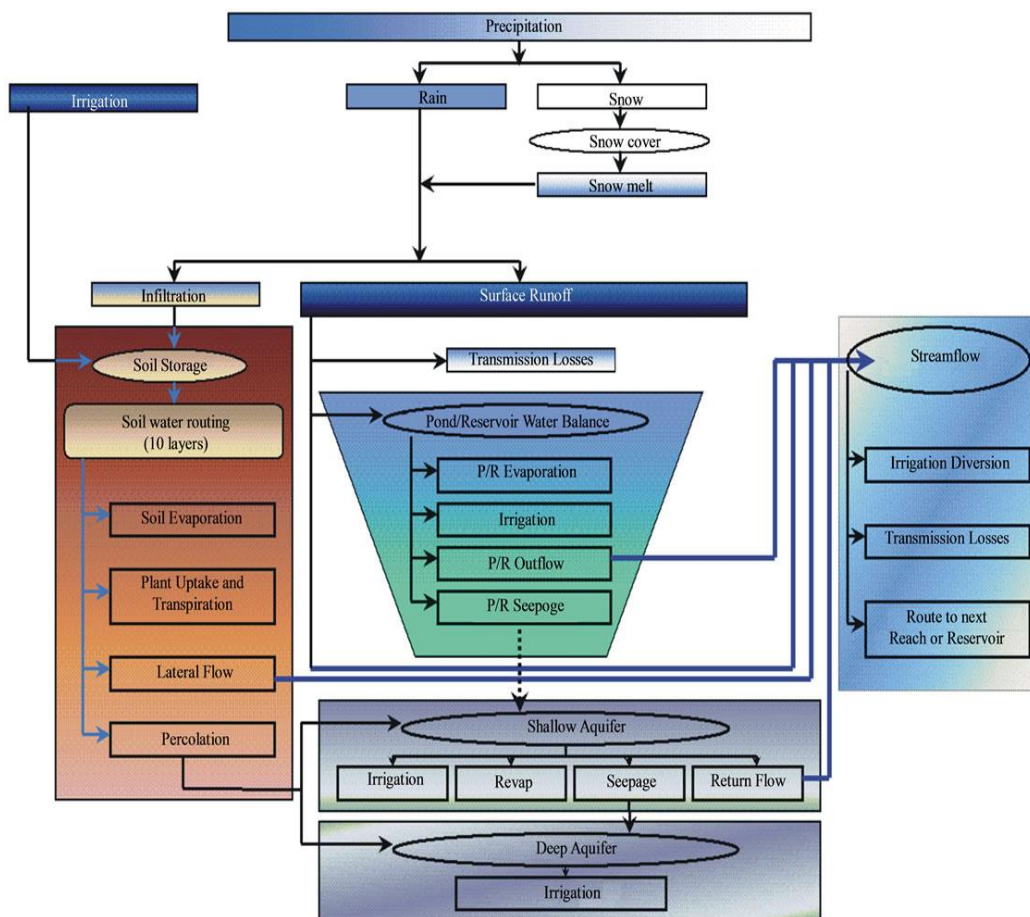
Όπου:

b_{mlt6} : παράγοντας τήξης χιονιού για την 21^η Ιουνίου

b_{mlt12} : παράγοντας τήξης χιονιού για την 21^η Δεκεμβρη

d_n : η μέρα του έτους που εξετάζεται

Στο ακόλουθο σχήμα δείχνεται ο υπολογισμός του υδρολογικού κύκλου με βάση το SWAT:



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα υπολογισμού του υδρολογικού κύκλου του μοντέλου (Neitsch et al., 2005)

3 Μεθοδολογία προετοιμασίας δεδομένων

Για την διεκπεραίωση όλων των διεργασιών και βημάτων αυτής της διπλωματικής, ήταν αναγκαία η χρήση λογισμικού GIS. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS της ESRI και συγκεκριμένα το πρόγραμμα ArcMap που αποτελεί μέρος του. Επίσης μέσα στο ArcGIS τρέξαμε και το μοντέλο ArcSWAT το οποίο εισάγεται ως επέκταση στην εργαλειοθήκη και χρησιμοποιείται εξολοκλήρου μέσα από το ArcMap.

Η χρησιμότητα του συγκεκριμένου λογισμικού στις υδρολογικές μελέτες, έγκειται στον σημαντικό αριθμό εργαλείων που διαθέτει. Συγκεκριμένα, στην εργαλειοθήκη του ArcMap, υπάρχει η εντολή «Hydrology» με την οποία ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει 11 διαφορετικές υδρολογικές διεργασίες όπως χάραξη υδροκρίτη, υπολογισμό λεκάνης απορροής, απαλοιφή βυθισμάτων, υπολογισμό συγκεντρωτικής ροής, δημιουργία υδρογραφικού δικτύου κ.α.

3.1 Προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων

Το πρώτο βήμα για την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν η αναζήτηση ή παραγωγή των απαραίτητων χαρτών και γεωγραφικών δεδομένων που εισάγονται στο πρόγραμμα. Πρόκειται για τα εξής δεδομένα και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

3.1.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Η επιφάνεια του εδάφους είναι ένα φαινόμενο συνεχές και όχι διακριτό και επομένως για την περιγραφή της απαιτούνται άπειρα σημεία και άπειρος αποθηκευτικός χώρος. Το Ψ.Μ.Ε είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της συνεχούς φυσικής γήινης επιφάνειας με πεπερασμένο αριθμό σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς. Για τη δημιουργία ενός ορθού υδρολογικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους, απαιτείται σαν βάση δεδομένων, οι ισουψείς, υψομετρικά σημεία, υδατορεύματα και ένα όριο κάλυψης της περιοχής. Όσο πιο πυκνή είναι η κατανομή των δεδομένων και όσο πιο μικρό το μέγεθος της εικονομηφίδας, τόσο πιο ακριβής και υψηλή θεωρείται η ανάλυση του Ψ.Μ.Ε. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους στην παρούσα εργασία, ανακτήθηκε από τη βάση δεδομένων του τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών μηχανικών του Ε.Μ.Π για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Για την οριοθέτηση της λεκάνης και την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση, ήταν επιβεβλημένο να γίνει αρχικά η χάραξη του υδροκρίτη για την υπολεκάνη ενδιαφέροντος. Η διαδικασία αυτή έγινε χειροκίνητα μέσω λογισμικού GIS. Με τις κατάλληλες εντολές και με τη βοήθεια των κατάλληλων εργαλείων αλλά και των υψομετρικών καμπυλών, πραγματοποιήθηκε η αρχική χάραξη του υδροκρίτη. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «Fill» από την εργαλειοθήκη ArcToolbox του λογισμικού για την απαλοιφή τυχόν βυθισμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο ArcSWAT έχει τη δυνατότητα αυτόματου υπολογισμού του υδροκρίτη και των υπολεκανών.

3.1.2 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής είναι το μέγεθος/έκταση, το σχήμα και το υψόμετρο της λεκάνης αυτής.

Οι ενέργειες για τον υπολογισμό τους και η περιγραφή/σημασία τους, αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω:

Μέγεθος λεκάνης απορροής: Το κυριότερο γεωμετρικό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι το εμβαδό της S_A . σημασία του μεγέθους της λεκάνης, βρίσκεται στο γεγονός ότι

επιηρεάζει τόσο τη συνολική απορροή στην έξοδό της, όσο και το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και κατά συνέπεια το σχήμα του υδρογραφήματος. Η παραπάνω σχέση δεν είναι βέβαια γραμμική, αφού τα γεωλογικά, εδαφικά και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης κατα κανόνα διαφέρουν. Η σχέση που αναφέρθηκε θα ήταν γραμμική αν τα προηγούμενα χαρακτηριστικά ήταν της ίδιας κατηγορίας και επιπλέον η κατακρήμνιση ήταν ομοιόμορφη σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης (Τσακίρης, 1995).

Η έκταση της λεκάνης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS, το οποίο υπολογίζει αυτόματα το εμβαδό ενός πολυγώνου δηλαδή το πολύγωνο που περικλείεται από τον υδροκρίτη. Άρα είναι επιβεβλημένο να έχει προυπάρξει σωστός καθορισμός του υδροκρίτη, ο οποίος -όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως- μπορεί να χαραχθεί είτε χειροκίνητα, είτε με την εργαλειοθήκη του ArcGIS (arctoolbox-spatial analyst-hydrology-basin), είτε αυτόματα στο περιβάλλον του ArcSWAT.

Σχήμα λεκάνης απορροής: Το σχήμα μιας λεκάνης απορροής είναι πάντα πολύπλοκο, δεν μοιάζει με κανένα από τα απλά γεωμετρικά σχήματα και έτσι δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από μικρό αριθμό παραμέτρων. Ωστόσο έχουν προταθεί διάφοροι αδιάστατοι δείκτες για την απόδοση του σχήματος οι οποίοι είναι οι εξής:

- Ο δείκτης κυκλικότητας. Ο λόγος της επιφάνειας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια με αυτή της λεκάνης (P).

$$E_c := \frac{S}{P^2/4\pi} \quad (3.1)$$

- Ο δείκτης συμπαγούς (cravelius) ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης προς την περίμετρο του κύκλου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης

$$E'_c := \frac{S}{\sqrt{4\pi S}} = \frac{1}{\sqrt{E_c}} \quad (3.2)$$

- Ο δείκτης επιμήκυνσης. Ο λόγος της πλευράς ενός τετραγώνου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης, προς ένα χαρακτηριστικό μήκος της λεκάνης L.

$$E_L := \frac{\sqrt{S}}{L} \quad (3.3)$$

Συνήθως επιμήκεις λεκάνες έχουν μεγαλύτερο χρόνο συγκέντρωσης από ριπιδοειδείς ή κυκλικές και κατα συνέπεια εμφανίζουν μικρότερες παροχές κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Υψόμετρο λεκάνης απορροής: Χαρακτηριστικά υψόμετρα της λεκάνης είναι το μέγιστο, το ελάχιστο και το μέσο υψόμετρο. Γενικά το υψόμετρο μιας λεκάνης έχει άμεση σχέση με την ποσότητα και την συχνότητα των κατακρημνισμάτων αλλά και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν. Τα κατακρημνίσματα αυξάνονται όσο αυξάνεται το υψόμετρο της λεκάνης έως το υψόμετρο των 2.5 km. ενώ μετά παρατηρείται ελάττωση. Η θερμοκρασία, αντιθέτως, μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Συμπερασματικά, όσο μεγαλύτερο το υψόμετρο, τόσο υψηλότερη η απορροή λόγω αυξημένων κατακρημνισμάτων και μειωμένης εξάτμισης λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών.

Το μέσο υψόμετρο μπορεί να προσδιοριστεί υπολογίζοντας ξεχωριστά τις επιφάνειες ανάμεσα από δυο διαδοχικές ισουψείς καμπύλες και πολλαπλασιάζοντας τα εμβαδά αυτά με το αντίστοιχο μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής, ενώ στη συνέχεια αθροίζονται αυτά τα γινόμενα και διαιρούνται με το άθροισμα των εμβαδών των υποπεριοχών.

$$z_m = \frac{\sum A_i z_i}{\sum A_i} \quad (3.4)$$

Όπου:

- z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
 z_i : το μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής
 A_i : το εμβαδό της κάθε υποπεριοχής

Για την αποφυγή της ειδικής και χρονοβόρας αυτής διαδικασίας υπολογισμού για κάθε υποπεριοχή, υπάρχει η δυνατότητα μέσω του ArcGIS χρησιμοποιώντας το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, για αυτόματο υπολογισμό του μέσου υψομέτρου της λεκάνης.

Όσον αφορά το μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο, υπολογίζονται εύκολα είτε οπτικά από το Ψ.Μ.Ε είτε αυτόματα μέσω της εργαλειοθήκης του λογισμικού ArcGIS.

Τέλος, για τον προσδιορισμό του διάμεσου υψομέτρου (ή αλλιώς διάμεση τιμή του υψομέτρου), είναι απαραίτητη η χάραξη της υψογραφικής ή υψομετρικής καμπύλης της λεκάνης, δηλαδή της καμπύλης που σε κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψομέτρου z αντιστοιχίζει το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης $F(z)$ που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής. Η μορφή της υψομετρικής καμπύλης αποκαλύπτει αρκετά ποιοτικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου της λεκάνης, σύμφωνα με τη γενική παρατήρηση ότι ισχυρές κλίσεις σε μια περιοχή της καμπύλης υποδηλώνουν ισχυρές κλίσεις του αναγλύφου της λεκάνης και αντίστροφα. Προκύπτουν έτσι μερικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αναμενόμενη μορφή των πλημμυρογραφημάτων και τους χαρακτηριστικούς χρόνους τους. (Κουτσογιάννης, 1999).

Η καμπύλη χαράσσεται σε σύστημα συντεταγμένων, με τεταγμένη το υψόμετρο, και τετμημένη την επιφάνεια των εκτάσεων που βρίσκονται πάνω από το αντίστοιχο υψόμετρο. Τελικά, το διάμεσο υψόμετρο της λεκάνης, είναι το υψόμετρο για το οποίο το 50% της έκτασης της λεκάνης βρίσκεται πάνω από αυτό.

3.1.3 Προετοιμασία δεδομένων χρήσεων γης

Η κάλυψη και οι χρήσεις γης σε μια λεκάνη απορροής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απορροή. Για την ανάγκη εντοπισμού χρήσεων γης στην παρούσα λεκάνη, αναζητήθηκαν στοιχεία από το πρόγραμμα CORINE της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2000 (COoRdinate INformation on the Environment). Το CORINE είναι ένα Ευρωπαϊκό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των χρήσεων γης και λοιπών στοιχείων του περιβάλλοντος για την Ευρώπη. Το χαρτογραφικό αυτό υπόβαθρο διαθέτει ένα ευρετήριο κάλυψης γης σε κλίμακα 1:100.000 και απαρτίζεται από 44 κατηγορίες.

Πιο αναλυτικά οι χρήσεις γης στο CORINE χωρίζονται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες οι οποίες με τη σειρά τους χωρίζονται σε 44 υποκατηγορίες όπως αναφέρθηκε και πιο πριν. Οι 5 αρχικές κατηγορίες είναι:

- 1) Τεχνητές επιφάνειες
- 2) Αγροτικές περιοχές
- 3) Δάση και ημιφυσικές περιοχές
- 4) Υγρές ζώνες
- 5) Υδάτινες επιφάνειες

Οι υποκατηγορίες είναι:

A. Τεχνητές επιφάνειες.

- 1) Αστική οικοδόμηση
 - Συνεχής αστική οικοδόμηση
 - Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
- 2) Βιομηχανικές, εμπορικές ζώνες και δίκτυα επικοινωνίας
 - Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
 - Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη
 - Ζώνες λιμένων
- 3) Ορυχεία, χώροι απορρίψεως απορριμάτων και χώροι οικοδόμησης
 - Χώροι εξόρυξης ορυκτών
 - Χώροι απόρριψης απορριμάτων
 - Χώροι οικοδόμησης
- 4) Τεχνητές, μη γεωργικές ζώνες πρασίνου
 - Περιοχές αστικού πρασίνου
 - Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής

B. Γεωργικές περιοχές

- 1) Αρόσιμη γη
 - Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
 - Μόνιμα αρδευόμενη αρόσιμη γη
 - Ορυζώνες
- 1) Μόνιμες καλλιέργειες
 - Αμπελώνες
 - Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
 - Ελαιώνες
- 2) Λιβάδια
 - Λιβάδια
- 3) Ετερογενείς γεωργικές περιοχές
 - Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες
 - Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
 - Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
 - Γεωργο-δασικές περιοχές

Γ. Δάση και ημιφυσικές περιοχές

- 1) Δάση
 - Δάσος πλατύφυλλων
 - Δάσος κωνοφόρων

- Μικτό δάσος
- 2) Θαμνώδης και ποώδης βλάστηση
 - Φυσιικοί βοσκότοποι
 - Θάμνοι και χερσότοποι
 - Σκληροφυλλική βλάστηση
 - Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
- 3) Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση
 - Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
 - Απογυμνωμένοι βράχοι
 - Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
 - Αποτεφρωμένες εκτάσεις
 - Παγετώνες και αιώνιο χιόνι

Δ. Υγρές ζώνες

- 1) Εσωτερικές υγρές ζώνες
 - Βάλτοι στην ενδοχώρα
 - Τυφώνες
- 2) Παραθαλάσσιες υγρές ζώνες
 - Παραθαλάσσιοι βάλτοι
 - Αλυκές
 - Παλιρροιακά επίπεδα

Ε. Υδάτινες επιφάνειες

- 1) Χερσαία ύδατα
 - Ροές υδάτων
 - Συλλογές υδάτων
- 2) Θαλάσσια ύδατα
 - Παράκτιες λιμνοθάλασσες
 - Εκβολές ποταμών
 - Θάλασσα και ωκεανός

Ο χάρτης CORINE ήταν διαθέσιμος στην ιστοσελίδα του Ινστιτούτου Πληροφοριακών Συστημάτων για Δημόσια και Ανοιχτά Δεδομένα (geodata.gov.gr) και κάλυπτε όλη την ελληνική επικράτεια. Η πληροφορία ήταν σε επίπεδο χωρικής οντότητας, όπου το κάθε σχεδιασμένο πολύγωνο κάλυπτε έκταση που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη χρήση γης. Συνεπώς, έπρεπε αρχικά να περιοριστεί για την περιοχή μελέτης και έπειτα να γίνει η απαραίτητη αντιστοίχιση με τις κατηγορίες που δέχεται το ArcSWAT οι οποίες διαφέρουν από τις αρχικές του CORINE.

Ο περιορισμός του χάρτη για την έκταση που μελετάμε, έγινε με την εργαλειοθήκη του ArcGIS με το εργαλείο clip. Η αντιστοίχιση με τις κατηγορίες του SWAT έγινε με σύγκριση και παρατήρηση και με τη βοήθεια παλαιότερων μελετών κατα τις οποίες είχε γίνει αντιστοίχιση για μερικές από τις κατηγορίες που θέλαμε.

Το SWAT έχει 102 είδη φυτοκάλυψης με διαφορετικές ιδιότητες το καθένα από αυτά. Η σωστή αντιστοίχιση των κωδικών του CORINE με τους κωδικούς του SWAT είναι υψίστης σημασίας διότι μειώνει πιθανά σφάλματα στην τελική υπολογισμένη απορροή και έτσι εξοικονομείται χρόνος κατά την τελική βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι διαδικασίες επεξεργασίας και προετοιμασίας των χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης, περιγράφονται πιο διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 3.1: Χρήσεις γης SWAT για την επιλογή urban

#	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ
1	UCOM	Commercial
2	UIDU	Industrial
3	UINS	Institutional
4	URBN	Residential
5	URHD	Residential-High density
6	URLD	Residential-Low density
7	URML	Residential-Med/Low density
8	URMD	Residential-Medium density
9	UTRN	Transportation

Πίνακας 3.2: Χρήσεις γης SWAT για την επιλογή crop

#	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	
1	SOYB	SOYBEAN	55	ASPR	ASPARAGUS
2	CORN	CORN	56	BROC	BROCCOLI
3	GRSG	GRAIN SORGHUM	57	CABG	CABBAGE
4	COTS	STRIP COTTON	58	CAUF	CAULIFLOWER
5	COTP	PICKER COTTON	59	CELR	CELERY
6	PNUT	PEANUT	60	LETT	LETTUCE
7	SUNF	SUNFLOWER	61	OLET	LEAF LETTUCE
8	CSUN	CANADA SUNFLOWER	62	SOIN	SPINACH
9	SIN	SILAGE	63	CRRT	CARROT
10	WWHT	WINTER WHEAT	64	ONIO	ONION
11	SWHT	SPRING WHEAT	65	SGBT	SUGARBEETS
12	CSWH	CANADA SP WHEAT	66	GRBN	GREEN BEANS
13	DWHT	DURAM WHEAT	67	LIMA	LIMA BEANS
14	BARL	BARLEY	68	PEAS	PEAS

Πίνακας 3.2: Χρήσεις γης SWAT για την επιλογή crop (συνέχεια)

15	CBAR	CANADA BARLEY	69	CUCM	CUCUMBERS
16	OATS	OATS	70	EGGP	EGG PLANT
17	COAT	CANADA OATS	71	CANT	CANTALOUPE
18	RICE	RICE	72	HMEL	HONEYDEW MEL
19	RYE	RYE	73	WMEL	WATERMELON
20	WPEA	WINTER PEAS	74	PERP	PEPPERS
21	LEN1	LENTILS1	75	STRW	STRAWBERRY
22	LENT	LENTILS	76	TOMA	TOMATO
23	CAN1	CANTALOUPE	77	SPOT	SWEET POTATO
24	CAN2	CANTALOUPE2	78	SCRN	SWEET CORN
25	FLAX	FLAX	79	TOBC	TOBACCO
26	FPEA	FIELD PEAS	80	SUGC	SUGAR CANE
27	MUNG	SUMMER MUNG	81	FESC	FESCUE
28	SESB	SESBANIA	82	PMIL	PEARL MILLET
29	DBEN	DRY BEANS	83	PINE	PINE TREES
30	SGHY	SORGHUM HAY	84	MESQ	MESQUITE TREE
31	ALFA	ALFALFA	85	APPL	APPLE TREE
32	CLVA	CLOVER ASLIKE	86	PAST	PASTURE
33	CLVR	RED CLOVER	87	AGRR	AGRICULTURAL LAND-ROW CROPS
34	CLVS	SWEET CLOVER	88	AGRC	AGRICULTURAL LAND CLOSE-GROWN
35	TIMO	TIMOTHY	89	AGRL	AGRICULTURAL LAND GENERIC
36	RNGE	RANGE	90	FRST	FOREST
37	SPAS	SUMMER PASTURE	91	URBN	URBAN GRASS
38	WPAS	WINTER PASTURE	92	WATR	WATER
39	RYEA	ALTAI WILD RYE	93	WETL	WETLAND
40	RYER	RUSSIAN W RYE	94	WETF	WETLAND_FOREST
41	RYEG	ANNUAL RYE GRASS	95	WETN	WETLAND_NONFORE ST
42	WWGR	W WHEATGRASS	96	FRSD	FOREST,DESIDUOUS
43	NWGR	N WHEATGRASS	97	FRSE	FOREST,EVERGREEN1
44	SWGR	SLENDER WHGR	98	FRSE	FOREST,EVERGREEN2
45	CWGR	CRESTED WHGR	99	ORCD	ORCHARD
46	BROM	BROM GRASS	100	RNGB	RANGE
47	BROS	SMOOTH BR GR	101	HAY	HAY
48	CWPS	COWPEAS	102	SPCL	SPRING PASTURE
49	BERM	BERMUDA	103	SWRN	RANGE, SOUTHWEST
50	POTA	POTATOES	104	WWG1	WINTER,WHEATGRAS S1
51	POT2	POTATOES 2	105	WWG2	WINTER,WHEATGRAS S2
52	OILP	OIL PALM	106	SIDE	SIDEOATS GRAMA

Πίνακας 3.2: Χρήσεις γης SWAT για την επιλογή crop (συνέχεια)

53	EGAM	EASTERN GAMAGRASS	107	CSIL	CORN SILAGE
54	JHGR	JOHNSONGRASS	108	BLUG	KENTUCKY BLUEGRASS

3.1.4 Προετοιμασία δεδομένων εδαφολογικής σύστασης

Η εδαφική σύσταση της λεκάνης απορροής που μελετάται διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην απορροή διότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζουν παραμέτρους όπως ο ρυθμός της διήθησης του νερού στους υπόγειους υδροφορείς ή την κίνηση του νερού στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Για τη σωστή μοντελοποίηση απαιτείται η εδαφολογική πληροφορία για αρκετά μέτρα βάθος που μπορεί να επιτευχθεί εάν υπάρχουν διαθέσιμες εδαφοτομές για την περιοχή. Το μοντέλο, απαιτεί την εισαγωγή εδαφολογικών δεδομένων, σε μορφή ψηφιακού χάρτη, όπου τα πολύγωνα αντιπροσωπεύουν το μητρικό υλικό του εδάφους στην αντίστοιχη έκταση που καλύπτει.

3.1.5 Χάρτης κλίσεων γης

Ο χάρτης κλίσεων γης που απαιτείται για την μοντελοποίηση, παράγεται αυτόματα μέσα από το περιβάλλον του ArcSWAT μέσω του Ψ.Μ.Ε και έτσι το μόνο που απαιτείται από τον χρήστη είναι η επιλογή των ποσοστών κλίσεων με βάση τα οποία θα χωριστεί η λεκάνη σε επίπεδα.

3.2 Προετοιμασία βροχομετρικών δεδομένων

3.2.1 Γενικά

Οι μετρήσεις των κατακρημνισμάτων στην περιοχή μελέτης, είναι το σημαντικότερο στοιχείο για την σωστή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στις εύκρατες περιοχές, όπως η Ελλάδα, μας ενδιαφέρουν κυρίως οι βροχοπτώσεις διότι είναι συνηθέστερες και υπερέχουν ποσοτικά έναντι των άλλων μορφών κατακρημνισμάτων και κατ'έπекταση δημιουργούν τα σημαντικότερα φαινόμενα επιφανειακής απορροής.

Τα ύψη βροχόπτωσης προσδιορίζονται με παρατηρήσεις σε κατάλληλα όργανα, όπως τα βροχόμετρα, οι βροχογράφοι ή με πιο σύγχρονους βροχομετρικούς σταθμούς κατάλληλα τοποθετημένους.

Εξαιρετική σημασία σε μίαν υδρολογική μελέτη παρουσιάζει η ποιότητα και η επάρκεια των βροχομετρικών δεδομένων. Είναι αναγκαίος ο έλεγχος ορθότητας των δεδομένων για τυχόν σφάλματα παρατηρητή ή οργάνου, ο έλεγχος πληρότητας για τυχόν ελλείψεις ή κενά στις χρονοσειρές, καθώς επίσης και ο έλεγχος ομογένειας με τους γειτονικούς σταθμούς που αποσκοπεί στον εντοπισμό τυχόν τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης.

3.2.2 Έλεγχος ομογένειας

Όταν σε μια χρονοσειρά μετρήσεων βροχής ενός σταθμού οι συνθήκες μέτρησης δεν είναι σταθερές αλλά μεταβάλλονται, τότε τα βροχομετρικά δεδομένα που προκύπτουν δεν είναι ομογενή. Ο έλεγχος ομογένειας αποσκοπεί στον εντοπισμό των αλλαγών των συνθηκών μέτρησης ώστε να αποκατασταθούν και να γίνουν ομογενή. Οι πηγές των ασυνεπειών σε μια

χρονοσειρά μετρήσεων μπορεί να είναι η αλλαγή του τύπου ή της θέσης του μετρητικού οργάνου, η αντικατάστασή του λόγω βλάβης, ή η αλλαγή του παρατηρητή με κάποιον λιγότερο έμπειρο ή εκπαιδευμένο.

Ο έλεγχος της ομογένειας ενός σταθμού γίνεται με τη σύγκρισή του με ομάδα γειτονικών σταθμών, που αποτελούν τους σταθμούς βάσης και έχουν ελεγχθεί ως προς την ομογένειά τους. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Σύμφωνα με τη μέθοδο, ελέγχονται τα ετήσια ύψη βροχής ενώ οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η κλιματική ομογένεια των ως προς σύγκριση σταθμών και ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των σταθμών βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού.

Ο έλεγχος για τη συσχέτιση των σταθμών πραγματοποιείται με την εύρεση του συντελεστή R^2 .

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]} \quad (3.5)$$

Όπου:

- x_i : το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για το σταθμό βάσης
- y_i : το ετήσιο βροχομετρικό ύψος το έτος i για τον εξεταζόμενο σταθμό
- \bar{x} : το αντίστοιχο μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος για το σταθμό βάσης
- \bar{y} : το αντίστοιχο μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος για τον εξεταζόμενο σταθμό

Για τη δημιουργία του διαγράμματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης, χρησιμοποιούμε το σταθμό βάσης στον άξονα των τετμημένων ενώ ο εξεταζόμενος σταθμός μπαίνει στον άξονα των τεταγμένων.

Για να σχεδιαστεί τελικά η διπλή αθροιστική καμπύλη, υπολογίζονται τα εξής αθροίσματα για κάθε σταθμό

$$\sum X_{i+1} = \sum X_i + X_{i+1} \quad (3.6)$$

Όπου:

- X_i : το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i
- i : το υδρολογικό έτος i
- $i + 1$: τάξη του παλαιότερου κατά 1 έτος στοιχείου

Στην περίπτωση που εμφανιστεί κάποια θλάση στην ευθεία γραμμή του διαγράμματος, τότε σημαίνει πως υπάρχει διαφοροποίηση στις συνθήκες μέτρησης πριν και μετά από το έτος στο οποίο εμφανίστηκε η θλάση. Για τη διόρθωση των ετήσιων βροχομετρικών υψών συνήθως θεωρούνται αξιόπιστες οι πιο πρόσφατες μετρήσεις και η διόρθωση γίνεται στο παλιότερο υποσύνολο πολλαπλασιάζοντας επι έναν συντελεστή αναγωγής. Ο συντελεστής αναγωγής αυτός, προκύπτει ως ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διπλής αθροιστικής καμπύλης: (Τσακίρης, 1995).

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3.7)$$

Όπου:

- α : ο συντελεστής αναγωγής
- λ_1 : κλίση του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος της αθροιστικής καμπύλης
- λ_2 : κλίση του δεύτερου ευθύγραμμου τμήματος της αθροιστικής καμπύλης

3.2.3 Έλεγχος πληρότητας και συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Στην περίπτωση που οι παρατηρήσεις του σταθμού που ελέγχουμε είναι ελλειπείς, μπορεί να γίνει συμπλήρωση αυτών των ελλείψεων με τη βοήθεια των γειτονικών σταθμών οι οποίοι διαθέτουν πλήρη και ομογενή δεδομένα. Είναι επίσης κι εδώ απαραίτητο να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών σταθμών και του υπο συμπλήρωση σταθμού. Οι μέθοδοι για συμπλήρωση των παρατηρήσεων είναι αρκετές και διακρίνονται σε εμπειρικές και στατιστικές.

Εμπειρικές:

α) Μέθοδος του αριθμητικού μέσου. Σύμφωνα με την απλή αυτή μέθοδο, η έλλειψη της παρατήρησης του ύψους βροχής για τον σταθμό Y , υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των αντίστοιχων υψών τριών ή περισσότερων γειτονικών σταθμών.

$$P_Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_i \quad (3.8)$$

Όπου:

P_Y : το ύψους βροχόπτωσης για το σταθμό Y

k : το πλήθος των γειτονικών σταθμών

P_i : το ύψος βροχής για καθένα από τους γειτονικούς σταθμούς

β) Μέθοδος των κανονικών λόγων. Τα ύψη βροχής των γειτονικών σταθμών σταθμίζονται με βάση τις αναλογίες των μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων.

$$P_Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{N_Y}{N_i} P_i \right] \quad (3.9)$$

Όπου:

P_i : το αντίστοιχο ύψος βροχής για καθένα από τους γειτονικούς σταθμούς

N_Y : η κανονική βροχόπτωση του υπο συμπλήρωση σταθμού

N_i : η (κανονική) μέση βροχόπτωση στους γειτονικούς σταθμούς

γ) Μέθοδος των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων. Στη μέθοδο αυτή ο βαθμός επιρροής κάθε σταθμού είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο προς την απόσταση (μικρή απόσταση σημαίνει μεγάλος βαθμός επιρροής).

$$P_Y = \sum_{i=1}^k w_i P_i \quad (3.10)$$

Όπου:

$$w_i = \frac{d_i^{-b}}{\sum_{j=1}^k d_j^{-b}} \quad (3.11)$$

P_Y : το ύψος βροχής για το σταθμό Y

P_i : το αντίστοιχο ύψος βροχής για καθένα από τους γειτονικούς σταθμούς

w_i : ο συντελεστής επιρροής

d_i : η απόσταση του εκάστοτε σταθμού i από τον σταθμό Y

k : το πλήθος των γειτονικών σταθμών

b : εκθέτης με τυπική τιμή 2

Στατιστικές μέθοδοι:

Οι στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν, όπως και οι εμπειρικές, γειτονικούς σταθμούς για τη συμπλήρωση των ελλείψεων, αλλά λαμβάνουν υπόψη τις πλήρεις χρονοσειρές στον υπο συμπλήρωση και τους γειτονικούς σταθμούς και όχι μεμονωμένες τιμές.

