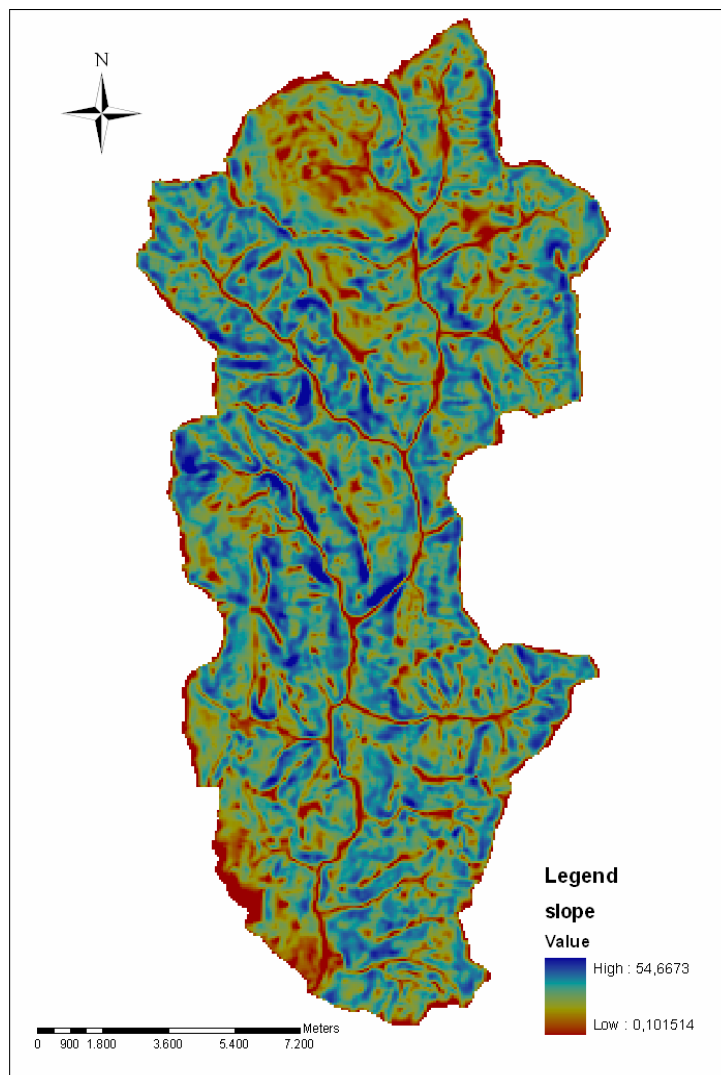




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη με χρήση του μοντέλου SWAT



Αθανασία Γεωργία

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Κατάλογος συμβόλων	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	2
2 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων	3
2.3 Εξέλιξη των μοντέλων βροχής - απορροής	4
2.4 Αναλυτική παρουσίαση επιλεγμένων μοντέλων	5
2.4.1 Μοντέλο Απλού Υδατικού Ισοζυγίου	5
2.4.2 Μοντέλο SWAT	6
2.4.3 Μοντέλο HEC-1	7
2.4.4 Μοντέλο MORIN	8
2.4.5 Μοντέλο ENNS	8
2.4.6 Μοντέλο MERO	10
2.4.7 Μοντέλο STANFORD IV	11
2.4.8 Μοντέλο SHE	11
2.4.9 Μοντέλο ILWAS	13
2.5 Μελλοντικές ανάγκες χρήσης μοντέλων βροχής - απορροής.....	14
2.6 Δείκτες καταλληλότητας των μοντέλων βροχής – απορροής – Ο δείκτης Nash	14
3 Το μοντέλο SWAT	16
3.1 Γενικά για τη λειτουργία του μοντέλου	16
3.2 Περιγραφή του μοντέλου	20
3.2.1 Υδρολογικές διαδικασίες.....	20
3.2.2 Μετεωρολογικές διεργασίες	25
3.3 Επιλογή λογισμικού	28
3.4 Γενική περιγραφή του λογισμικού.....	28
4 Προετοιμασία των δεδομένων του μοντέλου SWAT - Μεθοδολογία	30

4.1	Προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων του μοντέλου.....	30
4.1.1	Γενικές πληροφορίες	30
4.1.2	Ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ.....	30
4.1.3	Επεξεργασία διανυσματικών δεδομένων.....	31
4.1.4	Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.....	32
4.1.5	Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών Λεκάνης Απορροής.....	32
4.2	Προετοιμασία βροχομετρικών δεδομένων	33
4.2.1	Έλεγχος ομογένειας χρονοσειρών βροχόπτωσης.....	33
4.2.2	Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων.....	35
4.2.3	Υπολογισμός μέσου βροχομετρικού ύψους λεκάνης απορροής	35
4.3	Προετοιμασία δεδομένων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.....	37
4.3.1	Γενικά	37
4.3.2	Δεδομένα θερμοκρασίας αέρα.....	37
4.3.3	Ηλιακή ακτινοβολία	38
4.3.4	Υγρασία της ατμόσφαιρας.....	39
4.3.5	Άνεμος	40
4.3.6	Πρακτική σημασία της εξάτμισης και διαπνοής	40
4.3.7	Μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής.....	41
4.3.8	Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman	41
4.3.9	Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Hargreaves.....	42
4.4	Προετοιμασία δεδομένων απορροής	42
4.4.1	Γενικά	42
4.4.2	Κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής με το λογισμικό «Υδρογνώμων».....	43
4.4.3	Κατάρτιση υδρογραφήματος.....	44
5	Ξηρασία	46
5.1	Εισαγωγή	46
5.2	Ορισμοί της ξηρασίας.....	46
5.2.1	Υδρολογική ξηρασία	47
5.3	Στατιστική ανάλυση ελαχίστων παροχών.....	47
5.3.1	Εισαγωγή	47
5.3.2	Χρονοσειρές υδρολογικών φαινομένων	49
5.3.3	Περίοδος επαναφοράς.....	49
5.3.4	Η χρήση των L-ροπών	50
5.3.5	Οι εμπειρικές συναρτήσεις κατανομής.....	51
5.3.6	Δείκτες ξηρασίας από την ανάλυση συχνότητας ελαχίστων.....	52
5.3.7	Έλεγχος καταλληλότητας της θεωρητικής κατανομής πιθανότητας.....	55
6	Λεκάνη απορροής και δεδομένα	56
6.1	Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.....	56
6.2	Λεκάνη Αχελώου	56
6.3	Λεκάνη Αγραφιώτη	57

6.4	Γεωγραφικά δεδομένα	58
6.5	Υδρολογικά δεδομένα.....	60
6.5.1	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.....	60
6.5.2	Θερμοκρασία αέρα – Δυνητικά εξατμισοδιαπνοή.....	67
6.5.3	Απορροή	69
7	Εφαρμογή του μοντέλου SWAT	76
7.1	Διαθεσιμότητα δεδομένων.....	76
7.2	Προετοιμασία δεδομένων για χρήση από το SWAT	76
7.2.1	Το υπόβαθρο Corine.....	78
7.2.2	Αντιστοίχιση χρήσεων γης	80
7.3	Δεδομένα εισόδου και βαθμονόμηση του μοντέλου	82
7.3.1	Δεδομένα εισόδου.....	83
7.3.2	Βαθμονόμηση του SWAT	93
7.3.3	Εκτέλεση προγράμματος	103
7.3.4	Ανάγνωση αποτελεσμάτων.....	103
7.3.5	Βέλτιστες τιμές παραμέτρων	104
7.3.6	Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας.....	107
7.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	112
7.4.1	Γενικά	112
7.4.2	Έλεγχος αποτελεσμάτων	113
7.4.3	Μηνιαία βαθμονόμηση	114
7.4.4	Εφταήμερη βαθμονόμηση	114
7.4.5	Αρχικά αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας χαμηλών απορροών.....	115
7.4.6	Τελικά αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας χαμηλών απορροών.....	115
8	Συμπεράσματα	121
8.1	Συμπεράσματα σχετικά με τη διαθέσιμη πληροφορία και το επιλεγέν μοντέλο	121
8.2	Γενικά συμπεράσματα για την λεκάνη ενδιαφέροντος.....	123
	Αναφορές	125
	Στην ελληνική γλώσσα.....	125
	Ξενόγλωσσες.....	125
	Παράρτημα Α: Πίνακες	127
	Παράρτημα Β: Σχήματα	132

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κο. Ιωάννη Ναλμπάντη, Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ, για την καθοδήγησή του και τη βοήθειά του σε κάθε φάση της δημιουργίας της. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Χαρτογραφίας και ιδιαίτερα την κα. Λήδα Στάμου, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, η συνεισφορά της οποίας ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας, τον κο. Γεώργιο Πανόπουλο, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, τον κο. Τρύφωνα Δασκαλάκη, Δασολόγο του ΙΔΕ, τον κο. Μιχάλη Στεφασδούρο και τον κο. Κουβόπουλο Ιωάννη, Πολιτικούς Μηχανικούς της ΔΕΗ, για τη βοήθειά τους με τα δεδομένα που χρειαζόνταν για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και ιδιαίτερα τους γονείς και τον αδερφό μου για τη διαρκή υποστήριξή τους, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου Soil and Water Assessment Tool (SWAT), για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη, στην τοποθεσία Γέφυρα Βαρβαριάδος. Το SWAT είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου της κατηγορίας των μοντέλων φυσικής βάσης και για τη λειτουργία του απαιτεί λεπτομερή περιγραφή της λεκάνης απορροής, ως προς το ανάγλυφο, τις χρήσεις γης και το έδαφος. Για τον σκοπό αυτό, συγκεντρώθηκαν χάρτες καθώς και μετεωρολογικά στοιχεία για την περιοχή, τα οποία ελέγχθηκαν και συμπληρώθηκαν ως προς τις ελλείψεις τους. Αφού ορίστηκαν τα όρια της εξεταζόμενης υδρολογικής λεκάνης και αναλύθηκε αυτή μορφομετρικά, όλα τα μετεωρολογικά στοιχεία ανάχθηκαν κατάλληλα ώστε να αναφέρονται ρεαλιστικότερα σε αυτήν. Στην πορεία το μοντέλο SWAT βαθμονομήθηκε στην υπό εξέταση λεκάνη ώστε να εξάγει τις εφταήμερες απορροές του ποταμού με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Όλη αυτή η διαδικασία αποσκοπούσε στην τελική φάση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που είναι η στατιστική επεξεργασία των εφταήμερων και μηνιαίων ελάχιστων παροχών ώστε να μελετηθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χαμηλής απορροής της εξεταζόμενης λεκάνης. Βρέθηκαν τα ποσοστιαία σημεία της χαμηλής απορροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς και υπολογίστηκαν οι ποσοστιαίες διαφορές. Η εργασία κατέδειξε πόσο μεγάλες μπορούν να είναι οι αποκλίσεις των στατιστικών αυτών χαρακτηριστικών, όταν τα τελευταία υπολογίζονται με βάση την ιστορική χρονοσειρά και με βάση την προσομοιωμένη με το μοντέλο χρονοσειρά απορροής. Κατά συνέπεια, η μεθοδολογία της απλής επέκτασης των χρονοσειρών απορροής με τη βοήθεια κατανεμημένων μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής φυσικής βάσης χρειάζεται να βελτιωθεί και να συμπληρωθεί. Τότε, βεβαίως, θα υπάρχει η δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων της χρήσης υδρολογικών μοντέλων όπως το SWAT.

Abstract

The current study makes use of the water balance model “Soil and Water Assessment Tool” (SWAT) in order to simulate the hydrological cycle of the Agrafiotis River basin at Barbariada Bridge. SWAT is an integrated physics-based model for simulating the hydrological cycle, which demands a detailed description of the basin, in terms of the landscape, land uses and soils. This is the reason why maps and meteorological data were collected and processed. Data was checked and gaps were filled. The water divide of the examined river basin was determined and geomorphological information about the basin was derived. Meteorological information was transformed to correctly reflect basin’s conditions. The SWAT model was then calibrated so as to reproduce the seven-day average river discharge. This preliminary work aimed to the final target of this work: the statistical analysis of the time series of the minimum seven-day average and the monthly average discharge. Thus, statistical characteristics of low flows were estimated. Specifically, discharge quantiles were used (values for different return periods). The differences between quantiles based on historical and simulated discharges were calculated. This work revealed how large can the divergence be between those statistical characteristics of low flows when these calculated based on the historical time series or based on simulated discharges with the aid of SWAT. Consequently, the method of the simple extension of the discharge time series by means of distributed, physics-based, rainfall – runoff models needs to be improved and complemented. Only then the exploitation of the advantages of using hydrological models such as SWAT will be possible.

Κατάλογος συμβόλων

S_{\max}	Μέγιστη αποθηκευτικότητα του εδάφους
t	Χρονική στιγμή
S_t	Απόθεμα εδαφικής υγρασίας
Δt	Χρονικό διάστημα
$S_{t+\Delta t}$	Απόθεμα εδαφικής υγρασίας στους χρόνους $t+\Delta t$
P_t	Χωρικά μέση βροχόπτωση σε όρους όγκου νερού
E_t	Χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή
Q_t	Απορροή στην έξοδο της λεκάνης.
SW_t	Το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό
R	Ημερήσια κατακρήμνιση
Q	Ημερήσια απορροή
ET	Εξατμισοδιαπνοή
P	Διήθηση
QR	Υπόγεια ροή
CN _{2S}	Η τιμή του CN ₂ προσαρμοσμένη στην εκάστοτε κλίση
CN ₃	Η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες
S	Μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής.
CN ₁	Η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες
s_1	Η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN ₁
SW	Ποσοστό εδαφικής υγρασίας
w_1, w_2	Παράμετροι σχήματος
s	Παράμετρος κατακράτησης
s_{prev}	Παράμετρος κατακράτησης της προηγούμενης μέρας
O	Ρυθμός διήθησης σε mm/ημέρα
SW ₀	Περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στην αρχή της ημέρας σε mm
TT	Χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από το στρώμα i σε ώρες.
H_i	Υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/ώρα
FC _{i}	Υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαρασμού
SC _{i}	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το στρώμα i σε mm/ώρα

β_i	Παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάζει στο μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i
O_{i-1}	Η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/ημέρα
TT_{ci}	Χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από τη ρωγμή σε ώρες
S	Αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα)
q_{lat}	Υποδερμική ροή σε m^3/h
i	Ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m^2/h
L	Μήκος της μισγάγγειας σε m
v	Ταχύτητα ροής στην έξοδο
w	Πλάτος της μισγάγγειας
K_s	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
L_s	Μήκος της κορεσμένης κλιτύς σε m
V_{sa}	Αποθήκευση του επιφανειακού υδροφορέα
R_c	Επαναφόρτιση
re _{vap}	Ροή του νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ
q_{rf}	Υπόγεια ροή
perc _{gw}	Το νερό που διηθείται στο βαθύ υδροφορέα
WU _{SA}	Η χρήση νερού από τον επιφανειακό υδροφορέα
K_d	Υδραυλική αγωγιμότητα
μ	Ειδική απόδοση
R_c	Τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα
h	Το ύψος του νερού
ET _{act}	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ
β_r	Συντελεστής re _{vap}
re _{vap} _{st}	Αποθήκευση του εδαφικού στρώματος
E_p	Προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/ημέρα
E_s	Δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/ημέρα
EA	Δείκτης εδάφους
CV	Το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha
SNO _{mlt}	Η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/ημέρα
b_{mlt}	Παράγοντας τήξης του χιονιού για τη μέρα εκείνη σε mm/ημέρα-°C
sno _{cov}	Ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι
T_{snow}	Θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε °C

T_{mx}	Μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη
T_{mlt}	Θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού.
PW	Πιθανότητα μιας υγρής μέρας
NWD	Αριθμός των υγρών ημερών
ND	Ημέρες που έχει ο μήνας
β	Συντελεστής που κυμαίνεται συνήθως από 0.6 - 0.9
R_{day}	Ποσότητα της βροχής για μια συγκεκριμένη μέρα σε mm
μ_{mon}	Μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα
σ_{mon}	Τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm
SND_{day}	Κανονική τυπική απόκλιση για την ημέρα
g_{mon}	Συντελεστής ασυμμετρίας
SDRA	Τυπική απόκλιση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε MJ/m ²
RAMX	Μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα
RA	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία
μ_{10m}	Μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s
$\mu_{wnd_{mon}}$	Μέση μηνιαία τιμή του ανέμου
rnd_1	Ένα τυχαίο νούμερο
$R_{hW_{mon}}$	Μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα
$R_{hD_{mon}}$	Μέση ημερήσια σχετική υγρασία για τις ξηρές μέρες του μήνα
b_H	Ένας παράγοντας κλίμακας
$T_{soil}(z, dn)$	Μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος z σε mm και την dn ημέρα του μήνα
$\overline{T_{AA}}$	Μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους πάλι σε °C
A_{surf}	Ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C
dd	Καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm
ω_{tmp}	Γωνιακή συχνότητα
z_m	Μέσο υψόμετρο της λεκάνης
z_i	Μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής
A_i	Εμβαδόν της κάθε υποπεριοχής
X_i	Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του σταθμού το υδρολογικό έτος i
i	Η τάξη του νεότερου στοιχείου
$i+1$	Η τάξη του παλαιότερου κατά ένα έτος στοιχείου
α	Συντελεστής αναγωγής
λ_1	Κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

λ_2	Κλίση του παλαιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
P_X	Ζητούμενη τιμή βροχόπτωσης σε σταθμό όπου δεν υπάρχουν δεδομένα
P_1, P_2, P_3	Τιμές βροχόπτωσης στους σταθμούς βάσης 1, 2 και 3
N_1, N_2, N_3	Τιμές της μέσης βροχόπτωσης στους σταθμούς βάσης 1, 2 και 3
N_x	Μέση βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού
A_i	Η έκταση μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών
A	Η Συνολική έκταση της λεκάνης
$\overline{P}_{i-1,i}$	Μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών
λ	Συντελεστής διόρθωσης
β	Βροχοβαθμίδα
P_o	Τιμή του ύψους βροχής στην υψομετρική αναγωγή
\bar{z}	Σταθμικός μέσος των υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη απορροής
T_{\max}	Μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας
T_{\min}	Ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας
T_a	Θερμοκρασία
Z	Υψόμετρο
θ	Θερμοβαθμίδα
e	Τάση των υδρατμών
e_s	Μέγιστη τάση υδρατμών
T_d	Θερμοκρασία σημείου δρόσου
$e_a - e$	Έλλειμμα κορεσμού
A_h	Απόλυτη υγρασία
R_h	Σχετική υγρασία
P	Βροχόπτωση
I	Άρδευση
ΔSW	Η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατανομής
RO	Επιφανειακή απορροή
D	Βαθιά διήθηση
ET	Εξατμισοδιαπνοή
E	Εξάτμιση σε mm/ημέρα
Δ	Κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδάτων σε mmHg/°C
T_a	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	Ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας
N	Μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια
σ	Σταθερά Stephan – Boltzmann
T_{AK}	Θερμοκρασία του αέρα σε °K
r	Albedo
e	Τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}
E_a	Παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών
e_w	Τάση κορεσμένων υδρατμών σε mmHg
e	Τάση υδρατμών
RH	Σχετική υγρασία
γ	Ψυχομετρική σταθερά σε mmHg/°C
f	Συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας που εξετάζουμε
E_{rc}	Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d
S_o	Εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ/(m ² d)
λ	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/kg
T_a	Μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C
Ksat	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
R_h	Βαθμός ανάγλυφου
CNII	Αριθμός καμπύλης τύπου II
AWC	Διαθέσιμη εδαφική υγρασία
C_{vx}	Συντελεστής μεταβλητότητας
T	Περίοδος επαναφοράς μιας ετήσιας σειράς
T_p	Περίοδος επαναφοράς μερικής σειράς
λ_1	Ροπή που σχετίζεται με την παράμετρο θέσης και ταυτίζεται με την κλασική μέση τιμή (ροπή πρώτης τάξης)
λ_2	Ροπή που σχετίζεται με την μεταβλητότητα, η λ_3 με την ασυμμετρία και η λ_4 με την κύρτωση.
τ_2	Συντελεστής μεταβλητότητας
τ_3	Συντελεστής ασυμμετρίας
τ_4	Συντελεστής κύρτωσης
\bar{x}	Μέση τιμή του δείγματος των ετησίων ελαχίστων τιμών
σ	Τυπική απόκλιση του δείγματος.

κ	Παράμετρος σχήματος
λ	Παράμετρος κλίμακας
O_i	Αριθμός των παρατηρήσεων στην κλάση i
E_i	Αριθμός των παρατηρήσεων που προκύπτει από τη θεωρητική κατανομή για την ίδια κλάση (E_i =θεωρητική σχετική συχνότητα πολλαπλασιασμένη επί το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων)
p	Αριθμός των παραμέτρων της θεωρητικής κατανομής που εκτιμώνται από τα δεδομένα
ν	Βαθμοί ελευθερίας
α	Πιθανότητα υπέρβασης
D_{\max}	Η μεγαλύτερη διαφορά της πραγματικής και θεωρητικής αθροιστικής πιθανότητας
D_{cr}	Κρίσιμη τιμή για κάθε επίπεδο εμπιστοσύνης

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η ξηρασία είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, το οποίο είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης πολλών παραγόντων. Είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στην ξηρότητα (aridity) και την ξηρασία (drought). Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του κλίματος, μία μόνιμη κατάσταση να παρουσιάζεται μειωμένη βροχόπτωση, η οποία δεν φτάνει για τη διατήρηση της βλάστησης (Wallen, 1967, Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρία, 1998). Αντίθετα, η ξηρασία (drought) αναφέρεται σε μία παροδική κατάσταση του κλίματος που χαρακτηρίζεται από σημαντική ελάττωση του υετού σε μία περιοχή. Η ξηρασία δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, αλλά είναι δυνατόν να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε περιοχή του κόσμου. Είναι λάθος να θεωρείται ότι η ξηρασία είναι πρόβλημα μόνον των ξηρών και ερημικών περιοχών (Αναγνωστοπούλου, 2003). Αντίθετα, η εμφάνιση ξηρασίας σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από σημαντικά ποσά βροχόπτωσης, προκαλεί πολύ περισσότερα προβλήματα σε σχέση με αυτά που εμφανίζονται στις ξηρές περιοχές. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό από το γεγονός ότι στις περιοχές με ξηρό κλίμα τα οικοσυστήματα έχουν συνηθίσει να επιβιώνουν με περιορισμένη υγρασία, ενώ, αντίθετα, στην περίπτωση περιοχών με υγρό κλίμα, τα οικοσυστήματα είναι δυνατόν να παρουσιάσουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις, ακόμα και να καταστραφούν αν το ποσό της βροχόπτωσης περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό.

Ειδικότερα, η Ελλάδα δεν υστερεί ούτε σε βροχοπτώσεις, ούτε σε χιονοπτώσεις, ενώ το συνολικό υδατικό δυναμικό που εμφανίζει είναι σχετικά μεγάλο, όμως το γεωγραφικό και γεωμορφολογικό ανάγλυφο και, γενικά, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν είναι τέτοιες που συμβάλλουν στην άνιση κατανομή των βροχοπτώσεων, τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η δυτική Ελλάδα εμφανίζει μεγαλύτερα ύψη βροχής σε σχέση με την υπόλοιπη, ενώ οι ορεινές περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερα ύψη βροχής και χιονιού σε σχέση με τις πεδινές περιοχές. Το καλοκαίρι, καταγράφονται τα μικρότερα ύψη βροχής σε σχέση με τις άλλες εποχές, σε ολόκληρο τον ελληνικό χώρο. Η ανισοκατανομή αυτή είναι χαρακτηριστικό των κανονικών συνθηκών στο κλίμα της Ελλάδας. Δεν είναι όμως σπάνιο το γεγονός να παρατηρηθούν σημαντικές διαφοροποιήσεις από αυτήν την κατάσταση, όπως είναι η εμφάνιση ξηρασίας σε οποιαδήποτε περιοχή της Ελλάδας και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Η πιθανολογούμενη αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ξηρασίας στην Ελλάδα αποτέλεσε το έναυσμα για μία πρωτότυπη μελέτη των χαρακτηριστικών της ξηρασίας σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αυτή της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη και, συγκεκριμένα, των στατιστικών χαρακτηριστικών της χαμηλής απορροής της εξεταζόμενης λεκάνης.

Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, έγιναν πολλές ενέργειες και χρειάστηκε αρκετή δουλειά. Ένα καίριο και σημαντικό κομμάτι ήταν η επέκταση της χρονοσειράς της απορροής του ποταμού επειδή χρειαζόμασταν περισσότερα δεδομένα για να γίνει η στατιστική εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της χαμηλής απορροής. Όλες οι διεργασίες που προηγήθηκαν του τελικού συμπεράσματος παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία παρουσιάζεται σε 8 κεφάλαια κατά την σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι διεργασίες και επεξεργασίες που ήταν απαραίτητες για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων για το υδατικό δυναμικό της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη και τη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών της χαμηλής απορροής της περιοχής.

Κεφάλαιο 1

Παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία που αφορούν το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο κινήθηκε η διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Παρουσιάζονται τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής, η ταξινόμησή τους και η εξέλιξή τους στο χρόνο.

Κεφάλαιο 3

Παρουσιάζεται το μοντέλο SWAT, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη.

Κεφάλαιο 4

Παρουσιάζεται αναλυτικά η προετοιμασία των γεωγραφικών δεδομένων - με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS (δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους κλπ.) -, των βροχομετρικών δεδομένων, των δεδομένων που αφορούν στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και των δεδομένων απορροής.

Κεφάλαιο 5

Παρουσιάζεται το φαινόμενο της ξηρασίας και τα χαρακτηριστικά της με τη χρήση κατανομών από το λογισμικό 'Υδρογνώμων'.

Κεφάλαιο 6

Παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη και όλα τα στοιχεία που προέκυψαν για αυτή.

Κεφάλαιο 7

Παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου SWAT στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή και η στατιστική ανάλυση των χαμηλών παροχών του ποταμού.

Κεφάλαιο 8

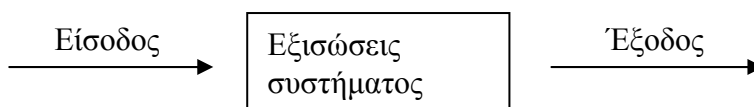
Είναι το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας στο οποίο και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα από τη μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας και τις άλλες ενέργειες που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής

2.1 Γενικά

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

Σχηματικά, ένα υδρολογικό μοντέλο αναπαρίσταται ως εξής:



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικού μοντέλου

Ως δεδομένα εισόδου συνήθως εμφανίζονται διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως είναι οι κατακρημνίσεις, οι θερμοκρασίες, η ταχύτητα του ανέμου κλπ. Στην πορεία χρησιμοποιείται ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροή (κατακράτηση, εξατμισοδιαπνοή, διήθηση, επιφανειακή απορροή, ενδιάμεση απορροή, εδαφική υγρασία, αποθήκευση υπόγειου ορίζοντα). Τα τελευταία χρόνια, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, οδήγησε στην εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διαδικασιών. Τέλος, αυτό που προκύπτει από τη συνδυασμένη χρήση όλων αυτών των εξισώσεων είναι η απορροή και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού.

2.2 Γενική ταξινόμηση μοντέλων

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

Ανάλογα με τη χωρική μεταβλητότητα διεργασιών τα μοντέλα διαχωρίζονται σε αδρομερή (lumped) και κατανεμημένα (distributed) (Ναλμπάντης, 2007). Στα πρώτα η λεκάνη είναι μια χωρική ενότητα με ενιαία υδρολογικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά ενώ στα δεύτερα η λεκάνη διασπάται σε τμήματα με διαφορετικά υδρολογικά μεγέθη και άλλα χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο ταξινόμησης των μοντέλων αυτά χωρίζονται σε μοντέλα 'μαύρου κουτιού' (black box), εννοιολογικά μοντέλα (conceptual) και μοντέλα φυσικής βάσης (physics-based). Το πρώτο είδος μοντέλου χρησιμοποιεί σχέσεις της θεωρίας της ανάλυσης συστημάτων χωρίς θεώρηση φυσικών νόμων ούτε και εμπειρικών σχέσεων. Το δεύτερο είδος χρησιμοποιεί μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο και το τρίτο είδος κάνει χρήση μαθηματικών σχέσεων που αναπαριστούν φυσικούς νόμους.

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των μοντέλων βροχόπτωσης - απορροής είναι σε αιτιοκρατικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic), ανάλογα με το χειρισμό αβεβαιότητας. Στα αιτιοκρατικά τα υδρολογικά μεγέθη έχουν σταθερές τιμές χωρίς αβεβαιότητα, ενώ στα στοχαστικά ορισμένα εκ των υδρολογικών μεγεθών έχουν αβεβαιότητα. Τέλος, ανάλογα με τη λειτουργία τους σε σχέση με το χρόνο έχουμε το διαχωρισμό σε μοντέλα υδρολογικού γεγονότος (event-based) και μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time). Το πρώτο είδος λειτουργεί ανά πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγει μόνον τις κύριες φυσικές διεργασίες των πλημμυρών ενώ το δεύτερο αναπαριστά την πλήρη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών, (σε υγρές και ξηρές περιόδους). Ο πλέον συνήθης διαχωρισμός των μοντέλων είναι πρώτον σε μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και σε συνεχή μοντέλα και δεύτερον σε αδρομερή και κατανεμημένα.

2.3 Εξέλιξη των μοντέλων βροχής - απορροής

Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη μοντέλων βροχής - απορροής ξεκινούν από το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα. Στα τέλη του αιώνα αυτού και στις αρχές του 20^{ου}, οι περισσότεροι μηχανικοί, σύμφωνα με τον Dooge (1957, 1973) χρησιμοποιούσαν είτε εμπειρικές μεθόδους, είτε τη λεγόμενη 'ορθολογική μέθοδο', (προσδιοριστικό black-box μοντέλο) η οποία αποτελεί την πρώτη προσπάθεια ορθολογικής προσέγγισης στο πρόβλημα της πρόβλεψης της σχέσης βροχής - απορροής. Λίγο αργότερα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920 που προέκυψε η ανάγκη για τον υπολογισμό παροχών σε μεγαλύτερες λεκάνες απορροής, έγιναν κάποιες αλλαγές στην ορθολογική μέθοδο έτσι ώστε αυτή να προσαρμοστεί στην ανομοιόμορφη χωρική και χρονική κατανομή της βροχής στα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Στην πορεία, έχοντας την ανάγκη για την εύρεση ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων λύσεων οι επιστήμονες και συγκεκριμένα ο Sherman (1932) οδηγήθηκε στην ανάπτυξη του μοναδιαίου υδρογραφήματος το οποίο βασιζόταν στην αρχή της επαλληλίας, δηλαδή στην υπόθεση ότι η λεκάνη απορροής συμπεριφέρεται ως ένα γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο σύστημα όσον αφορά τη μετατροπή της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 1995).

Η αρχή όμως του μοναδιαίου υδρογραφήματος παρουσίαζε κάποια προβλήματα, οι λύσεις των οποίων είναι σε μεγάλο βαθμό υποκειμενικές. Λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε το γεγονός ότι στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας προτάθηκε ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών για τη βελτίωση της αντικειμενικότητας των μεθόδων υπολογισμού της σχέσης βροχόπτωσης - απορροής και των αποτελεσμάτων τους με την εμπλοκή διαφόρων τεχνικών στατιστικής ανάλυσης.

Η πραγματική όμως λύση στο θέμα της πρόβλεψης της σχέσης βροχόπτωσης - απορροής έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 όταν οι υδρολόγοι ήταν σε θέση να χρησιμοποιούν τις τεχνικές της ανάλυσης πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων. Έτσι, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορούσε πλέον να αναπαρασταθεί με ορισμένες παραμέτρους οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής ή μέσω ορισμένων στατιστικών διαδικασιών.

Όμως, όλες οι παραπάνω τεχνικές δεν έχουν σχέση με τον πραγματικό κόσμο των υδρολογικών προβλημάτων. Τα προγράμματα που ακολουθούν τις τεχνικές αυτές, ενώ είναι εύκολο να ελεγχθούν στη βάση των πραγματικών τιμών βροχόπτωσης και απορροής είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις κάτω από σημαντικά διαφοροποιημένες συνθήκες από τις αρχικές.

Στην αρχή της δεκαετίας του 1960 εισήχθη μια καινούρια αντίληψη στην προσομοίωση της διαδικασίας βροχόπτωσης - απορροής η οποία αποτέλεσε τη βάση των λεγόμενων παραμετρικών υδρολογικών μοντέλων. Η αντίληψη αυτή βασίστηκε στην προσπάθεια ανεύρεσης μιας πιο φυσικής ερμηνείας των διαδικασιών που αναπαριστούν τη συμπεριφορά των διαφόρων συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου, σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Αν η δομική αναπαράσταση της λεκάνης απορροής ήταν στη θεωρία σωστή, τότε και οι παράμετροι του μοντέλου θα σχετίζονταν με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Όμως, επειδή μια λεκάνη απορροής είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, έτσι και η βαθμονόμηση των παραμέτρων αυτών σε επίπεδο λεκάνης απορροής είναι μια διαδικασία πολύπλοκη που απαιτεί βαθμονόμηση του μοντέλου. Έτσι, φτάνουμε λοιπόν στα λεγόμενα μοντέλα 'φυσικής βάσης'.

Τα τέλη της δεκαετίας του 1970 χαρακτηρίστηκαν από αυξημένο παγκόσμιο ενδιαφέρον για το περιβάλλον. Το ενδιαφέρον αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη ενός άλλου τύπου σύνθετων οικολογικών - υδρολογικών μοντέλων τα οποία περιλαμβάνουν επίσης τη μοντελοποίηση φαινομένων όπως η εδαφική διάβρωση, η ρύπανση των υπογείων και επιφανειακών υδάτινων συστημάτων κλπ.

Ένας άλλος τύπος μοντέλων βροχής - απορροής που αναπτύχθηκαν στις αρχές της επόμενης δεκαετίας είναι τα μοντέλα πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο τα οποία προήλθαν από την ανάγκη πρόβλεψης πλημμυρών. Σήμερα πολλά από τα μοντέλα φυσικής βάσης έχουν τροποποιηθεί ώστε να μπορούν να κάνουν πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο.

2.4 Αναλυτική παρουσίαση επιλεγμένων μοντέλων

2.4.1 Μοντέλο Απλού Υδατικού Ισοζυγίου

Το εννοιολογικό μοντέλο του απλού υδατικού ισοζυγίου (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite & Mather, 1955) αποτέλεσε τη βάση για πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια (Τσακίρης, 2006). Η μέγιστη αποθηκευτικότητα του εδάφους S_{max} αποτελεί τη μία και μοναδική παράμετρο του απλού αυτού μοντέλου, το οποίο τροποποιήθηκε και εμπλουτίστηκε στη συνέχεια από πολλούς ερευνητές. Ενδεικτικά αναφέρουμε την προσθήκη μιας δεύτερης παραμέτρου που αφορά τη διήθηση σε βαθύς υδροφορείς (βαθεία διήθηση) η οποία έγινε από τους Giakoumakis et al. (1991).

Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε μια απλή υδρολογική λεκάνη στην οποία δεν υφίσταται σημαντική υπόγεια υδροφορία ούτε και ανθρωπογενείς επεμβάσεις (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Το μόνο απόθεμα νερού στη λεκάνη σε κάθε χρονική στιγμή t θεωρείται το απόθεμα εδαφικής υγρασίας S_t .

Η σχέση που εκφράζει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης για το χρονικό διάστημα Δt μεταξύ των χρονικών στιγμών t και $t+\Delta t$ είναι η εξής:

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

Όπου S_t και $S_{t+\Delta t}$ είναι το απόθεμα εδαφικής υγρασίας στους χρόνους t και $t+\Delta t$ αντίστοιχα, P_t είναι η χωρικά μέση βροχόπτωση σε όρους όγκου νερού στο διάστημα $[t, t+\Delta t]$, E_t η χωρικά μέση πραγματική εξατμισοδιαπνοή και Q_t η απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

2.4.2 Μοντέλο SWAT

Το μοντέλο αυτό είναι ένα σύνολο επιμέρους μοντέλων φυσικής βάσης ή εννοιολογικών (Τσακίρης, 2006). Δημιουργήθηκε τη δεκαετία του 1990 από το Αμερικανικό Υπουργείο Γεωργίας (U.S. Department of Agriculture) και η ανάπτυξή του συνεχίστηκε και τις επόμενες δεκαετίες (Neitsch et al., 2002).

Για τη χρήση του μοντέλου αυτού σε ό,τι αφορά τις υδρολογικές διεργασίες, απαιτούνται τα παρακάτω:

- Γεωγραφικά δεδομένα
- Ψηφιακό μοντέλο εδάφους
- Ψηφιακή μορφή χρήσεων γης
- Ψηφιακή μορφή υδρογραφικού δικτύου
- Χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών

Το μοντέλο SWAT (Soil and Water Assessment Tool) προσομοιώνει μια σειρά από φυσικές και χημικές διεργασίες στη λεκάνη απορροής. Οι διεργασίες αυτές μαζί με τις μεταβλητές που αντιστοιχούν στην κάθε μια παρουσιάζονται παρακάτω:

- Προσομοίωση του 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 υλών

- Προσομοίωση ανάπτυξης καλλιεργειών
- Προσομοίωση καλλιεργητικών μεθόδων και πρακτικών
- Προσομοίωση διακίνησης νερού και ρύπων σε υδάτινα σώματα

Ως χωρική κλίμακα το μοντέλο χρησιμοποιεί το λεγόμενο HRU ή αλλιώς «μονάδα υδρολογικής απόκρισης» που είναι μια υδρολογικά ομογενής περιοχή της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

Η χρονική κλίμακα του μοντέλου είναι ημερήσια αλλά τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να είναι και σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα.

2.4.3 Μοντέλο HEC-1

Το μοντέλο αυτό είναι αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μοντέλου μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος. Μπορεί να υπολογίσει το υδρογράφημα πλημμύρας για ιστορικά και υποθετικά γεγονότα σε διάφορα σημεία της λεκάνης απορροής. Η λεκάνη αυτή μπορεί να χωριστεί σε διάφορες υπολεκάνες και μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη ταμειυτήρες, χωρίς έλεγχο ροής, και έργα εκτροπής (DeVries & Hromadka., 1993).

Το πρόγραμμα αυτό παρέχει διάφορες δυνατότητες οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Βροχόπτωση: η βροχόπτωση εισάγεται στο πρόγραμμα ως δεδομένο εισόδου.
2. Απώλειες: οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν με τη μέθοδο των καμπυλών SCS, είτε με την εξίσωση Holtan είτε με τη μέθοδο των Green and Ampt.
3. Ποτάμια ροή: η ποτάμια ροή υπολογίζεται με τη χρήση τριών μεταβλητών. Χρειάζεται μια αρχική απορροή στην αρχή της προσομοίωσης, ένας όρος εκθετικής μείωσης και ένα κατώφλι για τη μειούμενη παροχή.
4. Διήθηση διαμέσου φυσικών ανοιχτών αγωγών: μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι Muskingum - Cunge και Muskingum, η κινηματική μέθοδος, μια τροποποιημένη μέθοδος αυτής του Puls και κανονικού βάθους μέθοδοι .
5. Διόδευση δια μέσου ταμειυτήρα: χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές διόδευσης δια μέσου ταμειυτήρα χωρίς έλεγχο ροής.
6. Παράμετροι βελτιστοποίησης: το μοντέλο διαθέτει μια πολύ χρήσιμη επιλογή, αυτή της αυτόματης βαθμονόμησης του μοντέλου.
7. Παραγωγή συνθετικών υποθετικών ραγδαίων βροχοπτώσεων: Το HEC-1 έχει τη δυνατότητα να παράξει συνθετικές βροχοπτώσεις για διάφορες συχνότητες και για καταιγίδες σχεδιασμού τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε άλλα μέρη του πλανήτη.
8. Προσομοίωση πάχους και τήξης του χιονιού: η προσομοίωση του πάχους του στρώματος χιονιού και της ποσότητας νερού που προέρχεται από την τήξη του γίνεται με βάση το υψόμετρο της κάθε περιοχής και τη θερμοκρασία του αέρα.
9. Εφαρμογές για την ασφάλεια φράγματος: η διαδικασία υπολογισμού της διόδευσης δια μέσου ταμειυτήρα μπορεί να περιλαμβάνει και τον υπολογισμό της παροχής του ποταμού στην περίπτωση που το νερό ξεπεράσει το ύψος του φράγματος μαζί με το σχηματισμό ρωγμής.
10. Συνδυασμένη ανάλυση πολλών σεναρίων διαχείρισης υδατικών πόρων και πλημμυρών σχεδιασμού: η επιλογή αυτή είναι χρήσιμη για την ανάλυση των επιπτώσεων της αλλαγής στις χρήσεις γης της περιοχής.

11. Ανάλυση των καταστροφών λόγω πλημμύρας: μπορούν να προσδιοριστούν οι πλημμύρες για διάφορες περιόδους επαναφοράς σε κάθε σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής.
12. Βελτιστοποίηση του μεγέθους των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας.

2.4.4 Μοντέλο MORIN

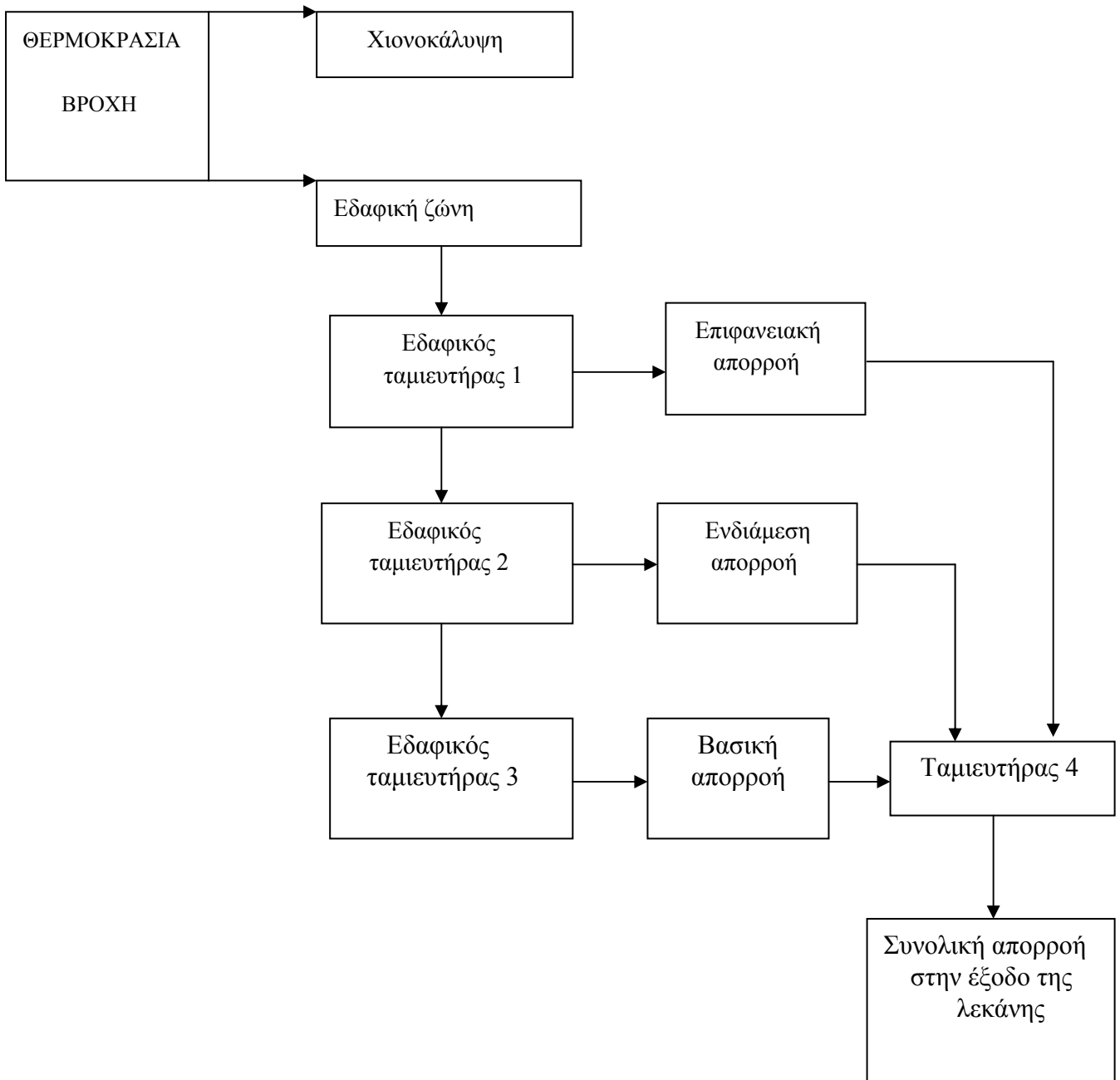
Το μοντέλο αυτό είναι ένα απλό προσδιοριστικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό τα διαδοχικά στάδια των υπολογισμών εκτελούνται με την ακόλουθη σειρά.

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

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι συνεχείς και ταυτόχρονες. Το μοντέλο περιλαμβάνει 17 παραμέτρους. Η βαθμονόμηση του μοντέλου μπορεί να γίνει με δοκιμές ή αυτόματα με πρόγραμμα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης στόχου.

2.4.5 Μοντέλο ENNS

Το μοντέλο ENNS (Nachtnebel, 1993) είναι ένα υδρολογικό μοντέλο στο οποίο η λεκάνη απορροής σχηματοποιείται όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.2: Σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής στο μοντέλο ENNS

Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερις ταμιευτήρες, οι τρεις εκ των οποίων είναι γραμμικοί. Από τον πρώτο ταμιευτήρα προκύπτει η επιφανειακή απορροή. Από τον δεύτερο ταμιευτήρα προκύπτει η υπεδάφια (ενδιάμεση) απορροή, ενώ ο τρίτος ταμιευτήρας δίνει τη βασική απορροή. Το σύνολο της απορροής καταλήγει στον τέταρτο ταμιευτήρα ο οποίος χρησιμεύει για τη διόδυσή της. Όπως φαίνεται στο σχήμα, πάνω από αυτή τη σειρά των ταμιευτήρων βρίσκεται η εδαφική ζώνη, ένα στρώμα εδάφους με σχετικά μικρό πάχος, πάνω στο οποίο επιδρούν οι μετεωρολογικοί παράγοντες και το οποίο μπορεί να καλύπτεται από χιόνι.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μετατροπή των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, όπως η χιονόπτωση και η βροχόπτωση, σε απορροή μέσω αυτού του συστήματος έχει να κάνει ως εξής:

Το νερό εισέρχεται στην εδαφική ζώνη με τη μορφή κατακρημνισμάτων. Ένα μέρος του νερού αυτού αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία, ένα άλλο μέρος του εξατμίζεται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, ενώ το ποσοστό που απομένει συνεχίζει την πορεία του προς την αλληλουχία των ταμιευτήρων. Στον πρώτο και στον δεύτερο ταμιευτήρα υπάρχει, εκτός από την οριζόντια εκροή, και κατακόρυφη ροή, ενώ στον τρίτο συναντάμε μόνο οριζόντια εκροή, η βασική απορροή. Τελικά, η συνολική απορροή καταλήγει στον τέταρτο ταμιευτήρα. Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση είναι μια ημέρα.

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο Thornthwaite, ελαφρώς τροποποιημένη. Το πρόγραμμα κάνει υπολογισμούς για κάθε μέρα χρησιμοποιώντας τη μέση ημερήσια θερμοκρασία.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι ένα ποσοστό της δυνητικής που εξαρτάται και από την υγρασία της εδαφικής ζώνης.

Ένα ποσοστό του νερού από την εδαφική ζώνη κατευθύνεται προς την αλληλουχία των ταμιευτήρων με δύο μηχανισμούς: την άμεση κατείδυση και τη βραδεία κατείδυση. Ο πρώτος αποτελεί το τμήμα των εισροών που βγαίνει αμέσως από το κάτω όριο της εδαφικής ζώνης και εισέρχεται στους ταμιευτήρες και οφείλεται σε ασυνέχειες του εδάφους ενώ, στον δεύτερο μηχανισμό, η κατείδυση γίνεται δια μέσου των πόρων του εδάφους. Η συνολική κατείδυση από την εδαφική ζώνη είναι το άθροισμα των δύο συνιστωσών.

Η οριζόντια απορροή από τον πρώτο ταμιευτήρα αντιστοιχεί στην άμεση απορροή και λαμβάνει χώρα μόνο εφόσον η στάθμη του νερού μέσα στον ταμιευτήρα ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο ύψος. Εάν αυτή η συνθήκη δεν πληρείται τότε δεν έχουμε οριζόντια απορροή. Αντίθετα, στους ταμιευτήρες 3 και 4 η απορροή εξαρτάται μόνο από την τιμή μιας σταθεράς του ταμιευτήρα. Ο δεύτερος ταμιευτήρας που αντιστοιχεί στην ακόρεστη ζώνη λειτουργεί όπως ο πρώτος. Ο τρίτος ταμιευτήρας είναι αυτός που αντιστοιχεί στην κορεσμένη ζώνη και δίνει τη βασική απορροή.

Το μοντέλο ENNS χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου, ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Μαζί με τις χρονοσειρές αυτές πρέπει να δοθεί και η χρονοσειρά της μετρημένης απορροής για να γίνει η σύγκριση με την υπολογισμένη.

2.4.6 Μοντέλο MERO

Το μοντέλο MERO είναι ένα προσδιοριστικό μοντέλο το οποίο δέχεται ως δεδομένα εισόδου ημερήσιες τιμές υψών βροχής P (mm) και δυναμικές εξατμισοδιαπνοές E_p (mm), ενώ παράγει συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιων τιμών απορροής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (Giakoumakis et al., 1991).

Οι εξισώσεις του μοντέλου οι οποίες περιγράφουν τις διάφορες συνιστώσες της απορροής καθώς επίσης και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, είναι εμπειρικές και έχουν προκύψει από στοιχεία μακροχρόνιων παρατηρήσεων σε λεκάνες απορροής της Κύπρου (Phanartzis, 1972). Το μοντέλο περιέχει 7 άγνωστες παραμέτρους που προσδιορίζονται μετά από βαθμονόμηση, χρησιμοποιώντας μετρημένα στοιχεία υψών απορροής.

2.4.7 Μοντέλο STANFORD IV

Το μοντέλο αυτό είναι ένα προσδιοριστικό, αδρομερές, παραμετρικό μοντέλο. Για την προσομοίωση της σχέσης βροχόπτωσης - απορροής απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου η ωριαία βροχόπτωση, η ημερήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή καθώς και η ημερήσια θερμοκρασία και ακτινοβολία για τον υπολογισμό της απορροής που προέρχεται από την διαδικασία της τήξης του χιονιού.

Για την εφαρμογή του μοντέλου η λεκάνη απορροής διαιρείται σε υποπεριοχές οι οποίες είναι ομογενείς σε σχέση με τον τύπο εδάφους, βλάστησης, τοπογραφίας κλπ. Κάθε υποπεριοχή αναπαρίσταται από ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της υποπεριοχής. Ο αριθμός των υποπεριοχών αυτών είναι συνήθως μικρός και συχνά ίσος με τον αριθμό των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.

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

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

Η διήθηση στο έδαφος μεταβάλλεται γραμμικά, σαν συνάρτηση του λόγου της υγρασίας της κατώτερης εδαφικής ζώνης προς την ονομαστική (μέγιστη) αποθήκευση της ζώνης αυτής. Η υπεδάφια ροή προσομοιώνεται με μια παρόμοια διαδικασία. Η υπεδάφια ροή αυξάνει όσο αυξάνει η εδαφική υγρασία. Η υπεδάφια απορροή αποθηκεύεται και ένα τμήμα της απελευθερώνεται προς το υδατόρευμα σε κάθε χρονικό βήμα.

Σε ό,τι αφορά την επιφανειακή απορροή, αυτή είτε αποθηκεύεται στην άνω εδαφική ζώνη, είτε μετατρέπεται σε ροή στην επιφάνεια του εδάφους υπολογιζόμενη από μια απλή εξίσωση συνέχειας.

Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, ένα μέρος της αποθήκευσης της άνω ζώνης περνάει στην κατώτερη ζώνη και διανέμεται μεταξύ εδαφικής υγρασίας κατώτερης ζώνης και υπόγειας αποθήκευσης. Η ποσότητα νερού που εισέρχεται στο υπόγειο στρώμα είτε προωθείται προς την βαθειά ή αδρανή υπόγεια αποθήκευση μη συνεισφέροντας στην απορροή του υδατορεύματος, είτε προωθείται προς την υπόγεια αποθήκευση από την οποία στη συνέχεια εισέρχεται στο υδατόρευμα.

Για τη διόδευση της απορροής μέσω του υδατορεύματος και τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εξόδου χρησιμοποιούνται είτε η κινηματική μέθοδος, είτε η μέθοδος Muskingum.

2.4.8 Μοντέλο SHE

Το μοντέλο SHE (Système Hydrologique Européen) είναι ένα κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης το οποίο προσομοιώνει όλες τις κύριες φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, οι διαδικασίες αυτές του υδρολογικού κύκλου προσομοιώνονται ως εξής:

Κατακράτηση στη φυτοκάλυψη

Η συνιστώσα αυτή υπολογίζει την καθαρή βροχόπτωση που φτάνει στο έδαφος μέσω της φυτοκάλυψης, το ποσό του νερού που αποθηκεύεται στη φυτοκάλυψη καθώς και την εξάτμιση. Η κατακράτηση στη φυτοκάλυψη προσομοιώνεται με το τροποποιημένο μοντέλο Rutter et al. (1971).

Εξάτμιση

Η προσομοίωση της δυναμικής και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους οι οποίες δίνουν στο μοντέλο αυτό την ευελιξία να προσαρμόζεται στα δεδομένα των εκάστοτε τοπικών συνθηκών. Η πλέον σύνθετη και φυσικώς ρεαλιστική σχέση που χρησιμοποιείται από το μοντέλο είναι η σχέση Penman-Monteith (Monteith, 1965).

Επιφανειακή απορροή

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής υιοθετείται μια δισδιάστατη λύση βασισμένη στις εξισώσεις Saint Venant, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Preissman & Zenoui, 1979).

Ποτάμια ροή

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

Ακόρεστη υπεδάφια ροή

Η συνιστώσα αυτή του μοντέλου υπολογίζει την εδαφική υγρασία και την κατανομή της πίεσης στην ακόρεστη ζώνη, η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα. Η επίλυση που ακολουθείται βασίζεται στην υπόθεση ότι η ροή ακολουθεί την κατακόρυφη διεύθυνση και η λύση αποκτάται με την μονοδιάστατη εξίσωση Richards.

Κορεσμένη υπεδάφια ροή

Αυτή η συνιστώσα υπολογίζει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και τη ροή η οποία θεωρείται μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση στην ακόρεστη ζώνη. Η μεταβολή στο χρόνο του ύψους επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα υπολογίζεται σε κάθε τετραγωνίδιο, από τη μη γραμμική εξίσωση Boussinesq.

Τήξη χιονιού

Ο σκοπός της συνιστώσας αυτής είναι να προσομοιώσει το πάχος στρώματος χιονιού, όπως αυτό επηρεάζεται από τα κατακρημνίσματα και την τήξη και να προσομοιώσει το ρυθμό εκροής του νερού που προέρχεται από την τήξη του χιονοστρώματος. Στο σημείο αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές μέθοδοι ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Η πιο απλή μέθοδος που χρησιμοποιείται απαιτεί ως δεδομένα μόνο τις ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες.

Θεωρητικά, οι περισσότερες από τις παραμέτρους του μοντέλου βασίζονται και προέρχονται από φυσικές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που χρειάζονται βαθμονόμηση. Στην πράξη, όμως, πολλές από τις παραμέτρους αυτές χρειάζονται βαθμονόμηση καθώς οι μετρήσεις συχνά αναφέρονται σε σημειακή κλίμακα και δεν είναι χαρακτηριστικές της κλίμακας τετραγωνιδίου στην οποία εφαρμόζεται το μοντέλο.

2.4.9 Μοντέλο ILWAS

Η ανάπτυξη του μοντέλου ILWAS (Integrated Lake Watershed Acidification Study) άρχισε το 1977, από το Ερευνητικό Ινστιτούτο Ηλεκτρικής Ενέργειας των Η.Π.Α. έκτοτε το μοντέλο αυτό έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε πολλά μέρη του κόσμου (Kaemaki, 1991). Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι ο προσδιορισμός τόσο των ποσοτικών (παροχές στο υδατόρευμα απορροές από κάθε εδαφικό στρώμα) όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών (PH, συγκεντρώσεις ιόντων, αλκαλικότητα) της απορροής. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η επίδραση ανθρωπογενών αλλαγών (π.χ. ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ) και διαχειριστικών αποφάσεων (π.χ. αλλαγές στα ποσοστά φυτοκάλυψης, είδη καλλιεργειών κλπ) τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα της απορροής.

Το μοντέλο ILWAS περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά υπομοντέλα: ένα υδρολογικό και ένα χημικό. Το υδρολογικό υπομοντέλο προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες της κατακράτησης στη φυτοκάλυψη, ενδορροή, εξατμισοδιαπνοή, συγκέντρωση και τήξη χιονιού και επιφανειακή και υπόγεια υδραυλική. Το χημικό υπομοντέλο προσομοιώνει τις συγκεντρώσεις 16 ανιόντων και κατιόντων, του PH και της αλκαλικότητας, σε κάθε ένα από τα τμήματα μιας λεκάνης απορροής. Προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η ετερογένεια μιας λεκάνης απορροής, αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε τμήματα τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Οι βασικές διαδικασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο αυτό είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

Υδρολογικό υπομοντέλο

- Διαχωρισμός βροχής και χιονιού
- Δυναμική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη
- Δυναμική εξατμισοδιαπνοή
- Πραγματική κατακράτηση στη φυτοκάλυψη και πραγματική εξάτμιση
- Υπεδάφια και υπόγεια ροή
- Ροή στην επιφάνεια του εδάφους
- Διόδευση κατά μήκος του υδατορεύματος

Χημικό υπομοντέλο

- Χημικές συγκεντρώσεις ιόντων ενδορροής
 - a. Ξηρή εναπόθεση στη φυτοκάλυψη
 - b. Φυλλική έκχυση
 - c. Οξείδωση
- Χημικές διαδικασίες οργανικού στρώματος
 - a. Φυλλόπτωσηση
 - b. Απορρόφηση τροφικών συστατικών
 - c. Ριζική αναπνοή
- Χημικές διαδικασίες εδαφικού στρώματος
 - a. Νιτροποίηση

- b. Απορρόφηση ιόντων
- c. Ανταλλαγή κατιόντων
- d. Αποσύνθεση πετρωμάτων

2.5 Μελλοντικές ανάγκες χρήσης μοντέλων βροχής - απορροής

Στις μέρες μας, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αρκετά μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το αυξημένο ενδιαφέρον για αυτές τις καταστροφές έχει οδηγήσει στην ανάγκη για διαρκή καταγραφή και διαχείριση των κρίσιμων καταστάσεων όπως είναι οι πλημμύρες ή οι ξηρασίες, καταστάσεις οι οποίες απαιτούν την ανάπτυξη ειδικών μοντέλων πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, η επίδραση που έχουν κάποια δύσκολα και απρόβλεπτα φαινόμενα στο περιβάλλον, όπως η όξινη βροχή, η υποβάθμιση του εδάφους, η διάχυση λιπασμάτων και η ρύπανση γενικώς μπορούν να μελετηθούν μόνο με δυναμικά μοντέλα φυσικής βάσης, τα οποία αναπαριστούν τις βιολογικές και χημικές εξισώσεις που υπεισέρχονται.

Η χρήση καταμετρημένων μοντέλων φυσικής βάσης είναι πλέον δυνατή αλλά συνάμα και πολύ ενδιαφέρουσα. Αυτό γιατί από τη μία υπάρχει διαθεσιμότητα ψηφιακών χαρτών και δορυφορικών εικόνων που έχουν επιτρέψει τη δημιουργία μεγάλων τραπεζών δεδομένων οι οποίες περιλαμβάνουν πάρα πολλά φυσικά φαινόμενα και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά και, από την άλλη μεριά, υπάρχει η τεράστια ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι έχουν καταστήσει δυνατή τη λύση διαφορικών εξισώσεων σε κανάβους με πολύ υψηλή διακριτοποίηση.

Η ανάγκη για χρήση περισσότερο ή λιγότερο αδρομερών μοντέλων σε μελέτες υδάτινου ισοζυγίου και διαχείρισης υδατικών πόρων έχουν στρέψει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε προβλήματα που συναρτώνται με τα προβλήματα αλλαγών χωρικής κλίμακας π.χ., ολοκληρώσεις φαινομένων και παραμέτρων στο χώρο και το χρόνο (Beven, 1975). Έτσι, μιλάμε πλέον για πιο απλά μοντέλα που λειτουργούν σε κλίμακα υπολεκάνης και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαχείριση συστημάτων πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο με πάρα πολύ μικρό κόστος.

2.6 Δείκτες καταλληλότητας των μοντέλων βροχής – απορροής – Ο δείκτης Nash

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου ελέγχεται με τη βοήθεια του δείκτη NTD, που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Nash το 1970. Ο δείκτης Nash δίνεται από τον τύπο

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} (Q_{\text{παρ},i} - Q_{\text{εκτ},i})^2}{\sum_{i=1}^{12} (Q_{\text{παρ},i} - \bar{Q}_{\text{παρ}})^2} \quad (2.2)$$

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

NTD ο αριθμός Nash

Η καλύτερη τιμή του αριθμού Nash είναι προφανώς η μονάδα, και αυτή προκύπτει όταν όλες οι εκτιμημένες παροχές είναι ακριβώς ίδιες με τις παρατηρημένες. Αν θέσουμε ως εκτιμημένες παροχές τον μέσο όρο των παρατηρημένων, ο δείκτης NTD θα ήταν ίσος με το μηδέν. Προφανώς, ο δείκτης λαμβάνει και αρνητικές τιμές και στην περίπτωση αυτή το μοντέλο θεωρείται εντελώς αναξιόπιστο για προγνώσεις. Παρατηρώντας τον τύπο αντιλαμβάνεται κανείς ότι ο δείκτης λαμβάνει υπόψη εκτός από την απόκλιση των δύο χρονοσειρών και τη διασπορά του δείγματος, εισάγοντας την απόκλιση των τιμών της παρατηρημένης χρονοσειράς από τη μέση τιμή στον παρονομαστή. Αν το δείγμα των παρατηρημένων απορροών έχει μεγάλη διασπορά, ο δείκτης Nash πλησιάζει τη μονάδα. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι ο δείκτης αυτός διαφέρει από το συντελεστή συσχέτισης, μιας και ο δεύτερος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος ακόμα και για χρονοσειρές που οι τιμές τους διαφέρουν σημαντικά, αρκεί να έχουν καλή γραμμική συσχέτιση. Ο δείκτης Nash αντίθετα εξετάζει την απόκλιση των τιμών των δυο χρονοσειρών. Ο δείκτης Nash μπορεί να εκτιμηθεί για ολόκληρη τη χρονοσειρά, ή για οποιοδήποτε διάστημα μας ενδιαφέρει, όπως για παράδειγμα ένα έτος.

Ο δείκτης Nash, είναι ένα μέγεθος που μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε με ακρίβεια την απόκλιση των τιμών, που έδωσε ως έξοδο το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, από τις παρατηρημένες τιμές.

