



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

Διπλωματική εργασία

Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών
απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας



Μπατέλης Σταμάτιος-Χρήστος

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ευχαριστίες	v
Περίληψη	vii
Abstract	ix
Κατάλογος συμβόλων	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	1
2 Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής	3
2.1 Ορισμός μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής	3
2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων	3
2.3 Αναλυτική παρουσίαση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής	4
2.3.1 Μοντέλου Απλού Υδατικού Ισοζυγίου	4
2.3.2 Μοντέλο SWAT	4
2.3.3 Βαθμονόμηση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής	6
2.3.4 Μελλοντικές κατευθύνσεις	6
3 Το μοντέλο SWAT	9
3.1 Γενικά	9
3.2 Ο υδρολογικός κύκλος	9
3.3 Περιγραφή του μοντέλου SWAT	12
3.3.1 Υδρολογικές διαδικασίες	12
3.3.2 Μετεωρολογικές διεργασίες	19
4 Περιγραφή της μεθοδολογίας για την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου στο SWAT	23
4.1 Προετοιμασία των γεωγραφικών δεδομένων	23
4.1.1 Εισαγωγή	23
4.1.2 Ψηφιοποίηση χαρτών	23
4.1.3 Επεξεργασία Βάσεων Δεδομένων	24
4.1.4 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ)	26
4.1.5 Δημιουργία Υδρολογικού Δικτύου και υπολογισμός λεκάνης απορροής	26
4.1.6 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών	27
4.2 Προετοιμασία των βροχομετρικών δεδομένων	28

4.2.1	Έλεγχος ομοιογένειας χρονοσειρών βροχόπτωσης	28
4.2.2	Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων	30
4.2.3	Μέσο Βροχομετρικό Ύψος Λεκάνης	30
4.3	Προετοιμασία δεδομένων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής	31
4.3.1	Γενικά	31
4.3.2	Πρακτική σημασία της εξάτμισης και της διαπνοής	32
4.3.3	Οι μέθοδοι Penman και Penman-Monteith.....	33
4.3.4	Η μέθοδος Hargreaves	34
4.4	Προετοιμασία δεδομένων χρήσεων γης.....	35
4.5	Απορροή	38
5	Εφαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη απορροής του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί	39
5.1	Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας	39
5.2	Λεκάνη Απορροής Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί.....	39
5.3	Γεωγραφικά δεδομένα	41
5.4	Υδρολογικά δεδομένα.....	41
5.4.1	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.....	41
5.4.2	Θερμοκρασία αέρα - Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή	47
5.4.3	Απορροή	48
5.5	Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής	49
5.6	Γεωλογικοί Σχηματισμοί της Λεκάνης	53
6	Κατάρτιση και βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT για την υπό μελέτη λεκάνη	59
6.1	Γενικά	59
6.2	Εισαγωγή δεδομένων	60
6.2.1	Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής	60
6.2.2	Υπολογισμός Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU).....	61
6.2.3	Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων.....	66
6.3	Βαθμονόμηση του SWAT και παρουσίαση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων	68
6.3.1	Γενικά	68
6.4	Εκτέλεση του SWAT.....	73
6.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	74
6.5.1	Έλεγχος αποτελεσμάτων	74
6.5.2	Υδρολογικός κύκλος.....	76
7	Επίδραση αλλαγών στις χρήσεις γης της λεκάνης	81
7.1	Γενικά	81
7.2	Χαρακτηριστικά των πυρκαγιών	81

7.3	Η τιμή του αριθμού CN για καμμένες εκτάσεις	82
7.4	Κατασκευή σεναρίων.....	84
7.4.1	Σενάριο 1 ^ο	84
7.4.2	Σενάριο 2 ^ο	84
7.4.3	Σενάριο 3 ^ο	85
7.5	Αποτελέσματα σεναρίων	88
7.5.1	Αποτελέσματα για κάθε σενάριο ξεχωριστά	88
7.5.2	Συγκριτικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια.....	93
7.5.3	Μεταβολές στις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.....	97
8	Σύνοψη-Συμπεράσματα	99
8.1	Σύνοψη - Προβλήματα.....	99
8.2	Συμπεράσματα	100
	Αναφορές	101
	Στην ελληνική γλώσσα.....	101
	Ξενόγλωσσες.....	101
	Διαδίκτυο.....	102
	Παράρτημα Α: Πίνακες	103
	Παράρτημα Β: Σχήματα	111

Ευχαριστίες

Γράφοντας αυτές της γραμμές, η διπλωματική εργασία φτάνει στο τέλος της. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο. Ιωάννη Ναλμπάντη, επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ, τόσο για την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης όσο και για το ερέθισμα που μου έδωσε για να ασχοληθώ με τον τομέα της Προστασίας & Διαχείρισης Υδατικών Πόρων. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την κα. Λήδα Στάμου, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, και την κα. Αντελίνα Σκοπελίτη, Διδάκτορα ΕΜΠ, για τη βοήθειά τους με το λογισμικό ArcGIS σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και τον κο. Ιωάννη Παναγόπουλο, μεταδιδάκτορα ερευνητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη βοήθειά του με το λογισμικό SWAT. Ακόμα, οφείλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ για τη διάθεση χώρου και μέσων ώστε να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Κλείνοντας θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους, συμφοιτητές αλλά και τους γονείς μου για τη στήριξή τους από την αρχή των σπουδών μου έως σήμερα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τις επιπτώσεις της εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του Ενιπέα στη θέση του μελετηθέντος φράγματος Παλαιοδερλίου με τη βοήθεια του υδρολογικού μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Το SWAT είναι ένα κατανεμημένο μοντέλο βροχόπτωσης – απορροής φυσικής βάσης που μπορεί να προσομοιώσει τον υδρολογικό κύκλο της λεκάνης. Για να λειτουργήσει το μοντέλο χρειάζονται να εισαχθούν το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, οι χρήσεις γης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι κλίσεις και τα μετεωρολογικά δεδομένα σε ημερήσιο ή μηνιαίο χρονικό βήμα. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε προσομοιώνοντας σε αρκετά καλό βαθμό τις μηνιαίες παροχές. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν τρία σενάρια πυρκαγιάς στη λεκάνη με βάση το ανάγλυφο και τις χρήσεις γης της περιοχής αλλά και με βάση τα χαρακτηριστικά των πυρκαγιών που παρατηρούνται στον Ελλαδικό χώρο, ώστε τα σενάρια να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των τριών σεναρίων της πυρκαγιάς, η παράμετρος που μεταβλήθηκε στις εκτάσεις που γίνεται η παραδοχή πως καίγονται είναι ο αριθμός καμπύλης (CN). Η εργασία έδειξε τις επιπτώσεις που έχει η πυρκαγιά στην μέση απορροή για όλα τα έτη που γίνεται η μελέτη θεωρούμενη σε μηνιαία, τριμηνιαία εξαμηνιαία και ετήσια βάση. Αυτό εξετάστηκε τόσο για την συνολική απορροής της λεκάνης όσο και για την κάθε συνιστώσα της απορροής ξεχωριστά. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια συσχέτισης της έκτασης της λεκάνης που καίγεται με τη μεταβολή του συνολικού όγκου της απορροής για τα 12 έτη που μελετούνται.

Abstract

This study examines the effects of fire on the water balance of the watershed of the Enipeas River basin at the studied dam named Palaioderli with the aid of a water balance model known as SWAT (Soil and Water Assessment Tool) SWAT is an integrated physics-based rainfall-runoff model that allows to simulate basic hydrological processes in a watershed. The model requires a Digital Elevation Model (DEM), land use maps, maps with soils and ground slopes, and meteorological information on a monthly or daily time step. The SWAT model was calibrated after many simulations on the basis of the observed monthly runoff series. Three scenarios of forest fire were constructed based on known features of fires in Greece, for similar topography and land uses, so that these be realistic. During the three scenario simulations, the only parameter that changed was the curve number (CN). The study showed the effects of fires on the mean runoff on the basis of monthly, three-month, six-month and annual scale. This is done for the total runoff as well as for each one of the runoff components. Last, an effort was made to associate the burnt area with the variation of the total runoff based on simulations for the twelve-year data set that was available.

Κατάλογος συμβόλων

$S_t, S_{t+\Delta t}$	Το απόθεμα εδαφικής υγρασίας αντίστοιχα στους χρόνους t και $t+\Delta t$
P_t	Η χωρικά μέση βροχόπτωση στο διάστημα $[t, t+\Delta t]$
E_t	Η χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή στο διάστημα $[t, t+\Delta t]$
QE_t	Η απορροή στο στόμιο εξόδου της λεκάνης στο διάστημα $[t, t+\Delta t]$
$Q_{εκτ}$	Οι μηνιαίες εκτιμημένες παροχές
$Q_{πα}$	Οι μηνιαίες παρατηρημένες παροχές
$\bar{Q}_{πα}$	Ο μέσος όρος των παρατηρημένων μηνιαίων παροχών
NSE	Ο συντελεστής NASH
SW_t	Το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό
t	Χρονική στιγμή
R	Η ημερήσια απορροή
ET	Η εξατμισοδιαπνοή
P	Η διήθηση
QR	Η υπόγεια ροή
Q	Η ημερήσια απορροή
R	Η ημερήσια βροχόπτωση
s	Μια παράμετρος κατακράτησης
CN_2	Η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στην κλίση του εδάφους
CN_3	Η τιμή του CN που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες
S	Η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής
s_1	Η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN_1
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/ημέρα
SW ₀	Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρας σε mm
TT	Ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα στο στρώμα i σε ώρες
H_i	Η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/h
FC _{i}	Η υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαράνσεως

SC_i	Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το i σε mm/h
β_i	Η παράμετρος που προκαλεί το Hi να πλησιάσει το μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i
O_{i-1}	Η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/d (R-Q) για το ανώτερο στρώμα
TT_{ci}	Ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από ρωγμή σε ώρες
S	Είναι ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα)
q_{lat}	Η υποδερμική ροή σε m^3/h
i	Ο ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h
L	Το μήκος της μισγάγγειας σε m
v	Η ταχύτητα ροής στην έξοδο της λεκάνης
w	Το πλάτος της μισγάγγειας
K_s	Είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
L_s	Το μήκος της κορεσμένης κλιτύος σε m
V_{sa}	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
$perc_{gw}$	Το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα
WU_{SA}	Η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα
K_d	Η υδραυλική αγωγιμότητα
L	Το μήκος πεδίου ροής
h	Το ύψος του νερού
R_c	Η τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα
μ	Η ειδική απόδοση
ET_{act}	Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ
β_r	Ο συντελεστής $revar$
$revar_{st}$	Η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος
E_p	Ο προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/d.
E_s	Ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/d
EA	Ο δείκτης εδάφους, ο οποίος δίνεται 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/d
b_{mlt}	Ο παράγοντας τήξης του χιονιού για μια μέρα σε mm/d- °C
sno _{cov}	Το ποσοστό HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι
T_{snow}	Η θερμοκρασία του χιονιού τη συγκεκριμένη μέρα σε °C
T_{mx}	Η μέγιστη θερμοκρασία της συγκεκριμένης μέρας σε °C
T_{mlt}	Η θερμοκρασία πάνω από την οποία το χιόνι λιώνει σε °C
PW	Η πιθανότητα μιας υγρής μέρας
NWD	Ο αριθμός των υγρών ημερών
ND	Οι ημέρες που έχει ο μήνας
β	Ένας συντελεστής που κυμαίνεται από 0.6 έως 0.9
R_{day}	Η ποσότητας βροχής για μία μέρα σε mm
μ_{mon}	Η μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα σε mm
σ_{mon}	Η τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm
SND _{day}	Η κανονική τυπική απόκλιση για την εξεταζόμενη ημέρα
g_{mon}	Ο συντελεστής ασυμμετρίας
SDRA	Η τυπική απόκλιση της ημερήσιας ακτινοβολίας σε MJ/m ²
RAMX	Η μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα
RA	Η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα k.
μ_{10m}	Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s
μ_{wnd}_{mon}	Η μέση μηνιαία τιμή του ανέμου
rnd ₁	Ένα τυχαίο νούμερο από 0 έως 1
R_{hWmon}	Η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα
R_{hDmon}	Η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις ξηρές μέρες του μήνα
b_H	Ο παράγοντας κλίμακας που παίρνει τιμές από 0 έως 1
$T_{soil}(z,dn)$	Η μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z σε mm και την dn ημέρα του μήνα
$\overline{T_{AA}}$	Η μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους σε °C
A_{surf}	Το ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C
dd	Το καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm
ω_{tmp}	Η γωνιακή συχνότητα
K_c	Ο δείκτης CRAVELIUS

P	Η περίμετρος της λεκάνης
A	Το εμβαδόν της λεκάνης
Z_m	Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
Z_i	Το μέσο υψόμετρο κάθε υποπεριοχής
A_i	Το εμβαδόν κάθε υποπεριοχής
X_i	Το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i
i	Η τάξη του νεότερου στοιχείου
α	Ο συντελεστής αναγωγής
λ_1	Η κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
λ_2	Η κλίση του παλαιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
P_1, P_2, P_3	Τιμές βροχόπτωσης στους σταθμούς 1,2,3
N_1, N_2, N_3	Η κανονική μέση βροχόπτωση στους σταθμούς 1,2,3
N_x	Η κανονική βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού
P_0	Μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης
P_i	Βροχομετρικό ύψος σταθμών
$\bar{P}_{i-1,i}$	Το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών
β	Η βροχοβαθμίδα
P_0	Η τιμή του ύψους βροχής στην υψομετρική αναγωγή
z_m	Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
\bar{z}	Ο σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη
P	Η βροχόπτωση
I	Η άρδευση
ΔSW	Η αλλαγή του περιεχομένου νερού της εδαφικής κατανομής
RO	Η επιφανειακή απορροή
D	Η βαθιά διήθηση
ET	Η εξατμισοδιαπνοή
E	Η εξάτμιση σε mm/ημέρα
Δ	Η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C
T_a	Η θερμοκρασία του αέρα σε °C
R	Η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής
R_A	Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας σε mm/ημέρα

n	Οι ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας
N	Η μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια (υπολογίζεται από πίνακες)
σ	Η σταθερά Stephan-Boltzmann ($2.01 \cdot 10^{-9}$ mm/ημέρα)
T_{AK}	Η θερμοκρασία του αέρα σε °K
r	Ο αριθμός albedo
e	Η τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}
E_a	Η παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών
e_w	Η τάση των κορεσμένων υδρατμών σε mmHg
e	Η τάση των υδρατμών
RH	Η σχετική υγρασία
γ	Η ψυχομετρική σταθερά ($\gamma=0,485$ mmHg/°C)
f	Ο συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας
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 υπό 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
γ	Η ψυχομετρική σταθερά
r_a	Η αεροδυναμική αντίσταση
r_c	Η αντίσταση της καλλιέργειας
E_{rc}	Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d
S_o	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
C	Ο συντελεστής απορροής
h_R	Ο όγκος της άμεσης απορροής εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος
h_T	Ο όγκος βροχόπτωσης εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η Ελλάδα είναι μια χώρα η οποία αντιμετωπίζει κάθε χρόνο την καταστροφική μανία των πυρκαγιών, οι οποίες συχνά είναι ιδιαίτερα καταστροφικές τόσο για το φυσικό περιβάλλον όσο και για το ανθρωπογενές, ενώ δεν είναι λίγες οι φορές που προκαλούν και θύματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επεξεργάζεται τις επιπτώσεις που θα είχε μια πυρκαγιά στη λεκάνη απορροής του Ενιπέα Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στην απορροή του ποταμού αυτού. Είναι γνωστό άλλωστε πως μετά από μια πυρκαγιά ο αριθμός καμπύλης (CN) των διαφόρων χρήσεων γης αυξάνεται, οπότε αυξάνεται και η απορροή. Γι' αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο SWAT προκειμένου να προσομοιώσει τις υδρολογικές διεργασίες που συντελούνται στη λεκάνη πριν και μετά την πυρκαγιά.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει αρθρωθεί σε 8 κεφάλαια, μέσα στα οποία περιγράφονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και, στο τέλος, επεξηγούνται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα η εργασία περιλαμβάνει τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1^ο

Παρουσιάζεται η γενική τοποθέτηση του προβλήματος γύρω από την οποία θα γίνει η μελέτη.

Κεφάλαιο 2^ο

Δίνεται ο ορισμός για τα μοντέλα βροχόπτωσης απορροής και αναφέρεται ο τρόπος ταξινόμησης και βαθμονόμησής τους. Επίσης αναφέρονται ενδεικτικά μοντέλα από τη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 3^ο

Γίνεται περιγραφή του μοντέλου SWAT και περιγράφονται οι υδρολογικές και οι μετεωρολογικές διεργασίες που αυτό προσομοιώνει.

Κεφάλαιο 4^ο

Περιγράφεται η μεθοδολογία για την προετοιμασία των γεωγραφικών δεδομένων με χρήση του ArcGIS, των βροχομετρικών δεδομένων, των δεδομένων της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της απορροής.

Κεφάλαιο 5^ο

Παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του Ενιπέα στη θέση του φράγματος Παλαιοδερλί.

Κεφάλαιο 6^ο

Γίνεται περιγραφή του τρόπου βαθμονόμησης του SWAT και παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

Κεφάλαιο 7°

Κατασκευάζονται τα σενάρια της πυρκαγιάς και παρουσιάζονται οι επιδράσεις τους στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.

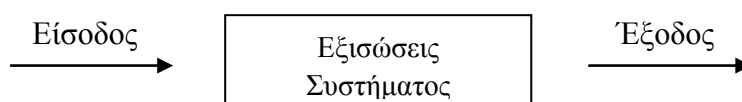
Κεφάλαιο 8°

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής γίνεται σύνοψη της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και σχολιάζονται τα προβλήματα που προέκυψαν και ο τρόπος που αυτά αντιμετωπίστηκαν, ενώ παρουσιάζονται και τα συμπεράσματα.

2 Μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής

2.1 Ορισμός μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής

Το υδρολογικό μοντέλο ορίζεται ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή. Σχηματικά, ένα υδρολογικό μοντέλο αναπαριστάται ως:



Σχήμα 2.1: Γενική αναπαράσταση μοντέλου

Τα δεδομένα εισόδου αποτελούν οι μετεωρολογικές μεταβλητές, δηλαδή τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία, η ταχύτητα ανέμου κλπ.. Τα μοντέλα περιλαμβάνουν το σύνολο των μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή. Αυτές οι φυσικές διαδικασίες είναι η κατακράτηση, η εξατμισοδιαπνοή, η διήθηση, η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή, και η υπόγεια απορροή. Τα τελευταία χρόνια, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διαδικασιών. Τέλος, η επίλυση του μοντέλου δίνει την απορροή και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού (Τσακίρης, 2005).

2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων

Τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των εξισώσεων, τη χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών, το χειρισμό της αβεβαιότητας και τη λειτουργία σε σχέση με το χρόνο.

Τα μοντέλα που ταξινομούνται με κριτήριο τη χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών χωρίζονται σε αδρομερή (lumped) και κατανεμημένα (distributed). Στα μεν αδρομερή μοντέλα, η λεκάνη είναι μια χωρική ενότητα με ενιαία υδρολογικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά, στα δε κατανεμημένα μοντέλα, η λεκάνη διασπάται σε τμήματα με διαφορετικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά.

Ανάλογα με το είδος των εξισώσεων, τα μοντέλα χωρίζονται σε μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box), σε εννοιολογικά μοντέλα (conceptual) και σε μοντέλα φυσικής βάσης (physics-based). Τα μοντέλα «μαύρου κουτιού» περιγράφονται με σχέσεις της θεωρίας της ανάλυσης συστημάτων, χωρίς θεώρηση φυσικών νόμων ούτε και εμπειρικών σχέσεων. Τα εννοιολογικά μοντέλα περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο. Τέλος, τα μοντέλα φυσικής βάσης περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις που αναπαριστούν φυσικούς νόμους.

Ένα ακόμα κριτήριο ταξινόμησης μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής είναι ο χειρισμός της αβεβαιότητας. Για αυτό το κριτήριο υπάρχουν δύο κατηγορίες, τα αιτιοκρατικά μοντέλα (deterministic), όπου τα υδρολογικά μεγέθη έχουν σταθερές τιμές χωρίς βεβαιότητα, και τα στοχαστικά μοντέλα (stochastic), όπου ορισμένα μόνο εκ των υδρολογικών μεγεθών έχουν βεβαιότητα.

Το τελευταίο κριτήριο ταξινόμησης μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής έχει να κάνει με τη λειτουργία σε σχέση με το χρόνο. Υπάρχουν τα μοντέλα υδρολογικού γεγονότος (event-based) και τα μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time). Τα πρώτα μοντέλα λειτουργούν ανά πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγουν μόνον τις κύριες φυσικές διεργασίες των πλημμυρών ενώ τα δεύτερα μοντέλα αναπαριστούν την πλήρη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών και σε υγρές και σε ξηρές περιόδους (Ναλμπάντης, 2007).

2.3 Αναλυτική παρουσίαση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής

2.3.1 Μοντέλου Απλού Υδατικού Ισοζυγίου

Το εννοιολογικό μοντέλο του απλού υδατικού ισοζυγίου (Thornthwaite, 1948, Thornthwaite and Mather, 1955) αποτέλεσε τη βάση για πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες. Συνεισφορά στην βελτίωση του μοντέλου είχαν οι Giakoumakis et al. (1991), οι οποίοι πρόσθεσαν και μια δεύτερη παράμετρο για τη διήθηση σε βαθείς υδροφορείς και οι Rozos et al. (2004) οι οποίοι πρόσθεσαν περισσότερους από μία παραμέτρους.

Για τη περιγραφή του μοντέλου θεωρούμε μια απλή λεκάνη απορροής, η οποία δεν παρουσιάζει σημαντική υπόγεια υδροφορία, ούτε μεγάλα υδάτινα σώματα όπως λίμνες και έλη, αλλά ούτε και σοβαρές ανθρωπογενείς επεμβάσεις, όπως ταμιευτήρες. Επίσης, θεωρούμε έναν όγκο αναφοράς που περιλαμβάνει όλο τον όγκο του εδάφους της λεκάνης μαζί με όλο το απόθεμα εδαφικής υγρασίας S_t σε κάθε χρονική στιγμή t . Το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης για το χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$ διάρκειας Δt , μεταξύ των χρονικών στιγμών t και $t + \Delta t$, γράφεται:

$$S_{t+\Delta t} - S_t = P_t - E_t - QE_t \quad (2.1)$$

όπου,

$S_t, S_{t+\Delta t}$: το απόθεμα εδαφικής υγρασίας αντίστοιχα στους χρόνους t και $t + \Delta t$

P_t : η χωρικά μέση βροχόπτωση στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$

E_t : η χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$

QE_t : η απορροή στο στόμιο εξόδου της λεκάνης στο διάστημα $[t, t + \Delta t]$

Να σημειωθεί ότι όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε όρους ύψους νερού (mm) στο σύνολο της έκτασης της εξεταζόμενης λεκάνης (Ναλμπάντης, 2007)

2.3.2 Μοντέλο SWAT

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) αναπτύχθηκε από το Dr. Jeff Arnold για το Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA, United States Department of Agriculture) με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του υδρολογικού κύκλου στο νερό, στα φερτά και στη συγκέντρωση χημικών ουσιών.

Για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο απαιτούνται τα εξής στοιχεία:

- Χαρτογραφικά στοιχεία:

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
- Οι χρήσεις γης
- Οι τύποι του εδάφους που εμφανίζονται στη λεκάνη με βάση την υδροπερατότητα
- Οι θέσεις των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιούνται

Επίσης, χρειάζεται ο υπολογισμός μιας σειράς παραμέτρων που θα αξιοποιηθούν από το πρόγραμμα για την προσομοίωση του μοντέλου στη λεκάνη απορροής. Αυτές είναι:

Προσομοίωση κλίματος:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Θερμοκρασία αέρα
- Θερμοκρασία νερού
- Θερμοκρασία εδάφους
- Ταχύτητα ανέμου
- Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- Τήξη χιονιού
- Υδρατμοί
- Σχετική υγρασία αέρα
- Καιρικές συνθήκες
- Κλιματική αλλαγή

Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών:

- Παραγωγή απορροής (μέθοδοι SCS, Green and Ampt)
- Εξατμισοδιαπνοή (μέθοδοι Penman-Monteith, Priestley-Taylor και Hargreaves)
- Πραγματική εξατμισοδιαπνοή
- Διακίνηση του νερού στο έδαφος (ακόρεστη ροή)
- Διακίνηση του νερού σε υπόγειους υδροφορείς (κορεσμένη ροή)

Προσομοίωση παραγωγής θρεπτικών

Προσομοίωση διακίνησης φερτών υλικών

Προσομοίωση ανάπτυξης καλλιεργειών

Προσομοίωση ανάπτυξης καλλιεργητικών μεθόδων και πρακτικών

Προσομοίωση διακίνησης νερού και ρύπων σε υδάτινα σώματα (Αθανασιά, 2010)

Ως μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU: Hydrologic Response Units) ορίζονται μικρές υδρολογικές ενότητες (μέσα στις υπολεκάνες μιας λεκάνης) που παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης, υδρολογικού τύπου εδάφους και κλίσεων. Η ξεχωριστή αντιμετώπιση κάθε μονάδας και η σύνθεσή τους στο τελικό αποτέλεσμα, όσον αφορά τον υδρολογικό κύκλο, δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να πετύχει μια λεπτομερή αναπαράσταση των διεργασιών στη λεκάνη (Ναλμπάντης και Τσακίρης, 2006).

2.3.3 Βαθμονόμηση μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής

Ως μέτρο καλής προσαρμογής ενός μοντέλου χρησιμοποιείται ευρύτερα το κριτήριο επίδοσης Nash and Sutcliffe που αναφέρεται και ως συντελεστής Nash. Για το εξεταζόμενο πρόβλημα βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αυτό, το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{παρ},i} - Q_{\text{εκτ},i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{παρ},i} - \bar{Q}_{\text{παρ}})^2} \quad (2.2)$$

όπου:

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

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

$\bar{Q}_{\text{παρ}}$: ο μέσος όρος των παρατηρημένων μηνιαίων παροχών

NSE : το κριτήριο επίδοσης Nash and Sutcliffe ($-\infty < NSE \leq 1$)

N : ο αριθμός παρατηρήσεων

Ο ρόλος του κριτηρίου επίδοσης είναι να υπολογίζει την απόκλιση των δύο χρονοσειρών, της χρονοσειράς για την οποία υπάρχουν μετρημένα δεδομένα και της χρονοσειράς όπου οι μηνιαίες απορροές προκύπτουν από το μοντέλο SWAT. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου, αλλάζουν οι ρυθμίσεις και κάποιες παράμετροι στο μοντέλο με στόχο το κριτήριο να πάρει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή και να προσεγγίσει τη μονάδα.

Είναι προφανές πως η καλύτερη τιμή για το κριτήριο, η οποία δείχνει την τέλεια προσομοίωση, είναι η μονάδα. Σε αυτή την περίπτωση, οι εκτιμημένες παροχές θα ισούνται με τις παρατηρημένες. Στην περίπτωση που κάποιος έθετε ως εκτιμημένες παροχές το μέσο όρο των παρατηρημένων, ο συντελεστής NASH θα μηδενιζόταν. Αρνητική τιμή του δείκτη σημαίνει ότι η συμπεριφορά του μοντέλου είναι χειρότερη από την απλή θεώρηση της μέσης τιμής της μετρημένης απορροής οπότε σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο δεν είναι αποδεκτό. Αντίθετα, καλή προσαρμογή του μοντέλου σημαίνει υψηλή τιμή του συντελεστή που τείνει στη μονάδα.

Εκτός του NSE, έχουν προταθεί και άλλα μέτρα καλής προσαρμογής μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής. Ενδεικτικά, αναφέρονται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, η μέση τιμή των απόλυτων τιμών του σφάλματος, η μέση τιμή των απόλυτων τιμών του σφάλματος και το μέγιστο απόλυτο σφάλμα.

2.3.4 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Οι κλιματικές αλλαγές, σε συνδυασμό με τα ακραία καιρικά φαινόμενα που πλήττουν όλο και συχνότερα διάφορες περιοχές του πλανήτη, έχουν κάνει επιτακτική ανάγκη τη διαρκή καταγραφή και διαχείριση κρίσιμων καταστάσεων, όπως οι πλημμύρες ή οι ξηρασίες, σε πραγματικό χρόνο. Η μελέτη των επιδράσεων στο περιβάλλον μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση δυναμικών μοντέλων φυσικής βάσης, τα οποία αναπαριστούν τις φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες που υπεισέρχονται.

Η διαθεσιμότητα ψηφιακών χαρτών και δορυφορικών εικόνων έχουν καταστήσει δυνατή τη δημιουργία μεγάλων τραπεζών δεδομένων οι οποίες περιλαμβάνουν πάρα πολλά φυσικά και μετεωρολογικά δεδομένα. Επίσης, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνουν τη

δυνατότητα για επίλυση διαφορικών εξισώσεων σε κανάβους με πολύ υψηλή διακριτικότητα. Τα γεγονότα αυτά έχουν καταστήσει δυνατή και ενδιαφέρουσα τη χρήση κατανεμημένων (distributed) μοντέλων φυσικής βάσης.

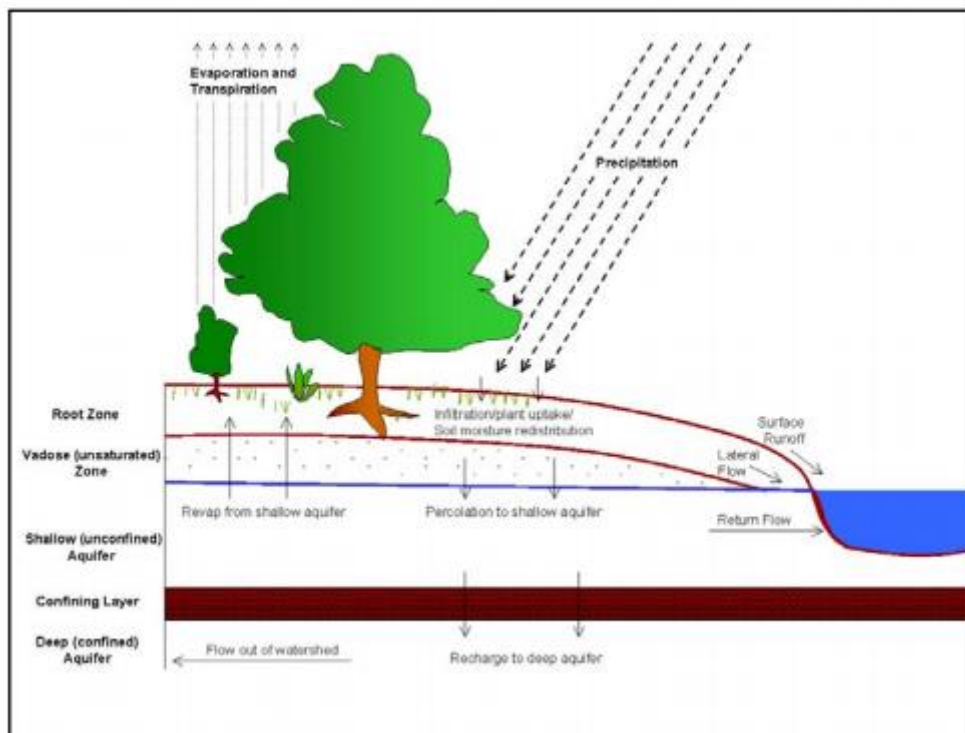
Τέλος, η ανάγκη για χρήση περισσότερο ή λιγότερο αδρομερών μοντέλων σε μελέτες υδάτινων πόρων έχουν στρέψει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε προβλήματα που συναρτώνται με την αδρομεροποίηση, δηλαδή την ολοκλήρωση φαινομένων και παραμέτρων στο χώρο και το χρόνο (Beven, 1975) με σκοπό την δημιουργία απλοποιημένων μοντέλων σε κλίμακα υπολεκάνης. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση συστημάτων υδρολογικής πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο, με πάρα πολύ μικρό κόστος.

3 Το μοντέλο SWAT

3.1 Γενικά

Η ανάπτυξη του SWAT, έχει ως στόχο τη κατασκευή ενός μοντέλου, που να προβλέπει με βάση υδρομετεωρολογικά στοιχεία την επίδραση της διαχείρισης της γης στο νερό, τα φερτά και τα αγροτικά χημικά, σε μεγάλες λεκάνες απορροής. Για την ικανοποίηση αυτού του στόχου, το μοντέλο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- α) έχει φυσική βάση
- β) χρησιμοποιεί ευρέως διαθέσιμα δεδομένα
- γ) είναι υπολογιστικά οικονομικό ώστε να «τρέχει» για μεγάλες λεκάνες σε λογικό χρόνο
- δ) είναι μοντέλο συνεχούς χρόνου, ικανό να προσομοιώνει μακρές περιόδους, για τον υπολογισμό των επιπτώσεων από αλλαγές διαχείρισης (Neitsch et al., 1999).



Σχήμα 3.1: Ο υδρολογικός κύκλος κατά το μοντέλο SWAT (Neitsch et al., 2005)

3.2 Ο υδρολογικός κύκλος

Το SWAT προσομοιώνει τα κατακρημνίσματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής, ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής. Ταυτόχρονα, έχει τη δυνατότητα παραγωγής συνθετικών κατακρημνισμάτων, αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία γι' αυτά, χρησιμοποιώντας μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης. Αυτά, εμφανίζονται με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης στο έδαφος. Το χιόνι τήκεται, όταν η εδαφική θερμοκρασία το επιτρέπει. Η δε

συμπεριφορά του λιωμένου χιονιού, είναι αντίστοιχη με αυτή της βροχόπτωσης (Arnold et al., 1999).

Το νερό της βροχής, είτε απορρέει επιφανειακά, είτε διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που θα απορρεύσει ρυθμίζεται από το συντελεστή απορροής, ανάλογα με τον τύπο εδάφους και τη χρήση γης. Εκτιμάται με μια τροποποιημένη μέθοδο του αριθμού καμπύλης CN κατά SCS. Το νερό που απορρέει επιφανειακά, καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες και αποτελεί τον πλημμυρικό όγκο του θεωρούμενου επεισοδίου. Το SWAT ταυτόχρονα, περιλαμβάνει σχέσεις για τον υπολογισμό της απορροής από παγωμένα εδάφη.

Το νερό που διηθείται ακολουθεί μια οριζόντια ή κατακόρυφη διαδρομή μέσα στο έδαφος. Το μοντέλο χωρίζει το έδαφος σε τρεις κύριες στρώσεις:

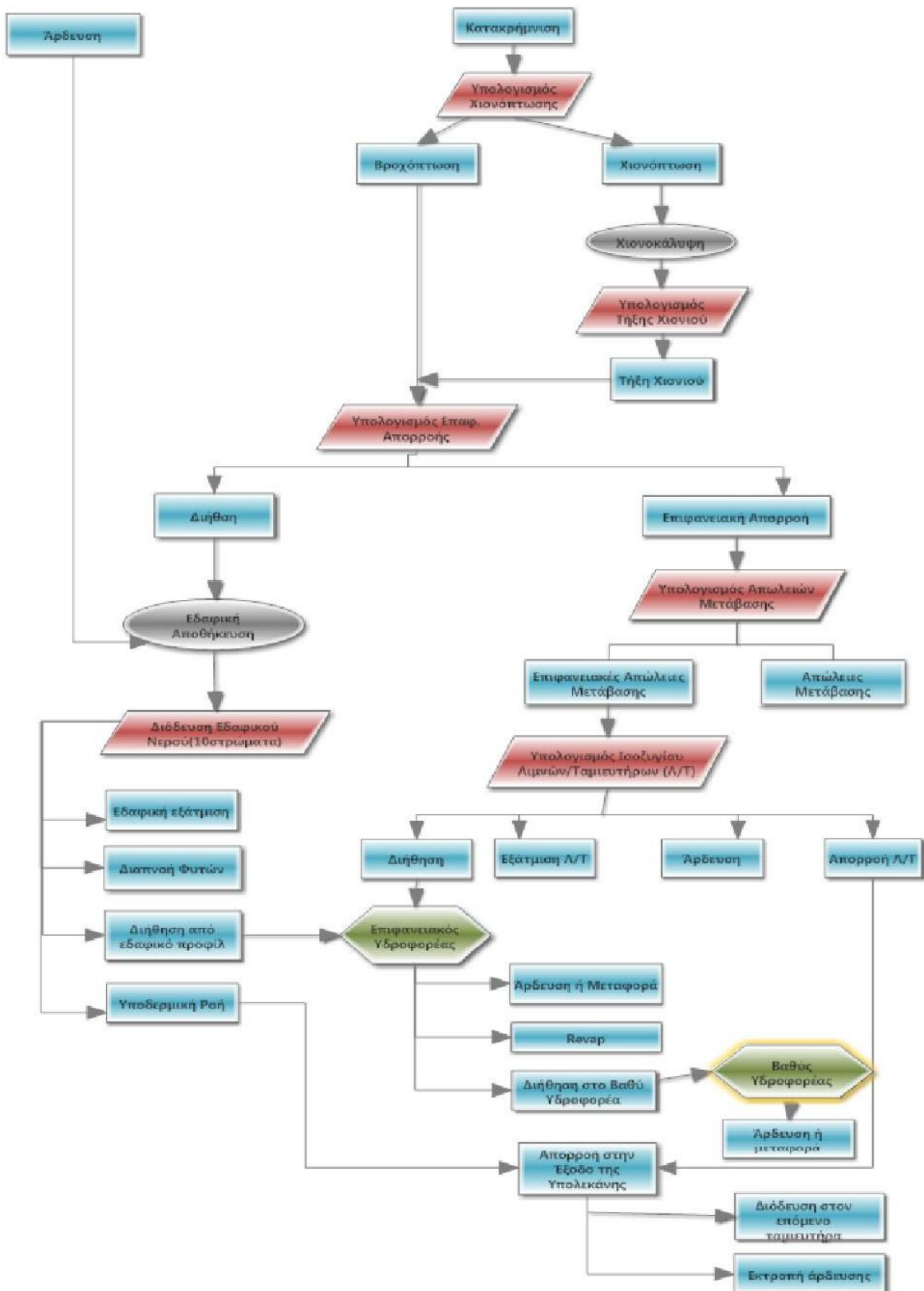
1. Το εδαφικό προφίλ (root zone & vadose unsaturated zone)
2. Τον επιφανειακό υδροφόρα (shallow unconfined aquifer)
3. Το βαθύ υδροφόρα (deep confined aquifer)

Ένα μέρος από το νερό του εδαφικού προφίλ περνάει σε αέρια φάση, είτε με την εδαφική εξάτμιση, είτε έμμεσα, με τη δέσμευσή του από τα φυτά και τη διαπνοή των φυλλωμάτων τους. Προκειμένου να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή, το μοντέλο ενσωματώνει τρεις διαφορετικές μεθόδους, ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα.. Ένα μέρος του νερού που υπάρχει στο εδαφικό προφίλ, συμβάλλει στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης με την υποδερμική ροή (lateral flow), ενώ ένα άλλο κατεισδύει στον επιφανειακό υδροφόρα. Η κατακόρυφη ροή λαμβάνει μέρος όταν η υδατοϊκανότητα μιας εδαφικής στρώσης ξεπερνιέται και η κάτω στρώση δεν είναι κορεσμένη.

Πέρα από το εδαφικό προφίλ, ο επιφανειακός υδροφόρας τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορεύματα και ταμειυτήρες. Η αποφόρτισή του γίνεται είτε με την υπόγεια ροή (return flow), δηλαδή με οριζόντια κίνηση του νερού, που τροφοδοτεί τους υδάτινους αποδέκτες, είτε με τη κατείσδυσή του στο βαθύ υδροφόρα. Την ίδια στιγμή, ένα μέρος του νερού που βρίσκεται στον επιφανειακό υδροφόρα, κινείται κάτω από ορισμένες συνθήκες προς την επιφάνεια και τροφοδοτεί το εδαφικό στρώμα, με μια διαδικασία που το μοντέλο ονομάζει Renap. Το μοντέλο θεωρεί πως το νερό που φτάνει στο βαθύ υδροφόρα χάνεται εκτός λεκάνης απορροής.

Κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων διόδευσης του νερού, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απώλειες μετάβασης και απορρόφησης, οι οποίες μειώνουν τους όγκους απορροής και τις οποίες αφαιρεί. Για την εκτίμηση αυτών των απωλειών το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lane (USDA, 1983). Βάση αυτής της μεθόδου, οι απώλειες υπολογίζονται ως συνάρτηση του μήκους και πλάτους των καναλιών και της διάρκειας της ροής.

Παρακάτω παρατίθενται το λογικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μεγεθών του υδρολογικού κύκλου από το υδρολογικό μοντέλο SWAT.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής υδρολογικού κύκλου SWAT (Πηγή: Arnold et al., 1999).

3.3 Περιγραφή του μοντέλου SWAT

3.3.1 Υδρολογικές διαδικασίες

Το υδρολογικό μοντέλο SWAT στηρίζεται πάνω στην ακόλουθη εξίσωση υδατικού ισοζυγίου

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3.1)$$

όπου:

SW_t : το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό

t : ο χρόνος σε ημέρες

R : η ημερήσια απορροή

ET : η εξατμισοδιαπνοή

P : η διήθηση

QR : η υπόγεια ροή

Τα μεγέθη αυτά αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

Επιφανειακή απορροή

Παίρνοντας ως δεδομένο την ημερήσια βροχόπτωση, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει την επιφανειακή απορροή, με τη βοήθεια μιας τροποποιημένης μεθόδου των καμπυλών κατά SCS. Η τεχνική αυτή επιλέχθηκε γιατί παρουσιάζει μια σειρά από προτερήματα. Αναλυτικά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

α) Η αξιοπιστία της αλλά και η εφαρμογή της για πολλά χρόνια

β) Η υπολογιστική της επίδοση

γ) Η διαθεσιμότητα των δεδομένων εισόδου που απαιτεί

δ) Το γεγονός ότι συσχετίζει την απορροή με τον τύπο εδάφους, τη χρήση γης και τις πρακτικές διαχείρισης. Οι πρακτικές διαχείρισης σχετίζονται με δεδομένα για τη σπορά, το θερισμό και την άρδευση των καλλιεργειών, καθώς επίσης και με στοιχεία για την εφαρμογή θρεπτικών και φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες.

Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την επιφανειακή απορροή ως συνάρτηση της ημερήσιας βροχόπτωσης με τη χρήση των καμπυλών SCS:

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{R + 0.8s}, \quad R \geq 0.2s \quad (3.2)$$

$$R = 0, \quad R < 0.2s \quad (3.3)$$

όπου:

Q : η ημερήσια απορροή

R : η ημερήσια βροχόπτωση

s : μια παράμετρος κατακράτησης

Η παράμετρος s μεταβάλλεται από λεκάνη σε υπολεκάνη, καθώς μεταβάλλονται τα εδάφη, οι χρήσεις γης, η διαχείριση του εδάφους και οι κλίσεις, και ανάλογα με το χρόνο, λόγω της

μεταβολής της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό. Η παράμετρος s συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης CN, από την εξίσωση SCS (USDA-SCS, 1972)

$$s = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Να επισημανθεί πως όλα τα παραπάνω μεγέθη εκφράζονται σε mm. Επίσης, ο αριθμός CN, αναφέρεται σε συνθήκες υγρασίας 2 (CN₂) και μπορεί να ληφθεί εύκολα για κάθε περιοχή από το εγχειρίδιο υδρολογίας της SCS (USDA-SCS, 1972). Το συγκεκριμένο εγχειρίδιο λαμβάνει υπόψη τα εδάφη, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης. Όσον αφορά τον αριθμό CN₂, αυτός αναφέρεται σε κλίσεις εδάφους 5%, ενώ για την προσαρμογή του σε διαφορετικές κλίσεις χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$CN_{25} = 1/3(CN_3 - CN_2)[1 - 2\exp(-13.86S)] + CN_2 \quad (3.5)$$

όπου:

CN₂₅ : η τιμή του CN₂ προσαρμοσμένη στην κλίση του εδάφους

CN₃ : η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες

S : η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής

Ο αριθμός καμπύλης CN₁, που αναφέρεται σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες, συνδέεται με τους αριθμούς CN₂ και CN₃ με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.636(100 - CN_2)]} \quad (3.6)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0.000673(100 - CN_2)] \quad (3.7)$$

Το SWAT 2005 παρέχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την παράμετρο κατακράτησης s με δύο τρόπους. Η πρώτη και η αρχαιότερη μέθοδος υπολογίζει τη παράμετρο με βάση τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία, καθώς έχει παρατηρηθεί πως η αλλαγή της εδαφικής υγρασίας μεταβάλλει την τιμή της παραμέτρου. Η άλλη μέθοδος υπολογίζει τη παράμετρο με βάση την καθημερινή εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Η προσθήκη αυτή έγινε γιατί η πρώτη μέθοδος υπολόγιζε πολύ μεγάλη απορροή για ρηχά εδάφη.

Η εξίσωση που περιγράφει τη πρώτη μέθοδο είναι:

$$s = s_1 \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp[w_1 - w_2(SW)]} \right) \quad (3.8)$$

όπου:

s_1 : είναι η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN₁ από τη σχέση

$$s_1 = 25.4 \left(\frac{1000}{CN_1} - 10 \right) \quad (3.9)$$

SW : είναι το ποσοστό εδαφικής υγρασίας

w_1, w_2 : παράμετροι σχήματος

Για τη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή όταν η παράμετρος εξαρτάται από την εξατμισοδιαπνοή των φυτών, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$s = s_{prev} + ET_i \cdot \exp\left(\frac{-cncoeff - s_{prev}}{s_1} - R_i - Q_i\right) \quad (3.10)$$

Όπου s_{prev} είναι η παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας.

Το πρόγραμμα υπολογίζει την παράμετρο κατακράτησης ακόμα και για παγωμένα εδάφη με τον κατάλληλο τύπο.

Διήθηση

Το SWAT υπολογίζει τη ροή του νερού μέσα από κάθε στρώμα. Συγκεκριμένα, όταν ένα στρώμα εδάφους κορεστεί τότε το νερό διηθείται στο αμέσως επόμενο στρώμα εδάφους. Η ποσότητα του νερού που διηθείται από το υπερκείμενο κορεσμένο στρώμα προς τα κάτω υπολογίζεται από τη σχέση:

$$O_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (3.11)$$

όπου:

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

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

$$SW_i = SW_{oi} \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (3.12)$$

Συνεπώς με μία απλή αφαίρεση, του SW από το SW_o μπορεί να υπολογιστεί η διήθηση. Ο χρόνος διόδευσης TT , υπολογίζεται για κάθε εδαφικό στρώμα ξεχωριστά, από τη γραμμική εξίσωση αποθήκευσης:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{H_i} \quad (3.13)$$

όπου:

- H_i : η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/h
- FC_i : η υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαράνσεως

Να σημειωθεί πως η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i} \right)^{\beta_i} \quad (3.14)$$

όπου:

- SC_i : η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το i σε mm/h
- β_i : η παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάσει το μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i

Στην περίπτωση που η ροή γίνεται δια μέσου ρωγμών, αυτή υπολογίζεται με σχέσεις παρόμοιες με αυτές που περιγράφηκαν. Η ποσότητα του διηθήματος που προκαλείται από κίνηση μέσα από μια ρωγμή δίνεται από τη σχέση:

$$O_i = O_{i-1} \left[\exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_{ci}} \right) \right] \quad (3.15)$$

όπου:

O_{i-1} : η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/d (R-Q) για το ανώτερο στρώμα

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

Ενδιάμεση απορροή

Το μοντέλο κινηματικής αποθήκευσης που αναπτύχθηκε από τους Sloan et al. (1983), χρησιμοποιεί την εξίσωση συνέχειας της μάζας λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο το εδαφικό προφίλ ως όγκο ελέγχου. Η εξίσωση συνέχειας του συγκεκριμένου μοντέλου την οποία χρησιμοποιεί και το μοντέλο SWAT είναι η εξής:

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = iL - \frac{q_{lat1} - q_{lat2}}{2} \quad (3.16)$$

όπου:

S : είναι ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα)

t : ο χρόνος σε ώρες

q_{lat} : η υποδερμική ροή σε m^3/h

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

L : το μήκος της μισγάγγειας σε m

Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην αρχή και το τέλος του χρονικού βήματος.