α) Γραμμική παλινδρόμηση. Η απλούστερη στατιστική μέθοδος στην οποία η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών είναι γραμμική. Ευθεία ελαχίστων τετραγώνων: $y=a+bx$, όπου οι σταθερές a , b προσδιορίζονται με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων ως εξής:

$$b = \frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum(x_i-\bar{x})^2} \quad (3.12)$$

$$a = \bar{y} - a\bar{x} \quad (3.13)$$

Όπου :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.14)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.15)$$

Η μέθοδος αυτή κρίνεται κατάλληλη από το μέγεθος:

$$r = \frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2 \sum(y_i-\bar{y})^2}} \quad (3.16)$$

το οποίο ονομάζεται συντελεστής γραμμικής συσχέτισης και παίρνει τιμές στο διάστημα

$[-1,1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 ή στο -1 βρίσκεται η τιμή του r , τόσο πιο ισχυρή συσχέτιση υπάρχει. Τέλος, για να είναι στατιστικά σημαντική η συσχέτιση θα πρέπει ο συντελεστής r να είναι μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή:

$$r > r_c \approx \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (3.17)$$

Όπου:

r_c : η κρίσιμη τιμή

n : ο κοινός αριθμός λειτουργίας των σταθμών

Εφόσον πραγματοποιηθούν οι παραπάνω έλεγχοι, τότε, ο γειτονικός σταθμός Y είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση του υπό συμπλήρωση σταθμού X . Σε γενικές γραμμές η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης είναι κατάλληλη για συμπλήρωση ετήσιων υψών βροχής ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για συμπλήρωση μηνιαίων υψών με απαραίτητη προϋπόθεση την ύπαρξη μεγάλου συντελεστή συσχέτισης r .

3.2.4 Μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης

Η τρίτη κατα σειρά διαδικασία μετά τον έλεγχο ομογένειας των χρονοσειρών βροχόπτωσης και τη συμπλήρωση των κενών στις χρονοσειρές, είναι ο υπολογισμός του μέσου βροχομετρικού ύψους λεκάνης με τους ακόλουθους τρόπους:

- 1) *Αριθμητικός μέσος όρος* παρατηρήσεων των σημειακών βροχομετρικών υψών των σταθμών της λεκάνης απορροής. Η μέθοδος αυτή σπάνια χρησιμοποιείται γιατί απαιτεί την ύπαρξη πολλών σταθμών και την ομοιόμορφη κατανομή τους στη λεκάνη.
- 2) *Πολύγωνα Thiessen*. Η μέθοδος αυτή χωρίζει γεωμετρικά τη συνολική επιφάνεια S σε ζώνες επιρροής S_i , μία για κάθε σταθμό ώστε το άθροισμα των ζωνών επιρροής να δίνουν το συνολικό εμβαδό S . Ο συντελεστής βάρους για κάθε σταθμό υπολογίζεται :

$$w_i = \frac{S_i}{S} \quad (3.18)$$

ενώ το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης υπολογίζεται:

$$P_0 = \sum \left[\frac{S_i}{S} * P_i \right] \quad (3.19)$$

Όπου,

P_0 : μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης

S_i : εμβαδό ζώνης επιρροής i

S : συνολικό εμβαδό λεκάνης

P_i : βροχομετρικό ύψος σταθμού i

3) *Ισόβροχες (ισουέτιες) καμπύλες*. Χαράσσονται όπως και οι ισουψείς καμπύλες. Αποτελεί την ακριβέστερη μέθοδο. Το μειονέκτημά της είναι η ανάγκη για ύπαρξη πολλών σταθμών και καλή γνώση της περιοχής ώστε να μην εξομαλύνονται ανωμαλίες στα χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλούνται από τοπικά αίτια.

$$P_0 = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} * \bar{P}_{i-1,i} \quad (3.20)$$

Όπου,

S_i : οι εκτάσεις μεταξύ των ισουέτιων καμπυλών

S : η συνολική έκταση της λεκάνης

$\bar{P}_{i-1,i}$: το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δυο ισουέτιων καμπυλών

3.2.5 Βροχοβαθμίδα – Αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης

Επιπλέον, μετά τον υπολογισμό του μέσου βροχομετρικού ύψους της λεκάνης, είναι απαραίτητη και η αναγωγή του στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής η οποία πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της τιμής του μέσου βροχομετρικού ύψους με τον συντελεστή λ . Ο συντελεστής λ υπολογίζεται με βάση τη βροχοβαθμίδα β .

$$\lambda = 1 + \frac{\beta}{P_0 * 100} * (z_m - \bar{z}) \quad (3.21)$$

Όπου:

β : η βροχοβαθμίδα

P_0 : το μέσο βροχομετρικό ύψος

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης

\bar{z} : ο σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν την λεκάνη.

3.3 Προετοιμασία μετεωρολογικών δεδομένων

Τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα που κρίνονται απαραίτητα για την εφαρμογή του μοντέλου SWAT είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και η υγρασία της ατμόσφαιρας.

3.3.1 Θερμοκρασία αέρα

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα υπό σκιά, πραγματοποιείται με κατάλληλα όργανα, τα θερμόμετρα και τους θερμογράφους τα οποία βρίσκονται κατάλληλα τοποθετημένα σε

σκιερό μέρος, προστατευμένα από την ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα μέσω των οργάνων αυτών, γίνεται η μέτρηση:

- 1) Της απόλυτης ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα για μια συγκεκριμένη περίοδο μέτρησης (T_{\max} , T_{\min}).
- 2) Της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας (T_d).
- 3) Της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τις τιμές των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών του μήνα που εξετάζεται.
- 4) Της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τις τιμές των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών των δώδεκα μηνών του έτους.
- 5) Του ημερησίου θερμομετρικού εύρους
- 6) Του ετήσιου θερμομετρικού εύρους

Κατ' αντιστοιχία με την βροχοβαθμίδα για τα βροχομετρικά ύψη, στη μελέτη της θερμοκρασίας υπολογίζεται η θερμοβαθμίδα η οποία αναπαριστά την τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με την μονάδα ύψους.

Γενικά, η θερμοκρασία αέρα τείνει να είναι υψηλότερη στα χαμηλότερα υψόμετρα και να μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Ωστόσο, αυτή η τάση διαταράσσεται συχνά από την επιρροή των υδάτινων μαζών, της τοπογραφίας της περιοχής και της βλάστησης που επικρατεί. Στο εσωτερικό ηπειρωτικών περιοχών ή μεγάλων νησιών, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες το καλοκαίρι και χαμηλότερες το χειμώνα σε σχέση με τις παράκτιες περιοχές σε αντίστοιχα υψόμετρα. Η μέση μείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με τη μονάδα ύψους είναι συνήθως μεταξύ 0.5 και 1°C / 100 m. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως οι περιοχές με δασώδη βλάστηση έχουν υψηλότερη ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία και χαμηλότερη ημερήσια μέγιστη σε σχέση με άγονες/γυμνές περιοχές ενώ επίσης η μέση θερμοκρασία σε μια δασώδη περιοχή είναι συνήθως 1 με 2°C χαμηλότερη σε σύγκριση με άγονες/γυμνές περιοχές (Linsley et al., 1988)

3.3.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την κυρίαρχη πηγή ενέργειας της γης και σε μεγάλο βαθμό καθορίζει τον καιρό και το κλίμα.

Συνοπτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι οι παρακάτω:

- 1) Η συνολική ηλιακή εκπομπή. Ο ήλιος εκπέμπει συνεχώς από την φωτόσφαιρα ακτινοβολία προς τη γη από μια μέση απόσταση 149.5 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Η τιμή της έντασης της ακτινοβολίας που μετριέται στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας και όταν η απόσταση γης-ήλιου φτάσει στην μέση τιμή της, λέγεται ηλιακή σταθερά και έχει μέση τιμή $I_0 = 1374 \text{ W/m}^2$.
- 2) Η μεταβολή της απόστασης γης-ήλιου. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο. Η μέγιστη τιμή της παρατηρείται την 1^η Ιανουαρίου κατά τον περιήλιο και η ελάχιστη την 1^η Ιουλίου (αφήλιο).
- 3) Το ύψος του ηλίου. Το ύψος μεταβάλλεται και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την εποχή του έτους και την ώρα της ημέρας.

- 4) Τη διάρκεια της ημέρας. Ο παράγοντας αυτός καθορίζει τη συνολική ποσότητα ακτινοβολίας που δέχεται ένα σημείο και αυτός με τη σειρά του εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους. (Τσακίρης, 1995).

3.3.3 Υγρασία ατμόσφαιρας

Η υγρασία (υδρατμοί) της ατμόσφαιρας είναι αποτέλεσμα της εξάτμισης του νερού από υδάτινες επιφάνειες αλλά και της διαπνοής των φυτών. Είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία νεφών και στην συνέχεια των κατακρημνισμάτων. Η ποσότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία· όσο αυξάνεται το υψόμετρο, μειώνεται η υγρασία. Επιπροσθέτως, η μεταβολή της υγρασίας και η διακύμανσή της εξαρτάται κι από το γεωγραφικό πλάτος.

Πιο συγκεκριμένα, οι παρακάτω υδρομετρικές παράμετροι βοηθούν για την πληρέστερη κατανόηση των μεταβολών της υγρασίας:

- 1) Τάση των υδρατμών. (e). Είναι η πίεση που ασκείται από τους υδρατμούς στην επιφάνεια της γης και αποτελεί μέρος της συνολικής ατμοσφαιρικής πίεσης.
- 2) Κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας. Ο αέρας είναι κορεσμένος όταν περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει σε μια ορισμένη θερμοκρασία και πριν αρχίσει η συμπύκνωση. Η πίεση που ασκούν οι υδρατμοί στις συνθήκες αυτές ονομάζεται μέγιστη τάση υδρατμών (e_s).
- 3) Θερμοκρασία σημείου δρόσου (T_d). Είναι η θερμοκρασία στην οποία μία ακόρεστη αέρια μάζα, όταν ψυχθεί κάτω από σταθερή πίεση, μετατρέπεται σε κορεσμένη.
- 4) Έλλειμα κορεσμού ($e_a - e$). Είναι η διαφορά των τάσεων υδρατμών κορεσμένου αέρα σε θερμοκρασία T_a και ακόρεστου στην ίδια θερμοκρασία. Μέσω αυτής της παραμέτρου προσδιορίζεται η επιπλέον ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία, μέχρι να γίνει κορεσμένος.
- 5) Απόλυτη υγρασία (A_h). Είναι η ποσότητα υδρατμών του αέρα σε γραμμάρια που περιέχεται στη μονάδα του όγκου και η σχέση που την εκφράζει είναι η εξής:

$$A_h = \frac{M}{V} \quad (gr \ m^{-3}) \quad (3.22)$$

- 6) Σχετική υγρασία (R_h). Είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών M_U που περιέχονται σε ορισμένο όγκο ακόρεστου αέρα, προς τη μάζα των υδρατμών M_{SU} που θα περιείχε ο ίδιος όγκος αν ήταν κορεσμένος κάτω από τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Δηλαδή:

$$R_h = \frac{M_U}{M_{SU}} \quad (3.23)$$

Ο λόγος αυτός ισούται επίσης προς την εκατοστιαία αναλογία της πραγματικής προς την μέγιστη τάση υδρατμών εις την ίδια θερμοκρασία :

$$R_h = \frac{e}{e_s} * 100 \quad (3.24)$$

- 7) Αναλογία μείγματος (r). Αναλογία μείγματος ενός δείγματος υγρού αέρα καλείται ο λόγος της μάζας M_U των υδρατμών προς τη μάζα M_d του ξηρού αέρα η οποία υπάρχει σε ένα μείγμα αέρος-υδρατμών:

$$r = \frac{M_u}{M_a} \quad (3.25)$$

- 8) Ειδική υγρασία (q). Ο λόγος της μάζας των υδρατμών ενός δείγματος υγρού αέρα προς τη συνολική μάζα του υγρού αέρα.
- 9) Κατακρημνίσιμη ποσότητα νερού (P_w). Η ποσότητα υδρατμών που περιέχεται σε μία κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη ορισμένης διατομής που εκτείνεται μεταξύ δύο καθορισμένων επιπέδων.

Όσον αφορά το μοντέλο SWAT, χρησιμοποιεί –όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο– μέσες ημερήσιες τιμές σχετικής υγρασίας αναλόγως την μέθοδο της εξατμισοδιαπνοής που επιλέγεται. Επιπλέον, η σχετική υγρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναγκαία παράμετρος στον υπολογισμό του σημείου δρόσου που είναι απαραίτητο στοιχείο για τη δημιουργία του σταθμού-γεννήτρια ο οποίος λειτουργεί βοηθητικά στην προσομοίωση. Συγκεκριμένα το σημείο δρόσου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_d = \left[\frac{f}{100} \right]^{1/8} (112 + 0.9T) + 0.1T - 112 \quad (3.26)$$

όπου:

- T_d : η θερμοκρασία σημείο δρόσου (°C)
 f : η σχετική υγρασία (%)
 T : η μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)

3.3.4 Μέση ταχύτητα ανέμου

Ο άνεμος είναι στην ουσία ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση και παίζει σημαντικό ρόλο σε διάφορες υδρομετεωρολογικές διεργασίες. Ο άνεμος χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, την διεύθυνση και την ταχύτητά του.

Η διεύθυνση είναι το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος ενώ η ταχύτητα μετρείται σε m/s ή κόμβους ανά ώρα με κατάλληλα όργανα, τους ανεμογράφους.

3.4 Εξάτμιση και διαπνοή

3.4.1 Γενικά

Σε αυτό το εδάφιο γίνεται αναφορά στην εξατμισοδιαπνοή η οποία αποτελείται από την εξάτμιση των εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας. Αποτελεί τη φάση του υδρολογικού κύκλου κατά την οποία τα διάφορα κατακρημνίσματα που φθάνουν στην επιφάνεια της γης, επιστρέφουν πίσω στην ατμόσφαιρα ως υδρατμοί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι λόγω των μηχανισμών της εξατμισοδιαπνοής χάνεται περίπου το 60% των κατακρημνισμάτων.

Το νερό όταν έχει φτάσει στη φάση της εξάτμισης είναι μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η εξατμισοδιαπνοή και η βροχόπτωση καθορίζουν την ποσότητα της επιφανειακής απορροής των υδρολογικών λεκανών ενώ επίσης μπορούν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία επιφανειακή απορροή ή πλημμύρες σε περίπτωση ισχυρής βροχόπτωσης.

Η ποσότητα της εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται από εδαφικές επιφάνειες, πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, κάτω από συνθήκες απεριόριστης

διαθεσιμότητας νερού, ονομάζεται δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε αντίθεση με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή η οποία εξαρτάται από την ποσότητα του διαθέσιμου εδαφικού νερού. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντα μεγαλύτερη ή το λιγότερο ίση με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Σε γενικές γραμμές και η δυνητική και η πραγματική εξαρτώνται από το είδος και τα χαρακτηριστικά της φυτοκάλυψης. (Κουτσογιάννης, 1999).

Μέσω της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου μπορεί ενδεχομένως να κατανοηθεί καλύτερα η συμβολή της εξατμισοδιαπνοής στον υδρολογικό κύκλο.

$$P + I + \Delta SW \pm RO - D - ET = 0 \quad (3.27)$$

όπου:

- P : η βροχόπτωση
- I : η άρδευση
- ΔSW : η αλλαγή του περιεχόμενου νερού στην εδαφική κατατομή
- RO : η επιφανειακή απορροή
- D : η βαθιά διήθηση
- ET : η εξατμισοδιαπνοή

3.4.2 Μέθοδοι εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Penman και Penman-Monteith:

Η μέθοδος Penman υπολογίζει την εξάτμιση από μια υδάτινη επιφάνεια σε mm/ημέρα με την σχέση :

$$E = \frac{\Delta * R + E_a * \gamma}{\Delta + \gamma} * f \quad (3.28)$$

Όπου:

- E : η εξάτμιση σε mm/ημέρα
- γ : η ψυχρομετρική σταθερά ($\gamma=0.485 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$)
- f : συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας
- R : η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής

$$R = R_A(1 - r) \left[0.29 \cos \varphi + 0.55 \frac{n}{N} \right] - \sigma T_{AK}^4 (0.56 - 0.09) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (3.29)$$

όπου:

- R_A : η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμοσφαιρας σε mm/ημέρα
- N : η μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια
- n : οι ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας
- σ : η σταθερά Stephan-Boltzman ($2.01 * 10^{-9} \text{ mm}/\eta\mu\epsilon\rho\alpha$)
- T_{AK} : η θερμοκρασία του αέρα σε K
- r : ο αριθμός albedo
- e : η τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}

E_{α} : η παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών

$$E_{\alpha} = 0.35(e_w - e)(0.5 + 0.54u_2) \quad (3.30)$$

όπου:

e_w : η τάση των κορεσμένων υδρατμών σε mmHg

$$e_w = 25.4616(0.00738T_a + 0.8072)^8 - 0.000484(1.8T_a + 48) + 0.0335 \quad (3.31)$$

e : η τάση των υδρατμών

$$e = RH * e_w \quad (3.32)$$

όπου:

RH : η σχετική υγρασία

Δ : η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C

$$\Delta = 1.5(0.00738 * T_a + 0.8072)^7 - 0.00087 \quad (3.33)$$

όπου:

T_a : η θερμοκρασία του αέρα σε °C

Η διαφοροποίηση της μεθόδου Penman με τη Penman-Monteith είναι ότι ο Monteith το 1963-64 εισήγαγε τους όρους της αντίστασης στην εξίσωση κι έφτασε στην παρακάτω σχέση για την εξατμισοδιαπνοή από επιφάνειες με επαρκή ή περιορισμένη περοχή νερού:

$$(L)(E) = \frac{\Delta(R_N - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{(\Delta + \gamma) \left[\frac{r_c - r_a}{r_a} \right]} \quad (3.34)$$

όπου:

L : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

E : ο ρυθμός της εξάτμισης

G : η πυκνότητα ροής της θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος

ρ : η πυκνότητα του αέρα

C_p : η ειδική θερμότητα του αέρα υπο σταθερή πίεση

R_N : η πυκνότητα ροής της καθαρά εισερχόμενης ακτινοβολίας

e_s : ο κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας

e_a : η τάση των υδρατμών κορεσμένου αέρα

Δ : η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας

r_a : η αεροδυναμική αντίσταση

r_c : η αντίσταση της καλλιέργειας

Η μέθοδος Hargreaves:

Η μέθοδος Hargreaves θεωρείται μια πιο απλή εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής και απαιτεί μόνον θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου. Στηρίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$E_{rc} = 0.0023 \left(\frac{S_o}{\lambda} \right) (T_a + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (3.35)$$

όπου:

E_{rc} : η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/ημέρα

S_o : η εξωγήινη ακτινοβολία σε $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})$

λ : η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης σε kJ/kg

T_a : η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}\text{C}$

$T_{max} - T_{min}$: η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας

Η μέθοδος αυτή συνιστάται όταν τα μόνα αξιόπιστα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι αυτά της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας. Εντούτοις η μέθοδος Hargreaves δίνει τελικά αποτελέσματα με ανεκτό σφάλμα της τάξης τους 10 με 15%.

4 Λεκάνη απορροής και δεδομένα

Η περιοχή που θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίζεται από τη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Ν. Πλαστήρα και ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη του Αχελώου. Χωρικά και διοικητικά ανήκει στο νομό Καρδίτσας, στη δυτική πλευρά του στον ορεινό όγκο των Αγράφων. Ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, όμως μετά την κατασκευή του φράγματος το μεγαλύτερο μέρος των νερών της λεκάνης εκτρέπεται προς το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας κι έτσι θεωρείται συνδυαστικό στοιχείο μεταξύ των δύο Υδατικών Διαμερισμάτων.

4.1 Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας

4.1.1 Γενικά στοιχεία

Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα της Ελλάδας και η έκτασή του ανέρχεται περίπου στα 10.398,60 km². Περιλαμβάνει τους νομούς Ευρυτανίας, Αιτωλοακαρνανίας και Λευκάδας, το μισό περίπου του νομού Φωκίδας και μικρά τμήματα των νομών Καρδίτσας, Τρικάλων, Άρτας και Φθιώτιδας.

Το υδατικό αυτό διαμέρισμα είναι κυρίως ορεινό με την οροσειρά της Πίνδου να καταλαμβάνει μεγάλο μέρος στα βόρεια και κεντρικά. Σε αυτήν συμπεριλαμβάνονται τα Άγραφα, τα Αθαμανικά, ο Τυμφρηστός και τα Βαρδούσια.

4.1.2 Γεωμορφολογικά – Γεωλογικά στοιχεία

Το υδατικό διαμέρισμα είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος ορεινό, με τις κυριότερες εξάρσεις στο ανατολικό τμήμα του. Οι μόνες πεδινές περιοχές εμφανίζονται στα παράλια του Μεσολογίου, στην πεδιάδα Αγρινίου και στην παραλιακή περιοχή της Βόνιτσας. Η κατανομή των υψομέτρων είναι η ακόλουθη: το 28% της εκτάσεως του διαμερίσματος έχει υψόμετρο πάνω από 1000 m, το 57% μεταξύ 200 και 1000 m, και μόνον το 15% έχει υψόμετρο μικρότερο των 200 m.

Στο διαμέρισμα αναπτύσσεται από βορρά προς νότο η οροσειρά της νότιας Πίνδου, η οποία περιλαμβάνει τα Αθαμανικά, τα Άγραφα, τον Τυμφρηστό, το Παναιτωλικό και τα Βαρδούσια. Τα υψόμετρα φτάνουν τα 2416 m (Αθαμανικά) ως 1924 m (Παναιτωλικό). Στα δυτικά εμφανίζονται χαμηλότερα βουνά (Βάλτου και Ακαρνανικά με μέγιστα υψόμετρα 1728 και 1528 m αντίστοιχα). Τέλος, στα ανατολικά βρίσκεται η Οίτη, με υψόμετρο 2325 m. Η μορφολογία των ακτών του διαμερίσματος είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη και περιλαμβάνει κλειστές θάλασσες και πολλούς μικρούς κόλπους και νησιά. Στο νοτιοδυτικό τμήμα, στις εκβολές του Αχελώου, σχηματίζονται οι κλειστές λιμνοθάλασσες του Αιτωλικού, του Μεσολογίου και της Κλείσοβας. (Στουρνάρας, 2011)

Η γεωμορφολογική εικόνα της περιοχής συντίθεται από πολλές γεωμορφολογικές μονάδες, ως συνέπεια της δράσης των ενδογενών και εξωγενών παραγόντων, με χαρακτηριστικό γνώρισμα τη βορειοδυτική-νοτιοανατολική διεύθυνση και την παρουσία μεγάλου αριθμού επιπέδων διάβρωσης σε διάφορα υψόμετρα.

Στο διαμέρισμα, από δυτικά προς τα ανατολικά, απαντώνται οι ακόλουθες γεωτεκτονικές ζώνες:

Ζώνη Παξών στο δυτικό τμήμα της Λευκάδας. Αποτελείται από φλύσχη και μεσοζωικούς ασβεστόλιθους.

Ιόνιος Ζώνη στο υπόλοιπο τμήμα της Λευκάδας και στο δυτικό τμήμα του διαμερίσματος. Αποτελείται από φλύσχη και μεσοζωικούς ασβεστόλιθους.

Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης στο κεντρικό ορεινό τμήμα του διαμερίσματος. Αποτελείται κυρίως από φλύσχη και ηφαιαιτικούς και κρητιδικούς ασβεστόλιθους.

Ζώνη Πίνδου στα ανατολικά της γραμμής Ναυπάκτου-Τριχωνίδας-Κρεμαστών. Αποτελείται από εναλλαγές λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων με κερατόλιθους, σχιστόλιθους και φλύσχη υπό μορφή λεπιών.

4.1.3 Κλιματολογικά – Υδρολογικά στοιχεία

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ξεκινά από 800 έως 1000 mm περίπου στα παράκτια και πεδινά και φτάνει τα 1400 mm στα ορεινά, ενώ σε μεγάλα υψόμετρα ξεπερνά τα 1800 mm. Η μέση ετήσια τιμή στο σύνολο του διαμερίσματος εκτιμάται σε 1370 mm. Η πιο βροχερή περίοδος είναι από το Νοέμβριο ως το Φεβρουάριο, ενώ οι πιο ξηροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι έντονες στα ορεινά του υδατικού διαμερίσματος. Οι μέρες χιονόπτωσης αυξάνουν από τα παράλια προς το εσωτερικό. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 65% στα παράκτια (65 και 68% για τους σταθμούς της Ναυπάκτου και του Μεσολογγίου αντίστοιχα), ενώ στο εσωτερικό παρατηρούνται ανάλογες τιμές (65% στο Λιδωρίκι).

Στο υδατικό διαμέρισμα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας περιλαμβάνονται οι κύριες υδρολογικές λεκάνες του Αχελώου, του Ευήνου και του Μόρνου και οι υπολεκάνες των παραποτάμων του Αχελώου (Ταυρωπού, Τρικεριώτη, Αγραφιώτη και Ίναχου).



Σχήμα 4.1: Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (wfd.ypeka.gr)

4.2 Λεκάνη απορροής Αχελώου

4.2.1 Γενικά

Ο ποταμός Αχελώος είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός της χώρας. Πηγάζει από την οροσειρά της Πίνδου και συγκεκριμένα από το όρος Λάκμος, νοτιοδυτικά του Μετσόβου και μετά από μια διαδρομή 220 χιλιομέτρων εκβάλλει στο Ιόνιο. Διέρχεται από τους νομούς Τρικάλων, έπειτα από τα όρια των νομών Άρτας-Καρδίτσας, ενώ στη συνέχεια από τα όρια των νομών Ευρυτανίας-Αιτωλοακαρνανίας. Σημαντικοί παραπόταμοι του Αχελώου είναι ο Ταυρωπός, ο Αγραφιώτης, ο Τρικεριώτης, το Μεγάλο ρέμα και ο Ρυάκας. Η λεκάνη απορροής του Αχελώου έχει έκταση 4770 km² και γειτονεύει βόρεια και δυτικά με τις λεκάνες του Αράχθου και της λίμνης Αμβρακίας και ανατολικά με τις λεκάνες του Πηνειού, του Σπερχειού και του Ευήνου. (Αθανασιά, 2010).

4.2.2 Λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα

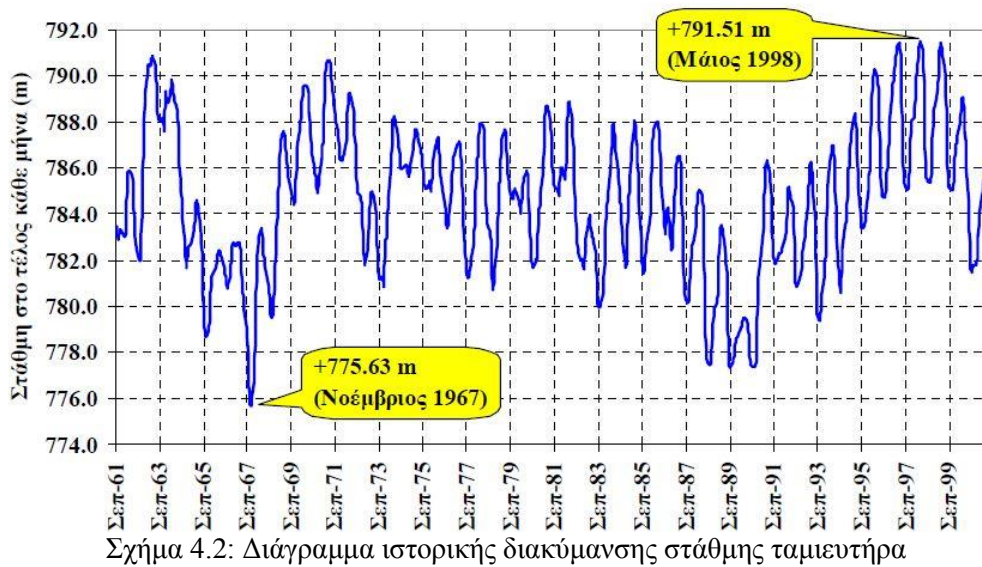
Στην ευρύτερη λεκάνη του Αχελώου ανήκει η λεκάνη απορροής της Λίμνης Πλαστήρα. Η περιοχή αυτή αποτελεί προστατευόμενη περιοχή και ανήκει στο δίκτυο NATURA 2000 ενώ έχει αναπτυχθεί και αξιοποιείται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες σε τουριστικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Ο Ταυρωπός ή Μέγδοβας, είναι ο μεγαλύτερος παραπόταμος του Αχελώου, έχει μήκος περίπου 60 km και εκβάλλει στην τεχνητή λίμνη των Κρεμαστών αφού διασχίζει τμήματα του νομού Καρδίτσας και Ευρυτανίας. Η ροή του διεκόπη το 1957 όταν και κατασκευάστηκε το τοξωτό υδροηλεκτρικό φράγμα και κατ'επέκταση η τεχνητή λίμνη Πλαστήρα (Ταυρωπού). Το φράγμα αυτό έχει ύψος 83.50 m, μήκος στέγης 188.0 m και στέγη στο υψόμετρο +795.20 m.

Ο ταμιευτήρας Ταυρωπού καταλαμβάνει (στη στάθμη υπερχειλίσης, 792 m) περίπου 25 km² από τα 164 km² που καταλαμβάνει η υδρολογική λεκάνη, δηλαδή το 15.2%. Έχει κατασκευαστεί με κύριο σκοπό την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το ύψος πτώσης είναι 577 m λόγω της τοποθέτησης του σταθμού παραγωγής ενέργειας στους πρόποδες του βουνού ανατολικά στη λεκάνη Πηνειού, κι έτσι εκτός από την υψηλή ενεργειακή απόδοση πραγματοποιείται και η εκτροπή του Ταυρωπού προς τη Θεσσαλική Πεδιάδα για να καλύψει τις μεγάλες αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Επίσης είναι σημαντική η συμβολή του ταμιευτήρα για την ύδρευση της Καρδίτσας αλλά και αρκετών γειτονικών περιοχών. Η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανέρχεται σε 400.000.000 m³. Η συνολική μέση ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται περίπου σε 190 GWh.

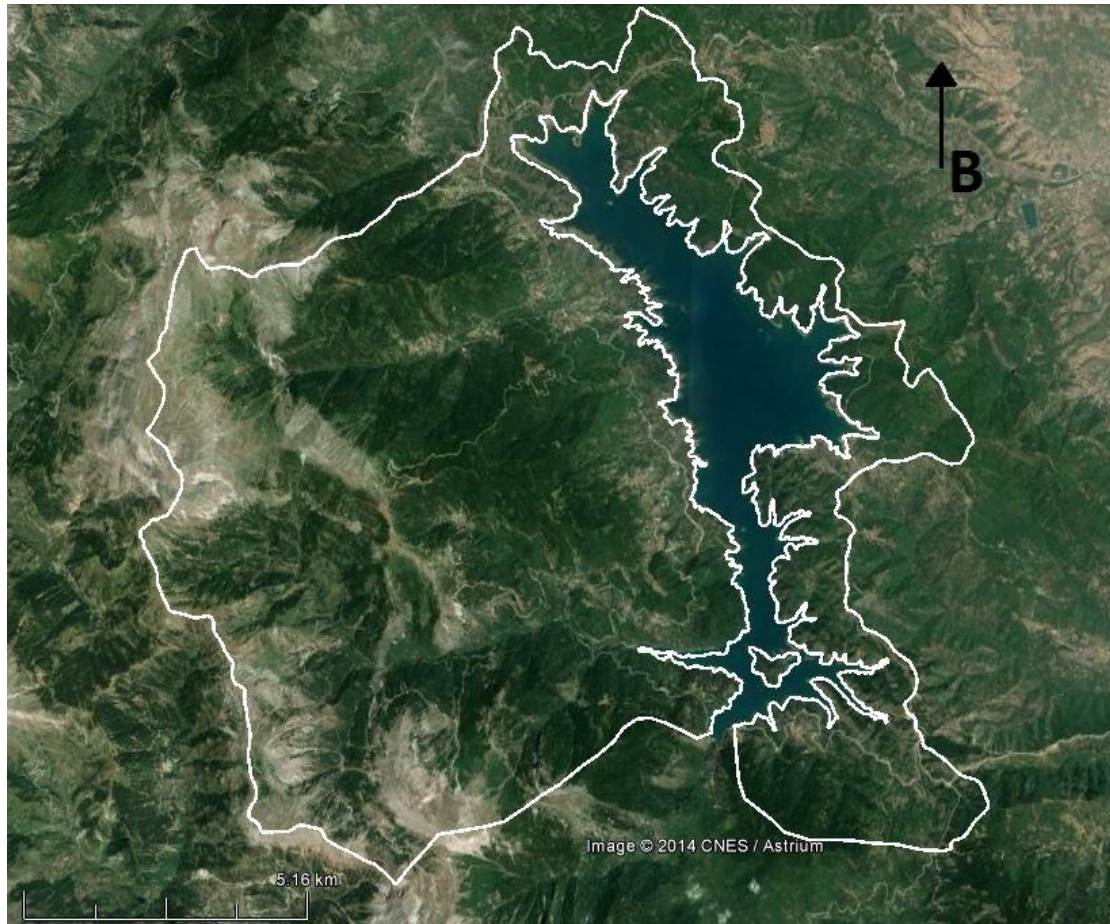
Η μέση ετήσια καθαρή εισροή του ταμιευτήρα είναι 153.2 hm³, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος απορροής στη λίμνη είναι 1029 mm. (Ευστρατιάδης κ.α., 2002)

Λόγω της μεγάλης ζήτησης για αρδευτικούς σκοπούς, οι ετήσιες απολήψεις ξεπέρασαν αρκετές φορές τη μέση ετήσια εισροή των 153.2×10⁶ m³ και αυτό είχε ως συνέπεια τη σταδιακή πτώση της στάθμης του ταμιευτήρα. Η ιστορική διακύμανση της στάθμης φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.



Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά λίμνης και λεκάνης απορροής Πλαστήρα

Έκταση λεκάνης απορροής	164.3 km ²
Έκταση λεκάνης χωρίς τη λίμνη για την παρούσα μελέτη	141.04 km ²
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης	2144,86 m
Μέσο υψόμετρο λεκάνης	1125,86 m
Στάθμη υπερχείλισης λίμνης	792 m
Κατώτατη στάθμη υδροληψίας	776 m
Έκταση λίμνης στη στάθμη υπερχείλισης	25 km ²
Έκταση λίμνης στη κατώτατη στάθμη υδροληψίας	15 km ²
Μέση ετήσια καθαρή εισροή	153×10 ⁶ m ³
Μέσο ετήσιο ύψος απορροής στη λίμνη	1029 mm

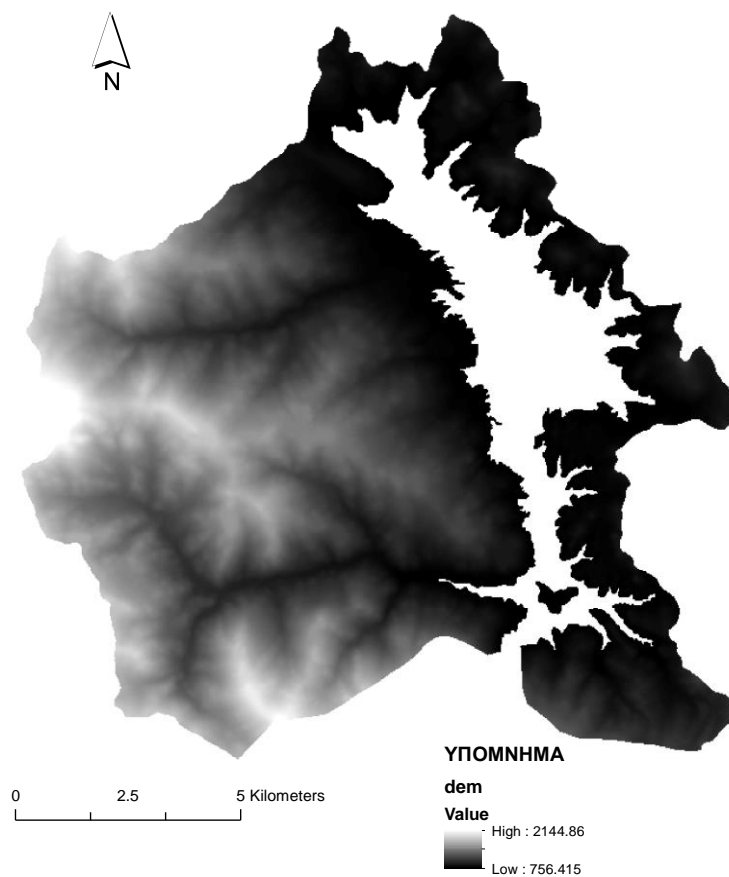


Σχήμα 4. 3: Η λεκάνη απορροής απο δορυφορική λήψη

4.3 Γεωγραφικά δεδομένα για τη λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα

4.3.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναζητήθηκαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής από τον τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Συγκεκριμένα, δόθηκε ένα Ψ.Μ.Ε της ευρύτερης περιοχής του νομού Καρδίτσας, μέσα στην οποία υπήρχε και η περιοχή μελέτης. Η ανάλυση του Ψ.Μ.Ε είναι 25x25 m η οποία παρόλο που δεν θεωρείται αρκετά υψηλή, είναι ικανοποιητική για την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής που επιχειρείται στην εργασία αυτή.

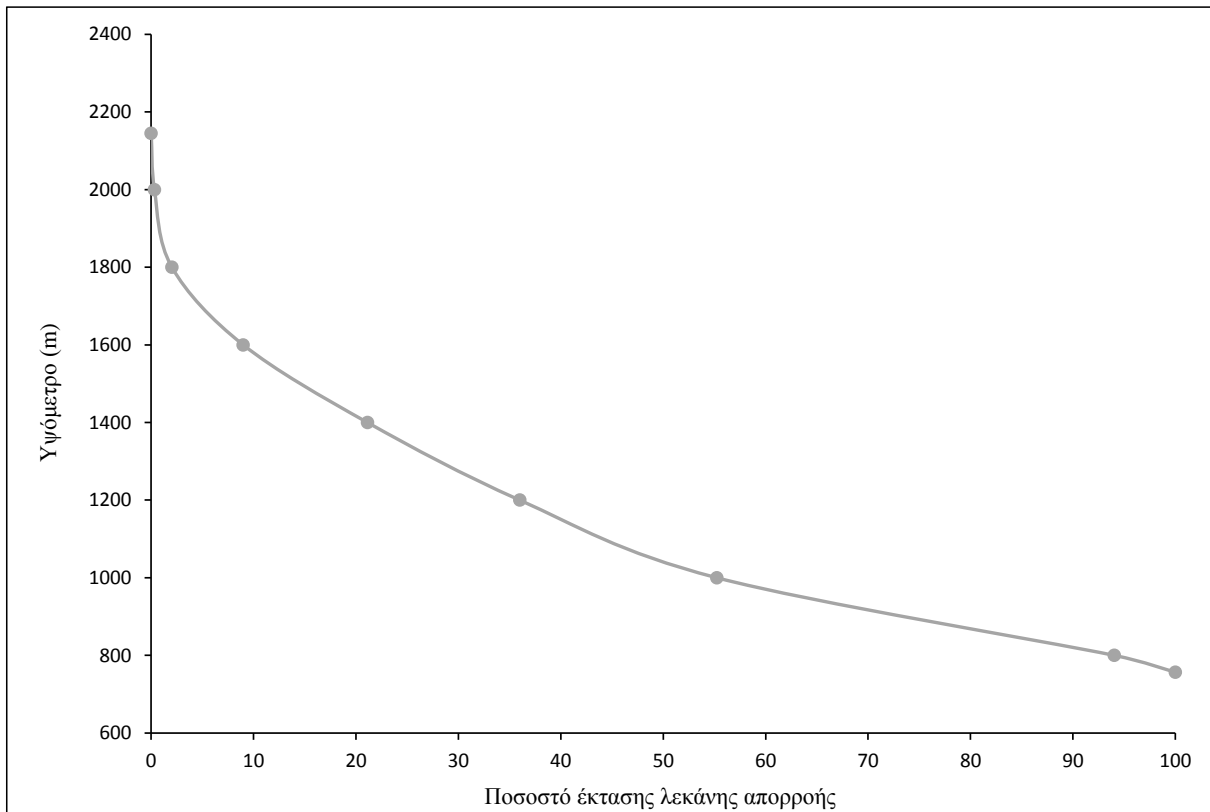


Σχήμα 4.4: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής

4.3.2 Υψογραφική καμπύλη

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής χωρίς τον ταμιευτήρα, στη θέση του φράγματος, υπολογίστηκε στα 141.046 km². Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης προέκυψε 1125.86 m.

Παρουσιάζεται παρακάτω η υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής στη θέση του φράγματος Πλαστήρα.



Σχήμα 4.5: Η υπογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής

Από την παραπάνω υπογραφική καμπύλη προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

- Ελάχιστο υψόμετρο: 756.41 m
- Μέγιστο υψόμετρο: 2144.86 m
- Διάμεσο υψόμετρο: 1054.26 m

4.4 Υδρολογικά δεδομένα για τη λεκάνη απορροής Λίμνης Πλαστήρα

4.4.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και βροχομετρικοί σταθμοί

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο για την τεχνική υδρολογία και την μελέτη και διαχείριση των υδατικών πόρων γενικότερα. Στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων, η βροχόπτωση και το χιόνι τα οποία έχουν την πιο άμεση επίπτωση στο υδρολογικό ισοζύγιο των ευρωπαϊκών χωρών

Οι κατακρημνίσεις παίζουν σπουδαίο ρόλο στην εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων. Ειδικότερα για την εφαρμογή του SWAT απαιτήθηκαν ημερήσια ύψη βροχόπτωσης. Οι σταθμοί που εντοπίστηκαν εντός ή πλησίον της λεκάνης απορροής είναι οι εξής:

- Σταθμός Καρίτσα
- Σταθμός Μπεζούλα
- Σταθμός Μορφοβούνι
- Σταθμός Μούχα
- Σταθμός ΥΗΣ – Φράγμα

- Σταθμός ΥΗΣ – Υδροληψία

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών

ΚΩΔΙΚΟΣ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΝΟΜΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΦΟΡΕΑΣ
ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	A/A			ΜΗΚΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ		
04	12	021	ΤΑΥΡΩΠΟΣ (ΥΗΣ Υδρολ.)	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°46'	39°17'	800	ΔΕΗ
04	12	019	ΤΑΥΡΩΠΟΣ (ΥΗΣ Φράγμα)	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°44'	39°14'	850	ΔΕΗ
04	12	020	ΜΟΥΧΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°46'	39°14'	870	ΔΕΗ
04	12		ΚΑΡΙΤΣΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°69'	39°26'	1074,3	ΥΠΕΚΑ
04	12	006	ΜΠΕΖΟΥΛΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°42'	39°18'	901	ΥΠΔΕ
08	11	067	ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	21°45'	39°21'	780	ΥΠΓΕ

Τελικά, στην προσπάθεια για τη συλλογή των ημερησίων υψών βροχόπτωσης για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής εντός της λεκάνης και ένας σταθμός λίγο έξω από τα όρια της λεκάνης στο βορειοανατολικό άκρο. Πρόκειται για τους τρεις σταθμούς, την Καρίτσα, την Μπεζούλα και το Μορφοβούνι για τους οποίους συλλέχθηκαν ελεύθερα πρωτογενή δεδομένα βροχόπτωσης για μεγάλες περιόδους.

4.4.2 Συσχέτιση υψών βροχόπτωσης – Εκτίμηση χωρικά μέσης βροχόπτωσης

Στην απόφαση για την επιλογή των βροχομετρικών σταθμών έπαιξε σημαντικό ρόλο, εκτός των ελεύθερων και άμεσα διαθέσιμων δεδομένων, η μεγάλη επιρροή που είχαν στην λεκάνη μέσω της κατάρτισης των πολυγώνων Thiessen καθώς επίσης και η καλή συσχέτιση μεταξύ τους, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη συμπλήρωση των ελλείψεων. Η συσχέτιση υπολογίστηκε ανα δύο σταθμούς με την κατάλληλη σχέση και ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου η μονάδα αποτελεί την τέλεια συσχέτιση. Οι συσχετίσεις των τριών σταθμών μεταξύ τους, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

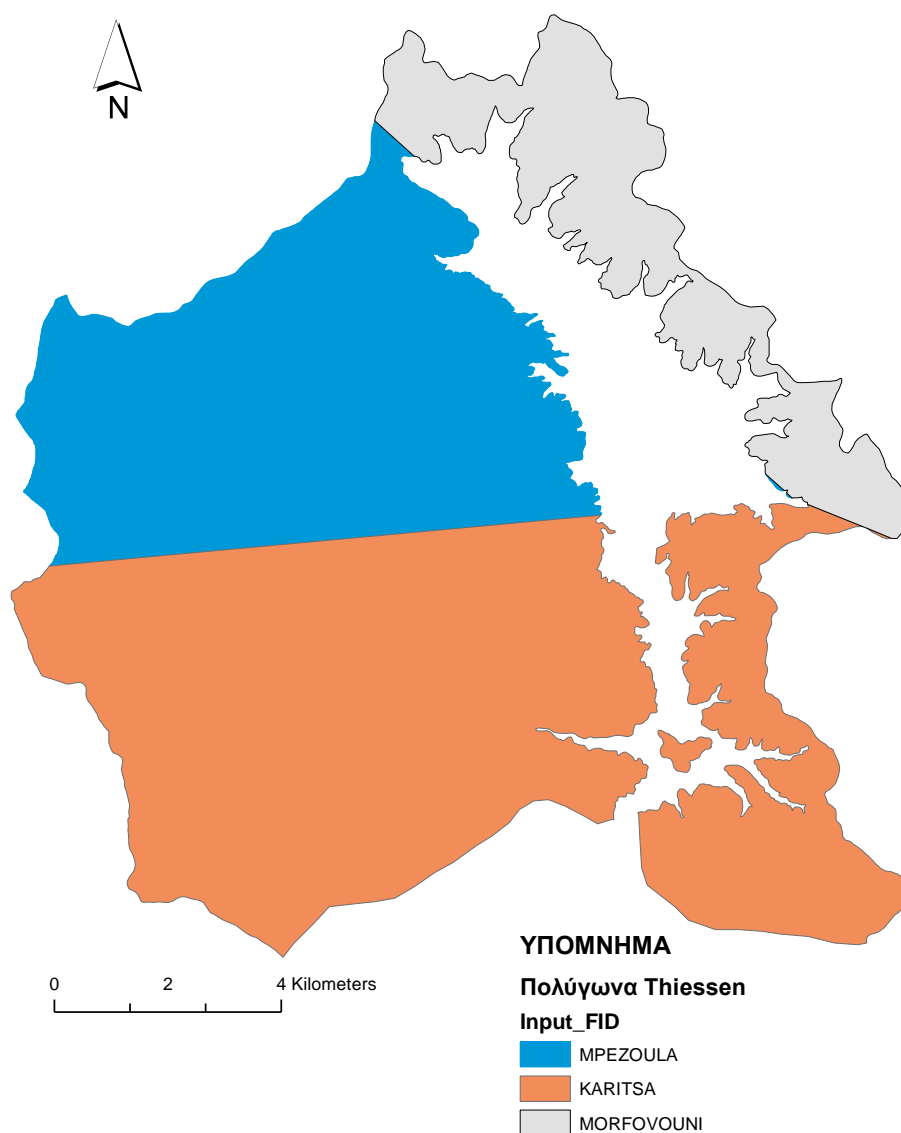
Πίνακας 4.3: Συντελεστές συσχέτισης των σταθμών

	ΚΑΡΙΤΣΑ	ΜΠΕΖΟΥΛΑ	ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ
ΚΑΡΙΤΣΑ	1	0.6447	0.6123
ΜΠΕΖΟΥΛΑ	0.6447	1	0.6800
ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	0.6123	0.6800	1

Επίσης, σύμφωνα με την τελική χάραξη των πολυγώνων Thiessen μέσω του λογισμικού GIS, προέκυψαν τα εξής ποσοστά επιρροής για τους τρεις αυτούς σταθμούς:

Πίνακας 4.4: Ζώνες επιρροής

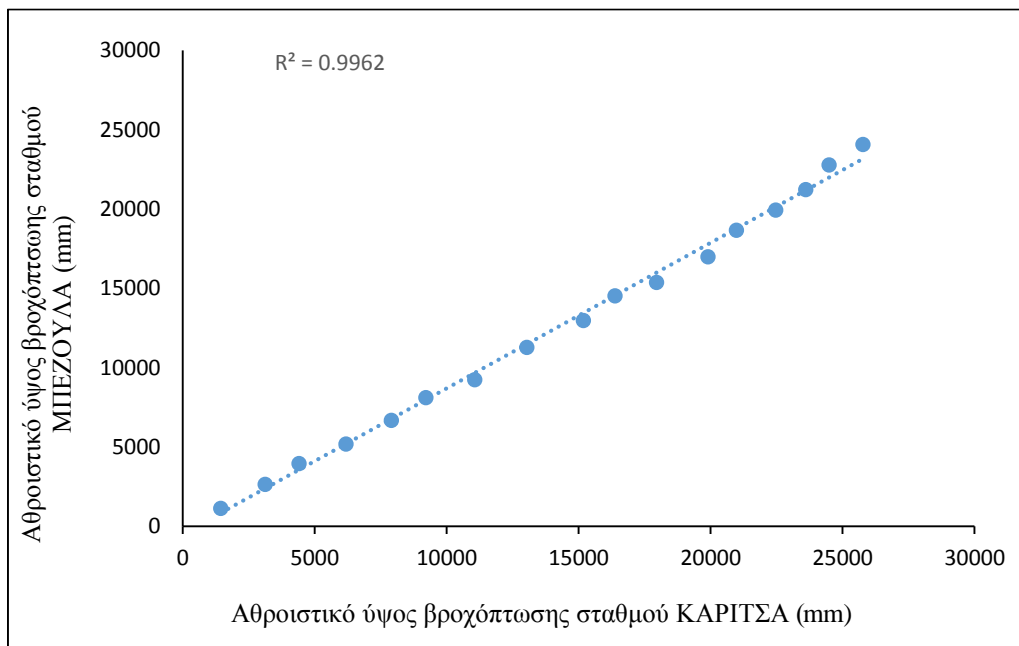
Βροχομετρικός σταθμός	Ποσοστό (%)
Καρίτσα	53.5
Μπεζούλα	33.2
Μορφοβούνι	13.3



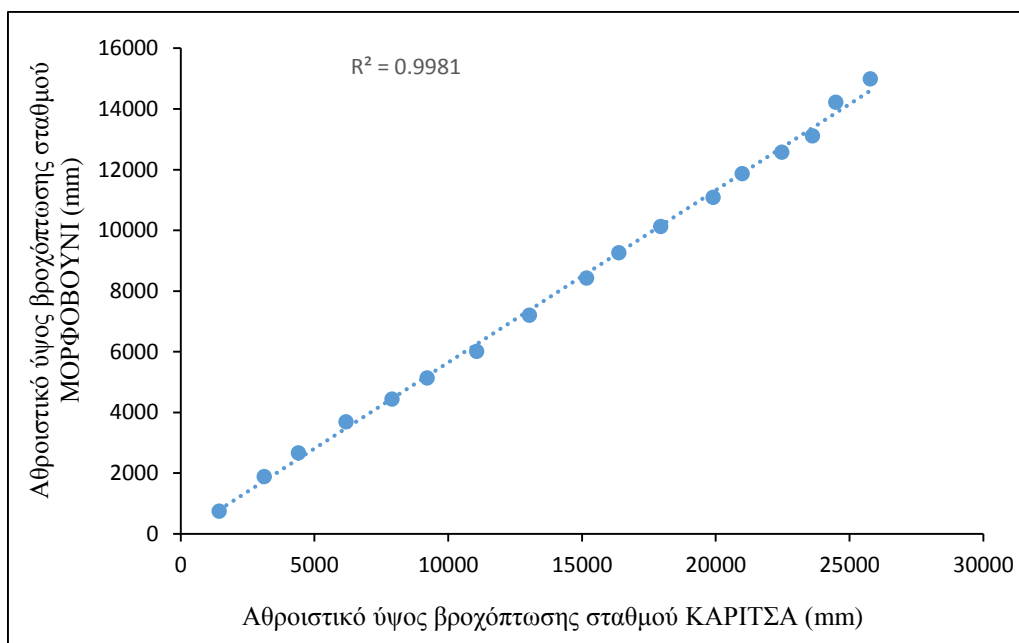
Σχήμα 4.6: Τα πολύγωνα Thiessen για τους τρεις σταθμούς

4.4.3 Έλεγχος ομογένειας

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σημαντικό να ελεγχθούν οι χρονοσειρές βροχόπτωσης για τον εντοπισμό των αλλαγών των συνθηκών μέτρησης. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται έλεγχος ομογένειας και πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης για 17 υδρολογικά έτη. Ως σταθμός βάσης επιλέχθηκε ο σταθμός Καρίτσα λόγω της μεγάλης επιρροής που έχει στη λεκάνη και δεδομένου ότι οι συντελεστές συσχέτισης ήταν παραπλήσιοι και για τους τρεις σταθμούς.

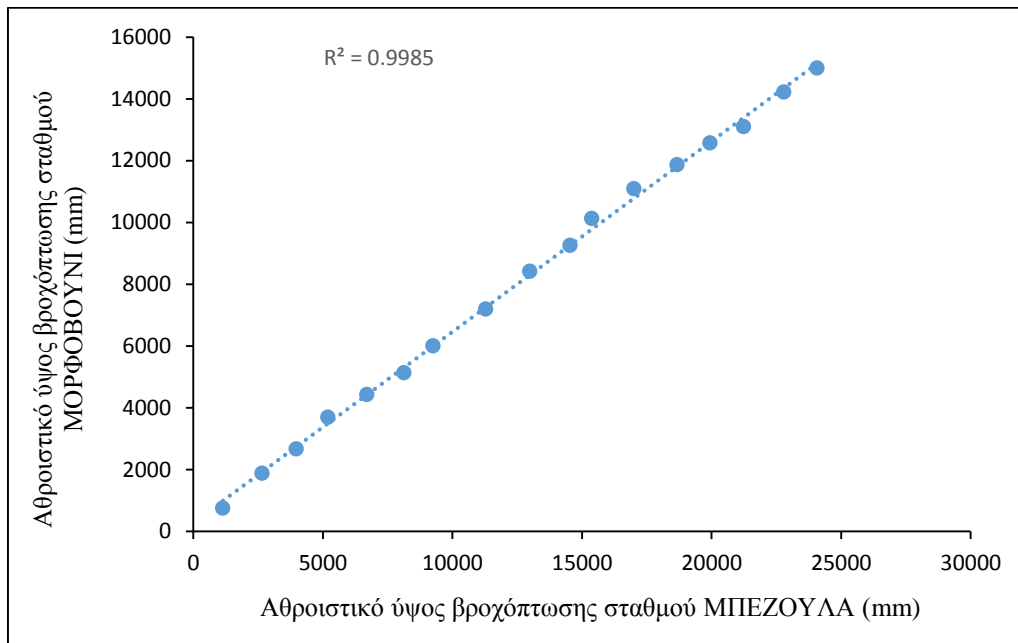


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα διπλής αθροιστικής καμπύλης Μπεζούλα-Καρίτσα



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα διπλής αθροιστικής καμπύλης Μορφοβούνι-Καρίτσα

Επίσης ελέγχθηκε και η ομογένεια με βάση το σταθμό Μπεζούλα και ελεγχόμενο σταθμό το Μορφοβούνι:



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα διπλής αθροιστικής καμπύλης Μορφοβούνι-Μπεζούλα

Από τα παραπάνω σχήματα και μέσω των συντελεστών R^2 , γίνεται η διαπίστωση ότι οι ευθείες προσαρμόζονται ικανοποιητικά. Συνεπώς, τα δεδομένα είναι ομογενή και δεν χρειάζονται κάποια διόρθωση για την ομογενοποίησή τους.

4.4.4 Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων και μέσο βροχομετρικό ύψος με υψομετρική αναγωγή

Οι χρονοσειρές που είχαμε στη διάθεσή μας, παρουσίαζαν ελλείψεις σε κάποια σημεία. Οι ελλείψεις αυτές ήταν κυρίως κάποιες ημέρες διάσπαρτες, ή ακόμα και ολόκληροι μήνες σε κάποιες ελάχιστες περιπτώσεις. Για την συμπλήρωση των ελλείψεων σε κάθε σταθμό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των αντιστρόφων αποστάσεων η οποία έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

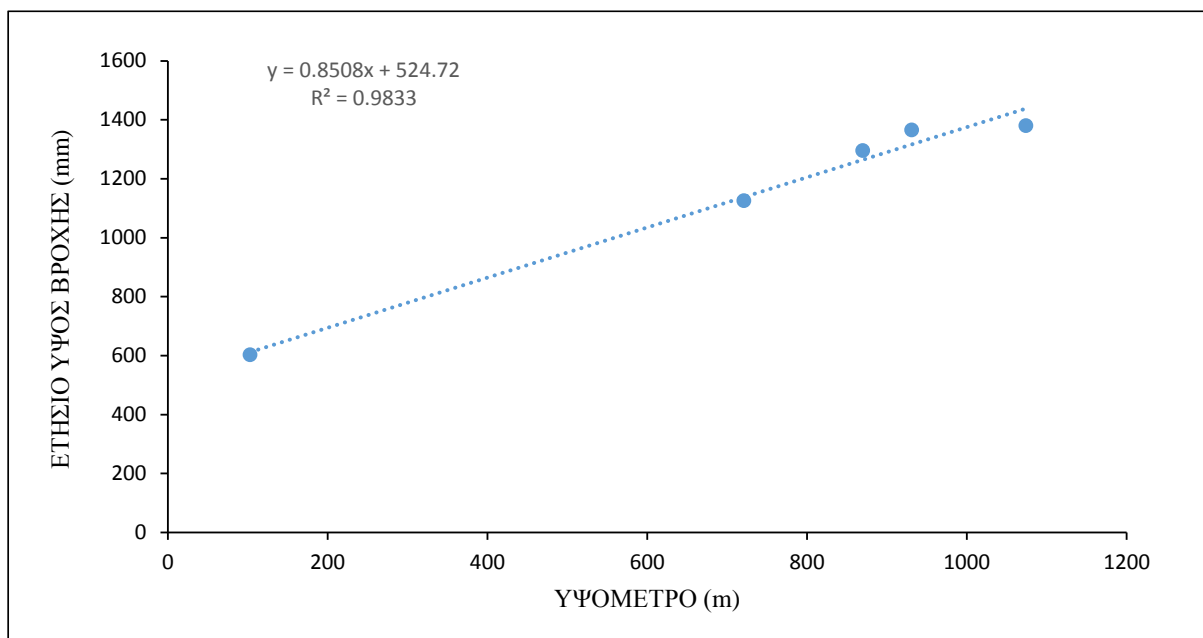
Στη συνέχεια, η τελική διαδικασία για την ετοιμασία των βροχομετρικών δεδομένων, είναι να βρεθεί η χωρικά μέση βροχόπτωση και να γίνει η αναγωγή στο μέσο τοπογραφικό υψόμετρο της λεκάνης.

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thiessen η οποία με την κατάλληλη σχέση και χρησιμοποιώντας τις ζώνες επιρροής που έχουν υπολογιστεί με βάση τα πολύγωνα, υπολογίζει την χωρικά μέση βροχόπτωση. Η αναγωγή της στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης έγινε με τη βοήθεια της βροχοβαθμίδας. Η βροχοβαθμίδα προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τα μέσα ετήσια βροχομετρικά ύψη των σταθμών:

- Καρίτσα
- Μπεζούλα
- Μουζάκι
- Μούχα

- Τρίκαλα

Για τους τρεις τελευταίους σταθμούς μπορεί να μην υπήρχαν διαθέσιμα ημερήσια βροχομετρικά ύψη, ήταν όμως γνωστό το μέσο ετήσιο ύψος βροχής από παλαιότερες έρευνες. Τελικά η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης μετά από αρκετές απόπειρες με διάφορους σταθμούς, κατέληξε να έχει υψηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης και φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα βροχοβαθμίδας

Συνεπώς, η βροχοβαθμίδα για την λεκάνη απορροής προέκυψε από την κλίση της ευθείας του σχήματος, ίση με 85 mm/100 m. Ο συντελεστής αναγωγής λ τελικά έλαβε τιμή 1.151.

Τελικά, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο, τα ημερήσια ύψη βροχόπτωσης για τα έτη 1961 έως 1977 λόγω της αξιοπιστίας και των ελλείψεων που είχαν.

Για την απλούστερη εκτέλεση της προσομοίωσης, δημιουργήθηκε ένας μέσος σταθμός με βασικό κριτήριο τα βάρη των βροχομετρικών σταθμών που επιλέχθηκαν, ενώ τα ημερήσια ύψη βροχόπτωσης διορθώθηκαν με χρήση του διορθωτικού συντελεστή αναγωγής λ . Συνεπώς, τα τελικά βροχομετρικά ύψη εισόδου είναι τα θεωρητικά ύψη του μέσου θεωρητικού σταθμού, ενώ το υψόμετρο του μέσου σταθμού είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης.

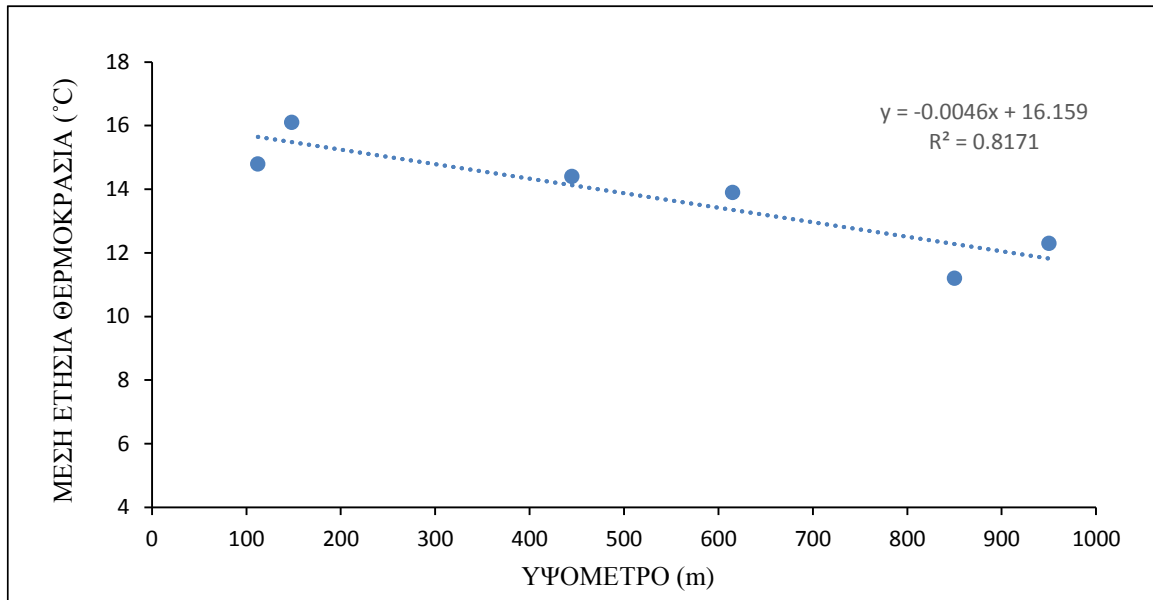
4.4.5 Θερμοκρασία αέρα και αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας συγκεντρώθηκαν δεδομένα ελαχίστων και μεγίστων θερμοκρασιών -των γειτονικών με την λεκάνη απορροής- μετεωρολογικών σταθμών Σκοπιά και Μ. Κερασιά. Τελικώς, επιλέχθηκε η χρονοσειρά της Σκοπιάς, λόγω την πληρέστερων δεδομένων και έγινε η αναγωγή της στο μέσο υψόμετρο της εξεταζόμενης λεκάνης με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου και προκύπτει από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών των σταθμών μιας περιοχής σε συνάρτηση με τα υψόμετρα.