3 Το μοντέλο SWAT

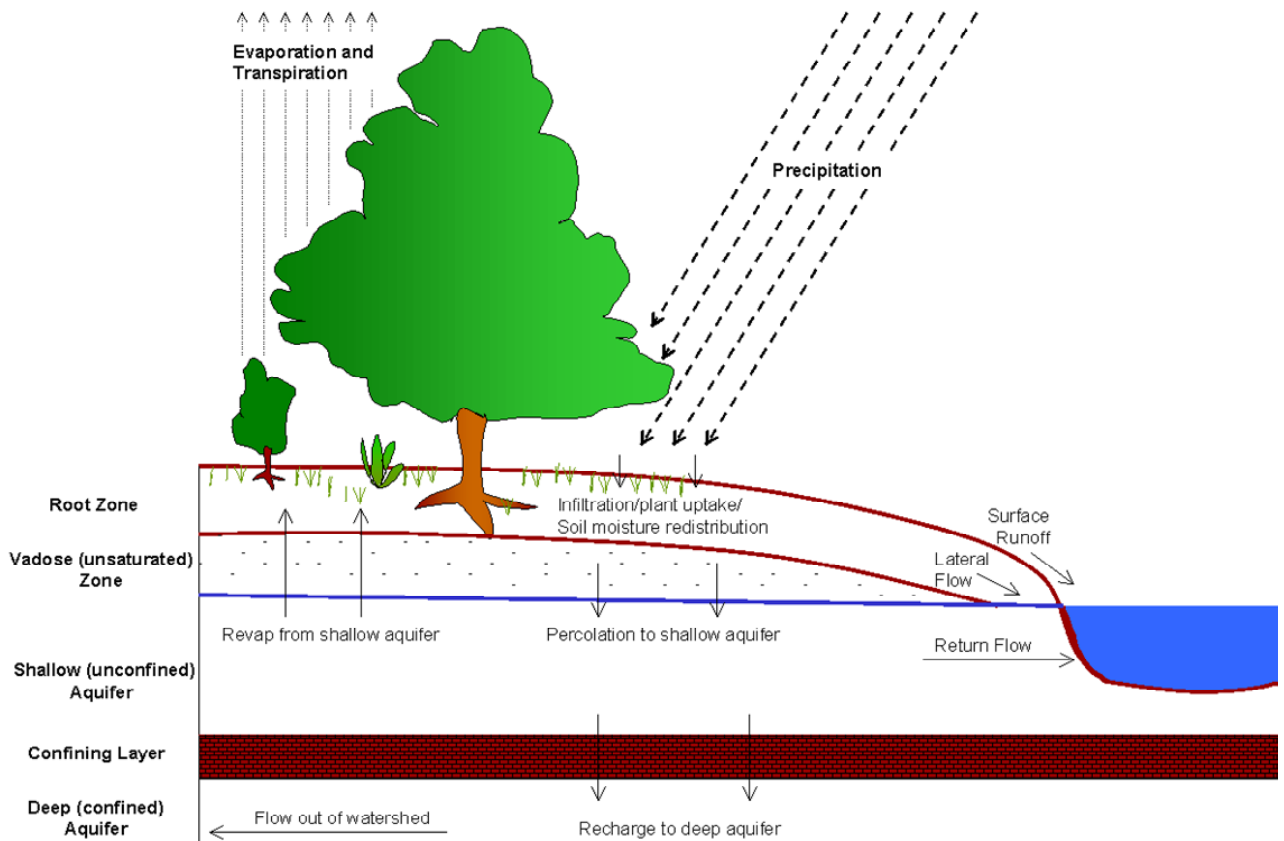
3.1 Γενικά για τη λειτουργία του μοντέλου

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

1. Έχει φυσική βάση
2. Χρησιμοποιεί έτοιμα δεδομένα
3. Είναι υπολογιστικά ικανό ώστε να εφαρμόζεται σε μεγάλες λεκάνες σε λογικό χρόνο
4. Είναι συνεχές μοντέλο ικανό να προσομοιώνει μακρές περιόδους για τον υπολογισμό των επιπτώσεων από αλλαγές διαχείρισης (Neitsch et al., 2005).

Σαφώς και το μοντέλο αυτό εξελίσσεται συνεχώς. Από το 2005 και έπειτα έχουν υπάρξει αρκετές εκδόσεις. Οι βασικές του αρχές όμως και η λειτουργία του δεν έχουν αλλάξει από τότε. Αυτό που έχει συμβεί είναι να προστεθούν και κάποιες άλλες παράμετροι ώστε η εκτίμηση της απορροής ενός ποταμού να είναι ακόμα πιο ακριβής. Οι παράμετροι αυτές είναι πολύ εξειδικευμένες και μόνο ένα μέρος τους θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική γιατί τα δεδομένα για τον προσδιορισμό τους είναι δυσεύρετα.

Ο υδρολογικός κύκλος που προσομοιώνει το μοντέλο αυτό συμβαδίζει απόλυτα με το τι συμβαίνει στη λεκάνη και παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.1. Η λογική της κίνησης του νερού στη λεκάνη απορροής στηρίζεται σε γνωστούς τύπους και μεθοδολογίες που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.



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

Το SWAT προσομοιώνει τα κατακρημνίσματα που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής. Έχει επίσης τη δυνατότητα παραγωγής κατακρημνισμάτων, αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία (Neitsch et al., 2005).

Το νερό της βροχής είτε απορρέει επιφανειακά είτε διηθείται στο έδαφος. Το ποσοστό που θα απορρεύσει τελικά καθορίζεται από το συντελεστή απορροής ανάλογα πάντα με τον τύπο του εδάφους και τις χρήσεις γης. Εκτιμάται με μια τροποποιημένη μέθοδο SCS. Το νερό που απορρέει επιφανειακά καταλήγει στους υδάτινους αποδέκτες και είναι αυτό που αποτελεί τον πλημμυρικό όγκο του επεισοδίου.

Το υπόλοιπο μέρος του νερού, αυτό που διηθείται, ακολουθεί κατακόρυφη ή οριζόντια διαδρομή μέσα στο έδαφος. Το έδαφος αυτό χωρίζεται από το μοντέλο SWAT σε 3 κύριες στρώσεις:

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

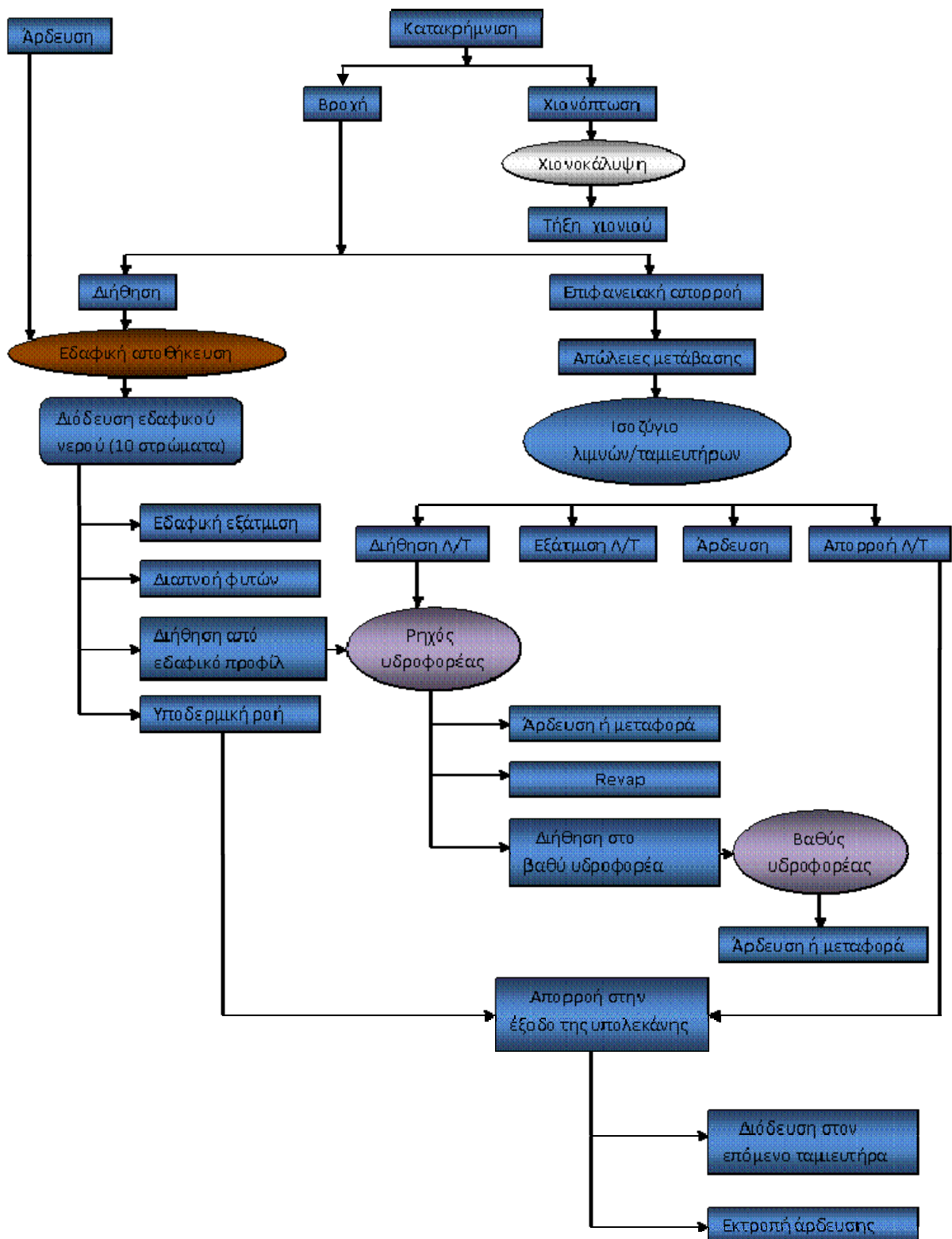
Ένα μέρος από το νερό της πρώτης στρώσης περνάει στην αέρια φάση είτε με την εδαφική εξατμηση είτε με τη διαπνοή των φυτών, μέσα από το φύλλωμά τους, αφού πρώτα έχει δεσμευτεί από αυτά. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει 3 μεθόδους ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτουμε κάθε φορά. Ένα μέρος

από το νερό που υπάρχει στο στρώμα αυτό συμβάλει με την υποδερμική ροή (lateral flow) στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης. Η κατακόρυφη ροή λαμβάνει χώρα όταν η υδατοϊκανότητα μιας εδαφικής στρώσης υπερβαίνεται και η κάτω στρώση δεν έχει κορεστεί.

Ακολουθεί η επόμενη στρώση, ο επιφανειακός υδροφορέας, ο οποίος τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορεύματα και ταμιευτήρες. Η αποφόρτισή του γίνεται είτε με την υπόγεια ροή (return flow), με την οριζόντια δηλαδή κίνηση του νερού που τροφοδοτεί τους υδάτινους αποδέκτες, είτε με την κατείσδυσή του στο τελευταίο στρώμα, το βαθύ υδροφορέα. Ταυτόχρονα, ένα μέρος από το νερό του επιφανειακού υδροφορέα μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω, δηλαδή προς το εδαφικό στρώμα με μια διαδικασία που το πρόγραμμα παρουσιάζει ως *recharge*. Το νερό που φτάνει στο τελευταίο στρώμα, το βαθύ υδροφορέα, χάνεται. Το μοντέλο θεωρεί ότι καταλήγει εκτός της λεκάνης απορροής που εξετάζει.

Καθ' όλη την πορεία της ροής του νερού, το μοντέλο υπολογίζει τις απώλειες μετάβασης και απορρόφησης και τις αφαιρεί, γιατί αυτές μειώνουν τον όγκο της απορροής. Το SWAT χρησιμοποιεί τη μέθοδο Lane (USDA, 1983) για την εκτίμηση των απωλειών αυτών οι οποίες προκύπτουν σε συνάρτηση με το μήκος και το πλάτος των καναλιών ροής του νερού.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται ο υδρολογικός κύκλος του μοντέλου.



Σχήμα 3.2: Λογικό διάγραμμα υπολογισμού του υδρολογικού κύκλου του μοντέλου (Πηγή: Neitsch et al., 2005).

3.2 Περιγραφή του μοντέλου

3.2.1 Υδρολογικές διαδικασίες

Ο υδρολογικός κύκλος, όπως ακριβώς προσομοιώνεται από το μοντέλο, βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση υδατικού ισοζυγίου:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3.1)$$

Όπου: SW_t είναι το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό, t είναι ο χρόνος σε ημέρες, R η ημερήσια βροχόπτωση, Q η ημερήσια απορροή, ET η εξατμισοδιαπνοή, P η διήθηση και QR η υπόγεια ροή. Αυτά τα μεγέθη παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Επιφανειακή απορροή Q

Έχοντας δεδομένη την ημερήσια βροχόπτωση το μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει την επιφανειακή απορροή με μια τροποποιημένη μέθοδο SCS. Η τεχνική αυτή έχει επιλεχθεί γιατί:

- i. Είναι αξιόπιστη και δοκιμασμένη
- ii. Είναι αποδοτική
- iii. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι διαθέσιμα
- iv. Συσχετίζει την απορροή με το είδος του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης οι οποίες αναφέρονται σε δεδομένα για τη σπορά, το θερισμό και την άρδευση ακόμα και με τα φυτοφάρμακα.

Η επιφανειακή απορροή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση της μεθόδου SCS:

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

$$Q = 0.0, \quad R \leq 0.2s \quad (3.3)$$

Όπου: Q είναι η ημερήσια απορροή, R η ημερήσια βροχόπτωση και s μία παράμετρος κατακράτησης. Η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται από υπολεκάνη σε υπολεκάνη και ανάλογα με το χρόνο. Συνδέεται άμεσα με τον αριθμό CN σύμφωνα με την εξίσωση SCS (USDA-SCS, 1972) που ακολουθεί

$$s = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.4)$$

Ο αριθμός CN αναφέρεται σε συνθήκες υγρασίας 2 (CN_2) και λαμβάνεται για κάθε περιοχή από το σχετικό εγχειρίδιο της SCS. Ο αριθμός αυτός αναφέρεται σε κλίσεις εδάφους 5%. Για οποιαδήποτε άλλη κλίση χρησιμοποιείται ο τύπος :

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

Όπου: CN_{2s} είναι η τιμή του CN_2 προσαρμοσμένη στην εκάστοτε κλίση, CN_3 η τιμή της καμπύλης που αντιστοιχεί σε υγρές υδρολογικές συνθήκες και S η μέση τιμή της κλίσης της λεκάνης απορροής.

Ο αριθμός CN_1 που αντιστοιχεί σε ξηρές υδρολογικές συνθήκες συνδέεται άμεσα με τους αριθμούς CN_2 και CN_3 με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + [0.000673(100 - CN_2)]} \quad (3.6)$$

Το SWAT 2005 επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν ανάμεσα σε δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της παραμέτρου κατακράτησης s . Η παραδοσιακή μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία. Μια εναλλακτική που υπάρχει στο SWAT 2005 θέλει την παράμετρο αυτή να μεταβάλλεται ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Ο υπολογισμός του αριθμού CN , σε ημερήσια βάση, προστέθηκε στο πρόγραμμα ως ένας παράγοντας που καθορίζει την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Η προσθήκη αυτή έγινε γιατί η παραδοσιακή μέθοδος προέβλεπε πολύ μεγάλη απορροή για τα ρηχά εδάφη.

Όταν η παράμετρος s διαφοροποιείται ανάλογα με τις διακυμάνσεις στην εδαφική υγρασία χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση

$$s = s_1 \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp[w_1 - w_2(SW)]} \right) \quad (3.7)$$

Όπου: s_1 είναι η τιμή του s που σχετίζεται με τον αριθμό CN_1 ($s_1 = 25.4 \left(\frac{1000}{CN_1} - 10 \right)$), SW

είναι το ποσοστό εδαφικής υγρασίας και w_1, w_2 είναι οι παράμετροι σχήματος.

Όταν η παράμετρος αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι

$$s = s_{prev} + ET_i \cdot \exp \left(\frac{-cncoeff - s_{prev}}{s_1} - R_i - Q_i \right) \quad (3.8)$$

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

Το πρόγραμμα υπολογίζει την παράμετρο κατακράτησης ακόμα και για παγωμένες επιφάνειες με τον κατάλληλο τύπο.

Διήθηση

Το SWAT υπολογίζει τη ροή μέσα από κάθε στρώμα. Το νερό διηθείται στο αμέσως επόμενο μη κορεσμένο στρώμα εδάφους όταν αυτό στο οποίο βρίσκεται έχει ήδη κορεστεί. Η ποσότητα του νερού που κινείται από το υπερκείμενο στρώμα προς τα κάτω υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$O_i = SW_{oi} \left[1 - \exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_i} \right) \right] \quad (3.9)$$

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

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

$$SW_i = SW_{0i} \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (3.10)$$

Συνεπώς η διήθηση μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας το SW από το SW₀.

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

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{H_i} \quad (3.11)$$

Όπου: H_i είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος i σε mm/h και FC_i η υδατοϊκανότητα μείον την εδαφική υγρασία στο σημείο μαράνσεως. Η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i}\right)^{\beta_i} \quad (3.12)$$

Όπου: SC_i είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για το στρώμα i σε mm/ώρα, β_i είναι η παράμετρος που προκαλεί το H_i να πλησιάζει στο μηδέν καθώς το SW_i τείνει προς το FC_i .

Η ροή δια μέσου των ρωγμών δίνεται από σχέσεις παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η ποσότητα του διηθήματος που προκαλείται από κίνηση μέσα από μια ρωγμή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$O_i = O_{i-1} \left[\exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{ci}}\right) \right] \quad (3.13)$$

Όπου: O_{i-1} είναι η ροή από την πιο πάνω στρώση σε mm/d ($R-Q$ για το ανώτερο στρώμα) και TT_{ci} είναι ο χρόνος διόδευσης του νερού μέσα από τη ρωγμή σε ώρες.

Υποδερμική ροή

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

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = iL - \frac{q_{lat1} + q_{lat2}}{2} \quad (3.14)$$

Όπου: S είναι ο αποστραγγιζόμενος όγκος νερού που αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη (νερό πάνω από την υδατοϊκανότητα), t είναι ο χρόνος σε ώρες, q_{lat} είναι η υποδερμική ροή σε m³/h, i είναι ο ρυθμός εισόδου του νερού στην κορεσμένη ζώνη σε m²/h, L το μήκος της μισγάγγειας σε m και οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην αρχή και το τέλος του χρονικού βήματος.

Ο όγκος του νερού που αποστραγγίζεται ανανεώνεται καθημερινά στο μοντέλο της λεκάνης. Η υποδερμική ροή στην έξοδο της μισγάγγειας δίνεται από τον τύπο

$$q_{lat} = H_0 \cdot v \cdot w \quad (3.15)$$

Όπου: v είναι η ταχύτητα ροής στην έξοδο και w το πλάτος της μισγάγγειας.

Η ταχύτητα στην έξοδο υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση

$$v = K_s \sin(a) \quad (3.16)$$

Όπου: K_s είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$q_{lat} = 0.024 \frac{2SK_s \sin(a)}{\Theta_d L} \quad (3.17)$$

Αν η κορεσμένη ζώνη υψωθεί πάνω από το τελευταίο εδαφικό στρώμα, το νερό θα κινηθεί προς την πιο πάνω στρώση. Η ποσότητα του νερού που κινείται προς τα πάνω υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q_{sat} = \frac{24K_s L_s}{L} \quad (3.18)$$

Όπου: L_s είναι το μήκος της κορεσμένης κλιτύς σε m.

Υπόγεια απορροή

Όσον αφορά την υπόγεια απορροή το SWAT χωρίζει το έδαφος σε 4 όγκους ελέγχου που αναφέρονται στην επιφάνεια, το εδαφικό προφίλ του ριζοστρώματος, τον επιφανειακό και το βαθύ υδροφορέα. Στην επιφανειακή απορροή συνεισφέρουν η υποερμική ροή από το εδαφικό προφίλ και η υπόγεια απορροή από τον επιφανειακό υδροφορέα. Το διήθημα από το εδαφικό προφίλ στη συνέχεια τροφοδοτεί τον επιφανειακό υδροφορέα. Όταν πλέον το νερό διηθηθεί στο βαθύ υδροφορέα χάνεται από τη λεκάνη απορροής και δεν επιστρέφει. Το υδατικό ισοζύγιο για τον επιφανειακό υδροφορέα φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$Vsa_i = Vsa_{i-1} + Rc - revar - q_{rf} - perc_{gw} - WU_{SA} \quad (3.19)$$

Όπου: V_{sa} είναι 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 και i η ημέρα.

Η υπόγεια ροή δίνεται από τον τύπο

$$q_{rf} = \frac{8K_d}{L^2} h \quad (3.20)$$

Όπου: K_d είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, L το μήκος του πεδίου ροής και h το ύψος του νερού. Αν δεχτούμε ότι ο επιφανειακός υδροφορέας τροφοδοτείται με διήθηση από υδατορεύματα ή από το εδαφικό προφίλ (με βροχόπτωση και άρδευση) και αποφορτίζεται από την υπόγεια ροή στα υδατορεύματα, οι μεταβολές στη στάθμη του νερού μπορούν να υπολογιστούν από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Rc - q}{0.8\mu} \quad (3.21)$$

Όπου: R_c η τροφοδότηση του επιφανειακού υδροφορέα και μ η ειδική απόδοση.

Το $revar$ ορίζεται ως το νερό που ρέει από τον επιφανειακό υδροφορέα πίσω στο εδαφικό προφίλ και χάνεται με την εξάτμιση ή την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Ο όγκος του δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$revarp = \beta_r ET_{act} \quad \text{αν } revarp > revarp_{st} \quad (3.22)$$

$$revarp = 0.0 \quad \text{αν } revarp < revarp_{st} \quad (3.23)$$

Όπου: ET_{act} είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στο εδαφικό προφίλ, β_r είναι ο συντελεστής $revarp$ και $revarp_{st}$ είναι η αποθήκευση του εδαφικού στρώματος.

Εξατμισοδιαπνοή

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Τρεις από τους τρόπους αυτούς χρησιμοποιούνται από το μοντέλο SWAT. Αυτές είναι: η μέθοδος Penman-Monteith (Monteith, 1965), η μέθοδος Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985) και αυτή των Priestley-Taylor (1972). Οι τρεις αυτές μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα δεδομένα που χρειάζονται. Η πρώτη μέθοδος, των Penman-Monteith, απαιτεί ως δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία. Η μέθοδος των Priestley-Taylor χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του αέρα, ενώ η μέθοδος Hargreaves μόνο 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 σε γραμμική συνάρτηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και του δείκτη φυλλωμάτων.

Εξάτμιση και διαπνοή

Το μοντέλο διαχωρίζει την εξάτμιση από τη διαπνοή χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις

$$E_p = \frac{(E_0)(LAI)}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (3.24)$$

$$E_p = E_0 \quad LAI > 3.0 \quad (3.25)$$

όπου: E_p είναι ο προβλεπόμενος ρυθμός διαπνοής των φυτών σε mm/d. Αν η εδαφική υγρασία είναι περιορισμένη, η διαπνοή θα ελαττωθεί.

Η δυνητική εξάτμιση από το έδαφος υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το εδαφικό κάλυμμα ως εξής:

$$E_s = (E_0)(EA) \quad (3.26)$$

όπου: E_s είναι ο δυνητικός ρυθμός εξάτμισης σε mm/d και EA ο δείκτης εδάφους. Η τιμή του δείκτη αυτού δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$EA = \exp(-5.0 \times 10^{-5} \cdot CV) \quad (3.27)$$

όπου: CV είναι το άθροισμα της εδαφικής βιομάζας και των καταλοίπων της καλλιέργειας σε kg/ha. Η πραγματική εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας υπολογίζεται πάνω στη βάση των ανώτερων 0.2 μέτρων του εδαφικού καλύμματος και της χιονοκάλυψης. Αν υπάρχουν περισσότερο από 0.5 mm χιόνι η λευκαύγεια παίρνει την τιμή 0.6 και ο δείκτης εδάφους γίνεται αυτομάτως 0.5. Το χιόνι εξατμίζεται με αυτό το ρυθμό μέχρι να εξαφανιστεί. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας.

Η δυνητική εξάτμιση του εδαφικού νερού μειώνεται σε περιόδους υψηλής χρήσης του από τα φυτά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$E_s^* = \min \left[E_s, \frac{(E_s)(E_0)}{E_s + E_p} \right] \quad (3.28)$$

όταν το E_p είναι μικρό το E_s^* τείνει στο E_p αλλά όσο το E_p πλησιάζει το E_0 το E_s^* τείνει στο $E_s/(1+EA)$, όπου EA είναι ο δείκτης εδάφους.

Τήξη χιονιού

Η τήξη του χιονιού ελέγχεται από τον άνεμο και από τη θερμοκρασία του χιονιού. Αν υπάρχει χιόνι, η τήξη του γίνεται σε ημέρες όπου η θερμοκρασία της δεύτερης εδαφικής στρώσης υπερβαίνει τους 0°C. Η τήξη του χιονιού υπολογίζεται από το SWAT μέσω της παρακάτω συνάρτησης

$$SNO_{mli} = b_{mli} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{mli} \right] \quad (3.29)$$

όπου: SNO_{mli} είναι η ποσότητα του τηγμένου χιονιού σε mm/d, b_{mli} είναι ο παράγοντας τήξης του χιονιού για τη μέρα εκείνη σε mm/d-°C, sno_{cov} είναι το ποσοστό του HRU που είναι καλυμμένο από χιόνι, T_{snow} είναι η θερμοκρασία του χιονιού εκείνη την ημέρα σε °C, T_{mx} είναι η μέγιστη θερμοκρασία την ημέρα εκείνη και T_{mli} είναι η θερμοκρασία πάνω από την οποία επιτρέπεται η τήξη του χιονιού.

Ο παράγοντας τήξης του χιονιού δέχεται μεταβολές ανάλογα με την εποχή στην οποία θέλουμε να τον υπολογίσουμε. Παίρνει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$b_{mli} = \frac{b_{mli6} + b_{mli12}}{2} + \frac{b_{mli6} - b_{mli12}}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{365} \cdot (d_n - 81) \right) \quad (3.30)$$

Οι παράγοντες αυτοί αντιστοιχούν στην 21^η Ιουνίου και στην 21^η Δεκεμβρίου αντίστοιχα και το σύμβολο d_n αντιπροσωπεύει την ημέρα του έτους στην όποια βρισκόμαστε.

Στις αγροτικές περιοχές ο παράγοντας αυτός κυμαίνεται από 1.4 - 6.9 mm/d-°C (Huber & Dickinson, 1988), στις αστικές περιοχές ο παράγοντας αυτός είναι μεγαλύτερος λόγω του κλίματος που δημιουργείται σ' αυτές από τη ρύπανση και τα αυτοκίνητα. Η τιμή του κυμαίνεται από 3.0 - 8.0 (Bengston, 1981; Westerstrom, 1981).

3.2.2 Μετεωρολογικές διεργασίες

Το SWAT χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου την ημερήσια βροχόπτωση, τη θερμοκρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Αν τα δεδομένα υπάρχουν, εισάγονται κατευθείαν στο πρόγραμμα. Διαφορετικά το SWAT μπορεί να προσομοιώσει αυτά τα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να προσομοιωθούν για ολόκληρη τη λεκάνη απορροής ή να διαχωριστούν και να υπολογιστούν ξεχωριστά για την κάθε υπολεκάνη.

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Το μοντέλο παραγωγής ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που χρησιμοποιεί το SWAT (Nicks, 1974) είναι μια αλυσίδα Markov πρώτης τάξης. Η αλυσίδα Markov πρώτης τάξης χρησιμοποιείται για να καθορίσει αν μια μέρα είναι ξηρή ή υγρή. Συνεπώς τα δεδομένα

εισόδου πρέπει να είναι ημερήσια και για κάθε μέρα πρέπει να ξέρουμε αν η προηγούμενη της είναι υγρή ή ξηρή. Για το λόγο αυτό παράγεται ένας τυχαίος αριθμός και συγκρίνεται με την πιθανότητα υγρής-ξηρής ημέρας. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος ή ίσος με την πιθανότητα, τότε εκείνη την ημέρα υπάρχουν κατακρημνίσματα.

Αν οι πιθανότητες αυτές δεν είναι διαθέσιμες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέσος μηνιαίος αριθμός υγρών ημερών. Η πιθανότητα μιας ημέρας να είναι υγρή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$PW = \frac{NWD}{ND} \quad (3.31)$$

όπου: PW είναι η πιθανότητα μιας υγρής μέρας, NWD ο αριθμός των υγρών ημερών και ND οι ημέρες που έχει ο μήνας. Η πιθανότητα μιας υγρής ημέρας μετά από μια ξηρή P(W/D) μπορεί να υπολογιστεί ως κλάσμα του PW:

$$P(W/D) = \beta PW \quad (3.32)$$

όπου: β είναι ένας συντελεστής που κυμαίνεται συνήθως από 0.6 - 0.9. Η πιθανότητα τώρα μιας υγρής μέρας μετά από μια υγρή εκτιμάται με την παρακάτω εξίσωση

$$P(W/W) = 1.0 - \beta + P(W/D) \quad (3.33)$$

Ο υπολογισμός των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν μια υγρή μέρα έχει προταθεί από τον Nicks (1974) και βασίζεται σε μια κατανομή του Fiering (1967). Η σχετική εξίσωση είναι

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2\sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (3.34)$$

όπου: R_{day} είναι η ποσότητα της βροχής για μια συγκεκριμένη μέρα σε mm, μ_{mon} είναι η μέση ημερήσια βροχόπτωση για ένα μήνα, σ_{mon} η τυπική απόκλιση της ημερήσιας βροχόπτωσης για ένα μήνα σε mm, SND_{day} η κανονική τυπική απόκλιση για την ημέρα και g_{mon} είναι ο συντελεστής ασυμμετρίας.

Θερμοκρασία αέρα και ηλιακή ακτινοβολία

Το SWAT, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας, χρησιμοποιεί ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Richardson (1981). Τα ημερήσια μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας παράγονται από μια πολυπαραμετρική κανονική κατανομή.

Το μοντέλο της θερμοκρασίας απαιτεί ως δεδομένα εισόδου τα μηνιαία μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και τις τυπικές αποκλίσεις. Αν αυτές δεν είναι διαθέσιμες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μακροπρόθεσμα παρατηρημένα μέγιστα και ελάχιστα της μηνιαίας θερμοκρασίας. Το μοντέλο εκτιμά την τυπική απόκλιση ως το 25% της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της μέσης τιμής κάθε μήνα. Αυτό απεικονίζεται και με τον παρακάτω τύπο

$$SDTMX_s = 0.25 \left(TE_{mx,k} - \overline{T_{mx,k}} \right) \quad (3.35)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση του μοντέλου ηλιακής ακτινοβολίας είναι η εξής

$$SDRA_k = 0.25(RAMX_k - RA_k) \quad (3.36)$$

όπου: SDRΑ είναι η τυπική απόκλιση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε MJ/m², RAMX η μέγιστη ημερήσια ακτινοβολία στα μέσα του μήνα και RA η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το μήνα *k*.

Το μοντέλο συσχετίζει τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία με τη βροχόπτωση την ημέρα αυτή. Έτσι λοιπόν, η μέγιστη θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία τείνουν να είναι χαμηλότερες κατά τις υγρές μέρες. Τα μεγέθη αυτά έχουν χαμηλότερη τιμή τις υγρές μέρες γιατί το πρόγραμμα SWAT κάνει χρήση εξισώσεων που τα ελαττώνουν.

Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου απαιτείται από το SWAT αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Penman-Monteith που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η μέση ταχύτητα του ανέμου προσομοιώνεται από το πρόγραμμα με τη χρήση της παρακάτω τροποποιημένης εκθετικής εξίσωσης:

$$\mu_{10m} = \mu w n d_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0.3} \quad (3.37)$$

όπου: μ_{10m} η μέση ταχύτητα του ανέμου σε m/s, $\mu w n d_{mon}$ είναι η μέση μηνιαία τιμή του ανέμου και rnd_1 είναι ένα τυχαίο νούμερο από το 0.0 έως το 1.0.

Σχετική υγρασία

Το πρόγραμμα SWAT υπολογίζει τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη μηνιαία. Όπως ακριβώς συμβαίνει με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία, η μέση ημερήσια σχετική υγρασία προσαρμόζεται ώστε να λαμβάνει υπόψη τις υγρές και τις ξηρές μέρες. Η αντίστοιχη εξίσωση εδώ είναι

$$R_{hWmon} = R_{hDmon} + b_H \cdot (1 - R_{hDmon}) \quad (3.38)$$

όπου: R_{hWmon} είναι η μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις υγρές μέρες του μήνα, R_{hDmon} είναι η αντίστοιχη για τις ξηρές μέρες του μήνα και b_H είναι ένας παράγοντας κλίμακας που κυμαίνεται μεταξύ 0.0 και 1.0. Η συνήθης τιμή του στο SWAT είναι το 0.9.

Θερμοκρασία εδάφους

Η μέση θερμοκρασία του εδάφους προσομοιώνεται στο μέσο του εδαφικού στρώματος. Η βασική εξίσωση της θερμοκρασίας του εδάφους αναπτύχθηκε από τους Carslaw and Jaeger (1959) και είναι η εξής

$$T_{soil}(z, d_n) = \overline{T_{AA}} + A_{surf} \exp(-z/dd) \sin(\omega_{imp} d_n - z/dd) \quad (3.39)$$

όπου: $T_{soil}(z, d_n)$ είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους σε βάθος *z* σε mm και την d_n ημέρα του μήνα, $\overline{T_{AA}}$ σε °C είναι η μέση ετήσια θερμοκρασία του εδάφους πάλι σε °C, A_{surf} είναι το ετήσιο εύρος στη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C, *dd* είναι το καθαρό ύψος εφαρμογής σε mm και ω_{imp} είναι η γωνιακή συχνότητα. Αν θέσουμε $z = 0$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$T_{soil}(0, d_n) = \overline{T_{AA}} + A_{surf} \sin(\omega_{imp} d_n) \quad (3.40)$$

Η εξίσωση αυτή τώρα δίνει τιμές που αντιστοιχούν στην θερμοκρασία του αέρα.

Αν τώρα θέσουμε $z \rightarrow \infty$ η εξίσωση γίνεται:

$$T_{soil}(\infty, d_n) = \overline{T_{AA}} \quad (3.41)$$

Η τελευταία εξίσωση δίνει στην επιφάνεια του εδάφους μια θερμοκρασία ίση με αυτή του αέρα κατά τις υγρές ημέρες. Για τις ξηρές ημέρες προκύπτουν υψηλότερες θερμοκρασίες.

Για τον υπολογισμό της εδαφικής υγρασίας, το πρόγραμμα SWAT λαμβάνει υπόψη και άλλους παράγοντες όπως η εδαφική βιομάζα, η φυτοκάλυψη και η χιονόστρωση.

3.3 Επιλογή λογισμικού

Παλαιότερα η κατασκευή ενός μοντέλου ήταν αρκετά διαδεδομένη διαδικασία και κάθε μεγάλο ινστιτούτο ή πανεπιστήμιο κατέστρωνε τις εξισώσεις και υλοποιούσε ένα ή περισσότερα μοντέλα. Σήμερα, τα μοντέλα αποτελούνται από πολλές δεκάδες χιλιάδες γραμμές προγραμματιστικού κώδικα και είναι τόσο σύνθετα που στην υλοποίησή τους συμμετέχει ομάδα προγραμματιστών. Εξελίσσονται δε συνεχώς και προσαρμόζονται στις νέες δυνατότητες των υπολογιστών και του λογισμικού. Το ενδιαφέρον σήμερα έχει στραφεί στη χρησιμοποίηση ενός από τα μεγαλύτερα μοντέλα που κυκλοφορούν στην παγκόσμια αγορά με χρήση όσο το δυνατόν πιο αναλυτικών δεδομένων εισόδου. Η ποιότητα αυτών των δεδομένων καθορίζει και την επιτυχία της προσομοίωσης. Η επιλογή του μοντέλου μπορεί να καθοριστεί με βάση κριτήρια όπως:

- Το διαθέσιμο τύπο υπολογιστών
- Το λειτουργικό σύστημα
- Την υπάρχουσα τεχνογνωσία
- Το διαθέσιμο χρόνο
- Τις απαιτήσεις των αποτελεσμάτων
- Τι δεδομένα υπάρχουν για το ζητούμενο χώρο

Στη συγκεκριμένη περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε χρήση του μοντέλου SWAT ενός από τα πλέον διαδεδομένα προγράμματα στον κόσμο. Παρόλο που το μοντέλο ήταν εντελώς άγνωστο, η ύπαρξη αναλυτικού εγχειριδίου και η διαθέσιμη υποστήριξη σχετικά με τη λειτουργία του έκανε τη χρήση του δυνατή.

3.4 Γενική περιγραφή του λογισμικού

Πρόκειται για ένα μοντέλο του οποίου τα αρχικά προέρχονται από τις αγγλικές λέξεις Soil and Water Assessment Tool. Αναπτύχθηκε με σκοπό την πρόβλεψη της επίδρασης της διαχείρισης της γης στο νερό. Δημιουργήθηκε αρχικά για την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών του Αμερικανικού Υπουργείου Γεωργίας (USDA), πλέον, όμως, χρησιμοποιείται ευρέως και συνεχίζει ακόμα να εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς. Το SWAT δέχεται ως δεδομένα εισόδου στοιχεία σχετικά με το έδαφος και το κλίμα μιας λεκάνης και δίνει αποτελέσματα σχετικά με τις απορροές, τα φερτά και την περιεκτικότητα σε χημικά στην έξοδο. Πρόκειται για ένα προσδιοριστικό, καταναμημένο μοντέλο, συνεχούς χρόνου. Ενσωματώνει τις επικρατέστερες τεχνικές που υπάρχουν στο χώρο της υδρολογίας, με σκοπό την προσομοίωση των ποσοτικών και ποιοτικών συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.

Το μοντέλο αυτό πλεονεκτεί σε πολλά σημεία ως προς τις συμβατικές μεθόδους. Αυτό που διαφοροποιεί το μοντέλο είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί τεχνικές παλινδρόμησης αλλά πρόκειται για ένα μοντέλο φυσικής βάσης. Τα δεδομένα εισόδου του είναι σχετικά με το κλίμα, τις ιδιότητες του εδάφους, την τοπογραφία, τη βλάστηση και τη διαχείριση της γης. Όλα αυτά τα συνδέει κάνοντας χρήση εξισώσεων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Κάτι που αποδεικνύει την πλεονεκτική του θέση, είναι το γεγονός ότι μπορεί να μοντελοποιήσει ακόμα και λεκάνες για τις οποίες δεν έχουμε μετρήσεις. Επίσης το πρόγραμμα μπορεί να λειτουργήσει και με ελάχιστα δεδομένα (πολύ λιγότερα από τις δυνατότητές του) τα οποία δεν είναι εξεζητημένα και μπορούν να συλλεχθούν από τις κρατικές και άλλες υπηρεσίες. Αυτό που δίνει ακόμα μεγαλύτερο προβάδισμα στο πρόγραμμα αυτό είναι η δυνατότητα λειτουργίας του σε περιβάλλον GIS αφού αυτό συμβάλλει στη δημιουργία ενός φιλικού και εποπτικού περιβάλλοντος εργασίας.

Η μεγαλύτερη καινοτομία όμως του προγράμματος αυτού είναι ο χωρισμός της λεκάνης απορροής στα λεγόμενα HRU (Hydrologic Response Units) ή αλλιώς Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης. Κάθε λεκάνη χωρίζεται προαιρετικά σε υπολεκάνες και, στη συνέχεια, γίνεται ο χωρισμός στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις κλίσεις. Ο χωρισμός αυτός γίνεται για να αντιμετωπιστεί κάθε HRU σαν μια διαφορετική λεκάνη. Έτσι το μοντέλο ρυθμίζεται και εφαρμόζει τις εξισώσεις ξεχωριστά σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Στη συνέχεια, συνδέει όλες αυτές τις μονάδες μεταξύ τους. Η απορροή από κάθε HRU διοδεύεται κατάλληλα δια των γειτονικών HRU και καταλήγει στην έξοδο της υπολεκάνης και, στη συνέχεια, στην έξοδο της κύριας λεκάνης (Neitsch et al., 2005).

Το πρόγραμμα αυτό αναπτύσσεται και βελτιώνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια και πρόκειται πλέον για ένα αξιόπιστο μοντέλο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του AVSWAT δηλαδή το μοντέλο SWAT χρησιμοποιήθηκε μέσα από το λογισμικό ArcGIS 9.3. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην εργασία αυτή έγινε μερική χρήση των δυνατοτήτων του προγράμματος. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το πρόγραμμα αυτό είναι ένα πολύ ισχυρό υπολογιστικό πακέτο που μπορεί να υπολογίσει πολλές παραμέτρους, ακόμα και τη συγκέντρωση χημικών.

4 Προετοιμασία των δεδομένων του μοντέλου SWAT - Μεθοδολογία

4.1 Προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων του μοντέλου

4.1.1 Γενικές πληροφορίες

Το λογισμικό ArcGIS της εταιρείας ESRI είναι πολύ χρήσιμο για την διεξαγωγή υδρολογικών μελετών. Έχει έναν σημαντικό αριθμό εργαλείων που εξάγουν αποτελέσματα σχετικά με τις υδρολογικές διεργασίες και διαδικασίες κάτι που ήταν χρήσιμο έως και απαραίτητο στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης έγινε χρήση της έκδοσης 9.3 του λογισμικού και των εργαλείων που εμπεριέχονται σε αυτό, έτσι ώστε να δημιουργηθεί τελικά ένα σωστό υδρολογικό Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της Λεκάνης Απορροής. Η διαδικασίες που ακολουθήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

4.1.2 Ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ

Ένα πολύ σημαντικό στάδιο για τη συνέχεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία του κατάλληλου υποβάθρου που αφορά στην οριοθέτηση της λεκάνης απορροής και στην ανάλυση της υψομετρικής πληροφορίας που μας παρέχεται για αυτήν μέσω των χαρτών αυτών.

Πριν γίνει η οποιαδήποτε επεξεργασία οι χάρτες αυτοί, αφού μετατράπηκαν σε ψηφιακή μορφή με τη χρήση σαρωτή, έπρεπε να γεωαναφερθούν σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε το ΕΓΣΑ '87, μιας και είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς στην Ελλάδα.

Με τον όρο γεωαναφορά εννοούμε το σύνολο των απαραίτητων στροφών και μεταθέσεων του χάρτη στο επίπεδο ώστε να προκύψει προβολή του κάθε σημείου του χάρτη στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Για να πραγματοποιηθεί η γεωαναφορά, εισήχθη ξεχωριστά το κάθε φύλλο χάρτη στο περιβάλλον του λογισμικού ArcMap, που εντάσσεται στο πακέτο λογισμικού ArcGIS. Αφού ολοκληρώθηκε αυτό το στάδιο, στην πορεία έγινε χρήση της εργαλειοθήκης “Georeferencing” η οποία δίνει τη δυνατότητα αντιστοίχισης των σημείων που απεικονίζονται πάνω σε έναν χάρτη με τις πραγματικές γεωδαιτικές τους συντεταγμένες σε ένα σύστημα αναφοράς, στην προκειμένη περίπτωση στο ΕΓΣΑ '87. Τα σημεία γνωστών συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωαναφορά ήταν οι κορυφές του κανάβου που απεικονίζεται πάνω στα φύλλα χάρτη, καθώς και κάποια σημεία του εσωτερικού του χάρτη. Δυστυχώς, οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν κωδικοποιημένο κানাβο ΕΓΣΑ και έτσι έγινε πρώτα μια διαδικασία μετατροπής των συντεταγμένων φ και λ σε X και Y ΕΓΣΑ με τη βοήθεια του προγράμματος COORD. Τα σημεία που τελικά επιλέχθηκαν ήταν αυτά με τα οποία ο τελικός μετασχηματισμός εμφάνισε το μικρότερο δυνατό σφάλμα, σε συνδυασμό, βέβαια, με έναν ικανοποιητικό αριθμό σημείων (γύρω στα 7 για κάθε χάρτη). Το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα του μετασχηματισμού ήταν κοντά στα 8 m.

Η ακρίβεια αυτή είναι ικανοποιητική για γεωαναφορά χάρτη κλίμακας 1:50 000. Αφού καθένα από τα φύλλα γεωαναφέρθηκε ξεχωριστά, στη συνέχεια έγινε εισαγωγή και των τριών στο περιβάλλον του ArcMap. Παρατηρώντας τα βλέπουμε ότι η γεωαναφορά ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην απεικόνιση της πραγματικότητας σε έναν ενιαίο χάρτη. Κάτι τέτοιο φαίνεται καθαρά αν κοιτάξει κανείς τις ενώσεις των αρχικών φύλλων. Αυτές έχουν ταιριάξει απόλυτα μεταξύ τους και επίσης καθώς ακολουθούμε ακμές ή καμπύλες που συνεχίζουν φυσικά από το ένα φύλλο στο άλλο, η μετάβαση είναι ομαλή και δεν αλλάζει η διεύθυνση τους.

Έχοντας τώρα το υπόβαθρο έτοιμο μπορούμε να συνεχίσουμε στη διαδικασία ψηφιοποίησης των στοιχείων του χάρτη που μας ενδιαφέρουν. Στην περίπτωση μας, τα απαραίτητα δεδομένα είναι το κύριο υδατόρευμα, οι ισοϋψείς καμπύλες, η λεκάνη απορροής του ποταμού καθώς και κάποια υψομετρικά σημεία που υπάρχουν στους χάρτες. Τα στοιχεία, αυτά όπως ακριβώς ψηφιοποιήθηκαν από τους χάρτες της ΓΥΣ, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β στα σχήματα 1, 2 και 3.

Αρχικά, εντοπίστηκαν και μετατράπηκαν σε διανυσματικά δεδομένα όλα τα ρέματα μόνιμης ροής που συνδέονται με τον κύριο κλάδο του ποταμού Αγραφιώτη. Για να γίνει αυτό, δημιουργήθηκε αρχικά με το λογισμικό ArcCatalog του πακέτου ArcGIS ένα αρχείο είδους “shapefile” και τύπου δεδομένων “polyline”, το οποίο και εισήχθη στο ArcMap. Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση της εργαλειοθήκης “Editor” του λογισμικού διανυσματοποιήθηκαν όλα τα κύρια ρέματα με φορά από ανάντη προς κατόντη κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία για την σωστή λειτουργία του εργαλείου που θα δημιουργήσει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους κάτι που περιγράφεται παρακάτω.

Σειρά έχει η χάραξη του υδροκρίτη. Αφού δημιουργήθηκε ένα νέο “shapefile” με την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, ξεκίνησε η ψηφιοποίηση του υδροκρίτη. Η οριοθέτηση της λεκάνης απορροής έγινε με ιδιαίτερη προσοχή. Όλο το υδρογραφικό δίκτυο που διανυσματοποιήθηκε προηγουμένως καθώς και η επιπλέον πληροφορία για μισγάγγειες – ρέματα μη μόνιμης ροής, που παρέχεται από τους χάρτες της Γ.Υ.Σ. πρέπει να είναι εντός των ορίων της λεκάνης απορροής. Επίσης, ο υδροκρίτης τέμνει κάθετα τις ισοϋψείς καμπύλες κατά την μέγιστη δυνατή κλίση.

Για την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπύλων δημιουργήθηκε σύμφωνα με τον γνωστό τρόπο ένα ακόμα αρχείο “shapefile”. Κρίθηκε σκόπιμο οι ισοϋψείς καμπύλες να διανυσματοποιηθούν ανά 100 m στο σύνολο της Λεκάνης Απορροής και μόνο κοντά στην έξοδο ανά 20 m για τα πρώτα 100 m. Διαφορετικά θα απαιτούταν πολύ μεγάλος όγκος εργασίας.

Τέλος, κρίθηκε σκόπιμο να προστεθεί και ένα “shapefile” τύπου “point” στο οποίο προστέθηκε υψομετρική πληροφορία κάποιων σημείων που υπήρχαν στους χάρτες της Γ.Υ.Σ.

4.1.3 Επεξεργασία διανυσματικών δεδομένων

Για την δημιουργία ενός Υδρολογικώς Ορθού Μοντέλου Αναγλύφου της λεκάνης, απαραίτητη ήταν αρχικά η επεξεργασία των ψηφιοποιημένων δεδομένων έτσι ώστε να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

Πρώτο απ’ όλα υπολογίστηκε το εμβαδό της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη. Αφού τα διανυσματικά αρχεία τύπου γραμμής μετατράπηκαν σε διανυσματικά αρχεία τύπου πολυγώνου με τη χρήση του ArcToolbox του ArcMap και συγκεκριμένα του εργαλείου Data Management Tools → Features → Feature to Polygon στο νέο διανυσματικό αρχείο που δημιουργήθηκε, και αφού ανοίξαμε τον πίνακα δεδομένων (Attribute Table) που αφορά το

συγκεκριμένο αρχείο, προσθέσαμε ένα νέο πεδίο. Σ' αυτό, επιλέγοντας την εντολή "Calculate Geometry" από το αναδυόμενο μενού του δεξιού κλικ και επιλέγοντας "area" υπολογίστηκε αυτόματα το εμβαδό της λεκάνης.

Με τον ίδιο τρόπο μετρήθηκαν και τα εμβαδά A_i ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ισοΰψεις καμπύλες για την εξαγωγή του μέσου υψομέτρου της λεκάνης.

4.1.4 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Για την δημιουργία ενός σωστού Ψ.Μ.Ε της λεκάνης έγινε χρήση του εργαλείου του ArcToolbox, 3D Analyst Tools → Raster Interpolation → Topo to Raster το οποίο είχε ως στοιχεία εισόδου το διανυσματικό αρχείο τύπου πολυγώνου που περιγράφει τα όρια της λεκάνης, το διανυσματικό αρχείο τύπου γραμμής που περιέχει τις ισοΰψεις καμπύλες καθώς και τα υψόμετά τους, το διανυσματικό αρχείο τύπου γραμμής που περιέχει το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης και, τέλος, το διανυσματικό αρχείο τύπου σημείου που περιέχει τα σημεία με υψομετρική πληροφορία.

4.1.5 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών Λεκάνης Απορροής

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 (Τσακίρης, 1995). 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.

Η σχέση μεγέθους λεκάνης – απορροής χρειάζεται επιπλέον ιδιαίτερη προσοχή, αφού το μέγεθος αυτής επηρεάζει όλους τους άλλους παράγοντες της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση της λεκάνης αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος αυτής, ενώ η ειδική παροχή ($m^3/s/km^2$) μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους της λεκάνης. Για τους λόγους αυτούς, η σχέση μέγεθος λεκάνης και απορροής δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως.

Η εκτίμηση του μεγέθους της λεκάνης έγινε ύστερα από επεξεργασία των χαρτών της Γ.Υ.Σ με το λογισμικό του ArcGIS, όπως αυτή περιγράφεται πιο πάνω. Ύστερα από αυτή την προεργασία υπολογίστηκε εύκολα το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από τον υδροκρίτη.

Υψόμετρο Λεκάνης Απορροής

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής έχει άμεση σχέση τόσο με τα κατακρημνίσματα που δέχεται όσο και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σ' αυτή (Τσακίρης, 1995). Πιο συγκεκριμένα, τα κατακρημνίσματα αυξάνουν όσο προχωράμε προς τα ψηλότερα σημεία της λεκάνης. Η αύξηση αυτή όμως παρατηρείται έως το υψόμετρο των 2500 m περίπου, από κει και πάνω παρατηρείται ελάττωση. Αντίθετα, η θερμοκρασία μειώνεται σε κάθε περίπτωση με την αύξηση του υψομέτρου. Η άμεση σχέση του υψομέτρου με τα κατακρημνίσματα που δέχεται η λεκάνη αλλά και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή επηρεάζει και την απορροή. Όσο περισσότερα είναι τα κατακρημνίσματα τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορροή αλλά επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι η εξάτμιση. Η θερμοκρασία καθορίζει και το ποσοστό των κατακρημνισμάτων που πέφτουν στο έδαφος υπό

τη μορφή χιονιού, όπως επίσης και την διάρκεια παραμονής τους σε αυτό. Οι συνθήκες αυτές, όπως είναι αναμενόμενο, επηρεάζουν σημαντικά την απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

Το πιο σημαντικό από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης για το οποίο απαιτείται η διαίρεση της λεκάνης σε υποπεριοχές και ο υπολογισμός του μέσου υψόμετρου καθεμιάς από αυτές. Στην περίπτωση μας, ως τέτοιες περιοχές λήφθηκαν αυτές που περιλαμβάνονται ανάμεσα σε δυο διαδοχικές ισοϋψείς καμπύλες και το μέσο υψόμετρο των υποπεριοχών αυτών είναι ο μέσος όρος των υψόμετρων των δυο καμπύλων. Ο τύπος που εκφράζει το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ο εξής:

$$z_m = \frac{\sum A_i z_i}{\sum A_i} \quad (4.1)$$

όπου:

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης

z_i : το μέσο υψόμετρο της κάθε υποπεριοχής

A_i : το εμβαδόν της κάθε υποπεριοχής

Εκτός όμως από το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, σημαντικά είναι και το μέγιστο και το ελάχιστο, καθώς και η μέση τιμή του υψόμετρου. Το ελάχιστο και το μέγιστο προσδιορίζονται εύκολα με τη χρήση τοπογραφικών χαρτών ή με μετρήσεις. Για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής του υψόμετρου είναι αναγκαία η χάραξη της υψογραφικής καμπύλης. Αυτή ορίζεται ως η καμπύλη που χαράσσεται σε σύστημα συντεταγμένων με τεταγμένη το υψόμετρο και τετμημένη το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που βρίσκεται πάνω από το κάθε υψόμετρο. Στη συνέχεια, η μέση τιμή του υψόμετρου, που καλείται επίσης και διάμεσος, λαμβάνεται από την υψογραφική καμπύλη και ισούται με εκείνη που αντιστοιχεί στο 50% της έκτασης της λεκάνης.

4.2 Προετοιμασία βροχομετρικών δεδομένων

4.2.1 Έλεγχος ομογένειας χρονοσειρών βροχόπτωσης

Ο έλεγχος ομογένειας (ή, έλεγχος συνέπειας κατά τους Κουτσογιάννη & Ξανθόπουλο, 1999, σ.107) αποσκοπεί στον εντοπισμό τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Σε περίπτωση που εντοπιστούν τέτοιες αλλαγές, η αποκατάσταση της ομογένειας (γνωστή και ως ανόρθωση) αποσκοπεί στην τροποποίηση των μετρήσεων σε τρόπο ώστε να αρθούν τα αποτελέσματα των αλλαγών των συνθηκών. Τέτοιες αλλαγές συσχετίζονται συνήθως με μεταβολές στον τρόπο μέτρησης, στο φυσικό περιβάλλον ή ακόμα και στην τοποθεσία του σταθμού.

Πριν από την ανάλυση και επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων αυτών. Για τον έλεγχο των παρατηρήσεων, εκτός από τους λογικούς ελέγχους που γίνονται για την εύρεση χονδροειδών σφαλμάτων πραγματοποιείται και ο έλεγχος ομογένειας των παρατηρήσεων. Σε αυτό το στάδιο, ελέγχεται το κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε με τις ίδιες συνθήκες μέτρησης. Η αλλαγή της θέσης του οργάνου ή η αντικατάστασή του όπως επίσης και η αλλαγή του παρατηρητή οδηγούν σε μη ομογενή δεδομένα.

Ο έλεγχος της ομογένειας των δεδομένων ενός σταθμού γίνεται με τη σύγκρισή του με γειτονικό σταθμό ο οποίος έχει πρώτα ελεγχθεί για την ομογένεια των παρατηρήσεών του. Ο

σταθμός αυτός ονομάζεται σταθμός βάσης και η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος της Διπλής Αθροιστικής Καμπύλης.

Η μεθοδολογία της διπλής αθροιστικής καμπύλης (double mass curve) που παρουσιάζεται και υλοποιείται στα πλαίσια του λογισμικού «Υδρογνώμων» αποτελεί έναν έλεγχο «χωρικής συνέπειας» μεταξύ μετρήσεων βροχόπτωσης γειτονικών σταθμών (Κοζάνης κ.ά., 2005). Η μέθοδος είναι ημιεμπειρική και συνδυάζει την γραφική απεικόνιση βροχομετρικών δεδομένων με στατιστικές υποθέσεις και την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η εφαρμογή της πρέπει να γίνεται σε σταθμούς με ισχυρή συσχέτιση λόγω κοντινής γεωγραφικής τους θέσης, η δε διόρθωση είναι καλό να τεκμηριώνεται με στοιχεία από το ημερολόγιο του σταθμού. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται σε ετήσια δεδομένα βροχόπτωσης χωρίς να αποκλείεται και εφαρμογή σε μηνιαίες χρονοσειρές. Οι συντελεστές που προκύπτουν από την διόρθωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για αναγωγή όλων των χρονοσειρών μικρότερου χρονικού βήματος.

Για την κατάρτιση της Διπλής Αθροιστικής Καμπύλης υπολογίστηκαν για κάθε σταθμό τα αθροίσματα:

$$\sum X_{i+1} = \sum X_i + X_{i+1} \quad (4.2)$$

όπου:

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

i : η τάξη του νεότερου στοιχείου

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

Αυτό που ακολουθεί στη συνέχεια είναι η επιλογή του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού οι οποίοι τοποθετούνται σε κοινό σύστημα αξόνων. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται στον άξονα των τετμημένων και ο εξεταζόμενος σταθμός στον άξονα των τεταγμένων.

Με τη μέθοδο αυτή ελέγχονται τα ετήσια ύψη βροχής και αναγκαία προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού.

Ο έλεγχος της συσχέτισης των δεδομένων γίνεται με τον συντελεστή R^2 ο οποίος δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (4.3)$$

όπου: x και y αναφέρονται στα ετήσια βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή R^2 τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση παρουσιάζουν τα δεδομένα των εξεταζόμενων σταθμών.

Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται στη διπλή αθροιστική καμπύλη θλάσεις οι οποίες σηματοδοτούν την έναρξη της αλλαγής των συνθηκών μέτρησης.

Για τη διόρθωση των θλάσεων αυτών θεωρούνται αξιόπιστες οι πιο πρόσφατες μετρήσεις των ετήσιων βροχομετρικών υψών και η διόρθωση γίνεται στα παλαιότερα δεδομένα έτσι ώστε τα

τελικά δεδομένα να είναι ανάλογα εκείνων που θα υπήρχαν αν δεν είχαν αλλάξει οι συνθήκες μέτρησης. Η διόρθωση γίνεται με τον πολλαπλασιασμό επί ένα συντελεστή αναγωγής ο οποίος είναι ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Ο συντελεστής αυτός δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4.4)$$

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

Για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού βάσης, όταν δεν δίνονται περαιτέρω δεδομένα για το αν ο σταθμός αυτός έχει ελεγχθεί για την ομογένεια του (όπως συμβαίνει και στην περίπτωση μας), υπολογίζεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανά δύο σταθμούς σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

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

όπου: x και y αναφέρονται στα ετήσια βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

4.2.2 Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Όταν λείπουν παρατηρήσεις από ένα σταθμό αυτές μπορούν να συμπληρωθούν με τη βοήθεια γειτονικών σταθμών οι οποίοι διαθέτουν πλήρη δεδομένα για την περίοδο αυτή. Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι αναγκαίο οι σταθμοί να έχουν ελεγχθεί ως προς το βαθμό συσχέτισης με τον υπό συμπλήρωση σταθμό και ως προς την ομογένεια των δεδομένων τους. Αν είναι διαθέσιμοι τρεις γειτονικοί σταθμοί βάσης τότε μπορεί για τη συμπλήρωση της ελλειπούσης τιμής P_x του υπό συμπλήρωση σταθμού να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} + \frac{N_x P_3}{N_3} \right] \quad (4.6)$$

όπου:

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

N_1, N_2, N_3 : οι τιμές της μέσης βροχόπτωσης στους σταθμούς αυτούς

N_x : η μέση βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού

4.2.3 Υπολογισμός μέσου βροχομετρικό ύψους λεκάνης απορροής

Αφού συμπληρωθούν και τα βροχομετρικά δεδομένα που έλειπαν από τους σταθμούς σειρά έχει τώρα η υψομετρική αναγωγή των βροχομετρικών αυτών δεδομένων. Για να γίνει αυτό

πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη. Αυτό μπορεί να επιτευχτεί με έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους:

- I. Αριθμητικός μέσος όρος παρατηρήσεων των σημειακών βροχομετρικών υψών των σταθμών της λεκάνης απορροής. Η μέθοδος αυτή σπάνια χρησιμοποιείται γιατί προϋποθέτει την ομοιόμορφη κατανομή των σταθμών στη λεκάνη απορροής.
- II. Πολύγωνα Thiessen. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τον παράγοντα βάρους που αντιστοιχεί στα εμβαδά των πολυγώνων (περιοχών) επιρροής κάθε σταθμού όπως αυτός προκύπτει με τη χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους. Το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης P_0 προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους παρατηρήσεων P_i πολλαπλασιασμένων επί των αντίστοιχων εκτάσεων επηρεασμού δια της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής. Η εξίσωση που αντιστοιχεί στα παραπάνω είναι η εξής:

$$P_0 = \frac{\sum A_i P_i}{A} = \sum \left(\frac{A_i}{A} P_i \right) \quad (4.7)$$

- III. Ισοϋέτιες καμπύλες (ή ισόβροχες καμπύλες). Η μέθοδος αυτή είναι η ακριβέστερη μέθοδος από τις τρεις που αναφέρθηκαν, προϋποθέτει όμως την ύπαρξη αρκετών σταθμών και τη γνώση της περιοχής ώστε να μην εξομαλύνονται τα χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλούνται από τοπικά αίτια. Οι ισοϋέτιες καμπύλες χαράσσονται με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν των ισοϋψών καμπυλών που έχουμε στην τοπογραφία. Με τη μέθοδο αυτή, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στη λεκάνη προκύπτει από το παρακάτω τύπο:

$$P_0 = \sum \frac{A_i}{A} \overline{P_{i-1,i}} \quad (4.8)$$

όπου:

A_i : Η έκταση μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών

A : Η συνολική έκταση της λεκάνης

$\overline{P_{i-1,i}}$: Το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋέτιων καμπυλών

Επιπλέον έγινε αναγωγή των βροχομετρικών αυτών υψών στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής με βάση τη βροχοβαθμίδα. Ο συντελεστής διόρθωσης λ δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$\lambda = 1 + \frac{\beta}{P_0 \cdot 100} (z_m - \bar{z}) \quad (4.9)$$

όπου:

β : η βροχοβαθμίδα

P_0 : η τιμή του ύψους βροχής στη υψομετρική αναγωγή

z_m : το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής

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

Ο συντελεστής λ υπολογίστηκε $\lambda = 1.086069$

Τελικά η χωρικά μέση βροχόπτωση ανηγμένη στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του παραπάνω συντελεστή λ επί το μέσο βροχομετρικό ύψος την ίδια χρονική στιγμή.

4.3 Προετοιμασία δεδομένων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

4.3.1 Γενικά

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής του νερού στο φυσικό περιβάλλον έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία στην εκτίμηση της απορροής ενός ποταμού και αυτό γιατί η εξάτμιση και η διαπνοή είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Το νερό όταν εισέλθει στη φάση της εξάτμισης είναι πλέον μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Για τους λόγους αυτούς, θα ήταν λάθος να μην εξεταστεί η συμμετοχή των φαινομένων αυτών στην παραγωγή απορροής της συγκεκριμένης λεκάνης.

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής απαραίτητες είναι οι μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών που αφορούν στη θερμοκρασία και στη σχετική υγρασία του αέρα καθώς επίσης και στην ηλιακή ακτινοβολία και στην ταχύτητα του ανέμου. Αυτό που επίσης είναι απαραίτητο είναι ένα μοντέλο που να μπορεί να αναπαριστά ικανοποιητικά αυτές τις φυσικές διεργασίες.

4.3.2 Δεδομένα θερμοκρασίας αέρα

Όταν γίνεται αναφορά στη θερμοκρασία αέρα, νοείται η θερμοκρασία αυτού υπό σκιά (Τσακίρης, 1995). Η μέτρησή της γίνεται με θερμόμετρα και θερμογράφους που τοποθετούνται στους μετεωρολογικούς κλωβούς όπου ο αέρας κυκλοφορεί ελεύθερα και τα όργανα προστατεύονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Από τα όργανα αυτά μπορούν να υπολογιστούν οι παρακάτω παράμετροι:

1. Η απόλυτη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας (T_{\max} και T_{\min} αντίστοιχα) που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ορισμένης χρονικής περιόδου.
2. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία
3. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία
4. Η μέση ετήσια θερμοκρασία
5. Το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος, δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία του 24ώρου.
6. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος, δηλαδή η διαφορά της μέσης θερμοκρασίας του ψυχρότερου μήνα από τη μέση του θερμότερου μήνα του έτους.

Η θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλεται με την αύξηση του ύψους της ατμόσφαιρας, από υδρολογικής άποψης όμως ιδιαίτερης σημασίας είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα εντός της τροπόσφαιρας και στην περίπτωση αυτή αύξηση του υψόμετρου σημαίνει μείωση της θερμοκρασίας. Οι κυριότεροι λόγοι της μείωσης αυτής είναι η αραίωση του αέρα και των υδρατμών καθώς το ύψος αυξάνεται, η μείωση της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας κλπ.

Η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με τη μονάδα του ύψους, λέγεται θερμοκρασιακή βαθμίδα ή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα (Wilson, 1974) και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z} \quad (4.10)$$

Όπου: T_a η θερμοκρασία και Z το υψόμετρο

Το αρνητικό πρόσημο τοποθετείται για να δηλώσει ότι αύξηση του ύψους αντιστοιχεί σε ελάττωση της θερμοκρασίας. Ως μονάδα του ύψους λαμβάνονται τα 100 m ή το 1 km. Επομένως, η θερμοβαθμίδα εκφράζεται σε °C/100 m ή σε °C/1 km και η μέση τιμή της είναι 0.6°C. Η τιμή της αυτή μεταβάλλεται κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να γίνει πολύ θερμή την ημέρα και να ψυχθεί τη νύχτα με αποτέλεσμα και η θερμοβαθμίδα να λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή την ημέρα και μικρότερη τη νύχτα.

Ο κανόνας μείωσης της θερμοκρασίας με αύξηση του ύψους που προαναφέρθηκε δεν ακολουθείται πάντοτε και είναι πιθανό η θερμοκρασία να αυξάνεται αυξανόμενου του ύψους. Σε κάθε τέτοια περίπτωση, η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα παίρνει αρνητικές τιμές και ευνοείται η συσσώρευση ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Μια τέτοια ανάλυση όμως είναι έξω από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αυτό που πρέπει επίσης να αναφερθεί είναι ότι ο τύπος αυτός είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί γιατί προϋποθέτει πλήρη γνώση της μεταβολής που έχει η θερμοκρασία με το υψόμετρο. Έτσι, αυτό που γίνεται συνήθως είναι η προσέγγιση της θερμοβαθμίδας με δεδομένα που έχουμε πάρει από μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής που βρίσκονται σε διαφορετικό υψόμετρο. Όσο περισσότεροι είναι οι σταθμοί αυτοί, τόσο καλύτερη είναι και προσέγγιση της θερμοβαθμίδας στην πραγματική της τιμή.