Ο όγκος νερού που αποστραγγίζεται, ανανεώνεται καθημερινά στο μοντέλο της λεκάνης. Η υποδερμική ροή στην έξοδο της μισγάγγειας δίνεται από τη σχέση:

$$q_{lat} = H_o \cdot v \cdot w \quad (3.17)$$

όπου:

v : η ταχύτητα ροής στην έξοδο της λεκάνης

w : το πλάτος της μισγάγγειας

Η ταχύτητα στην έξοδο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v = K_s \cdot \sin(a) \quad (3.18)$$

όπου:

K_s : είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$q_{lat} = 0.024 \frac{2SK_s \sin(a)}{\Theta_d L} \quad (3.19)$$

όπου το q_{lat} μετριέται σε mm/ημέρα, το S σε m/ώρα, το Θ_d σε m/m και το L σε m. Στην περίπτωση που η κορεσμένη ζώνη υψωθεί πάνω από το τελευταίο εδαφικό στρώμα, τότε το νερό θα κινηθεί προς την ανώτερη στρώση. Η ποσότητα αυτή του νερού υπολογίζεται από τον τύπο:

$$q_{sat} = \frac{24K_s L_s}{L} \quad (3.20)$$

όπου:

L_s : το μήκος της κορεσμένης κλιτύος σε m

Υπόγεια απορροή

Προκειμένου να υπολογίσει το SWAT την υπόγεια απορροή, χωρίζει το έδαφος σε 4 όγκους ελέγχου, την επιφάνεια, το εδαφικό προφίλ του ριζοστρώματος, τον επιφανειακό και το βαθύ υδροφορέα. Επιπλέον, στην επιφανειακή απορροή συνεισφέρουν η υποδερμική ροή από το εδαφικό προφίλ και η υπόγεια απορροή από τον επιφανειακό υδροφορέα. Στη συνέχεια το διήθημα από το εδαφικό προφίλ τροφοδοτεί τον επιφανειακό υδροφορέα. Όταν πλέον το νερό διηθηθεί στο βαθύ υδροφορέα, τότε χάνεται από τη λεκάνη απορροής και δεν επιστρέφει. Το υδατικό ισοζύγιο για τον επιφανειακό υδροφορέα περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{sa_i} = V_{sa_{i-1}} + Rc - revar - q_{rf} - perc_{gw} - WU_{SA} \quad (3.21)$$

όπου:

V_{sa} : είναι η αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα

Rc : είναι η επαναφόρτιση

$revar$: είναι η ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ

q_{rf} : η υπόγεια ροή

$perc_{gw}$: το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα

WU_{SA} : η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα

i : η ημέρα

Η υπόγεια ροή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{rf} = \frac{8K_d}{L^2} h \quad (3.22)$$

όπου:

K_d : η υδραυλική αγωγιμότητα

L : το μήκος πεδίου ροής

h : το ύψος του νερού

Κάνοντας την παραδοχή πως ο επιφανειακός υδροφορέας τροφοδοτείται με διήθηση από το υδατόρευμα ή από το εδαφικό προφίλ, είτε με βροχοπτώσεις είτε με άρδευση, και αποφορτίζεται από την υπόγεια ροή στα υδατορεύματα, οι μεταβολές στη στάθμη του νερού μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{R_c - q}{0.8\mu} \quad (3.23)$$

όπου:

R_c : είναι η τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα

μ : είναι η ειδική απόδοση

Ο όρος $revar$ περιγράφει το νερό που ρέει από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ και χάνεται είτε με την εξάτμιση, είτε με την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Ο όγκος νερού δίνεται από τις εξισώσεις:

$$revar = \beta r ET_{act}, \quad \text{αν } revar > revar_{st} \quad (3.24)$$

$$revar = 0.0, \quad \text{αν } revar < revar_{st} \quad (3.25)$$

όπου:

ET_{act} : είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ

β_r : είναι ο συντελεστής $revar$

$revar_{st}$: είναι η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος

Εξατμισοδιαπνοή

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετοί τρόποι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Ωστόσο, το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί μόνο τρεις από αυτές τις μεθόδους, τη μέθοδο Penman-Monteith (Monteith, 1965), τη μέθοδο Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985) και τη μέθοδο Priestley-Taylor (1972). Οι διαφοροποιήσεις των παραπάνω μεθόδων οφείλονται στα δεδομένα που χρειάζεται το κάθε μοντέλο για να εκτιμήσει την εξατμισοδιαπνοή. Συγκεκριμένα, η μέθοδος Penman-Monteith χρειάζεται ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία. Η μέθοδος Hargreaves απαιτεί μόνο τη θερμοκρασία του αέρα, ενώ τέλος η μέθοδος Priestley-Taylor χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα.

Η εξάτμιση από εδάφη και η διαπνοή από φυτά υπολογίζεται ξεχωριστά από το μοντέλο. Η πραγματική εξάτμιση του εδαφικού νερού γίνεται με τη χρήση εκθετικών συναρτήσεων του εδαφικού βάθους και της περιεκτικότητας σε νερό. Η δυνητική εξάτμιση υπολογίζεται ως συνάρτηση της δυνητικής εξάτμισης και του δείκτη φυλλωμάτων (Leaf Area Index ή LAI). Η διαπνοή των φυτών προσομοιώνεται ως γραμμική συνάρτηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και του δείκτη φυλλωμάτων.

Εξάτμιση και διαπνοή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το υδρολογικό μοντέλο διαχωρίζει την εξάτμιση από τη διαπνοή χρησιμοποιώντας τα παρακάτω εξισώσεις:

$$E_p = \frac{(E_o)(LAI)}{3.0}, \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (3.26)$$

$$E_p = E_o, \quad LAI > 3.0 \quad (3.27)$$

όπου:

E_p : ο προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/d.

Προφανώς, όταν η εδαφική υγρασία είναι περιορισμένη, η διαπνοή ελαττώνεται. Ο υπολογισμός της δυνητικής εξάτμισης από το έδαφος, γίνεται αφού ληφθεί υπόψη το εδαφικό κάλυμμα ως εξής:

$$E_s = (E_o)(EA) \quad (3.28)$$

όπου:

E_s : ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/d

EA : ο δείκτης εδάφους, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$EA = \exp(-5.0 \times 10^{-5} CV) \quad (3.29)$$

όπου:

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

Το μοντέλο, υπολογίζει την πραγματική εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας, στη βάση των ανώτερων 0.2 μέτρων του εδάφους και της χιονοκάλυψης. Εφόσον υπάρχουν περισσότερο από 0.5 mm χιόνι, η λευκαύγεια παίρνει την τιμή 0.6 και ο δείκτης εδάφους γίνεται αυτομάτως 0.5. Το χιόνι συνεχίζει να εξατμίζεται με αυτό το ρυθμό έως ότου να εξαφανιστεί. Από τη στιγμή που όλο το χιόνι έχει εξατμιστεί, τότε αρχίζει η εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας.

Τέλος, δυνητική εξάτμιση σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τη χρήση του εδαφικού νερού από τα φυτά, όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$E_s^* = \min \left[E_s, \frac{(E_s)(E_o)}{E_s + E_p} \right] \quad (3.30)$$

Τήξη χιονιού

Η τήξη χιονιού καθορίζεται από τον άνεμο και από τη θερμοκρασία της ανώτερης στρώσης του χιονιού, δηλαδή όταν αυτή υπερβαίνει τους 0°C. Το SWAT υπολογίζει τη ποσότητα του τηγμένου χιονιού από τη σχέση:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} - T_{mx}}{2} - T_{mlt} \right] \quad (3.31)$$

όπου:

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

b_{mlt} : ο παράγοντας τήξης του χιονιού για μια μέρα σε mm/d- °C

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

T_{snow} : η θερμοκρασία του χιονιού τη συγκεκριμένη μέρα σε °C

T_{mx} : η μέγιστη θερμοκρασία της συγκεκριμένης μέρας σε °C

T_{mlt} : η θερμοκρασία πάνω από την οποία το χιόνι λιώνει σε °C

Ο παράγοντας τήξης του χιονιού σχετίζεται με τις εποχές του χρόνου και παίρνει τη μέγιστη τιμή το καλοκαίρι και την ελάχιστη το χειμώνα. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του παράγοντα τήξης είναι ο παρακάτω:

$$b_{mlt} = \frac{b_{mlt6} + b_{mlt12}}{2} + \frac{b_{mlt6} - b_{mlt12}}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{365} \cdot (d_n - 81) \right) \quad (3.32)$$

Ο παράγοντας b_{mlt6} αναφέρεται στην 21^η Ιουνίου και ο παράγοντας b_{mlt12} στην 21^η Δεκεμβρη ενώ το σύμβολο d_n αντιπροσωπεύει την ημέρα του έτους την οποία εξετάζουμε. Ο

παράγοντας τήξης στις αγροτικές περιοχές κυμαίνεται από 1.4-6.9 mm/d/°C (Huber and Dickinson, 1988), στις αστικές περιοχές η τιμή του παράγοντα είναι μεγαλύτερη (3.0-8.0) λόγω του κλίματος που δημιουργείται από τη ρύπανση και τα αυτοκίνητα (Bengston, 1981; Westerstrom, 1981).

3.3.2 Μετεωρολογικές διεργασίες

Το υδρολογικό μοντέλο SWAT δέχεται ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές με την ημερήσια βροχόπτωση, τη θερμοκρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση που αυτά τα δεδομένα υπάρχουν, τότε εισάγονται κατευθείαν στο πρόγραμμα, ενώ σε διαφορετική περίπτωση, τα δεδομένα αυτά μπορεί να τα προσομοιώσει το πρόγραμμα μόνο του, είτε για ολόκληρη τη λεκάνη είτε μόνο για κάποιες υπολεκάνες ξεχωριστά.

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί το SWAT για τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε ημερήσια βάση είναι μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης (Nicks, 1974). Η αλυσίδα Markov πρώτης τάξης χρησιμεύει στο καθορισμό εάν μια μέρα είναι ξηρή ή υγρή. Συγκεκριμένα, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός και στη συνέχεια συγκρίνεται με την πιθανότητα υγρής-ξηρής ημέρας. Αν ο αριθμός είναι μικρότερος ή ίσος με την πιθανότητα τότε εκείνη την ημέρα υπάρχουν κατακρημνίσματα. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες αυτές οι πιθανότητες, τότε χρησιμοποιείται ο μέσος μηνιαίος αριθμός υγρών ημερών. Η πιθανότητα μιας ημέρας να είναι υγρή μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$PW = \frac{NWD}{ND} \quad (3.33)$$

Όπου:

PW : η πιθανότητα μιας υγρής μέρας

NWD : ο αριθμός των υγρών ημερών

ND : οι ημέρες που έχει ο μήνας

Η πιθανότητα μιας υγρής μέρας μετά από ξηρή P(W|D) μπορεί να υπολογιστεί ως κλάσμα το PW ως εξής:

$$P(W|D) = \beta \cdot PW \quad (3.34)$$

όπου:

β : ένας συντελεστής που κυμαίνεται από 0.6-0.9

| : η δεσμευμένη πιθανότητα υγρής ημέρας υπό την προϋπόθεση ότι η προηγούμενη είναι ξηρή

Αντίστοιχα, η πιθανότητα μιας υγρής μέρας μετά από υγρή θα είναι:

$$P(W|W) = 1.0 - \beta + P(W|D) \quad (3.35)$$

Τέλος, ο υπολογισμός των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν μια υγρή μέρα έχει προταθεί από τον Nicks (1974) και βασίζεται σε μια κατανομή του Fiering (1967), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_{\text{day}} = \mu_{\text{mon}} + 2\sigma_{\text{mon}} \cdot \left(\frac{\left[\left(\text{SND}_{\text{day}} - \frac{g_{\text{mon}}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{\text{mon}}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{\text{mon}}} \right) \quad (3.36)$$

όπου:

- R_{day} : η ποσότητα βροχής για μία μέρα σε mm
 μ_{mon} : η μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα σε mm
 σ_{mon} : η τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm
 SND_{day} : η κανονική τυπική απόκλιση για την εξεταζόμενη ημέρα
 g_{mon} : ο συντελεστής ασυμμετρίας της ημερήσιας βροχόπτωσης

Θερμοκρασία αέρα και ηλιακή ακτινοβολία

Το SWAT, προκειμένου να υπολογίσει τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία, χρησιμοποιεί ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Richardson (1981). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, τα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας παράγονται από μια πολυπαραμετρική κανονική κατανομή.

Συγκεκριμένα, το μοντέλο της θερμοκρασίας απαιτεί ως δεδομένα εισόδου τα μηνιαία μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις. Στην περίπτωση που αυτές δεν είναι διαθέσιμες, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μακροπρόθεσμα παρατηρημένα μέγιστα και ελάχιστα της μηνιαίας θερμοκρασίας και το μοντέλο από μόνο του εκτιμά την τυπική απόκλιση ως 25% της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και μέσης τιμής κάθε μήνα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση.

$$\text{SDTMX}_s = 0.25(\overline{TE_{mx,k}} - \overline{T_{mx,k}}) \quad (3.37)$$

Για την ηλιακή ακτινοβολία ισχύει αντίστοιχα:

$$\text{SDRA}_k = 0.25(\text{RAMX}_k - \text{RA}_k) \quad (3.38)$$

όπου:

- SDRA : η τυπική απόκλιση της ημερήσιας ακτινοβολίας σε MJ/m²
 RAMX : η μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα
 RA : η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα k.

Το μοντέλο συσχετίζει τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία με τη βροχόπτωση για μια συγκεκριμένη μέρα, με τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία να τείνουν να είναι χαμηλότερες τις υγρές μέρες. Για να το πετύχει αυτό, το SWAT, διαθέτει εξισώσεις που ελαττώνουν την θερμοκρασία και την ακτινοβολία τις υγρές μέρες.

Ταχύτητα ανέμου

Στην περίπτωση που το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο Penman-Monteith για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, τότε χρειάζεται τη ταχύτητα του ανέμου. Η μέση ταχύτητα του ανέμου προσομοιώνεται από το πρόγραμμα με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης

$$\mu_{10m} = \mu_{wnd_{mon}} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (3.39)$$

όπου:

μ_{10m} : η μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s

$\mu_{wnd_{mon}}$: η μέση μηνιαία τιμή του ανέμου

rnd_1 : ένα τυχαίο νούμερο από 0-1

Σχετική υγρασία

Το SWAT για να υπολογίσει τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία, χρησιμοποιεί την αντίστοιχη μηνιαία, λαμβάνοντας υπόψη, όπως και πριν, τις υγρές και τις ξηρές μέρες. Η εξίσωση που χρησιμοποιεί είναι:

$$R_{hWmon} = R_{hDmon} + b_H \cdot (1 - R_{hDmon}) \quad (3.40)$$

όπου:

R_{hWmon} : η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα

R_{hDmon} : η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις ξηρές μέρες του μήνα

b_H : ο παράγοντας κλίμακας που παίρνει τιμές από 0 έως 1

Η συνήθης τιμή του παράγοντα κλίμακας είναι 0.9.

Θερμοκρασία εδάφους

Η βασική εξίσωση της θερμοκρασίας του εδάφους αναπτύχθηκε από τους Carslaw and Jaeger (1959) και αναφέρεται στη μέση θερμοκρασία του μέσου του εδαφικού στρώματος. Η εξίσωση που περιγράφει αυτή τη σχέση είναι:

$$T_{soil}(z, d_n) = \overline{T_{AA}} + A_{surf} \exp\left(\frac{-z}{dd}\right) \sin\left(\omega_{tmp} d_n - \frac{z}{dd}\right) \quad (3.41)$$

όπου:

$T_{soil}(z, d_n)$: η μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z σε mm και την d_n ημέρα του μήνα

$\overline{T_{AA}}$: η μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους σε °C

A_{surf} : το ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C

dd : το καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm

ω_{tmp} : η γωνιακή συχνότητα

Για $z = 0$, η εξίσωση δίνει τιμές που αντιστοιχούν στην θερμοκρασία του αέρα ενώ για $z \rightarrow \infty$ η θερμοκρασία παίρνει τιμές ίσες με αυτές του αέρα για υγρές ημέρες. Για της ξηρές προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές.

Όσο για την εδαφική υγρασία, ο υπολογισμός της γίνεται από το πρόγραμμα αφού ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η εδαφική βιομάζα, η φυτοκάλυψη και η χιονόστρωση.

4 Περιγραφή της μεθοδολογίας για την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου στο SWAT

4.1 Προετοιμασία των γεωγραφικών δεδομένων

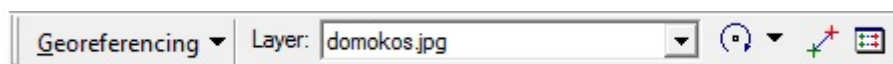
4.1.1 Εισαγωγή

Κατά την πρώτη φάση της προετοιμασίας των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 9.3, στο οποίο έγινε η ψηφιοποίηση των χαρτών έως ότου παραχθεί το τρισδιάστατο DTM, το οποίο εισάγεται στο SWAT για να σχεδιάσει την λεκάνη απορροής, τα ρέματα και να αποτελέσει τη βάση πάνω στην οποία θα στηριχτεί το SWAT για να τρέξει το πρόγραμμα. Το ArcGIS επιλέχθηκε έναντι άλλων προγραμμάτων, καθώς, εκτός ότι έχει πάρα πολλές δυνατότητας, έχει το προτέρημα να είναι συμβατό με το SWAT και μάλιστα το SWAT να βρίσκεται στην εργαλειοθήκη του ArcMAP.


4.1.2 Ψηφιοποίηση χαρτών

Το πρώτο βήμα για την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν η ψηφιοποίηση των χαρτών ώστε να κατασκευαστούν οι απαραίτητοι χάρτες για το λογισμικό (DTM, χάρτης χρήσεων γης, χάρτης εδαφικής κάλυψης και χάρτης κλίσεων), σε μορφή συμβατή με αυτό. Γι' αυτό το λόγο, σε πρώτο στάδιο έγινε η ψηφιοποίηση έξι φύλλων χαρτών της Θεσσαλίας, εκεί δηλαδή που βρίσκεται η περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς η μελέτη γίνεται για τον ποταμό Ενιπέα ο οποίος εκβάλλει στον Πηνειό. Η ψηφιοποίηση έγινε σε scanner που δέχεται μεγάλα φύλλα χάρτη και η ανάλυση ήταν 200 dpi, αρκετά καλή για την ανάλυση που χρειάζεται.

Στη συνέχεια, έγινε γεωαναφορά των εικόνων στο ArcMAP. Πρέπει να επισημανθεί πως οι αρχικοί χάρτες που ψηφιοποιήθηκαν, προέρχονται από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, σε έκδοση του 1972, και κλίμακα 1:50 000 ενώ το προβολικό σύστημα είναι αυτό της ισαπέχουσας αζιμουθιακής προβολής του HATT. Με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού COORD GR έγινε η μετατροπή κάποιων συντεταγμένων, περίπου 7-8 για κάθε φύλλο χάρτη, από το προβολικό σύστημα HATT στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς '87 (ΕΓΣΑ 87). Στη συνέχεια, εισήχθησαν οι ψηφιοποιημένοι χάρτες στο ArcMap σαν εικόνες για να γίνει η γεωαναφορά. Ενεργοποιήθηκε το εργαλείο Georeferencing από την επιλογή *View*→*Toolbars*→*Georeferencing*.



Σχήμα 4.1: Εργαλείο Georeferencing στο ArcMap.

Από το πλήκτρο  (Add Control Points) γίνεται η ψηφιοποίηση του σημείου αγκίστρωσης και στη συνέχεια με δεξιά κλικ ανοίγει ένα παράθυρο όπου γίνεται η επιλογή *Input X and Y* και η εισαγωγή των συντεταγμένων. Όταν γίνει η εισαγωγή όλων των σημείων, υπάρχει η δυνατότητα από την επιλογή *View Link Table* ώστε να παρουσιαστούν τα σφάλματα για κάθε σημείο και αν χρειάζεται να σβηστεί κάποιο σημείο. Να τονιστεί πως τα σημεία που επιλέγονται είναι σημεία που μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και με μικρό σφάλμα, όπως

κορυφές βουνών, απότομες στροφές δρόμων, κορυφές κανάβων κ.α. Στην παρούσα διπλωματική τα σφάλματα κυμάνθηκαν μεταξύ 2.5 έως 4.0 μέτρα, μια ακρίβεια αρκετά ικανοποιητική για την ακρίβεια που χρειάζεται η μελέτη. Τέλος, η οριστικοποίηση της διαδικασίας γίνεται από την επιλογή *Georeferencing*→*Update Georeferencing*. Να σημειωθεί πως αυτή η διαδικασία έγινε για όλους τους χάρτες δύο φορές, τη πρώτη όταν οι χάρτες ήταν σε μορφή RGB και τη δεύτερη όταν ήταν σε μορφή b/w (black and white). Οι τελευταίοι χάρτες χρησίμευσαν στην ταχύτερη ψηφιοποίηση των ισουψών, μια διαδικασία που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

4.1.3 Επεξεργασία Βάσεων Δεδομένων

Προκειμένου να γίνει η ψηφιοποίηση των χαρτών, οι οποίοι έχουν γεωαναφερθεί, πρέπει να κατασκευαστεί μία βάση δεδομένων, όπου αυτή θα έχει τη δυνατότητα της διαχείρισης των δεδομένων από διάφορες εφαρμογές. Τα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων, παρέχουν στους χρήστες τους μια σειρά από εργαλεία, που εκτελούν λειτουργίες όπως οι ακόλουθες:

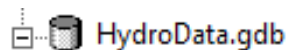
- 1) Να δημιουργεί νέα αρχεία
- 2) Να διαγράφει υπάρχοντα αρχεία
- 3) Να προσθέτει νέες εγγραφές σε υπάρχοντα αρχεία
- 4) Να διαγράφει εγγραφές από υπάρχοντα αρχεία
- 5) Να αλλάζει ή να ενημερώνει το περιεχόμενο των εγγραφών
- 6) Να επιλέγει εγγραφές που ικανοποιούν λογικές εκφράσεις.

Η αναπαράσταση των γεωγραφικών φαινομένων σε περιβάλλον ΣΓΠ στηρίζεται στην άρρηκτη σύνδεση των γεωγραφικών στοιχείων με τα περιγραφικά χαρακτηριστικά. Τα γεωγραφικά στοιχεία είναι η «μετάφραση» των γεωγραφικών δεδομένων σε μια από τις τρεις βασικές κατηγορίες γεωγραφικών φαινομένων: σημειακά, γραμμικά ή επιφανειακά, είναι δε ο γραφικός τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται στην οθόνη ή στο χαρτί.

Η περιγραφή του γεωγραφικού χώρου υλοποιείται με την αποθήκευση σε περιβάλλον H/Y:

- I) των γεωγραφικών στοιχείων (θέση υπό μορφή συντεταγμένων) που καταγράφουν τα γεωγραφικά φαινόμενα
- II) των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους (ιδιότητες) που τα προσδιορίζουν πλήρως και καθορίζουν τη μεταξύ τους διαφοροποίηση (Στάμου και Σκοπελίτη, 2009).

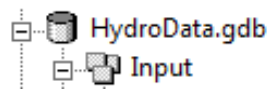
Σε πρώτη φάση, κατασκευάστηκε η γεωγραφική βάση δεδομένων (Geodatabase) στο ArcCatalog, από την επιλογή *file*→*New*→*File Geodatabase* (είδος Geodatabase)→*Εισαγωγή Ονόματος*.



Σχήμα 4.2: Η Γεωγραφική Βάση Δεδομένων που δημιουργήθηκε.

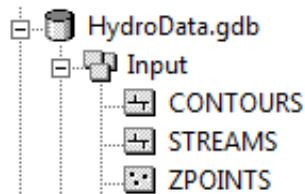
Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το σύνολο των γεωγραφικών αντικειμένων (Feature Dataset) εντός της γεωβάσης κάνοντας δεξί κλικ πάνω στη γεωβάση και μετά πατώντας: *New*→*Feature Dataset*→*Name*→*XY Coordinate System* (Ορισμός προβολικού συστήματος):

UnKnown→Vertical Coordinate System (Unknown)→XY Tolerance (Η μέγιστη απόσταση για την οποία δύο κορυφές ταυτίζονται)→Finish.




Σχήμα 4.3: Το σύνολο των γεωγραφικών αντικειμένων εντός της γεωβάσης.

Το τρίτο και τελευταίο βήμα πριν το στάδιο της ψηφιοποίησης είναι η δημιουργία της κλάσης γεωγραφικών αντικειμένων (Feature Class). Αυτό γίνεται με δεξί κλικ πάνω στη Feature Dataset και μετά: *New*→*Feature Class*: (Όνομα)→*Type*: Polygon features, Line features, Point features→*Fields* (field name, Data type, Field Properties)→*Finish*. Στην παρούσα διπλωματική κατασκευάστηκαν τρεις feature classes και συγκεκριμένα αυτή των ισοϋψών (γραμμική), των ρεμάτων (γραμμική) και των σημειακών υψομέτρων (σημειακή).



Σχήμα 4.4: Οι κλάσεις των γεωγραφικών αντικειμένων.

Η ψηφιοποίηση έγινε με την εργαλειοθήκη *Editor*. Η ψηφιοποίηση για τις ισοϋψείς έγινε για κάθε 100 μέτρα, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων, όπως σε περιπτώσεις που αλλάζει απότομα η κλίση, σε κάποια μικρά οροπέδια και σε σημεία όπου δεν υπάρχει κορυφή ενός βουνού ή λόφου. Μάλιστα, για τις ισοϋψείς, χρησιμοποιήθηκε η ημιαυτόματη μέθοδος διανυσματοποίησης, η οποία ενεργοποιείται ως εξής: *Tools*→*Extensions*→*ArcScan*. Η ημιαυτόματη μέθοδος χρειάζεται ως υπόβαθρο ασπρόμαυρες φωτογραφίες. Για να ξεκινήσει η ημιαυτόματη διανυσματοποίηση, επιλέγεται το εργαλείο ημιαυτόματης διανυσματοποίησης

(Vectorization Trace)  και με το πλήκτρο του ποντικιού υποδεικνύονται τα φατνία της εικόνας όπου θα γίνει η έναρξη της διαδικασίας. Στη συνέχεια, με το ποντίκι υποδεικνύεται η διεύθυνση προς την οποία θα γίνει η διανυσματοποίηση της εικόνας.

Όσον αφορά τα ρέματα, η ψηφιοποίηση έγινε σε εικόνες RGB και με κατεύθυνση την κατεύθυνση του νερού, δηλαδή από τα μεγαλύτερα υψόμετρα προς τα μικρότερα υψόμετρα. Τυχόν λάθη σε αυτό το στάδιο, θα δημιουργούσε προβλήματα αργότερα στη δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ). Βέβαια, ο εντοπισμός τέτοιων χονδροειδών σφαλμάτων θα γινόταν εύκολα καθώς θα ήταν εύκολος ο εντοπισμός τους στο ΨΜΕ από τις χρωματικές ασυνέχειες που θα δημιουργούσε.

Τέλος, ψηφιοποιήθηκαν και οι κορυφές των βουνών και τα τριγωνομετρικά σημεία για τα οποία υπήρχαν υψόμετρα.



Σχήμα 4.5: Η εργαλειοθήκη Editor.

4.1.4 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ)

Απώτερος σκοπός της διανυσματοποίησης ήταν η δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM), που θα εισαχθεί αργότερα στο ArcSWAT για να σχεδιάσει τη λεκάνη απορροής και τα ρέματα. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πρέπει κατ' αρχάς να ενεργοποιηθούν οι επιλογές του ArcMap (3D Analyst και Spatial Analyst) με την επιλογή *ArcMap*→*Extensions*→*3D Analyst, Spatial Analyst*.

Στη συνέχεια, από το εργαλείο *Arc tools*→*3D Analyst Tools*→*Raster Interpolation*→*Topo to Raster*, γίνεται η δημιουργία του ΨΜΕ αφού επιλεγούν οι κλάσεις οντοτήτων (feature classes), δηλαδή το διανυσματικό αρχείο για τις ισοϋψείς και τα ρέματα (type: Line features) και το διανυσματικό αρχείο για τα σημεία γνωστού υψομέτρου (type: point features). Να σημειωθεί πως το μέγεθος του φατνίου σε μέτρα (cell size) ισούται με 10x10 (βλ. Παράρτημα Β, Σχήμα 1).

Επειδή κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του ΨΜΕ δημιουργούνται σχεδόν πάντοτε ψευδή βυθίσματα στο ανάγλυφο, χρειάζεται αυτά τα βυθίσματα να διορθωθούν. Ο όρος βύθισμα αναφέρεται σε ένα ή περισσότερα φατνία γύρω από τα οποία όλα τα φατνία έχουν υψηλότερο υψόμετρο. Τα βυθίσματα αυτά διορθώνονται από τα εργαλεία: *Arc Toolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Fill*.

4.1.5 Δημιουργία Υδρολογικού Δικτύου και υπολογισμός λεκάνης απορροής

Για να υπολογίσουμε τη λεκάνη απορροής, πρώτα πρέπει να κάνουμε έναν έλεγχο για τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων. Δηλαδή, με τη βοήθεια μιας συνεχούς χρωματικής παλέτας γίνεται ο έλεγχος για τη φορά των ρεμάτων, ώστε αυτά να έχουν την κατεύθυνση από το μεγαλύτερο υψόμετρο προς το μικρότερο υψόμετρο. Αυτό επιτυγχάνεται από τα εργαλεία: *ArcMap*→*3D Analyst*→*Hillshade* (βλ. Παράρτημα Β, Σχήμα 2).

Το επόμενο βήμα είναι να σχεδιαστεί ο κανάβος διεύθυνσης απορροής. Αυτό γίνεται με τα εργαλεία: *Arc Toolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Direction*.

Στη συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός της συγκεντρωτικής ροής, δημιουργώντας τον ανάλογο κανάβο με τη βοήθεια των εργαλείων: *ArcGIS*→*Arc Toolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Accumulation*. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του κανάβου ισούται με το άθροισμα των φατνίων που απορρέουν σε αυτό από τα γειτονικά φατνία (Στάμου και Σκοπελίτη, 2009).

Κατόπιν, γίνεται ο προσδιορισμός του υδρογραφικού δικτύου. Προφανώς, τα φατνία του κανάβου συγκεντρωτικής ροής, που σχεδιάστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, με υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε μισγάγγειες, ενώ με τις μηδενικές τιμές σε κορυφογραμμές. Σε αυτή τη φάση, έχοντας ήδη σχεδιάσει τα ρέματα, με τη διανυσματοποίηση των χαρτών, το ArcGIS ξανασχεδιάζει τα ρέματα με βάση το ανάγλυφο και τις εντολές που του δίνουμε. Έτσι, είναι δυνατός ο έλεγχος της αρχικής ψηφιοποίησης αλλά και του σχεδιασμού της λεκάνης απορροής βάζοντας τους δύο χάρτες σε αντιπαραβολή. Συγκεκριμένα, για να κάνουμε την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου θεωρήθηκε ως δεδομένο πως 800 σταγόνες δημιουργούν ένα �έμα, αφού έγιναν δοκιμές με περισσότερες και λιγότερες σταγόνες. Οι λιγότερες σταγόνες είχαν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλά «σκουπίδια» στο χάρτη ενώ οι περισσότερες να χάνεται πολλή πληροφορία.

Στο προτελευταίο βήμα έγινε η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου, κατά Strahler, από τα εργαλεία: *Arc Toolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Stream Order*.

Τέλος, σχηματίστηκε η λεκάνη απορροής από τα εργαλεία: *Arc Toolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Basin*.

4.1.6 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών

Μέγεθος Λεκάνης Απορροής

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής έχει σημασία αφού επηρεάζει γενικά τόσο τη συνολική απορροή στην έξοδό της, όσο και το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και, κατά συνέπεια, και το σχήμα του υδρογραφήματος. Η παραπάνω σχέση δεν είναι βέβαια γραμμική αφού τα γεωλογικά, εδαφικά και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης κατά 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 σχέση «μεγέθους λεκάνης και απορροής» χρειάζεται επιπλέον ιδιαίτερη προσοχή, αφού το μέγεθος της λεκάνης επηρεάζει όλους τους άλλους παράγοντες της και συγκεκριμένα τη κλίση της λεκάνης, η οποία αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος αυτής, και την ειδική παροχή ($m^3/s/km^2$), η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της λεκάνης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εκτίμηση του μεγέθους της λεκάνης απορροής έγινε με τη βοήθεια της ψηφιοποίησης των χαρτών της Γ.Υ.Σ. και με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS σύμφωνα με τα βήματα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα θα παρουσιασθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Σχήμα Λεκάνης Απορροής

Το σχήμα της λεκάνης απορροής επηρεάζει το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και επομένως το μέγεθος της παροχής που παρατηρείται στο στόμιο της λεκάνης (Gregory και Walling, 1983, Garg, 1987). Συγκεκριμένα, επιμήκεις λεκάνες έχουν μεγαλύτερο χρόνο συγκέντρωσης από ριπιδοειδείς ή κυκλικές και, κατά συνέπεια, εμφανίζουν μικρότερες παροχές κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Το σχήμα της λεκάνης δύσκολα προσδιορίζεται και εκφράζεται αριθμητικά με σαφήνεια και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται αρκετοί δείκτες για την απόδοση του σχήματος.

Ο δείκτης CRAVELIUS χρησιμοποιεί το δείκτη συγκέντρωσης για να εκφράσει το σχήμα της λεκάνης, σύμφωνα με την εξίσωση

$$K_c = \frac{\text{Περίμετρος της λεκάνης } P \text{ με εμβαδόν } A}{\text{Περίμετρος κύκλου με ίσο εμβαδόν } A} \quad (4.1)$$

Όπου P είναι η περίμετρος της λεκάνης και A το εμβαδόν. Προφανώς για $K_c=1$ σημαίνει πως η λεκάνη είναι κυκλική.

Ο δείκτης αυτός έχει αποδειχθεί πως ισούται με:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \quad (4.2)$$

Υψόμετρο Λεκάνης Απορροής

Το υψόμετρο μιας λεκάνης απορροής σχετίζεται άμεσα με τα κατακρημνίσματα που δέχεται αλλά και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή. Πιο αναλυτικά, τα κατακρημνίσματα αυξάνονται με το υψόμετρο της λεκάνης έως το υψόμετρο των 2.5 km, καθώς από κει και πέρα παρατηρείται ελάττωση. Την αντίθετη συμπεριφορά φαίνεται να έχει η θερμοκρασία

καθώς μειώνεται με το υψόμετρο. Η άμεση σχέση του υψομέτρου της λεκάνης με τα κατακρημνίσματα και τη θερμοκρασία, όπως αυτά αποτυπώνονται στη βροχοβαθμίδα και τη θερμοβαθμίδα αντίστοιχα, συντελούν και στον επηρεασμό της απορροής από το υψόμετρο. Η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στο ποσοστό των κατακρημνισμάτων που πέφτουν με τη μορφή χιονιού καθώς και τη διάρκεια παραμονής του στο έδαφος. Οι παραπάνω συνθήκες, εν τέλει, επηρεάζουν σημαντικά την απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

Από τα διάφορα υψόμετρα της λεκάνης, τα πιο σημαντικά είναι το μέσο, η μέση τιμή και το ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο. Όσον αφορά το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο, αυτό εύκολα εντοπίζεται από τους τοπογραφικούς χάρτες αλλά και με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS. Προκειμένου να υπολογισθεί η μέση τιμή, τότε κρίνεται αναγκαία η χάραξη της υψομετρικής καμπύλης της λεκάνης. Αυτή η καμπύλη χαράσσεται σε σύστημα συντεταγμένων, όπου τεταγμένη είναι το υψόμετρο και τετμημένη είναι η επιφάνεια των εκτάσεων που βρίσκονται πάνω από το υψόμετρο. Η μέση τιμή του υψομέτρου (διάμεσος) υπολογίζεται από την υψομετρική καμπύλη και είναι το υψόμετρο για το οποίο το 50% της έκτασης της λεκάνης βρίσκεται πάνω από αυτό.

Για τον προσδιορισμό του μέσου υψομέτρου της λεκάνης διαιρέθηκε η λεκάνη σε υποπεριοχές ανά 100 m σύμφωνα με τις ισούψεις γραμμές και έγινε ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου για κάθε μία από αυτές. Στη συνέχεια το μέσο υψόμετρο της λεκάνης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Z_m = \frac{\sum(Z_i A_i)}{\sum A_i} \quad (4.3)$$

όπου:

- Z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης
- Z_i : το μέσο υψόμετρο κάθε υποπεριοχής
- A_i : το εμβαδόν κάθε υποπεριοχής

4.2 Προετοιμασία των βροχομετρικών δεδομένων

4.2.1 Έλεγχος ομοιογένειας χρονοσειρών βροχόπτωσης

Ο έλεγχος ομοιογένειας μιας χρονοσειράς μετρήσεων βροχής αποσκοπεί στον εντοπισμό τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Τέτοιες αλλαγές είναι η αλλαγή θέσης οργάνου μέτρησης, η αλλαγή παρατηρητή και η αντικατάσταση του οργάνου. Γίνεται δηλαδή ο έλεγχος για το κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε από τις ίδιες συνθήκες μετρήσεων. Στην περίπτωση που παρατηρηθούν τέτοιες μεταβολές, γίνεται τροποποίηση των μετρήσεων ώστε να αρθούν αυτές οι αλλαγές.

Για να επιτευχθεί ο έλεγχος ομοιογένειας των δεδομένων ενός σταθμού, αυτά συγκρίνονται με δεδομένα από ομάδα γειτονικών σταθμών, για τα οποία έχει γίνει έλεγχος ομοιογένειας και οι οποίοι αποτελούν τους σταθμούς βάσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος διπλής αθροιστικής καμπύλης. Για να σχεδιαστεί η Διπλή Αθροιστική Καμπύλη, υπολογίζονται για κάθε σταθμό τα αθροίσματα:

$$\sum X_{i+1} = \sum X_i + X_{i+1} \quad (4.4)$$

όπου:

X_i : το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i

i : τάξη του νεότερου στοιχείου

$i+1$: τάξη του παλαιότερου κατά 1 έτος στοιχείου

Στη συνέχεια, επιλέγονται ο σταθμός βάσης, ο οποίος παρουσιάζεται στον άξονα των τεταγμένων, και ο εξεταζόμενος σταθμός, ο οποίος παρουσιάζεται στον άξονα των τεταγμένων.

Σύμφωνα με τη μέθοδο, αυτός ο έλεγχος γίνεται για τα ετήσια ύψη βροχόπτωσης αν και μπορεί να γίνει και για τα μηνιαία ύψη. Απαραίτητο για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του εξεταζόμενου κάθε φορά σταθμού και του σταθμού βάσης.

Ο συντελεστής R^2 που προσδιορίζει αν τα δεδομένα είναι ομογενή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (4.5)$$

Όπου x και y είναι τα ετήσια βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

Προφανώς, η βέλτιστη τιμή είναι η μονάδα και θα έδειχνε την τέλεια ομογένεια. Συχνά παρατηρείται μία ή περισσότερες θλάσεις στην διπλή αθροιστική καμπύλη, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ημερομηνίες. Αυτές οι ημερομηνίες σηματοδοτούν την αλλαγή των συνθηκών μέτρησης και θα πρέπει να διορθωθούν.

Για τη διόρθωση των ετήσιων βροχομετρικών υψών βροχόπτωσης, θεωρούνται αξιόπιστες οι πρόσφατες μετρήσεις και έτσι η διόρθωση γίνεται στο παλαιότερο υποσύνολο ώστε τελικά τα δεδομένα να είναι ανάλογα με αυτά που εμφανίζονταν αν δεν είχαν αλλάξει οι συνθήκες μέτρησης. Η διόρθωση αυτή γίνεται με πολλαπλασιασμό με τον συντελεστή αναγωγής, που προκύπτει ως ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Ο συντελεστής αυτός είναι:

$$a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4.6)$$

όπου:

a : ο συντελεστής αναγωγής

λ_1 : η κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

λ_2 : η κλίση του παλαιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα για το αν κάποιος σταθμός έχει ελεγχθεί για την ομογένειά του, όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία, τότε υπολογίζεται αρχικά ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανά δύο σταθμούς σύμφωνα με τον τύπο:

$$\rho = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.7)$$

όπου x και y τα ετήσια βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

4.2.2 Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο να λείπουν παρατηρήσεις από το σταθμό που ελέγχουμε. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι δυνατόν να συμπληρωθούν με τη βοήθεια των γειτονικών σταθμών που διαθέτουν πλήρη δεδομένα και έχουν ελεγχθεί για την ομογένειά τους αλλά και για το βαθμό συσχέτισης με τα δεδομένα του υπό συμπλήρωση σταθμού. Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμοι τρεις γειτονικοί σταθμοί βάσης, τότε μπορεί για τη συμπλήρωση της τιμής P_x του υπό συμπλήρωση σταθμού να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} + \frac{N_x P_3}{N_3} \right] \quad (4.8)$$

όπου:

P_1, P_2, P_3 : οι αντίστοιχες τιμές στους σταθμούς 1,2,3

N_1, N_2, N_3 : η κανονική μέση βροχόπτωση στους τρεις παραπάνω σταθμούς

N_x : η κανονική βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού

Να σημειωθεί πως κανονικός μέσος όρος σημαίνει μέσος όρος 30 ετών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επειδή χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 3 βροχομετρικοί σταθμοί, για να συμπληρωθούν οι παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο παραπάνω τύπος αλλά για δύο γειτονικούς σταθμούς.

4.2.3 Μέσο Βροχομετρικό Ύψος Λεκάνης

Αφού έγινε ο έλεγχος ομογένειας των χρονοσειρών βροχόπτωσης και μετά τη συμπλήρωση των κενών των δεδομένων, υπολογίζεται το μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης. Το μέσο βροχομετρικό ύψος μιας λεκάνης απορροής μπορεί να υπολογιστεί από τους ακόλουθους τρόπους:

- i) *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.
- ii) *Πολύγωνα Thiessen*. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τα βάρη των εμβαδών των πολυγώνων επηρεασμού κάθε σταθμού, όπως αυτά προκύπτουν με τη χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους, για να υπολογίσει το μέσο βροχομετρικό ύψος. Ο τύπος που το υπολογίζει είναι:

$$P_o = \frac{\sum A_i P_i}{A} = \sum \left(\frac{A_i}{A} P_i \right) \quad (4.9)$$

όπου:

P_o : μέσο βροχομετρικό ύψος λεκάνης

A_i : εμβαδά πολυγώνων επηρεασμού

A : εμβαδόν λεκάνης απορροής

P_i : βροχομετρικό ύψος σταθμών

- iii) *Ισοϋέτιες καμπύλες (ή ισόβροχες καμπύλες)*. Οι ισοϋέτιες καμπύλες χαράσσονται όπως ακριβώς και οι ισοϋψείς καμπύλες. Αυτή η μέθοδος αποτελεί την ακριβέστερη μέθοδο, ωστόσο έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί την ύπαρξη πολλών σταθμών και την καλή γνώση της περιοχής ώστε να μην εξομαλύνονται ανωμαλίες στα χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλούνται από τοπικά αίτια. Το μέσο ετήσιο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης δίνεται από τον τύπο:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \bar{P}_{i-1,i}}{A} \quad (4.10)$$

όπου:

A_i : οι εκτάσεις μεταξύ των ισοϋέτιων καμπύλων

A : η συνολική έκταση της λεκάνης

$\bar{P}_{i-1,i}$: το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών.

Τέλος, για τον υπολογισμό του μέσου βροχομετρικού ύψους λεκάνης, έγινε η αναγωγή του στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας. Ο τύπος που αποτυπώνει αυτή τη σχέση είναι:

$$\lambda = 1 + \frac{\beta}{P_o 100} (z_m - \bar{z}) \quad (4.11)$$

όπου:

β : η βροχοβαθμίδα

P_o : η τιμή του ύψους βροχής στην υψομετρική αναγωγή

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης

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

Εν τέλει, η χωρικά μέση βροχόπτωση ανοιγμένη στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον παραπάνω συντελεστή λ με το μέσο βροχομετρικό ύψος (χωρίς τη διόρθωση) το ζητούμενο χρονικό διάστημα.

4.3 Προετοιμασία δεδομένων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

4.3.1 Γενικά

Σε μια τέτοια μελέτη, όπως αυτή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην γίνει ιδιαίτερη αναφορά στο ρόλο της εξατμισοδιαπνοής του νερού στο φυσικό περιβάλλον, καθώς αυτή παίζει μεγάλο ρόλο στον υδρολογικό κύκλο. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να μελετηθεί και να υπολογιστεί η συμμετοχή της εξατμισοδιαπνοής στην παραγωγή της απορροής.

Προκειμένου να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή, χρειάζονται μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία,

όπως επίσης και ένα μοντέλο που να μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά αυτές τις διεργασίες.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία, συλλέχθηκαν ημερήσια δεδομένα με τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (T_{max} και T_{min} αντίστοιχα) από τον σταθμό Σκοπιά και στη συνέχεια έγινε η αναγωγή με βάση τη θερμοβαθμίδα στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης, με μια διαδικασία που θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5.

Τα δεδομένα για τη σχετική υγρασία, τις τιμές ηλιοφάνειας και της ταχύτητας του ανέμου συλλέχθηκαν από το Μετεωρολογικό Σταθμό της Λάρισας, ως μέσες μηνιαίες τιμές που είχαν εξαχθεί από τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 1990-91. Να σημειωθεί πως για τα παραπάνω δεδομένα δεν έγινε κάποια αναγωγή και χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια. Άλλωστε, το σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα λόγω αυτής της παραδοχής είναι αποδεκτό.

4.3.2 Πρακτική σημασία της εξάτμισης και της διαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή, αδιαμφισβήτητα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, είτε αυτή γίνεται από ελεύθερες επιφάνειες νερού είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες εδαφικές επιφάνειες. Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί μια αέναη κίνηση του νερού από την ατμόσφαιρα προς στην επιφάνεια της γης με τη μορφή υδρομετεώρων και μετά πάλι πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

Από τη στιγμή που το νερό εισέρχεται στη φάση της εξάτμισης παύει να είναι προσιτό και προς εκμετάλλευση. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων, ειδικά σε μέρη όπου οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο οπότε είναι επιβεβλημένη η ορθολογική τους χρήση μέσω του υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή μαζί με τη βροχόπτωση καθορίζουν την ποσότητα της επιφανειακής απορροής αλλά και τα χαρακτηριστικά των λεκανών, ιδιαίτερα όσον αφορά την επιφανειακή απορροή και τις πλημμύρες σε περιόδους μεγάλων βροχοπτώσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της σπουδαιότητας της εξατμισοδιαπνοής βρίσκονται στο σχεδιασμό αρδευτικών έργων, όπου η δυναμική εξατμισοδιαπνοή θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή.

Δυστυχώς, η εξατμισοδιαπνοή από φυτοκαλυμμένες περιοχές και η εξάτμιση από ελεύθερες επιφάνειες νερού είναι ακόμα από τις λιγότερο κατανοητές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και η εκτίμησή τους σε εκτεταμένες περιοχές παραμένει δύσκολη (Τσακίρης, 1995).

Όλα τα παραπάνω ποσοτικοποιούνται από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, η οποία εκφράζει τη διατήρηση της μάζας σε μια εδαφική κατανομή και γράφεται ως εξής:

$$P+I+\Delta SW \pm RO-D-ET=0 \quad (4.12)$$

Όπου:

- P : η βροχόπτωση
- I : η άρδευση
- ΔSW : η αλλαγή του περιεχομένου νερού της εδαφικής κατανομής
- RO : η επιφανειακή απορροή
- D : η βαθιά διήθηση
- ET : η εξατμισοδιαπνοή

Γενικά, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής. Άλλες είναι περισσότερο ακριβείς και άλλες παρέχουν απλά προσεγγίσεις. Σε κάθε υδρολογική μελέτη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, την ακρίβεια που απαιτείται και τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος.