Χρησιμοποιήθηκαν 6 σταθμοί των οποίων ήταν γνωστές οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και είναι οι εξής στα αντίστοιχα υψόμετρα H :

- Καρδίτσα (14.8 °C, $H= 112$ m)

- Φάρσαλα (16.1 °C, H= 148 m)
- Σκοπιά (14.4 °C, H= 444,7 m)
- Δομοκός (13.9 °C, H= 615 m)
- Φρ. Ταυρωπού (11.2 °C, H= 850 m)
- Λεοντίτο (12.3 °C, H= 950 m)



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα θερμοβαθμίδας

Από την παραπάνω γραφική παράσταση, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η θερμοβαθμίδα προκύπτει $-0,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

4.4.6 Απορροές

Στη συγκεκριμένη εργασία, ήταν αναγκαίο να βρεθούν ή να υπολογιστούν οι συνολικές μετρημένες απορροές στην έξοδο της λεκάνης. Οι μηνιαίες απορροές που χρειάστηκαν ώστε να γίνει η απαραίτητη σύγκριση με τις προσομοιωμένες απορροές του μοντέλου, συλλέχτηκαν από προϋπάρχουσα μελέτη (Ευστρατιάδης κ.α., 2002). Με κατάλληλη επεξεργασία, τα μηνιαία ύψη των απορροών σε mm του πίνακα της υδρολογικής μελέτης, μετατράπηκαν σε παροχές για την εξεταζόμενη έκταση της λεκάνης ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση με τις προσομοιωμένες παροχές και να επιτευχθεί η εξαγωγή του συντελεστή NSE και η βαθμονόμηση. Ο πίνακας με τις μετρημένες απορροές που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθεται παρακάτω:

Πίνακας 4.5: Μετρημένες απορροές σε (m³/s)

Υδρ.	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μα	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
1961-62	2.92	5.1	4.53	2.96	5.57	17.33	4.30	2.14	1.10	0.28	0.47	2.76
1962-63	6.39	18.6	20.28	15.41	25.72	9.90	7.36	7.60	2.20	1.26	0.72	0.23
1963-64	4.76	1.33	16.51	3.2	7.19	9.1	3.90	3.56	2.55	1.50	0.97	0.15
1964-65	1.96	5.52	11.66	7.14	6.67	8.16	10.58	5.35	2.38	1.01	0.41	0.34
1965-66	0.24	4.62	9.62	12.04	5.49	7.96	5.19	5.16	1.89	0.25	0	0.84
1966-67	0.87	11.79	11.87	7.55	2.59	4.34	5.16	2.94	0.81	1.56	0.55	0.69
1967-68	0.71	1.28	9.02	12.94	11.60	9.04	5.67	4.71	2.86	0.39	0.31	0.39
1968-69	2.26	5.14	19.42	10.70	9.74	12.78	4.76	4.38	0.69	0.71	0.12	1.03
1969-70	0.11	1.78	13.79	15.15	5.65	9.57	3.15	2.02	2.32	1.05	0.25	0.72
1970-71	2.72	0.87	6.28	11.13	8.14	16.34	11.07	4.18	0.86	1.08	1.91	0.73
1971-72	1.55	4.31	5.29	7.52	9.52	11.10	14.76	6.20	0.75	1.01	1.09	0.71
1972-73	6.67	2.99	1.70	5.19	12.87	9.09	8.80	6.46	1.23	1.21	1.14	0.45
1973-74	4.33	3.84	10.90	4.24	9.59	10.51	12.61	5.49	1.27	0.98	0.63	0.05
1974-75	1.74	3.82	2.28	1.89	4.43	7.14	4.54	2.12	1.13	1.14	3.93	0
1975-76	1.18	3.22	6.68	4.76	8.38	8.14	9.75	4.77	1.15	0.87	0.77	0.36
1976-77	1.10	5.26	11.83	5.75	2.16	1.74	3.3	1.31	0.67	0.45	0	0.67

4.5 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων χρήσεων γης

Η κάλυψη γης της λεκάνης όπως αυτή προήλθε από χάρτες του CORINE μέσω της ιστοσελίδας του υπουργείου και επεξεργάστηκε καταλλήλως αναλύεται παρακάτω:

Στην λεκάνη απορροής της λίμνης Πλαστήρα, εμφανίζονται οι εξής χρήσεις γης βάση του CORINE:

Στη δεύτερη κατηγορία «Αγροτικές περιοχές» εμφανίζονται οι εξής υποκατηγορίες:

211: Αρόσιμη γη/Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη

242: Ετερογενείς αγροτικές περιοχές/Σύνθετες καλλιέργειες

Στην τρίτη κατηγορία «Δάση και ημιφυσικές περιοχές» εμφανίζονται οι υποκατηγορίες:

311: Δάση/ Δάσος πλατύφυλλων

312: Δάση/ Δάσος κωνοφόρων

313: Δάση/ Μεικτό δάσος

321: Θάμνοι και ποώδη/ Φυσικοί βοσκότοποι

322: Θάμνοι και ποώδη/ Θάμνοι και χερσότοποι

323: Θάμνοι και ποώδη/ Σκληροφυλλική βλάστηση

324: Θάμνη και ποώδη/ Μεταβατικές και θαμνώδεις-δασώδεις εκτάσεις

331: Ανοιχτοί χώροι με λίγο ή καθόλου βλάστηση/ Αμμώδεις εκτάσεις και αμμόλοφοι

332: Ανοιχτοί χώροι με λίγο ή καθόλου βλάστηση/ Γυμνά βράχια

333: Ανοιχτοί χώροι με λίγο ή καθόλου βλάστηση/ Εκτάσεις με αραιή βλάστηση

Στην τέταρτη κατηγορία «Υδάτινες επιφάνειες»:

512: Εσωτερικά νερά/ Υδάτινα συστήματα

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η βάση δεδομένων του SWAT διαθέτει 102 είδη φυτοκάλυψης. Η σωστή αντιστοίχιση των τύπων χρήσεων γης του CORINE με τους τύπους του SWAT είναι κρίσιμης σημασίας διότι έτσι διασφαλίζεται η σωστή κατανομή των αριθμών καμπύλης CN που κρίνουν σε μεγάλο βαθμό τις απορροές που θα υπολογιστούν από το μοντέλο. Το SWAT δίνει συγκεκριμένο αριθμό καμπύλης για κάθε τύπο χρήσης γης από τη βάση δεδομένων του.

Για τη σωστή αντιστοίχιση έγινε προσπάθεια ακριβούς μετάφρασης των ονομασιών των κατηγοριών του SWAT ενώ πραγματοποιήθηκε έρευνα στην ελληνική και την ξένη βιβλιογραφία για παρόμοιες αντιστοιχίσεις.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τις αντιστοιχίσεις των κατηγοριών χρήσης γης:

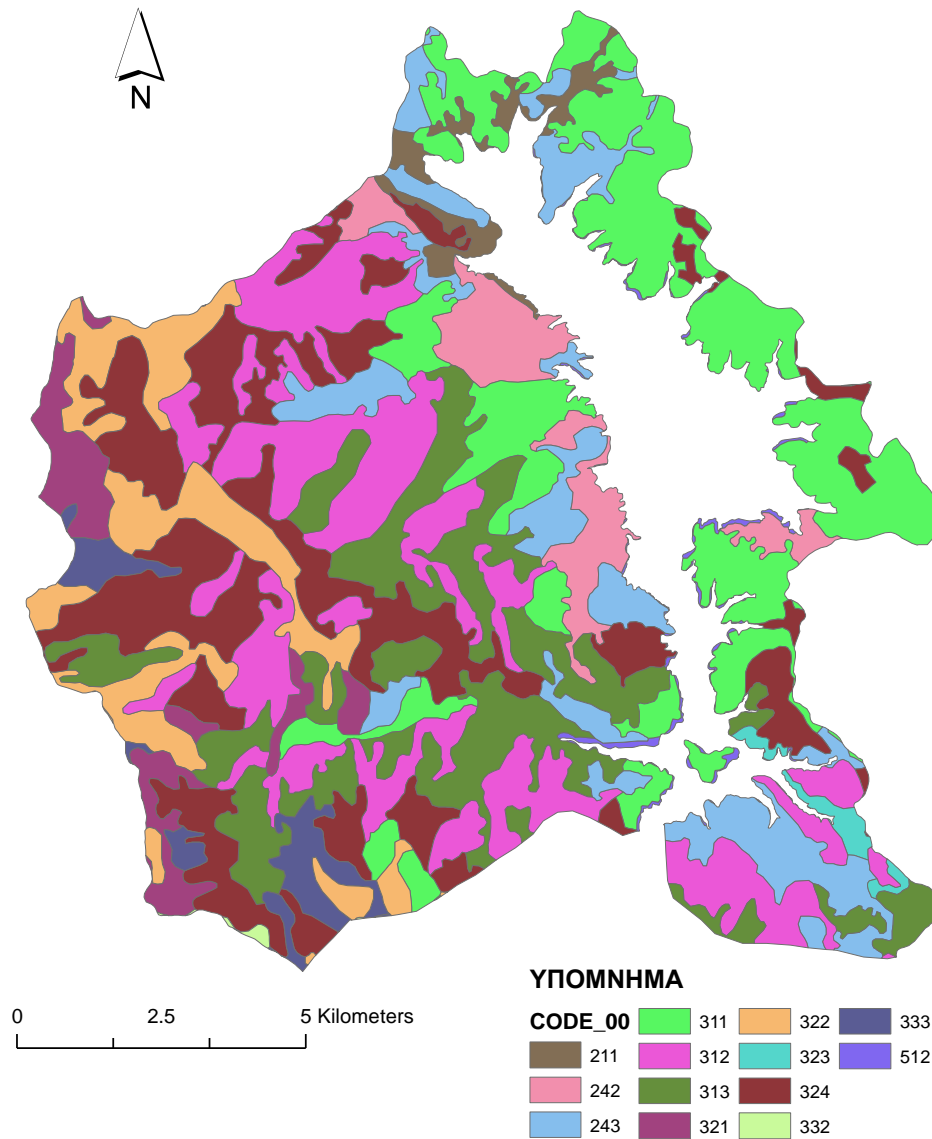
Πίνακας 4.6: Αντιστοίχιση κατηγοριών χρήσεων γης

Κωδικός CORINE	Έκταση στη λεκάνη χωρίς τη λίμνη (m ²)	Ποσοστό (%)	Αντιστοίχιση στο SWAT
211	2584807,983	1.83	WWHT
242	7184349,906	5.09	AGRL
243	13260471,06	9.40	AGRL
311	25901198,38	18.36	FRSD
312	25082811,09	17.78	FRSE
313	20483066,51	14.52	FRST
321	5099612,61	3.61	PAST
322	10476835,96	7.42	RNGE
323	983455,87	0.70	FRST
324	25572768,43	18.13	RNGE
332	130580,31	0.09	BERM
333	3454604,49	2.45	BERM
512	831118,57	0.59	WATR

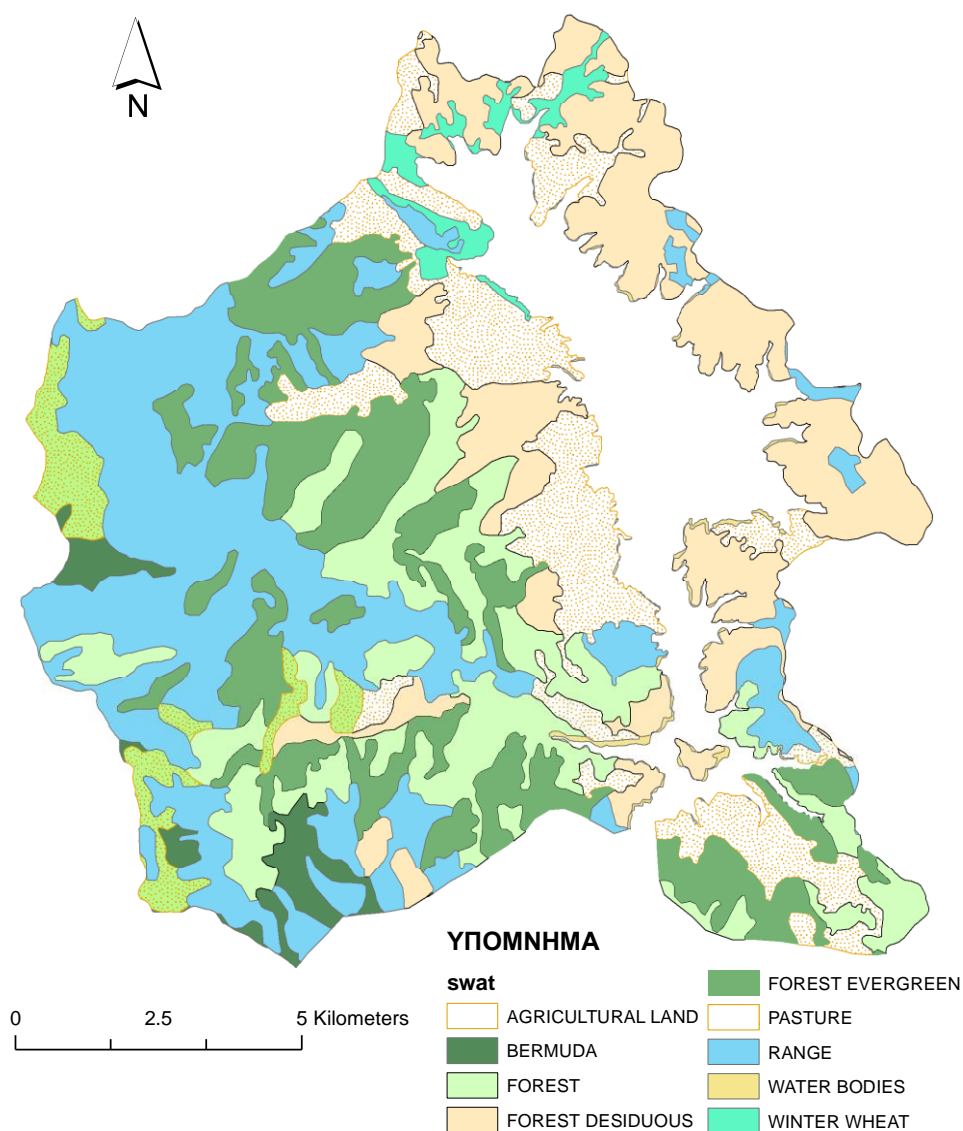
Όπως διαπιστώθηκε από την επεξεργασία των κωδικών του CORINE αλλά και από την παραπάνω αντιστοίχιση με τις κατηγορίες του SWAT, η κάλυψη γης που επικρατεί στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης, είναι οι δασικές εκτάσεις. Αυτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση το SWAT και είναι τα δάση πλατύφυλλων (FRSD), τα δάση κωνοφόρων (FRSE) και τα μικτά δάση (FRST). Συνολικά, οι δασικές εκτάσεις καλύπτουν το 51.36% της έκτασης της λεκάνης. Η δεύτερη σε ποσοστό κάλυψη είναι η κατηγορία Θάμνοι και χερσότοποι

(RNGE) με 25.55%. Ακολουθούν οι αγροτικές εκτάσεις με 14.49% ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες καταλαμβάνουν το υπόλοιπο κομμάτι.

Τελικά, οι 13 χρήσεις γης του CORINE αντιστοιγήθηκαν σε 9 κατηγορίες του SWAT και απεικονίζονται στους παρακάτω χάρτες:



Σχήμα 4.12: Χάρτης χρήσεων γης CORINE

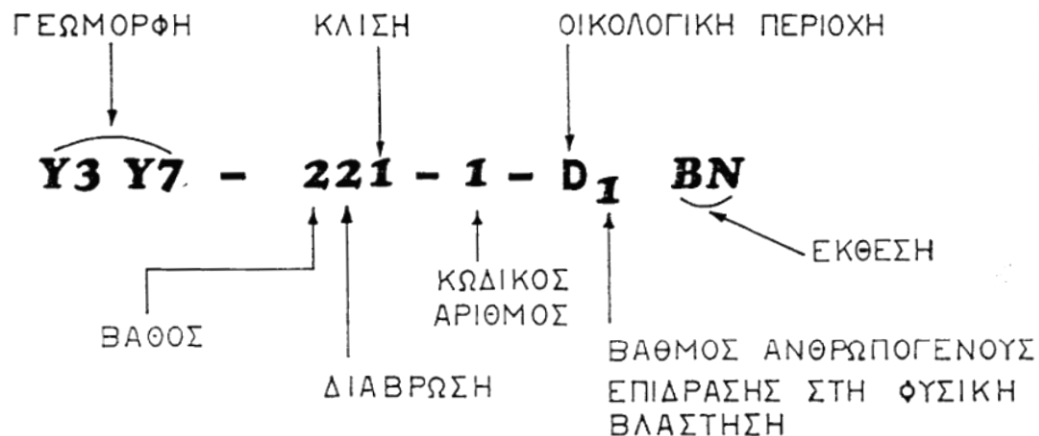


Σχήμα 4.13: Χάρτης χρήσεων γης SWAT

4.6 Εδαφολογικά δεδομένα

Τα στοιχεία εδάφους της λεκάνης απορροής, ελήφθησαν από χάρτη γαιών και γαιοϊκανότητας του Ινστιτούτου Δασικών Ερευνών σε κλίμακα 1:50.000. Μαζί με τον χάρτη παραλήφθηκε και ένα αρχείο επεξήγησης της κωδικοποίησης της βάσης δεδομένων.

Η κωδικοποίηση ήταν της μορφής Y3Y7 – 221 – 1 – D₁ BN, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.14: Κωδικοποίησης της βάσης δεδομένων του εδαφολογικού χάρτη

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της λεκάνης ενδιαφέροντος, το στοιχείο που ήταν απαραίτητο από την παραπάνω κωδικοποίηση, ήταν η γεωμορφή. Γεωμορφές είναι χαρακτηριστικές μονάδες της επιφάνειας της γης με ειδική προέλευση υλικού και ξεχωριστό σχήμα. Στην ταξινόμηση των γαιών της χώρας μας οι γεωμορφές διακρίνονται ανάλογα με το γεωμετρικό τους σχήμα, το οποίο συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την πετρογραφία της περιοχής.

Πίνακας 4.7: Οι κατηγορίες μητρικού υλικού του εδάφους

Μητρικό υλικό εδάφους	Συμβολισμός	Μητρικό υλικό εδάφους	Συμβολισμός
Ψαμμιτικός Φλύσσης	YY	Κολλούβια φλύσχη	KK
Μικτός φλύσσης	FF	Κολλούβια ασβεστολίθων	HH
Αργιλικός φλύσσης	RR	Κολλούβια περιδοτιτών	JJ
Σκληροί Ασβεστόλιθοι	CC	Κολλούβια σχιστολίθων	VV
Τριτογενείς αποθέσεις	TT	Κολλούβια γνευσίων	WW
Περιδοτίτες-γάβροι	PP	Δολίνες	LC
Σχιστόλιθοι	XX	Κώνοι αποθέσεων	SS
Γνεύσιοι	ZZ	Σάρρες	ES
Γρανίτης	NN	Κοίτες ποταμών	BB
Αλλούβια	AA	Φλύσσης επί ασβεστολίθων	MM

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία του χάρτη του Ι.Δ.Ε και ερμηνεύοντας προσεκτικά τις γεωμορφές, προσδιορίστηκαν τα μητρικά υλικά των εδαφών που συναντώνται στη λεκάνη Ν.Πλαστήρα.

Πίνακας 4.8: Τύποι εδαφών και τα ποσοστά τους

Τύποι εδαφών στη λεκάνη	Ποσοστό (%)
Ψαμμιτικός φλύσσης	73.7
Σκληρός ασβεστόλιθος	21.2
Κολλούβια ασβεστολίθων	2.03
Μικτός φλύσσης	1.64
Φλύσσης επί ασβεστολίθων	1.04

Πίνακας 4.8: Τύποι εδαφών και τα ποσοστά τους (συνέχεια)

Αργιλικός φλύσχη	0.21
Κολλούβια φλύσχη	0.18

Ουσιαστικά, το μεγαλύτερο μέρος (73.7%) της λεκάνης απαρτίζεται από εδάφη των οποίων το μητρικό υλικό είναι ο ψαμμιτικός φλύσχη, ενώ ακολουθούν σε ποσοστό 21.2% οι σκληροί ασβεστόλιθοι και τα κολλούβια ασβεστολίθων με 2.03%. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες ιδιότητες και οι τιμές των χαρακτηριστικών των τριών επικρατέστερων εδαφών.

Ψαμμιτικός φλύσχη:

- Αδιαπέρατο έδαφος
- Ανήκει στα εδάφη κατηγορίας CAMBISOL σύμφωνα με τον FAO (Διεθνής Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας)
- Τα εδάφη που προέρχονται από ψαμμιτικό φλύσχη είναι βαριά εδάφη
- Έχει μικρή τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και εδαφικής υγρασίας σε σχέση με τα υπόλοιπα εδάφη της περιοχής
- Ανήκει στην υδρολογική ομάδα D

Οι τιμές συγκεκριμένων χαρακτηριστικών απαραίτητων για τη μοντελοποίηση της λεκάνης, βρέθηκαν μετά από αναζήτηση στη βιβλιογραφία και σε διάφορες παλαιότερες έρευνες σχετικά με τη μοντελοποίηση SWAT.

Για τον ψαμμιτικό φλύσχη προέκυψαν ως εξής:

Πίνακας 4.9: Τιμές χαρακτηριστικών ψαμμιτικού φλύσχη

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ksat (Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα)	10 mm/hr
SOL_AWC (Διαθέσιμη εδαφική υγρασία για λήψη από τα φυτά)	0.12 mmH ₂ O/mm εδάφους
Kusle (Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους)	0.25
SOL_CBN (Ποσοστό οργανικού άνθρακα)	0.8%
SOL_BD (Ειδικό βάρος για υγρό έδαφος)	1.55
SOL_ALB (Λευκάγεια εδαφικής επιφάνειας)	0.06

Σκληρός ασβεστόλιθος:

- Ημιδιαπερατό έδαφος
- Ανήκει στα εδάφη κατηγορίας LUVISOL σύμφωνα με τον FAO
- Τα εδάφη που σχηματίζονται από τον σκληρό ασβεστόλιθο με χημική αποσάθρωση είναι αριλώδη/αργιλοπηλώδη που συνεπάγεται περιορισμένη ταχύτητα διήθησης
- Έχει ενδιάμεση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας
- Ανήκει στην υδρολογική ομάδα B

Για το σκληρό ασβεστόλιθο προέκυψαν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.10: Τιμές χαρακτηριστικών σκληρού ασβεστόλιθου

<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Ksat (Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα)	50 mm/hr
SOL_AWC (Διαθέσιμη εδαφική υγρασία για λήψη από τα φυτά)	0.1 mmH ₂ O/mm εδάφους
Kusle (Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους)	0.3
SOL_CBN (Ποσοστό οργανικού άνθρακα)	1%
SOL_BD (Ειδικό βάρος για υγρό έδαφος)	1.55
SOL_ALB (Λευκάγεια εδαφικής επιφάνειας)	0.06

Κολλούβια ασβεστολίθων:

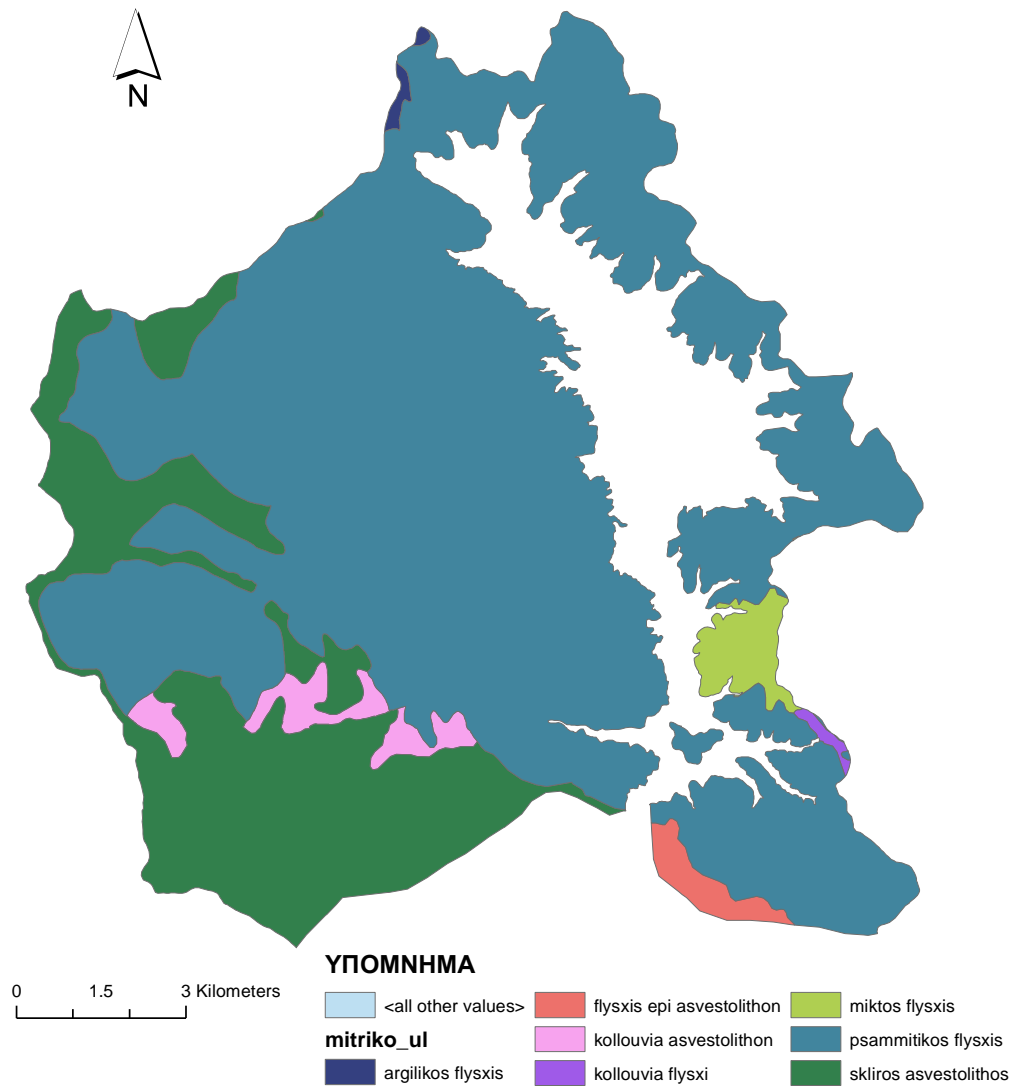
- Βαθιά εδάφη
- Παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία και ταχύτητα διήθησης του νερού
- Ανήκει στα εδάφη κατηγορίας FLUVISOL
- Ανήκει στην υδρολογική ομάδα A

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που προκύπτουν από τα κολλούβια ασβεστολίθων είναι τα εξής:

Πίνακας 4.11: Τιμές χαρακτηριστικών για κολλούβια ασβεστολίθων

<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Ksat (Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα)	75 mm/hr
SOL_AWC (Διαθέσιμη εδαφική υγρασία για λήψη από τα φυτά)	0.3 mmH ₂ O/mm εδάφους
Kusle (Συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους)	0.35
SOL_CBN (Ποσοστό οργανικού άνθρακα)	1%
SOL_BD (Ειδικό βάρος για υγρό έδαφος)	1
SOL_ALB (Λευκάγεια εδαφικής επιφάνειας)	0.06

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο χάρτης με την κατανομή των εδαφών της λεκάνης:



Σχήμα 4.15: Χάρτης εδαφών λεκάνης

5 Βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT

5.1 Εκτέλεση προγράμματος

Το πρόγραμμα εγκαταστάθηκε ως επέκταση στο λογισμικό ArcGIS όπως έχει ήδη αναφερθεί σε εισαγωγικό κεφάλαιο. Η είσοδος των απαραίτητων δεδομένων και στοιχείων, που είναι πλέον έτοιμα όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για το «τρέξιμο» του μοντέλου απαιτεί μια σειρά από ρυθμίσεις. Τα στάδια εκτέλεσης του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω:

Δημιουργία εργασίας SWAT:

Το αρχικό στάδιο είναι η δημιουργία μιας νέας εργασίας SWAT από το αρχικό μενού SWAT Project Setup όπου ο χρήστης δημιουργεί την εργασία ώστε να μπορεί να τη αποθηκεύσει και να τη διαχειριστεί σε μεταγενέστερη φάση.

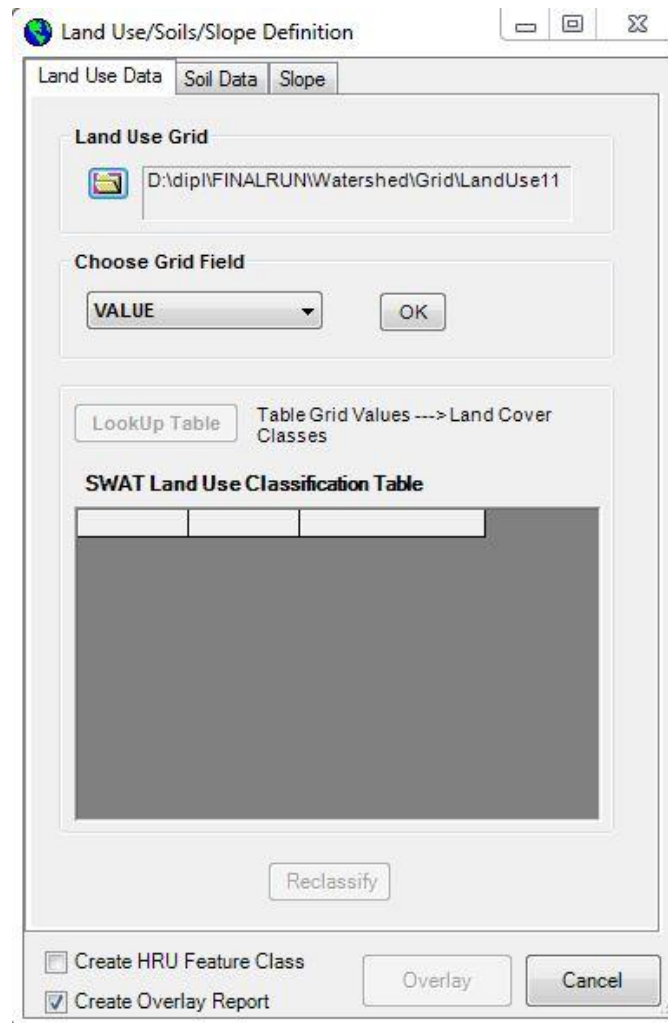
Χάραξη υδροκρίτη:

Το επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή του ψηφιακού χάρτη της περιοχής μελέτης, η δυνατότητα αυτόματης χάραξης του υδροκρίτη (εφόσον απαιτείται), η δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης και η δημιουργία των υπολεκανών. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί μέσω του μενού Watershed delineation. Σε αυτό το στάδιο έγινε η εισαγωγή του Ψ.Μ.Ε της λεκάνης απορροής, ο υδροκρίτης της οποίας είχε ήδη χαραχθεί χειροκίνητα. Στη συνέχεια γίνεται η ρύθμιση των μονάδων στις οποίες θα είναι το υψόμετρο (εδώ σε m). Να σημειωθεί εδώ ότι το Ψ.Μ.Ε και όλοι οι υπόλοιποι χάρτες που θα εισαχθούν στη συνέχεια, θα πρέπει να είναι στο ίδιο προβολικό σύστημα και στην περίπτωση αυτής της εργασίας στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87. Έπειτα, το πρόγραμμα δημιουργεί το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης με την επιλογή Create streams and outlets. Εν τέλει, δημιουργήθηκαν 18 υπολεκάνες οι έξοδοι των οποίων ήταν στη λίμνη δεδομένου ότι η λίμνη δε συμμετέχει στην απορροή της λεκάνης.

Ανάλυση μονάδων υδρολογικής απόκρισης:

Κατά το στάδιο αυτό, πραγματοποιείται η δημιουργία από το χρήστη των μονάδων υδρολογικής απόκρισης που όπως έχει αναλυθεί και προγενέστερα αποτελεί απαραίτητο βήμα στην κατασκευή του μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο, εισάγονται οι χρήσεις γης, τα εδαφολογικά στοιχεία και οι κλίσεις του εδάφους και κατόπιν γίνεται η δημιουργία των HRUs με βάση τα ποσοστά επικάλυψης που επιλέγει ο χρήστης για τις χρήσεις γης, τα εδαφολογικά στοιχεία και τις κλίσεις.

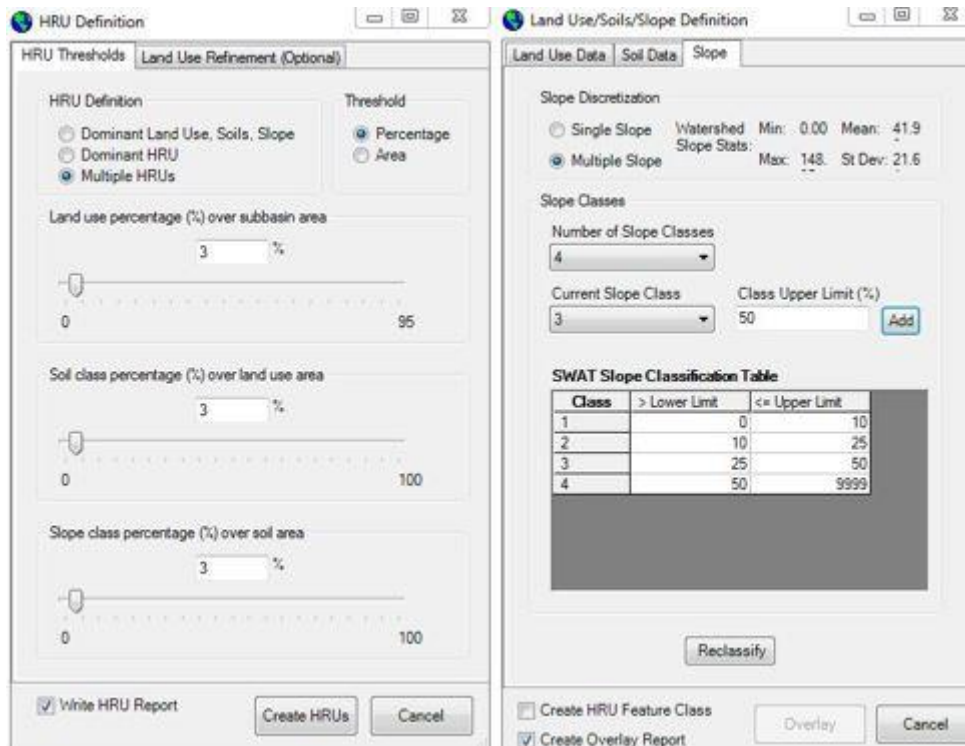
Πιο αναλυτικά, στο μενού Land Use Data, ο χρήστης εισάγει τον χάρτη χρήσεων γης της περιοχής στο σύστημα αναφοράς που έχει επιλεγεί και με βάση τους κωδικούς που περιγράφουν τις διάφορες χρήσεις γης γίνεται η αναγνώριση των χρήσεων γης από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια, μέσω ενός πίνακα (Lookup Table) που ετοιμάστηκε σε μορφή .txt επιτεύχθηκε η σωστή αντιστοίχιση από το πρόγραμμα των χρήσεων γης CORINE με αυτούς του SWAT (Σχ. 5.1). Ο πίνακας αυτός ετοιμάστηκε με βάση την αντιστοίχιση που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.1: Μενού εισαγωγής και αντιστοίχισης χρήσεων γης

Αμέσως μετά με την ίδια διαδικασία γίνεται η εισαγωγή του χάρτη των εδαφών. Σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται η αντιστοίχιση του κάθε τύπου εδάφους στο χάρτη με τα χαρακτηριστικά του που έχουν εισαχθεί χειροκίνητα στη βάση δεδομένων του SWAT. Για παράδειγμα, για τον ψαμμιτικό φλύσχη που είναι και το επικρατέστερο μητρικό υλικό εδάφους στη λεκάνη, επιλέχθηκε στο μενού SWAT Soil Classification table το έδαφος Y για το οποίο είχε γίνει κατάλληλη χειροκίνητη επεξεργασία των χαρακτηριστικών του κατευθείαν μέσα από τη βάση δεδομένων του SWAT με χρήση της MS Access. Κατά τον ίδιο τρόπο επιλέχθηκαν και οι υπόλοιποι τύποι εδαφών της λεκάνης από το ίδιο μενού. Να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν στη βάση δεδομένων του SWAT και οι τιμές τους έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4.