4.3.3 Ηλιακή ακτινοβολία

Η κύρια πηγή ενέργειας για την επιφάνεια της γης είναι εκείνη που προέρχεται από τον ήλιο και γι' αυτό καλείται ηλιακή ενέργεια ή ηλιακή ακτινοβολία (Τσακίρης, 1995). Αυτή δραστηριοποιεί μερικές από τις φάσεις του υδρολογικού κύκλου και η ποσότητα αυτής που φθάνει στην επιφάνεια της γης επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- i. Τη συνολική ηλιακή εκπομπή. Ο ήλιος εκπέμπει συνεχώς από τη φωτόσφαιρα προς τη γη ακτινοβολία από μια μέση απόσταση 149.5 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Από την ηλιακή αυτή ενέργεια ένα πολύ μικρό ποσοστό φθάνει στην επιφάνεια της γης.
- ii. Τη μεταβολή της απόστασης γης - ήλιου. Αυτή οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.
- iii. Το ύψος του ηλίου. Το ύψος αυτού πάνω από τον ορίζοντα επηρεάζει σημαντικά την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα σημείο της γης.
- iv. Τη διάρκεια της ημέρας. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους και καθορίζει τη συνολική ποσότητα ακτινοβολίας που δέχεται ένα σημείο.

Η ατμόσφαιρα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το ενεργειακό ισοζύγιο της επιφάνειας της γης. Πιο συγκεκριμένα, από τη μία άποψη συμπεριφέρεται σαν ασπίδα και προστατεύει τη γη από εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας από το διάστημα και από την άλλη αποτρέπει άμεση απώλεια ενέργειας (θερμότητα) από την επιφάνειά της (Shaw, 1983). Όμως, οι

ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ ατμόσφαιρας και επιφάνεια της γης είναι πολλές και ιδιαίτερα πολύπλοκες.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα μελετηθεί η ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση πάντα με τον υδρολογικό κύκλο. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία σχετίζεται άμεσα με την εξάτμιση του νερού απαραίτητες είναι οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό του όγκου αυτής της ενέργειας.

Συνηθέστερη είναι η μέτρηση της πραγματικής ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ενός μήνα ή ενός έτους.

4.3.4 Υγρασία της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντοτε μια μεταβαλλόμενη ποσότητα υγρασίας (υδρατμών) που προέρχεται από την εξάτμιση του νερού των ωκεανών, των υγρών επιφανειών της ξηράς και τη διαπνοή των φυτών. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται άμεσα με τη θερμοκρασία και μειώνεται με το υψόμετρο, ακολουθώντας το ρυθμό ελάττωσης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (Τσακίρης, 1995). Όμως, η υγρασία της ατμόσφαιρας δε μεταβάλλεται μόνο με το υψόμετρο αλλά και με τη μεταβολή του γεωγραφικού πλάτους ενός τόπου και είναι μεγαλύτερη στις περιοχές κοντά στον ισημερινό και μικρότερη σε εκείνες κοντά στους πόλους.

Σημαντικό είναι να οριστούν ορισμένες υδρομετρικές παράμετροι για καλύτερη κατανόηση των μεταβολών της υγρασίας της ατμόσφαιρας. Αυτές είναι:

- i. Τάση των υδρατμών (e). Αποτελεί μέρος της συνολικής ατμοσφαιρικής πίεσης και είναι η πίεση που ασκείται από τους υδρατμούς στην επιφάνεια της γης.
- ii. Κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας. Ο αέρας είναι κορεσμένος όταν σε μια ορισμένη θερμοκρασία και πριν αρχίσει η συμπύκνωση περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει. Η πίεση που ασκούν οι υδρατμοί στις συνθήκες αυτές ονομάζεται μέγιστη τάση υδρατμών (e_s).
- iii. Θερμοκρασία σημείου δρόσου (T_d). Είναι η θερμοκρασία στην οποία μία ακόρεστη αέρια μάζα, όταν ψυχθεί κάτω από σταθερή πίεση, μετατρέπεται σε κορεσμένη.
- iv. Έλλειμμα κορεσμού ($e_a - e$). είναι η διαφορά των τάσεων υδρατμών κορεσμένου και ακόρεστου αέρα σε θερμοκρασία T_a . Η παράμετρος αυτή δείχνει την επιπλέον ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία, μέχρι να γίνει κορεσμένος.
- v. Απόλυτη υγρασία (A_h). Είναι η ποσότητα υδρατμών του αέρα σε γραμμάρια που περιέχεται στη μονάδα όγκου και εκφράζεται με τη σχέση:

$$A_h = \frac{M}{V} (g r m^3) \quad (4.11)$$

- vi. Σχετική υγρασία (R_h). Είναι ο λόγος των υδρατμών που περιέχονται σε ορισμένο όγκο ακόρεστου αέρα προς τη μάζα των υδρατμών που θα περιείχε ο ίδιος όγκος αν ήταν κορεσμένος κάτω από τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Δηλαδή:

$$R_h = \frac{M_U}{M_{SU}} \quad (4.12)$$

Ο λόγος αυτός ισούται επίσης με την εκατοστιαία αναλογία της πραγματικής προς τη μέγιστη τάση υδρατμών στην ίδια θερμοκρασία. Δηλαδή:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (4.13)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και άλλες υδρομετρικές παράμετροι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιες άλλες υδρολογικές μελέτες.

4.3.5 Άνεμος

Άνεμος καλείται κάθε κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την οριζόντια διεύθυνση (Τσακίρης, 1995). Όμως, εκτός από τις οριζόντιες, υπάρχουν και κινήσεις του αέρα προς τα πάνω και προς τα κάτω που ονομάζονται ανοδικοί και καθοδικοί άνεμοι. Η κίνηση των ανέμων οφείλεται στη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της από τη Δύση προς την Ανατολή, στη δύναμη τριβής με την επιφάνεια του εδάφους, στη διαφορά πιέσεων μεταξύ δύο περιοχών κλπ.

Ο άνεμος προσδιορίζεται από τη διεύθυνση ή κατεύθυνση και την ένταση ή ταχύτητα. Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσάει ο άνεμος και προσδιορίζεται με ανεμοδείκτες και ανεμογράφους. Η ταχύτητα εκφράζεται σε m/s ή km/h ή κόμβους ανά ώρα και μετράται με τους ανεμογράφους. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιείται επίσης και η κλίμακα Beaufort η οποία βασίζεται στις επιδράσεις του ανέμου σε διάφορα αντικείμενα. Από κλιματολογικής άποψης οι άνεμοι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: σε εποχιακούς, ημερήσιους και τοπικούς.

4.3.6 Πρακτική σημασία της εξάτμισης και διαπνοής

Από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου είναι η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης. Ο υδρολογικός κύκλος, ξεκινά με την προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή υδρομετεώρων.

Όταν πλέον το νερό έχει εισέλθει στη φάση της εξάτμισης είναι μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Όταν οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο, κάτι που συμβαίνει σε πολλά μέρη του κόσμου, η γνώση της εξατμισοδιαπνοής είναι επιβεβλημένη. Η εξατμισοδιαπνοή από διάφορες περιοχές της γης μαζί με τη βροχόπτωση καθορίζει το ποσόν της επιφανειακής απορροής των υδρολογικών λεκανών των ποταμών. Ακόμα, η εξατμισοδιαπνοή και η βροχόπτωση μπορούν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία επιφανειακή απορροή ή πλημμύρες σε περίπτωση μεγάλης βροχόπτωσης. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή πολλές φορές θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή νερού στο σχεδιασμό των προτεινόμενων αρδευτικών συστημάτων. Το ποσόν και ο ρυθμός εξάτμισης από υδατικές επιφάνειες είναι απαραίτητη πληροφορία για το σχεδιασμό φραγμάτων ή την εκτίμηση των φυσικών λιμνών που απαιτούνται για την οικιακή και τη βιομηχανική χρήση νερού, την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων κλπ.

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

Όλα όσα αναφέρθηκαν μπορούν να εκφραστούν με μια εξίσωση. Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου και παρουσιάζεται παρακάτω.

$$P + I + \Delta SW \pm RO - D - ET = 0 \quad (4.14)$$

όπου:

P : η βροχόπτωση

I : η άρδευση

ΔSW : η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατανομής

RO : η επιφανειακή απορροή

D : η βαθιά διήθηση

ET : η εξατμισοδιαπνοή

4.3.7 Μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής

Από όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, κρίνεται αναγκαίο στη συγκεκριμένη μελέτη που αφορά την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη να υπολογιστεί ο όγκος νερού ο οποίος χάνεται με την εξάτμιση.

Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι για την εκτίμηση του όγκου αυτού. Άλλες είναι ακριβείς και αξιόπιστες και άλλες παρέχουν απλά προσεγγίσεις. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από το είδος της λεκάνης που μελετάται, από την ακρίβεια που απαιτεί η συγκεκριμένη μελέτη και από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Άλλοι παράγοντες επίσης σημαντικοί είναι το κόστος, η ευκολία και η τεχνική δυνατότητα εφαρμογής της κάθε μεθόδου.

4.3.8 Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman

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

$$E = \frac{\Delta \cdot R + E_a \cdot \gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f \quad (4.15)$$

όπου:

E : η εξάτμιση σε mm/ημέρα

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

$$\Delta = 1,5(0,00738 \cdot T_a + 0,8072)^7 - 0,00087 \quad (4.16)$$

όπου:

T_a : θερμοκρασία του αέρα σε °C

R : η διαφορά ακτινοβολιών λήψεως/εκπομπής

$$R = R_A(1-r) \cdot \left(0,29 \cdot \cos \phi + 0,55 \cdot \frac{n}{N} \right) - \sigma \cdot T_{AK}^4 \cdot (0,56 - 0,09) \cdot \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (4.17)$$

όπου:

R_A : η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της Ατμόσφαιρας σε mm/ημέρα (υπολογίζεται από πίνακες)

n : ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας

N : μέγιστη δυνατή ηλιοφάνεια (υπολογίζεται από πίνακες)

σ : σταθερά Stephan – Boltzmann ($2.01 \cdot 10^{-9}$ mm/ημέρα)

T_{AK} : θερμοκρασία του αέρα σε °K

r : albedo

e : τάση υδρατμών σε θερμοκρασία T_{AK}

E_a : η παράμετρος μεταφοράς μάζας υδρατμών

$$E_a = 0,35 \cdot (e_w - e) \cdot (0,5 + 0,54 \cdot u_2) \quad (4.18)$$

όπου:

e_w : τάση κορεσμένων υδρατμών σε mmHg

$$e_w = 25,4616(0,00738 \cdot T_a + 0,8072)^8 - 0,000484(1,8 \cdot T_a + 48) + 0,03350 \quad (4.19)$$

e : τάση υδρατμών

$$e = RH \cdot e_w \quad (4.20)$$

όπου:

RH: σχετική υγρασία

γ : ψυχομετρική σταθερά ($\gamma = 0.485$ mmHg/°C)

f : συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της υδρολογικής επιφάνειας που εξετάζουμε

4.3.9 Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Hargreaves

Είναι μια σχετικά πρόσφατη εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς, που απαιτεί μόνον θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου (Hargreaves & Samani, 1985; Shuttleworth, 1993). Η μέθοδος Hargreaves βασίζεται στην απλή εξίσωση

$$E_{rc} = 0.0023 \left(\frac{S_o}{\lambda} \right) (T_a + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (4.21)$$

Όπου E_{rc} η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d, S_o η εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ/(m²d), λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/kg, T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C, και $T_{\max} - T_{\min}$ η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας πάλι σε °C. Η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι 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 απορροής

4.4.1 Γενικά

Οι απορροές αποτελούν το τμήμα εκείνο του υδρολογικού κύκλου που έχει τη μεγαλύτερη σχέση με τις δραστηριότητες και τα έργα των ανθρώπων. Επίσης, οι απορροές αποτελούν την βασική υδρολογική παράμετρο σε μια σειρά από έργα που γίνονται για τον έλεγχο, την

αξιοποίηση ή την προστασία των υδατικών πόρων. Τέλος, ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών έργων στηρίζονται και υπολογίζονται με βάση τα μεγέθη της απορροής (Τσακίρης, 1995).

Έτσι, γι' αυτούς τους λόγους, η εκτίμηση της απορροής για τη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη καθώς επίσης και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της στο μέλλον είναι βασικό ζήτημα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η μέτρηση της απορροής που παρέχει μια λεκάνη απορροής είναι ένα δύσκολο εγχείρημα το οποίο προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός ικανού δικτύου σταθμών που να επιτρέπουν να εκτιμηθεί το μέγεθος της απορροής.

Η μετρήσεις που γίνονται για την εκτίμηση της απορροής περιλαμβάνουν πληθώρα διαφορετικών μετρήσεων όπως μετρήσεις της στάθμης του ποταμού, μετρήσεις για τον προσδιορισμό του εμβαδού της υγρής διατομής του ποταμού κλπ.

4.4.2 Κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής με το λογισμικό «Υδρογνώμων»

Ο «Υδρογνώμων» (Αγγλική ονομασία: “Hydrognomon”), το σύστημα δηλαδή επεξεργασίας των χρονοσειρών είναι μία αυτόνομη εφαρμογή λογισμικού που αναπτύσσεται εντός του Ε.Μ.Π. εδώ και μία δεκαετία για να καλύψει διάφορες ερευνητικές ανάγκες. Εδώ χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.99.13 (.19) η οποία είναι μετεξέλιξη των παλαιότερων εκδόσεων που έχουν αναπτυχθεί κυρίως για τα εξής ερευνητικά προγράμματα: «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 1999–2003» και «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), 2003–2006».

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιεί απλές, τυπικές υδρολογικές επεξεργασίες, οι οποίες λειτουργούν βοηθητικά. Οι σημαντικότερες λειτουργίες που επιτελεί ο Υδρογνώμωνας είναι οι παρακάτω:

- Μετατροπή χρονοσειρών σε σταθερό χρονικό βήμα (ως γνωστόν, οι πρωτογενείς χρονοσειρές έχουν κάποια σταθερότητα, αλλά συχνά παρουσιάζουν διαταραχές, η εξάλειψη των οποίων είναι αναγκαία για περαιτέρω επεξεργασία)
- Εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος (συνάθροιση), π.χ. ωριαίων από δεκάλεπτες, ημερήσιων από ωριαίες, μηνιαίων από ημερήσιες
- Τυπικοί έλεγχοι συνέπειας όπως ακραίων τιμών και χρονικής συνέπειας
- Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ χρονοσειρών, πολλαπλή παλινδρόμηση, οργανική συσχέτιση και αυτοσυσχέτιση
- Υδατικά ισοζύγια: αδρομερές μοντέλο βροχής – απορροής (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Ζυγός»)
- Συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης, δυνατότητα εισαγωγή τυχαίου όρου για διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών. Επέκταση χρονοσειρών
- Γραμμικές πράξεις μεταξύ χρονοσειρών
- Κατάρτιση καμπυλών στάθμης – παροχής με στατιστικές μεθόδους και καμπυλών επέκτασης με χρησιμοποίηση υδραυλικών εξισώσεων
- Εξαγωγή χρονοσειρών παροχών από χρονοσειρές στάθμης, καθώς και χρονοσειρών όγκου και επιφανείας από χρονοσειρές στάθμης ταμιευτήρων και λιμνών

- Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με αναλυτικές ή ημιεμπειρικές μεθόδους
- Επέκταση δειγμάτων εξατμισοδιαπνοής
- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος χρονοσειράς, προσαρμογή στατιστικών παραμέτρων, στατιστικές προγνώσεις, στατιστικοί έλεγχοι και εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Πυθία»)
- Ανάλυση χρονοσειρών εξαιρετικών βροχοπτώσεων - κατάρτιση όμβριων καμπυλών με συνεπείς μεθοδολογίες. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Όμβρος»).

Για τον υπολογισμό της παροχής με το λογισμικό αυτό απαραίτητη ήταν η κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής. Αφού πρώτα δημιουργήθηκαν οι απαιτούμενες χρονοσειρές υδρομετρήσεων, μία για τις ημερήσιες στάθμες του ποταμού και μία για τις μετρημένες παροχές του, από το μενού Hydrology → Curves and interpolations έγινε η παραγωγή των καμπυλών αυτών. Για να καταλήξουμε στο τελικό αποτέλεσμα επισημάνθηκε αρχικά στο πρόγραμμα ποιες είναι οι χρονοσειρές στάθμης και παροχής έτσι προέκυψε στο διάγραμμα της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος ένα νέφος υδρομετρήσεων από διαφορετικές χρονικές περιόδους. Στην πορεία, οι μετρήσεις αυτές χωρίστηκαν σε διάφορες υποπεριόδους έτσι ώστε τα σημεία των μετρήσεων κάθε υποπεριόδου να ακολουθούν κάποια ευθεία στο διπλό λογαριθμικό χαρτί. Δημιουργήθηκαν έτσι 16 καμπύλες στάθμης-παροχής και μία καμπύλη επέκτασης. Για την κατάρτιση της τελευταίας χρησιμοποιείται το κουμπί Hydraulic και έπειτα επιλέγεται μια διατομή. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε μια τυπική διατομή, η τραπεζοειδής γιατί δεν υπήρχαν ακριβέστερα στοιχεία για την κοίτη του ποταμού. Έχοντας τώρα και την καμπύλη επέκτασης μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η παροχή. Οι διαδικασίες αυτές παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

Το πρόβλημα της κατάρτισης καμπυλών στάθμης – παροχής είναι αρκετά σύνθετο, καθώς όπως είδαμε οι καμπύλες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, επιπλέον δεν διαθέτουμε υδρομετρήσεις για όλο το εύρος παροχών του υδατορεύματος. Για να απλοποιηθεί η διαδικασία γίνεται ο χωρισμός των εργασιών στα εξής στάδια:

- Χωρισμός των υδρομετρήσεων σε ομοιογενείς περιόδους
- Εντοπισμός των εξωκείμενων σημείων στάθμης – παροχής
- Χάραξη της καμπύλης στάθμης παροχής για κάθε περίοδο χωριστά
- Εκτίμηση της καμπύλης επέκτασης.

Τα παραπάνω στάδια μπορούν να αυτοματοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Οι Tsakalias & Koutsoyiannis (1999) είχαν κατασκευάσει ένα τέτοιο σύστημα το οποίο πρόκειται να αξιοποιηθεί σε μελλοντική έκδοση του συστήματος του ‘Υδρογνώμονα’. Προς το παρόν εφαρμόζεται μία ημιγραφική μέθοδος για τα δύο πρώτα στάδια (χωρισμός περιόδων – εντοπισμός των εξωκείμενων σημείων) η οποία έχει το πλεονέκτημα της φιλικότητας και του καλού ελέγχου από τον χρήστη.

4.4.3 Κατάρτιση υδρογραφήματος

Με όλα τα παραπάνω στοιχεία μπορούμε εύκολα να δημιουργήσουμε το υδρογράφημα απορροής.

Είναι γνωστό ότι οι καταγίδες προκαλούν πλημμύρες, οπότε θα έχουμε και πλημμυρική απορροή. Η περιγραφή της πλημμυρικής απορροής γίνεται με το υδρογράφημα. Στα μεγαλύτερα ελληνικά ποτάμια ο χρόνος εμφάνισης σημαντικής πλημμυρικής απορροής είναι συνήθως 2 έως 3 ημέρες. Στο ίδιο διάγραμμα με το υδρογράφημα παραθέτουμε συνήθως και το υετόγραμμα για να έχουμε μια εικόνα της σχέσης βροχόπτωσης και απορροής.

5 Ξηρασία

5.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της ξηρασίας απασχολεί το ευρύ κοινό, εδώ και λίγα χρόνια, λόγω του αυξημένου κινδύνου λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας αλλά και σε μεγάλο βαθμό στην υπόλοιπη Ευρώπη.

Είναι γεγονός ότι η ξηρασία είναι ένα ακραίο γεγονός που έχει διάφορες εκφράσεις ανάλογα με την παράμετρο με την οποία αυτή εκφράζεται και ανάλογα με το κλίμα της περιοχής που αναφέρεται. Ουσιαστικά, το κρίσιμο επίπεδο της μεταβλητής με την οποία εκφράζεται η ξηρασία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (Τσακίρης, 1995).

Σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό, ξηρασία για ένα υδατικό σύστημα είναι το φαινόμενο κατά τη διάρκεια εμφάνισης του οποίου το υδατικό σύστημα βρίσκεται κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο σε σχέση με την κανονική του λειτουργία.

Το φαινόμενο της ξηρασίας σε αντίθεση με άλλα ακραία γεγονότα όπως πλημμύρες, καταιγίδες κλπ, έχει συνήθως μεγάλη χρονική διάρκεια.

Ιδιαίτερα το φαινόμενο της ξηρασίας αναγκάζει συνήθως τις κυβερνήσεις να ανακοινώνουν μέτρα για τον περιορισμό της κατανάλωσης αλλά και να αναγγείλουν νέα έργα για την καλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων. Επειδή η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που εντάσσεται στη γενικότερη διακύμανση του κλίματος μιας περιοχής πολλά από τα μέτρα που αναγγέλλονται κατά τη διάρκεια της ξηρασίας ξεχνιούνται μόλις έρθουν οι βροχές.

Μια παρατεταμένη ξηρασία έχει πολλές επιπτώσεις στα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα, στο περιβάλλον και σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Η ανάλυση των επιπτώσεων της ξηρασίας είναι ένα διεπιστημονικό αντικείμενο μεγάλης σπουδαιότητας που ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η επιστημονική προσέγγιση του φαινομένου της ξηρασίας περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες ανάλυσης, που στηρίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και ορισμούς.

Σε κάθε περίπτωση, η προσομοίωση του φαινομένου στο σύνολό του είναι δύσκολο εγχείρημα. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη των ξηρασιών περιλαμβάνει τόσο την ανάλυση συχνοτήτων ελαχίστων τιμών χαρακτηριστικών υδρολογικών μεταβλητών για μεγάλο χρονικό διάστημα (βροχόπτωση, απορροή κλπ.), όσο και τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεικτών που αποτελούν μέτρο ποσοτικής εκτίμησης μιας ξηρασίας (υδατικό έλλειμμα, ελλειμματική επιφάνεια, ένταση κλπ.). Οι δείκτες αυτοί μπορεί να συσχετιστούν με διάφορα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

5.2 Ορισμοί της ξηρασίας

Η ξηρασία αποτελεί ίσως το περισσότερο δύσκολο στην κατανόηση του υδρολογικό φαινόμενο. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που μπορεί να αναλυθεί σε βάθος μόνο με διεπιστημονική προσέγγιση (Τσακίρης, 1995).

Οι πιο γνωστοί ορισμοί της ξηρασίας είναι (Grigg & Vlachos, 1989):

- Μετεωρολογική ξηρασία που είναι μια περίοδος χωρίς αρκετή βροχή.
- Υδρολογική ξηρασία που είναι η περίοδος υδρολογικού ελλείμματος (π.χ. στην απορροή, στην αποθήκευση σε ταμιευτήρες, στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα).
- Γεωργική ξηρασία που εξαρτάται από τα επίπεδα εδαφικής υγρασίας και επάρκειας του νερού για την ανάπτυξη καλλιεργειών.
- Κοινωνικό-οικονομική ξηρασία που αναφέρεται σε ελλείμματα υδατικών πόρων που συνήθως οφείλονται στην υπερκατανάλωση, την ανεπαρκή υποδομή και προετοιμασία και λιγότερο στις μειωμένες βροχοπτώσεις ή στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.

5.2.1 Υδρολογική ξηρασία

Η υδρολογική ξηρασία που επηρεάζει άμεσα τους υδατικούς πόρους και την αξιοποίησή τους δίνει έμφαση στην εμφάνιση χαμηλών παροχών στους επιφανειακούς υδροφορείς (ποταμοί, πηγές, κλπ.). Για τους υπόγειους υδροφορείς χρησιμοποιούνται δείκτες που αναφέρονται στη στάθμη του υπογείου νερού και την ποιότητά του (που σχετίζονται με την ποιότητα του λόγω υπεράντλησης).

Είναι γεγονός ότι οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι είναι οι λιγότερο ανθεκτικοί στην περίπτωση της ξηρασίας ενώ οι επιπτώσεις της ξηρασίας στους υπόγειους υδροφορείς έχουν μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης (Τσακίρης, 1995).

Συνηθίζεται λοιπόν, ως υδρολογική ξηρασία σε μια περιοχή, να χαρακτηρίζεται η κατάσταση που δημιουργείται κατά μια χρονική περίοδο, στην οποία οι τιμές των παροχών των ποταμών στην περιοχή, παίρνουν ακραίες χαμηλές τιμές.

Γενικός ορισμός της υδρολογικής ξηρασίας που να καλύπτει τις ιδιαιτερότητες κάθε τόπου είναι ιδιαίτερα δύσκολο αν όχι αδύνατο να διατυπωθεί. Μπορεί, όμως, να προσδιοριστεί μέσω της στατιστικής ανάλυσης των ελαχίστων παροχών σε συνδυασμό με τους χαρακτηριστικούς δείκτες ξηρασίας για απορροές λεκανών.

5.3 Στατιστική ανάλυση ελαχίστων παροχών

5.3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση συχνότητας της υδρολογικής πληροφορίας συμβάλλει ουσιαστικά στον ορθολογικό σχεδιασμό των έργων που έχουν άμεση ή έμμεση σχέση με το νερό (Τσακίρης, 1995). Παραδείγματα τέτοιων έργων τα οποία πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τη σχέση μεγέθους-συχνότητας εμφάνισης του υδρολογικού φαινομένου είναι, μεταξύ άλλων, οι υπερχειλιστές ασφαλείας φραγμάτων, τα δίκτυα αποχέτευσης όμβριων νερών, τα στραγγιστικά δίκτυα, οι γέφυρες και οι αντιπλημμυρικές κατασκευές.

Η στατιστική ανάλυση της υδρολογικής πληροφορίας συνεισφέρει στο σχεδιασμό υδραυλικών κατασκευών με μικρή επικινδυνότητα αλλά, κυρίως, στον αποδοτικό σχεδιασμό των έργων. Ένας πραγματικά αποδοτικός σχεδιασμός πρέπει να προέρχεται από συνδυασμό ανάλυσης συχνότητας εμφάνισης του υδρολογικού φαινομένου με την οικονομική ανάλυση (ανάλυση κόστους-ωφέλειας) και την ανάλυση των συνολικών επιπτώσεων από την κατασκευή του έργου (περιβαλλοντικών, αισθητικής τοπίου, κλπ).

Η ανάλυση συχνότητας των υδρολογικών φαινομένων προϋποθέτει ότι οι παρατηρήσεις είναι τυχαίες με τη στατιστική έννοια του όρου και ομογενείς, χωρίς δηλαδή να έχει επέλθει καμία μεταβολή κατά τη διάρκεια της περιόδου των παρατηρήσεων.

Η στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών έχει ιδιαίτερο θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον καθώς προσπαθεί να απαντήσει σε ερωτήματα όπως 'ποιές είναι οι τιμές ενός φυσικού μεγέθους που μπορεί να παρατηρηθούν σε βάθος χρόνου'. Όταν διαθέτουμε ένα μοντέλο με μικρό αριθμό παραμέτρων, είναι δυνατό να δοθεί απάντηση μέσω των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος. Συχνά, όμως, τα φυσικά συστήματα είναι πολύπλοκα και έχουν ασαφείς μηχανισμούς οπότε η απάντηση μπορεί να δοθεί μόνο με την στατιστική ανάλυση.

Το πρόβλημα της στατιστικής ανάλυσης έχει τα εξής διακριτά στάδια:

- Εύρεση των τυπικών στατιστικών χαρακτηριστικών του δείγματος, του μέτρου δηλαδή της θέσης (μέσω της μέσης τιμής), της διακύμανσης (μέσω της τυπικής απόκλισης-διακύμανσης ή μεταβλητότητας) καθώς και της μορφής (ασυμμετρία και κύρτωση) της τοποθέτησης των τιμών.
- Χρησιμοποιώντας τα τυπικά χαρακτηριστικά προσαρμόζονται θεωρητικά μοντέλα στατιστικών κατανομών (με προσαρμογή των παραμέτρων των κατανομών). Με αυτά τα μοντέλα, μας δίνεται η δυνατότητα στατιστικής πρόγνωσης πέρα από τα όρια των μετρήσεων καθώς και η πιθανότητα προσαρμογής της θεωρητικής κατανομής σε εμπειρικές κατανομές, εκτέλεση στατιστικών δοκιμών.
- Χρήση των θεωρητικών κατανομών για διαδικασίες στοχαστικής προσομοίωσης (με χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών των συγκεκριμένων κατανομών). Εφαρμογή στην εκτίμηση των διαστημάτων εμπιστοσύνης των συναρτήσεων κατανομής ή στην γένεση συνθετικών χρονοσειρών.

Όσον αφορά την χρήση συγκεκριμένων τύπων κατανομών μπορούμε να ακολουθήσουμε τις παρακάτω κατευθυντήριες γραμμές και στην συνέχεια να γίνουν οι έλεγχοι καταλληλότητας:

- Κανονική κατανομή μπορούμε να εφαρμόζουμε σε μεγέθη που προέρχονται από συνάθροιση (ή μέσες τιμές) πάνω σε ένα διάστημα, όπως, για παράδειγμα, σε ετήσιες βροχοπτώσεις. Η καταλληλότητα σε αυτήν την περίπτωση τεκμηριώνεται μαθηματικά με το κεντρικό οριακό θεώρημα καθώς το άθροισμα των επιμέρους τιμών που ακολουθούν διαφορετικές κατανομές τείνει να περιγραφεί από την κανονική κατανομή. Αφού η κανονική κατανομή επεκτείνεται μέχρι το $-\infty$ θα πρέπει να εξετάζεται το ποσοστό αρνητικών τιμών ώστε η πιθανότητα υπέρβασης της μηδενικής τιμής να είναι μεγάλη (Κουτσογιάννης, 1997). Ειδικά για την κανονική κατανομή ένα κριτήριο για να ικανοποιείται η απαίτηση της κυριαρχίας των θετικών τιμών είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας να είναι $C_{vx} < 0.25$. Αν όμως ισχύει $C_{vx} > 0.50$ τότε πρέπει να απορριφθεί η κανονική κατανομή.
- Κατανομή γάμα (ή Pearson III ή λογαριθμική 2 ή 3 παραμέτρων) εφαρμόζουμε σε μεγέθη που παρουσιάζουν (θετική) ασυμμετρία. Τέτοια είναι για παράδειγμα τα δείγματα που έχουν εποχικότητα (π.χ., χρονοσειρά βροχοπτώσεων συγκεκριμένου μήνα).
- Εκθετική κατανομή για την περιγραφή υδρολογικών μεταβλητών σε μικρή χρονική κλίμακα.

- Κατανομές ακραίων τιμών (AT) ή Log-Pearson III για την περιγραφή ακραίων τιμών σε ένα χρονικό διάστημα όπως χρονοσειρές ετήσιων μεγίστων βροχοπτώσεων ή παροχών.
- AT-3 ή Weibull για την περιγραφή παροχών ξηρασίας.
- Pareto για την περιγραφή μεταβλητών που ξεπερνούν ένα δεδομένο κατώφλι.

Πάντα πρέπει να έχουμε υπόψη το φυσικό μέγεθος που περιγράφει η μεταβλητή και αυτό θα είναι βασικό κριτήριο για να επιλέξουμε τον τύπο της κατανομής. Η προσαρμογή της εμπειρικής κατανομής στην θεωρητική (πόσο, δηλαδή, τα σημεία των μετρήσεων ταιριάζουν στην καμπύλη της κατανομής) δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θεωρείται βασικό κριτήριο. Η προσαρμογή θα χρησιμοποιείται για έλεγχο καταλληλότητας. Άλλωστε, η αστοχία στην προσαρμογή της κατανομής θα παρουσιαστεί στα σημεία της επέκτασης (στατιστική πρόγνωση), στην περιοχή των τιμών δηλαδή για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις.

5.3.2 Χρονοσειρές υδρολογικών φαινομένων

Οι μετρήσεις ενός υδρολογικού φαινομένου διατεταγμένες κατά χρονολογική σειρά αποτελούν μια χρονοσειρά (ή σειρά) του φαινομένου αυτού (Τσακίρης, 1995).

Οι παρατηρήσεις συνεχούς διάρκειας όπως τα ημερήσια ύψη βροχής, οι ημερήσιες παροχές, οι μηνιαίες τιμές της εξατμισοδιαπνοής αποτελούν τις πλήρεις σειρές των αντίστοιχων υδρολογικών μεγεθών. Οι πλήρεις σειρές μπορούν να αναλυθούν είτε στην αρχική τους μορφή ή με την επιλογή ορισμένων μεγεθών που έχουν σχέση με το πρόβλημα που εξετάζεται. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε τις μερικές και τις ετήσιες σειρές. Οι μερικές σειρές αποτελούνται από τιμές πάνω ή κάτω από μια τιμή του υδρολογικού φαινομένου (μερικές σειρές υπερβάσεως ή μη υπερβάσεως αντίστοιχα) που ταιριάζει στο πρόβλημα, ενώ οι ετήσιες σειρές είναι οι σειρές με ετήσιες τιμές ή ετήσιους μέσους όρους ή προκύπτουν από την επιλογή των ετήσιων μεγίστων ή ελαχίστων.

Στις μερικές και τις ετήσιες σειρές θεωρείται ότι επαληθεύεται η συνθήκη της τυχαιότητας των παρατηρήσεων. Ειδικά όμως στην περίπτωση των μερικών σειρών πρέπει να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των παρατηρήσεων.

Αν και οι ετήσιες σειρές περιέχουν συνήθως λιγότερη πληροφορία από ότι γενικά οι μερικές σειρές, χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω της ευκολίας στη χρήση.

5.3.3 Περίοδος επαναφοράς

Περίοδος επαναφοράς δοθέντος ετησίου μεγέθους ενός φαινομένου είναι το μέσο χρονικό διάστημα T (έτη) μέσα στο οποίο το θεωρούμενο υδρολογικό φαινόμενο θα εμφανιστεί μία μόνο φορά με τιμή ίση ή μεγαλύτερη της δοθείσας (Τσακίρης, 1995). Αν η σειρά που εξετάζεται είναι σειρά ετήσιων μεγίστων, η περίοδος επαναφοράς αναφέρεται στο μέγεθος του φαινομένου ως ετήσιο μέγιστο, πράγμα που δεν συμβαίνει αν η σειρά είναι μερική.

Σύμφωνα με τον ορισμό προκειμένου για ανάλυση μεγίστων τιμών ενός φαινομένου:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T} \quad \text{ή} \quad (5.1)$$

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση των σειρών ελαχίστων τιμών ενός φαινομένου ισχύει:

$$P(X \leq x) = \frac{1}{T} \quad \text{ή} \quad (5.3)$$

$$T = \frac{1}{P(X \leq x)} \quad (5.4)$$

Αν και υπάρχει μια μικρή διαφορά στο νόημα της περιόδου επαναφοράς μερικής σειράς (T_p) από την περίοδο επαναφοράς μιας ετήσιας σειράς (T), στην πράξη δεν γίνεται διάκριση μιας που τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν ουσιαστικά για περιόδους μεγαλύτερες των πέντε ετών. Γενικά υπάρχει η ακόλουθη σχέση μεταξύ των δυο περιόδων επαναφοράς:

$$T_p = \frac{1}{\ln T - \ln(T-1)} \quad (5.5)$$

Όπως προκύπτει από τον ορισμό της περιόδου επαναφοράς για τα μέγιστα, η πιθανότητα υπέρβασης σε ένα έτος είναι $\frac{1}{T}$. Αν θεωρήσουμε ότι το γεγονός της υπέρβασης (ή μη υπέρβασης) είναι ανεξάρτητο για κάθε έτος τότε η πιθανότητα μη υπέρβασης του μεγέθους x και στα n έτη ζωής του έργου είναι:

$$P(X \leq x)_n = (P(X \leq x))^n = (1 - P(X > x))^n \quad (5.6)$$

Η πιθανότητα υπέρβασης (έστω και μία φορά) στα n έτη είναι:

$$P(X \geq x)_n = 1 - P(X \leq x)_n = 1 - (1 - P(X > x))^n \quad (5.7)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει και η επόμενη η οποία μας δίνει την περίοδο σχεδιασμού. Περίοδος σχεδιασμού n είναι η περίοδος σε έτη κατά την οποία η πιθανότητα υπέρβασης του μεγέθους x του υδρολογικού φαινομένου (με περίοδο επαναφοράς T) δεν υπερβαίνει τη δοθείσα τιμή πιθανότητας. Η μεταβλητή αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{\log(1 - P(X \geq x)_n)}{\log\left(\frac{T-1}{T}\right)} \quad (5.8)$$

5.3.4 Η χρήση των L-ροπών

Οι τιμές μίας χρονοσειράς αποτελούν δείγμα ενός πληθυσμού. Έτσι, αφού σχηματίσουμε ένα δείγμα x_i από τις n τιμές της χρονοσειράς (δεν λαμβάνονται υπόψη οι ελλείπουσες τιμές) μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών του δείγματος με την μέθοδο των ροπών ή την μέθοδο των L-ροπών, ώστε να είναι δυνατή τελικά η προσαρμογή των θεωρητικών κατανομών στο δείγμα.

Οι L-ροπές είναι μία σειρά παραμέτρων, ανάλογες με τις κλασσικές ροπές, που μπορούν να περιγράψουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος (θέση – μέση τιμή, μεταβλητότητα, ασυμμετρία, κύρτωση κλπ.). Εισήχθησαν από τον Hosking (1990). Παράγονται από γραμμικούς συνδυασμούς των τιμών ενός ταξινομημένου δείγματος (από αυτό το γεγονός προέρχεται και ο χαρακτηρισμός L, δηλαδή Linear - γραμμικές).

Από την εφαρμογή της μεθόδου των L-ροπών για την περιγραφή των στατιστικών χαρακτηριστικών ενός δείγματος καθώς και την εκτίμηση των παραμέτρων κατανομών προκύπτουν μία σειρά από πλεονεκτήματα όπως:

- Καλύτερη προσαρμογή των κατανομών ακροτάτων (π.χ. AT-1, AT-2, AT-3, GEV) στο δείγμα
- Μικρή ευαισθησία σε εξωκείμενες τιμές (outliers values)
- Απλή υπολογιστική διαδικασία στην εξαγωγή παραμέτρων κατανομών.

Από τα παραπάνω φαίνεται πως πλεονεκτεί ιδιαίτερα η χρήση τους στις κατανομές AT, διότι μεταξύ άλλων η εφαρμογή των κλασικών ροπών σε αυτές τις κατανομές απαιτεί προσεγγιστικές ή αριθμητικές λύσεις.

Οι L-ροπές θα συμβολίζονται με το ελληνικό γράμμα λ και έναν δείκτη 1, 2, 3, ... Η λ_1 σχετίζεται με την παράμετρο θέσης και ταυτίζεται με την κλασική μέση τιμή (ροπή πρώτης τάξης). Η λ_2 σχετίζεται με την μεταβλητότητα, η λ_3 με την ασυμμετρία και η λ_4 με την κύρτωση. Εφόσον οι L-ροπές είναι γραμμικοί συνδυασμοί των τιμών του δείγματος, η διάστασή τους είναι η ίδια με αυτή του φυσικού μεγέθους του οποίου αντιπροσωπεύουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του. Ωστόσο, μπορούμε να ορίσουμε τους εξής αδιάστατους συντελεστές:

- Συντελεστής μεταβλητότητας:

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (5.9)$$

- Συντελεστής ασυμμετρίας:

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (5.10)$$

- Συντελεστής κύρτωσης:

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \quad (5.11)$$

5.3.5 Οι εμπειρικές συναρτήσεις κατανομής

Οι εμπειρικές συναρτήσεις κατανομής μας δίνουν τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε την συνάρτηση κατανομής (πιθανότητα μη υπέρβασης) για κάθε τιμή του δείγματος χωρίς την χρήση κάποιου θεωρητικού μοντέλου. Μέσω της εκτίμησής της, έχουμε στη συνέχεια τη δυνατότητα ελέγχου της προσαρμογής κάποιας θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στο δείγμα.

Το λογισμικό «Υδρογνώμων» παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης των εμπειρικών κατανομών κατά Weibull, Blom, Cunnane και Gringorten (Κοζάνης κ.ά., 2005). Η εμπειρική κατανομή που είναι καταρχήν ενεργοποιημένη είναι αυτή του Weibull, η οποία έχει την απλούστερη σχέση και είναι γνωστή στην βιβλιογραφία ως αμερόληπτη ως προς την πιθανότητα υπέρβασης θέσης σχεδίασης.

Αν $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ οι τιμές του δείγματος, ορίζουμε μια ακολουθία που προκύπτει αν ταξινομηθεί το δείγμα σε αύξουσα αριθμητική σειρά τέτοια ώστε: $X_{(1)}, X_{(2)}, X_{(3)}, \dots, X_{(n)}$ και $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq X_{(3)} \leq \dots \leq X_{(n)}$.

Τότε η πιθανότητα μη υπέρβασης (συνάρτηση κατανομής) για κάθε τιμή $X_{(i)}$ μπορεί να εκφραστεί με μία συνάρτηση f της μορφής:

$$F(X_{(i)}) = q_i = f(i, n) \quad (5.12)$$

όπου i είναι η σειρά της τιμής $X_{(i)}$ στο διατεταγμένο δείγμα και n το μέγεθος του δείγματος ($i=1\dots n$). Οι σχέσεις των εμπειρικών συναρτήσεων κατανομής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: Σχέσεις των εμπειρικών συναρτήσεων κατανομής

Όνομα κατανομής	Σχέση $q_i =$
Weibull	$\frac{i}{n+1}$
Blom	$1 - \frac{(n-i+1) - 0.375}{n+0.25}$
Cunnane	$1 - \frac{(n-i+1) - 0.4}{n+0.2}$
Gringorten	$1 - \frac{(n-i+1) - 0.44}{n+0.12}$

5.3.6 Δείκτες ξηρασίας από την ανάλυση συχνότητας ελαχίστων

Από μια χρονοσειρά ανεξαρτήτων και τυχαίων παροχών μπορεί να προκύψει η συχνότητα υπέρβασης και από αυτή η πιθανότητα υπέρβασης, $P(X \geq x)$, της τιμής x από την τυχαία μεταβλητή X . Για τον σκοπό αυτό συντάσσεται πίνακας με τα γεγονότα διατεταγμένα κατά φθίνουσα τάξη από πλευράς μεγέθους (Τσακίρης, 1995).

Ειδικότερα με τη χρήση των θεωρητικών κατανομών πιθανότητας επιτυγχάνεται η σύνδεση των μεγεθών (στην περίπτωση αυτή των χαμηλών παροχών) με τις αθροιστικές πιθανότητες και την περίοδο επαναφοράς. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται και η επέκταση της πληροφορίας και για πιο σπάνια γεγονότα από αυτά που περιέχει το δείγμα των παρατηρήσεων.

Γενικότερα, για την κατηγορία αυτή των Δεικτών ξηρασίας ακολουθούνται οι παρακάτω τρεις μέθοδοι:

- i. Γνωστές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας τις οποίες δεχόμαστε ότι ακολουθούν οι μετρήσεις. Όταν οι παράμετροι μιας τέτοιας συνάρτησης κατανομής που εκλέχτηκε προσδιοριστούν από τις υπάρχουσες μετρήσεις τότε ο προσδιορισμός της τιμής του υδρολογικού φαινομένου ακόμη και για μεγάλες περιόδους επαναφοράς είναι δυνατός με τη χρησιμοποίηση της θεωρητικής κατανομής την οποία ακολουθούν οι μετρήσεις.
- ii. Μέσω συσχέτισης προς παρατηρήσεις γειτονικών λεκανών απορροής, με παρόμοια υδρολογικά χαρακτηριστικά για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις μεγαλύτερου μήκους ή συσχετίσεις μεταξύ βροχοπτώσεων και απορροών όπου κατά κανόνα οι παρατηρήσεις βροχοπτώσεων είναι μεγαλύτερου μήκους.
- iii. Παραγωγή συνθετικών δεδομένων με μαθηματική προσομοίωση χρησιμοποιώντας κατάλληλα στοχαστικά μοντέλα και τεχνικές. Έτσι, το μήκος των διαθέσιμων παρατηρήσεων εμπλουτίζεται σε βαθμό που οι προβλέψεις για μεγάλες περιόδους επαναφοράς να είναι περισσότερο αξιόπιστες.

Οι κατανομές που συνήθως χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της διαθέσιμης χρονοσειράς είναι πολλές. Εδώ, παρουσιάζεται μόνον η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου III γνωστή ως Weibull που χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη στατιστική ανάλυση ελαχίστων.

Η Κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου III (Weibull)

Η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου III εφαρμόζεται για ανάλυση ελαχίστων τιμών στις οποίες υπάρχει όριο προς την κατεύθυνση των ακραίων τιμών (ελαχίστων). Το όριο αυτό προκειμένου για παροχές είναι το μηδέν (Τσακίρης, 1995).

Η κατανομή Ακραίων Τιμών τύπου III με κάτω όριο το 0 είναι διπαραμετρική.

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας είναι

$$p(x) = \kappa x^{\kappa-1} \lambda^{-\kappa} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\kappa\right] \quad (5.13)$$

Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας είναι

$$P(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\kappa\right] \quad (5.14)$$

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων κ και λ ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφεται πολύ συνοπτικά πιο κάτω.

Εφαρμόζεται μέθοδος σύμφωνα με τη οποία (Shaw, 1983), απαιτούνται η μέση τιμή \bar{x} του δείγματος των ετησίων ελαχίστων τιμών και η τυπική απόκλιση σ του δείγματος. Ο λόγος $\frac{\bar{x}}{\sigma}$ είναι συνάρτηση της παραμέτρου κ . Από πίνακα που δίνει την τιμή του $\frac{1}{\kappa}$ ως συνάρτηση του λόγου $\frac{\bar{x}}{\sigma}$ προσδιορίζεται η παράμετρος κ . Η τιμή της παραμέτρου λ δίνεται από της εξίσωση

$$\lambda = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\kappa}\right)} \quad (5.15)$$

Όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση γάμμα που δίνεται από πίνακες μαθηματικών εγχειριδίων.

Πιο αναλυτικά, η κατανομή αυτή ανήκει στην οικογένεια των ασυμπτωτικών κατανομών ακροτάτων. Έχει δύο παραμέτρους και αυτές είναι οι παράμετροι σχήματος και κλίμακας που συμβολίζονται με κ και λ αντίστοιχα. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να προσδιοριστούν είτε με τη μέθοδο των ροπών, είτε με τη μέθοδο των L-ροπών. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το κατώτατο όριο τυχαίας μεταβλητής της κατανομής Weibull είναι το μηδέν και ανώτατο το ∞ .

Η κατανομή Weibull με παραμέτρους σχήματος κ και κλίμακας λ δίνεται από την σχέση:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\kappa} \quad (5.16)$$

Η δε αντίστροφη συνάρτηση κατανομής δίνεται από τη σχέση:

$$x(u) = \frac{\lambda}{\kappa} \left[-\ln(1-u)\right]^\kappa \quad (5.17)$$

Εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull με τη μέθοδο των ροπών

Η σχέση που συνδέει την παράμετρο σχήματος της AT-3 ελαχίστων με τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος είναι της μορφής:

$$\frac{\Gamma(1+2\kappa)}{\Gamma^2(1+\kappa)} = \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \quad (5.18)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης ως προς κ γίνεται με αριθμητική μέθοδο. Εφόσον έχουμε λύση για την κ , η παράμετρος κλίμακας λ μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\lambda = m \frac{\kappa}{\Gamma(1+\kappa)} \quad (5.19)$$

Για την επίλυση ως προς κ ακολουθούμε την εξής στρατηγική: Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της συνάρτησης Γ : $\Gamma(\alpha+1) = \alpha\Gamma(\alpha)$, η πιο πάνω σχέση μετασχηματίζεται σε:

$$\frac{2\kappa\Gamma(2\kappa)}{\Gamma^2(1+\kappa)} = \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \quad (5.20)$$

Και λύνοντας ως προς κ λαμβάνουμε την εξής πεπλεγμένη εξίσωση:

$$\kappa = \frac{\Gamma^2(1+\kappa)}{2\Gamma(2\kappa)} \left(\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + 1 \right) \quad (5.21)$$

Η τελευταία σχέση μπορεί να λυθεί με διαδοχικές επαναλήψεις θέτοντας μία αρχική τιμή στο κ του δεξιού σκέλους και κάθε νέα τιμή που προκύπτει στο αριστερό σκέλος. Τελικά η σχέση αυτή συγκλίνει προς την τελική τιμή του κ . Αν κ_i η τρέχουσα τιμή του κ στον i κύκλο υπολογισμού και κ_{i+1} η νέα τιμή που προκύπτει από το δεξί σκέλος της εξίσωσης η ταχύτητα σύγκλισης αυξάνεται σημαντικά αν χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω μετασχηματισμός:

$$\kappa_{i+1} = \frac{1}{2}(3\kappa_i - \kappa_{i+1}) \quad (5.22)$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, «εξομαλύνονται» οι διακυμάνσεις της ακολουθίας και συγκλίνει γρηγορότερα. Στην συνέχεια γίνεται ο εξής έλεγχος και μετασχηματισμός ώστε να μην έχουμε απόκλιση σε περίπτωση αρνητικών τιμών του κ :

$$\kappa_{i+1} < 0 \Rightarrow \kappa_{i+1} = \frac{\kappa_i}{2} \quad (5.23)$$

Η σύγκλιση επιτυγχάνεται μόλις ικανοποιηθεί κάποιο από τα παρακάτω κριτήρια σύγκλισης:

$$\left| \frac{\kappa_{i+1} - \kappa_i}{\kappa_{i+1}\kappa_i} \right| \leq \varepsilon \quad (5.24)$$

$$i \geq i_{\max} \quad (5.25)$$

όπου για τον «Υδρογνώμων» υιοθετούμε $i_{\max} = 100$ και $\varepsilon = 0.001$.

Εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull με τη μέθοδο των L-ροπών

Όπως αναφέρθηκε, η εκτίμηση με την μέθοδο των L-ροπών γίνεται μέσω απλών σχετικά σχέσεων που έχουν κλειστή μορφή. Υπενθυμίζουμε πως η λ_1 ταυτίζεται με την μέση τιμή, η λ_2 σχετίζεται με την διασπορά του δείγματος ενώ η λ_3 με την ασυμμετρία. Συνεπώς, η λ_1 και η

λ_2 υπεισέρχονται πάντα (όπως συμβαίνει με τις μ_x, σ_x στη μέθοδο των ροπών) ενώ η λ_3 συσχετίζεται με την παράμετρο σχήματος (κ συνήθως) όταν η κατανομή προβλέπει τρεις παραμέτρους.

Αρχικά υπολογίζουμε τον συντελεστή μεταβλητότητας τ_2 καθώς και τον συντελεστή ασυμμετρίας τ_3 ως:

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (5.26)$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (5.27)$$

Έπειτα υπολογίζουμε τις παραμέτρους της κατανομής ως εξής:

$$\kappa = \frac{-\ln(1-\tau_2)}{\ln 2} \quad (5.28)$$

$$\lambda = \lambda_1 \frac{\kappa}{\Gamma(1+\kappa)} \quad (5.29)$$

5.3.7 Έλεγχος καταλληλότητας της θεωρητικής κατανομής πιθανότητας

Η σωστή χρήση των κατανομών προϋποθέτει την επιλογή της θεωρητικής κατανομής πιθανότητας που προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δεδομένα του δείγματος. Υπάρχουν δυο πρακτικοί τρόποι επιλογής της κατανομής πιθανότητας:

1. Με τη χρησιμοποίηση του χαρτιού πιθανότητας της αντίστοιχης θεωρητικής κατανομής.
2. Με τη σύγκριση μεταξύ ιστογράμματος σχετικών συχνοτήτων και θεωρητικής καμπύλης πυκνότητας-πιθανότητας.

Η ικανότητα των σημείων που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις να παρασταθούν ικανοποιητικά με μια ευθεία γραμμή εξετάζεται με το χαρτί πιθανότητας.

Και οι δυο αυτοί τρόποι που προαναφέρθηκαν είναι εμπειρικοί και ο έλεγχος που γίνεται με αυτούς είναι υποκειμενικός. Περισσότερο αξιόπιστοι στατιστικοί έλεγχοι είναι οι έλεγχοι χ^2 και Kolmogorov-Smirnov οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

6 Λεκάνη απορροής και δεδομένα

6.1 Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας

Το υδατικό διαμέρισμα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα της χώρας. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει κατά καιρούς, η συνολική επιφάνεια του διαμερίσματος αυτού ανέρχεται σε 10100 km². Οι κυριότερες υδρολογικές λεκάνες του υπόψη υδατικού διαμερίσματος είναι αυτές του Αχελώου, του Ευήνου, του Μόρνου, του Ξηροπόταμου, του Αράπη, της λίμνης Αμβρακίας και της νήσου Λευκάδας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Αχελώου και πιο συγκεκριμένα η υπολεκάνη του παραποτάμου του Αγραφιώτη που βρίσκεται στην περιοχή των Αγράφων.

Τα Άγραφα είναι οροσειρά της κεντρικής Ελλάδας, η νότια απόληξη της Πίνδου. Γεωγραφικά σαν περιοχή τα Άγραφα ορίζονται στα βόρεια από το νομό των Τρικάλων, στα νότια από τις επαρχίες της Τριχωνίδας και της Φθιώτιδας, καθώς και από την περιοχή του Καρπενησιού. Στα ανατολικά, τα Άγραφα ορίζονται από την πεδιάδα της Καρδίτσας και από την επαρχία του Δομοκού. Καταλαμβάνουν όλο το βόρειο τμήμα του νομού Ευρυτανίας και το δυτικό του νομού Καρδίτσας και χωρίζονται σε Θεσσαλικά Άγραφα και Ευρυτανικά Άγραφα. Στην περιοχή των Θεσσαλικών Αγράφων βρίσκεται και η λίμνη Πλαστήρα. Το έδαφος δεν έχει αλλάξει από την αρχαιότητα επειδή δεν έχει υποστεί ιδιαίτερες επεμβάσεις. Η φύση των Αγράφων έχει χαρακτηριστεί ως μία από τις πλέον καθαρές περιοχές στον πλανήτη. Η ψηλότερη κορυφή τους είναι η Καράβα με υψόμετρο 2.184 μέτρα. Συνολικά τα Άγραφα έχουν 7 κορυφές με υψόμετρο πάνω από 2.000 μέτρα. Αυτές είναι:

- Καράβα 2.184 m
- Ντελιδίμι 2.163 m
- Βουτσικάκι 2.154 m
- Φτέρη 2.128 m
- Λιάκουρα 2.043 m
- Μαράθια 2.042 m
- Καλόβια 2.018 m

Επίσης, έχουν πολλές άλλες με υψόμετρο πάνω από 1.900 μέτρα. Τα βουνά των Αγράφων είναι κατάφυτα. Σε μεγάλο υψόμετρο κυριαρχεί το έλατο. Από τα Άγραφα πηγάζουν οι ποταμοί Ταυρωπός και Αγραφιώτης.

6.2 Λεκάνη Αχελώου

Η λεκάνη απορροής του Αχελώου βρίσκεται στη Δυτική Στερεά Ελλάδα και έχει συνολική έκταση 4770 km² με μέγιστο υψόμετρο 2469 m. Γειτονεύει βόρεια και δυτικά με τις λεκάνες του ποταμού Αράχθου και της λίμνης Αμβρακίας και ανατολικά με τις λεκάνες των ποταμών

Πηνειού, Σπερχειού και Ευήνου. Ο υδροκρίτης της λεκάνης ακολουθεί στα δυτικά τις κορυφογραμμές των οροσειρών Θυάμου, Μακρύ, Βάλτου και Αθαμανίων, στα βορειοδυτικά αυτές του όρους Λάκμος και τέλος στα ανατολικά τις κορυφογραμμές της νότιας Πίνδου, του Τυμφρηστού, της Οξυάς και του Παναιτωλικού. Ο ποταμός αυτός ονομάζεται και Ασπροπόταμος επειδή η τυρβώδης ροή του νερού δημιουργούσε άσπρους αφρούς ή κατ' άλλους επειδή η κοίτη του σε ορισμένα σημεία παρουσιάζεται άσπρη.

Είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος ποταμός της Ελλάδας, μετά τον Αλιάκμονα, και πηγάζει από το όρος Λάκμος της οροσειράς της Πίνδου στην περιοχή του Μετσόβου. Η διαδρομή του είναι εξ ολοκλήρου σε ελληνικό έδαφος. Αρχικά, ρέει στα δυτικά της Θεσσαλίας με κατεύθυνση προς το νότο και στη συνέχεια εισέρχεται στη Στερεά Ελλάδα και διαγράφει, για αρκετό διάστημα, τα σύνορα Ευρυτανίας και Αιτωλοακαρνανίας. Στην περιοχή αυτή εμπλουτίζεται με νερά της Πίνδου από τους διάφορους παραποτάμους του, κυριότεροι των οποίων είναι ο Αγραφιώτης, ο Μέγδοβας και ο Τρικεριώτης. Συνεχίζοντας την πορεία του συναντά τους παραποτάμους Μπιζάκο ή Ίναχο μεταξύ των ορεινών όγκων του Βάλτου και του Μακρυνόρους και στη συνέχεια το Μεγάλο ρέμα και το Ρύακα. Στο ύψος του Αγρινίου σχηματίζει ένα διπλό μαιανδρισμό και στρέφεται δυτικά προς την Αιτωλική λεκάνη. Από το σημείο αυτό ακολουθεί πάλι νότια κατεύθυνση και εμπλουτίζεται με τα πλεονάζουσα νερά των λιμνών Οζερού, Λυσιμαχείας και Τριχωνίδας. Στη συνέχεια, ρέοντας μέσα από μια πλατιά πλέον κοίτη, στρέφεται δυτικά στην περιοχή του Νεοχωρίου και τελικά εκβάλλει στο Ιόνιο πέλαγος, νότια των Εχινάδων νήσων.

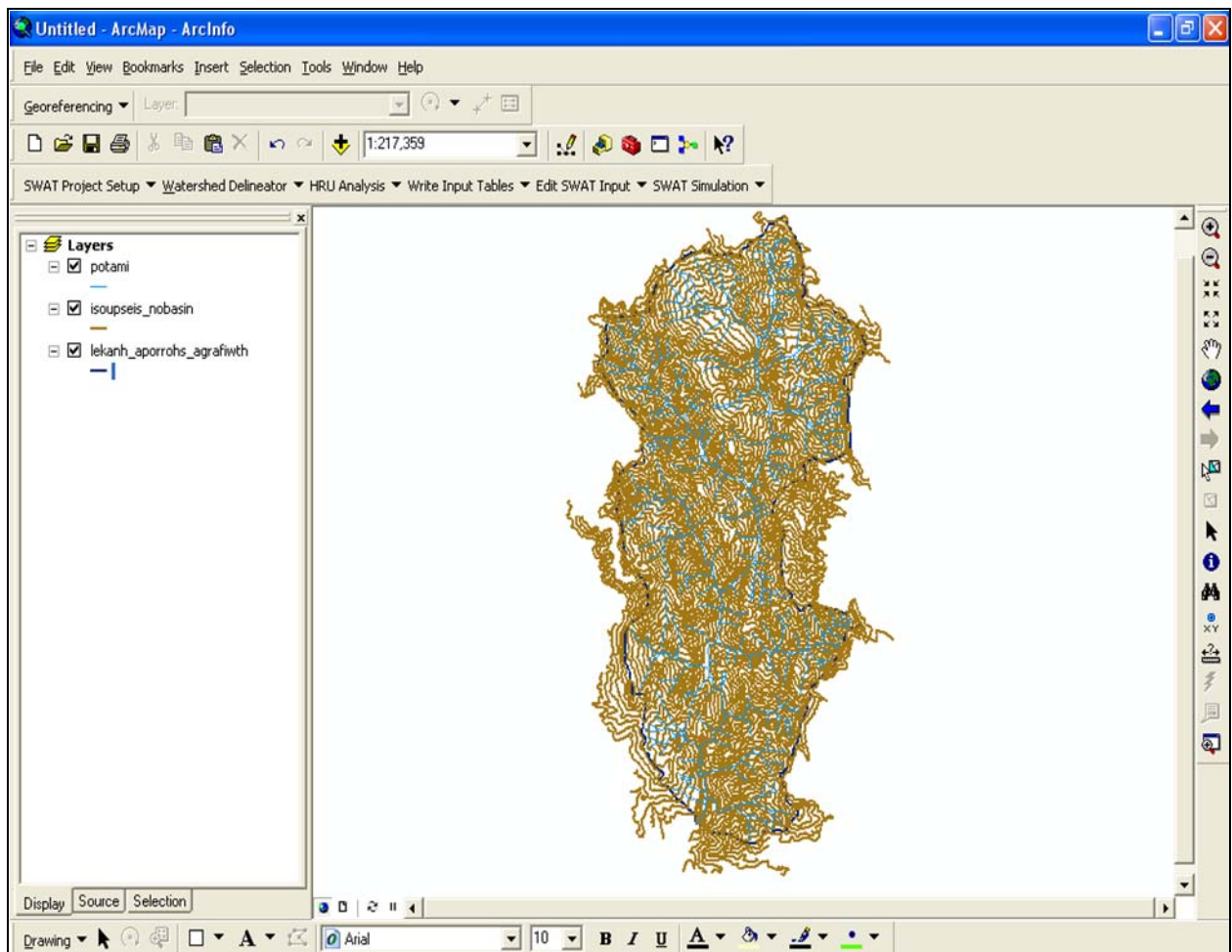
6.3 Λεκάνη Αγραφιώτη

Ο ποταμός Αγραφιώτης ή Αγραφιωτικός είναι από τους σημαντικότερους παραποτάμους του Αχελώου. Βρίσκεται στην περιοχή της Ευρυτανίας και πηγάζει από τη νότια Πίνδο. Στη διαδρομή του, περνάει από τα χωριά Βραγγιανά και Τροβάτο καθώς και μέσα από τα Άγραφα όπου και τα χωρίζει σε Δυτικά και Ανατολικά για να καταλήξει στο χωριό Τριπόταμο όπου και ενώνεται σήμερα με τη λίμνη Κρεμαστών. Έχει μήκος περίπου 60 km και η λεκάνη απορροής του ανέρχεται στα 217.648 km². Ως έξοδος της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη θεωρείται η Γέφυρα Βαρβαριάδος όπου υπάρχει και υδρομετρικός σταθμός.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 13 έως 14°C και το θερμοκρασιακό εύρος φτάνει μέχρι και τους 35°C με αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες την περίοδο του Δεκεμβρίου του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου.

Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη ανέρχεται στα 1771 mm με το μέσο ύψος των κατακρημνίσεων να αυξάνεται με το υψόμετρο των σταθμών. Οι μήνες με τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις είναι από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο ενώ οι χαμηλότερες παρουσιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες.