4.3.3 Οι μέθοδοι Penman και Penman-Monteith

Η μέθοδος Penman υπολογίζει την εξάτμιση από μια υδάτινη επιφάνεια σε mm/ημέρα σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$E = \frac{\Delta \cdot R + E_a \cdot \gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f \quad (4.13)$$

όπου:

- E : η εξάτμιση σε mm/ημέρα
 Δ : η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C

$$\Delta = 1.5(0.00738 \cdot T_a + 0.8072)^7 - 0.00087 \quad (4.14)$$

όπου:

- T_a : η θερμοκρασία του αέρα σε °C
 R : η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής

$$R = R_A(1-r) \cdot \left(0.29 \cdot \cos \phi + 0.55 \cdot \frac{n}{N} \right) - \sigma \cdot T_{AK}^4 \cdot (0.56 - 0.09) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (4.15)$$

όπου:

- R_A : η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της Ατμόσφαιρας υπολογισμένη σε mm/ημέρα (υπολογίζεται από πίνακες)
 n : οι ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας
 N : η μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια (υπολογίζεται από πίνακες)
 σ : η σταθερά Stephan-Boltzmann ($2.01 \cdot 10^{-9}$ mm/ημέρα)
 T_{AK} : η θερμοκρασία του αέρα σε °K
 r : ο αριθμός albedo
 e : η τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}
 E_a : η παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών

$$E_a = 0.35 \cdot (e_w - e) \cdot (0.5 + 0.54u_2) \quad (4.16)$$

όπου:

- e_w : η τάση των κορεσμένων υδρατμών σε mmHg
 $e_w = 25.4616(0.00738 \cdot T_a + 0.8072)^8 - 0.000484(1.8 \cdot T_a + 48) + 0.0335 \quad (4.17)$

- e : η τάση των υδρατμών

$$e = RH \cdot e_w \quad (4.18)$$

όπου:

- RH : η σχετική υγρασία
 γ : η ψυχρομετρική σταθερά ($\gamma=0.485 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$)
 f : ο συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας

Ο Monteith (1963, 1964) εισήγαγε τους όρους της αντίστασης στην εξίσωση του Penman κι έφθασε στην ακόλουθη έκφραση για την εξατμισοδιαπνοή από επιφάνειες με επαρκή ή περιορισμένη παροχή νερού (Τσακίρης, 1995):

$$LE = \frac{\Delta(R_N - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{(\Delta + \gamma)[(r_a - r_c) / r_a]} \quad (4.19)$$

όπου:

- L : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
 E : ο ρυθμός της εξάτμισης
 G : πυκνότητα ροής της θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος
 ρ : η πυκνότητα του αέρα
 C_p : η ειδική θερμότητα του αέρα υπό 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, στο $T=20^\circ\text{C}$
 γ : η ψυχρομετρική σταθερά
 r_a : η αεροδυναμική αντίσταση
 r_c : η αντίσταση της καλλιέργειας

Η εξίσωση (4.13) αναφέρεται και ως εξίσωση Penman-Monteith και έχει αποδειχθεί πως προσεγγίζει με επιτυχία το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής.

4.3.4 Η μέθοδος Hargreaves

Η μέθοδος αυτή, αποτελεί μια σχετικά πιο πρόσφατη εμπειρική μέθοδο εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής, που απαιτεί μόνον θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου (Hargreaves & Samani, 1985; Shuttleworth, 1993). Η μέθοδος Hargreaves βασίζεται στην απλή εξίσωση:

$$E_{rc} = 0.0023 \left(\frac{S_o}{\lambda} \right) (T_a + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (4.20)$$

Όπου:

- E_{rc} : η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d
 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 σε °C

Η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σφάλμα της τάξης του 10-15% ή του 1 mm/d (το μεγαλύτερο από τα δύο) και συστήνεται ως μια ανεκτή προσέγγιση για την περίπτωση που τα μόνα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα είναι τα θερμοκρασιακά (Shuttleworth, 1993).

4.4 Προετοιμασία δεδομένων χρήσεων γης

Σε μια υδρολογική μελέτη απαραίτητο στοιχείο είναι η μελέτη των χρήσεων γης που υπάρχουν στη περιοχή που μελετάται, καθώς αυτές επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την απορροή. Για τον εντοπισμό των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής χρησιμοποιήθηκε το υπόβαθρο Corine (Coordination Information on the Environment). Το Corine είναι ένα πρόγραμμα που οργανώθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση με στόχο τη συλλογή και το συντονισμό των χρήσεων γης ενώ χρησιμοποιείται ευρύτατα για περιβαλλοντικές μελέτες καθώς ανά δεκαετία ανανεώνεται δίνοντας τη δυνατότητα σε μελετητές να εντοπίσουν τις αλλαγές χρήσεων γης. Πρόσφατα κυκλοφόρησε νεότερη έκδοση αλλά στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του 2000. Η κλίμακα του Corine είναι 1:100.000, αρκετά ικανοποιητικό για τέτοιου είδους μελέτες. Αποτελείται από συνολικά 5 μεγάλες κατηγορίες και 44 υποκατηγορίες χρήσεων. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει αναλυτικά αυτές τις κατηγορίες και υποκατηγορίες:

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες και υποκατηγορίες χρήσεων γης του Corine (Πηγή: <http://ecourses.dbnet.ntua.gr/10605.html>).

1. Τεχνητές επιφάνειες	1.1 Αστική οικοδόμηση	1.1.1 Συνεχής αστική οικοδόμηση 1.1.2 Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
	1.2 Βιομηχανικές, εμπορικές ζώνες και δίκτυα επικοινωνίας	1.2.1 Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες 1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη 1.2.3 Ζώνες λιμένων
	1.3 Ορυχεία, χώροι απορρίψεως απορριμμάτων και χώροι οικοδόμησης	1.3.1 Χώροι εξόρυξης ορυκτών 1.3.2 Χώροι απόρριψης απορριμμάτων 1.3.3 Χώροι οικοδόμησης
	1.4 Τεχνητές, μη γεωργικές ζώνες πρασίνου	1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου 1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
2. Γεωργικές περιοχές	2.1 Αρόσιμη γη	2.1.1 Μη αρδευόμενη-αρόσιμη γη 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη 2.1.3 Ορυζώνες

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες και υποκατηγορίες χρήσεων γης του Corine (Πηγή: <http://ecourses.dbnet.ntua.gr/10605.html>) (συνέχεια).

	2.2 Μόνιμες καλλιέργειες	2.2.1 Αμπελώνες 2.2.2 Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς 2.2.3 Ελαιώνες
	2.3 Λιβάδια	2.3.1 Λιβάδια
	2.4 Ετερογενείς γεωργικές περιοχές	2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες 2.4.2 Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας 2.4.3 Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης 2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές
3. Δάση και ημι-φυσικές περιοχές	3.1 Δάση	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων 3.1.3 Μικτό δάσος
	3.2 Συνδυασμοί θαμνώδους και/ή ποώδους βλάστησης	3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
	3.3 Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές 3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι 3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση 3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις 3.3.5 Παγετώνες και αιώνιο χιόνι
4. Υγρές ζώνες	4.1 Εσωτερικές υγρές ζώνες	4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα 4.1.2 Τυφώνες
	4.2 Παραθαλάσσιες υγρές ζώνες	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι 4.2.2 Αλυκές 4.2.3 Παλιρροιακά επίπεδα
5. Υδάτινες επιφάνειες	5.1 Χερσαία ύδατα	5.1.1 Ροές υδάτων 5.1.2 Συλλογές υδάτων
	5.2 Θαλάσσια ύδατα	5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες 5.2.2 Εκβολές ποταμών 5.2.3 Θάλασσα και ωκεανός

Στη λεκάνη απορροής που εξετάζεται δεν εντοπίστηκαν παρά μόνο 11 χρήσεις γης και οι οποίες αντιστοιχίστηκαν με ισάριθμες χρήσεις γης που αναγνωρίζει το SWAT. Το SWAT έχει δικές του χρήσεις γης, στις οποίες μεταβάλλεται και ο αριθμός CN. Συγκεκριμένα, εμφανίζει δύο επιλογές: την επιλογή urban, στην οποία συμπεριλαμβάνονται τεχνητές επιφάνειες και την επιλογή crop, η οποία περιλαμβάνει υδάτινες, γεωργικές και δασικές περιοχές. Στον Πίνακα 4.2 εμφανίζονται οι χρήσεις γης για την επιλογή urban και στον Πίνακα 4.3 για την επιλογή crop.

Πίνακας 4.2: Χρήσεις γης του SWAT για την επιλογή urban.

a/a	Είδος φυτοκάλυψης	Κωδικός
1	Commercial	UCOM
2	Industrial	UIDU
3	Institutional	UINS
4	Residential	URBN
5	Residential-High Density	URHD
6	Residential-Low Density	URLD
7	Residential-Med/Low Density	URML
8	Residential-Medium Density	URMD
9	Transportation	UTRN

Πίνακας 4.3: Χρήσεις γης του SWAT για την επιλογή crop.

a/a	Είδος φυτοκάλυψης	Κωδικός	a/a	Είδος φυτοκάλυψης	Κωδικός
1	Agricultural Land-Close-grown	AGRC	55	Oil Palm	OILP
2	Agricultural Land-Generic	AGRL	56	Olives	OLIV
3	Agricultural Land-Row Crops	AGRR	57	Onion	ONIO
4	Alamo Switchgrass	SWCH	58	Orchard	ORCD
5	Alfalfa	ALFA	59	Pasture	PAST
6	Almonds	ALMD	60	Peanut	PNUT
7	Alsike Clover	CLVA	61	Pearl Millet	PMIL
8	Altai Wildrye	RYEA	62	Pine	PINE
9	Apple	APPL	63	Pinto Beans	PTBN
10	Asparagus	ASPR	64	Poplar	POPL
11	Bananas	BANA	65	Potato	POTA
12	Bell Pepper	PEPR	66	Range-Brush	RNGB
13	Bermudagrass	BERM	67	Range-Grasses	RNGE
14	Big Bluestem	BBLA	68	Red Clover	CLVR
15	Broccoli	BROC	69	Rice	RICE
16	Cabbage	CABG	70	Rubber Trees	RUBR
17	Cantaloupe	CANT	71	Russian Wildrye	RYER
18	Carrot	CRRT	72	Rye	RYE
19	Cauliflower	CAUF	73	Sesbania	SESB
20	Celery	CELR	74	Sideoats Grama	SIDE
21	Coffee	COFF	75	Slender Wheatgrass	SWGR
22	Corn	CORN	76	Smooth Bromegrass	BROS
23	Corn Silage	CSIL	77	Sorghum Hay	SGHY
24	Cowpeas	CWPS	78	Southwestern US (Arid) Range	SWRN

Πίνακας 4.3: Χρήσεις γης του SWAT για την επιλογή crop (συνέχεια).

a/a	Είδος φυτοκάλυψης	Κωδικός	a/a	Είδος φυτοκάλυψης	Κωδικός
25	Crested Wheatgrass	CWGR	79	Soybean	SOYB
26	Cucumber	CUCM	80	Spinach	SPIN
27	Durum Wheat	DWHT	81	Spring Barley	BARL
28	Eastern Gamagrass	EGAM	82	Spring Canola-Argentine	CANA
29	Eggplant	EGGP	83	Spring Canola-Polish	CANP
30	Eragrostis Teff	TEFF	84	Spring Wheat	SWHT
31	Field Peas	FPEA	85	Strawberry	STRW
32	Flax	FLAX	86	Sugarbeet	SGBT
33	Forest-Deciduous	FRSD	87	Sugarcane	SUGC
34	Forest-Evergreem	FRSE	88	Summer Pasture	SPAS
35	Forest-Mixed	FRST	89	Sunflower	SUNF
36	Garden r Canning Peas	PEAS	90	Sweet Corn	SCRN
37	Grain Sorghum	GRSG	91	Sweetclover	CLVS
38	Gradigue	GRAR	92	Sweetpotato	SPOT
39	Green Beans	GRBN	93	Tall Fescue	FESC
40	Hay	HAY	94	Tiimothy	TIMO
41	Head Lettuce	LETT	95	Tobacco	TOBC
42	Honey Mesquite	MESQ	96	Tomato	TOMA
43	Honeydew Melon	HMEL	97	Upland Cotton-harvested with	COTP
44	Indiangrass	INDN	98	Upland Cotton-harvested with	COTS
45	Italian (Annual) Ryegrass	RYEG	99	Vineyard	GRAP
46	Johnsongrass	JHGR	100	Water	WATR
47	Kentucky Bluegrass	BLUG	101	Watermelon	WMEL
48	Lentils	LENT	102	Western Wheatgrass	WWGR
49	Lima Beans	LIMA	103	Wetlands-Forested	WETF
50	Little Bluestem	LBLS	104	Wetlands-Mixed	WETL
51	Meadow Bromegrass	BROM	105	Wetlands-non-Forested	WETN
52	Mung Beans	MUNG	106	Winter Barley	WBAR
53	Oak	OAK	107	Winter Pasture	WPAS
54	Oats	OATS	108	Winter Wheat	WWHT

4.5 Απορροή

Το SWAT, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δίνει αποτελέσματα, σε ημερήσιο ή μηνιαίο βήμα, για διάφορες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, όπως την επιφανειακή, την υπόγεια και τη συνολική απορροή, ενώ η ενδιάμεση απορροή προκύπτει αν αφαιρεθεί από τη συνολική απορροή η επιφανειακή και η υπόγεια. Επίσης, τα εξαγόμενα προκύπτουν σε mm και για να προκύψουν σε m^3/s , πρέπει οι τιμές αυτές να πολλαπλασιαστούν με την έκταση της λεκάνης και να διαιρεθούν με το χρονικό βήμα. Οι απορροές ωστόσο μπορούν να αντληθούν κατευθείαν σε m^3/s από το αρχείο .rch.

5 Εφαρμογή της μεθοδολογίας στη λεκάνη απορροής του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί

5.1 Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας

Παρατηρώντας το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, από άποψη διοικητικής δομής, είναι προφανές πως αυτό συμπίπτει σχεδόν με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα, με κάποιες εξαιρέσεις κυρίως προς τα νότια και νοτιοδυτικά του διαμερίσματος. Η συνολική έκταση του διαμερίσματος είναι 13153 km² και το μέσο υψόμετρο περίπου 285 m. Οι κυριότεροι παραπόταμοι του υδατικού διαμερίσματος είναι στα νότια ο Ενιπέας, ο Φαρσαλιώτης, ο Σοφαδίτης (στον οποίο κατασκευάστηκε το φράγμα Σμοκόβου) και ο Καλετζής, στα δυτικά και νοτιοδυτικά ο Πλιούρης (ή Πάμισος), ο Πορταϊκός και το Μουργκάνι και στα βόρεια ο Ληθαίος, ο Νεοχωρίτης και ο Τιταρήσιος (Ναλμπάντης και Κουτσογιάννης, 1997).

Η γεωμορφολογική εικόνα που παρουσιάζει είναι σχετικά απλή, καθώς κατά κύριο λόγο αποτελείται από πεδιάδες, ενώ περιτριγυρίζεται από οροσειρές και συγκεκριμένα, τις οροσειρές Ολύμπου-Καμβουνίων στα βόρεια, της Πίνδου στα δυτικά, της Όθρυος στα νότια και του Πηλίου-Όσσας στα ανατολικά.

Οι κυριότερες υδρολογικές λεκάνες του διαμερίσματος είναι αυτές του Πηνειού (10225 km²), του Ξηρορέματος, του Ξηριά καθώς και του Πηλίου. Επίσης, υπάρχουν και τρεις κλειστές λεκάνες, η λεκάνη της λίμνης της Κάρλας και οι λεκάνες Συκουριού και Αλμυρού. Οι μελέτες όμως δεν περιορίζονται σε αυτές τις λεκάνες καθώς ιδιαίτερο υδρολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εννιά παρακάτω λεκάνες, οι οποίες κατά καιρούς έχουν μελετηθεί για τη κατασκευή ταμιευτήρων: Παλαιομονάστηρο (Τιταρήσιος), Καλούδα (Τιταρήσιος), Παλαιοδερλί (Ενιπέας), Νεοχώρι (Νεοχωρίτης), Θεόπετρα (Ληθαίος), Κρύα Βρύση (Πηνειός), Πύλη (Πορταϊκός), Μουζάκι (Πάμισος) και Σμόκοβο (Σοφαδίτης) (Μάμασης και Κουτσογιάννης, 1996).

5.2 Λεκάνη Απορροής Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί

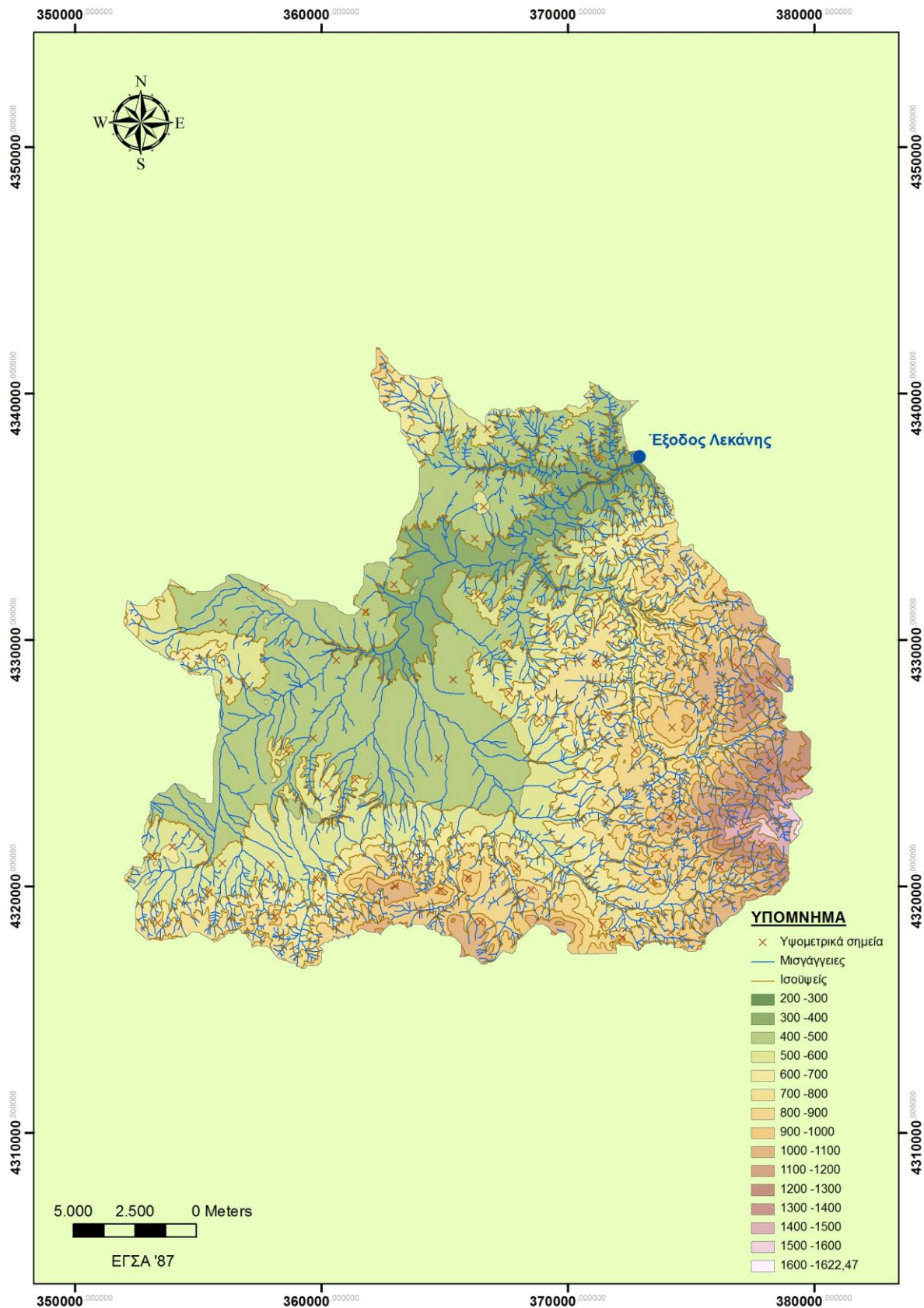
Ο ποταμός Ενιπέας αποτελεί έναν από τους σπουδαιότερους παραποτάμους του Πηνειού που τον τροφοδοτεί καθημερινά με νερό. Στη παρούσα εργασία, γίνεται η μελέτη της λεκάνης απορροής του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί, όπου σχεδιάζεται να κατασκευαστεί ένας ταμιευτήρας.

Η λεκάνη στη θέση Παλαιοδερλί σχηματίστηκε με τη βοήθεια του ArcGIS, έτσι όπως περιγράφηκε στο Κεφ.4 και έχει έκταση 438.7989 km².

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 12.5 και 13.5°C, ενώ το θερμοκρασιακό εύρος δεν ξεπερνά τους 30°C. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμφανίζονται τους κυρίως τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο ενώ οι μικρότερες θερμοκρασίες τους χειμερινούς μήνες, Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση ήταν 601.5 mm, με το μέσο ύψος των κατακρημνίσεων να αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου ενώ οι μήνες με τις περισσότερες βροχές ήταν οι μήνες Οκτώβριος έως Φεβρουάριος και με τις λιγότερες βροχές οι θερινοί, που σε πολλά υδρολογικά έτη ήταν και τελείως άνυδροι. Τέλος, ο συντελεστής K_c που αποτελεί δείκτη για

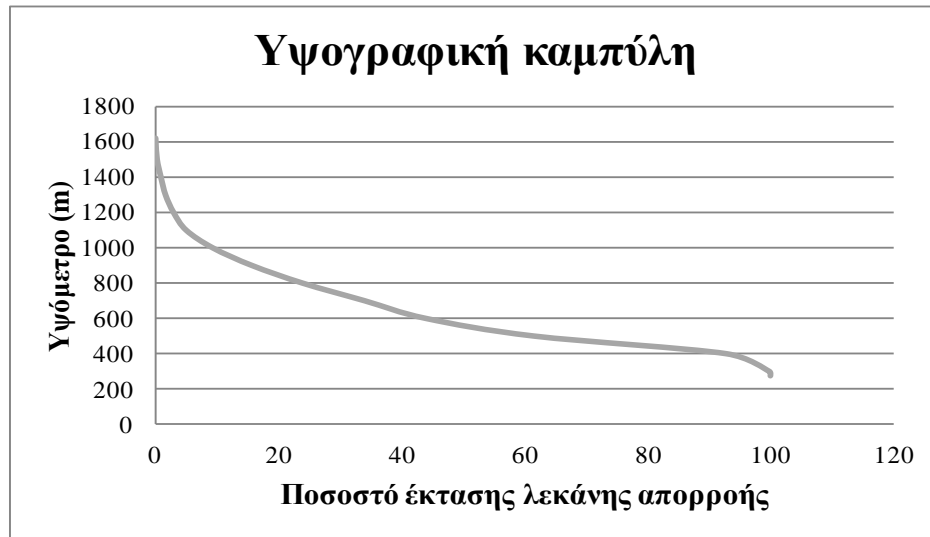
το σχήμα υπολογίστηκε από τη σχέση 4.2 ίσος με 2.09 και αποτελεί δείγμα για τον τρόπο συμπεριφοράς της λεκάνης και ειδικά όσον αφορά την παροχή.



Σχήμα 5.1: Χάρτης υψομέτρων υδρολογικής λεκάνης (ΕΓΣΑ '87).

5.3 Γεωγραφικά δεδομένα

Η λεκάνη απορροής του Ενιπέα, με σημείο εξόδου το υπό σχεδίαση φράγμα στη θέση Παλαιοδερλί, σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS και έχει έκταση 438.7989 km² με μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής ίσο με 644 m (Σχήμα 5.1). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του Ενιπέα για τη θέση Παλαιοδερλί:



Σχήμα 5.2: Υψογραφική καμπύλη λεκάνης Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί.

Παρατηρώντας την παραπάνω καμπύλη, προκύπτουν τα εξής:

Ελάχιστο υψόμετρο: 275 m

Μέγιστο υψόμετρο : 1622 m

Διάμεσο υψόμετρο : 568 m

5.4 Υδρολογικά δεδομένα

5.4.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Καταλυτικό ρόλο στην μελέτη, έπαιξε η μελέτη των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και η συλλογή δεδομένων για τις βροχοπτώσεις σε ημερήσια βάση. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκαν σταθμοί μέσα και γύρω από τη λεκάνη απορροής για να καταστεί δυνατή η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης απορροής, ανοιγμένο στο μέσο υψόμετρο λεκάνης με τη βοήθεια της βροχοβαθμίδας.

Για τη συλλογή αυτών των δεδομένων, εντοπίστηκαν οι σταθμοί που βρίσκονται κοντά ή μέσα στη λεκάνη. Οι σταθμοί που εντοπίστηκαν είναι οι εξής:

Βροχομετρικός σταθμός Φαρσάλα

Βροχομετρικός σταθμός Τρίλοφο

Βροχομετρικός σταθμός Σκοπιά

Βροχομετρικός σταθμός Παλιά Γιαννιτσού

Βροχομετρικός σταθμός Ανάβρα

Βροχομετρικός σταθμός Δομοκός

Τα χαρακτηριστικά κάθε σταθμού παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών.

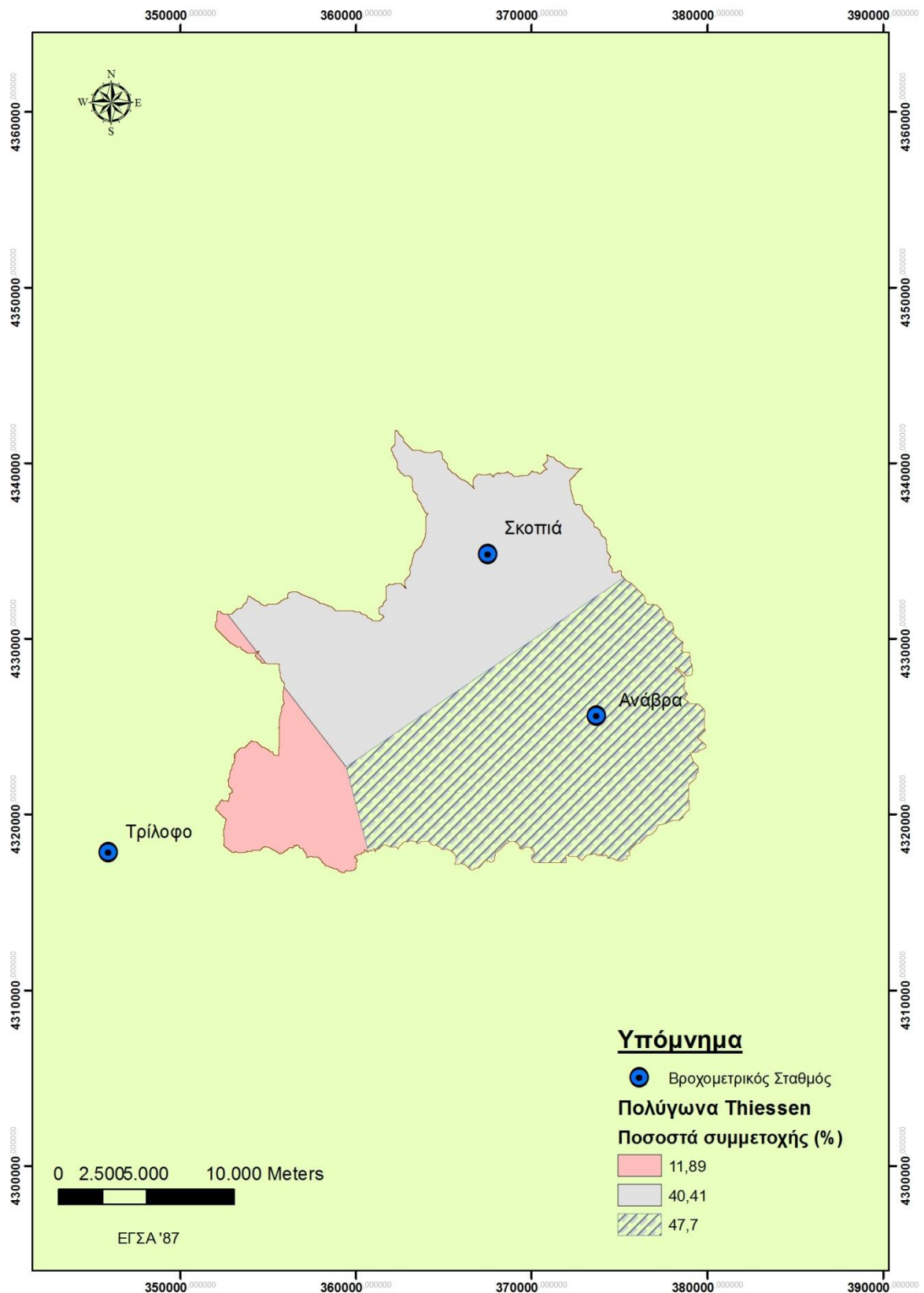
ΚΩΔΙΚΟΣ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΝΟΜΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΦΟΡΕΑΣ
ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	Α/Α, ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ			ΜΗΚΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ		
08	11	036	ΦΑΡΣΑΛΑ	ΛΑΡΙΣΑ	22° 23'	39° 18'	148	ΕΜΥ
07	06		ΤΡΙΛΟΦΟ	ΦΘΙΩΤΙΔΑ	22° 13'	39° 00'	580	ΥΠΔΕ
08	13	001	ΣΚΟΠΙΑ	ΛΑΡΙΣΑ	22° 28'	39° 09'	450	ΥΠΔΕ
08	11	072	ΠΑΛ.ΓΙΑΝΝΙΤΣΟΥ	ΦΘΙΩΤΙΔΑ	22° 05'	39° 02'	960	ΥΠΓΕ
08	11	031	ΑΝΑΒΡΑ	ΦΘΙΩΤΙΔΑ	22° 33'	39° 05'	700	ΥΠΓΕ
08	11	-----	ΔΟΜΟΚΟΣ	ΦΘΙΩΤΙΔΑ	22° 18'	39° 08'	615	-----

Στη συνέχεια, έγινε ο έλεγχος μέσω δοκιμαστικής κατάρτισης των πολυγώνων Thiessen για να εντοπιστούν οι σταθμοί οι οποίοι δεν επηρεάζουν καθόλου τη λεκάνη, και σε αυτόν τον έλεγχο εντοπίστηκε ο σταθμός των Φαρσάλων. Επίσης, έγινε έλεγχος μεταξύ των υπολοίπων σταθμών στα δεδομένα ώστε να βρεθούν τα κοινά υδρολογικά έτη για να γίνει η μελέτη. Σε αυτή τη φάση εντοπίστηκε και αφαιρέθηκε ο σταθμός της Παλαιάς Γιαννιτσούς καθώς είχε δεδομένα έως το υδρολογικό έτος 1980-81, οπότε σε αυτή τη περίπτωση θα είχαμε μόνο 6 υδρολογικά έτη, αρκετά λίγα για την ακρίβεια που επιθυμούμε. Τέλος, αφαιρέθηκε ο σταθμός του Δομοκού, καθώς δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν δεδομένα. Εν τέλει, χρησιμοποιήθηκαν τρεις βροχομετρικοί σταθμοί (Σκοπιά, Ανάβρα, Τρίλοφο) και η μελέτη έγινε για τα υδρολογικά έτη 1975-76 έως 1986-87.

Για τους εναπομείναντες τρεις σταθμούς υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης από τη σχέση 4.7. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, όπου η μονάδα αποτελεί την τέλεια συσχέτιση μεταξύ των σταθμών.

Πίνακας 5.2: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης.

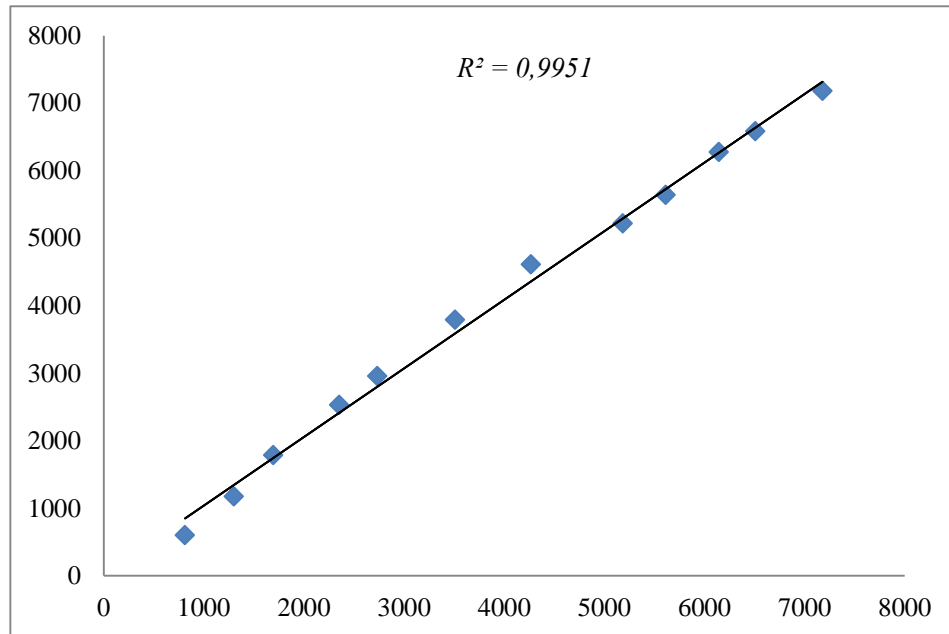
	Ανάβρα	Σκοπιά	Τρίλοφο
Ανάβρα	1	0.446	0.675
Σκοπιά	0.446	1	0.676
Τρίλοφο	0.675	0.676	1



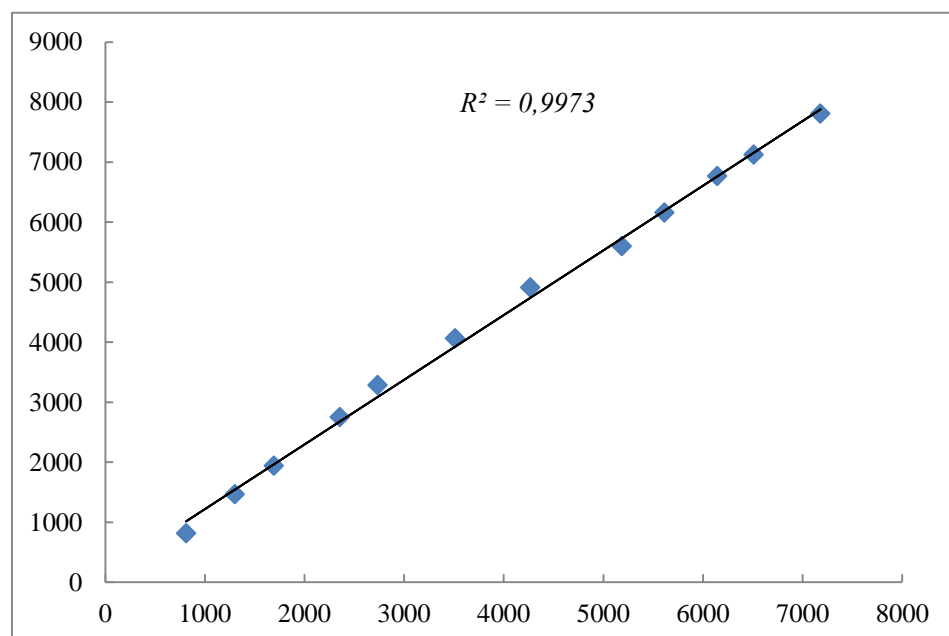
Σχήμα 5.3: Χάρτης πολυγώνων Thiessen (ΕΓΣΑ '87).

Επόμενο βήμα, για τον έλεγχο των χρονοσειρών των μετρήσεων της βροχής είναι ο έλεγχος ομογένειας, που αποσκοπεί στον εντοπισμό και τη διόρθωση τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, με τη βοήθεια της μεθόδου της Διπλής Αθροιστικής Καμπύλης έτσι

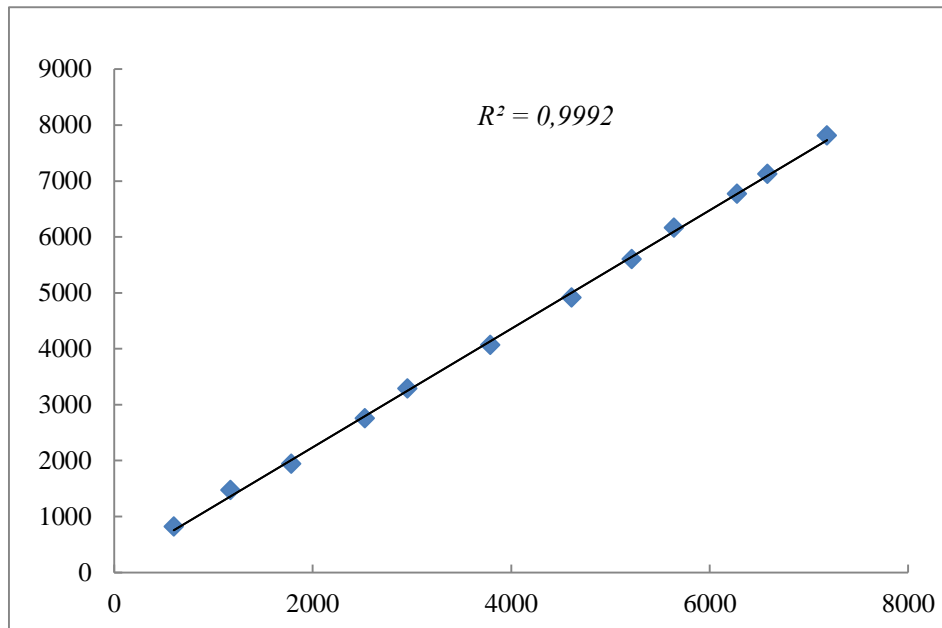
όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφ.4.2. Ως σταθμός βάσης επιλέχθηκε ο σταθμός της Ανάβρας γιατί, αν και δεν έχει τον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που έχει ο σταθμός Τρίλοφο, έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στη λεκάνη, σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen, κοντά στο 50%. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου:



Σχήμα 5.4: Διπλή Αθροιστική Καμπύλη με σταθμό βάσης την Ανάβρα και ελεγχόμενο σταθμό τη Σκοπιά (συντελεστής $R^2 = 0.9951$, κλίση ευθείας = 1.015).



Σχήμα 5.5: Διπλή Αθροιστική Καμπύλη με σταθμό βάσης την Ανάβρα και ελεγχόμενο σταθμό τη Τρίλοφο (συντελεστής $R^2 = 0.9973$, κλίση ευθείας = 1.078).



Σχήμα 5.6: Διπλή Αθροιστική Καμπύλη με σταθμό βάσης το Τρίλοφο και ελεγχόμενο σταθμό τη Σκοπιά (συντελεστής $R^2=0.9992$, κλίση ευθείας=0.943).

Είναι προφανές πως σύμφωνα με τους συντελεστές R^2 , τα δεδομένα είναι ομογενή και δεν χρειάζονται διαδικασίες διόρθωσης για να εξαλειφθούν τυχόν αλλαγές στις συνθήκες μετρήσεων.

Ένα συχνό πρόβλημα, που παρουσιάζεται σε υδρολογικές μελέτες είναι αυτό των κενών στα ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα. Δυστυχώς, η Ελλάδα παρουσιάζει τέτοια φαινόμενα ελλিপών στοιχείων καθώς δεν υπάρχει μια βάση δεδομένων με όλους τους σταθμούς ανά την επικράτεια, ενώ ακόμα και γι' αυτούς που υπάρχουν στοιχεία εμφανίζονται πολλές ελλείψεις. Στη προκειμένη περίπτωση, αυτό το πρόβλημα εμφανίστηκε μόνο για το σταθμό της Ανάβρας για τρεις ολόκληρους μήνες σε διαφορετικά υδρολογικά έτη. Το γεγονός ότι αυτοί οι μήνες ήταν θερινοί και κυρίως ξηροί, ελάττωσαν το σφάλμα. Η συμπλήρωση αυτών των μηνών έγινε με τη βοήθεια της σχέσης 4.8 αλλά αντί για τρεις γειτονικούς σταθμούς χρησιμοποιήθηκαν μόνον οι δύο γειτονικοί σταθμοί που ήταν διαθέσιμοι και η σχέση έγινε:

$$P_x = \frac{1}{2} \left[\frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} \right] \quad (5.1)$$

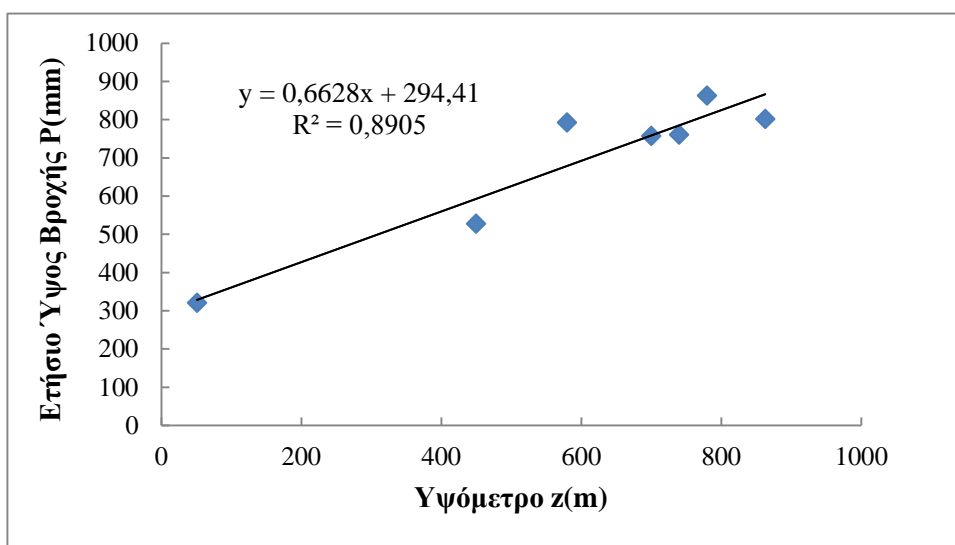
Επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση του μέσου βροχομετρικού ύψους της λεκάνης απορροής του Ενιπέα, η οποία έγινε με τη μέθοδο των Πολυγώνων Thiessen, με τον τρόπο που περιγράφηκε στη παράγραφο 4.2.3. Τα ποσοστά επιρροής των σταθμών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 5.3: Ποσοστά επιρροής των σταθμών στο σύνολο της λεκάνης απορροής.

Βροχομετρικός Σταθμός	Ποσοστό (%)
Σκοπιά	40.41
Ανάβρα	47.70
Τρίλοφο	11.89

Τελευταίο βήμα για την δημιουργία της χρονοσειράς βροχοπτώσεων, είναι η αναγωγή του μέσου βροχομετρικού ύψους στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης με τη χρήση της βροχοβαθμίδας και ο υπολογισμός του συντελεστή λ από τη σχέση 4.11.

Ο υπολογισμός της βροχοβαθμίδας έγινε με τη βοήθεια του Excel και χρησιμοποιήθηκαν επτά βροχομετρικοί σταθμοί της Θεσσαλίας, οι τρεις που χρησιμοποιούνται ήδη στη διπλωματική εργασία, συν τους σταθμούς Λιόπρασο, Καρδίτσα, Βερδικούσα και Σωτήριο. Τα ετήσια ύψη βροχής των σταθμών προέκυψαν από δεδομένα για τουλάχιστον είκοσι υδρολογικά έτη. Η βροχοβαθμίδα προκύπτει από τη γραφική παράσταση, όπου στον άξονα των τεταγμένων είναι τα υψόμετρα και στον άξονα των τεταγμένων τα μέσα ετήσια ύψη βροχής, και ισούται με τη κλίση της γραμμής τάσης. Στην προκειμένη περίπτωση, η βροχοβαθμίδα προέκυψε ίση με $\beta=0.66$ mm/m ή 66 mm/100 m και η γραφική παράσταση παρατίθεται στο Σχ. 5.5.



Σχήμα 5.7: Εκτίμηση βροχοβαθμίδας για τη λεκάνη απορροής του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί

Ο συντελεστής R^2 , όπως φαίνεται ισούται με 0.89 και είναι αρκετά υψηλός, πράγμα που δείχνει πως έχει γίνει καλή προσαρμογή της ευθείας στα βροχομετρικά δεδομένα και συνεπώς η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας στη περιοχή είναι αρκετά καλή.

Ο συντελεστής λ υπολογίστηκε $\lambda=1.000683$. Τελικά, πολλαπλασιάζοντας το συντελεστή λ με το μέσο βροχομετρικό ύψος τη ζητούμενη χρονική στιγμή, προκύπτει η χωρικά μέση βροχόπτωση ανοιγμένη στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής.

Κάνοντας όλη αυτή τη διαδικασία, στην ουσία δημιουργούμε έναν νέο εικονικό σταθμό, «καταργώντας» τους υπόλοιπους τρεις, ο οποίος θα έχει ως δεδομένα βροχόπτωσης τη χωρικά μέση βροχόπτωση ανοιγμένη στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Στο σταθμό αυτό θα δοθούν συντεταγμένες με βάση τις συντεταγμένες των τριών βροχομετρικών σταθμών και τους συντελεστές Thiessen. Οι τελικές συντεταγμένες του σταθμού είναι:

$$X = 367896 \text{ και } Y = 4328386.$$

Εδώ πρέπει να τονιστεί, πως στο πρόγραμμα SWAT, όπως εκτενέστερα θα αναλυθεί στο 6^ο Κεφάλαιο, ως μετεωρολογικός σταθμός, με δεδομένα για θερμοκρασία, βροχόπτωση, ταχύτητα ανέμου και σχετική υγρασία θα εισαχθεί μόνον ο σταθμός αυτός και όχι οι άλλοι τρεις.

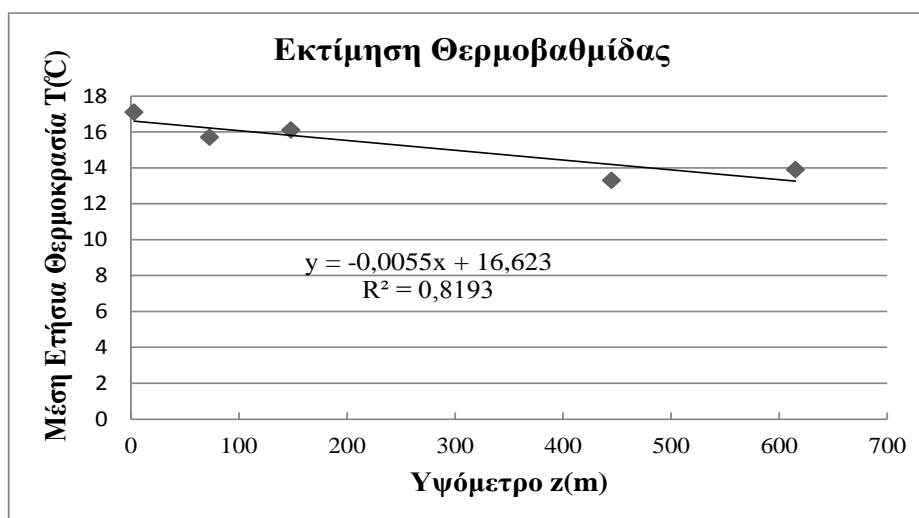
Οι συντεταγμένες των σταθμών με τα ποσοστά επιρροής τους στο μέσο σταθμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Συντεταγμένες σταθμών.

Όνομα Σταθμού	Συντεταγμένες
Σκοπιά	X=367512 Y=4334785
Ανάβρα	X=373706 Y=4325601
Τρίλοφο	X=345889 Y=4317809

5.4.2 Θερμοκρασία αέρα - Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή

Η θερμοκρασία παίζει ιδιαίτερο ρόλο σε μια υδρολογική μελέτη, αφού σχετίζεται άμεσα με την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής ανεξάρτητα από μια μέθοδο τελικά επιλεγεί. Το SWAT για τη μέθοδο Penman-Monteith απαιτεί τη μέση μηνιαία θερμοκρασία ενώ για τη μέθοδο Hargreaves μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες. Στη παρούσα διπλωματική εισήχθησαν δεδομένα και για τις δύο μεθόδους, ώστε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου να ελεγχθεί ποια μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα, προσομοιώνοντας με το βέλτιστο τρόπο τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Τελικά, επιλέχθηκε η μέθοδος Hargreaves καθώς έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν τα θερμοκρασιακά δεδομένα από το σταθμό Σκοπιά και η αναγωγή τους στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής έγινε με τη βοήθεια της θερμοβαθμίδας. Η θερμοβαθμίδα υπολογίστηκε $\theta = -0.55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, έτσι όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, και χρησιμοποιήθηκαν εκτός από το σταθμό της Σκοπιάς, ο σταθμός της Λάρισας, του Βόλου, των Φαρσάλων και του Δομοκού. Τέλος, επειδή θα ήταν αδύνατο να παρουσιαστεί η χρονοσειρά των ημερήσιων θερμοκρασιών μετά την αναγωγή για δώδεκα υδρολογικά έτη, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και οι μέσες μηνιαίες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.8: Εκτίμηση θερμοβαθμίδας για τη λεκάνη απορροής του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί.

Πίνακας 5.5: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες.