Μετά την εισαγωγή του χάρτη και των στοιχείων των εδαφολογικών δεδομένων, σειρά έχει η δημιουργία του χάρτη των κλίσεων της λεκάνης. Η σωστή δημιουργία των κλίσεων παίζει σημαντικό ρόλο στη σωστή μοντελοποίηση καθώς η κλίση των πρανών της λεκάνης ασκεί σημαντική επίδραση στην επιφανειακή απορροή, διότι καθορίζει το χρόνο επαφής του νερού της βροχής με την επιφάνεια του εδάφους και, συνεπώς, τη διάρκεια της διηθήσεως και το χρόνο συγκέντρωσης. Στο μενού *Slope* ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των κατηγοριών των κλίσεων της λεκάνης. Στην παρούσα περίπτωση, επιλέχθηκε να γίνει δημιουργία τεσσάρων κατηγοριών κλίσεων, η πρώτη κατηγορία περιέχει εδάφη με κλίσεις από 0-10%, η δεύτερη από 10-25%, η τρίτη από 25%-50% και η τέταρτη από 50% και πάνω.

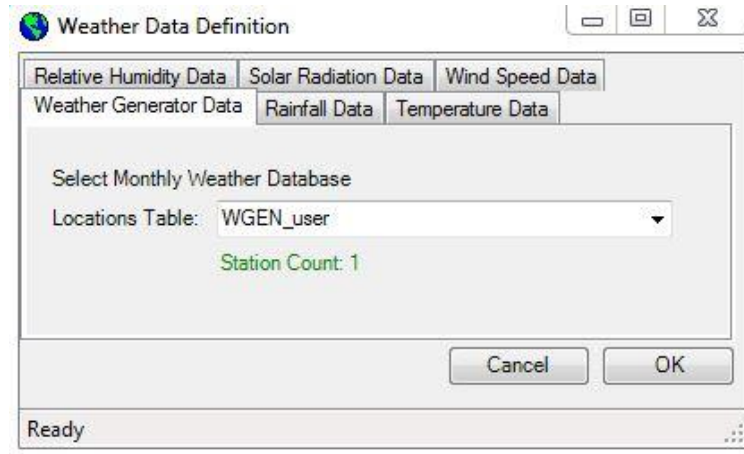


Σχήμα 5.2: Μενού καθορισμού HRU και κλίσεων

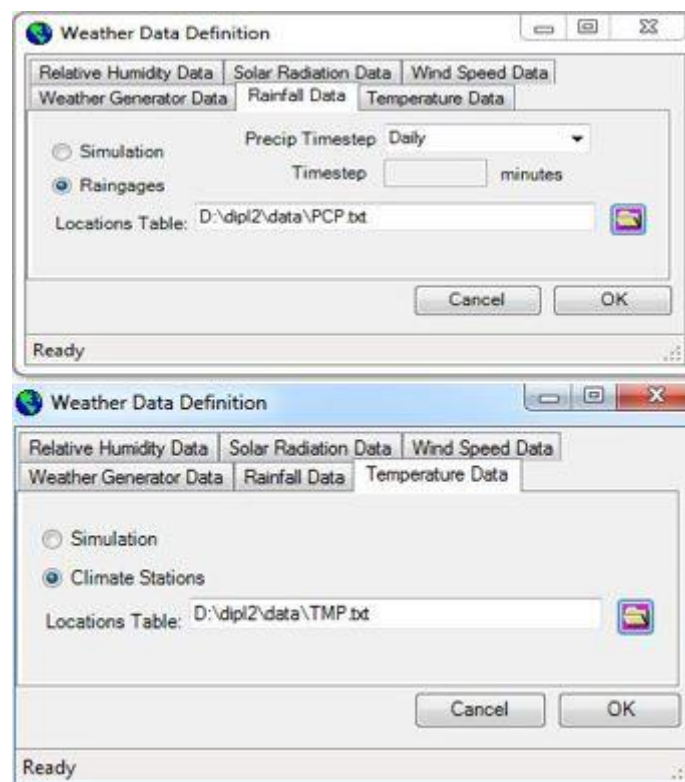
Τέλος, γίνεται η δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης επιλέγοντας το ποσοστό επικάλυψης των χρήσεων γης, του εδαφολογικού τύπου και των κλίσεων για κάθε υπολεκάνη, δημιουργώντας έτσι μοναδικούς συνδυασμούς εδάφους/χρήσεων γης/κλίσεων, τα λεγόμενα HRUs. Μετά από δοκιμές στα ποσοστά επικάλυψης, επιλέχθηκε ο συνδυασμός 3%-3% -3% ο οποίος δημιούργησε συνολικά 219 μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) για τις 18 υπολεκάνες της προς μοντελοποίηση περιοχής. Σε δοκιμές με μεγαλύτερα ποσοστά επικάλυψης, δημιουργήθηκαν λιγότερα HRUs και το μοντέλο έδωσε ελαφρώς καλύτερη προσαρμογή. Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο δε λαμβάνονται υπόψιν αρκετές χρήσεις γης και εδάφη σε κάποιες υπολεκάνες που στις οποίες ενδεχομένως να βρίσκονται κάτω από το επιλεγθέν ποσοστό και έτσι μειώνεται η ακρίβεια και η ανάλυση της μελέτης. Συνεπώς, είναι αναγκαία μια ενδιάμεση λύση η οποία θα δίνει αφενός καλή προσαρμογή του μοντέλου και αφετέρου θα είναι ακριβής και θα λαμβάνει υπόψιν όσο το δυνατόν πληρέστερα τις πληροφορίες για τις χρήσεις γης, τα εδάφη και τις κλίσεις.

Εγγραφή δεδομένων εισόδου:

Στο στάδιο αυτό το οποίο βρίσκεται στο μενού Write Input Tables, ο χρήστης εισάγει τα υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν ήδη προετοιμαστεί και υποστεί επεξεργασία κατάλληλα. Επίσης, σε αυτό το σημείο, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής του σταθμού γεννήτρια που θα προσομοιώσει δεδομένα που τυχόν θα λείπουν από τις χρονοσειρές. Τα αρχεία που εισήχθησαν στην παρούσα μελέτη είναι τα PCP.txt για τη βροχόπτωση και TMP.txt για τις θερμοκρασίες τα οποία υποδεικνύουν στο πρόγραμμα τα αρχεία στα οποία περιέχονται τα ύψη βροχής ανηγμένα στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες. Επίσης φορτώνεται ο σταθμός γεννήτρια «WGEN_user» μέσω της βάσης δεδομένων του SWAT.



Σχήμα 5.3: Μενού εισαγωγής σταθμού γεννήτριας



Σχήμα 5.4: Μενού εισαγωγής βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων

Επεξεργασία των δεδομένων εισόδου:

Μέσω αυτής της διαδικασίας ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί αυτόματα διάφορα δεδομένα ή στοιχεία της βάσης δεδομένων του SWAT. Από εδώ, μπορεί να γίνει επεξεργασία των χαρακτηριστικών των εδαφών, διαφόρων χαρακτηριστικών των υπολεκανών ή τυχόν ταμειυτήρων που μπορεί να υπάρχουν, ενώ σε αυτό το μενού δίνεται η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Προσομοίωση μοντέλου SWAT:

Τέλος, σε αυτό το μενού (SWAT Simulation) πραγματοποιείται το «τρέξιμο» του μοντέλου και ορίζονται διάφορες επιλογές όπως η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης και τα έτη που θα

χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα ως έτη προθέρμανσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν από την εντολή Read SWAT Output.

5.2 Βαθμονόμηση

Για τη βέλτιστη λειτουργία του μοντέλου είναι αναγκαία η διαδικασία βαθμονόμησής του. Πρακτικά με τη διαδικασία της βαθμονόμησης ή αλλιώς βελτιστοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου, επιτυγχάνεται ο καλός βαθμός ομοιότητας των αποτελεσμάτων που μας δίνει η προσομοίωση SWAT με μετρήσεις που έχουν προηγηθεί στο πεδίο.

Στο πρόγραμμα SWAT η βαθμονόμηση μπορεί να επιτευχθεί είτε αυτόματα με χρήση κατάλληλων πακέτων λογισμικού, είτε χειροκίνητα. Στην παρούσα εργασία, έγινε χειροκίνητη βαθμονόμηση η οποία επιτρέπει στο χρήστη να έρθει σε επαφή και να επεξεργαστεί τις περισσότερες παραμέτρους του μοντέλου και να αντιληφθεί καλύτερα τις διεργασίες και τις μεταβλητές που επηρεάζουν τη λειτουργία του. Κατά τη διαδικασία της χειροκίνητης βαθμονόμησης μεταβάλλονταν συνεχώς οι περισσότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία του μοντέλου και των οποίων το μέγεθος της επιρροής τους έχει μελετηθεί σε παλαιότερες έρευνες. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποιες από τις σημαντικότερες παραμέτρους που έχουν επίδραση στην απορροή της λεκάνης και χρησιμοποιήθηκαν τελικά στη βαθμονόμηση του μοντέλου της παρούσας εργασίας:

Αρχεία εδάφους .sol

Τα αρχεία εδάφους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά ενώ η δεύτερη στα χημικά χαρακτηριστικά. Οι φυσικές ιδιότητες των εδαφών διέπουν την κίνηση του νερού και του αέρα στο εδαφικό προφίλ και έχουν σημαντική επίδραση στον κύκλο του νερού σε μια μονάδα υδρολογικής απόκρισης:

- Μέγιστο βάθος ριζοστρώματος
- Μέγιστο βάθος στρώσης
- Η διαθέσιμη χωρητικότητα του εδάφους σε νερό (Διαθέσιμη εδαφική υγρασία). (SOL_AWC)
- Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. (SOL_K)
- Η περιεκτικότητα σε ιλύ, άμμο, άργιλο
- Η λευκαύγεια της εδαφική επιφάνειας (albedo) (SOL_ALB)
- Το ποσοστό οργανικού άνθρακα.(SOL_CBN)

Αρχεία υπόγειου νερού .gw

Το υπόγειο νερό διαχωρίζεται από το πρόγραμμα στο νερό που κινείται στον επιφανειακό υδροφορέα και επανατροφοδοτεί τη λεκάνη και στο νερό που βρίσκεται στον περιορισμένο βαθύ υδροφορέα και χάνεται από τη λεκάνη. (Μπατέλης, 2012)

- Χρόνος υστέρησης υπόγειου νερού (GW_DELAY)
- Παράγοντας ALPHA. (ALPHA_BF)
- Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)
- Συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP)
- Όριο νερού επανατροφοδότησης (REVAPMN)

- Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP)
- Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφορέα (GW_SPYLD)
- Ειδικό βάρος για υγρό έδαφος. (SOL_BD)

Αρχεία υπολεκανών .sub

- Αριθμός καμπύλης CN. Η παράμετρος που είναι ιδιαίτερης σημασίας στα αρχεία υπολεκανών είναι ο αριθμός καμπύλης CN για υδρολογική κατάσταση II. Οι αριθμοί καμπύλης προκύπτουν με βάση τις χρήσεις γης της εκάστοτε υπολεκάνης και δίνονται αρχικές τιμές από το πρόγραμμα ανάλογα με τη χρήση γης που έχει ορίσει ο χρήστης. Μέσω της βαθμονόμησης και έπειτα από σχολαστική έρευνα σε παλαιότερες μελέτες και αρκετές δοκιμές οι τιμές των αριθμών καμπύλης μεταβλήθηκαν αναλόγως ώστε να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερες για τις συνθήκες της περιοχής.
- Μέση κλίση εδάφους. Όσον αφορά τη μέση κλίση του εδάφους, αυτή υπολογίζεται από το πρόγραμμα με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που έχει εισαχθεί σε προγενέστερο στάδιο
- Μέση κλίση υδατορευμάτων. Έχει την ίδια τιμή για όλα τα HRU σε μια υπολεκάνη. Υπολογίζεται κατά προσέγγιση από το πρόγραμμα λαμβάνοντας υπόψη την υψομετρική διαφορά του πιο απομακρυσμένου σημείου της υπολεκάνης και της εξόδου της
- Συντελεστής Manning
- Υδραυλική αγωγιμότητα κοίτης.

Τελικά, οι παράμετροι για τις οποίες έγιναν εκτεταμένες δοκιμές και εν τέλει χρησιμοποιήθηκαν στην τελική προσομοίωση του μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με τις τελικές τιμές τους:

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων που μεταβλήθηκαν στη βαθμονόμηση

Παράμετρος	Αρχική τιμή	Τελική τιμή		
GW_DELAY	31	35		
RCHRG_DP	0.05	0.01		
ALPHA_BF	0.01	0.033		
SOL_K	Ψαμμιτικός Φλύσσης	10	8	
	Σκληρός Ασβεστόλιθος	50	40	
	Κολλούβια Ασβεστολίθων	75	75	
SOL_AWC	Ψαμμιτικός Φλύσσης	0.12	0.12	
	Σκληρός Ασβεστόλιθος	0.10	0.32	
	Κολλούβια Ασβεστολίθων	0.30	0.30	
CN2	FRST	79	70	
	Ψαμμιτικός Φλύσσης	FRSE	77	68
	FRSD	83	71	
	RNGE	84	75	

5.3 Έλεγχος αποτελεσμάτων μοντέλου

5.3.1 Γενικά

Μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης και την εύρεση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, ακολουθεί ο έλεγχος ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προσομοίωσης και της βαθμονόμησης και η ενδεχόμενη επανάληψή της στην περίπτωση που ο έλεγχος κρίνει ότι τα αποτελέσματα δεν είχαν την απαιτούμενη αξιοπιστία. Ουσιαστικά ο έλεγχος δείχνει κατά πόσο οι προσομοιωμένες απορροές προσαρμόζονται στις ήδη παρατηρημένες και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας διάφορους στατιστικούς δείκτες.

5.3.2 Δείκτες ελέγχου

Για τον έλεγχο μιας προσομοίωσης SWAT μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετοί δείκτες, μερικοί εκ των οποίων είναι οι εξής:

- Συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{παρ}} - \hat{Q}_{\text{παρ}})(Q_{\text{εκτ}} - \hat{Q}_{\text{εκτ}})}{[\sum_{i=1}^n (Q_{\text{παρ}} - \hat{Q}_{\text{παρ}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{\text{εκτ}} - \hat{Q}_{\text{εκτ}})^2]^{0.5}} \right]^2 \quad (5.1)$$

Όπου:

$Q_{\text{παρ}}$: οι παρατηρημένες μηνιαίες παροχές

$Q_{\text{εκτ}}$: οι εκτιμημένες μηνιαίες παροχές

$\hat{Q}_{\text{εκτ}}$: ο μέσος όρος των παρατηρημένων μηνιαίων παροχών

n : ο αριθμός παρατηρήσεων

Ο συντελεστής R^2 , περιγράφει ουσιαστικά την επιτυχία με την οποία η διακύμανση των μετρημένων στοιχείων αναπαράγεται από το μοντέλο και παίρνει τιμές από 0 έως 1, όπου 1 είναι η μέγιστη συσχέτιση.

- Συντελεστής NSE

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{παρ}} - Q_{\text{εκτ}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{παρ}} - \hat{Q}_{\text{παρ}})^2} \quad (5.2)$$

Το κριτήριο επίδοσης Nash and Sutcliffe ή συντελεστής NSE, χρησιμοποιείται ως δείκτης καλής προσαρμογής ενός μοντέλου και παίρνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Η καλύτερη τιμή για το κριτήριο είναι η μονάδα, όταν οι παρατηρημένες απορροές ισούνται με τις εκτιμημένες που υπολογίστηκαν από το μοντέλο που σημαίνει ότι η απόδοση του μοντέλου ήταν η καλύτερη δυνατή. Γενικά, οι τιμές από 0.5 έως 1 θεωρούνται ικανοποιητικές για την απόδοση του εκάστοτε μοντέλου..

- Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος, RMSE

Θεωρείται ως ένας από τους πιο διαδεδομένους στατιστικούς δείκτες. Όσο πιο χαμηλή τιμή παίρνει ο RMSE τόσο πιο καλή θεωρείται η απόδοση ενός μοντέλου.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{παρ}} - Q_{\text{εκτ}})^2}{n}} \quad (5.3)$$

- Δείκτης RSR (RSR= RMSE/STDEVobs)

Είναι ο λόγος της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος με την τυπική απόκλιση των παρατηρημένων τιμών. Ουσιαστικά, ο δείκτης RSR ενσωματώνει τα οφέλη των στατιστικών

δεικτών σφάλματος και περιλαμβάνει έναν παράγοντα κανονικοποίησης, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις. Η βέλτιστη τιμή του RSR είναι το 0, που σημαίνει ότι το RMSE είναι 0 και η προσομοίωση του μοντέλου η καλύτερη δυνατή. Γενικά, ισχύει ότι όσο πιο χαμηλή είναι η τιμή τόσο καλύτερη είναι και η επίδοση του μοντέλου.

5.3.3 Έλεγχος του μοντέλου για την προσομοίωση στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα

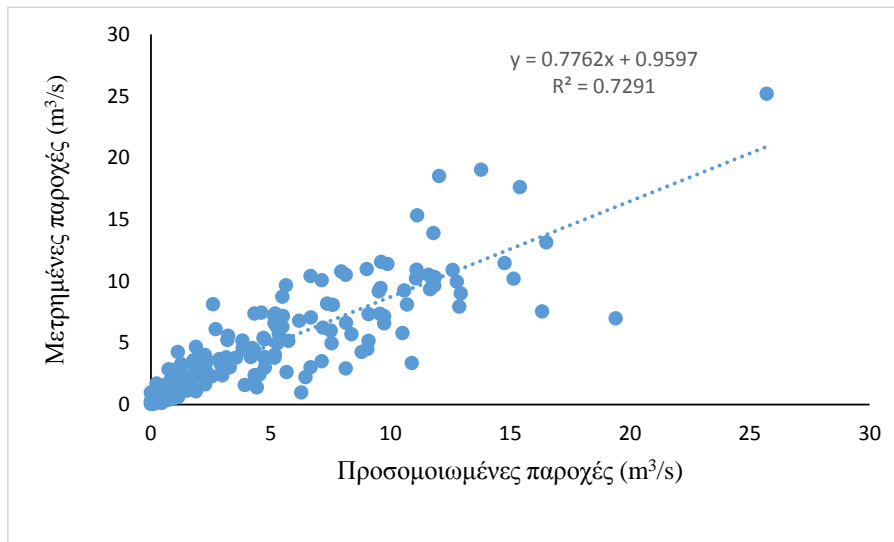
Ο έλεγχος στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την πρώτη προσομοίωση του μοντέλου, ώστε να διαπιστωθεί η αρχική προσαρμογή του μοντέλου. Το βασικό ζητούμενο είναι να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν την απορροή στην λεκάνη.

Για τον έλεγχο της βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής NSE ο οποίος προέκυψε 0.71 για την πρώτη προσομοίωση. Έπειτα, για κάθε νέα προσομοίωση ελεγχόταν εάν ο δείκτης NSE μειωνόταν ή αυξανόταν κι έτσι γινόταν και η κατάλληλη αύξηση ή μείωση της παραμέτρου που εξεταζόταν κάθε φορά. Τελικά, η διαδικασία της βαθμονόμησης στη λεκάνη της Λίμνης Πλαστήρα για τη σύγκριση των απορροών στη θέση του φράγματος, πραγματοποιήθηκε πάνω από 80 φορές. Ο συντελεστής τελικά έλαβε την υψηλή τιμή 0.770 για την περίοδο βαθμονόμησης (1961 έως 1970), με εξαίρεση των δύο πρώτων ετών που χρησιμοποιήθηκαν για το απαιτούμενο ζέσταμα του μοντέλου. Για την περίοδο της επαλήθευσης (1970 – 1977), ο συντελεστής NSE ήταν μικρότερος (0.670) σε σχέση με την περίοδο βαθμονόμησης αλλά μέσα σε ικανοποιητικά πλαίσια. Εν τέλει, στην προσομοίωση ολόκληρης της περιόδου από 1961-1977 και χρησιμοποιώντας τις τελικές τιμές των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν μέσω της βαθμονόμησης, τα κριτήρια επίδοσης του μοντέλου ήταν τα εξής:

Πίνακας 5.2: Τιμές κριτηρίων επίδοσης μοντέλου

<i>Μέθοδος</i>	<i>Τιμή</i>
NSE	0.721
R^2	0.729
RSR	0.532

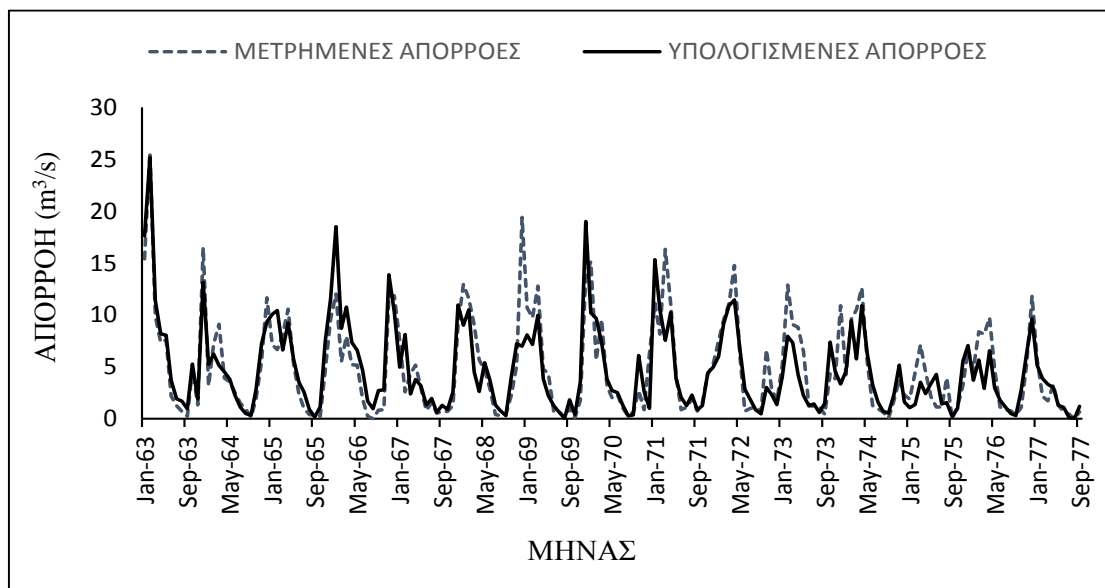
Πρακτικά, το μοντέλο παρουσιάζει καλή επίδοση που αποδεικνύεται από τις τιμές των τριών μεθόδων ελέγχου οι οποίες βρίσκονται στα πλαίσια που ορίζει η βιβλιογραφία ως ικανοποιητικά.



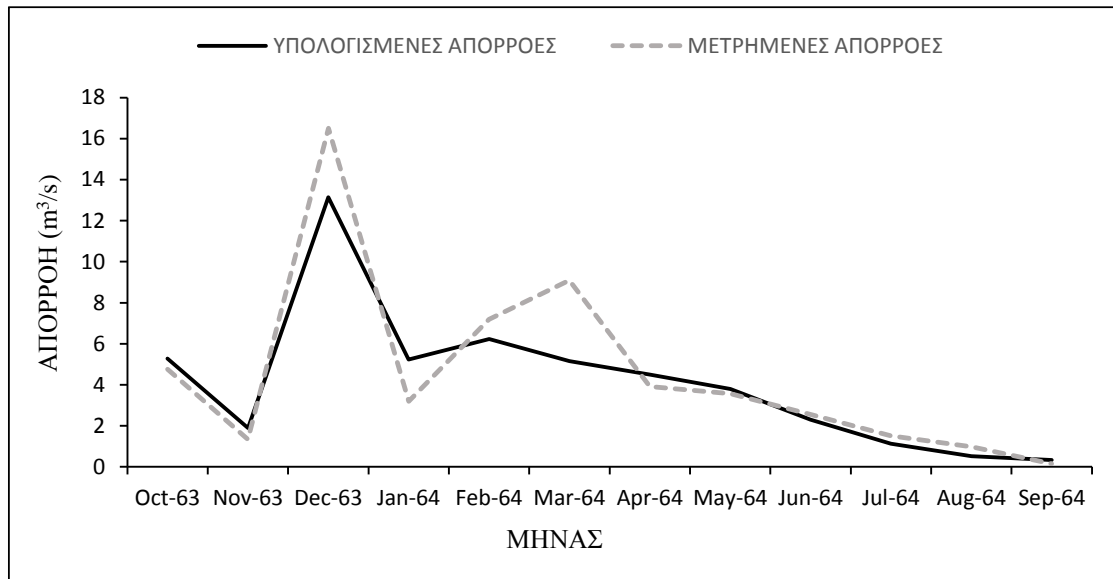
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα διασποράς και ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης

5.3.4 Αποτελέσματα της προσομοίωσης SWAT

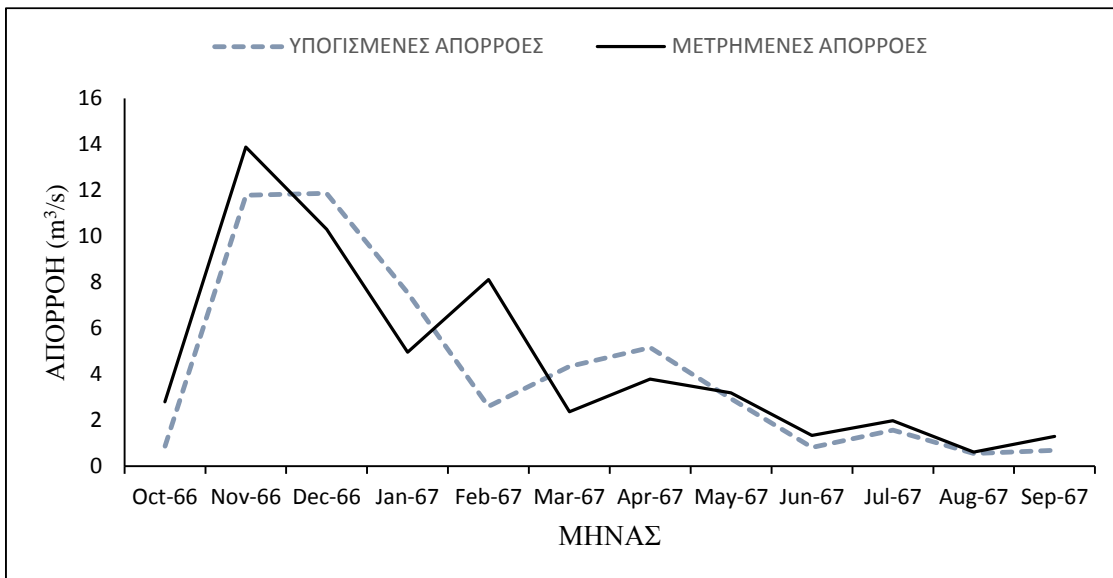
Τα αποτελέσματα για τα οποία έγινε ο έλεγχος στο προηγούμενο εδάφιο παρουσιάζονται παρακάτω μέσω των υδρογραφημάτων σύγκρισης μετρημένων με υπολογισμένων απορροών, σε μηνιαίο βήμα, συνολικά για όλη την περίοδο και για κάποια έτη ενδεικτικά:



Σχήμα 5.6: Υδρογράφημα μετρημένων-υπολογισμένων απορροών

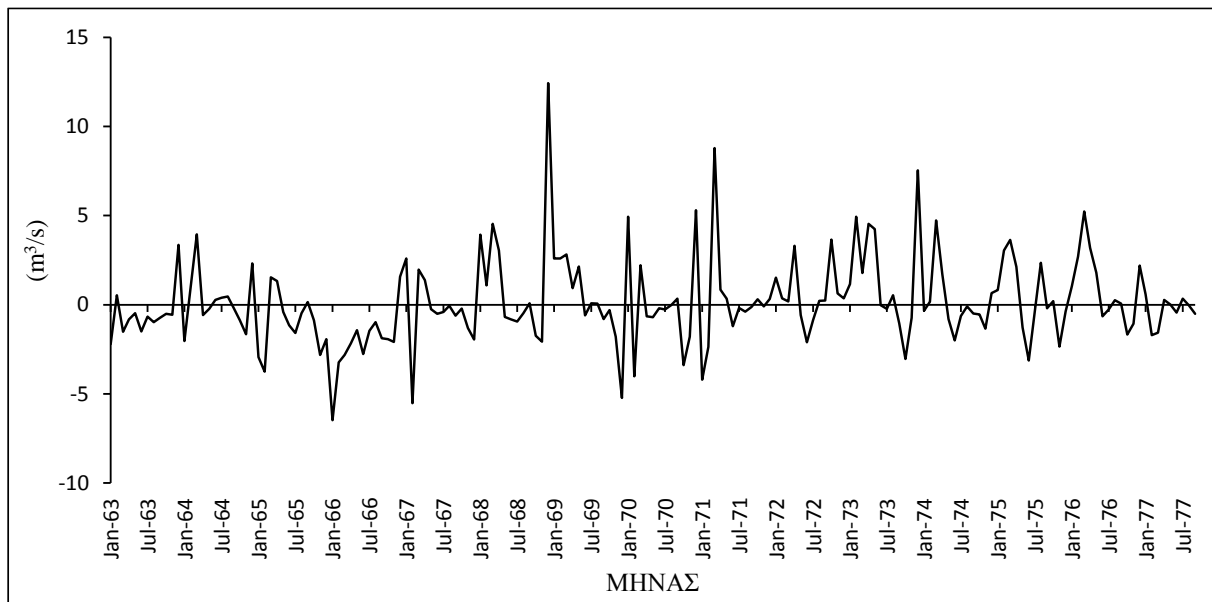


Σχήμα 5.7: Ενδεικτικό υδρογράφημα μετρημένων-υπολογισμένων απορροών για το υδρολογικό έτος 1963-64



Σχήμα 5.8: Ενδεικτικό υδρογράφημα για το υδρολογικό έτος 1966-67

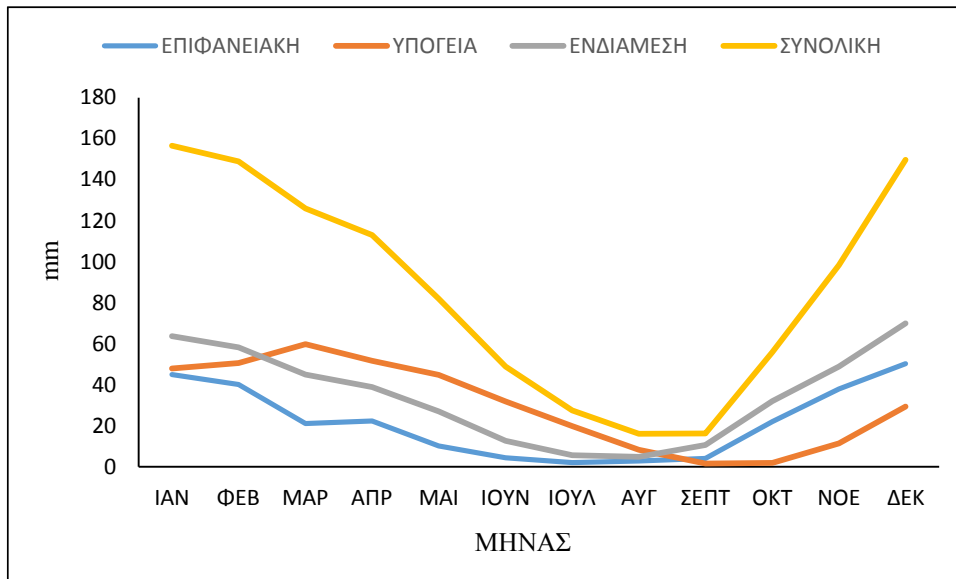
Το υπολειμματικό σφάλμα της απορροής στην έξοδο της λεκάνης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



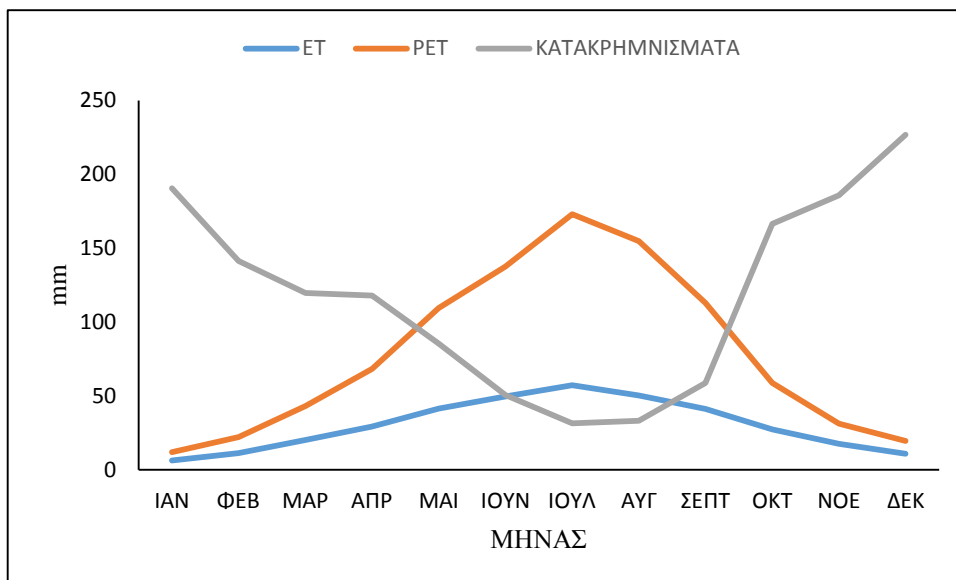
Σχήμα 5.9: Υπολειμματικό σφάλμα απορροής

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να διαβαστούν μέσα από τους φακέλους της εργασίας που δημιουργήθηκε και χωρίζονται σε διάφορες μορφές αναλόγως τις ανάγκες του χρήστη. Για παράδειγμα μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης, με τις υπολεκάνες ή να εμφανιστούν συνολικά για ολόκληρη τη λεκάνη.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου για τη λεκάνη απορροής όπως προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών συνιστωσών της απορροής



Σχήμα 5.11: Σύγκριση κατακρημνισμάτων και εξατμισοδιαπνοής

6 Επίδραση αποδάσωσης στην απορροή της λεκάνης της Λίμνης Πλαστήρα

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η αυξανόμενη ανάγκη για έρευνα και μελέτη των επιπτώσεων σε υδρολογικό επίπεδο, των αλλαγών στο καθεστώς των χρήσεων ή τύπων κάλυψης γης της υδρολογικής λεκάνης που μελετάται. Το SWAT ως υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης έχει τη δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης τέτοιων αλλαγών στις υδρολογικές διεργασίες της εξεταζόμενης λεκάνης. Αναλυτικότερα στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αρχικά μια εισαγωγή στον αντίκτυπο που έχουν οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και κυρίως η απομάκρυνση μέρους της δασικής έκτασης, ενώ σε δεύτερη φάση θα μελετηθεί διεξοδικά η συμπεριφορά της λεκάνης σε τρεις ενδεχόμενες καταστάσεις αποδάσωσης εστιάζοντας στη συνιστώσα της επιφανειακής απορροής.