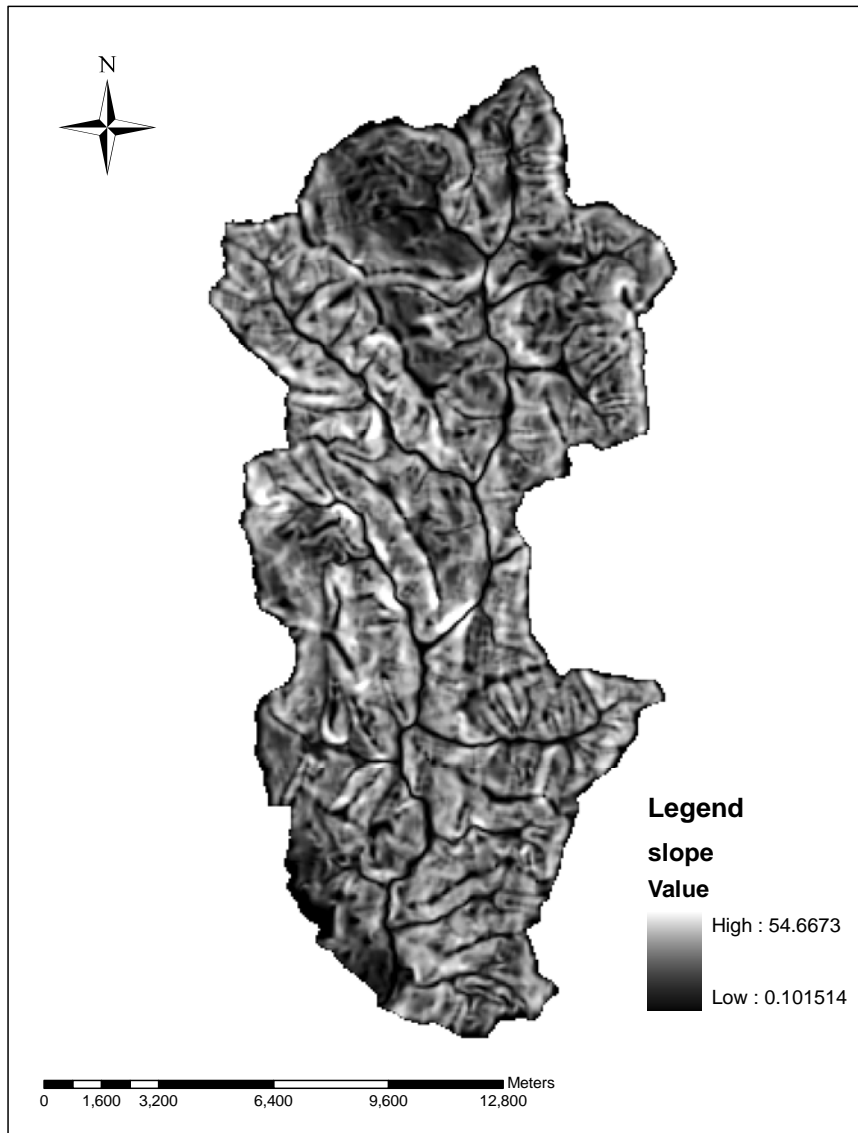
Η λεκάνη απορροής, όπως ακριβώς ψηφιοποιήθηκε από τους χάρτες της Γ.Υ.Σ με διαδικασία που παρουσιάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 6.1: Η λεκάνη απορροής του ποταμού όπως προέκυψε από την ψηφιοποίηση των χαρτών της ΓΥΣ

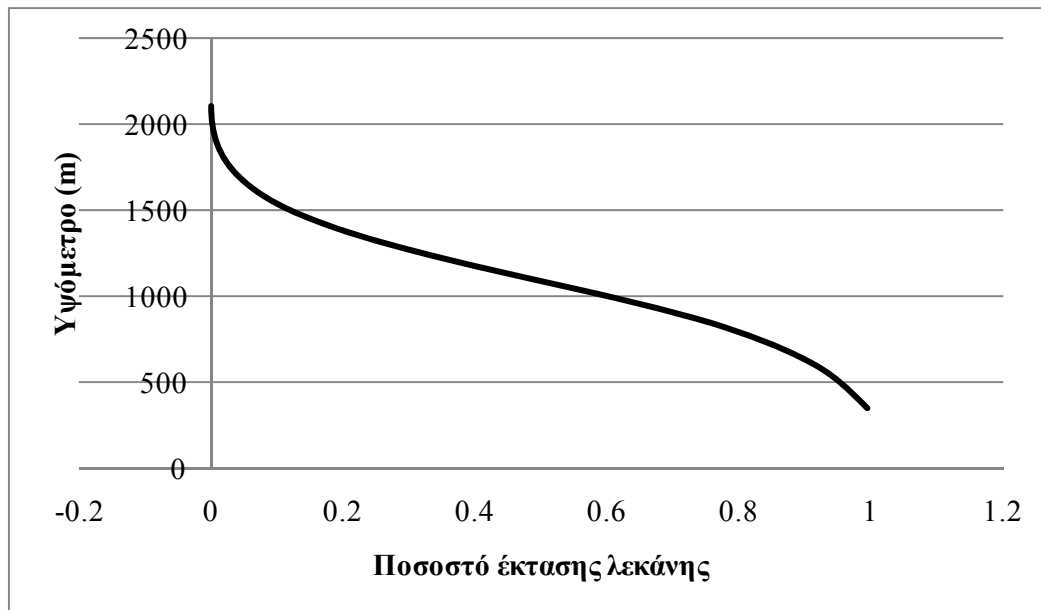
6.4 Γεωγραφικά δεδομένα

Με την εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο προέκυψε τελικά το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Ένας τρόπος απεικόνισής του είναι ο παρακάτω.



Σχήμα 6.2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

Το μέγεθος της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Αγραφιώτη με σημείο εξόδου την προεπιλεγθείσα θέση κοντά στο χωριό Γέφυρα Βαρβαριάδος, υπολογίστηκε στα 217.638 km². Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη προέκυψε 1137.96 m. Στη συνέχεια φαίνεται η υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη:



Σχήμα 6.3: Υψογραφική καμπύλη λεκάνης Αγραφιώτη στη Γέφυρα Βαρβαριάδας.

Παρατηρώντας την παραπάνω καμπύλη διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

- Το ελάχιστο υψόμετρο είναι 320 m
- Το μέγιστο υψόμετρο είναι 2100 m
- Το διάμεσο υψόμετρο είναι 1097 m

6.5 Υδρολογικά δεδομένα

6.5.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν οι μετρήσεις των κατακρημνισμάτων και ιδιαίτερα της βροχόπτωσης στην υπό μελέτη περιοχή.

Για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, και, συγκεκριμένα, της βροχόπτωσης, συλλέχθηκαν πρωτογενή δεδομένα καταγραφής τους από διάφορους βροχομετρικούς σταθμούς. Με βάση ορισμένα κριτήρια (κατανομή των σταθμών στη υπό μελέτη περιοχή και την αξιοπιστία των διατιθέμενων δεδομένων), επιλέχθηκαν οι βροχομετρικοί σταθμοί που κρίθηκαν ως οι πλέον αξιόπιστοι της περιοχής που μελετάται. Οι βροχομετρικοί σταθμοί οι οποίοι επιλέχθηκαν τελικά είναι οι εξής:

- i. Βροχομετρικός σταθμός Μαυρομάτα
- ii. Βροχομετρικός σταθμός Μοναστηράκι
- iii. Βροχομετρικός σταθμός Τέμπλα
- iv. Βροχομετρικός σταθμός Τριπόταμος
- v. Βροχομετρικός σταθμός Τροβάτο
- vi. Βροχομετρικός σταθμός Φουσιανά
- vii. Βροχομετρικός σταθμός Μ.Βραγγιανά

Χαρακτηριστικά των σταθμών αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

Πινάκας 6.1: Βροχομετρικοί σταθμοί

ΚΩΔΙΚΟΣ				ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΝΟΜΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΦΟΡΕΑΣ
ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	Α/Α ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	ΜΗΚΟΣ			ΠΛΑΤΟΣ			
04	11	023	ΤΕΜΠΛΑ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 26'	39° 06'	306	ΔΕΗ	
04	11	037	ΦΟΥΣΙΑΝΑ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 31'	39° 10'	950	ΔΕΗ	
04	11	039	Μ.ΒΡΑΓΓΙΑΝΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	21° 27'	39° 14'	580	ΔΕΗ	
04	12	014	ΜΑΥΡΟΜΑΤΑ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 44'	39° 04'	900	ΔΕΗ	
04	16	005	ΤΡΙΠΟΤΑΜΟΣ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 32'	38° 57'	650	ΔΕΗ	
04	16	002	ΤΡΟΒΑΤΟ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 36'	39° 13'	1060	ΔΕΗ	
04	16	004	ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	21° 35'	39° 25'	660	ΔΕΗ	

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε ο υδρομετρικός σταθμός που βρίσκεται στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας. Ο σταθμός αυτός ανήκει στη ΔΕΗ και είναι εξοπλισμένος με δύο σταθμήμετρα το ένα στη δεξιά και το άλλο στην αριστερή όχθη. Παρ' όλ' αυτά όμως η θέση του σταθμού δεν είναι πολύ κατάλληλη γιατί υπάρχει νησίδα που χωρίζει τη ροή σε δύο κλάδους που βρίσκονται σε διαφορετικό ύψος. Έτσι, για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης - παροχής χρησιμοποιήθηκε μόνο το σταθμήμετρο Νο 1, αφού μόνο γι' αυτό έχουμε μετρήσεις από το 1966 και μετά και η θέση του διαφέρει από αυτή του σταθμήμετρου Νο 2.

Στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη επιλέχτηκαν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σταθμοί σύμφωνα με την επιρροή που αυτοί ασκούν στα πολύγωνα Thiessen:

1. Σταθμός Μαυρομάτας
2. Σταθμός Μοναστηρακίου
3. Σταθμός Τριποτάμου
4. Σταθμός Τροβάτου
5. Σταθμός Φουσιανών
6. Σταθμός Βραγγιανών
7. Σταθμός Τέμπλων

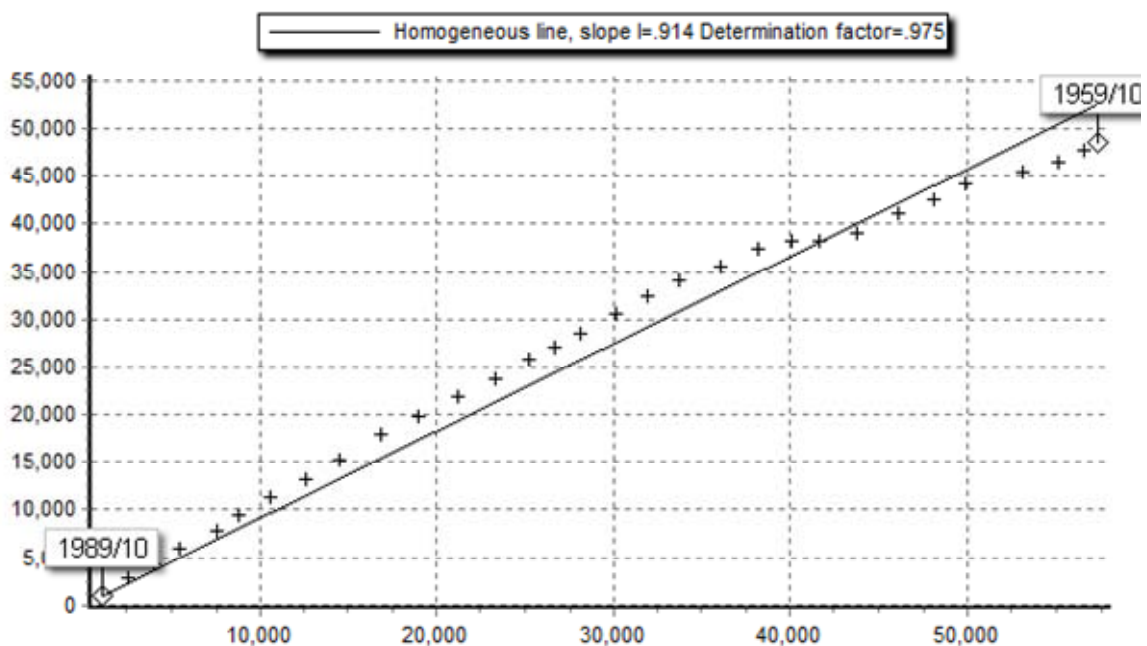
Για τους σταθμούς αυτούς υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο και έτσι προέκυψε ο παρακάτω πίνακας.

Πινάκας 6.2: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης

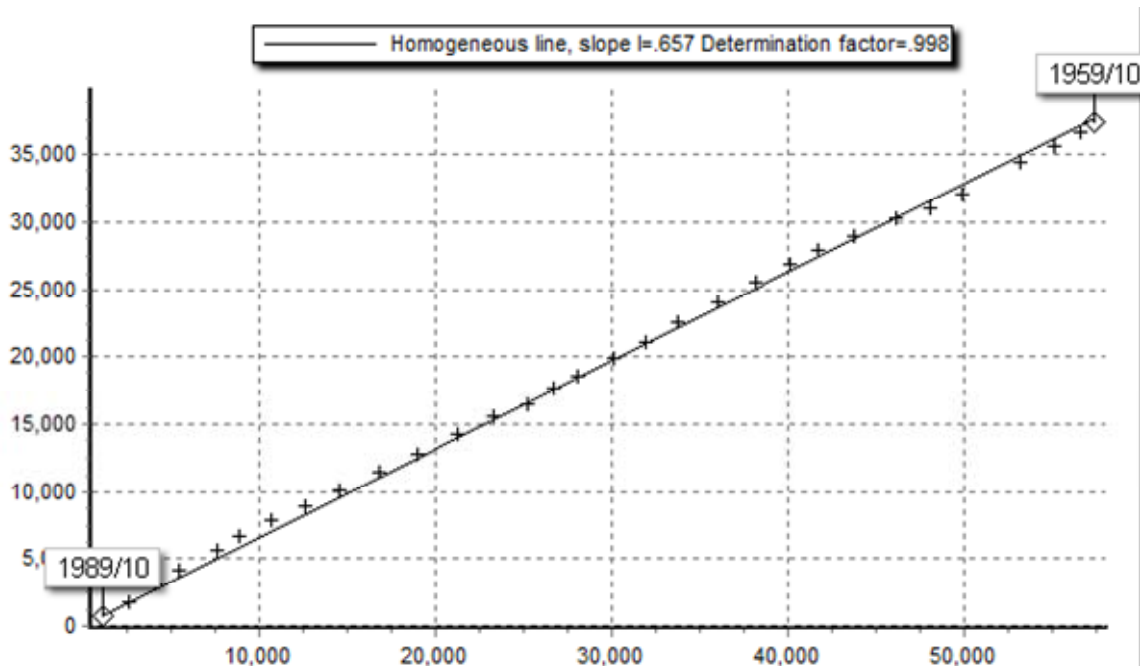
	Μαυρομάτα	Μοναστηράκι	Τριποτάμος	Τροβάτο	Φουσιανά	Βαγγιανά	Τέμπλα
Μαυρομάτα	1	0.8319	0.7800	0.4683	0.7372	0.8106	0.6201
Μοναστηράκι	0.8319	1	0.9190	0.3433	0.8095	0.8319	0.8689
Τριποτάμος	0.7800	0.9190	1	0.3097	0.7975	0.8014	0.8233

	Μαυρομάτα	Μοναστηράκι	Τριπόταμος	Τροβάτο	Φουσιανά	Βραγγιανά	Τέμπλα
Τροβάτο	0.4683	0.3433	0.3097	1	0.2433	0.4095	0.1263
Φουσιανά	0.7372	0.8095	0.7975	0.2433	1	0.8268	0.7769
Βραγγιανά	0.8106	0.8319	0.8014	0.4095	0.8268	1	0.6992
Τέμπλα	0.6201	0.8689	0.8233	0.1263	0.7769	0.6992	1
Μαυρομάτα	1	0.8319	0.7800	0.4683	0.7372	0.8106	0.6201

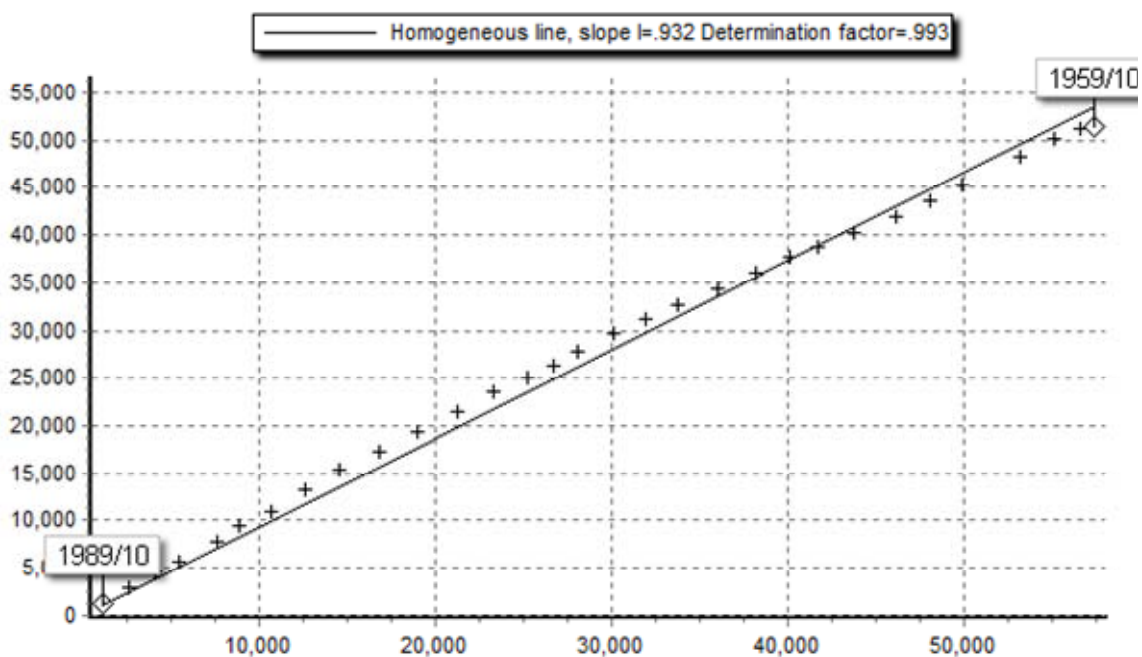
Για τον έλεγχο της ομογένειας των δεδομένων ως σταθμός βάσης επιλέχθηκε αυτός του Μοναστηρακίου γιατί εκτός από τον υψηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που έχει με τους υπόλοιπους σταθμούς έχει και μεγάλη επιρροή στη λεκάνη απορροής σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen. Έτσι, προχωρήσαμε στην κατάρτιση των Διπλών Αθροιστικών Καμπυλών με τη βοήθεια του προγράμματος «Υδρογνώμων» και συγκεκριμένα της εντολής Hydrology → Double mass curve. Ορισμένες από αυτές παρουσιάζονται ενδεικτικά παρακάτω:



Σχήμα 6.4: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μοναστηράκι και ελεγχόμενο σταθμό το Τροβάτο (συντελεστής $R^2 = 0.975$, κλίση ευθείας = 0.914)



Σχήμα 6.5: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μοναστηράκι και ελεγχόμενο σταθμό τα Φουσιανά (συντελεστής $R^2 = 0.998$, κλίση ευθείας = 0.657)



Σχήμα 6.6: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Μοναστηράκι και ελεγχόμενο σταθμό τη Μαυρομάτα (συντελεστής $R^2 = 0.993$, κλίση ευθείας = 0.932)

Οι συντελεστές R^2 που υπολογίστηκαν παραπάνω φανερώνουν ότι τα δεδομένα είναι ομογενή οπότε δε χρειάζονται περαιτέρω διαδικασίες διόρθωσης ώστε να επέλθει η ομογένεια.

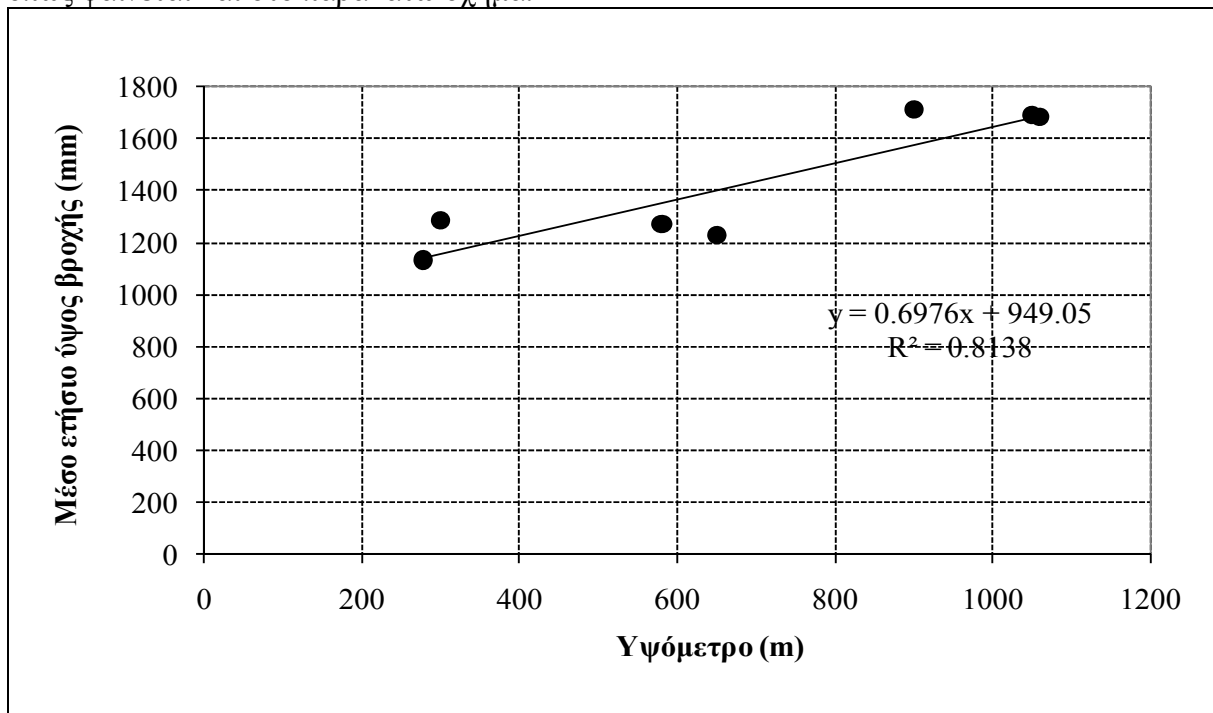
Στο παράρτημα φαίνονται δοκιμές με τη χρήση και άλλων σταθμών ως σταθμούς βάσης.

Όλες οι τιμές που έλειπαν συμπληρώθηκαν με τρόπο που παρουσιάζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο και κάθε φορά επιλέγονταν οι καλύτεροι συσχετιζόμενοι σταθμοί μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις που έλειπαν δεδομένα από δύο σταθμούς ταυτόχρονα επιλέχτηκε ο αμέσως

επόμενος καλύτερα συσχετιζόμενος σταθμός για τη συμπλήρωση της μιας ελλειπούσης τιμής, ενώ η άλλη του δεύτερου σταθμού χωρίς δεδομένο για την ίδια ημερομηνία συμπληρώθηκε κανονικά χρησιμοποιώντας τη νέα τιμή του άλλου σταθμού που μόλις συμπληρώθηκε.

Χρήσιμη παρατήρηση για τη συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού κρίνεται η παρατήρηση ότι το σημειακό ύψος βροχής αυξάνεται με το υψόμετρο. Η παρατήρηση αυτή είναι γενικά χρήσιμη για οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων σε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που αρχικά ανήκουν.

Εδώ ταιριάζει και η έννοια της βροχοβαθμίδας η οποία είναι η μέση αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου. Η βροχοβαθμίδα προκύπτει συνήθως από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων υψών βροχής του κάθε σταθμού και τα υψόμετά τους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας στη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη. Για τον προσδιορισμό της λήφθηκαν υπόψη όχι μόνον οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και άλλοι γειτονικοί για τους οποίους είχαμε δεδομένα. Τελικά, η βροχοβαθμίδα προέκυψε $\beta = 0.69 \text{ mm/m}$ ή $69 \text{ mm}/100\text{m}$ όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.7: Εκτίμηση βροχοβαθμίδας για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη

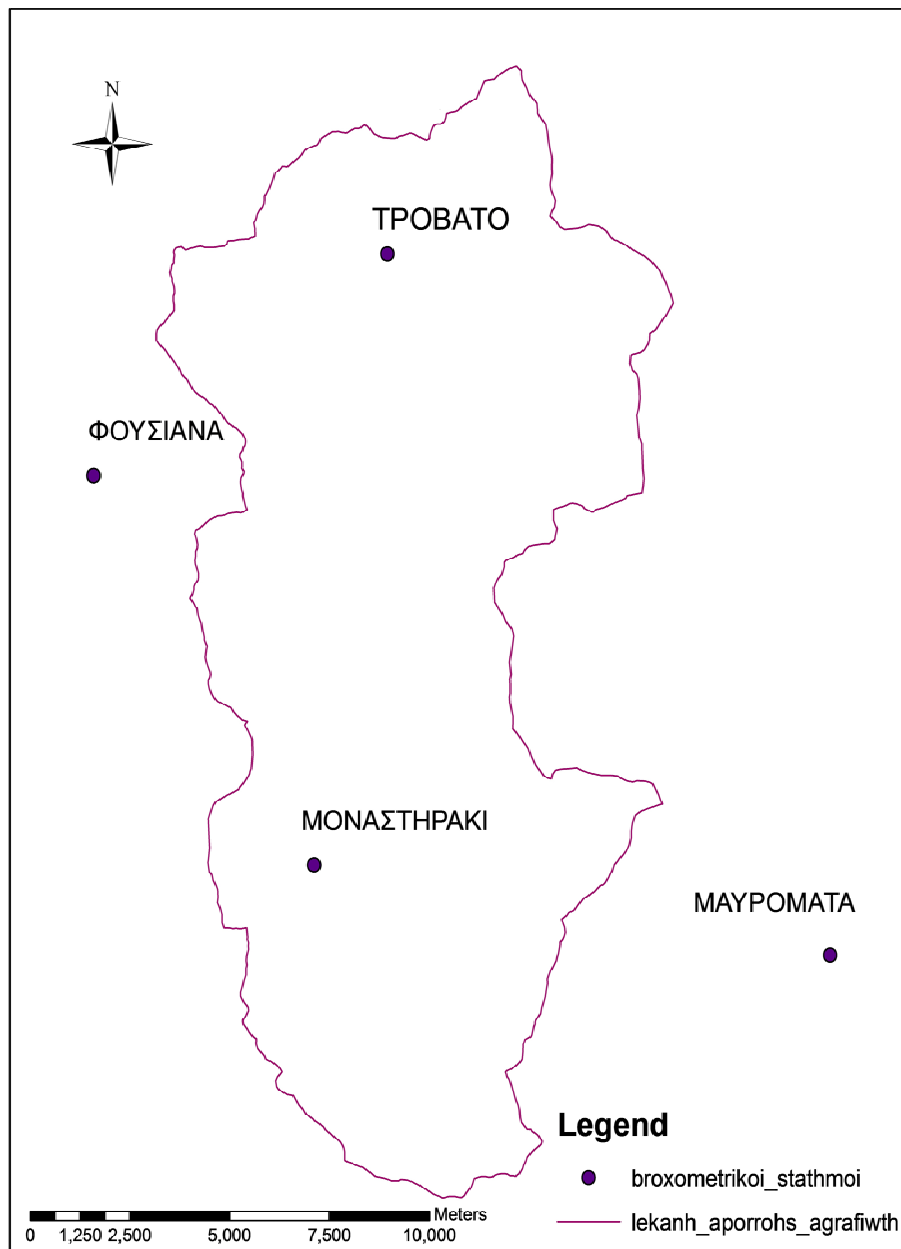
Ο συντελεστής R^2 ισούται με 0.8138 όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα. Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή γεγονός που φανερώνει την καλή προσαρμογή της ευθείας στα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών και άρα την καλή εκτίμηση της βροχοβαθμίδας για την περιοχή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την εκτίμηση του μέσου βροχομετρικού ύψους της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen λόγω της αρκετά μεγάλης ακρίβειας που παρέχει σε σχέση πάντα και με τον περιορισμένο αριθμό σταθμών που διαθέτουμε για την μελέτη αυτή. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή, ο αριθμός των σταθμών που συμμετείχαν τελικά στην επιρροή του μέσου βροχομετρικού ύψους της Λεκάνης Απορροής μειώθηκε στους 4. Τα ποσοστά συμμετοχής των σταθμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.3: Ποσοστά επιρροής των βροχομετρικών σταθμών στο σύνολο της λεκάνης απορροής του Αγραφιώτη.

Σταθμός	Ποσοστό
Τροβάτο	42.04%
Φουσιανά	8.78%
Μοναστηράκι	47.65%
Μαυρομάτα	1.53%

Η θέση των σταθμών αυτών που επιλέχτηκαν τελικά φαίνεται στον παρακάτω χάρτη:



Σχήμα 6.8: Χάρτης βροχομετρικών σταθμών

Με τον υπολογισμό της χωρικά μέσης βροχόπτωσης στην ουσία, έχουμε τη δημιουργία ενός νέου, εικονικού σταθμού του μέσου σταθμού στον οποίο πρέπει να δώσουμε και συντεταγμένες. Η θέση του μέσου αυτού σταθμού προσδιορίστηκε με έναν αντίστοιχο τρόπο με αυτόν του υπολογισμού του ύψους βροχής στο σταθμό αυτό. Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ οι συντελεστές Thiessen που παρουσιάζονται σε πίνακα που βρίσκεται παραπάνω. Οι συντεταγμένες του κάθε σταθμού πολλαπλασιάστηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές και στη συνέχεια τα νούμερα που προέκυψαν προστέθηκαν μεταξύ τους για να πάρουμε τελικά τις συντεταγμένες X και Y οι οποίες είναι οι εξής:

$$X = 291242.357 \text{ και } Y = 4335409.271$$

Οι συντεταγμένες του κάθε σταθμού μαζί με τα ποσοστά συμμετοχής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

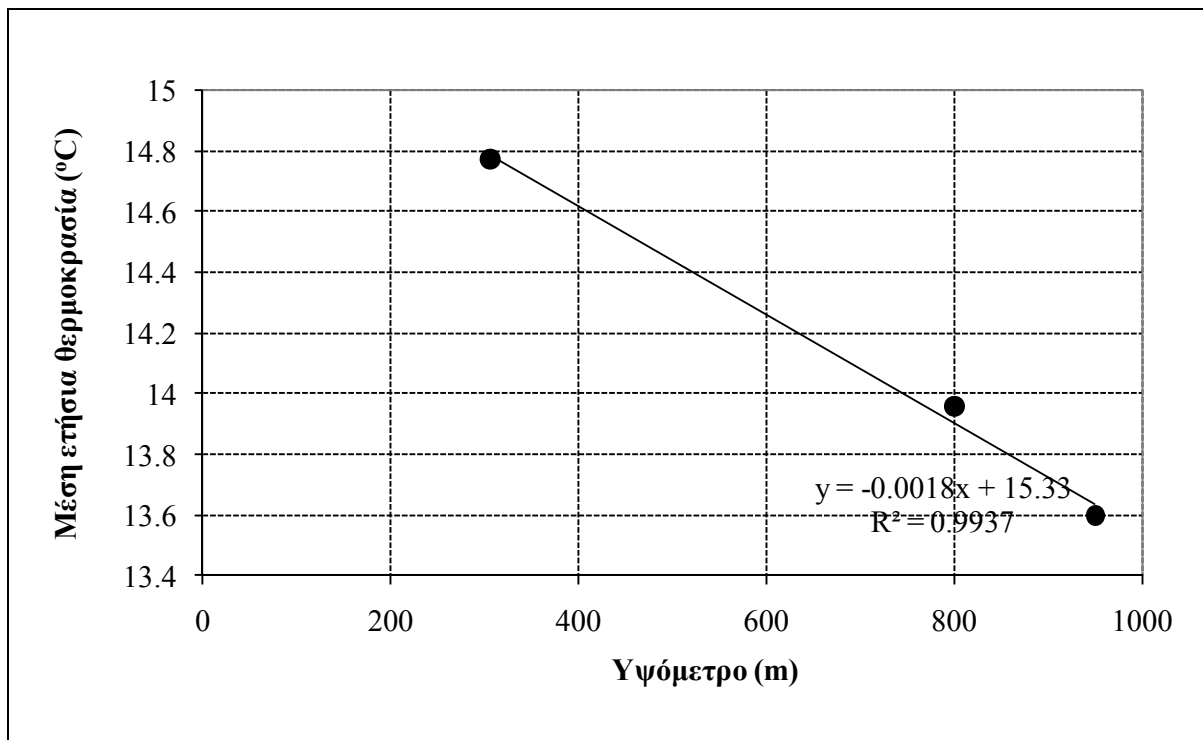
Πίνακας 6.4: Συντεταγμένες σταθμών και τα ποσοστά επιρροής τους.

Όνομα σταθμού	Συντεταγμένες	Ποσοστό επιρροής (%)
Μοναστηράκι	X = 290757.906 Y = 4328411.235	47.65
Μαυρομάτα	X = 303688.069 Y = 4326226.831	1.53
Τροβάτο	X = 292591.324 Y = 4343172.571	42.04
Φουσιανά	X = 285243.682 Y = 4337816.609	8.78

Οι βροχοπτώσεις που προέκυψαν τελικά για τη λεκάνη απορροής συγκρίθηκαν με αυτές που είχαν υπολογιστεί για την ίδια λεκάνη σε παλαιότερη μελέτη του ΕΜΠ (1992). Ύστερα από μια χρονοβόρα διαδικασία ελέγχου, τα αποτελέσματα προέκυψαν πολύ κοντά, πράγμα που σημαίνει ότι παρά τις ελλείψεις τα τελικά εξαγόμενα ήταν αξιόπιστα. Τελικά χρησιμοποιήθηκαν οι βροχοπτώσεις που υπολογίστηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπως ακριβώς περιγράφηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης απεικονίζονται στο Παράρτημα Β στα σχήματα 10 και 11.

6.5.2 Θερμοκρασία αέρα – Δυνητικά εξατμισοδιαπνοή

Το SWAT χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές θερμοκρασίας σε ημερήσιο βήμα. Σε αντίθεση με τη βροχόπτωση, όπου η χωρική διακριτικότητα είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή προσομοίωση, η χωρική διακριτικότητα της θερμοκρασίας επηρεάζει ελάχιστα, μιας και υπεισέρχεται μόνο στην εξατμισοδιαπνοή και το σχηματισμό και τήξη του χιονιού. Έτσι, στηριζόμενοι στους παραπάνω λόγους τα δεδομένα για τη θερμοκρασία λήφθηκαν από γειτονική λεκάνη και ανάχθηκαν στο μέση υψόμετρο της λεκάνης του ποταμού Αγραφιώτη μιας και δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τη ζητούμενη λεκάνη για την περίοδο που τα χρειαζόμασταν. Υπήρχαν μόνο μεταγενέστερα δεδομένα τα οποία και συλλέχθηκαν από τη ΔΕΗ. Από τα δεδομένα αυτά, υπολογίστηκε η θερμοβαθμίδα για τη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη η οποία και προέκυψε $-0.18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Με την τιμή αυτή έγινε η αναγωγή, των ημερησίων δεδομένων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, από τη γειτονική λεκάνη απορροής στη ζητούμενη λεκάνη. Το διάγραμμα εκτίμησης της θερμοβαθμίδας παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 6.9: Εκτίμηση της θερμοβαθμίδας στη λεκάνη Αγραφιώτη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρεις σταθμοί για την εκτίμηση της θερμοβαθμίδας. Τα δεδομένα των σταθμών αυτών περάστηκαν σε ηλεκτρονική μορφή κατευθείαν από τα φύλλα του παρατηρητή του αρχείου της Δ.Ε.Η. Ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, η θερμοβαθμίδα προέκυψε $\theta = -0.18^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ όπως προαναφέρθηκε και όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα.

Για τον σωστό υπολογισμό της πραγματικής απορροής και άρα το υδατικό δυναμικό της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη, απαραίτητη είναι η εκτίμηση του όγκου νερού που χάνεται μέσω της εξάτμισης.

Στην περίπτωση μας, δεδομένης και της κλίμακας στην οποία γίνεται η μελέτη και του πλήθους των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων, η καταλληλότερη μέθοδος εκτίμησης της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής είναι η μέθοδος Hargreaves που προσομοιώνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την διεργασία της εξατμισοδιαπνοής σε μια φυσική λεκάνη απορροής. Τα δεδομένα εισόδου της μεθόδου αυτής είναι μόνον η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, πριν προχωρήσουμε σε οποιαδήποτε επεξεργασία των δεδομένων αυτών, έγινε αναγωγή των ημερησίων θερμοκρασιών του μετεωρολογικού σταθμού του Αιγίου στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής, σύμφωνα με την θερμοβαθμίδα.

Από όλα τα στοιχεία θερμοκρασίας που είχαμε υπολογίστηκαν η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η μέση ελάχιστη και η μέση μέγιστη καθώς και η τυπική απόκλιση του κάθε μεγέθους. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες. Ο ένας αφορά στα δεδομένα που ελήφθησαν από τη ΔΕΗ για τρεις διαφορετικούς σταθμούς της λεκάνης και ο άλλος σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν τελικά, μετά τις κατάλληλες αναγωγές από γειτονική λεκάνη, αφού τα δεδομένα της ΔΕΗ δεν ανταποκρίνονταν στις απαιτήσεις μας (δεν υπήρχαν δεδομένα για όλα τα έτη, υπήρχαν πολλές ελλείψεις, τα δεδομένα ήταν μηνιαία). Άλλωστε η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος που επηρεάζει ελάχιστα τη λειτουργία του μοντέλου.

Πίνακας 6.5: Υπολογισμός μεγεθών για τα δεδομένα της ΔΕΗ

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση	Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση
Ιανουάριος	5.515738	0.383503	9.05209	1.804809	1.979386	1.204142
Φεβρουάριος	7.008488	1.151016	11.0137	1.681696	3.003277	0.839275
Μάρτιος	9.640511	0.927355	13.51113	2.195953	5.769892	2.724801
Απρίλιος	12.23174	0.484437	16.90823	1.789029	7.555244	0.860366
Μάιος	16.75257	1.169632	22.32855	2.864571	11.17659	0.594961
Ιούνιος	20.67454	0.682486	26.69167	2.180556	14.65741	1.032382
Ιούλιος	23.40846	0.915295	29.48186	2.818436	17.33505	0.98787
Αύγουστος	23.14036	0.526954	29.22685	2.412628	17.05387	1.371117
Σεπτέμβριος	19.91036	1.114689	25.61947	3.003908	14.20125	0.815468
Οκτώβριος	14.68845	0.766193	19.47778	2.359405	9.899123	0.895146
Νοέμβριος	10.24103	0.599645	14.39366	2.137823	6.088402	1.058404
Δεκέμβριος	6.804971	0.414575	10.45653	2.049503	3.153411	1.353582

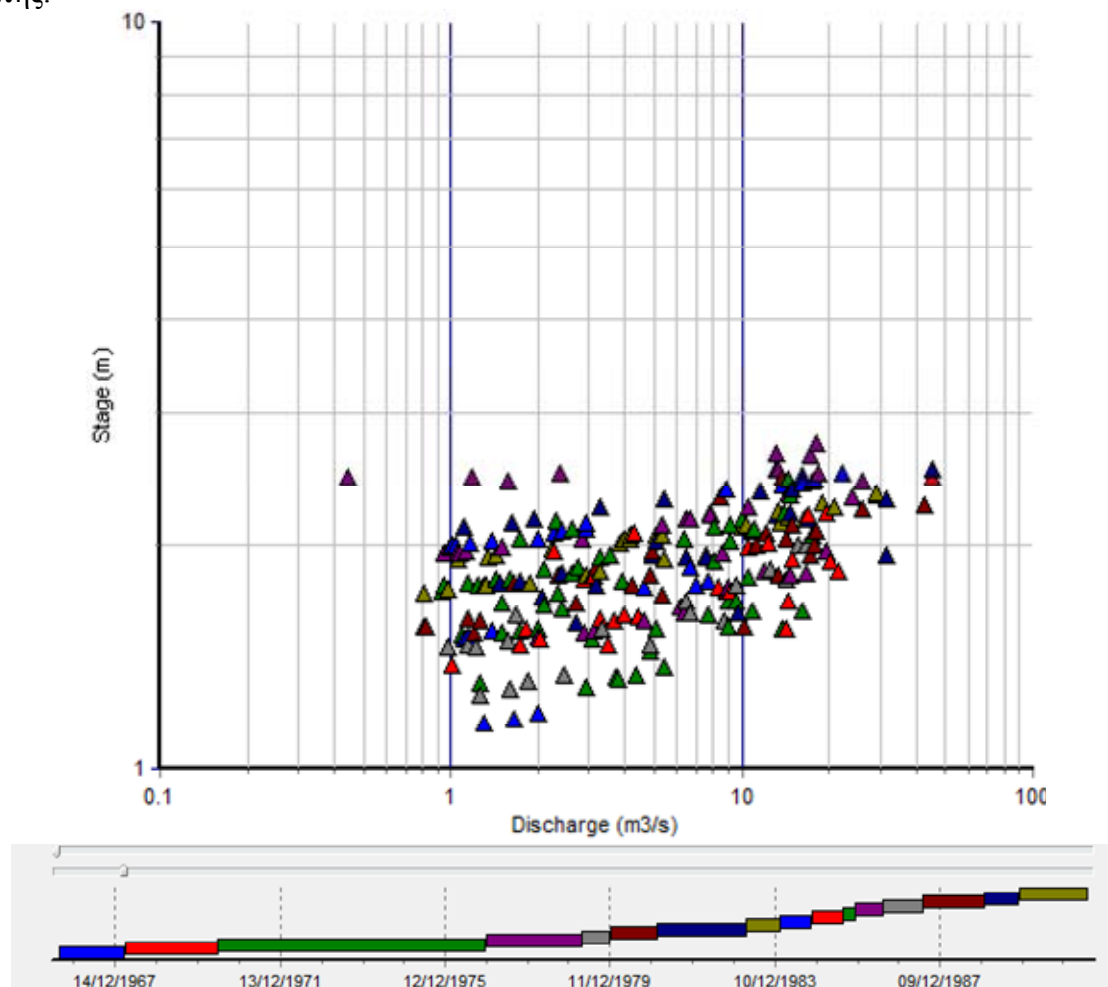
Πίνακας 6.6: Υπολογισμός μεγεθών για τα δεδομένα της γειτονικής λεκάνης

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση	Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Τυπική απόκλιση
Ιανουάριος	4.607468	1.203572	8.378699	1.218989	0.836237	1.575245
Φεβρουάριος	5.58984	1.602754	9.466515	1.800406	1.713165	1.754959
Μάρτιος	7.950307	2.152629	12.3149	2.620753	3.585714	1.82381
Απρίλιος	12.11	1.408728	17.00683	1.920745	7.213175	1.113137
Μάιος	16.52619	1.400902	22.16068	1.701981	10.89171	1.183634
Ιούνιος	20.34937	1.560769	26.43302	1.899635	14.26571	1.336987
Ιούλιος	22.56436	1.158252	28.8278	1.463792	16.30092	0.965768
Αύγουστος	21.60276	1.296385	27.59939	1.548684	15.60614	1.150235
Σεπτέμβριος	18.19516	1.409971	23.7773	1.716926	12.61302	1.176306
Οκτώβριος	12.92984	1.450449	17.50581	1.853262	8.353871	1.237353
Νοέμβριος	8.543349	1.491325	12.42259	1.554895	4.664113	1.598171
Δεκέμβριος	5.469194	1.036824	9.09629	1.176853	1.842097	1.147425

6.5.3 Απορροή

Αφού καταρχήν γίνεται μία εκτίμηση για τον αριθμό των διαφορετικών χρονικών περιόδων το μοντέλο «Υδρογνώμων» απεικονίζει τα σημεία των υδρομετρήσεων με διαφορετικό χρώμα για κάθε περίοδο (Σχήμα 6.10). Ο χρήστης μεταβάλλει την έναρξη και το πέρας κάθε χρονικής περιόδου χρησιμοποιώντας απλά εργαλεία, όπως μία ολισθαίνουσα μπάρα. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα όποτε το κρίνει σκόπιμο να εισάγει νέες καμπύλες ή και να διαγράψει. Μελέτες έχουν δείξει πως πιθανές χρονικές στιγμές αλλαγής περιόδου είναι τα

έντονα πλημμυρικά επεισόδια, τέτοια που μπορούν να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά της κοίτης.



Σχήμα 6.10: Διαχωρισμός των υδρομετρήσεων σε ομογενείς περιόδους (με διαφορετικό χρωματισμό)

Το σύστημα παρέχει διάφορες διευκολύνσεις στον χρήστη, όπως δυνατότητα εμφάνισης μόνο μίας περιόδου, επιλεκτικής εμφάνισης των σημείων ή των καμπυλών, απόκρυψη των εξωκείμενων σημείων κ.ά. Ο χρήστης τελικά αποφασίζει τις θέσεις των αλλαγών των περιόδων ανάλογα με την τάση των σημείων να προσαρμόζονται σε απλά γεωμετρικά μοντέλα όπως μία ευθεία, ή μία θλάση κλπ. Ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει διαφορετικές λύσεις και, στην συνέχεια, αφού προσαρμόσει και τις καμπύλες στάθμης παροχής, να τις αποθηκεύσει για να τις συγκρίνει μεταξύ τους σε κάποιο μεταγενέστερο στάδιο.

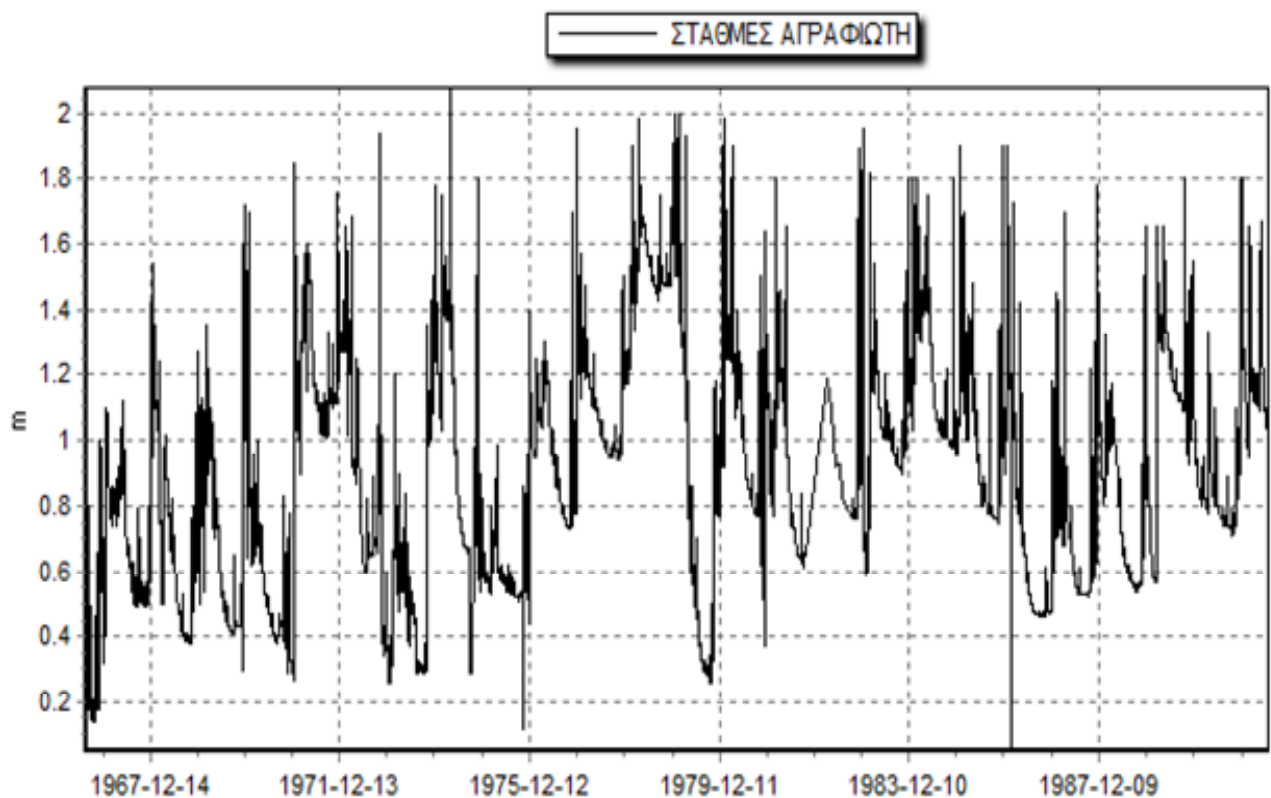
Τέλος, ο χρήστης αποφασίζει ποια σημεία είναι εξωκείμενα και τα επισημαίνει με την κατάλληλη γραφική λειτουργία. Το κριτήριο είναι εμπειρικό και βασίζεται αποκλειστικά στις ενέργειες του χρήστη. Ο χρήστης μπορεί να δικαιολογήσει τον χαρακτηρισμό ενός σημείου ως εξωκείμενο βασισμένος σε μεθοδολογία με στατιστική τεκμηρίωση, παρατηρώντας δηλαδή την βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού αφαιρώντας τέτοια σημεία.

Οι καμπύλες επέκτασης αφορούν τις σχέσεις που συνδέουν τις τιμές της στάθμης και παροχής πέρα από κάποιο μέγεθος, εκεί δηλαδή που δεν διαθέτουμε υδρομετρήσεις. Για την περίπτωση των καμπυλών επέκτασης, γίνεται η παραδοχή πως μία καμπύλη επέκτασης αρκεί για να περιγράψει την σχέση στάθμης και παροχής για όλες τις περιόδους. Είναι δε

παρατηρημένο πως οι καμπύλες στάθμης – παροχής διαφορετικών περιόδων έχουν την τάση να συγκλίνουν για μεγάλες τιμές στάθμης και παροχής.

Η μεθοδολογία εξαγωγής των σχέσεων για τις καμπύλες επέκτασης δεν βασίζεται αποκλειστικά στις υδρομετρήσεις, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες σε αυτήν την περιοχή τιμών, συνήθως εφαρμόζεται κάποια μεθοδολογία που συνδυάζει εξισώσεις της υδραυλικής και τις υψηλότερες τιμές από τις υδρομετρήσεις. Η κατάρτιση μπορεί να γίνει και με αποκλειστική χρήση των σχέσεων της υδραυλικής εφόσον είναι γνωστά τα στοιχεία τραχύτητας και κλίσης του «αγωγού» που προσομοιάζει το υδατόρευμα. Επιπλέον ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτήν την μεθοδολογία κατάρτισης καμπύλων και για συνηθισμένες τιμές στάθμης – παροχής, σε συνδυασμό με ή και χωρίς καθόλου υδρομετρήσεις.

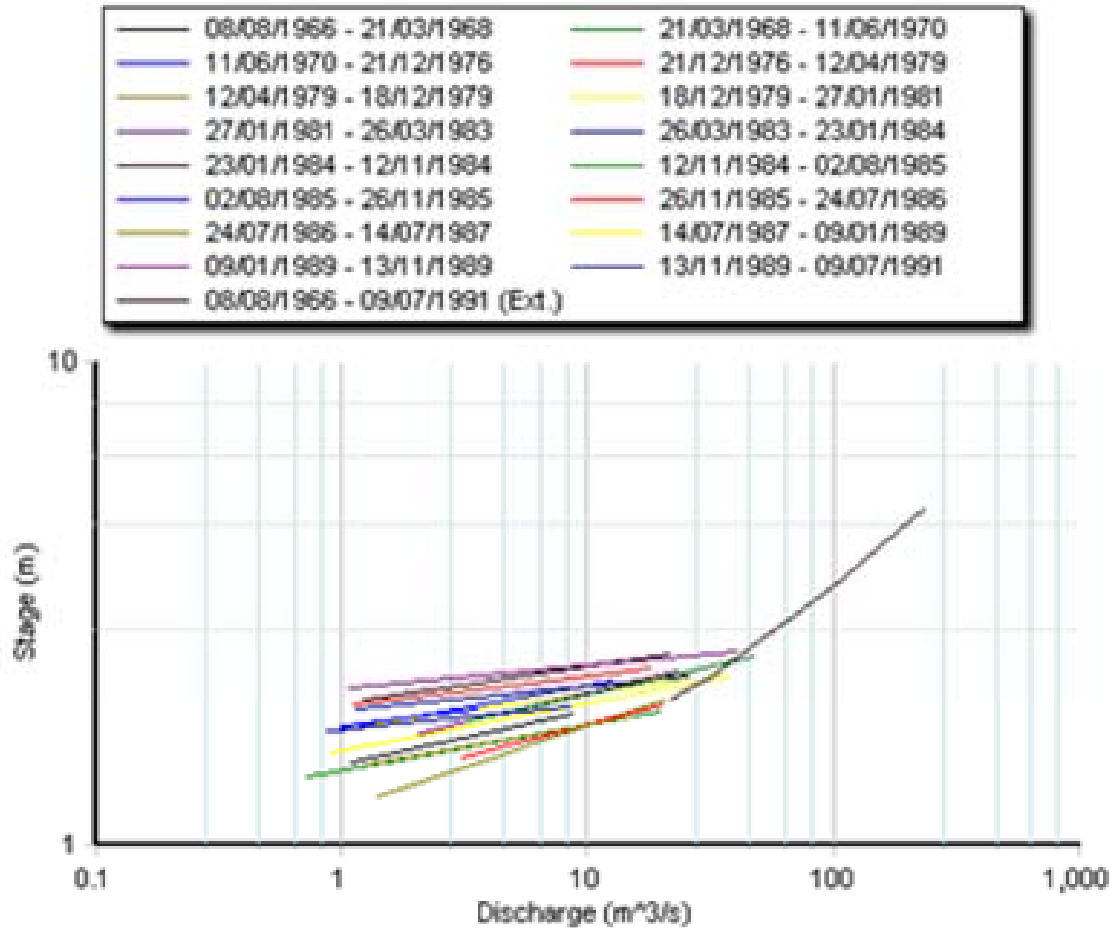
Για την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης - παροχής χρησιμοποιήθηκαν οι στάθμες και οι παροχές του ποταμού Αγραφιώτη που είχαν μετρηθεί στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Βαρβαριάδος. Οι μετρημένες παροχές ήταν ελάχιστες οπότε απαραίτητες ήταν οι στάθμες του ποταμού για την εύρεση των ημερήσιων παροχών. Οι μετρημένες στάθμες του Αγραφιώτη υπήρχαν σε ημερήσια βάση για πολλά έτη και το σταθμηγράφημα που προκύπτει από αυτές φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.11: Σταθμηγράφημα του ποταμού Αγραφιώτη

Οι καμπύλες στάθμης - παροχής δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος “Hydrognomon”. Στο πρόγραμμα αυτό εισήχθηκαν ως δεδομένα οι στάθμες και οι παροχές του ποταμού Αγραφιώτη όπως αυτές δόθηκαν από τον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Βαρβαριάδος. Έτσι, εμφανίστηκαν στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος δύο στήλες. Στην πρώτη υπήρχαν οι παροχές του ποταμού και στη δεύτερη οι αντίστοιχες στάθμες.

Επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση των ζευγαριών αυτών, στάθμης και παροχής, σ' ένα διάγραμμα. Αυτό έγινε με τη βοήθεια της εντολής Hydrology → Curves and interpolations. Αρχικά εμφανίστηκε μια κενή επιφάνεια, χωρίς τίποτα μέσα στο διάγραμμα αλλά με τη χρήση της εντολής Edit ένα νέο παράθυρο εμφανίστηκε με όλα τα ζεύγη σταθμών και παροχών που εισήχθησαν αρχικά στο πρόγραμμα. Τελική ενέργεια ήταν η δημιουργία των καμπυλών στάθμης - παροχής. Μετά από αρκετές δοκιμές, και ύστερα από την απαλοιφή αρκετών τιμών οι οποίες κρίθηκαν ως αναξιόπιστες προέκυψαν οι τελικές καμπύλες οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 6.12: Καμπύλες στάθμης-παροχής

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα του Υδρογνώμονα δημιουργήθηκαν τελικά 16 καμπύλες στάθμης - παροχής οι οποίες χωρίστηκαν ως εξής:

Πίνακας 6.7: Χρονικό εύρος ισχύος καμπυλών στάθμης-παροχής

Αριθμός καμπύλης	Από	έως
1	8 Αυγούστου 1966	21 Μαρτίου 1968
2	21 Μαρτίου 1968	11 Ιουνίου 1970
3	11 Ιουνίου 1970	21 Δεκεμβρίου 1976
4	21 Δεκεμβρίου 1976	12 Απριλίου 1979
5	12 Απριλίου 1979	18 Δεκεμβρίου 1979
6	18 Δεκεμβρίου 1979	27 Ιανουαρίου 1981
7	27 Ιανουαρίου 1981	26 Μαρτίου 1983
8	26 Μαρτίου 1983	23 Ιανουαρίου 1984
9	23 Ιανουαρίου 1984	12 Νοεμβρίου 1984
10	12 Νοεμβρίου 1984	2 Αυγούστου 1985
11	2 Αυγούστου 1985	26 Νοεμβρίου 1985
12	26 Νοεμβρίου 1985	24 Ιουλίου 1986
13	24 Ιουλίου 1986	14 Ιουλίου 1987
14	14 Ιουλίου 1987	9 Ιανουαρίου 1989
15	9 Ιανουαρίου 1989	13 Νοεμβρίου 1989
16	13 Νοεμβρίου 1989	9 Ιουλίου 1991

Έχοντας πλέον τις καμπύλες στάθμης - παροχής και την καμπύλη επέκτασης μπορούμε για κάθε ημερήσια στάθμη του ποταμού που έχουμε να πάρουμε την αντίστοιχη ημερήσια παροχή.

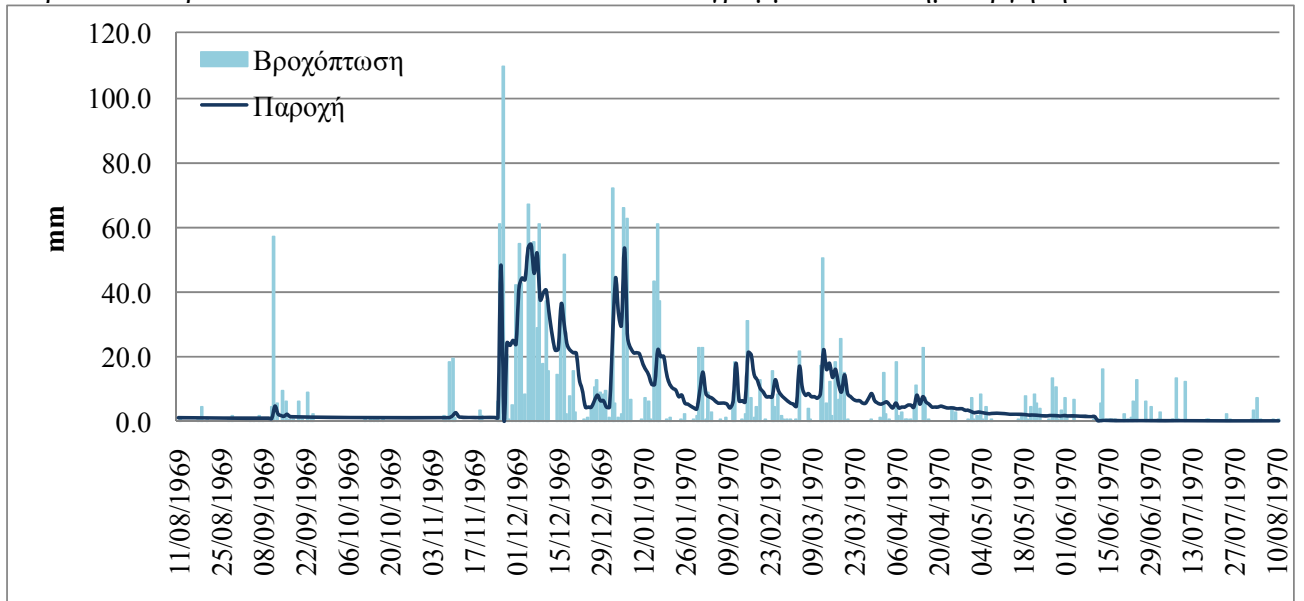
Τα σημεία που επιλέχθηκαν τελικά για την κατάρτιση της κάθε καμπύλης στάθμης – παροχής και της καμπύλης επέκτασης παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 1 και 2 του Παραρτήματος Α.

Η παροχή αυτή, όπως και η βροχόπτωση, συγκρίθηκε με παλαιότερη μελέτη που είχε γίνει για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Ύστερα από αυτή τη χρονοβόρα διαδικασία του ελέγχου, προέκυψε ελάχιστη διαφορά μεταξύ της απορροής που υπολογίστηκε με τον παραπάνω τρόπο και αυτής που είχε υπολογιστεί σε προηγούμενη μελέτη από το ΕΜΠ (1992). Έτσι, παρά τις δυσκολίες που συναντήθηκαν η παροχή του ποταμού Αγραφιώτη υπολογίστηκε σωστά στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στους παρακάτω υπολογισμούς. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται σχηματικά στο Παράρτημα Β στο Σχήμα 12.

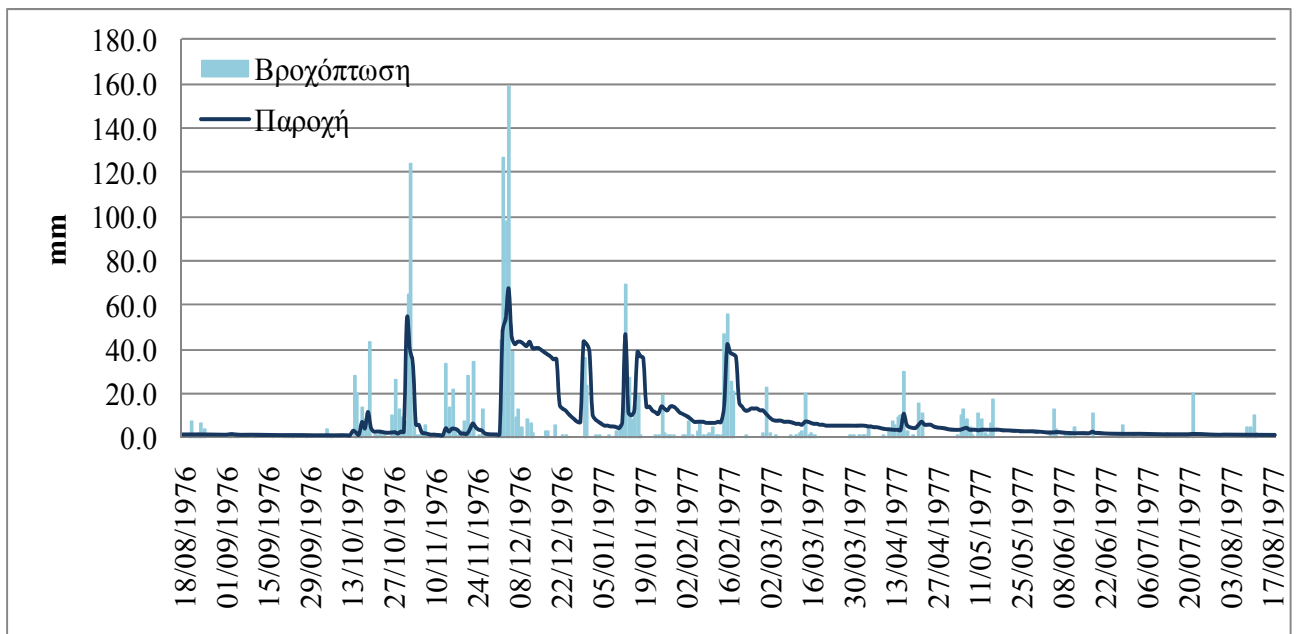
Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρειάστηκε επίσης να μελετηθεί η σχέση βροχόπτωσης – απορροής για να ελεγχθεί αν οι βροχοπτώσεις που τελικά εισάγουμε στο πρόγραμμα SWAT επαρκούν για να δώσουν τη μετρημένη απορροή. Από τα υδρογραφήματα και υετογράμματα που δημιουργήθηκαν ελέγχθηκε αν τελικά η σχέση βροχόπτωσης - απορροής είναι καλή.

Στον άξονα y τοποθετείται η παροχή Q σε mm καθώς και η χωρικά μέση βροχόπτωση πάλι σε mm, για να γίνει η σύγκριση, και στον άξονα x τοποθετείται το χρονικό βήμα σε ημέρες, έχουμε ημερήσιες βροχές και απορροές.

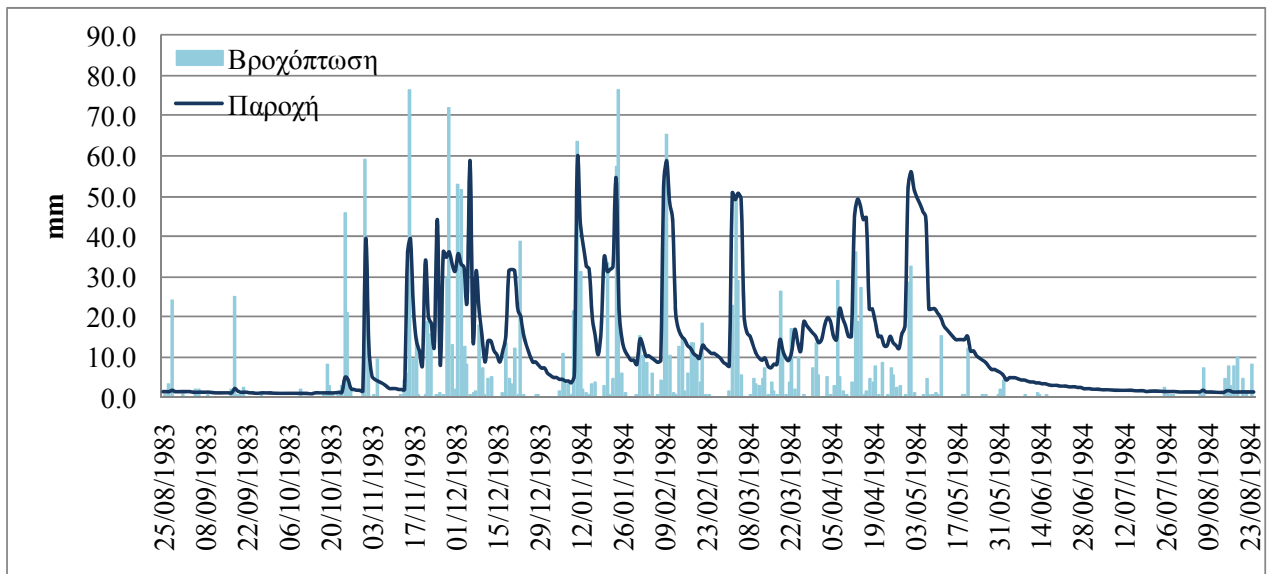
Παρακάτω παρατίθενται επιλεκτικά κάποια από τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 6.13: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1969-1970



Σχήμα 6.14: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1976-1977



Σχήμα 6.15: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1983-1984

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι υπάρχει καλή σχέση βροχόπτωσης - απορροής οπότε μπορούμε να εισάγουμε τις βροχοπτώσεις ως έχουν στο μοντέλο και να περιμένουμε τα εξαγόμενα αποτελέσματα απορροής που να είναι κοντά στα μετρημένα. Στα περισσότερα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν συμβαίνει αυτό. Οι μόνες αποκλίσεις υπήρχαν εκεί που οι μετρημένες απορροές ήταν λανθασμένες. Περισσότερα υδρογραφήματα - υετογράμματα παρατίθενται στο σχετικό παράρτημα.