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση (°C)	Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση (°C)	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση (°C)
Ιανουάριος	3.6	1.7	8.9	2.5	-1.7	1.4
Φεβρουάριος	3.9	1.3	8.8	1.5	-1.1	1.7
Μάρτιος	7.8	1.6	13.5	2.4	2.2	1.2
Απρίλιος	11.5	1.7	18.0	2.7	4.9	0.9
Μάιος	16.6	1.7	23.9	2.2	9.4	1.3
Ιούνιος	21.4	1.1	29.2	1.7	13.5	0.7
Ιούλιος	23.9	1.0	32.3	1.5	15.5	0.8
Αύγουστος	23.0	1.5	31.3	2.2	14.7	1.0
Σεπτέμβριος	19.6	1.6	27.2	2.3	12.0	1.0
Οκτώβριος	14.6	2.1	20.8	3.0	8.4	1.5
Νοέμβριος	9.0	1.7	14.5	2.0	3.4	1.9
Δεκέμβριος	5.2	1.8	10.2	2.3	0.2	1.5

5.4.3 Απορροή

Η απορροή σε μια υδρολογική μελέτη αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα του υδρολογικού κύκλου και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα έργα που χρειάζονται να γίνουν για τη προστασία και διαχείριση των υδατικών πόρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι μηνιαίες παροχές που χρειάστηκαν για τη λεκάνη απορροής του Ενιπέα, στη θέση του φράγματος Παλαιοδερλί συλλέχτηκαν από προηγούμενη υδρολογική μελέτη (Ναλμπάντης & Κουτσογιάννης, 1997). Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου του SWAT και με βάση αυτές προέκυψε ο συντελεστής Nash. Ο πίνακας των μηνιαίων παροχών για τη θέση αυτή ήταν σε m^3/s και η μελέτη έγινε για τα υδρολογικά έτη 1975-76 έως 1986-87. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αυτές οι τιμές σε m^3/s για τα υδρολογικά έτη της μελέτης.

Πίνακας 5.6: Μηνιαίες παροχές Ενιπέα στη θέση του φράγματος Παλαιοδερλί (m³/s).

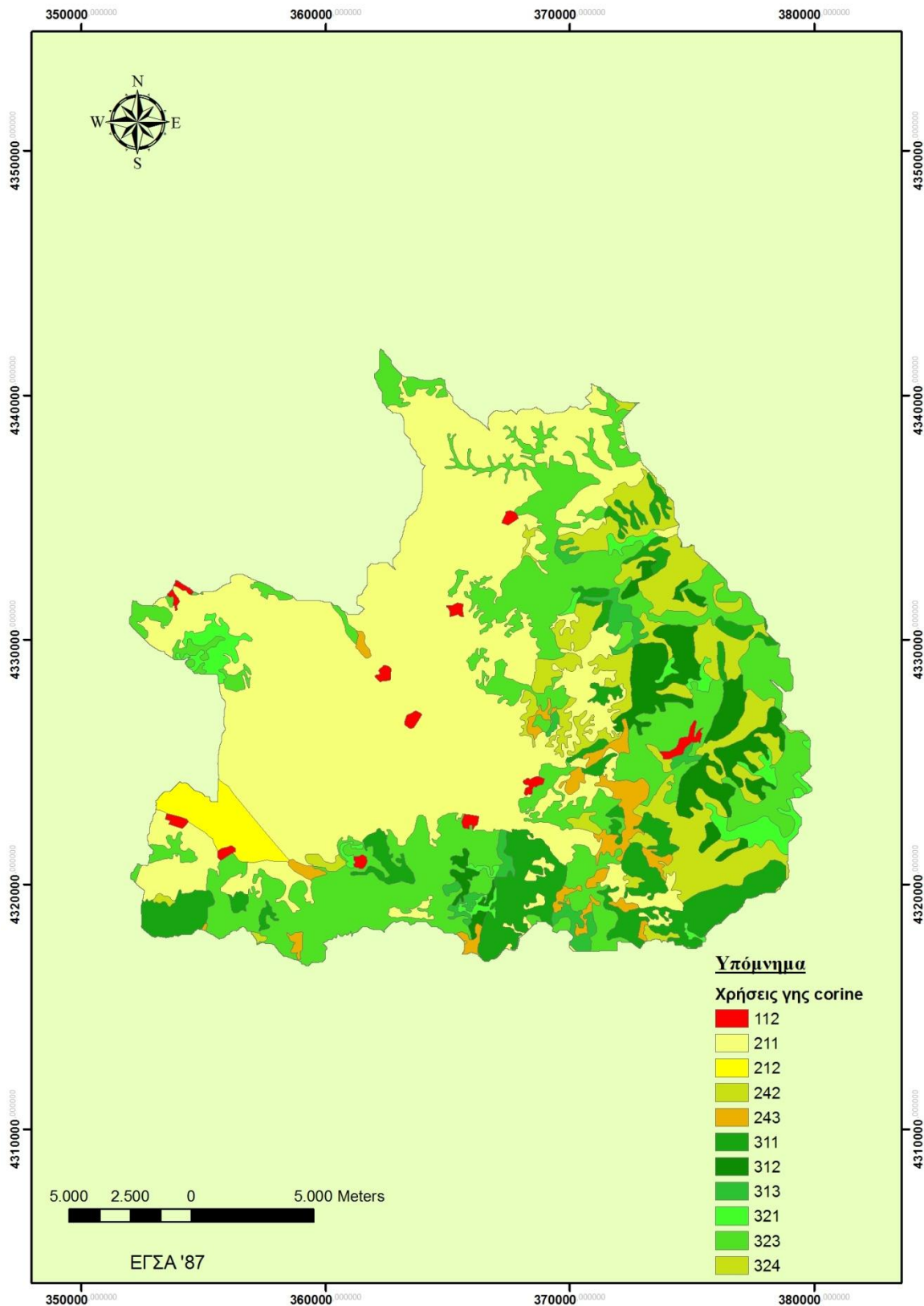
Υδρ.Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
1975-76	0.66	0.72	1.65	2.62	12.74	3.13	1.97	1.43	0.41	0.34	0.30	0.24	2.18
1976-77	0.34	0.54	0.53	0.54	0.33	0.31	0.25	0.19	0.07	0.00	0.00	0.04	0.26
1977-78	0.08	0.08	0.58	4.76	4.93	1.64	1.98	1.16	0.27	0.07	0.11	1.63	1.44
1978-79	1.12	1.61	2.02	1.80	3.83	1.73	1.27	1.32	0.46	0.56	0.16	0.23	1.34
1979-80	3.12	5.56	4.16	5.62	4.86	11.86	4.54	2.66	0.82	0.56	0.46	0.44	3.72
1980-81	5.25	1.97	3.58	8.04	8.60	9.58	6.32	3.10	1.31	0.73	0.73	1.02	4.19
1981-82	1.48	1.24	1.50	0.90	3.45	4.81	8.07	7.44	4.14	1.03	0.20	0.33	2.88
1982-83	0.33	0.80	1.47	1.17	1.44	3.55	0.66	0.30	0.63	0.22	0.11	0.17	0.90
1983-84	0.34	0.63	5.49	2.07	6.05	6.14	5.39	2.25	0.75	0.18	0.34	0.25	2.49
1984-85	0.25	0.35	0.84	4.98	3.65	2.66	1.49	0.41	0.18	0.04	0.01	0.09	1.25
1985-86	0.23	1.77	0.62	0.50			0.63	0.31	0.17	0.20	0.13		
1986-87	0.16	0.56	1.08	2.39	1.98	11.52	11.91	4.40	1.35	0.53	0.42	0.34	3.05
Μ.τιμή	1.11	1.32	1.96	2.95	4.71	5.18	3.71	2.08	0.88	0.37	0.25	0.43	2.15

5.5 Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής

Κατά τη μελέτη των χρήσεων γης της περιοχής, σύμφωνα με το υπόβαθρο εντοπίστηκαν 11 διαφορετικές χρήσεις γης. Αυτές οι χρήσεις γης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα μαζί με τα ποσοστά συμμετοχής κάθε χρήσης στη λεκάνη απορροής ενώ στον επόμενο χάρτη φαίνεται πως κατανομονται οι χρήσεις στο χώρο.

Πίνακας 5.7: Χρήσεις γης σύμφωνα με το υπόβαθρο corine.

Κωδικός	Χρήση γης	Ποσοστό
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	0.86%
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	44.57%
212	Μόνιμα αρδευόμενη αρόσιμη γη	1.83%
242	Σύνθετες καλλιέργειες	0.24%
243	Γη που χρησιμοποιείται για γεωργία με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	2.27%
311	Δάσος πλατύφυλλων	8.43%
312	Δάσος κωνοφόρων	4.69%
313	Μεικτό δάσος	1.54%
321	Φυσικοί βοσκότοποι	2.43%
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	23.21%
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	9.93%



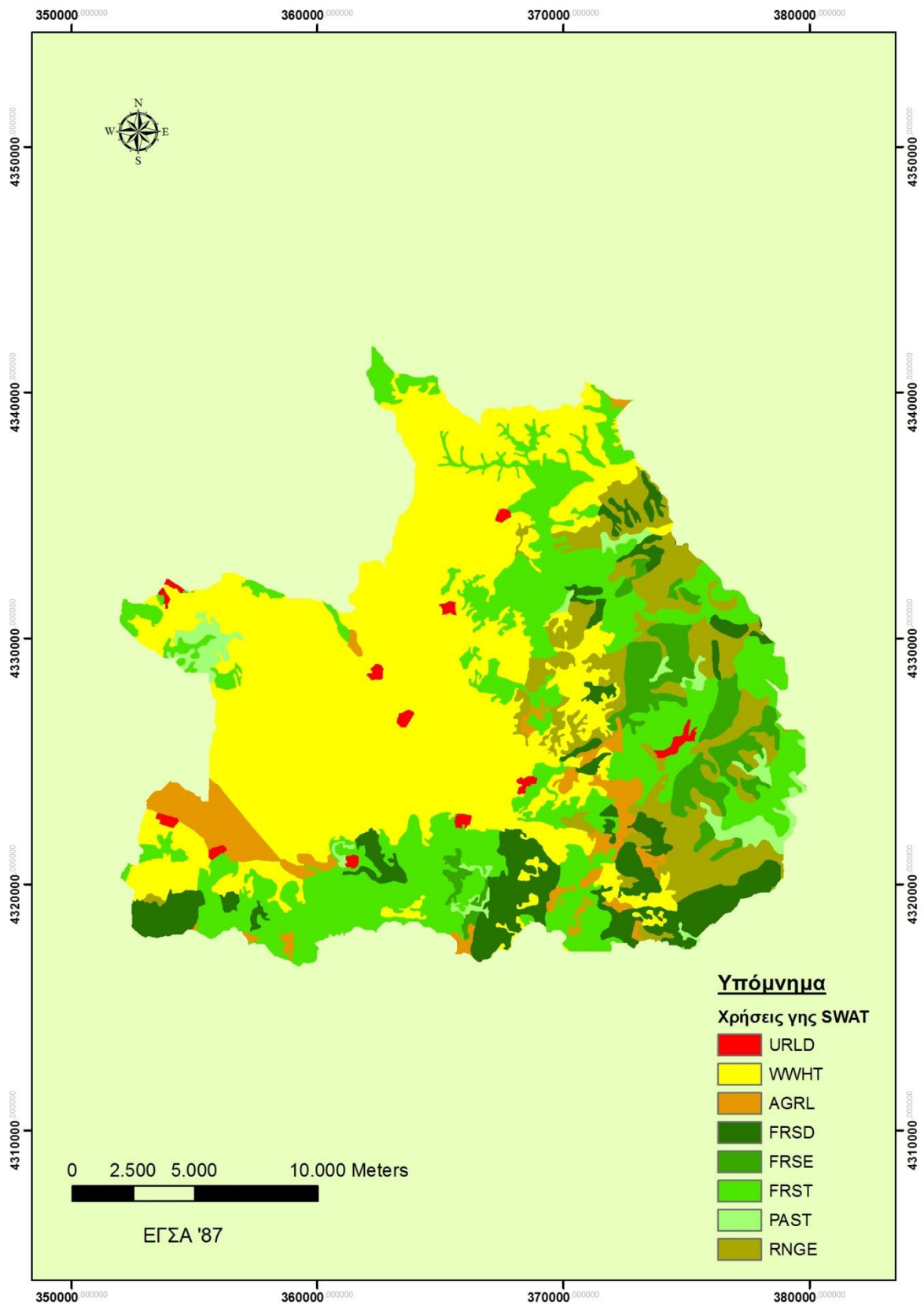
Σχήμα 5.9: Χάρτης χρήσεων γης Corine (ΕΓΣΑ '87).

Παρατηρώντας τις χρήσεις γης, γίνεται φανερή η υπεροχή των γεωργικών περιοχών έναντι των άλλων χρήσεων γης. Συγκεκριμένα, οι γεωργικές περιοχές καταλαμβάνουν σχεδόν το μισό της λεκάνης απορροής και ακολουθούν οι συνδυασμοί θαμνώδους και ποώδους

βλάστησης με 35.57%. Επίσης, υπάρχουν οι δασικές εκτάσεις που καλύπτουν το 14.66% και ο ασυνεχής αστικός ιστός με μόλις 0.86%. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το SWAT δεν κάνει αυτό το διαχωρισμό στις χρήσεις, που κάνει το Corine, οπότε πρέπει να γίνει η αντιστοίχιση των παραπάνω χρήσεων γης με αυτές του SWAT. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει πως οι χρήσεις γης του Corine που εντοπίστηκαν, αντιστοιχούνται σε χρήσεις γης του SWAT. Επειδή, ο αριθμός των χρήσεων γης του SWAT είναι μεγάλος και λεπτομερής, σε αντίθεση με του Corine που είναι πιο γενικός, έγινε και χρήση αεροφωτογραφιών από το Google Earth για να διαπιστωθεί ακριβώς τι καλλιέργειες επικρατούν στην περιοχή ενώ χρησιμοποιήθηκε και η ιστοσελίδα της περιφέρειας Θεσσαλίας (<http://www.thessalia.gr>). Όσον αφορά τις καλλιέργειες, διαπιστώθηκε πως αυτές αποτελούνται από καλλιέργεια σιταριού. Η αντιστοίχιση που έγινε φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.8: Αντιστοίχιση χρήσεων γης.

α/α	CORINE		SWAT	
	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ
1	112	Ασυνεχής Αστικός Ιστός	URLD	Residential-Low Density
2	211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	WWHT	Winter Wheat
3	212	Μόνιμα αρδευόμενη αρόσιμη γη	AGRL	Agricultural Land-Generic
4	242	Σύνθετες καλλιέργειες	AGRL	Agricultural Land-Generic
5	243	Γη που χρησιμοποιείται για γεωργία με σημαντικά	AGRL	Agricultural Land-Generic
6	311	Δάσος Πλατύφυλλων	FRSD	Forest-Deciduous
7	312	Δάσος κωνοφόρων	FRSE	Forest-Evergreen
8	313	Μεικτό δάσος	FRST	Forest-Mixed
9	321	Φυσικοί βοσκότοποι	PAST	Pasture
10	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	Forest-Mixed
11	324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	RNGE	Range-Grasses



Σχήμα 5.10: Χάρτης χρήσεων γης SWAT (ΕΓΣΑ '87).

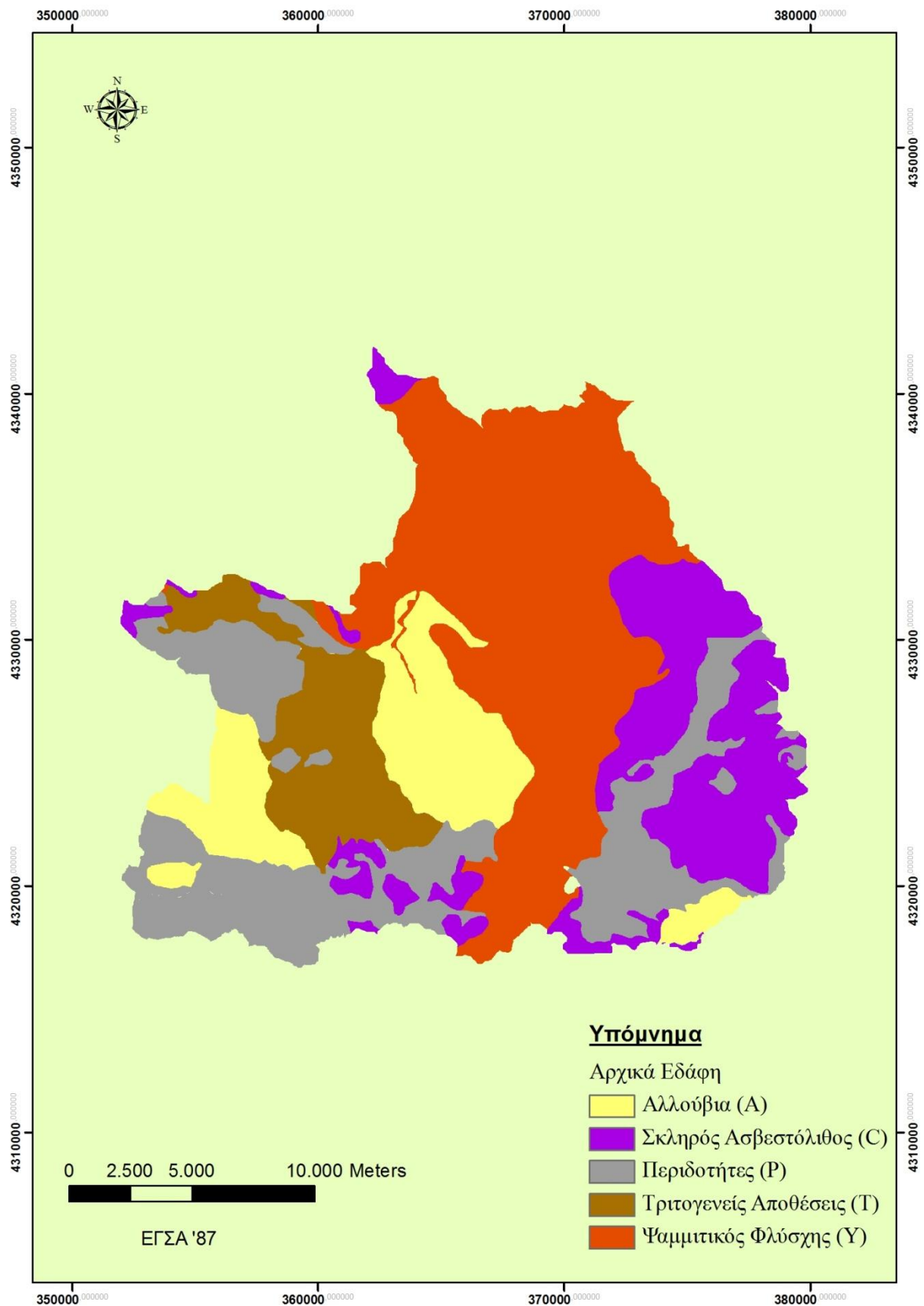
5.6 Γεωλογικοί Σχηματισμοί της Λεκάνης

Μια μελέτη για να είναι πλήρης, πρέπει να συμπεριλάβει τα γεωλογικά στοιχεία που επικρατούν στην περιοχή. Τα γεωλογικά στοιχεία έχουν αρκετή επίδραση στην απορροή μιας λεκάνης μιας και καθορίζουν παραμέτρους όπως η διήθηση του νερού στους υπόγειους υδροφορείς ή η κίνηση του νερού στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Βέβαια, το μοντέλο SWAT έχει δείξει σε παλαιότερες έρευνες (Πικούνης, 2000) πως δεν είναι τόσο ευαίσθητο στην ακρίβεια με την οποία ορίζονται τα εδαφολογικά στοιχεία.

Για τη μελέτη των γεωλογικών σχηματισμών, χρησιμοποιήθηκαν γεωλογικοί και εδαφολογικοί χάρτες, κλίμακας 1:50000, οι οποίοι ελήφθησαν από το ΙΓΜΕ και το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών. Αυτοί ψηφιοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και τον χάρτη που ακολουθεί. Η ψηφιοποίηση των χαρτών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί πως οι εδαφολογικοί χάρτες περιγράφουν μόνον το μητρικό πέτρωμα και όχι ολόκληρη την εδαφική πληροφορία για αρκετά μέτρα βάθος, η οποία παίζει ρόλο στη σωστή μοντελοποίηση. Γι' αυτό το λόγο, συνήθως χρησιμοποιούνται και εδαφοτομές, οι οποίες όμως δεν υπήρχαν διαθέσιμες για τη περιοχή μελέτης, ούτε από το ΙΓΜΕ, ούτε από το ΙΔΕ.

Πίνακας 5.9: Κατανομή γεωλογικών στοιχείων.

Σχηματισμός	Εμβαδόν (m ²)	Ποσοστό
Αλλούβια (A)	59660407	13.6%
Σκληρός Ασβεστόλιθος (C)	79413216.01	18. %
Περιδοτίτες (P)	100382098.9	22.87%
Ψαμμτικός Φλύσχης (Y)	155076708.1	35.34%
Τριτογενείς αποθέσεις (T)	44266470.09	10.09%



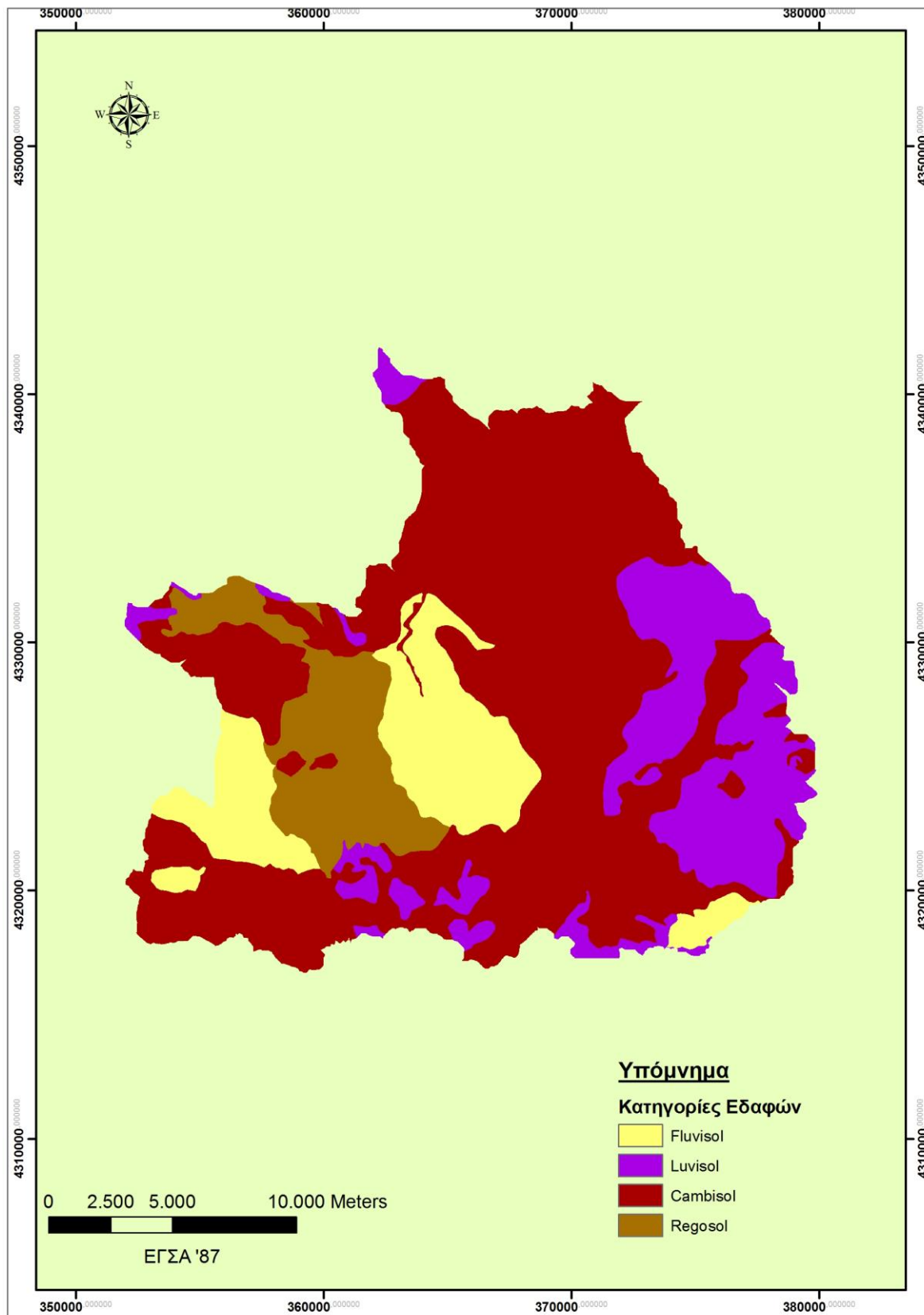
Σχήμα 5.11: Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών (ΕΓΣΑ '87).

Επειδή, όμως, ο διαχωρισμός εδαφολογικών στοιχείων είναι αρκετά αναλυτικός και δεν υπάρχουν εδαφολογικά δεδομένα για κάθε γεωλογικό σχηματισμό, κρίθηκε αναγκαίο η

ομαδοποίηση των σχηματισμών, η οποία έγινε με τη χρήση του Παγκόσμιου Εδαφολογικού Χάρτη, που έχει καταρτίσει ο FAO (Food and Agriculture Organization). Ο εν λόγω ψηφιακός χάρτης περιλαμβάνει 26 διαφορετικά είδη εδάφους, με πληροφορίες για την ονομασία τους, τη κοκκομετρία του εδάφους το εδαφικό προφίλ και την κλίση. Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται στην ιστοσελίδα <http://www.grid.unep.ch> και διατίθενται δωρεάν (Πικούνης, 2002).

Τα εδαφολογικά δεδομένα της λεκάνης του Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί ομαδοποιήθηκαν σε 4 κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- i) *Cambisol*: Ανοιχτόχρωμα εδάφη με μικρή ανάπτυξη προφίλ. Αποτελούνται κυρίως από περιδοτίτες γαύρων, ψαμμιτικούς φλύσχεις και ασβεστόλιθους. Εμφανίζουν τη μικρότερη τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και διαθέσιμης υγρασίας.
- ii) *Fluvisol*: Αναφέρεται κυρίως σε αλλουβιακά εδάφη και περιλαμβάνει εκτάσεις γύρω από κοίτες υδατορευμάτων. Εμφανίζουν πολύ μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και μεγάλη διαθέσιμη υγρασία.
- iii) *Luvisol*: Ανοιχτόχρωμα εδάφη με έντονη αργλική στρώση. Αποτελούνται κυρίως από σκληρούς ασβεστόλιθους, γνεύσιους, σχιστόλιθους κ.α. Εμφανίζουν ενδιάμεση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας περίπου ανάλογη με την επόμενη κατηγορία.
- iv) *Regosol*: Εδάφη με βραχώδες υλικό στην επιφάνεια. Περιλαμβάνουν κυρίως τριτογενείς αποθέσεις και εμφανίζουν ενδιάμεση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και διαθέσιμης υγρασίας.



Σχήμα 5.12: Χάρτης κατηγοριών εδαφών (ΕΓΣΑ '87).

Δυστυχώς, η αντιστοίχιση των παραπάνω κατηγοριών δεν μπορεί να γίνει άμεσα με εδάφη της βάσης δεδομένων του SWAT, καθώς αυτή αναφέρεται στην Αμερική και προφανώς

αρκετά δεδομένα διαφοροποιούνται. Το SWAT χρειάζεται δεδομένα για το ανώτερο στρώμα του εδάφους (έως 3 m) για να προσομοιώσει την απορροή, και σε αυτό βασικό ρόλο παίζουν τα μεγέθη της Κορεσμένης Υδραυλικής Αγωγιμότητας (SOL_K) και της διαθέσιμης υγρασίας (SOL_AWC). Οι τιμές αυτές των δεδομένων δεν έγινε δυνατό να μετρηθούν με έρευνα επί τόπου στην περιοχή μελέτης και λόγω του μεγάλου εύρους τιμών που εμφανίζουν, μόνο μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός τους.

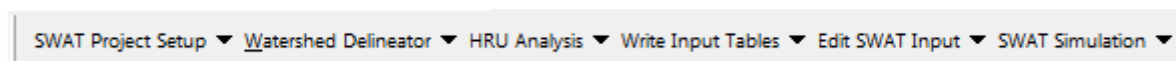
Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ορίστηκαν αρχικά μεγέθη με λογικές τιμές για τους διάφορους σχηματισμούς και, στη συνέχεια, με τη βαθμονόμηση επιλέχθηκαν οι βέλτιστες τιμές, οι οποίες όμως ήταν κοντά στις αρχικές. Οι αρχικές λογικές τιμές που επιλέχθηκαν σχετίζονται με τη φύση του κάθε σχηματισμού. Για παράδειγμα, ο φλύσχος, ως αδιαπέρατο υλικό, είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ανώτερης στρώσης εδάφους σχετικά αδιαπέρατης, άρα εμφανίζει μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Αντίθετα αποτελέσματα έχουν οι τριτογενείς αποθέσεις, που ως διαπερατό υλικό, εμφανίζουν μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

6 Κατάρτιση και βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT για την υπό μελέτη λεκάνη

6.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί διεξοδικά το μοντέλο SWAT ως προς τον τρόπο λειτουργίας και εφαρμογής του στη λεκάνη απορροής που εξετάζεται αλλά και ως προς τον τρόπο που έγινε η βαθμονόμησή του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.3.4 του SWAT 2005 σε περιβάλλον ArcGIS 9.3.1 (Build 3000, Service Pack 1). Επειδή το SWAT παρουσιάζει πολλά προβλήματα ασυμβατότητας κατά το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου, ιδιαίτερα με σύγχρονα λογισμικά, όπως τα Windows Vista ή τα Windows 7, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Windows XP σε αγγλική έκδοση.

Το SWAT εμφανίζεται ως εργαλειοθήκη στο ArcMAP και έχει τη παρακάτω μορφή:



Σχήμα 6.1: Το μενού επιλογών του SWAT.

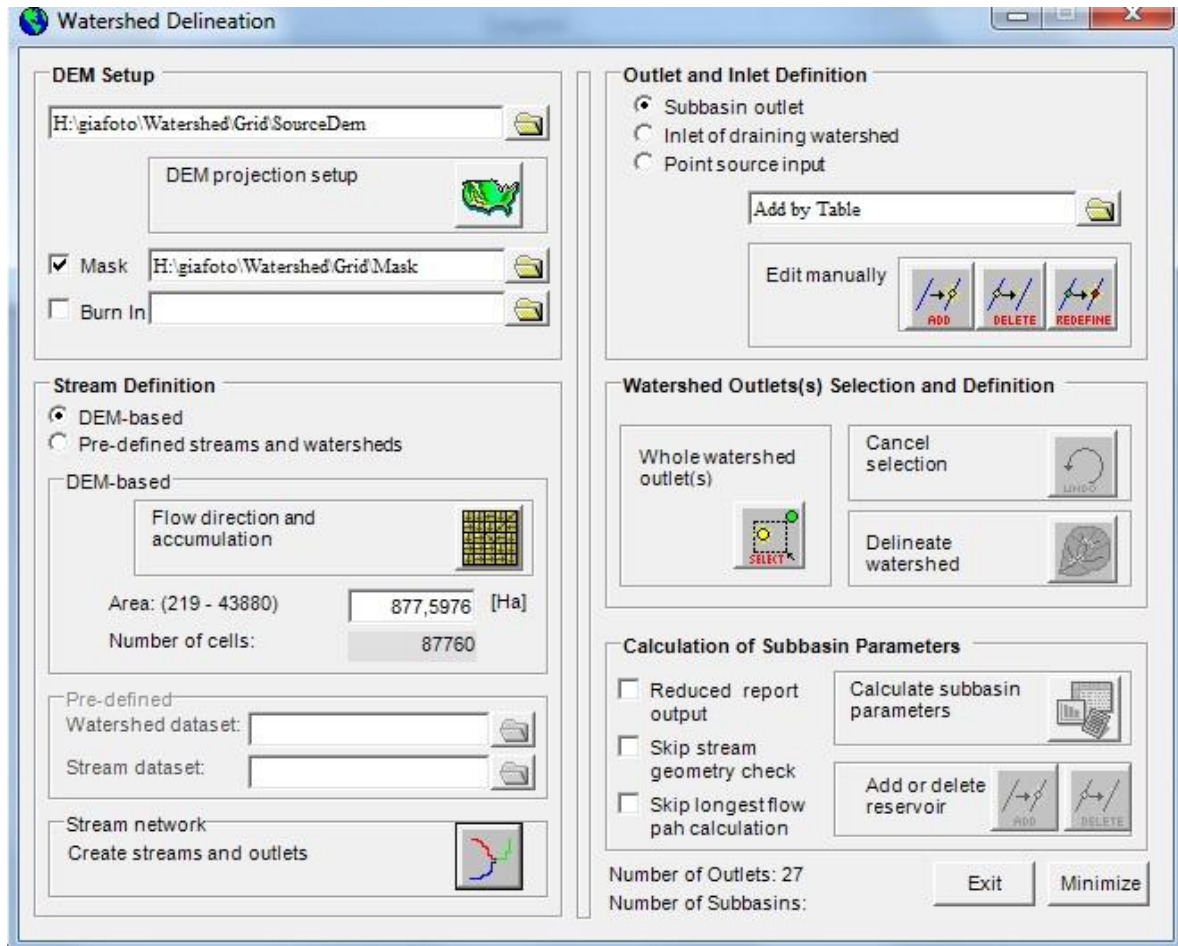
Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να χωριστεί σε έξι στάδια που αντιστοιχούν στις ισάριθμες επιλογές του μενού. Συνοπτικά, στο πρώτο στάδιο (SWAT Project Setup) γίνεται η δημιουργία ενός νέου αρχείου SWAT ή το άνοιγμά ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου. Στο δεύτερο στάδιο (Watershed Delineator) εισάγεται ο χάρτης του ανάγλυφου της περιοχής, τα ρέματα και εν τέλει σχεδιάζεται η λεκάνη απορροής. Στο τρίτο στάδιο (HRU Analysis) εισάγονται οι χάρτες χρήσεων γης και εδάφους και επίσης δημιουργούνται οι κλάσεις των κλίσεων γης με σκοπό τη δημιουργία των hrus (μονάδων υδρολογικής απόκρισης). Στο τέταρτο στάδιο (Write Input Tables) φορτώνονται τα αρχεία που υποδεικνύουν στο λογισμικό τα αρχεία βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών, ενώ στο πέμπτο στάδιο (Edit SWAT Input) γίνεται η αλλαγή των παραμέτρων με σκοπό τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Στο έκτο και τελευταίο στάδιο (SWAT Simulation) γίνεται το «τρέξιμο» του μοντέλου και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων, ενώ περιέχει και εργαλειοθήκη που βοηθά τη ταχύτερη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Σε αυτή τη φάση, πρέπει να γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά στους χάρτες που φορτώνονται στο SWAT. Συγκεκριμένα, οι χάρτες πρέπει να είναι σε μορφή Raster (format:grid) για να τους δεχθεί το αρχείο. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς η συνήθης μορφή Raster έχει format :FGDBR, και θα πρέπει να γίνει η μετατροπή στο επιθυμητό format κάνοντας δεξί κλικ στο αρχείο και μετά *export→raster to different format*. Επίσης, όλοι οι χάρτες θα πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο προβολικό σύστημα. Στη παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε το Ε.Γ.Σ.Α. 87. Ωστόσο, έχει σημασία και η ονομασία του προβολικού συστήματος, καθώς για παράδειγμα το σύστημα GRS 80 και D_GGRS_1987 παρόλο που είναι τα ίδια ακριβώς προβολικά συστήματα, εάν ένας χάρτης βρίσκεται στο ένα σύστημα και ο άλλος στο άλλο θα δημιουργηθεί ασυμβατότητα.


6.2 Εισαγωγή δεδομένων

6.2.1 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Μόλις δημιουργήσουμε ένα αρχείο SWAT, πατάμε την επιλογή *Watershed Delineator*, ώστε να δημιουργηθεί η λεκάνη απορροής. Το Σχήμα 6.2 δείχνει το παράθυρο που εμφανίζεται.

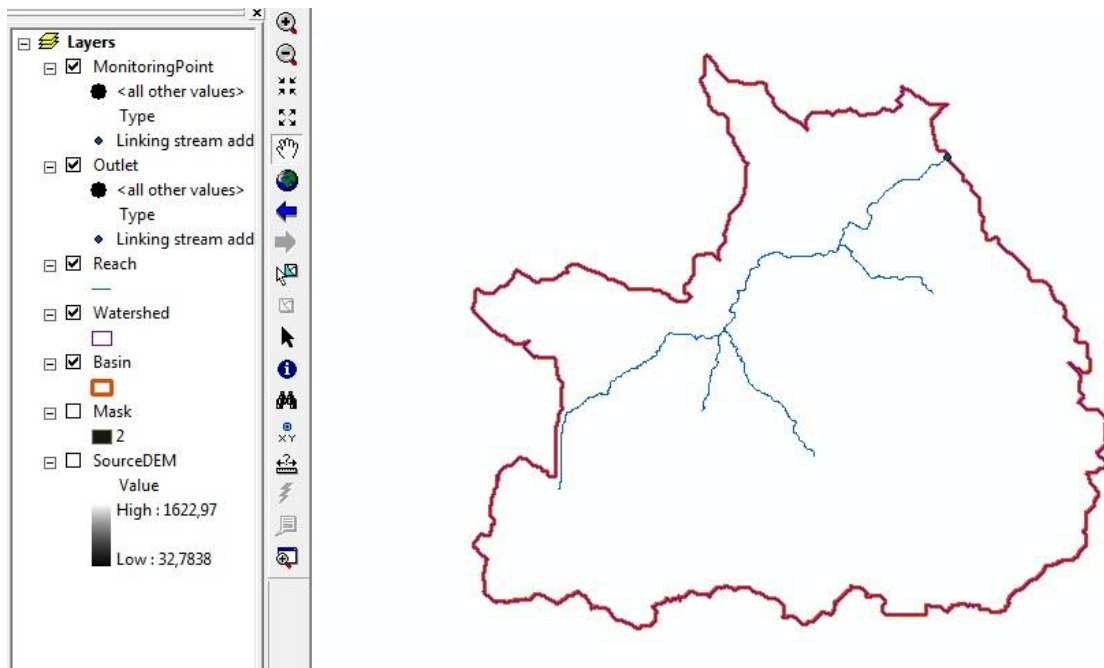


Σχήμα 6.2: Η φόρμα εισαγωγής των δεδομένων για τη δημιουργία της λεκάνης απορροής.

Στην επιλογή DEM Setup φορτώνουμε το αρχείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που έχουμε δημιουργήσει και στη συνέχεια πατάμε την επιλογή  για να ορίσουμε σε τι μονάδες θα είναι το υψόμετρο (εδώ, μέτρα). Στη συνέχεια, εισάγουμε μια μάσκα που έχουμε δημιουργήσει γύρω από τη λεκάνη απορροής ώστε να περιορίσουμε το μοντέλο στην περιοχή μελέτης. Το SWAT, μόνο του, υπολογίζει τη κατεύθυνση των ρεμάτων δημιουργώντας το υδρογραφικό δίκτυο και τις υπολεκάνες με τα σημεία εξόδου για κάθε υπολεκάνη. Συνολικά δημιουργήθηκαν 27 υπολεκάνες αλλά αυτές ενοποιήθηκαν σε μία. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι γιατί η λεκάνη απορροής που μελετάται είναι σχετικά μικρή σε μέγεθος και χρησιμοποιήθηκε ένας «εικονικός» σταθμός για τα μετεωρολογικά δεδομένα, έτσι όπως αυτός προέκυψε με τη βοήθεια της μεθόδου Thiessen από τους τρεις σταθμούς. Επιπλέον, δεν υπήρχαν δεδομένα απορροής για άλλη περιοχή πλην του σημείου εξόδου, στο μελετηθέν φράγμα Παλαιοδερλί. Σε διαφορετική περίπτωση, εφόσον εισάγονταν τρεις σταθμοί σε μια λεκάνη όπου θα υπήρχαν περισσότερες από μία υπολεκάνες, το SWAT μόνο του θα επέλεγε

για κάθε υπολεκάνη τον εγγύτερο μετεωρολογικό σταθμό και δεν θα χρειάζονταν να εφαρμοστεί ούτε η μέθοδος Thiessen, ούτε αναγωγή στο μέσο υψόμετρο λεκάνης, καθώς το SWAT θα χρησιμοποιούσε αυτές τις τιμές βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας αυτούσιες.

Αφού ενοποιήθηκαν οι 27 υπολεκάνες σε μία, επιλέχθηκε το σημείο εξόδου της λεκάνης, αυτό της θέσης του φράγματος, και στη συνέχεια το SWAT σχεδίασε τη λεκάνη απορροής. Το σχήμα 6.3 δείχνει το υδρογραφικό δίκτυο και τα ρέματα που σχεδίασε το SWAT αλλά και το σημείο εξόδου της λεκάνης (μπλε κουκίδα).



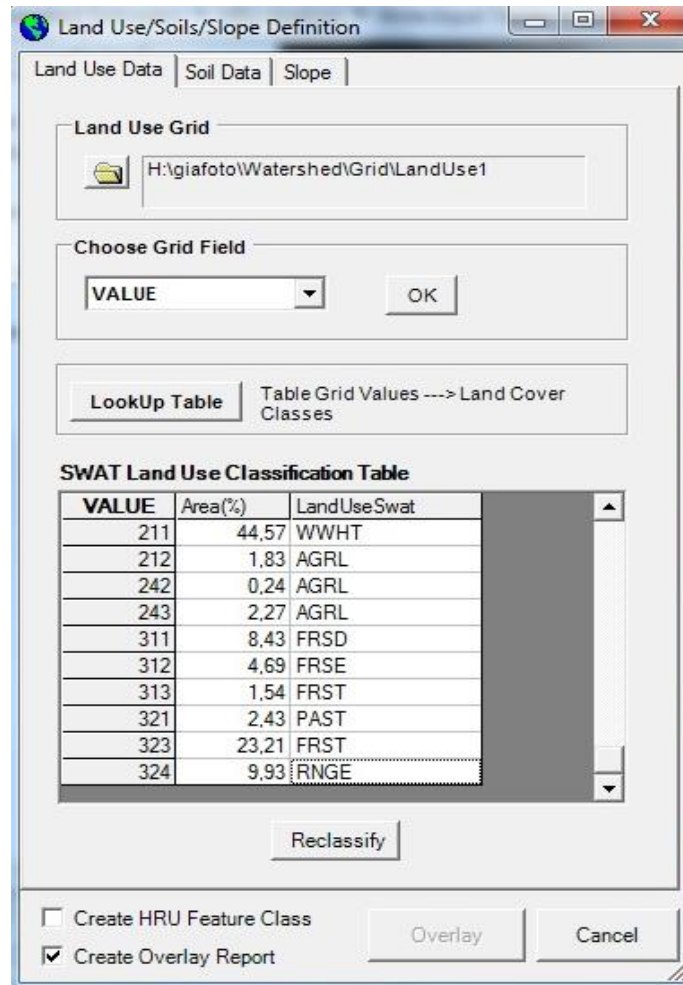
Σχήμα 6.3: Υπολογισμός της λεκάνης απορροής μετά την ενοποίηση των υπολεκανών.

6.2.2 Υπολογισμός Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRU)

Επόμενο στάδιο είναι η εκτίμηση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (hru: Hydrologic Response Units) αφού γίνει η εισαγωγή των χρήσεων γης, των εδαφών και των κλίσεων. Οι μικρές αυτές υδρολογικές ενότητες μέσα στις υπολεκάνες, παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά χρήσεων γης, εδαφολογικών στοιχείων και κλίσεων, δίνοντας τη δυνατότητα να επιτευχθεί λεπτομερέστερη ρύθμιση στη λεκάνη.

Χρήσεις γης

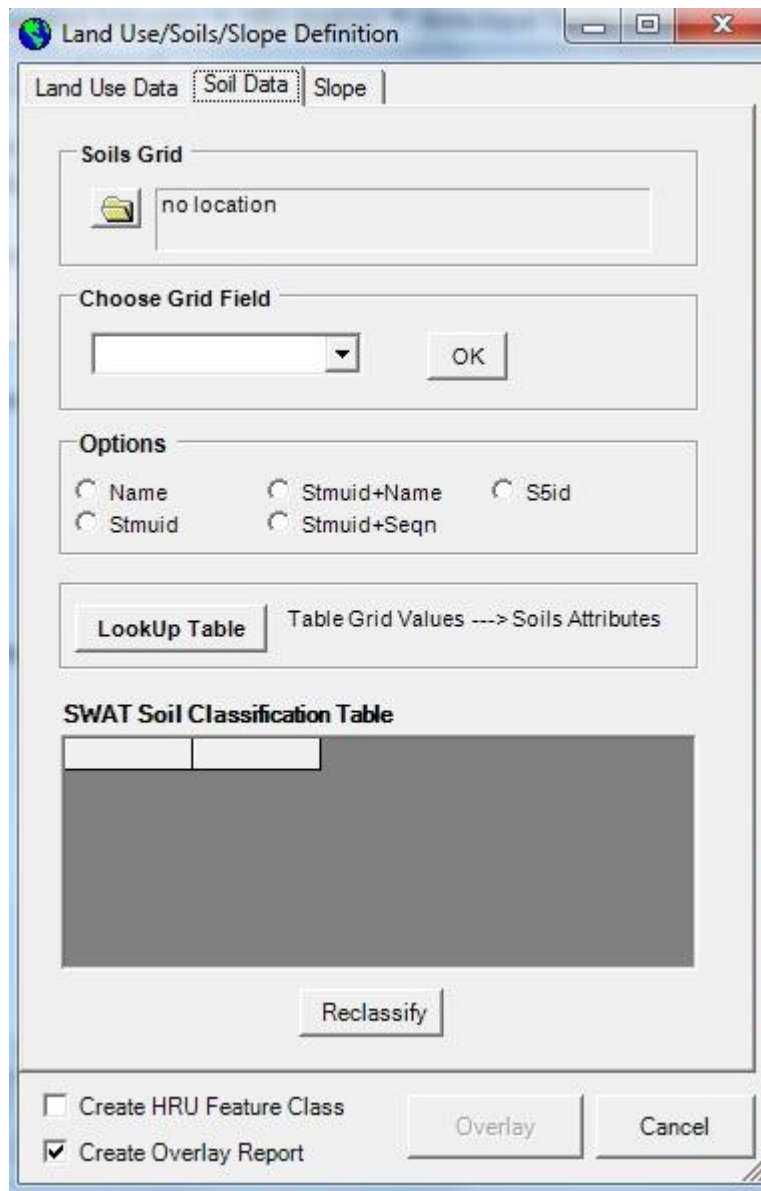
Για τις χρήσεις γης, εισάγεται ο χάρτης που έχει σχεδιαστεί νωρίτερα με τις χρήσεις γης, οι οποίες προέκυψαν με τη βοήθεια του υποβάθρου του Corine και μετά έγινε η αντιστοίχιση των χρήσεων από το Corine σε αυτές του SWAT. Η φόρμα για την εισαγωγή των χρήσεων γης φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 6.4: Φόρμα εισαγωγής χρήσεων γης.

Γεωλογικοί Σχηματισμοί

Για τους γεωλογικούς σχηματισμούς έγινε πάλι η εισαγωγή του αντίστοιχου χάρτη και μετά αντιστοιχίστηκαν οι τέσσερις αυτοί σχηματισμοί με ισάριθμα γεωλογικά στοιχεία του SWAT, των οποίων τα χαρακτηριστικά άλλαξαν ώστε να ανταποκρίνονται στις τιμές των μεταβλητών που επικρατούν στη περιοχή. Η φόρμα εισαγωγής των γεωλογικών σχηματισμών παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.

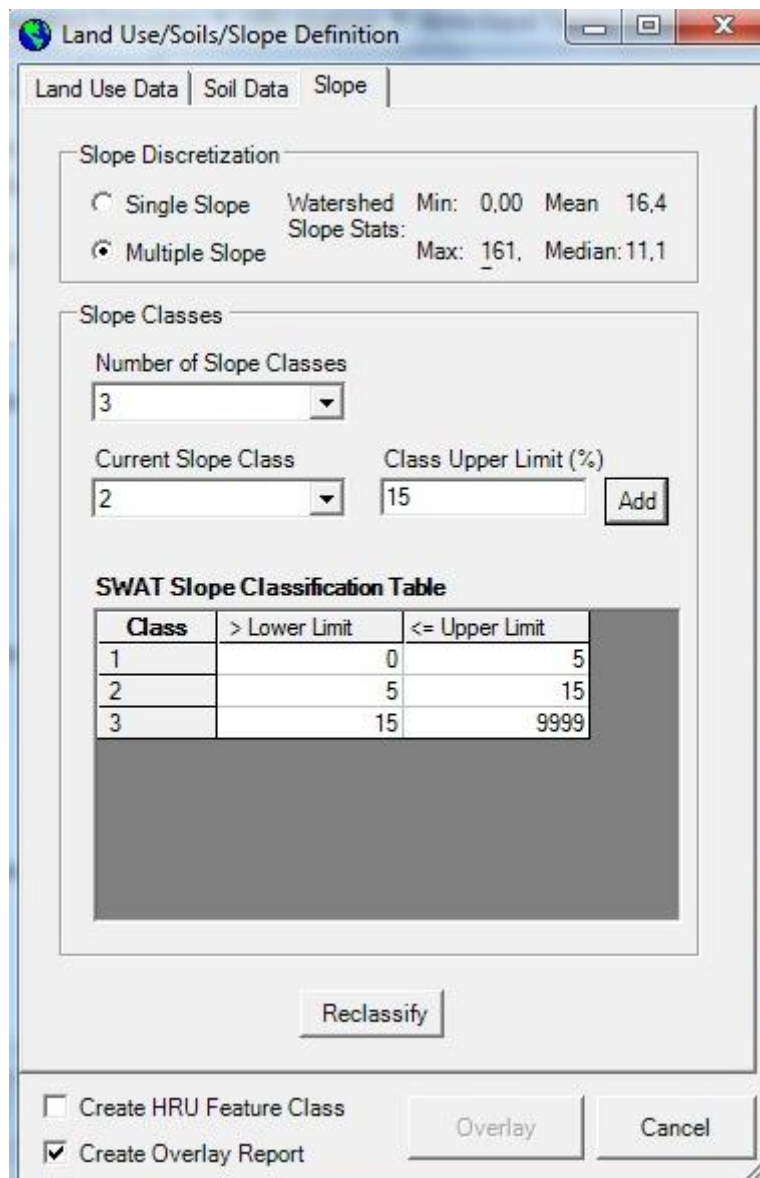


Σχήμα 6.5: Φόρμα εισαγωγής γεωλογικών σχηματισμών.