6.2 Το πρόβλημα της αποδάσωσης

Η εκχέρσωση δασών και δασικών εκτάσεων πήρε μεγάλες διαστάσεις τον προηγούμενο αιώνα σε παγκόσμιο επίπεδο λόγω της γενικότερης ανάπτυξης της γεωργίας και της κτηνοτροφίας. Η βοσκή των ζώων είναι από τους κυριότερους ανασταλτικούς παράγοντες στην ανάπτυξη της δασοπονίας στη χώρα μας και η κυριότερη αιτία της αποψίλωσης ολόκληρων περιοχών με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολυάριθμων καταστρεπτικών χειμάρρων.

Τα δάση, οι δασικές εκτάσεις και η πυκνή βλάστηση επηρεάζουν την ποσότητα και ποιότητα του νερού, την κατανομή του στο χρόνο, καθώς και τα υπόλοιπα συστατικά του υδρολογικού ισοζυγίου μιας λεκάνης απορροής. Τα δάση είναι ιδιαίτερα σημαντικά, ιδιαίτερα σε περιοχές σαν αυτήν της Μεσογείου, όπου οι υδατικοί πόροι είναι ένας οριακός παράγοντας της ζωής και της οικονομικής ανάπτυξης και οι μεταβολές στη φυτοκάλυψη μπορεί να οδηγήσουν σε επιπτώσεις στην υδρολογία.

Μελέτες αποδεικνύουν πως πράγματι οι αποδάσώσεις συνέβαλαν στην εμφάνιση πλημμυρών και κατολισθήσεων και πως τα δάση συμβάλλουν σε μεγαλύτερη διήθηση του νερού, στη μείωση των χειμαρρικών απορροών και στην υποβάθμιση των απορροών αιχμής. (Τζαμτζής, 2007).

Ειδικότερα στις λεκάνες απορροής επιβάλλεται η αύξηση της φυσικής βλάστησης γιατί βοηθά στη διατήρηση του υδρολογικού κύκλου, στη ρύθμιση και τη σταθεροποίηση του υδατικού ισοζυγίου. Επίσης, προστατεύει από ακραία φαινόμενα όπως οι πλημμύρες και η ξηρασία. Η απομάκρυνση της βλάστησης οδηγεί στην αύξηση των φερτών υλών, στην υποβάθμιση της απόδοσης σε νερό και της ποιότητας του νερού και μεταξύ άλλων στην υποβάθμιση υδροχαρών οικοτόπων. Η βλάστηση βοηθά επίσης στη ρύθμιση του υπόγειου υδροφορέα και στην πρόληψη της αλάτωσης των εδαφών η οποία επηρεάζει τις μεγάλες εκτάσεις των γεωργικών εδαφών, με μεγάλο κατά συνέπεια αντίκτυπο για την κοινωνία. (Εσκίογλου, 2008)

Επίσης, η απομάκρυνση ή η καταστροφή του δασικού τάπητα, ενδέχεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο και για τα εδάφη μιας λεκάνης. Όταν ο δασικός τάπητας διαταραχθεί έντονα ή καταστραφεί, είτε από πυρκαγιές, είτε από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως εκχέρσωση για οποιαδήποτε χρήση, αποψιλωτικές υλοτομίες, με αποτέλεσμα το έδαφος να παραμένει γυμνό, τότε ο κίνδυνος απώλειας νερού και διάβρωσης είναι πολύ μεγάλος. Ο κίνδυνος αυτός είναι

μεγαλύτερος για τα λεπτά αργιλώδη εδάφη και για εκτάσεις με μεγάλες κλίσεις. Σε καλά δασωμένες λεκάνες απορροής η παροχή των ρευμάτων είναι κανονική και σχετικά σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτή η επιθυμητή κατάσταση βελτιώνεται όταν η δασική βλάστηση είναι αδιατάρακτη. (Ζάγκας κ.α, 2013)

Κάποιοι σημαντικοί παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάζονται λόγω της αποδάσωσης είναι οι εξής:

- Η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους λόγω της πλήρους αποδάσωσης μια περιοχής, όμως μακροπρόθεσμα η μέση θερμοκρασία του εδάφους δεν επηρεάζεται σημαντικά (Almeida et al, 2007).
- Μειώσεις στην διαθεσιμότητα εδαφικού νερού για τα φυτά (διαθέσιμη εδαφική υγρασία) λόγω του περιορισμένου βάθους της ζώνης ριζοστρώματος για χορτολιβαδικές εκτάσεις.
- Μείωση στην ικανότητα διήθησης λόγω της συμπίεσης του εδάφους μετά την αποδάσωση. (Nepstad et al., 1994)

6.3 Η κατασκευή των σεναρίων

Η κατασκευή ρεαλιστικών σεναρίων με βάση τα οποία θα μελετηθεί ποσοτικά η επιρροή της αλλαγής χρήσης γης στην απορροή, αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας. Για τη σύγκριση θα χρησιμοποιηθούν οι απορροές που το μοντέλο υπολογίζει στην έξοδο της λεκάνης. Πρακτικά, η συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης αναμένεται να μη μεταβληθεί ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή των τριών σεναρίων, αλλά θα επέλθει μεταβολή σε μηνιαία χρονική κλίμακα καθώς και στις συνιστώσες της απορροής, δηλαδή στον τρόπο με τον οποίο το νερό θα απορρεύσει και θα φτάσει στην έξοδο.

Θεωρείται πως οι δασικές εκτάσεις που αποδασώνονται ώστε να μετατραπούν σε χορτολιβαδικές και βοσκοτόπια, βρίσκονται ως επί το πλείστον σε περιοχές οι οποίες είναι κοντά σε αστική δόμηση και με σχετικά εύκολη πρόσβαση στο οδικό δίκτυο. Βασικό κριτήριο είναι επίσης η ομαλή κλίση εδάφους όσο αυτό είναι εφικτό σε μια ορεινή λεκάνη απορροής με μεγάλη μέση κλίση. Γίνεται η παραδοχή ότι οι δασικές εκτάσεις που αφαιρούνται μετατρέπονται σε βοσκοτόπια ανεξάρτητα με το εάν ήταν δάση κωνοφόρων, δάση πλατυφύλλων ή μικτά δάση εφόσον η τελική χρήση γης των εκτάσεων αυτών ανήκει στα βοσκοτόπια. Πρακτικά, σε κάθε νέο σενάριο εισάγεται ένας νέος χάρτης χρήσεων γης όπου στις εκτάσεις που αποδασώνονται δίνεται ο αριθμός CNII της νέας χρήσης γης, δηλαδή των εκτάσεων βοσκής (pasture) και ο οποίος αντιστοιχεί στην τιμή 84, έτσι όπως την θεωρεί το SWAT.

6.4 Σενάριο 1

Στην πρώτη περίπτωση, κατασκευάζεται ένα σενάριο το οποίο καθορίζεται από τοπογραφικούς και μορφολογικούς παράγοντες με γνώμονα πάντα τη σωστή χωροθέτηση της αποδασωτέας έκτασης ώστε το σενάριο να απεικονίζει μια ρεαλιστική κατάσταση η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει πραγματικότητα κάποια στιγμή στο μέλλον.

Στο σενάριο αυτό αποδασώνονται δασικές εκτάσεις συνολικής έκτασης 3.96 km², δηλαδή το 5.5% των συνολικών δασικών εκτάσεων της λεκάνης. Πρόκειται για εκτάσεις που περικλείονται από επαρχιακούς οδικούς άξονες ώστε να ευνοείται η εύκολη μετάβαση από τους υλοτόμους και τους κτηνοτρόφους που εκμεταλλεύονται τις εκτάσεις αυτές. Αυτό το σενάριο,

αποτελεί μια δυσμενή περίπτωση αποδάσωσης διότι για κάθε περιοχή κόβονται δέντρα που αντιστοιχούν σε μεγάλη και συνεχή έκταση δάσους και συνήθως αυτό είναι αποτέλεσμα της αύξησης της επιχειρηματικής δραστηριότητας στον τομέα της κτηνοτροφίας, με το άνοιγμα νέων μεγάλων κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χωροθέτηση των νέων αυτών κτηνοτροφικών μονάδων πραγματοποιείται συνήθως κοντά σε χωριά ή σε περιοχές με πιο έντονη αστική δόμηση λόγω διευκόλυνσης για πρακτικούς λόγους.

Πιο αναλυτικά, δημιουργούνται οι εξής 4 περιοχές:

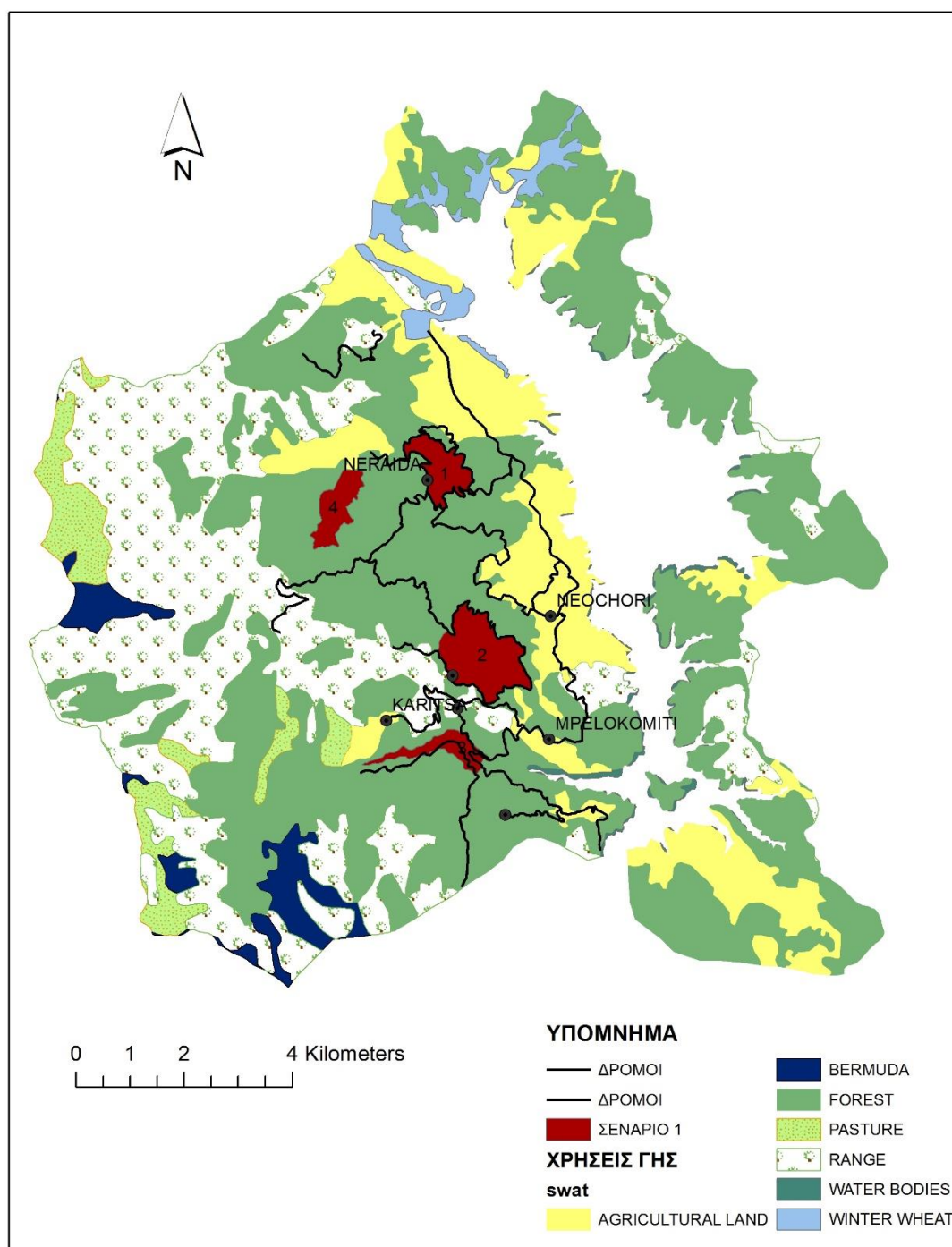
Περιοχή 1: Δασική έκταση 0.86 km² η οποία έχει ως επίκεντρο το χωριό Νεράιδα και περικλείεται εξ ολοκλήρου από επαρχιακούς δρόμους της περιοχής. Η κλίση της περιοχής είναι σχετικά ομαλή και βρίσκεται σε υψηλό υψόμετρο (900-1000 m).

Περιοχή 2: Δασική έκταση 1.81 km². Περικλείεται από επαρχιακούς οδικούς άξονες και βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τα χωριά Μπελοκομίτη και Νεοχώρι.

Περιοχή 3: Δασική έκταση η οποία βρίσκεται κατά μήκος κυρίου υδατορεύματος. Αποδασώνεται η περιοχή έως την υψομετρική καμπύλη των 900 m. Οι περιοχές κοντά σε κυρίως υδατορεύματα προτιμούνται από κτηνοτρόφους λόγω της εύκολης πρόσβασης σε νερό. Επίσης, από την περιοχή περνάει οδικός άξονας ο οποίος συνδέει την περιοχή με τα κοντινά χωριά Μπελοκομίτη, Αγ.Μαρίνα και Καρίτσα. Η έκταση της είναι 0.58 km².

Περιοχή 4: Βρίσκεται σε υψηλό μέσο υψόμετρο περίπου 1100 m με σχετικά έντονο ανάγλυφο και σε περιοχή δυτικά από το χωριό Νεράιδα. Το εμβαδό της είναι 0.72 km².

Όλες οι παραπάνω περιοχές φαίνονται στο Σχήμα 6.1.



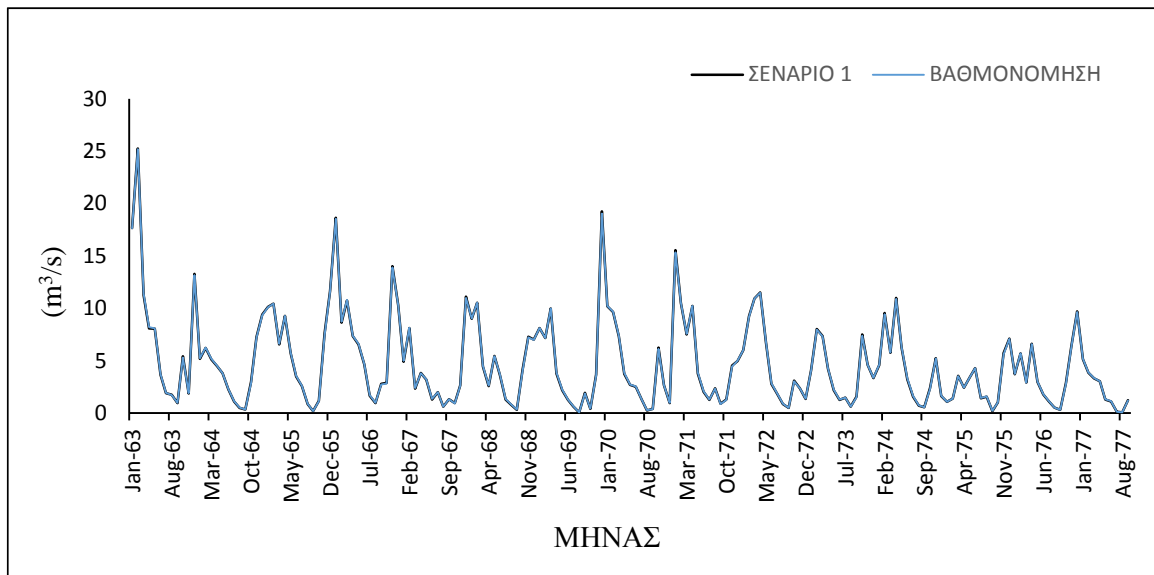
Σχήμα 6.1: Σενάριο 1

Αποτελέσματα σεναρίου 1:

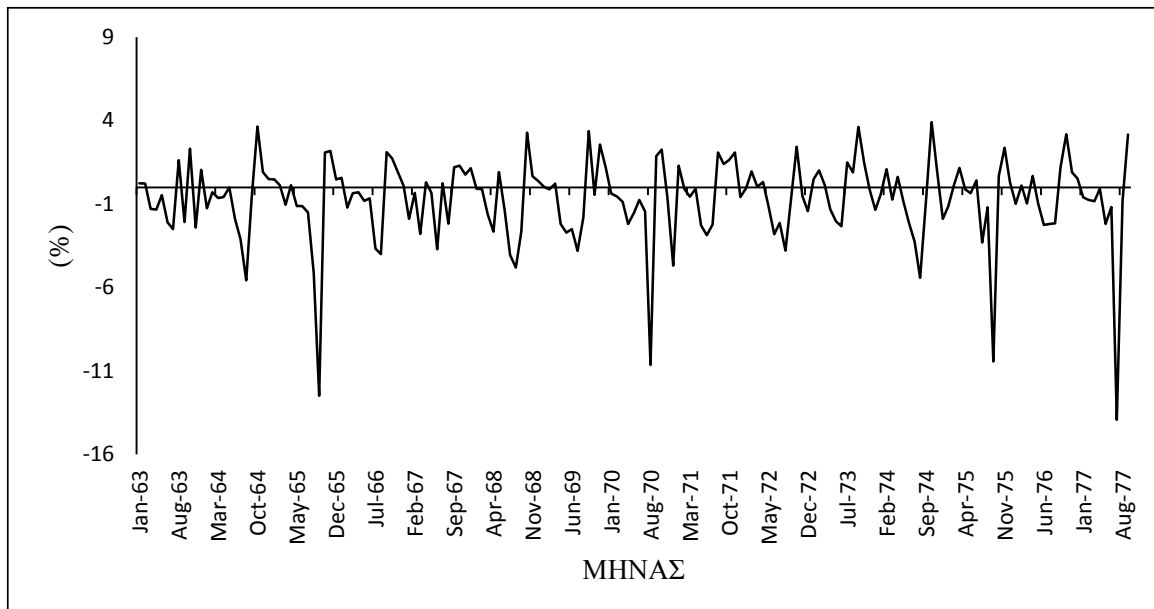
Τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία είναι πρωτίστως η απορροή που δίνεται από το πρόγραμμα σε μηνιαίο ύψος (mm) για όλα τα έτη προσομοίωσης. Κατόπιν γίνεται η απαραίτητη σύγκριση των απορροών αυτών εκφρασμένων σε m^3/s , με αυτές της

βαθμονόμησης ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της αποδάσωσης που πραγματοποιήθηκε στο Σενάριο 1.

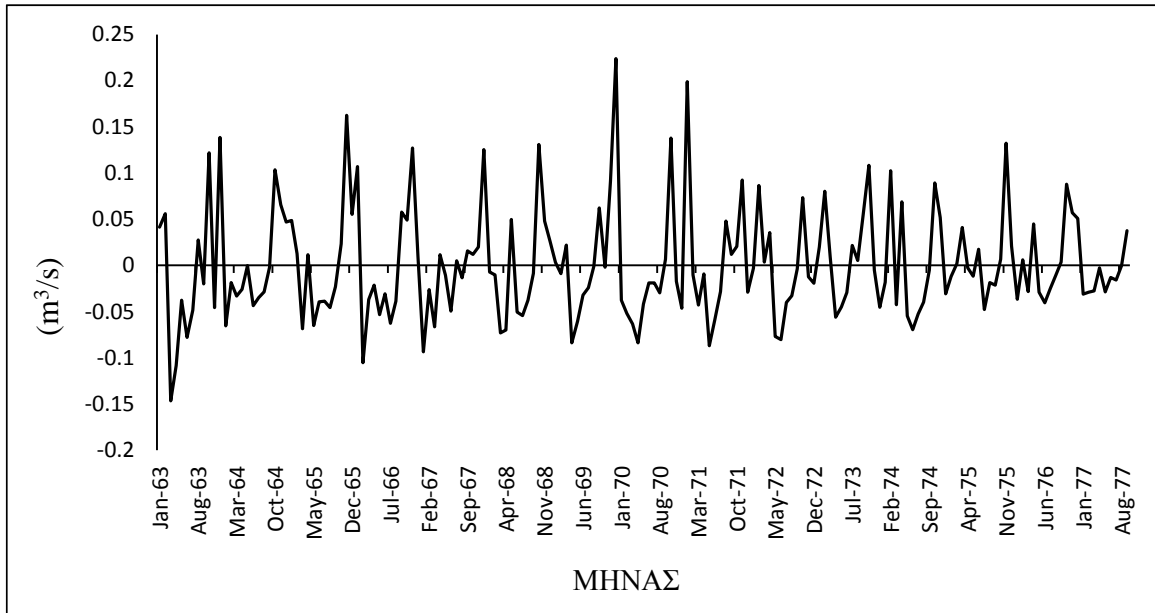
Μετά την αποδάσωση των εκτάσεων που έχουν καθοριστεί, η απορροή αυξάνεται σύμφωνα με τις τιμές των αποτελεσμάτων που εμφάνισε το μοντέλο. Στο Σχήμα 6.2 φαίνονται οι μηνιαίες τιμές των απορροών πριν και μετά την αποδάσωση του Σεναρίου 1 για όλα τα έτη που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η μηνιαία μεταβολή των απορροών σε ποσοστό, ενώ στο Σχήμα 6.4 εμφανίζεται η μεταβολή σε απόλυτη τιμή του ρυθμού της απορροής (m^3/s).



Σχήμα 6.2: Σύγκριση απορροών για το Σενάριο 1

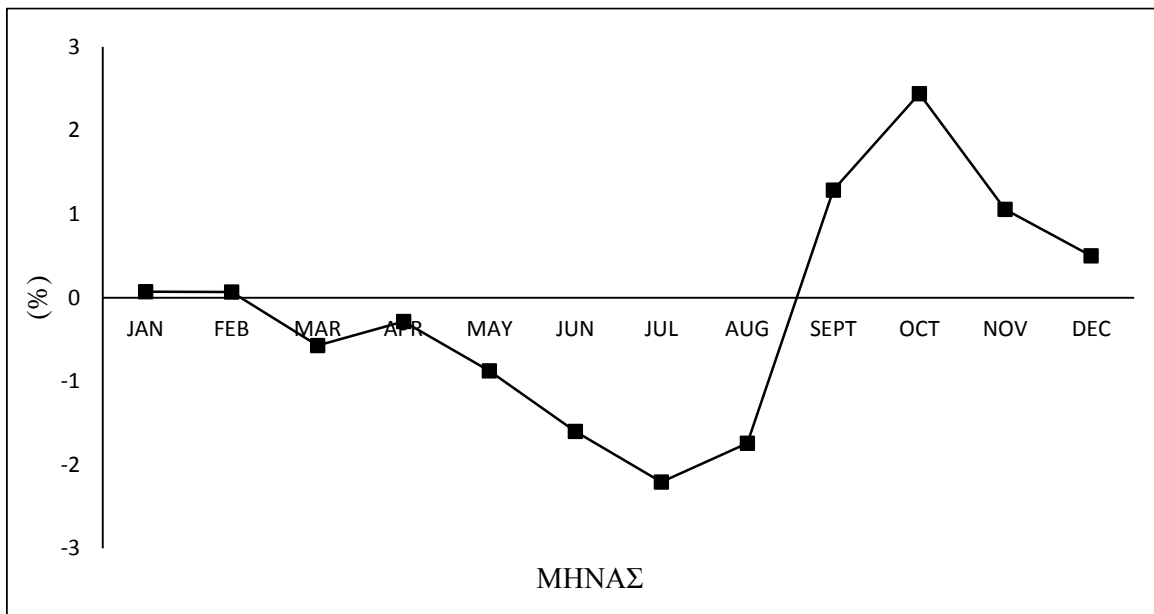


Σχήμα 6.3: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε μηνιαία βάση για ολόκληρη την περίοδο

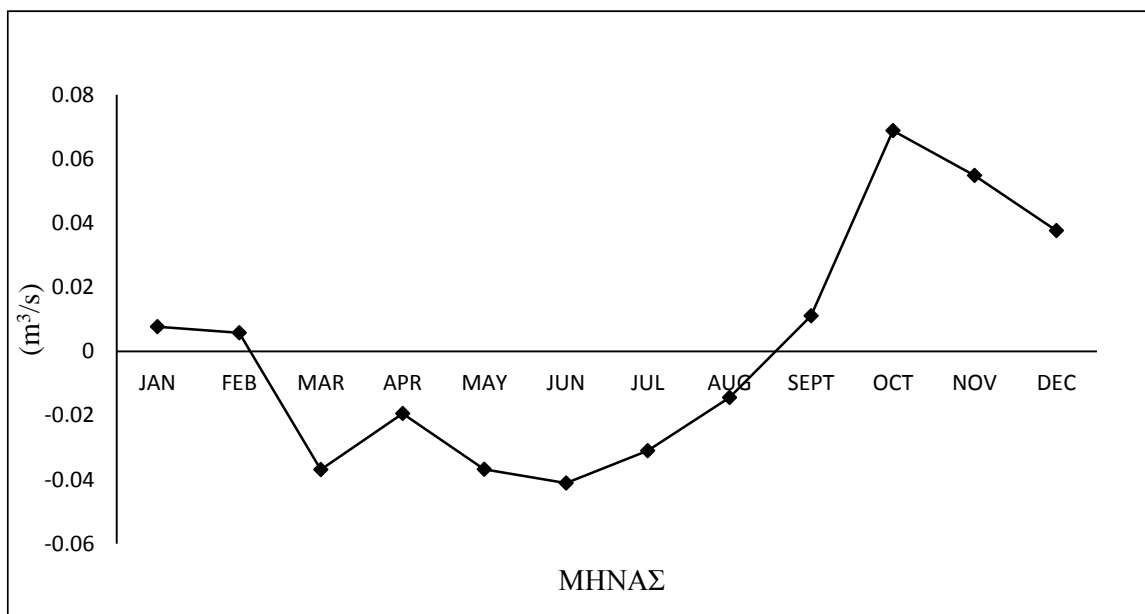


Σχήμα 6.4: Μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m³/s)

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μηνιαίας απορροής στη λεκάνη καθώς και η μέση μηνιαία μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m³/s).



Σχήμα 6.5: Ποσοστιαία αλλαγή της μέσης μηνιαίας απορροής



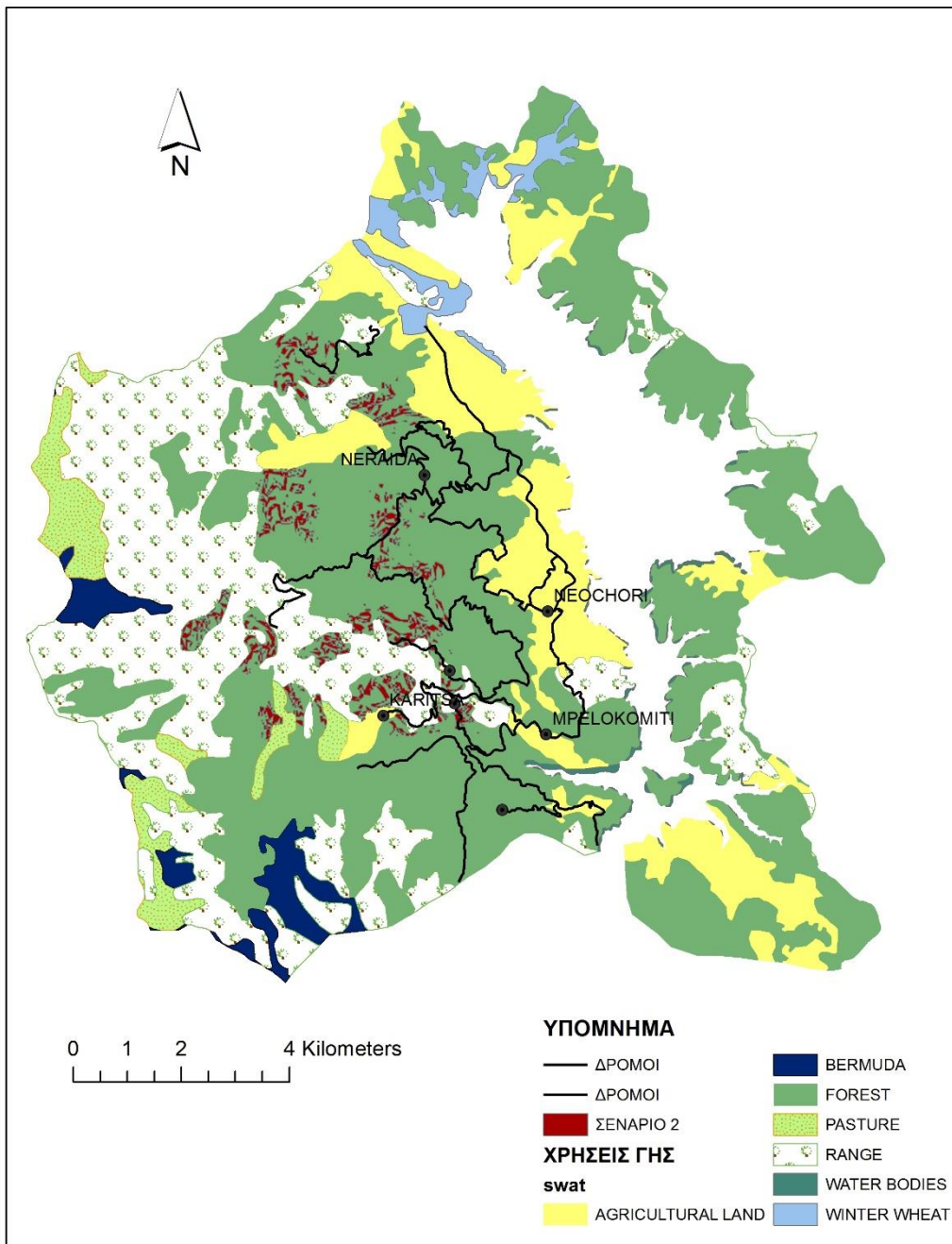
Σχήμα 6.6: Μέση μηνιαία μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m³/s)

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.5 και 6.6 με τις μέσες μηνιαίες μεταβολές, μπορούμε να βγάλουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η μεγαλύτερη αύξηση της απορροής συμβαίνει τον μήνα Οκτώβριο (0.068 m³/s), ενώ η μεγαλύτερη μείωση τον Ιούνιο (-0.041 m³/s).
2. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της απορροής συμβαίνει ξανά τον μήνα Οκτώβριο με 2.11% ενώ η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση τον Ιούλιο (-3.03%).
3. Τελικά, η μέση ετήσια απορροή είναι 4.6403 m³/s μειωμένη κατά -0.008% σε σύγκριση με την πρώτη προσομοίωση (βαθμονόμηση).
4. Η επιφανειακή απορροή σε αυτό το Σενάριο αυξήθηκε κατά 5.25% ενώ η υπόγεια ροή μειώθηκε κατά 3.18%

6.5 Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι η αποδάσωση στην περιοχή πραγματοποιείται σποραδικά και όχι συστηματικά. Πραγματοποιούνται πολλές αποδασώσεις μικρής κλίμακας διάσπαρτες μέσα στη λεκάνη χωρίς πλάνο και χωρίς ιδιαίτερη συστηματικότητα. Προφανώς, το αποτέλεσμα των αποδασώσεων αυτών θεωρείται ότι έχει προκύψει μέσα στο πέρασμα των ετών και δεν μπορεί εύκολα να προβλεφθεί ή να καταγραφεί. Τα διάφορα «μπαλώματα» των εκτάσεων που αποδασώνονται έχουν ακανόνιστη μορφή και εκτείνονται σε ολόκληρη τη λεκάνη σε διάφορα σημεία. Το συνολικό εμβαδό τους είναι 2.58 km² δηλαδή το 3.6% των συνολικών δασών της λεκάνης και η κλίση του εδάφους και η έκταση του κάθε μπαλώματος είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Οι αποδασωμένες περιοχές φαίνονται στο Σχήμα 6.7.