7 Εφαρμογή του μοντέλου SWAT

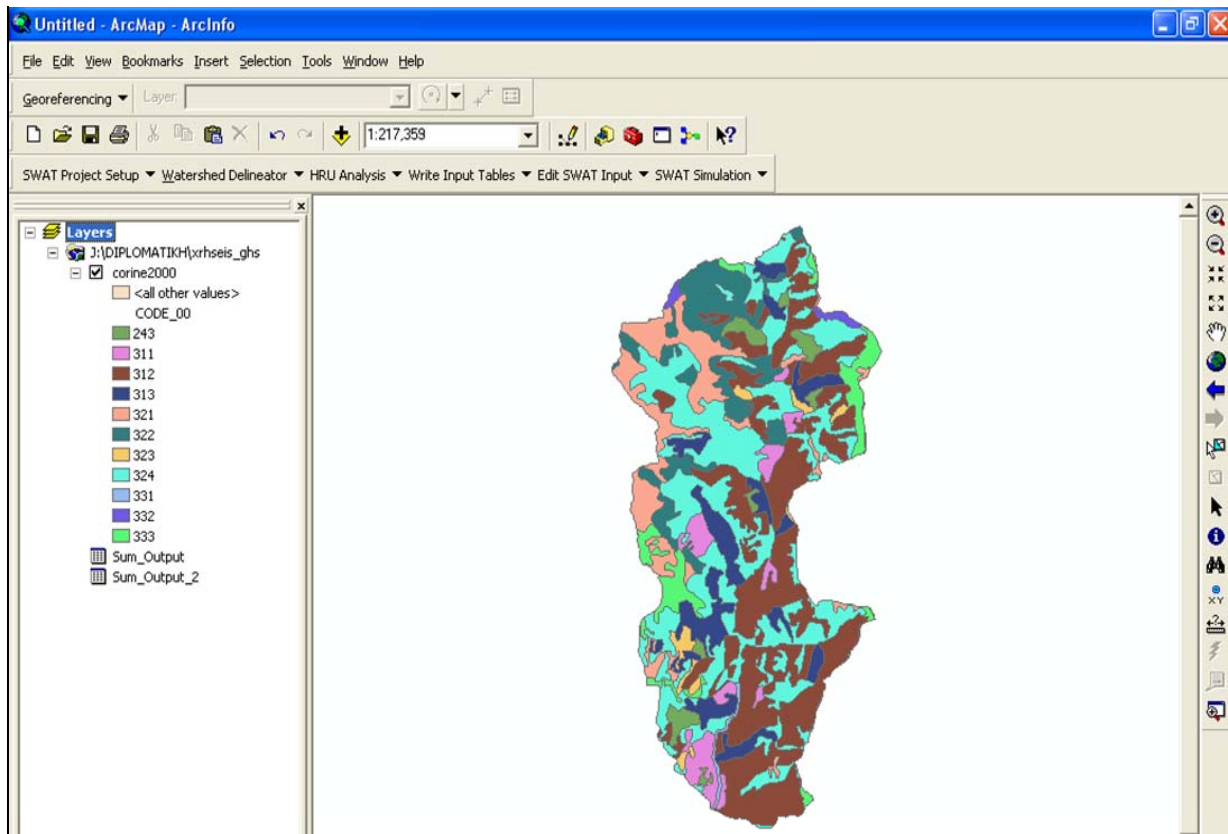
7.1 Διαθεσιμότητα δεδομένων

Η περιοχή μελέτης δεν ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκή για την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου μιας και δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία. Ένα από τα προβλήματα των δεδομένων είναι η ποιότητα των χρονοσειρών βροχόπτωσης και απορροής, που δημιουργεί σημαντικά σφάλματα στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, ιδίως με τη χρήση ομοιωμάτων βροχόπτωσης - απορροής, όπως το SWAT. Ειδικά στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, η κατάσταση έγινε ακόμα δυσκολότερη από το γεγονός ότι οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης ήταν ελλιπείς και απαιτούσαν συμπλήρωση ορισμένων τιμών, καθώς επίσης και από το γεγονός ότι οι μετρήσεις της απορροής (υδρομετρήσεις) ήταν ελάχιστες και η αντίστοιχη χρονοσειρά έπρεπε αναγκαστικά να δημιουργηθεί από την αρχή μέσα από την κατασκευή των καμπυλών στάθμης - παροχής. Ανάλογη είναι και η ποιότητα των χρονοσειρών θερμοκρασίας οι οποίες αναζητήθηκαν από τη ΔΕΗ, αλλά από την αναζήτηση στα σχετικά αρχεία διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχαν επαρκείς μετρήσεις για την περιοχή και τις χρονολογίες που χρειάζονταν. Έτσι, και αυτές προέκυψαν με αναγωγές από γειτονικές λεκάνες. Ο ρόλος όμως των τελευταίων στη μοντελοποίηση δεν είναι τόσο ουσιαστικός.

Σε ό,τι αφορά στη διαθεσιμότητα των χωρικών δεδομένων, αυτή μπορεί να κριθεί ως η περισσότερο ανεπαρκής. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της χαρτογράφησης χρήσεων γης με το υπόβαθρο Corine το οποίο, αν και δεν παρουσίαζε τις χρήσεις γης με μεγάλη λεπτομέρεια, ήταν επαρκές στην παρούσα φάση. Οι χάρτες εδάφους από την άλλη ήταν ένα σημαντικό πρόβλημα μιας και δεν υπήρχαν ελεύθεροι προς χρήση. Αναζητήθηκαν από το ΙΔΕ (Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών) και μας δόθηκαν σε αναλογική μορφή μαζί με κάποιες εδαφοτομές. Η επιθυμητή μορφή, όμως, θα ήταν η ψηφιακή, και έτσι ακολούθησε η σάρωση του αναλογικού χάρτη και στην πορεία η ψηφιοποίηση του στο περιβάλλον του ArcGIS. Αφού έγινε ακολούθως και η εξαγωγή των απαραίτητων στοιχείων από τις εδαφοτομές, ο χάρτης εδάφους ήταν έτοιμος προς χρήση.

7.2 Προετοιμασία δεδομένων για χρήση από το SWAT

Η επεξεργασία των δεδομένων που αφορούν τις χρήσεις γης στη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη έγιναν στο περιβάλλον του προγράμματος ArcGIS. Τα δεδομένα για τις χρήσεις αυτές ελήφθησαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Corine (το οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω) με το οποίο έχει γίνει αναλυτική χαρτογράφηση των χρήσεων γης όλης της Ευρώπης. Τα στοιχεία που δόθηκαν αφορούσαν ολόκληρη την Ελλάδα και, έτσι, έπρεπε να γίνει μια προεργασία για να χρησιμοποιηθούν για τη συγκεκριμένη λεκάνη και να εισαχθούν στο πρόγραμμα SWAT. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι χρήσεις γης που δίνει το Corine για τη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη.



Σχήμα 7.1: Χρήσεις γης από Corine

Σε μια πρώτη φάση έγινε χρήση της εντολής clip του ArcToolBox με την οποία περιορίσαμε τα δεδομένα του Corine μόνο στην περιοχή που μας ενδιαφέρει (στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη). Έτσι, προέκυψε η παραπάνω εικόνα.

Ανοίγοντας τώρα τον πίνακα που αντιστοιχεί στον παραπάνω ψηφιακό χάρτη της περιοχής παρατηρούμε ότι υπάρχουν 151 πολύγωνα με μόνο 11 διαφορετικές χρήσεις γης. Απαραίτητη είναι λοιπόν η περίληψη των δεδομένων ως προς τον κωδικό χρήσης γης που δόθηκε από το Corine. Σε μια δεύτερη φάση, έγινε χρήση της εντολής “Summarize” έτσι ώστε κάθε καταχώρηση να εμφανίζεται μια φορά στον πίνακα με τον αντίστοιχο μετρητή Count να δείχνει πόσες φορές η καταχώρηση αυτή υπήρχε στον αρχικό πίνακα. Με την ενέργεια αυτή οι καταχωρήσεις του πίνακα μειώθηκαν σε 11. Οι χρήσεις αυτές μαζί με την συνολική περίμετρο και το εμβαδό που καταλαμβάνει κάθε μια, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.1: Χρήσεις γης από Corine (συνολικό εμβαδό και περίμετρος της κάθε μιας)

Attributes of Sum_Output_2					
	OID	CODE_00	Count_CODE_00	Sum_AREA	Sum_PERIMETER
▶	0	243	8	5552007.9247	33005.3153
	1	311	9	10460332.8898	58821.4997
	2	312	30	95228979.928	385360.1499
	3	313	16	21026830.4282	112828.3454
	4	321	12	37610987.3751	176134.4004
	5	322	18	31949207.4829	148903.2614
	6	323	8	3614125.6106	29285.7742
	7	324	34	100590063.9812	524117.6672
	8	331	1	2106466.3717	22706.2897
	9	332	3	2778002.1004	19317.0283
	10	333	12	22700640.1801	123313.6133

Στη συνέχεια απαιτήθηκε η αποθήκευση των επεξεργασμένων πληροφοριών σε μια μορφή που να αναγνωρίζεται από το μοντέλο SWAT. Αυτό έγινε με την εντολή “Export Feature attribute to ASCII” με την οποία ο χάρτης χρήσεων γης αποθηκεύτηκε μαζί με τον αντίστοιχο πίνακα δεδομένων για να γίνει μετέπειτα εισαγωγή στις χρήσεις γης του SWAT.

7.2.1 Το υπόβαθρο Corine

Το Corine είναι ένα Ευρωπαϊκό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για τη συλλογή και το συντονισμό των χρήσεων γης και άλλων στοιχείων του περιβάλλοντος στον ευρωπαϊκό χώρο. Ξεκίνησε το 1985 στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τα αρχικά του σημαίνουν ‘Coordination Information on the Environment’ δηλαδή, συντονισμός πληροφοριών για το περιβάλλον. Το υπόβαθρο αυτό είναι ένα πρωτότυπο σχέδιο με πεδίο δράσης πολλά περιβαλλοντικά ζητήματα. Ένα από αυτά είναι ένα ευρετήριο κάλυψης γης που έχει τη μορφή χαρτογράφησης σε κλίμακα 1:100 000. Αυτή η βάση δεδομένων έχει 44 κατηγορίες και είναι διαθέσιμη για τις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης και, κατ’ επέκταση, και της Ελλάδας. Στις μέρες μας, υπάρχει κάποια μορφή χαρτογράφησης των χρήσεων γης στις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης. Τα δεδομένα αυτά έχουν ενημερωθεί και εισαχθεί στο υπόβαθρο Corine.

Από το υπόβαθρο αυτό συλλέχτηκαν δεδομένα για τις χρήσεις γης στη λεκάνη του ποταμού Αγραφιώτη.

Το Corine περιλαμβάνει συνολικά 5 μεγάλες κατηγορίες χρήσεων γης. Αυτές είναι οι εξής:

1. Τεχνητές επιφάνειες
2. Γεωργικές περιοχές
3. Δάση και ημιφυσικές περιοχές
4. Υγρές ζώνες
5. Υδάτινες επιφάνειες

Οι βασικές αυτές κατηγορίες χωρίζονται σε 44 υποκατηγορίες. Από αυτές ελάχιστες εμφανίζονται στην υπό μελέτη περιοχή και πρέπει να αντιστοιχηθούν με τις χρήσεις γης που αναγνωρίζει το μοντέλο SWAT. Η παρουσίασή τους γίνεται παρακάτω:

2. ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

2.4 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

2.4.3 Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης

Περιοχές κυρίως γεωργικές που διακόπτονται από φυσική βλάστηση.

3. ΔΑΣΗ ΚΑΙ ΗΜΙΦΥΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

3.1 ΔΑΣΗ

3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων

Βλάστηση που αποτελείται κυρίως από δέντρα αλλά και από θάμνους και χαμόδεντρα, όπου κυριαρχούν τα πλατύφυλλα είδη δέντρων.

3.1.2 Δάσος κωνοφόρων

Βλάστηση που αποτελείται κυρίως από δέντρα αλλά και από θάμνους και χαμόδεντρα, όπου κυριαρχούν τα κωνοφόρα είδη δέντρων.

3.1.3 Μικτό δάσος

Βλάστηση που αποτελείται κυρίως από δέντρα, αλλά και από θάμνους και χαμόδεντρα, όπου δεν κυριαρχούν ούτε τα πλατύφυλλα ούτε τα κωνοφόρα είδη δέντρων.

3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΘΑΜΝΩΔΟΥΣ ΚΑΙ/Η ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι

Βοσκότοποι χαμηλής παραγωγικότητας. Βρίσκονται συχνά σε περιοχές με ανάμαλο έδαφος. Μπορεί να περιλαμβάνουν περιοχές με ρείκια, χερσότοπους και βραχώδεις περιοχές.

3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι

Θαμνώδης βλάστηση με χαμηλή και κλειστή κάλυψη που κυριαρχείται από θάμνους, χαμόδεντρα και ποώδη φυτά (χερσότοποι, ρείκια, αμμόχορτα, ράχοι, λαμπούρνο, κλπ.).

3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση

Βλάστηση θαμνωδών σκληρόφυλλων. Περιλαμβάνει ρεικότοπους και θαμνόδεντρα. Ρεικότοποι: συνδυασμοί πυκνής βλάστησης που αποτελούνται από πολλά χαμόδεντρα που καλύπτουν όξινα πυριτιούχα εδάφη σε περιοχές της Μεσογείου. Χαμόδεντρα: διακεκομμένοι θαμνώδεις συνδυασμοί μεσογειακών ασβεστολιθικών υψιπέδων. Πολύ συχνά, αποτελείται από κοκκοφόρους δρύες, κέδρους, κουμαριές, λεβάντα, θυμάρι κλπ. Μπορεί να υπάρχουν μερικά απομονωμένα δέντρα.

3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις

Θαμνώδης και ποώδης βλάστηση με σκόρπια δέντρα. Μπορεί να προκύψει από την απογύμνωση δασώδους έκτασης ή αναγέννηση/ φυσική αναδάσωση.

3.3 ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΜΕ ΛΙΓΗ Η ΚΑΘΟΛΟΥ ΒΛΑΣΤΗΣΗ

3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές

Παραλίες, αμμόλοφοι και παράκτιες και ηπειρωτικές ζώνες με άμμο ή βότσαλα (κροκάλες).

3.3.2 Εκτάσεις με αραή βλάστηση

Περιλαμβάνει στέπες, τούνδρες και ερημότοπους.

3.3.3 Αποτεφρωμένες εκτάσεις

Εκτάσεις που έχουν πληγεί από πυρκαγιές και παραμένουν αποτεφρωμένες.

7.2.2 Αντιστοίχιση χρήσεων γης

Το SWAT έχει στη βάση δεδομένων του 102 διαφορετικά είδη φυτοκάλυψης. Σε κάθε ένα από αυτά τα είδη το πρόγραμμα αντιστοιχίζει μια σειρά από ιδιότητες. Αυτές είναι τα στοιχεία βιομάζας και ενέργειας, η ιδανική θερμοκρασία για την ανάπτυξη των φυτών, κάποιες παράμετροι νιτρικών κτλ.

Η κύρια από αυτές τις παραμέτρους είναι ο δείκτης απορροής CN για το κάθε είδος. Εδώ βρίσκεται η σημασία της σωστής αντιστοίχισης των χρήσεων γης που δίνονται από το Corine με τους κατάλληλους τύπους του SWAT. Η αντιστοίχιση αυτή έχει μεγάλη σημασία μιας και από αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό ο υπολογισμός της απορροής στην εξεταζόμενη λεκάνη.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα της διόρθωσης των παραμέτρων που βρίσκονται στις βάσεις δεδομένων και που επηρεάζουν την απορροή, τόσο εκ των προτέρων όσο και εκ των υστέρων. Το γεγονός αυτό κάνει περισσότερο καθαρή την αναγκαιότητα της σωστής αντιστοίχισης των χρήσεων γης. Η ενέργεια αυτή θα περιορίσει κατά πολύ τη βαθμονόμηση του μοντέλου στην πορεία των εργασιών.

Οι χρήσεις γης της βάσης δεδομένων του SWAT φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.2: Χρήσεις γης στη βάση δεδομένων του SWAT

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ	α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ
1	SOYB	SOYBEAN	52	ASPR	ASPARAGUS
2	CORN	CORN	53	BROC	BROCCOLI
3	GRSG	GRAIN SORGHUM	54	CABG	CABBAGE
4	COTS	STRIP COTTON	55	CAUF	CAULIFLOWER
5	COTP	PICKER COTTON	56	CELR	CELERY
6	PNUT	PEANUT	57	LETT	LETTUCE
7	SUNF	SUNFLOWER	58	OLET	LEAF LETTUCE
8	CSUN	CANADA SUNFLOWER	59	SOIN	SPINACH
9	SIN	SILAGE	60	CRRT	CARROT
10	WWHT	WINTER WHEAT	61	ONIO	ONION
11	SWHT	SPRING WHEAT	62	SGBT	SUGARBEETS
12	CSWH	CANADA SP WHT	63	GRBN	GREEN BEANS
13	DWHT	DURAM WHEAT	64	LIMA	LIMA BEANS
14	BARL	BARLEY	65	PEAS	PEAS
15	CBAR	CANADA BARLEY	66	CUCM	CUCUMBERS
16	OATS	OATS	67	EGGP	EGGPLANT
17	COAT	CANADA OATS	68	CANT	CANTALOUPE
18	RICE	RICE	69	HMEL	HONEYDEW MEL
19	RYE	RYE	70	WMEL	WATERMELON
20	WPEA	WINTER PEAS	71	PEPR	PEPPERS

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ	α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ
21	LEN1	LENTILS1	72	STRW	STRAWBERRY
22	LENT	LENTILS	73	TOMA	TOMATO
23	CAN1	CANTALOUPE	74	SPOT	SWEET POTATO
24	CAN2	CANTALOUPE2	75	SCRN	SWEET CORN
25	FLAX	FLAX	76	TOBC	TOBACCO
26	FPEA	FIELD PEAS	77	SUGC	SUGAR CANE
27	MUNG	SUMMER MUNG	78	FESC	FESCUE
28	SESB	SESBANIA	79	PMIL	PEARL MILLET
29	DBEN	DRY_BEANS	80	PINE	PINE TREES
30	SGHY	SORGHUM HAY	81	MESQ	MESQUITE TREE
31	ALFA	ALFALFA	82	APPL	APPLE TREE
32	CLVA	CLOVER ALSIKE	83	PAST	PASTURE
33	CLVR	RED CLOVER	84	AGRR	AGRICULTURAL RANGE
34	CLVS	SWEET CLOVER	85	AGRC	CROP, CLOSE-GROWN
35	TIMO	TIMOTHY	86	AGRL	AGRICULTURAL LAND GENERIC
36	RNGE	RANGE	87	FRST	FOREST
37	SPAS	SUMMER PASTURE	88	URBN	URBAN GRASS
38	WPAS	WINTER PASTURE	89	WATR	WATER
39	RYEA	ALTAI WILD RYE	90	WETL	WETLAND
40	RYER	RUSSIAN W RYE	91	WETF	WETLAND_FOREST
41	RYEG	ANNUAN RYE GR	92	WETN	WETLAND_NONFOREST
42	WWGR	W WHEATGRASS	93	FRSD	FOREST, DECIDUOUS
43	NWGR	N WHEATGRASS	94	FRSE	FOREST, EVERGREEN
44	SWGR	SLENDER WHGR	95	FRSE	FOREST, EVERGREEN2
45	CWGR	CRESTED WHGR	96	ORCD	ORCHARD
46	BROM	BROM GRASS	97	RNGB	RANGE
47	BROS	SMOOTH BR GR	98	HAY	HAY
48	CWPS	CANADA WPAS	99	SPCL	SPRING PASTURE
49	BERM	BERMUDA	100	SWRN	RANGE, SOUTHWEST
50	POTA	PATATOES	101	WWG1	WINTER, WHEAT GRASS1
51	POT2	POTATOES2	102	WWG2	WINTER, WHEAT GRASS2

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η αντιστοίχιση των χρήσεων γης που επιλέχθηκαν τελικά. Η επιλογή έγινε με πολύ προσοχή. Επιδιώχτηκε η όσο το δυνατόν καλύτερη ταύτιση, χρησιμοποιώντας τις περιγραφές που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα Corine, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, και κάνοντας σωστή ερμηνεία των εδαφών που αναγράφονται στο πρόγραμμα SWAT. Έτσι, οι 11 διαφορετικές χρήσεις γης του Corine αντιστοιχίστηκαν σε 7 διαφορετικές χρήσεις γης στο πρόγραμμα SWAT.

Πίνακας 7.3: Αντιστοίχιση χρήσεων γης

α/α	CORINE		SWAT	
	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΟΝΟΜΑ
1	243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	AGRL	AGRICULTURAL LAND
2	311	Δάσος πλατύφυλλων	FRSD	FOREST DECIDUOUS
3	312	Δάσος κωνοφόρων	FRSE	FOREST EVERGREEN
4	313	Μικτό δάσος	FRST	FOREST
5	321	Φυσικοί βοσκότοποι	PAST	PASTURE
6	322	Θάμνοι και χερσότοποι	RNGE	RANGE
7	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	FRST	FOREST
8	324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	RNGE	RANGE
9	331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	BERM	BERMUDA
10	332	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	BERM	BERMUDA
11	333	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	BERM	BERMUDA

7.3 Δεδομένα εισόδου και βαθμονόμηση του μοντέλου

Η εφαρμογή του μοντέλου σε μια λεκάνη απορροής μπορεί να διαχωριστεί σε πέντε βήματα, που αντιστοιχούν στις πέντε κύριες επιλογές που προσθέτει το μοντέλο SWAT στο μενού του ArcGIS. Το πρώτο βήμα αφορά στη δήλωση δεδομένων εισόδου που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Η δήλωση αυτή γίνεται μέσα από την εντολή ‘Watershed Delineator’ και περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα γεωγραφικής πληροφορίας.

Το δεύτερο στάδιο εφαρμογής του μοντέλου εφαρμόζεται μέσα από την εντολή ‘HRU Analysis’ και περιλαμβάνει την επιλογή σχετικά με τη διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες και μονάδες υδρολογικής απόκρισης, που όπως προαναφέρθηκε είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Στο τρίτο στάδιο, γίνεται χρήση του μενού ‘Write Input Tables’. Το μενού αυτό αφορά στον ορισμό των αρχείων με τις χρονοσειρές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, θερμοκρασίας και κλιματικών δεδομένων. Στο ίδιο μενού, εμπεριέχεται και η δημιουργία όλων των αρχείων εισόδου που κατασκευάζει το μοντέλο. Η ενέργεια αυτή, μπορεί να γίνει είτε για όλα τα αρχεία μαζί μέσα από την εντολή ‘Write All’, είτε χωριστά για το καθένα. Έτσι, δημιουργούνται τα αρχεία που σχετίζονται με το έδαφος, τα χαρακτηριστικά λεκανών, τη

διόδευση, το υπόγειο νερό, τη διαχείριση νερού, τη διαχείριση εδάφους, τα χημικά, τα αναχώματα και αρχεία που σχετίζονται με την ποιότητα του νερού. Το SWAT δημιουργεί για κάθε μια τέτοια κατηγορία, πλήθος αρχείων ίσο με τον αριθμό των HRU.

Το τέταρτο στάδιο υλοποιείται μέσα από το μενού 'Edit SWAT Input' στο οποίο γίνεται η διόρθωση όλων των αρχείων που δημιουργεί το μοντέλο. Θα πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι πολλές από τις κατηγορίες αρχείων συχνά δεν απαιτούν βελτιστοποίηση, ενώ σε άλλες η βελτιστοποίηση μπορεί να ομαδοποιηθεί, ή να χρησιμοποιηθεί ένα μόνο αντιπροσωπευτικό αρχείο για όλα τα HRU. Η αλλαγή των αρχείων αυτών μπορεί να γίνει εύκολα μέσα από τα μενού του προγράμματος, ή και με τη βοήθεια ενός απλού επεξεργαστή κειμένου.

Το πέμπτο και τελευταίο στάδιο εφαρμογής του μοντέλου περιέχει τις διαδικασίες εκτέλεσης των τρεξιμάτων της προσομοίωσης που γίνεται μέσα από το μενού 'SWAT Simulation'. Το ίδιο στάδιο περιλαμβάνει και την ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Πολύ ευκολότερα και ακριβέστερα γίνεται η ανάγνωση των αποτελεσμάτων με το άνοιγμα της βάσης δεδομένων που δημιουργείται μετά το τρέξιμο του μοντέλου. Τα αρχεία αυτά μπορούν εύκολα να διαβαστούν ή ακόμα καλύτερα μπορούν να μετατραπούν σε αρχεία Excel και να υποστούν επεξεργασία ευκολότερα.

7.3.1 Δεδομένα εισόδου

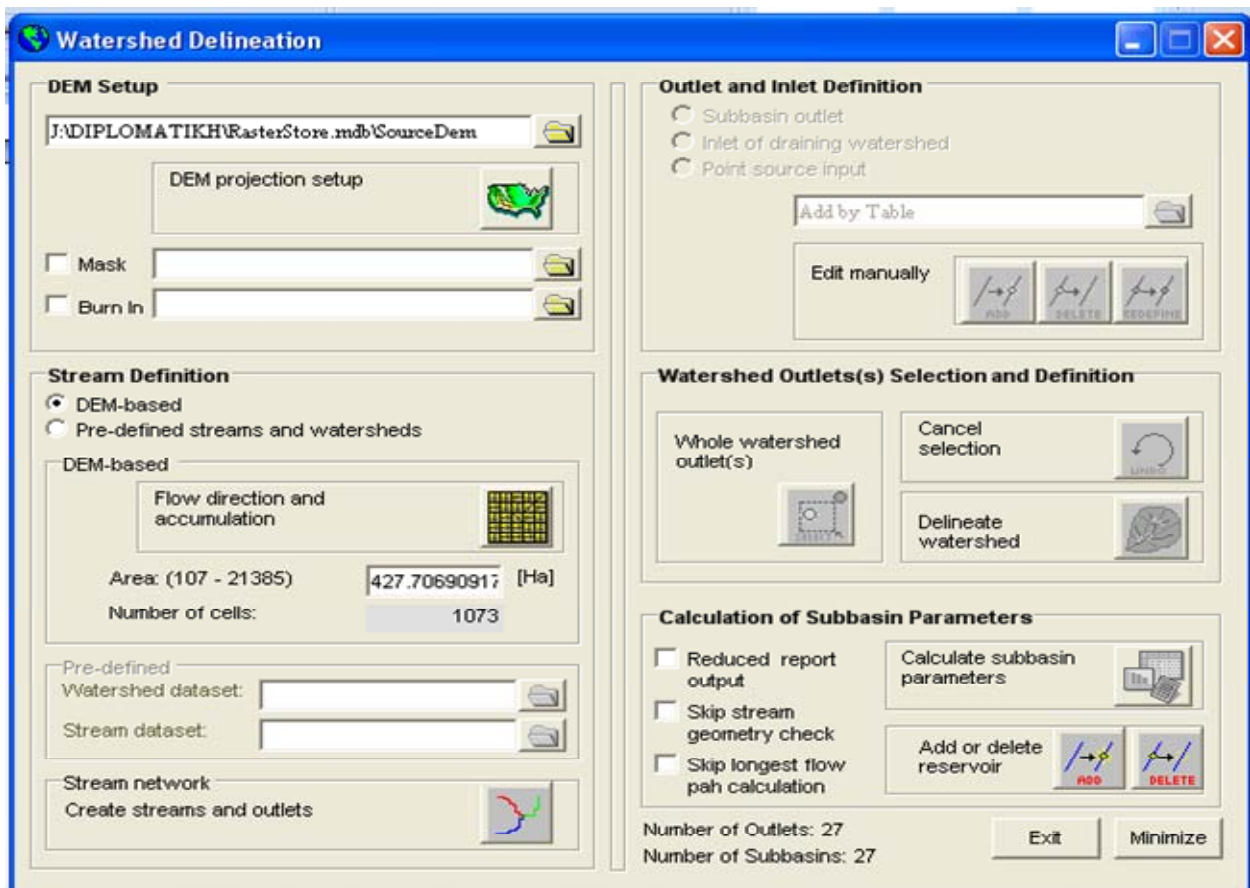
Η σωστή συλλογή και προετοιμασία των δεδομένων εισόδου έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στη διαδικασία της μοντελοποίησης. Σε ένα βαθμό μάλιστα, η διαθεσιμότητα των δεδομένων καθορίζει και την επιλογή του μοντέλου και τα όρια της περιοχής μελέτης. Παρακάτω δίνεται μια ολόκληρη εικόνα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ ταυτόχρονα παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την πηγή προέλευσής τους, την ποιότητα και την επάρκειά τους.

Παρακάτω αναλύονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για είσοδο στο πρόγραμμα SWAT, στην περίπτωση της υπό μελέτης λεκάνης καθώς και οι ειδικές ρυθμίσεις των παραμέτρων του προγράμματος ώστε να εξαγόμενα αποτελέσματα να προσεγγίζουν τα παρατηρημένα. Αν και οι ρυθμίσεις αυτές αναφέρονται μόνο στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, η λογική των ρυθμίσεων και οι παράμετροι που εξετάζονται θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή και σε άλλες λεκάνες απορροής.

➤ Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι στην ουσία ένας κλίμακας με περασμένη την τιμή του υψομέτρου σε κάθε σημείο. Το SWAT χρησιμοποιεί το μοντέλο εδάφους για τον υπολογισμό των κλίσεων και, συνεπώς, της κατεύθυνσης ροής του επιφανειακού νερού. Για τον καθορισμό της φοράς κίνησης από κάθε σημείο λαμβάνονται υπόψη 8 γειτονικά σημεία και η κίνηση γίνεται προς την κατεύθυνση που δίνει τη μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά (Neitsch et al., 2005).

Η φόρμα εισαγωγής δεδομένων που χρησιμοποιεί το μοντέλο φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 7.2: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων του SWAT

Αρχικά φορτώνουμε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που δημιουργήθηκε νωρίτερα, όπως περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, ύστερα από ψηφιοποίηση των χαρτών της Γ.Υ.Σ. Το μοντέλο, στην πορεία, δημιουργεί μόνο του το υδατόρευμα, με βάση την κίνηση του νερού. Απαραίτητο βήμα για τη συνέχεια είναι ο ορισμός του σημείου εξόδου της λεκάνης απορροής. Αυτό τοποθετήθηκε στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Γέφυρα Βαρβαριάδος μιας και εκεί υπήρχαν αξιόπιστες μετρήσεις της απορροής του ποταμού. Σε επόμενο βήμα, ύστερα από εντολή μας, το μοντέλο χωρίζει την κύρια λεκάνη σε υπολεκάνες. Όπως φαίνεται εδώ η κύρια λεκάνη της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίστηκε σε 27 υπολεκάνες για τις οποίες υπολογίζει και κάποια στατιστικά στοιχεία όπως το εμβαδό, το μέγιστο, μέσο και ελάχιστο υψόμετρο κ.α.

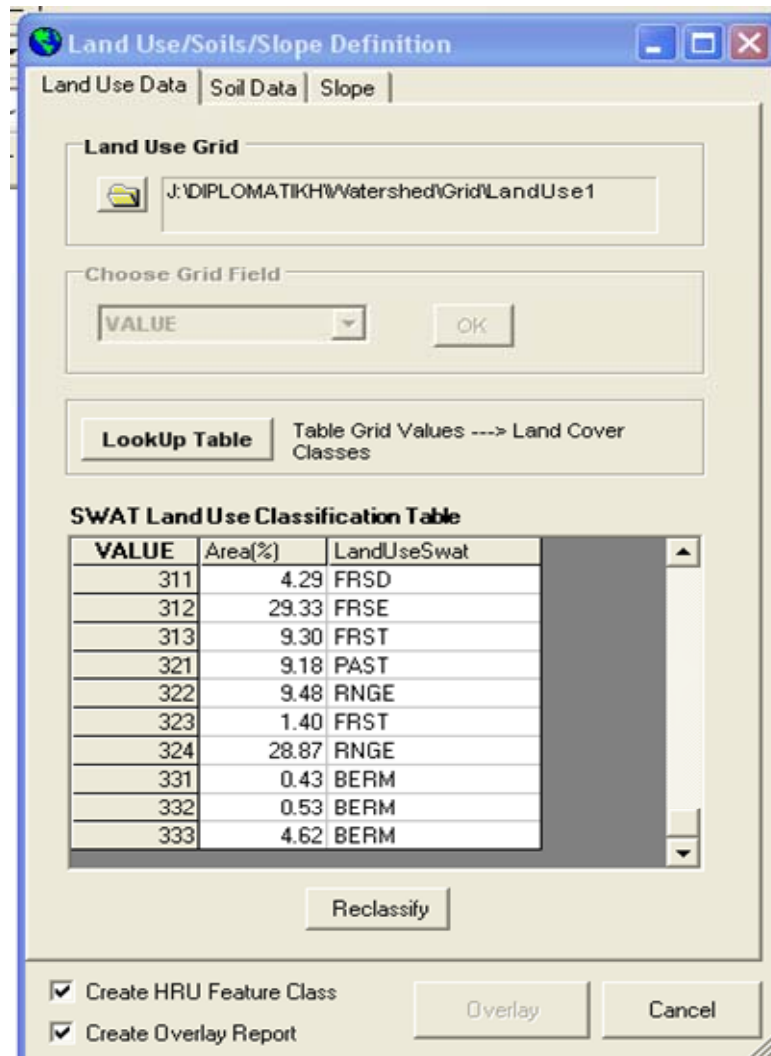
Ο χάρτης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, όπως ακριβώς αυτό εισήχθη στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β στο Σχήμα 17. Στο ίδιο Παράρτημα παρουσιάζονται επίσης οι χάρτες που απεικονίζουν:

1. το υδρογραφικό δίκτυο όπως σχεδιάστηκε από το μοντέλο
2. τις υπολεκάνες που σχηματίστηκαν από το μοντέλο
3. τα σημεία σύνδεσης των κλάδων του ποταμού όπως επιλέχθηκαν από το μοντέλο και το σημείο εξόδου της λεκάνης που επιλέχθηκε χειροκίνητα

Όλα αυτά παρουσιάζονται στα σχήματα 18, 19 και 20 του Παραρτήματος Β.

➤ Χρήσεις γης

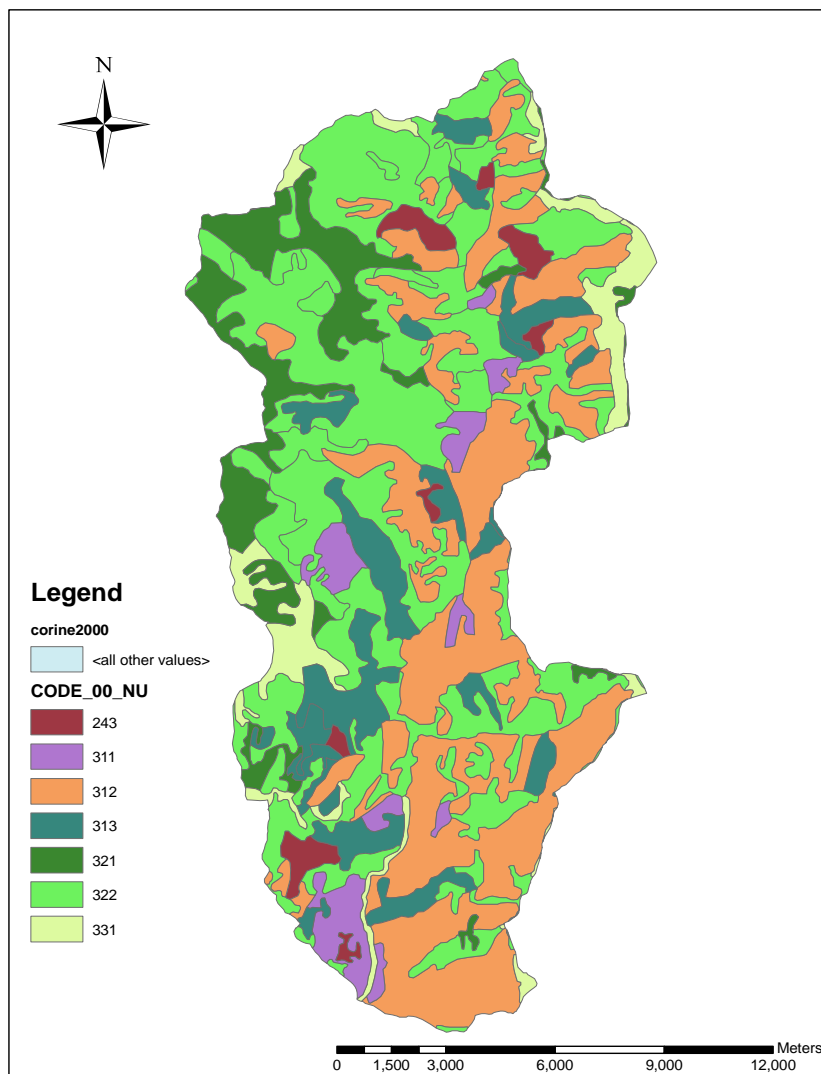
Στις χρήσεις γης εισήχθησαν τα δεδομένα που προετοιμάστηκαν από το ArcGIS σε προηγούμενο στάδιο. Το αρχείο που περιέχει τον κάρτα των χρήσεων γης είναι αυτό που προέκυψε από το Corine με τη διαδικασία που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Απαιτήθηκε όμως μετατροπή των χρήσεων γης κατά Corine σε χρήσεις γης κατά SWAT. Η διαδικασία αυτή έγινε μέσα από το περιβάλλον του προγράμματος με τη φόρμα των χρήσεων γης.



Σχήμα 7.3: Φόρμα αντιστοίχισης χρήσεων γης στο SWAT

Όπως φαίνεται και παραπάνω κάθε χρήση γης κατά Corine έχει αντιστοιχηθεί με μία χρήση γης κατά SWAT.

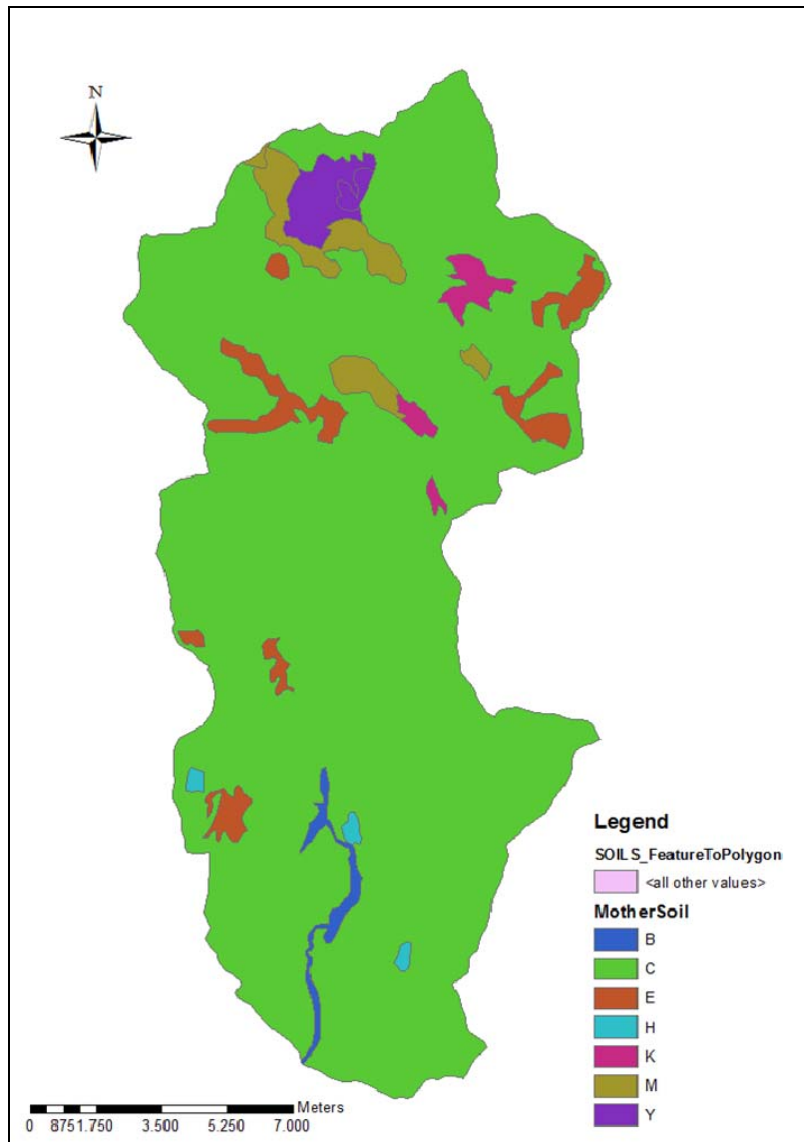
Ο χάρτης που προκύπτει είναι ο εξής:



Σχήμα 7.4: Τελικές χρήσεις γης

➤ Στοιχεία εδάφους

Τα εδαφολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής ελήφθησαν από αναλογικό χάρτη του Ινστιτούτου Δασικών Ερευνών, σε κλίμακα 1:50 000 ο οποίος ψηφιοποιήθηκε για να εισαχθούν στο πρόγραμμα τα αντίστοιχα πολύγωνα των εδαφών. Ο χάρτης που προέκυψε είναι ο παρακάτω:



Σχήμα 7.5: Πολύγωνα εδαφών της περιοχής όπως ακριβώς ψηφιοποιήθηκαν από τους χάρτες του ΙΔΕ

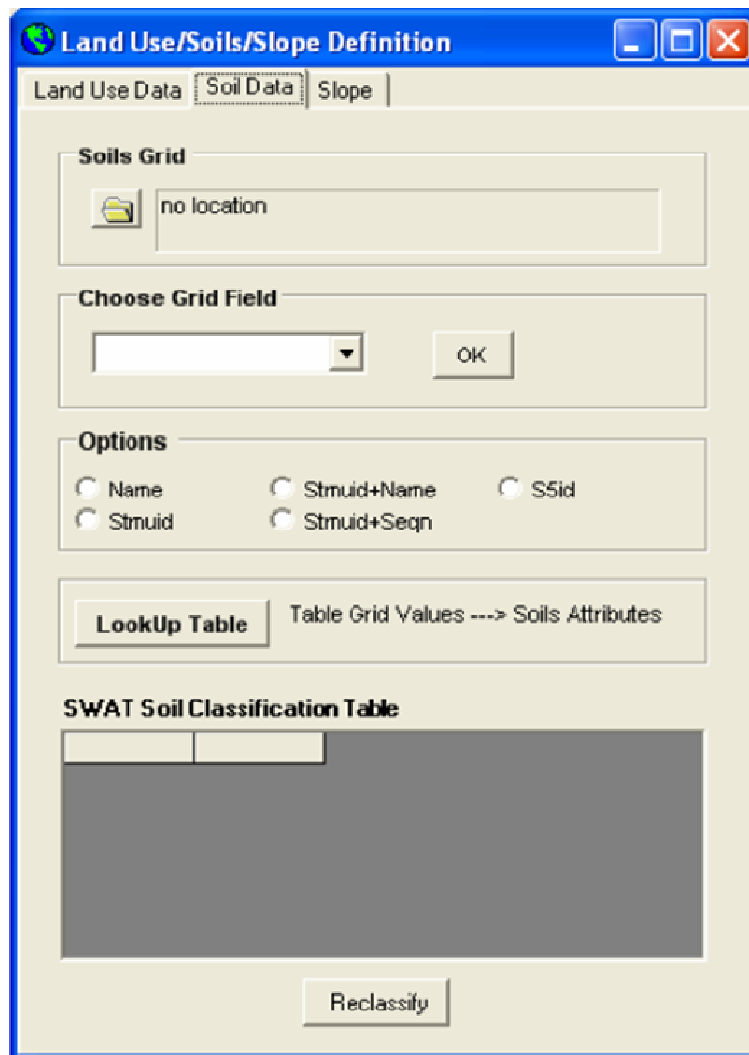
Οι ιδιότητες των εδαφών αυτών που απαιτεί το πρόγραμμα υπολογίστηκαν από τις εδαφοτομές που είχαν γίνει εντός της υπό μελέτης λεκάνης από τον ίδιο φορέα (Ι.Δ.Ε). Οι εδαφοτομές αυτές που υπήρχαν μέσα στη λεκάνη ήταν 4, και οι 4 έδιναν στοιχεία για μητρικό υλικό που αποτελείται από σκληρούς ασβεστόλιθους - βαθιά εδάφη που ήταν και το επικρατέστερο μητρικό υλικό σύμφωνα με το χάρτη που δόθηκε για τη συγκεκριμένη λεκάνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90% (όπως φαίνεται και στον παραπάνω χάρτη). Έτσι, λόγω έλλειψης στοιχείων, επιλέχτηκε ένα μόνο μητρικό υλικό, αυτό που αποτελείτε από σκληρούς ασβεστόλιθους - βαθιά εδάφη μιας και το ποσοστό επικρατείας του το επιτρέπει.

Τα στοιχεία του συγκεκριμένου εδάφους που συλλέχθηκαν από τις 4 εδαφοτομές, για λόγους απλότητας και λόγω ενιαίου τελικά εδάφους στη περιοχή, συμπίχτηκαν τελικά σε στοιχεία μιας εδαφοτομής. Άλλωστε παλαιότερες μοντελοποιήσεις του SWAT (Πικούνης, 2000), έδειξαν ότι το μοντέλο δεν είναι τόσο ευαίσθητο στην ακρίβεια με την οποία ορίζονται τα εδαφολογικά στοιχεία.

Τα στοιχεία αυτά περάστηκαν σε βάση δεδομένων μέσα στο πρόγραμμα. Η βάση δεδομένων για τα εδάφη προσδίδει ορισμένα χαρακτηριστικά στο έδαφος στο οποίο αναφέρεται. Τέτοιο είναι, για παράδειγμα το βάθος ριζοστρώματος για τα εδάφη, το οποίο έχει εδώ την τιμή 1500 mm. Το αρχείο χωρίζει το έδαφος μέχρι το βάθος ριζοστρώματος σε 3 επίπεδα, βάθους 500 mm το καθένα. Αναφέρει ότι το έδαφος ανήκει στην υδρολογική ομάδα Β. Ορίζει ποσοστό οργανικού άνθρακα ίσο με 1% και ειδικό βάρος (Bulk Density) για υγρό έδαφος ίσο με 1.55 g/cm³. Το τελευταίο υπολογίστηκε από πίνακα που ονομάζεται Πίνακας Ειδικού Βάρους για Υγρό Έδαφος (Mineral Bulk Density Chart) κατασκευασμένο από τους Rawls and Brakensiek (1985). Δίνει, επίσης, ποσοστό του πετρώματος που περνά από κόσκινο 2 mm ίσο με 5%. Ταυτόχρονα, ορίζει τη λευκαύγεια της εδαφικής επιφάνειας (albedo) ίση με 0.06 και το συντελεστή διάβρωσης (Erosion K) ίσο με 0.43. Δίνει, επίσης, διαθέσιμη εδαφική υγρασία για τα φυτά (SOL_AWC ή Ave. AW) ίση με 0.31 (σε mm H₂O/mm εδάφους).

Όλα αυτά, παρουσιάζονται σε ένα πίνακα περιεχομένου ενός τυπικού αρχείου εδάφους. Στον πίνακα φαίνονται επίσης και άλλα χαρακτηριστικά των ασβεστολιθικών μητρικών υλικών όπως είναι η περιεκτικότητα % σε άμμο, ιλύ και άργιλο, η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K ή Ksat). Αξίζει να αναφερθεί ότι για ορισμένα από αυτά τα στοιχεία ανατρέξαμε σε μεταπτυχιακές εργασίες (Πικούνης, 2002) γιατί δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή τους από τις εδαφοτομές.

Η φόρμα μέσα από την οποία εισάγαμε τα στοιχεία εδάφους στο πρόγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 7.6: Φόρμα εισαγωγής στοιχείων εδάφους στο SWAT

➤ Κλίσεις

Το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής και οι κλίσεις των διαφόρων επιφανειών της επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες βροχόπτωσης – απορροής. Πιο συγκεκριμένα, σε λεκάνες με ομαλό ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις, ο χρόνος συγκέντρωσης του περισεύματος βροχής είναι μικρός και, κατά συνέπεια, και η πιθανότητα διήθησης μειώνεται σημαντικά. Έτσι, τα υδρογραφήματα στο στόμιο της λεκάνης χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική βάση, απότομες καμπύλες ανόδου και καθόδου και υψηλές πλημμυρικές αιχμές. Ακόμα, ομαλό ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις των λεκανών συντελούν στην αύξηση των φερτών υλικών στο στόμιό τους (Chorley, 1979), ενώ, τα αντίθετα χαρακτηριστικά από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω παρατηρούνται στα υδρογραφήματα λεκανών με ομαλό ανάγλυφο και μικρές κλίσεις.

Η έκφραση του αναγλύφου και των κλίσεων της λεκάνης παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες που απορρέουν από την επιδίωξη έκφρασης τρισδιάστατων μεταβολών με απλούς δείκτες. Προς την κατεύθυνση αυτή έγιναν πολλές προσπάθειες και σήμερα τα χαρακτηριστικά αυτά των λεκανών εκφράζονται με απλούς δείκτες, με συνδυασμένους δείκτες, καθώς και με επιλεγμένες μετρήσεις των κλίσεων. Από αυτούς, οι απλοί δείκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκτίμηση της μέσης κλίσης και ο βαθμός αναγλύφου R_h για την έκφραση του αναγλύφου της. Όμως, κανένας από τους τρόπους που αναφέρθηκαν δεν καταδεικνύει την

κατανομή του αναγλύφου και των κλίσεων στην επιφάνεια της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι κατανομής των χαρακτηριστικών αυτών και μία από αυτές είναι η κατασκευή ειδικών χαρτών που προέρχονται από τους αντίστοιχους τοπογραφικούς.

Για την αναπαράσταση του αναγλύφου και των κλίσεων της λεκάνης απορροής του ποταμού Αγραφιώτη επιλέχθηκε να μην γίνει χρήση κάποιου από τους παραπάνω δείκτες αλλά να δημιουργηθεί ένας χάρτης κλίσεων (βλ. Παράρτημα Β, Σχήμα 21).

Ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε μέσω της φόρμας του προγράμματος για τις κλίσεις η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

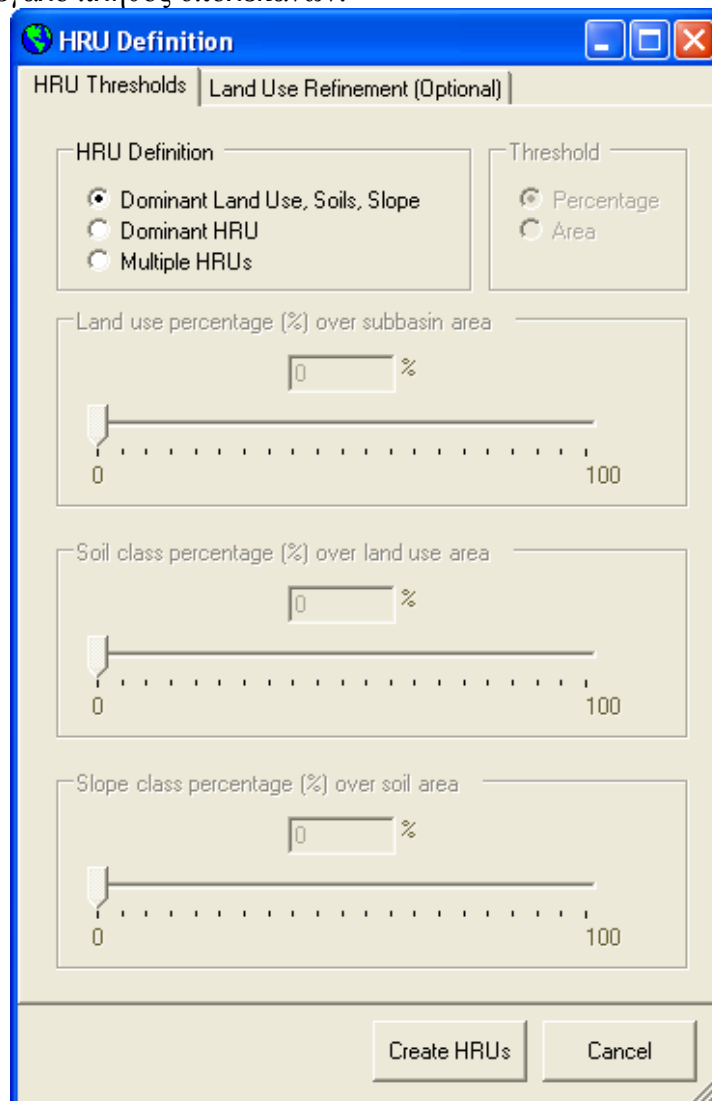
The screenshot shows the 'Land Use/Soils/Slope Definition' window with the 'Slope' tab selected. Under 'Slope Discretization', 'Single Slope' is chosen. The 'Slope Stats' for the watershed are: Min: 0.00, Mean: 5.9, Max: 114, Median: 2.8. The 'Slope Classes' section includes a dropdown for 'Number of Slope Classes' and an 'Add' button. The 'SWAT Slope Classification Table' is empty. A 'Reclassify' button is located at the bottom of the window.

Σχήμα 7.7: Φόρμα εισαγωγής κλίσεων στο πρόγραμμα SWAT

Το πρόγραμμα SWAT δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει και έναν τέτοιο ψηφιακό χάρτη με τις διάφορες κλίσεις της υπό μελέτη λεκάνης, όπως προαναφέρθηκε. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να χωριστεί η λεκάνη απορροής σε 3 ζώνες 0 - 5, 5 - 20, 20 - 55 ανάλογα με την κλίση του εδάφους.

➤ Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU)

Το μοντέλο SWAT έχει τη δυνατότητα να διαχωρίζει τη λεκάνη απορροής και τις υπολεκάνες σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης, μικρότερα δηλαδή τμήματα με κοινά χαρακτηριστικά χρήσεων γης, εδαφικών χαρακτηριστικών και κλίσεων. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται αυτόματα από το μοντέλο με βάση την επίθεση των ψηφιακών χαρτών χρήσεων γης και εδαφών. Το μόνο που ορίζει ο χρήστης είναι το ελάχιστο ποσοστό της υπολεκάνης που πρέπει να καταλαμβάνει μια χρήση γης, ένας εδαφικός τύπος και μια κλίση, ώστε να οριστεί μια ξεχωριστή μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Ορίζει δηλαδή το πόσο συγκεντρωτική ή καταναμημένη μορφή αποκτά το μοντέλο. Μπορεί, επίσης να επιλεγεί η χρήση ενός μόνο HRU σε κάθε υπολεκάνη. Η επιλογή αυτή συνίσταται μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος υπολεκανών.



Σχήμα 7.8: Φόρμα διαχωρισμού της λεκάνης σε HRU

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του Αγραφιώτη, χρησιμοποιήθηκε αρκετά μεγάλη ανάλυση σε HRUs, ορίζοντας το ελάχιστο ποσοστό για τον ορισμό νέας μονάδας σε 5% για τις χρήσεις γης, 10% για το έδαφος και 10% για τις κλίσεις. Με τη ρύθμιση αυτή το πρόγραμμα δημιούργησε 449 μονάδες υδρολογικής απόκρισης για τη λεκάνη, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των ψηφιακών χαρτών.

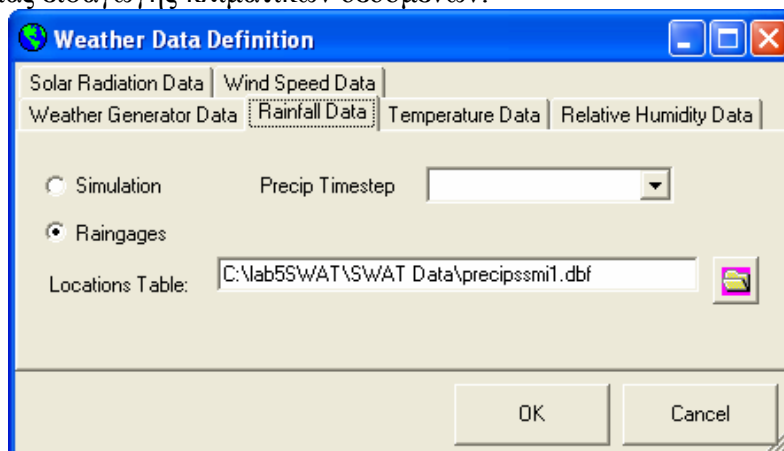
Ο χάρτης που δημιουργήθηκε από το χωρισμό της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 22 του Παραρτήματος Β.

➤ Κλιματικά δεδομένα

Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη λεκάνη απορροής του Αγραφιώτη αφορούν σε τιμές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και θερμοκρασίας. Τα στοιχεία αυτά ελήφθησαν από υδρομετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής και παραχωρήθηκαν σε μη επεξεργασμένη μορφή από τη Δ.Ε.Η. Η λήψη των βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων έγινε κατά τη διάρκεια εκπόνησης παλαιότερων μελετών. Η επεξεργασία τους, όμως, καθώς και η λήψη άλλων δεδομένων όπως η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία (τα τελευταία μεγέθη δεν χρησιμοποιήθηκαν γιατί υπήρχαν αρκετές ελλείψεις) έγιναν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

a) Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

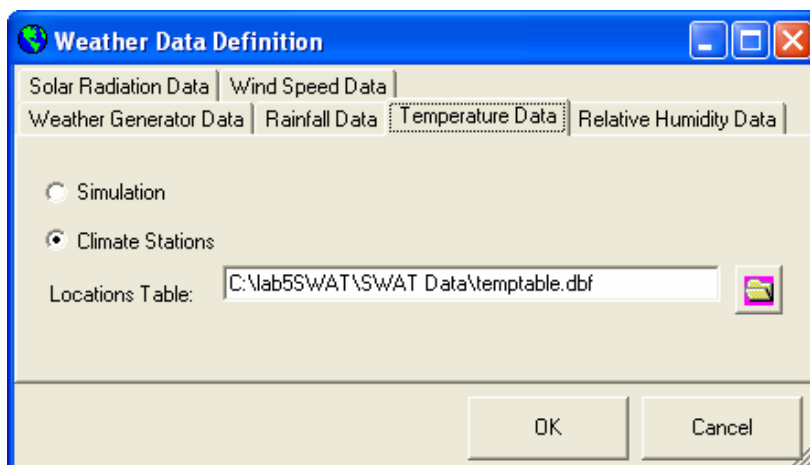
Τα στοιχεία των σταθμών ελήφθησαν σε μορφή αρχείου .pdf. Το περιεχόμενο των αρχείου αυτού ήταν παλιά αρχεία γραφομηχανής τα οποία με κατάλληλη επεξεργασία περάστηκαν στο Excel. Το δεύτερο βήμα ήταν η συμπλήρωση τους μιας και τα στοιχεία αυτά ήταν σε πρωτογενή μορφή με ελλιπείς ημερήσιες χρονοσειρές. Στη συνέχεια, έγινε αναγωγή των σταθμών αυτών σε έναν, με μέσο υψόμετρο το σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών, με συντελεστές βάρους τους συντελεστές Thiessen. Τα δεδομένα για την τοποθεσία του μέσου σταθμού και του τελικού αρχείου δεδομένων βροχοπτώσεων (pcp_new.dbf), εισήχθησαν στο αρχείο precipssmi1.dbf, η τοποθεσία του οποίου στο δίσκο δόθηκε στο πρόγραμμα μέσω της παρακάτω φόρμας εισαγωγής κλιματικών δεδομένων.



Σχήμα 7.9: Φόρμα εισαγωγής βροχομετρικών δεδομένων

b) Θερμοκρασία αέρα

Και πάλι έγινε αναγωγή των δεδομένων στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής με χρήση αυτή τη φορά της θερμοβαθμίδας. Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν στο αρχείο tmp_new.dbf και το πρόγραμμα κατευθύνεται σε αυτό με τη βοήθεια του αρχείου temptable.dbf. Η τοποθεσία του αρχείου αυτού δόθηκε στο πρόγραμμα μέσα από την παρακάτω φόρμα εισαγωγής κλιματικών δεδομένων.



Σχήμα 7.10: Φόρμα εισαγωγής θερμοκρασιακών δεδομένων

7.3.2 Βαθμονόμηση του SWAT

Πέρα από την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων, το πρόγραμμα απαιτεί την κατάλληλη βαθμονόμηση ώστε να προσαρμοστεί στην υπό εξέταση λεκάνη. Με τον όρο «βαθμονόμηση» νοούνται οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν με σκοπό να αποκτηθεί ένας προκαθορισμένος βαθμός ομοιότητας μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων πεδίου.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου μπορεί να χωριστεί σε δύο βήματα που επαναλαμβάνονται πολλές φορές για την κάθε παράμετρο. Αυτά είναι τα εξής:

1) Επιλογή των παραμέτρων βελτιστοποίησης

Με τον όρο 'βελτιστοποίηση' νοείται ο καθορισμός της τιμής των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση στόχου. Τα μοντέλα περιέχουν πολλές παραμέτρους και, έτσι, ο χρήστης καλείται να επιλέξει τις πιο σημαντικές από αυτές. Η επιλογή βασίζεται κυρίως στα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας. Οι παράμετροι που τελικά επιλέγονται προς βελτιστοποίηση πρέπει να έχουν σημαντική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου.

2) Επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης

Ο κύριος διαχωρισμός μεταξύ των μεθόδων βαθμονόμησης είναι σε δύο κατηγορίες, στη χειροκίνητη και στην αυτόματη βαθμονόμηση.

Η χειροκίνητη βαθμονόμηση γίνεται συνήθως με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους. Επιλέγονται διάφορες τιμές των παραμέτρων και συγκρίνονται κάθε φορά τα αποτελέσματα που εξάγει το πρόγραμμα με τις μετρημένες τιμές που διατίθενται. Αν και η χειροκίνητη βαθμονόμηση είναι δυσκολότερη και συνήθως δεν καταλήγει στο πραγματικά βέλτιστο, επιλέχθηκε εδώ γιατί πλεονεκτεί από την αυτόματη στο ότι ο χρήστης αποκτά μια καλύτερη εικόνα της λειτουργίας του μοντέλου.

Στην αυτόματη βαθμονόμηση το πρόγραμμα προσπαθεί να ταυτίσει τη μετρημένη με την προσομοιωμένη τιμή μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία. Ο χρήστης δεν απαιτείται να αλλάζει τις τιμές των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης αλλά ελέγχει τη διαδικασία από πριν αποφασίζοντας για παράδειγμα τα κριτήρια προσδιορισμού της συνάρτησης στόχου.

Με τη σωστή βαθμονόμηση, τα εξαγόμενα αποτελέσματα προσεγγίζουν τις τιμές των παρατηρημένων απορροών. Για να γίνει όμως αυτό, απαιτείται μεταβολή παραμέτρων του

προγράμματος είτε για όλα τα HRU συνολικά, είτε ξεχωριστά για το καθένα από αυτά. Η αλλαγή των κοινών παραμέτρων γίνεται μέσα από το μενού του προγράμματος. Για πιο εξεζητημένες παραμέτρους, όμως, απαιτείται αλλαγή των αρχείων στην πρωτογενή τους μορφή με τη βοήθεια κάποιου επεξεργαστή κειμένου. Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το μοντέλο και οι τιμές αυτών που επιλέχθηκαν τελικά για τη βαθμονόμηση της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχεία υπογείου νερού *.gw

Το SWAT κατηγοριοποιεί το υπόγειο νερό σε 2 κλάσεις. Αυτό που κινείται στον επιφανειακό, ελεύθερο υδροφορέα και επανατροφοδοτεί τα επιφανειακά υδατορεύματα και αυτό που κινείται στον βαθύ, περιορισμένο υδροφορέα και καταλήγει εκτός λεκάνης απορροής. Πάνω από τον επιφανειακό υδροφορέα, βρίσκεται η ζώνη του ριζοστρώματος. Τα αρχεία .gw ρυθμίζουν την κίνηση του υπογείου νερού μέσα σε αυτές τις στρώσεις αλλά και από τη μία στρώση στην άλλη. Οι σημαντικότερες παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτά τα αρχεία είναι:

1. Παράγοντας Άλφα (Alpha factor - ALPHA_BF): Η παράμετρος αυτή ρυθμίζει την καμπύλη στείρευσης της παροχής του υπογείου νερού. Μεταβάλλεται από 0 έως 1 και λαμβάνει μικρές τιμές (κοντά στο 0) για απότομη καμπύλη.
2. Χρόνος υστέρησης υπογείου νερού (GW_DELAY): Είναι ο χρόνος σε ημέρες που απαιτείται για το νερό που φεύγει από τον πυθμένα του ριζοστρώματος μέχρι να φτάσει στον επιφανειακό υδροφορέα. Πρόκειται για μια παράμετρο που επηρεάζει σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.
3. Συντελεστής επανατροφοδότησης (Revar coefficient - GW_REVAP): Η μεταβλητή αυτή ελέγχει τον όγκο του νερού που θα κινηθεί από το ρηχό υδροφορέα 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 αντιστρόφα. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.02 και 0.2.
4. Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP): Η παράμετρος αυτή ορίζει το ποσοστό του νερού της ζώνης ριζοστρώματος το οποίο τροφοδοτεί τον βαθύ υδροφορέα. Η τιμή του μεταβάλλεται από 0 έως 1.
5. Όριο νερού επανατροφοδότησης (REVAPMN): Πρόκειται για το ελάχιστο ύψος νερού (mm) στον επιφανειακό υδροφορέα ώστε να πραγματοποιηθεί κίνηση του νερού από αυτόν προς τη ζώνη ριζοστρώματος.
6. Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφορέα (GW_SPYLD): Είναι ο όγκος του νερού που αποστραγγίζεται με τη βοήθεια της βαρύτητας προς το συνολικό όγκο βράχου (m^3/m^3). Η παράμετρος αυτή έχει πολύ μικρή επίδραση στην απορροή.
7. Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN): Είναι το όριο του νερού στο ρηχό υδροφορέα (mm) που απαιτείται για να συμβεί επιστρέφουσα ροή. Η ροή του υπογείου νερού στο υδατόρευμα επιτρέπεται μόνο αν το βάθος του νερού στον επιφανειακό υδροφορέα είναι ίσο ή μεγαλύτερο του GWQMN.