Κλίσεις

Οι κλίσεις σε μια λεκάνη απορροής επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες βροχής-απορροής. Για παράδειγμα, λεκάνες με ομαλό ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις εμφανίζουν μικρό χρόνο συγκέντρωσης του περισσέυματος βροχής και, συνεπώς, η πιθανότητα διήθησης μειώνεται σημαντικά (Τσακίρης, 1995).

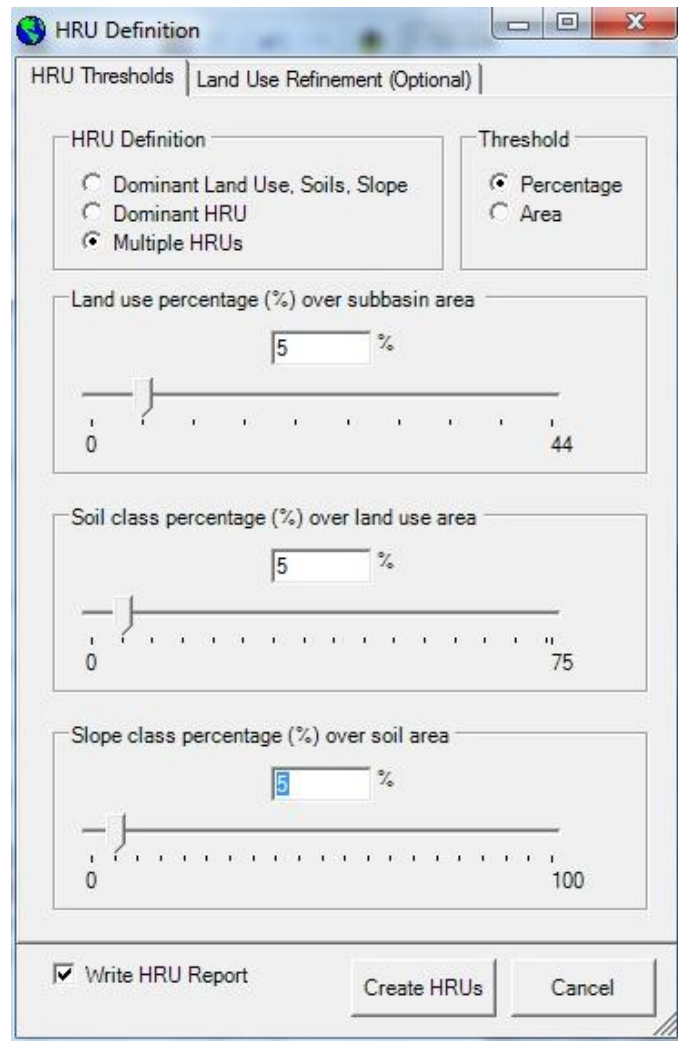
Η έκφραση του αναγλύφου και των κλίσεων της λεκάνης παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες που απορρέουν από την επιδίωξη έκφρασης τρισδιάστατων μεταβολών με απλούς δέκτες (Gregory και Walling, 1983). Για την έκφραση αυτών των χαρακτηριστικών, σήμερα υπάρχουν απλοί δέκτες, με συνδυασμούς και με επιλεγμένες μετρήσεις κλίσεων. Ωστόσο, επειδή κανένας από τους παραπάνω δέκτες δεν καταδεικνύει την κατανομή του αναγλύφου και των κλίσεων στη λεκάνη, χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατος χάρτης, ο οποίος προέκυψε από τη ψηφιοποίηση των τοπογραφικών χαρτών. Ο χάρτης αυτός διαιρέθηκε σε υποπεριοχές ομοιόμορφης κλίσης, όπως φαίνεται και στο χάρτη κλίσεων (βλ. Παράρτημα Β, Σχήμα 3). Η φόρμα εισαγωγής των χαρτών στο SWAT παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 6.6: Φόρμα εισαγωγής κλίσεων.

Ορισμός Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs)

Αφού έχουν εισαχθεί τα δεδομένα για τις χρήσεις γης, τα εδαφολογικά στοιχεία και τις κλίσεις, θα πρέπει να οριστεί η ακρίβεια με την οποία θα σχηματιστούν οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης. Επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη ανάλυση καθώς ως ελάχιστο ποσοστό για τον ορισμό νέας μονάδας ορίστηκε 5% για χρήσεις γης, 5% για εδαφολογικά στοιχεία και 5% για τις κλίσεις. Η ανάλογη φόρμα φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:

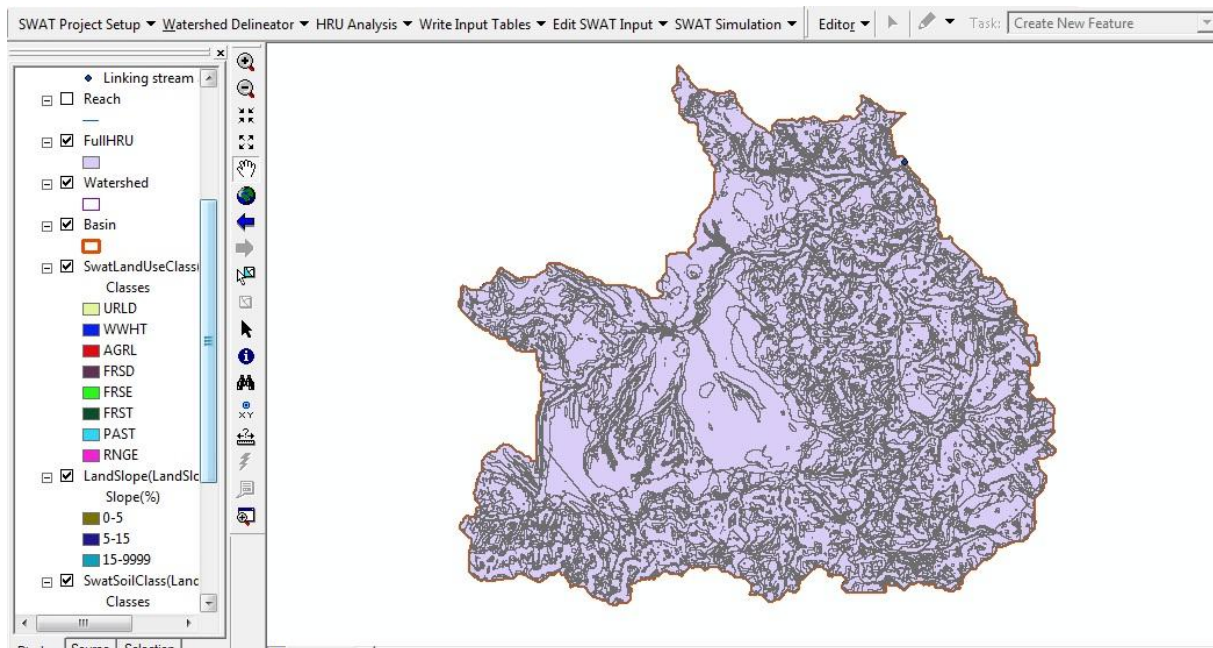


Σχήμα 6.7: Φόρμα ορισμού ανάλυσης για σχηματισμό HRU.

Όσον αφορά τα εδαφολογικά στοιχεία, όλα συμπεριλήφθησαν ως ξεχωριστές μονάδες καθώς και οι τέσσερις σχηματισμοί είχαν ποσοστό έκτασης μεγαλύτερο από 5%. Ωστόσο, όσον αφορά τις χρήσεις γης, κάποιες χρήσεις γης με ποσοστό έκτασης μικρότερο από 5% δεν συμπεριλήφθησαν. Συνολικά, δημιουργήθηκαν 27 HRUs. Τελικά, οι χρήσεις γης οι οποίες θα επηρεάσουν από εδώ και πέρα τη βαθμονόμηση παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6.1: Πίνακας τελικών χρήσεων γης.

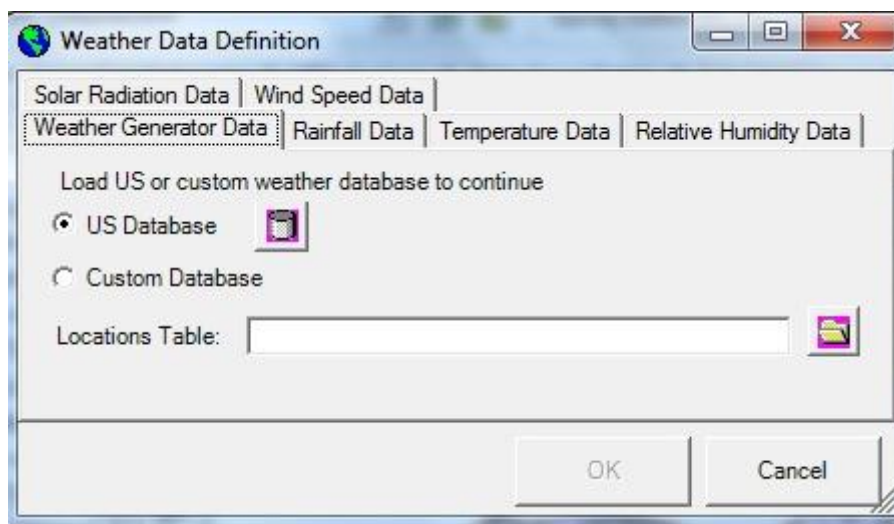
α/α	Κωδικός	Χρήση γης	SWAT	Ποσοστό
1	211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	WWHT	50.84%
2	311	Δάσος Πλατύφυλλων	FRSD	9.82%
3	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	28.22%
4	324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	RNGE	11.32%



Σχήμα 6.8: Δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs).

6.2.3 Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων

Το τελευταίο στάδιο πριν τη βαθμονόμηση του μοντέλου, περιλαμβάνει την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, μετά τον υπολογισμό των HRUs επιλέγουμε το κουμπί *write input table* → *weather station*. Πατώντας αυτή την επιλογή εμφανίζεται η φόρμα που φαίνεται στην εικόνα 6.9.



Σχήμα 6.9: Φόρμα εισαγωγής μετεωρολογικών δεδομένων.

Τα αρχεία που εισάγονται βρίσκονται σε μορφή .dbf. Για την δημιουργία αυτών των αρχείων χρειάζεται το λογισμικό Microsoft Excel 2003. Ένα αρχείο που βρίσκεται σε excel2003, μπορεί να μετατραπεί σε *.dbf αρχείο, από την επιλογή *Αποθήκευση ως* → *dbf 4(dBASE IV)*, αφού πρώτα επιλεγούν τα κελιά που θέλει ο χρήστης να τους αλλάξει format. Το SWAT δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη είτε να χρησιμοποιήσει τη βάση δεδομένων του SWAT που

αναφέρεται στην Αμερική (Επιλογή US Database), είτε να χρησιμοποιήσει τις δικές του μετρήσεις. Προφανώς επιλέχθηκε το δεύτερο.

Στην πρώτη επιλογή (Weather Generator Data) εισάγονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί, με το όνομα, τις συντεταγμένες και το γεωγραφικό πλάτος τους. Το αρχείο με το όνομα wgn φορτώθηκε στην επιλογή.

ID	NAME	XPR	YPR	LAT
1	enipeas	367896	4328386	39,1

Σχήμα 6.10: Το αρχείο wgn.dbf που εισήχθη.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η δεύτερη επιλογή (Rainfall Data) και αφού επιλέχθηκε ότι τα δεδομένα θα είναι ημερήσια, φορτώθηκε το αρχείο rcp.dbf. Εδώ, πρέπει να τονιστεί πως το αρχείο rcp.dbf δεν περιέχει τα ημερήσια ύψη βροχής ανηγμένα στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης, αλλά το όνομα του αρχείου που περιέχει αυτά τα δεδομένα και τις συντεταγμένες του βροχομετρικού σταθμού.

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	ENIP_P	367896	4328386	582

Σχήμα 6.11: Το αρχείο rcp.dbf που εισήχθη.

Το πρόγραμμα που διαβάζει το παραπάνω αρχείο, ψάχνει να βρει το αρχείο ENIP_P.dbf που περιέχει τα ημερήσια δεδομένα. Όλα τα αρχεία που φορτώνονται στο Weather Generator Data βρίσκονται στον ίδιο φάκελο για αποφυγή καθυστερήσεων και προβλημάτων του SWAT. Το αρχείο ENIP_P με τα ημερήσια δεδομένα παρουσιάζεται παρακάτω. Ωστόσο, επειδή σε αυτό το αρχείο υπάρχουν δεδομένα ημερήσια για 12 υδρολογικά έτη, θα ήταν αδύνατο να παρουσιαστεί ολόκληρο. Γι' αυτό το λόγο, ενδεικτικά παρουσιάζονται οι πρώτες ημέρες.

OID	DATE	PCP
0	1/10/1975	0
1	2/10/1975	0
2	3/10/1975	0
3	4/10/1975	2,6
4	5/10/1975	10,2
5	6/10/1975	12,8
6	7/10/1975	0,2
7	8/10/1975	0
8	9/10/1975	0
9	10/10/1975	0,9
10	11/10/1975	0,3
11	12/10/1975	0,1
12	13/10/1975	0

Σχήμα 6.12: Το αρχείο ENIP_P.dbf με τα ημερήσια ύψη βροχής σε mm.

Όμοια και για τις ημερήσιες θερμοκρασίες, στην επιλογή Temperature Data φορτώνουμε το αρχείο temp.dbf, που υποδεικνύει στο SWAT σε ποιο αρχείο υπάρχουν οι ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το αρχείο temp.dbf και το αρχείο ENIP_T.dbf.

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	ENIP_T	367896	4328386	582

Σχήμα 6.13: Το αρχείο temp.dbf.

OID	DATE	MAX	MIN
0	1/10/1975	25	11
1	2/10/1975	25	12
2	3/10/1975	23	10
3	4/10/1975	20	10
4	5/10/1975	25	11
5	6/10/1975	22	9
6	7/10/1975	12	8
7	8/10/1975	16	6
8	9/10/1975	22	6
9	10/10/1975	18	7
10	11/10/1975	19	9
11	12/10/1975	23	12
12	13/10/1975	26	12
13	14/10/1975	19	13
14	15/10/1975	21	5
15	16/10/1975	21	6
16	17/10/1975	19	8
17	18/10/1975	24	11
18	19/10/1975	20	9
19	20/10/1975	19	11
20	21/10/1975	13	6

Σχήμα 6.14: Αρχείο ENIP_T.dbf με τις ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες σε °C.

Στη συνέχεια, με την επιλογή *write all* το SWAT γράφει όλα τα αρχεία. Επειδή όμως για το μετεωρολογικό σταθμό που εισήχθη από το αρχείο wgn.dbf με το όνομα *enipeas* δεν διαθέτει δεδομένα, ζητά από το χρήστη να εισάγει τα δεδομένα για το σταθμό. Από την επιλογή *Edit SWAT Input*→*Databases*→*User Weather Stations*, εισάγονται οι μέσες μηνιαίες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες, οι τυπικές τους αποκλίσεις, οι μηνιαίες τιμές ταχύτητας του ανέμου και σχετικής υγρασίας και τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής.

6.3 Βαθμονόμηση του SWAT και παρουσίαση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων

6.3.1 Γενικά

Αφού υπολογίστηκε η λεκάνη απορροής από το SWAT και εισήχθησαν τα δεδομένα, επόμενο στάδιο είναι η βαθμονόμηση. Κατά τη βαθμονόμηση μεταβάλλονται κάποιες μεταβλητές με σκοπό οι απορροές που θα προκύψουν από το SWAT και οι παρατηρημένες τιμές που υπάρχουν για τη λεκάνη ανάντη του φράγματος Παλαιοδερλί να είναι κοντά.

Κατά τη βαθμονόμηση, πρέπει να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους, για οποίες το μοντέλο θα έχει τον υψηλότερο δείκτη Nash και την καλύτερη προσαρμογή με βάση τα μετρημένα μεγέθη.

Το SWAT δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη είτε να κάνει αυτόματη βαθμονόμηση (Auto Calibration) είτε να κάνει μόνος του χειροκίνητη βαθμονόμηση με τη μέθοδο δοκιμής - λάθους. Παρόλο που η δεύτερη μέθοδος είναι μακράν πιο επίπονη, καθώς κάθε φορά επιλέγεται η μεταβολή μίας παραμέτρου γίνεται η επαλήθευση της για να ελεγχθεί αν η μεταβολή βελτιώνει ή χειροτερεύει το τελικό αποτέλεσμα, επιλέχθηκε ακριβώς αυτή για τη

βαθμονόμηση του μοντέλου, ώστε ο χρήστης να κατανοήσει καλύτερα τη λεκάνη αλλά και τις μεταβλητές που επηρεάζουν τελικά το μοντέλο.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: Είτε από την επιλογή *Edit SWAT Input* είτε από την επιλογή *SWAT Simulation* → *Manual Calibration Helper*. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των σημαντικότερων παραμέτρων με τις τιμές που έλαβαν κατά τη βαθμονόμηση.

Αρχεία υπόγειου νερού *.gw

Το SWAT χωρίζει το υπόγειο νερό σε δύο κλάσεις, στο νερό που κινείται στον επιφανειακό ελεύθερο υδροφόρο και επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα και σε αυτό που τροφοδοτεί το υδατόρευμα εκτός λεκάνης απορροής. Πάνω από τον επιφανειακό υδροφόρο βρίσκεται η ζώνη ριζοστρώματος. Τα αρχεία .gw ρυθμίζουν την κίνηση του υπόγειου νερού μέσα σε αυτές τις στρώσεις αλλά και από τη μία στρώση στην άλλη. Οι σημαντικότερες παράμετροι περιγράφονται παρακάτω:

1. *Παράγοντας Άλφα (Alpha factor-ALPHA_BF)*: Η καμπύλη αυτή ρυθμίζει την καμπύλη ύφεσης της παροχής του υπόγειου νερού. Μεταβάλλεται από 0 έως 1 και λαμβάνει μικρές τιμές (κοντά στο μηδέν) για απότομη καμπύλη ύφεσης. Στη παρούσα μελέτη πήρε τιμή ALPHA_BF=0.02 days.
2. *Χρόνος υστέρησης υπόγειου νερού (GW_DELAY)*: Είναι ο χρόνος σε ημέρες που απαιτείται για το νερό που φεύγει από το βάθος ριζοστρώματος να φτάσει στον επιφανειακό υδροφόρο. Η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει αρκετά το υδατικό ισοζύγιο και εδώ πήρε την τιμή GW_DELAY=40 days.
3. *Συντελεστής επατροφοδότησης (Revar coefficient-GW_REVAP)*: Η μεταβλητή αυτή ελέγχει τον όγκο του νερού που θα κινηθεί από τον ρηχό υδροφόρο προς τη ζώνη ριζοστρώματος, ως αποτέλεσμα της έλλειψης εδαφικής υγρασίας και της πρόσληψης νερού από δέντρα και θάμνους με βαθιές ρίζες. Καθώς η παράμετρος αυτή πλησιάζει το μηδέν, η κίνηση του νερού προς τη ζώνη ριζοστρώματος περιορίζεται και αντιστροφή. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.02 και 0.2 ενώ εδώ πήρε την τιμή 0.02.
4. *Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφόρο (RCHRG_DP)*: Η παράμετρος αυτή ορίζει το ποσοστό του νερού της ζώνης ριζοστρώματος που τροφοδοτεί το βαθύ υδροφόρο. Η τιμή κινείται μεταξύ 0 και 1. Εδώ βέλτιστη τιμή ήταν 0.01.
5. *Όριο νερού επανατροφοδότησης (REVAPMN)*: Η μεταβλητή αυτή ορίζει το ελάχιστο ύψος νερού (mm) στον επιφανειακό υδροφόρο ώστε να πραγματοποιηθεί η κίνηση του νερού προς τη ζώνη ριζοστρώματος. Πήρε την τιμή 500 mm.
6. *Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφόρου (GW_SPYLD)*: Η μεταβλητή αυτή υπολογίζει τον όγκο του νερού που αποστραγγίζεται, με τη βοήθεια της βαρύτητας, προς το συνολικό όγκο βράχου (m^3/m^3). Η παράμετρος αυτή έχει μηδαμινή επίδραση στην απορροή.
7. *Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)*: Το όριο του νερού στο ρηχό υδροφόρο (mm) που απαιτείται για να συμβεί επιστρέφουσα ροή. Η ροή του υπόγειου νερού στο υδατόρευμα επιτρέπεται μόνο αν το βάθος του νερού στον επιφανειακό υδροφόρο είναι ίσο ή μεγαλύτερο του GWQMN. Εδώ πήρε την τιμή 800 mm.

Αρχεία υπολεκανών *.sub

Τα αρχεία υπολεκανών χρησιμεύουν για την περιγραφή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών των HRUs. Απ' όλες τις παραμέτρους, αυτή που επηρεάζει περισσότερο την απορροή είναι ο αριθμός καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II. Οι τιμές των καμπυλών προσδιορίστηκαν για κάθε χρήση γης ξεχωριστά και μετά με πολλές δοκιμές προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές. Οι αλλαγές των τιμών μπορούσαν να γίνουν είτε ξεχωριστά για κάθε HRU είτε για κάθε χρήση γης ξεχωριστά. Στην περίπτωση που υπήρχαν ξεχωριστές υπολεκάνες, οι αλλαγές θα μπορούσαν να γίνουν και για κάθε υπολεκάνη.

Τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των HRUs, όπως η μέση κλίση του εδάφους προκύπτουν με βάση τους ψηφιακούς χάρτες και συνήθως δεν χρειάζονται αλλαγή. Το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές Manning. Ενδεικτικά οι παράμετροι είναι:

1. *Αριθμός καμπύλης CNII*: Οι αριθμοί αυτοί προκύπτουν ανάλογα με τις χρήσεις γης που επικρατούν στην περιοχή και αναφέρονται στην υδρολογική κατάσταση II. Το SWAT, κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, αλλάζει τις τιμές του CN ανάλογα με την εκάστοτε υγρασία του εδάφους αλλά και τη κλίση. Μεγάλες τιμές του CN προκαλούν μεγαλύτερες απορροές και κατά συνέπεια αύξηση των πλημμυρικών αιχμών. Στην προκειμένη περίπτωση οι αρχικές τιμές του CNII, της βάσης δεδομένων του SWAT για τις χρήσεις γης, έπρεπε να μεταβληθούν και οι βέλτιστες τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.2: Νέες τιμές CNII για τις υφιστάμενες χρήσεις γης.

a/a	Κωδικός	Χρήση γης	SWAT	Νέες τιμές CNII			
				A	B	C	D
1	211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	WWHT	39	66	73	76
2	311	Δάσος Πλατύφυλλων	FRSD	45	66	77	83
3	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	36	60	73	79
4	324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	RNGE	49	69	79	84

2. *Μέση κλίση υδατορευμάτων*: Υπολογίζεται από το SWAT, κατά προσέγγιση, από την υψομετρική διαφορά του πιο απομακρυσμένου σημείου της υπολεκάνης και της εξόδου της υπολεκάνης, και έχει την ίδια τιμή για όλα τα HRU.
3. *Υδραυλική αγωγιμότητα κοίτης*: Είναι ο ρυθμός με τον οποίο διηθείται το νερό που κινείται στα υδατορεύματα, μέσα στο έδαφος μέσω της αλλουβιακής κοίτης. Η τιμή είναι σε mm/h και χρειάζεται μείωση εφόσον οι απώλειες του νερού που κινείται στα υδατορεύματα είναι πολύ μεγάλες.

4. *Συντελεστής Manning*: Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί δύο συντελεστές Manning: ο ένας περιγράφει τη ροή μέσα στα υδατορεύματα με τιμή 0.014 και ο άλλος περιγράφει την επίγεια ροή με τιμή 0.15.
5. *Μέση κλίση εδάφους*: Αναφέρεται στη κλίση του εδάφους σε m/m. Η τιμή αυτή είναι ίδια για όλα τα HRUs μέσα σε μία υπολεκάνη. Έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενες χρήσεις του μοντέλου ότι η αλλαγή της τιμής της κλίσης του εδάφους μπορεί να βελτιώσει την προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών, ωστόσο εδώ δεν επιχειρήθηκε μια τέτοια αλλαγή.
6. *Θερμοβαθμίδα*: Η μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας ανά 1000 m υψομέτρου. Στην προκειμένη περίπτωση υπολογίστηκε ίση με $-5.5^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$.
7. *Συντελεστής ESCO*: Η παράμετρος αυτή ρυθμίζει την κατανομή της εξάτμισης από το έδαφος με το βάθος, για να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως η επίδραση των τριχοειδών φαινομένων και ρωγμών. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 ενώ στην προκειμένη περίπτωση έλαβε τιμή 0.35.

Αρχεία εδάφους *.sol

Τα αρχεία εδάφους περιγράφουν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την εδαφική σύσταση της περιοχής. Αυτά τα αρχεία επηρεάζουν την προσομοίωση κατά δύο τρόπους, αφενός, όσον αφορά το υδατικό ισοζύγιο, υπεισέρχονται παράγοντες όπως η διαπερατότητα του εδάφους και η διαθέσιμη υγρασία, και αφετέρου, στο τομέα των ποιοτικών χαρακτηριστικών όπου ρυθμίζουν τη συγκέντρωση σε νιτρικά. Οι σημαντικότερες παράμετροι αναφέρονται παρακάτω ενώ ακολουθεί ο πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων για τους γεωλογικούς σχηματισμούς.

1. *Το μέγιστο βάθος ριζοστρώματος*: Η παράμετρος αυτή εισάγεται στις διεργασίες κίνησης του υπόγειου νερού κατακόρυφα. Εδώ χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1500 mm.
2. *Το μέγιστο βάθος στρώσης*: Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα για διαχωρισμό του εδαφικού προφίλ σε έως και 10 διαφορετικές στρώσεις. Ωστόσο, το σύνηθες είναι η χρήση 3 ή 4 στρώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 3 στρώσεις με κάθε στρώση να έχει κατακόρυφο πάχος 500 mm.
3. *Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC)*: Η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το υδατικό ισοζύγιο. Περιγράφει τον όγκο νερού που διατίθεται στα φυτά, όταν το έδαφος βρίσκεται σε υδατοϊκανότητα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ως νερό που ελευθερώνεται μεταξύ υδατοϊκανότητας και του σημείου μαράνσεως ενώ η συνήθης τιμή είναι από 0.08 έως 0.35 mm H₂O/mm εδάφους.
4. *Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K)*: Και αυτή η παράμετρος επηρεάζει αρκετά το υδατικό ισοζύγιο. Περιγράφει την ευκολία κίνησης του νερού στο έδαφος όταν είναι κορεσμένο, συνδέοντας την ταχύτητα ροής του νερού στο έδαφος με την εδαφική κλίση και υπολογίζεται σε mm/h. Συνήθης τιμή είναι από 1 έως 100 mm/h.
5. *Η περιεκτικότητα σε ιλό, άμμο και άργιλο*: Η αναλογία αυτή επηρεάζει κυρίως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

Πίνακας 6.3: Οι τιμές των παραμέτρων των αρχείων .sol για τις κατηγορίες εδάφους.

α/α	Κατηγορία Εδάφους	Κατηγορία υδροπερατότητας	SOL_K (mm/hr)	SOL_AWC (mm H ₂ O/mm εδάφους)
1	Fluvisol	A	73	0.30
2	Luvisol	D	42	0.30
3	Regosol	B	73	0.30
4	Cambisol	A	9	0.30

Αρχεία διαχείρισης *.mgt

Τα αρχεία αυτά σχετίζονται με τις ανθρωπογενείς πληροφορίες, περιγράφοντας τις πρακτικές διαχείρισης του νερού και του εδάφους στη λεκάνη απορροής. Συγκεκριμένα, τα αρχεία αυτά παρουσιάζουν πληροφορίες για τη σπορά, το θερισμό, την άρδευση και τέλος, την χρήση εντομοκτόνων και φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες. Τα αρχεία αυτά επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της λεκάνης ενώ παίζουν ρόλο στα ποσοτικά χαρακτηριστικά εφόσον η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε αγροτική έκταση. Σε αυτό ρόλο παίζουν και οι χρήσεις γης. Συγκεκριμένα, σε αυτή τη διπλωματική εργασία, τα αρχεία αυτά δεν χρειάστηκε να μεταβληθούν γιατί η πλειοψηφία των καλλιεργειών είναι σιτάρι, το οποίο θεωρείται πως δεν χρειάζεται άρδευση. Αν ήταν βαμβάκι, για παράδειγμα, θα χρειαζόταν να συμπεριληφθεί στη μελέτη η άρδευση και επίσης να μελετηθεί αν το νερό αυτό προέρχεται από άλλη λεκάνη ή χρησιμοποιείται το υπόγειο και το επιφανειακό νερό της λεκάνης.

Αρχεία διαχείρισης νερού *.wus

Τα αρχεία αυτά περιγράφουν την ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται για καταναλωτική χρήση μέσα στη λεκάνη απορροής. Γίνεται η παραδοχή ότι το νερό που απομακρύνεται χάνεται από το σύστημα. Ο ρόλος των αρχείων αυτών είναι να προσομοιώνουν το νερό που απομακρύνεται για την άρδευση περιοχών εκτός λεκάνης ή για αστικές και βιομηχανικές χρήσεις. Εμπεριέχουν πληροφορίες για τη μέση ημερήσια απομάκρυνση νερού από ταμειυτήρες, από το τμήμα υδατορεύματος που βρίσκεται σε κάθε HRU και από το βαθύ υδροφορέα, σε μηνιαία βάση.

Αρχεία χημικών εδάφους *.chm

Τα αρχεία αυτά λειτουργούν ως συνέχεια των αρχείων .sol δίνοντας και άλλες πληροφορίες για τις χημικές ιδιότητες της πρώτης εδαφικής στρώσης. Χρησιμεύουν στη ποιοτική ανάλυση της λεκάνης, περιλαμβάνοντας πληροφορίες για την αρχική συγκέντρωση σε εντομοκτόνα, οργανικό άζωτο και άνθρακα. Στη παρούσα μελέτη, αυτά τα αρχεία δεν άλλαξαν.

Αρχεία υδατορεύματος *.rte

Τα αρχεία αυτά χρησιμεύουν στη περιγραφή ροής του νερού και τη μεταφορά φερτών και εντομοκτόνων με παραμέτρους όπως η γεωμετρία των αγωγών, ο συντελεστής Manning, η υδραυλική αγωγιμότητα της κοίτης του υδατορεύματος, η ταχύτητα διάχυσης, αντίδρασης και αποικοδόμησης των εντομοκτόνων κατά την κίνησή τους στο υδατόρευμα.

Αρχεία αναχωμάτων *.pnd

Τα αρχεία αυτά χρησιμεύουν στη περιγραφή της λειτουργίας των μικρών αναχωμάτων κατά μήκος του υδατορεύματος. Όταν υπερβληθεί η χωρητικότητά τους, τα αναχώματα αυτά

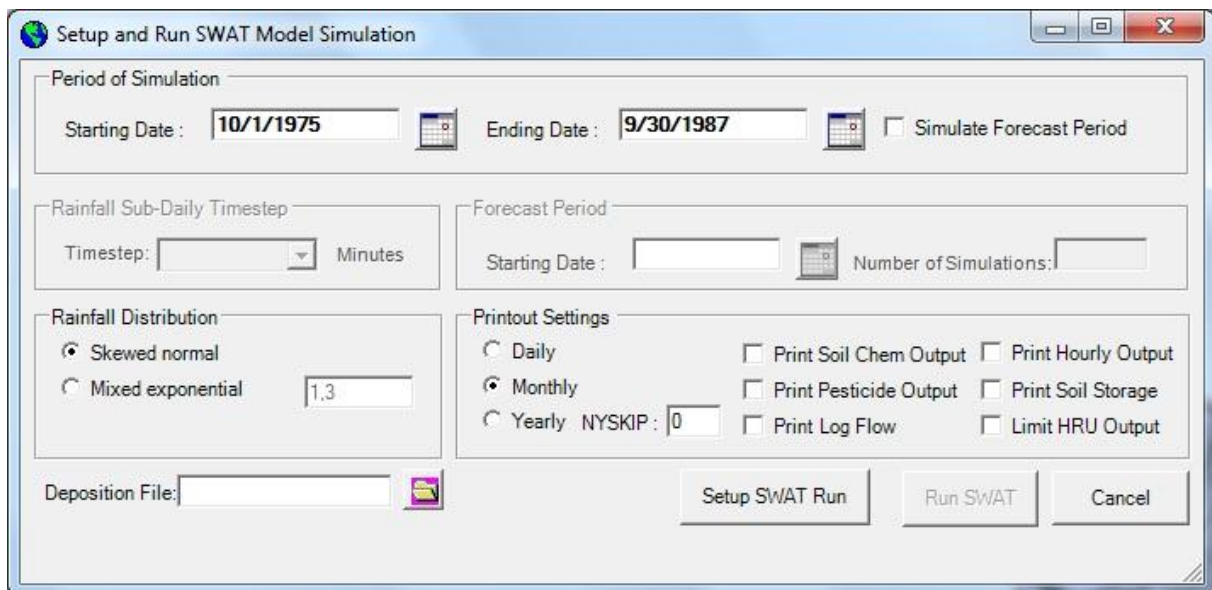
υπερχειλίζουν και, έτσι με τη βοήθεια αυτών των αρχείων, είναι δυνατή η συγκράτηση φερτών υλικών αλλά και ο έλεγχος των διεργασιών της αποικοδόμησης θρεπτικών. Παρεμφερή λειτουργία έχουν και τα αρχεία .res, τα οποία, βέβαια, βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλους ταμιευτήρες.

Αρχεία ποιοτικών χαρακτηριστικών *.swq

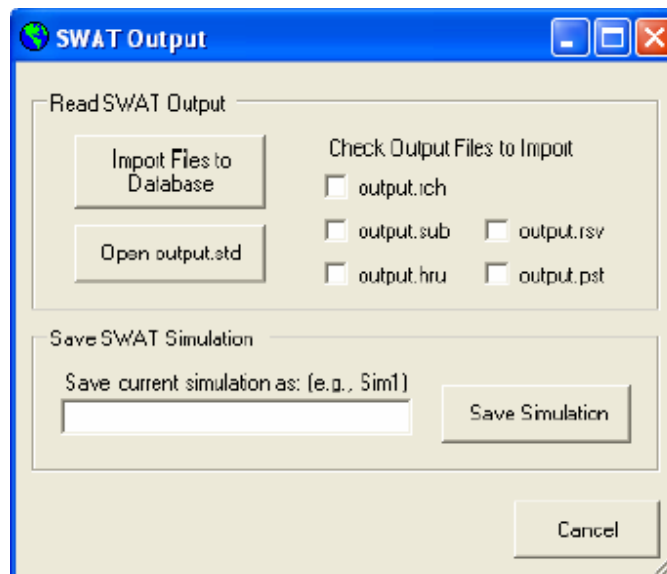
Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιούνται σε ποιοτικές αναλύσεις και δεν μεταβλήθηκαν σε αυτή τη μελέτη. Εμπεριέχουν πληροφορίες για το νερό στο υδατόρευμα, όπως είναι οι αρχικές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, αμμωνίας, νιτρικών κ.α.

6.4 Εκτέλεση του SWAT

Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα δεδομένα, μένει να γίνει η εκτέλεση του μοντέλου. Αυτή γίνεται από τα εργαλεία *Simulation*→*Run SWAT*. Πατώντας αυτή την επιλογή προκύπτει το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων είτε σε ημερήσιο, είτε σε μηνιαίο είτε σε ετήσιο βήμα. Για να διαβαστούν τα αποτελέσματα επιλέγεται το *Read SWAT Output* (Σχήμα 6.15), και επιλέγεται το *output.rch*, το οποίο εμφανίζει τις απορροές σε m^3/s έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση τους με τις μετρημένες απορροές που είναι στην ίδια μονάδα μέτρησης.



Σχήμα 6.14: Φόρμα εκτέλεσης του SWAT.



Σχήμα 6.15: Φόρμα εξαγωγής αποτελεσμάτων.

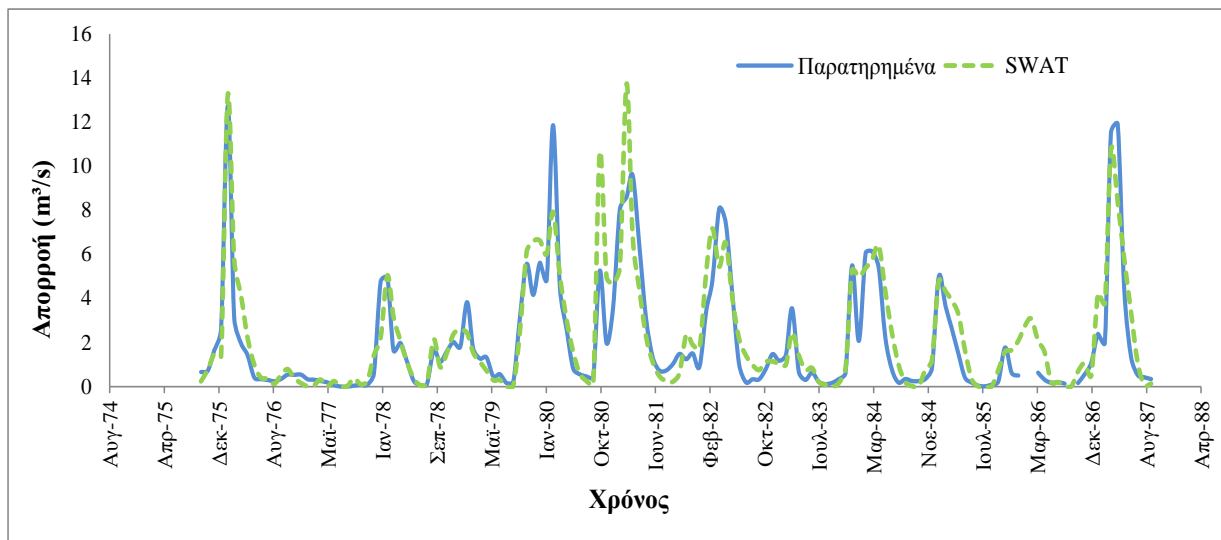
6.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.5.1 Έλεγχος αποτελεσμάτων

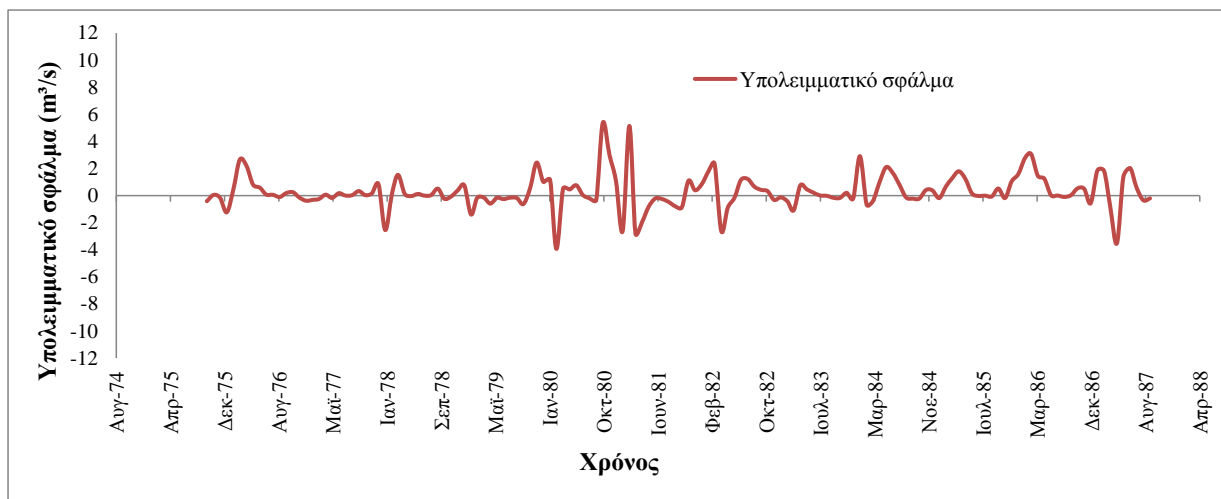
Η πιο σημαντική φάση της βαθμονόμησης είναι ο έλεγχος των αποτελεσμάτων, ώστε η βαθμονόμηση να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία αλλά και οι τιμές των τελικών παραμέτρων να έχουν λογικές τιμές που ανταποκρίνονται στα δεδομένα της περιοχής.

Για να γίνει ο έλεγχος της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής NSE. Συγκεκριμένα, σε κάθε βαθμονόμηση που άλλαζε κάποια παράμετρος, ο δείκτης αυτός άλλαζε και ανάλογα αν πλησίαζε τη μονάδα ή απομακρυνόταν, άλλαζε και η παράμετρος. Αυτή η διαδικασία έγινε πάνω από 320 φορές μέχρι που ο δείκτης έλαβε μια μεγάλη τιμή. Η σύγκριση των απορροών έγινε μόνο για τη θέση στο υπό κατασκευή φράγμα Παλαιοδερλί, η οποία θέση είναι και η έξοδος της λεκάνης απορροής με συντεταγμένες $X=372900$ και $Y=4337416$.

Η προσομοίωση έγινε για 12 υδρολογικά έτη (1975-76 έως 1986-87) σε μηνιαίο βήμα. Το πρώτο υδρολογικό έτος χρησιμοποιήθηκε για το «ζέσταμα» του μοντέλου και δεν συνυπολογίστηκε στο συντελεστή Nash. Από τα υπόλοιπα 11 υδρολογικά έτη, τα πρώτα 6 χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και τα υπόλοιπα 5 για την επαλήθευση του μοντέλου. Κατά το στάδιο της βαθμονόμησης, αποδείχθηκε, από τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων, πως το υδρολογικό έτος 1980-1981 είχε πολύ χαμηλή προσαρμογή στο μοντέλο και αποφασίστηκε να μην συνυπολογιστεί στο συντελεστή Nash. Έτσι, ο συντελεστής Nash για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, για 5 υδρολογικά έτη, υπολογίστηκε ίσος με 0.762. Αφού βαθμονομήθηκε το μοντέλο, μετά έγινε η επαλήθευσή του για τα υπόλοιπα 5 υδρολογικά έτη. Πάλι ένα υδρολογικό έτος (το 1983-84) εμφάνισε μικρή προσαρμογή στο μοντέλο και δεν συνυπολογίστηκε στο συντελεστή Nash. Η τιμή του συντελεστή για την επαλήθευση του μοντέλου βρέθηκε 0.751. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των προσομοιωμένων απορροών μαζί με τις παρατηρημένες, καθώς επίσης και το διάγραμμα της διαφοράς των δύο απορροών.



Σχήμα 6.16: Σύγκριση παρατηρημένης και προσομοιωμένης χρονοσειράς απορροών στη θέση Παλαιοδερλί.



Σχήμα 6.17: Υπολειμματικό σφάλμα απορροής στη θέση Παλαιοδερλί.

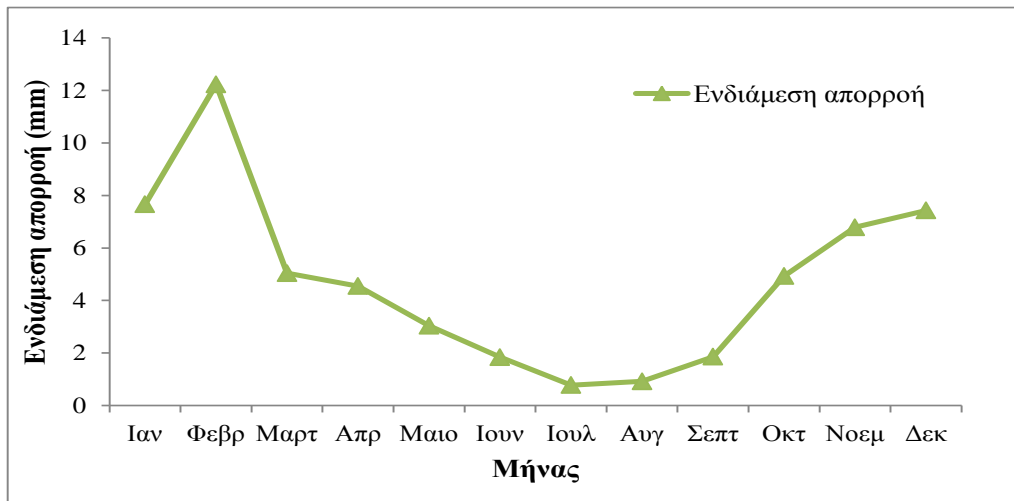
Παρατηρώντας το Σχήμα 6.16 φαίνεται πως το μοντέλο έχει αρκετά καλή προσαρμογή. Μάλιστα, μετά το υδρολογικό έτος 1980-81, φαίνεται να περιγράφει επαρκώς τις παρατηρημένες τιμές και να «πιάνει» όλες τις αιχμές αλλά και τις χαμηλές απορροές. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς οι αιχμές ευθύνονται για διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και με βάση αυτές σχεδιάζονται τα διάφορα αντιπλημμυρικά έργα. Γενικά, με εξαίρεση κάποιους μεμονωμένους μήνες και σύμφωνα με τις τιμές του συντελεστή Nash που προέκυψαν, φαίνεται η προσαρμογή να είναι αρκετά ικανοποιητική. Θα μπορούσε να ήταν και καλύτερη βέβαια αν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροών, σε ημερήσιο βήμα, για περισσότερα υδρολογικά έτη. Επίσης, σίγουρα ο δείκτης ακρίβειας θα αυξανόταν εάν ήταν γνωστές διάφορες παράμετροι για τα εδάφη και για το υπόγειο νερό, που μόνο μέσω της βαθμονόμησης κατέστη δυνατό να υπολογιστούν.

Τέλος, παρατηρώντας το Σχήμα 6.17 φαίνεται πως το σφάλμα δεν είναι συστηματικό και δεν εμφανίζει, οπτικά, κάποιου είδους περιοδικότητα που θα σήμαινε λάθος στη βαθμονόμηση. Επίσης, η διαφορά του αθροίσματος των απορροών ως ποσοστό των παρατηρημένων απορροών υπολογίστηκε στο 12%, υπερεκτιμώντας τις παρατηρημένες τιμές, κάτι που

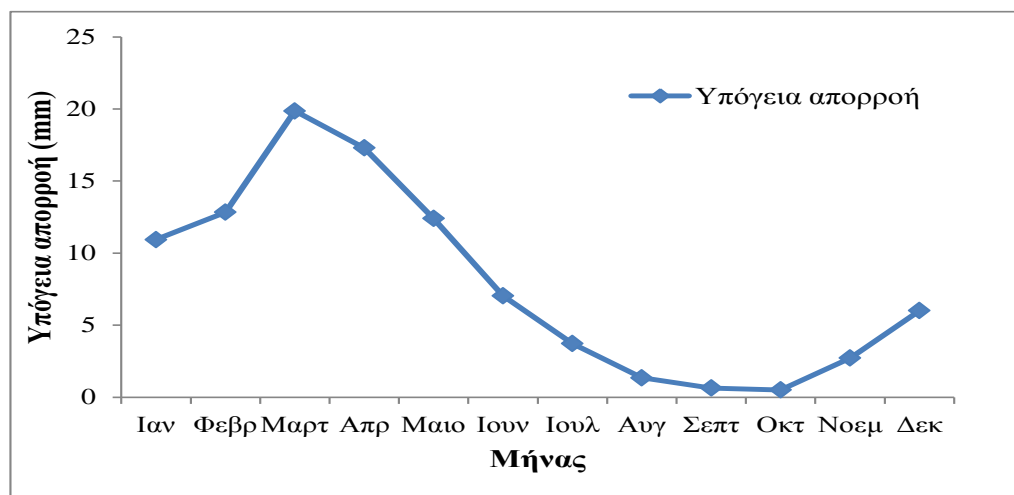
φαίνεται και στο σχήμα, ενώ όταν εξαιρούνται τα υδρολογικά έτη που δεν έχουν καλή προσαρμογή η διαφορά των απορροών φτάνει το 10%.

6.5.2 Υδρολογικός κύκλος

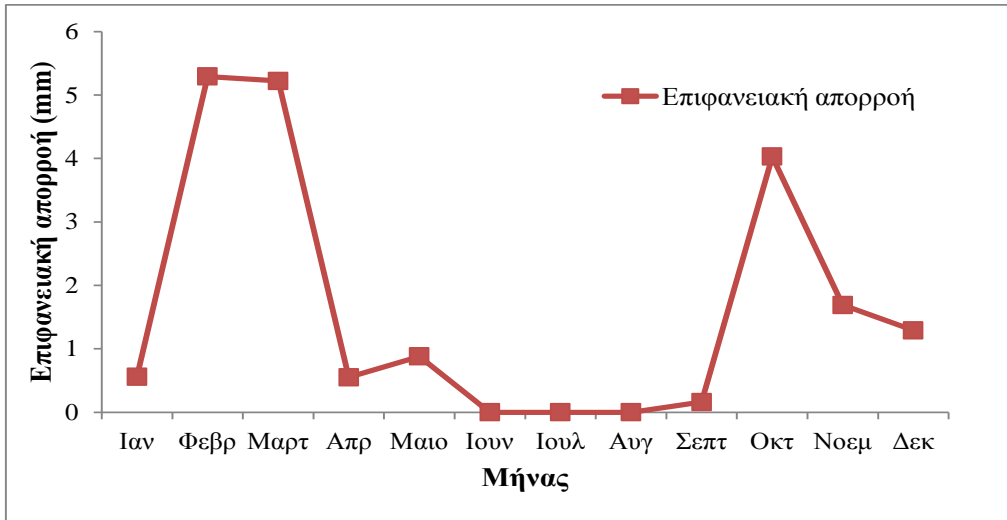
Το SWAT έχει τη δυνατότητα να δώσει αποτελέσματα για αρκετές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, βάσει των οποίων λαμβάνεται καλύτερη γνώση για τη λεκάνη. Τέτοιες συνιστώσες είναι η επιφανειακή, υπόγεια, ενδιάμεση και συνολική απορροή και εξατμισοδιαπνοή (πραγματική). Όλα τα αποτελέσματα δίνονται σε mm και αφορούν το σύνολο της λεκάνης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σε γραφήματα και σε πίνακα.



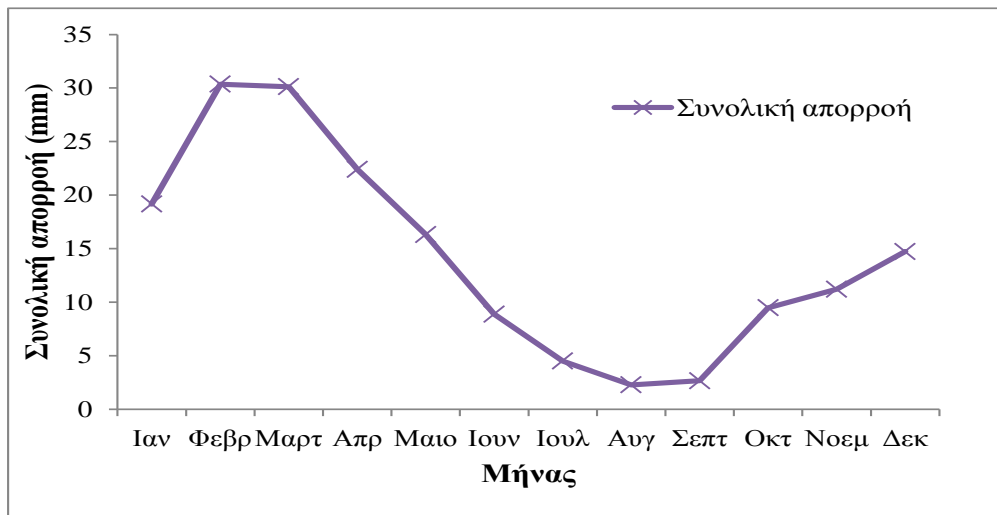
Σχήμα 6.19: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της ενδιάμεσης απορροής.



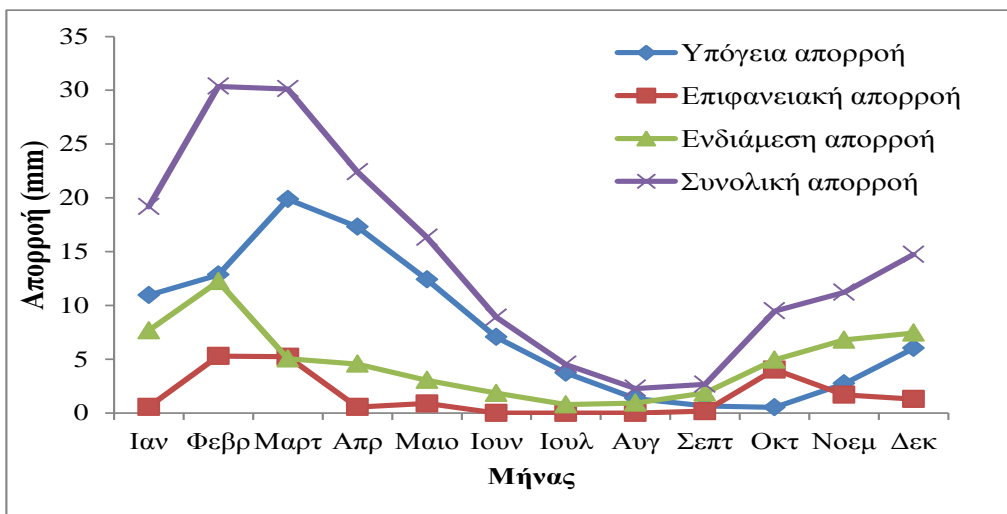
Σχήμα 6.20: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της υπόγειας απορροής.



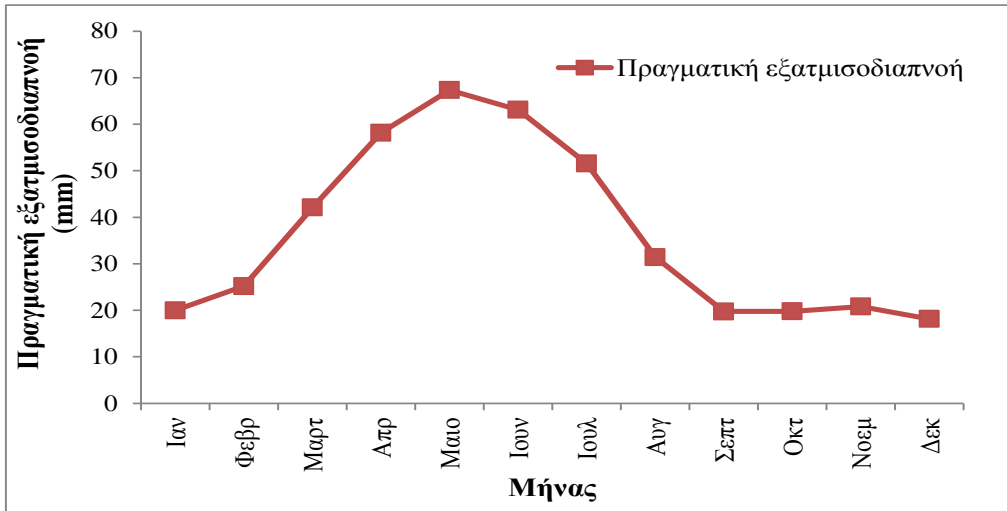
Σχήμα 6.21: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της επιφανειακή απορροής.



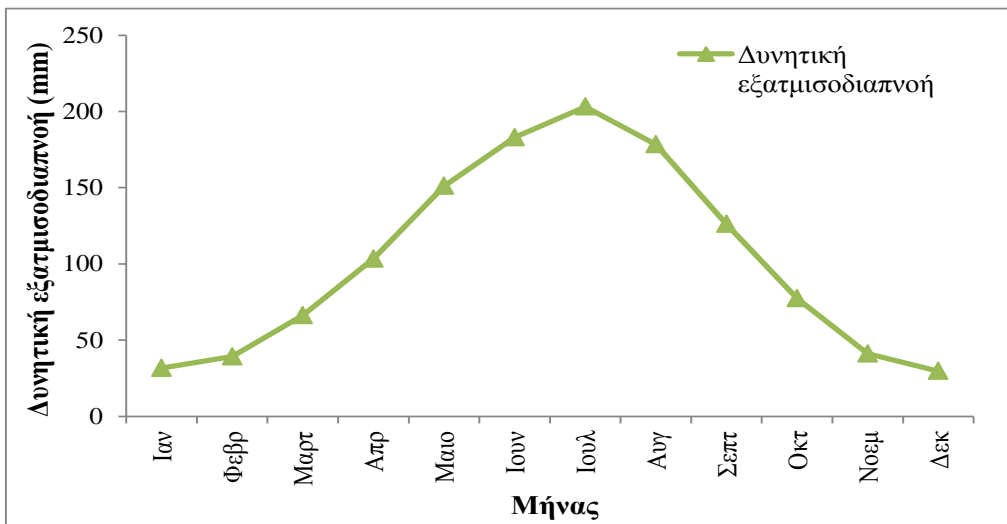
Σχήμα 6.22: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της συνολικής απορροής.



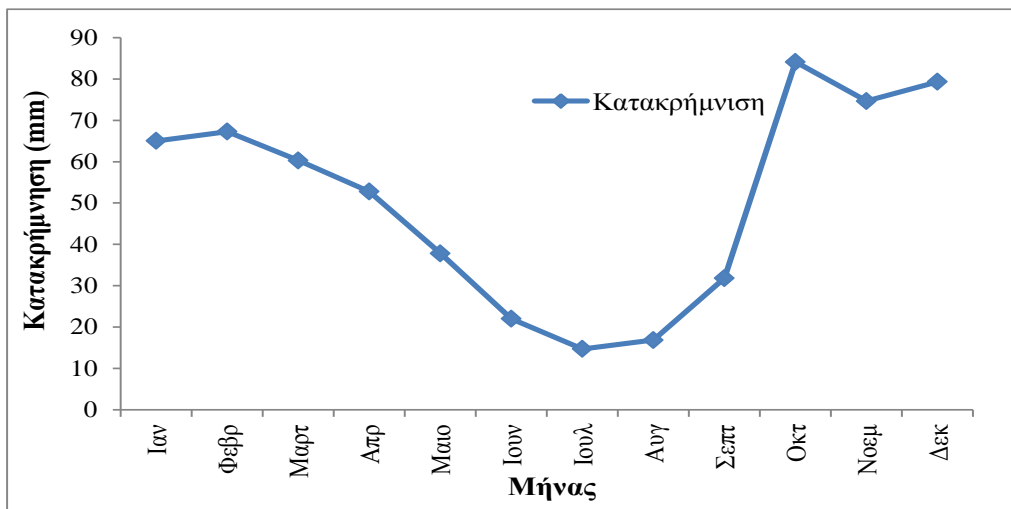
Σχήμα 6.23: Σύγκριση μέσω μηνιαίων τιμών συνιστωσών της απορροής.



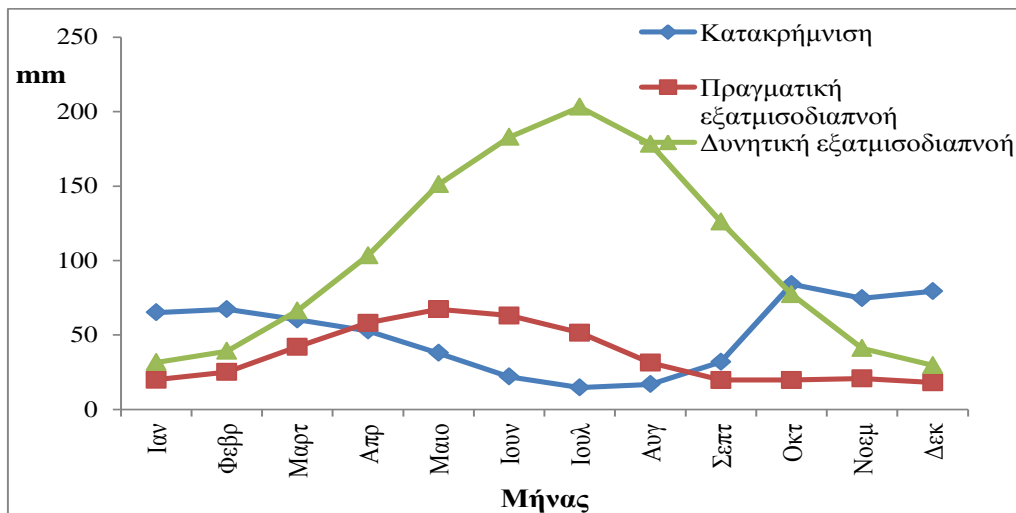
Σχήμα 6.25: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.



Σχήμα 6.26: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.



Σχήμα 6.27: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας τιμής των ατμοσφαιρικών κατακρημισμάτων.



Σχήμα 6.28: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και εξατμισοδιαπνοής (πραγματικής και δυνητικής).

Πίνακας 6.4: Μέσες μηνιαίες τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου στην υπό μελέτη λεκάνη.

Μήνας	Επιφανειακή απορροή	Υπόγεια απορροή	Ενδιάμεση απορροή	Συνολική απορροή	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
Ιαν	0.56	10.94	7.66	19.16	65.03	20.00	31.63
Φεβρ	5.29	12.84	12.23	30.36	67.26	25.20	39.21
Μαρτ	5.22	19.86	5.04	30.12	60.29	42.09	66.28
Απρ	0.55	17.3	4.55	22.4	52.78	58.17	103.34
Μαιο	0.88	12.4	3.04	16.32	37.83	67.33	151.10
Ιουν	0.00	7.04	1.84	8.88	21.99	63.1	182.90
Ιουλ	0.00	3.72	0.78	4.5	14.71	51.54	203.08
Αυγ	0.0	1.35	0.92	2.27	16.85	31.43	178.26
Σεπτ	0.16	0.64	1.86	2.66	31.85	19.75	126.10
Οκτ	4.03	0.51	4.93	9.47	84.11	19.78	77.26
Νοεμ	1.69	2.72	6.79	11.2	74.64	20.79	41.05
Δεκ	1.29	6.01	7.43	14.73	79.33	18.13	29.63
Σύνολο	19.67	95.33	57.07	172.07	606.67	437.31	1229.84

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και τον σχετικό πίνακα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- i) Η υπόγεια απορροή αποτελεί τη σημαντικότερη συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου αφού συμμετέχει με το 50% στη συνολική απορροή κατά τους μήνες Δεκέμβρη έως Φλεβάρη, με 76% τους μήνες Μάρτη έως Αύγουστο και με μόλις 16% τους μήνες Σεπτέμβρη έως Νοέμβρη. Η αυξημένη υπόγεια ροή οφείλεται στο σχετικά ομαλό έδαφος, αφού το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης εμφανίζει ομαλό ανάγλυφο (βλ. Χάρτη Κλίσεων Παράρτημα) και σημαντική έκταση με δασώδεις εκτάσεις που ευνοούν την διήθηση του νερού καθώς και το κατάλληλο γι' αυτό γεωλογικό υπόβαθρο.
- ii) Όλες οι συνιστώσες εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, όπως φαίνεται στα γραφήματα, και εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές τους μήνες Φλεβάρη και

Μάρτιο και τις ελάχιστες τους θερινούς μήνες, όπου η επιφανειακή και η ενδιάμεση απορροή σχεδόν μηδενίζονται.

- iii) Όσον αφορά το διάγραμμα της εξατμισοδιαπνοής, φαίνεται πως πραγματική και δυνητική εξατμισοδιαπνοή σχεδόν συμπίπτουν τους μήνες Δεκέμβρη και Ιανουάριο, ενώ τους υπόλοιπους μήνες οι τιμές της δυνητικής είναι αρκετά μεγαλύτερες και φτάνουν και το τετραπλάσιο της πραγματικής.

Τέλος, ένας άλλος συντελεστής που μπορεί να εξαχθεί από τα παραπάνω δεδομένα είναι ο συντελεστής απορροής C . Ο συντελεστής απορροής ισούται με το λόγο του όγκου της άμεσης απορροής προς τον όγκο της βροχόπτωσης.

$$C = \frac{h_R}{h_T} \quad (6.1)$$

Όπου:

h_R : ο όγκος της άμεσης απορροής εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος

h_T : ο όγκος βροχόπτωσης εκφρασμένος σε ισοδύναμο ύψος

Ο συντελεστής απορροής υπολογίστηκε ίσος με 0.28.

7 Επίδραση αλλαγών στις χρήσεις γης της λεκάνης

7.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο βρίσκεται η ουσία της διερεύνησης που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, θα επιλεγούν τρία σενάρια βάσει των οποίων, για κάθε σενάριο, ένα τμήμα της δασικής και ημιδασικής περιοχής της λεκάνης απορροής θα θεωρηθεί ότι καίγεται ώστε να μελετηθούν οι συνέπειες που θα υπάρξουν στην απορροή της λεκάνης και κυρίως στις αιχμές της μηνιαίας απορροής. Επίσης, θα μελετηθούν και οι μεταβολές της υπόγειας και επιφανειακής απορροής ξεχωριστά.

Όσον αφορά τα σενάρια, θα γίνει μια προσπάθεια αυτά να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο στη πραγματικότητα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό έγινε βιβλιογραφική μελέτη ώστε να συλλεχθούν χρήσιμα στοιχεία, όπως, για παράδειγμα, ποια είναι τα εύφλεκτα δέντρα, ποιες οι εύφλεκτες χρήσεις γης, αλλά και ποια είναι η συνηθισμένη πορεία εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών (Παράγραφος 7.2). Ωστόσο, όσο και εκτενής να είναι αυτή η μελέτη, δεν μπορεί να παρακαμφθεί το γεγονός ότι πρόκειται για την περιγραφή ενός φαινομένου (πυρκαγιά) που δύσκολα προσομοιώνεται με προγράμματα καθώς υπάρχουν πολλοί τυχαίοι παράγοντες που το επηρεάζουν. Για παράδειγμα, η κατεύθυνση της φωτιάς μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου.

7.2 Χαρακτηριστικά των πυρκαγιών

Πριν αναφερθούν τα τρία σενάρια, είναι απαραίτητο να περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά των πυρκαγιών τα οποία σχετίζονται και με τη διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, οι φωτιές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσής τους σε τρεις κατηγορίες:

- i) *Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες*: Εμφανίζονται σπάνια στην Ελλάδα και καίνε συνήθως την καύσιμη ύλη που συσσωρεύεται στο έδαφος (ημιαποσυντεθειμένα ή «χωμένα» φύλλα και βελόνες) ή κάτω από αυτό (τύρφη κλπ.). Δεν απαιτούν πολύ οξυγόνο και βγάζουν λίγο ή καθόλου καπνό, εμφανίζοντας μικρό ρυθμό εξάπλωσης.
- ii) *Πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες*: Αυτές οι πυρκαγιές εμφανίζονται συχνότερα στον Ελλαδικό χώρο και καίνε τη νεκρή καύσιμη ύλη (βελόνες, φύλλα, κλαδιά) που βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος ή τη ζωντανή βλάστηση που αναπτύσσεται πάνω σε αυτό (χόρτα, πόες, θάμνοι και νεαρά δέντρα). Σε αυτή τη κατηγορία, οι κόμμες των δέντρων, όπου αυτά υπάρχουν, δεν αναφλέγονται. Χαρακτηριστικό τους είναι η έντονη φλόγα, λόγω του διαθέσιμου οξυγόνου, αλλά και η δυσκολία στην αντιμετώπισή τους.
- iii) *Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες*: Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία, εδώ η ανάφλεξη και η καύση συντελείται στην κόμη ψηλών δέντρων. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η επικινδυνότητα που εμφανίζουν και η ταχύτητα εξάπλωσης. Εμφανίζονται κυρίως σε πευκοδάση της παραθαλάσσιας ζώνης (χαλεπιού και τραχείας πέυκης) της Ελλάδας, όπου καίγεται ο υπόροφος (θαμνώδης βλάστηση και δενδρύλλια) κάτω από τα δέντρα και μεταδίδει τη φωτιά

στη κόμη δημιουργώντας μια μεικτή πυρκαγιά. Έτσι, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της πυρκαγιάς, ανάλογα με τις συνθήκες, αυτή μπορεί να μετεξελιχθεί από πυρκαγιά κόμης σε επιφάνειας και το αντίστροφο (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε, 2009)

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και τον τρόπο εξάπλωσής της είναι τρεις:

- i) Χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης
- ii) Καιρικές συνθήκες
- iii) Τοπογραφικές συνθήκες

Επειδή οι δύο πρώτοι παράγοντες είναι αρκετά προφανείς, θα αναλυθεί ο τρίτος παράγοντας. Συνήθως, οι φωτιές εξαπλώνονται από τα χαμηλότερα προς τα υψηλότερα υψόμετρα, εκτός αν υπάρχει ισχυρός αντίθετος άνεμος ή εμπρηστικός μηχανισμός. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση τόσο ταχύτερη είναι και η εξάπλωση της πυρκαγιάς ειδικά εάν φυσάει κατά τη φορά της κλίσης. Μάλιστα, σε μεγάλες κλίσεις, παρατηρείται το φαινόμενο φλεγόμενα κομμάτια καύσιμης ύλης να κατρακυλούν προς τα κάτω εξαπλώνοντας τη φωτιά. Στη συνέχεια, λόγω της μεγάλης κλίσης η φωτιά εξαπλώνεται και πάλι προς τα πάνω.

Ακόμα και η έκθεση της πλαγιάς παίζει ρόλο καθώς οι βόρειες πλαγιές δέχονται λιγότερο ηλιακή ακτινοβολία και η καύσιμη ύλη είναι περισσότερο υγρή από τις άλλες πλαγιές. Οι θερμότερες και ξηρότερες συνθήκες επικρατούν στις νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση τόσο περισσότερο ισχύουν τα παραπάνω. Επίσης, η έκθεση της πλαγιάς σε συνδυασμό με το υψόμετρο διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά της βλάστησης που παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και εξάπλωση της φωτιάς.

Τέλος, το ανάγλυφο της περιοχής παίζει σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της φωτιάς, καθώς, για παράδειγμα, σε ένα φαράγγι η ταχύτητα αυξάνεται αρκετά ενώ είναι πιθανό να δημιουργήσει στροβιλισμούς.

Με βάση τα παραπάνω αλλά και με βάση τις χρήσεις γης σχεδιάστηκαν τα σενάρια.

7.3 Η τιμή του αριθμού CN για καμμένες εκτάσεις

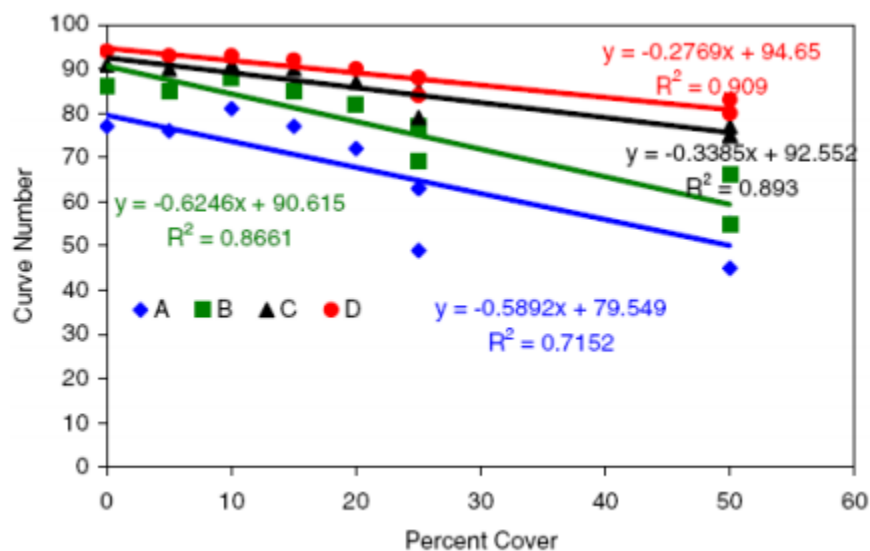
Όπως αναφέρθηκε, σε αυτή τη φάση θα κατασκευαστούν τρία σενάρια πυρκαγιών ώστε να ελεγχθεί η μεταβολή της απορροής μετά την πυρκαγιά. Κατά την προσομοίωση η μόνη παράμετρος που θα μεταβληθεί θα είναι η τιμή του CN. Γι' αυτό η τιμή αυτή θα παίζει καθοριστικό ρόλο στη μελέτη και στα αποτελέσματά που αυτή αναμένεται να δώσει.

Για να εντοπιστεί αυτή η τιμή έγινε μελέτη της ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας. Αρχικά εντοπίστηκε η διπλωματική εργασία του Λυμπερόπουλου (2008). Σε εκείνη τη διπλωματική, εργασία, με βάση μετρημένες απορροές για το ρέμα Γιαννούλα στην Πάρνηθα πριν και μετά από πραγματική πυρκαγιά, υπολογίστηκε ο αριθμός καμπύλης CN. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι, η ημικατανεμημένη μέθοδος που δίνει τιμή 83.1 και η αδρομερής προσέγγιση που δίνει τιμή 81.8. Να σημειωθεί πως η λεκάνη της Πάρνηθας που μελετήθηκε, κυριαρχείται από ψαμμιτικό φλύσχη, ένα πέτρωμα που εμφανίζεται και στη λεκάνη του Ενιπέα σε μεγάλο ποσοστό της έκτασης. Παρόμοια μελέτη υπάρχει σε στη διπλωματική εργασία του Κιουλέπογλου (2009) για το ρέμα Αγίας Τριάδας Πάρνηθας, όπου υπολογίζονται οι τιμές για το CN, 89.4 με αδρομερή προσέγγιση και 84.4 με ημικατανεμημένη μέθοδο. Τέλος, στη μεταπτυχιακή εργασία του Βασιλείου (2008), γίνεται αναφορά σε αυτό το ζήτημα. Συγκεκριμένα, η μελέτη έγινε για την περιοχή της Ζαχάρως Ηλείας, μετά τις πυρκαγιές του 2007. Ο αριθμός CN, για εδάφη στα οποία κυριαρχούν τριτογενείς αποθέσεις (Κατηγορία

υδροπερατότητας B), αναφέρεται ότι εκτιμήθηκε ο αριθμός καμπύλης με τη βοήθεια ειδικών ερευνητών του Ινστιτούτου Δασικών Ερευνών (Δρ. Μπαλούτσος & Δρ. Οικονόμου) σε 79 για καμένα δάση, 87 για καμένες καλλιέργειες και 92 για καμένους οικισμούς.

Στη ξένη βιβλιογραφία αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη μεταβολή του CN μετά από πυρκαγιά (Cerelli, 2005, Higginson and Jarnecke, 2007, Solt and Muir, 2006, Kuyumjian, Livinston et al., 2005). Οι παραπάνω έρευνες συσχετίζουν την τιμή του CN με την ένταση των πυρκαγιών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός CN άρα και μεγαλύτερες οι πλημμυρικές αιχμές. Επίσης, υπάρχουν και αρκετές μελέτες που υπολογίζουν τον αριθμό CN με βάση παρατηρημένες απορροές πριν και μετά από μια πυρκαγιά.

Μια άλλη μελέτη για τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας τα υδρολογικά μοντέλα KINEROS 2 και SWAT είναι αυτή των Goodrich et al. (2005). Η συγκεκριμένη μελέτη συνδέει τον αριθμό CN με το ποσοστό της χρήσης γης που δεν καίγεται. Με άλλα λόγια συνδυάζονται οι τιμές CN για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (A, B, C, D), οι χρήσεις γης και το ποσοστό κάλυψης μετά τη πυρκαγιά. Έτσι, ανάλογα με το ποσοστό που καίει η φωτιά για κάθε χρήση γης αλλάζει και η τιμή του CN. Να σημειωθεί ότι η έρευνα αυτή αναφέρεται σε φυσικές και αστικές χρήσεις γης και όχι σε αγροτικές χρήσεις.



Σχήμα 7.1: Συσχέτιση τιμών CN με το ποσοστό κάλυψης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας του εδάφους (Goodrich et al., 2005).

Συνοψίζοντας, είναι φανερό πως η τιμή του CN κινείται σε μια κοινή τάξη μεγέθους για όλες τις μελέτες. Τελικά, επιλέχθηκε στην εφαρμογή να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Goodrich et al., γιατί είναι πιο λεπτομερής αφού προσδιορίζει τιμές και για τις 4 κατηγορίες υδροπερατότητας εδάφους και γιατί η μεθοδολογία εφαρμόστηκε ήδη στο λογισμικό SWAT. Γενικά, στον Ελλαδικό χώρο, οι δασικές εκτάσεις είναι αρκετά επιρρεπείς σε πυρκαγιές και λόγω των συνθηκών που επικρατούν το καλοκαίρι αλλά και των εύφλεκτων δέντρων (πεύκο κτλ.) που καίγονται ολοσχερώς. Έτσι, στη παρούσα διπλωματική εργασία θα θεωρηθεί πως το ποσοστό της λεκάνης που θα καεί θα καεί ολοσχερώς, οπότε θα έχει ποσοστό κάλυψης 0%, και σύμφωνα με το σχήμα οι τιμές του CN θα είναι 77, 86, 91, 94 για τις κατηγορίες A, B, C, και D αντίστοιχα.

7.4 Κατασκευή σεναρίων

Σε αυτό το στάδιο, με βάση τους χάρτες που έχουν κατασκευαστεί για τη λεκάνη, αλλά και με βάση τις πληροφορίες που υπάρχουν για τα χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών στον Ελληνικό χώρο, κατασκευάστηκαν σενάρια. Γενικά, κατά τη φάση κατασκευής των σεναρίων έγινε προσπάθεια αυτά να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά. Θεωρήθηκε ότι ιδιαίτερα εύφλεκτα είναι τα δάση κωνοφόρων, οι μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις και η σκληροφυλλική βλάστηση, σε αντίθεση με τα δάση πλατύφυλλων, τα οποία αναφλέγονται μέτρια και σβήνονται πολύ γρήγορα. Όσον αφορά τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και πιο συγκεκριμένα το σιτάρι, αυτό να μην καίγεται εύκολα, αλλά επειδή η βλάστηση είναι πολύ χαμηλή, σβήνει και εύκολα. Επίσης, θεωρήθηκε πως όπου υπάρχουν δρόμοι είναι πιο εύκολο να αναχαιτιστεί μια πυρκαγιά από τα επίγεια μέσα σε αντίθεση με μια ορεινή περιοχή, όπου δεν υπάρχουν δρόμοι πρόσβασης.

Τέλος, συγκρίνοντας το χάρτη χρήσεων γης με το χάρτη κλίσεων, διαπιστώθηκε πως η συντριπτική πλειονότητα των δασικών εκτάσεων βρίσκεται σε κλίση 15-9999, αρκετά μεγάλη δηλαδή, ώστε να ευνοεί την εξάπλωση της πυρκαγιάς (βλ. Παράρτημα Β, Σχήμα 3).

Η διερεύνηση αυτών των σεναρίων έγινε πάνω στο ίδιο μοντέλο που κατασκευάστηκε και βαθμονομήθηκε αλλάζοντας τον αριθμό CN στα πολύγωνα που θα περιλαμβάνονταν στις καμμένες εκτάσεις στα σενάρια πυρκαγιάς, από την επιλογή *Manual Calibration Helper*. Κατόπιν, τα αποτελέσματα της επιφανειακής απορροής συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που έδωσε το SWAT.

7.4.1 Σενάριο 1^ο

Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, καίγεται το νότιο τμήμα της δασικής έκτασης. Συγκεκριμένα, αυτή η περιοχή αποτελείται από σκληροφυλλική βλάστηση με κάποιες μικρές εκτάσεις δάσους πλατύφυλλων. Με βάση αυτό το σενάριο, η πυρκαγιά αναχαιτίζεται στα βόρεια στο σημείο που αρχίζουν οι καλλιέργειες σιταριού και παράλληλα μειώνεται η κλίση, οπότε γίνεται δυνατή η κατάσβεση της φωτιάς από τις επίγειες δυνάμεις της πυροσβεστικής. Η πυρκαγιά αναχαιτίζεται από τα ανατολικά στο σημείο που αρχίζει το δάσος πλατύφυλλων και παρατηρείται μια αισθητή μείωση της κλίσης (σε πολλά σημεία είναι επίπεδο το έδαφος και παρατηρούνται βοσκοτόποι) και δυτικά γίνεται η παραδοχή πως οι επίγειες δυνάμεις σταματούν τη φωτιά πάνω στο δρόμο όπως φαίνεται στο χάρτη των σεναρίων (Σχήμα 7.2). Ο συγκεκριμένος δρόμος ενώνει τη Λαμία με το Δομοκό και από εκεί συνεχίζει μέχρι να ενωθεί με την Εγνατία Οδό. Στο ορεινό αυτό σημείο, ο δρόμος έχει συνολικά τρεις λωρίδες κατεύθυνσης, δύο προς Δομοκό (Βόρεια) και μία προς Λαμία (Νότια), και είναι αρκετά πλατύς οπότε είναι αρκετά πιθανό να καταφέρει η Πυροσβεστική να σταματήσει εκεί τη φωτιά. Προφανώς, η φωτιά δεν θα σταματήσει στις κορυφογραμμές και στη λεκάνη απορροής, αλλά θα επεκταθεί και προς τα νότια. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν θα έχει επίπτωση στη λεκάνη μελέτης και δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βάσει αυτού του σεναρίου καίγονται συνολικά 30216591.24 m² ή 30.217 km², έκταση που αντιστοιχεί στο 6.88% της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Επειδή η έκταση είναι μικρή δεν αναμένονται πολύ μεγάλες διαφορές στην απορροή.

7.4.2 Σενάριο 2^ο

Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται στην ανατολική πλευρά της λεκάνης, η οποία είναι και η πιο επιρρεπής σε πυρκαγιά, καθώς δέχεται περισσότερο ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς επικρατούν θερμότερες και ξηρότερες συνθήκες. Μάλιστα, η συγκεκριμένη έκταση περιλαμβάνει και κωνοφόρα δέντρα (κυρίως πεύκη) αλλά και μεταβατικές δασώδεις και

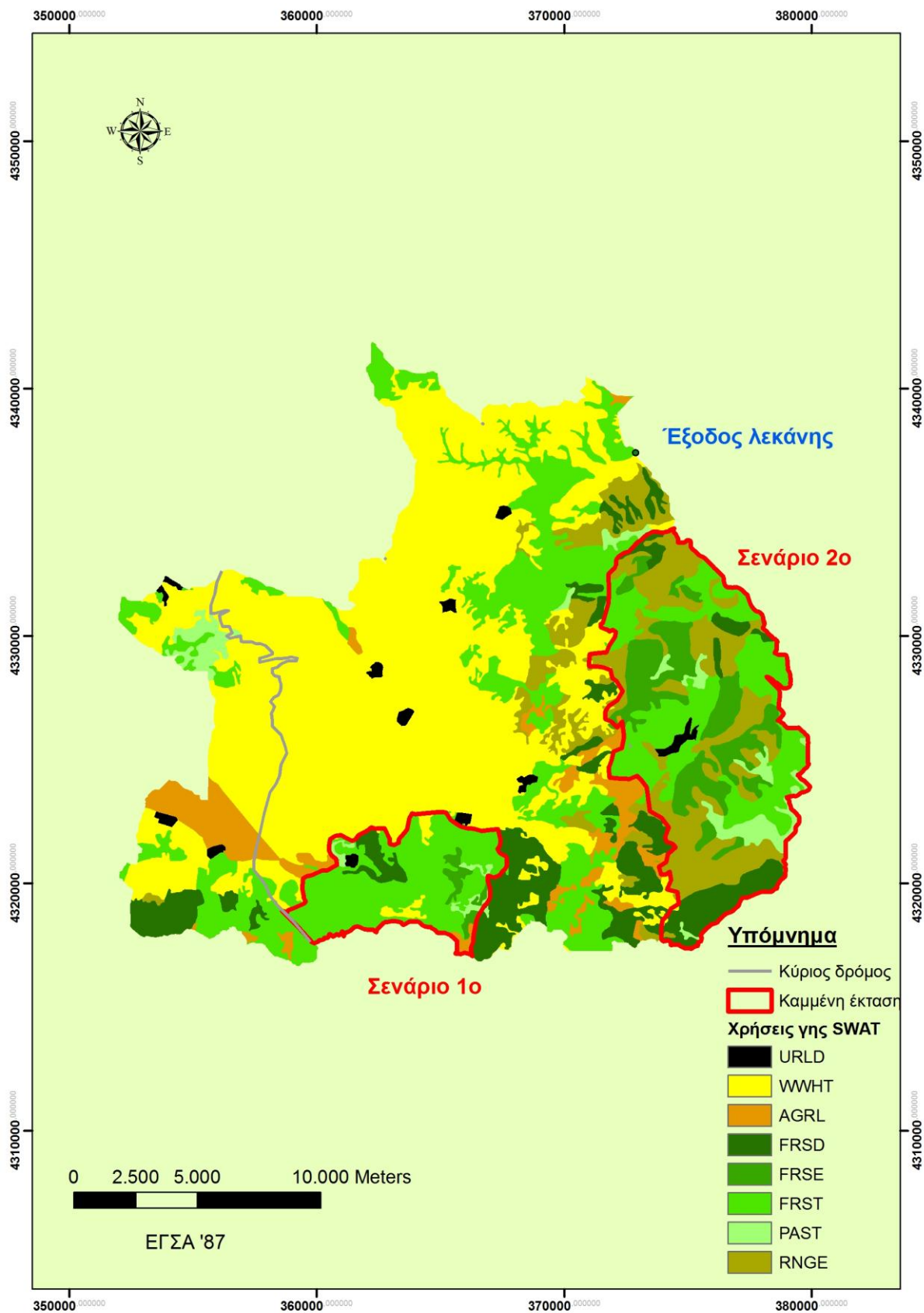
θαμνώδεις εκτάσεις και ποσοστά σκληροφυλλικής βλάστησης που θεωρούνται ιδιαίτερα εύφλεκτα. Με βάση αυτό το σενάριο, στην έκταση που θα καεί θα καούν και όλες οι άλλες χρήσεις γης που βρίσκονται σε αυτό το κομμάτι. Η πυρκαγιά θεωρείται πως αναχαιτίζεται στα βόρεια στο σημείο που ελαττώνεται η κλίση και υπάρχουν σκόρπιες καλλιέργειες, στα δυτικά στο σημείο που αρχίζουν οι καλλιέργειες σιταριού και μικραίνει η κλίση. Στα νότια γίνεται η παραδοχή πως η πυρκαγιά συνεχίζεται προς τα νότια. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς προς γειτονικές λεκάνες απορροής δεν επηρεάζει τη συγκεκριμένη λεκάνη και οι συνολικές επιπτώσεις δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Συνολικά, καίγονται 89576622.92 m² ή 89.577 km², περίπου το 20.45% της συνολικής έκτασης.

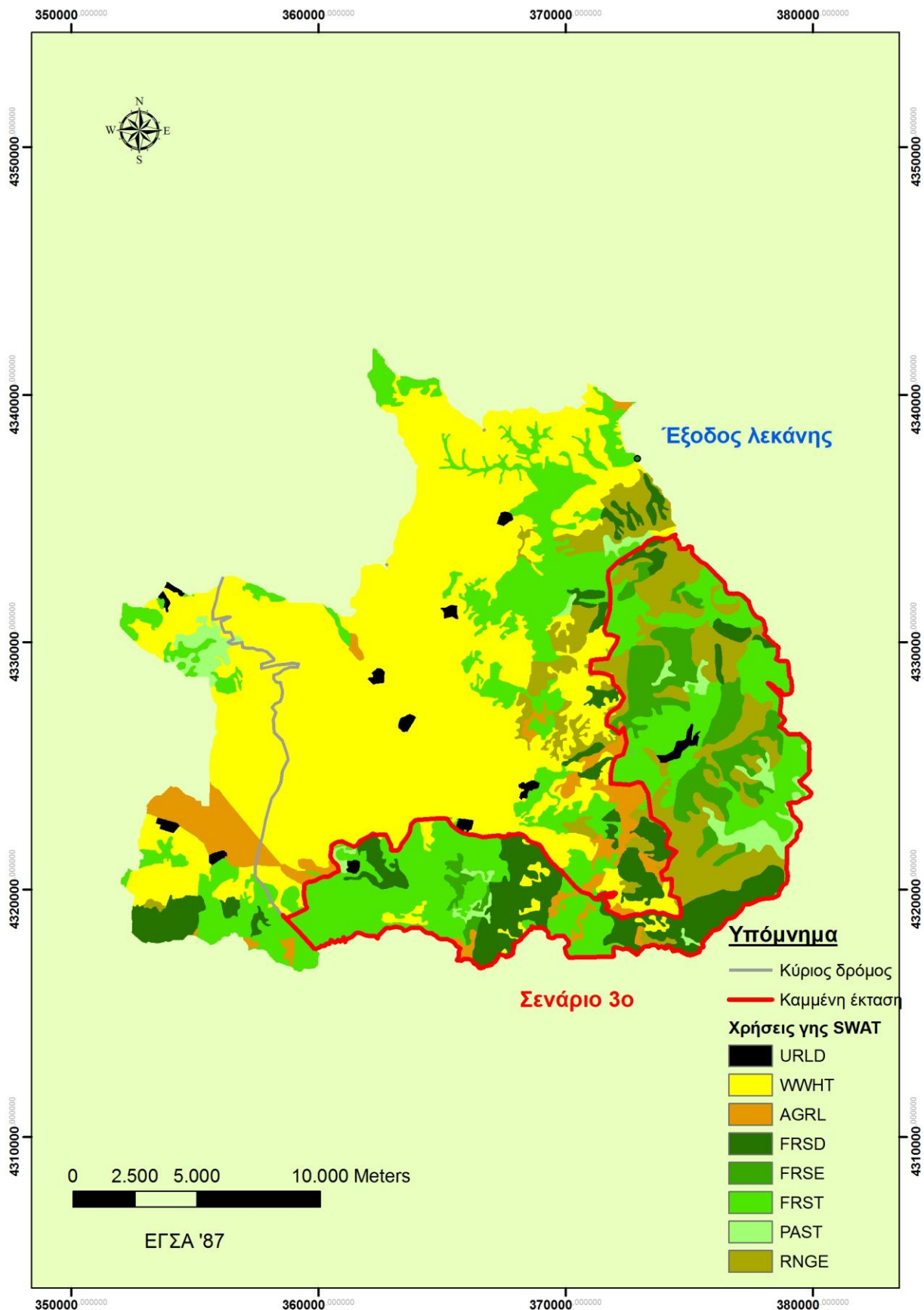
7.4.3 Σενάριο 3^ο

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο αποτελεί συνδυασμό των άλλων δύο σεναρίων. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή πως η πυρκαγιά είναι τόσο σφοδρή που καίει τις εκτάσεις των δύο παραπάνω σεναρίων καθώς και ένα ενδιάμεσο κομμάτι που τις ενώνει. Αυτό το κομμάτι επιλέχθηκε πάλι με τη κλίση και το είδος της καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.3, θεωρείται πως καίγεται το δάσος πλατύφυλλων και η σκληροφυλλική βλάστηση που βρίσκονται ανατολικά του 1^{ου} σεναρίου και εμφανίζουν μεγάλη κλίση. Έτσι, όπως και στο 2^ο σενάριο, θεωρείται πως οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και το δάσος πλατύφυλλων όταν βρίσκονται σε μικρή κλίση δεν αναφλέγονται καθώς η πρόσβαση σε αυτές από τις επίγειες δυνάμεις είναι πιο εύκολη.

Συνολικά καίγονται 140206243.44 m² ή 140.206 km², περίπου το 31.95% της συνολικής έκτασης.



Σχήμα 7.2: Χάρτης 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου πυρκαγιάς.



Σχήμα 7.3:Χάρτης 3^{ου} σεναρίου πυρκαγιάς.

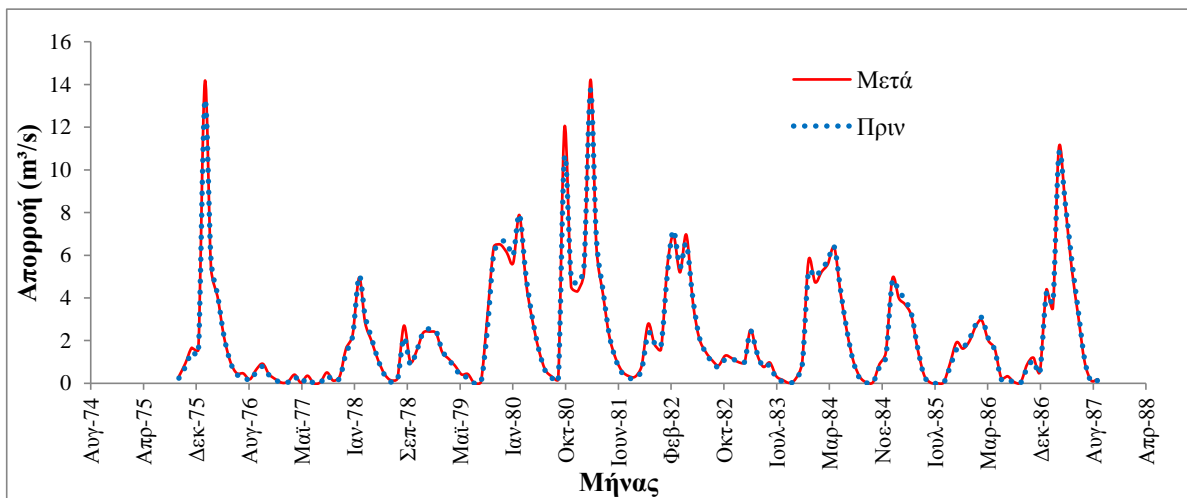
7.5 Αποτελέσματα σεναρίων

7.5.1 Αποτελέσματα για κάθε σενάριο ξεχωριστά

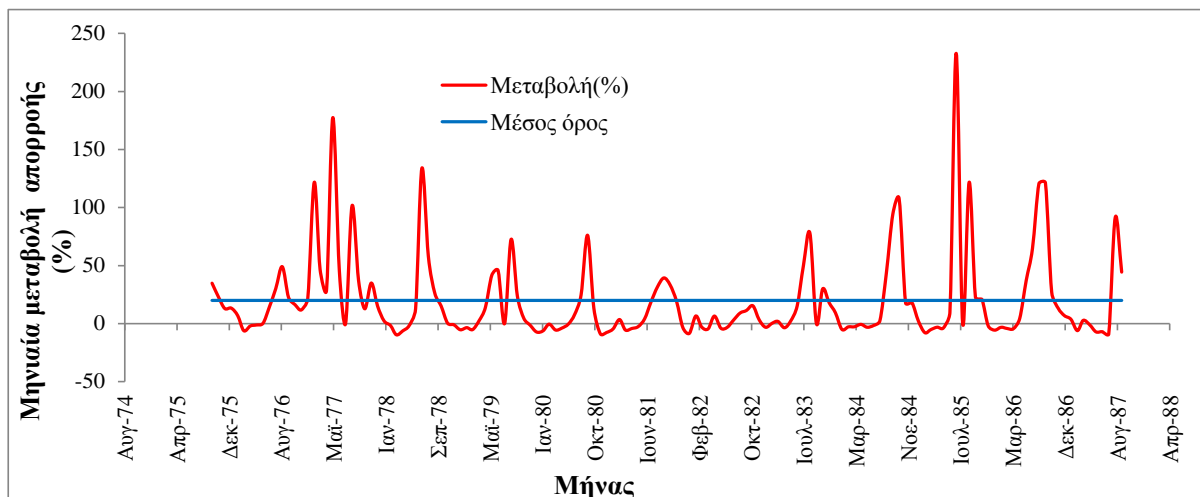
Τα αποτελέσματα των σεναρίων θα αναλυθούν αρχικά ξεχωριστά, ώστε να περιγραφούν οι μεταβολές που παρουσιάζει το κάθε σενάριο σε μηνιαίο βήμα αλλά και αθροιστικά, για όλα τα υδρολογικά έτη που γίνεται η μελέτη.

Σενάριο 1^ο

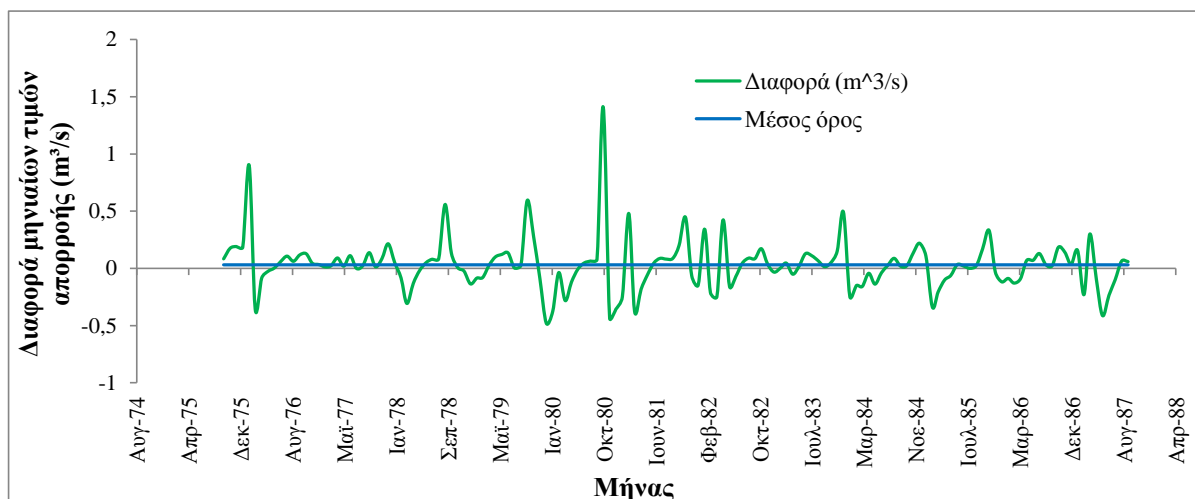
Στο πρώτο σενάριο, όπως ειπώθηκε, καίγεται ένα μέρος στη νότια πλευρά της λεκάνης με έκταση περίπου 30.2 km², το 6.88% της λεκάνης. Επειδή η έκταση που καίγεται είναι μικρή, δεν αναμένονται μεγάλες αλλαγές. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχήματα που εμφανίζουν τη μεταβολή της απορροής αφού καεί η συγκεκριμένη έκταση.



Σχήμα 7.4: Σύγκριση προσομοιωμένης απορροής πριν (διακεκομμένη μπλε γραμμή) και μετά την πυρκαγιά για το Σενάριο 1 (συνεχής κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 7.5: Εκατοστιαία μεταβολή της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 1 (%).



Σχήμα 7.6: Διαφορά της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 1 (m^3/s).

Το άθροισμα των απορροών για το σύνολο των υδρολογικών ετών που μελετούνται φαίνεται να αυξήθηκε κατά 1.34% ή $4.432 m^3/s$. Η αύξηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, ωστόσο αν υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας μεταβολής για όλους τους μήνες στα 12 υδρολογικά έτη, αυτός ισούται με 19.96% ή $0.03 m^3/s$. Ο λόγος που η συνολική μεταβολή του συνολικού αθροίσματος των απορροών δεν είναι τόσο μεγάλη όσο η τιμή της μέσης μηνιαίας μεταβολής οφείλεται σε δύο παράγοντες: (α) γιατί παρατηρούνται αρνητικές τιμές κυρίως τους θερινούς μήνες αλλά και στα σημεία που η καμπύλη της απορροής πέφτει φαίνεται η ανάλογη καμπύλη για το 1^ο Σενάριο να χαμηλώνει πιο απότομα, (β) γιατί, αν και η συνολική μηνιαία απορροή των HRUs που «κάηκαν» αυξήθηκε κατά 390.7%, η περιορισμένη έκταση του Σεναρίου αλλά και η χαμηλή απορροή που έδειχνε η συγκεκριμένη περιοχή κατά την προσομοίωση δεν αύξησαν κατά πολύ τη συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

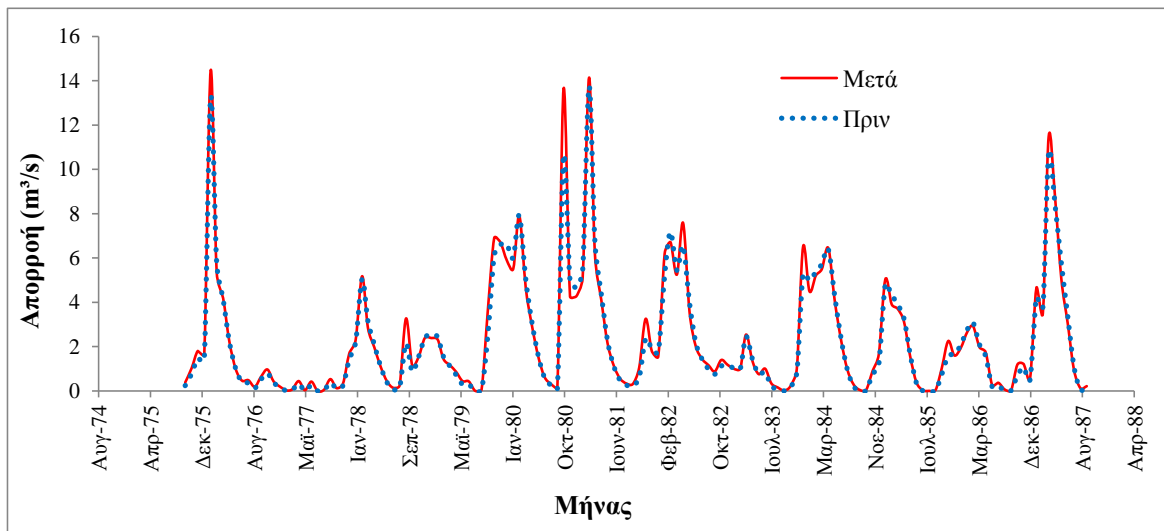
Παρατηρώντας το Σχήμα 7.5 φαίνεται πως η μηνιαία μεταβολή της απορροής μπορεί να φτάσει και το 230%. Ωστόσο φαίνεται πως οι μεγάλες αυτές ποσοστιαίες μεταβολές παρατηρούνται μόνο σε μήνες που η μηνιαία απορροή κινείται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Έτσι, μπορεί να υπάρχει μεγάλη ποσοστιαία μεταβολή, όμως η απορροή που αυξάνεται μετρημένη σε απόλυτη τιμή (m^3/s) είναι αρκετά μικρή. Άλλωστε, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η μέση μηνιαία αύξηση της απορροής είναι μόλις $0.03 m^3/s$.

Τέλος, όσον αφορά το 1^ο Σενάριο, έγινε ιδιαίτερη μελέτη για τις αιχμές της χρονοσειράς των απορροών. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι αιχμές που εμφανίζουν μηνιαίο όγκο απορροής μεγαλύτερο από $4 m^3/s$. Για τις 13 αυτές αιχμές που εντοπίστηκαν, υπολογίστηκε η μέση μηνιαία μεταβολή ίση με 3.16% ή $0.293 m^3/s$, με τη μεγαλύτερη αύξηση να εντοπίζεται τον Οκτώβρη του 1980, οπότε η μηνιαία απορροή αυξήθηκε 13.3% ή $1.41 m^3/s$ και η μικρότερη το Μάρτη του 1982 οπότε η μηνιαία απορροή μειώθηκε κατά 2.96% ή κατά $0.21 m^3/s$. Όπως φαίνεται, ακόμα και στις αιχμές παρουσιάζονται αρνητικές μεταβολές όπου, δηλαδή, η απορροή μετά το σενάριο της πυρκαγιάς μειώνεται. Αξίζει να σημειωθεί πως 5 από τις 13 αιχμές που μελετήθηκαν εμφάνισαν αρνητικές μεταβολές.

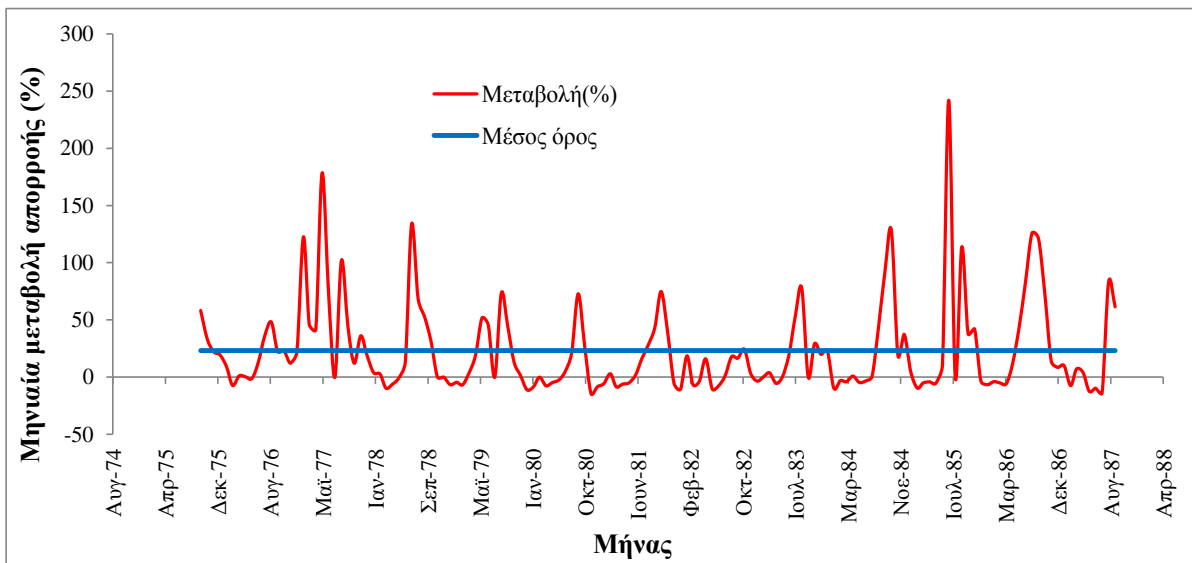
Σενάριο 2^ο

Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται ότι καίγεται η ανατολική πλευρά της λεκάνης σε ένα ποσοστό 20.45% της συνολικής λεκάνης καταλαμβάνοντας έκταση περίπου $89.6 km^2$. Στα σχήματα

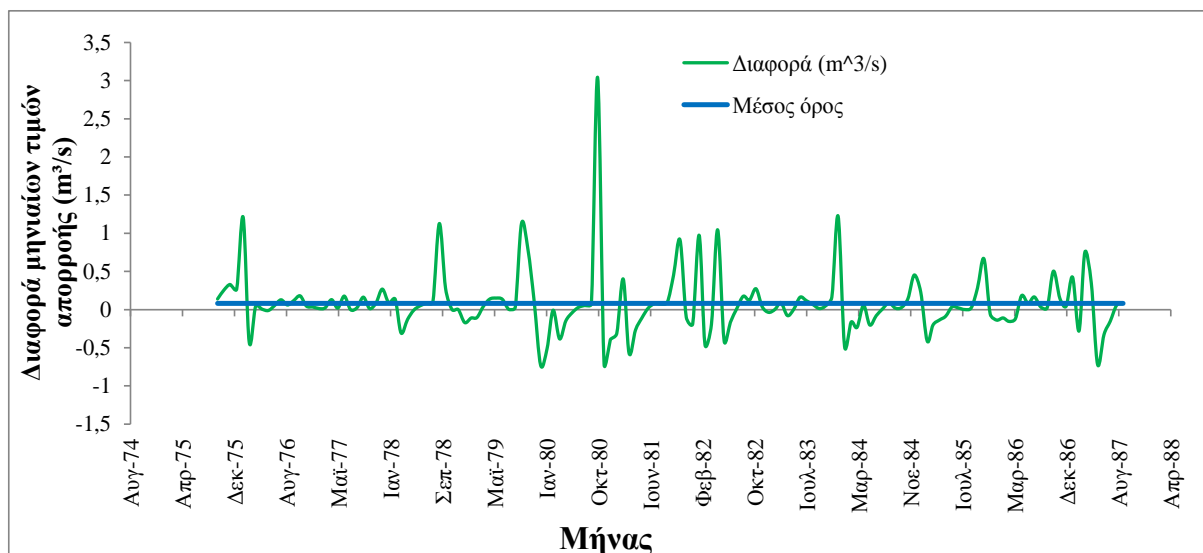
που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μηνιαίες τιμές της απορροής μετά τη πυρκαγιά αλλά και οι μεταβολές αυτής σε σχέση με την προσομοιωμένη του SWAT πριν την πυρκαγιά.



Σχήμα 7.7: Σύγκριση προσομοιωμένης απορροής πριν (διακεκομμένη μπλε γραμμή) και μετά την πυρκαγιά για το Σενάριο 2 (συνεχής κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 7.8: Εκατοστιαία μεταβολή της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 2 (%).



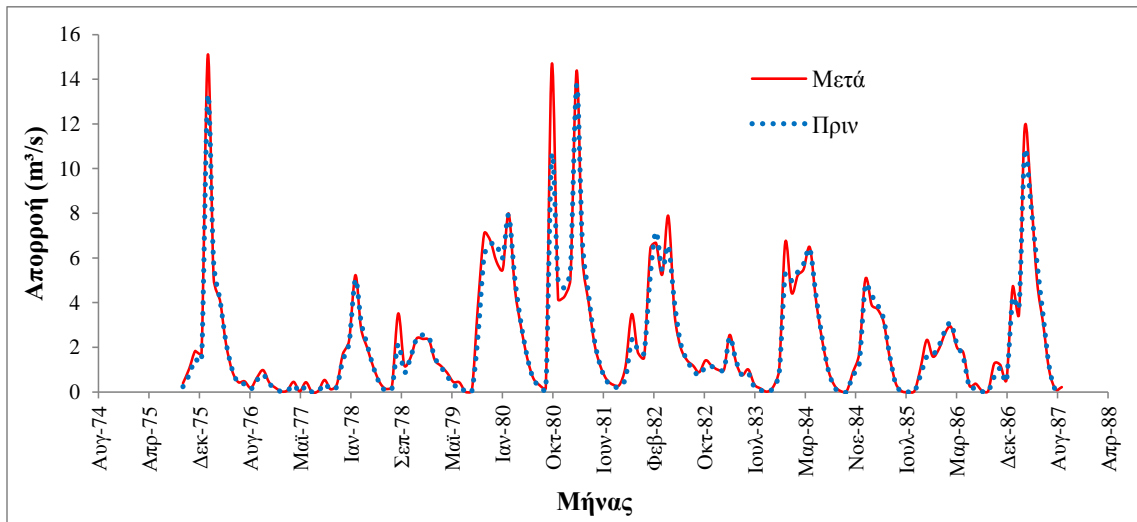
Σχήμα 7.9: Διαφορά της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 2 (m^3/s)

Το άθροισμα των απορροών για το σύνολο των υδρολογικών ετών φαίνεται να αυξήθηκε κατά 3.53% ή $11.65 \text{ m}^3/\text{s}$. Όπως και στο 1^ο Σενάριο έτσι και σε αυτό, η ποσοστιαία μεταβολή για το σύνολο των τιμών είναι μικρή. Όμως, η μέση μηνιαία μεταβολή ισούται με 23.17% ή $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. Παρόμοιοι λόγοι με το προηγούμενο σενάριο συντελούν στην εμφάνιση αυτής της διαφοράς. Τα HRUs όπου μεταβλήθηκε ο αριθμός CN εμφάνισαν συνολική μεταβολή της απορροής τους κατά 288.6%.

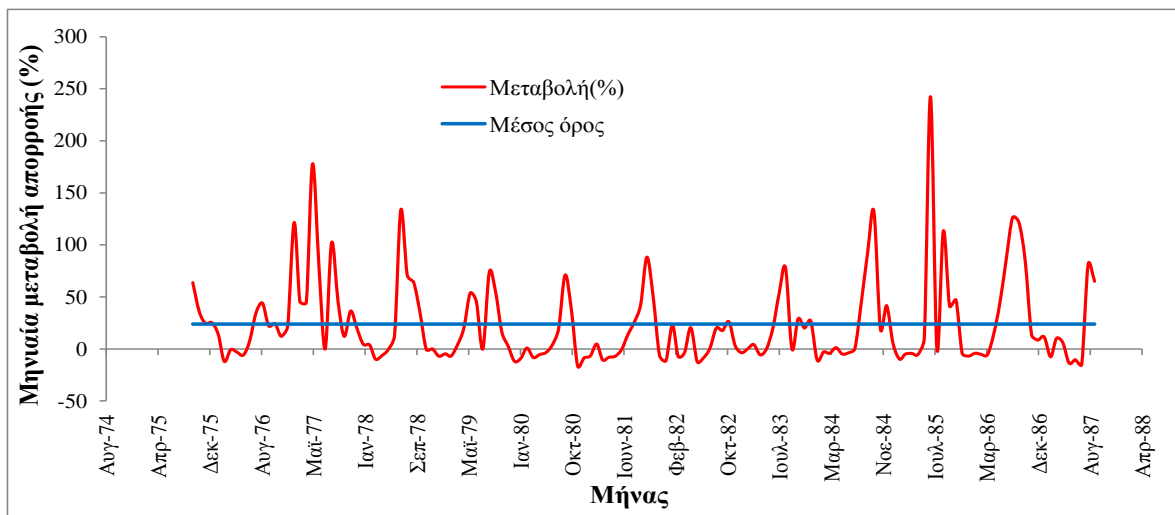
Παρατηρώντας τα σχήματα εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα με το 1^ο Σενάριο, μόνο που εδώ φαίνεται οι αιχμές να αυξάνονται περισσότερο. Αυτό αποδεικνύεται και από τη ξεχωριστή μελέτη των αιχμών που η μηνιαία τους απορροή είναι μεγαλύτερη από $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Συγκεκριμένα, η μέση μηνιαία μεταβολή τους είναι 7.73% και η μέση διαφορά σε σχέση με τις τιμές της προσομοίωσης του SWAT πριν την πυρκαγιά είναι $0.63 \text{ m}^3/\text{s}$. Μεγαλύτερη αύξηση συντελέστηκε τον Οκτώβρη του 1980 οπότε η μηνιαία απορροή αυξήθηκε κατά 28.7% ή $3.05 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ, αντίθετα, το Μάρτη του 1982 φαίνεται η μηνιαία απορροή να μειώνεται κατά 6.4% ή $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως στο 2^ο Σενάριο από τις 13 αιχμές που μελετήθηκαν μόνο δύο εμφάνισαν μείωση του μηνιαίου όγκου απορροής σε σχέση με 5 μήνες που εμφάνισαν αρνητικές μεταβολές στο 1^ο Σενάριο.

Σενάριο 3^ο

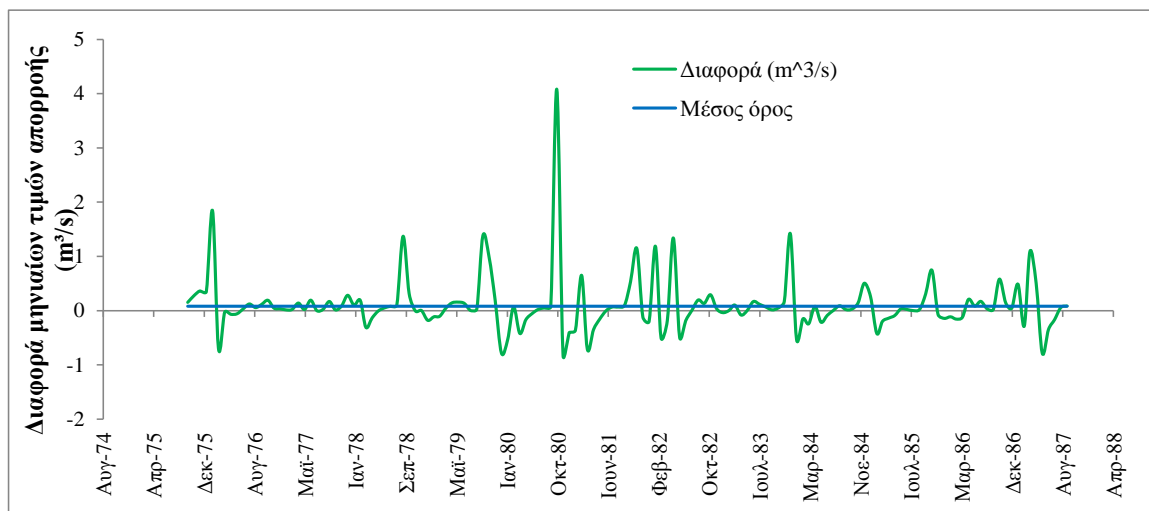
Το τρίτο και τελευταίο σενάριο είναι το συνδυαστικό όπου θεωρείται ότι καίγονται οι εκτάσεις των δύο προηγούμενων σεναρίων αλλά και ένα ενδιάμεσο τμήμα που χωρίζει τα δύο πρώτα σεναρία. Συνολικά καίγονται περίπου 140.2 km^2 , το 31.95% της λεκάνης απορροής. Προφανώς, λόγω της έκτασης του σεναρίου αναμένονται και τα μεγαλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 7.10: Σύγκριση προσομοιωμένης απορροής πριν (διακεκομμένη μπλε γραμμή) και μετά την πυρκαγιά για το Σενάριο 3 (συνεχής κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 7.11: Εκατοστιαία μεταβολή της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 3 (%).



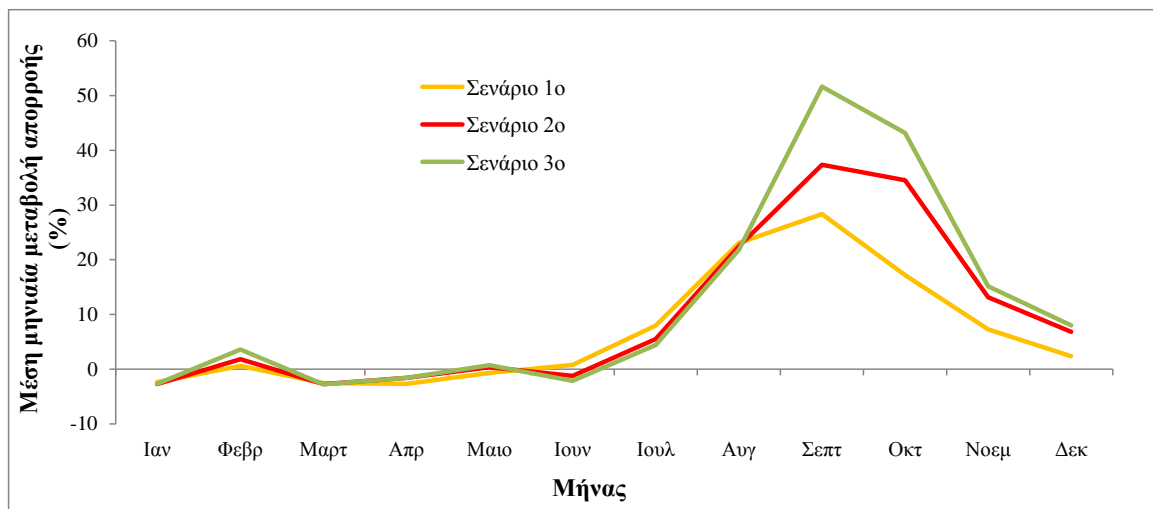
Σχήμα 7.12: Διαφορά της προσομοιωμένης απορροής μετά την πυρκαγιά σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά για το Σενάριο 2 (m^3/s)

Στο τρίτο σενάριο φαίνεται το άθροισμα των απορροών και για τα 12 υδρολογικά έτη που μελετούνται να αυξάνεται κατά 4.6% ή 15.19 m³/s. Βέβαια, η μέση ποσοστιαία μηνιαία μεταβολή για το σύνολο των ετών είναι 23.89%, ενώ η μέση μηνιαία αύξηση 0.11 m³/s. Στα HRUs των οποίων μεταβλήθηκε ο αριθμός CN φαίνεται να αυξάνεται η συνολική απορροή τους και για τα 12 έτη κατά 93%. Το γεγονός πως το ποσοστό αύξησης είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο για τα δύο πρώτα σενάρια οφείλεται στο γεγονός πως το ενδιάμεσο κομμάτι που καίγεται, δηλαδή αυτό που δεν κάηκε ούτε στο 1^ο ούτε στο 2^ο σενάριο, περιέχει εκτάσεις με σιτάρι, με μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις αλλά και με δάσος πλατύφυλλων. Οι παραπάνω εκτάσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές CN οπότε κατά την εφαρμογή των σεναρίων, οι αριθμοί CN για τις παραπάνω χρήσεις γης δεν μεταβλήθηκαν τόσο πολύ όσο στη περίπτωση της σκληροφυλλικής βλάστησης.

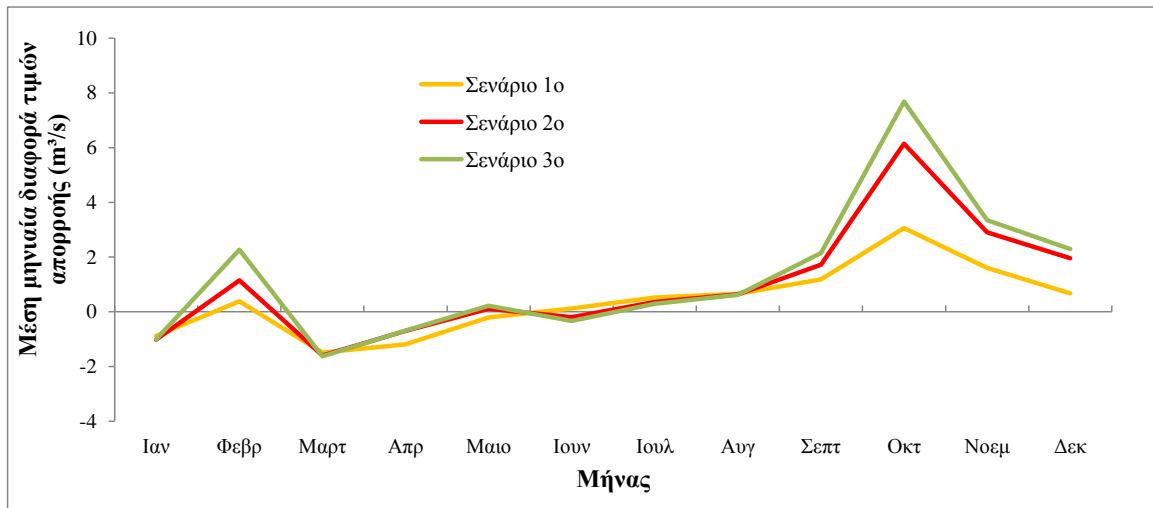
Όσον αφορά τις παροχές αιχμής εμφανίζονται τα ίδια χαρακτηριστικά με τα προηγούμενα δύο σενάρια μόνο που, σε αυτή τη περίπτωση, η αύξηση των αιχμών γίνεται ακόμα πιο εμφανής. Μελετώντας μόνο τις 13 αιχμές, φαίνεται πως η μέση μηνιαία αύξησή τους να είναι 10.26% ή 0.86 m³/s. Από αυτές τις 13 αιχμές μεγαλύτερη αύξηση υπήρξε τον Οκτώβρη του 1980 οπότε η μηνιαία απορροή αυξήθηκε 38.5% ή 4.1 m³/s, ενώ πάλι το Μάρτη του 1982 υπήρξε μείωση της απορροής κατά 7% ή 0.5 m³/s. Αξιοσημείωτο είναι πως όσο καίγεται μεγαλύτερη έκταση, η μείωση της μηνιαίας απορροής το συγκεκριμένο μήνα αυξάνεται. Τέλος, σε αυτό το σενάριο από τις 13 αιχμές μόνον ένας μήνας εμφάνισε αρνητική μεταβολή.

7.5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια

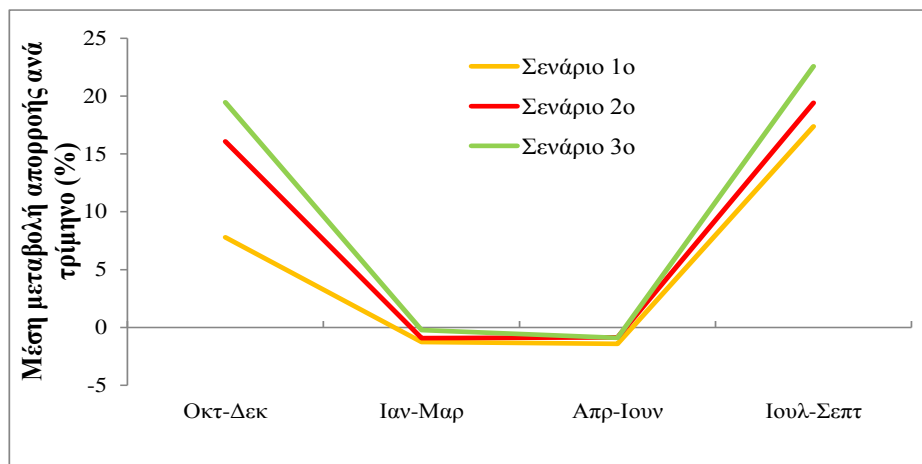
Σε αυτή τη παράγραφο θα αναλυθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα από τα τρία σενάρια και θα συγκριθούν μεταξύ τους σε μηνιαίο, εξαμηνιαίο και τριμηνιαίο βήμα ώστε να φανεί ποιοι μήνες επηρεάζουν περισσότερο και ποιο λιγότερο την απορροή. Επίσης, θα γίνει μια προσπάθεια για να συσχετιστεί η έκταση που καίγεται με την αύξηση της συνολικής απορροής.



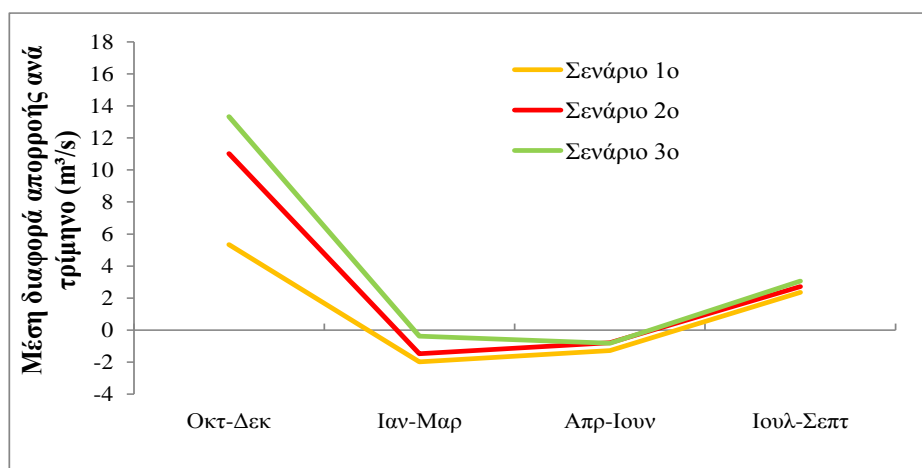
Σχήμα 7.13: Μέση μηνιαία ποσοστιαία μεταβολή της υπολογισμένης για κάθε σενάριο μηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (%).



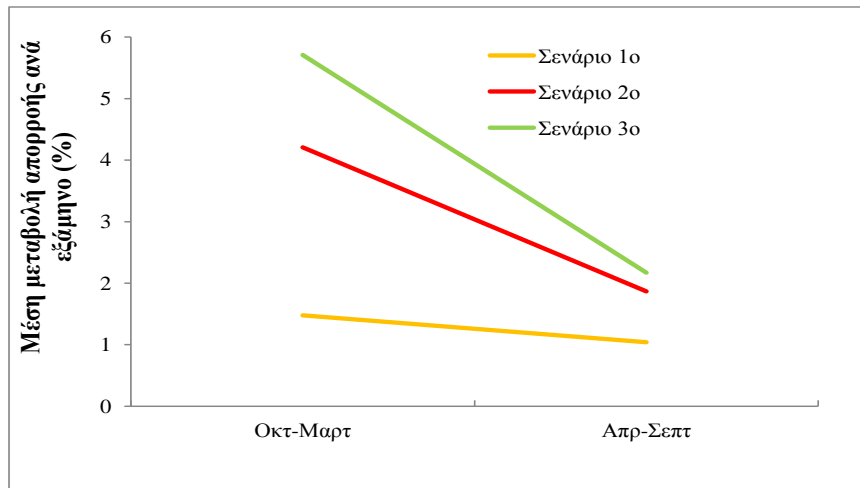
Σχήμα 7.14: Μέση μηνιαία διαφορά της υπολογισμένης για κάθε σενάριο χρονοσειράς μηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (m^3/s).



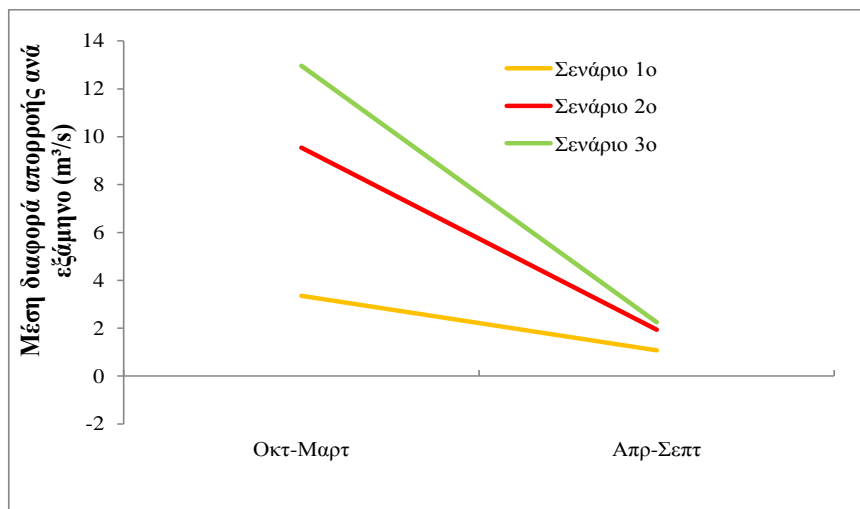
Σχήμα 7.15: Μέση μηνιαία ποσοστιαία μεταβολή της υπολογισμένης για κάθε σενάριο τριμηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (%).



Σχήμα 7.16: Μέση διαφορά της υπολογισμένης για κάθε σενάριο τριμηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (m^3/s).



Σχήμα 7.17: Μέση μεταβολή της υπολογισμένης για κάθε σενάριο εξαμηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (%).



Σχήμα 7.18: Μέση διαφορά της υπολογισμένης για κάθε σενάριο εξαμηνιαίας απορροής σε σχέση με την απορροή πριν την πυρκαγιά (m^3/s).

Από τα παραπάνω σχήματα, τα οποία παρουσιάζονται τόσο σε μηνιαίο όσο και σε τριμηνιαίο και εξαμηνιαίο βήμα, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα μελετώντας τα Σχήματα 7.13 και 7.14 προκύπτουν τα εξής:

- i) Για μεγαλύτερη καμμένη έκταση εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές τόσο σε ποσοστιαία μεταβολή όσο και σε απόλυτη μεταβολή. Εξάιρεση αποτελούν οι θερινοί μήνες όπου εκεί η ποσοστιαία μεταβολή είναι μεγάλη αλλά η απόλυτη μεταβολή δεν είναι μεγάλη.
- ii) Τους μήνες Μάρτιο έως Ιούνιο εμφανίζονται αρνητικές μεταβολές που σημαίνει πως η απορροή μειώνεται σε σχέση με τις μηνιαίες τιμές πριν την πυρκαγιά.
- iii) Μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή εμφανίζεται τους μήνες Αύγουστο έως Νοέμβριο με μέγιστη τιμή αυτή του Σεπτεμβρίου. Ωστόσο, σε απόλυτες τιμές, η αύξηση είναι μεγαλύτερη τον Οκτώβρη. Αυτό με άλλα λόγια σημαίνει πως μεγάλη ποσοστιαία μεταβολή της απορροής δεν συνεπάγεται και σημαντική αύξηση του όγκου της απορροής.

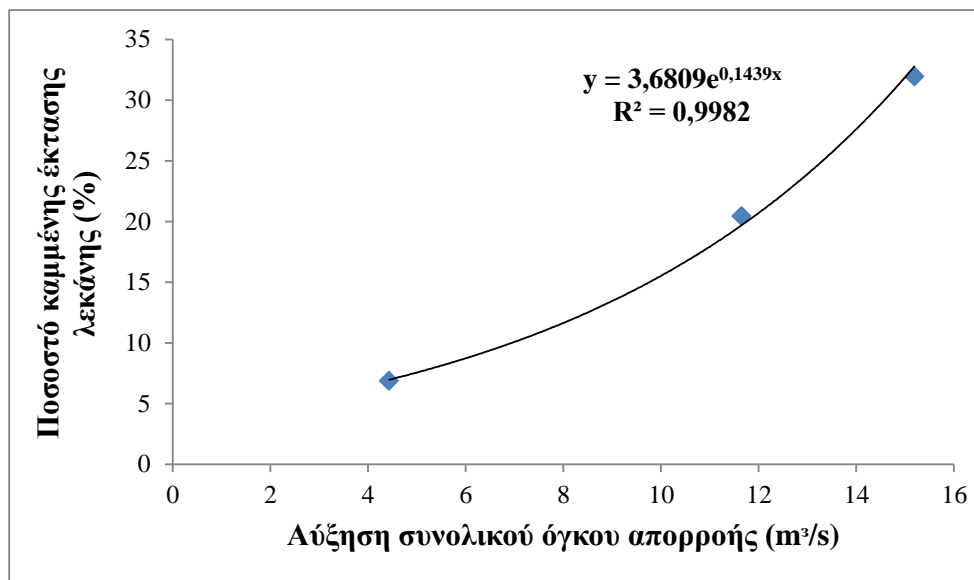
Μελετώντας τα Σχήματα 7.15 και 7.16 που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ανά τρίμηνο προκύπτει ότι:

- i) Μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της απορροής εμφανίζεται τους μήνες Ιούλιο έως Σεπτέμβριο, οι οποίοι όμως εμφανίζουν μικρή διαφορά σε σχέση με τις προσομοιωμένες τιμές πριν την πυρκαγιά. Αυτό οφείλεται στις μικρές τιμές μηνιαίων παροχών που εμφανίζουν.
- ii) Μεγαλύτερη αύξηση του όγκου απορροής εμφανίζεται τους μήνες Οκτώβριο έως Δεκέμβριο οπότε και παρατηρούνται οι μεγαλύτερες βροχοπτώσεις.
- iii) Τους μήνες Ιανουάριο έως Ιούνιο οι μεταβολές είναι αρνητικές οπότε και ο όγκος απορροής μειώνεται.

Τέλος, από τα Σχήματα 7.17 και 7.18 που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ανά εξάμηνο προκύπτει:

- i) Μεγαλύτερη αύξηση της συνολικής απορροής εμφανίζεται το εξάμηνο Οκτωβρίου - Μαρτίου και μικρότερη το εξάμηνο Απριλίου - Σεπτεμβρίου.
- ii) Δεν παρατηρούνται αρνητικές μεταβολές.
- iii) Για μεγαλύτερη καμμένη έκταση εμφανίζεται και μεγαλύτερη αύξηση της απορροής.

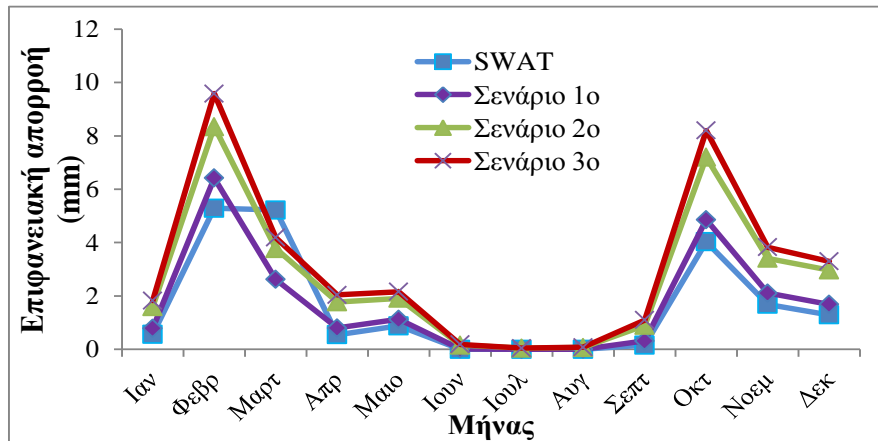
Επεκτείνοντας ακόμα περισσότερο τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που μπορούν να εξαχθούν από αυτά, έγινε προσπάθεια συσχέτισης του ποσοστού της έκτασης της λεκάνης που καίγεται με την αύξηση του συνολικού όγκου της απορροής για το σύνολο των υδρολογικών ετών που μελετάται. Προέκυψε πως υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών η οποία μπορεί να περιγραφεί από μια εκθετική συνάρτηση με υψηλό συντελεστή R^2 (0.9982).



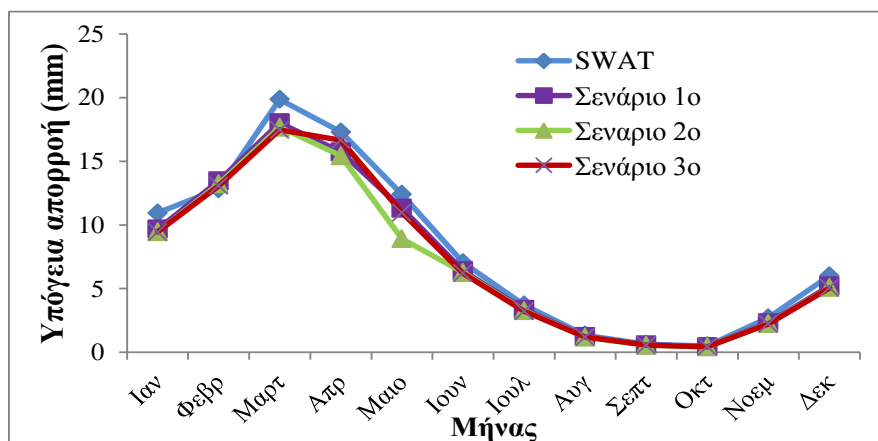
Σχήμα 7.19: Συσχέτιση του ποσοστού καμμένης έκτασης της λεκάνης με την αύξηση του όγκου απορροής.

7.5.3 Μεταβολές στις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου

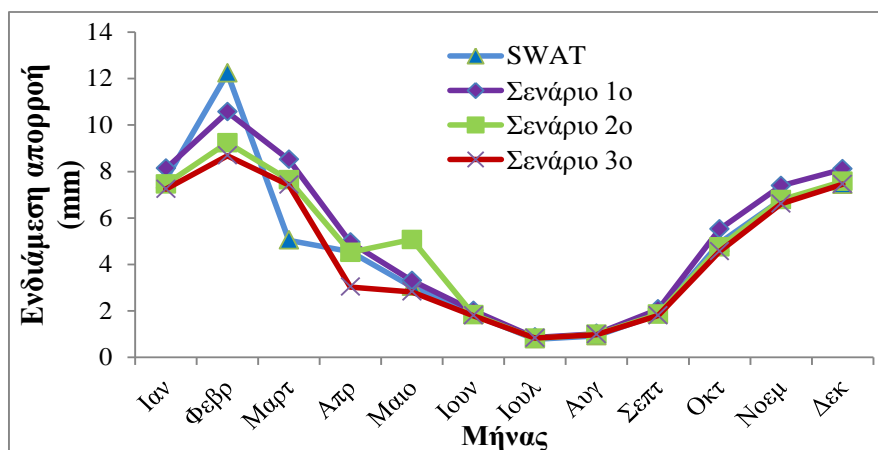
Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστούν οι μεταβολές που επιφέρει κάθε σενάριο στις βασικές συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου (Επιφανειακή, ενδιάμεση, υπόγεια και συνολική απορροή). Επίσης, μελετήθηκαν οι μεταβολές και στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή ωστόσο οι μεταβολές ήταν αμελητέες.



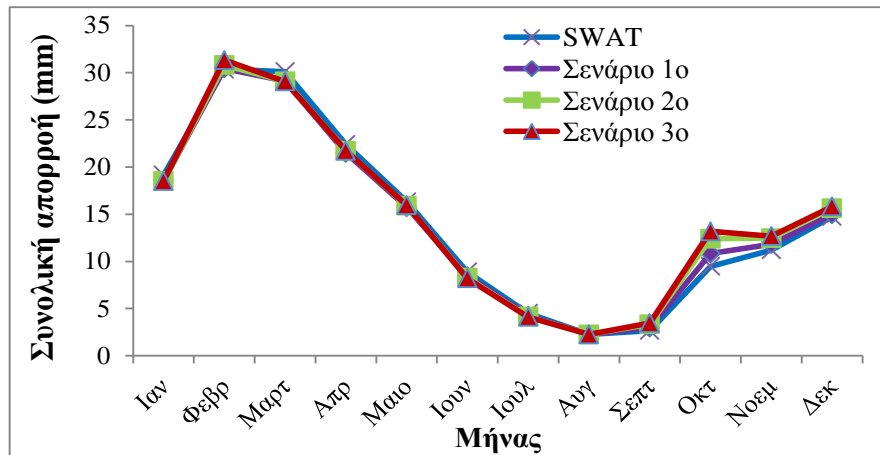
Σχήμα 7.20: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών επιφανειακής απορροής (mm).



Σχήμα 7.21: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών υπόγειας απορροής (mm).



Σχήμα 7.22: Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών ενδιάμεσης απορροής (mm).



Σχήμα 7.23: Σύγκριση μέσω μηνιαίων τιμών συνολικής απορροής (mm).

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- i) Η συνολική απορροή φαίνεται να μην μεταβάλλεται δραματικά εκτός από τους μήνες Οκτώβρη έως Δεκέμβρη οπότε και αυξάνεται λίγο. Μεγαλύτερη είναι η αύξηση τον Οκτώβρη.
- ii) Όσον αφορά την επιφανειακή απορροή, παρατηρείται πως τα τρία σενάρια στο διάγραμμα εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Με εξαίρεση το μήνα Μάρτιο, τους υπόλοιπους παρατηρείται αύξηση του ύψους της απορροής με αποκορύφωμα τους μήνες Φεβρουάριο και Οκτώβριο. Το Σενάριο 3 παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από το Σενάριο 1, όπου καίγεται μικρότερη έκταση, κάτι που είναι αναμενόμενο. Τους θερινούς μήνες οι τιμές του μεγέθους αυτού μηδενίζονται.
- iii) Μελετώντας τη μεταβολή της υπόγειας απορροής φαίνεται τους μήνες Ιούνιο έως Νοέμβριο οι τιμές των σεναρίων να συμπίπτουν με αυτές της βαθμονόμησης του SWAT ενώ τους υπόλοιπους οι τιμές μειώνονται για όλα τα σενάρια.
- iv) Τέλος, μελετώντας την ενδιάμεση απορροή, φαίνεται πως τα σενάρια μεταξύ τους να μην εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ενδιάμεση απορροή δεν προκύπτει από το υδρολογικό μοντέλο αλλά υπολογίζεται από αφαίρεση της υπόγειας και επιφανειακής απορροής από τη συνολική, οπότε στις τιμές του μεγέθους αυτού μεταφέρονται τα σφάλματα των υπολοίπων συνιστωσών.

8 Σύνοψη-Συμπεράσματα

8.1 Σύνοψη - Προβλήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων μιας πυρκαγιάς στο υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα σε αυτή του ποταμού Ενιπέα στη θέση Παλαιοδερλί.

Κατά τη φάση εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε μια σειρά από προβλήματα τα οποία εν τέλει αντιμετωπίστηκαν. Κατ' αρχήν, για τη δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ) και τη χάραξη του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής δεν υπήρχαν διαθέσιμα ψηφιοποιημένα αρχεία σε οποιαδήποτε μορφή. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν αναλογικοί χάρτες της ΓΥΣ σε κλίμακα 1:50.000 οι οποίοι και ψηφιοποιήθηκαν αφού πρώτα γεωαναφέρθηκαν στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87 χρησιμοποιώντας συντεταγμένες γνωστών σημείων, κάτι το οποίο ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρο και επίπονο. Όλη αυτή η διαδικασία εμπεριέχει κάποιο σφάλμα καθώς και στο στάδιο του σκαναρίσματος εισάγεται κάποιος «θόρυβος» όσο και στη διαδικασία της γεωαναφοράς και της ψηφιοποίησης υπάρχει σφάλμα. Ωστόσο, για την ακρίβεια που απαιτεί η συγκεκριμένη μελέτη, η διαδικασία που ακολουθήθηκε επαρκεί.

Ένα άλλο πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν η έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων. Όσον αφορά τα βροχομετρικά δεδομένα, δεν βρέθηκαν ημερήσια δεδομένα για όλους τους σταθμούς που περιέβαλαν ή ακόμα βρίσκονταν και μέσα στη λεκάνη απορροής, ενώ ακόμα και αυτά που βρέθηκαν, είχαν κάποιες ελλείψεις και δεδομένα για περιορισμένα υδρολογικά έτη.

Τα θερμοκρασιακά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν για το σταθμό της Σκοπιάς, όπου υπήρχε διαθέσιμη πληροφορία για την ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία για όλα τα υδρολογικά έτη της μελέτης με ελάχιστες ελλείψεις.

Τα δεδομένα που απαιτούνταν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής (ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία και μέρες ηλιοφάνειας) λήφθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Λάρισας. Αυτά ήταν σε μέσες μηνιαίες τιμές, και χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια. Επειδή εν τέλει χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hargreaves, δεν υπήρξε μεγάλο σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα. Δυστυχώς, η Ελλάδα ακόμα δεν διαθέτει οργανωμένη βάση δεδομένων με ημερήσια δεδομένα από βροχομετρικούς και μετεωρολογικούς σταθμούς, κάνοντας την εκπόνηση μελετών πάνω στο αντικείμενο της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων εξαιρετικά δύσκολη. Η παρούσα μελέτη έγινε για τα υδρολογικά έτη 1975-76 έως 1986-87.

Ένα άλλο πρόβλημα που προέκυψε έχει σχέση με το ArcSWAT, το οποίο εμφανίζει αρκετές ασυμβατότητες με διάφορα λογισμικά, αλλά ακόμα και με εκδόσεις του ArcGIS. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο H/Y του εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων που διαθέτει Windows XP (Αγγλική έκδοση) και ArcGIS 9.3.1 Build 3000.

Τέλος, το τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν αυτό της βαθμονόμησης καθώς η λεκάνη ήταν μεγάλη, τα δεδομένα είχαν ελλείψεις, αλλά τελικά, ύστερα από αρκετές επαναλήψεις το μοντέλο βαθμονομήθηκε. Βέβαια, δύο υδρολογικά έτη, ένα στη βαθμονόμηση και ένα στην επαλήθευση εμφάνισαν χαμηλή προσαρμογή σε αντίθεση με τα

υπόλοιπα. Το δύο αυτά έτη τελικά δεν συνυπολογίστηκαν στο συντελεστή Nash, ο οποίος για τη βαθμονόμηση υπολογίστηκε ίσος με 0.762 και για την επαλήθευση 0.751.

8.2 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή δείχνει ότι με τη βοήθεια ενός κατανεμημένου μοντέλου φυσικής βάσης μπορούν να προβλεφθούν οι επιπτώσεις στο υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής αλλαγών στο περιβάλλον της λεκάνης και συγκεκριμένα δασικών πυρκαγιών. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τρία σενάρια πυρκαγιάς φαίνεται ότι μια μεγάλη έκτασης πυρκαγιά δεν επηρεάζει σε τόσο σημαντικό βαθμό το συνολικό άθροισμα των μηνιαίων απορροών αλλά σε μηνιαίο βήμα η αύξηση μπορεί να είναι αρκετά σημαντική. Βέβαια, φάνηκε ότι τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση την είχαν μήνες με μικρές μηνιαίες παροχές. Ωστόσο και σε μήνες με μεγάλους όγκους απορροής υπήρξαν μεγάλες αυξήσεις που έφτασαν σχεδόν και το 40% για το τρίτο σενάριο, στο οποίο καίγεται μεγαλύτερη έκταση απ' ό,τι στα άλλα δύο σενάρια. Οι μήνες που επηρεάστηκαν περισσότερο από τα σενάρια της πυρκαγιάς είναι κυρίως οι μήνες Οκτώβριος έως Φεβρουάριος, αυτοί δηλαδή που δέχονται και τις περισσότερες βροχοπτώσεις, ενώ από τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου αυτή που επηρεάστηκε περισσότερο είναι η επιφανειακή απορροή. Τέλος, φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ της έκτασης της λεκάνης που καίγεται και του συνολικού όγκου της απορροής που αναπαριστάται μαθηματικά με μια εκθετική συνάρτηση.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- Αθανασιά, Γ., *Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη με χρήση του μοντέλου SWAT*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- Κουτσογιάννης, Δ. & Ξανθόπουλος, Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Ναλμπάντης, Ι., και Τσακίρης, Γ., *Υδατικοί Πόροι: Επιφανειακό Υδατικό Δυναμικό*, Κεφάλαιο 2 στο Γ. Τσακίρης (υπεύθυνος έκδοσης), *Υδραυλικά Έργα: Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2006.
- Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- Ναλμπάντης, Ι. & Κουτσογιάννης, Δ., *Ερευνητικό έργο. Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας*, Τεύχος 4 Τελική Έκθεση, 1997.
- Πικούνης, Μ., *Μελέτη Επιπτώσεων και Αλλαγών Χρήσεων Γης στη Λεκάνη Απορροής με χρήση GIS και του Υδρολογικού Μοντέλου SWAT*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- Πικούνης, Μ., *Αρχές καλής Μοντελοποίησης για την Εναρμόνιση των υδρολογικών Ομοιομάτων: Εφαρμογή και Ποιοτικός Έλεγχος του Ομοιώματος SWAT στην Εκτίμηση των Υδρολογικών Επιπτώσεων των Αλλαγών Χρήσεων Γης*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- Στάμου, Λ. & Σκοπελίτη, Α., *Ψηφιακή Χαρτογραφία*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- Τσακίρης, Γ., (Υπεύθυνος Έκδοσης), *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1995.
- Τσακίρης, Γ., (Υπεύθυνος Έκδοσης), *Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός & Διαχείριση II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.

Ξενόγλωσσες

- Arnold, J.G., Williams J.R., Srinivasan R., King, K.W, *Soil and Water Assessment Tool*, 1999.
- Cerrelli, G. A. *FIRE HYDRO, a simplified method for predicting peak discharges to assist in the design of flood protection measures for western wildfires*, Williamsburg, VA. Alexandria, VA: American Society of Civil Engineers: 935-941, 2005.
- Chow, V.T., Maidment D.R. and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.

- Goodrich, D.C., Canfield, H.E., Burns, I.S., Semmens, D.J., Miller, S.N., Hernandez, M., Levick, L.R., Guertin, D.P., Kepner, W.G., *Rapid Post-Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GIS-based Hydrologic Modeling Tool*, 2005.
- Gregory, K.J. & D.E. Walling, *Drainage Basin. Form and Process*, A Geomorphical Approach. Fletcher and Son Ltd., Norwich, U.K., 1983.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., *Reference crop evapotranspiration from temperature*, Apple. Eng. In Agr., 1(2): 96-99, 1985.
- Higginson, B., Jarnecke, J., Salt Creek BAER-2007 *Burned Area Emergency Response*, Provo, UT: Uinta National Forest; Hydrology Specialist Report. 11 p., 2007.
- Livingston, R.K., Earles, T.A., Wright, K.R. *Los Alamos post-fire watershed recovery: a curve-number-based evaluation*, 2005.
- Monteith, J.L., *Evaporation and environment*, Symp. Soc. Exp. Biol. 19, 205-234, 1965.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. *River flow forecasting through conceptual models*, I. A discussion of principles, Journal of hydrology 10(3), 282-290, 1970.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G. & Williams, J.R. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*, Texas, USA, 1999.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, G.R. & Williams, J.R. *Soil and Water Assessment Theoretical Tool Documentation*, Texas, USA, 2005.
- Solt, A., Muir, M. *Warm Fire--hydrology and watershed report*. Richfield, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Region, Fishlake National Forest. 9 p., 2006.
- Thornthwaite, C.W. *An approach toward a rational classification of climate*, Geogr. Rev., 38(1), 55-94, 1948.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, E. *The water Balance*, Drexel Inst. Tech. Publ. in Climatol., 8(8), 1-104, 1955.
- USDA Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology, Chapter 19, 1972.

Διαδίκτυο

<http://ecourses.dbnet.ntua.gr/10605.html>

<http://www.grid.unep.ch>

<http://www.thessalia.gr>

Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας Α1: Μέσες μηνιαίες τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου για το 1^ο Σενάριο.

Μήνας	Επιφανειακή απορροή	Υπόγεια απορροή	Ενδιάμεση απορροή	Συνολική απορροή	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
Ιαν	0.79	9.67	8.13	18.59	65.03	20.08	31.63
Φεβρ	6.42	13.46	10.56	30.44	67.26	25.30	39.21
Μαρτ	2.62	18.01	8.51	29.14	60.29	42.30	66.28
Απρ	0.80	15.74	4.95	21.49	52.78	58.39	103.34
Μαιο	1.13	11.30	3.30	15.73	37.83	66.89	151.10
Ιουν	0.02	6.40	2.01	8.43	21.99	62.46	182.90
Ιουλ	0.00	3.37	0.86	4.23	14.71	52.12	203.08
Αυγ	0.01	1.24	1.02	2.27	16.85	32.56	178.26
Σεπτ	0.32	0.59	2.07	2.98	31.85	20.45	126.10
Οκτ	4.86	0.45	5.52	10.83	84.11	19.97	77.26
Νοε	2.11	2.32	7.39	11.82	74.64	20.79	41.05
Δεκ	1.69	5.20	8.10	14.99	79.33	18,18	29.30
Σύνολο	20.77	87.75	62.42	170.94	606.67	439.49	1229.84

Πίνακας Α2: Μέσες μηνιαίες τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου για το 2^ο Σενάριο.

Μήνας	Επιφανειακή απορροή	Υπόγεια απορροή	Ενδιάμεση απορροή	Συνολική απορροή	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
Ιαν	1.60	9.46	7.46	18.52	65.03	19.99	31.63
Φεβρ	8.34	13.22	9.24	30.8	67.26	25.22	39.21
Μαρτ	3.78	17.67	7.64	29.09	60.29	42.31	66.28
Απρ	1.78	15.43	4.52	21.73	52.78	58.20	103.34
Μαιο	1.91	8.92	5.07	15.90	37.83	66.34	151.10
Ιουν	0.16	6.27	1.84	8.27	21.99	61.77	182.90
Ιουλ	0.05	3.27	0.82	4.14	14.71	51.47	203.08
Αυγ	0.07	1.20	0.99	2.26	16.85	32.20	178.26
Σεπτ	0.90	0.57	1.86	3.33	31.85	20.15	126.10
Οκτ	7.20	0.44	4.76	12.4	84.11	19.86	77.26
Νοε	3.41	2.26	6.79	12.46	74.64	20.68	41.05
Δεκ	2.97	5.09	7.58	15.64	79.33	18.09	29.30
Σύνολο	32.17	83.8	58.57	174.54	606.67	436.28	1229.84

Πίνακας Α3: Μέσες μηνιαίες τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου για το 3^ο Σενάριο.

Μήνας	Επιφανειακή απορροή	Υπόγεια απορροή	Ενδιάμεση απορροή	Συνολική απορροή	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
Ιαν	1.83	9.45	7.24	18.52	65.03	19.97	31.63
Φεβρ	9.58	13.08	8.68	31.34	67.26	25.19	39.21
Μαρτ	4.19	17.46	7.42	29.07	60.29	42.27	66.28
Απρ	2.04	16.66	3.03	21.73	52.78	58.13	103.34
Μαιο	2.16	10.97	2.82	15.95	37.83	66.14	151.10
Ιουν	0.19	6.21	1.79	8.19	21.99	61.45	182.90
Ιουλ	0.05	3.23	0.83	4.11	14.71	51.05	203.08
Αυγ	0.08	1.19	0.98	2.25	16.85	31.72	178.26
Σεπτ	1.10	0.56	1.80	3.46	31.85	20.09	126.10
Οκτ	8.20	0.43	4.56	13.19	84.11	19.83	77.26
Νοε	3.83	2.24	6.61	12.68	74.64	20.63	41.05
Δεκ	3.30	5.06	7.45	15.81	79.33	18.06	29.30
Σύνολο	36.55	86.54	53.21	176.3	606.67	434.53	1229.84

Πίνακας Α4: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 1^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s.

Μήνας	Σενάριο 1 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 1 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Οκτ-75	0.321	0.238	34.803	0.083	Οκτ-81	0.803	0.603	33.311	0.201
Νοε-75	0.941	0.766	22.824	0.175	Νοε-81	2.782	2.336	19.092	0.446
Δεκ-75	1.666	1.475	12.949	0.191	Δεκ-81	1.826	1.891	-3.437	-0.065
Ιαν-76	1.565	1.381	13.324	0.184	Ιαν-82	1.591	1.738	-8.458	-0.147
Φεβ-76	14.150	13.250	6.792	0.900	Φεβ-82	5.575	5.232	6.556	0.343
Μαρ-76	5.430	5.787	-6.169	-0.357	Μαρ-82	6.962	7.174	-2.955	-0.212
Απρ-76	4.067	4.153	-2.071	-0.086	Απρ-82	5.197	5.445	-4.555	-0.248
Μαϊ-76	2.206	2.233	-1.209	-0.027	Μαϊ-82	6.960	6.536	6.487	0.424
Ιουν-76	1.000	0.997	0.261	0.003	Ιουν-82	3.815	3.974	-4.001	-0.159
Ιουλ-76	0.469	0.411	14.133	0.058	Ιουλ-82	2.112	2.184	-3.297	-0.072
Αυγ-76	0.461	0.354	30.164	0.107	Αυγ-82	1.468	1.424	3.090	0.044
Σεπ-76	0.187	0.125	49.043	0.062	Σεπ-82	1.070	0.981	9.117	0.089
Οκτ-76	0.635	0.518	22.578	0.117	Οκτ-82	0.836	0.751	11.249	0.085
Νοε-76	0.915	0.786	16.302	0.128	Νοε-82	1.292	1.120	15.357	0.172
Δεκ-76	0.423	0.379	11.727	0.044	Δεκ-82	1.182	1.144	3.322	0.038
Ιαν-77	0.188	0.155	21.553	0.033	Ιαν-83	1.001	1.034	-3.191	-0.033
Φεβ-77	0.023	0.010	121.714	0.013	Φεβ-83	1.002	0.999	0.260	0.003
Μαρ-77	0.072	0.049	46.660	0.023	Μαρ-83	2.497	2.451	1.877	0.046
Απρ-77	0.403	0.312	29.075	0.091	Απρ-83	1.366	1.417	-3.599	-0.051
Μαϊ-77	0.030	0.011	177.512	0.019	Μαϊ-83	0.772	0.755	2.238	0.017
Ιουν-77	0.354	0.242	45.833	0.111	Ιουν-83	0.968	0.841	15.217	0.128
Ιουλ-77	0.000	0.000	0.000	0.000	Ιουλ-83	0.334	0.222	50.045	0.111
Αυγ-77	0.047	0.023	101.550	0.024	Αυγ-83	0.154	0.086	77.845	0.067
Σεπ-77	0.505	0.368	37.320	0.137	Σεπ-83	0.016	0.001	0.100	0.015
Οκτ-77	0.123	0.110	12.694	0.014	Οκτ-83	0.210	0.162	29.870	0.048
Νοε-77	0.328	0.243	34.967	0.085	Νοε-83	0.980	0.831	17.981	0.149
Δεκ-77	1.633	1.418	15.162	0.215	Δεκ-83	5.760	5.268	9.339	0.492
Ιαν-78	2.262	2.210	2.353	0.052	Ιαν-84	4.731	4.979	-4.981	-0.248
Φεβ-78	4.953	5.038	-1.687	-0.085	Φεβ-84	5.223	5.374	-2.810	-0.151
Μαρ-78	2.860	3.167	-9.694	-0.307	Μαρ-84	5.575	5.733	-2.756	-0.158
Απρ-78	1.972	2.103	-6.229	-0.131	Απρ-84	6.349	6.392	-0.673	-0.043
Μαϊ-78	1.100	1.120	-1.786	-0.020	Μαϊ-84	4.210	4.348	-3.174	-0.138
Ιουν-78	0.436	0.387	12.678	0.049	Ιουν-84	2.373	2.412	-1.617	-0.039
Ιουλ-78	0.140	0.060	133.712	0.080	Ιουλ-84	1.016	0.991	2.512	0.025
Αυγ-78	0.226	0.143	58.135	0.083	Αυγ-84	0.289	0.201	43.703	0.088
Σεπ-78	2.697	2.138	26.146	0.559	Σεπ-84	0.040	0.020	94.496	0.019
Οκτ-78	1.015	0.881	15.262	0.134	Οκτ-84	0.044	0.021	107.523	0.023
Νοε-78	1.543	1.537	0.390	0.006	Νοε-84	0.893	0.759	17.677	0.134
Δεκ-78	2.362	2.386	-1.006	-0.024	Δεκ-84	1.431	1.211	18.167	0.220
Ιαν-79	2.418	2.554	-5.325	-0.136	Ιαν-85	4.898	4.790	2.255	0.108

Πίνακας Α4: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 1^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s (συνέχεια).

Μήνας	Σενάριο 1 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 1 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Φεβ-79	2.344	2.429	-3.499	-0.085	Φεβ-85	3.981	4.319	-7.826	-0.338
Μαρ-79	1.464	1.544	-5.181	-0.080	Μαρ-85	3.713	3.919	-5.256	-0.206
Απρ-79	1.147	1.119	2.502	0.028	Απρ-85	3.176	3.278	-3.112	-0.102
Μαϊ-79	0.824	0.724	13.820	0.100	Μαϊ-85	1.597	1.659	-3.737	-0.062
Ιουν-79	0.413	0.291	41.764	0.122	Ιουν-85	0.371	0.338	9.742	0.033
Ιουλ-79	0.431	0.296	45.654	0.135	Ιουλ-85	0.029	0.009	232.878	0.020
Αυγ-79	0.002	0.000	0.000	0.002	Αυγ-85	0.000	0.000	0.000	0.000
Σεπ-79	0.068	0.040	72.562	0.029	Σεπ-85	0.044	0.020	121.806	0.024
Οκτ-79	3.082	2.489	23.825	0.593	Οκτ-85	0.918	0.747	22.845	0.171
Νοε-79	6.388	6.111	4.533	0.277	Νοε-85	1.915	1.583	20.973	0.332
Δεκ-79	6.507	6.594	-1.319	-0.087	Δεκ-85	1.623	1.654	-1.874	-0.031
Ιαν-80	6.137	6.617	-7.254	-0.480	Ιαν-86	1.965	2.083	-5.665	-0.118
Φεβ-80	5.645	6.021	-6.245	-0.376	Φεβ-86	2.682	2.770	-3.177	-0.088
Μαρ-80	7.883	7.920	-0.467	-0.037	Μαρ-86	2.942	3.071	-4.201	-0.129
Απρ-80	4.778	5.060	-5.573	-0.282	Απρ-86	1.999	2.091	-4.400	-0.092
Μαϊ-80	2.982	3.103	-3.899	-0.121	Μαϊ-86	1.625	1.556	4.434	0.069
Ιουν-80	1.570	1.577	-0.444	-0.007	Ιουν-86	0.259	0.189	37.104	0.070
Ιουλ-80	0.645	0.598	7.807	0.047	Ιουλ-86	0.330	0.200	64.671	0.130
Αυγ-80	0.322	0.258	24.767	0.064	Αυγ-86	0.060	0.027	120.674	0.033
Σεπ-80	0.179	0.102	76.130	0.078	Σεπ-86	0.042	0.019	121.215	0.023
Οκτ-80	12.010	10.600	13.302	1.410	Οκτ-86	0.868	0.683	27.097	0.185
Νοε-80	4.537	4.974	-8.786	-0.437	Νοε-86	1.196	1.056	13.258	0.140
Δεκ-80	4.302	4.659	-7.663	-0.357	Δεκ-86	0.542	0.507	6.840	0.035
Ιαν-81	5.167	5.417	-4.615	-0.250	Ιαν-87	4.392	4.235	3.707	0.157
Φεβ-81	14.220	13.740	3.493	0.480	Φεβ-87	3.555	3.785	-6.077	-0.230
Μαρ-81	6.403	6.780	-5.560	-0.377	Μαρ-87	11.030	10.730	2.796	0.300
Απρ-81	4.189	4.373	-4.208	-0.184	Απρ-87	8.286	8.375	-1.063	-0.089
Μαϊ-81	2.213	2.273	-2.640	-0.060	Μαϊ-87	5.370	5.783	-7.142	-0.413
Ιουν-81	1.144	1.099	4.095	0.045	Ιουν-87	3.143	3.379	-6.984	-0.236
Ιουλ-81	0.563	0.475	18.346	0.087	Ιουλ-87	1.010	1.110	-9.009	-0.100
Αυγ-81	0.337	0.256	31.435	0.081	Αυγ-87	0.133	0.069	91.342	0.063
Σεπ-81	0.310	0.222	39.344	0.088	Σεπ-87	0.191	0.132	44.360	0.059

Πίνακας Α5: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 2^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s.

Μήνας	Σενάριο 2 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 2 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Οκτ-75	0.377	0.238	58.186	0.139	Οκτ-81	1.053	0.603	74.772	0.451
Νοε-75	1.023	0.766	33.499	0.257	Νοε-81	3.249	2.336	39.084	0.913
Δεκ-75	1.804	1.475	22.305	0.329	Δεκ-81	1.792	1.891	-5.235	-0.099
Ιαν-76	1.648	1.381	19.334	0.267	Ιαν-82	1.551	1.738	-10.759	-0.187
Φεβ-76	14.460	13.250	9.132	1.210	Φεβ-82	6.205	5.232	18.597	0.973
Μαρ-76	5.364	5.787	-7.309	-0.423	Μαρ-82	6.715	7.174	-6.398	-0.459
Απρ-76	4.196	4.153	1.035	0.043	Απρ-82	5.250	5.445	-3.581	-0.195
Μαϊ-76	2.239	2.233	0.269	0.006	Μαϊ-82	7.581	6.536	15.988	1.045
Ιουν-76	0.984	0.997	-1.254	-0.013	Ιουν-82	3.564	3.974	-10.317	-0.410
Ιουλ-76	0.463	0.411	12.722	0.052	Ιουλ-82	2.016	2.184	-7.692	-0.168
Αυγ-76	0.482	0.354	36.033	0.128	Αυγ-82	1.437	1.424	0.913	0.013
Σεπ-76	0.186	0.125	48.166	0.060	Σεπ-82	1.155	0.981	17.785	0.174
Οκτ-76	0.635	0.518	22.617	0.117	Οκτ-82	0.876	0.751	16.560	0.124
Νοε-76	0.966	0.786	22.826	0.180	Νοε-82	1.393	1.120	24.375	0.273
Δεκ-76	0.425	0.379	12.150	0.046	Δεκ-82	1.182	1.144	3.322	0.038
Ιαν-77	0.189	0.155	22.006	0.034	Ιαν-83	0.998	1.034	-3.501	-0.036
Φεβ-77	0.023	0.010	122.493	0.013	Φεβ-83	1.003	0.999	0.360	0.004
Μαρ-77	0.072	0.049	45.746	0.023	Μαρ-83	2.542	2.451	3.713	0.091
Απρ-77	0.442	0.312	41.531	0.130	Απρ-83	1.339	1.417	-5.505	-0.078
Μαϊ-77	0.030	0.011	178.433	0.019	Μαϊ-83	0.756	0.755	0.132	0.001
Ιουν-77	0.419	0.242	72.731	0.176	Ιουν-83	1.002	0.841	19.215	0.162
Ιουλ-77	0.000	0.000	0.000	0.000	Ιουλ-83	0.339	0.222	52.518	0.117
Αυγ-77	0.047	0.023	101.981	0.024	Αυγ-83	0.154	0.086	77.960	0.067
Σεπ-77	0.530	0.368	44.115	0.162	Σεπ-83	0.015	0.001	0.100	0.014
Οκτ-77	0.123	0.110	12.146	0.013	Οκτ-83	0.209	0.162	29.128	0.047
Νοε-77	0.330	0.243	36.038	0.088	Νοε-83	0.996	0.831	19.834	0.165
Δεκ-77	1.686	1.418	18.900	0.268	Δεκ-83	6.491	5.268	23.216	1.223
Ιαν-78	2.297	2.210	3.937	0.087	Ιαν-84	4.496	4.979	-9.701	-0.483
Φεβ-78	5.173	5.038	2.680	0.135	Φεβ-84	5.208	5.374	-3.089	-0.166
Μαρ-78	2.861	3.167	-9.662	-0.306	Μαρ-84	5.500	5.733	-4.064	-0.233
Απρ-78	1.972	2.103	-6.229	-0.131	Απρ-84	6.447	6.392	0.860	0.055
Μαϊ-78	1.111	1.120	-0.804	-0.009	Μαϊ-84	4.146	4.348	-4.646	-0.202
Ιουν-78	0.438	0.387	12.987	0.050	Ιουν-84	2.331	2.412	-3.358	-0.081
Ιουλ-78	0.140	0.060	133.712	0.080	Ιουλ-84	0.998	0.991	0.666	0.007
Αυγ-78	0.240	0.143	68.583	0.098	Αυγ-84	0.290	0.201	44.102	0.089
Σεπ-78	3.265	2.138	52.713	1.127	Σεπ-84	0.039	0.020	93.415	0.019
Οκτ-78	1.159	0.881	31.615	0.278	Οκτ-84	0.049	0.021	128.131	0.027
Νοε-78	1.538	1.537	0.065	0.001	Νοε-84	0.905	0.759	19.139	0.145
Δεκ-78	2.386	2.386	0.000	0.000	Δεκ-84	1.664	1.211	37.407	0.453
Ιαν-79	2.384	2.554	-6.656	-0.170	Ιαν-85	5.020	4.790	4.802	0.230

Πίνακας Α5: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 2^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s (συνέχεια).

Μήνας	Σενάριο 2 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 2 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Φεβ-79	2.318	2.429	-4.570	-0.111	Φεβ-85	3.908	4.319	-9.516	-0.411
Μαρ-79	1.440	1.544	-6.736	-0.104	Μαρ-85	3.716	3.919	-5.180	-0.203
Απρ-79	1.162	1.119	3.843	0.043	Απρ-85	3.141	3.278	-4.179	-0.137
Μαϊ-79	0.860	0.724	18.892	0.137	Μαϊ-85	1.572	1.659	-5.244	-0.087
Ιουν-79	0.442	0.291	51.647	0.151	Ιουν-85	0.374	0.338	10.601	0.036
Ιουλ-79	0.430	0.296	45.485	0.135	Ιουλ-85	0.030	0.009	241.982	0.021
Αυγ-79	0.002	0.000	0.000	0.002	Αυγ-85	0.000	0.000	0.000	0.000
Σεπ-79	0.069	0.040	73.343	0.029	Σεπ-85	0.043	0.020	113.623	0.023
Οκτ-79	3.616	2.489	45.279	1.127	Οκτ-85	1.030	0.747	37.848	0.283
Νοε-79	6.900	6.111	12.911	0.789	Νοε-85	2.248	1.583	42.009	0.665
Δεκ-79	6.702	6.594	1.638	0.108	Δεκ-85	1.597	1.654	-3.446	-0.057
Ιαν-80	5.888	6.617	-11.017	-0.729	Ιαν-86	1.945	2.083	-6.625	-0.138
Φεβ-80	5.510	6.021	-8.487	-0.511	Φεβ-86	2.660	2.770	-3.971	-0.110
Μαρ-80	7.911	7.920	-0.114	-0.009	Μαρ-86	2.916	3.071	-5.047	-0.155
Απρ-80	4.676	5.060	-7.589	-0.384	Απρ-86	1.970	2.091	-5.787	-0.121
Μαϊ-80	2.954	3.103	-4.802	-0.149	Μαϊ-86	1.739	1.556	11.761	0.183
Ιουν-80	1.537	1.577	-2.536	-0.040	Ιουν-86	0.272	0.189	43.552	0.082
Ιουλ-80	0.627	0.598	4.881	0.029	Ιουλ-86	0.366	0.200	82.585	0.166
Αυγ-80	0.313	0.258	21.202	0.055	Αυγ-86	0.061	0.027	125.713	0.034
Σεπ-80	0.176	0.102	72.790	0.074	Σεπ-86	0.042	0.019	121.215	0.023
Οκτ-80	13.640	10.600	28.679	3.040	Οκτ-86	1.186	0.683	73.620	0.503
Νοε-80	4.262	4.974	-14.314	-0.712	Νοε-86	1.202	1.056	13.826	0.146
Δεκ-80	4.263	4.659	-8.500	-0.396	Δεκ-86	0.551	0.507	8.516	0.043
Ιαν-81	5.105	5.417	-5.760	-0.312	Ιαν-87	4.659	4.235	10.012	0.424
Φεβ-81	14.140	13.740	2.911	0.400	Φεβ-87	3.505	3.785	-7.398	-0.280
Μαρ-81	6.209	6.780	-8.422	-0.571	Μαρ-87	11.480	10.730	6.990	0.750
Απρ-81	4.105	4.373	-6.129	-0.268	Απρ-87	8.721	8.375	4.131	0.346
Μαϊ-81	2.160	2.273	-4.971	-0.113	Μαϊ-87	5.065	5.783	-12.416	-0.718
Ιουν-81	1.118	1.099	1.729	0.019	Ιουν-87	3.051	3.379	-9.707	-0.328
Ιουλ-81	0.552	0.475	16.074	0.076	Ιουλ-87	0.956	1.110	-13.838	-0.154
Αυγ-81	0.329	0.256	28.315	0.073	Αυγ-87	0.127	0.069	83.117	0.058
Σεπ-81	0.319	0.222	43.390	0.097	Σεπ-87	0.213	0.132	61.469	0.081

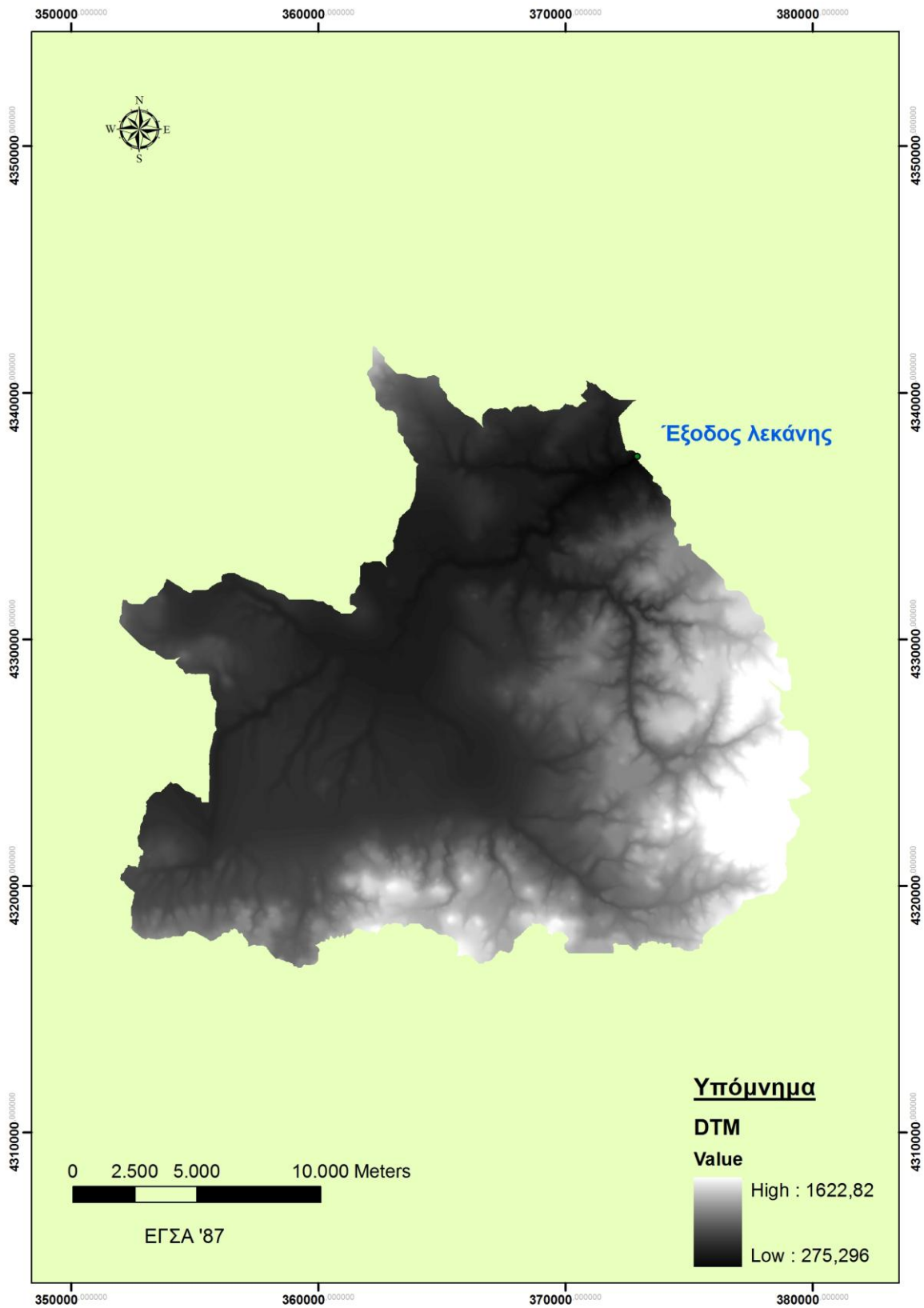
Πίνακας Α6: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 3^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s.

Μήνας	Σενάριο 3 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 3 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Οκτ-75	0.390	0.238	63.770	0.152	Οκτ-81	1.134	0.603	88.216	0.532
Νοε-75	1.042	0.766	35.978	0.276	Νοε-81	3.483	2.336	49.101	1.147
Δεκ-75	1.839	1.475	24.678	0.364	Δεκ-81	1.773	1.891	-6.240	-0.118
Ιαν-76	1.730	1.381	25.272	0.349	Ιαν-82	1.540	1.738	-11.392	-0.198
Φεβ-76	15.090	13.250	13.887	1.840	Φεβ-82	6.420	5.232	22.706	1.188
Μαρ-76	5.095	5.787	-11.958	-0.692	Μαρ-82	6.674	7.174	-6.970	-0.500
Απρ-76	4.124	4.153	-0.698	-0.029	Απρ-82	5.259	5.445	-3.416	-0.186
Μαϊ-76	2.165	2.233	-3.045	-0.068	Μαϊ-82	7.875	6.536	20.487	1.339
Ιουν-76	0.938	0.997	-5.868	-0.059	Ιουν-82	3.484	3.974	-12.330	-0.490
Ιουλ-76	0.441	0.411	7.322	0.030	Ιουλ-82	1.997	2.184	-8.562	-0.187
Αυγ-76	0.477	0.354	34.594	0.123	Αυγ-82	1.431	1.424	0.492	0.007
Σεπ-76	0.181	0.125	44.099	0.055	Σεπ-82	1.177	0.981	20.029	0.196
Οκτ-76	0.634	0.518	22.250	0.115	Οκτ-82	0.884	0.751	17.692	0.133
Νοε-76	0.978	0.786	24.313	0.191	Νοε-82	1.413	1.120	26.161	0.293
Δεκ-76	0.425	0.379	12.124	0.046	Δεκ-82	1.180	1.144	3.147	0.036
Ιαν-77	0.188	0.155	21.877	0.034	Ιαν-83	0.997	1.034	-3.617	-0.037
Φεβ-77	0.023	0.010	121.422	0.012	Φεβ-83	1.003	0.999	0.360	0.004
Μαρ-77	0.072	0.049	45.401	0.022	Μαρ-83	2.554	2.451	4.202	0.103
Απρ-77	0.452	0.312	44.733	0.140	Απρ-83	1.336	1.417	-5.716	-0.081
Μαϊ-77	0.030	0.011	177.788	0.019	Μαϊ-83	0.754	0.755	-0.106	-0.001
Ιουν-77	0.435	0.242	79.414	0.193	Ιουν-83	1.008	0.841	19.929	0.168
Ιουλ-77	0.000	0.000	0.000	0.000	Ιουλ-83	0.340	0.222	52.878	0.118
Αυγ-77	0.047	0.023	102.067	0.024	Αυγ-83	0.154	0.086	78.076	0.068
Σεπ-77	0.537	0.368	45.909	0.169	Σεπ-83	0.015	0.001	0.100	0.014
Οκτ-77	0.123	0.110	12.055	0.013	Οκτ-83	0.209	0.162	29.004	0.047
Νοε-77	0.331	0.243	36.450	0.089	Νοε-83	0.998	0.831	20.087	0.167
Δεκ-77	1.701	1.418	19.958	0.283	Δεκ-83	6.687	5.268	26.936	1.419
Ιαν-78	2.309	2.210	4.480	0.099	Ιαν-84	4.446	4.979	-10.705	-0.533
Φεβ-78	5.229	5.038	3.791	0.191	Φεβ-84	5.221	5.374	-2.847	-0.153
Μαρ-78	2.857	3.167	-9.788	-0.310	Μαρ-84	5.490	5.733	-4.239	-0.243
Απρ-78	1.969	2.103	-6.372	-0.134	Απρ-84	6.471	6.392	1.236	0.079
Μαϊ-78	1.112	1.120	-0.714	-0.008	Μαϊ-84	4.134	4.348	-4.922	-0.214
Ιουν-78	0.438	0.387	13.065	0.051	Ιουν-84	2.325	2.412	-3.607	-0.087
Ιουλ-78	0.140	0.060	133.378	0.080	Ιουλ-84	0.995	0.991	0.353	0.004
Αυγ-78	0.244	0.143	70.968	0.101	Αυγ-84	0.291	0.201	44.599	0.090
Σεπ-78	3.509	2.138	64.125	1.371	Σεπ-84	0.039	0.020	93.366	0.019
Οκτ-78	1.197	0.881	35.930	0.316	Οκτ-84	0.050	0.021	131.822	0.028
Νοε-78	1.531	1.537	-0.390	-0.006	Νοε-84	0.906	0.759	19.376	0.147
Δεκ-78	2.388	2.386	0.084	0.002	Δεκ-84	1.716	1.211	41.701	0.505
Ιαν-79	2.375	2.554	-7.009	-0.179	Ιαν-85	5.050	4.790	5.428	0.260

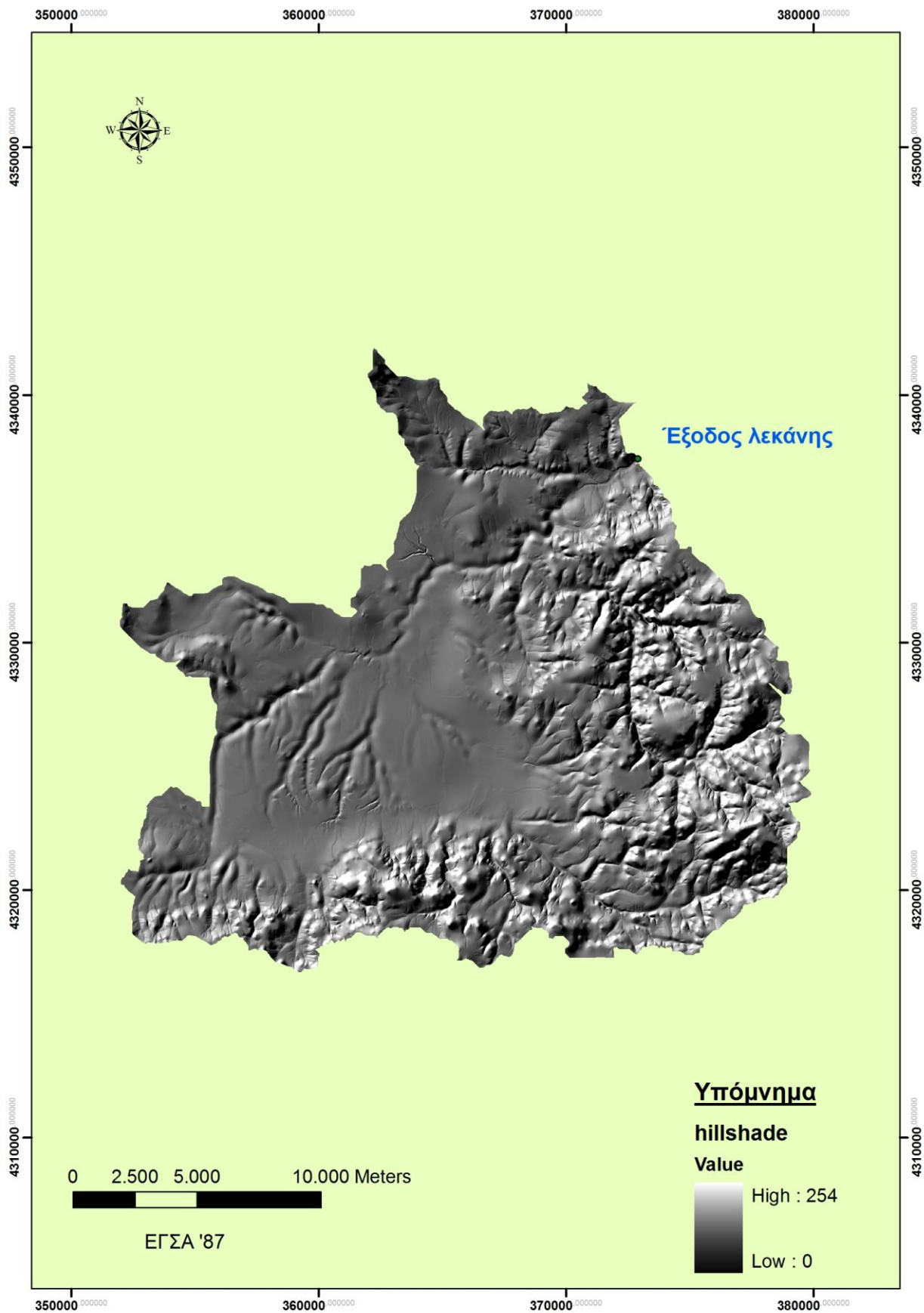
Πίνακας Α6: Σύγκριση της υπολογισμένης για το 3^ο Σενάριο χρονοσειράς απορροών σε σχέση με τη προσομοιωμένη του SWAT σε μηνιαίο βήμα. Οι μήνες με κόκκινο δείχνουν τις αιχμές που είναι μεγαλύτερες από 4 m³/s (συνέχεια).

Μήνας	Σενάριο 3 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)	Μήνας	Σενάριο 3 (m ³ /s)	SWAT (m ³ /s)	Μεταβολή (%)	Διαφορά (m ³ /s)
Φεβ-79	2.316	2.429	-4.652	-0.113	Φεβ-85	3.898	4.319	-9.748	-0.421
Μαρ-79	1.439	1.544	-6.801	-0.105	Μαρ-85	3.720	3.919	-5.078	-0.199
Απρ-79	1.165	1.119	4.111	0.046	Απρ-85	3.139	3.278	-4.240	-0.139
Μαϊ-79	0.867	0.724	19.748	0.143	Μαϊ-85	1.569	1.659	-5.425	-0.090
Ιουν-79	0.448	0.291	53.706	0.157	Ιουν-85	0.372	0.338	10.187	0.034
Ιουλ-79	0.430	0.296	45.316	0.134	Ιουλ-85	0.030	0.009	242.438	0.021
Αυγ-79	0.002	0.000	0.000	0.002	Αυγ-85	0.000	0.000	0.000	0.000
Σεπ-79	0.069	0.040	73.495	0.029	Σεπ-85	0.043	0.020	113.273	0.023
Οκτ-79	3.869	2.489	55.444	1.380	Οκτ-85	1.056	0.747	41.328	0.309
Νοε-79	7.094	6.111	16.086	0.983	Νοε-85	2.328	1.583	47.063	0.745
Δεκ-79	6.783	6.594	2.866	0.189	Δεκ-85	1.586	1.654	-4.111	-0.068
Ιαν-80	5.833	6.617	-11.848	-0.784	Ιαν-86	1.940	2.083	-6.865	-0.143
Φεβ-80	5.489	6.021	-8.836	-0.532	Φεβ-86	2.656	2.770	-4.116	-0.114
Μαρ-80	7.989	7.920	0.871	0.069	Μαρ-86	2.915	3.071	-5.080	-0.156
Απρ-80	4.639	5.060	-8.320	-0.421	Απρ-86	1.969	2.091	-5.835	-0.122
Μαϊ-80	2.936	3.103	-5.382	-0.167	Μαϊ-86	1.764	1.556	13.368	0.208
Ιουν-80	1.523	1.577	-3.424	-0.054	Ιουν-86	0.273	0.189	44.080	0.083
Ιουλ-80	0.621	0.598	3.728	0.022	Ιουλ-86	0.371	0.200	85.279	0.171
Αυγ-80	0.309	0.258	19.574	0.051	Αυγ-86	0.061	0.027	126.047	0.034
Σεπ-80	0.174	0.102	70.923	0.072	Σεπ-86	0.042	0.019	121.477	0.023
Οκτ-80	14.680	10.600	38.491	4.080	Οκτ-86	1.264	0.683	85.039	0.581
Νοε-80	4.151	4.974	-16.546	-0.823	Νοε-86	1.201	1.056	13.731	0.145
Δεκ-80	4.251	4.659	-8.757	-0.408	Δεκ-86	0.551	0.507	8.535	0.043
Ιαν-81	5.054	5.417	-6.701	-0.363	Ιαν-87	4.723	4.235	11.523	0.488
Φεβ-81	14.390	13.740	4.731	0.650	Φεβ-87	3.499	3.785	-7.556	-0.286
Μαρ-81	6.071	6.780	-10.457	-0.709	Μαρ-87	11.820	10.730	10.158	1.090
Απρ-81	4.025	4.373	-7.958	-0.348	Απρ-87	8.876	8.375	5.982	0.501
Μαϊ-81	2.114	2.273	-6.995	-0.159	Μαϊ-87	4.999	5.783	-13.557	-0.784
Ιουν-81	1.093	1.099	-0.546	-0.006	Ιουν-87	3.031	3.379	-10.299	-0.348
Ιουλ-81	0.540	0.475	13.655	0.065	Ιουλ-87	0.943	1.110	-15.045	-0.167
Αυγ-81	0.322	0.256	25.663	0.066	Αυγ-87	0.126	0.069	81.241	0.056
Σεπ-81	0.317	0.222	42.491	0.095	Σεπ-87	0.218	0.132	64.951	0.086

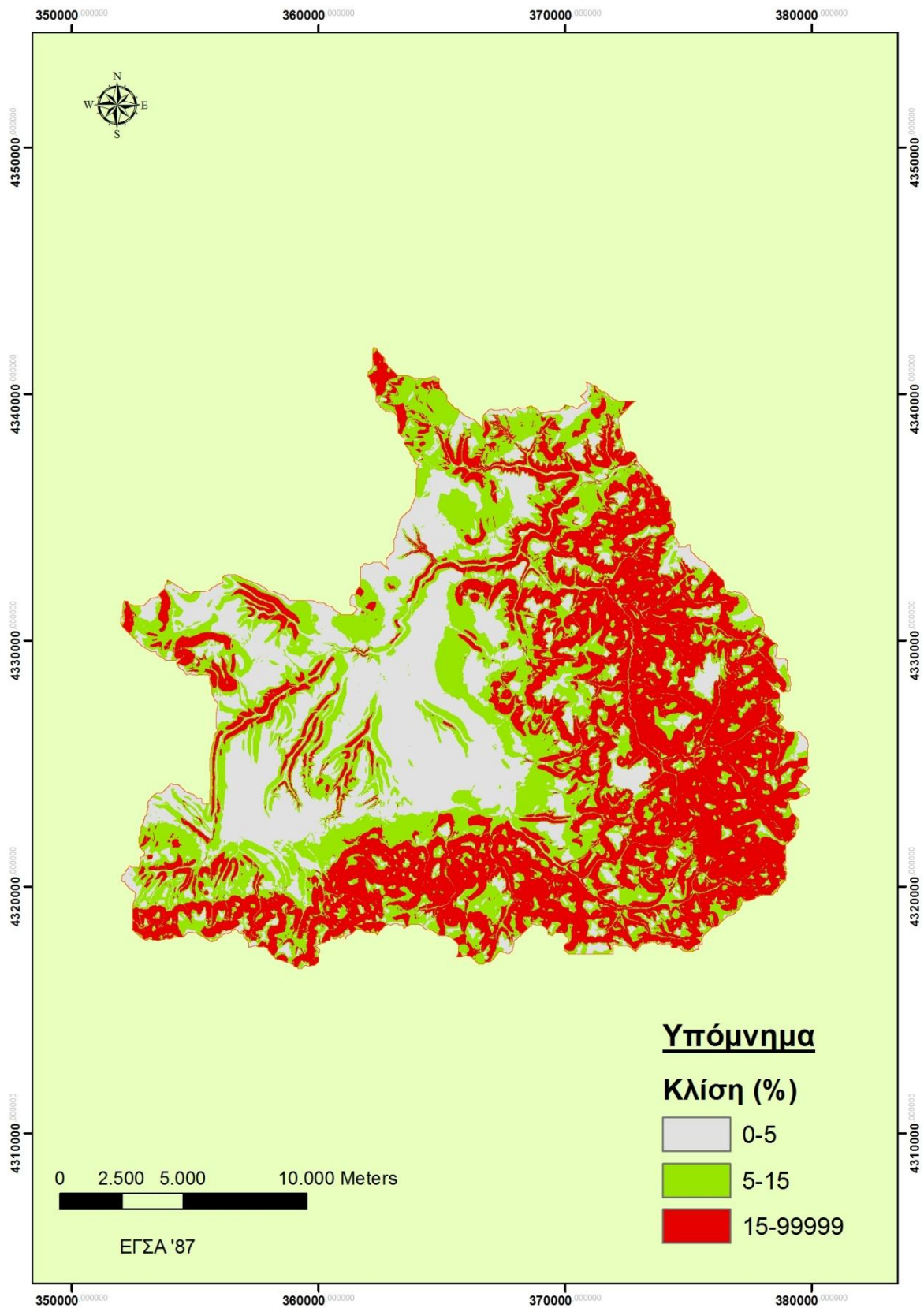
Παράρτημα Β: Σχήματα



Σχήμα Β1: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΕΓΣΑ '87).



Σχήμα Β2: Μοντέλο σκίασης του ΨΜΕ (ΕΓΣΑ '87).



Σχήμα Β3: Χάρτης κλίσεων (ΕΓΣΑ '87).