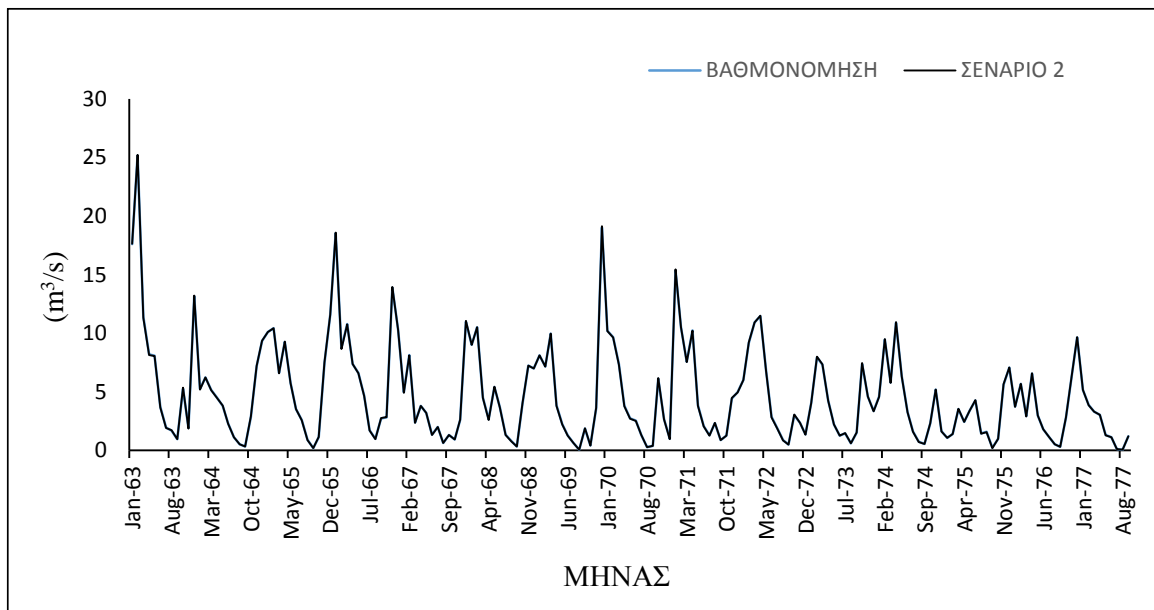


Σχήμα 6.7: Χάρτης σεναρίου 2

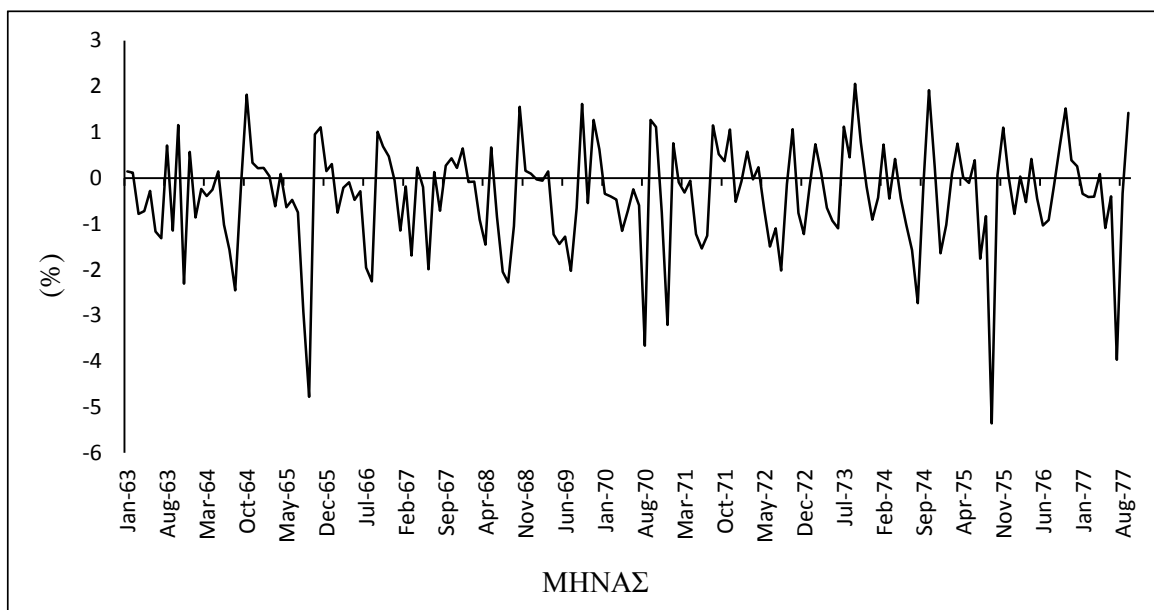
Όπως γίνεται φανερό και από το χάρτη του Σχήματος 6.7, τα «μπαλώματα» των εκτάσεων που αποδασώνονται βρίσκονται κατανεμημένα σε ολόκληρο το κομμάτι της κεντρικής λεκάνης, ακόμα και σε δύσβατα σημεία με υψηλό υψόμετρο και απότομες κλίσεις και κάποια από αυτά είναι αρκετά απομακρυσμένα από οικισμούς και οδικούς άξονες.

Αποτελέσματα σεναρίου 2:

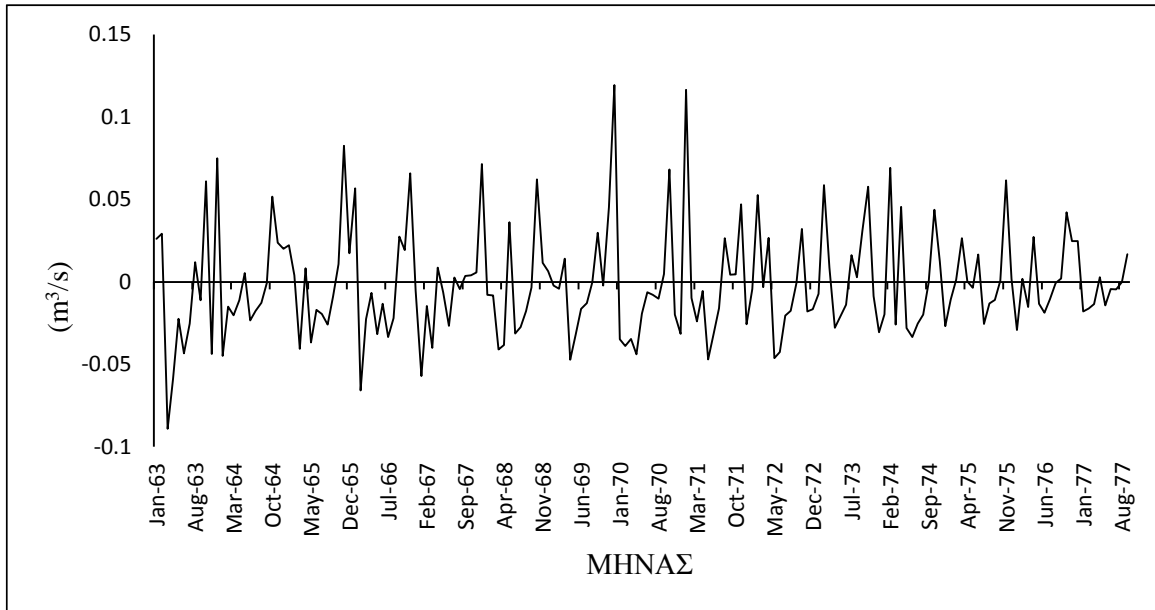
Τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου παρουσιάζονται παρακάτω με τα κατάλληλα διαγράμματα. Αναμένονται μικρότερες μεταβολές στην απορροή λόγω της μικρότερης έκτασης αποδάσωσης. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



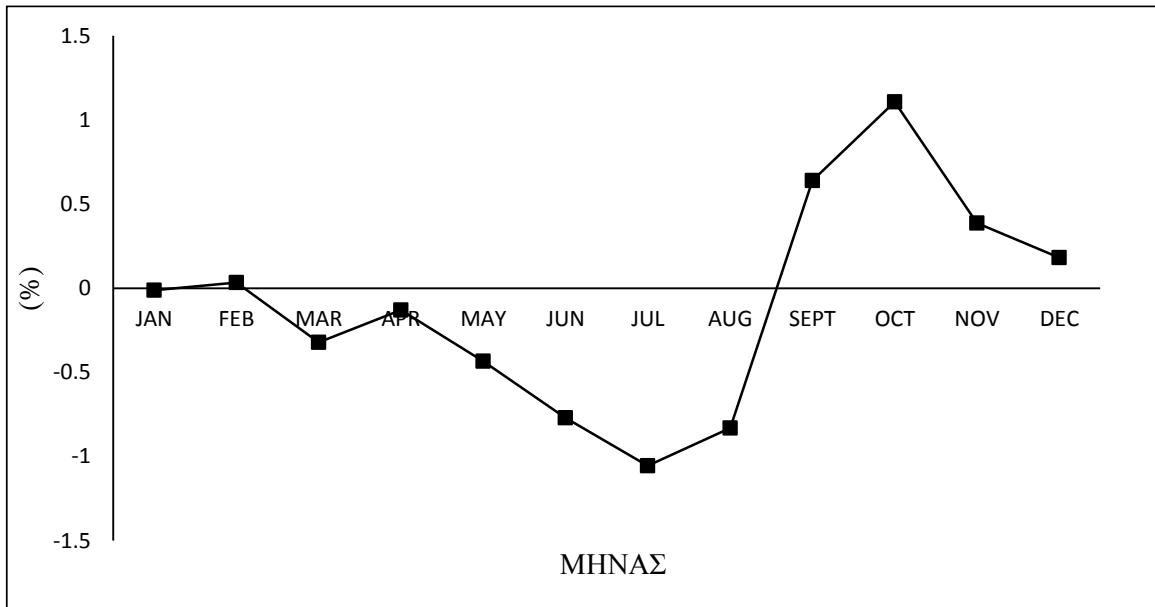
Σχήμα 6.8: Σύγκριση απορροών για το σενάριο 2



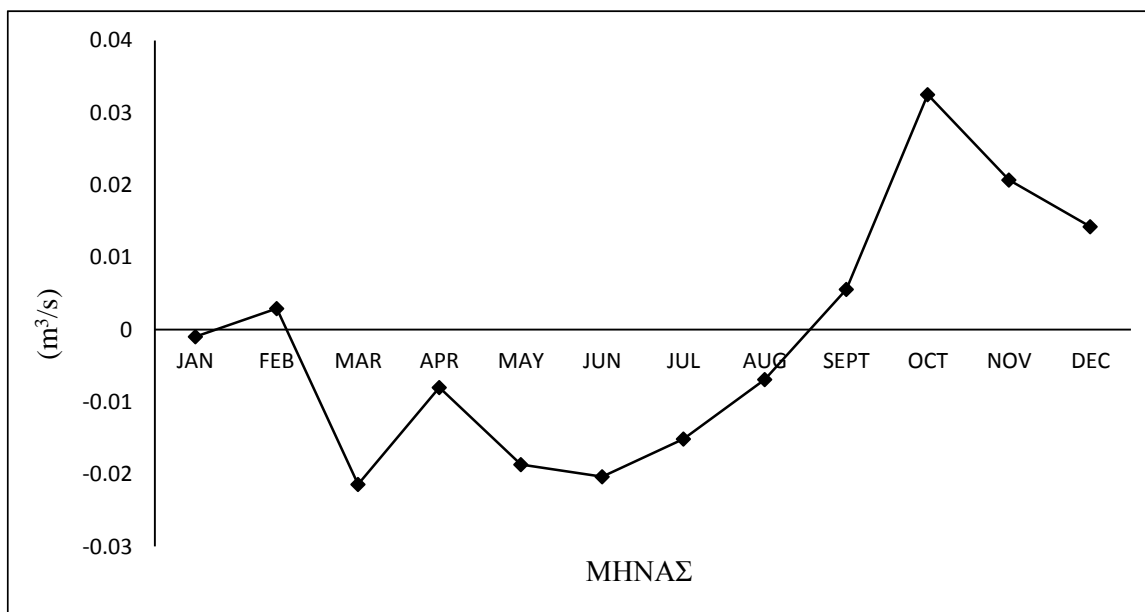
Σχήμα 6.9: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε μηνιαία βάση για ολόκληρη την περίοδο



Σχήμα 6.10: Μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m³/s)



Σχήμα 6.11: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μηνιαίας απορροής



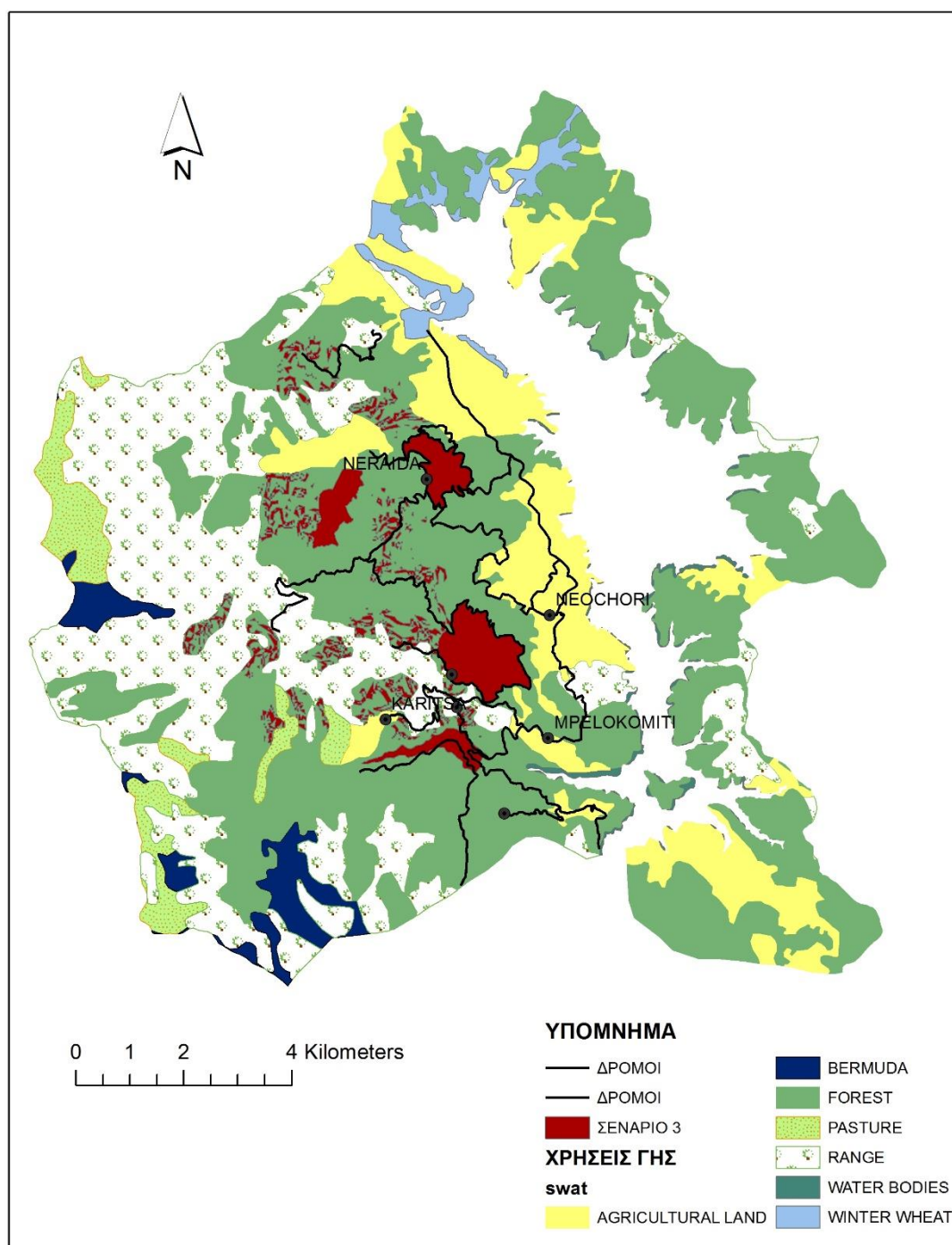
Σχήμα 6.12: Μέση μηνιαία μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m³/s)

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.11 και 6.12 με τις μέσες μηνιαίες μεταβολές, μπορούμε να οδηγηθούμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) Η μεγαλύτερη αύξηση της απορροής συμβαίνει τον μήνα Οκτώβριο (0.033 m³/s), ενώ η μεγαλύτερη μείωση τον Μάρτιο (-0.021 m³/s).
- 2) Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της απορροής συμβαίνει ξανά τον μήνα Οκτώβριο (0.92%), ενώ η μεγαλύτερη μείωση τον Ιούλιο (-1.34%).
- 3) Τελικά, η μέση ετήσια απορροή για το Σενάριο 2 είναι 4.64 m³/s, μειωμένη κατά 0,015% σε σύγκριση με την αρχική προσομοίωση (βαθμονόμηση).
- 4) Η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή είναι 1.2 m³/s αυξημένη κατά 3.27% σε σύγκριση με την περίοδο προ της αλλαγής, ενώ η υπόγεια ροή είναι μειωμένη κατά 1.81%

6.6 Σενάριο 3

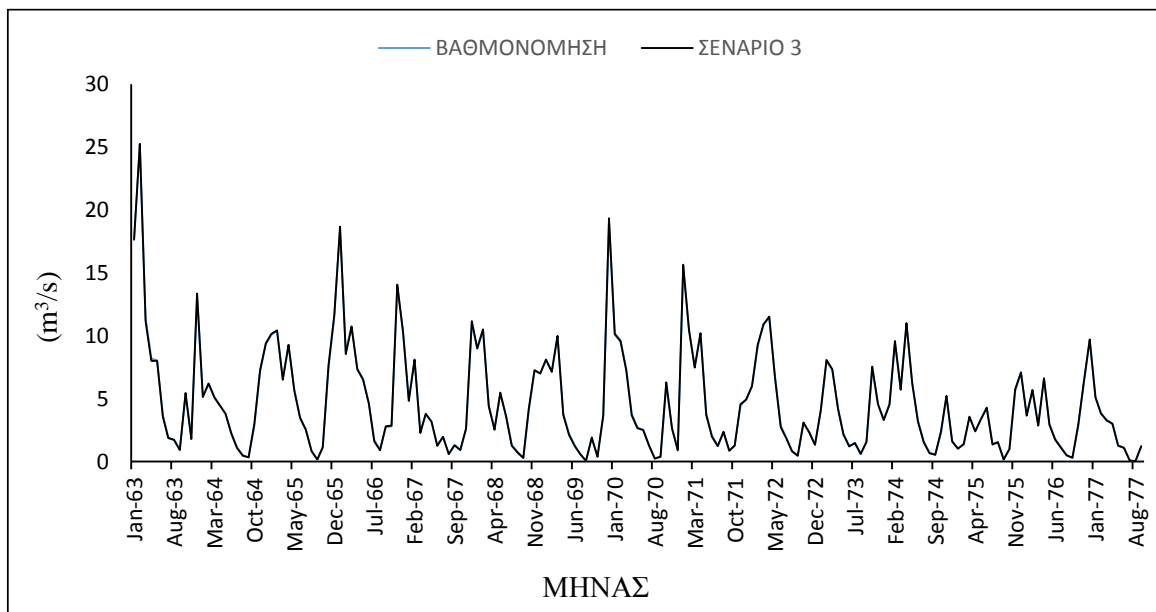
Το τρίτο σενάριο αποτελεί το συνδυασμό των δύο προηγούμενων σεναρίων, δηλαδή συστηματική αποδάσωση μεγάλων συνεχών εκτάσεων όπως στο Σενάριο 1 και σποραδική μη ελεγχόμενη αποδάσωση όπως στο Σενάριο 2. Συνολικά αποδασώνονται 6.54 km², δηλαδή το 9.15% των συνολικών δασικών εκτάσεων της λεκάνης και αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση από τις τρεις. Οι αποδασωμένες περιοχές φαίνονται στο Σχήμα 6.13.



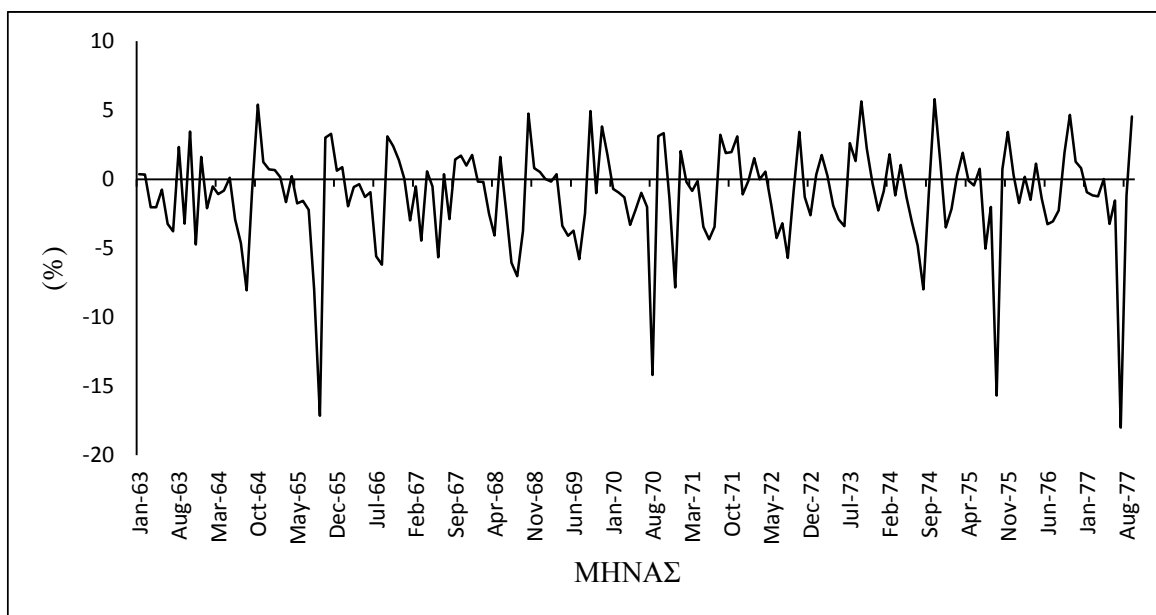
Σχήμα 6.13: Σενάριο 3

Αποτελέσματα σεναρίου 3:

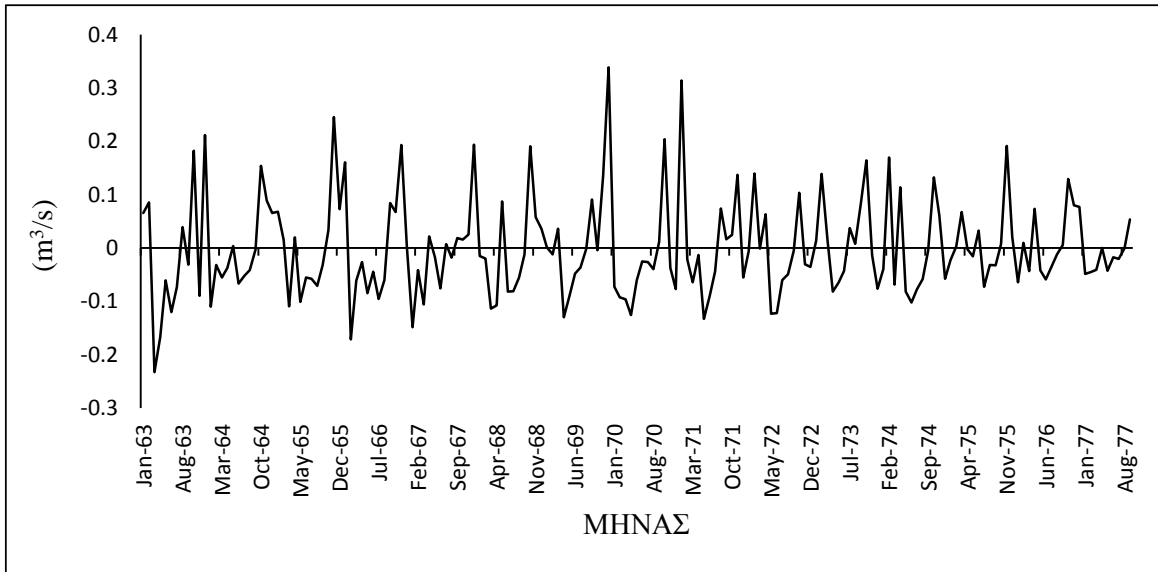
Το Σενάριο 3, αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση συγκριτικά με τα προηγούμενα δύο σεναρία, καθώς αποδασώνονται συνολικά 6.54 km² δασικής έκτασης. Αναμένονται οι μεγαλύτερες μεταβολές της απορροής τόσο ποσοστιαία όσο και σε απόλυτη μεταβολή. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



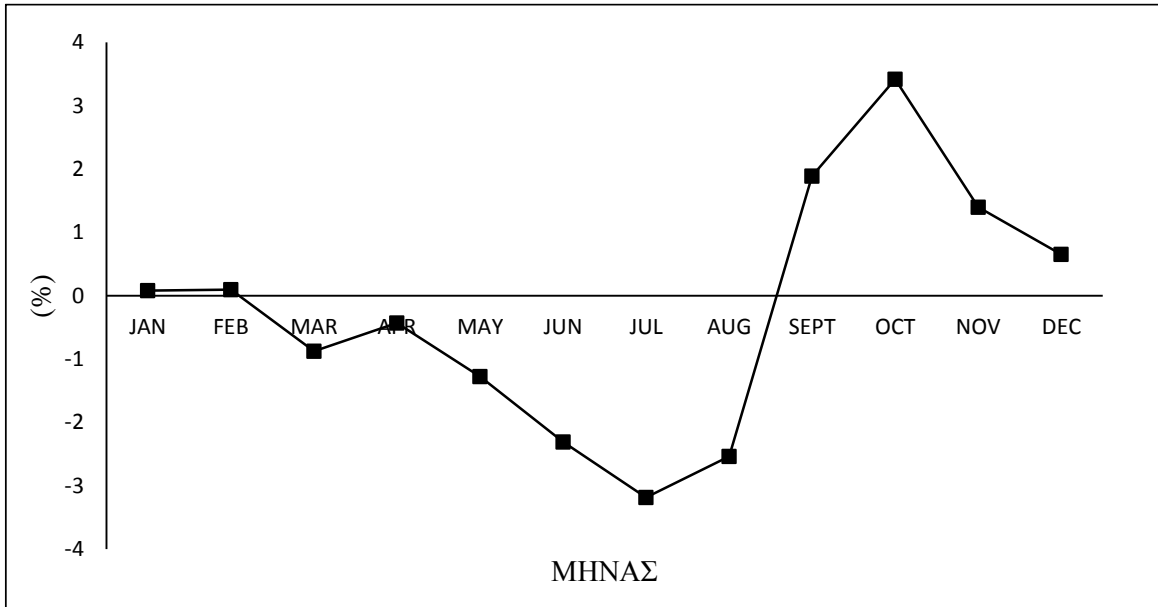
Σχήμα 6.14: Σύγκριση απορροών για το Σενάριο 3 για ολόκληρη την περίοδο



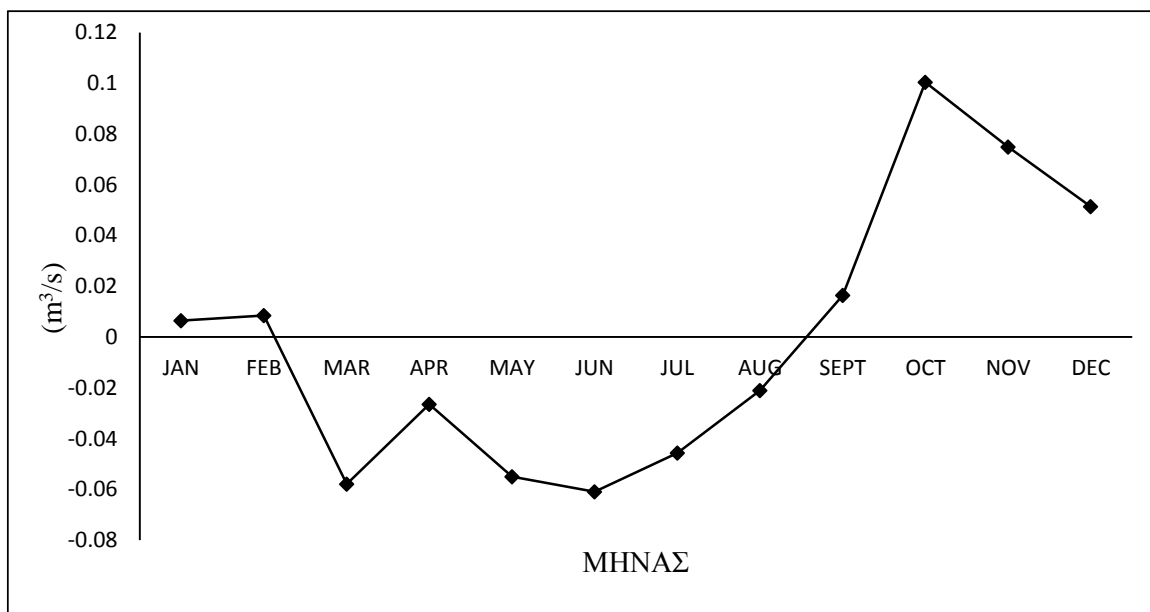
Σχήμα 6.15: Ποσοστιαία μεταβολή της απορροής σε μηνιαία βάση για ολόκληρη την περίοδο



Σχήμα 6.16: Μεταβολή της απορροής σε απόλυτη τιμή (m^3/s)



Σχήμα 6.17: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης μηνιαίας απορροής



Σχήμα 6.18: Μέση μηνιαία μεταβολή (m³/s)

Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.17 και 6.18 με τις μέσες μηνιαίες μεταβολές, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η μεγαλύτερη αύξηση της απορροής συμβαίνει τον μήνα Οκτώβριο ($0.1 \text{ m}^3/\text{s}$), ενώ η μεγαλύτερη μείωση τον Μάρτιο με $-0.058 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της απορροής συμβαίνει ξανά τον μήνα Οκτώβριο (3.41%), ενώ η μεγαλύτερη μείωση τον Ιούλιο (-3.19%).
3. Τελικά, η μέση ετήσια απορροή είναι $4.639 \text{ m}^3/\text{s}$ και είναι μειωμένη κατά -0.04% σε σύγκριση με την αρχική προσομοίωση.
4. Η επιφανειακή απορροή είναι $1.262 \text{ m}^3/\text{s}$ αυξημένη κατά 8.61%, ενώ η υπόγεια ροή είναι $1.528 \text{ m}^3/\text{s}$ μειωμένη κατά 4.86% σε σύγκριση με τη αρχική προσομοίωση.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα και των τριών σεναρίων προκύπτουν τα εξής:

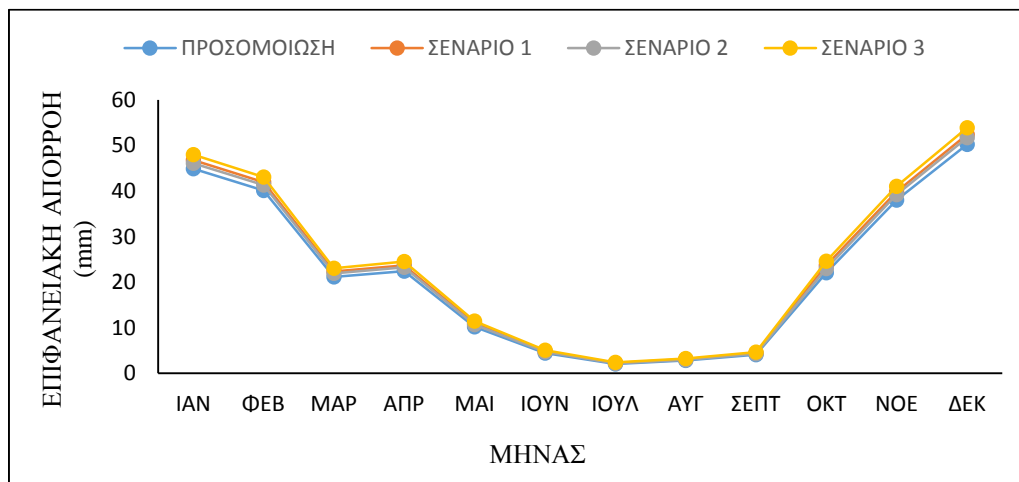
1. Παρατηρείται ότι για τους ξηρούς μήνες κατά τους οποίους οι βροχές είναι λίγες, η ποσοστιαία μεταβολή είναι μεγάλη και αρνητική παρόλο που η μεταβολή σε απόλυτη τιμή είναι σχετικά μικρή. Το αντίθετο συμβαίνει στους υγρούς μήνες, για τους οποίους η μεταβολή σε ποσοστό είναι θετική και σχετικά μικρή ενώ η μεταβολή σε m^3/s είναι αρκετά μεγαλύτερη.
2. Η αλλαγή στον αριθμό CN κατά την αποδάσωση, προκαλεί αύξηση της επιφανειακής απορροής της λεκάνης μετά από βροχοπτώσεις. Επίσης, μειώνεται η ποσότητα του νερού που διηθείται στο έδαφος και τροφοδοτεί τον επιφανειακό υδροφορέα. Έτσι εξηγείται το ότι η απορροή κατά τους ξηρούς μήνες, η οποία προέρχεται κυρίως από τη βασική ροή μειώνεται, σε αντίθεση με τους υγρούς μήνες κατά τους οποίους η συνολική απορροή, η οποία προέρχεται κυρίως από την επιφανειακή ροή αυξάνεται.
3. Για το δυσμενέστερο σενάριο (Σενάριο 3), παρατηρείται αύξηση στη συνολική απορροή της λεκάνης κατά 1.25% τους υγρούς μήνες (Σεπτέμβριο-Φεβρουάριο), ενώ για τους ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος) παρατηρείται μείωση της τάξης του -2.68 %. Για το Σενάριο 2, παρατηρείται αύξηση 0.38% για τους υγρούς μήνες ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται μείωση -0,89%. Τέλος, για το Σενάριο 1,

τους υγρούς μήνες παρατηρείται αύξηση 0.90% ενώ τους ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες η απορροή στη λεκάνη μειώνεται κατά -1.85%.