Είναι προφανές ότι οι τιμές των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με μετρήσεις πεδίου και είναι, επίσης, δύσκολο να βρεθούν αρκετά δεδομένα που να διαφοροποιούν τις τιμές αυτές σωστά για κάθε HRU. Συνεπώς, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του υπογείου νερού προκύπτουν συνήθως με δοκιμές και ελέγχοντας το τελικό

υδατικό ισοζύγιο. Τα αρχεία του υπογείου νερού έχουν καθοριστική σημασία για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και η επιρροή που έχει ο κάθε παράγοντας αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχεία υπολεκανών *.sub

Τα αρχεία υπολεκανών περιέχουν παραμέτρους κυρίως σχετικά με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των μονάδων υδρολογικής απόκρισης. Η σημαντικότερη παράμετρος που περιέχεται σε αυτά και συνήθως χρειάζεται να ρυθμιστεί είναι ο αριθμός καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II. Η αρχική τιμή που προσδίδει το πρόγραμμα σε αυτήν την παράμετρο λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων cn.dbf και αποδίδεται σε όσα HRU έχουν την ίδια χρήση γης. Ο χρήστης μπορεί κατόπιν να επέμβει σε κάθε αρχείο sub και να αλλάξει αυτήν την παράμετρο που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιφανειακή απορροή. Εναλλακτικά, η επέμβαση θα μπορούσε να γίνει εξαρχής στο αρχείο cn.dbf.

Τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του HRU, όπως είναι η μέση κλίση του εδάφους, δημιουργούνται με βάση τους ψηφιακούς χάρτες και συνήθως δεν χρειάζεται να αλλαχθούν από το χρήστη. Αλλαγή συνήθως δεν απαιτείται και για τους συντελεστές Manning, αλλά ούτε και για την τιμή της θερμοβαθμίδας ($6^{\circ}\text{C}/\text{km}$) η οποία είναι αντιπροσωπευτική για τις ελληνικές συνθήκες. Αναλυτικά οι κύριες παράμετροι που περιλαμβάνονται σε ένα τέτοιο αρχείο είναι οι ακόλουθες:

1. Αριθμός καμπύλης CN_{II}: Οι αριθμοί αυτοί διαβάζονται από το αρχείο δεδομένων cn.dbf ανάλογα με τη χρήση γης που επικρατεί στη μονάδα υδρολογικής απόκρισης και αντιστοιχούν στην υδρολογική κατάσταση II. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, οι αριθμοί CN προσαρμόζονται ανάλογα με την εκάστοτε υγρασία εδάφους, αλλά και με βάση την κλίση του εδάφους. Αύξηση του αριθμού καμπύλης συνεπάγεται αύξηση της επιφανειακής απορροής και, κατά συνέπεια, αύξηση των πλημμυρικών αιχμών.
2. Μέση κλίση υδατορευμάτων: Έχει την ίδια τιμή για όλα τα HRU σε μια υπολεκάνη. Υπολογίζεται κατά προσέγγιση από το πρόγραμμα λαμβάνοντας υπόψη την υψομετρική διαφορά του πιο απομακρυσμένου σημείου της υπολεκάνης και της εξόδου της υπολεκάνης.
3. Υδραυλική αγωγιμότητα κοίτης: Πρόκειται για το ρυθμό με τον οποίο διηθείται το νερό που κινείται στα υδατορεύματα, μέσα στο έδαφος δια της αλλουβιακής κοίτης. Η τιμή δίνεται σε mm/h και απαιτείται μείωση όταν ο χρήστης κρίνει ότι οι απώλειες του νερού που κινείται στα υδατορεύματα είναι πολύ μεγάλες και αντίστροφα.
4. Αριθμός Manning: Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί διαφορετικούς συντελεστές Manning για τη ροή μέσα στα υδατορεύματα και για την επίγεια ροή. Η προεπιλεγμένη τιμή της πρώτης είναι φυσικά αρκετά μικρότερη και ίση με 0.014 ενώ της δεύτερης ίση με 0.15.
5. Μέση κλίση εδάφους: Πρόκειται για την κλίση του εδάφους σε m/m. Η τιμή αυτή είναι ίδια για όλα τα HRU σε μια υπολεκάνη. Έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενες χρήσεις του μοντέλου ότι αλλαγή της τιμής της κλίσης του εδάφους μπορεί να βελτιώσει την προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών. Πρόκειται για μια τεχνητή παρέμβαση στην μοντελοποίηση, η οποία στην παρούσα βαθμονόμηση, που έχει μόνο ποσοτικό χαρακτήρα, δεν έγινε.
6. Θερμοβαθμίδα: Είναι η μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας ανά 1000 m υψομέτρου. Πρέπει να έχει την ίδια τιμή για κάθε HRU στην υπολεκάνη.

7. Συντελεστής ESCO: Η μεταβλητή αυτή ρυθμίζει την κατανομή της εξάτμισης από το έδαφος με το βάθος, για να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως είναι η επίδραση των τριχοειδών φαινομένων και ρωγμών. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 και εισάγεται χωριστά σε κάθε αρχείο τύπου .sub μιας και η προεπιλογή του μοντέλου είναι να μην αποδίδει τιμή σε αυτήν την παράμετρο.

Αρχεία εδάφους *.sol

Τα αρχεία εδάφους περιέχουν όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την εδαφική σύσταση της περιοχής. Οι παράμετροι που περιέχονται σε ένα αρχείο .sol και λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση, είναι οι συνηθέστερες εδαφικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται διεθνώς σε εδαφολογικές μελέτες. Σπάνια όμως θα βρει κανείς όλες τις παραπάνω πληροφορίες για κάθε περιοχή της Ελλάδος.

Τα αρχεία εδάφους επηρεάζουν την προσομοίωση σε ό,τι αφορά στο υδατικό ισοζύγιο όπου υπεισέρχονται παράγοντες όπως η διαπερατότητα του εδάφους και η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα. Οι σημαντικότερες παράμετροι των αρχείων εδάφους είναι:

1. Το μέγιστο βάθος ριζοστρώματος: Η παράμετρος αυτή εισάγεται στις διεργασίες κίνησης του υπογείου νερού κατακόρυφα.
2. Το μέγιστο βάθος στρώσης: Το SWAT δίνει τη δυνατότητα διαχωρισμού του εδαφικού προφίλ μέχρι και σε 10 διαφορετικές στρώσεις, έτσι ώστε να αντιστοιχηθούν διαφορετικά χαρακτηριστικά στο καθένα. Η διαίρεση αυτή αντιστοιχεί στο χωρισμό των εδαφών σε ορίζοντες που γίνεται στη γεωπονία. Συνήθως, χρησιμοποιούνται 3 ή 4 διαφορετικές στρώσεις και αρκετές παράμετροι του εδάφους αυξάνονται ομοιόμορφα με το βάθος (π.χ., μείωση της αγωγιμότητας με το βάθος). Το μέγιστο βάθος στρώσης είναι η απόσταση του κάτω ορίου της στρώσης από την επιφάνεια.
3. Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC): Πρόκειται για σημαντική παράμετρο του υδατικού ισοζυγίου. Είναι ο όγκος νερού που διατίθεται στα φυτά, όταν το έδαφος βρίσκεται σε υδατοϊκανότητα. Υπολογίζεται ως νερό που ελευθερώνεται μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μόνιμης μάρανσης.
4. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K): Περιγράφει την ευκολία κίνησης του νερού στο έδαφος όταν είναι κορεσμένο, συνδέοντας την ταχύτητα ροής του νερού στο έδαφος με την εδαφική κλίση. Αύξηση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας συνήθως συνεπάγεται μικρή αύξηση της συνολικής απορροής της λεκάνης.
5. Η περιεκτικότητα σε ιλύ, άμμο και άργιλο: Η αναλογία που αυτά τα βασικά συστατικά του εδάφους συνιστούν το υπό εξέταση έδαφος ενδιαφέρει κυρίως στη βαθμονόμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Εκτός από τα παραπάνω αρχεία, που περιέχουν τις σημαντικότερες μεταβλητές του προγράμματος, υπάρχουν και άλλα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω

Αρχεία διαχείρισης *.mgt

Τα αρχεία αυτά όπως και τα αρχεία .wus στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Συνοψίζουν δηλαδή τις πρακτικές διαχείρισης του νερού και του εδάφους στη λεκάνη απορροής. Τα αρχεία .mgt περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τη σπορά, την άρδευση, το θερισμό καθώς επίσης και την εφαρμογή φυτοφαρμάκων και εντομοκτόνων στις σοδειές. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να προγραμματιστούν με βάση την ημερομηνία. Τα αρχεία αυτά επηρεάζουν σημαντικά την προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του κύκλου και έχουν μεγάλη

σημασία όταν το μοντέλο εφαρμόζεται σε μικρές αγροτικές λεκάνες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν υπήρξε καμία ενασχόληση με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά οπότε τα αρχεία αυτά δε μεταβλήθηκαν.

Αρχεία διαχείρισης νερού *.wus

Τα αρχεία αυτά περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται μέσα στη λεκάνη απορροής. Το νερό που απομακρύνεται υποτίθεται ότι χάνεται από το σύστημα. Τα αρχεία αυτά χρησιμεύουν στην προσομοίωση της ποσότητας του νερού αυτού που χάνεται για άρδευση περιοχών εκτός της λεκάνης απορροής ή για αστικές και βιομηχανικές χρήσεις. Περιέχουν πληροφορία σχετικά με τη μέση ημερήσια απόληψη νερού από ταμειυτήρες, από το τμήμα υδατορεύματος που βρίσκεται σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης και από το ρηχό υδροφορέα, για κάθε μήνα.

Αρχεία χημικών εδάφους *.chm

Τα αρχεία αυτά αποτελούν συνέχεια των αρχείων .sol και δίνουν πρόσθετες χημικές ιδιότητες στην πρώτη εδαφική στρώση. Παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις περιπτώσεις που λαμβάνεται υπόψη και η ποιοτική συνιστώσα του μοντέλου. Έχουν πληροφορίες σχετικά με την αρχική συγκέντρωση σε εντομοκτόνα, οργανικό άζωτο και άνθρακα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα αρχεία αυτά δε μεταβλήθηκαν, όπως ακριβώς έγινε και με τα αρχεία .mgt.

Αρχεία υδατορεύματος *.rte

Τα αρχεία υδατορεύματος περιέχουν εκείνα τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος που επηρεάζουν τη ροή του νερού και τη μεταφορά φερτών και εντομοκτόνων. Μέσα σε αυτά τα αρχεία υπάρχουν παράμετροι όπως η γεωμετρία των αγωγών, η σταθερά Manning, η υδραυλική αγωγιμότητα κοίτης του υδατορεύματος, αλλά και παράμετροι που σχετίζονται με την ταχύτητα διάχυσης, αντίδρασης και αποικοδόμησης των εντομοκτόνων κατά την κίνησή τους στο υδατόρευμα.

Αρχεία αναχωμάτων *.pnd

Τα αρχεία αυτά περιγράφουν τη λειτουργία των μικρών αναχωμάτων κατά μήκος του υδατορεύματος. Τα αναχώματα αυτά υπερχειλίζουν όταν υπερβληθεί η χωρητικότητά τους. Με τη βοήθεια των αρχείων αυτών προσομοιώνεται και η συγκράτηση φερτών αλλά και οι διεργασίες αποικοδόμησης των θρεπτικών.

Αρχεία ποιοτικών χαρακτηριστικών υδατορεύματος *.swq

Τα αρχεία αυτά περιέχουν ποιοτικές πληροφορίες για το νερό στα υδατορέυματα όπως είναι οι αρχικές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου, αμμωνίας, νιτρικών, φωσφόρου, αλγών, BOD κτλ. Ο ρόλος του αφορά αποκλειστικά και μόνο την ποιοτική συνιστώσα του μοντέλου.

Εξατμισοδιαπνοή

Το μοντέλο SWAT παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής τριών διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Αυτές είναι οι Penman-Monteith, Priestley-Taylor και Hargreaves. Με δοκιμές διαπιστώθηκε ότι καλύτερα αποτελέσματα, στην παρούσα βαθμονόμηση, δίνει η τελευταία μέθοδος και αυτή είναι που χρησιμοποιήθηκε τελικά.

Οι περισσότερες από τις παραμέτρους αυτές επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τελική απορροή που δίνει το μοντέλο. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης του μοντέλου, της εύρεσης δηλαδή των βέλτιστων τιμών της βαθμονόμησής του στην υπό εξέταση λεκάνη, έχει

διεξαχθεί στο παρελθόν μια σύντομη ανάλυση ευαισθησίας των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων παραμέτρων (Πικούνης, 2002). Με τον όρο ‘ανάλυση ευαισθησίας’ νοείται ο συστηματικός έλεγχος της συμπεριφοράς του μοντέλου, ως αντίδραση στις αλλαγές στα δεδομένα εισόδου, τις αρχικές συνθήκες και τις παραμέτρους. Αυτή μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα (όπως στην προκειμένη περίπτωση) είτε χρησιμοποιώντας προγράμματα που είναι κατασκευασμένα ειδικά γι’ αυτό το σκοπό. Η ανάλυση ευαισθησίας διερευνά τη συμπεριφορά του μοντέλου και όχι μόνο εντοπίζει τυχόν λάθη στη λειτουργία του, αν υπάρχουν, αλλά ταυτόχρονα βοηθά στη βαθμονόμηση που ακολουθεί. Συνήθως, δίνονται ρεαλιστικές αλλαγές στα δεδομένα εισόδου και μάλιστα αυτές συνήθως είναι ένα σταθερό ποσοστό της παραμέτρου που εξετάζεται. Κάθε παράμετρος εξετάζεται ξεχωριστά ή σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους.

Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη διεξαγωγή της ανάλυσης ευαισθησίας. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξής:

- Ανάλυση ευαισθησίας με την επίλυση των εξισώσεων: αν οι εξισώσεις του μοντέλου μπορούν να λυθούν αναλυτικά, η επίδραση των αλλαγών από τη μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί άμεσα και να αναπαρασταθεί γραφικά.
- Μεταβολή υποτιθέμενα ανεξάρτητων παραγόντων χωριστά: στην προσέγγιση αυτοί η μεταβολή των μεταβλητών γίνεται ξεχωριστά για την κάθε μια οπότε το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δε διερευνάται η αλληλεπίδραση των μεταβλητών.
- Τυπική ανάλυση ευαισθησίας: το μοντέλο γραμμικοποιείται γύρω από τις τυπικές τιμές των παραμέτρων για κάθε χρονική στιγμή και για οποιαδήποτε μεταβλητή κατάσταση έτσι ώστε η παράγωγος μιας παραμέτρου να μπορεί να εντοπιστεί με ένα απλό τρέξιμο. Έτσι μπορούμε να διαπιστώσουμε την ευαισθησία του μοντέλου. Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι οι παράγοντες μπορούν να αποκλίνουν ελάχιστα από τις δοθείσες τυπικές τιμές και το αποτέλεσμα θα εξαρτηθεί σημαντικά από αυτές, επίσης για ακόμα μια φορά, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών λαμβάνονται ελάχιστα υπόψη.
- Ανάλυση ‘Monte Carlo’: όλες οι μεταβλητές αλλάζονται ταυτόχρονα και όχι συστηματικά, με βάση τη στατιστική τους κατανομή. Απαραίτητος είναι ένας μεγάλος αριθμός από τρεξίματα του μοντέλου πριν να εφαρμοστεί γραμμική παλινδρόμηση, ώστε να καθοριστεί η σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των παραγόντων.

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε χειροκίνητα, μεταβάλλοντας τα μεγέθη κατά ένα ποσοστό 10% γύρω από την αρχική τους τιμή και εξετάζοντας το αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής στην υπόγεια, επιφανειακή και συνολική απορροή. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης και η εννοιολογική μορφή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παράμετρος	Μεταβολή παραμέτρου %	Μεταβολή υπόγειας απορροής %	Μεταβολή επιφανειακής απορροής %	Μεταβολή συνολικής απορροής %
Αριθμός καμπύλης (CNII)	+10	-27.77	58.44	7.06
	-10	19.87	-36.27	-3.79
Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K)	+10	-2.67	-0.15	0.68
	-10	2.72	0.23	-0.69
Διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC)	+10	6.70	21.91	8.15
	-10	1.68	-8.39	0.50
Παράγοντας Άλφα (ALFA_BF)	+10	0.004	0	0.002
	-10	-0.005	0	-0.002
Υστέρηση υπογείου Νερού (GW_DELAY)	+10	-0.96	0	-0.40
	-10	-1.08	0	0.45
Συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP)	+10	-1.45	0	-0.61
	-10	1.55	0	0.65
Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP)	+10	-2.80	0	-1.18
	-10	3.02	0	1.27
Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφορέα (GW_SPYLD)	+10	0	0	0
	-10	0	0	0
Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)	+10	-1.08	0	-0.45
	-10	1.17	0	0.49

Πίνακας 7.5: Συνοπτική περιγραφή αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας

Παράμετρος	Επίδραση στην επιφανειακή απορροή	Επίδραση στην υπόγεια απορροή
Αριθμός καμπύλης (CNII)	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη
Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (SOL_K)	Μέτρια	Μεγάλη
Διαθέσιμη εδαφική υγρασία (SOL_AWC)	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη
Παράγοντας Άλφα (ALFA_BF)	Ασήμαντη	Πολύ μικρή
Υστέρηση υπογείου Νερού (GW_DELAY)	Ασήμαντη	Μικρή
Συντελεστής επανατροφοδότησης (GW_REVAP)	Ασήμαντη	Μέτρια
Κλάσμα διήθησης στο βαθύ υδροφορέα (RCHRG_DP)	Ασήμαντη	Μέτρια
Ειδική απόδοση επιφανειακού υδροφορέα (GW_SPYLD)	Ασήμαντη	Μικρή
Όριο επιστρέφουσας ροής (GWQMN)	Ασήμαντη	Μικρή

Πριν ληφθεί υπόψη αυτή η λεπτομερέστατη ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, έγινε άλλη μια χειροκίνητη ανάλυση ευαισθησίας. Αυτή περιλάμβανε ακραίες μεταβολές σε κάποιες από τις παραμέτρους και καταγραφή της συμπεριφοράς του μοντέλου στις αλλαγές αυτές. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν κάποια αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ανάλυση ευαισθησίας είναι μεταβλητές που αφορούν στο υπόγειο νερό και είναι οι εξής: GW_DELAY, GWQMIN, GW_REVAP, RCHRG_DP, REVAPMN.

- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους: Παρατηρείται ότι το υδρογράφημα απορροής κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Δεν έχουμε μεγάλες τιμές απορροής ούτε καν τους χειμερινούς μήνες, αντίθετα φαίνεται ότι η απορροή του ποταμού είναι πολύ μικρή και το νερό χάνεται στον υπόγειο υδροφορέα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους: Το υδρογράφημα απορροής φαίνεται ότι έχει μεγάλο εύρος διακύμανσης της παροχής. Έχει χαμηλές τιμές τους θερινούς μήνες και υψηλές τιμές απορροής τους χειμερινούς μήνες. Δε χάνεται σχεδόν καθόλου νερό με διήθηση και υπόγεια απορροής. Αντίθετα, σχεδόν όλο μετατρέπεται σε απορροή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης του.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY που παίρνει τη μέγιστη: Παρατηρείται ότι το υδρογράφημα έχει μικρό εύρος διακύμανσης της παροχής. Δεν υπάρχουν χαμηλές τιμές της απορροής, ούτε καν τους καλοκαιρινούς μήνες αλλά δεν υπάρχουν και υψηλές τιμές της απορροής που συνήθως χαρακτηρίζουν τους χειμερινούς μήνες. Προφανώς, το νερό διηθείται κατά τους χειμερινούς μήνες (γι' αυτό

και έχουμε χαμηλές απορροές) και επιστρέφει στον επιφανειακό υδροφορέα μετά από αρκετό καιρό ανεβάζοντας έτσι τις απορροές των καλοκαιρινών μηνών.

- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το GW_REVAP που παίρνει τη μέγιστη: Εδώ φαίνεται να συμβαίνει ακριβώς το ίδιο με όταν όλες οι μεταβλητές πήραν την ελάχιστη τιμή τους. Η μεγάλη αύξηση της μεταβλητής αυτής δεν επέφερε σημαντική αλλαγή στο υδρογράφημα απορροής του μοντέλου. Η μόνη διαφορά είναι ότι κάποιους καλοκαιρινούς μήνες η διάρκεια των χαμηλών απορροών είναι μεγαλύτερη.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το RCHRG_DP που παίρνει τη μέγιστη: Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται ότι το υδρογράφημα απορροής μοιάζει με αυτό των μεγίστων τιμών των μεταβλητών. Κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα και έχει μικρό εύρος διακύμανσης της παροχής, παρουσιάζει δε χαμηλές τιμές απορροής χειμώνα καλοκαίρι.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το REVAPMN που παίρνει τη μέγιστη: Το υδρογράφημα απορροής δεν παρουσιάζει καμία διαφορά με αυτό των ελαχίστων. Οι αριθμητικές τιμές των απορροών μεταβάλλονται σε σχέση με εκείνη την περίπτωση, όχι όμως τόσο ώστε αυτό να φαίνεται στο διάγραμμα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY που παίρνει μια μέση τιμή: Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται ότι το υδρογράφημα απορροής μοιάζει με αυτό των μεγίστων τιμών των μεταβλητών. Η απορροή του ποταμού είναι μικρή χειμώνα καλοκαίρι και η μόνη διαφορά είναι στις χαμηλές τιμές των θερινών μηνών οι οποίες μεταβάλλονται ελάχιστα άλλοτε προς τα πάνω και άλλοτε προς τα κάτω.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GWQMIN που παίρνει μια μέση τιμή: Στην περίπτωση αυτή το υδρογράφημα απορροής είναι ένας συνδυασμός του υδρογραφήματος μεγίστων τιμών των μεταβλητών και αυτού των ελαχίστων τιμών τους. Στο πρώτο μισό του υδρογραφήματος απορροής παρατηρείται χαμηλή απορροή τους θερινούς αλλά και τους χειμερινούς μήνες, ενώ στο δεύτερο μισό οι θερινοί μήνες παραμένουν χαμηλά ενώ παράλληλα η απορροή των χειμερινών μηνών ανεβαίνει κατακόρυφα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το GW_REVAP που παίρνει μια μέση τιμή: Και εδώ φαίνεται να συμβαίνει ακριβώς το ίδιο με την περίπτωση που η εν λόγω παράμετρος πήρε τη μέγιστη τιμή της. Παρατηρείται ότι και πάλι σε κάποιους καλοκαιρινούς μήνες η διάρκεια των χαμηλών απορροών είναι μεγαλύτερη.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το RCHRG_DP που παίρνει μια μέση τιμή: Παρατηρείται ότι το υδρογράφημα απορροής έχει λίγο μικρότερο εύρος κατά τον άξονα y από αυτό των ελαχίστων τιμών των μεταβλητών. Οι χαμηλές απορροές των καλοκαιρινών μηνών κυμαίνονται πάλι σε χαμηλά επίπεδα, ενώ αυτές των χειμερινών μηνών φαίνεται να είναι λίγο χαμηλότερες.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή εκτός από το REVAPMN που παίρνει μια μέση τιμή: Το υδρογράφημα απορροής δεν παρουσιάζει καμία διαφορά με αυτό των ελαχίστων τιμών όλων των παραμέτρων. Οι αριθμητικές τιμές των απορροών σίγουρα αλλάζουν, όχι όμως τόσο ώστε αυτό να φαίνεται στο διάγραμμα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY και το GWQMIN που παίρνουν μια μέση τιμή: Φαίνεται ότι το υδρογράφημα απορροής του ποταμού χωρίζεται για ακόμα μια φορά στα δυο. Στο πρώτο μισό, παρατηρείται ότι οι

απορροές κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα όλο το έτος, ενώ στο δεύτερο μισό διαφαίνεται μια μικρή αύξηση των τιμών των απορροών κατά τους χειμερινούς μήνες και μια αρκετά μεγαλύτερη για τους καλοκαιρινούς.

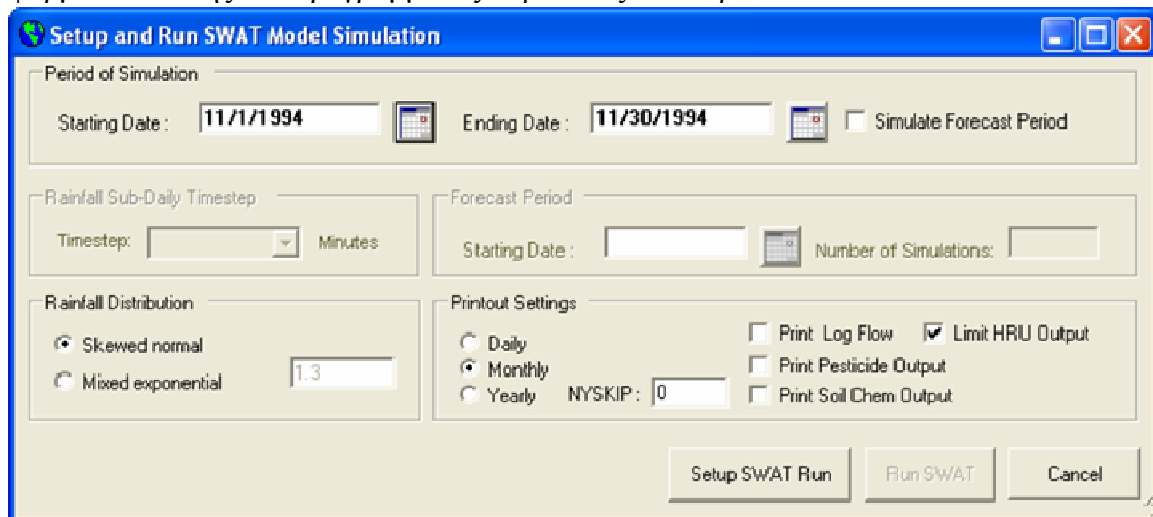
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY και το GW_REVAP που παίρνουν μια μέση τιμή: Το υδρογράφημα απορροής μοιάζει με αυτό που δημιουργήθηκε από μια μέση τιμή του GW_DELAY. Η απορροή του ποταμού είναι μικρή χειμώνα καλοκαίρι. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι μικρές τιμές της απορροής του καλοκαιριού είναι λίγο χαμηλότερες προς το τέλος του υδρογραφήματος.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY και το RCHRG_DP που παίρνουν μια μέση τιμή: Το υδρογράφημα απορροής που προέκυψε από την αλλαγή των μεταβλητών αυτών είναι αυτό που περιγράφηκε ακριβώς από πάνω μετατοπισμένο ελάχιστα προς τα κάτω.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_DELAY και το REVAPMN που παίρνουν μια μέση τιμή: Εδώ φαίνεται καθαρά ότι το υδρογράφημα έχει μετατοπιστεί στο κέντρο του διαγράμματος. Η απορροή του χειμώνα είναι πιο χαμηλή, αλλά όχι ελάχιστη και αυτή του καλοκαιριού είναι αρκετά μεγάλη.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GWQMIN και το GW_REVAP που παίρνουν μια μέση τιμή: Πάλι εδώ το υδρογράφημα απορροής χωρίζεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μισό, οι απορροές του χειμώνα είναι πολύ χαμηλές, ενώ στο δεύτερο μισό ανεβαίνουν κατακόρυφα. Και στις δυο περιπτώσεις η θερινή απορροή παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GWQMIN και το RCHRG_DP που παίρνουν μια μέση τιμή: Σε αυτό το υδρογράφημα,, παρατηρούνται πολύ χαμηλές απορροές το χειμώνα (μεγάλη πτώση), οι καλοκαιρινές τιμές της απορροής εδώ κυμαίνονται στα ίδια χαμηλά επίπεδα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GWQMIN και το REVAPMN που παίρνουν μια μέση τιμή: Και εδώ το υδρογράφημα χωρίζεται στα δυο μόνο που αυτή τη φορά ο διαχωρισμός δεν είναι ίσος, το πρώτο κομμάτι είναι λίγο μικρότερο από το δεύτερο. Στο πρώτο κομμάτι οι απορροές του χειμώνα είναι πολύ χαμηλές ενώ στο υπόλοιπο αυξάνονται κατακόρυφα. Οι θερινές απορροές παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του υδρογραφήματος.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_REVAP και το RCHRG_DP που παίρνουν μια μέση τιμή: Στο υδρογράφημα αυτό οι θερινές τιμές της απορροής διατηρούνται χαμηλά, ενώ παράλληλα οι χειμερινές τιμές είναι υψηλές χωρίς να έχουν τη μέγιστη τιμή που έχουμε βρει μέχρι τώρα.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το GW_REVAP και το REVAPMN που παίρνουν μια μέση τιμή: Το υδρογράφημα εδώ φαίνεται ίδιο με αυτό των ελαχίστων τιμών των παραμέτρων. Οι χειμερινοί μήνες έχουν υψηλή απορροή, ενώ οι θερινοί διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα όλο το έτος.
- Όλες οι μεταβλητές παίρνουν την ελάχιστη τιμή τους εκτός από το RCHRG_DP και το REVAPMN που παίρνουν μια μέση τιμή: Παρατηρείται ότι οι χειμερινοί μήνες έχουν πιο χαμηλή απορροή από τη μέγιστη που έχουμε συναντήσει μέχρι τώρα και ότι οι θερινοί μήνες έχουν πάλι τις ίδιες χαμηλές τιμές απορροής.

Με όλες τις παραπάνω αναλύσεις ευαισθησίας ήταν πιο εύκολο να κατανοηθεί η λειτουργία του μοντέλου και να επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

7.3.3 Εκτέλεση προγράμματος

Αφού δημιουργηθούν όλα τα αρχεία δεδομένων που αντιστοιχούν στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης, το μοντέλο επιτρέπει την εκτέλεση προσομοίωσης, με τη βοήθεια του μενού ``Simulation``. Πατώντας την αντίστοιχη εντολή ανοίγει και η κατάλληλη φόρμα για την εκτέλεση του προγράμματος. Στη φόρμα αυτή επιλέγεται και η περίοδος στην οποία επιθυμεί ο χρήστης να τρέξει το πρόγραμμα. Αφού τοποθετηθούν και οι ημερομηνίες επιλέγεται στην πορεία το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Το μοντέλο SWAT επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε ημερήσιο, μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα. Έτσι, παρόλο που όλα τα δεδομένα είναι ημερήσια, τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν και σε μηνιαίο αλλά και σε ετήσιο χρονικό βήμα απαλλάσσοντας έτσι το χρήστη από χρονοβόρες πράξεις μετατροπής των αποτελεσμάτων.

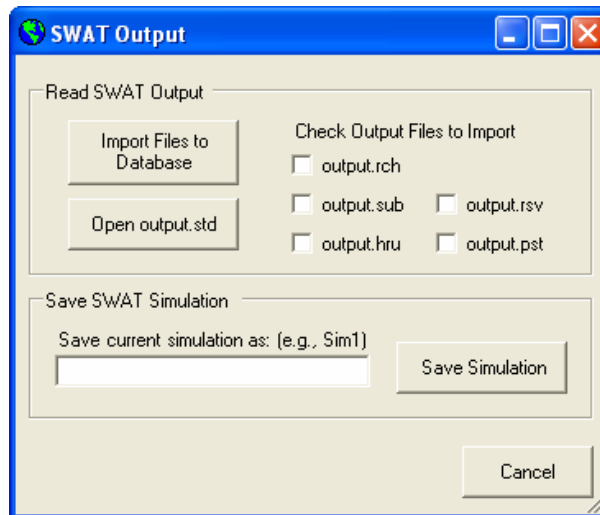
Η φόρμα εκτέλεσης του προγράμματος παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 7.11: Φόρμα εκτέλεσης του προγράμματος

7.3.4 Ανάγνωση αποτελεσμάτων

Μετά την εκτέλεση προχωράμε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων η οποία γίνεται μέσω της παρακάτω φόρμας του προγράμματος.



Σχήμα 7.12: Φόρμα εξαγωγής αποτελεσμάτων

Αφού ανοίξουμε το αντίστοιχο αποθηκευμένο αρχείο βλέπουμε ότι τα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου δίνονται και εδώ σε mm ύψους βροχής, ποσότητα δηλαδή ανοιγμένη στην επιφάνεια της εκάστοτε υπολεκάνης. Το γεγονός αυτό δυσκολεύει τη σύγκριση των υπολογισμένων με τις παρατηρημένες απορροές και κάνει αναγκαία τη χρήση μακροεντολών ή γλώσσας προγραμματισμού. Αν, για παράδειγμα, ο χρήστης γνωρίζει την απορροή στην έξοδο της υπολεκάνης 3, που βρίσκεται κατάντη των υπολεκανών 1 και 2, τότε, για να συγκρίνει τα αποτελέσματα στην έξοδο της 3, θα πρέπει να πολλαπλασιάσει την ανοιγμένη απορροή που του δίνει το αρχείο κάθε χρονικό βήμα, με την αντίστοιχη έκταση της υπολεκάνης, για τις υπολεκάνες 1 έως 3 και να αθροίσει αυτά τα μεγέθη. Κατόπιν μπορεί να μετατρέψει αυτό το άθροισμα από όγκο νερού στο χρονικό βήμα, σε μέση παροχή (m^3/s) διαιρώντας με τα δευτερόλεπτα του χρονικού βήματος, ή σε ανηγμένο ύψος απορροής (mm) διαιρώντας με την επιφάνεια του αθροίσματος των 3 υπολεκανών. Λαμβάνονται, δηλαδή, υπόψη κάθε φορά όλες οι υπολεκάνες που βρίσκονται στα ανάντη του σημείου εξόδου, μια και το μοντέλο δίνει το ισοζύγιο κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά και όχι το αθροιστικό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 27 υπολεκάνες και έτσι η παραπάνω ενέργεια έγινε και για τις 27 με απλό λογισμικό.

Το πρόγραμμα εμφανίζει τα αποτελέσματα σε μια βάση δεδομένων Access και με απλή διαδικασία μπορούν αυτά να μεταφερθούν στο Excel για να γίνει η επεξεργασία τους όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα στοιχεία τα οποία εξάγει το μοντέλο SWAT και αφορούν τις υδρολογικές διεργασίες και όχι την ποιοτική ανάλυση (η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική) φαίνονται στον Πίνακα 3 του Παραρτήματος Α. Στον Πίνακα 4 του ίδιου παραρτήματος φαίνεται πως εξάγονται τα αποτελέσματα για μια μέρα του έτους και για τις 27 υπολεκάνες και στον Πίνακα 5 πώς εξάγονται τα αποτελέσματα για ένα μήνα του έτους και για τις 27 υπολεκάνες που έχουν δημιουργηθεί.

7.3.5 Βέλτιστες τιμές παραμέτρων

Οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται παρακάτω, προέκυψαν ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Η πολυπλοκότητα και τα σφάλματα που παρουσιάζονται στη λειτουργία του ομοιώματος SWAT, κατέστησαν υποχρεωτική τη χειροκίνητη βελτιστοποίηση. Σε αυτή μεταβλήθηκε κάθε παράμετρος ξεχωριστά και διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις αυτών των μεταβολών στους δείκτες σύγκρισης των παρατηρημένων με τις

προσομοιωμένες απορροές. Ως κριτήριο για το τέλος της βελτιστοποίησης τέθηκε η μέγιστη δυνατή τιμή του δείκτη Nash με ακρίβεια της τάξης του 10^{-4} .

Εδαφολογικά στοιχεία

Σε κάθε τύπο εδάφους αντιστοιχεί και ένα αρχείο ιδιοτήτων με τα στοιχεία εκείνα που απαιτεί το πρόγραμμα. Ένα τέτοιο αρχείο είναι και το παρακάτω.

Soil of AGRAFIWTH (Asbestolithoi)			
Asbestolithoi			
B	1500.00		
*** LAYER DATA ***			
	1	2	3
Depth [mm]:	500.00	1000.00	1500.00
Bulk Density Moist [g/cc]:	1.55	1.55	1.55
Ave. AW Incl. Rock Frag :	0.31	0.31	0.31
Ksat. (est.) [mm/hr]:	50	50	50
Organic Carbon [weight %]:	1.00	1.00	1.00
Clay [weight %]:	12.00	12.00	12.00
Silt [weight %]:	65.00	65.00	65.00
Sand [weight %]:	23.00	23.00	23.00
Rock Fragments [vol. %]:	5.00	5.00	5.00
Soil Albedo (Moist) :	0.06		
Erosion K :	0.43		
NO3 Cocentration [mg/kg]:	0.00	0.00	0.00
Crack volume potential :	0.00		

Σχήμα 7.13: Αρχείο εδαφολογικών στοιχείων

Τα αρχεία εδάφους προσδιορίζουν ορισμένα χαρακτηριστικά στο έδαφος στο οποίο αναφέρονται. Πολλά από αυτά είναι κοινά για όλα τα εδάφη, είτε για λόγους απλότητας ρυθμίσεων, είτε κυρίως για λόγους έλλειψης στοιχείων. Οι τελικές τιμές των χαρακτηριστικών των εδαφών του ποταμού Αγραφιώτη που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία φαίνονται στον παραπάνω πίνακα. Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία ελήφθησαν από τις εδαφοτομές του ΙΔΕ, άλλα υπολογίστηκαν από κάποια δεδομένα που είχαν οι εδαφοτομές αυτές και για όσα από αυτά δεν υπήρχαν πληροφορίες έγινε χρήση της διεθνούς βιβλιογραφίας σε συνδυασμό με κάποιες δοκιμές στο πρόγραμμα.

Ένα τέτοιο στοιχείο είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα Ksat. Η μεταβλητή αυτή εκφράζει την ευκολία κίνησης του νερού στο έδαφος όταν αυτό είναι κορεσμένο. Η παράμετρος αυτή εισάγεται στον τύπο υπολογισμού της υποδερμικής απορροής και συσχετίζει την ταχύτητα ροής του εδαφικού νερού με την υδραυλική κλίση. Η αύξηση της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας έχει ως συνέπεια της αύξησης της συνολικής απορροής της λεκάνης του ποταμού.

Για να δοθεί τιμή στην κορεσμένη εδαφική αγωγιμότητα έγινε χρήση της διεθνούς βιβλιογραφίας (Adams, 1973) μιας και δεν ήταν δυνατό να βρεθούν οι τιμές αυτές από τις εδαφοτομές. Η τιμή αυτή ελήφθη σε m/s ή cm/s και μετετράπη σε mm/h όπως απαιτεί το πρόγραμμα. Πριν ληφθεί όμως το τελικό αποτέλεσμα έγιναν κάποιες δοκιμές και έτσι η μεταβλητή αυτή βελτιστοποιήθηκε. Μαζί της άλλαξε και μια άλλη παράμετρος του ίδιου αρχείου. Οπότε στην παρούσα βαθμονόμηση έχουμε τη βελτιστοποίηση δυο μόνο παραμέτρων, της υδραυλικής αγωγιμότητας και της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας. Οι

βέλτιστες τιμές των δυο παραμέτρων που προέκυψαν είναι $K_{sat}=50$ mm/hr και $AWC=0.31$ mm H_2O/mm εδάφους αντίστοιχα.

Συντελεστές απορροής CNII

Το μοντέλο SWAT χρησιμοποιεί την εξίσωση των αριθμών καμπύλης κατά SCS για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής. Το πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα χρήσεων γης σε συνδυασμό με τον τύπο εδάφους και σε κάθε HRU αντιστοιχεί έναν αριθμό καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II (Neitsch et al., 2005). Οι αριθμοί αυτοί, στη περίπτωση του ποταμού Αγραφιώτη δεν ήταν επιθυμητοί γιατί έδιναν λανθασμένη απορροή. Συνεπώς απαιτήθηκε η μεταβολή τους για κάθε κατηγορία χρήσης γης. Οι νέες τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.6: Νέες τιμές του αριθμού καμπύλης CN

Χρήση γης	Νέος αριθμός CNII
AGRICULTURAL LAND	38
FOREST DECIDUOUS	41
FOREST EVERGREEN	37
FOREST	33
PASTURE	40
RANGE	43
BERMUDA	39

Παράμετροι υπογείου νερού

Οι παράμετροι του υπογείου νερού μεταβλήθηκαν μέσα από το μενού 'Edit SWAT Input' αφού εκεί βρίσκεται και το αντίστοιχο αρχείο .gw. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ρυθμίσεις του υπογείου νερού έγιναν για το σύνολο των HRU. Οι κυριότερες μεταβλητές που ρυθμίστηκαν ήταν οι εξής:

- Alpha factor: Η παράμετρος αυτή ρυθμίζει την καμπύλη ύφεσης της παροχής υπογείου νερού. Μεταβάλλεται από 0.0 έως 1.0 και λαμβάνει μικρές τιμές, κοντά στο μηδέν για απότομη καμπύλη ύφεσης. Στην περίπτωσή μας, έλαβε την τιμή 0.34 days.
- Groundwater delay: Είναι ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να φτάσει στον επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα. Η παράμετρος αυτή μπορεί να μεταβληθεί ανάμεσα στο 0 και το 500. Η τιμή $GW_DELAY = 61$ days έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα.
- Revap coefficient: Η μεταβλητή αυτή ελέγχει τον όγκο του νερού που θα κινηθεί από το ρηχό υδροφορέα προς τη ζώνη ριζοστρώματος, ως αποτέλεσμα της έλλειψης εδαφικής υγρασίας και της πρόσληψης νερού από τα δέντρα και τους θάμνους με βαθιές ρίζες. Η μεταβλητή αυτή λαμβάνει τιμές ανάμεσα στο 0.02 και το 0.2. καθώς πλησιάζει την ελάχιστη τιμή της η κίνηση προς τη ριζική ζώνη απαγορεύεται και αντίστροφα. Τα αποτελέσματα της απορροής βελτιστοποιήθηκαν όταν η μεταβλητή έλαβε την τιμή $GW_REVAP = 0.2$.
- Deep aquifer percolation fraction: Η παράμετρος αυτή δίνει το λόγο του όγκου νερού που τροφοδοτεί το βαθύ υδροφορέα προς το συνολικό όγκο. Μπορεί να λάβει τιμές ανάμεσα στο 0.0 και το 1.0. Βέλτιστη τιμή αποδείχθηκε η $RCHRG_DP = 0.3$.
- Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur: Η παράμετρος αυτή καθορίζει το κατώτατο ύψος νερού στον αβαθή υδροφορέα, ώστε να μπορεί να γίνει

κίνηση του νερού από τον υδροφορέα στη ζώνη ριζοστρώματος. Συνεπώς, η κίνηση αυτή επιτρέπεται μόνο στην περίπτωση που το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την τιμή της μεταβλητής αυτής. Η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται ανάμεσα στο 0.0 και στο 500, εδώ όμως το καλύτερο αποτέλεσμα έδωσε η τιμή $REVAPMN = 1 \text{ mm H}_2\text{O}$.

- Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow to occur: Η μεταβλητή αυτή εκφράζει το κάτω όριο νερού στον αβαθή υδροφορέα, ώστε να πραγματοποιηθεί επιστρέφουσα ροή. Έτσι η ροή από τον υπόγειο υδροφορέα προς το υδρογραφικό δίκτυο επιτρέπεται μόνο αν το ύψος του νερού στον υδροφορέα είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την τιμή της μεταβλητής αυτής. Μπορεί να λάβει τιμές από 0.0 έως 5000, το καλύτερο αποτέλεσμα όμως έδωσε η τιμή $GWQMIN = 2 \text{ mm H}_2\text{O}$.

Παράμετροι λεκάνης

Οι παράμετροι που αφορούν στη λεκάνη απορροής μεταβλήθηκαν μέσα από το μενού 'Edit SWAT Input' αφού εκεί βρίσκεται και το αντίστοιχο αρχείο .bsn. Εδώ βελτιστοποιήθηκε μία μόνο μεταβλητή και επιλέχθηκε και η μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

- ESCO: Η μεταβλητή αυτή ρυθμίζει την κατά βάθος κατανομή της εξατίμησης από το έδαφος έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη στου υπολογισμούς η επίδραση των τριχοειδών φαινομένων και των ρωγμών. Λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0.0 και 1.0. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η τιμή 0.2.
- Εξατμισοδιαπνοή: Το SWAT παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε τρεις μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Αυτές είναι οι Penman-Monteith, Priestley-Taylor και Hargreaves. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η τρίτη μέθοδος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ίδιο αρχείο έγιναν και κάποιες αλλαγές σε παραμέτρους που αφορούν την προσομοίωση του χιονιού. Το μοντέλο SWAT διαθέτει 7 παραμέτρους σχετικές με τη δημιουργία και την τήξη του χιονιού, η ρύθμισή τους όμως δε βελτίωσε αισθητά τα αποτελέσματα της απορροής.

7.3.6 Μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας

Το πρώτο βήμα για τη μελέτη των χαρακτηριστικών ξηρασίας της περιοχής γύρω από τον ποταμό Αγραφιώτη, η οποία αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η επεξεργασία των ετησίως ελαχίστων εφταήμερων αλλά και μηνιαίων παροχών του ποταμού στην έξοδο την λεκάνης απορροής του.

Η κατάρτιση των ετησίως ελάχιστων εφταήμερων αλλά και μηνιαίων παροχών του ποταμού έγινε και για τις μετρημένες τιμές της απορροής αλλά και για τις εξαγόμενες από το πρόγραμμα τιμές. Υπολογίστηκαν, δηλαδή, και οι ιστορικές ετησίως ελάχιστες εφταήμερες και μηνιαίες παροχές, αλλά και οι αντίστοιχες προσομοιωμένες.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε με το λογισμικό Excel.

Όσον αφορά τις ετησίως ελάχιστες εφταήμερες παροχές του ποταμού, ο υπολογισμός τους έγινε ως εξής:

Αφού οι ημερήσιες παροχές περάστηκαν στο Excel υπολογίστηκαν οι παροχές ανά 7 συνεχόμενες ημέρες, για τους καλοκαιρινούς μήνες μόνο αφού σε αυτούς θα βρίσκονται και οι ελάχιστες παροχές ολόκληρου του έτους. Η διαδικασία υπολογισμού τους στηρίχθηκε στη χρήση ενός νοητού παραθύρου το οποίο χωρά 7 συνεχόμενες τιμές της απορροής και κάθε φορά κατεβαίνει προς τα κάτω κατά μια τιμή υπολογίζοντας συνεχώς το μέσο όρο των

διαδοχικών αυτών 7 τιμών. Από αυτούς τους μέσους όρους υπολογίζουμε το αντίστοιχο μέσο όρο για όλο το έτος και για κάθε έτος στη συνέχεια. Έτσι, έχουμε τελικά τις ετησίως ελάχιστες εφταήμερες απορροές.

Όσον αφορά τώρα τις ετησίως ελάχιστες μηνιαίες παροχές, ο υπολογισμός τους είναι πιο απλός. Χρησιμοποιήθηκαν οι ελάχιστες τιμές του κάθε μήνα (για τους θερινούς μήνες) και από αυτές υπολογίστηκε πάλι η ελάχιστη τιμή.

Αφού ολοκληρώθηκε το στάδιο αυτό των υπολογισμών ακολούθησε η προσαρμογή της συνάρτησης κατανομής Weibull με το λογισμικό 'Υδρογνώμων'.

Η στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών με το λογισμικό «Υδρογνώμων» συνίσταται από τις εξής λειτουργίες:

- Στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών (Πυθία).

Κατά την επεξεργασία αυτή υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών (στατιστικά χαρακτηριστικά δείγματος) και προσαρμόζονται στατιστικές συναρτήσεις κατανομής. Στην συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την προσαρμογή του δείγματος στις συναρτήσεις κατανομής αλλά να κάνει και προβλέψεις (forecasts), στατιστικούς ελέγχους (test), καθώς και εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης.

- Ανάλυση εξαιρετικών υδρολογικών γεγονότων.

Με την ειδική αυτή λειτουργία συνάθροισης, παράγονται ετήσιες ή μηνιαίες χρονοσειρές μεγίστων εντάσεων ή υψών βροχόπτωσης συγκεκριμένης διάρκειας. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αξιοποιούνται στην συνέχεια για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών.

- Κατάρτιση όμβριων καμπυλών (Όμβρος).

Πρόκειται για εξελιγμένο σύστημα για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών με δυνατότητες προσαρμογής από ένα πλήθος στατιστικών κατανομών, εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης σε όμβρια καμπύλη, κ.α.

Οι λειτουργίες αυτές του «Υδρογνώμονα» εμφανίζονται κάτω από το menu Hydrology στην φόρμα επεξεργασίας δεδομένων.

Πυθία - Στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών

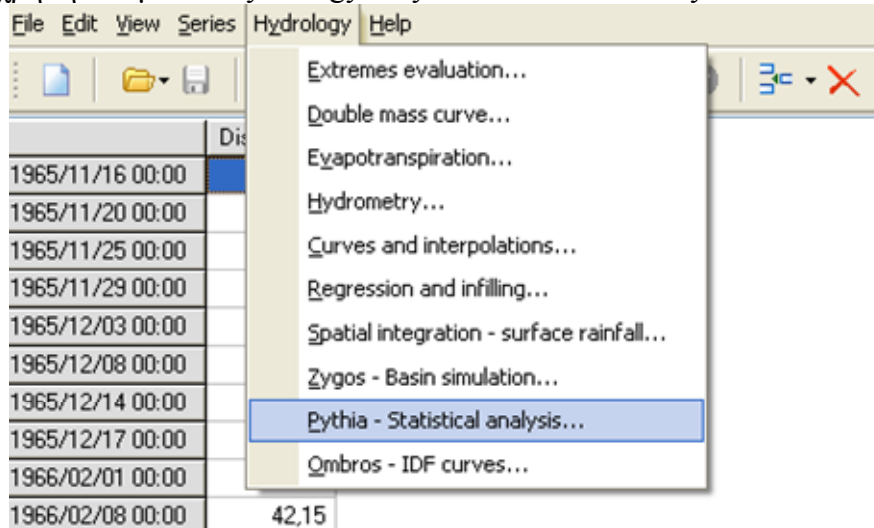
Η θεωρία πιθανοτήτων και η στατιστική αποτελούν βασικό μαθηματικό εργαλείο της υδρολογίας. Η στατιστική ανάλυση μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα από το υποσύστημα Πυθία του λογισμικού «Υδρογνώμων». Μέσω του υποσυστήματος αυτού γίνονται τα ακόλουθα:

- Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής με βάση ένα ευρύ φάσμα στατιστικών μοντέλων
- Απεικόνιση εμπειρικής και θεωρητικής κατανομής σε διάφορους τύπους χαρτιού
- Εκτίμηση διαστήματος εμπιστοσύνης
- Εκτίμηση τιμής υπέρβασης για δεδομένη περίοδο επαναφοράς
- Εκτίμηση περιόδου επαναφοράς για δεδομένη τιμή της μεταβλητής
- Αναλυτικοί πίνακες στατιστικών παραμέτρων και εκτιμητριών για όλες τις διαθέσιμες κατανομές

Μέσω του υποσυστήματος «Πυθία» δίνονται δυνατότητες στατιστικής ανάλυσης σε δείγματα που σχηματίζονται από τα δεδομένα χρονοσειρών. Ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει, στην συνέχεια, τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος, να προσαρμόσει στατιστικές

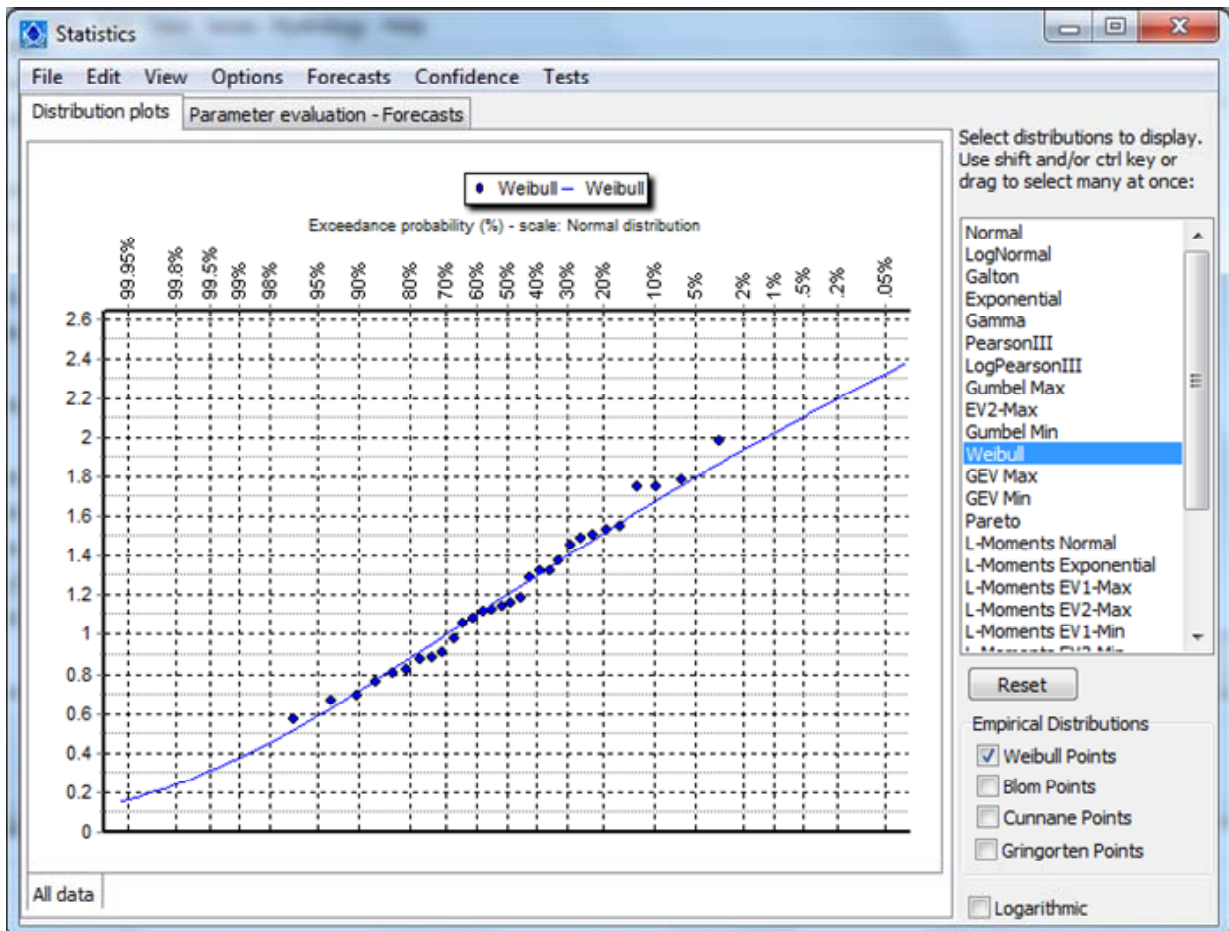
κατανομές και να εκτελέσει στατιστικές προγνώσεις. Η ανάλυση γίνεται επί χρονοσειρών μηνιαίου ή ετήσιου χρονικού βήματος. Στην πρώτη περίπτωση, το δείγμα χωρίζεται σε δώδεκα (12) επιμέρους δείγματα, ένα για κάθε μήνα. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Ο χρήστης επιλέγει την χρονοσειρά στην οποία θα εκτελεστεί η ανάλυση, αυτή μάλιστα θα είναι η ενεργή χρονοσειρά.
2. Γίνεται χρήση του μενού Hydrology→Pythia - Statistical analysis:



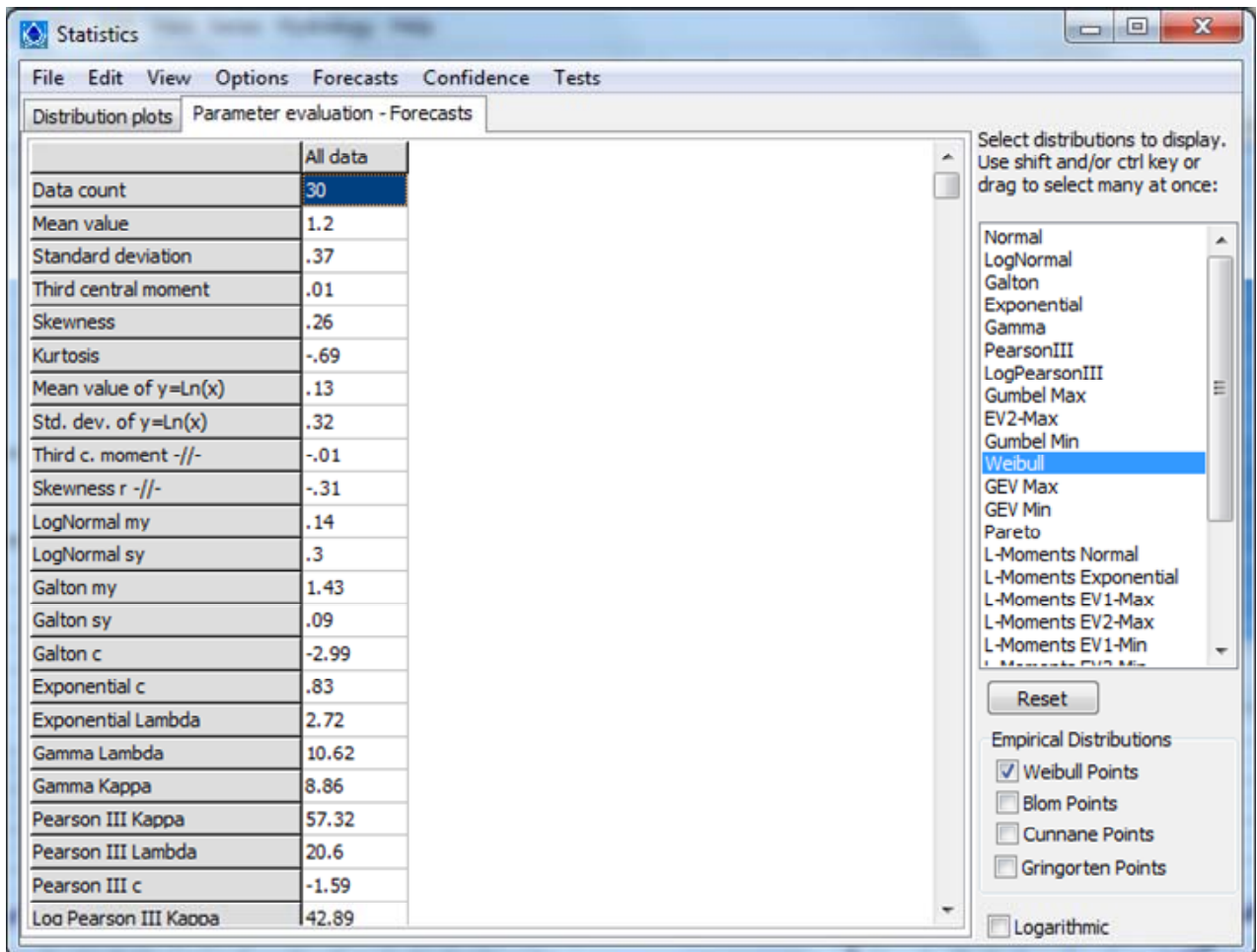
Σχήμα 7.14: Το μενού Hydrology του Υδρογνώμονα

3. Για την περίπτωση της ετήσιας χρονοσειράς η εικόνα που λαμβάνει ο χρήστης είναι η παρακάτω:



Σχήμα 7.15: Κατανομή Weibull

4. Ο χρήστης επιλέγει την καρτέλα "Parameter evaluation - Forecasts" και έχει μία εικόνα των στατιστικών παραμέτρων του δείγματος και των στατιστικών κατανομών.



Σχήμα 7.16: Στατιστικοί παράμετροι του δείγματος

- Μέσω των επιλογών του μενού Forecasts ο χρήστης κάνει στατιστικές προγνώσεις.
- Μέσω των επιλογών του μενού Test ο χρήστης εκτελεί στατιστικούς ελέγχους για τις κατανομές. Επιλέγοντας Test→X-Square test, ζητείται από τον χρήστη να ορίσει αριθμό κλάσεων. Ο χρήστης μπορεί να αποδεχθεί την προτεινόμενη τιμή, όπως προκύπτει από τις σχετικές ανισότητες και δίνοντας OK λαμβάνει τα αποτελέσματα του τεστ.

X-Square test for All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Pearson
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	43.5%	1.67
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	84.6%	0.33
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.3%	3.00
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19.7%	1.67
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	8.2%	5.00
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.3%	1.33
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.7%	1.00
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41.4%	0.67
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.7%	1.00
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.3%	3.00
EV2-Max	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.6%	7.33
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	13.5%	4.00
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	84.6%	0.33
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41.4%	0.67
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41.4%	0.67
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	8.3%	3.00
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.7%	1.00
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	56.4%	0.33
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.4%	2.67
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	8.2%	5.00
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.3%	3.00
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	84.6%	0.33

Σχήμα 7.17: Έλεγχος χ^2 .

7. Η λέξη REJECT αντιστοιχεί σε μη αποδοχή της κατανομής ενώ η λέξη ACCEPT σε επιτυχία του τεστ για διάφορα επίπεδα σημαντικότητας (εδώ φαίνονται τα 1%, 5% και 10%). Ο πίνακας του test κλείνει μέσω του μενού View→Refresh parameters table ή με το πλήκτρο F5, οπότε ο πίνακας επιστρέφει σε κατάσταση απεικόνισης των παραμέτρων των κατανομών.

7.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

7.4.1 Γενικά

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του μοντέλου. Παρουσιάζονται, δηλαδή, τα εξαγόμενα που προέκυψαν από τη διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών ελέγχου της ακρίβειας της βαθμονόμησης. Παράλληλα, δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκρισης των προσομοιωμένων με τις παρατηρημένες χρονοσειρές. Η επιτευχθείσα βαθμονόμηση, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης, σε ό,τι αφορά τις συνιστώσες της επιφανειακής, υπόγειας, ενδιάμεσης και συνολικής απορροής, καθώς και της βροχόπτωσης, δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.

Με βάση τον δείκτη NTD έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου, αλλάζοντας κάθε φορά κάποια (ή κάποιες) από τις παραμέτρους του SWAT και παρατηρώντας την επίδραση που είχε η

μεταβολή στο δείκτη. Βέβαια, κάθε αλλαγή των μεταβλητών του προγράμματος, έπρεπε να υπόκειται σε έναν ποιοτικό έλεγχο προκειμένου τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα να είναι λογικά. Ένα τέτοιο κριτήριο αριθμητικού ελέγχου ήταν το συνολικό άθροισμα των απορροών για ολόκληρη τη χρονοσειρά. Επιλέχθηκαν δηλαδή τέτοιες ρυθμίσεις που να δίνουν άθροισμα παροχών κοντά στο παρατηρούμενο και τιμή του δείκτη Nash όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη μονάδα.

Το εγχείρημα αυτό ήταν αρκετά δύσκολο και έγιναν αρκετές δοκιμές μέχρι να φτάσουμε σε ένα καλό αποτέλεσμα. Η διαδικασία ήταν χρονοβόρα γιατί το πρόγραμμα έβγαζε τα αποτελέσματα σε βάση δεδομένων της Access τα οποία έπρεπε να μεταφερθούν στο Excel και εκεί κάθε φορά να γίνονται οι κατάλληλες πράξεις για να υπολογίσουμε τον δείκτη Nash.

7.4.2 Έλεγχος αποτελεσμάτων

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος SWAT ελήφθησαν αρχικά σε μηνιαίο και έπειτα σε εβδομήμερο βήμα. Η ενέργεια αυτή έγινε έτσι ώστε να έχουμε τελικά την καλύτερη προσαρμογή των εβδομήμερων δεδομένων. Η βαθμονόμηση του μοντέλου ξεκίνησε από ένα πιο μεγάλο χρονικό βήμα και, αφού τα εξαγόμενα αποτελέσματα προσαρμόστηκαν αρκετά καλά στα μετρημένα, μόνο τότε ξεκίνησε η ενασχόληση με τα εβδομήμερα. Με τον τρόπο αυτό η σύγκλιση προσομοιωμένων και ιστορικών παροχών ήταν ευκολότερη. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα του SWAT συγκρίθηκαν με τις παρατηρημένες τιμές της απορροής στην έξοδο της λεκάνης του Αγραφιώτη.