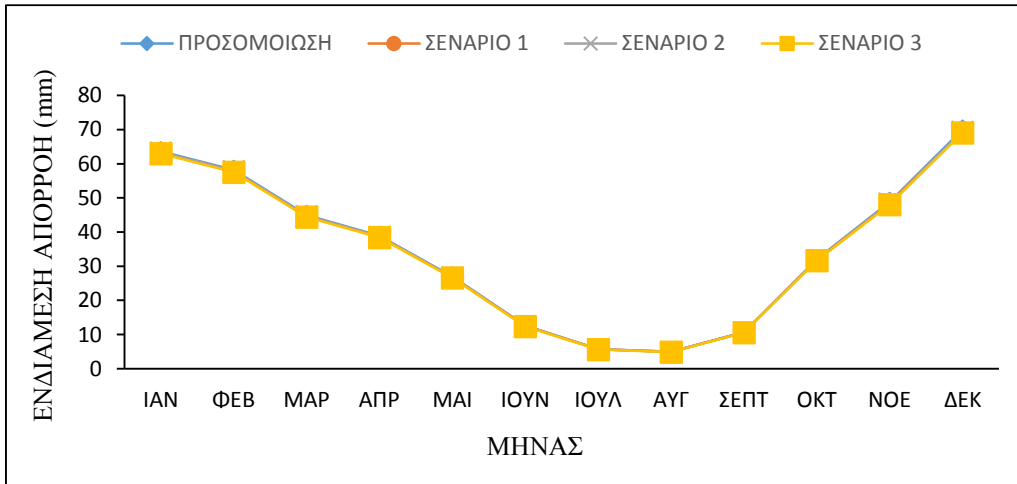
4. Η επίδραση του τρίτου σεναρίου ήταν μεγαλύτερη συγκριτικά με τα άλλα δύο και έδωσε μεγαλύτερες μεταβολές της απορροής σε ετήσια βάση.
5. Η επίδραση της αποδάσωσης στη μέση ετήσια απορροή της λεκάνης ήταν αμελητέα, κάτι που δικαιολογείται από τις μικρές αλλά ρεαλιστικές εκτάσεις που αποδασώθηκαν. Συγκεκριμένα η συνολική μέση ετήσια απορροή μεταβάλλεται ελάχιστα και αρνητικά και για τα τρία σενάρια κατά -0.008%, -0.015% και -0.04% αντίστοιχα, τιμές που ανήκουν μέσα στο αποδεκτό στατιστικό σφάλμα του μοντέλου.
6. Μελετώντας τις περιοχές (HRU) στις οποίες έγινε η αποδάσωση, πριν και μετά την εφαρμογή του Σεναρίου 3, διαπιστώνεται μία αύξηση 22.6% της συνολικής απορροής για όλη την περίοδο που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι απορροές στις περιοχές που αποδασώθηκαν επηρεάζονται σημαντικά.

6.7 Μελέτη των μεταβολών για τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου

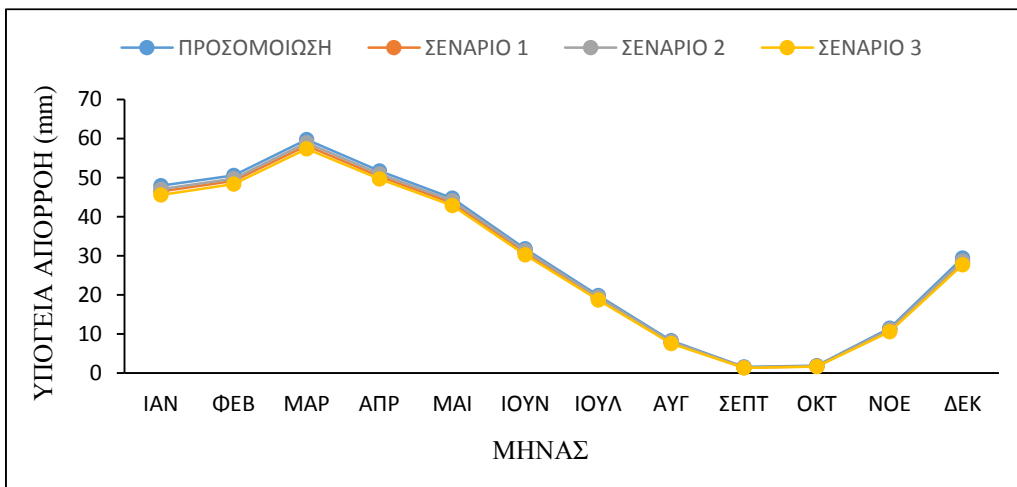
Για την καλύτερη επεξήγηση του φαινομένου των μεταβολών της απορροής που μελετήθηκε στα προηγούμενα εδάφια, θα κατασκευαστούν διαγράμματα με όλες τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου για όλα τα σενάρια αποδάσωσης. Οι συνιστώσες αυτές, είναι η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή, η υπόγεια και η συνολική, ενώ επίσης θα γίνει διερεύνηση και για τη μεταβολή της εξατμισοδιαπνοής. Έτσι θα γίνει μια αποτίμηση όσον αφορά την κατανομή της απορροής στις συνιστώσες της για κάθε διαφορετικό σενάριο. Οι μεταβολές στις συνιστώσες αυτές εμφανίζονται στα παρακάτω σχήματα.



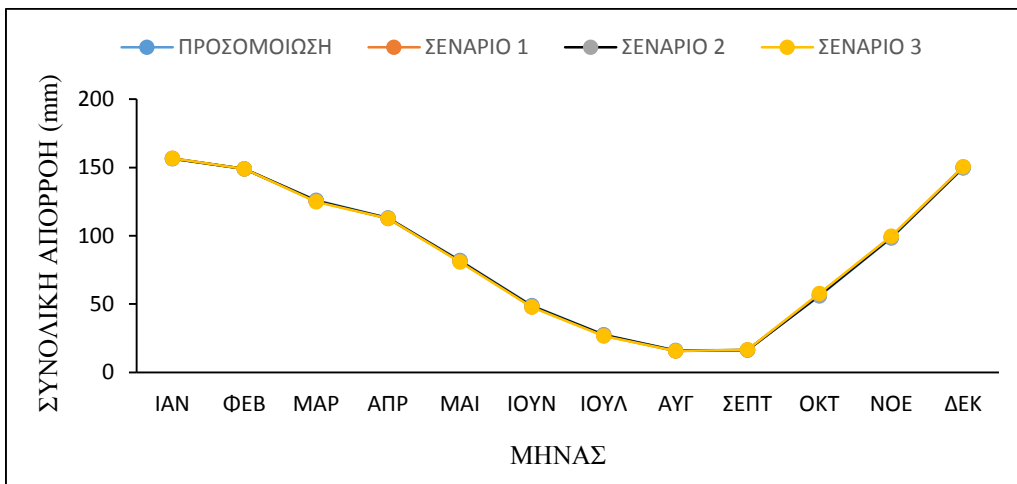
Σχήμα 6.19: Διακύμανση επιφανειακής απορροής σε mm



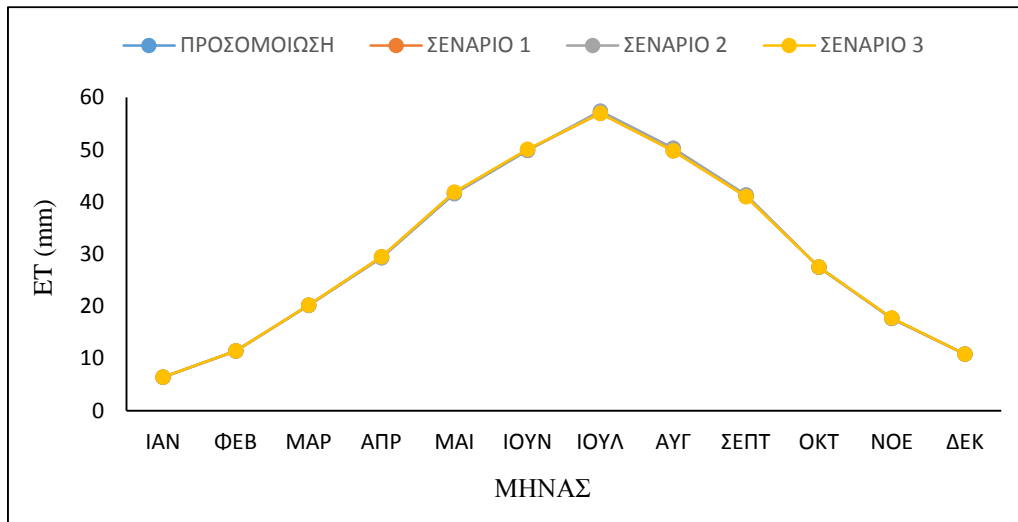
Σχήμα 6.20: Διακύμανση ενδιάμεσης απορροής σε mm



Σχήμα 6.21: Διακύμανση της υπόγειας απορροής σε mm



Σχήμα 6.22: Διακύμανση της συνολικής απορροής σε mm



Σχήμα 6.23: Διακύμανση εξατμισοδιαπνοής σε mm

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

1. Η επιφανειακή απορροή είναι η συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου που επηρεάζεται περισσότερο από την αποδάσωση. Παρουσιάζει μεταβολές για τα σενάρια, ανάλογα με την έκταση αποδάσωσης. Τους καλοκαιρινούς μήνες οι τιμές της επιφανειακής απορροής υποχωρούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα και η μεταβολή από σενάριο σε σενάριο είναι μικρή σε αντίθεση με τους υγρούς μήνες.
2. Η υπόγεια απορροή μειώνεται όσο αυξάνεται η έκταση της αποδάσωσης για όλους τους μήνες του έτους εκτός από τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβριο κατά τους οποίους δε μεταβάλλεται σε σχέση με τις τιμές της προσομοίωσης.
3. Η συνολική απορροή δε μεταβάλλεται ουσιαστικά με την αποδάσωση. Εξαιρέση αποτελεί μια μικρή αύξηση τους μήνες Οκτώβριο-Δεκέμβριο για το Σενάριο 3.

7 Συμπεράσματα

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας ήταν πολλά και αρκετές φορές χρονοβόρα στην επίλυσή τους. Αρχικά, το μεγάλο πρόβλημα σε εργασίες τέτοιου τύπου, είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων. Ο αριθμός των ελεύθερων δεδομένων βροχομετρικών σταθμών και ειδικότερα τα βροχομετρικά ύψη σε ημερήσια κλίμακα, ήταν περιορισμένος και όσα υπήρχαν περιείχαν ελλείψεις οι οποίες έπρεπε να συμπληρωθούν. Το ίδιο πρόβλημα υπήρξε και με τα ημερήσια δεδομένα θερμοκρασιών. Η αναζήτηση των εδαφολογικών δεδομένων κόστισε πολύ χρόνο έως ότου βρεθεί λύση μέσω του Ι.Δ.Ε σε αντίθεση με τα δεδομένα χρήσεων γης τα οποία ήταν εύκολα προσβάσιμα και σε ψηφιακή μορφή μέσω της ιστοσελίδας geodata.gov.gr. Όσον αφορά τα εδαφολογικά δεδομένα, αυτά δεν ήταν επαρκή σε αυτούσια μορφή για την υδρολογική ανάλυση και, έτσι, έπρεπε να γίνει προσεκτική αναζήτηση των στοιχείων που χαρακτηρίζει το κάθε έδαφος ώστε να εισαχθούν λογικές τιμές στη βαθμονόμηση. Ένα άλλο εμπόδιο που έπρεπε να ξεπεραστεί είναι ο μεγάλος αριθμός σφαλμάτων και ασυμβατοτήτων του λογισμικού πακέτου ArcSWAT το οποίο έχει αρκετές ιδιαιτερότητες και εμφανίζει συχνά θόνη σφάλματος εάν κάποιος στοιχείο ή παράμετρος δεν εισαχθεί σωστά, πράγμα που μπορεί να κοστίζει πολύ χρόνο εάν δεν είναι σαφής η ακριβής αιτία του σφάλματος.

Με την παρούσα εργασία αποδεικνύεται ότι η χρήση ενός μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής φυσικής βάσης μπορεί να εξασφαλίσει τη δυνατότητα διερεύνησης των επιπτώσεων ανθρωπογενών παρεμβάσεων στο υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής. Μέσω αυτής της δυνατότητας διερευνήθηκαν τρία σενάρια μετατροπής δασικής έκτασης σε χορτολιβαδική καθώς και οι επιπτώσεις που είχαν αυτές οι αλλαγές στις υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης που εξετάστηκε.

Η κατασκευή των τριών σεναρίων έπρεπε να ακολουθεί μια ρεαλιστική πορεία οπότε οι εκτάσεις αποδάσωσης για κάθε σενάριο δε θα μπορούσαν να ήταν πολύ μεγάλες. Αυτό οδηγεί σε αμελητέα μεταβολή στο σύνολο των απορροών για όλη τη περίοδο μελέτης. Αυτό που μπορεί να μελετηθεί ωστόσο με επάρκεια είναι η μεταβολή των απορροών σε μηνιαίο επίπεδο καθώς και η διακύμανση των μέσων μηνιαίων απορροών μέσα στο έτος. Συμπεραίνεται ότι για τους ξηρούς μήνες κατά τους οποίους οι βροχές είναι λίγες, η ποσοστιαία μεταβολή της απορροής είναι μεγάλη και αρνητική παρόλο που η μεταβολή σε απόλυτη τιμή είναι σχετικά μικρή. Το αντίθετο συμβαίνει στους υγρούς μήνες, για τους οποίους η μεταβολή ως ποσοστό είναι θετική και σχετικά μικρή ενώ η μεταβολή σε m^3/s είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης μελετώντας ξεχωριστά τις περιοχές οι οποίες επλήγησαν από το φαινόμενο της αποδάσωσης, γίνεται σαφές ότι η απορροή εκεί αυξήθηκε κατά 22.6% στο σύνολο της περιόδου που μελετήθηκε. Τέλος, προκύπτει το συμπέρασμα ότι από τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου, η επιφανειακή απορροή είναι αυτή που μεταβάλλεται περισσότερο αυξητικά, η υπόγεια μεταβάλλεται αρνητικά, ενώ η συνολική απορροή δεν μεταβάλλεται δραματικά, κυρίως λόγω της μικρής έκτασης που αποδασώνεται.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- Αθανασιά Γ., *Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της λεκάνης του ποταμού Αγραφιότη με χρήση του μοντέλου SWAT*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- Εσκιογλου Π., *Προστασία δασικών οικοσυστημάτων και φυσικού περιβάλλοντος*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, 2008
- Ευστρατιάδης Α., Κουκουβίνος Α., Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., *Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα Τεύχη 1&2*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- Ζάγκας Θ., Στάθης Δ., Παπαιωάννου Α., *Ο ρόλος της δασικής βλάστησης στις λεκάνες απορροής των ρεμάτων και στον εφοδιασμό των εδαφών και των πηγών με καθαρό πόσιμο νερό*, 2013
- Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3^η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Μπατέλης Στ., *Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα, 2012.
- Ναλμπάντης Ι. και Τσακίρης Γ., *Υδατικοί Πόροι: Επιφανειακό Υδατικό Δυναμικό*, Κεφάλαιο 2 στο Γ.Τσακίρης (υπεύθυνος έκδοσης), *Υδραυλικά Έργα: Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος II: Εγχειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006
- Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- Στουρνάρας Γ., κ.α., *Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά σώματα του ελλαδικού χώρου*, Επιτροπή μελέτης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής, ΤΡΑΠΕΖΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ, Αθήνα, 2011.
- Τζαμτζής Ι., *Διερεύνηση των σχέσεων δάσους και νερού με βάση το υδατικό ισοζύγιο*, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2007.
- Τσακίρης Γ., *ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.
- Τσακίρης Γ., *ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΡΓΑ: Εγχειοβελτιωτικά έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006.

Ξενόγλωσσες

- Arnold J.G, Williams J.R, Srinivasan R., King K.W, *Soil and Water Assessment Tool*, 1999
- Almeida et al., *The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution*, International Journal of Climatology, 2007
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988
- Linsley R., Kohler M., Paulhus J., *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, 1988
- Neitsch S.L, Arnold J.G, et al., *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, January 2005.

Neitsch S.L, Arnold J.G, & Williams J.R, *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*, 1999

Nepstad D., de Carvalho CR, Davidson E, Jipp P., Lefebvre P, *The role of deep roots in the hydrologic and carbon cycles of Amazonian forests and pastures*, 1994

USDA, Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*, 1972

Διαδικτυακές

wfd.ypeka.gr

geodata.gov.gr

swat.tamu.edu

Παράρτημα Α: Πίνακες

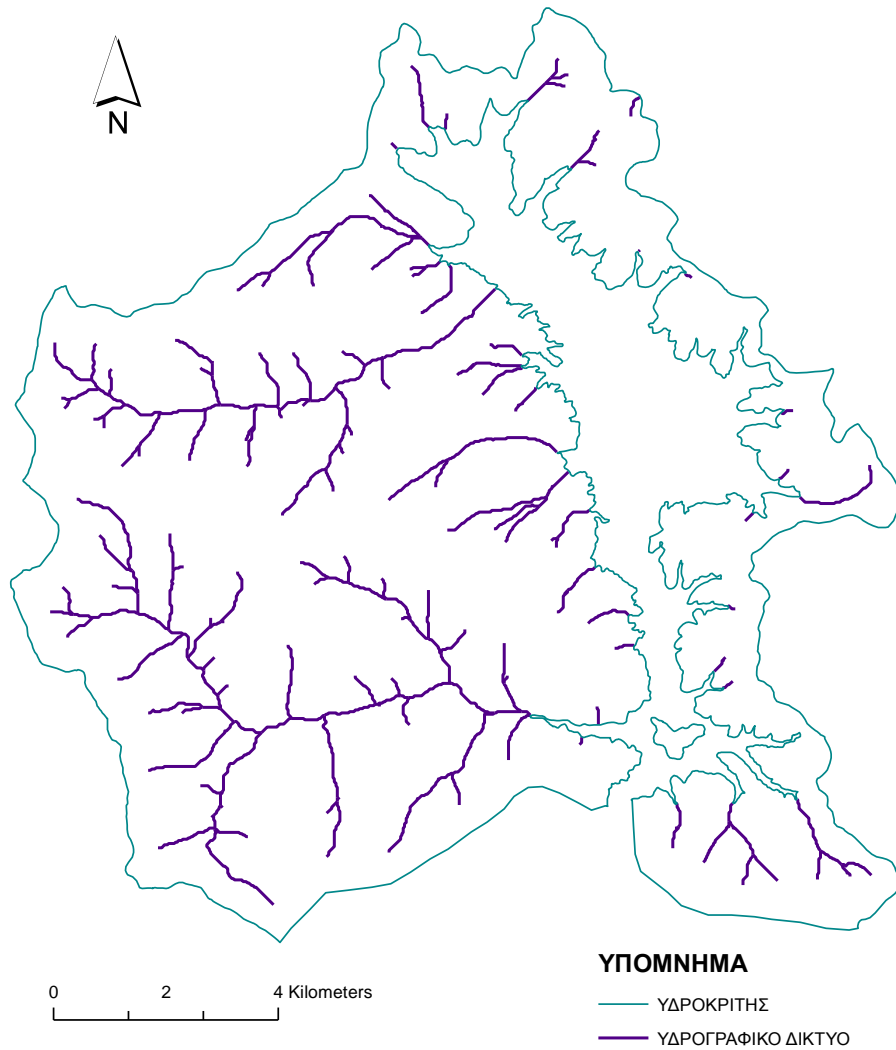
Πίνακας Α.1: Τυπικός πίνακας αποτελεσμάτων SWAT σε μηνιαία βάση για ένα έτος

MONTH	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	GWQ (mm)	PERCOLATE (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)
1	321.4	97.78	134.74	101.21	158.25	283.4	4.98	6.94	334.37
2	470.7	134.48	166.65	114.51	158.01	282.36	6.99	9.63	416.39
3	120.6	20.2	59.42	135.85	47.45	283.31	22.06	36.29	216.46
4	112.6	7.96	38.28	103.21	37.75	283.28	26.75	49.86	150.39
5	168	19.08	56.13	77.29	46.11	278.36	56.67	86.13	153.38
6	37	1.12	11.54	54.96	1.38	238.38	69.13	142.58	68.37
7	17.9	0.22	3.22	32.99	0	192.02	61.63	176.26	37.05
8	77.4	10.72	4.81	16.48	0	191.78	52.77	168.51	32.5
9	22.9	0.44	13.56	3.57	1.26	160.52	47.98	117.56	17.93
10	297.5	41.59	56.05	2.33	48.61	268.29	24.3	41.59	100.25
11	52.9	0.22	19.96	14.42	0.56	264.34	19.27	36.02	34.86
12	349.3	101.24	119.48	28.67	124.49	276.3	16.82	22.95	249.67

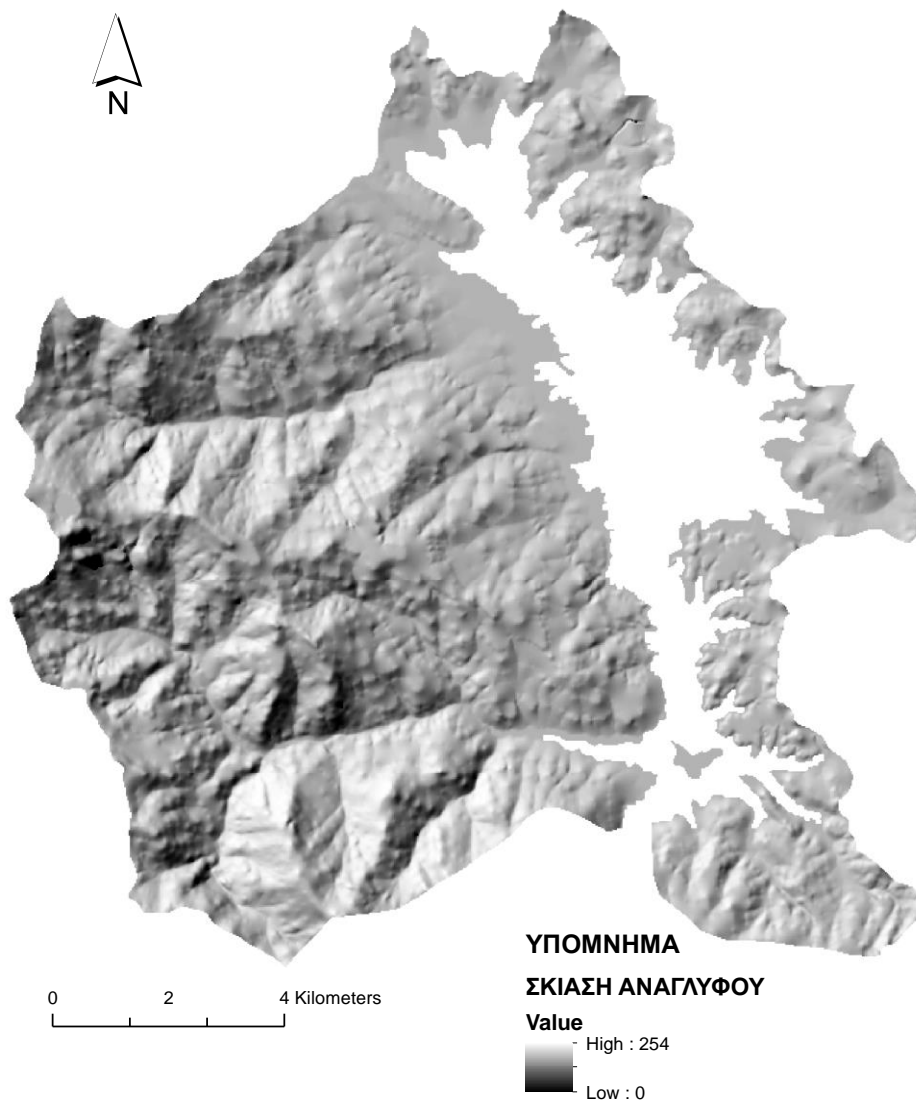
Πίνακας Α.2: Τυπικός πίνακας αποτελεσμάτων SWAT σε επίπεδο υπολεκάνης

SUB	PRECIP mm	SNOMELT mm	PET mm	ET mm	SW mm	PERC mm	SURQ mm	GW_Q mm	WYLD mm
1	321.4	270.189	7.073	6.019	182.56	201.122	188.058	133.833	330.5
2	321.4	270.05	6.994	5.297	193.62	230.476	108.993	157.736	320.816
3	321.4	270.063	7.039	5.37	182.24	242.083	121.013	165.633	319.701
4	321.4	270.15	7.055	5.713	182.16	218.493	150.067	145.736	323.064
5	321.4	270.342	7.08	6.697	182.29	179.316	206.918	115.778	332.318
6	321.4	270.079	6.917	5.072	245.6	173.413	111.879	112.445	329.079
7	321.4	270.056	7.045	5.229	182.36	246.046	118.987	167.271	317.878
8	321.4	269.981	7.062	4.924	182.71	267.043	103.013	184.022	315.602
9	321.4	269.991	7.073	5.006	182.74	264.646	107.73	182.232	316.386
10	321.4	270.035	6.994	5.063	181.97	247.885	100.6	169.208	315.654
11	321.4	270.152	7.006	5.637	182.05	225.01	138.072	151.502	321.921
12	321.4	270.257	7.039	6.161	181.67	186.675	177.288	120.479	327.364
13	321.4	270.239	7.022	6.024	181.79	195.702	168.744	127.693	326.111
14	321.4	270.046	7.053	5.25	181.76	218.221	135.167	145.442	320.898
15	321.4	269.98	7.061	4.941	181.93	238.096	111.881	160.862	317.007
16	321.4	269.988	7.054	4.922	182.14	255.256	96.699	173.985	313.984
17	321.4	270.043	6.922	4.749	343.10	121.045	78.953	73.069	342.679
18	321.4	269.999	7.021	5.026	293.65	175.697	68.135	115.852	332.021

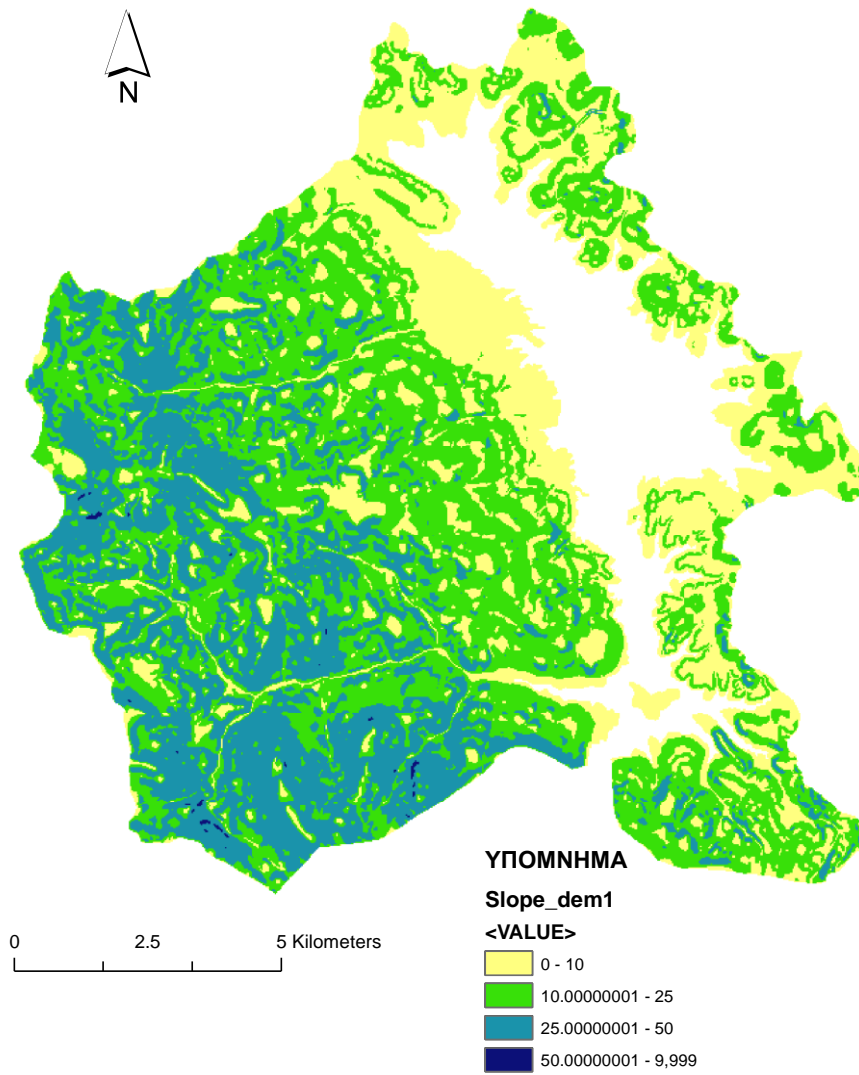
Παράρτημα Β: Σχήματα



Σχήμα Β.1: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου



Σχήμα Β.2: Χάρτης σκίασης αναγλύφου



Σχήμα Β.3: Χάρτης κλίσεων λεκάνης