Οι αξιόπιστες τιμές απορροής που διαθέταμε ήταν από τον Οκτώβριο του 1982 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 1988. Από αυτές, αφαιρέθηκαν τα τρία πρώτα έτη τα οποία κρίθηκαν αναγκαία για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, το λεγόμενο 'ζέσταμα'. Δηλαδή, επειδή ακριβώς ορισμένες παράμετροι αρχικοποίησης του προγράμματος δεν ήταν διαθέσιμες δόθηκε καταρχήν μόνο μια ενδεικτική τιμή τους, και συνεπώς τα πρώτα έτη προσομοίωσης του μοντέλου αναλώθηκαν στη βαθμονόμηση αυτών των παραμέτρων. Για παράδειγμα, δεδομένα για το αρχικό ύψος του νερού στον επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα δε θα μπορούσαν να διατίθενται και μόνο με δοκιμές θα ήταν δυνατό να βρεθούν. Για την παράμετρο αυτή δόθηκε μια ενδεικτική τιμή της τάξης του 1 m και, στη συνέχεια, το πρόγραμμα σε κάθε τρέξιμό του συνέκλινε ολοένα και περισσότερο στην πραγματική τιμή της μεταβλητής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα εξαγόμενα δεδομένα αρχίζουν να πλησιάζουν ικανοποιητικά τα πραγματικά από τον Οκτώβριο του 1985 και μετά, συνεπώς αυτές ήταν και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν.

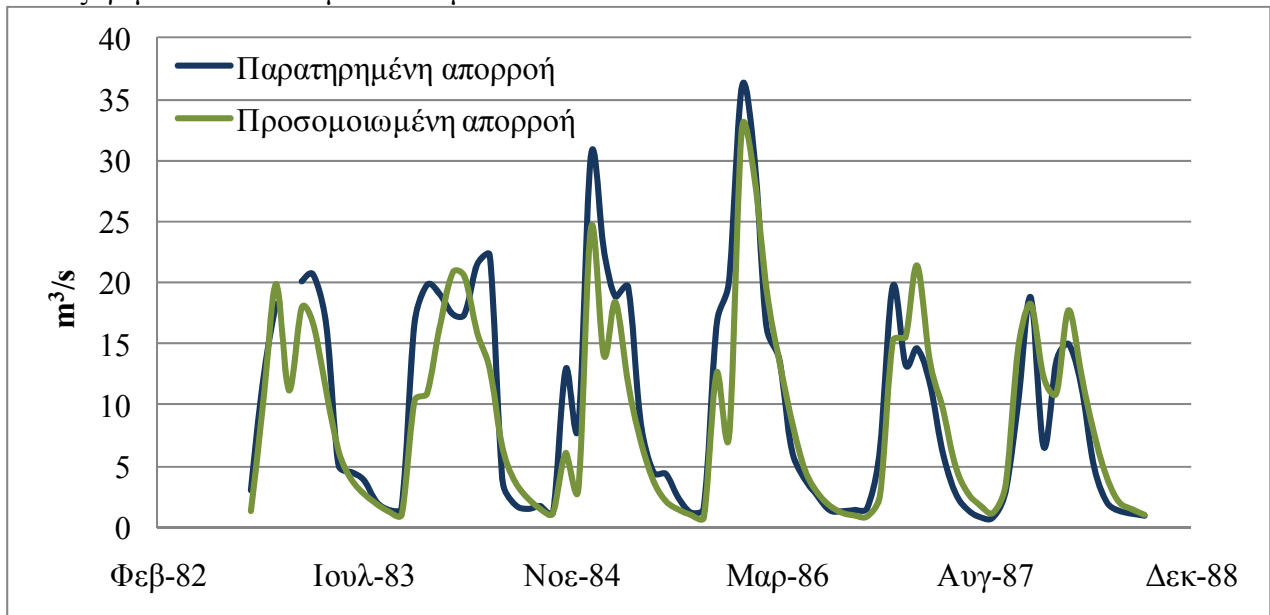
Ο λόγος που η χρονοσειρά των απορροών περιορίστηκε τόσο πολύ είναι, όπως προαναφέρθηκε, η αξιοπιστία των δεδομένων. Υπήρχαν κάποιοι καλοκαιρινοί μήνες που είχαν ανεξήγητα υψηλές απορροές αφού οι βροχές την περίοδο αυτή ήταν ελάχιστες ως και μηδενικές και η θερμοκρασίες υψηλές. Από την άλλη, βρέθηκαν και κάποιοι χειμερινοί μήνες με πολύ χαμηλές απορροές κοντά στο μηδέν μετά από έντονες περιόδους βροχόπτωσης κάτι που δεν είναι φυσικό. Παρατηρήθηκαν επίσης περίοδοι στις οποίες η τιμή των μετρημένων απορροών δεν μεταβαλλόταν καθόλου για περιόδους που έφταναν ακόμη και στον ένα μήνα. Τέλος, υπήρχαν και πολλοί μήνες στους οποίους έλειπαν μετρήσεις για ένα μεγάλο αριθμό ημερών. Αναγκαστικά λοιπόν, μιας και ο τελικός σκοπός ήταν η εβδομήμερη βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT, τα έτη που παρουσίαζαν σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα αυτά δεν ελήφθησαν υπόψη. Αυτό φυσικά, είναι ένα γενικότερο φαινόμενο που παρουσιάζεται στον ελλαδικό χώρο και δυσκολεύει αρκετά τη δουλειά του υδρολόγου μηχανικού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μία μέτρηση απορροής και συγκεκριμένα αυτή του μήνα Ιανουαρίου του έτους 1983, για την οποία υπήρχαν ισχυρές ενδείξεις ότι είναι λανθασμένη (υπερβολικά

χαμηλή απορροή μετά από έντονα επεισόδια βροχόπτωσης) κρίθηκε σκόπιμο να αφαιρεθεί από τη χρονοσειρά με την οποία έγινε ο έλεγχος των αποτελεσμάτων. Η ενέργεια αυτή έγινε πολύ προσεκτικά και με ιδιαίτερη έμφαση στο να μην αλλοιωθεί η τελική εικόνα των αποτελεσμάτων.

7.4.3 Μηνιαία βαθμονόμηση

Τα δεδομένα των παρατηρημένων απορροών ελήφθησαν σε ημερήσιο βήμα και έπρεπε πρώτα να μετατραπούν σε μηνιαίο, για να γίνει η μηνιαία βαθμονόμηση, διαδικασία που έγινε σχετικά εύκολα με τη χρήση απλού λογισμικού.

Η σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με τα πραγματικά γίνεται στο Σχήμα 7.18. Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος εμφανίζονται οι χρόνοι σε μηνιαίο βήμα όπως προαναφέρθηκε. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η απορροή. Η σειρά 'Παρατηρημένη απορροή' αναφέρεται στις πραγματικές, καταγεγραμμένες απορροές, όπως αυτές μετρήθηκαν στην έξοδο της λεκάνης του ποταμού, ενώ η σειρά 'Προσομοιωμένη απορροή' αναφέρεται στα εξαγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου.

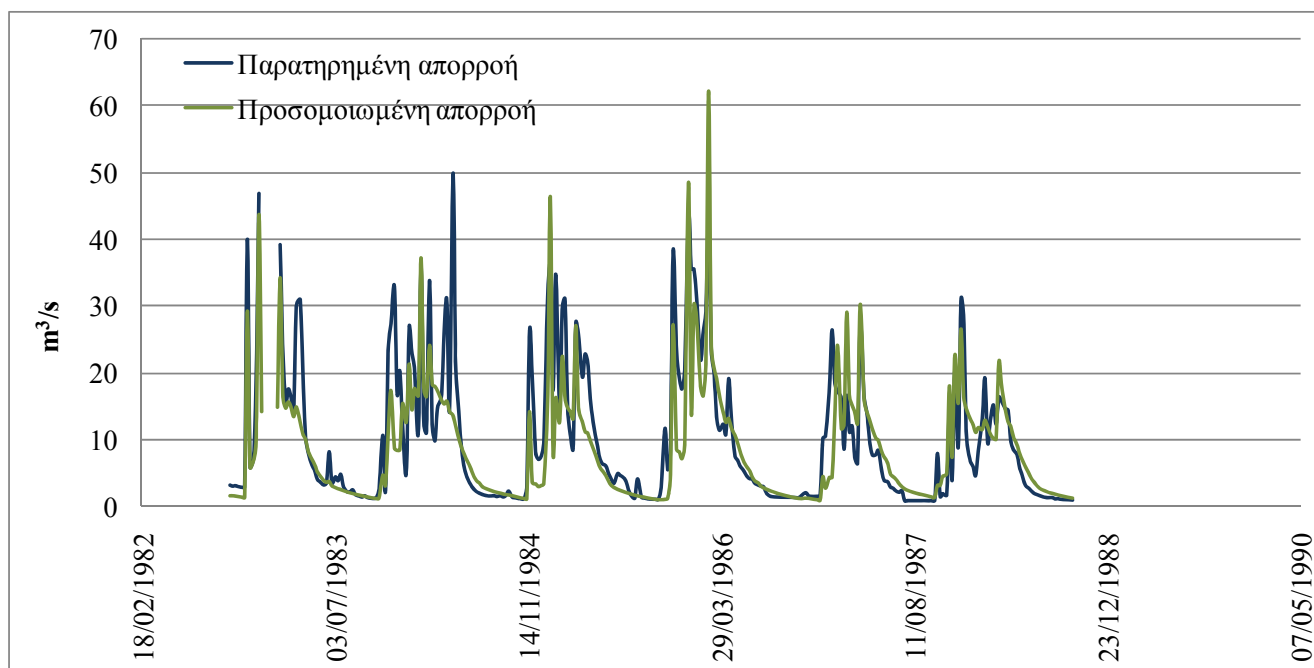


Σχήμα 7.18: Σύγκριση των παρατηρημένων και εκτιμημένων μηνιαίων απορροών.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με τη βοήθεια του δείκτη Nash. Αυτός για τα έτη 1982 έως 1985, που αποτελούν και την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου, προέκυψε ίσως με 0.7027 τιμή που κρίνεται αρκετά ικανοποιητική δεδομένου ότι η περίοδος αυτή αποτελεί το 'ζέσταμα' του μοντέλου. Για την περίοδο επαλήθευσης που περιλαμβάνει τα έτη 1985 έως 1988 ο δείκτης έλαβε υψηλότερη τιμή και ίση με 0.8438. Και στις δύο περιπτώσεις ο δείκτης υποδηλώνει ότι το μοντέλο ρυθμίστηκε αρκετά καλά στη λεκάνη απορροής.

7.4.4 Εφταήμερη βαθμονόμηση

Η σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με τα πραγματικά γίνεται στο Σχήμα 7.19. Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος εμφανίζονται οι χρόνοι σε ημερήσιο βήμα και στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η απορροή. Η σειρά 'Παρατηρημένη απορροή' αναφέρεται στις πραγματικές, ή καταγεγραμμένες απορροές, όπως αυτές μετρήθηκαν στην έξοδο της λεκάνης του ποταμού, ενώ η σειρά 'Προσομοιωμένη απορροή' αναφέρεται στα εξαγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου.



Σχήμα 7.19: Συγκριση παρατηρημένων και εκτιμημένων εφταήμερων απορροών.

Και εδώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με τη βοήθεια του δείκτη Nash. Αυτός για τα έτη 1982 έως 1985, που αποτελούν και την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου, προέκυψε ίσως με 0.6227 τιμή που κρίνεται ικανοποιητική δεδομένου ότι η περίοδος αυτή αποτελεί το ‘ζέσταμα’ του μοντέλου και ότι πλέον δουλεύουμε με εφταήμερες απορροές που είναι πολύ πιο δύσκολο να συγκλίνουν σε σχέση με τις μηνιαίες. Για την περίοδο επαλήθευσης που περιλαμβάνει τα έτη 1985 έως 1988 ο δείκτης έλαβε υψηλότερη τιμή και ίση με 0.7025. Και στις δύο περιπτώσεις, ο δείκτης υποδηλώνει ότι το μοντέλο βαθμονομήθηκε αρκετά καλά στη λεκάνη απορροής. Αξίζει να αναφερθεί ότι και σε αυτή την περίπτωση αφαιρέθηκε ο μήνας Ιανουάριος του 1983, που παρουσίαζε πολύ χαμηλές απορροές, από τη χρονοσειρά με την οποία έγινε ο έλεγχος των αποτελεσμάτων.

7.4.5 Αρχικά αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας χαμηλών απορροών

Πολλές φορές, τα μετρημένα δεδομένα παρουσιάζουν σφάλματα που μπορεί να αλλοιώσουν τον στατιστικό έλεγχο. Έτσι, και εδώ είχαμε κάποιες εσφαλμένες μετρήσεις στη χρονοσειρά των ελαχίστων απορροών που ξεχώριζαν. Οι τιμές αυτές είτε ήταν πολύ υψηλές είτε πολύ χαμηλές. Τα έτη που παρουσίαζαν τόσο υψηλές τιμές μετρημένης απορροής αφαιρέθηκαν από την ιστορική χρονοσειρά. Τα έτη που παρουσίαζαν τις πολύ χαμηλές απορροές ελέγχθηκαν με βάση τις βροχοπτώσεις που είχαμε για την περίοδο εκείνη. Όπου αυτές δικαιολόγησαν τις τόσο χαμηλές απορροές το αντίστοιχο έτος δε σβήστηκε από τη χρονοσειρά, όπου όπως οι βροχοπτώσεις ήταν αξιοσημείωτες το έτος αφαιρέθηκε.

7.4.6 Τελικά αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας χαμηλών απορροών

Τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών ξηρασίας αφορούν τις ελάχιστες παροχές του ποταμού.

Η πρώτη κατηγορία δεικτών χαμηλής απορροής ενός υδατορεύματος αφορά αυτούς που αναφέρονται στο μέγεθος της χαμηλής απορροής. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, οι παρακάτω δείκτες:

1. $Q_{7,T}$ = ποσοστιαίο σημείο της κατανομής της ελάχιστης μέσης επταήμερης παροχής για τιμές της περιόδου επαναφοράς $T = 2, 5, 10, 25, 50$ έτη.
2. $Q_{m,T}$ = ποσοστιαίο σημείο της κατανομής της ελάχιστης μέσης μηνιαίας παροχής για τιμές της περιόδου επαναφοράς $T = 2, 5, 10, 25, 50$ έτη.

Οι δείκτες αυτοί χωρίζονται δηλαδή σε δυο κατηγορίες όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπολογίστηκαν οι ετησίως ελάχιστες εφταήμερες παροχές (ιστορικές και προσομοιωμένες) αλλά και οι ετησίως ελάχιστες μηνιαίες παροχές (επίσης ιστορικές και προσομοιωμένες) του ποταμού στην έξοδο την λεκάνης απορροής του. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στην προσαρμογή της συνάρτησης κατανομής Weibull με το λογισμικό «Υδρογνώμων» και, έπειτα, στον έλεγχο καταλληλότητας της κατανομής με το test χ^2 . Ο έλεγχος αυτός έδειξε ότι η κατανομή είναι κατάλληλη σε όλες τις περιπτώσεις και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Έτσι, προχωρήσαμε στον εντοπισμό των τιμών των ελαχίστων παροχών που αντιστοιχούν σε $T = 2, T = 5, T = 10, T = 25$ και $T = 50$ έτη (ποσοστιαία σημεία).

Από αυτή τη διαδικασία προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις:

- Ετησίως ελάχιστες εφταήμερες παροχές (Ιστορικές)

Μια φορά στα 2 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 1.07 ($T = 2$).

Μια φορά στα 5 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.87 ($T = 5$).

Μια φορά στα 10 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.76 ($T = 10$).

0.22 Μια φορά στα 25 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.64 ($T = 25$).

Μια φορά στα 50 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.56 ($T = 50$).

- Ετησίως ελάχιστες εφταήμερες παροχές (Προσομοιωμένες)

Μια φορά στα 2 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 1.22 ($T = 2$).

Μια φορά στα 5 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.89 ($T = 5$).

Μια φορά στα 10 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.72 ($T = 10$).

Μια φορά στα 25 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.55 ($T = 25$).

Μια φορά στα 50 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.46 ($T = 50$).

- Ετησίως ελάχιστες μηνιαίες παροχές (Ιστορικές)

Μια φορά στα 2 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 1.05 ($T = 2$).

Μια φορά στα 5 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.86 ($T = 5$).

Μια φορά στα 10 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.76 ($T = 10$).

Μια φορά στα 25 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.64 ($T = 25$).

Μια φορά στα 50 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.57 ($T = 50$).

- Ετησίως ελάχιστες μηνιαίες παροχές (Προσομοιωμένες)

Μια φορά στα 2 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 1.2 ($T = 2$).

Μια φορά στα 5 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.88 ($T = 5$).

Μια φορά στα 10 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.72 ($T = 10$).

Μια φορά στα 25 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.55 ($T = 25$).

Μια φορά στα 50 χρόνια η τιμή της απορροής θα πέσει κάτω από το 0.45 ($T = 50$).

Αφού βρέθηκαν τα παραπάνω ποσοστιαία σημεία με τη βοήθεια του λογισμικού «Υδρογνώμων», υπολογίστηκαν οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ ιστορικών και προσομοιωμένων τιμών και για τα δυο περιπτώσεις, για τις ετησίως ελάχιστες εφταήμερες και μηνιαίες παροχές. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με απλό λογισμικό και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

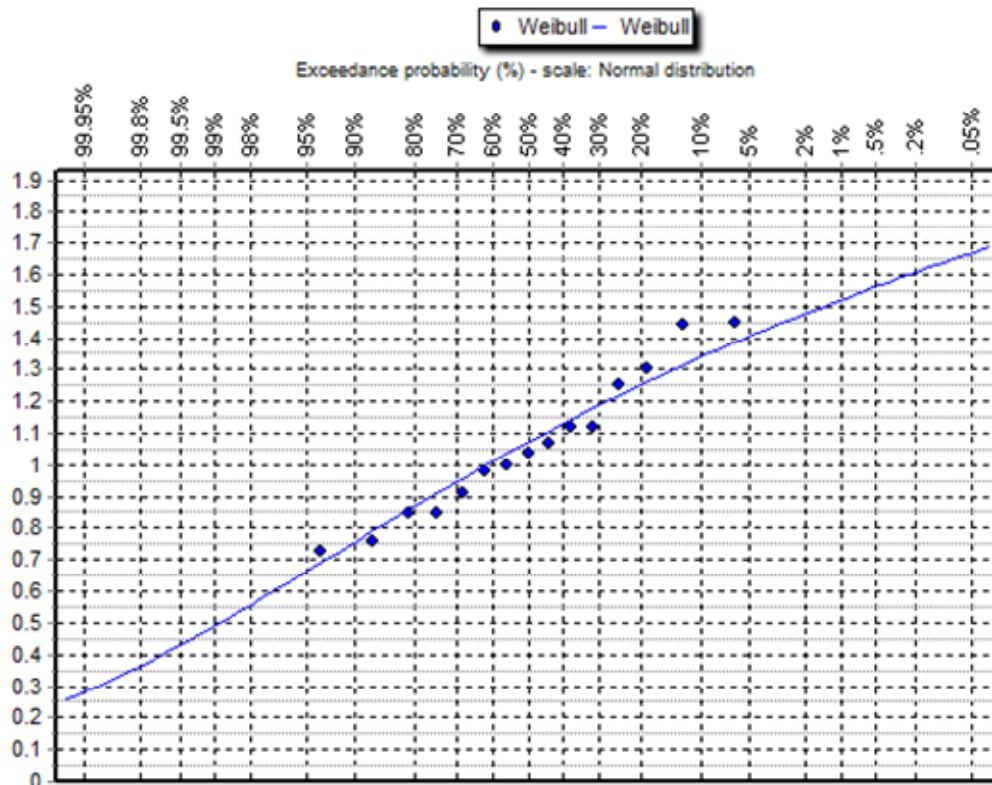
Πίνακας 7.7: Ποσοστιαίες διαφορές ιστορικών και προσομοιωμένων ετησίως ελαχίστων εφταήμερων παροχών

Περίοδος επαναφοράς $T =$	Ποσοστιαία διαφορά
2	0.1401 ή 14.01%
5	0.0229 ή 2.29%
10	0.0555 ή 5.55%
25	0.1636 ή 16.36%
50	0.2173 ή 21.27%

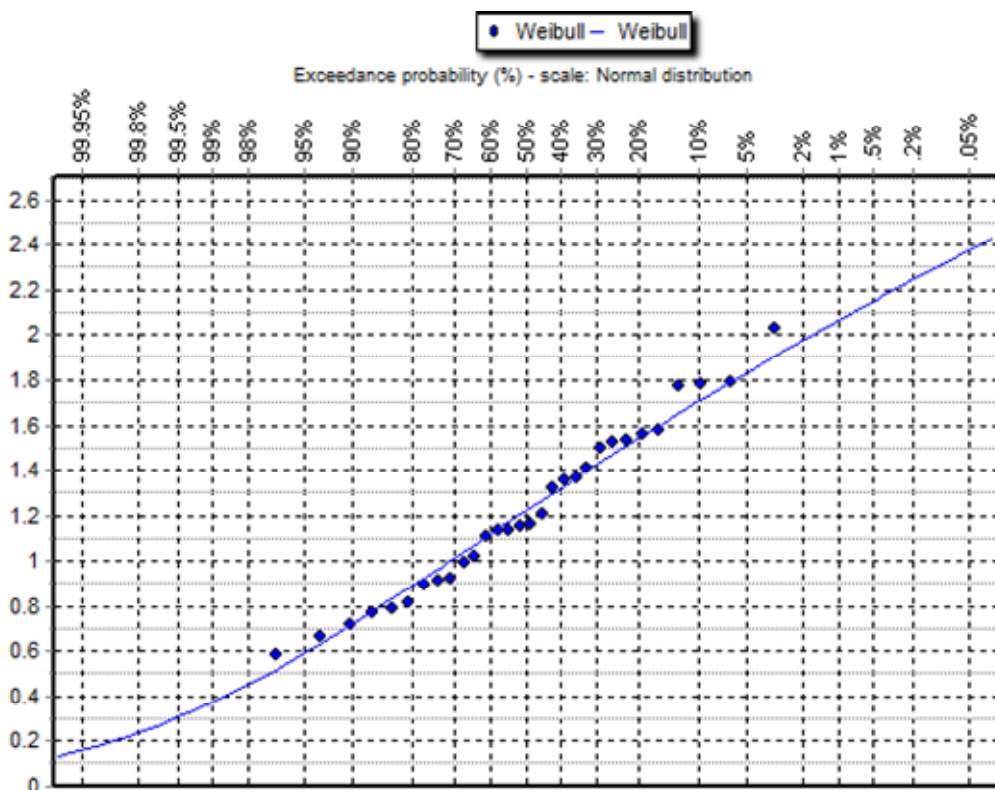
Πίνακας 7.8: Ποσοστιαίες διαφορές ιστορικών και προσομοιωμένων ετησίως ελαχίστων μηνιαίων παροχών

Περίοδος επαναφοράς $T =$	Ποσοστιαία διαφορά
2	0.1428 ή 14.28%
5	0.0232 ή 2.32%
10	0.0555 ή 5.55%
25	0.1636 ή 16.36%
50	0.2666 ή 26.66%

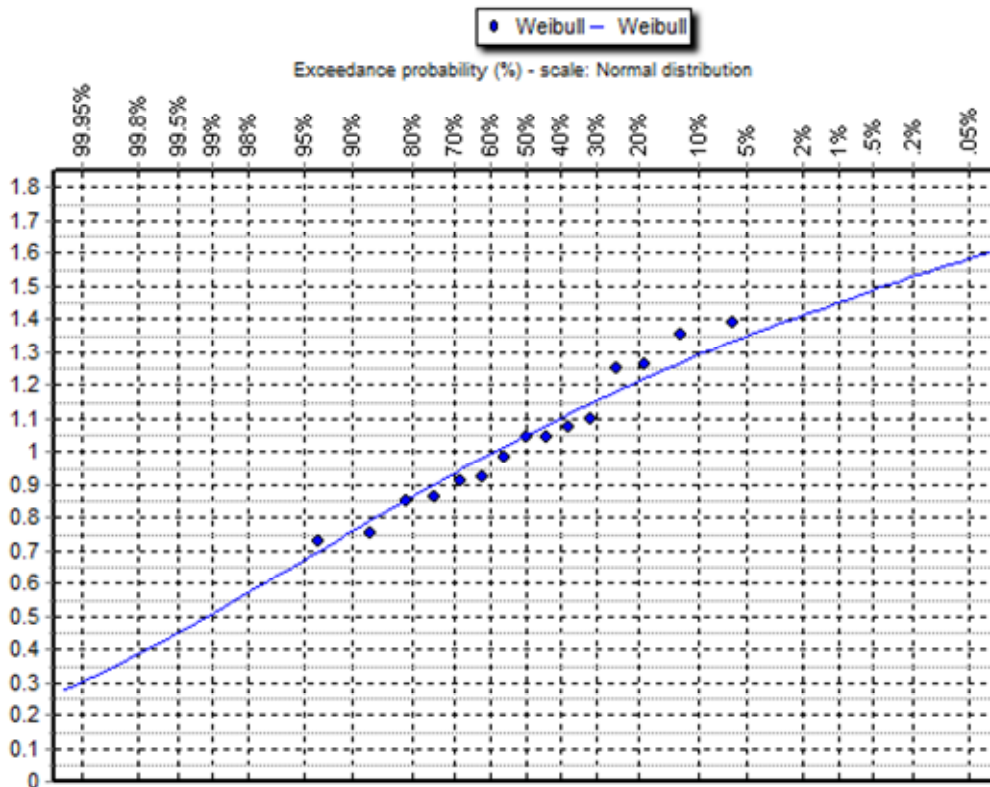
Παρακάτω παρουσιάζονται και διαγραμματικά οι κατανομές για την καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων:



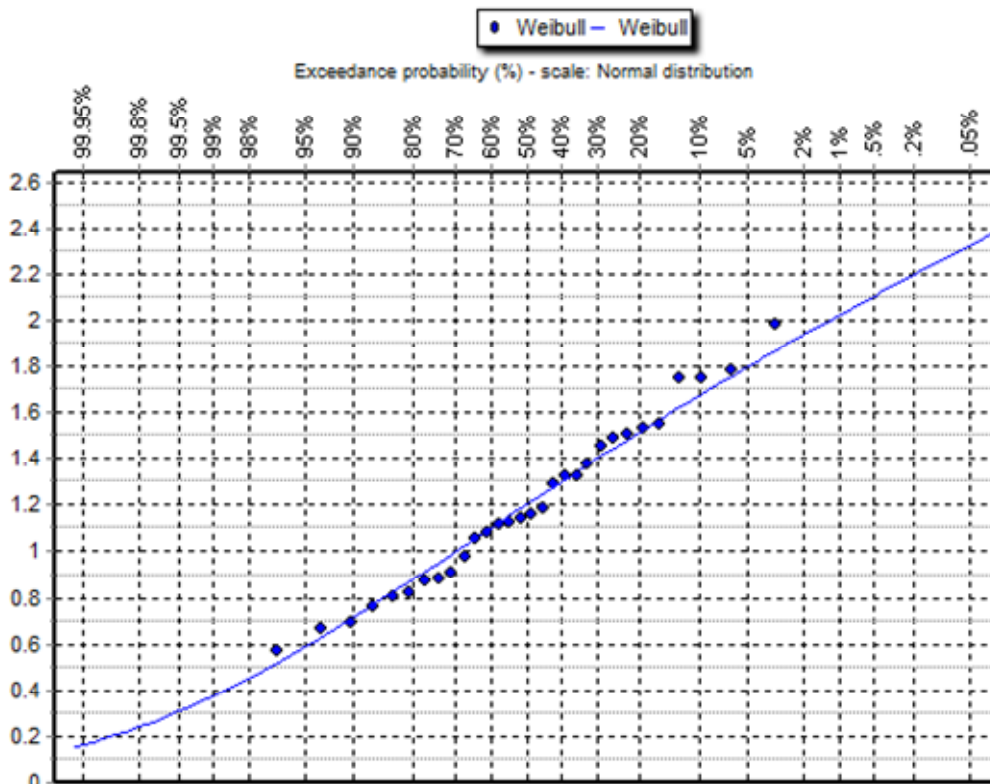
Σχήμα 7.20: Κατανομή ιστορικών ετησίως ελαχίστων εφταήμερων παροχών



Σχήμα 7.21: Κατανομή προσομοιωμένων ετησίως ελαχίστων εφταήμερων παροχών



Σχήμα 7.22: Κατανομή ιστορικών ετησίως ελαχίστων μηνιαίων παροχών



Σχήμα 7.23: Κατανομή προσομοιωμένων ετησίως ελαχίστων μηνιαίων παροχών

Η δεύτερη κατηγορία δεικτών χαμηλής απορροής αναφέρεται στη διάρκεια των γεγονότων χαμηλής απορροής. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, οι παρακάτω δείκτες:

1. \bar{Q}_7 = μέση τιμή των ελάχιστων μέσων επταήμερων παροχών

2. \bar{Q}_m = μέση τιμή των ελάχιστων μέσων μηνιαίων παροχών

Οι τιμές που πήραν οι δείκτες αυτοί στη παρούσα διπλωματική εργασία για τις παρατηρημένες αλλά και τις προσομοιωμένες παροχές παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 7.9: Μέσες τιμές των ελάχιστων μέσων επταήμερων παροχών

	$\bar{Q}_7 =$
Παρατηρημένες παροχές	1.0582
Προσομοιωμένες παροχές	1.2173

Πίνακας 7.10: Μέσες τιμές των ελάχιστων μέσων μηνιαίων παροχών

	$\bar{Q}_m =$
Παρατηρημένες παροχές	1.0333
Προσομοιωμένες παροχές	1.1977

Παρακάτω παρουσιάζονται και οι ποσοστιαίες διαφορές των δεικτών αυτών για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.11: Ποσοστιαίες διαφορές ιστορικών και προσομοιωμένων μέσων τιμών των ελάχιστων μέσων εφταήμερων και μηνιαίων παροχών

Ποσοστιαία διαφορά μέσων τιμών ελάχιστων εφταήμερων παροχών	0.1503 ή 15.03%
Ποσοστιαία διαφορά μέσων τιμών ελάχιστων μηνιαίων παροχών	0.1591 ή 15.91%

8 Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα σχετικά με τη διαθέσιμη πληροφορία και το επιλεγέν μοντέλο

Λόγω της πολυπλοκότητας του υδρολογικού κύκλου είναι αναμενόμενο ότι οποιαδήποτε υδρολογική έρευνα ή μελέτη, όποια και αν είναι η κλίμακά της, θα συναντήσει διάφορες δυσκολίες κατά την διεξαγωγή της.

Όσον αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψαν διάφορα προβλήματα σε διάφορα στάδια της εκπόνησής της. Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά με την (κατά το δυνατόν) σειρά εμφάνισής τους, καθώς και το πώς και σε ποίο βαθμό αντιμετωπίστηκαν.

Οι χάρτες της Γ.Υ.Σ. που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν από το εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε αναλογική – εκτυπωμένη μορφή, έγινε η σάρωσή τους με σαρωτή και, στη συνέχεια, ψηφιοποιήθηκαν, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι ψηφιακοί πλέον χάρτες έπρεπε να γεωαναφερθούν όσο το δυνατό καλύτερα. Θεωρήθηκε σωστό, εξ αρχής, να ληφθούν ως σημεία γνωστών συντεταγμένων για την γεωαναφορά, όλες οι κορυφές του κανάβου με κωδικοποίηση σε ΕΓΣΑ '87. Κάτι τέτοιο μπορεί θεωρητικά να φαίνεται ότι θα αποδίδει την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, στην πράξη, όμως, ο πολύ μεγάλος αριθμός σημείων προσδίδει «θόρυβο» και τελικά χειροτερεύει την ακρίβεια του αποτελέσματος. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε αφαιρώντας σημεία γνωστών συντεταγμένων. Επιδίωξη, ωστόσο, ήταν η διατήρηση ενός αρκετά μεγάλου αριθμού σημείων για καλύτερη προσαρμογή στην πραγματικότητα του συνόλου του χάρτη. Τελικά αποδείχθηκε ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα προέκυπτε με την διατήρηση αρκετών σημείων περιμετρικά στο χάρτη και λιγότερων σημείων στο εσωτερικό του και κυρίως κοντά στην περιοχή στην οποία θα γινόταν συνένωση με το γειτονικό φύλλο χάρτου. Στις περιοχές συνένωσης των 3 χαρτών, παρουσιάστηκε μια μικρή έλλειψη πληροφορίας. Η έλλειψη αυτή οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στον τεμαχισμό ενός ενιαίου χάρτη από την Γ.Υ.Σ. ώστε να προκύψουν τα φύλλα χάρτου σε διαχειρίσιμο μέγεθος, όπως επίσης και, κατά δεύτερο λόγο, στα σφάλματα της γεωαναφοράς.

Ιδιαίτερα επίπονη αποδείχθηκε η διαδικασία διανυσματοποίησης των χαρτών. Η δυσκολία οφείλεται κυρίως στην μικρή κλίμακα των χαρτών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στην μεγάλη έκταση της περιοχής.

Τα βροχομετρικά δεδομένα παρουσίαζαν σημαντικές ελλείψεις που όμως δεν αποδείχθηκαν εμπόδιο για την ορθή συμπλήρωσή τους, λόγω των μη επικαλυπτόμενων «κενών» μεταξύ των διαφόρων βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.

Προβλήματα παρουσιάστηκαν με τις διαθέσιμες μετρήσεις της θερμοκρασίας. Αναζητήθηκαν από τη ΔΕΗ αλλά δεν υπήρχαν δεδομένα για όλο το διάστημα που χρειαζόμασταν. Οι σταθμοί της περιοχής δεν ήταν παλιοί, ούτε πλήρως εξοπλισμένοι και, έτσι, είχαμε μετρήσεις της θερμοκρασίας για μεταγενέστερα έτη. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας από γειτονική λεκάνη απορροής με κατάλληλες αναγωγές.

Πρόβλημα παρουσιάστηκε επίσης με τις διαθέσιμες μετρήσεις της απορροής. Οι μετρήσεις αυτές ήταν ελάχιστες. Έτσι η ημερήσια απορροή έπρεπε να εκτιμηθεί έμμεσα με τη χρήση των ημερήσιας στάθμης του ποταμού και την κατασκευή των καμπυλών στάθμης - παροχής. Και αυτό το εγχείρημα ήταν δύσκολο γιατί έπρεπε να αφαιρεθούν κάποια σημεία υδρομετρήσεων με ιδιαίτερη προσοχή και ύστερα από προσωπική εκτίμηση.

Τα προβλήματα συνεχίστηκαν και μετά την εξαγωγή των τελικών ημερήσιων απορροών του ποταμού. Κάποιες από αυτές ήταν εμφανώς λανθασμένες, και έπρεπε και αυτές να αφαιρεθούν με προσοχή ώστε να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα της μελέτης.

Ένα ακόμη πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε στην πορεία ήταν η έλλειψη δεδομένων για τα εδαφολογικά στοιχεία. Και αυτά αναζητήθηκαν προσωπικά από το ΙΔΕ και ύστερα από μια χρονοβόρο διαδικασία, δόθηκαν σε αναλογική μορφή. Έπρεπε να γίνει πάλι η διαδικασία σάρωσης, γεωαναφοράς και ψηφιοποίησης, όπως ακριβώς έγινε και με τους χάρτες της ΓΥΣ.

Γενικά λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι η διαθεσιμότητα των δεδομένων για υδρολογικές μελέτες, στον ελληνικό χώρο είναι μικρή. Ακόμα και αν τα στοιχεία υπάρχουν, η ανάκτησή τους είναι δύσκολη έως και αδύνατη. Πολλά από αυτά διατίθενται έναντι ενός τιμήματος και η μορφή τους είναι μη επεξεργασμένη και αναλογική. Επίσης, πολλά δεδομένα υπήρχαν και σε ψηφιακή μορφή, αλλά δεν ήταν διαθέσιμα. Τέλος, παρατηρήθηκαν και αρκετά λάθη στις μετρήσεις κάτι που έκανε την εργασία μας δυσκολότερη.

Ακόμα, και όταν όλα τα δεδομένα ήταν έτοιμα να εισαχθούν στο πρόγραμμα SWAT –ύστερα από όλες αυτές τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν- αντιμετωπίστηκαν κάποια τεχνικά προβλήματα και λάθη στη συγκεκριμένη έκδοση του προγράμματος. Πρώτον, το πρόγραμμα, ενώ δημιουργούσε τα αρχεία μέσα σε ένα φάκελο που το ίδιο έφτιαχνε, δεν τα έτρεχε μέσα από αυτόν αλλά από έναν άλλο, φάκελο που προϋπήρχε στον υπολογιστή. Έτσι, κάθε φορά πριν τρέξουμε το πρόγραμμα έπρεπε να αντιγράψουμε τα αρχεία εκεί. Δεύτερον, έπρεπε να δημιουργήσουμε τα αρχεία κατακρήμνισης και θερμοκρασίας σε μορφή data base file στο ArcGIS. Το πρόγραμμα απαιτούσε συγκεκριμένα πεδία με συγκεκριμένο όνομα που όμως το ArcGIS δε επέτρεπε να γραφούν και αυτόματα άλλαζε το όνομα της στήλης.

Αφού αντιμετωπίστηκαν τα προβλήματα και διορθώθηκαν τα λάθη ακολούθησαν οι διαδικασίες για το τρέξιμο του μοντέλου.

Παρά τις ελλείψεις και τις δυσκολίες που υπήρξαν, το μοντέλο βαθμονομήθηκε αρκετά καλά στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη. Σε μηνιαίο βήμα, ο δείκτης Nash έφτασε το 0.8438 κατά την περίοδο βαθμονόμησης ενώ σε εφταήμερο βήμα ο δείκτης αυτός προέκυψε ίσος με 0.7025. Παρατηρείται λοιπόν ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα απορροών πλησίασαν αρκετά τα παρατηρημένα, όχι μόνο ως τιμές, αλλά και ως γενικότερη συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τις αυξήσεις και μειώσεις στην απορροή, με την απώλεια, βέβαια, ορισμένων αιχμών.

Παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται καλύτερα τα καλοκαίρια προσεγγίζοντας όλες τις τιμές των καλοκαιρινών μηνών. Τα δυο υδρογραφήματα απορροής (ιστορικών και προσομοιωμένων τιμών) ξεκινούν την καθοδική αλλά και την ανοδική πορεία τους μαζί. Και η βαθμονόμηση του χειμώνα όμως είναι καλή. Η μόνη ασυμφωνία που υπάρχει είναι στις αιχμές του υδρογραφήματος. Το υδρογράφημα απορροής των προσομοιωμένων τιμών έχει μεγαλύτερες αιχμές από αυτό των ιστορικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τις μετρήσεις της στάθμης του ποταμού με το σταθμήμετρο έχουμε χάσει πληροφορία για τις πλημμύρες κατά τους χειμερινούς μήνες.

Ένα σημαντικό επίσης συμπέρασμα είναι ότι οι μεταβλητές του υπογείου νερού (ALFA_BF, GW_DELAY, GW_REVAP, RCHRG_DP, GWQMN), μαζί με τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία, την υδραυλική αγωγιμότητα και τον αριθμό καμπύλης CNII είναι αυτές που επηρεάζουν περισσότερο το μοντέλο και άρα αυτές που τελικά τροποποιήθηκαν ώστε να γίνει η καλύτερη βαθμονόμησή του στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αγραφιώτη.

Από όλες αυτές τις παραμέτρους, στη συγκεκριμένη λεκάνη παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ρόλο τον έπαιξαν οι μεταβλητές RCHRG_DP, GW_REVAP και AWC. Αυτές ανέβασαν τον δείκτη Nash από το 0.60 - 0.63 που κυμαινόταν (κατά τη διάρκεια πολλών δοκιμών, γύρω στις 200) στο 0.70.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι το σημαντικότερο ρόλο παίζει η βροχόπτωση η οποία εισάγουμε στο πρόγραμμα καθώς, όταν επιχειρήθηκε η αύξησή της κατά κάποια ποσοστά, για δοκιμή, η τιμή της απορροής μεταβλήθηκε αρκετά ανάλογα με την αύξηση της βροχόπτωσης. Αντίθετα, πολύ μικρό ρόλο έπαιξαν οι θερμοκρασίες (καθώς συμμετέχουν μόνο στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής), τα εδάφη (καθώς παρατηρήθηκε ότι το πρόγραμμα δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις αλλαγές τους) και το μεγάλο πλήθος των χρήσεων γης (όσο πιο ομαδοποιημένες είναι, τόσο καλύτερα συμπεριφέρεται το μοντέλο).

8.2 Γενικά συμπεράσματα για την λεκάνη ενδιαφέροντος

Η εργασία αυτή κατέδειξε ότι η κατάρτιση μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής της κατηγορίας των κατανεμημένων μοντέλων φυσικής βάσης είναι μια επίπονη διαδικασία καθόσον αυτή απαιτεί την προεπεξεργασία και την αξιοποίηση μεγάλου πλήθους δεδομένων τα οποία, συνήθως, δεν διατίθενται με την ακρίβεια και την μορφή που απαιτούνται. Τα πλεονεκτήματα, όμως, της χρήσης αυτών των μοντέλων είναι πολλά και κυρίως:

1. η δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης αλλαγών στις υδρολογικές διεργασίες στην εξεταζόμενη λεκάνη (π.χ., κλιματική αλλαγή, ανθρωπογενείς επεμβάσεις),
2. η δυνατότητα υπολογισμού και παρακολούθησης της εξέλιξης πολλών υδρολογικών μεταβλητών στο εσωτερικό της εξεταζόμενης λεκάνης, πράγμα που είναι χρήσιμο σε πολλές εφαρμογές μηχανικού, και
3. η δυνατότητα επέκτασης των παρατηρημένων χρονοσειρών απορροής.

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η τρίτη από τις παραπάνω εφαρμογές των κατανεμημένων μοντέλων φυσικής βάσης με στόχο την βελτίωση της πληροφορίας σχετικά με τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χαμηλής απορροής της εξεταζόμενης λεκάνης.

Από την επεξεργασία αυτή των στατιστικών χαρακτηριστικών παρατηρείται αύξηση των ποσοστών αυτών ανάλογα με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Φαίνεται, και στις δυο περιπτώσεις, ότι η ποσοστιαία διαφορά είναι σαφώς μεγαλύτερη για περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη. Επίσης κοιτώντας τις διαφορές αυτές παρατηρούμε ότι, σε κάθε περίπτωση, οι ετησίως ελάχιστες μηνιαίες ποσοστιαίες διαφορές των παροχών είναι μεγαλύτερες είτε ίσες με τις αντίστοιχες εφταήμερες, ποτέ μικρότερες. Η εργασία κατέδειξε επίσης πόσο μεγάλες μπορούν να είναι οι αποκλίσεις των στατιστικών αυτών χαρακτηριστικών (μέχρι και 26.66%), όταν τα τελευταία υπολογίζονται με βάση την ιστορική χρονοσειρά και με βάση την προσομοιωμένη με το μοντέλο χρονοσειρά απορροής. Κατά συνέπεια, η μεθοδολογία της απλής επέκτασης των χρονοσειρών απορροής με τη βοήθεια κατανεμημένων μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής φυσικής βάσης χρειάζεται να βελτιωθεί περισσότερο και να

συμπληρωθεί. Τότε, βεβαίως, θα αξιοποιηθούν πλήρως τα παραπάνω πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας των υδρολογικών μοντέλων.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- Αναγνωστοπούλου, Χ. (2003) *Συμβολή στη Μελέτη της Ξηρασίας στον Ελληνικό Χώρο*, MSc Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
- Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρεία. (1998) Ερμηνευτικό λεξικό Μετεωρολογικών και Κλιματολογικών όρων, Αθήνα.
- Κοζάνης, Σ., Χριστοφίδης, Α. & Ευστρατιάδης, Α. (2010) *Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων έκδοση 4*, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ. & Ξανθόπουλος, Θ. (1999) *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ. (1997) *Στατιστική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ναλμπάντης, Ι. (2007) *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Πικούνης, Μ. (2000) *Μελέτη Επιπτώσεων των Αλλαγών Χρήσεων Γης στην Απορροή Λεκάνης με Χρήση GIS και του Υδρολογικού Μοντέλου SWAT*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Πικούνης, Μ. (2002) *Αρχές καλής μοντελοποίησης για την εναρμόνιση των υδρολογικών ομοιωμάτων: Εφαρμογή και ποιοτικός έλεγχος του ομοιώματος SWAT στην εκτίμηση των υδρολογικών επιπτώσεων των αλλαγών χρήσεων γης*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσακίρης, Γ. (υπεύθυνος έκδοσης). (1995) *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Τσακίρης, Γ. (υπεύθυνος έκδοσης). (2006) *Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός και Διαχείριση Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Ξενόγλωσσες

- Adams W.A. (1973) The effect of organic matter and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* 24: 10-17.
- Bengston, L. (1981) Snowmelt-generated runoff in urban areas. p. 444-451. In B.C. Yen (ed.) *Urban stormwater hydraulics and hydrology: proceedings of the Second International Conference on Urban Storm Drainage*, held at Urbana, Illinois, USA, 15-19 June 1981 Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Carlsaw, H.S. & J.C. Jaeger. (1959) *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, London.

- DeVries J.J. & Hromadka T.V. (1993) Computer Models for Surface Water, Chapter 21 in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, editor, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Fiering, M.B. (1967) *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge.
- Giakoumakis, S., Tsakiris, G. & Efremides, D. (1991) On the rainfall-runoff modelling in a Mediterranean island environment, in G. Takiris (editor), *Proceedings of the EWRA conference "Advances in Water Resources Technology"*, Athens, 20-23 March 1991, Balkema, Rotterdam.
- Huber, W.C. & R.E. Dickinson. (1988) *Storm water management model, version 4: user's manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Nachtnebel H.P., Lettl W. & Baumung St. (1993) *Abflußprognosemodell fuer das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr (Handbuch)*, Institut fuer Wasserwirtschaft, Hydrologie Wasserbau, Wien, Austria.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R. (2005) *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, Texas, USA.
- Nicks, A.D. (1974) Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. In *Proc. Symp. Statistical Hydrology*, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Phanartzis, C. A. (1972) *Simulation of watershed runoff in Morphou – Tylliria area*, Morphou – Tylliria feasibility studies, AGL:SF/CYP.513, Technical Report.
- Richardson, C.W. (1981) Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17(1):182-190.
- Shaw E. (1983) *Hydrology in Practice* (ed.). Van Nostrand Reinhold, v.k , Co. Ltd.
- Shuttleworth, W. (1993) Evaporation, Chapter 4 in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, editor, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Sloan, P.G., Morre I.D., Coltharp G.B. & Eigel J.D. (1983) *Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds*. Water Resources Inst. Report 142. Univ. Kentucky, Lexington.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J.R. (1955) *The Water Balance*. Drexel Inst. Tech. Publ. In *Climatol.*, 8(8), 1-104.
- Thornthwaite, C. W. (1948) *An approach toward a rational classification of climate*, *Geogr. Rev.*, 38(1), 55-94.
- Tsakalias, G., & Koutsoyiannis D. (1999) A comprehensive system for the exploration and analysis of hydrological data, *Water Resources Management*, 13, 269-302.
- USDA Soil Conservation Service. (1972) *National Engineering Handbook*, Section 4 Hydrology, Chapters 4-10.
- USDA Soil Conservation Service. (1983) *National Engineering Handbook*, Section 4 Hydrology, Chapter 19.
- Wallen, C. C. (1948) Aridity definition and their applicability. *Geographiska Annaler*, 49A, 367-384, Stockholm.

Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας 1: Σημεία για την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής

Α/Α Καμπύλης	Χρονικό εύρος	Σημεία		
		Αριθμός σημείου	Στάθμη (m)	Παροχή (m ³ /s)
1	08/08/1966 – 21/03/1968	1	0.49	1.1
		2	0.87	8.74
2	21/03/1968 – 11/06/1970	1	0.38	0.73
		2	0.9	19.98
3	11/06/1970 – 21/12/1976	1	0.73	0.98
		2	1.2	12.7
4	21/12/1976 – 12/04/1979	1	0.95	1.12
		2	1.34	18.22
5	12/04/1979 – 18/12/1979	1	0.26	1.39
		2	1	20.89
6	18/12/1979 – 27/01/1981	1	0.78	1.36
		2	1.23	26.11
7	27/01/1981 – 26/03/1983	1	0.7	2.08
		2	1.3	23.45
8	26/03/1983 – 23/01/1984	1	0.91	1.15
		2	1.24	26.38
9	23/01/1984 – 12/11/1984	1	1	1.22
		2	1.5	22.14
10	12/11/1984 – 02/08/1985	1	0.8	3.27
		2	1.47	48.1
11	02/08/1985 – 26/11/1985	1	0.76	1.002
		2	0.92	3.667
12	26/11/1985 – 24/07/1986	1	0.52	3.13
		2	0.96	20.3
13	24/07/1986 – 14/07/1987	1	0.46	1.25
		2	0.85	15.72
14	14/07/1987 – 09/01/1989	1	0.55	0.91
		2	1.26	38.8
15	09/01/1989 – 13/11/1989	1	1.11	1.06
		2	1.53	41.58
16	13/11/1989 – 09/07/1991	1	0.72	0.86
		2	0.94	8.72

Πίνακας 2: Σημεία για την κατάρτιση της καμπύλης επέκτασης

Όνομα καμπύλης	Χρονικό εύρος	Σημεία		
		Αριθμός σημείου	Στάθμη (m)	Παροχή (m ³ /s)
Καμπύλη επέκτασης	08/08/1966 – 09/07/1991	1	1	21.981
		2	1.111	26.219
		3	1.259	32.342
		4	1.457	41.325
		5	1.721	54.721
		6	2.072	75.052
		7	2.541	106.491
		8	3.166	156.092
		9	4	236.076

Πίνακας 3: Εξαγόμενες μεταβλητές του μοντέλου SWAT.

Μεταβλητές	Επεξήγηση
SUB	Αριθμός υπολεκάνης
YEAR	Ο αριθμός του έτος. Υφίσταται μόνο όταν έχουμε ημερήσιο ή ετήσιο βήμα
MON	Ημερήσιο βήμα: ο αριθμός της ημέρας (1-365/366, μηνιαίο βήμα: ο αριθμός του μήνα (1-12), ετήσιο βήμα: ο αριθμός του έτους με 4 ψηφία
AREA	Εμβαδό της υπολεκάνης σε km ²
PRECIP	Συνολική βροχόπτωση σε κάθε υπολεκάνη για το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm H ₂ O)
SNOMELT	Ποσό του πάγου ή του χιονιού που λιώνει στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm H ₂ O)
PET	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή για την κάθε υπολεκάνη στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm H ₂ O)
ET	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή για την κάθε υπολεκάνη στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm)
SW	Εδαφική υγρασία (mm). Η ποσότητα του νερού στο έδαφος στο τέλος της χρονικής περιόδου
PERC	Ποσότητα νερού που διηθείται στη ζώνη ριζοστρώματος στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm)
SURQ	Επιφανειακή απορροή στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται (mm H ₂ O)
GW_Q	Ποσότητα νερού από το ρηχό υδροφόρα που επιστρέφει στην επιφάνεια στο χρονικό διάστημα που χρησιμοποιείται (mm)
WYLD	Συνολική απορροή (mm H ₂ O). Η ποσότητα του νερού που φεύγει από την κάθε υπολεκάνη και συμμετέχει στη δημιουργία της συνολικής παροχής του ποταμού στο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται

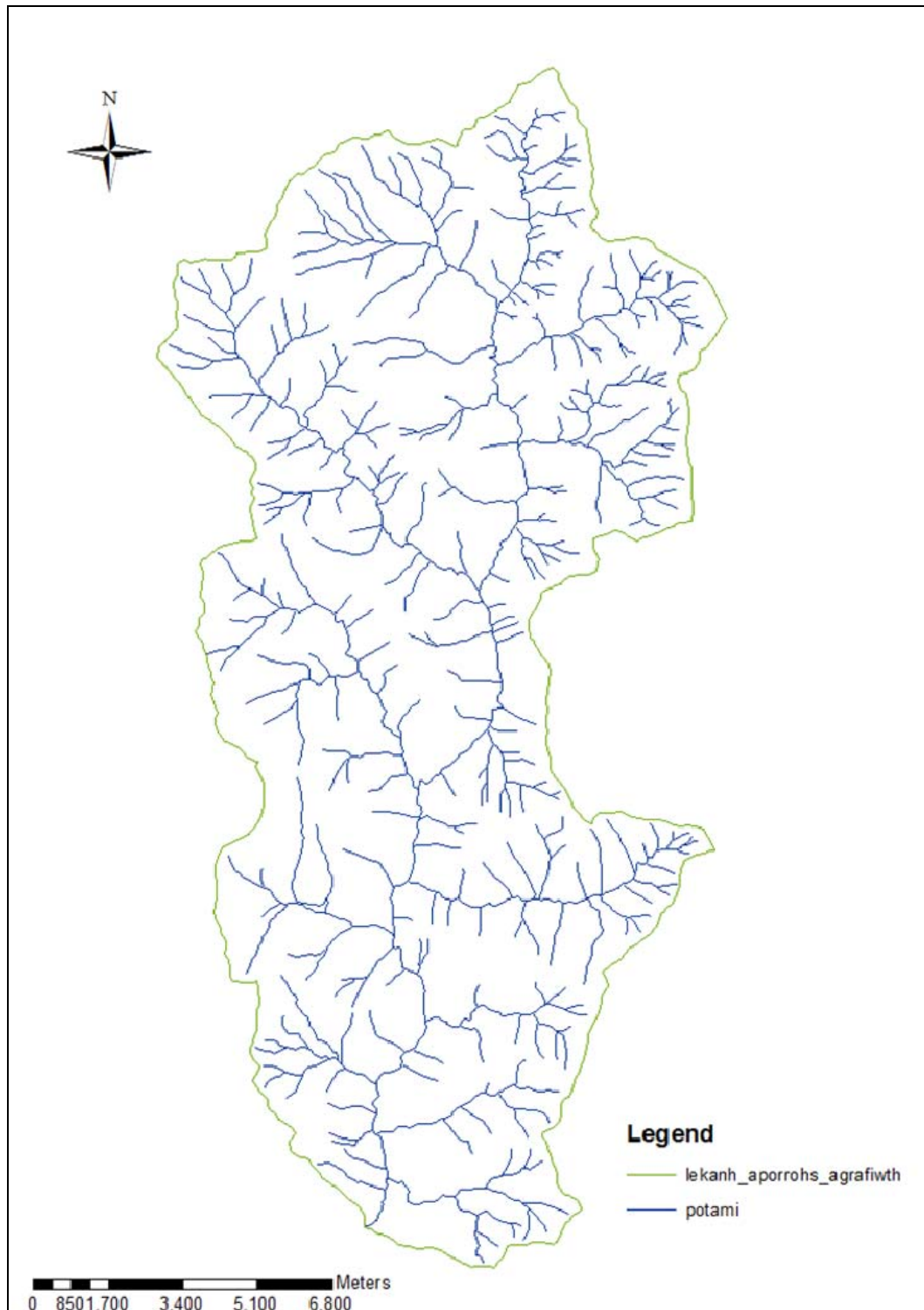
Πίνακας 4: Εξαγόμενα αποτελέσματα μιας ημέρας του έτους

SUB	YEAR	MON	AREA km2	PRECIP mm	SNOWMELT mm	PETmm	ETmm	SWmm	PERCmm	SURQmm	GW_Qmm	WYLDmm
1	1979	276	8.356	17.7	0	2.578	2.578	433.837	0	0	0	0.011
2	1979	276	4.706	17.7	0	2.578	2.577	433.724	0	0	0	0.012
3	1979	276	4.6781	17.7	0	2.578	2.578	433.745	0	0	0	0.012
4	1979	276	11.289	17.7	0	2.578	2.578	433.556	0	0	0	0.014
5	1979	276	5.0168	17.7	0	2.579	2.579	433.592	0	0	0	0.014
6	1979	276	10.293	17.7	0	2.579	2.579	433.595	0	0	0	0.014
7	1979	276	5.0646	17.7	0	2.58	2.58	433.583	0	0	0	0.014
8	1979	276	11.026	17.7	0	2.58	2.58	433.499	0	0	0	0.015
9	1979	276	29.224	17.7	0	2.58	2.58	433.357	0	0	0	0.016
10	1979	276	9.2725	17.7	0	2.581	2.581	433.463	0	0	0	0.015
11	1979	276	9.7826	17.7	0	2.581	2.581	433.311	0	0	0	0.017
12	1979	276	6.6227	17.7	0	2.583	2.582	433.509	0	0	0	0.014
13	1979	276	7.2642	17.7	0	2.583	2.583	433.282	0	0	0	0.017
14	1979	276	13.835	17.7	0	2.582	2.582	433.386	0	0	0	0.016
15	1979	276	3.9489	17.7	0	2.584	2.584	433.438	0	0	0	0.015
16	1979	276	17.198	17.7	0	2.584	2.584	433.467	0	0	0	0.015
17	1979	276	11.787	17.7	0	2.584	2.584	433.524	0	0	0	0.014
18	1979	276	2.7017	17.7	0	2.584	2.584	433.447	0	0	0	0.015
19	1979	276	5.8974	17.7	0	2.585	2.585	433.467	0	0	0	0.015
20	1979	276	6.2242	17.7	0	2.585	2.585	433.445	0	0	0	0.015
21	1979	276	6.2082	17.7	0	2.586	2.586	433.824	0	0	0	0.011
22	1979	276	3.7536	17.7	0	2.586	2.586	433.531	0	0	0	0.014
23	1979	276	2.2394	17.7	0	2.586	2.586	433.647	0	0	0	0.013
24	1979	276	6.2839	17.7	0	2.586	2.586	433.458	0	0	0	0.015
25	1979	276	1.2393	17.7	0	2.587	2.587	433.776	0	0	0	0.011
26	1979	276	7.7105	17.7	0	2.587	2.587	433.495	0	0	0	0.014
27	1979	276	2.2354	17.7	0	2.587	2.587	433.949	0	0	0	0.01

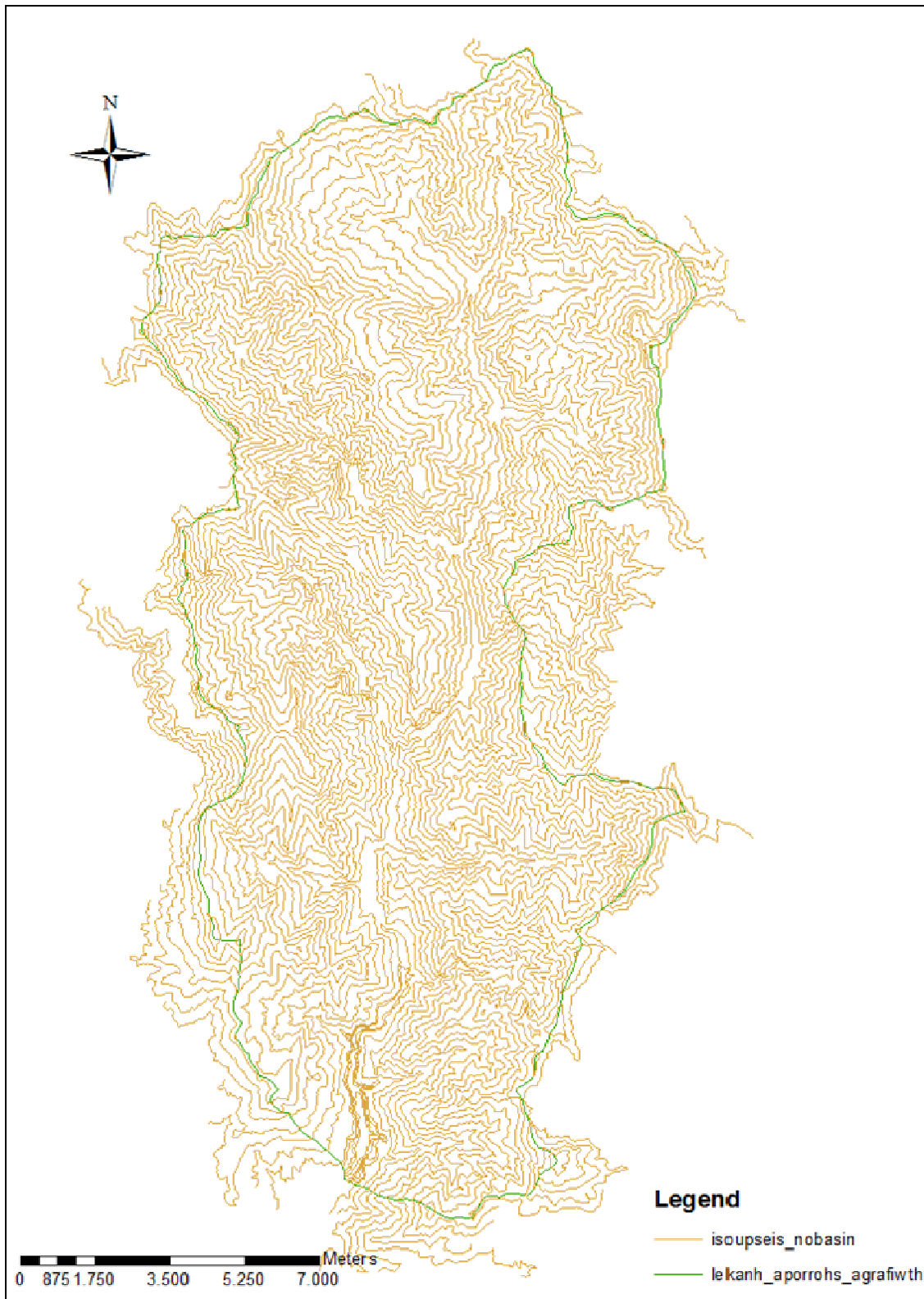
Πίνακας 5: Εξαγόμενα αποτελέσματα ενός μήνα του έτους

SUB	YEAR	MON	AREA km2	PRECIP mm	SNOWMELT mm	PETmm	ETmm	SWmm	PERCmm	SURQmm	GW_Qmm	WYLDmm
1	1975	11	8.356	280.6	15.999	33.481	28.952	469.697	158.295	12.532	37.444	69.913
2	1975	11	4.706	280.6	16	33.47	28.942	469.045	152.621	13.1	36.072	71.095
3	1975	11	4.6781	280.6	15.998	33.494	28.962	469.44	156.833	8.943	37.081	67.705
4	1975	11	11.289	280.6	15.999	33.472	28.942	468.379	147.971	8.813	34.913	68.856
5	1975	11	5.0168	280.6	15.996	33.511	28.974	468.606	149.26	9.901	35.186	69.352
6	1975	11	10.293	280.6	15.998	33.496	28.962	468.654	150.031	8.831	35.389	68.53
7	1975	11	5.0646	280.6	15.996	33.52	28.981	468.484	148.383	10.36	35.005	69.805
8	1975	11	11.026	280.6	15.995	33.531	28.989	468.202	146.659	7.414	34.549	68.047
9	1975	11	29.224	280.6	15.995	33.528	28.986	467.447	138.801	9.917	32.587	70.761
10	1975	11	9.2725	280.6	15.994	33.547	29.001	467.942	143.976	8.997	33.904	69.472
11	1975	11	9.7826	280.6	15.992	33.566	29.016	467.284	136.986	10.058	32.081	71.039
12	1975	11	6.6227	280.6	15.99	33.595	29.041	468.185	145.728	9.956	34.311	69.835
13	1975	11	7.2642	280.6	15.989	33.601	29.044	467.243	137.15	8.123	32.098	69.697
14	1975	11	13.835	280.6	15.99	33.593	29.038	467.715	142.394	6.629	33.445	68.021
15	1975	11	3.9489	280.6	15.987	33.624	29.064	467.979	144.285	7.666	33.911	68.43
16	1975	11	17.198	280.6	15.986	33.637	29.075	468.045	145.051	8.238	34.14	68.752
17	1975	11	11.787	280.6	15.987	33.636	29.075	468.346	147.765	8.059	34.82	68.279
18	1975	11	2.7017	280.6	15.987	33.633	29.072	468.088	145.557	6.448	34.237	67.459
19	1975	11	5.8974	280.6	15.985	33.656	29.09	468.08	145.135	8.387	34.127	68.809
20	1975	11	6.2242	280.6	15.984	33.667	29.098	467.982	144.705	7.48	34.039	68.273
21	1975	11	6.2082	280.6	15.983	33.676	29.11	469.972	160.68	10.038	37.954	67.797
22	1975	11	3.7536	280.6	15.983	33.679	29.109	468.519	149.535	6.34	35.212	66.86
23	1975	11	2.2394	280.6	15.982	33.694	29.123	469.045	153.264	8.959	36.138	68.07
24	1975	11	6.2839	280.6	15.982	33.691	29.118	468.093	146.157	6.224	34.396	67.221
25	1975	11	1.2393	280.6	15.981	33.702	29.131	469.832	159.469	9.05	37.582	67.199
26	1975	11	7.7105	280.6	15.98	33.713	29.137	468.295	147.657	6.788	34.762	67.39
27	1975	11	2.2354	280.6	15.98	33.713	29.142	470.768	166.848	10.191	39.381	66.906

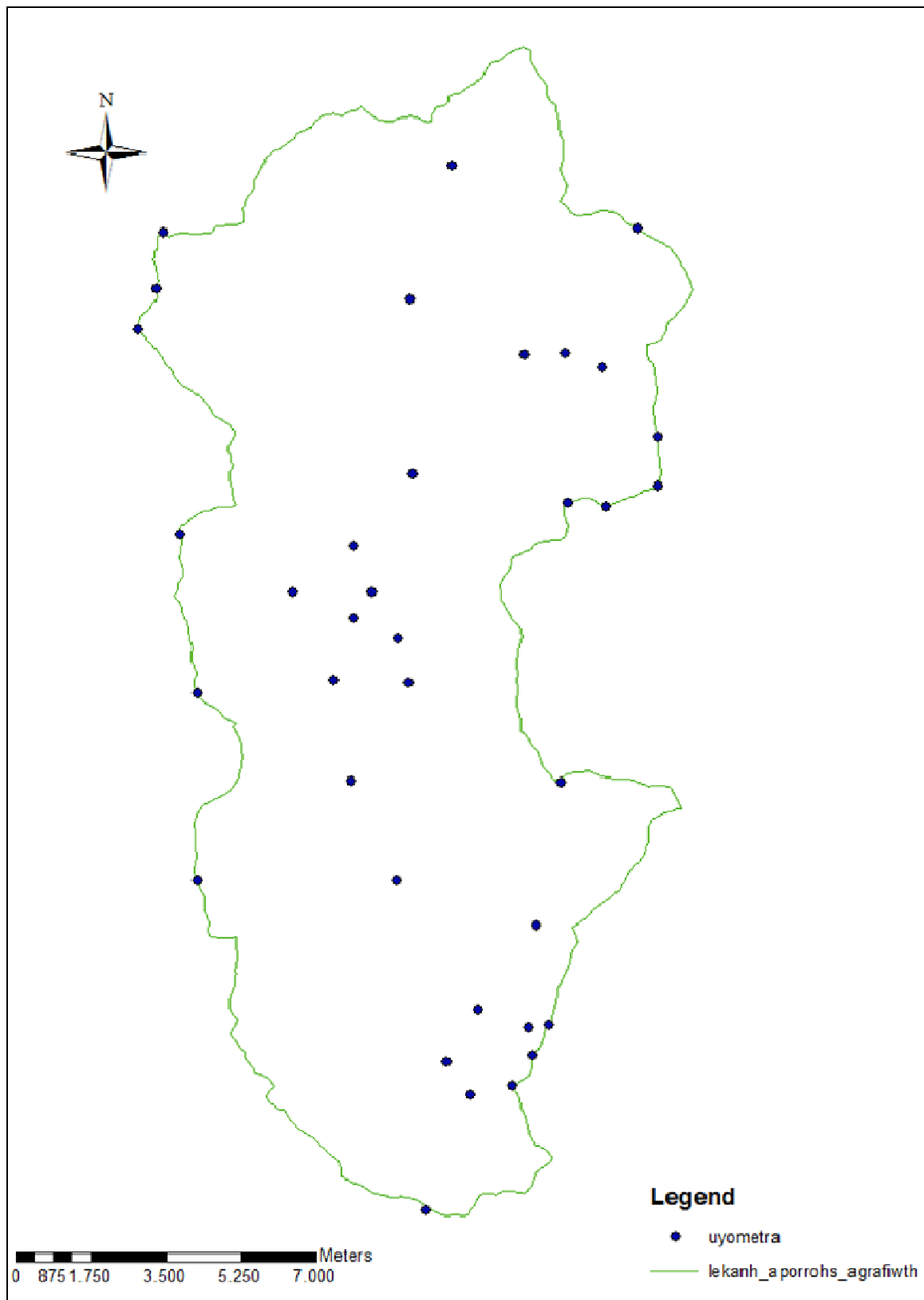
Παράρτημα Β: Σχήματα



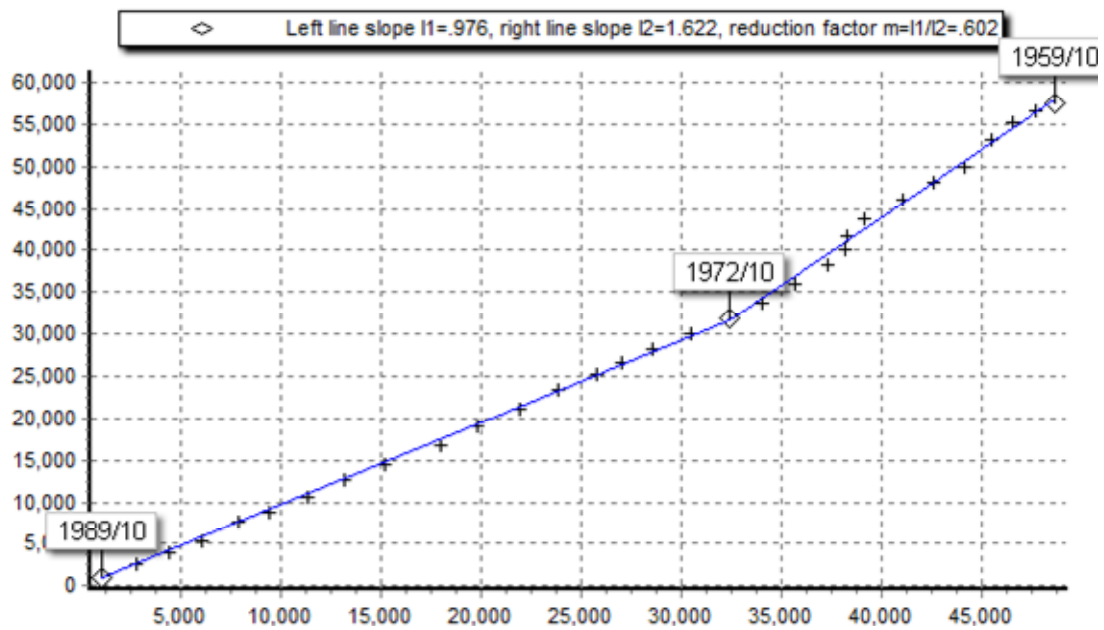
Σχήμα 1: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτό ψηφιοποιήθηκε από τους χάρτες στις ΓΥΣ



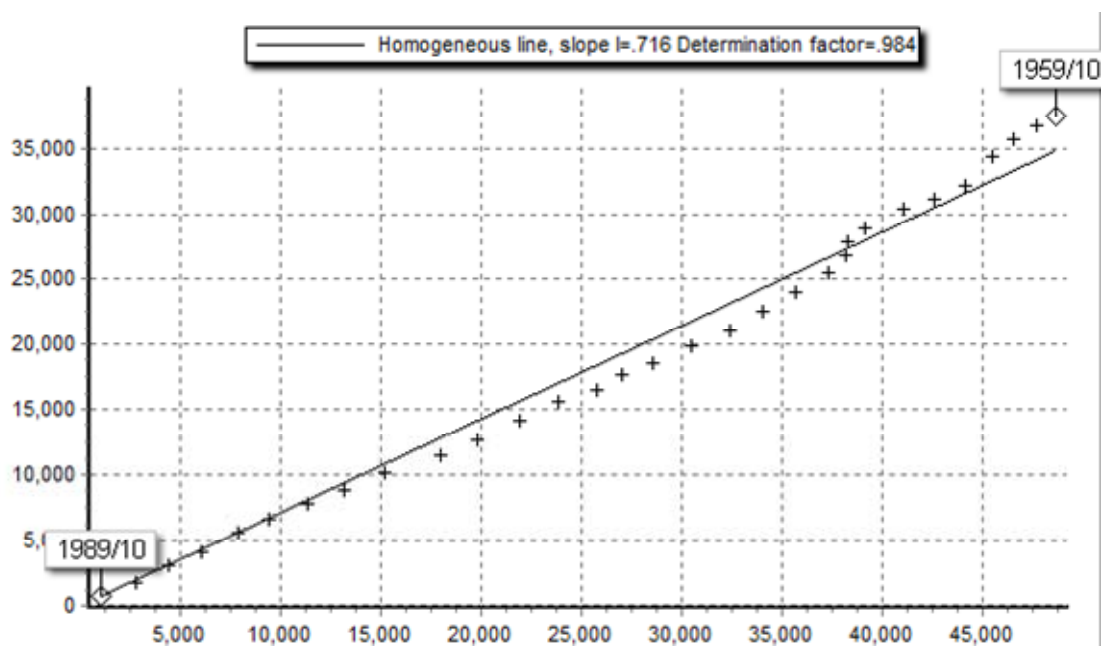
Σχήμα 2: Χάρτης ισοψών καμπυλών όπως ακριβώς αυτές ψηφιοποιήθηκαν από τους χάρτες της ΓΥΣ



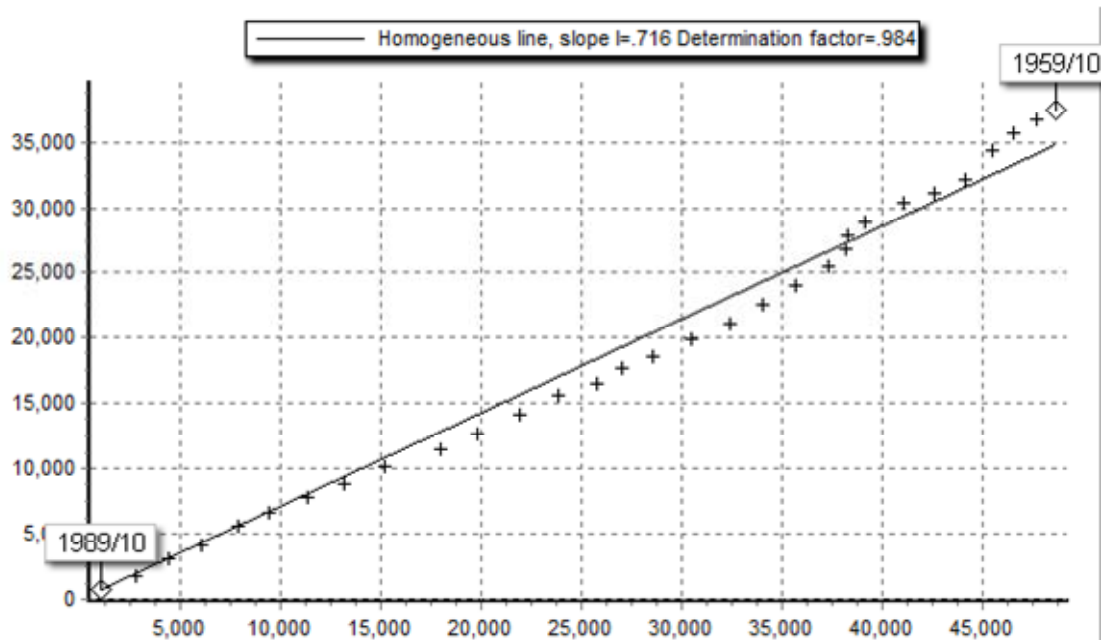
Σχήμα 3: Χάρτης υψομετρικών σημείων όπως ακριβώς τοποθετήθηκαν από τους χάρτες της ΓΥΣ



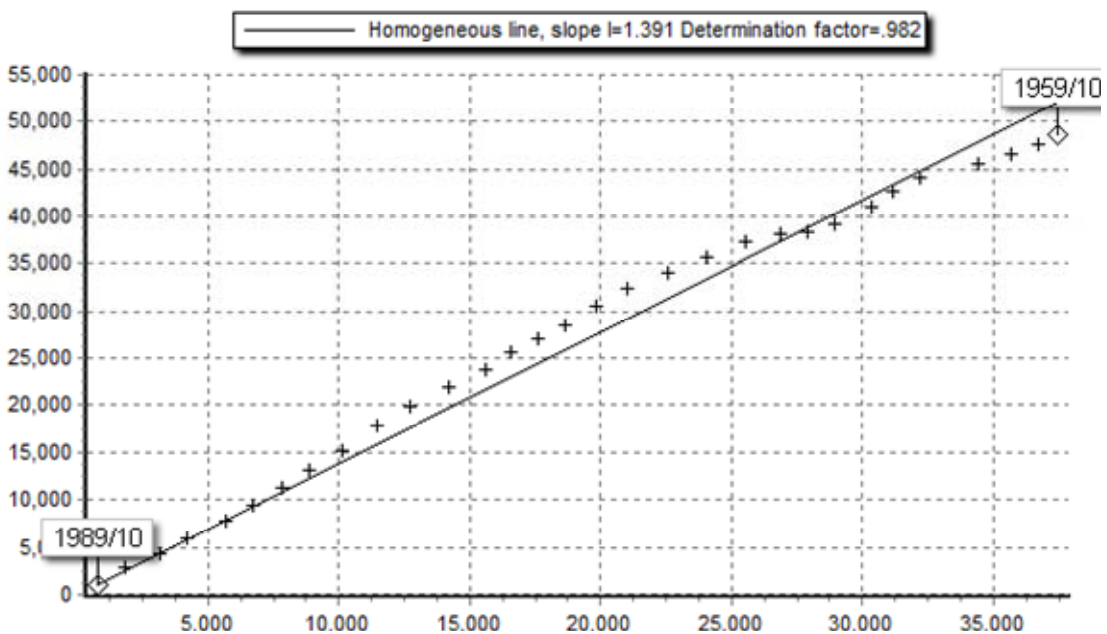
Σχήμα 4: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Τροβάτο και ελεγχόμενο σταθμό το Μοναστηράκι (συντελεστής $R^2=0.979$, κλίση ευθείας_1 = 0.976, κλίση ευθείας_2 = 1.622)



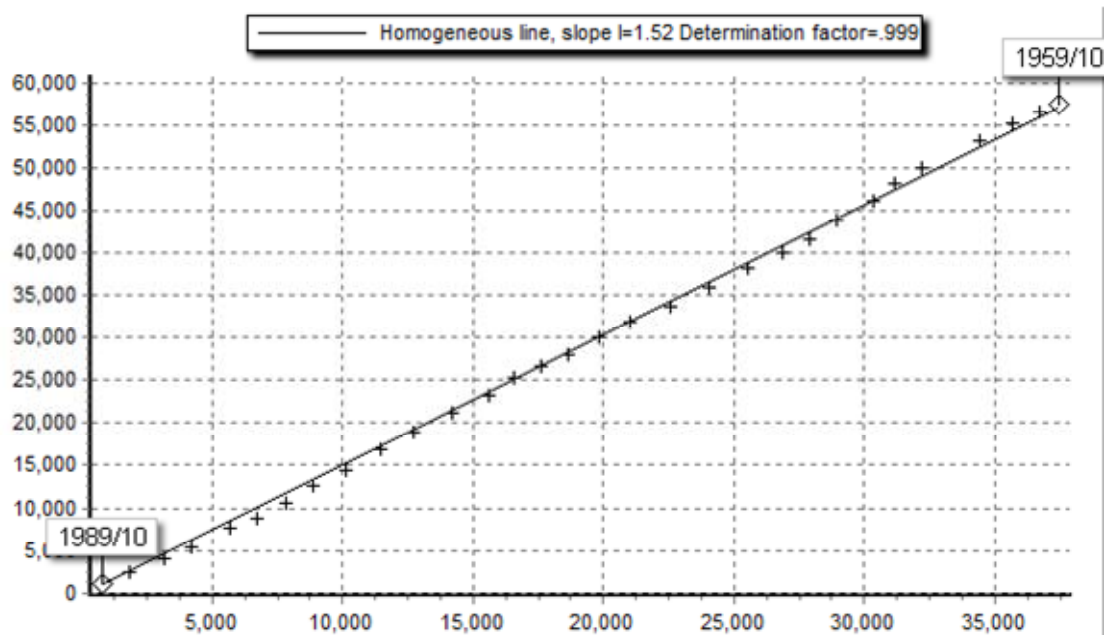
Σχήμα 5: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Τροβάτο και ελεγχόμενο σταθμό τα Φουσιανά (συντελεστής $R^2=0.984$, κλίση ευθείας = 0.716)



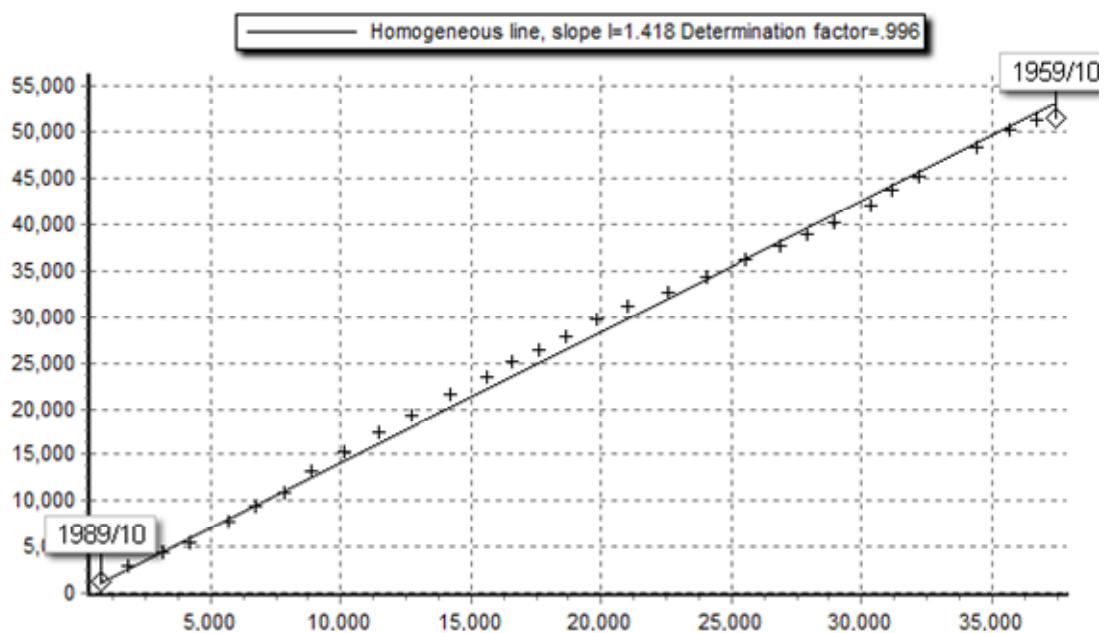
Σχήμα 6: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης το Τροβάτο και ελεγχόμενο σταθμό τη Μαυρομάτα (συντελεστής $R^2 = 0.984$, κλίση ευθείας = 0.716)



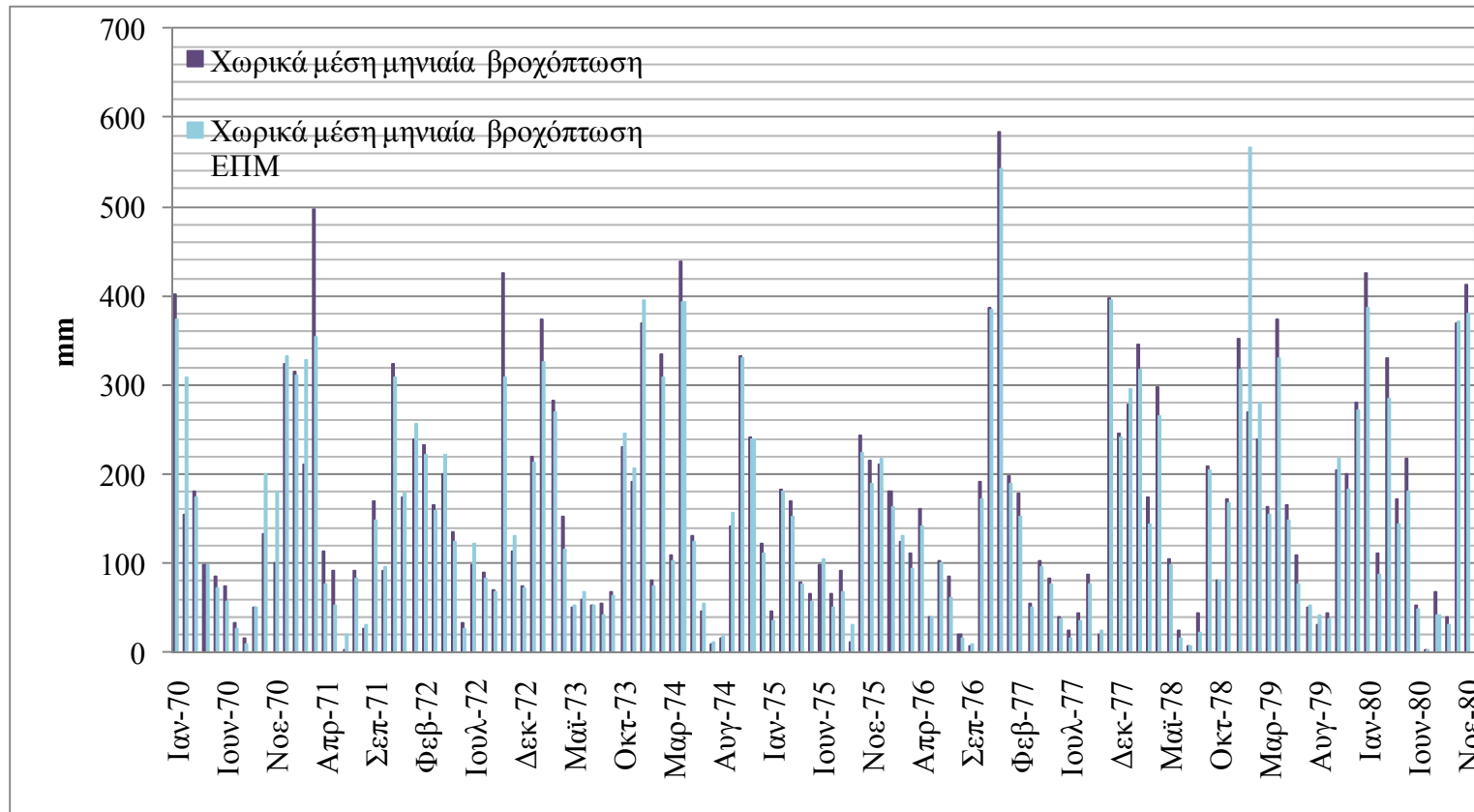
Σχήμα 7: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τα Φουσιανά και ελεγχόμενο σταθμό το Τροβάτο (συντελεστής $R^2 = 0.982$, κλίση ευθείας = 1.391)



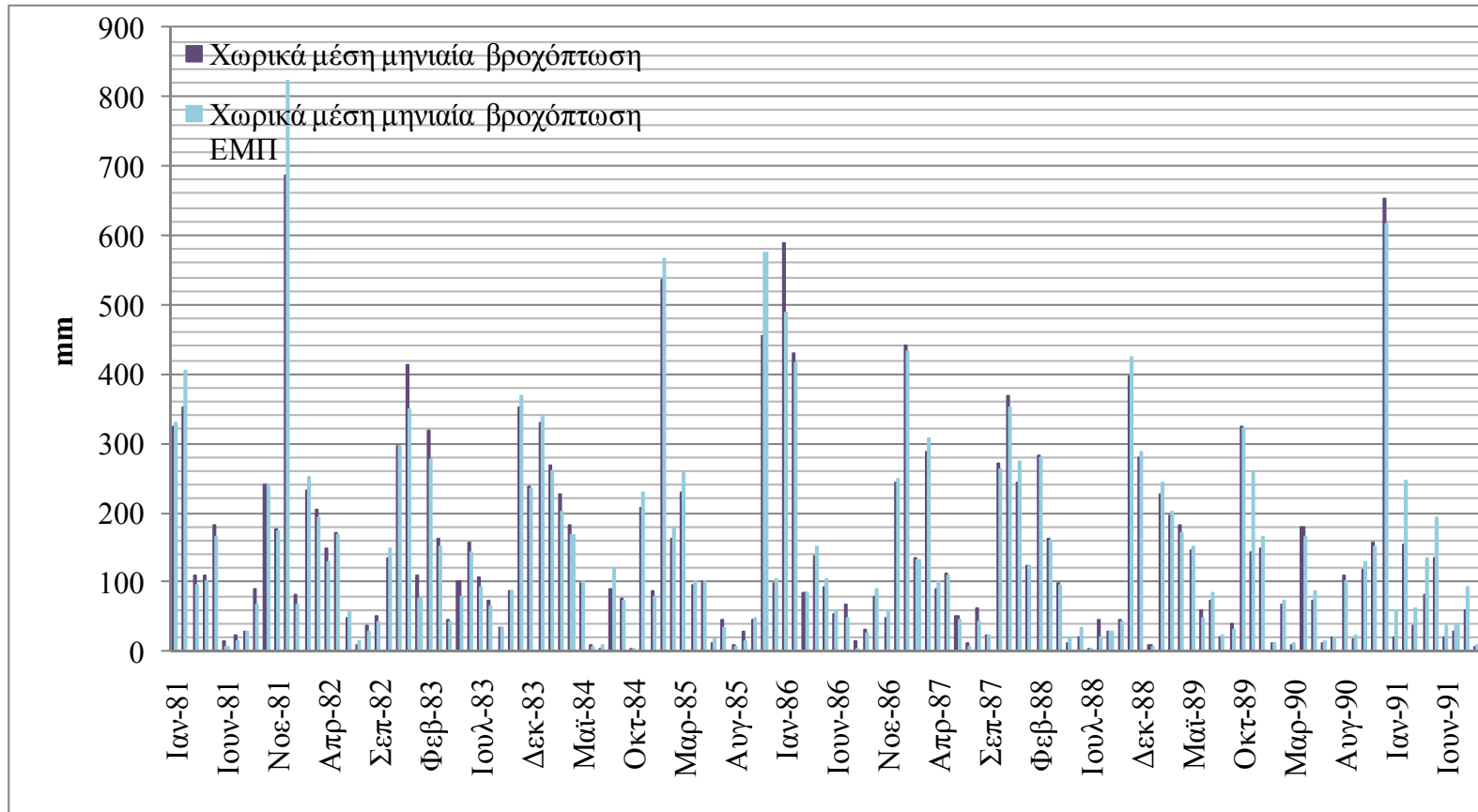
Σχήμα 8: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τα Φουσιανά και ελεγχόμενο σταθμό το Μοναστηράκι (συντελεστής $R^2 = 0.999$, κλίση ευθείας = 1.520)



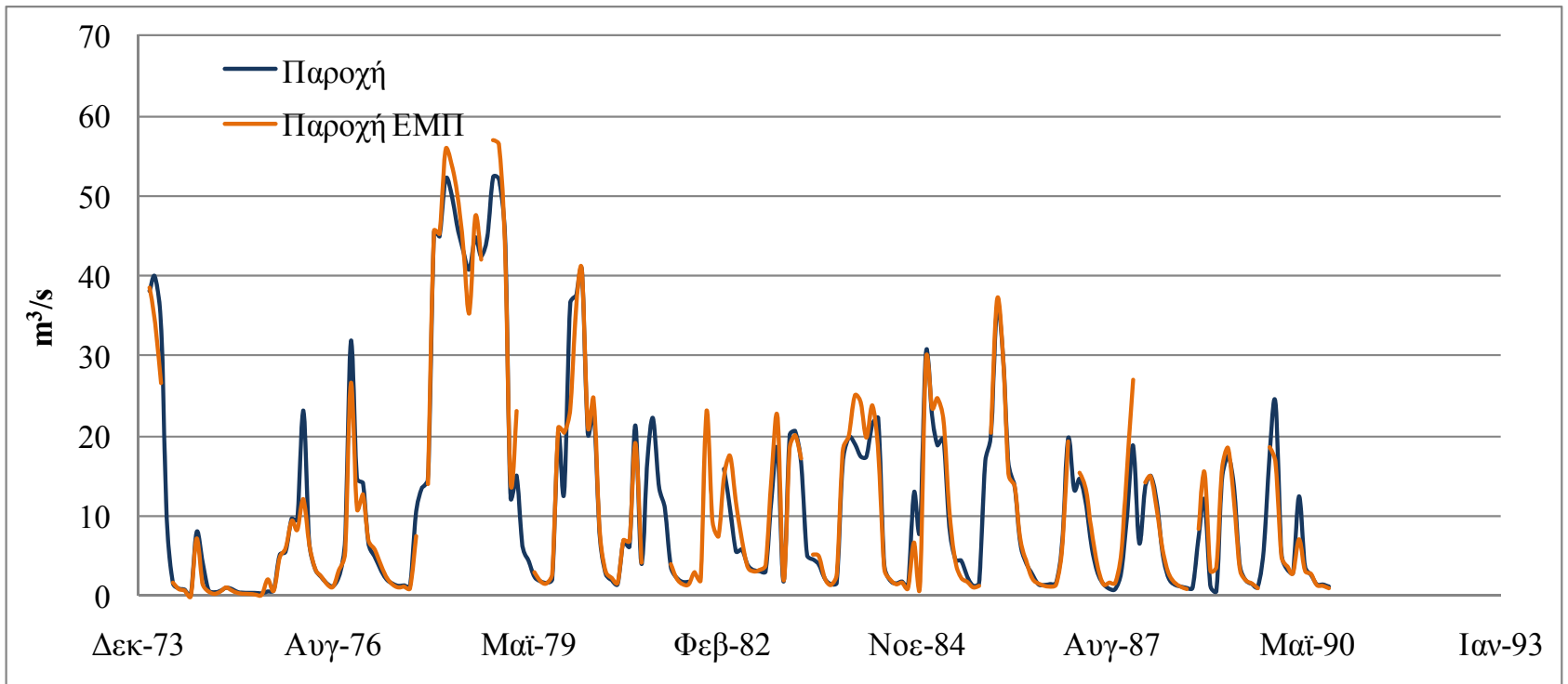
Σχήμα 9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τα Φουσιανά και ελεγχόμενο σταθμό τη Μαυρομάτα (συντελεστής $R^2 = 0.996$, κλίση ευθείας = 1.418)



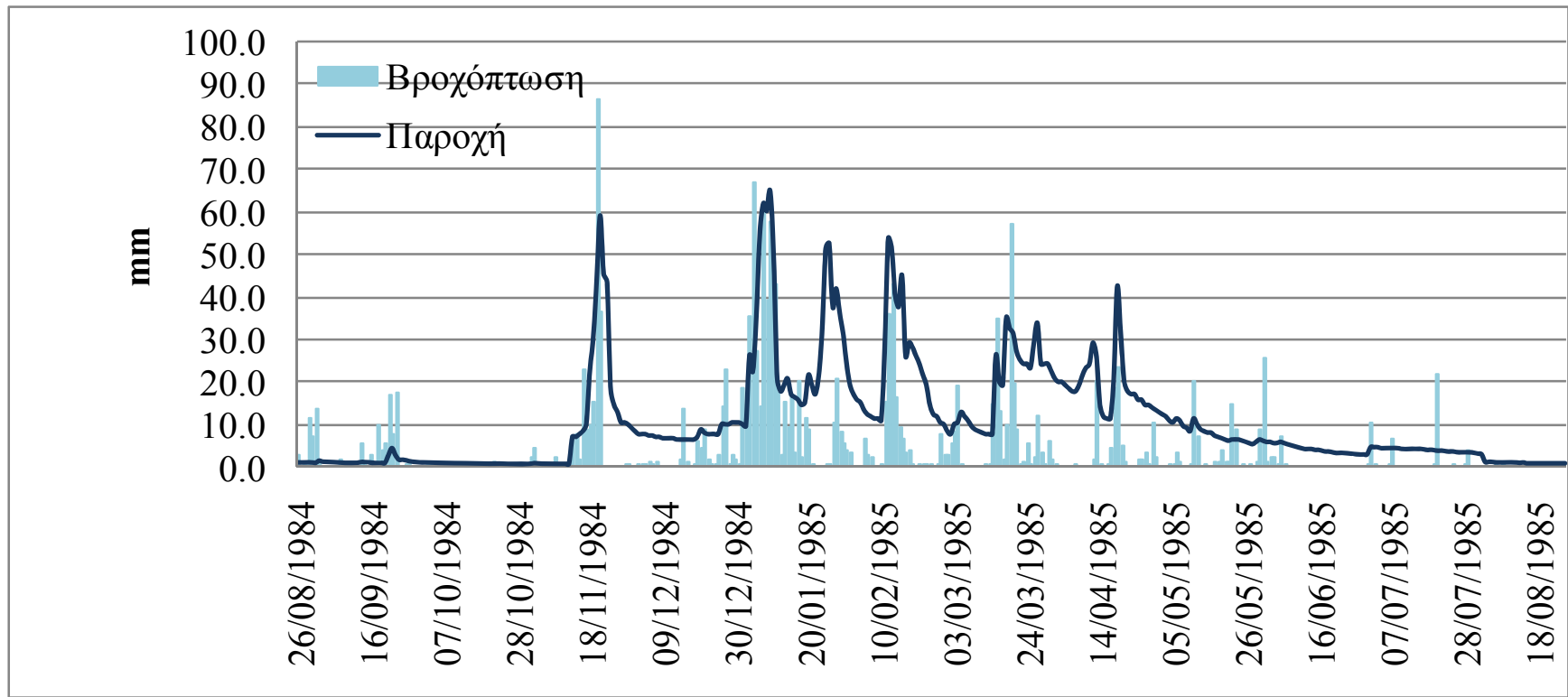
Σχήμα 10: Σύγκριση υπολογισμένης βροχόπτωσης με παλαιότερη από το ΕΜΠ (1992) για την περίοδο 1970-1980



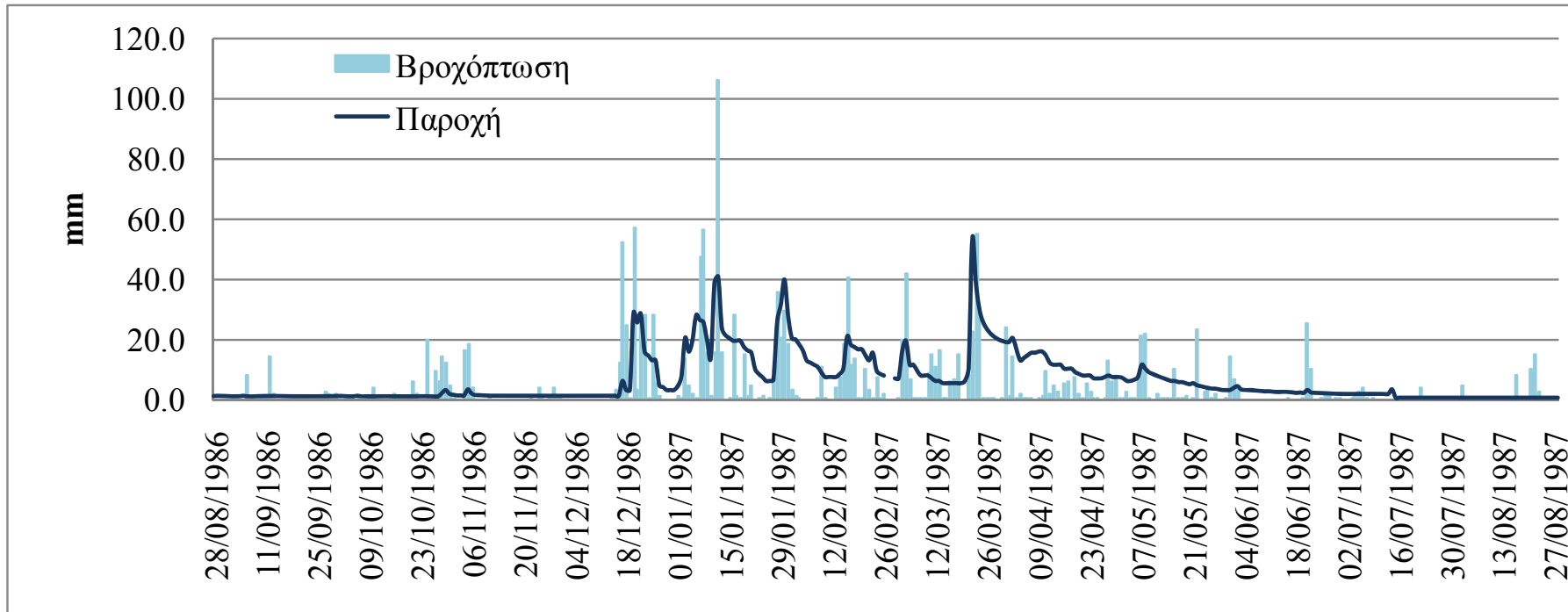
Σχήμα 11: Σύγκριση υπολογισμένης βροχόπτωσης με παλαιότερη από το ΕΜΠ (1992) για την περίοδο 1981-1991



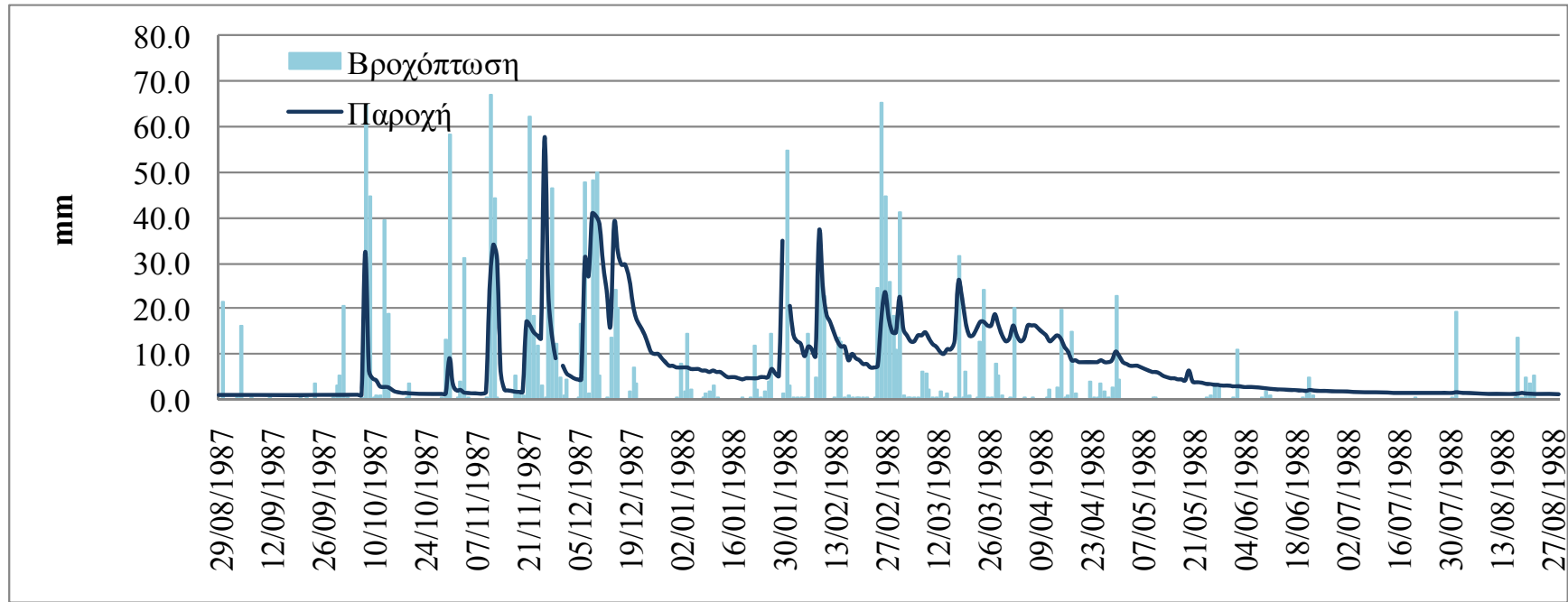
Σχήμα 12: Σύγκριση υπολογισμένης παροχής με παλαιότερη από το ΕΜΠ (1992) για την περίοδο 1973-1993



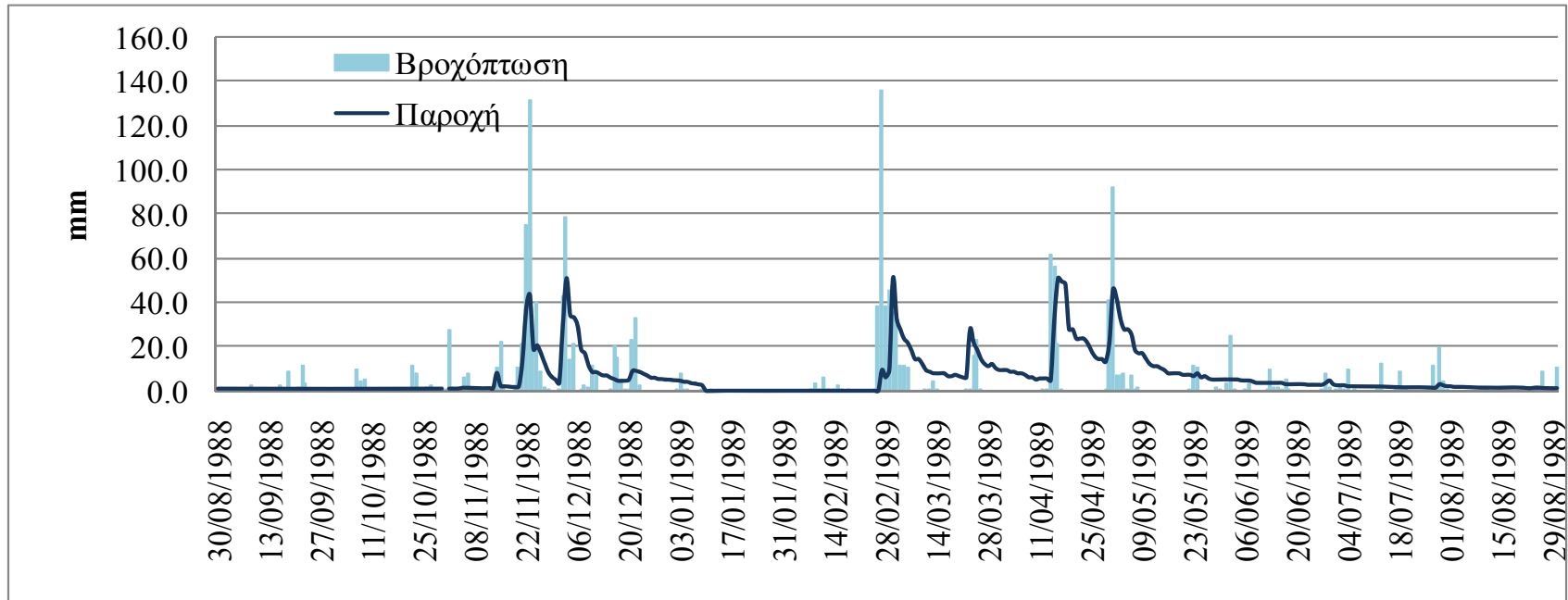
Σχήμα 13: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1984-1985



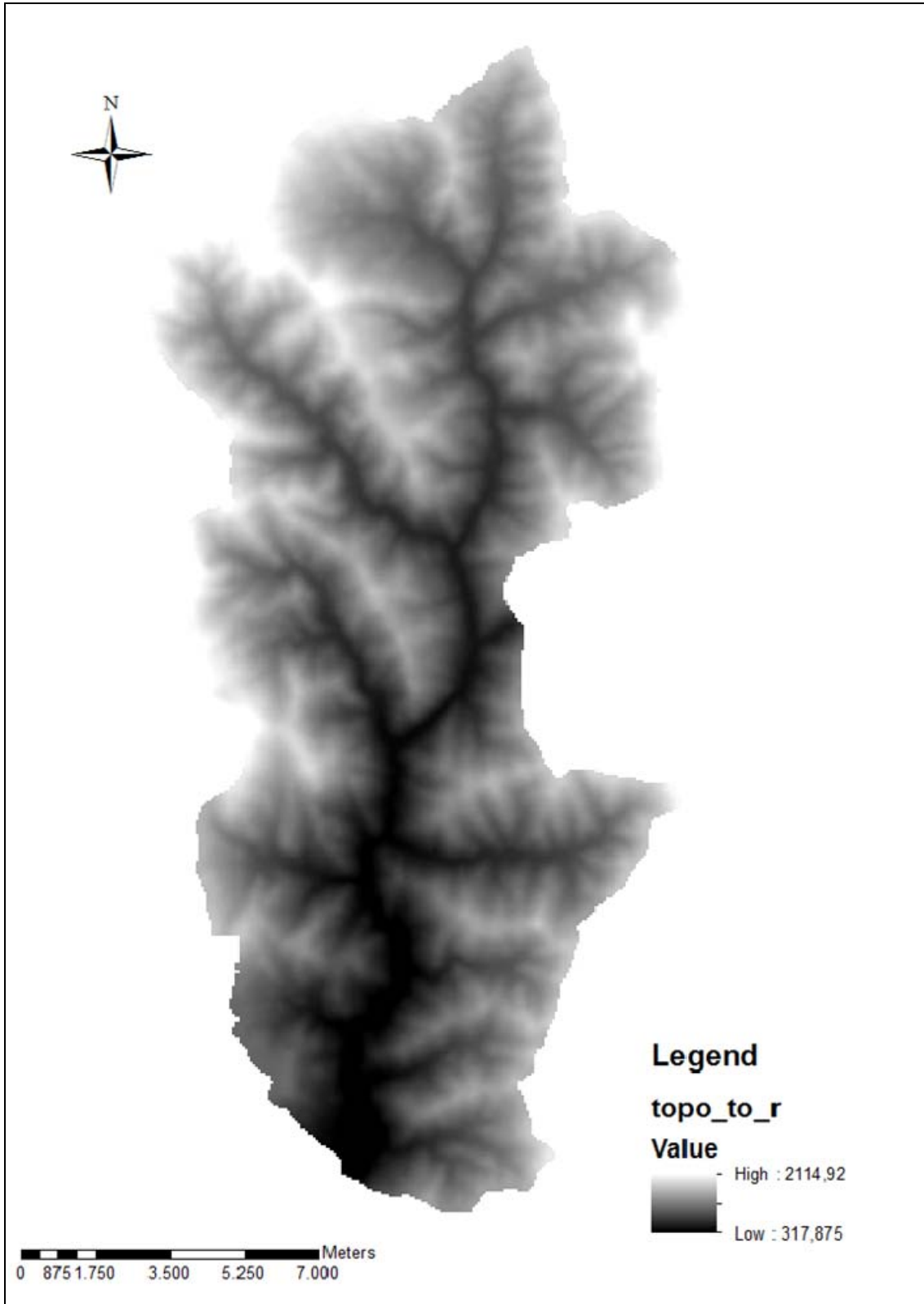
Σχήμα 14: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1986-1987



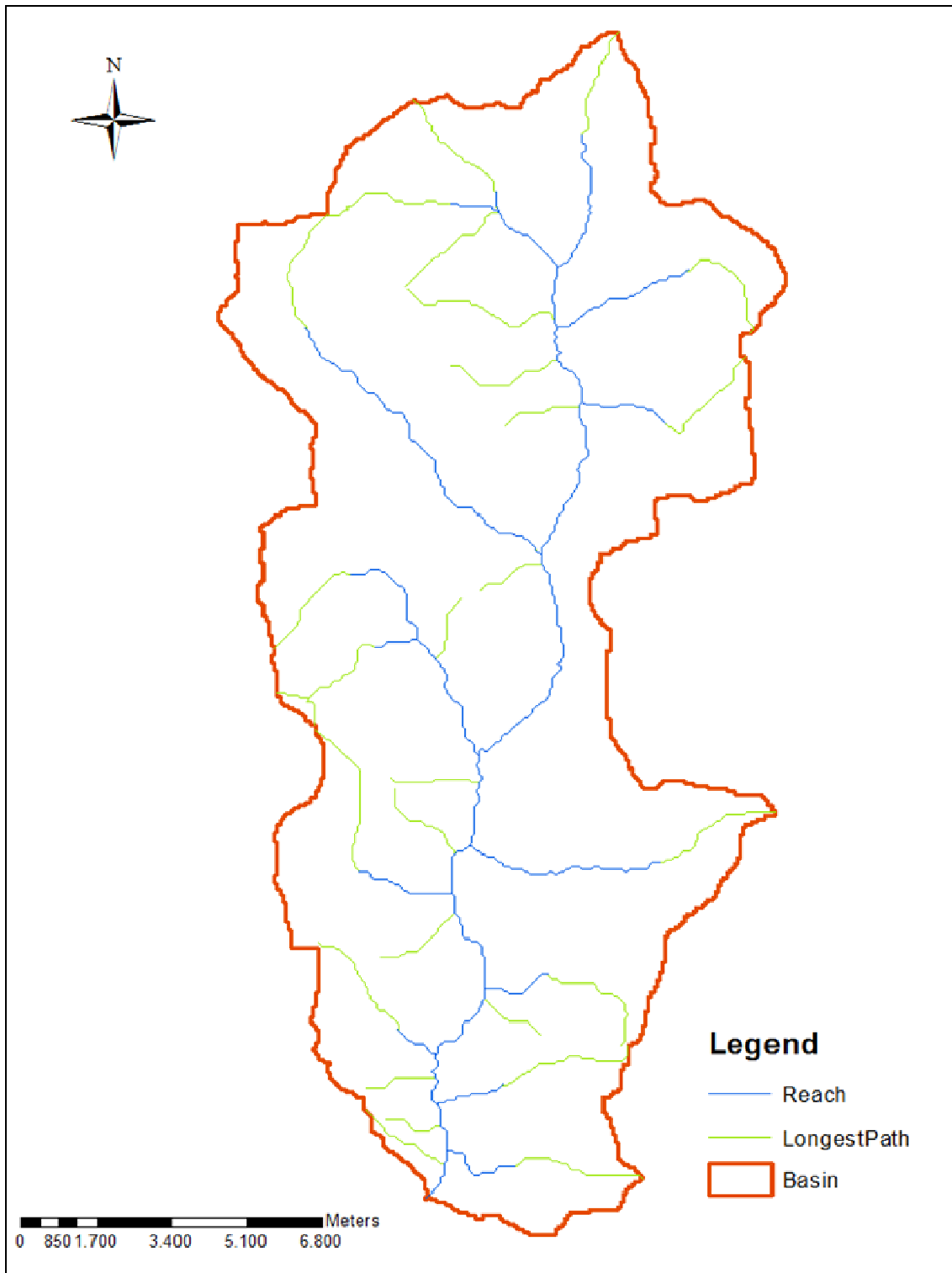
Σχήμα 15: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1987-1988



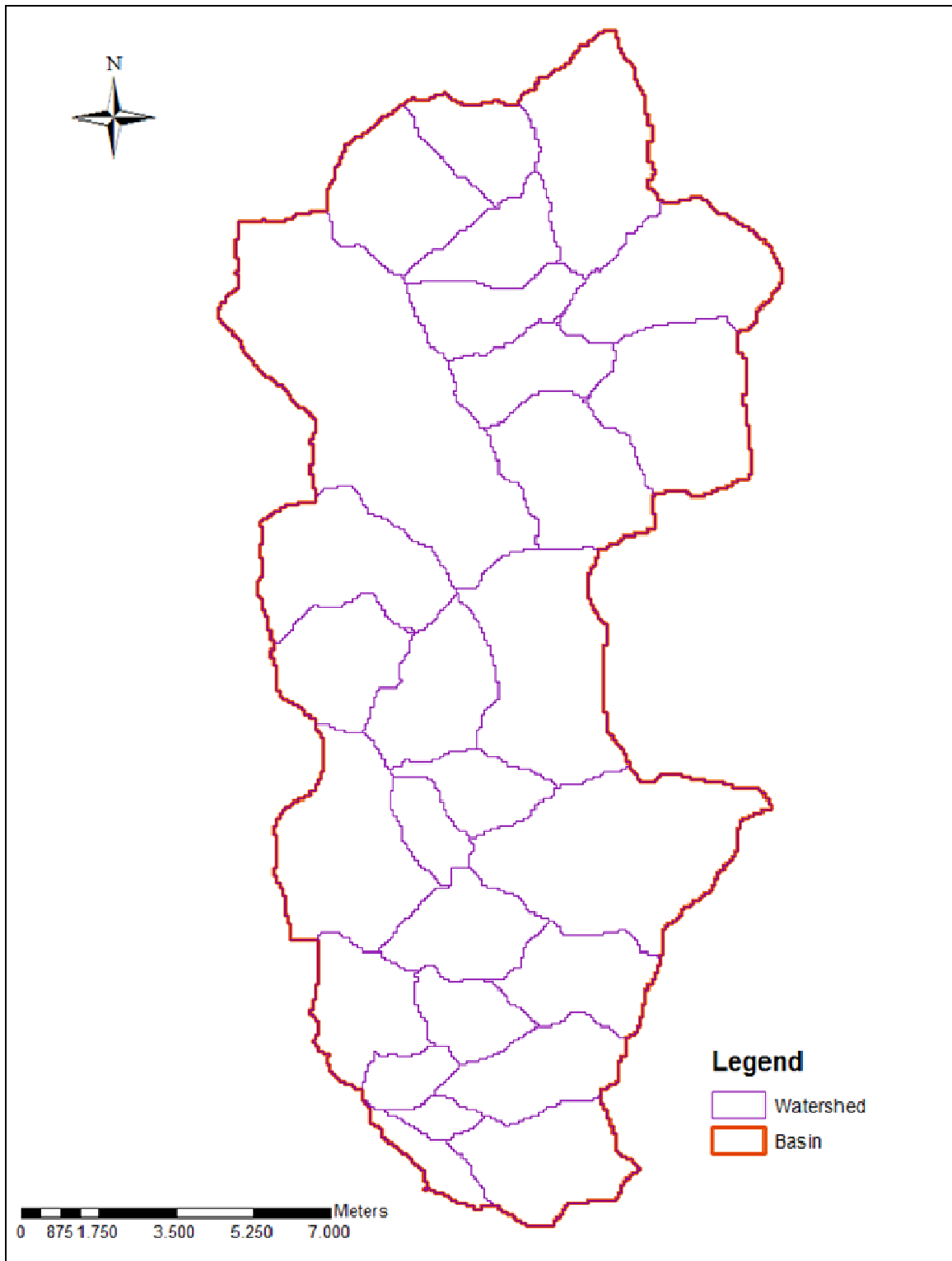
Σχήμα 16: Υδρογράφημα-υετόγραμμα για το έτος 1988-1989



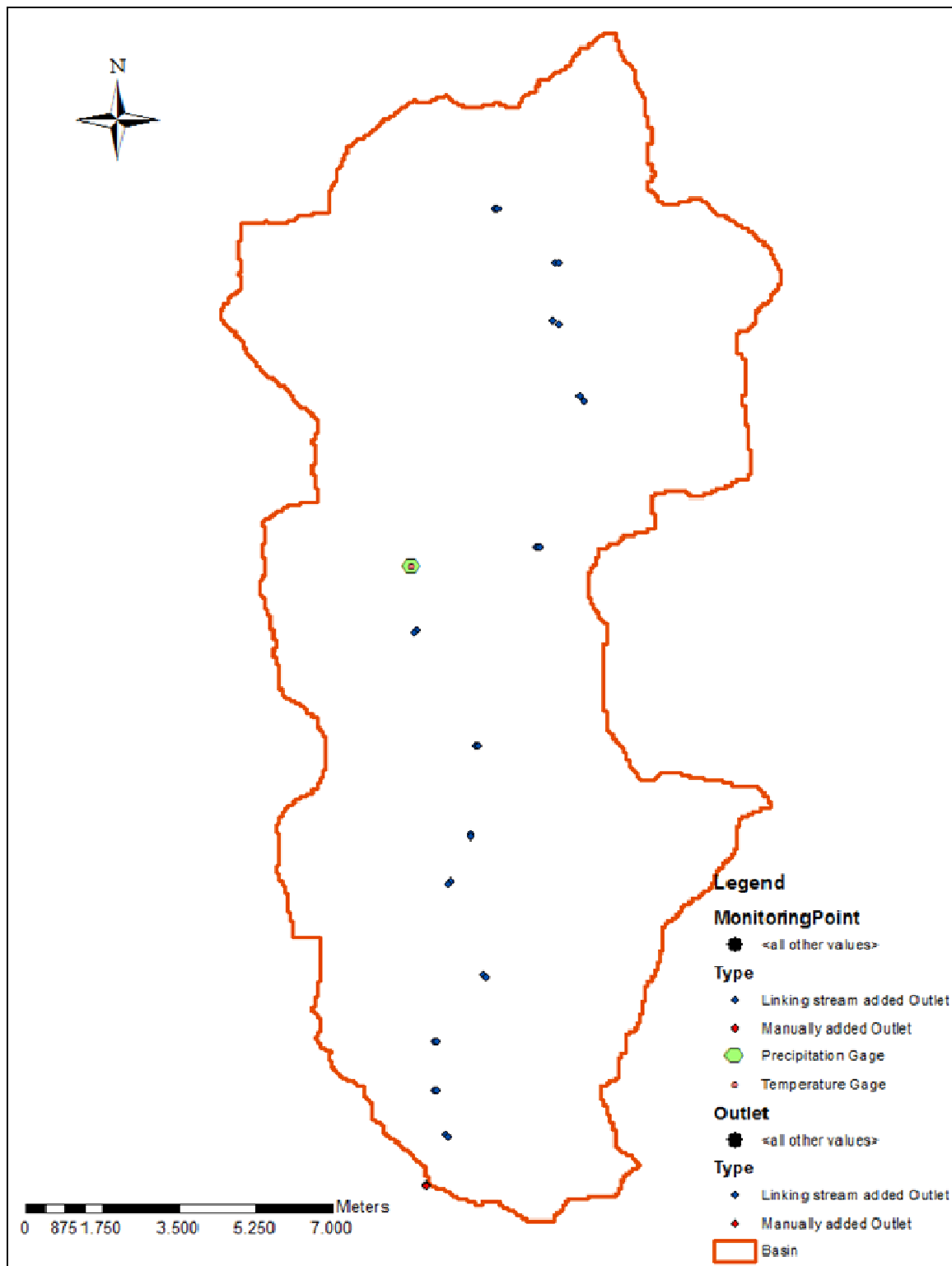
Σχήμα 17: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους, όπως ακριβώς εισήχθη στο μοντέλο



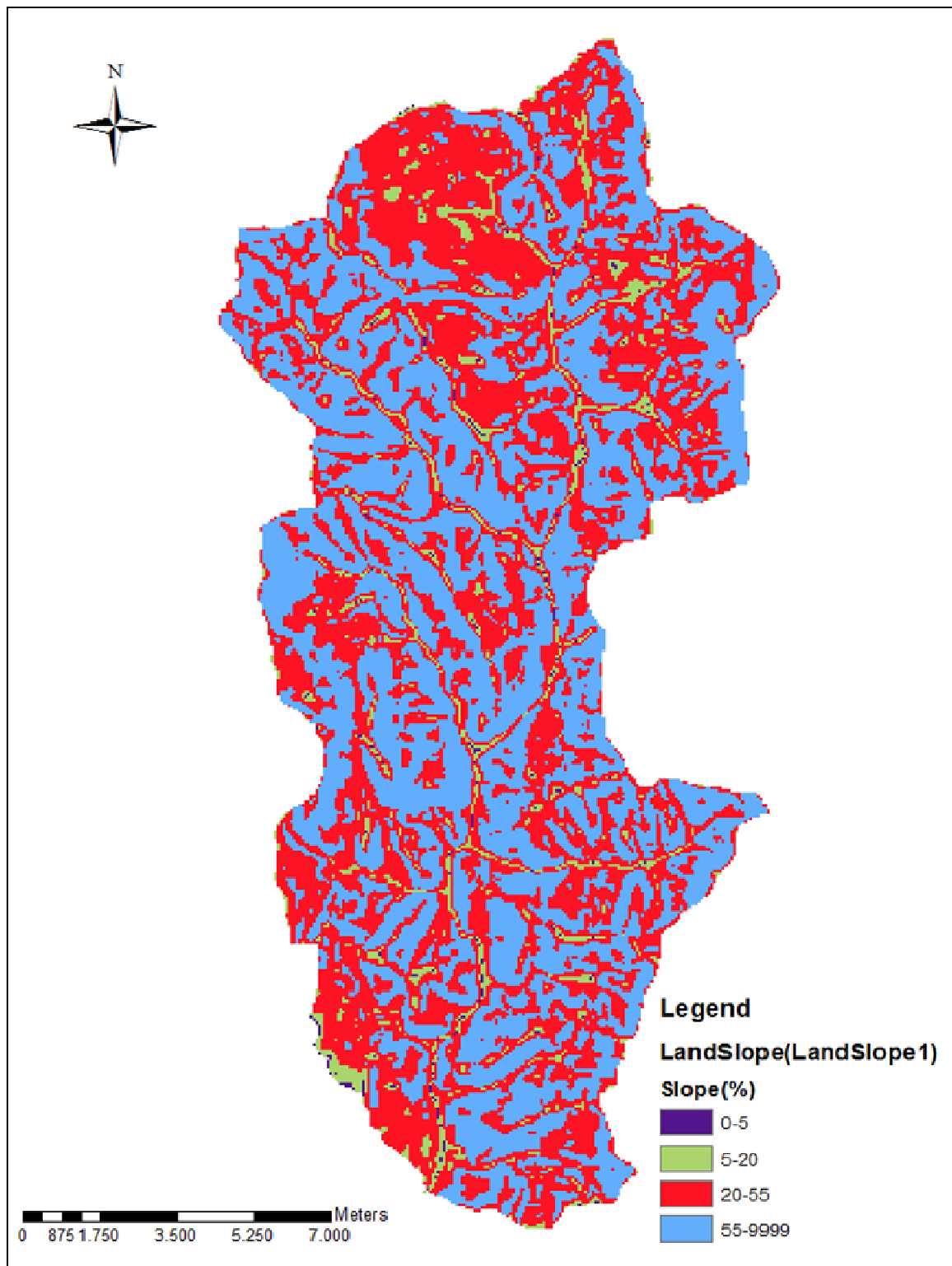
Σχήμα 18: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτό δημιουργήθηκε από το μοντέλο



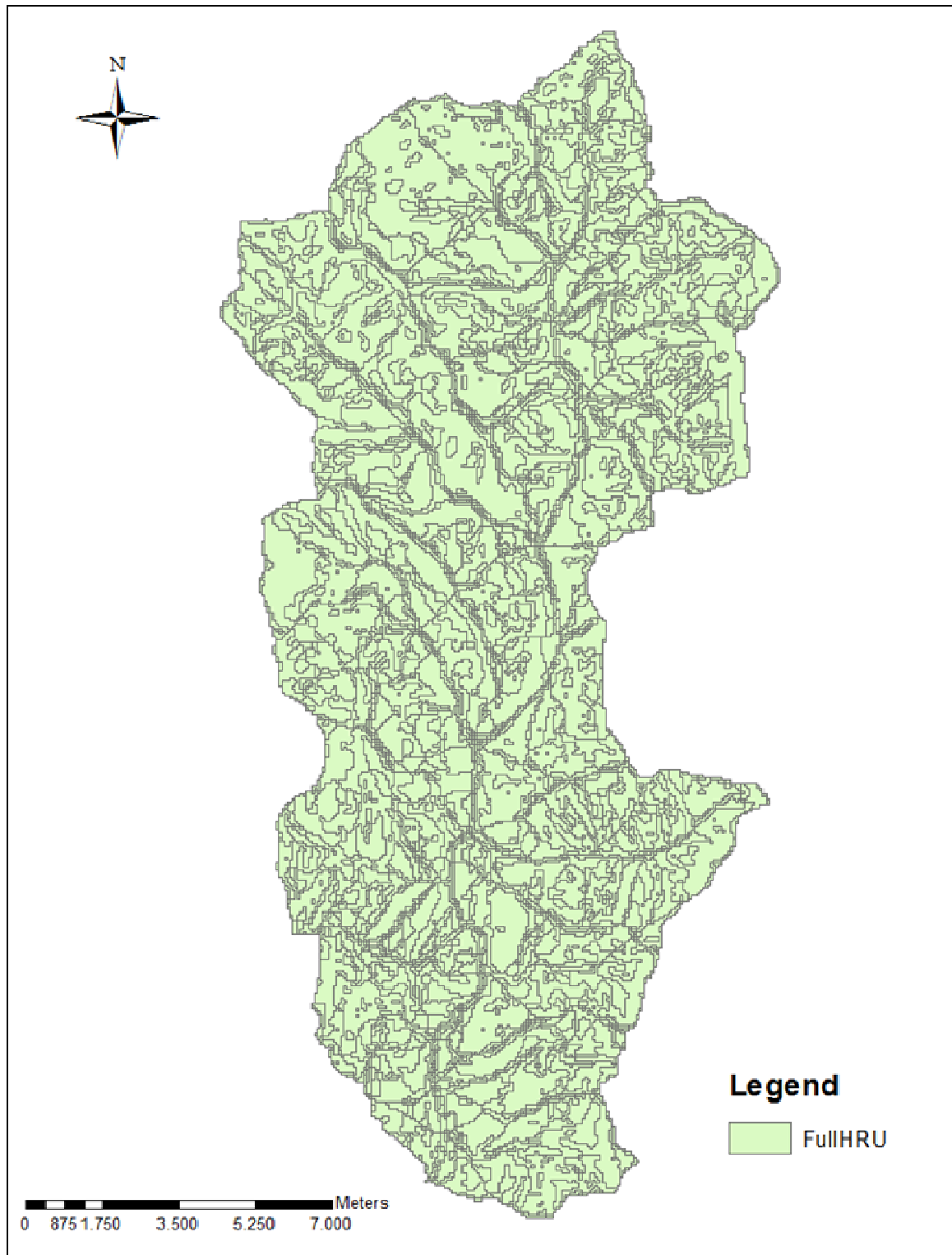
Σχήμα 19: Χάρτης υπολεκανών, όπως αυτές δημιουργήθηκαν από το μοντέλο



Σχήμα 20: Χάρτης σημείων σύνδεσης των κλάδων του ποταμού, σημείου εξόδου της λεκάνης, και παρουσίασης του μέσου μετεωρολογικού σταθμού που δημιουργήθηκε



Σχήμα 21: Χάρτης κλίσεων γης όπως δημιουργήθηκε από το μοντέλο



Σχήμα 22: Χάρτης μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU)