



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΟΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ**  
**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μη μετρούμενες λεκάνες απορροής: Διερεύνηση στη λεκάνη του  
Πηνειού Θεσσαλίας, στη θέση Σαρακίνα**



**Γουργουλιός Βασίλειος**

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2016

## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>v</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων</b>	<b>xi</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	1
<b>2 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής</b>	<b>3</b>
2.1 Ορισμός.....	3
2.2 Ταξινόμηση μοντέλων βροχόπτωσης - απορροής.....	3
2.3 Βαθμονόμηση μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής.....	4
<b>3 Οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής</b>	<b>7</b>
3.1 Γενικά.....	7
3.2 Προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες.....	7
3.2.1 Η πρωτοβουλία PUB της IAHS.....	7
3.2.2 Επιτεύγματα της πρωτοβουλίας.....	9
<b>4 Το μοντέλο PRMS</b>	<b>13</b>
4.1 Γενικά.....	13
4.2 Έννοιες και ορισμοί του μοντέλου PRMS.....	13
4.3 Αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών του μοντέλου PRMS.....	15
4.3.1 Ορισμός λεκάνης απορροής.....	16
4.3.2 Διαδοχικότητα.....	16
4.3.3 Ηλιακός πίνακας.....	17
4.3.4 Δεδομένα χρονοσειρών.....	18
4.3.5 Ενόητες διανομής της θερμοκρασίας.....	19
4.3.6 Ενόητες διανομής των κατακρημνισμάτων.....	21
4.3.7 Ενόητες συνδυασμένης χωρικής κατανομής κλίματος.....	24
4.3.8 Ενόητες κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας.....	29
4.3.9 Ενόητες περιόδου διαπνοής.....	31
4.3.10 Ενόητες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.....	31
4.3.11 Συγκράτηση από το φύλλωμα.....	35
4.3.12 Χιόνι.....	36
4.3.13 Ενόητες επιφανειακής απορροής.....	46

4.3.14	Ζώνη εδάφους .....	51
4.3.15	Ροή υπογείων υδάτων .....	57
4.3.16	Απορροή υδατορευμάτων .....	58
4.3.17	Σύνοψη .....	60
<b>5</b>	<b>Η λεκάνη απορροής και η προετοιμασία των δεδομένων για το μοντέλο PRMS</b>	<b>62</b>
5.1	Το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας .....	62
5.2	Η λεκάνη απορροής του Πηνειού με έξοδο στον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα.....	63
5.3	Γεωγραφικά δεδομένα .....	64
5.3.1	Γενικά.....	64
5.3.2	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	64
5.3.3	Δημιουργία υδρογραφικού δικτύου .....	65
5.3.4	Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών .....	66
5.3.5	Κλίσεις του εδάφους στην υπό μελέτη λεκάνη .....	68
5.4	Υδρολογικά δεδομένα .....	70
5.4.1	Βροχομετρικά δεδομένα.....	70
5.4.2	Θερμοκρασία αέρα.....	79
5.4.3	Απορροή.....	80
5.5	Κάλυψη γης της λεκάνης απορροής .....	81
5.5.1	Το υπόβαθρο CORINE .....	81
5.5.2	Προετοιμασία των δεδομένων κάλυψης γης για τη λεκάνη.....	83
5.6	Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU) της λεκάνης απορροής .....	86
<b>6</b>	<b>Εφαρμογή του μοντέλου PRMS</b>	<b>90</b>
6.1	Κατάρτιση και βαθμονόμηση του μοντέλου PRMS.....	90
6.1.1	Κατάρτιση του μοντέλου .....	90
6.1.2	Βαθμονόμηση του μοντέλου .....	95
6.2	Εφαρμογή του μοντέλου σε περίπτωση που η λεκάνη ήταν μη μετρούμενη .....	99
6.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων .....	100
<b>7</b>	<b>Σύνοψη - Συμπεράσματα - Προεκτάσεις</b>	<b>102</b>
7.1	Σύνοψη - Προβλήματα .....	102
7.2	Συμπεράσματα.....	103
7.3	Προεκτάσεις .....	104
	<b>Αναφορές</b>	<b>105</b>
	Στην ελληνική γλώσσα .....	105
	Ξενόγλωσσες .....	105
	Διαδικτυακές.....	106





## Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ, κο. Ιωάννη Ναλμπάντη, ο οποίος μου ανέθεσε και επέβλεψε αυτή τη διπλωματική εργασία. Η συνεργασία μας ήταν άψογη και η καθοδήγηση και οι συμβουλές του πολύτιμες σε όλα τα στάδια και τη διάρκεια των εργασιών μου, υποδεικνύοντάς μου την ορθή και επιστημονική προσέγγιση ενός τέτοιου θέματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, κα. Ινώ Παπαγεωργάκη για τη βοήθειά της σχετικά με το λογισμικό ArcGIS και κάποιες άγνωστες σε εμένα διαδικασίες του, καθώς επίσης και τη συνεισφορά της στη συλλογή δεδομένων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου και φυσικά την οικογένειά μου που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.



## Περίληψη

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει αντικείμενο τη μελέτη των επιπτώσεων, στην πρόβλεψη της απορροής, της έλλειψης δεδομένων απορροής, ή, αλλιώς, της κατάστασης στην οποία μια λεκάνη είναι μη μετρούμενη. Συγκεκριμένα, για τη μελέτη αυτή γίνεται διερεύνηση της λεκάνης απορροής του Πηνειού στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Σαρακίνα. Το μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής που χρησιμοποιείται για την υδρολογική προσομοίωση είναι το Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS-IV), το οποίο είναι ένα αιτιοκρατικό, καταναμημένο μοντέλο φυσικής βάσης. Για την κατάρτιση του μοντέλου για την υπό μελέτη λεκάνη γίνεται συλλογή γεωγραφικών και υδρολογικών δεδομένων, καθώς και δεδομένων κάλυψης γης. Η επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων και των δεδομένων κάλυψης γης για να μπορούν αυτά να χρησιμοποιηθούν από το PRMS-IV, γίνεται σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Επίσης, πραγματοποιείται κατάλληλη επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων. Την κατάρτιση του μοντέλου ακολουθεί η βαθμονόμησή του χειροκίνητα για να εκτιμηθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του. Έπειτα, γίνεται εφαρμογή του μοντέλου θεωρώντας ότι η λεκάνη είναι μη μετρούμενη και ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με εκείνα του βαθμονομημένου μοντέλου. Τέλος, εξήχθησαν συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία. Το πρώτο από αυτά είναι η πολύ μεγάλη επίδραση της έλλειψης των μετρήσεων απορροής στην προσομοιωμένη απορροή, καθώς δεν μπορεί να γίνει βαθμονόμηση και επαλήθευση. Επίσης, το μοντέλο PRMS που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση λεκανών απορροής, καθώς περιλαμβάνει ενότητες που παρέχουν πολλές διαφορετικές και εναλλακτικές επιλογές για την προσομοίωση παρά πολλών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου.





## Abstract

---

The current thesis aims at studying the impact, on flow prediction, of the lack of streamflow data, or, else, of the situation in which a river basin is ungauged. Specifically, for this purpose, research work is carried out in the Pineios river basin at the gauging station of Sarakina. The precipitation – runoff model used for hydrological simulation is the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS-IV), which is a deterministic, distributed, physics-based model. Geographical, hydrological and land cover data are collected for the model setup. A Geographical Information System (GIS) environment is used for handling and processing geographical and land use data to be later introduced into PRMS-IV. Also, the hydrological data are properly processed. After model setup, a manual calibration process allows the estimation of the optimal model parameters. Parallel to that, the basin is considered as ungauged and the model is applied to produce flow estimates which are then compared to those of the calibrated model. Finally, conclusions are drawn with regard the question studied in this work. The first conclusion is that the lack of streamflow data has a very significant influence to the simulated runoff, since calibration and validation cannot be performed. Also, PRMS, which was used in this study, is a very powerful tool for basin simulation, since it contains modules that provide many different and alternative choices for the simulation of multiple hydrological processes.



## Κατάλογος συμβόλων

---

NSE	Ο συντελεστής των Nash και Sutcliffe
$Q_{\text{μετ}}$	Η μετρημένη απορροή
$Q_{\text{εκτ}}$	Η εκτιμημένη απορροή
$\bar{Q}_{\text{μετ}}$	Η μέση τιμή της μετρημένης απορροής
$N$	Το πλήθος παρατηρήσεων
$E$	Η απόκλιση της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου, σε γωνιακές μοίρες
EC	Η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης (περίπου 0.01671), σε rad
jd	Η ημέρα του αριθμού του έτους (το 3 εξαιρείται από τον αριθμό ημέρας και η ηλιακή ημέρα του χρόνου ξεκινάει στις 29 Δεκεμβρίου), σε ημέρες
rad	Η ταχύτητα περιστροφής της γης, σε rad ανά ημέρα
DM	Η ηλιακή απόκλιση σε γωνιακές μοίρες
sr	Η ωρική γωνία της ανατολής στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) μετρούμενη από την ηλιακή μεσημβρία (οι πρωινές τιμές είναι αρνητικές και οι απογευματινές είναι θετικές), σε ακτίνια
ss	Η ωρική γωνία της δύσης στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) μετρούμενη από την ηλιακή μεσημβρία (οι πρωινές τιμές είναι αρνητικές και οι απογευματινές είναι θετικές), σε ακτίνια
soltab_sunhrs	Η διάρκεια της ηλιοφάνειας για κάθε HRU και για κάθε ημέρα του χρόνου σε ώρες
soltab_potsw	Η δυνητική ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ημέρα του έτους
SC	Η ηλιακή σταθερά, 458.4 cal/cm <sup>2</sup> /rad
$c1_{\text{PSR}}, c2_{\text{PSR}}$	Συντελεστές για τον υπολογισμό της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας
hru_lat <sub>HRU</sub>	Το γεωγραφικό πλάτος για κάθε HRU σε μοίρες
precip	Οι ημερήσιες μετρήσεις των κατακρημνισμάτων
tmax	Οι ημερήσιες μετρήσεις της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα
tmin	Οι ημερήσιες μετρήσεις της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα
pan_evap	Οι ημερήσιες μετρήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής
solrad	Οι ημερήσιες μετρήσεις της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας
runoff	Οι ημερήσιες μετρήσεις της απορροής
snow	Οι ημερήσιες μετρήσεις του ύψους χιονιού
tmaxc	Η μέγιστη θερμοκρασία αέρα για κάθε HRU σε °C
tminc	Η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για κάθε HRU σε °C

tavgc	Η μέση θερμοκρασία αέρα για κάθε HRU σε °C
hru_area	Το εμβαδό της κάθε HRU
basin_area	Το εμβαδό της λεκάνης απορροής
basin_tmax	Η μέγιστη θερμοκρασία αέρα σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
basin_tmin	Η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
basin_temp	Η μέση θερμοκρασία αέρα σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
tmax_lapse	Η μηνιαία κατακόρυφη θερμοβαθμίδα για τη μέγιστη θερμοκρασία αέρα
tmin_lapse	Η μηνιαία κατακόρυφη θερμοβαθμίδα για την ελάχιστη θερμοκρασία αέρα
hru_elev	Το υψόμετρο για κάθε HRU
tsta_elev	Το υψόμετρο του κάθε σταθμού μέτρησης της θερμοκρασίας
tmax_adj	Συντελεστής ρύθμισης της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα για κάθε HRU με βάση την κλίση και τον προσανατολισμό
tmin_adj	Συντελεστής ρύθμισης της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα για κάθε HRU με βάση την κλίση και τον προσανατολισμό
elfac	Λόγος υψομέτρων που χρησιμοποιείται στις ενότητες temp_laps και temp_dist2
basin_lapse_max	Η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας αέρα σταθμισμένη στο εμβαδό της λεκάνης απορροής
basin_lapse_min	Η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα σταθμισμένη στο εμβαδό της λεκάνης απορροής
nrain	Το πλήθος των σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων
ntemp	Το πλήθος των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα
dist	Η απόσταση μεταξύ του κεντροειδούς μίας HRU και ενός σταθμού μέτρησης
hru_xlong	Το γεωγραφικό μήκος του κεντροειδούς μίας HRU στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
hru_ylat	Το γεωγραφικό πλάτος του κεντροειδούς μίας HRU στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
tsta_xlong	Το γεωγραφικό μήκος κάθε σταθμού μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
tsta_ylat	Το γεωγραφικό πλάτος κάθε σταθμού μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
tmax_allrain	Η θερμοκρασία - όριο, πάνω από την οποία τα κατακρημνίσματα είναι βροχή
tmax_allsnow	Η θερμοκρασία - όριο, κάτω από την οποία τα κατακρημνίσματα είναι χιόνι
prmx	Κλάσμα που υποδεικνύει αν τα κατακρημνίσματα είναι βροχή
adj_mixrain	Μηνιαίος παράγοντας για τη ρύθμιση του ποσοστού της βροχής σε ένα μεικτό γεγονός
hru_rpt	Τα κατακρημνίσματα που κατανέμονται σε κάθε HRU

hru_rain	Η βροχόπτωση που κατανέμεται σε κάθε HRU
hru_snow	Η χιονόπτωση που κατανέμεται σε κάθε HRU
basin_ppt	Η μέση τιμή των κατακρημνισμάτων σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
basin_rain	Η μέση τιμή της βροχόπτωσης σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
basin_snow	Η μέση τιμή της χιονόπτωσης σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής
rain_adj	Μηνιαίος παράγοντας για τη ρύθμιση της μετρημένης βροχόπτωσης σε κάθε HRU που συνυπολογίζει τις διαφορές στο υψόμετρο, στη χωρική διακύμανση, στην τοπογραφία κ.α.
snow_adj	Μηνιαίος παράγοντας για τη ρύθμιση της μετρημένης χιονόπτωσης σε κάθε HRU που συνυπολογίζει τις διαφορές στο υψόμετρο, στη χωρική διακύμανση, στην τοπογραφία κ.α.
padj_rn	Μηνιαίος παράγοντας που ρυθμίζει τη βροχοβαθμίδα των κατακρημνισμάτων στην ενότητα precip_laps
padj_sn	Μηνιαίος παράγοντας που ρυθμίζει τη βροχοβαθμίδα των κατακρημνισμάτων στην ενότητα precip_laps
pmn_mo	Μέσα μηνιαία κατακρημνίσματα για κάθε σταθμό μέτρησης για την ενότητα precip_laps
psta_elev	Το υψόμετρο κάθε σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων
rain_mon	Μηνιαίος παράγοντας της βροχής σε κάθε HRU της ενότητας precip_dist2
snow_mon	Μηνιαίος παράγοντας του χιονιού σε κάθε HRU της ενότητας precip_dist2
psta_mon	Μηνιαίος παράγοντας των κατακρημνισμάτων σε κάθε σταθμό μέτρησης για την ενότητα precip_dist2
psta_xlong	Το γεωγραφικό μήκος κάθε σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
psta_ylat	Το γεωγραφικό πλάτος κάθε σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων στο σύστημα συντεταγμένων State Plane
ppt_lapse	Η παράμετρος πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τα κατακρημνίσματα στην ενότητα xyz_dist
max_lapse	Η παράμετρος πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη μέγιστη θερμοκρασία αέρα στην ενότητα xyz_dist
min_lapse	Η παράμετρος πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την ελάχιστη θερμοκρασία αέρα στην ενότητα xyz_dist
CV	Η κλιματική μεταβλητή στην ενότητα xyz_dist
b <sub>0</sub>	Το σημείο τομής των παραμέτρων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με τον άξονα της κλιματικής μεταβλητής
ppt_mean	Τα μέσα κατακρημνίσματα
x_mean	Συντεταγμένη θέσης των μέσων ημερήσιων κατακρημνισμάτων
y_mean	Συντεταγμένη θέσης των μέσων ημερήσιων κατακρημνισμάτων

<i>z_mean</i>	Συντεταγμένη θέσης των μέσων ημερήσιων κατακρημνισμάτων
<i>psta_nuse</i>	Το υποσύνολο των σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων που χρησιμοποιείται στην παλινδρόμηση των ενοτήτων συνδυασμένης κατανομής κλίματος
<i>psta_month_ppt</i>	Ο μηνιαίος μέσος όρος των κατακρημνισμάτων του κάθε σταθμού μέτρησης
<i>ppt_add</i>	Η μέση τιμή για την εξίσωση μετασχηματισμού του σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων στην ενότητα <i>xyz_dist</i>
<i>x_add</i>	Η μέση τιμή για την εξίσωση μετασχηματισμού του γεωγραφικού μήκους του μετεωρολογικού σταθμού
<i>y_add</i>	Η μέση τιμή για την εξίσωση μετασχηματισμού του γεωγραφικού πλάτους του μετεωρολογικού σταθμού
<i>z_add</i>	Η μέση τιμή για την εξίσωση μετασχηματισμού του υψομέτρου του μετεωρολογικού σταθμού
<i>ppt_div</i>	Η τυπική απόκλιση για την εξίσωση μετασχηματισμού του σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων
<i>x_div</i>	Η τυπική απόκλιση για την εξίσωση μετασχηματισμού του γεωγραφικού μήκους του μετεωρολογικού σταθμού
<i>y_div</i>	Η τυπική απόκλιση για την εξίσωση μετασχηματισμού του γεωγραφικού πλάτους του μετεωρολογικού σταθμού
<i>z_div</i>	Η τυπική απόκλιση για την εξίσωση μετασχηματισμού του υψομέτρου του μετεωρολογικού σταθμού
<i>psta_freq_nuse</i>	Το υποσύνολο των σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων για τον καθορισμό ύπαρξης κατακρημνισμάτων
<i>rain_code</i>	Ο μηνιαίος δείκτης για τη χρήση του σταθμού μέτρησης των κατακρημνισμάτων
<i>tsta_nuse</i>	Το υποσύνολο των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα που χρησιμοποιείται στην παλινδρόμηση κατανομής
<i>tsta_month_max</i>	Ο μηνιαίος μέσος όρος της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα του κάθε σταθμού μέτρησης
<i>tsta_month_min</i>	Ο μηνιαίος μέσος όρος της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα του κάθε σταθμού μέτρησης
<i>dist_exp</i>	Ο εκθέτης για υπολογισμού αντίστροφης απόστασης\
<i>w</i>	Ο συντελεστής βαρύτητας που συσχετίζει μία HRU με ένα σταθμό
<i>d</i>	Η απόσταση μεταξύ της HRU και του σταθμού
<i>precip_dist</i>	Η σταθμισμένη στην απόσταση συνιστώσα των κατακρημνισμάτων
<i>tmax_dist</i>	Η σταθμισμένη στην απόσταση συνιστώσα της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα
<i>tmin_dist</i>	Η σταθμισμένη στην απόσταση συνιστώσα της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα
<i>rain_nsta</i>	Ο αριθμός των σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων με την τιμή της παραμέτρου <i>psta_nuse</i> ίση με 1 και μέγιστη τιμή ίση με τη διάσταση <i>nrain</i>

temp_nsta	Ο αριθμός των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα με την τιμή της παραμέτρου tsta_nuse ίση με 1 και μέγιστη τιμή ίση με τη διάσταση ntemp
dd	Ο συντελεστής βαθμοημερών
sof	Ο λόγος της πραγματικής προς τη δυνητική ακτινοβολία για οριζόντιες επιφάνειες
dday_slope	Η μηνιαία κλίση στην εξίσωση βαθμοημερών
dday_incp	Η μηνιαία συγκράτηση στην εξίσωση βαθμοημερών
hru_slope	Η κλίση για κάθε HRU σε μορφή δεκαδικού κλάσματος
ppt_rad_adj	Μηνιαία παράμετρος ελάχιστων κατακρημνισμάτων
swrad	Η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων που κατανέμεται σε κάθε HRU
radj_sppt	Παράγοντας ρύθμισης της ηλιακής ακτινοβολίας για θερινές ημέρες
radj_wppt	Παράγοντας ρύθμισης της ηλιακής ακτινοβολίας για χειμερινές ημέρες
sky	Ποσοστό καθαρού ουρανού για κάθε HRU
ccov_slope	Μηνιαίος συντελεστής στη σχέση νεφοκάλυψης
ccov_intcp	Μηνιαία συγκράτηση στη σχέση νεφοκάλυψης
solrad_tmax	Μέγιστη θερμοκρασία αέρα της λεκάνης απορροής για χρήση στους υπολογισμούς ηλιακής ακτινοβολίας
solrad_tmin	Ελάχιστη θερμοκρασία αέρα της λεκάνης απορροής για χρήση στους υπολογισμούς ηλιακής ακτινοβολίας
orad	Η ηλιακή ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια για κάθε HRU
crad_coef	Συντελεστής της εξίσωσης υπολογισμού της orad
crad_exp	Εκθέτης της εξίσωσης υπολογισμού της orad
radmax	Το μέγιστο κλάσμα της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να φτάσει στο έδαφος εξαιτίας της ομίχλης, της σκόνης και του νέφους
soltab_basinpotsw	Η δυνητική ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ημέρα του χρόνου για τη λεκάνη απορροής
potet	Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε HRU
jh_coef	Μηνιαίος συντελεστής της θερμοκρασίας αέρα ο οποίος χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Jensen και Haise
jh_coef_hru	Συντελεστής της θερμοκρασίας αέρα για κάθε HRU ο οποίος χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Jensen και Haise
λ	Η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης στην HRU, σε cal/g
rho_high_temp	Η πίεση κορεσμένων υδρατμών, σε 102 Pa, για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα για το θερμότερο μήνα του χρόνου
rho_low_temp	Η πίεση κορεσμένων υδρατμών, σε 102 Pa, για τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για το θερμότερο μήνα του χρόνου
hamon_coef	Μηνιαίος συντελεστής της θερμοκρασίας αέρα ο οποίος χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hamon



$\rho$	Η πυκνότητα κορεσμένων υδρατμών (ή, απόλυτη υγρασία), σε $g/m^2$
hs_krs	Μηνιαίος παράγοντας ρύθμισης για κάθε HRU ο οποίος χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves και Samani
psycnst	Ο ψυχομετρικός συντελεστής για κάθε HRU, σε $kPa/^\circ C$
vp_slope	Η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμένων υδρατμών προς τη θερμοκρασία αέρα, για κάθε HRU, σε $kPa/^\circ C$
G	Η πυκνότητα ροής της θερμότητας στο έδαφος για κάθε HRU, σε $MJ/m^2 \cdot d$
pt_alpha	Μηνιαίος παράγοντας ρύθμισης για κάθε HRU ο οποίος χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά Priestly και Taylor
tempc_dewpt	Η θερμοκρασία στο σημείο δρόσου σε $^\circ C$
humidity_hru	Η σχετική υγρασία, σε δεκαδικό κλάσμα, που εισάγεται σε ένα αρχείο CBH
vp_actual	Η πραγματική πίεση των υδρατμών, σε $kPa$ , για κάθε HRU
vp_sat	Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών, σε $kPa$ , για κάθε HRU
vp_deficit	Το έλλειμμα πίεσης υδρατμών, σε $kPa$ , για κάθε HRU
lwrad_net	Η καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων, σε $MJ/m^2 \cdot d$ , για κάθε HRU
$\gamma$	Το ειδικό βάρος του νερού, σε $N/m^3$ , για κάθε HRU
wind_speed	Η ταχύτητα του ανέμου για κάθε HRU, σε $m/s$
pm_d_coef	Μηνιαίος συντελεστής ταχύτητας ανέμου για κάθε HRU, της μεθόδου των Penman και Monteith για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής,
pm_n_coef	Μηνιαίος συντελεστής θερμοκρασίας για κάθε HRU, της μεθόδου των Penman και Monteith για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, $^\circ C/d$
epan_coef	Μηνιαίος συντελεστής εξάτμισης
pan_evap	Η εξάτμιση σε κάθε σταθμό μέτρησης, σε $in$
cov_type	Ο τύπος της κάλυψης γης για κάθε HRU
covden_sum	Η καλοκαιρινή πυκνότητα της κάλυψης βλάστησης για τον κύριο τύπο βλάστησης για κάθε HRU
covden_win	Η χειμερινή πυκνότητα της κάλυψης βλάστησης για τον κύριο τύπο βλάστησης για κάθε HRU
srain_intcp	Η χωρητικότητα του αποθέματος συγκράτησης για την καλοκαιρινή βροχή για τον κύριο τύπο βλάστησης σε κάθε HRU, σε $in$
wrain_intcp	Η χωρητικότητα του αποθέματος συγκράτησης για την χειμερινή βροχή για τον κύριο τύπο βλάστησης σε κάθε HRU, σε $in$
snow_intcp	Η χωρητικότητα του αποθέματος συγκράτησης για το χιόνι για τον κύριο τύπο βλάστησης σε κάθε HRU, σε $in$
AvailCanSto	Η διαθέσιμη χωρητικότητα του αποθέματος του φυλλώματος για κάθε HRU, σε $102.790153 m^2$ (acre-in)
intcp_stor	Το απόθεμα συγκράτησης του φυλλώματος για την πυκνότητα κάλυψης για κάθε HRU, σε $in$

potet_sublim	Το κλάσμα της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής που αεριοποιείται από το χιόνι στο φύλλωμα και στο στρώμα χιονιού
Ptf	Τα κατακρημνίσματα που διαπερνούν σε κάθε HRU, σε in
net_ppt	Τα καθαρά κατακρημνίσματα που φτάνουν στο έδαφος για κάθε HRU
pkwater_equiv	Το ισοδύναμο απόθεμα νερού στο στρώμα χιονιού για κάθε HRU, σε in
snowmelt	Η ποσότητα του λιωμένου χιονιού για κάθε HRU, σε in
snow_evap	Η ποσότητα εξάχνωσης για κάθε HRU, σε in
albedo	Η λευκαύγεια της επιφάνειας του χιονιού για κάθε HRU
pk_den	Η πυκνότητα του στρώματος χιονιού για κάθε HRU, σε g/cm <sup>3</sup>
snowcov_area	Η επιφάνεια χιονοκάλυψης για κάθε HRU
pk_def	Το έλλειμμα θερμότητας του στρώματος χιονιού για κάθε HRU, σε Langleys (41840 J/m <sup>2</sup> )
pk_temp	Η θερμοκρασία του στρώματος χιονιού σε κάθε HRU, σε °C
pkwater_equiv	Το ισοδύναμο ύψος νερού του στρώματος χιονιού σε κάθε HRU, σε in
train	Η βροχή σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία για κάθε HRU
caln	Η ποσότητα της εισερχόμενης ενέργειας για κάθε HRU, σε Langleys/in
snarea_thresh	Το μέγιστο κατώφλι του ισοδύναμου αποθέματος νερού κάτω από το οποίο εφαρμόζεται η καμπύλη επιφάνειας χιονοκάλυψης, σε in
snarea_curve	Οι τιμές τις καμπύλης μείωσης της επιφάνειας του χιονιού
swn	Η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων που εφαρμόζεται στο στρώμα χιονιού για κάθε HRU
rad_trncf	Ο συντελεστής μετάδοσης για ακτινοβολία βραχέων κυμάτων μέσω του φυλλώματος της βλάστησης του χειμώνα για κάθε HRU
lwp	Η τέλεια εκπομπή του μέλανος σώματος
cal	Η συνολική εισερχόμενη εκπομπή μακρών κυμάτων για κάθε HRU
cecsb	Ο συνδυασμένος όρος ενέργειας για τη μεταγωγή και τη λανθάνουσα θερμότητα από συμπύκνωση για κάθε HRU
cecn_coef	Μηνιαίος συντελεστής μεταγωγής συμπύκνωσης ενέργειας, σε cal/°C
freeh2o_cap	Το κατώφλι της χωρητικότητας για απόθεμα ελεύθερου νερού
pk_depth	Το αρχικό ύψους στρώματος χιονιού για κάθε HRU, σε in
den_init	Η αρχική πυκνότητα του νέου χιονιού, σε g/cm <sup>3</sup>
den_max	Η μέγιστη πυκνότητα του στρώματος χιονιού, σε g/cm <sup>3</sup>
net_snow	Η ποσότητα της νέας καθαρής χιονόπτωσης, σε in
settle_const	Η σταθερά καθίζησης του στρώματος χιονιού
qcond	Η θερμότητα μέσω αγωγής
pk_temp	Η θερμοκρασία του στρώματος χιονιού σε κάθε HRU, σε °C

keff	Η ενεργός θερμική αγωγιμότητα για κάθε HRU
tcal	Το ενεργειακό ισοζύγιο του καθαρού στρώματος χιονιού για κάθε HRU, σε Langleys
hru_intcepvap	Η εξάχνωση από το συγκρατημένο από τη βλάστηση χιόνι, σε in
scal	Ποσότητα μείωσης του ελλείμματος θερμότητας από την εξάχνωση σε περίπτωση που ο περιεχόμενος πάγος του στρώματος χιονιού είναι πιο ψυχρός από 0 °C
hru_percent_imperv	Κλάσμα της επιφάνειας κάθε HRU που είναι αδιαπέρατο
dprst_area	Το άθροισμα των επιφανειών των κοιλοτήτων για κάθε HRU, σε acres
avail_water	Το προγενέστερο απόθεμα του αδιαπέρατου τμήματος για κάθε HRU, σε in
imperv_stor_max	Το μέγιστο απόθεμα διατήρησης της αδιαπέρατης επιφάνειας για κάθε HRU, σε in
hru_sroffi	Η επιφανειακή απορροή των αδιαπέρατων περιοχών για κάθε HRU, σε in
hru_imperevap	Η εξάτμιση από το αδιαπέρατο τμήμα μίας HRU, σε in
avail_et	Η μη ικανοποιημένη δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε HRU, σε in
dprst_evap_hru	Η εξάτμιση για οποιοδήποτε απόθεμα σε κοιλότητες για κάθε HRU, σε in
hru_imperv_stor	Το απόθεμα στο αδιαπέρατο τμήμα για κάθε HRU, σε in
hru_sroffp	Η επιφανειακή απορροή κατά Horton από το διαπερατό τμήμα μίας HRU, σε in
ca_fraction	Η κλασματική έκταση μεταβλητής επιφάνειας παραγωγής απορροής για το διαπερατό τμήμα μίας HRU
soil_rechr	Το προγενέστερο απόθεμα της ζώνης επαναφόρτισης της τριχοειδούς δεξαμενής, σε in
soil_rechr_max	Το μέγιστο απόθεμα της ζώνης επαναφόρτισης της τριχοειδούς δεξαμενής, σε in
upslope_hortonian	Η επιφανειακή απορροή κατά Horton από μία ανάντη HRU, σε in
carea_max	Η μέγιστη δυνατή επιφάνεια που συμβάλλει στην επιφανειακή απορροή, σε κλάσμα της επιφάνειας της HRU
carea_min	Η ελάχιστη δυνατή επιφάνεια που συμβάλλει στην επιφανειακή απορροή, σε κλάσμα της επιφάνειας της HRU
smidx_coef	Συντελεστής στον μη γραμμικό αλγόριθμο συμβάλλουσας επιφάνειας για κάθε HRU
smidx_exp	Εκθέτης στον μη γραμμικό αλγόριθμο συμβάλλουσας επιφάνειας για κάθε HRU
infil	Η διήθηση της περιοχής με το διαπερατό τμήμα για κάθε HRU, σε in
snowinfil_max	Μέγιστη διήθηση χιονιού ανά ημέρα, σε in/d
capacity	Το έλλειμμα χωρητικότητας αποθήκευσης για κάθε HRU, σε in
excess	Η δυνητική υπέρβαση στη διήθηση για κάθε HRU, σε in
excess_infil	Η επιπρόσθετη επιφανειακή απορροή για κάθε HRU, σε in

dprst_vol_open_max	Η μέγιστη χωρητικότητα μίας ανοικτής επιφανειακής κοιλοτήτας για κάθε HRU ,σε in
dprst_depth_avg	Το μέσο ύψος των επιφανειακών κοιλοτήτων στη μέγιστη χωρητικότητα αποθέματος για κάθε HRU, σε in
dprst_frac_open	Κλάσμα της επιφάνειας του αποθέματος των ανοικτών επιφανειακών κοιλοτήτων μέσα σε κάθε HRU
dprst_vol_thres_open	Το κατώφλι όγκου για να δημιουργηθεί επιφανειακή απορροή από τις ανοικτές επιφανειακές κοιλοότητες
op_flow_thres	Κλάσμα της ανοικτής επιφανειακής κοιλοτήτας στο οποίο δημιουργείται η επιφανειακή απορροή
dprst_frac_init	Κλάσμα του μέγιστου αποθέματος των επιφανειακών κοιλοτήτων που περιέχει νερό στην αρχή της προσομοίωσης
dprst_vol_open	Ο όγκος αποθέματος σε ανοικτή κοιλότητα
sro_to_dprst	Κλάσμα της επιφανειακής απορροής του διαπερατού τμήματος της λεκάνης που ρέει στο απόθεμα των κοιλοτήτων
dprst_area_open	Το εμβαδό για ανοικτές επιφανειακές κοιλοότητες
va_open_exp	Εκθετικός συντελεστής στη σχέση υπολογισμού του εμβαδού για ανοικτές επιφανειακές κοιλοότητες
dprst_evap_vol_max	Ο μέγιστος όγκος της εξάτμισης στην επιφανειακή κοιλότητα για κάθε HRU
dprst_evap_vol	Η πραγματική εξάτμιση από την επιφανειακή κοιλότητα για κάθε HRU
dprst_seep_hru	Η διαρροή στις υπόγειες δεξαμενές από τις επιφανειακές κοιλοότητες για κάθε HRU
dprst_rate_open	Συντελεστής στη γραμμική σχέση υπολογισμού της διαρροής για κάθε HRU
dprst_rate_clos	Συντελεστής στη γραμμική σχέση υπολογισμού της διαρροής για κάθε HRU
dprst_sroff_hru	Η επιφανειακή απορροή από τις επιφανειακές κοιλοότητες σε κάθε HRU
hortonian_flow	Η συνολική επιφανειακή απορροή κατά Horton για κάθε HRU
pref_flow_thrsh	Το απόθεμα του κατωφλίου της προτιμητέας ροής για κάθε HRU, σε in
sat_threshold	Χωρητικότητα συγκράτησης νερού των δεξαμενών βαρύτητας και προτιμητέας ροής για κάθε HRU, σε in
pref_flow_den	Κλάσμα της ζώνης εδάφους στην οποία υπάρχει προτιμητέα ροή για κάθε HRU, σε in
pref_flow_max	Η μέγιστη χωρητικότητα του αποθέματος στην δεξαμενή προτιμητέας ροής για κάθε HRU, σε in
pref_flow_maxin	Η μέγιστη διήθηση στη δεξαμενή προτιμητέας ροής για κάθε HRU, σε in
pref_stor	Το απόθεμα της δεξαμενής προτιμητέας ροής για κάθε HRU, σε in
dunnian_pfr	Η πρώτη συνιστώσα της επιφανειακής απορροής κατά Dunne για κάθε HRU, σε in
upslope_dunnianflow	Το υπόλοιπο της επιφανειακής απορροής κατά Dunne από τα ανάντη για κάθε HRU, σε in
upslope_interflow	Το υπόλοιπο της πλάγιας ροής από τα ανάντη για κάθε HRU, σε in

hru_frac_perv	Το κλάσμα της HRU που είναι διαπερατό
soil_moist	Το απόθεμα της τριχοειδούς δεξαμενής για κάθε HRU, σε in
soil_moist_max	Το μέγιστο απόθεμα της τριχοειδούς δεξαμενής για κάθε HRU, σε in
soil_lower	Το απόθεμα στη χαμηλότερη ζώνη για κάθε HRU, σε in
cap_excess	Το περίσσειμα της εισροής στην τριχοειδή δεξαμενή για κάθε HRU,σε in
cap_waterin	Η διήθηση στην τριχοειδή δεξαμενή για κάθε HRU, σε in
soil_to_gw	Η περίσσεια εισροής στην τριχοειδή δεξαμενή για κάθε HRU, σε in
soil2gw_max	Μέγιστη ποσότητα της περίσσειας εισροής για κάθε HRU, σε in
gvr_maxin	Το περίσσειμα που εισέρχεται στην υπόγεια δεξαμενή για κάθε HRU, σε in
slow_stor	Το προγενέστερο απόθεμα στη δεξαμενή βαρύτητας για κάθε HRU, σε in
grav_stor	Το απόθεμα στη δεξαμενή βαρύτητας για κάθε HRU, σε in
gvr_excess	Το περίσσειμα ροής στην υπόγεια δεξαμενή για κάθε HRU, σε in
ssres_in	Η πραγματική εισροή στην υπόγεια δεξαμενή για κάθε HRU, σε in
dunnian_gvr	Η δεύτερη συνιστώσα της επιφανειακής απορροής κατά Dunne για κάθε HRU,σε in
gvr2pfr	Η εναπομείνουσα εισροή στη δεξαμενή προτιμητέας ροής για κάθε HRU,σε in
slow_flow	Η αργή πλάγια υπεδάφια ροή για κάθε HRU, σε in
slowcoef_lin	Γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της αργής πλάγιας υπεδάφιας ροής
slowcoef_sq	Μη γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της αργής πλάγιας υπεδάφιας ροής
ssr_to_gw	Η αποστράγγιση λόγω βαρύτητας από τη δεξαμενή βαρύτητας για κάθε HRU, σε in
ssr2gw_rate	Γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της αποστράγγισης λόγω βαρύτητας για κάθε HRU, σε in
ssr2gw_exp	Μη γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της αποστράγγισης λόγω βαρύτητας για κάθε HRU, σε in
fast_flow	Η ταχεία πλάγια υπεδάφια ροή για κάθε HRU, σε in
fastcoef_lin	Γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της ταχείας πλάγιας υπεδάφιας ροής
fastcoef_sq	Μη γραμμικός συντελεστής της σχέσης υπολογισμού της ταχείας πλάγιας υπεδάφιας ροής
dunnian_flow	Η συνολική επιφανειακή απορροή κατά Dunne για κάθε HRU, σε in
upslope_interflow	Η ανάντη πλάγια υπεδάφια ροή σε περίπτωση ορισμού διαδοχικότητας
upslope_dunnianflow	Η ανάντη επιφανειακή απορροή κατά Dunne σε περίπτωση ορισμού διαδοχικότητας
soil_type	Ο τύπος εδάφους της κάθε HRU

avail_potet	Η εναπομείνουσα ζήτηση σε δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε HRU, σε in
soil_rechr_ratio	Ο λόγος του περιεχόμενου νερού στη ζώνη επαναφόρτισης για κάθε HRU
potet_rechr	Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή στη ζώνη επαναφόρτισης για κάθε HRU, σε in
potet_lower	Η εξατμισοδιαπνοή στη χαμηλότερη ζώνη για κάθε HRU, σε in
lower_zone_ratio	Ο λόγος του περιεχόμενου νερού στη χαμηλότερη ζώνη για κάθε HRU
gwres_in	Η συνολική εισροή σε κάθε GWR, σε in
gw_upslope	Η υπόγεια ροή από οποιεσδήποτε ανάντη GWRs, σε in
seepage	Η διαρροή σε κάθε GWR, σε in
gwres_flow	Η βασική ροή σε κάθε GWR, σε in
gwres_sink	Η διαφυγή υπογείου νερού σε κάθε GWR, σε in
gwres_stor	Το απόθεμα σε κάθε GWR, σε in
basin_sroff	Η μέση επιφανειακή απορροή στα υδατορεύματα σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, σε in
basin_ssflow	Η μέση πλάγια απορροή από τις δεξαμενές βαρύτητας και προτιμητέας ροής σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, σε in
basin_gwflow	Η μέση υπόγεια ροή στα υδατορεύματα σταθμισμένη στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής, σε in
basin_stflow	Η συνολική απορροή των υδατορευμάτων από τη λεκάνη απορροής, σε in/acre ανά ημέρα
storage	Το απόθεμα σε ένα τμήμα ρεύματος, σε in
seg_inflow	Η εισροή σε ένα τμήμα ρεύματος, σε in
seg_outflow	Η εκροή σε ένα τμήμα ρεύματος, σε in
k_coef	Χρόνος διαδρομής του κύματος πλημμύρας από ένα υδατόρευμα στο ακριβώς κατάντη του, σε h
x_coef	Το ποσοστό απόσβεσης του κύματος πλημμύρας
$\Delta t$	Το εσωτερικό χρονικό διάστημα στην ενότητα Muskingum



# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Σε πολλές λεκάνες απορροής, τόσο στον ελληνικό χώρο, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, παρατηρείται έλλειψη σε δεδομένα μετρήσεων απορροής. Οι λόγοι αυτού του φαινομένου μπορεί να είναι η ανυπαρξία του κατάλληλου εξοπλισμού στην περιοχή, η μικρή σπουδαιότητα της λεκάνης, ειδικά αν αυτή έχει μικρό μέγεθος, οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τα τοπικά ή εθνικά κέντρα λήψης αποφάσεων και από τις αρμόδιες υπηρεσίες, το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού κ.ά. Οι λεκάνες αυτές ονομάζονται μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Η συστηματική μελέτη του αντικειμένου των μη μετρούμενων λεκανών απορροής αποτελεί ένα σχετικά σύγχρονο κομμάτι της επιστήμης της υδρολογίας καθώς η επιστημονική κοινότητα οργανώθηκε τα προηγούμενα δεκαπέντε χρόνια κάτω από την πρωτοβουλία “Predictions in Ungauged Basins” της International Association of Hydrological Sciences. Επίσης, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο για τη γενικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων και το μέλλον της, καθώς χρόνο με το χρόνο οι ανάγκες σε νερό αυξάνονται συνεχώς. Η μελέτη των μη μετρούμενων λεκανών απορροής μπορεί να αναπτυχθεί και να βοηθηθεί από τις σπουδαίες τεχνολογικές εξελίξεις που συντελούνται, από την ανάπτυξη κατάλληλων υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης για αυτές τις λεκάνες και προφανώς από την ανάπτυξη νέων θεωριών της υδρολογίας με έμφαση σε εναλλακτικές μη συμβατικές μεθοδολογίες και τρόπους σκέψης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετούνται οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής και οι εξελίξεις που έχουν συντελεστεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με αυτές. Επίσης, γίνεται μία διερεύνηση με εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου στον ποταμό Πηνειό, στο υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας. Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής έχει έξοδο τον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα. Το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της υπό μελέτη λεκάνης απορροής είναι το Precipitation - Runoff Modeling System IV (PRMS IV) που έχει αναπτυχθεί από την υπηρεσία United States Geological Survey (USGS).

## 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια στα οποία περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζεται το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, αναλύεται η μεθοδολογία και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την κατάλληλη προσομοίωση της λεκάνης απορροής και τη βαθμονόμηση του μοντέλου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και εξάγονται συμπεράσματα για τα αποτελέσματα και τις γενικότερες εργασίες της διπλωματικής. Στη συνέχεια, περιγράφεται συνοπτικά τι περιέχει κάθε κεφάλαιο.

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

Αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας καθώς περιλαμβάνει μια γενική τοποθέτηση του προβλήματος και πως έχει διαρθρωθεί η εργασία.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

Παρουσιάζεται ο ορισμός των μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής, τα κριτήρια ταξινόμησής τους και η διαδικασία βαθμονόμησής τους.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

Παρουσιάζονται πληροφορίες για τις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής και αναλύεται η πρωτοβουλία Predictions in Ungauged Basins καθώς και οι ενέργειες που έχουν γίνει από την επιστημονική κοινότητα σύμφωνα με αυτή.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

Περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο PRMS IV που χρησιμοποιήθηκε, μαζί με όλες τις λειτουργίες και διαδικασίες του.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

Παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής του Πηνειού με έξοδο τον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα και περιγράφεται η μεθοδολογία και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την προετοιμασία των δεδομένων για το μοντέλο PRMS IV.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

Παρουσιάζεται ο τρόπος κατάρτισης του μοντέλου για την υπό μελέτη λεκάνη, η βαθμονόμησή του, η αξιοποίησή του σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων που η λεκάνη θεωρείται μετρούμενη ή μη μετρούμενη.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

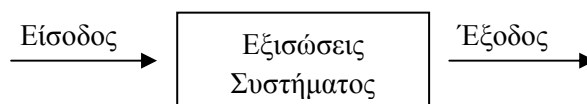
Παρουσιάζεται μία σύνοψη της διπλωματικής εργασίας με όλα τα προβλήματα που ανέκυψαν, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή.

## 2 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής

---

### 2.1 Ορισμός

Όπως αναφέρεται από το Ναλμπάντη (2007): «Ως μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής ορίζεται ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων, είτε αλγεβρικών είτε διαφορικών εξισώσεων ή λογικών σχέσεων, που συσχετίζουν την βροχόπτωση με την απορροή. Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ονομάζεται υδρολογική προσομοίωση. Η προσομοίωση ορίζεται ως η τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος σε ό,τι αφορά την χρονική του εξέλιξη. Η σχηματική αναπαράσταση ενός μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.»



Σχήμα 2.1: Γενική αναπαράσταση μοντέλου (Πηγή: Ναλμπάντης, 2007, Τσακίρης, 2013)

Ως δεδομένα εισόδου εισέρχονται διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως κατακρημνίσματα, θερμοκρασία, άνεμος κλπ. Οι εξισώσεις του συστήματος περιλαμβάνουν ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που απεικονίζουν τις φυσικές διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή. Τέτοιες φυσικές διαδικασίες είναι η κατακράτηση, η εξατμισοδιαπνοή, η διήθηση, η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή και η αποθήκευση στο έδαφος. Επίσης, το αυξημένο ενδιαφέρον για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών τα τελευταία χρόνια, έχει οδηγήσει στην εισαγωγή αλγορίθμων προσομοίωσης χημικών διαδικασιών στα υδρολογικά μοντέλα. Η έξοδος του μοντέλου, μετά την εφαρμογή των εξισώσεων με τα δεδομένα εισόδου, δίνει την απορροή (Τσακίρης, 2013).

### 2.2 Ταξινόμηση μοντέλων βροχόπτωσης - απορροής

Η ταξινόμηση των μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής γίνεται με βάση τα παρακάτω κριτήρια, που αναφέρουν οι Ναλμπάντης και Τσακίρης (2006):

«

- Ο χειρισμός της χωρικής κατανομής των φυσικών διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή εντός της εξεταζόμενης λεκάνης.
- Το είδος των μαθηματικών εξισώσεων και σχέσεων για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών στη θεωρούμενη λεκάνη
- Ο τρόπος χειρισμού της αβεβαιότητας των υδρολογικών μεγεθών.
- Η λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με τον χρόνο (συνεχής ή όχι).

Σύμφωνα με το κριτήριο της χωρικής κατανομής των φυσικών διεργασιών, τα μοντέλα διακρίνονται σε αδρομερή και κατανεμημένα. Στα αδρομερή (lumped) ολόκληρη η λεκάνη απορροής αντιμετωπίζεται ως ενιαία χωρική ενότητα που δέχεται ως εισόδους την χωρικά μέση βροχόπτωση και τις χωρικά μέσες τιμές άλλων μεγεθών τα οποία μετασχηματίζονται

μέσω μαθηματικών σχέσεων που είναι χωρικά ομογενείς. Στα κατανεμημένα (distributed) η λεκάνη απορροής διασπάται σε στοιχειώδη τμήματα τέτοια ώστε να αναπαρίσταται η χωρική κατανομή των φυσιογραφικών ή άλλων χαρακτηριστικών της λεκάνης (υψόμετρα, κλίση, γεωλογικό υπόβαθρο, κλπ). Τα κατανεμημένα μοντέλα που έχουν μικρό πλήθος χωρικών ενοτήτων αναφέρονται και ως ημικατανεμημένα (semi-distributed).

Σύμφωνα με το κριτήριο του είδους των μαθηματικών εξισώσεων τα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα «μαύρου κουτιού», εννοιολογικά μοντέλα και μοντέλα φυσικής βάσης. Στα μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box) οι φυσικές διεργασίες αναπαρίστανται από σχέσεις της γενικής θεωρίας της ανάλυσης συστημάτων χωρίς καμία θεώρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών (φυσικοί νόμοι, εμπειρικές σχέσεις) του υπό μελέτη συστήματος, δηλαδή της λεκάνης απορροής. Στα εννοιολογικά ή παραμετρικά μοντέλα (conceptual) οι φυσικές διεργασίες αναπαρίστανται με απλές μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο. Οι σχέσεις αυτές όπως και εκείνες των μοντέλων «μαύρου κουτιού» περιλαμβάνουν άγνωστες παραμέτρους που εκτιμούνται ειδικά για την εξεταζόμενη λεκάνη. Στα μοντέλα φυσικής βάσης (physics-based) οι μαθηματικές σχέσεις αναπαριστούν τους φυσικούς νόμους που διέπουν το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή.

Σύμφωνα με το κριτήριο του τρόπου χειρισμού της αβεβαιότητας τα μοντέλα διακρίνονται σε αιτιοκρατικά και στοχαστικά. Στα αιτιοκρατικά (deterministic) όλα τα υδρολογικά μεγέθη που υπεισέρχονται θεωρούνται ότι έχουν συγκεκριμένες τιμές (γνωστές ή όχι) χωρίς αβεβαιότητα. Στα στοχαστικά (stochastic) ορισμένα από τα υδρολογικά μεγέθη θεωρούνται ότι περιέχουν αβεβαιότητα και συνήθως αναπαρίστανται ως στοχαστικές ανεξίτητες (stochastic processes).

Σύμφωνα με το κριτήριο της λειτουργίας σε σχέση με το χρόνο τα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα υδρολογικού γεγονότος και σε μοντέλα συνεχούς χρόνου. Τα μοντέλα υδρολογικού γεγονότος (event-based) λειτουργούν για ένα μεμονωμένο πλημμυρικό γεγονός και συνήθως αναπαράγουν μόνο τις κύριες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια πλημμυρών. Τα μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time) μπορούν να λειτουργούν αναπαριστώντας την πλήρη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών, τόσο σε υγρές όσο και σε ξηρές χρονικές περιόδους. Για το λόγο αυτό μόνο τα μοντέλα συνεχούς χρόνου χρησιμοποιούνται στις εκτιμήσεις του επιφανειακού υδατικού δυναμικού.»

### **2.3 Βαθμονόμηση μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής**

Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής με βάση μετρήσεις των υδρολογικών μεγεθών εισόδου και εξόδου ονομάζεται βαθμονόμηση (calibration). Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης εισάγονται στο μοντέλο οι χρονοσειρές των μεγεθών εισόδου και παράγεται η χρονοσειρά της συνθετικής απορροής. Η πιστότητα της αναπαραγωγής της χρονοσειράς της μετρημένης απορροής δείχνει και τον βαθμό επιτυχούς προσαρμογής του μοντέλου στα δεδομένα. Δηλαδή, γίνεται μία σύγκριση μεταξύ της μετρημένης χρονοσειράς απορροής και της χρονοσειράς συνθετικής απορροής που προέκυψε από την διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου και εξάγεται συμπέρασμα για το πόσο καλά προσαρμόζονται οι δύο χρονοσειρές και, κατ' επέκταση, για το πόσο καλά προσαρμόζεται το μοντέλο στα δεδομένα. Ως μέτρο καλής προσαρμογής ενός μοντέλου χρησιμοποιείται ευρύτατα ο συντελεστής επίδοσης των Nash και Sutcliffe (1970), NSE

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{μετ},i} - Q_{\text{εκτ},i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{μετ},i} - \bar{Q}_{\text{μετ}})^2} \quad (2.1)$$

όπου:

$Q_{\text{μετ}}$  : η μετρημένη απορροή

$Q_{\text{εκτ}}$  : η εκτιμημένη απορροή

$\bar{Q}_{\text{μετ}}$  : η μέση τιμή της μετρημένης απορροής

$N$  : το πλήθος παρατηρήσεων

Για το συντελεστή NSE ισχύει:

$$-\infty \leq \text{NSE} \leq 1 \quad (2.2)$$

Αρνητική τιμή του συντελεστή NSE σημαίνει ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται χειρότερα από την απλή θεώρηση της μέσης τιμής της μετρημένης απορροής και το μοντέλο δεν είναι αποδεκτό. Αντίθετα, καλή προσαρμογή του μοντέλου σημαίνει υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού που τείνει στη μονάδα. Γενικά, το όριο για να θεωρηθεί ικανοποιητική η προσαρμογή του μοντέλου είναι το 0.7 ή 0.8.

Αν θεωρηθεί ότι διατίθενται ταυτόχρονες χρονοσειρές απορροής από μετρήσεις  $Q_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) και υδρολογικών μεγεθών εισόδου (π.χ. χωρικά μέσης βροχόπτωσης) που συμβολίζεται με ένα διάνυσμα μεταβλητών  $\mathbf{P}_i$  ( $i=1,2, \dots,N$ ) και ότι το μοντέλο βροχόπτωσης απορροής έχει  $K$  παραμέτρους ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$ ) τότε η χρονοσειρά της συνθετικής απορροής για τυχούσες τιμές των παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$  προκύπτει ως μια συνάρτηση  $f(\cdot)$  των παραμέτρων και των υδρολογικών μεγεθών και είναι η εξής (Ναλμπάντης, 2007):

$$QE_i = f(\mathbf{P}_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.3)$$

Επομένως, αν τα παραπάνω εφαρμοστούν στη Σχέση 2.1 προκύπτει:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - f(\mathbf{P}_i, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (2.4)$$

Από τη σχέση 2.4 είναι εφικτός ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων εφαρμόζοντας μια οποιαδήποτε κατάλληλη μέθοδο βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση στόχου προς μεγιστοποίηση είναι το NSE και οι μεταβλητές απόφασης είναι οι παράμετροι ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$ ). Σε κάθε επαναληπτικό βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης πραγματοποιείται ένα τρέξιμο του μοντέλου για μια ορισμένη χρονική περίοδο που ονομάζεται περίοδος βαθμονόμησης, έτσι ώστε να υπολογιστεί η χρονοσειρά της εκτιμημένης ή συνθετικής απορροής.

Μετά τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, αυτές εισάγονται στο μοντέλο μαζί με χρονοσειρές των υδρολογικών μεγεθών εισόδου για την υπό μελέτη λεκάνη, αλλά για μια χρονική περίοδο διαφορετική από την περίοδο βαθμονόμησης, η οποία λέγεται περίοδος επαλήθευσης. Στη συνέχεια, γίνεται τρέξιμο του μοντέλου και λαμβάνεται η τιμή του NSE. Αν η τιμή αυτή είναι σχετικά συγκρίσιμη με τη συνήθως μεγαλύτερη βέλτιστη τιμή που έχει προκύψει κατά την περίοδο βαθμονόμησης, τότε το μοντέλο γίνεται δεκτό για περαιτέρω χρησιμοποίηση. Αν οι δύο τιμές διαφέρουν σημαντικά, τότε το μοντέλο δεν γίνεται δεκτό και απορρίπτεται (Ναλμπάντης, 2007).

## 3 Οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής

---

### 3.1 Γενικά

Παρόλη τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης της υδρολογίας τις τελευταίες δεκαετίες, είναι πολύ συχνό το φαινόμενο έλλειψης υδρολογικών δεδομένων σε πολλές περιοχές σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα δεδομένα αυτά αφορούν μετρήσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, των μετεωρολογικών μεγεθών και της απορροής. Έτσι, οι λεκάνες απορροής που σχηματίζονται σε αυτές τις περιοχές ονομάζονται μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Βέβαια, στην επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με αυτό το αντικείμενο, ο όρος συνήθως αφορά λεκάνες απορροής χωρίς μετρήσεις της απορροής.

Οι ελλείψεις δεδομένων σε αυτές τις λεκάνες δημιουργούν πολλά προβλήματα και αδιέξοδα κατά τη μελέτη τους με συμβατικό τρόπο. Η μοντελοποίησή τους καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, η ακρίβειά της πολύ μικρή και διάφορες άλλες υδρολογικές διαδικασίες, σχεδόν ακατόρθωτες.

Η επιστημονική κοινότητα έχει αντιληφθεί πόσο σημαντικό θέμα αποτελούν οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής και έχει καταβάλει μεγάλη προσπάθεια στην κατανόηση και ερμηνεία τους, αλλά και στην ανάπτυξη επιστημονικής γνώσης, μεθόδων, εργαλείων και μοντέλων για την περαιτέρω μελέτη τους.

### 3.2 Προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες

#### 3.2.1 Η πρωτοβουλία PUB της IAHS

Το ζήτημα των προβλέψεων σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής ξεκίνησε να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα στην αρχή της νέας χιλιετίας καθώς οι μέχρι τότε υδρολογικές θεωρίες, τα μοντέλα και οι εμπειρικές μέθοδοι ήταν ιδιαίτερα ανεπαρκείς για προβλέψεις σε τέτοιου είδους λεκάνες (Hrachowitz et al., 2013). Επιπλέον, υπήρχε μεγάλη ανάγκη για καλύτερη κατανόηση της υδρολογικής λειτουργίας και της μορφής της απορροής για να αντιμετωπιστεί η πρόκληση των μη μετρούμενων λεκανών απορροής. Με άλλα λόγια έγινε αντιληπτό ότι η έλλειψη δεδομένων θα οδηγούσε να εξαχθεί συμπέρασμα περί της υδρολογικής λειτουργίας μιας λεκάνης από μετρήσεις της μορφής της ίδιας της λεκάνης όπως και των συνδυασμένων επιδράσεων του κλίματος, της τοπογραφίας, της γεωλογίας, του είδους του εδάφους και της κάλυψης γης. Έγινε αντιληπτό ότι αυτός ο στόχος θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με τη βελτιωμένη κατανόηση των βασικών υδρολογικών διεργασιών, απαιτώντας μια μετατόπιση της εστίασης της έρευνας μακριά από την προσαρμογή παραμέτρων και προς την κατεύθυνση της κατανόησης της διαδικασίας καθώς και τις δομικές διαγνώσεις των μοντέλων.

Παρόλη τη μοναδική σημασία του νερού στο σύστημα της γης και τον κεντρικό ρόλο της υδρολογίας στη διεπαφή της με πολυάριθμους τομείς, ο ίδιος ο τομέας της υδρολογίας παρέμεινε διχασμένος και, κατά κάποιο τρόπο, σε κατάσταση έλλειψης επαρκούς στιβαρής επιστημονικής και θεωρητικής βάσης για να παρέχει αξιόπιστες προβλέψεις βασισμένες στην επιστήμη. Οι κύριοι παράγοντες που κατέληγαν σε αβεβαιότητα της πρόβλεψης περιελάμβαναν:

- Μία ελλιπή κατανόηση του συνόλου των διεργασιών απόκρισης του υδρολογικού συστήματος και των συσχετίσεων μεταξύ τους σε κλίμακα λεκάνης, που συχνά καταλήγει σε εκ φύσεως μη ρεαλιστικά μοντέλα με υψηλή αβεβαιότητα πρόβλεψης
- Μία ελλιπή κατανόηση της πολυδιάστατης χωροχρονικής ετερογένειας των διεργασιών σε διαφορετικά τοπία και κλίματα, καθώς η μεγάλη πλειονότητα των μικρών λεκανών απορροής παγκοσμίως ήταν και είναι μη μετρούμενες με ελάχιστη ή και μηδαμινή πληροφορία
- Ακατάλληλες τεχνικές περιοχοποίησης για να μεταφερθεί η κατανόηση των προτύπων υδρολογικής απόκρισης από μετρούμενα σε μη μετρούμενα περιβάλλοντα, εξαιτίας, μεταξύ άλλων, και της έλλειψης μελετών σύγκρισης μεταξύ λεκανών απορροής και της έλλειψης φυσικών αρχών που διέπουν την ισχυρή περιοχοποίηση.

Έτσι, η ανεπαρκής κατανόηση της διεργασίας και η έλλειψη ταυτόχρονων δεδομένων σε πολλαπλές κλίμακες χώρου και χρόνου, καθώς και η έμφαση σε τοπικές και απομονωμένες ερευνητικές μελέτες, δημιούργησαν μία κατάσταση στην οποία η αξιόπιστη υδρολογική πρόβλεψη γινόταν συχνά δύσκολη στις σχετικά λίγες μετρημένες περιοχές παγκοσμίως και ουσιαστικά αδύνατη για τον υπόλοιπο κόσμο.

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, ξεκίνησε το 2003 η πρωτοβουλία για τις προβλέψεις σε μη μετρήσιμες λεκάνες απορροής (Predictions in Ungauged Basins - PUB) από την Διεθνή Ένωση των Υδρολογικών Επιστημών (International Association of Hydrological Sciences - IAHS) με την έκδοση ενός δεκαετούς επιστημονικού σχεδίου. Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της πρωτοβουλίας ήταν «να διατυπώσει και να εκτελέσει κατάλληλα επιστημονικά προγράμματα τα οποία θα απασχολήσουν και θα ενεργοποιήσουν την επιστημονική κοινότητα, με ένα συντονισμένο και αποτελεσματικό τρόπο, προς την επίτευξη σημαντικής προόδου σε ό,τι αφορά τις υδρολογικές προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής». Αυτή η στρατηγική συνεπάγεται μία σημαντική μεταβολή στην ιδεολογική δομή της επιστημονικής υδρολογίας, η οποία παραδοσιακά σχετίζεται με εμπειρικές τεχνικές, καθώς δίνει έμφαση στην ανάγκη απομάκρυνσης από μεθόδους που εστιάζουν στα δεδομένα και στη βαθμονόμηση και στην προσέγγιση μεθόδων που είναι πιο ισχυρά βασισμένες σε θεωρητικές γνώσεις σχετικά με τις φυσικές διεργασίες και την κατανόηση του συστήματος. Η πρωτοβουλία PUB σχεδιάστηκε για να ωφελήσει την επιστήμη της υδρολογίας παρέχοντας μεγαλύτερη συνοχή και αρμονία στις επιστημονικές δραστηριότητες και αυξημένες προοπτικές για επιστημονικές ανακαλύψεις και, άρα, ενθουσιασμό για την επιστήμη.

Σύμφωνα με τον παραπάνω γενικό στόχο, διατυπώθηκαν οι πρωταρχικοί ερευνητικοί στόχοι της πρωτοβουλίας PUB οι οποίοι είναι:

- Να βελτιώσει την ικανότητα των υφιστάμενων υδρολογικών μοντέλων να προβλέπουν, με μειωμένη αβεβαιότητα, υδρολογικά μεγέθη σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής
- Να αναπτύξει νέα και καινοτόμα μοντέλα που να αντιπροσωπεύουν τη χωροχρονική μεταβλητότητα των υδρολογικών διεργασιών και, ως εκ τούτου, να βελτιώσει την εμπιστοσύνη στις προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Η πρωτοβουλία PUB υιοθέτησε πολλούς, ως επί το πλείστον παράλληλους αλλά έντονα συνυφασμένους άξονες έρευνας για να επιτύχει τους καθορισμένους στόχους. Η βασική στρατηγική της πρωτοβουλίας PUB ήταν να εξάγει περισσότερη πληροφορία από τα δεδομένα, είτε με πιο αποτελεσματική εκμετάλλευση των διαθέσιμων δεδομένων, είτε με χρήση νεοαποκτηθέντων δεδομένων για να βελτιώσει την τοπική διαδικασία κατανόησης στις

μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Αυτή η κατανόηση θα χρησιμοποιούταν έπειτα για το σχεδιασμό μοντέλων με αυξημένο βαθμό ρεαλισμού στις τοποθεσίες με μετρήσεις. Την ίδια στιγμή, περιφερειακά ή παγκόσμια συγκεντρωμένα δεδομένα, επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν σε συγκριτικές μελέτες για να αποκτηθεί μία καλύτερη κατανόηση των πολυδιάστατων, χωροχρονικών ετερογενειών των προτύπων της υδρολογικής απόκρισης. Αυτή η βελτιωμένη αντίληψη των προτύπων αναμενόταν να διευκολύνει την ανάπτυξη περισσότερων εκλεπτυσμένων τεχνικών περιοχοποίησης οι οποίες ήταν απαραίτητες για επέκταση της γνώσης σε τοποθεσίες χωρίς μετρήσεις, οι οποίες τελικά θα επιτρέψουν περισσότερο αξιόπιστες προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Επιπρόσθετα, οι διαγνώσεις μοντέλων προόδευαν προς μια καλύτερη κατανόηση των αβεβαιοτήτων και εκπονήθηκαν μέθοδοι ταξινόμησης των λεκανών απορροής καθώς και πλαίσια ομοιότητας. Αυτή η καλύτερη αντίληψη των προτύπων της υδρολογικής λειτουργίας αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη μίας νέας προοπτικής (και των περιορισμών της) στην οποία η υδρολογία δεν φαίνεται ως μία απομονωμένη επιστήμη, αλλά, στην πραγματικότητα, αποτελεί τον κεντρικό παράγοντα στη διεπαφή της εξέλιξης του κλίματος, της γεωλογίας, της τοπογραφίας και της οικολογίας και των παροδικών και μακροχρόνιων αποκρίσεών τους στη μεταβολή. Πρέπει να επισημανθεί ότι η έμφαση της πρωτοβουλίας PUB δόθηκε στις προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής καθώς και στη κατανόηση δεδομένων και διαδικασιών για να υποστηριχθούν αυτές οι προβλέψεις.

### **3.2.2 Επιτεύγματα της πρωτοβουλίας**

Κατά τη διάρκεια της δεκαετούς πρωτοβουλίας PUB σημειώθηκαν διάφορα επιτεύγματα και εκπονήθηκαν διάφορες μελέτες που προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα την επιστήμη της υδρολογίας και συνέβαλαν σε πιο αξιόπιστες προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Όλα τα παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις κατηγορίες επιτευγμάτων στους ακόλουθους τομείς:

- Ετερογένεια δεδομένων και διεργασιών
- Μοντέλα, ανάλυση αβεβαιότητας και διαγνώσεις
- Ταξινόμηση λεκανών απορροής και νέα θεωρία

Στη συνέχεια, αναλύεται κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες.

#### **Ετερογένεια δεδομένων και διεργασιών**

Τα δεδομένα αποτελούν τη σπονδυλική στήλη για οποιουδήποτε είδους πρόοδο στην κατανόηση της υδρολογικής διαδικασίας και στη μοντελοποίηση. Τόσο η έλλειψη δεδομένων όσο και η ποιότητά τους ήταν παραδοσιακά κύρια προβλήματα για την υδρολογία και ακόμα αποτελούν πηγή σημαντικής αβεβαιότητας σε οποιουδήποτε τύπου υδρολογική εφαρμογή. Καθώς η παραδοσιακή απόκτηση δεδομένων υπόκειται τυπικά σε οικονομικούς λογιστικούς και χρονικούς περιορισμούς, οι καινοτομίες και οι πρόοδοι στις τεχνολογίες αισθητήρων έχουν την προοπτική να είναι ιδιαίτερα πολύτιμες για την υδρολογία. Επίσης, κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών έχουν γίνει σημαντικά βήματα προς τα εμπρός για τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα μιας ευρείας ποικιλίας περιβαλλοντικών δεδομένων που αποκτήθηκαν με διαφορετικές τεχνολογίες και στρατηγικές παρατήρησης. Επιπλέον, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες στην ανάπτυξη τρόπων για την εξαγωγή περισσότερης πληροφορίας από ιστορικά και σύγχρονα διαθέσιμα δεδομένα. Ακόμη, ένα κρίσιμο ζήτημα είναι οι απαιτήσεις των δεδομένων για εξάρτηση από μία κλίμακα, το οποίο απαιτεί μία ιεραρχική στρατηγική απόκτησης δεδομένων. Βέβαια, τα παγκόσμια και τα χαμηλής ανάλυσης σύνολα δεδομένων, τα οποία συνήθως βασίζονται στην τηλεπισκόπηση, παρέχουν γενικευμένη πληροφορία σε χαμηλό κόστος. Αντίθετα, περιφερειακές πηγές δεδομένων με



ποικιλία διαθεσιμότητας και ακρίβειας παρέχουν πιο λεπτομερή πληροφορία με μεγαλύτερο κόστος, μέσω δεδομένων μικρότερης κλίμακας. Τέλος, με τους αυξανόμενους χρονικούς και οικονομικούς πόρους, οι τοπικές εκστρατείες παρατήρησης, ακόμα και αν περιορίζονται σε μικρές περιόδους, μπορούν να παρέχουν λεπτομερή κατανόηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής σε τοπική κλίμακα.

Υπό το φως των εξελίξεων στην απόκτηση δεδομένων, υπάρχουν ομόφωνες απόψεις πως πλησιάζει σύντομα η εποχή κατά την οποία, παρόλη τη μείωση των πολλών επίγειων παρατηρήσεων εξαιτίας των οικονομικών περικοπών, η υδρολογία, λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας και ποιότητας δεδομένων τηλεπισκόπησης, δε θα περιορίζεται από την έλλειψη κλιματικών δεδομένων. Ακόμη, θα εμφανίζονται νέες ευκαιρίες για αφομοίωση δεδομένων η οποία θα είναι πολύτιμη για τη βελτίωση των προβλέψεων σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Όλα τα παραπάνω έχουν ομαδοποιηθεί και αναλυθεί σε πέντε κατηγορίες βημάτων προόδου:

- Πρόοδος στην τεχνολογία radar και δορυφόρων
- Πρόοδος στην τεχνολογία επίγειων παρατηρήσεων
- Νέα δεδομένα και πρόοδος στην κατανόηση των διεργασιών μέσω πειραματικών μελετών
- Δεδομένα ιχνηθετήσεων και πρόοδος στην κατανόηση των διαδικασιών μεταφοράς
- Πρόοδος στην κατανόηση της εξάρτησης από την κλίμακα μέσω δεδομένων αυξημένης κάλυψης και ανάλυσης

### **Μοντέλα, ανάλυση αβεβαιότητας και διαγνώσεις**

Μέχρι την έναρξη της πρωτοβουλίας PUB, ο πολλαπλασιασμός των εμπορικών λογισμικών μοντελοποίησης οδήγησε σε πόλωση μεταξύ διαφορετικών ομάδων που υποστήριζαν το κάθε λογισμικό και δινόταν ιδιαίτερη έμφαση στον καθορισμό των τύπων των μοντέλων (π.χ., φυσικής βάσης - εννοιολογικά) που θα προτιμούνταν παγκόσμια. Δηλαδή, αντί να ελέγχεται το πιο κατάλληλο μοντέλο για κάθε συγκεκριμένη, μοναδική λεκάνη απορροής, ελεγχόταν ο κώδικας του μοντέλου για την ικανότητά του να εφαρμόζεται σε παγκόσμιο επίπεδο.

Όμως, κατά τη διάρκεια της πρωτοβουλίας PUB αναπτύχθηκε μία αυξανόμενη κατανόηση της σημασίας της εξωστρέφειας ως προς διαφορετικές προσεγγίσεις και της προθυμίας για επικοινωνία και έρευνα για νέες ευκαιρίες. Αυτά οδήγησαν σε μία πολύ περισσότερο ανοικτή στάση ως προς τη μοντελοποίηση και τη διασταύρωση μεταξύ εννοιών. Παράδειγμα είναι η μίξη μηχανικών περιγραφών με την αφομοίωση δεδομένων, πειραματισμοί και δοκιμές με αλγορίθμους, συγχώνευση μεθόδων και χρήση προσεγγίσεων για πολλές λεκάνες απορροής για τον έλεγχο των παραδοχών και των υποθέσεων. Ως εκ τούτου, έγινε ευρέως αποδεκτό ότι κανένα μοντέλο δεν είναι τέλειο και δόθηκε μεγαλύτερη σημασία στις διαδικασίες μοντελοποίησης και τις παραδοχές που εμπλέκονται από ό,τι στην ονομασία και τη φήμη ενός μοντέλου.

Επιπλέον, αξιοποιήθηκαν νέα δεδομένα στα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής καθώς η ικανότητα πρόβλεψης περιορίζεται αν αυτά στηρίζονται μόνον σε παρατηρημένα υδρογραφήματα.

Παράλληλα, έγινε πρόοδος στη διαδικασία βαθμονόμησης μοντέλων και στον έλεγχό τους και διατυπώθηκαν νέοι τροποποιημένοι συντελεστές προσδιορισμού σαν αυτόν των Nash και Sutcliffe, NSE, καθώς ο NSE παρουσιάζει υπερευαισθησία στις παροχές αιχμής της απορροής.

Επίσης, η επιστημονική κοινότητα ευαισθητοποιήθηκε σχετικά με την ανάλυση αβεβαιότητας και την ανάγκη αυτή να λάβει μία πιο εξέχουσα θέση στην υδρολογία.

Τέλος, με όλες αυτές τις εξελίξεις, διατυπώθηκε η άποψη πως τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία εκμάθησης καθώς έχουν τη δυνατότητα να διδάξουν στην επιστημονική κοινότητα περισσότερο σχετικά με το υδρολογικό σύστημα.

### **Ταξινόμηση λεκανών απορροής και νέα θεωρία**

Οι υδρολογικές επιστήμες χαρακτηρίζονται από ουσιώδη ετερογένεια των διεργασιών μεταξύ διάφορων τοποθεσιών καθώς και από χωρικές και χρονικές κλίμακες. Για πολύ καιρό, αυτή η ετερογένεια παρεμπόδιζε τις προσπάθειες για εμφάθυνση και κατανόηση σχετικά με το τι ελέγχει τις υδρολογικές διαδικασίες και πως αυτές συνδέονται μεταξύ τους. Ωστόσο, από τις γνώσεις σχετικά με τις επιδράσεις αυτών των ετερογενειών στα πρότυπα απόκρισης μπορεί να παραχθεί μία ολιστική θεωρία για την υδρολογία. Η αναγνώριση των σχέσεων κλιμάκωσης, καθώς και η ανάπτυξη συστημάτων ταξινόμησης λεκανών απορροής και πλαισίων ομοιότητας, που βασίζονται σε συγκριτικές μελέτες, μπορούν να φανούν ως ένας πολλά υποσχόμενος δρόμος προς τη σύνθεση.

Έτσι, κατά τη πρωτοβουλία PUB επετεύχθη πρόοδος στις διεργασίες και στην περιοχοποίηση των παραμέτρων, στην ταξινόμηση των λεκανών απορροής και στα πλαίσια ομοιότητας και στην ανάπτυξη νέας υδρολογικής θεωρίας.

Η περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας.



## 4 Το μοντέλο PRMS

---

### 4.1 Γενικά

Το μοντέλο PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) είναι ένα αιτιοκρατικό, καταναμημένο, υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και την εκτίμηση της απόκρισης μιας λεκάνης απορροής, κάτω από διάφορους συνδυασμούς κλίματος και χρήσεων γης. Είναι εφικτό να γίνει προσομοίωση της απόκρισης για κανονική και ακραία βροχόπτωση και χιονόπτωση με στόχο την εκτίμηση αλλαγών σε σχέσεις υδατικού ισοζυγίου, στο καθεστώς απορροής, σε σχέσεις εδαφικής υγρασίας και στην επαναφόρτιση των υπογείων υδάτων. Στο PRMS κάθε υδρολογική διαδικασία αναπαρίσταται από έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε ένα φυσικό νόμο ή σε μία εμπειρική σχέση με χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να μετρηθούν ή να εκτιμηθούν (Markstrom et al., 2015).

Η ιδιότητα του PRMS να είναι καταναμημένο έγκειται στο διαχωρισμό της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) οι οποίες προκύπτουν από φυσικές ιδιότητες της λεκάνης όπως το υψόμετρο του εδάφους, η κλίση και ο προσανατολισμός. Επίσης, γίνεται η υπόθεση πως, τόσο οι φυσικές διεργασίες, όσο και η υδρολογική απόκριση είναι ομοιογενείς για κάθε HRU. Έτσι, καθημερινά συντίθεται ένα υδατικό ισοζύγιο και ένα ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε HRU. Το σύνολο των αποκρίσεων όλων των HRU, σταθμισμένο με βάση την επιφάνεια κάθε μονάδας, παράγει την ημερήσια απόκριση της λεκάνης απορροής στην πιο βασική δομή.

### 4.2 Έννοιες και ορισμοί του μοντέλου PRMS

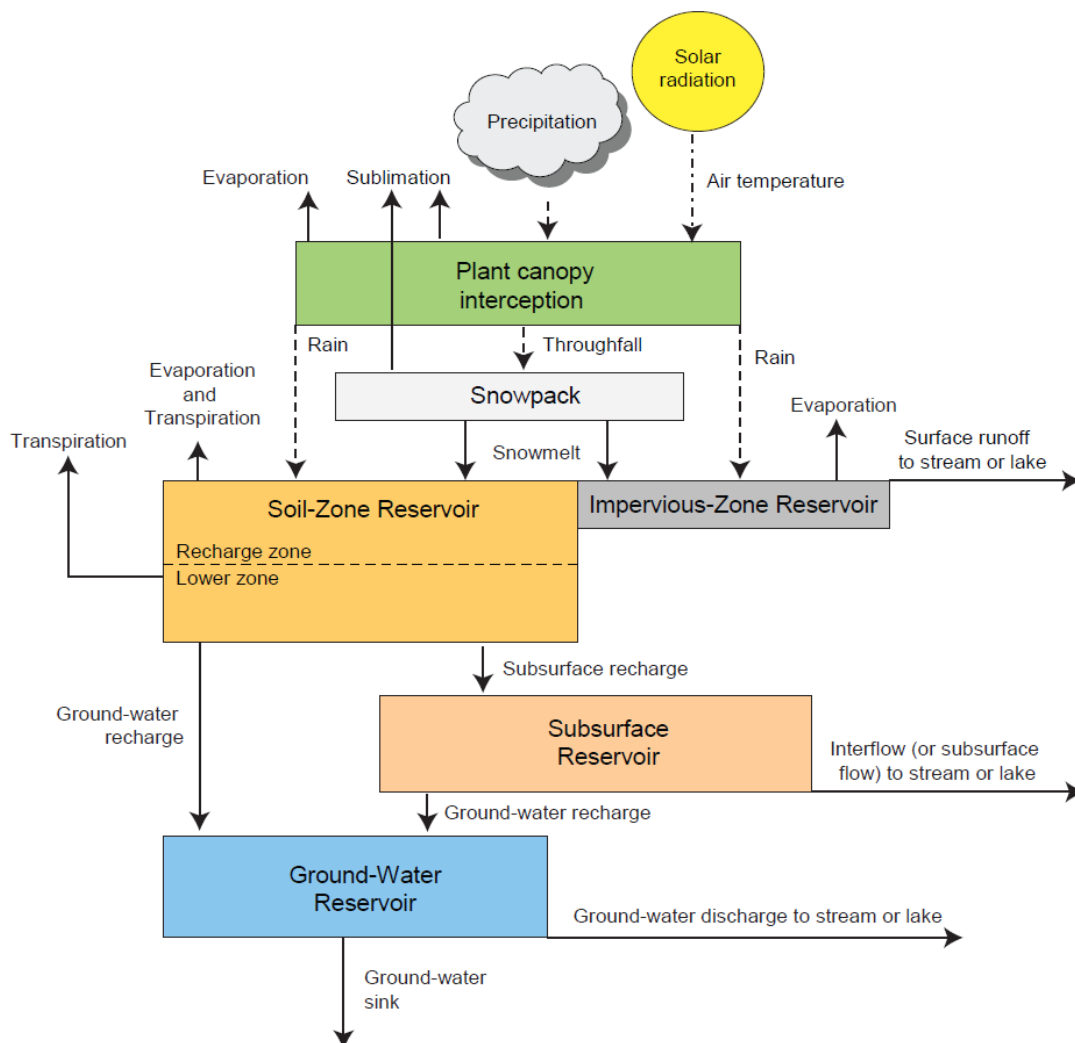
Όπως αναφέρεται από τους Markstrom et al. (2015), το μοντέλο PRMS, συγκεκριμένα η έκδοση PRMS-IV, λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές ημερήσιου βήματος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωση, χιονόπτωση), της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων, η οποία βέβαια μπορεί να υπολογιστεί εσωτερικά από το μοντέλο, αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Τα κατακρημνίσματα με τη μορφή βροχής, χιονιού ή και συνδυασμό των δύο μειώνονται από την παρεμβολή του φυλλώματος της βλάστησης και οι ποσότητες που το διαπερνούν γίνονται τα καθαρά κατακρημνίσματα που μεταφέρονται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρονται στις διεργασίες του μοντέλου που σχετίζονται με την εξάτμιση, τη διαπνοή, την εξάχνωση και την τήξη του χιονιού. Η δομή της λεκάνης απορροής γίνεται αντιληπτή ως μια σειρά αποθεμάτων νερού, τμημάτων υδατορευμάτων και λιμνών. Κατά την προσομοίωση διατηρείται από το μοντέλο ένα υδατικό ισοζύγιο ολόκληρης της λεκάνης καθώς και των παραπάνω επιμέρους τμημάτων της, παρόλο που συμβαίνει αποθήκευση και μεταφορά νερού μεταξύ αυτών.

Η ζώνη εδάφους αντιπροσωπεύει το τμήμα του μανδύα του εδάφους που χάνει νερό εξαιτίας της εξάτμισης και της διαπνοής. Το βάθος της ζώνης εδάφους ορίζεται από το μέσο βάθος των ριζών του κύριου τύπου βλάστησης που καλύπτει την επιφάνεια του εδάφους. Το απόθεμα του νερού στη ζώνη εδάφους αυξάνεται από τη διήθηση της βροχής και την τήξη του χιονιού και μειώνεται από την εξατμισοδιαπνοή. Η διήθηση ορίζεται ως η καθαρή

βροχόπτωση μείον την επιφανειακή απορροή. Το απόθεμα του νερού στο έδαφος και η ροή μέσα στην εδαφική ζώνη αντιπροσωπεύονται από μια σειρά νοητών ταμιευτήρων. Το νερό κινείται μεταξύ αυτών των ταμιευτήρων με βάση προηγούμενες συνθήκες και ιδιότητες του εδάφους. Ο ταμιευτήρας αδιαπέρατης ζώνης αναφέρεται σε μια επιφάνεια χωρίς χωρητικότητα διήθησης. Αυτός έχει μια μέγιστη χωρητικότητα αποθέματος, η οποία πρέπει να ικανοποιείται πριν λάβει χώρα η επιφανειακή απορροή στα διάφορα υδατορεύματα (Leavesley et al., 1983).

Οι πλευρικές εισροές υπολογίζονται ως το άθροισμα της επιφανειακής απορροής, της υπεδάφιας ροής και της ροής των υπόγειων υδάτων. Σε σύνθετες λεκάνες απορροής, το νερό μπορεί να απορρέει από ταμιευτήρα σε ταμιευτήρα προτού φτάσει στα υδατορεύματα. Επίσης, η απορροή μπορεί να αποθηκεύεται σε λίμνες και να εξασθενεί ο ρυθμός αυτής.

Όλες οι παραπάνω ιδιότητες και διαδικασίες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Υδρολογικές διαδικασίες του μοντέλου PRMS για την προσομοίωση μιας υποθετικής λεκάνης απορροής (Πηγή: Leavesley et al., 1983)

Σχετικά με τη χωρική διακριτοποίηση, οι Markstrom et al. (2015) αναφέρουν πως για να γίνει μια προσομοίωση με το PRMS, απαιτείται η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής να χωριστεί σε μια σειρά από ξεχωριστές υδρολογικές μονάδες. Συνήθως, αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (ΓΣΠ) σε έναν υπολογιστή. Η

διακριτοποίηση επιτρέπει τη χωρική μεταβλητότητα στις εισόδους του μοντέλου και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτά μπορούν να αξιολογηθούν για κάθε μονάδα ξεχωριστά ή για ένα σύνολο μονάδων. Μια εφαρμογή στο PRMS βασίζεται σε πέντε τύπους χωρικών μονάδων: στο πεδίο του μοντέλου, δηλαδή τη λεκάνη απορροής στο σύνολό της, στα τμήματα υδατορευμάτων, στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs), στις λίμνες και στις υπολεκάνες.

### 4.3 Αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών του μοντέλου PRMS

Η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου μιας λεκάνης απορροής με το μοντέλο PRMS είναι χωρισμένη σε 17 διεργασίες. Κάθε μια από αυτές αντιπροσωπεύει είτε μία από τις κύριες υδρολογικές διεργασίες, όπως η επιφανειακή απορροή ή η υπόγεια ροή, ή μία διαχειριστική διαδικασία, όπως η ανάγνωση δεδομένων εισόδου, ή η δημιουργία αναφοράς αποτελεσμάτων. Κάθε διαδικασία λειτουργεί με τη σωστή σειρά από το PRMS για την προσομοίωση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής. Για την προσομοίωση μίας διαδικασίας χρησιμοποιούνται ενότητες (modules). Μία ενότητα (module) είναι ένας πηγαίος κώδικας του υπολογιστή ο οποίος είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 90. Μία διαδικασία είναι δυνατόν να υλοποιείται από περισσότερες από μία ενότητες, που η καθεμία αποτελεί μία εναλλακτική σύλληψη ή προσέγγιση της προσομοίωσης της αντίστοιχης υδρολογικής διεργασίας. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης είναι εκείνος που καλείται να επιλέξει ποια ενότητα θα χρησιμοποιήσει, ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτει και τις μεθόδους που θέλει να ακολουθήσει. Όμως, για κάθε διαδικασία χρησιμοποιείται αυστηρά μία ενότητα. Κάθε ενότητα χρειάζεται συγκεκριμένες εισόδους για να τρέξει και υπολογίζει συγκεκριμένες εξόδους οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι σε άλλες ενότητες. Οι ενότητες μεταδίδουν τις εισόδους και τις εξόδους μεταξύ τους μέσα από μία καλά ορισμένη δομή μνήμης. Οι 17 διαδικασίες υλοποιούνται από συνολικά 36 ενότητες (η ενότητα `climate_hru` μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε 6 διαδικασίες) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Επίσης, υπάρχουν και μερικές ακόμα ενότητες για σύνδεση με τις προηγούμενες εκδόσεις του PRMS οι οποίες δεν αναφέρονται.

Πίνακας 4.1: Διαδικασίες και ενότητες του PRMS-IV

A/A	Διαδικασίες	Ενότητες
1	Ορισμός λεκάνης απορροής	basin
2	Διαδοχικότητα	cascade
3	Ηλιακός πίνακας	soltab
4	Δεδομένα χρονοσειρών	obs
5	Διανομή θερμοκρασίας	temp_1sta
		temp_laps
		temp_dist2
		climate_hru
6	Διανομή κατακρημνισμάτων	precip_1sta
		precip_laps
		precip_dist2
		climate_hru
7	Συνδυασμένη διανομή κλίματος	ide_dist
		xyz_dist
		climate_hru

Πίνακας 4.1 (συνέχεια): Διαδικασίες και ενότητες του PRMS-IV

A/A	Διαδικασίες	Ενότητες
8	Διανομή ηλιακής ακτινοβολίας	ddsolrad
		ccsolrad
		climate_hru
9	Περίοδος διαπνοής	transp_frost
		transp_tindex
		climate_hru
10	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή	potet_hamon
		potet_jh
		potet_hs
		potet_pt
		potet_pm
		potet_pan
		climate_hru
11	Συγκράτηση από το φύλλωμα	intcp
12	Χιόνι	snowcomp
13	Επιφανειακή απορροή	srunoff_smidx
		srunoff_carea
14	Ζώνη εδάφους	soilzone
15	Ροή υπογείων υδάτων	gwflow
16	Απορροή ρευμάτων	strmflow
		muskingum
		strmflow_in_out
		strmflow_lake
17	Σύνοψη	basin_sum
		subbasin
		map_results

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή κάθε ενότητας (module) του μοντέλου PRMS-IV όπως αυτές περιγράφονται από τους Markstrom et al. (2015).

#### 4.3.1 Ορισμός λεκάνης απορροής

Η ενότητα ορισμού της λεκάνης απορροής (basin module) εγκαθιστά και υπολογίζει τις μεταβλητές του πεδίου ορισμού, ελέγχει την εγκυρότητα των φυσικών παραμέτρων των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU), υπολογίζει την επιφάνεια και τον όγκο των εννοιολογικών δεξαμενών αποθήκευσης και αποφασίζει τη σειρά δρομολόγησης μεταξύ των γεωγραφικών χαρακτηριστικών.

#### 4.3.2 Διαδοχικότητα

Η ενότητα διαδοχικότητας (cascade module) παρέχει μια προαιρετική διαδικασία διαδοχικής ροής για να δρομολογούνται οι υπολογισμένες ροές από τις ανάντη στις κατάντη μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) και στις υπόγειες δεξαμενές (groundwater reservoirs – GWRs). Αυτή η διαδικασία βασίζεται στον προσδιορισμό ενός κατευθυνόμενου δικτύου ροής, το οποίο είναι ένα γράφημα δενδρικής μορφής χωρίς κυκλικές ροές που ορίζει τους διαδρόμους ροής μέσα στο πεδίο ορισμού που είναι η λεκάνη απορροής. Η ενότητα αυτή

επιτρέπει τη δρομολόγηση ροών μεταξύ χωρικών μονάδων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί θεωρώντας δεδομένες τις μεταβολές της τοπογραφίας, των χρήσεων γης, του κλίματος, των ιδιοτήτων του εδάφους, και γεωλογικών μονάδων. Κάθε διάδρομος ροής ορίζεται από το ξεκίνημα στο υψηλότερο ανάντη σημείο και από τη διάβαση στα κατόντη για να τερματίσει σε ένα τμήμα υδατορεύματος, σε μία λίμνη ή ένα βάλτο χωρίς καμία κυκλική ροή. Για το επιφανειακό και το υπόγειο νερό ορίζονται διαφορετικοί δρόμοι και οι υπόγειοι πρέπει να τερματίζουν μόνο σε τμήματα υδατορευμάτων. Επίσης, αυτή η ενότητα υποστηρίζει και σύνθετους διαδρόμους, συμπεριλαμβανομένης και της δρομολόγησης ροής σε πολλαπλές κατόντη γειτονικές περιοχές, δηλαδή HRUs, κάτι που λέγεται many-to-many, ή σε μία κατόντη γειτονική HRU, περίπτωση που αναφέρεται ως one-to-one. Η δρομολόγηση one-to-one χρησιμοποιείται όταν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) έχουν οριστεί μόνον με βάση την τοπογραφία, ενώ η δρομολόγηση many-to-many όταν οι HRUs έχουν οριστεί και από άλλους παράγοντες, όπως οι χρήσεις γης και τα εδάφη. Στην δεύτερη περίπτωση, η διαδοχική ροή δρομολογείται με βάση το κλάσμα επιφάνειας στην ανάντη HRU που η εν λόγω HRU συνεισφέρει ροή σε κάθε κατόντη HRU. Η ενότητα διαδοχικότητας υπολογίζει μεταβλητές που χρησιμοποιούνται από άλλες ενότητες για να δρομολογήσουν την επιφανειακή και την υπόγεια ροή από τις ανάντη στις κατόντη HRUs. Το επιφανειακό νερό αυτής της διαδικασίας προστίθεται στην κατόντη HRU ως διήθηση στην τριχοειδή δεξαμενή (το τμήμα της ζώνης εδάφους στο οποίο το νερό συγκρατείται από δυνάμεις τριχοειδούς και είναι ακίνητο), ή ως πλευρική εισροή σε τμήματα υδατορευμάτων. Αντίστοιχα, το υπόγειο νερό προστίθεται στην κατόντη υπόγεια δεξαμενή ως αποστράγγιση λόγω βαρύτητας ή ως πλευρική εισροή σε τμήματα υδατορευμάτων.

### 4.3.3 Ηλιακός πίνακας

Στην ενότητα του ηλιακού πίνακα (soltab module) υπολογίζονται πίνακες που απαρτίζονται από ημερήσιες εκτιμήσεις της δυνητικής (καθαρού ουρανού) ηλιακής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) με βάση τις ώρες μεταξύ ανατολής και δύσης, δηλαδή τη διάρκεια ηλιοφάνειας, για κάθε ημέρα του έτους για κάθε HRU. Επίσης, υπολογίζεται η δυνητική ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων για κάθε ημέρα του έτους για ένα οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια του κεντροειδούς του πεδίου ορισμού, δηλαδή της λεκάνης απορροής.

Οι ημερήσιες εκτιμήσεις της εκτροπής υπολογίζονται από τη σχέση (Meeus, 1999):

$$E = 1 - [EC \times \cos(jd - 3) \times \text{rad}] \quad (4.1)$$

όπου

- $E$  : η απόκλιση της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου, σε γωνιακές μοίρες
- $EC$  : η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης (περίπου 0.01671), σε rad
- $jd$  : η ημέρα του αριθμού του έτους (το 3 εξαιρείται από τον αριθμό ημέρας η ηλιακή ημέρα του χρόνου ξεκινάει στις 29 Δεκεμβρίου), σε ημέρες
- rad : η ταχύτητα περιστροφής της γης, σε rad ανά ημέρα

Οι ημερήσιες εκτιμήσεις της ηλιακής απόκλισης υπολογίζονται από τη σχέση (Meeus, 1999):

$$DM = 0.006918 - 0.399912 \times \cos(E_{rt}) + 0.070257 \times \sin(E_{rt}) - 0.006758 \times \cos(E_{rt}) + 0.000907 \times \sin(2 \times E_{rt}) - 0.002697 \times \cos(3 \times E_{rt}) + 0.00148 \times \sin(3 \times E_{rt}) \quad (4.2)$$

όπου

- $DM$  : η ηλιακή απόκλιση, σε γωνιακές μοίρες και  $E_{rt} = \text{rad} \times (jd - 1)$



Οι ημερήσιες εκτιμήσεις της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας και οι ώρες ηλιοφάνειας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις τιμές των E και DM και εκτιμήσεις των τιμών της κλίσης, του προσανατολισμού και του γεωγραφικού πλάτους χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό μεθόδων που περιγράφονται στους Frank and Lee (1966) και στον Swift (1976). Η διάρκεια της ηλιοφάνειας υπολογίζεται σε ακτίνια, μετατρέπεται σε ώρες και πολλαπλασιάζεται από την ωριαία ηλιακή σταθερά. Οι ωρικές γωνίες τη στιγμή της ανατολής (sr) και της δύσης (ss) καθώς και η διάρκεια της ηλιοφάνειας (soltab\_sunhrs) για κάθε HRU και για κάθε ημέρα του χρόνου υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$sr_{HRU} = \cos^{-1}[-\tan(hru\_lat_{HRU}) \times \tan(DM_{HRU})] \quad (4.3)$$

$$ss_{HRU} = -1 \times sr_{HRU} \quad (4.4)$$

$$soltab\_sunhrs_{HRU} = 12 \times (ss_{HRU} - sr_{HRU}) \quad (4.5)$$

όπου

$sr_{HRU}$ : η ωρική γωνία της ανατολής στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) μετρούμενη από την ηλιακή μεσημβρία (οι πρωινές τιμές είναι αρνητικές και οι απογευματινές είναι θετικές), σε ακτίνια

$ss_{HRU}$ : η ωρική γωνία της δύσης στην μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) μετρούμενη από την ηλιακή μεσημβρία (οι πρωινές τιμές είναι αρνητικές και οι απογευματινές είναι θετικές), σε ακτίνια

Η δυνητική ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ημέρα του έτους υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$soltab\_postsw_{HRU} = SC \times (c1_{PSR} + c2_{PSR}) \quad (4.6)$$

όπου

SC : είναι η ηλιακή σταθερά (458.4 θερμίδες ανά τετραγωνικό εκατοστό ανά ακτίνιο προτείνεται από τους Frank and Lee (1966))

$$c1_{PSR} = \frac{\sin(DM_{HRU}) \times \sin(hru\_lat_{HRU}) \times (ss_{HRU} - sr_{HRU}) \times 24}{2 \times \pi} \quad (4.7)$$

$$c2_{PSR} = \frac{\cos(DM_{HRU}) \times \cos(hru\_lat_{HRU}) \times [\sin(ss_{HRU}) - \sin(sr_{HRU})] \times 24}{2 \times \pi} \quad (4.8)$$

Η δυνητική ηλιακή ενέργεια για κάθε ημέρα του χρόνου για τη λεκάνη απορροής (soltab\_basinpotsw) υπολογίζεται επίσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.6 – 3.8, μόνο που χρησιμοποιούνται το υψόμετρο και οι χρόνοι ανατολής και δύσης για το κεντροειδές της λεκάνης απορροής.

#### 4.3.4 Δεδομένα χρονοσειρών

Η ενότητα δεδομένων χρονοσειρών (obs module) διαβάζει τις μεταβλητές των χρονοσειρών από το αρχείο δεδομένων (Data File) και τις κάνει διαθέσιμες για είσοδο σε άλλες ενότητες και για έξοδο στα αρχεία στατιστικών των μεταβλητών (Statistics Variable) και κινούμενων απεικονίσεων (Animation). Οι μετεωρολογικές μετρήσεις των κατακρημνισμάτων (precip), της θερμοκρασίας αέρα (tmax και tmin), της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (pan\_evap) και της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (solrad) κατανομονται σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) από άλλες ενότητες. Αν η δυνητική ηλιακή ακτινοβολία δεν καθορίζεται στο αρχείο δεδομένων, τότε εκτιμάται μία τιμή για κάθε ημέρα του χρόνου για κάθε HRU (soltab\_potsw) από την ενότητα ηλιακού πίνακα (soltab module). Οι τύποι των

μετεωρολογικών δεδομένων που είναι είσοδοι στο PRMS εξαρτώνται από τις ενότητες που επιλέγονται για μία συγκεκριμένη προσομοίωση. Για όλες τις ενότητες κατανομής της θερμοκρασίας και των κατακρημνισμάτων πρέπει να περιλαμβάνονται στο αρχείο δεδομένων τα κατακρημνίσματα (precip) και η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία (tmax και tmin αντίστοιχα) για τουλάχιστον έναν μετεωρολογικό σταθμό. Αυτό δεν ισχύει για την ενότητα climate\_hru η οποία διαβάζει προεπεξεργασμένες τιμές για τις παραπάνω μεταβλητές και, έτσι, για τη συγκεκριμένη ενότητα, οι τιμές του αρχείου δεδομένων για τα κατακρημνίσματα, τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία, τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και τη δυνητική ηλιακή ακτινοβολία είναι προαιρετικές. Στο αρχείο δεδομένων μπορούν να περιλαμβάνονται μετρημένα δεδομένα για την απορροή (runoff) και για το ύψος χιονιού (snow) για σύγκριση με τις προσομοιωμένες τιμές απορροής και χιονιού χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο. Οι μονάδες μέτρησης όλων των δεδομένων κατακρημνίσεων και θερμοκρασίας αέρα του αρχείου δεδομένων ορίζονται στο αρχείο παραμέτρων (Parameter File). Στην παράμετρο μονάδες κατακρημνισμάτων (precip\_units) η τιμή 0 δηλώνει ίντσες (in) και η τιμή 1 δηλώνει χιλιοστόμετρα (mm) ενώ στην παράμετρο μονάδες θερμοκρασιών (temp\_units) η τιμή 0 δηλώνει βαθμούς Φαρενάιτ (°F) και η τιμή 1 δηλώνει βαθμούς Κελσίου (°C).

#### 4.3.5 Ενότητες διανομής της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία του αέρα χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς εξάτμισης, διαπνοής, εξάχνωσης και λωσίματος του χιονιού για κάθε HRU. Οι ενότητες διανομής της θερμοκρασίας υπολογίζουν και διανέμουν τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου (°C) και Φαρενάιτ (°F) για κάθε HRU και για κάθε χρονικό βήμα. Το PRMS-IV περιλαμβάνει 3 ενότητες διανομής της θερμοκρασίας, τις temp\_1sta, temp\_laps και temp\_dist2, συν μία ακόμη για συνδεσιμότητα με παλαιότερες εκδόσεις, την temp\_2sta, η οποία δεν περιγράφεται. Επίσης, δύο ενότητες διανομής συνδυασμένου κλίματος, η xyz\_dist και η ide\_dist, οι οποίες θα περιγραφούν αργότερα, προσφέρουν δύο επιπλέον αλγόριθμους κατανομής θερμοκρασίας. Η έβδομη και τελευταία επιλογή είναι να εισαχθούν τιμές τις θερμοκρασίας, οι οποίες έχουν διανεμηθεί από πριν σε κάθε HRU. Η είσοδος αυτή γίνεται με την ενότητα climate\_hru, η οποία επίσης θα περιγραφεί αργότερα. Ο χρήστης θέτει την παράμετρο ελέγχου temp\_module, η οποία έχει οριστεί στο αρχείο ελέγχου, σε ένα από τα ονόματα των 7 ενότητων διανομής θερμοκρασίας. Η καλύτερη επιλογή εξαρτάται από τη μέθοδο διανομής της θερμοκρασίας που αντιπροσωπεύει καλύτερα την εκάστοτε λεκάνη απορροής και από τις τοποθεσίες των διαθέσιμων σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα. Σε κάθε μία από τις ενότητες, η προσαρμοσμένη μέση θερμοκρασία της HRU για κάθε χρονικό βήμα (tavgc) και οι σταθμισμένες στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής μέγιστες, ελάχιστες και μέσες θερμοκρασίες (basin\_tmax, basin\_tmin και basin\_temp) υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$tavgc_{HRU} = \frac{tmaxc_{HRU} + tminc_{HRU}}{2}, \quad (4.9)$$

$$basin\_tmax = \frac{\sum_{i=1}^{nhru} (tmaxc_i \times hru\_area_i)}{basin\_area}, \quad (4.10)$$

$$basin\_tmin = \frac{\sum_{i=1}^{nhru} (tminc_i \times hru\_area_i)}{basin\_area} \text{ και} \quad (4.11)$$

$$\text{basin\_temp} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{nhru}} (\text{tempc}_i \times \text{hru\_area}_i)}{\text{basin\_area}} \quad (4.12)$$

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι 3 ενότητες temp\_1sta, temp\_laps και temp\_dist2 για τη διανομή της θερμοκρασίας.

Η ενότητα temp\_1sta (temp\_1sta module) διανέμει τη θερμοκρασία αέρα σε κάθε HRU με βάση μια μετρημένη τιμή της μέγιστης (tmax) και της ελάχιστης (tmin) θερμοκρασίας. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας μηνιαίες τιμές της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας (tmax\_lapse και tmin\_lapse) και παραμέτρους ρύθμισης της θερμοκρασίας (tmax\_adj και tmin\_adj). Η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα αντιπροσωπεύει την αλλαγή της θερμοκρασίας με τη μεταβολή των μονάδων υψομέτρου κατά 1000. Αυτή η ενότητα χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας από έναν ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης και τα μετρημένα δεδομένα μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε HRU από την παράμετρο hru\_tsta (δείκτης του σταθμού βάσης που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς κατακόρυφης θερμοβαθμίδας). Ο δείκτης tsta είναι ο σταθμός μέτρησης που συνδέεται με την εκάστοτε HRU. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα για κάθε HRU υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$\text{tmaxc}_{\text{HRU}} = \text{tmax}_{\text{tsta}} - \text{tmax\_lapse}_{\text{month}} \times \left( \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_elev}_{\text{tsta}}}{1000} \right) - \text{tmax\_adj}_{\text{HRU}} \quad \text{και} \quad (4.13)$$

$$\text{tminc}_{\text{HRU}} = \text{tmin}_{\text{tsta}} - \text{tmin\_lapse}_{\text{month}} \times \left( \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_elev}_{\text{tsta}}}{1000} \right) - \text{tmin\_adj}_{\text{HRU}} \quad (4.14)$$

όπου

tsta είναι ο αριθμός αναγνώρισης του σταθμού μέτρησης που συνδέεται με την εκάστοτε HRU από την παράμετρο hru\_tsta

Η ενότητα temp\_laps (temps\_laps module) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα από δύο τουλάχιστον σταθμούς μέτρησης με διαφορετικά υψόμετρα για τον υπολογισμό και τη διανομή της θερμοκρασίας αέρα. Σε κάθε HRU εκχωρούνται θερμοκρασίες αέρα σύμφωνα με κατακόρυφες θερμοβαθμίδες οι οποίες υπολογίζονται καθημερινά κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος στην προσομοίωση από ένα διαθέσιμο ζευγάρι σταθμών μέτρησης. Ο σταθμός που είναι πιο αντιπροσωπευτικός για τη θερμοκρασία στην HRU ορίζεται ως σταθμός βάσης και προσδιορίζεται από την παράμετρο hru\_tsta ενώ ο άλλος σταθμός ονομάζεται σταθμός μεσολάβησης και προσδιορίζεται από την παράμετρο hru\_tlaps και χρησιμοποιείται μαζί με το σταθμό βάσης για τον υπολογισμό της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες των HRU υπολογίζονται για κάθε χρονικό βήμα μέσω μίας κατακόρυφης θερμοβαθμίδας από τους δύο συνδεδεμένους σταθμούς σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{tmaxc}_{\text{HRU}} = \text{tmax}_{\text{tsta}} + (\text{tmax}_{\text{tlaps}} - \text{tmax}_{\text{tsta}}) \times \text{elfac}_{\text{HRU}} - \text{tmax\_adj}_{\text{HRU}} \quad \text{και} \quad (4.15)$$

$$\text{tminc}_{\text{HRU}} = \text{tmin}_{\text{tsta}} + (\text{tmin}_{\text{tlaps}} - \text{tmin}_{\text{tsta}}) \times \text{elfac}_{\text{HRU}} - \text{tmin\_adj}_{\text{HRU}} \quad (4.16)$$

όπου

$$\text{elfac}_{\text{HRU}} = \left( \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_elev}_{\text{tsta}}}{\text{tsta\_elev}_{\text{tlaps}} - \text{tsta\_elev}_{\text{tsta}}} \right) \quad (4.17)$$

Η ενότητα temp\_dist2 (temp\_dist2 module) διανέμει τις θερμοκρασίες στις HRUs υπολογίζοντας βάρη βασισμένα στις κατακόρυφες θερμοβαθμίδες και στο αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ του κεντροειδούς της HRU και της περιοχής πολλαπλών σταθμών μέτρησης σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$\text{tmaxc}_{\text{HRU}} = \sum_{\text{tsta}=1}^{\text{ntemp}} [(\text{tmax}_{\text{tsta}} + (\text{basin\_lapse\_max} \times \text{elfac}_{\text{HRU,tsta}} + \text{tmax\_adj}_{\text{HRU}}) \times \text{dist}_{\text{HRU,tsta}})] \quad \text{και} \quad (4.18)$$

$$\text{tminc}_{\text{HRU}} = \sum_{\text{tsta}=1}^{\text{ntemp}} [(\text{tmin}_{\text{tsta}} + (\text{basin\_lapse\_min} \times \text{elfac}_{\text{HRU,tsta}} + \text{tmin\_adj}_{\text{HRU}}) \times \text{dist}_{\text{HRU,tsta}})] \quad (4.19)$$

όπου

ntemp το πλήθος των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας

$$\text{basin\_lapse\_max} = \sum_{i=1}^{\text{ntemp}} \left[ \frac{(\text{tmax}_i - \text{tmax}_{i+1}) \times 1000}{(\text{tsta\_elev}_i - \text{tsta\_elev}_{i+1}) \times \text{ntemp}} \right], \quad (4.20)$$

$$\text{basin\_lapse\_min} = \sum_{i=1}^{\text{ntemp}} \left[ \frac{(\text{tmin}_i - \text{tmin}_{i+1}) \times 1000}{(\text{tsta\_elev}_i - \text{tsta\_elev}_{i+1}) \times \text{ntemp}} \right], \quad (4.21)$$

$$\text{elfac}_{\text{HRU,tsta}} = \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_elev}_{\text{tsta}}}{1000} \quad \text{και} \quad (4.22)$$

$$\text{dist}_{\text{HRU,tsta}} = \left( \frac{1}{\sqrt{(\text{hru\_ylat}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_ylat}_{\text{tsta}})^2 + (\text{hru\_xlong}_{\text{HRU}} - \text{tsta\_xlong}_{\text{tsta}})^2}} \right)^2 \quad (4.23)$$

Το πλήθος των σταθμών μέτρησης μπορεί να είναι ένα υποσύνολο όλων των διαθέσιμων σταθμών με βάση την τιμή της παραμέτρου dist\_max η οποία ορίζει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ της θέσης ενός σταθμού μέτρησης και του κεντροειδούς της εκάστοτε HRU.

#### 4.3.6 Ενότητες διανομής των κατακρημνισμάτων

Οι ενότητες διανομής των κατακρημνισμάτων καθορίζουν τη μορφή τους (βροχή, χιόνι ή μεικτό) και διανέμουν τα κατακρημνίσματα σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) για κάθε χρονικό βήμα. Τα μετρημένα κατακρημνίσματα μπορεί να είναι σε ίντσες (in) ή σε χιλιοστόμετρα (mm) (στην παράμετρο precip\_units η τιμή 0 δηλώνει in και η τιμή 1 δηλώνει mm) αλλά τα αποτελέσματα είναι σε ίντσες. Οι τρεις ενότητες του PRMS-IV για τη διανομή των κατακρημνισμάτων είναι η precip\_1sta, η precip\_laps και η precip\_dist2. Επίσης, οι ενότητες xyz\_dist και ide\_dist παρέχουν δύο επιπλέον αλγορίθμους διανομής των κατακρημνισμάτων αλλά περιγράφονται αργότερα. Η έκτη και τελευταία επιλογή είναι η χρήση της ενότητας climate\_hru (η οποία επίσης θα περιγραφεί αργότερα) για είσοδο των τιμών των κατακρημνισμάτων που έχουν διανεμηθεί προηγουμένως σε κάθε HRU. Ο

χρήστης θέτει την παράμετρο ελέγχου `precip_module`, η οποία έχει ορισθεί στο αρχείο ελέγχου, σε ένα από τα ονόματα των 6 ενότιων διανομής των κατακρημνισμάτων. Η καλύτερη επιλογή εξαρτάται από τη μέθοδο διανομής των κατακρημνισμάτων που αντιπροσωπεύει καλύτερα την εκάστοτε λεκάνη απορροής και από το πλήθος και τις τοποθεσίες των διαθέσιμων σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων. Η μορφή των κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι ή μείγμα των δυο) είναι σημαντική για την προσομοίωση της συσσώρευσης χιονιού, του λιώσιματος του χιονιού, της διήθησης και της απορροής. Η μορφή των κατακρημνισμάτων κάθε ημέρας εκτιμάται από της ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα για κάθε HRU και στη σχέση που αυτές έχουν με τη θερμοκρασία που έχει ορισθεί για κατακρημνίσματα που είναι όλα χιόνι (παράμετρος `tmax_allsnow`) και τη θερμοκρασία που έχει ορισθεί για κατακρημνίσματα που είναι όλα βροχή (παράμετρος `tmax_allrain`) για τον συγκεκριμένο μήνα. Τα κατακρημνίσματα είναι όλα χιόνι σε μια HRU όταν η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι μικρότερη ή ίση από την τιμή της παραμέτρου `tmax_allsnow`. Αντίστοιχα, τα κατακρημνίσματα είναι όλα βροχή σε μία HRU όταν η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι μεγαλύτερη από την τιμή της παραμέτρου `tmax_allsnow` και όταν η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή της παραμέτρου `tmax_allrain` για το συγκεκριμένο μήνα. Όταν η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι ανάμεσα στις τιμές των παραμέτρων `tmax_allsnow` και `tmax_allrain` και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα είναι μικρότερη ή ίση από την τιμή της παραμέτρου `tmax_allsnow`, τότε τα κατακρημνίσματα της HRU προσομοιώνονται ως μείγμα βροχής και χιονιού. Ο λόγος των συνολικών κατακρημνισμάτων που είναι βροχή σε κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$prmx_{HRU} = \left( \frac{tmaxc_{HRU} - tmax\_allsnow}{tmaxc_{HRU} - tminc_{HRU}} \right) \times adjmix\_rain_{month} \quad (4.24)$$

Αν η τιμή του λόγου `prmx` για μία HRU είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα, τότε τα κατακρημνίσματα θεωρούνται πως είναι όλα βροχή.

Σε κάθε μία από τις ενότητες διανομής των κατακρημνισμάτων, τα ημερήσια κατακρημνίσματα, η ημερήσια βροχόπτωση και το ημερήσιο χιόνι για τη λεκάνη απορροής (`basin_ppt`, `basin_rain` και `basin_snow`) υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$basin\_ppt = \frac{\sum_{i=1}^{nhru} (hru\_ppt_i \times hru\_area_i)}{basin\_area} \quad (4.25)$$

$$basin\_rain = \frac{\sum_{i=1}^{nhru} (hru\_rain_i \times hru\_area_i)}{basin\_area} \quad (4.26)$$

και

$$basin\_snow = \frac{\sum_{i=1}^{nhru} (hru\_snow_i \times hru\_area_i)}{basin\_area} \quad (4.27)$$

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι 3 ενότητες `precip_1sta`, `precip_laps` και `precip_dist2` για τη διανομή των κατακρημνισμάτων.

Η ενότητα `precip_1sta` (`precip_module`) διανέμει τα μετρημένα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU για κάθε χρονικό βήμα με βάση μία μετρημένη τιμή των κατακρημνισμάτων και

κάποιες παραμέτρους που ρυθμίζουν την ποσότητα των μεικτών κατακρημνισμάτων (σχέση 3.24), την ποσότητα της βροχής (rain\_adj) και την ποσότητα του χιονιού (snow\_adj). Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του υψομέτρου, της χωρικής μεταβολής, της τοπογραφίας, την τοποθεσία του μετρητή και τις ελλείψεις στην αντίληψη του μετρητή. Αυτή η ενότητα χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα των κατακρημνισμάτων από έναν ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης και τα μετρημένα δεδομένα μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε HRU από την παράμετρο hru\_psta. Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη βροχόπτωση, τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \text{precip}_{\text{psta}} \times \text{rain\_adj}_{\text{HRU,month}} \quad (4.28)$$

όπου

psta είναι ο σταθμός μέτρησης που συνδέεται με την HRU από την παράμετρο hru\_psta

Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη χιόνι ή γεγονός μεικτών κατακρημνισμάτων τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \text{precip}_{\text{psta}} \times \text{snow\_adj}_{\text{HRU,month}} \quad (4.29)$$

Η ενότητα precip\_laps (precip\_laps module) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα από δύο τουλάχιστον σταθμούς μέτρησης με διαφορετικά υψόμετρα για τον υπολογισμό και τη διανομή των κατακρημνισμάτων. Σε κάθε HRU εκχωρούνται κατακρημνίσματα σύμφωνα με βροχοβαθμίδες οι οποίες υπολογίζονται καθημερινά κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος στην προσομοίωση από ένα διαθέσιμο ζευγάρι σταθμών μέτρησης. Ο σταθμός που είναι πιο αντιπροσωπευτικός για τα κατακρημνίσματα στην HRU ορίζεται ως σταθμός βάσης και προσδιορίζεται από την παράμετρο hru\_psta ενώ ο άλλος σταθμός ονομάζεται σταθμός μεσολάβησης και προσδιορίζεται από την παράμετρο hru\_plaps και χρησιμοποιείται μαζί με το σταθμό βάσης για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας. Τα κατακρημνίσματα των HRU υπολογίζονται για κάθε χρονικό βήμα μέσω μίας βροχοβαθμίδας από τους δύο συνδεδεμένους σταθμούς. Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη βροχόπτωση, τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \text{precip}_{\text{psta}} \times \left( 1.0 + \text{padj\_rn}_{\text{psta,month}} \times \left( \frac{\left( \frac{\text{pmn\_mo}_{\text{plaps}} - \text{pmn\_mo}_{\text{psta}}}{\text{psta\_elev}_{\text{plaps}} - \text{psta\_elev}_{\text{psta}}} \right) \times (\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{psta\_elev}_{\text{psta}})}{\text{pmn\_mo}_{\text{psta}}} \right) \right) \quad (4.30)$$

Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη χιόνι, ή περιέχει οποιοδήποτε κλάσμα χιονιού, τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \text{precip}_{\text{psta}} \times \left( 1.0 + \text{padj\_sn}_{\text{psta,month}} \times \left( \frac{\left( \frac{\text{pmn\_mo}_{\text{plaps}} - \text{pmn\_mo}_{\text{psta}}}{\text{psta\_elev}_{\text{plaps}} - \text{psta\_elev}_{\text{psta}}} \right) \times (\text{hru\_elev}_{\text{HRU}} - \text{psta\_elev}_{\text{psta}})}{\text{pmn\_mo}_{\text{psta}}} \right) \right) \quad (4.31)$$

Η ενότητα `precip_dist2` (`precip_dist2` module) διανέμει τα κατακρημνίσματα στις HRUs υπολογίζοντας βάρη βασισμένα στις βροχοβαθμίδες και στο αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ του κεντροειδούς της HRU και της περιοχής πολλαπλών σταθμών μέτρησης. Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη βροχόπτωση, τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \frac{\sum_{\text{psta}=1}^{\text{nrain}} \left( \frac{\text{precip}_{\text{psta}}}{\text{dist}_{\text{HRU,psta}}} \right)}{\sum_{\text{psta}=1}^{\text{nrain}} \text{dist}_{\text{HRU,psta}}} \times \left( \frac{\text{rain\_mon}_{\text{HRU,month}}}{\text{psta\_mon}_{\text{HRU,month}}} \right) \quad (4.32)$$

Αν η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι όλη χιόνι, ή περιέχει οποιοδήποτε κλάσμα χιονιού, τότε τα κατακρημνίσματα σε κάθε HRU υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \frac{\sum_{\text{psta}=1}^{\text{nrain}} \left( \frac{\text{precip}_{\text{psta}}}{\text{dist}_{\text{HRU,psta}}} \right)}{\sum_{\text{psta}=1}^{\text{nrain}} \text{dist}_{\text{HRU,psta}}} \times \left( \frac{\text{snow\_mon}_{\text{HRU,month}}}{\text{psta\_mon}_{\text{HRU,month}}} \right) \quad (4.33)$$

όπου

$$\text{dist}_{\text{HRU,psta}} = \left( \frac{1}{\sqrt{(\text{hru\_y\text{lat}}_{\text{HRU}} - \text{psta\_y\text{lat}}_{\text{psta}})^2 + (\text{hru\_x\text{long}}_{\text{HRU}} - \text{psta\_x\text{long}}_{\text{psta}})^2}} \right)^2 \quad (4.34)$$

Το πλήθος των σταθμών μέτρησης μπορεί να είναι ένα υποσύνολο όλων των διαθέσιμων σταθμών με βάση την τιμή της παραμέτρου `dist_max` η οποία ορίζει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ της θέση ενός σταθμού μέτρησης και του κεντροειδούς της εκάστοτε HRU.

#### 4.3.7 Ενότητες συνδυασμένης χωρικής κατανομής κλίματος

Οι ενότητες `xyz_dist` και `ide_dist` κατανέμουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες θερμοκρασίες και τα κατακρημνίσματα σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU). Όταν κάποια από αυτές τις ενότητες επιλέγεται ως ενότητα κατανομής θερμοκρασίας, πρέπει επίσης να επιλεγεί και ως ενότητα κατανομής των κατακρημνισμάτων. Οι γενικές κατευθυντήριες γραμμές που περιγράφονται στην αρχή των ενότητων κατανομής θερμοκρασίας και κατανομής των κατακρημνισμάτων εφαρμόζονται και σε αυτές τις ενότητες.

Η ενότητα `xyz_dist` (`xyz_dist` module) χρησιμοποιεί μία τρισδιάστατη, πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση βασισμένη στο γεωγραφικό μήκος, στο γεωγραφικό πλάτος και στο υψόμετρο για να κατανείμει δεδομένα θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων από δύο ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης ή από αποτελέσματα κελιών καννάβου των ατμοσφαιρικών μοντέλων. Η

μεθοδολογία αρχικά αναπτύχθηκε για την κατανομή κατακρημνισμάτων και θερμοκρασιών, η οποίες αποδίδονται υπό κλίμακα με στατιστικό τρόπο, από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο σε κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU). Όμως, περαιτέρω έλεγχοι έδειξαν ότι η ενότητα αυτή είναι κατάλληλη και για την κατανομή δεδομένων σταθμών μέτρησης επίσης. Σχέσεις πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης αναπτύσσονται για κάθε εξαρτημένη κλιματική μεταβλητή (κατακρημνίσματα και μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα) χρησιμοποιώντας το γεωγραφικό πλάτος (y), το γεωγραφικό μήκος (x) και το υψόμετρο (z) του σταθμού ή του κελιού του καννάβου, ως ανεξάρτητες μεταβλητές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Οι παράμετροι της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (ppt\_laps για τα κατακρημνίσματα και max\_lapse και min\_lapse (για τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αέρα αντίστοιχα) για τις τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές στην εξίσωση (x, y και z) υπολογίζονται για κάθε μήνα χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές από τους σταθμούς κλίματος που βρίσκονται μέσα ή κοντά στον υδροκρίτη. Η γενική εξίσωση που ακολουθεί περιγράφει ένα επίπεδο στον τρισδιάστατο χώρο με τις παραμέτρους της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ή αλλιώς «κλίσεις» (lapse) να τέμνουν τον άξονα της κλιματικής μεταβλητής (CV) στο  $b_0$ .

$$CV = (\text{lapse}_x \times x_{\text{sta}}) + (\text{lapse}_y \times y_{\text{sta}}) + (\text{lapse}_z \times z_{\text{sta}}) + b_0 \quad (4.35)$$

όπου

$\text{lapse}_x$ ,  $\text{lapse}_y$  και  $\text{lapse}_z$ , είναι ο κατάλληλες τιμές των  $\text{ppt\_lapse}_{\text{άξονας, μήνας}}$ ,  $\text{max\_lapse}_{\text{άξονας, μήνας}}$  και  $\text{min\_lapse}_{\text{άξονας, μήνας}}$  ανάλογα με το ποια κλιματική μεταβλητή υπολογίζεται.

Επιλέγεται η κλιματική μεταβλητή των κατακρημνισμάτων (hru\_ppt) για να διευκρινιστεί πως χρησιμοποιείται η σχέση 4.35. Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη τον υπολογισμό της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας (tmaxc και tminc). Αρχικά, τα μέσα ημερήσια κατακρημνίσματα (ppt\_mean) και η αντίστοιχη μέση θέση (x\_mean, y\_mean και z\_mean) υπολογίζονται από μια σειρά σταθμών που έχουν οριστεί από την παράμετρο psta\_nuse. Όποιος σταθμός δεν έχει μια έγκυρη τιμή για ένα χρονικό βήμα δεν συμπεριλαμβάνεται σε αυτόν τον υπολογισμό. Κατά συνέπεια, κάθε ημέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετική σειρά σταθμών. Αν κανένας σταθμός δεν έχει έγκυρες τιμές για μια συγκεκριμένη ημέρα, τότε χρησιμοποιείται η μέση μηνιαία τιμή (η παράμετρος psta\_month\_ppt). με αυτές τις τιμές, υπολογίζεται το  $b_0$  σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$b_0 = \text{ppt\_mean} - (\text{ppt\_lapse}_{x,\text{month}} \times x_{\text{mean}}) - (\text{ppt\_lapse}_{y,\text{month}} \times y_{\text{mean}}) - (\text{ppt\_lapse}_{z,\text{month}} \times z_{\text{mean}}) \quad (4.36)$$

Στη συνέχεια, η ποσότητα των κατακρημνισμάτων για κάθε HRU μπορεί να υπολογισθεί από την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = (\text{ppt\_lapse}_{x,\text{month}} \times \text{hru\_x}_{\text{HRU}}) + (\text{ppt\_lapse}_{y,\text{month}} \times \text{hru\_y}_{\text{HRU}}) + (\text{ppt\_lapse}_{z,\text{month}} \times \text{hru\_z}_{\text{HRU}}) + b_0 \quad (4.37)$$

Όλες οι εξαρτημένες και οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην παλινδρόμηση μετατρέπονται αφαιρώντας τις μέσες τιμές (παράμετροι ppt\_add, x\_add, y\_add και z\_add) και διαιρώντας στη συνέχεια με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις (παράμετροι ppt\_div, x\_div, y\_div και z\_div). Η μετατροπή αυτή γίνεται για να αφαιρεθούν οι επιδράσεις των μονάδων, του μεγέθους και της ασυνέπειας ως προς τον ορισμό. Η παράμετρος της



πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (prrt\_lapse) πρέπει να καθορισθεί χρησιμοποιώντας αυτές τις κανονικοποιημένες μεταβλητές. Ένα συχνό πρόβλημα με αυτή την προσέγγιση είναι ότι οι ποσότητες των κατακρημνισμάτων τείνουν να αυξάνονται, όσο αυξάνεται το υψόμετρο των HRUs. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγαλύτερα υψόμετρα, μπορεί πάντα να προσομοιώνονται κατακρημνίσματα ανεξάρτητα από το αν μετριούνται στους σταθμούς ή όχι. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, ορίζεται η παράμετρος psta\_freq\_nuse για να υποδεικνύει ένα σύνολο σταθμών που χρησιμοποιείται για να καθοριστεί αν πράγματι υπάρχουν κατακρημνίσματα. Η τιμή της παραμέτρου rain\_code καθορίζει πως αυτή η πληροφορία θα αξιοποιηθεί.

Η ενότητα ide\_dist (ide\_dist module) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα από τρεις ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης για να υπολογίσει και να κατανείμει τα κατακρημνίσματα και τις θερμοκρασίες. Η ενότητα χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό αντίστροφης απόστασης και υψομέτρου (Inverse Distance and Elevation – IDE) για στάθμιση για να παρεμβληθούν τα δεδομένα του σταθμού για τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία σε κάθε HRU. Η μεθοδολογία IDE αναπτύχθηκε για χρήση όταν υπάρχει επαρκής κάλυψη σταθμών στη λεκάνη απορροής. Έτσι, αν υπάρχει σημαντική έλλειψη της λεκάνης χωρίς μετρημένα δεδομένα σταθμού, ίσως είναι καταλληλότερη μία άλλη ενότητα. Η ενότητα ide\_dist καθορίζει τους δύο πλησιέστερους σταθμούς κλίματος με υψόμετρα μεγαλύτερα και μικρότερα από ένα δεδομένο υψόμετρο μιας HRU και παρεμβάλλει γραμμικά τις κλιματικές τιμές (precip\_elev, tmax\_elev και tmin\_elev) για την HRU με βάση δεδομένα από τους δύο σταθμούς. Αυτή η παρεμβολή γίνεται μόνον ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση. Τα δεδομένα του σταθμού ταξινομούνται ως προς το υψόμετρο και υπολογίζεται ένας κινητός μέσος όρος των τριών σταθμών για κάθε δύο σταθμούς. Αν το υψόμετρο της HRU δεν είναι μεταξύ του εύρους των υψομέτρων των σταθμών κλίματος, τότε χρησιμοποιούνται η χαμηλότερη και η υψηλότερη μέση τιμή των τριών σταθμών για να εκτιμηθούν οι τιμές κλίματος. Το σύνολο των σταθμών που χρησιμοποιούνται σε μια προσομοίωση καθορίζεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους psta\_nuse και tsta\_nuse. Οι σταθμοί που έχουν τιμές έξω από το διπλάσιο της τυπικής απόκλισης από τη μέση τιμή για ένα χρονικό βήμα, δεν συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό. Αν τρεις ή λιγότεροι σταθμοί έχουν έγκυρες τιμές, οι τιμές κλίματος θα υπολογιστούν από τις μέσες μηνιαίες τιμές του σταθμού (παράμετροι psta\_month\_prrt για τα κατακρημνίσματα και tsta\_month\_max και tsta\_month\_min για τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία αέρα αντίστοιχα). Για να αποφευχθούν μη ρεαλιστικές τιμές θερμοκρασίας, η κλίση δεν πρέπει να υπερβαίνει την ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα (DALR) (σταθερή μείωση 2.4 °C ανά 1000 m) κατά την προέκταση. Οι κλιματικές τιμές του εκθέτη της απόστασης (dist\_exp) καθορίζονται υπολογίζοντας ένα βάρος που σχετίζει κάθε HRU με κάθε σταθμό (που υποδεικνύεται από τον δείκτη sta) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$w_{HRU,sta} = \left( \frac{1.0}{d_{HRU,sta}} \right)^{dist\_exp} \quad (4.38)$$

όπου

$w_{HRU,sta}$  είναι ο συντελεστής βαρύτητας που συσχετίζει μία HRU με ένα σταθμό  
 $d_{HRU,sta}$  είναι η απόσταση μεταξύ της HRU και του σταθμού

Οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίζονται για σταθμούς κατακρημνισμάτων και για σταθμούς θερμοκρασίας αέρα. Αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου dist\_exp αυξάνει και η επιρροή

των σταθμών που είναι ακόμα μακρύτερα από την HRU. Μόλις υπολογιστούν τα βάρη, η βασισμένη στην απόσταση συνιστώσα των τιμών των κατακρημνισμάτων και της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα (precip\_dist, tmax\_dist, και tmin\_dist) για κάθε HRU υπολογίζονται από της ακόλουθες σχέσεις.

$$\text{precip\_dist}_{\text{HRU}} = \sum_{\text{sta}=1}^{\text{rain\_nsta}} (w_{\text{HRU,sta}} \times \text{precip}_{\text{sta}}) \quad (4.39)$$

$$\text{tmax\_dist}_{\text{HRU}} = \sum_{\text{sta}=1}^{\text{temp\_nsta}} (w_{\text{HRU,sta}} \times \text{tmax}_{\text{sta}}) \quad (4.40)$$

$$\text{tmin\_dist}_{\text{HRU}} = \sum_{\text{sta}=1}^{\text{temp\_nsta}} (w_{\text{HRU,sta}} \times \text{tmin}_{\text{sta}}) \quad (4.41)$$

όπου

rain\_nsta είναι ο αριθμός των σταθμών μέτρησης των κατακρημνισμάτων με την τιμή της παραμέτρου psta\_nuse ίση με 1 και μέγιστη τιμή ίση με τη διάσταση nrain

temp\_nsta είναι ο αριθμός των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα με την τιμή της παραμέτρου tsta\_nuse ίση με 1 και μέγιστη τιμή ίση με τη διάσταση ntemp

Τέλος, οι τιμές των κατακρημνισμάτων και της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα για κάθε HRU υπολογίζονται από τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} = \text{prcp\_wght\_dist}_{\text{month}} \times \text{precip\_dist}_{\text{HRU}} + (1 - \text{prcp\_wght\_dist}_{\text{month}}) \times \text{precip\_elev}_{\text{HRU}} \quad (4.42)$$

$$\text{hru\_tmax}_{\text{HRU}} = \text{temp\_wght\_dist}_{\text{month}} \times \text{tmax\_dist}_{\text{HRU}} + (1 - \text{temp\_wght\_dist}_{\text{month}}) \times \text{tmax\_elev}_{\text{HRU}} \quad \text{και} \quad (4.43)$$

$$\text{hru\_tmin}_{\text{HRU}} = \text{temp\_wght\_dist}_{\text{month}} \times \text{tmin\_dist}_{\text{HRU}} + (1 - \text{temp\_wght\_dist}_{\text{month}}) \times \text{tmin\_elev}_{\text{HRU}} \quad (4.44)$$

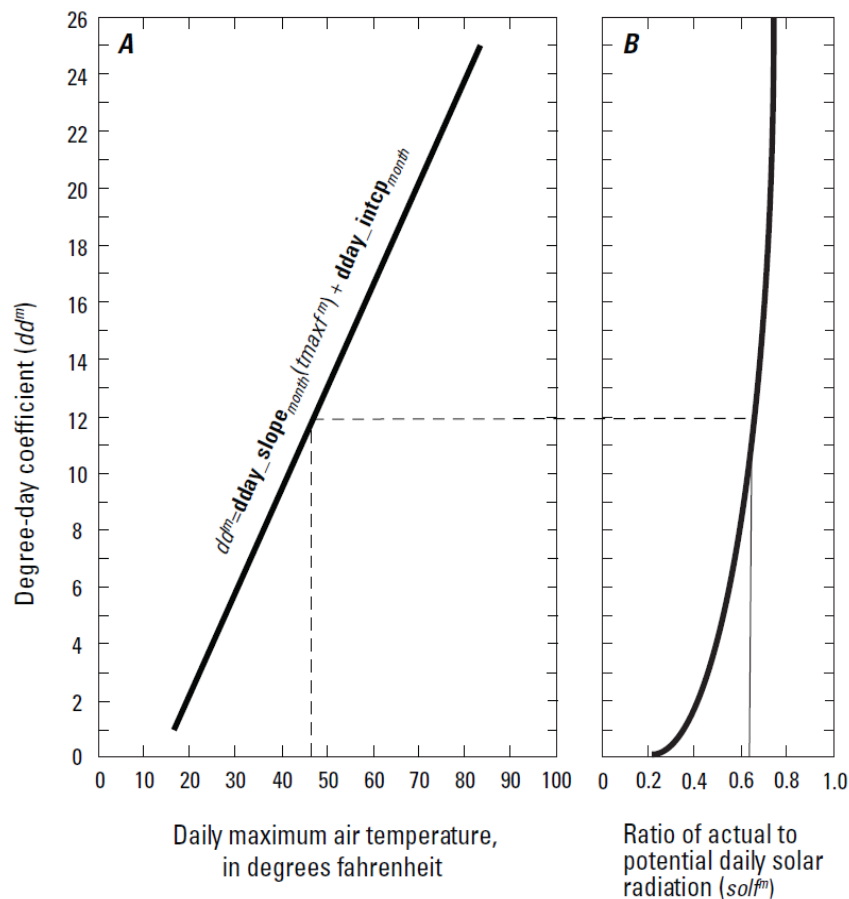
Η ενότητα κλίματος ανά HRU (climate\_hru module) παρέχει μία μέθοδο για να εισάγει χρονοσειρές ιστορικών, σύγχρονων και προβλεπόμενων κλιματικών τιμών, οι οποίες έχουν κατανεμηθεί από πριν σε κάθε HRU. Αυτή η ενότητα διευρύνει την είσοδο των κλιματικών επιδράσεων από τον υπολογισμό και την κατανομή μεθόδων που είναι διαθέσιμες μέσα στο PRMS-IV για να περιλαμβάνει τη χρήση οποιασδήποτε μεθόδου υπολογισμού και κατανομής του κλίματος που αποφασίζει ο χρήστης εκτός από την προσομοίωση του PRMS-IV που έχει μέχρι τώρα περιγραφεί. Η χρήση αυτής της ενότητας παρέχει μία εύχρηστη μέθοδο για την διερεύνηση ενός εύρους πιθανών σεναρίων κλιματικών αλλαγών και την επίδρασή τους στους υδάτινους πόρους. Επτά τιμές κλιματικής επίδρασης μπορούν να προσδιορισθούν: 1) κατακρημνίσματα, 2) μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, 3) δυναμική εξατμισοδιαπνοή, 4) ηλιακή ακτινοβολία, 5) ενεργός διαπνοή, 6) ταχύτητα ανέμου και 7) σχετική υγρασία. Αυτές οι τιμές διαβάζονται από ξεχωριστά αρχεία CBH (Climate by HRU) για κάθε τύπο δεδομένων, ένα αρχείο για τους τύπους 1, 3, 4, 5, 6 και 7 και 2 για τον τύπο 2. Για να χρησιμοποιηθεί ένα αρχείο CBH για ένα τύπο δεδομένων, πρέπει να ορισθούν μία ή περισσότερες από τις παραμέτρους ελέγχου temp\_module, precip\_module, et\_module, solrad\_module ή transp\_module στην ενότητα climate\_hru. Για την είσοδο τιμών υγρασίας και ταχύτητας του ανέμου πρέπει να ορισθούν οι παράμετροι ελέγχου humidity\_cbh\_flag και

windspeed\_cbh\_flag στην τιμή 1 αντίστοιχα. Τα αρχεία CBH της ταχύτητας ανέμου και της σχετικής υγρασίας είναι απαραίτητα για την ενότητα κατανομής της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman-Monteith (παράμετρος ελέγχου et\_module = rotet\_pm) που περιγράφεται παρακάτω. Οι τύποι δεδομένων που δεν ορίζονται χρησιμοποιώντας αρχεία CBH υπολογίζονται και κατανέμονται σε κάθε HRU χρησιμοποιώντας την επιλογή κατανομής κλίματος που έχει επιλεγεί. Για παράδειγμα, αν οι τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δεν είναι είσοδος σε ένα αρχείο CBH, τότε θα υπολογιστούν για κάθε HRU και κάθε χρονικό βήμα από την ενότητα που ορίστηκε για την τιμή της παραμέτρου rotet\_module. Οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών των τύπων δεδομένων μπορεί να είναι είσοδος σε μια προσομοίωση. Έτσι, οι τύποι από 1 ως 7 και μέχρι οκτώ αρχεία CBH μπορούν να είναι είσοδοι σε μια προσομοίωση. Τα αρχεία CBH είναι πανομοιότυπα σε μορφή με το αρχείο δεδομένων (Data File) του PRMS-IV. Όπως και με τα αρχεία δεδομένων, η χρονική περίοδος που καλύπτεται σε κάθε αρχείο CBH μπορεί να είναι διαφορετική, αρκεί η χρονική περίοδος που επιλέγεται για την προσομοίωση να περιλαμβάνεται μέσα σε κάθε αρχείο. Η συμπερίληψη στο αρχείο δεδομένων μαζί με τον ορισμό των τιμών σε ένα αρχείο CBH για έναν ή περισσότερους τύπους δεδομένων μπορεί να είναι χρήσιμη για λόγους σύγκρισης. Για παράδειγμα, αν ένα αρχείο CBH κατακρημνισμάτων χρησιμοποιείται για να εισαχθούν οι κατανεμημένες τιμές κατακρημνισμάτων, τότε οι μετρημένες τιμές των κατακρημνισμάτων μπορούν επίσης να εισαχθούν σε ένα αρχείο δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, ένα αρχείο δεδομένων είναι απαραίτητο για όλες τις προσομοιώσεις, ακόμα και αν όλα τα δεδομένα κλίματος ορίζονται σε αρχεία CBH. Όμως, το αρχείο δεδομένων πρέπει να περιλαμβάνει, κατ' ελάχιστο, τις στήλες που δηλώνουν τη χρονική μεταβολή, δηλαδή το ημερήσιο βήμα προσομοίωσης και τουλάχιστον μία στήλη μετρημένων τιμών. Για παράδειγμα, οι μετρημένες τιμές της απορροής μπορεί να είναι η μόνη στήλη που ορίζεται στο αρχείο δεδομένων. Μία μέθοδος δημιουργίας αρχείων εισόδου CBH είναι μία ή περισσότερες ενότητες κλιματικής κατανομής του PRMS να υπολογίζουν και να εξάγουν τις κλιματικές τιμές της HRU σε ένα αρχείο και, στη συνέχεια, η ενότητα κατανομής κλίματος ανά HRU να διαβάζει τις τιμές από το αρχείο για μία μεταγενέστερη προσομοίωση. Ένα παράδειγμα μίας μεθόδου που καθορίζεται από το χρήστη είναι η κατανομή των κατακρημνισμάτων για ένα πλαίσιο χρονοσειρών σε κάθε HRU με μία επικάλυψη με στάθμιση στην επιφάνεια μεταξύ του πλέγματος χάρτη των κατακρημνισμάτων και του χάρτη των HRUs. Κατά τη χρήση της ενότητας climate\_hru απαγορεύεται να υπάρχουν ελλείψεις ή μη ορθές τιμές και, έτσι, ο χρήστης πρέπει να είναι βέβαιος ότι οι τιμές εισόδου είναι ορθές για όλες τις HRUs και για όλα τα χρονικά βήματα σε κάθε αρχείο CBH. Αν κάποιες εσφαλμένες τιμές είναι είσοδοι στην ενότητα climate\_hru κατά τη διάρκεια της επιλεγμένης χρονικής περιόδου της προσομοίωσης τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα σφάλματος και η εκτέλεση σταματάει. Τέλος, η ενότητα climate\_hru επιτρέπει τη βαθμονόμηση με τιμές κατακρημνισμάτων και θερμοκρασίας αέρα χρησιμοποιώντας πολλαπλασιαστικές και προσθετικές παραμέτρους αντίστοιχα. Οι ρυθμίσεις των μηνιαίων κατακρημνισμάτων εφαρμόζονται ανά HRU ή υπολεκάνη, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους rain\_cbh\_adj και snow\_cbh\_adj ή τις παραμέτρους rain\_sub\_adj και snow\_sub\_adj αντίστοιχα. Η μορφή των κατακρημνισμάτων καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στις υπόλοιπες ενότητες διανομής των κατακρημνισμάτων. Οι χρήστες μπορούν να θέσουν στην παράμετρο adj\_by\_hru την τιμή 0 για ρύθμιση ανά υπολεκάνη ή την τιμή 1 για ρύθμιση ανά HRU. Οι συντελεστές ρύθμισης της θερμοκρασίας εφαρμόζονται ανά HRU (παραμέτροι tmax\_cbh\_adj και tmin\_cbh\_adj).

### 4.3.8 Ενότητες κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ημερήσια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (sward) για κάθε HRU εκτιμάται με μία εκ των τριών διαθέσιμων μεθόδων. Η πρώτη που εντάσσεται στην ενότητα ddsolrad, είναι μια τροποποίηση της μεθόδου βαθμοημερών που περιγράφεται από τους Leaf και Brink (1973). Η δεύτερη, της ενότητας ccsolrad, χρησιμοποιεί (1) μία σχέση μεταξύ της νεφοκάλυψης και του ημερήσιου εύρους στη θερμοκρασία αέρα και (2) μία σχέση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και νεφοκάλυψης. Η τρίτη επιλογή είναι να γίνει εισαγωγή των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν καταταξιωθεί από πριν σε κάθε HRU χρησιμοποιώντας την ενότητα climate\_hru που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ακολουθεί η περιγραφή των δύο πρώτων ενότητων.

Η ενότητα ddsolrad (ddsolrad module) υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων με μία τροποποιημένη μέθοδο βαθμοημερών. Είναι περισσότερο εφαρμόσιμη σε περιοχές που επικρατεί κυρίως καθαρός ουρανός τις ημέρες που δεν υπάρχουν κατακρημνίσματα. Η μέθοδος βαθμοημερών παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί και το οποίο περιλαμβάνει δύο διαφορετικά συστήματα αξόνων.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα σχέσης εκτιμημένης ηλιακής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων και μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα (dd: ο συντελεστής βαθμοημερών, solf: ο λόγος της πραγματικής προς τη δυνητική ακτινοβολία για οριζόντιες επιφάνειες, ο εκθέτης m αναφέρεται σε μηνιαίες τιμές) (Πηγή: Markstrom et al.,2015)

Στο προηγούμενο σχήμα εισάγεται μία μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία στον άξονα x του τμήματος A και τέμνει την ανάλογη μηνιαία ευθεία (παράμετροι dday\_slope και dday\_incp). Αυτές οι ευθείες εκφράζουν τη σχέση μεταξύ της μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα και του συντελεστή βαθμοημερών (dd). Από αυτό το σημείο τομής, με οριζόντια μεταφορά στην

καμπύλη του τμήματος B και προβολή στον δικό του άξονα x, μπορεί να εξαχθεί ο λόγος της πραγματικής προς τη δυνητική ακτινοβολία για μια οριζόντια επιφάνεια (solf). Στη συνέχεια, η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (swrad) για κάθε HRU(sward) υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$swrad_{HRU} = \frac{solf_{HRU} \times soltab\_potsw_{HRU}}{\cos(\arctan(hru\_slope_{HRU}))} \quad (4.45)$$

όπου

$soltab\_potw_{SHRU}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 3.6

Ο λόγος solf αναπτύχθηκε για ημέρες χωρίς κατακρημνίσματα και άρα η υπολογισμένη τιμή της swrad από τη σχέση 3.45 είναι για ξηρές ημέρες. Για ημέρες με κατακρημνίσματα μεγαλύτερα από τη μηνιαία παράμετρο ppt\_rad\_adj, η τιμή της swrad υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$swrad_{HRU} = swrad_{HRU} \times rad\_adj \quad (4.46)$$

Όπου

rad\_adj είναι radj\_sprpt για καλοκαιρινές ημέρες και radj\_wprpt για χειμερινές ημέρες

Οι μηνιαίες τιμές των παραμέτρων dday\_slope και dday\_intcp μπορούν να εκτιμηθούν από ιστορικά δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Οι τιμές των παραμέτρων radj\_sprpt και radj\_wprpt μπορούν να εκτιμηθούν συγκρίνοντας τις ιστορικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε ημέρες με κατακρημνίσματα με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε ημέρες χωρίς κατακρημνίσματα για τις καλοκαιρινές και τις χειμερινές ημέρες αντίστοιχα.

Η ενότητα ccsolrad (ccsolrad module) υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε HRU χρησιμοποιώντας μία σχέση μεταξύ της κάλυψης του ουρανού από σύννεφα και της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας αέρα και μία σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και της κάλυψης του ουρανού από σύννεφα. Αυτή η διαδικασία είναι εφαρμόσιμη σε πιο υγρές περιοχές με εκτεταμένες περιόδους νεφοκάλυψης με και χωρίς κατακρημνίσματα. Ο καθαρός ουρανός σε ημερήσια βάση (sky) υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$sky = 1 - ccov\_slope_{month} \times (solrad\_tmax - solrad\_tmin) + ccov\_intcp_{month} \quad (4.47)$$

Με αυτή, η ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια (orad) μπορεί να εκτιμηθεί από την επόμενη σχέση.

$$orad = MAX\left[ \left( crad\_coef + (1 - crad\_coef) \times (sky)^{crad\_exp} \right), radmax \right] \times soltab\_basinpotsw \quad (4.48)$$

όπου

$soltab\_basinpotsw$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση 3.6

Τελικά, η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (swrad) υπολογίζεται ρυθμίζοντας την κλίση της HRU σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$swrad_{HRU} = \frac{soltab\_potsw_{HRU} \times orad}{soltab\_basinpotsw \times \cos(\arctan(hru\_slope_{HRU}))} \quad (4.49)$$

Για ημέρες με κατακρημνίσματα, η swrad ρυθμίζεται από τη μηνιαία παράμετρο ppt\_rad\_adj, σύμφωνα με τη σχέση 4.46.

### 4.3.9 Ενότητες περιόδου διαπνοής

Η περίοδος ενεργού διαπνοής καθορίζεται για κάθε HRU με μία μέθοδο που ορίζεται από το χρήστη από τρεις διαθέσιμες. Η πρώτη, με τις ενότητες `transp_frost` και `frost_date`, χρησιμοποιεί την προσέγγιση του μαύρου παγετού ή παγετού θανάτου (χαμηλές θερμοκρασίες που σκοτώνουν σχεδόν όλα τα είδη καλλιεργειών) (Christiansen et al, 2011). Η δεύτερη, η ενότητα `transp_tindex`, χρησιμοποιεί μία προσέγγιση δείκτη θερμοκρασίας. Η τρίτη επιλογή είναι να γίνει εισαγωγή τιμών διαπνοής που έχουν ήδη καταναμηθεί σε κάθε HRU με την ενότητα `climate_hru` που έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Η πρώτη επιλογή είναι η χρήση της ενότητας `transp_frost` (`transp_frost module`) για τον καθορισμό της περιόδου της ενεργού διαπνοής, ή αλλιώς της διάρκειας της καλλιεργητικής περιόδου, η οποία χρησιμοποιεί την προσέγγιση του παγετού θανάτου. Η διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για κάθε HRU μπορεί να οριστεί ως η χρονική διάρκεια μεταξύ των τελευταίων και των πρώτων παγωμένων θερμοκρασιών αέρα (παράμετροι `spring_frost` και `fall_frost` αντίστοιχα). Η ενότητα `frost_date` (`frost_date module`) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των παραμέτρων `spring_frost` και `fall_frost` και για να τις εγγράψει στο αρχείο παραμέτρων “`frost_date.param`”. Αυτή η ενότητα ενεργοποιείται θέτοντας την παράμετρο ελέγχου `model_mode` στην τιμή `FROST`

Η δεύτερη επιλογή είναι η χρήση της ενότητας `transp_tindex` (`transp_tindex module`) για τον καθορισμό της περιόδου της ενεργού διαπνοής, η οποία χρησιμοποιεί μία προσέγγιση δείκτη θερμοκρασίας. Στην ουσία υπολογίζει ένα δείκτη θερμοκρασίας που είναι το σωρευτικό άθροισμα των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών για κάθε HRU μόλις η προσομοίωση με το μοντέλο φτάσει στον αρχικό μήνα της διαπνοής (παράμετρος `transp_beg`). Η περίοδος της ενεργού διαπνοής για κάθε HRU ξεκινάει όταν ο δείκτης θερμοκρασίας φτάσει ένα κατώφλι (παράμετρος `transp_tmax`). Η περίοδος της διαπνοής για κάθε HRU τερματίζεται όταν η προσομοίωση με το μοντέλο φτάσει στον μήνα που ορίζεται από την παράμετρο `transp_end`.

### 4.3.10 Ενότητες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Στο μοντέλο PRMS υπάρχουν επτά διαθέσιμες επιλογές, από τις οποίες μπορεί να επιλέξει ο χρήστης για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU). Η επιλογή μίας συγκεκριμένης ενότητας εξαρτάται από τη διαθέσιμη πληροφορία του μελετητή. Οι λιγότερο πολύπλοκες ενότητες απαιτούν πληροφορία μετρημένης θερμοκρασίας αέρα, ενώ οι περισσότερο πολύπλοκες ενότητες απαιτούν επιπλέον μετρημένη ηλιακή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων, ατμοσφαιρική πίεση, σχετική υγρασία και ταχύτητα ανέμου. Επίσης υπάρχουν δύο ενότητες που επιτρέπουν την άμεση είσοδο δεδομένων μετρημένης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στο PRMS-IV.

Η πρώτη επιλογή (ενότητα `potet_jh`) χρησιμοποιεί την τροποποιημένη μέθοδο των Jensen και Haise (Jensen και Haise 1963, Jensen et al, 1969). Η δεύτερη επιλογή (ενότητα `potet_hamon`) χρησιμοποιεί την εμπειρική μέθοδο του Hamon (1961). Η τρίτη επιλογή (ενότητα `potet_hs`) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Hargreaves και Samani (1985). Η τέταρτη επιλογή (ενότητα `potet_pt`) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Priestley και Taylor (1972). Η πέμπτη επιλογή (ενότητα `potet_pm`) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Penman και Monteith (Penman, 1948, Monteith, 1965). Η έκτη επιλογή (ενότητα `potet_pan`) χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα εξάτμισης από έναν ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης και αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε HRU. Η έβδομη και τελευταία επιλογή είναι η χρήση της ενότητας `climate_hru`, η οποία έχει περιγραφεί προηγουμένως, για την εισαγωγή δεδομένων δυνητικής εξατμισοδιαπνοής τα οποία έχουν διανεμηθεί σε κάθε HRU από πριν. Ακολουθεί η περιγραφή των έξι πρώτων ενότητων.

Η ενότητα potet\_jh (potet\_jh module) χρησιμοποιεί την τροποποιημένη μέθοδο των Jensen και Haise για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για κάθε HRU. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως μία συνάρτηση της θερμοκρασίας αέρα, της ηλιακής ακτινοβολίας και δύο παραμέτρων (jh\_coef και jh\_coef\_hru), οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας την τοπική θερμοκρασία αέρα, το υψόμετρο και την πίεση κορεσμένων υδρατμών. Για κάθε HRU, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση

$$\text{potet}_{\text{HRU}} = \text{jh\_coef}_{\text{month}} \times (\text{tavgc}_{\text{HRU}} - \text{jh\_coef\_hru}_{\text{HRU}}) \times \frac{\text{swrad}_{\text{HRU}}}{2.54 \times \lambda_{\text{HRU}}} \quad \text{και} \quad (4.50)$$

$$\lambda_{\text{HRU}} = 597.3 - (0.5653 \times \text{tavgc}_{\text{HRU}}) \quad (4.51)$$

όπου

$\lambda_{\text{HRU}}$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης σε κάθε HRU, σε  $4.182 \text{ J/g}$

Η παράμετρος της θερμοκρασίας αέρα (παράμετρος jh\_coef\_hru) που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με αυτή τη μέθοδο μπορεί να εκτιμηθεί για κάθε HRU σύμφωνα με την σχέση

$$\text{jh\_coef\_hru}_{\text{HRU}} = 27.5 - \left[ 0.25 \times (\rho_{\text{high\_temp}} - \rho_{\text{low\_temp}}) \right] - \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}}}{1000} \quad (4.52)$$

όπου

$\rho_{\text{high\_temp}}$  είναι η πίεση κορεσμένων υδρατμών, σε  $10^2 \text{ Pa}$ , για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα για το θερμότερο μήνα του χρόνου και

$\rho_{\text{low\_temp}}$  είναι η πίεση κορεσμένων υδρατμών, σε  $10^2 \text{ Pa}$ , για τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία αέρα για το θερμότερο μήνα του χρόνου

Για μία πρόχειρη εκτίμηση, θεωρείται ότι η  $\rho_{\text{low\_temp}}$  είναι  $1002 \text{ Pa}$  και η  $\rho_{\text{high\_temp}}$  είναι  $3167 \text{ Pa}$ . Έτσι, η σχέση 3.52 απλοποιείται στην επόμενη σχέση.

$$\text{jh\_coef\_hru}_{\text{HRU}} = 22 - \frac{\text{hru\_elev}_{\text{HRU}}}{1000} \quad (4.53)$$

Η ενότητα potet\_hamon (potet\_hamon module) χρησιμοποιεί την εμπειρική μέθοδο του Hamon στην οποία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως μία συνάρτηση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα και των πιθανών ωρών ηλιοφάνειας, σύμφωνα με την σχέση

$$\text{potet}_{\text{HRU}} = \text{hamon\_coef}_{\text{HRU}} \times \left( \frac{\text{soltab\_sunhrs}_{\text{HRU}}}{12} \right)^2 \times \rho_{\text{HRU}} \quad \text{και} \quad (4.54)$$

$$\rho_{\text{HRU}} = 216.7 \times \frac{6.108 \times e^{\left( \frac{17.26939 \times \text{tavgc}_{\text{HRU}}}{\text{tavgc}_{\text{HRU}} + 237.3} \right)}}{\text{tavgc}_{\text{HRU}} + 237.3} \quad (4.55)$$

όπου

$\rho_{\text{HRU}}$  είναι η πυκνότητα κορεσμένων υδρατμών (ή απόλυτη υγρασία), σε  $\text{g/m}^2$  και

$\text{soltab\_sunhrs}_{\text{HRU}}$  είναι ο αριθμός των ωρών μεταξύ ανατολής και δύσης (σχέση 4.5)

Η ενότητα potet\_hs (potet\_hs module) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Hargreaves και Samani στην οποία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως συνάρτηση της ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{potet}_{\text{HRU}} = \text{hs\_krs}_{\text{HRU,month}} \times \text{swrad}_{\text{HRU}} \times \sqrt{\text{tmaxc}_{\text{HRU}} - \text{tminc}_{\text{HRU}}} \times (\text{tavgc}_{\text{HRU}} + 17.8) \quad (4.56)$$

Η ενότητα potet\_pt (potet\_pt module) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Priestley και Taylor στην οποία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως συνάρτηση της ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα, της ατμοσφαιρικής πίεσης και της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο ψυχομετρικός συντελεστής (psycnst) για κάθε HRU, σε kPa/°C, υπολογίζεται από την σχέση

$$\text{psycnst}_{\text{HRU}} = 1.6286 \times \frac{101.3 - (0.003215 \times \text{hru\_elev}_{\text{HRU}})}{\lambda_{\text{HRU}}} \quad (4.57)$$

όπου

$\lambda_{\text{HRU}}$  είναι η λαθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης σε κάθε HRU, σε 4.182×J/g  
 $\text{hru\_elev}_{\text{HRU}}$  είναι το υψόμετρο σε 0.3048·m

Η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμένων υδρατμών προς τη θερμοκρασία αέρα ,για κάθε HRU, σε kPa/°C, υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{vp\_slope}_{\text{HRU}} = \frac{4098 \times \left( 0.6108e^{\frac{17.26939 \times \text{tavgc}_{\text{HRU}}}{\text{tavgc}_{\text{HRU}} + 237.3}} \right)}{(\text{tavgc}_{\text{HRU}} + 237.3)^2} \quad (4.58)$$

Η πυκνότητα ροής της θερμότητας στο έδαφος για κάθε HRU, σε MJ/m<sup>2</sup>·d, υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση

$$G_{\text{HRU}} = -4.2 \times (\text{tavgc}_{\text{HRU}}^{m-1} \times \text{tavgc}_{\text{HRU}}) \quad (4.59)$$

Τέλος, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε HRU υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση

$$\text{potet}_{\text{HRU}} = \text{pt\_alpha}_{\text{HRU,month}} \times \left( \frac{1}{\lambda_{\text{HRU}}} \right) \times \left( \frac{\text{vp\_slope}_{\text{HRU}}}{\text{vp\_slope}_{\text{HRU}} + \text{psycnst}_{\text{HRU}}} \right) \times \left( \frac{\text{swrad}_{\text{HRU}}}{23.88} - G_{\text{HRU}} \right) \quad (4.60)$$

όπου

23.88 μετατρέπει τις μονάδες Langleys ανά ημέρα (Ly/d) σε MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>

Η ενότητα potet\_pm (potet\_pm module) χρησιμοποιεί την μέθοδο των Penman και Monteith στην οποία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως συνάρτηση της ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία στο σημείο δρόσου (tempc\_dewpt), σε °C, υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{tempc\_dewpt}_{\text{HRU}} = \frac{237.3}{\left[ \frac{1}{\left( \frac{\ln\left(\frac{\text{humidity\_hru\_HRU}}{100}\right)}{17.26939} \right) + \left( \frac{\text{tavgc}_{\text{HRU}}}{237.3} + \text{tavgc}_{\text{HRU}} \right)} \right]^{-1}} \quad (4.61)$$

όπου



humidity\_hru<sub>HRU</sub> είναι η σχετική υγρασία, σε δεκαδικό κλάσμα, που εισάγεται σε ένα αρχείο CBH

Η πραγματική πίεση των υδρατμών (vp\_actual), σε kPa, υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την σχέση

$$vp\_actual_{HRU} = 0.6108e^{\frac{tempc\_dewpt_{HRU} \times 17.26939}{tempc\_dewpt_{HRU} + 237.3}} \quad (4.62)$$

Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών (vp\_sat), σε kPa, υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την σχέση

$$vp\_sat_{HRU} = \frac{0.6108 \times \left( e^{\frac{tmaxc_{HRU} \times 17.26939}{tmaxc_{HRU} + 237.3}} - e^{\frac{tminc_{HRU} \times 17.26939}{tminc_{HRU} + 237.3}} \right)}{2} \quad (4.63)$$

Το έλλειμμα πίεσης υδρατμών (vp\_deficit), σε kPa, υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την σχέση

$$vp\_deficit_{HRU} = vp\_sat_{HRU} - vp\_actual_{HRU} \quad (4.64)$$

Η καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων είναι η διαφορά μεταξύ της εξερχόμενης και της εισερχόμενης ακτινοβολίας μακρών κυμάτων και υπολογίζεται για κάθε HRU, σε MJ/m<sup>2</sup>·d, σύμφωνα με την σχέση

$$lwrad\_net_{HRU} = (4.903 \times 10^{-9}) \times (tavgc_{HRU} + 273.16) \times (0.34 - 0.14 \sqrt{vp\_actual_{HRU}}) \times \left( 1.35 \times \frac{swrad_{HRU}}{soltab\_potsw_{HRU}} - 0.35 \right) \quad (4.65)$$

όπου

soltab\_potsw<sub>HRU</sub> είναι η δυνητική ακτινοβολία για μία οριζόντια επιφάνεια (σχέση 4.6)

Τέλος, στην επόμενη σχέση παρουσιάζεται η εξίσωση Penman-Monteith η οποία επιλύεται για κάθε HRU σε ημερήσιο βήμα.

$$potet_{HRU} = \frac{0.408 \times vp\_slope_{HRU} \times \left( \frac{swrad_{HRU}}{23.88} - G_{HRU} \right)}{vp\_slope_{HRU} + (\gamma_{HRU} \times (1 + pm\_d\_coef_{HRU,month} \times wind\_speed_{HRU}))} + \frac{\gamma_{HRU} \times \left( \frac{pm\_n\_coef_{HRU,month}}{tavgc_{HRU} + 273.16} \right) \times wind\_speed_{HRU} \times vp\_deficit_{HRU}}{vp\_slope_{HRU} + (\gamma_{HRU} \times (1 + pm\_d\_coef_{HRU,month} \times wind\_speed_{HRU}))} \quad (4.66)$$

όπου

G<sub>HRU</sub> είναι η πυκνότητα ροής της θερμότητας στο έδαφος για κάθε HRU, σε MJ/m<sup>2</sup>·d (σχέση 4.59)

Η ενότητα potet\_pan (potet\_pan module) χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα εξάτμισης από έναν ή περισσότερους σταθμούς μέτρησης. Ο σταθμός που συνδέεται με κάθε HRU ορίζεται από την παράμετρο hru\_pansta. Η ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από την μετρημένη εξάτμιση και ένα μηνιαίο συντελεστή σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{potet}_{\text{HRU}} = \text{epan\_coef}_{\text{month}} \times \text{pan\_evap}_{\text{hru\_pansta}} \quad (4.67)$$

#### 4.3.11 Συγκράτηση από το φύλλωμα

Η ενότητα *intcp* (*intcp module*) υπολογίζει την συγκράτηση των κατακρημνισμάτων από το φύλλωμα (*hru\_intcp\_stor*) και την καθαρή κατακρήμνιση (*net\_ppt*), για κάθε HRU, ως συνάρτηση της πυκνότητας της φυτοκάλυψης και του αποθέματος σε κάθε HRU.

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (*transp\_on* = 1), η πυκνότητα της φυτοκάλυψης λαμβάνει την τιμή της παραμέτρου *covden\_sum*, ενώ, κατά τη διάρκεια του χειμώνα (*transp\_on* = 0), η πυκνότητα της φυτοκάλυψης λαμβάνει την τιμή της παραμέτρου *covden\_win*. Ομοίως, η χωρητικότητα αποθήκευσης της βροχής στο φύλλωμα διαφέρει μεταξύ του καλοκαιριού (τιμή της παραμέτρου *srain\_intcp*) και του χειμώνα (τιμή της παραμέτρου *wrain\_intcp*). Η χωρητικότητα αποθέματος του χιονιού στο φύλλωμα (πaráμετρος *snow\_intcp*) έχει μοναδική τιμή γιατί η μεγάλη ποσότητα του χιονιού πέφτει κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η ικανότητα της συγκράτησης και της εξάχνωσης του χιονιού πάνω από το έδαφος είναι λειτουργία του τύπου φυτοκάλυψης. Τα υδάτινα σώματα (πaráμετροι *con\_type* = 0 και *hru\_type* = 2) δεν μπορούν να αποθηκεύσουν βροχή και χιόνι, τα χόρτα (*con\_type* = 1) μπορούν να συγκρατήσουν τη βροχή αλλά όχι το χιόνι, γιατί θάβονται κάτω από αυτό και οι θάμνοι και τα δέντρα (*con\_type* = 2 και 3 αντίστοιχα) μπορούν να συγκρατήσουν και τη βροχή και το χιόνι.

Το τέχνασμα των δύο ειδών φυλλώματος (καλοκαίρι και χειμώνα) γίνεται ως μια ρύθμιση για να μετρηθεί η μεταβαλλόμενη πυκνότητα του φυλλώματος την πρώτη ημέρα του χειμώνα και την πρώτη ημέρα του καλοκαιριού. Το αποτέλεσμα είναι ότι το αποθηκευμένο νερό στο καλοκαιρινό φύλλωμα ρέει ενδιάμεσα με βάση τη διαφορά μεταξύ της καλοκαιρινής και της χειμερινής πυκνότητας φυλλώματος με το υπόλοιπο να απομένει στο φύλλωμα την πρώτη ημέρα του χειμώνα. Ομοίως, το ύψος του νερού την τελευταία ημέρα του χειμώνα θα ρυθμιστεί με βάση τη διαφορά μεταξύ της χειμερινής και της καλοκαιρινής πυκνότητας φυλλώματος την πρώτη ημέρα του καλοκαιριού, το οποίο τυπικά μειώνεται ως αποτέλεσμα της διάδοσης του συγκεκριμένου και πεπερασμένου όγκου σε μία μεγαλύτερη επιφάνεια φυλλώματος και, για αυτό, η πυκνότητα φυλλώματος το καλοκαίρι είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα φυλλώματος το χειμώνα. Σε όλες της ημέρες εκτός από την πρώτη ημέρα του χειμώνα, η συγκρατούμενη βροχή θεωρείται ότι εξατμίζεται με αναλογία επιφάνειας ελεύθερου νερού. Το συγκρατούμενο χιόνι θεωρείται ότι εξαχνώνεται με μία αναλογία η οποία εκφράζεται ως δεκαδικό κλάσμα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (πaráμετρος *potet\_sublim*).

Τα κατακρημνίσματα που εξέρχονται από τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης του φυλλώματος θα γίνει διαπερνώντα. Η διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης (*Avail-CanSto*) υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση

$$\begin{aligned} \text{AvailCanSto}_{\text{HRU}} &= (\text{srain\_intcp}_{\text{HRU}} - \text{intcp\_stor}_{\text{HRU}}) \\ &\times \text{hru\_area}_{\text{HRU}} \times \text{covden\_sum}_{\text{HRU}} \end{aligned} \quad (4.68)$$

Η βροχή που διαπερνάει το φύλλωμα το καλοκαίρι (*Ptf*) για κάθε HRU υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις.

όταν

$$\text{hru\_ppt}_{\text{HRU}} > \frac{\text{AvailCanSto}_{\text{HRU}}}{\text{hru\_area}_{\text{HRU}} \times \text{covden\_sum}_{\text{HRU}}}$$

τότε

$$P_{tf\_HRU} = hru\_ppt_{HRU} - \frac{AvailCanSto_{HRU}}{hru\_area_{HRU} \times covden\_sum_{HRU}} \quad (4.69)$$

αλλιώς

$$P_{tf\_HRU} = 0.0 \quad (4.70)$$

όπου

$AvailCanSto_{HRU}$  είναι το διαθέσιμο απόθεμα στο φύλλωμα της HRU, σε  $102.790153 \text{ m}^2$  και

$P_{tf\_HRU}$  είναι η κατακρήμνιση που διαπερνάει στην HRU, σε  $2.54 \text{ cm}$

Τα κατακρημνίσματα που φτάνουν στο έδαφος κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφέρονται ως καθαρά κατακρημνίσματα ( $net\_ppt$ ) και είναι το άθροισμά των κατακρημνισμάτων που διαπερνούν και των κατακρημνισμάτων στην επιφάνεια της HRU που δεν καλύπτεται από φυτά και υπολογίζονται για κάθε HRU (το καλοκαίρι) σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$net\_ppt_{HRU} = hru\_ppt_{HRU} \times (1.0 - covden\_sum_{HRU}) + (P_{tf\_HRU} \times covden\_sum_{HRU}) \quad (4.71)$$

#### 4.3.12 Χιόνι

Η ενότητα snowcomp (snowcomp module) καλείται πάντα από το PRMS-IV και δεν χρειάζεται να ορισθεί στο αρχείο ελέγχου (Control File).

*Γενικά*

Το PRMS προσομοιώνει την εισαγωγή, τη συσσώρευση και την εξάντληση του στρώματος χιονιού σε κάθε HRU. Η δυναμική του στρώματος χιονιού προσομοιώνεται μέσα από εκτιμήσεις των υδατικών και ενεργειακών ισοζυγίων. Αυτά τα ισοζύγια διατηρούν τη μάζα και την ενέργεια έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ των εισροών και των εκροών να είναι ίση με την μεταβολή στο απόθεμα του χιονιού.

Η εισαγωγή του νερού στην ενότητα snowcomp περιλαμβάνει τη μορφή και την καθαρή ποσότητα κατακρημνισμάτων που φτάνουν στο στρώμα χιονιού, έτσι όπως αυτές υπολογίζονται από τις ενότητες διανομής των κατακρημνισμάτων και της συγκράτησης από το φύλλωμα. Οι έξοδοι της ενότητας snowcomp είναι το ισοδύναμο απόθεμα νερό στο στρώμα χιονιού ( $pkwater\_equiv$ ), το λιώσιμο του χιονιού ( $snowmelt$ ) και η εξάχνωση ( $snow\_evap$ ). Το λιωμένο νερό γίνεται είσοδος στις ενότητες επιφανειακής απορροής και ζώνης εδάφους ( $srunoff\_carea$ ,  $srunoff$  και  $soilzone$  αντίστοιχα) οι οποίες περιγράφονται παρακάτω. Η εξάχνωση είναι μέρος της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για κάθε HRU ( $hru\_actet$ ).

Το απόθεμα μέσα στο στρώμα χιονιού παρακολουθείται σε δύο καταστάσεις: στον πάγο (στερεή) και στο ελεύθερο νερό (υγρή). Η ποσότητα ελεύθερου νερού στο στρώμα χιονιού καθορίζεται από τους κύκλους ψύξης - απόψυξης του ενεργειακού ισοζυγίου και από τη φυσική χωρητικότητα του χώρου μεταξύ των ξεχωριστών κρυστάλλων πάγου στο στρώμα χιονιού που κρατούν το ελεύθερο νερό. Το συνολικό απόθεμα νερού στο στρώμα χιονιού εκφράζεται σε ισοδύναμο νερό από χιόνι, το οποίο είναι ο όγκος του νερού που θα προέκυπτε από το λιώσιμο όλου του πάγου σε υγρή μορφή, και δεν περιλαμβάνει το χώρο του αέρα.

Η ενέργεια μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ του στρώματος χιονιού και της ατμόσφαιρας αμφίδρομα μέσω της ακτινοβολίας και της μετάδοσης θερμότητας ή μεταγωγής. Ένα γεγονός κατακρήμνισης που συμβαίνει σε μία θερμοκρασία διαφορετική από την θερμοκρασία

παγετού θα επηρεάσει επίσης το ενεργειακό απόθεμα του στρώματος χιονιού. Η ενεργειακή κατάσταση αναφοράς για τα αποθέματα χιονιού, κατά την προσομοίωση από την ενότητα snowcomp, είναι το σημείο που παγώνει το νερό, η αλλιώς ένα εντελώς παγωμένο ισόθερμο απόθεμα χιονιού στους 0 °C. Όταν το απόθεμα χιονιού έχει ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή την κατάσταση, ένα τμήμα του πάγου θα λιώσει και θα παραχθεί ένας όγκος ελεύθερου νερού με βάση τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης του νερού. Αν ο όγκος του ελεύθερου νερού υπερβεί το χώρο των πόρων του αποθέματος χιονιού, τότε το λιωμένο χιόνι φεύγει από το απόθεμα χιονιού και αποτελεί έξοδο νερού και λανθάνουσας ενέργειας από το απόθεμα. Ανεξάρτητα από την ποσότητα της ενέργειας που εισέρχεται στο απόθεμα χιονιού, η θερμοκρασία δεν θα υπερβεί ποτέ τους 0 °C. Όταν από το απόθεμα χιονιού λείπει αρκετή ενέργεια για να είναι αυτό ισόθερμο στους 0 °C, όλο το νερό θα είναι παγωμένο και η θερμοκρασία του αποθέματος θα πέσει κάτω από τους 0 °C. Αυτή η έλλειψη ενέργειας λογαριάζεται ως ένα έλλειμμα θερμότητας, ή ως η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για να έρθει το απόθεμα χιονιού πίσω στην ισόθερμη κατάσταση των 0 °C. Το έλλειμμα θερμότητας και η θερμοκρασία σχετίζονται από τη συγκεκριμένη θερμότητα του πάγου και του ισοδύναμου χιονόνερο του αποθέματος χιονιού.

Άλλα δομικά χαρακτηριστικά που προσομοιώνονται είναι η λευκαύγεια (albedo), η μέση πυκνότητα (pk\_den) και η επιφάνεια χιονοκάλυψης της HRU (snowcov\_area). Η λευκαύγεια ορίζει πόση ακτινοβολία ανακλάται από την επιφάνεια του χιονιού, η πυκνότητα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας του στρώματος χιονιού και η επιφάνεια χιονοκάλυψης χρησιμοποιείται για να οριστεί τι ποσοστό των παράγωγων του υδατικού ισοζυγίου επηρεάζει το ισοδύναμο χιονόνερο (ή ισοδύναμο ύψος νερού) του αποθέματος χιονιού.

#### *Λεπτομέρειες προσομοίωσης*

Το απόθεμα και οι ροές μέσα στο στρώμα χιονιού υπολογίζονται, γενικά, σε μονάδες ύψους ανά μονάδα επιφάνειας και ύψους ανά μονάδα επιφάνειας ανά χρόνο αντίστοιχα. Όμοια με το ισοδύναμο ύψος νερού του αποθέματος χιονιού, η μονάδα ύψους χιονιού σε αυτή την ενότητα απευθύνεται μόνο στο περιεχόμενο υγρό νερό. Όταν το ύψος εφαρμόζεται σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια (για παράδειγμα, ένα εκατοστό ισοδύναμο ύψους νερού σε μία HRU), ο απόλυτος όγκος μπορεί να οριστεί πολλαπλασιάζοντας το ύψος με την επιφάνεια.

Η ενεργειακές καταστάσεις και οι ροές υπολογίζονται σε μονάδες Langleys (θερμίδες ανά τετραγωνικό εκατοστό, cal/cm<sup>2</sup>) και σε Langleys ανά μονάδα χρόνου αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί των ενεργειακών ανταλλαγών (λανθάνουσα ή ειδική θερμότητα) γίνονται απευθείας σε όγκους νερού για να καθοριστεί η ενεργειακή ροή. Όταν υπολογίζεται η ενέργεια θερμότητας σε Langleys, η ενότητα snowcomp ορίζει τον όγκο νερού ως ύψος σε ίντσες (in) ανά επιφάνεια σε τετραγωνικά εκατοστά (cm<sup>2</sup>). Αυτό το μείγμα μονάδων συνήθως απαλείφεται, πράγμα που απλοποιεί του υπολογισμούς. Για παράδειγμα, η πυκνότητα θερμότητας του στρώματος χιονιού (pk\_def σε Langleys) για κάθε HRU μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από τη θερμοκρασία του στρώματος χιονιού (pk\_temp<0°C) και το ισοδύναμο ύψος νερού (pkwater\_equiv σε ίντσες) σύμφωνα με την σχέση

$$pk\_def_{HRU} = -pk\_temp_{HRU} \times pkwater\_equiv_{HRU} \times 1.27 \quad (4.72)$$

όπου

1.27 είναι η ειδική θερμότητα του πάγου, σε cal/inxcm<sup>2</sup>x°C.

Η ενότητα snowcomp τρέχει σε ημερήσιο χρονικό βήμα. Σε κάθε υπολογισμό γίνεται συνάθροιση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με εξαίρεση το ενεργειακό ισοζύγιο, του οποίου η

μέρα χωρίζεται σε δύο μισές ημέρες (ημέρα και νύχτα). Η ενότητα του χιονιού εκτελεί τους υπολογισμούς του υδατικού και του ενεργειακού ισοζυγίου σε πέντε διαδοχικά βήματα για κάθε HRU τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. Υπολογίζει το ποσό των μεταβολών του εισερχόμενου νερού και της ενέργειας εξαιτίας των κατακρημνισμάτων, συμπεριλαμβανομένου του ενδεχομένου δημιουργίας τήξης.
2. Υπολογίζει τη μεταβολή της επιφάνειας χιονοκάλυψης.
3. Υπολογίζει τη μεταβολή στη λευκαύγεια.
4. Εφαρμόζει το υπόλοιπο της ροής ενέργειας (μεταβολές ακτινοβολίας και μεταγωγής) στο να μεταβάλλει τη θερμοκρασία του αποθέματος χιονιού για την παραγωγή λιωμένου χιονιού (snowmelt).
5. Υπολογίζει της απώλειες λόγω εξάχνωσης και εξάτμισης.

#### *Θερμοκρασία κατακρημνίσεων*

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας κατακρημνισμάτων διαφέρει ανάμεσα σε ημέρες με μεικτά κατακρημνίσματα και σε ημέρες μόνο με βροχή ή μόνο με χιόνι. Αν τα κατακρημνίσματα είναι μόνο χιόνι ή μόνο βροχή, τότε η μέση τιμή της θερμοκρασίας των κατακρημνισμάτων θεωρείται ότι είναι η μέση τιμή της ελάχιστης και της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα για την ημέρα. Υπάρχει μια εξαίρεση για ημέρες μόνο με βροχή που έχουν μία μέση τιμή θερμοκρασίας από 0°C και κάτω. Για παράδειγμα, μέσα σε διάστημα 24 ωρών μπορεί να βρέξει κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά να μη χιονίσει κατά τη διάρκεια μιας πολύ κρύας νύχτας. Αν συμβαίνει αυτό το είδος γεγονότος, η ενότητα snowcomp μεταχειρίζεται τα κατακρημνίσματα σαν να ήταν μεικτής μορφής. Αυτό ουσιαστικά συλλαμβάνει τη φύση του ελλείμματος ενέργειας των κατακρημνισμάτων. Όταν πέφτει βροχή με θερμοκρασίας παγετού ή μαζί με χιόνι, η θερμοκρασία της εκτιμάται ως η μέση τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και ενός κατωφλίου για την μέγιστη θερμοκρασία αέρα, κάτω από το οποίο τα κατακρημνίσματα είναι μόνο χιόνι (παράμετρος tmax\_allsnow). Η εκτίμηση της θερμοκρασίας του χιονιού σε μία ημέρα μεικτών κατακρημνισμάτων εξαρτάται από την προϋπαρξη ενός στρώματος χιονιού. Αν υπάρχει ήδη ένα στρώμα χιονιού, η θερμοκρασία του χιονιού εκτιμάται ως η μέση τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και της παραμέτρου tmax\_allsnow. Αν δεν υπάρχει κάποιο στρώμα χιονιού, η θερμοκρασία χιονιού εκτιμάται ως η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας, όμοια με μία ημέρα μόνο με χιόνι.

#### *Επιδράσεις της βροχής*

Η βροχή προσθέτει στο στρώμα χιονιού τόσο ελεύθερο νερό όσο και ενέργεια. Το έλλειμμα θερμότητας του στρώματος χιονιού ψύχει το εισερχόμενο νερό στους 0°C και αφήνει την λανθάνουσα θερμότητα όσο το νερό παγώνει. Για τη βροχή σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (train) το ποσό της εισερχόμενης ενέργειας (σε Langleys ανά ίντσα) για κάθε HRU υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{caln}_{\text{HRU}} = 203.2 + 2.54 \times \text{train}_{\text{HRU}} \quad (4.73)$$

όπου

- |       |   |
|-------|---|
| 203.2 | είναι η λανθάνουσα θερμότητα που ελευθερώνεται από κάθε ίντσα παγωμένου νερού της βροχής, σε cal/inxcm <sup>2</sup> (που είναι 80 cal/cm <sup>3</sup> ) |
| 2.54  | είναι το ποσό της θερμότητας που ελευθερώνεται από κάθε ίντσα ψυχόμενης βροχής για κάθε βαθμό Κελσίου ψύξης, σε cal/inxcm <sup>2</sup> x°C              |

Επειδή το έλλειμμα θερμότητας ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να έρθει το στρώμα χιονιού σε ισόθερμη κατάσταση, είναι ξεκάθαρο ότι πρέπει να καθορισθεί

αν το στρώμα χιονιού έχει κάποια χωρητικότητα για να ψύξει την εισερχόμενη βροχή. Για να ψυχθεί η βροχή, το έλλειμμα θερμότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 0, και η ενέργεια που προστίθεται από την εισερχόμενη βροχή να εφαρμόζεται πρώτα για να μειωθεί το έλλειμμα θερμότητας προς το 0. Αν το έλλειμμα θερμότητας είναι επαρκές για να ψύξει και να παγώσει όλη τη βροχή, τότε όλη η εισερχόμενη βροχή γίνεται πάγος του στρώματος χιονιού και το έλλειμμα θερμότητας μειώνεται κατά το κατάλληλο ποσό. Κάθε στιγμή που το έλλειμμα θερμότητας ( $pk\_def$ ) μίας HRU μεταβάλλεται χωρίς να φτάνει το 0, μία νέα μέση θερμοκρασία του στρώματος χιονιού υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$pk\_temp_{HRU} = \frac{-1 \times pk\_def_{HRU}}{1.27 \times pkwater\_equiv_{HRU}} \quad (4.74)$$

όπου

$pkwater\_equiv_{HRU}$  είναι το ισοδύναμο ύψος νερού του στρώματος χιονιού, σε ίντσες  
1,27 είναι το η ειδική θερμότητα του πάγου, σε  $cal/in \times cm^2 \times ^\circ C$

Αυτό το αποτέλεσμα θα είναι αρνητικό (κάτω από  $0^\circ C$ ) όταν το έλλειμμα θερμότητας υπάρχει. Αν το έλλειμμα θερμότητας δεν επαρκεί για να ψυχθεί και να παγώσει όλη η βροχή, τότε η ενέργεια από τη βροχή φέρνει το στρώμα χιονιού σε ισόθερμη κατάσταση στους  $0^\circ C$  και οποιαδήποτε επιπλέον ενέργεια εφαρμόζεται για να λιώσει ο υπάρχον πάγος στο στρώμα χιονιού. Αν το συνολικό ελεύθερο νερό που προκύπτει υπερβαίνει τη χωρητικότητα αποθέματος ελεύθερου νερού, τότε πραγματοποιείται λιώσιμο του χιονιού και το νερό και η ενέργεια εξέρχονται από το στρώμα χιονιού.

#### *Επιδράσεις του χιονιού*

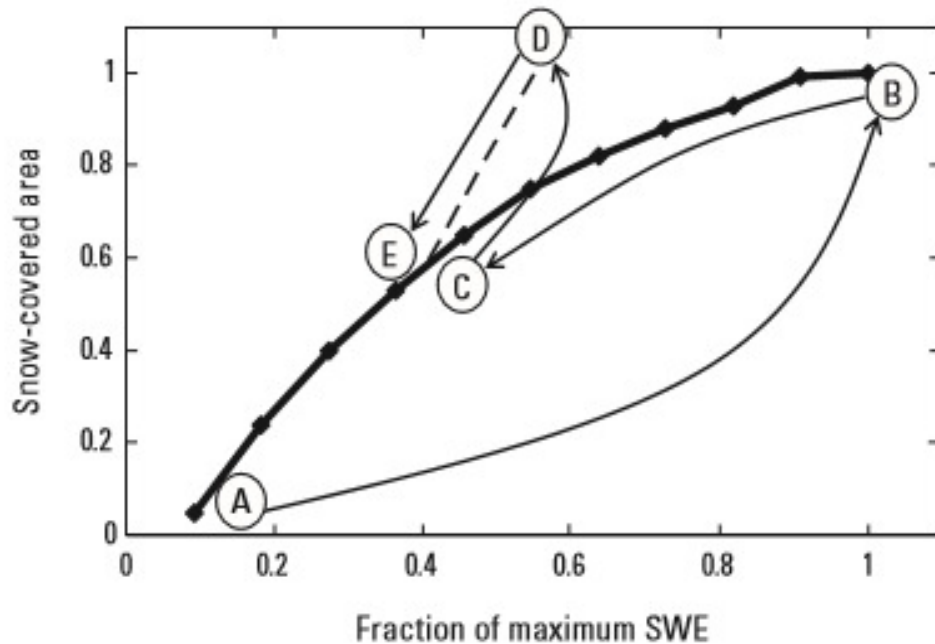
Το νέο χιόνι προστίθεται στον περιεχόμενο πάγο του στρώματος χιονιού. Αν το νέο χιόνι είναι στους  $0^\circ C$ , τότε, δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο έλλειμμα θερμότητας του στρώματος χιονιού. Παρόλο που δεν αλλάζει το έλλειμμα, η θερμοκρασία του στρώματος χιονιού θα αυξηθεί αν το στρώμα χιονιού ήταν κάτω από τους  $0^\circ C$  πριν πέσει το νέο χιόνι. Αν το αρχικό στρώμα χιονιού έχει έλλειμμα θερμότητας, η θερμοκρασία προσαρμόζεται ξανά, σύμφωνα με τη σχέση 3.74.

Αν το νέο χιόνι είναι κάτω από τους  $0^\circ C$ , τότε η αναδιανομή της θερμότητας μετά τη νέα χιονόπτωση μπορεί και να παγώσει το νερό ή και να αυξήσει το έλλειμμα θερμότητας. Το έλλειμμα θερμότητας του νέου χιονιού υπολογίζεται όμοια με αυτό του στρώματος χιονιού στην σχέση 3.74, με τον υπολογισμό να εφαρμόζεται μόνο στο νέο χιόνι ( $net\_snow$ ) αντί σε όλο το στρώμα χιονιού ( $pkwater\_equiv$ ). Το έλλειμμα θερμότητας του νέου χιονιού εφαρμόζεται πρώτα για να παγώσει το ελεύθερο νερό στο στρώμα χιονιού. Τότε, αν το έλλειμμα θερμότητας από το νέο χιόνι δεν έχει καταναλωθεί όλο για το πάγωμα του ελεύθερου νερού, όσο έχει περισσέψει προστίθεται στο έλλειμμα θερμότητας του συνολικού στρώματος χιονιού. Όταν το στρώμα χιονιού είναι όλο πάγος πριν το νέο χιόνι, τότε το έλλειμμα θερμότητας του νέου χιονιού απλά προστίθεται στο έλλειμμα θερμότητας του στρώματος χιονιού.

#### *Επιφάνεια χιονοκάλυψης*

Η επιφάνεια χιονοκάλυψης καθορίζεται από το ισοδύναμο ύψος νερού μέσω μιας καμπύλης εξάντλησης. Όταν το ισοδύναμο ύψος νερού είναι κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι ( $parameter\ snarea\_thresh$ ) αλλά αυξάνεται από το νέο χιόνι, πάντα η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι αρχικά τίθεται στη μέγιστη τιμή της. Κατόπιν, καθώς το στρώμα

χιονιού λιώνει, τα αυξανόμενα ακάλυπτα τμήματα θα μειώνουν σταδιακά την επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα καμπύλης εξάντλησης μιας περιοχής που καλύπτεται από χιόνι (συνεχής γραμμή), όπως ορίζεται από 11 σημεία (τετράγωνα). Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το κλάσμα του μέγιστου ισοδύναμου ύψους νερού που έχει επιτευχθεί με το μοντελοποιημένο στρώμα χιονιού. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει το κλάσμα της μέγιστης χερσαίας επιφάνειας που καλύπτεται από χιόνι. Η διακεκομμένη γραμμή είναι ένα παράδειγμα μιας γραμμικά παρεμβλλόμενης εξάντλησης μετά από μια δευτερεύουσα συσσώρευση χιονιού. Για ένα υποθετικό στρώμα χιονιού, τα βέλη υποδεικνύουν προσομοιώσεις για: (AB) αρχική συσσώρευση, (BC) λιώσιμο, (CD) δευτερεύουσα συσσώρευση (η οποία είναι το νέο χιόνι) και (DE) λιώσιμο αυτής της δευτερεύουσας συσσώρευσης (Πηγή: Markstrom et al.,2015)

Ξεκινώντας από τη μέγιστη κάλυψη χιονιού για μία δεδομένη επιφάνεια, η καμπύλη που χαρακτηρίζει τη σχέση μεταξύ της μειούμενης επιφάνειας που καλύπτεται από χιόνι και του ισοδύναμου ύψους νερού καθορίζεται από 11 προοδευτικά μικρότερα κλάσματα της περιοχής που καλύπτεται από χιόνι (παράμετρος `snarea_curve`), από δεξιά προς τα αριστερά στο Σχήμα 3.3. Καθώς το στρώμα χιονιού λιώνει, η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι μπορεί να καθορισθεί από τη φθίνουσα τιμή στον άξονα  $y$  που αντιστοιχίζεται με τη φθίνουσα απόσταση κατά μήκος του άξονα  $x$  που καθορίζεται από το λόγο του τρέχοντος ισοδύναμου ύψους νερού με το κατώφλι του ισοδύναμου ύψους νερού (παράμετρος `snarea_thresh`).

Όταν το στρώμα χιονιού λιώνει, είναι πιθανό ότι μια νέα χιονόπτωση δεν θα είναι επαρκής για να αυξήσει το ισοδύναμο ύψος νερού στην τιμή του κατωφλίου. Όμως, το καινούργιο χιόνι πάντα θα αυξάνει την επιφάνεια που καλύπτεται από το χιόνι στη μέγιστή της τιμή. Εξαιτίας της μέγιστης επιφάνειας που καλύπτεται από το χιόνι, αλλά σε τιμή του ισοδύναμου ύψους νερού μικρότερη της μέγιστής του, χρειάζεται ένας διαφορετικός αλγόριθμος εκτός της καμπύλης για να υπολογιστεί η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι μέχρι να λιώσει το νέο χιόνι. Πρώτα, θεωρείται ότι η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι θα παραμείνει στη μέγιστη τιμή της μέχρι να λιώσει το ένα τέταρτο του νέου χιονιού. Στη συνέχεια, θεωρείται ότι τα εναπομείναντα τρία τέταρτα του νέου ισοδύναμου ύψους νερού χρειάζεται να λιώσουν πριν

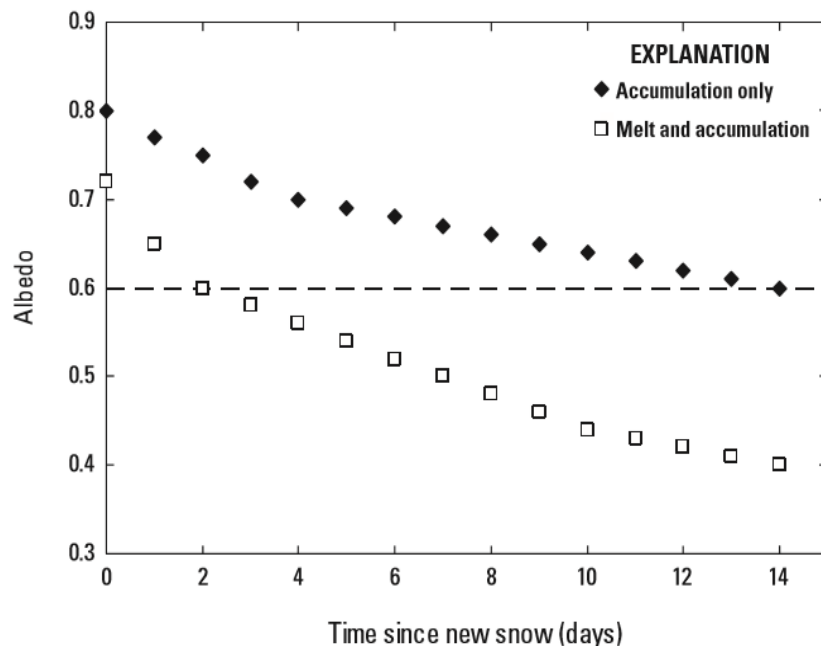
επιστρέψει το στρώμα χιονιού στην αρχική του επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι, ή στην επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι ακριβώς πριν το νέο χιόνι.

Χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή για να καθορισθεί η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι μεταξύ της μέγιστης επιφάνειας (του προηγούμενου ισοδύναμου ύψους νερού συν τα τρία τέταρτα του νέου χιονιού) και της προηγούμενης θέσης στην καμπύλη εξάντλησης (το ισοδύναμο ύψος νερού πριν πέσει το νέο χιόνι). Η διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 3.4 παρέχει ένα παράδειγμα αυτής της παροδικής σχέσης μεταξύ του ισοδύναμου ύψους νερού και της περιοχής που καλύπτεται από χιόνι. Όταν τα εναπομείναντα τρία τέταρτα του νέου χιονιού έχουν λιώσει, η επιφάνεια που καλύπτεται από χιόνι καθορίζεται ξανά από την καμπύλη εξάντλησης, ξαναρχίζοντας από το σημείο εκκίνησης όταν πέσει το νέο χιόνι.

#### Λευκαύγεια

Το ποσό της ακτινοβολούμενης ηλιακής ενέργειας βραχέων κυμάτων (swrad) που εφαρμόζεται στο στρώμα χιονιού επηρεάζεται από την λευκαύγεια (albedo), ή την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του στρώματος χιονιού. Η λευκαύγεια ποσοτικοποιεί το κλάσμα της συνολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων που ανακλάται από την επιφάνεια του χιονιού, έτσι ώστε η διαφορά της λευκαύγειας από τη μονάδα (1-albedo) να είναι το κλάσμα της ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων που εφαρμόζεται στο ισοζύγιο ενέργειας του στρώματος χιονιού. Με άλλα λόγια, το πρόσφατα πεσμένο χιόνι με υψηλή λευκαύγεια απορροφά λιγότερη ενέργεια και είναι λιγότερο πιθανό να λιώσει από το παλαιότερο χιόνι με χαμηλότερη λευκαύγεια. Επισημαίνεται ότι η λευκαύγεια δεν επηρεάζει την ακτινοβολία μακρών κυμάτων από την ατμόσφαιρα ή την κάλυψη γης.

Η λευκαύγεια καθορίζεται από το χρόνο που έχει περάσει από την τελευταία νέα χιονόπτωση και η τιμές της μειώνονται για κάθε ημέρα που δεν υπάρχει νέα χιονόπτωση. Όταν πραγματοποιείται μια ουσιώδης νέα χιονόπτωση, η λευκαύγεια επαναφέρεται σε μία από τις δύο μέγιστες τιμές της όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4: Οι καμπύλες μείωσης της λευκαύγειας σε συνάρτηση με τον αριθμό των ημερών από την τελευταία νέα χιονόπτωση. Διαφορετικές καμπύλες εφαρμόζονται για τη συσσώρευση του στρώματος χιονιού και τις περιόδους λιώσιματος. Και οι δύο καμπύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την περίοδο συσσώρευσης αλλά μόνο η δεύτερη θα χρησιμοποιηθεί κατά την περίοδο λιώσιματος. Κατά



την περίοδο συσσώρευσης, η πρώτη καμπύλη χρησιμοποιείται για τις πρώτες 14 ημέρες από την νέα χιονόπτωση. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την τιμή της λευκαύγειας στην οποία οι δύο καμπύλες επικαλύπτονται (Πηγή: Markstrom et al., 2015).

Η επιλογή μίας μέγιστης τιμής εξαρτάται από το αν το στρώμα χιονιού γενικά συσσωρεύεται (υψηλότερη μέγιστη τιμή) ή από το αν το στρώμα χιονιού γενικά λιώνει (χαμηλότερη μέγιστη τιμή). Ο διαχωρισμός μεταξύ των περιόδων συσσώρευσης και λιώσιματος καθορίζεται από δύο παραμέτρους που υποδεικνύουν αν το στρώμα χιονιού βρίσκεται σε ισόθερμη κατάσταση για πέντε συνεχόμενες ημέρες. Η παράμετρος *melt\_look* καθορίζει τη νωρίτερα δυνατή ημέρα που μπορεί να ξεκινήσει η περίοδος λιώσιματος. Η παράμετρος *melt\_force* καθορίζει την αργότερη ημέρα για να εξαναγκαστεί να γίνει αρχή της περιόδου λιώσιματος. Η περίοδος λιώσιματος δεν ξεκινά ποτέ πριν την ημερομηνία *melt\_look*. Μετά την ημερομηνία *melt\_look* αλλά πριν την ημερομηνία *melt\_force*, πέντε συνεχόμενες ημέρες στην ισόθερμη κατάσταση των 0°C πυροδοτούν την αρχή της περιόδου λιώσιματος. Η περίοδος λιώσιματος είναι ενεργή μετά την ημερομηνία *melt\_force*, ασχέτως αν έχουν περάσει πέντε ημέρες στην κατάσταση των 0°C. Αυτή η περιοδική άποψη στην συσσώρευση του στρώματος χιονιού και στο λιώσιμο είναι η πλέον κατάλληλη σε περιοχές που τα στρώματα χιονιού τείνουν να μένουν για ένα σημαντικό διάστημα του έτους. Για περιοχές που τα στρώματα χιονιού είναι αρκετά εφήμερα, θα ήταν κατάλληλο να τίθεται και στις δύο παραμέτρους (*melt\_look* και *melt\_force*) η τιμή 1 απενεργοποιώντας έτσι την πρώτη καμπύλη του Σχήματος 3.4.

#### *Ενέργεια*

Οι εκτιμήσεις των μεταβολών στην ακτινοβολούμενη, στην αισθητή και στη λανθάνουσα ενέργεια εξαρτώνται κυρίως από διεργασίες στην αλληλεπίδραση του χιονιού και της ατμόσφαιρας και στην εσωτερική αγωγιμότητα μέσα στο στρώμα χιονιού. Εξαιτίας των διαφορών της ατμοσφαιρικής ενέργειας μεταξύ ημέρας και νύχτας, το ενεργειακό ισοζύγιο για μία δεδομένη ημέρα υπολογίζεται ξεχωριστά για τις περιόδους ημέρας και νύχτας. Κατά την προσομοίωση των ενεργειακών μετακινήσεων μιας δεδομένης ημέρας ή νύχτας, το στρώμα χιονιού θεωρείται δύο επιπέδων: (1) μία λεπτή επιφάνεια της οποίας η θερμοκρασία ελέγχεται από τις άμεσες ατμοσφαιρικές συνθήκες, και (2) τον υποκείμενο όγκο του στρώματος χιονιού όπου η θερμοκρασία ελέγχεται από την ιστορία του στρώματος χιονιού. Ο τύπος και η ποσότητα της ενεργειακής μεταφοράς καθορίζεται από τη ροή ενέργειας στο επιφανειακό επίπεδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια κλίση θερμοκρασίας μεταξύ του επιφανειακού επιπέδου και του υποκείμενου στρώματος χιονιού.

Το ενδεχόμενο ενεργειακών μεταβολών στο στρώμα χιονιού επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του επιφανειακού επιπέδου του στρώματος. Αν η μέση θερμοκρασία αέρα είναι κάτω από τους 0°C, οι ενεργειακές ανταλλαγές με την ατμόσφαιρα θεωρείται ότι κρατούν το επιφανειακό επίπεδο στην ίδια θερμοκρασία με τον αέρα. Όταν η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα είναι 0°C ή μεγαλύτερη, η επιφάνεια του χιονιού είναι 0°C γιατί ο πάγος δεν μπορεί να είναι θερμότερος από τους 0°C. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμοκρασία που εφαρμόζεται στην επιφάνεια υπολογίζεται στη μέση του διαστήματος μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα και της μέσης θερμοκρασίας αέρα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η θερμοκρασία που εφαρμόζεται στην επιφάνεια υπολογίζεται ως η μέση τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα και της μέσης θερμοκρασίας αέρα.

Οι ενεργειακές ανταλλαγές της αλληλεπίδρασης χιονιού ατμόσφαιρας είναι το άθροισμα της ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων, της καθαρής ακτινοβολίας μακρών κυμάτων, της διάδοσης θερμότητας και της λανθάνουσας θερμότητας. Η ενότητα διανομής της ηλιακής ακτινοβολίας

εκτιμά την εισερχόμενη ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (swrad) που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να υπολογιστεί η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων που εφαρμόζεται στο στρώμα χιονιού (swn) για κάθε HRU, η εισερχόμενη ακτινοβολία περιορίζεται από την παράμετρο του συντελεστή μετάδοσης ( $0 < \text{rad\_trncf} < 1$ ) και μειώνεται κατά την εκτιμημένη λευκαύγεια σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{swn}_{\text{HRU}} = \text{swrad}_{\text{HRU}} \times (1 - \text{albedo}_{\text{HRU}}) \times \text{rad\_trncf}_{\text{HRU}} \quad (4.75)$$

Η εισερχόμενη ακτινοβολία μακρών κυμάτων προέρχεται από την κάλυψη γης και από την ατμόσφαιρα. Το φύλλωμα της χλωρίδας θεωρείται ότι έχει την ίδια θερμοκρασία με τον αέρα (η μεταβλητή *temp* είναι είτε *tminc* ή *tmaxc*, εξαρτάται από το αν ο υπολογισμός είναι για την περίοδο της ημέρας ή της νύχτας) και η τέλεια εκπομπή του μέλανος σώματος (*lwp*) σχετίζεται με αυτή τη θερμοκρασία για κάθε HRU, η οποία εκτιμάται από την επόμενη εμπειρική σχέση.

$$\text{lwp}_{\text{HRU}} = 5.85 \times 10^{-8} \times (\text{temp}_{\text{HRU}} + 273.16)^4 \quad (4.76)$$

όπου

273.16 είναι μία σταθερά που μετατρέπει τη θερμοκρασία από °C σε °K

Η συνολική εισερχόμενη εκπομπή μακρών κυμάτων (cal) για κάθε HRU καθορίζεται προσθέτοντας την εκπομπή μακρών κυμάτων από την κάλυψη γης, με βάση την χειμερινή κάλυψη βλάστησης (παράμετρος *covden\_win*), και από τον αέρα σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{cal}_{\text{HRU}} = \text{covden\_win}_{\text{HRU}} \times \text{lwp}_{\text{HRU}} + (1 - \text{covden\_win}_{\text{HRU}}) \times \text{lwp}_{\text{HRU}} \times \text{emis} \quad (4.77)$$

όπου

emis τίθεται στην τιμή της παραμέτρου *emis\_norpt* για ημέρες χωρίς κατακρημνίσματα

emis τίθεται σε 1.0 για ημέρες με κατακρημνίσματα κατά τη διάρκεια μηνών με μετωπικές καταιγίδες κατά κύριο λόγο (παράμετρος *tstorm\_mo=0*)

emis τίθεται αναλογικά σε μία τιμή μεταξύ του 0.75 και του 1.0 σε ημέρες με κατακρημνίσματα κατά τη διάρκεια μηνών με καταιγίδες συναγωγής κυρίως (παράμετρος *tstorm\_mo=1*)

Η εξερχόμενη ακτινοβολία μακρών κυμάτων από το στρώμα χιονιού, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό μέλαν σώμα, υπολογίζεται από τη σχέση 3.76 χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία του επιφανειακού επιπέδου του χιονιού. Η καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων στο στρώμα χιονιού υπολογίζεται αφαιρώντας την εξερχόμενη από την εισερχόμενη σύμφωνα με τη σχέση 3.78.

Ο συνδυασμένος όρος ενέργειας για τη μεταγωγή και τη λανθάνουσα θερμότητα από συμπύκνωση (*cecsub*) για κάθε HRU προκύπτει από το γινόμενο της παραμέτρου *cecn\_coef* και της θερμοκρασίας αέρα (*temp*, είτε *tminc* ή *tmax* ανάλογα με το αν υπολογισμός γίνεται για τη περίοδο της ημέρας ή της νύχτας) σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{cecsub}_{\text{HRU}} = \text{cecn\_coef}_{\text{month}} \times \text{temp}_{\text{HRU}} \quad (4.78)$$

Επειδή οι πιέσεις υδρατμών πρέπει να είναι υψηλές για να είναι η μεταγωγή και η συμπύκνωση ουσιώδεις, αυτή η ενέργεια εφαρμόζεται μόνον όταν υπάρχει κατακρήμνιση και η θερμοκρασία πάνω από τους 0°C. Για να ληφθεί υπόψη η μείωση του αέρα, η εφαρμοζόμενη ενέργεια μειώνεται στο μισό σε περιοχές που η κάλυψη γης είναι θάμνοι ή δέντρα.

Η συνολική ανταλλαγή ενέργειας στην αλληλεπίδραση χιονιού και ατμόσφαιρας εκτιμάται προσθέτοντας την ακτινοβολία βραχέων κυμάτων, την καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων και τους όρους μεταγωγής συμπύκνωσης. Μια θετική τιμή της συνολικής ανταλλαγής ενέργειας υποδεικνύει ότι εισέρχεται ενέργεια στην επιφάνεια του στρώματος χιονιού. Αν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι 0°C και υπάρχει εισερχόμενη ακτινοβολία από την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας, τότε το επιφανειακό χιόνι λιώνει και αυτό το νερό μεταφέρει ενέργεια στο χαμηλότερο τμήμα του στρώματος χιονιού. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οποιαδήποτε ενέργεια από μεταβίβαση είναι αμελητέα σε σχέση με τη μεταφορά ενέργειας από το λιωμένο χιόνι. Όταν αυτή η ενέργεια εφαρμόζεται στο στρώμα χιονιού, παρουσιάζεται τήξη του χιονιού όταν το έλλειμμα θερμότητας υπερσχύει και το κατώφλι της χωρητικότητας για απόθεμα ελεύθερου νερού (παράμετρος `freeh2o_cap`) υπερκαλύπτεται.

Όλη η ατμοσφαιρική ενέργεια, εκτός των κατακρημνισμάτων, μπορεί να επηρεάσει μόνον το χαμηλότερο επίπεδο του στρώματος χιονιού όταν αυτό είναι σε ισόθερμη φάση λιώσιματος. Όταν το στρώμα χιονιού είναι σε φάση συσσώρευσης, η θερμότητα μεταφέρεται μόνο με μεταβίβαση μεταξύ του χαμηλότερου επιπέδου και του επιφανειακού επιπέδου. Μόνον το επιφανειακό επίπεδο θεωρείται ότι ανταλλάσει ενέργεια με την ατμόσφαιρα. Αν το χαμηλότερο επίπεδο είναι θερμότερο από το επιφανειακό, τότε η απώλεια ενέργειας από μεταβίβαση μπορεί να παγώσει το ελεύθερο νερό στο χαμηλότερο επίπεδο και να αυξήσει το έλλειμμα θερμότητας. Αν το χαμηλότερο επίπεδο είναι ψυχρότερο από το επιφανειακό, τότε η εισερχόμενη ενέργεια με μεταβίβαση από το επιφανειακό επίπεδο θα μειώσει το έλλειμμα θερμότητας στο χαμηλότερο επίπεδο και, πιθανώς, θα φέρει όλο το στρώμα χιονιού στην ισόθερμη κατάσταση των 0°C.

Ενώ η θερμοκρασία του επιφανειακού επιπέδου διαφέρει με την θερμοκρασία αέρα, το χαμηλότερο επίπεδο τείνει να ολοκληρώνει τις ανταλλαγές ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα μειωμένο εύρος θερμοκρασίας σε σχέση με το επιφανειακό στρώμα. Η θερμότητα (ενέργεια) που μεταβιβάζεται μεταξύ των δύο επιπέδων είναι συνάρτηση της κλίσης της θερμοκρασίας και της θερμικής αγωγιμότητας του χιονιού. Η θερμική αγωγιμότητα του στρώματος χιονιού μπορεί να υπολογιστεί ως μία συνάρτηση της πυκνότητας του στρώματος χιονιού, όπου η πυκνότητα είναι ο λόγος του ισοδύναμου χιονόνερου του στρώματος χιονιού προς το ύψος του χιονιού. Γενικά, η πυκνότητα του στρώματος χιονιού τείνει να αυξάνεται με τον χρόνο, και άρα το ύψος τείνει να μειώνεται κατά τις περιόδους χωρίς νέα χιονόπτωση. Η μείωση στο βάθος του στρώματος χιονιού καθορίζεται ως μία συνάρτηση του αρχικού ύψους στρώματος χιονιού (`pk_depth`), της αρχικής πυκνότητας του νέου χιονιού (παράμετρος `den_init`), της μέγιστης πυκνότητας του στρώματος χιονιού (παράμετρος `den_max`), του συνολικού ισοδύναμου ύψους νερού του στρώματος χιονιού (`pk_equiv`), του ποσού της νέας χιονόπτωσης (`net_snow`), και του ποσοστού καθίζησης (παράμετρος `settle_const`). Το πάχος του στρώματος χιονιού για κάθε HRU βασίζεται στην επόμενη σχέση που είναι συνήθης διαφορική εξίσωση.

$$\frac{d(pk\_depth_{HRU})}{dt} + settle\_const \times pk\_depth_{HRU} = \frac{net\_snow_{HRU}}{den\_init} + \left( settle\_const \times \frac{pkwater\_equiv_{HRU} + net\_snow_{HRU}}{den\_max} \right) \quad (4.79)$$

Μία κατά προσέγγιση αριθμητική επίλυση για την αλλαγή στο βάθος χιονιού για κάθε HRU για ένα πεπερασμένο χρονικό βήμα ( $t$ ) μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\Delta pk\_depth_{HRU} = \Delta t \times \left( \frac{net\_snow_{HRU}}{den\_init} \right) + \Delta t \times settle\_const \times \left( \frac{pkwater\_equiv_{HRU} + net\_snow_{HRU}}{den\_max} - pk\_depth_{HRU} \right) \quad (4.80)$$

Το βάθος του στρώματος χιονιού για κάθε HRU υπολογίζεται ως το άθροισμα του βάθους του στρώματος χιονιού την προηγούμενη ημέρα ( $pk\_depth^{t-1}$ ) συν την μεταβολή της σχέσης 3.80.

$$pk\_depth_{HRU} = pk\_depth_{HRU}^{t-1} + \Delta pk\_depth_{HRU} \quad (4.81)$$

Μόλις υπολογιστεί το νέο βάθος, η νέα πυκνότητα του στρώματος χιονιού υπολογίζεται ως ο λόγος του ισοδύναμου ύψους νερού προς το νέο βάθος.

$$pk\_den_{HRU} = \frac{pkwater\_equiv_{HRU}}{pk\_depth_{HRU}} \quad (4.82)$$

Η θερμότητα μέσω αγωγής ( $qcond$ ) θα είναι είτε προς ή από το χαμηλότερο επίπεδο σε σχέση με το επιφανειακό (θετικά ή αρνητικά αντίστοιχα), και εκτιμάται ως μία συνάρτηση της πυκνότητας του στρώματος χιονιού και της κλίσης της θερμοκρασίας μεταξύ του επιφανειακού και του χαμηλότερου επιπέδου ( $temp\_pk\_temp$ ) σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$qcond_{HRU} = 2 \times \left[ 0.5 \times pk\_den_{HRU} \sqrt{\frac{keff_{HRU} \times \Delta t}{0.5 \times pk\_den_{HRU} \times A}} \right] \times (temp_{HRU} - pk\_temp_{HRU}) \quad (4.83)$$

Και οι δύο τιμές 0.5 της παραπάνω σχέσης είναι η ειδική θερμότητα του πάγου, σε  $cal/cm^2 \cdot ^\circ C$ . Αυτή η σχέση εφαρμόζεται δύο φορές για κάθε ημέρα (περίοδοι ημέρας και νύχτας), και έτσι το  $\Delta t$  είναι 12 ώρες (h). Η ενεργός θερμική αγωγιμότητα ( $keff$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$keff_{HRU} = 0.0077 \times (pk\_den_{HRU})^2 \quad (4.84)$$

Θεωρείται ότι η μεταβίβαση θερμότητας δεν είναι ουσιώδης πηγή ενέργειας για το λιωμένο χιόνι, και, έτσι, η θερμότητα μεταβίβασης δεν παράγει λιωμένο χιόνι. Όμως, η θερμότητα μεταβίβασης είναι σημαντική για την σωστή προσομοίωση της θερμοκρασίας στο στρώμα χιονιού, και είναι ικανή να παγώσει το ελεύθερο νερό σε ένα στρώμα χιονιού στην ισόθερμη κατάσταση των  $0^\circ C$ . Η ανταλλαγή θερμότητας με την αλληλεπίδραση χιονιού και γης θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την αλληλεπίδραση χιονιού και ατμόσφαιρας.

#### *Τήξη χιονιού*

Όταν το δωδεκάωρο ενεργειακό ισοζύγιο ( $tcal$ ) είναι αρνητικό, η ροή της θερμότητας συμβαίνει μόνο με μεταβίβαση και το ποσό της υπολογίζεται από τη σχέση 3.83. Όταν το δωδεκάωρο ισοζύγιο είναι θετικό, αυτή η ενέργεια θεωρείται ότι λιώνει το χιόνι στο επιφανειακό επίπεδο. Το λιώσιμο του χιονιού μεταφέρει θερμότητα στο χαμηλότερο επίπεδο με μεταφορά μάζας. Το λιώσιμο του χιονιού για κάθε HRU υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$snowmelt_{HRU} = \frac{tcal_{HRU}}{203.2} \times snowcov\_area_{HRU} \quad (4.85)$$

όπου

203.2 είναι μία σταθερά ίση με τον αριθμό των θερμίδων που απαιτείται για να λιώσει μία ίντσα ισοδύναμου νερού του πάγου στους 0°C, σε cal/in

Αν η θερμοκρασία του χαμηλότερου επιπέδου (pk\_temp) είναι κάτω από τους 0°C, τότε μέρος ή όλο το στρώμα χιονιού παγώνει ξανά. Αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να ικανοποιήσει το ενεργειακό έλλειμμα (pk\_def) στο χαμηλότερο επίπεδο και μία νέα θερμοκρασία του στρώματος χιονιού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.74. Όταν η θερμοκρασία του χαμηλότερου επιπέδου φτάσει τους 0°C, οποιοδήποτε επιπλέον λιώσιμο χιονιού χρησιμοποιείται για να ικανοποιηθεί η χωρητικότητα συγκράτησης ελεύθερου νερού (παράμετρος freeh2o\_cap). Όταν αυτή η χωρητικότητα ικανοποιηθεί, το λιωμένο χιόνι αφήνει το στρώμα χιονιού και γίνεται διήθηση ή επιφανειακή απορροή.

#### Εξάχνωση

Η εξάχνωση (snow\_evap) μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια περιόδων χωρίς διαπνοή για όλες τις HRU, ενώ επίσης μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή σε HRU's οι οποίες καλύπτονται από γρασίδι ή γυμνό έδαφος. Η εξάχνωση για κάθε HRU υπολογίζεται ως ένα τμήμα τις δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που εξατμίζεται από το τμήμα της HRU που είναι καλυμμένο με χιόνι (snowcov\_area) σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$snow\_evap_{HRU} = (potet\_sublim \times potet_{HRU} \times snowcov\_area_{HRU}) - hru\_intcpevap_{HRU} \quad (4.86)$$

Η εξάχνωση από το συγκρατημένο από τη βλάστηση χιόνι (hru\_intcpevap) υπολογίζεται από την ενότητα συγκράτησης και δεν συμπεριλαμβάνεται στη μεταβλητή snow\_evap. Το εξαχνωμένο νερό αφαιρείται από τον περιεχόμενο πάγο του στρώματος χιονιού. Αν ο περιεχόμενος πάγος του στρώματος χιονιού είναι ψυχρότερος από το σημείο παγετού (pk\_temp κάτω από 0°C), τότε η εξάχνωση θα μειώσει το έλλειμμα θερμότητας κατά ένα ποσό (scal) το οποίο υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$scal_{HRU} = pk\_temp_{HRU} \times snow\_evap_{HRU} \times 1.27 \quad (4.87)$$

όπου

1.27 είναι η ειδική θερμότητα του πάγου, σε cal/in×cm<sup>2</sup>×°C

#### 4.3.13 Ενότητες επιφανειακής απορροής

Οι ενότητες επιφανειακής απορροής υπολογίζουν την επιφανειακή απορροή από το περίσσειμα βροχόπτωσης και τον κορεσμό του εδάφους χρησιμοποιώντας την έννοια μιας μεταβλητής επιφάνειας παραγωγής απορροής, σύμφωνα την οποία οι περιοχές που δημιουργούν απορροή μεταβάλλονται σε θέση και μέγεθος με την πάροδο του χρόνου. Η ενότητα srunoff\_smidx υπολογίζει αυτές τις τιμές χρησιμοποιώντας μία μη γραμμική μέθοδο μεταβλητής επιφάνειας παραγωγής απορροής, ενώ η ενότητα srunoff\_carea τις υπολογίζει με μία γραμμική μέθοδο. Ο χρήστης επιλέγει ποια από τις δύο ενότητες θα χρησιμοποιηθεί θέτοντας την παράμετρο ελέγχου srunoff\_module του αρχείου ελέγχου είτε στην τιμή srunoff\_carea ή στην τιμή srunoff\_smidx.

Η διαπερώσα βροχή, το λιώσιμο του χιονιού και οποιαδήποτε επιφανειακή απορροή που προέρχεται από μία ανάντη μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) διαμοιράζονται στα διαπερατά και στα αδιαπεράτα τμήματα, καθώς και στα τμήματα αποθήκευσης σε κοιλάτητες για κάθε HRU με βάση ένα κλάσμα της αδιαπερατής επιφάνειας (παράμετρος hru\_percent\_imperv) προς την έκταση του αποθέματος σε κοιλάτητες (παράμετρος dprst\_area) της HRU. Και οι δύο ενότητες υπολογίζουν τη διατήρηση του αποθέματος, την εξάτμιση και την απορροή σε αδιαπεράτες εκτάσεις και κοιλάτητες για κάθε HRU

χρησιμοποιώντας τη συνέχεια. Επίσης, και οι δύο ενότητες υπολογίζουν τη διαρροή από το απόθεμα σε κοιλότητες. Η επιφανειακή απορροή που οφείλεται στο περίσσειμα διήθησης και στην υπέρβαση της αδιαπέρατης χωρητικότητας αποθήκευσης αθροίζονται και αναφέρονται ως επιφανειακή απορροή κατά Horton.

*Διεργασίες στο αδιαπέρατο τμήμα της λεκάνης*

Αν το άθροισμα της διαπερώσας βροχής, της τήξης του χιονιού και της προγενέστερης αδιαπέρατης αποθήκευσης το οποίο είναι η μεταβλητή *avail\_water* υπερβεί τη χωρητικότητα του αποθέματος διατήρησης σε ένα αδιαπέρατο τμήμα μίας HRU για ένα χρονικό βήμα, τότε δημιουργείται η επιφανειακή απορροή κατά Horton. Το νερό μέχρι και την αδιαπέρατη χωρητικότητα αποθέματος (παράμετρος *imperv\_stor\_max*) διατηρείται μέχρι να εξατμιστεί. Η επιφανειακή απορροή κατά Horton από ένα αδιαπέρατο τμήμα μίας HRU (*hru\_sroffi*) για κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται από τη συνέχεια σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$avail\_water = imperv\_stor_{HRU}^{t-1} + net\_rain_{HRU} + snowmelt_{HRU} \quad (4.88)$$

Αν  $avail\_water > imperv\_stor\_max_{HRU}$  τότε η επιφανειακή απορροή κατά Horton (*hru\_sroffi*) για κάθε HRU προκύπτει από την επόμενη σχέση.

$$hru\_sroffi_{HRU} = (avail\_water - imperv\_stor\_max_{HRU}) \times hru\_percent\_imperv_{HRU} \quad (4.89)$$

Αλλιώς

$$hru\_sroffi_{HRU} = 0.0$$

Η εξάτμιση από το αδιαπέρατο τμήμα μίας HRU (*hru\_imperevap*) για κάθε χρονικό βήμα βασίζεται στο διαθέσιμο νερό και στη μη ικανοποιημένη δυναμική εξατμισοδιαπνοή. Το διαθέσιμο νερό (*avail\_water*) και η μη ικανοποιημένη δυναμική εξατμισοδιαπνοή (*avail\_et*) υπολογίζονται σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$avail\_water = imperv\_stor_{HRU}^{t-1} + net\_rain_{HRU} + snowmelt_{HRU} - \frac{hru\_sroffi_{HRU}}{hru\_percent\_imperv_{HRU}} \quad (4.90)$$

$$avail\_et = potet_{HRU} - snow\_evap_{HRU} - hru\_intcpevap_{HRU} - dprst\_evap\_hru_{HRU} \quad (4.91)$$

όπου

$dprst\_evap\_hru_{HRU}$  είναι η εξάτμιση, σε in, για οποιοδήποτε απόθεμα σε κοιλότητες όπως υπολογίζεται στη σχέση 4.112

Αν *avail\_et* είναι μεγαλύτερη ή ίση από *avail\_water*, τότε η εξάτμιση από το αδιαπέρατο τμήμα για μία HRU για κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα προκύπτει από την επόμενη σχέση.

$$hru\_impervevap_{HRU} = avail\_water \times (1 - snowcov\_area_{HRU}) \times hru\_percent\_imperv_{HRU} \quad (4.92)$$

Αν *avail\_et* είναι μικρότερη από *avail\_water*, τότε η εξάτμιση από το αδιαπέραστο τμήμα για μία HRU για κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα προκύπτει από την επόμενη σχέση.

$$hru\_impervevap_{HRU} = avail\_et \times (1 - snowcov\_area_{HRU}) \times hru\_percent\_imperv_{HRU} \quad (4.93)$$

Το απόθεμα στο αδιαπέρατο τμήμα μίας HRU υπολογίζεται από τη συνέχεια για κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα σύμφωνα με την επόμενη σχέση

$$\begin{aligned} \text{hru\_impervstor}_{\text{HRU}} &= \text{hru\_impervstor}_{\text{HRU}}^{t-1} - \text{hru\_sroffi}_{\text{HRU}} - \text{hru\_impervevap}_{\text{HRU}} + \\ &(\text{net\_rain}_{\text{HRU}} + \text{snowmelt}_{\text{HRU}}) \times \text{hru\_percent\_imperv}_{\text{HRU}} \end{aligned} \quad (4.94)$$

*Διεργασίες στο διαπερατό τμήμα της λεκάνης*

Όταν η διαπερνώσα βροχή, η τήξη του χιονιού και οποιαδήποτε ανάντη επιφανειακή απορροή κατά Horton, που είναι διαθέσιμη για διήθηση, υπερβούν τη χωρητικότητα του εδάφους, τότε δημιουργείται περίσσειμα διήθησης στο διαπερατό τμήμα καθεμίας HRU. Η επιφανειακή απορροή κατά Horton από το διαπερατό τμήμα μίας HRU ( $\text{hru\_sroffp}$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{hru\_sroffp}_{\text{HRU}} = \text{ca\_fraction} \times (\text{upslope\_hortonian}_{\text{HRU}} + \text{net\_rain}_{\text{HRU}} + \text{snowmelt}_{\text{HRU}}) \quad (4.95)$$

όπου

$\text{ca\_fraction}$  είναι μία κλασματική έκταση μεταβλητής επιφάνειας παραγωγής απορροής για το διαπερατό τμήμα μίας HRU.

Η ενότητα  $\text{srunoff\_carea}$  υπολογίζει την  $\text{ca\_fraction}$  με βάση την προγενέστερη ( $\text{soil\_rechr}$ ) και τη μέγιστη (παράμετρος  $\text{soil\_rechr\_max}$ ) περιεκτικότητα της εδαφικής υγρασίας της τριχοειδούς δεξαμενής της ζώνης επαναφόρτισης σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{ca\_fraction} = \text{carea\_min}_{\text{HRU}} + \left[ \frac{(\text{carea\_max}_{\text{HRU}} - \text{carea\_min}_{\text{HRU}}) \times \left( \frac{\text{soil\_rechr}_{\text{HRU}}^{t-1}}{\text{soil\_rechr\_max}_{\text{HRU}}} \right)}{\left( \frac{\text{soil\_rechr}_{\text{HRU}}^{t-1}}{\text{soil\_rechr\_max}_{\text{HRU}}} \right)} \right] \quad (4.96)$$

Η ενότητα  $\text{srunoff\_smidx}$  υπολογίζει την προγενέστερη περιεκτικότητα της εδαφικής υγρασίας της τριχοειδούς δεξαμενής ( $\text{soil\_moist}$ ) σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{smidx}_{\text{HRU}} = \text{soil\_moist}_{\text{HRU}}^{t-1} + 0.5 \times \text{net\_ppt}_{\text{HRU}} \quad (4.97)$$

$$\text{ca\_fraction} = \text{smidx\_coef}_{\text{HRU}} \times (10)^{\text{smidx\_exp}_{\text{HRU}} \times \text{smidx}} \quad (4.98)$$

Αν  $\text{ca\_fraction} > \text{carea\_max}_{\text{HRU}}$ , τότε η  $\text{ca\_fraction}$  τίθεται  $\text{carea\_max}_{\text{HRU}}$

Όταν δεν υπάρχει απόθεμα χιονιού, η διήθηση στη σχετική περιοχή με το διαπερατό τμήμα μίας HRU υπολογίζεται με την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} \text{infil}_{\text{HRU}} &= (\text{upslope\_hortonian}_{\text{HRU}} + \text{net\_rain}_{\text{HRU}} + \text{snowmelt}_{\text{HRU}} - \\ &\text{hru\_sroffi}_{\text{HRU}} - \text{hru\_sroffp}_{\text{HRU}}) \times (1 - \text{hru\_percent\_imperv}_{\text{HRU}}) \end{aligned} \quad (4.99)$$

Αν υπάρχει απόθεμα χιονιού, η επιφανειακή απορροή στο διαπερατό τμήμα της HRU και η διήθηση προσαρμόζονται με βάση την παράμετρο  $\text{snowinfil\_max}$ . Αρχικά, το έλλειμμα χωρητικότητας αποθήκευσης ( $\text{capacity}$ ), το διαθέσιμο νερό για εισροή ( $\text{avail\_water}$ ) και η δυναμική υπέρβαση στη διήθηση ( $\text{excess}$ ) στη τριχοειδή δεξαμενή υπολογίζονται σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{capacity} = \text{soil\_mosit\_max}_{\text{HRU}} - \text{soil\_moist}_{\text{HRU}}^{t-1} \quad (4.100)$$

$$\text{avail\_water} = \text{upslope\_hortonian}_{\text{HRU}} + \text{snowmelt}_{\text{HRU}} \quad (4.101)$$

$$\text{excess} = \text{avail\_water} - \text{capacity} \quad (4.102)$$

Στη συνέχεια, οποιαδήποτε επιπρόσθετη επιφανειακή απορροή ( $\text{excess\_infil}$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{excess\_infil} = \text{MAX}(0.0, \text{avail\_water} - \text{capacity} - \text{snowinfil\_max}_{\text{HRU}}) \quad (4.103)$$

Αν η  $\text{excess\_infil}$  είναι μεγαλύτερη από 0.0, η τιμή προστίθεται στην  $\text{hru\_sroffp}$  (σχέση 3.95) και η ποσότητα νερού που διηθείται στη τριχοειδή δεξαμενή για την HRU ορίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{infil}_{\text{HRU}} = \text{snowinfil\_max}_{\text{HRU}} + \text{capacity}_{\text{HRU}} \quad (4.104)$$

#### *Προσομοίωση αποθήκευσης σε επιφανειακές κοιλότητες*

Οι ενότητες επιφανειακής απορροής μπορούν να προσομοιάσουν τις διαδικασίες αποθήκευσης σε επιφανειακές κοιλότητες οι οποίες που ευθύνονται για την εμφάνιση πολυάριθμων, μικρών και διάσπαρτων υδάτινων σωμάτων. Παρόλο που το αποτέλεσμα μίας μόνο κοιλότητας μπορεί να είναι αμελητέο, πολυάριθμες κοιλότητες μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην υδρολογική απόκριση μίας HRU. Τυπικά, οι επιφανειακές κοιλότητες έχουν απόθεμα νερού κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τα γεγονότα κατακρημνισμάτων και τήξης χιονιού. Όμως, μερικές μπορεί να διατηρούν νερό όλο το χρόνο. Μία επιφανειακή κοιλότητα διαφέρει από μία λίμνη στο ότι δεν είναι αρκετά μεγάλη για να δικαιολογεί διακριτοποίηση ως αυτοτελής HRU. Παραδείγματα επιφανειακών κοιλοτήτων είναι οι λακκούβες των λιβαδιών, οι νερόλακκοι στις φάρμες και στους μύλους και οι κατασκευές συγκράτησης όμβριων υδάτων. Η ενότητα της αποθήκευσης σε επιφανειακές κοιλότητες ενεργοποιείται με τον ορισμό της παραμέτρου ελέγχου  $\text{dprst\_flag}$  στην τιμή 1.

Οι επιφανειακές κοιλότητες οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν επιφανειακή απορροή ονομάζονται «ανοικτές», ενώ όσες δεν μπορούν ονομάζονται «κλειστές». Η μέγιστη χωρητικότητα μίας ανοικτής επιφανειακής κατάπτωσης ( $\text{dprst\_vol\_open\_max}$ ) για κάθε HRU υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} \text{dprst\_vol\_open\_max}_{\text{HRU}} &= \text{dprst\_area}_{\text{HRU}} \times \text{dprst\_depth\_avg}_{\text{HRU}} \times \\ &\text{dprst\_frac\_open}_{\text{HRU}} \end{aligned} \quad (4.105)$$

Οι κλειστές επιφανειακές κοιλότητες προσομοιώνονται με απεριόριστη χωρητικότητα αποθέματος νερού. Οι ανοικτές επιφανειακές κοιλότητες δημιουργούν επιφανειακή απορροή όταν το απόθεμά τους φτάσει ένα κατώφλι όγκου ( $\text{dprst\_vol\_thres\_open}$ ). Αυτό το κατώφλι όγκου υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{dprst\_vol\_thres\_open}_{\text{HRU}} = \text{dprst\_vol\_open\_max}_{\text{HRU}} \times \text{op\_flow\_thres}_{\text{HRU}} \quad (3.106)$$

Οι αρχικές ποσότητες νερού σε ανοικτές και κλειστές επιφανειακές κοιλότητες υπολογίζονται για κάθε HRU σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{dprst\_vol\_open}_{\text{HRU}}^{t=0} = \text{dprst\_vol\_open\_max}_{\text{HRU}} \times \text{dprst\_frac\_init}_{\text{HRU}} \quad (3.107)$$

και

$$\begin{aligned} \text{dprst\_vol\_clos}_{\text{HRU}}^{t=0} &= \text{dprst\_area}_{\text{HRU}} \times \text{dprst\_depth\_avg}_{\text{HRU}} \times \\ &(1 - \text{dprst\_frac\_open}_{\text{HRU}}) \times \text{dprst\_frac\_init}_{\text{HRU}} \end{aligned} \quad (4.108)$$

Οι τιμές των ανοικτών και κλειστών όγκων αποθέματος για μεταγενέστερα χρονικά βήματα υπολογίζονται με βάση τις εισροές και τις εκροές και των προγενέστερων όγκων αποθέματος. Η επιφανειακή απορροή κατά Horton που κατέρχεται από ανάντη ( $\text{upslope\_hortonian}$ ), η διαπερώσα βροχή ( $\text{net\_rain}$ ) που υπολογίζεται από την ενότητα συγκράτησης, και το λωμένο χιόνι ( $\text{snowmelt}$ ) που υπολογίζεται από την ενότητα χιονιού προστίθενται απευθείας στις



ανοικτές και κλειστές επιφανειακές κοιλότητες ως ύψος νερού, σε in, πάνω από το μέγιστο εμβαδό των κοιλοτήτων. Ο νέος όγκος αποθέματος σε ανοικτή κοιλότητα υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την επόμενη σχέση

$$\begin{aligned} \text{dprst\_vol\_open}_{\text{HRU}} &= \text{dprst\_vol\_open}_{\text{HRU}}^{t-1} + \\ &(\text{upslope\_hortonian}_{\text{HRU}} \times \text{sro\_to\_dprst}_{\text{HRU}} + \text{net\_rain}_{\text{HRU}} + \text{snowmelt}_{\text{HRU}}) \times \text{dprst\_area\_open}_{\text{HRU}}^{t-1} \end{aligned} \quad (4.109)$$

Ο νέος όγκος αποθέματος σε κλειστή κοιλότητα υπολογίζεται από την ίδια σχέση χρησιμοποιώντας την κατάληξη «\_clos» στις μεταβλητές.

Το εμβαδό για ανοικτές επιφανειακές κοιλότητες υπολογίζεται για κάθε HRU σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{dprst\_area\_open}_{\text{HRU}} = e^{\text{va\_open\_exp} \times \text{LOG} \left( \frac{\text{dprst\_vol\_open}_{\text{HRU}}}{\text{dprst\_vol\_thres\_open}_{\text{HRU}}} \right)} \quad (4.110)$$

Το επιφανειακό εμβαδό για κλειστές επιφανειακές κοιλότητες υπολογίζεται από την ίδια σχέση χρησιμοποιώντας την κατάληξη «\_clos» στις μεταβλητές.

Η εξάτμιση και στις ανοικτές και στις κλειστές επιφανειακές κοιλότητες βασίζεται στην δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Αν υπάρχει στρώμα χιονιού σε μία HRU, η εξάτμιση στην επιφανειακή κοιλότητες μειώνεται από το κλάσμα της HRU που καλύπτεται από χιόνι. Ο μέγιστος όγκος της εξάτμισης στην επιφανειακή κοιλότητα για κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} \text{dprst\_evap\_vol\_max}_{\text{HRU}} &= \text{potet}_{\text{HRU}} \times (1 - \text{snowcov\_area}_{\text{HRU}}) \\ &\times (\text{dprst\_area\_open}_{\text{HRU}} + \text{dprst\_area\_clos}_{\text{HRU}}) \end{aligned} \quad (4.111)$$

Η εξάτμιση της επιφανειακής κοιλότητας περιορίζεται από το ποσό της δυνητική εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιείται για να ικανοποιήσει την εξάτμιση από το φύλλωμα και την εξάχνωση από οποιοδήποτε στρώμα χιονιού. Η πραγματική εξάτμιση από την επιφανειακή κοιλότητα (dprst\_evap\_vol) για κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\text{dprst\_evap\_hru}_{\text{HRU}} = \text{MIN} \left[ \frac{(\text{potet}_{\text{HRU}} - \text{hru\_intcpevap}_{\text{HRU}} - \text{snow\_evap}_{\text{HRU}}),}{\text{hru\_area}_{\text{HRU}}} \right] \quad (4.112)$$

Οι απώλειες και από τις ανοικτές και από τις κλειστές επιφανειακές κοιλότητες περιλαμβάνουν επίσης και διαρροή στις υπόγειες δεξαμενές για κάθε HRU και υπολογίζονται από την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} \text{dprst\_seep\_hru}_{\text{HRU}} &= \frac{\text{dprst\_vol\_open}_{\text{HRU}} \times \text{dprst\_seep\_rate\_open}_{\text{HRU}}}{\text{hru\_area}_{\text{HRU}}} \\ &+ \frac{\text{dprst\_vol\_clos}_{\text{HRU}} \times \text{dprst\_seep\_rate\_clos}_{\text{HRU}}}{\text{hru\_area}_{\text{HRU}}} \end{aligned} \quad (4.113)$$

Σε οποιαδήποτε ανοικτή επιφανειακή κοιλότητα στην οποία το απόθεμα υπερβαίνει τον μέγιστο ανοικτό όγκο αποθέματος για μία HRU (σχέση 4.105), το νερό υπερχειλίζει ως επιφανειακή απορροή που υπολογίζεται από τις επόμενες διαδοχικές σχέσεις.

$$dprst\_sroff\_max_{HRU} = MAX[0.0, dprst\_vol\_open_{HRU} - dprst\_vol\_max_{HRU}] \quad (4.114)$$

$$dprst\_sroff\_thres_{HRU} = MAX \left[ 0.0, dprst\_vol\_open_{HRU} - \right. \\ \left. dprst\_vol\_thres\_open_{HRU} \right] \quad (4.115)$$

$$dprst\_sroff_{HRU} = dprst\_sroff\_max_{HRU} + \\ (dprst\_flow\_coef_{HRU} \times dprst\_sroff\_thres_{HRU}) \quad (4.116)$$

Αν  $dprst\_sroff_{HRU}$  είναι μεγαλύτερο από 0.0, τότε ο  $dprst\_vol\_open_{HRU}$  μειώνεται κατά αυτό το ποσό. Η επιφανειακή απορροή από τις επιφανειακές κοιλότητες σε κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$dprst\_sroff\_hru_{HRU} = \frac{dprst\_sroff_{HRU}}{hru\_area_{HRU}} \quad (4.117)$$

Η συνολική επιφανειακή απορροή κατά Horton για κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$hortonian\_flow_{HRU} = dprst\_sroff\_hru_{HRU} + hru\_sroffp_{HRU} + hru\_sroffi_{HRU} \quad (4.118)$$

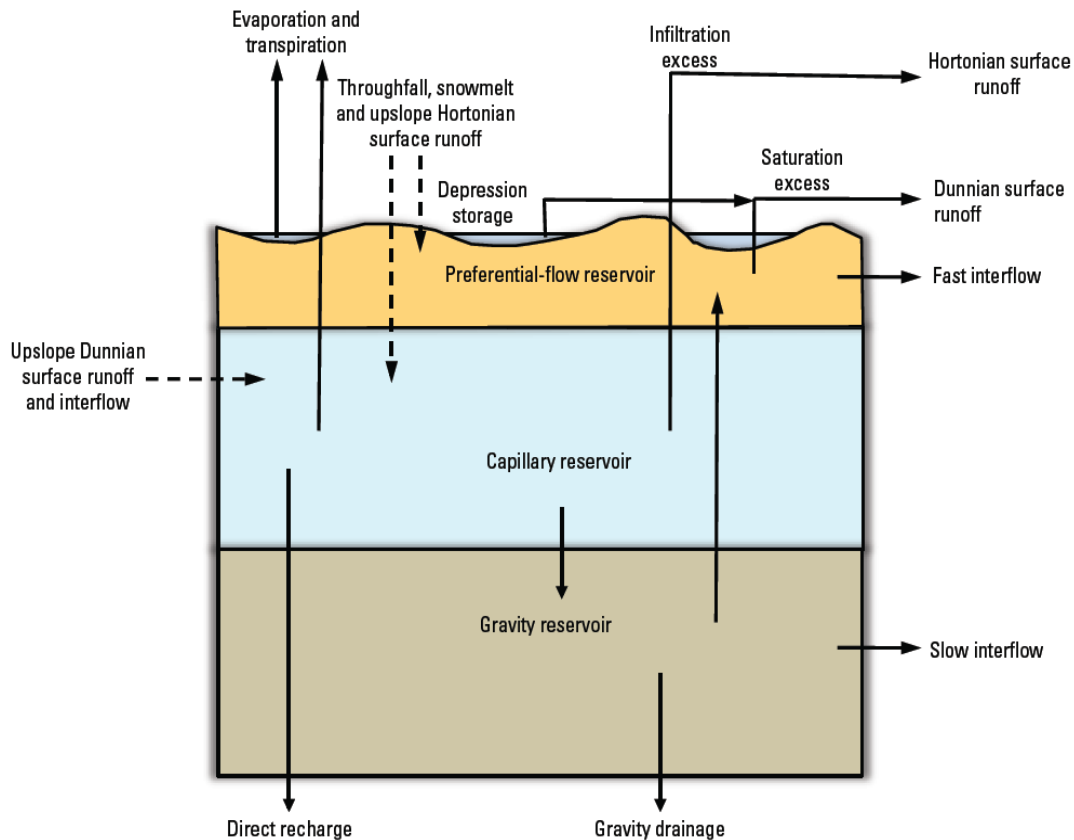
#### 4.3.14 Ζώνη εδάφους

Η υδρολογικές διεργασίες της ζώνης εδάφους προσομοιώνονται στο PRMS\_IV είτε από την ενότητα soilzone ή από το συνδυασμό των αναχρονιστικών ενοτήτων smbal\_prms και ssflow\_prms οι οποίες υπάρχουν ακόμα μόνον για σύνδεση με παλαιότερες εκδόσεις του PRMS και, για αυτό, στη συνέχεια αναλύεται μόνον η ενότητα soilzone. Η ενότητα που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται με την παράμετρο ελέγχου soilzone\_module στο αρχείο ελέγχου σε μία από τις παραπάνω τιμές.

Ο υπολογισμός του νερού που περιέχεται στη ζώνη εδάφους βασίζεται στην άθροιση όλων των εισροών και εκροών εδαφικού νερού. Οι εκροές περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή, την αποστράγγιση προς την υπόγεια δεξαμενή, τη γρήγορη και αργή πλάγια ροή στο υπέδαφος και το περίσσειμα κορεσμένης επιφανειακής απορροής που καλείται επιφανειακή απορροή κατά Dunne. Οι εισροές είναι η εδαφική διήθηση όπως υπολογίζεται από την ενότητα εδαφικής απορροής και οποιαδήποτε επιφανειακή απορροή κατά Dunne και πλάγια ροή στο υπέδαφος που κατέρχονται από τις ανάντη HRU όπως υπολογίζονται από την ενότητα ζώνης εδάφους.

##### *Περιγραφή των εννοιολογικών δεξαμενών*

Η ενότητα ζώνης εδάφους αναπαριστά το υδροσύστημα με τρεις εννοιολογικές δεξαμενές. Αυτές οι δεξαμενές είναι η τριχοειδής δεξαμενή (capillary reservoir), η δεξαμενή βαρύτητας (gravity reservoir) και η δεξαμενή της προτιμητέας ροής (preferential-flow reservoir) οι οποίες φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.5: Η εδαφική ζώνη όπως προσομοιώνεται από το PRMS\_IV (Πηγή: Markstrom et al.,2015)

Αυτές οι τρεις δεξαμενές δεν είναι φυσικά επίπεδα στη στήλη εδάφους αλλά περισσότερο αντιπροσωπεύουν και λογαριάζουν το περιεχόμενο εδαφικό νερό σε διάφορα επίπεδα κορεσμού. Το νερό που περιέχεται σε καθεμία από αυτές τις τρεις δεξαμενές υπόκειται σε διαφορετικές διεργασίες και έχει διαφορετικές μέγιστες χωρητικότητες αποθέματος.

Η τριχοειδής δεξαμενή αναπαριστά το περιεχόμενο νερό μεταξύ του σημείου μαρασμού και τη χωρητικότητα αυτού του πεδίου (`soil_moist`) για κάθε HRU με το μέγιστο περιεχόμενο να ορίζεται από την παράμετρο `soil_moist_max`. Αυτή η δεξαμενή καταλαμβάνει το τμήμα της HRU που είναι διαπερατό (`hru_frac_perv`). Αυτό το νερό συγκρατείται στη θέση του από τριχοειδείς δυνάμεις. Δεν είναι διαθέσιμο για αποστράγγιση και εξαντλείται μόνο κατά τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Η τριχοειδής δεξαμενή χωρίζεται σε δύο ζώνες: τη ζώνη επαναφόρτισης και τη χαμηλότερη ζώνη. Η ζώνη επαναφόρτισης περιέχει νερό (`soil_rechr`) του οποίου το μέγιστο περιεχόμενο ορίζεται από τη παράμετρο `soil_rechr_max`. Το νερό σε αυτή τη ζώνη είναι διαθέσιμο για εξάτμιση και διαπνοή. Έτσι, αποτελεί το περιεχόμενο νερό της τριχοειδούς δεξαμενής που είναι διαθέσιμο για απευθείας εξάτμιση στην επιφάνεια του εδάφους. Η χαμηλότερη ζώνη περιέχει νερό (`soil_lower`) όταν το επίπεδο κορεσμού του νερού στην τριχοειδή δεξαμενή υπερβεί την τιμή της παραμέτρου `soil_rechr_max`. Έτσι, η μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα του συγκρατούμενου νερού της χαμηλότερης ζώνης είναι η διαφορά μεταξύ των παραμέτρων `soil_moist_max` και `soil_rechr_max`. Το νερό στη χαμηλότερη ζώνη είναι διαθέσιμο μόνο για διαπνοή.

Προαιρετικά, οι HRUs μπορούν να περιλαμβάνουν μια δεξαμενή προτιμητέας ροής όταν η μοναδιαία παροχή της προτιμητέας ροής (παραμέτρος `pref_flow_den`) έχει ορισθεί σε τιμή μεγαλύτερη του μηδέν. Το απόθεμα αυτής της δεξαμενής (`pref_flow_stor`) ορίζεται από το

περιεχόμενο νερό μεταξύ του κατώφλιου της προτιμητέας ροής ( $pref\_flow\_thrsh$ ) και το κατώφλι του κορεσμού του εδάφους (παράμετρος  $sat\_threshold$ ). Το κατώφλι για κάθε HRU υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$pref\_flow\_thrsh_{HRU} = sat\_threshold_{HRU} \times (1 - pref\_flow\_den_{HRU}) \quad (4.119)$$

Η μέγιστη χωρητικότητα του αποθέματος στην δεξαμενή προτιμητέας ροής υπολογίζεται για κάθε HRU από την επόμενη σχέση.

$$pref\_flow\_max_{HRU} = sat\_threshold_{HRU} - pref\_flow\_thrsh_{HRU} \quad (4.120)$$

Το απόθεμα της δεξαμενής βαρύτητας ( $slow\_stor$ ) ορίζεται από το περιεχόμενο νερό μεταξύ της χωρητικότητας αυτού του πεδίου και του  $pref\_flow\_thrsh$ . Το περιεχόμενο νερό στην δεξαμενή βαρύτητας και στη δεξαμενή προτιμητέας ροής ( $ssres\_stor$ ) υπόκειται στη δύναμη της βαρύτητας, στην υδραυλική αγωγιμότητα και στη χωρητικότητα αποθέματος. Το περιεχόμενο νερό στη δεξαμενή βαρύτητας είναι διαθέσιμο για επαναφόρτιση της υπόγειας δεξαμενής, για αργή πλάγια ροή στο υπέδαφος για ροή στη δεξαμενή προτιμητέας ροής και για επιφανειακή απορροή κατά Dunne. Η επαναφόρτιση από τη δεξαμενή βαρύτητας εκλαμβάνεται ως κατακόρυφη, οδηγούμενη από τη βαρύτητα ροή δια μέσου των διάκενων των πόρων του εδάφους. Η αργή πλάγια ροή εκλαμβάνεται ως πλευρική υπεδάφια ροή που εκρέει από τη δεξαμενή βαρύτητας. Η επιφανειακή απορροή κατά Dunne εκλαμβάνεται ως το περίσσειμα του εδαφικό νερού το οποίο ρέει προς τα κατάντη πλευρικά στην επιφάνεια του εδάφους. Το νερό στη δεξαμενή προτιμητέας ροής είναι διαθέσιμο για ταχεία πλάγια ροή και για επιφανειακή απορροή κατά Dunne. Η ταχεία πλάγια ροή εκλαμβάνεται ως η πλευρική υπεδάφια ροή από τις ρωγμές του εδάφους, οπές ζώων ή απορρίμματα φύλλων.

#### *Σειρά υπολογισμών*

Η σειρά των υπολογισμών της ροής μέσα και έξω από τη ζώνη εδάφους γίνεται με διαδοχικά βήματα για κάθε HRU και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Είσοδος στις δεξαμενές αποθήκευσης

#### Βήμα 1

Καθορίζεται το ποσό του διαθέσιμου νερού για είσοδο στη δεξαμενή προτιμητέας ροής και στη τριχοειδή δεξαμενή και έπειτα το κλάσμα (παράμετρος  $pref\_flow\_den$ ) της εδαφικής διήθησης ( $infil$ ), το οποίο έχει υπολογισθεί από την ενότητα επιφανειακής απορροής, επιμερίζεται στην δεξαμενή προτιμητέας ροής ως ένα μέγιστο ποσό νερού σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$pref\_flow\_maxin_{HRU} = infil_{HRU} \times pref\_flow\_den_{HRU} \quad (4.121)$$

#### Βήμα 2

Αυτό το μέγιστο ποσό νερού προστίθεται στο προγενέστερο απόθεμα της δεξαμενής προτιμητέας ροής μέχρι τη μέγιστη χωρητικότητα αποθέματος (σχέση 3.120) σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$pref\_stor_{HRU} = \text{MIN} \left( \begin{array}{l} pref\_flow\_stor_{HRU}^{t-1} + pref\_flow\_maxin_{HRU} \\ pref\_flow\_max_{HRU} \end{array} \right) \quad (4.122)$$

Οποιοδήποτε περίσσειμα εισροής στη δεξαμενή προτιμητέας ροής είναι η πρώτη συνιστώσα της επιφανειακής απορροής κατά Dunne και υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\text{dunnian\_pfr}_{\text{HRU}} = \text{MAX}(0, \text{pref\_flow\_maxin}_{\text{HRU}} - \text{pref\_flow\_max}_{\text{HRU}}) \quad (4.123)$$

### Βήμα 3

Το υπόλοιπο της εδαφικής διήθησης (infil) και οποιασδήποτε επιφανειακής απορροής κατά Dunne (upslope\_dunnianflow) και οποιαδήποτε πλάγια ροή (upslope\_interflow) κατέρχονται από τα ανάντη, προστίθενται στη τριχοειδή δεξαμενή σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{capwater\_maxin}_{\text{HRU}} = \frac{\text{upslope\_dunnianflow}_{\text{HRU}} + \text{upslope\_interflow}_{\text{HRU}}}{\text{hru\_frac\_perv}_{\text{HRU}}} + \frac{\text{infil}_{\text{HRU}} - \text{pref\_flow\_maxin}_{\text{HRU}}}{\text{hru\_frac\_perv}_{\text{HRU}}} \quad (4.124)$$

### Βήμα 4

Το ποσό του capwater\_maxin προστίθεται στο προγενέστερο απόθεμα στη ζώνη επαναφόρτισης (soil\_rechr) της τριχοειδούς δεξαμενής μέχρι την τιμή της παραμέτρου soil\_rechr\_max και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{soil\_rechr}_{\text{HRU}} = \text{MIN} \left( \text{soil\_rechr}_{\text{HRU}}^{t-1} + \text{capwater\_maxin}_{\text{HRU}}, \text{soil\_rechr\_max}_{\text{HRU}} \right) \quad (4.125)$$

### Βήμα 5

Το τρέχον απόθεμα στην τριχοειδή δεξαμενή (soil\_moist) τίθεται στο άθροισμα του capwater\_maxin και του προγενέστερου αποθέματος στην δεξαμενή της εδαφικής ζώνης (soil\_moist), μέχρι την τιμή της παραμέτρου soil\_moist\_max, και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{soil\_moist}_{\text{HRU}} = \text{MIN} \left( \text{soil\_moist}_{\text{HRU}}^{t-1} + \text{capwater\_maxin}_{\text{HRU}}, \text{soil\_moist\_max}_{\text{HRU}} \right) \quad (4.126)$$

Το απόθεμα στη χαμηλότερη ζώνη (soil\_lower) τίθεται στην τιμή της διαφοράς μεταξύ της soil\_moist και της soil\_rechr σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{soil\_lower}_{\text{HRU}} = \text{soil\_moist}_{\text{HRU}} - \text{soil\_rechr}_{\text{HRU}} \quad (4.127)$$

### Βήμα 6

Το περίσσειμα της εισροής στη τριχοειδή δεξαμενή (cap\_excess) και η διήθηση (cap\_waterin) στη τριχοειδή δεξαμενή υπολογίζονται σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{cap\_excess}_{\text{HRU}} = \text{MAX} \left( 0, \text{soil\_moist}_{\text{HRU}}^{t-1} + \text{capwater\_maxin}_{\text{HRU}} - \text{soil\_moist\_max}_{\text{HRU}} \right) \quad (4.128)$$

$$\text{cap\_waterin}_{\text{HRU}} = \text{capwater\_maxin}_{\text{HRU}} - \text{cap\_excess}_{\text{HRU}} \quad (4.129)$$

Οποιαδήποτε περίσσεια εισροής στην τριχοειδή δεξαμενή πρώτα εισέρχεται στην υπόγεια δεξαμενή (soil\_to\_gw), περιορίζεται από ένα μέγιστο ποσοστό αναπλήρωσης (παραμέτρος soil2gw\_max) και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{soil\_to\_gw}_{\text{HRU}} = \text{MIN}(\text{cap\_excess}_{\text{HRU}}, \text{soil2gw\_max}_{\text{HRU}}) \quad (4.130)$$

Οποιοδήποτε εναπομείναν περίσσειμα εισέρχεται στην υπόγεια δεξαμενή (gvr\_maxin) και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$gvr\_maxin_{HRU} = cap\_excess_{HRU} - soil\_to\_gw_{HRU} \quad (4.131)$$

### Βήμα 7

Το απόθεμα στη δεξαμενή βαρύτητας τίθεται στο άθροισμα της  $gvr\_maxin$  και στο προγενέστερο απόθεμα ( $slow\_stor$ ), μέχρι μία μέγιστη χωρητικότητα αποθέματος στη δεξαμενή βαρύτητας, και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$grav\_stor_{HRU} = \text{MIN} \left( \begin{array}{l} slow\_stor_{HRU}^{t-1} + gvr\_maxin_{HRU} \\ pref\_flow\_thrsh_{HRU} \end{array} \right) \quad (4.132)$$

Το περίσσειμα ροής ( $gvr\_excess$ ) και η πραγματική εισροή ( $ssres\_in$ ) στην υπόγεια δεξαμενή υπολογίζονται σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$gvr\_excess_{HRU} = \text{MAX} \left( \begin{array}{l} 0, \\ slow\_stor_{HRU}^{t-1} + \\ gvr\_maxin_{HRU} - pref\_flow\_thrsh_{HRU} \end{array} \right) \quad (4.133)$$

$$ssres\_in_{HRU} = gvr\_maxin_{HRU} - gvr\_excess_{HRU} \quad (4.134)$$

### Βήμα 8

Η εισροή στη δεξαμενή προτιμητέας ροής ( $gvr\_excess$  στη σχέση 4.133) η οποία είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα αποθέματος (σχέση 4.120) αποτελεί τη δεύτερη συνιστώσα της επιφανειακής απορροής κατά Dunne και υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$dunnian\_gvr_{HRU} = \text{MAX} \left( \begin{array}{l} 0, \\ fast\_stor_{HRU} + \\ pref\_flow\_maxin_{HRU} - pref\_flow\_max_{HRU} \end{array} \right) \quad (4.135)$$

Η εναπομείνασα εισροή στη δεξαμενή προτιμητέας ροής ( $gvr2pfr$ ) προστίθεται στο τρέχον απόθεμα (σχέση 4.122) και υπολογίζεται από τις επόμενες σχέσεις.

$$gvr2pfr_{HRU} = pfr\_flow\_maxin_{HRU} - dunnian\_gvr_{HRU} \quad (4.136)$$

$$pref2\_stor_{HRU} = pref\_stor_{HRU} + gvr2pfr_{HRU} \quad (4.137)$$

Εκροές από τις δεξαμενές της ζώνης εδάφους

### Βήμα 9

Υπάρχουν τέσσερις πιθανές εκροές από τη ζώνη εδάφους: η αργή πλάγια υπεδάφια ροή, η αποστράγγιση λόγω βαρύτητας, η επιφανειακή απορροή κατά Dunne και η ταχεία πλάγια υπεδάφια ροή. Η αργή πλάγια υπεδάφια ροή πραγματοποιείται όταν το απόθεμα της δεξαμενής βαρύτητας είναι μεγαλύτερο από 0.0. Η εξίσωση της αργής πλάγιας υπεδάφιας ροής αναπτύσσεται από τη συνέχεια και μία εμπειρική σχέση και παρουσιάζεται στην επόμενη σχέση.

$$slow\_flow_{HRU} = (slowcoef\_lin_{HRU} \times grav\_stor_{HRU}) + (slowcoef\_sq_{HRU} \times (grav\_stor_{HRU})^2) \quad (4.138)$$

Επίσης, αφαιρείται από το απόθεμα της δεξαμενής βαρύτητας σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{grav2\_stor}_{\text{HRU}} = \text{grav\_stor}_{\text{HRU}} - \text{slow\_flow}_{\text{HRU}} \quad (4.139)$$

#### Βήμα 10

Η αποστράγγιση λόγω βαρύτητας από τη δεξαμενή βαρύτητας είναι ένα τμήμα του τρέχοντος αποθέματος και υπολογίζεται και αφαιρείται από το απόθεμα της δεξαμενής βαρύτητας σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{ssr\_to\_gw}_{\text{HRU}} = \text{ssr2gw\_rate}_{\text{HRU}} \times (\text{grav2\_stor}_{\text{HRU}})^{\text{ssr2gw\_exp}_{\text{HRU}}} \quad (4.140)$$

$$\text{slow\_stor}_{\text{HRU}} = \text{grav2\_stor}_{\text{HRU}} - \text{ssr\_to\_gw}_{\text{HRU}} \quad (4.141)$$

#### Βήμα 11

Η ταχεία πλάγια υπεδάφια ροή υπολογίζεται και αφαιρείται από το απόθεμα της δεξαμενής της προτιμητέας ροής σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{fast\_flow}_{\text{HRU}} = (\text{fastcoef\_lin}_{\text{HRU}} \times \text{pref2\_stor}_{\text{HRU}}) + (\text{fastcoef\_sq}_{\text{HRU}} \times (\text{pref2\_stor}_{\text{HRU}})^2) \quad (4.142)$$

$$\text{pref\_flow\_stor}_{\text{HRU}} = \text{pref2\_stor}_{\text{HRU}} - \text{fast\_flow}_{\text{HRU}} \quad (4.143)$$

#### Βήμα 12

Οποιαδήποτε περίσσεια στην εισροή στη δεξαμενή προτιμητέας ροής (σχέση 4.135) συν την περίσσεια της διήθησης (σχέση 4.123) είναι η συνολική επιφανειακή απορροή κατά Dunne ( $\text{dunnian\_flow}$ ) και υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{dunnian\_flow}_{\text{HRU}} = \text{dunnian\_pfr}_{\text{HRU}} + \text{dunnian\_gvr}_{\text{HRU}} \quad (4.144)$$

#### Βήμα 13

Αν η διαδικασία της αλληλουχίας της ροής είναι ενεργή (ενότητα cascade), τότε η πλάγια υπεδάφια ροή και η επιφανειακή απορροή κατά Dunne προστίθενται στη τριχοειδή δεξαμενή οποιωνδήποτε κατάντη HRU σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις.

$$\text{upslope\_dunnianflow}_{\text{dnhru}} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{ncascade\_hru}} (\text{dunnian\_flow}_i \times \text{hru\_pct\_up}_i \times \text{hru\_area}_i)}{\text{hru\_area}_{\text{dnhru}}} \quad (4.145)$$

$$\text{upslope\_interflow}_{\text{dnhru}} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{ncascade\_hru}} ((\text{slow\_flow}_i + \text{fast\_flow}_i) \times \text{hru\_pct\_up}_i \times \text{hru\_area}_i)}{\text{hru\_area}_{\text{dnhru}}} \quad (4.146)$$

Εξατμισοδιαπνοή από την τριχοειδή δεξαμενή

#### Βήμα 14

Η εξατμισοδιαπνοή από την τριχοειδή δεξαμενή ( $\text{perv\_actet}$ ) εξαρτάται από τι τύπο εδάφους (παράμετρος  $\text{soil\_type}$ ), τον τύπο της βλάστησης (παράμετρος  $\text{cov\_type}$ ), την επιφάνεια χιονοκάλυψης ( $\text{snowcov\_area}$ ) και την περίοδο της ενεργούς διαπνοής ( $\text{transp\_on}$ ). Αν μία HRU έχει το 99% της επιφάνειάς της καλυμμένο με χιόνι, τότε δεν υπάρχει καθόλου εξατμισοδιαπνοή από την τριχοειδή δεξαμενή. Αν μία HRU δεν βρίσκεται σε περίοδο

ενεργούς διαπνοής, τότε δεν υπάρχει καθόλου διαπνοή, αλλά υπάρχει μόνον εξάτμιση. Η εξατμισοδιαπνοή περιορίζεται από το διαθέσιμο νερό ( $soil\_moist$  και  $soil\_rechr$ ) και από την εναπομείνασα ζήτηση σε δυνητική εξατμισοδιαπνοή, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} avail\_potet_{HRU} = & potet_{HRU} - hru\_intcpevap_{HRU} - snow\_evap_{HRU} \\ & - hru\_impervevap_{HRU} - dprst\_evap\_hru_{HRU} \end{aligned} \quad (4.147)$$

Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ξεχωριστά για τη ζώνη επαναφόρτισης και για τη χαμηλότερη ζώνη. Η εξατμισοδιαπνοή στη ζώνη επαναφόρτισης βασίζεται σε ένα λόγο του περιεχόμενου νερού ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$soil\_rechr\_ratio_{HRU} = \frac{soil\_rechr_{HRU}}{soil\_rechr\_max_{HRU}} \quad (4.148)$$

Αν το έδαφος στην HRU είναι κυρίως άμμος (παράμετρος  $soil\_type=1$ ), τότε υπάρχουν δύο πιθανές τιμές για την  $potet\_rechr$ . Αν  $soil\_rechr\_ratio$  είναι λιγότερος από 0.25, τότε η  $potet\_rechr$  παίρνει την τιμή 0.5. Αλλιώς τίθεται ίση με την  $avail\_et$ . Αν το έδαφος στην HRU είναι κυρίως πηλώδες έδαφος (παράμετρος  $soil\_type=2$ ), υπάρχουν δύο πιθανές τιμές για την  $potet\_rechr$ . Αν  $soil\_rechr\_ratio$  είναι λιγότερος από 0.5, τότε η  $potet\_rechr$  υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$potet\_rechr_{HRU} = soil\_rechr\_ratio_{HRU} \times avail\_potet_{HRU} \quad (4.149)$$

Αλλιώς, η  $potet\_rechr$  τίθεται στην  $avail\_et$ . Αν το έδαφος στην HRU είναι κυρίως άργιλος (παράμετρος  $soil\_type=3$ ), τότε υπάρχουν τρεις πιθανές τιμές για την  $potet\_rechr$ . Αν  $soil\_rechr\_ratio$  είναι λιγότερος ή ίσος με 1/3, τότε η  $potet\_rechr$  υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$potet\_rechr_{HRU} = 0.5 \times soil\_rechr\_ratio_{HRU} \times avail\_potet_{HRU} \quad (4.150)$$

Αν  $soil\_rechr\_ratio$  είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 2/3, τότε η  $potet\_rechr$  τίθεται στην  $avail\_et$ . Αλλιώς, η  $potet\_rechr$  υπολογίζεται από τη σχέση 4.149.

Η εξατμισοδιαπνοή στη χαμηλότερη ζώνη ( $potet\_lower$ ) υπολογίζεται ομοίως χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4.149 με 4.150 με βάση ένα λόγο του περιεχόμενου νερού ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$lower\_zone\_ratio_{HRU} = \frac{soil\_moist_{HRU}}{soil\_moist\_max_{HRU}} \quad (4.151)$$

Αν η  $potet\_rechr$  είναι μεγαλύτερη ή ίση με την  $potet\_lower$ , ή η περίοδος της ενεργούς διαπνοής είναι απενεργοποιημένη, η εξατμισοδιαπνοή από την τριχοειδή δεξαμενή ( $perv\_actet$ ) τίθεται σε  $potet\_rechr$ . Αλλιώς, η  $perv\_actet$  τίθεται στην  $potet\_lower$ . Το περιεχόμενο νερό της ζώνης επαναφόρτισης μειώνεται κατά  $potet\_rechr$ . Το περιεχόμενο νερό της τριχοειδούς δεξαμενής μειώνεται κατά  $perv\_actet$ .

#### 4.3.15 Ροή υπογείων υδάτων

Η ενότητα ροής υπογείων υδάτων ( $gwflow$ ) προσομοιώνει το απόθεμα και τις εισροές και εκροές από τη δεξαμενή των υπογείων υδάτων (GWR). Η δεξαμενή GWR έχει άπειρη χωρητικότητα και είναι η πηγή της προσομοιωμένης βασικής ροής. Για κάθε HRU πρέπει να υπάρχει και μία δεξαμενή GWR που να αντιστοιχεί σε αυτή.



Η συνολική εισροή σε κάθε GWR ( $gwres\_in$ ) προέρχεται από την περίσσεια εδαφικού νερού (σχέση 4.130), την αποστράγγιση λόγω βαρύτητας (σχέση 4.140), την υπόγεια ροή από οποιοδήποτε ανάντη GWRs ( $gw\_upslope$ ) και από το απόθεμα επιφανειακής κοιλότητας (σχέση 4.113) και, άρα, υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} gwres\_in_{GWR} = & soil\_to\_gw_{GWR} + ssr\_to\_gw_{GWR} + \\ & gw\_upslope_{GWR} + gw\_dprst\_seep_{GWR} \end{aligned} \quad (4.152)$$

Αν η παράμετρος ελέγχου  $strmflow\_module$  έχει τεθεί σε  $strmflow\_lake$ , τότε η διαρροή υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$seepage_{lake} = (elev_{lake} - lake\_seep\_elev_{lake}) \times gw\_seep\_coef_{GWR} \quad (4.153)$$

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί με τους οποίους το νερό φεύγει από μία GWR: η βασική ροή ( $gwres\_flow$ ) και η διαφυγή υπόγειου νερού ( $gwres\_sink$ ). Η βασική ροή είναι νερό που ρέει από μία GWR σε ένα τμήμα ρεύματος, μία λίμνη, ή μία άλλη GWR μέσα στη λεκάνη απορροής και υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$gwres\_flow_{GWR} = gwflow\_coef_{GWR} \times gwres\_stor_{GWR} \quad (4.154)$$

Η διαφυγή υπόγειου νερού αναπαριστά την υπόγεια ροή που φεύγει από τη λεκάνη απορροής και υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$gwres\_sink_{GWR} = gwsink\_coef_{GWR} \times gwres\_stor_{GWR} \quad (4.155)$$

Το απόθεμα σε μία GWR ( $gwres\_stor$ ) υπολογίζεται από τις εισροές και τις εκροές (σχέσεις 4.152 με 4.155) καθώς και από το απόθεμα σε προηγούμενο χρονικό βήμα, σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} gwres\_stor_{GWR} = & gwres\_stor_{GWR}^{t-1} + gwres\_in_{GWR} - \\ & gwres\_flow_{GWR} - gwres\_sink_{GWR} - seepage_{GWR}^{t-1} \end{aligned} \quad (4.156)$$

#### 4.3.16 Απορροή υδατορευμάτων

Η απορροή των υδατορευμάτων υπολογίζεται με μία από τρεις συνολικά επιλογές η οποία ορίζεται από το χρήστη. Η πιο απλή προσέγγιση είναι η ενότητα  $strmflow$  η οποία υπολογίζει τη συνολική απορροή των υδατορευμάτων που φεύγει από τη λεκάνη απορροής ως το άθροισμα της επιφανειακής απορροής, της πλάγιας υπεδάφιας απορροής και της αποστράγγισης των υπόγειων υδάτων που φτάνει στα υδατορεύματα του υδρογραφικού δικτύου. Η ενότητα  $muskingum$  χρησιμοποιεί τη μέθοδο Muskingum για τη διόδευση της ροής που υπολογίζει την απορροή των ρευμάτων προς και από ξεχωριστά τμήματα των ρευμάτων. Η ενότητα  $strmflow\_in\_out$  χρησιμοποιεί το ίδιο δίκτυο υδατορευμάτων με την ενότητα  $muskingum$ , αλλά θέτει την εκροή κάθε τμήματος στην εισροή. Ο χρήστης επιλέγει ποια ενότητα απορροής υδατορευμάτων θα χρησιμοποιηθεί θέτοντας στην παράμετρο ελέγχου  $strmflow\_module$  στο αρχείο ελέγχου ένα από τα τρία ονόματα των ενότητων:  $strmflow$ ,  $Muskingum$  ή  $strmflow\_in\_out$ .

Ενότητα  $strmflow$

Όπως αναφέρθηκε η ενότητα  $strmflow$  αθροίζει τις συνιστώσες της απορροής (επιφανειακή απορροή, πλάγια υπεδάφια απορροή και αποστράγγιση των υπόγειων υδάτων) από τις HRUs και από τις GWRs για να υπολογίσει τη συνολική απορροή που εξέρχεται από τη λεκάνη. Δεν

υπάρχουν παράμετροι εισόδου σε αυτή την ενότητα. Η συνολική απορροή των υδατορευμάτων από τη λεκάνη απορροής (basin\_stflow), σε in/acre ανά ημέρα, υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\text{basin\_stflow} = \text{basin\_sroff} + \text{basin\_ssflow} + \text{basin\_gwflow} \quad (4.157)$$

#### Ενότητα muskingum

Στην ενότητα muskingum το δίκτυο υδατορευμάτων που χρησιμοποιείται για διόδευση εκλαμβάνεται ως μία μονής κατεύθυνσης ακολουθία συνδεδεμένων τμημάτων ρευμάτων όπως ορίζονται από την παράμετρο tosegment. Τυπικά, ένα τμήμα σχετίζεται με κάθε HRU ενός επιπέδου ή με ένα ζευγάρι HRU αριστερής και δεξιάς όχθης, όπως ορίζεται από την παράμετρο hru\_segment. Αυτή η ενότητα έχει μία εσωτερική δομή που επιτρέπει διαφορετικό υπολογιστικό χρονικό βήμα για κάθε τμήμα μέσα σε κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα του PRMS. Οι τιμές της απορροής που υπολογίζονται για αυτά τα μικρότερα χρονικά βήματα συναθροίζονται για κάθε τμήμα.

Η εξίσωση για τη διόδευση κατά Muskingum θεωρεί μία γραμμική σχέση μεταξύ του αποθέματος και των χαρακτηριστικών της εισροής (seg\_inflow) και της εκροής (seg\_outflow). Το απόθεμα (storage) σε ένα τμήμα ρεύματος, για εσωτερικό χρονικό βήμα  $\Delta t$ , υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\text{storage}_{\text{segment}}^t = k\_coef_{\text{segment}} \times \left( (x\_coef_{\text{segment}} \times \text{seg\_inflow}_{\text{segment}}^t) + (1 - x\_coef_{\text{segment}}) \times \text{seg\_outflow}_{\text{segment}}^t \right) \quad (4.158)$$

Θεωρώντας ότι η μέση ροή κατά τη διάρκεια ενός εσωτερικού χρονικού βήματος ισούται με τη μέση ροή στις στιγμές αρχής και τέλους τους εσωτερικού χρονικού βήματος, η εξίσωση συνέχειας εκφράζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\begin{aligned} \Delta \text{storage}_{\text{segment}}^t &= \text{storage}_{\text{segment}}^t - \text{storage}_{\text{segment}}^{t-1} = \\ & \left( \frac{\text{seg\_inflow}_{\text{segment}}^t + \text{seg\_inflow}_{\text{segment}}^{t-1}}{2} \right) \times \Delta t_{\text{segment}} \\ & - \left( \frac{\text{seg\_outflow}_{\text{segment}}^t + \text{seg\_outflow}_{\text{segment}}^{t-1}}{2} \right) \times \Delta t_{\text{segment}} \end{aligned} \quad (4.159)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης 4.158 στη σχέση 4.159 και με επίλυση ως προς την εκροή του τμήματος του υδατορεύματος, για το εσωτερικό χρονικό βήμα, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{seg\_outflow}_{\text{segment}}^t &= (c0_{\text{segment}} \times \text{seg\_inflow}_{\text{segment}}^t) + (c1_{\text{segment}} \times \text{seg\_inflow}_{\text{segment}}^{t-1}) \\ & + (c2_{\text{segment}} \times \text{seg\_outflow}_{\text{segment}}^{t-1}) \end{aligned} \quad (4.160)$$

όπου

$$c0_{\text{segment}} = \frac{-(k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) + \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}}{(k\_coef_{\text{segment}}) - (k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) + \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}} \quad (4.161)$$

$$c1_{\text{segment}} = \frac{(k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) + \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}}{k\_coef_{\text{segment}} - (k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) + \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}} \quad (4.162)$$

$$c2_{\text{segment}} = \frac{k\_coef_{\text{segment}} - (k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) - \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}}{k\_coef_{\text{segment}} - (k\_coef_{\text{segment}} \times x\_coef_{\text{segment}}) + \frac{\Delta t_{\text{segment}}}{2}} \quad (4.163)$$

Το εσωτερικό χρονικό βήμα ( $\Delta t$ ) που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις 4.159 – 4.163 υπολογίζεται από την ενότητα muskingum για κάθε χρονικό βήμα σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\Delta t_{\text{segment}} = \left[ \frac{24}{\left[ \frac{24}{k\_coef_{\text{segment}}} \right]} \right] \quad (4.164)$$

Η παραπάνω σχέση είναι ουσιαστικά ο χρόνος διαδρομής, σε ώρες, στρογγυλοποιημένος σε ένα ακέραιο τμήμα των 24 ωρών (για παράδειγμα 24, 12, 6, 4, 3, 2, 1). Το PRMS-IV περιορίζεται σε ημερήσια χρονικά βήματα και έτσι ο χρόνος διαδρομής δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 24 ώρες. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος διαδρομής οποιοδήποτε τμήματος στο υδρογραφικό δίκτυο (παράμετρος K-coef) πρέπει να είναι μικρότερος από μία ημέρα. Μια επεξήγηση της παραπάνω σχέσης είναι ότι η διοδευόμενη απορροή των υδατορευμάτων σε κάθε τμήμα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά εσωτερικά χρονικά βήματα. Κατά συνέπεια, η απορροή των υδατορευμάτων πρέπει να συναθροίζεται όταν μεταφέρεται από τμήματα με μικρότερο  $\Delta t$  σε τμήματα με μεγαλύτερο  $\Delta t$ . Παρομοίως, η απορροή των υδατορευμάτων πρέπει να διαχωρίζεται όταν μεταφέρεται από τμήματα με μεγαλύτερο  $\Delta t$  σε τμήματα με μικρότερο  $\Delta t$ .

Ενότητα strmflo<sub>w\_in\_out</sub>

Η ενότητα strmflo<sub>w\_in\_out</sub> χρησιμοποιεί το ίδιο δίκτυο υδατορευμάτων με την ενότητα muskingum, αλλά θέτει απευθείας την απορροή κάθε τμήματος να είναι ίση με το άθροισμα των εισροών. Οι εξισώσεις muskingum (4.158 – 4.164) δεν επιλύονται από την ενότητα strmflo<sub>w\_in\_out</sub> και, έτσι, οι παράμετροι K\_coef και x\_coef αγνοούνται.

#### 4.3.17 Σύνοψη

Οι ενότητες σύνοψης παρέχουν συνόψεις (συγκεντρωτικούς πίνακες συναθροισμένων τιμών) επιλεγμένων μεταβλητών σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές αναλύσεις. Οι τρεις ενότητες σύνοψης είναι οι: basin<sub>\_sum</sub>, subbasin και map<sub>\_results</sub>.

*Ενότητα basin<sub>\_sum</sub>*

Η ενότητα basin<sub>\_sum</sub> γράφει στο αρχείο υδατικού ισοζυγίου το οποίο ορίζεται από την παράμετρο model<sub>\_output\_file</sub>. Αυτή η ενότητα παράγει συνόψεις για τη λεκάνη απορροής ημερήσια, μηνιαία, ετήσια και στη συνολική περίοδο προσομοίωσης με βάση τις τιμές των παραμέτρων print<sub>\_type</sub> και print<sub>\_freq</sub>.

Τρεις τύποι αναφορών είναι διαθέσιμοι:

- Αναφορές εκπλήρωσης (παράμετρος `print_type = 0`) οι οποίες περιγράφουν τη μετρημένη και την προσομοιωμένη απορροή
- Αναφορές υδατικού ισοζυγίου που περιλαμβάνουν την κατακρήμνιση, την εξατμισοδιαπνοή, το απόθεμα και δεδομένα προσομοιωμένης και μετρημένης απορροής (παράμετρος `print_type = 1`)
- Αναλυτικές αναφορές που περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και αποτελέσματα εισροής, εκροής και αποθέματος (παράμετρος `print_type = 2`)

#### *Ενότητα subbasin*

Η ενότητα `subbasin` παρέχει μία μέθοδο για να διαιρεί τη λεκάνη απορροής σε ομάδες από μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs), της υπολεκάνης (παράμετρος `hru_subbasin`). Κάθε HRU μπορεί να ανατεθεί μόνο σε μία υπολεκάνη. Αυτή η ενότητα υπολογίζει τις συνόψεις της απορροής των υδατορευμάτων και άλλων μεταβλητών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βαθμονόμηση. Η απορροή των υδατορευμάτων στην έξοδο μίας υπολεκάνης είναι το άθροισμα των συστατικών της απορροής που δημιουργείται από τις HRUs και τις GWRs που περιέχονται σε αυτή την υπολεκάνη. Επιπρόσθετα, αυτή η απορροή συμβάλλει στην απορροή των υδατορευμάτων οποιασδήποτε άλλης υπολεκάνης που έχει σχεδιαστεί να βρίσκεται κατάντη (παράμετρος `subbasin_down`). Η ενότητα `subbasin` ενεργοποιείται αν η διάσταση `nsub` ορίζεται μεγαλύτερη από 0 και η παράμετρος ελέγχου `subbasin_flag = 1`.

#### *Ενότητα map\_results*

Η ενότητα αποτελεσμάτων χάρτη (`map_results`) διευκολύνει τη σύνδεση του PRMS\_IV με άλλα μοντέλα. Η ενότητα συνοψίζει το προσομοιωμένα αποτελέσματα σε χωρικές και χρονικές αναλύσεις που απαιτούνται από το συνδεδεμένο μοντέλο. Γράφει τα αποτελέσματα για κάθε HRU σε μορφή καννάβου συγκεντρωμένα σε τέσσερις χρονικές κλίμακες: εβδομαδιαία, μηνιαία, ετήσια και για τη συνολική χρονική περίοδο προσομοίωσης. Τα συγκεντρωμένα αποτελέσματα μπορούν να γραφούν σε μονάδες της μεταβλητής εξόδου ή να μετατραπούν από ίντσες ανά ημέρα είτε σε πόδια ανά ημέρα, ή σε εκατοστά ανά ημέρα ή σε μέτρα ανά ημέρα. Η ενότητα `map_results` ενεργοποιείται όταν η παράμετρος ελέγχου `mapOutON_OFF = 1`.

Για τον έλεγχο των υπολογισμών της ενότητας `map_results` ορίζονται τέσσερις παράμετροι στο αρχείο παραμέτρων. Η παράμετρος `mapvars_units` ορίζει τις μονάδες εξόδου. η παράμετρος `ncol` ορίζει τον αριθμό των στηλών για κάθε σειρά των σχεδιασμένων αποτελεσμάτων. Η παράμετρος `prms_warmup` ορίζει τον αριθμό των ετών που θα εκτελέσει η προσομοίωση πριν από τον υπολογισμό των συνοπτικών αποτελεσμάτων. Οι συνόψεις των αποτελεσμάτων καννάβου εγγράφονται σε ένα ή περισσότερα αρχεία αποτελεσμάτων χάρτη ως χρονοσειρές των επιλεγμένων μεταβλητών κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια της χρονικής συχνότητας όπως αυτή ορίζεται από τη μεταβλητή `mapvars_freq`.

## 5 Η λεκάνη απορροής και η προετοιμασία των δεδομένων για το μοντέλο PRMS

---

### 5.1 Το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας

Η λεκάνη απορροής που μελετάται σε αυτή την εργασία ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας έχει μελετηθεί εκτενώς σε ερευνητικό έργο του ΕΜΠ (Ναλμπάντης και Κουτσογιάννης, 1997) και στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία από αυτό.

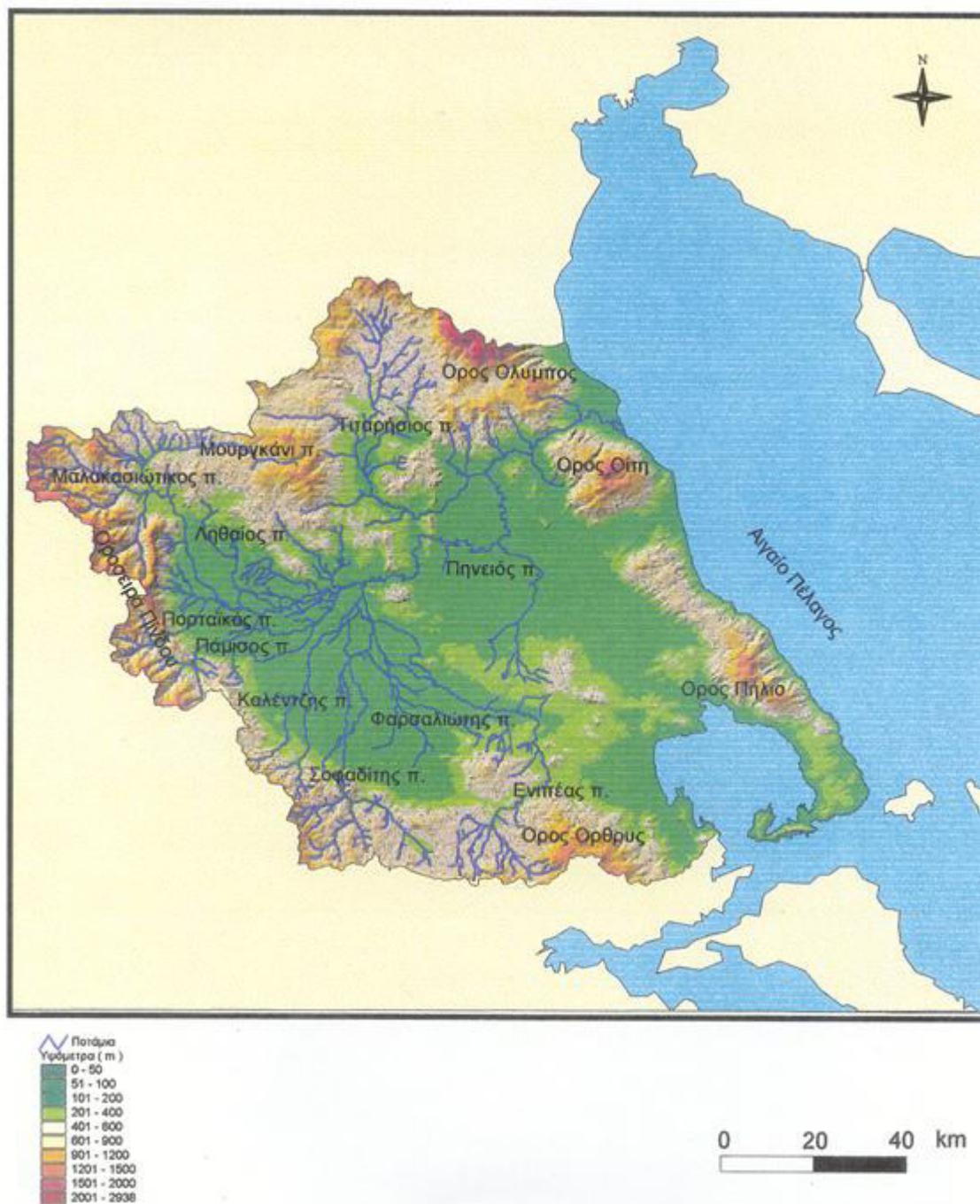
Το υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας συμπίπτει σχεδόν με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα. Μόνο μικρά τμήματα του γεωγραφικού διαμερίσματος ανήκουν σε γειτονικά υδατικά διαμερίσματα και αντίστροφα. Η συνολική έκταση του διαμερίσματος είναι 13153 km<sup>2</sup>. Περιλαμβάνει σχεδόν όλο το νομό Λάρισας και πολύ μεγάλο μέρος των νομών Μαγνησίας, Τρικάλων και Καρδίτσας καθώς και μικρά τμήματα των νομών Πιερίας, Γρεβενών και Φθιώτιδας.

Η γεωμορφολογική εικόνα του υδατικού διαμερίσματος είναι απλή με τα πεδινά τμήματα στις κεντρικές περιοχές και τα ορεινά τμήματα στις περιφερειακές. Στο κέντρο βρίσκεται ο θεσσαλικός κάμπος ο οποίος περιβάλλεται από τις οροσειρές Ολύμπου – Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου – Όσσας στα ανατολικά. Ο κάμπος χωρίζεται σε δύο ανεξάρτητες από υδρολογική άποψη πεδινές εκτάσεις από τα Χαλκηδόνια όρη.

Το μέσο υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος είναι 285 m.

Η κυριότερη λεκάνη απορροής του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας είναι η λεκάνη του Πηνειού με έκταση περίπου 9448 km<sup>2</sup> και φυσικά καλύπτει ένα πολύ μεγάλο μέρος του διαμερίσματος. Οι κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού, οι οποίοι συνθέτουν υπολεκάνες ανάλογα με τον ορισμό των εξόδων τους, είναι ο Ενιπέας, ο Φαρσαλιώτης, ο Σοφαδίτης και ο Καλέντζης στα νότια, ο Πλιούρης (ή Πάμισος), ο Πορταϊκός, το Μουργκάνι και ο Μαλακασιώτης στα δυτικά και νοτιοδυτικά και ο Λήθαιος, ο Νεοχωρίτης και ο Τιταρήσιος στα βόρεια.

Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (Πηγή: Ναλμπάντης και Κουτσογιάννης, 1997)

Η κύρια χρήση νερού στο υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας είναι η αρδευτική λόγω των πολλών και μεγάλων καλλιεργήσιμων εκτάσεων.

## 5.2 Η λεκάνη απορροής του Πηνειού με έξοδο στον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα

Η λεκάνη που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας και έχει έξοδο στον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα. Το μεγαλύτερο μέρος της υπάγεται στο νομό Τρικάλων ενώ κάποια μικρά τμήματα στα βόρεια υπάγονται στο νομό Γρεβενών. Η θέση της υπό μελέτη λεκάνης σε



σχέση με τη Θεσσαλία αλλά και την υπόλοιπη Ελλάδα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 5.2: Θέση λεκάνης σε απεικόνιση στο Google earth

Στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής ρέει ο Πηνειός αλλά και άλλοι παραπόταμοί του με σημαντικότερους τον Μαλακασιώτη στα βορειοδυτικά και το Μουργκάνι στα βορειοανατολικά.

## 5.3 Γεωγραφικά δεδομένα

### 5.3.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS της εταιρίας Esri και συγκεκριμένα η έκδοση ArcMap 10.2.2. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εξαγωγή υδρολογικών πληροφοριών, γιατί, εκτός από τις γενικές λειτουργίες των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS), όπως η συλλογή, η επεξεργασία, η ανάλυση και η παρουσίαση χωρικών και γεωγραφικών δεδομένων, παρέχει αρκετά εξειδικευμένα εργαλεία που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με υδρολογικές διεργασίες. Βέβαια, δεν είναι άμεσα συμβατό με το μοντέλο PRMS και τα δεδομένα που χρειάστηκε να εισαχθούν σε αυτό από το ArcMap έπρεπε πρώτα να υποστούν μια σχετικά απλή επεξεργασία είτε σε λογιστικό φύλλο είτε σε αρχείο .txt. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό αυτό για την επεξεργασία των γεωγραφικών και χωρικών δεδομένων.

### 5.3.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ ή DEM από το Digital Elevation Model) της ευρύτερης περιοχής μελέτης χορηγήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. και έχει διάσταση κανονικοποιημένου καννάβου στο έδαφος 5 m. Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του είναι το ΕΓΣΑ '87. Αφού έγινε εισαγωγή του στο λογισμικό ArcMap 10.2.2, ακολούθησε η ανάλυση που περιγράφεται στη συνέχεια.

### 5.3.3 Δημιουργία υδρογραφικού δικτύου

Αρχικά, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους περικόπηκε κατάλληλα από την υπό μελέτη λεκάνη απορροής με έξοδο στον υδρομετρικό σταθμό Σαρακίνα με το εργαλείο *Extract by Mask* που βρίσκεται στη διαδρομή: *ArcToolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Extraction*→*Extract by Mask*. Έτσι, το ψηφιακό μοντέλο αφορά μόνο την υπό μελέτη λεκάνη απορροής.

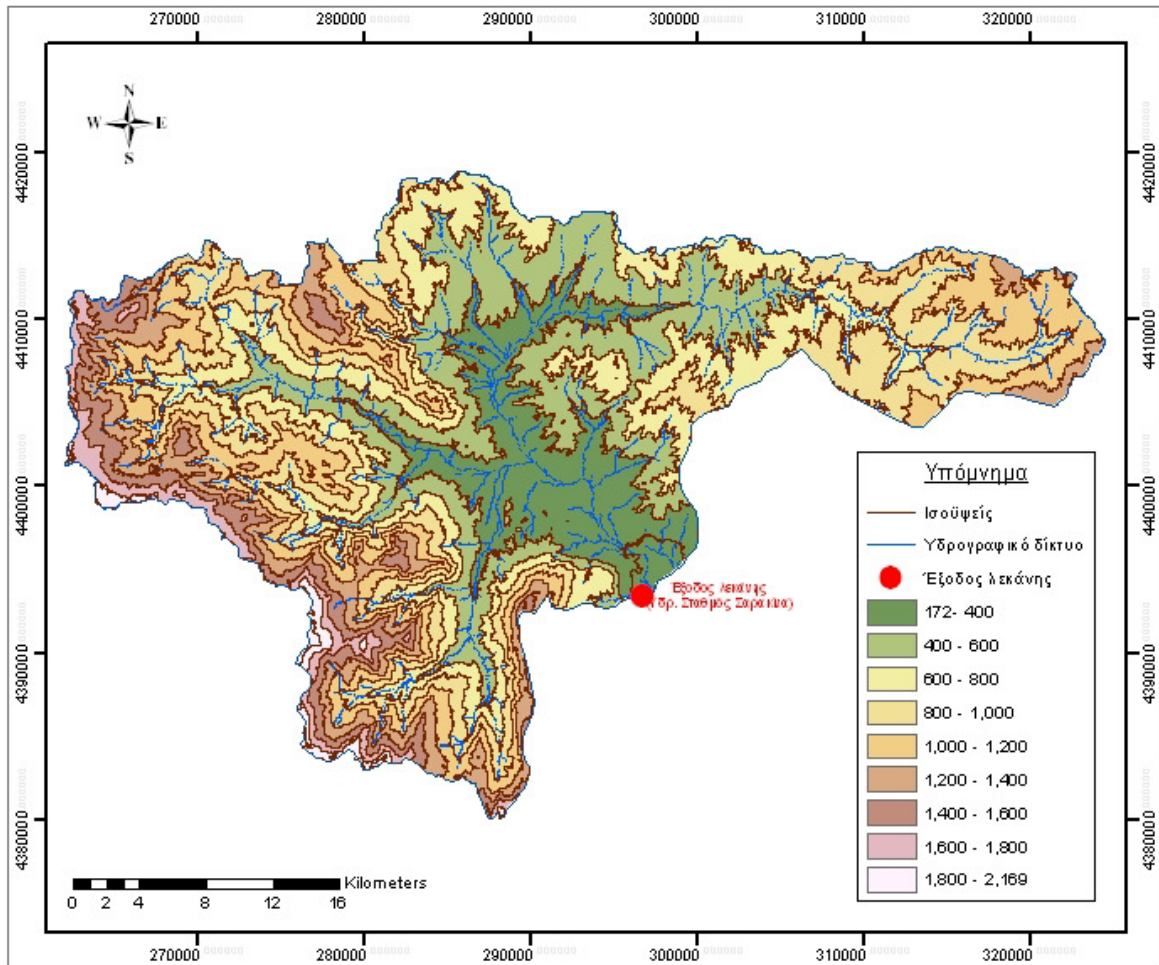
Στη συνέχεια, για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν χονδροειδών σφαλμάτων του ψηφιακού μοντέλου, το οποίο μπορεί να οφείλονται σε πιθανά βυθίσματα, εκτελέστηκε το εργαλείο *Fill* με διαδρομή: *ArcToolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Fill*. Το αποτέλεσμα αυτού του εργαλείου είναι να απορρεύσει επιτυχώς όλο το πλήθος των κελιών του μοντέλου στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Για να εξαχθεί το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, εκτελέστηκαν δύο εργαλεία: για τη δημιουργία του καννάβου διεύθυνσης ροής και του καννάβου συγκεντρωτικής ροής. Το πρώτο εργαλείο είναι το *Flow Direction* με διαδρομή: *ArcToolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Direction*. Το εργαλείο αυτό ουσιαστικά δείχνει τη διεύθυνση στην οποία θα απορρεύσει κάθε φατνίο στο ακριβώς κατάντη γειτονικό του. Το δεύτερο εργαλείο είναι το *Flow Accumulation* με διαδρομή: *ArcToolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Hydrology*→*Flow Accumulation*. Η συγκεντρωτική ροή κάθε φατνίου είναι ουσιαστικά το άθροισμα όλων των φατνίων που απορρέουν σε αυτό.

Στο σημείο αυτό έχει ήδη αρχίσει να διακρίνεται το υδρογραφικό δίκτυο σε μια πρόχειρη μορφή. Για την καλύτερη αναπαράστασή του, έγιναν διάφορες δοκιμές και προσδιορίστηκε ένα κατώφλι φατνίων πάνω από το οποίο θεωρήθηκε ότι υφίσταται υδρογραφικό δίκτυο και κάτω από αυτό όχι. Δηλαδή, αν ο αριθμός των φατνίων που απορρέουν σε ένα άλλο είναι μεγαλύτερος από το κατώφλι, τότε αυτό αποτελεί υδρογραφικό δίκτυο. Αν απορρέει αριθμός μικρότερος από το κατώφλι δεν αποτελεί υδρογραφικό δίκτυο. Έπειτα, με τον κατάλληλο χρωματισμό όλων των φατνίων υδρογραφικού δικτύου για να υπάρχει αντίθεση με την υπόλοιπη λεκάνη έγινε δυνατή η κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική αναπαράστασή του, Παπαγεωργάκη (2012).

Η απεικόνιση της λεκάνης απορροής έτσι όπως προέκυψε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) με τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε, αλλά και τη δημιουργία των ισοϋψών καμπύλων με το εργαλείο *Contour* με διαδρομή: *ArcToolbox*→*Spatial Analyst Tools*→*Surface*→*Contour* παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.





Σχήμα 5.3: Η λεκάνη απορροής με τις ισοϋψείς καμπύλες, το υδρογραφικό δίκτυο αλλά και τη διακύμανση των υψομέτρων

### 5.3.4 Υπολογισμός μορφομετρικών χαρακτηριστικών

#### Μέγεθος λεκάνης απορροής

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής έχει σημασία αφού επηρεάζει γενικά τόσο τη συνολική απορροή (water yield) στην έξοδό της, όσο και το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και, κατά συνέπεια, και το σχήμα του υδρογραφήματος. Η παραπάνω σχέση δεν είναι βέβαια γραμμική αφού τα γεωλογικά, τα 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 είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης (Τσακίρης, 2013).

Η σχέση μεγέθους λεκάνης και απορροής χρειάζεται επιπλέον ιδιαίτερη προσοχή, αφού το μέγεθος αυτής επηρεάζει όλους τους άλλους παράγοντες της λεκάνης και 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 την εκτίμηση του μεγέθους της λεκάνης απορροής που μελετάται στην παρούσα εργασία έγινε μέτρηση της επιφάνειας που περικλείει ο υδροκρίτης με το λογισμικό ArcMap και προέκυψε  $1076.1 km^2$  περίπου.

## Υψόμετρο λεκάνης απορροής

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής έχει άμεση σχέση τόσο με τα κατακρημνίσματα που δέχεται όσο και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σε αυτή (Τσακίρης, 2013). Συγκεκριμένα, τα κατακρημνίσματα αυξάνουν όσο αυξάνεται το υψόμετρο της λεκάνης μέχρι και το υψόμετρο των 2.5 km περίπου και από εκεί και πάνω παρατηρείται ελάττωση. Αντίθετα, η θερμοκρασία μειώνεται με το υψόμετρο. Η άμεση σχέση του υψομέτρου της λεκάνης με τα κατακρημνίσματα και τη θερμοκρασία συντελεί και στον επηρεασμό της απορροής από το υψόμετρο γιατί μεγαλύτερο ύψος κατακρημνισμάτων συντελεί στην αύξηση της απορροής και χαμηλότερες ή υψηλότερες θερμοκρασίες συνεπάγονται ελάττωση ή αύξηση της εξάτμισης αντίστοιχα. Επιπλέον, η θερμοκρασία καθορίζει και το ποσοστό των κατακρημνισμάτων που πέφτουν υπό μορφή χιονιού, καθώς και τη διάρκεια παραμονής του στο έδαφος. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν με τη σειρά τους την απορροή στην έξοδο της λεκάνης σημαντικά.

Από τα διάφορα υψόμετρα της λεκάνης απορροής αυτά που είναι πιο σημαντικά και τη χαρακτηρίζουν είναι το μέσο, η μέση τιμή, το μέγιστο και το ελάχιστο. Το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο προσδιορίζονται εύκολα από μετρήσεις και στη συγκεκριμένη περίπτωση προσδιορίστηκαν από το ΨΜΕ. Η μέση τιμή του υψομέτρου προσδιορίζεται με τη χάραξη της υψομετρικής καμπύλης της λεκάνης απορροής η οποία ορίζεται ως η καμπύλη που χαράσσεται σε σύστημα συντεταγμένων με τεταγμένη κάθε φορά το υψόμετρο και τετμημένη την επιφάνεια των εκτάσεων που βρίσκονται πάνω από αυτό το υψόμετρο. Έτσι, η μέση τιμή του υψομέτρου εκτιμάται από τη διάμεσο, δηλαδή λαμβάνεται η τιμή του υψομέτρου της υψομετρικής καμπύλης για την οποία το 50% της έκτασης της λεκάνης απορροής βρίσκεται πάνω από αυτό το υψόμετρο. Το μέσο υψόμετρο, το οποίο είναι και το σημαντικότερο, υπολογίζεται αφού πρώτα διαιρεθεί η λεκάνη σε υποπεριοχές και υπολογισθεί το μέσο υψόμετρο κάθε μίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι υποπεριοχές αυτές είναι μεταξύ των διάφορων κλάσεων του υψομέτρου στο ΨΜΕ. Τελικά, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$Z_m = \frac{\sum (Z_i \times A_i)}{\sum A_i} \quad (6.1)$$

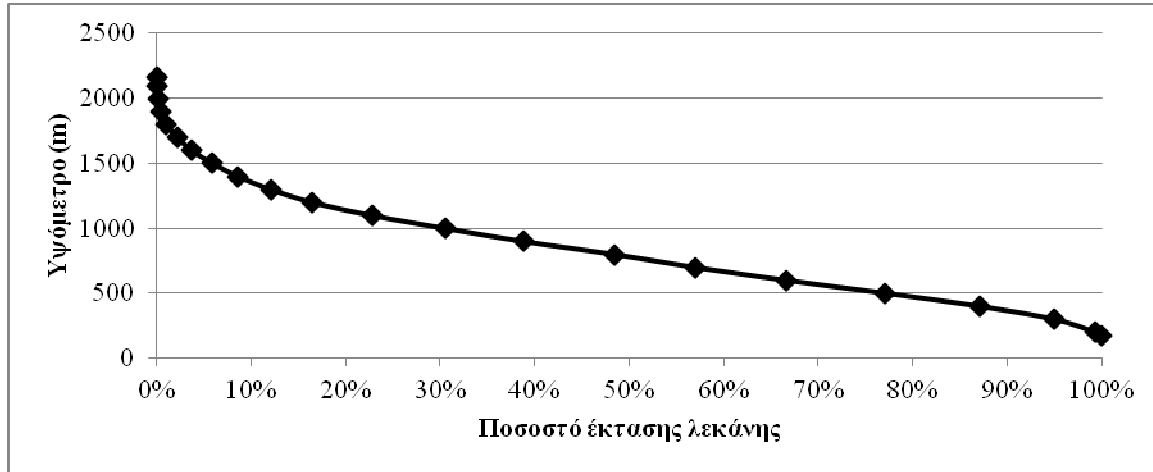
όπου

$Z_m$	είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής
$Z_i$	είναι το μέσο υψόμετρο κάθε υποπεριοχής
$A_i$	είναι το εμβαδόν κάθε υποπεριοχής

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής όπως προέκυψε από το λογισμικό ArcMap είναι 823.1 m.

Για τη δημιουργία της υψομετρικής καμπύλης της λεκάνης απορροής εφαρμόστηκαν κάποια εργαλεία στο ArcMap και, στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία σε λογιστικό φύλλο. Αρχικά, εφαρμόστηκε το εργαλείο *Reclassify* με διαδρομή: *Spatial Analyst Tools*→*Reclass*→*Reclassify* και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρίστηκε σε κλάσεις υψομέτρου ανά 100 m και δόθηκε ο αύξων αριθμός κάθε κλάσης ως ακέραια τιμή ώστε να μπορεί να γίνει η μετατροπή σε πολύγωνα. Έπειτα, εφαρμόστηκε το εργαλείο *Raster to Polygon* με διαδρομή: *Conversion Tools*→*From Raster*→*Raster to Polygon* και έτσι η επιφάνεια που κάλυπτε κάθε κλάση υψομέτρου έγινε πολύγωνο. Όμως, με τη διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν πολλά ξεχωριστά πολύγωνα για κάθε κλάση τα οποία έπρεπε να συγχωνευθούν για να προκύψει η συνολική επιφάνεια της κάθε κλάσης. Έτσι, εφαρμόστηκε η

εντολή *Merge* στον *Editor* και επιλέχθηκαν διαδοχικά όλα τα πολύγωνα κάθε κλάσης και συγχωνεύτηκαν σε μία ενιαία οντότητα. Έτσι, ο πίνακας ιδιοτήτων περιείχε όλα τα πολύγωνα των κλάσεων και τα εμβαδά τους. Αυτά μεταφέρθηκαν σε ένα λογιστικό φύλλο στο οποίο δημιουργήθηκε η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.4: Υψομετρική καμπύλη λεκάνης απορροής

Τέλος, από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και από την παραπάνω καμπύλη προκύπτει ότι:

- Το ελάχιστο υψόμετρο είναι 171.90 m
- Το μέγιστο υψόμετρο είναι 2169.01 m
- Το διάμεσο υψόμετρο είναι 785.00 m

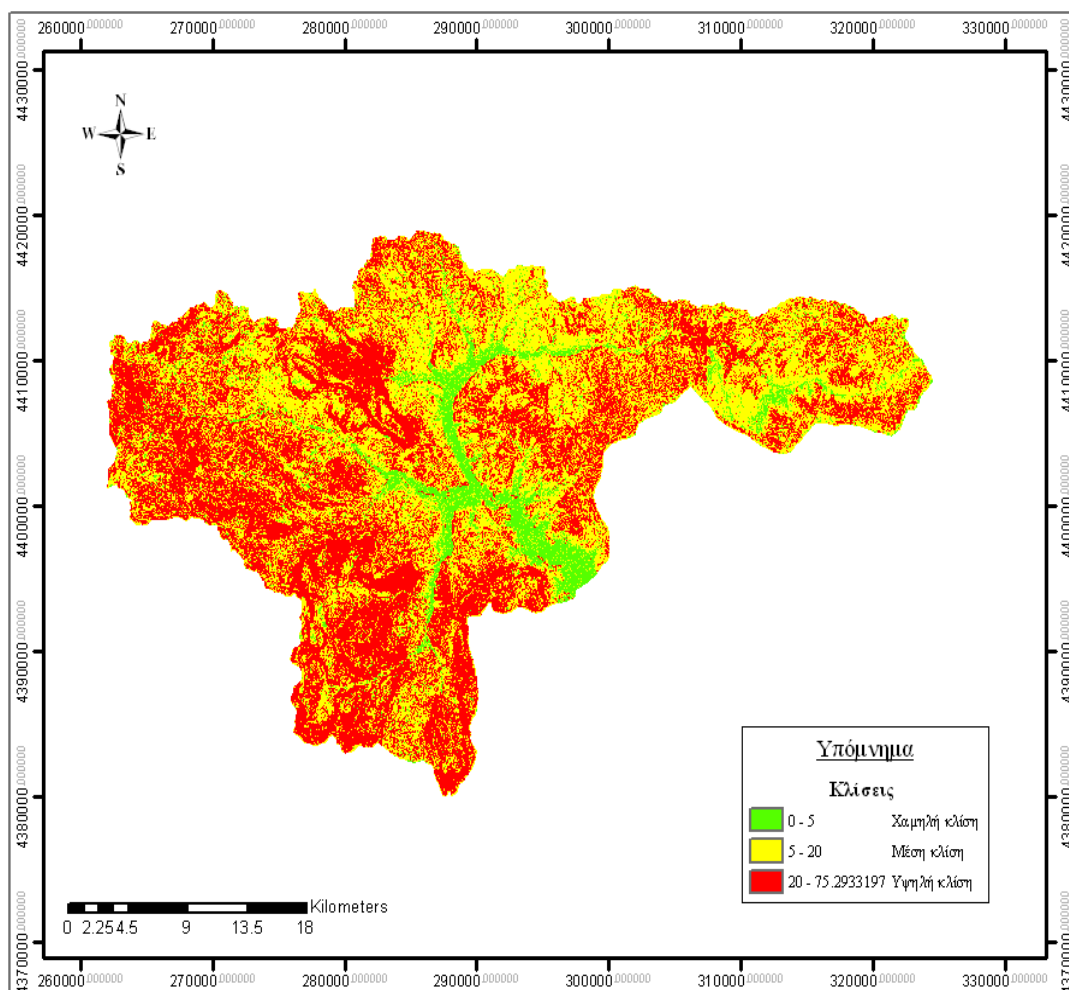
### 5.3.5 Κλίσεις του εδάφους στην υπό μελέτη λεκάνη

Οι κλίσεις που παρουσιάζει το έδαφος σε μία περιοχή παίζουν σημαντικότατο ρόλο για το πως και προς τα που θα κινηθεί το νερό, είτε αυτό προέρχεται από κατακρήμνιση ή από επιφανειακή απορροή. Έτσι, είναι απαραίτητο να ληφθούν σοβαρά υπόψη σε μία υδρολογική μελέτη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η δημιουργία ενός χάρτη κλίσεων του εδάφους έγινε από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του ArcMap. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το *Slope* με διαδρομή: *Spatial Analyst Tools*→*Surface*→*Slope*. Έτσι δημιουργήθηκε ένας χάρτης των κλίσεων της περιοχής σε μοίρες και σε μορφή raster, δηλαδή σε ένα σύνολο από εικονοστοιχεία (pixels). Στη συνέχεια, οι κλίσεις του εδάφους κατηγοριοποιήθηκαν στις τρεις παρακάτω κλάσεις:

- 0 – 5 μοίρες: χαμηλή κλίση
- 5 – 20 μοίρες: μέση κλίση
- 20 και πάνω μοίρες: υψηλή κλίση

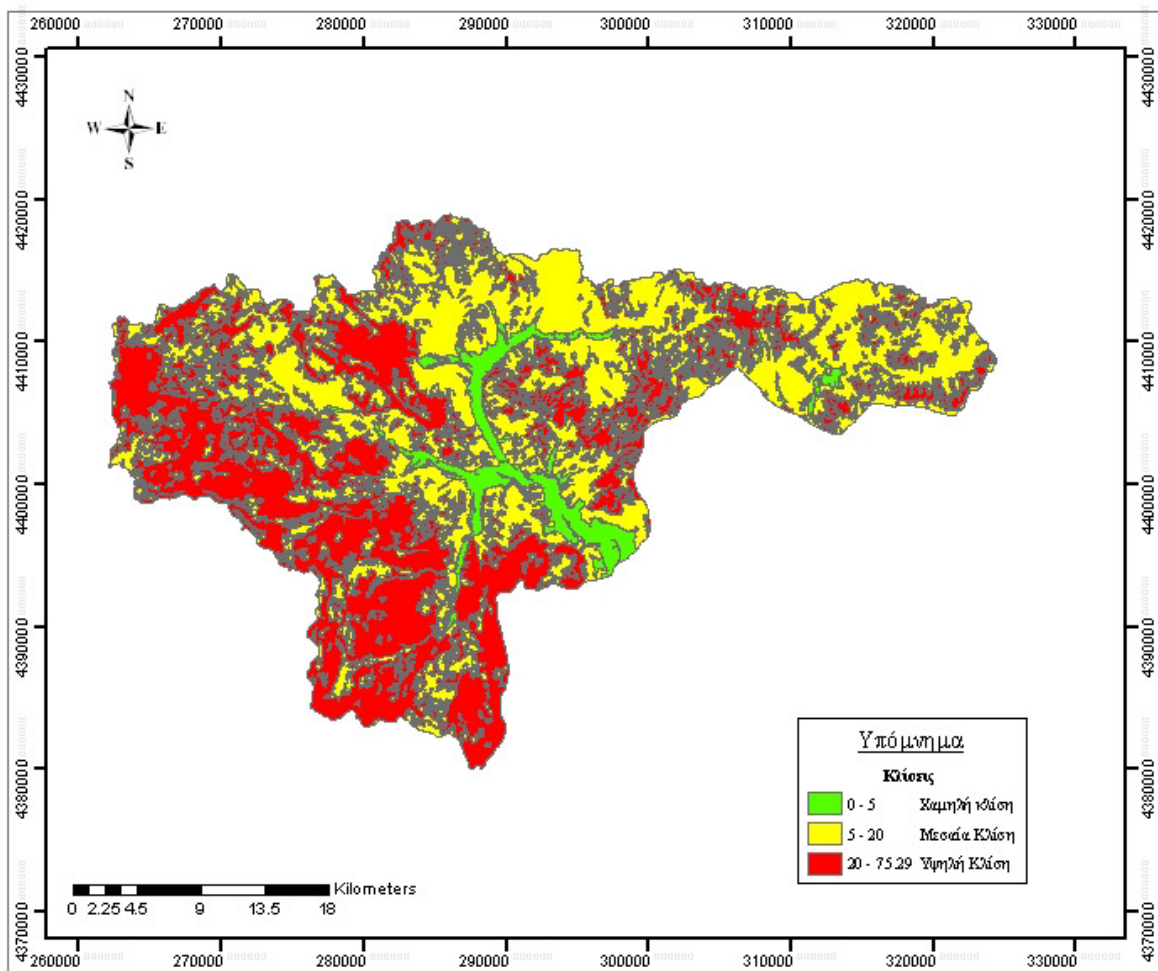
Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.5: Χάρτης κλίσεων του εδάφους της λεκάνης απορροής

Για την περαιτέρω επεξεργασία και αξιοποίηση του παραπάνω χάρτη σε συνδυασμό και με άλλα δεδομένα (π.χ. κάλυψη γης) κρίθηκε απαραίτητη η μετατροπή του σε ξεχωριστές διανυσματικές οντότητες και συγκεκριμένα σε πολύγωνα. Αρχικά, οι τιμές του κάθε κελιού – εικονοστοιχείου του χάρτη έπρεπε να μετατραπούν σε ακέραιες για τις περαιτέρω διαδικασίες. Αυτό έγινε με την εντολή *Reclassify* με διαδρομή: *Spatial Analyst Tools*→*Reclass*→*Reclassify* και η κλάση 0 – 5 συμβολίστηκε με 1, η κλάση 5 – 20 με 2 και η κλάση 20 και πάνω με 3. Στη συνέχεια, έπρεπε να εξομαλυνθούν όσο γινόταν οι διάφορες γωνίες των σχηματισμών του χάρτη και να γενικευτούν κάποιες πολύ μικρές περιοχές μιας και τόσο υψηλή ακρίβεια θα ήταν περιττή για το σύνολο της λεκάνης που είναι μια μεγάλη περιοχή, αλλά και για την ταχύτητα των υπολογισμών και την αναπαράσταση στην οθόνη. Αυτή η διαδικασία έγινε με την εκτέλεση του εργαλείου *Majority Filter* με διαδρομή: *Spatial Analyst Tools*→*Generalization*→*Majority Filter* διαδοχικές φορές για την όσο καλύτερη γενίκευση. Το φίλτρο που εφαρμόζεται με αυτό το εργαλείο, αποδίδει στο κεντρικό εικονοστοιχείο ενός τετραγώνου με 3x3 εικονοστοιχεία, την τιμή που βρίσκεται σε πλειοψηφία στα γειτονικά του 8. Έπειτα, έγινε η μετατροπή από τη μορφή raster σε πολύγωνα με το εργαλείο *Raster to Polygon* με διαδρομή: *Conversion Tools*→*From Raster*→*Raster to Polygons* και ο χάρτης πλέον απέκτησε διανυσματική μορφή. Όμως, με τη διαδικασία αυτή, δημιουργήθηκαν πάρα πολλές χιλιάδες πολύγωνα και ιδιαίτερα πάρα πολλά πολύγωνα πολύ μικρής έκτασης που ήταν άχρηστα. Βέβαια, και αρκετά πολύγωνα

μεγαλύτερης έκτασης δεν παρείχαν κάποια διαφορετική και σημαντική πληροφορία, σε σχέση πάντα με το συνολικό μέγεθος της λεκάνης απορροής και της επιθυμητής ακρίβειας. Έτσι, έγινε μια διαδικασία γενίκευσης έτσι ώστε να μειωθεί το πλήθος των πολυγώνων με ενσωμάτωση και ενοποίηση με γειτονικά πολύγωνα, χωρίς να μειωθεί σε σημαντικό βαθμό η εναπομείνουσα πληροφορία. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *Eliminate* με διαδρομή: *Data Management Tools*→*Generalization*→*Eliminate*. Το συγκεκριμένο εργαλείο ενοποιεί πολύγωνα, τα οποία έχουν επιλεγεί με βάση μία συγκεκριμένη ιδιότητά τους, με τα γειτονικά τους. Η ιδιότητα που εξετάστηκε για την ενοποίηση των πολυγώνων είναι η έκταση τους καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εξάλειψη πολυγώνων μικρής έκτασης με ενοποίησή τους με άλλα μεγαλύτερης έκτασης δεν επηρεάζει σημαντικά την πιστότητα της αναπαράστασης των κλίσεων. Έτσι, μετά από δοκιμές επιλέχθηκαν τα πολύγωνα με έκταση μικρότερη από 50000m<sup>2</sup> με την εντολή *Select By Attributes* και εφαρμόστηκε το εργαλείο *Eliminate*. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.6: Κλίσεις εδάφους της λεκάνης απορροής μετά από επεξεργασία

## 5.4 Υδρολογικά δεδομένα

### 5.4.1 Βροχομετρικά δεδομένα

Τα βροχομετρικά δεδομένα αποτελούν έναν ιδιαίτερα καίριο και σημαντικό παράγοντα για την περαιτέρω υδρολογική μελέτη μιας περιοχής. Έτσι και στην παρούσα εργασία έγινε επιλογή δεδομένων από βροχομετρικούς σταθμούς μέσα αλλά και γύρω από τη λεκάνη

απορροής. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας με την ονομασία Υδροσκόπιο. Από την πληθώρα διαθέσιμων σταθμών μέσα και έξω από τη λεκάνη, επιλέχθηκαν αυτοί που βρίσκονταν σε λειτουργία για μεγάλη χρονική διάρκεια έτσι ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερες ελλείψεις δεδομένων. Βρέθηκαν μάλιστα κάποιοι που είχαν συνεχή ημερήσια δεδομένα για δέκα και πλέον χρόνια. Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν είναι:

- Εντός λεκάνης
  - ✓ Αγιόφυλλο
  - ✓ Μαλακάσιο
  - ✓ Μετέωρα
  - ✓ Χρυσομηλιά
  - ✓ Μεγάλη Κερασιά
- Εκτός λεκάνης
  - ✓ Βερδικούσα
  - ✓ Κατάφυτο

Τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά κάθε σταθμού παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.1: Βροχομετρικοί σταθμοί

ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	ID	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΝΟΜΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ	ΦΟΡΕΑΣ
					ΜΗΚΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ		
08	11	1323	ΑΓΙΟΦΥΛΛΟ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°34'	39°52'	584.10	ΥΠΕΚΑ
08	11	2228	ΜΑΛΑΚΑΣΙΟ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°17'	39°47'	850.70	ΥΠΕΚΑ
08	11	2278	ΜΕΤΕΩΡΑ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°39'	39°44'	241.80	ΥΠΕΚΑ
08	11	3197	ΧΡΥΣΟΜΗΛΙΑ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°30'	39°36'	911.10	ΥΠΕΚΑ
08	11	2251	ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°29'	39°45'	509.00	ΥΠΕΚΑ
08	12	1539	ΒΕΡΔΙΚΟΥΣΑ	ΛΑΡΙΣΑΣ	21°59'	39°47'	914.60	ΥΠΕΚΑ
04	11	1967	ΚΑΤΑΦΥΤΟ	ΤΡΙΚΑΛΩΝ	21°15'	39°38'	1018.40	ΥΠΕΚΑ

Για την εφαρμογή των βροχομετρικών δεδομένων των παραπάνω σταθμών στο μοντέλο πρέπει πρώτα να γίνουν κάποιες διαδικασίες επεξεργασίας τους οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### Έλεγχος ομογένειας βροχομετρικών δεδομένων

Ο έλεγχος ομογένειας αναφέρεται στον έλεγχο της ποιότητας των παρατηρήσεων, δηλαδή ελέγχεται κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε με τις ίδιες συνθήκες μέτρησης, καθώς η αλλαγή της θέσης του οργάνου, η αντικατάσταση του οργάνου και η αλλαγή του παρατηρητή οδηγούν σε μη ομογενή δεδομένα (Τσακίρης, 2013). Ο έλεγχος ομογένειας γίνεται με τη μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης η οποία ουσιαστικά συγκρίνει τα δεδομένα ενός σταθμού με ενός άλλου γειτονικού ή μιας ομάδας γειτονικών σταθμών που αποτελούν τους σταθμούς βάσης και έχει, πρώτα, ελεγχθεί η ομογένεια των δεδομένων τους.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της αθροιστικής καμπύλης, ελέγχονται τα ετήσια ύψη βροχής ενώ, στη συνέχεια, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και για τα μηνιαία και ημερήσια ύψη βροχής χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που προκύπτουν. Αρχικά, για κάθε σταθμό υπολογίζονται τα αθροιστικά ετήσια ύψη βροχής σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\sum X_{i+1} = \sum X_i + X_{i+1} \quad (6.2)$$

όπου

$X_i$	είναι το ετήσιο ύψος βροχής του σταθμού για το υδρολογικό έτος $i$
$i$	είναι η τάξη του νεότερου στοιχείου
$i+1$	είναι η τάξη του παλαιότερου κατά ένα έτος στοιχείου

Έπειτα, επιλέγεται ο σταθμός βάσης που παρουσιάζεται στον άξονα των τετμημένων και ο εξεταζόμενος σταθμός που παρουσιάζεται στον άξονα των τεταγμένων. Έτσι, σχηματίζεται μία καμπύλη που αποτελείται από σημεία με τετμημένες τα αθροιστικά ύψη βροχής του σταθμού βάσης και τεταγμένες τα αθροιστικά ύψη βροχής του εξεταζόμενου σταθμού. Αν η καμπύλη προσεγγίζει την ευθεία χωρίς να δημιουργείται θλάση, σημαίνει πως οι παρατηρήσεις έχουν γίνει κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης ενώ αν δημιουργείται θλάση, σημαίνει πως οι παρατηρήσεις δεν έχουν γίνει κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης και οι διαφορετικές συνθήκες μέτρησης ξεκινούν στο σημείο της θλάσης, στο αντίστοιχο υδρολογικό έτος και άρα οι παρατηρήσεις αποτελούν δύο επιμέρους σύνολα με διαφορετικές συνθήκες μέτρησης.

Για τη διόρθωση των ετήσιων υψών βροχής θεωρούνται αξιόπιστες οι πιο πρόσφατες μετρήσεις και άρα η διόρθωση γίνεται στο παλιότερο υποσύνολο πολλαπλασιάζοντας τα ύψη με ένα συντελεστή αναγωγής που προκύπτει ως ο λόγος των κλίσεων των δύο ευθύγραμμων τμημάτων της διπλής αθροιστικής καμπύλης σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4.3)$$

όπου

$\alpha$	είναι ο συντελεστής αναγωγής
$\lambda_1$	είναι η κλίση του νεότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης
$\lambda_2$	είναι η κλίση του παλιότερου τμήματος της διπλής αθροιστικής καμπύλης

Βέβαια, αναγκαία προϋπόθεση για να εφαρμοστεί η μέθοδος της διπλής αθροιστικής καμπύλης είναι ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του σταθμού που εξετάζεται και του ή των σταθμών βάσης. Η γραμμική συσχέτιση ελέγχεται με των συντελεστή  $R^2$  που προκύπτει σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (4.4)$$

Όπου  $x$  και  $y$  είναι τα ετήσια ύψη βροχής του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

Ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1, 1]$  και όσο πιο κοντά στα άκρα βρίσκεται η τιμή του, τόσο πιο ισχυρή θεωρείται η συσχέτιση, ενώ αν προσεγγίζει το 0 θεωρείται ότι υφίσταται ανυπαρξία συσχέτισης.



Αν δεν υπάρχουν δεδομένα για το ποιος σταθμός έχει ελεγχθεί για την ομογένεια του και άρα μπορεί να αποτελέσει σταθμό βάσης, όπως συμβαίνει με τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας, τότε υπολογίζεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανά δύο σταθμούς σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

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

Όπου  $x$  και  $y$  είναι τα ετήσια ύψη βροχής του σταθμού βάσης και του εξεταζόμενου σταθμού αντίστοιχα.

Τέλος, αναφέρεται ότι για να είναι στατιστικά σημαντική η συσχέτιση των δύο σταθμών θα πρέπει ο συντελεστής συσχέτισης να είναι μεγαλύτερος κατά απόλυτη τιμή από μία κρίσιμη τιμή που προκύπτει από την επόμενη σχέση.

$$r_c = \frac{2}{\sqrt{N}} \quad (4.6)$$

Όπου  $N$  είναι ο αριθμός των υδρολογικών ετών.

Συνήθως βέβαια, οι απαιτήσεις για την τιμή του συντελεστή συσχέτισης, είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από την παραπάνω κρίσιμη τιμή.

#### Συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Ένα πολύ συχνό φαινόμενο είναι η έλλειψη παρατηρήσεων στον υπό έλεγχο σταθμό. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη συμπλήρωση αυτών των παρατηρήσεων με τη βοήθεια γειτονικών σταθμών οι οποίοι διαθέτουν πλήρη δεδομένα και έχουν ελεγχθεί για την ομογένεια των δεδομένων και για το βαθμό συσχέτισης με τα δεδομένα του υπό συμπλήρωση σταθμού. Έτσι, αν είναι διαθέσιμοι τρεις γειτονικοί σταθμοί βάσης τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση για τη συμπλήρωση της τιμής  $P_x$  του υπό συμπλήρωση σταθμού.

$$P_x = \frac{1}{3} \left[ \frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} + \frac{N_x P_3}{N_3} \right] \quad (4.7)$$

όπου

$P_1, P_2, P_3$	είναι οι αντίστοιχες τιμές στους σταθμούς 1,2,3
$N_1, N_2, N_3$	είναι η κανονική μέση βροχόπτωση στους τρεις παραπάνω σταθμούς
$N_x$	είναι η κανονική βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού

Ως κανονική μέση βροχόπτωση εννοείται η μέση βροχόπτωση από δείγμα 30 ετών.

#### Πολύγωνα Thiessen και αναγωγή στο υψόμετρο της λεκάνης απορροής

Αφού τα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών έχουν ελεγχθεί, ομογενοποιηθεί και συμπληρωθεί, μπορεί να υπολογισθεί το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης απορροής. Για τον υπολογισμό του υπάρχουν τρεις τρόποι (Τσακίρης, 2013):

- Ο αριθμητικός μέσος όρος παρατηρήσεων των σημειακών βροχομετρικών υψών των σταθμών της λεκάνης απορροής
- Τα πολύγωνα Thiessen
- Οι ισοϋέτιες καμπύλες (ή ισόβροχες καμπύλες)



Ο πιο συνηθισμένος τρόπος υπολογισμού του βροχομετρικού ύψους, και αυτός που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία, είναι τα πολύγωνα Thiessen γιατί έχουν ικανοποιητική ακρίβεια, η εφαρμογή τους είναι σχετικά απλή και δεν χρειάζονται κάποιες άλλες προϋποθέσεις όπως οι άλλοι δύο τρόποι.

Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen χρησιμοποιεί τον παράγοντα βάρους που αντιστοιχεί στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού κάθε σταθμού όπως 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  $P_i$  των σταθμών πολλαπλασιασμένες επί τις αντίστοιχες εκτάσεις επηρεασμού  $A_i$  δια της συνολικής έκτασης της λεκάνης  $A$ , όπως παρουσιάζεται στην επόμενη σχέση.

$$P_0 = \frac{\sum A_i P_i}{A} = \sum \left( \frac{A_i}{A} \times P_i \right) \quad (4.8)$$

Γενικά, το σημειακό ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψόμετρου (Τσακίρης, 2013). Η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων σε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που αρχικά ανήκουν. Οι αναγωγές αυτές γίνονται με τη βοήθεια της βροχοβαθμίδας η οποία ορίζεται ως η μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξησης του υψόμετρου. Η βροχοβαθμίδα προκύπτει για κάθε περιοχή από τα μέσα ετήσια βροχομετρικά ύψη των βροχομετρικών σταθμών μιας περιοχής σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών. Για τις υψομετρικές αναγωγές των βροχομετρικών παρατηρήσεων υπολογίζεται ένας διορθωτικός συντελεστής  $\lambda$  σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

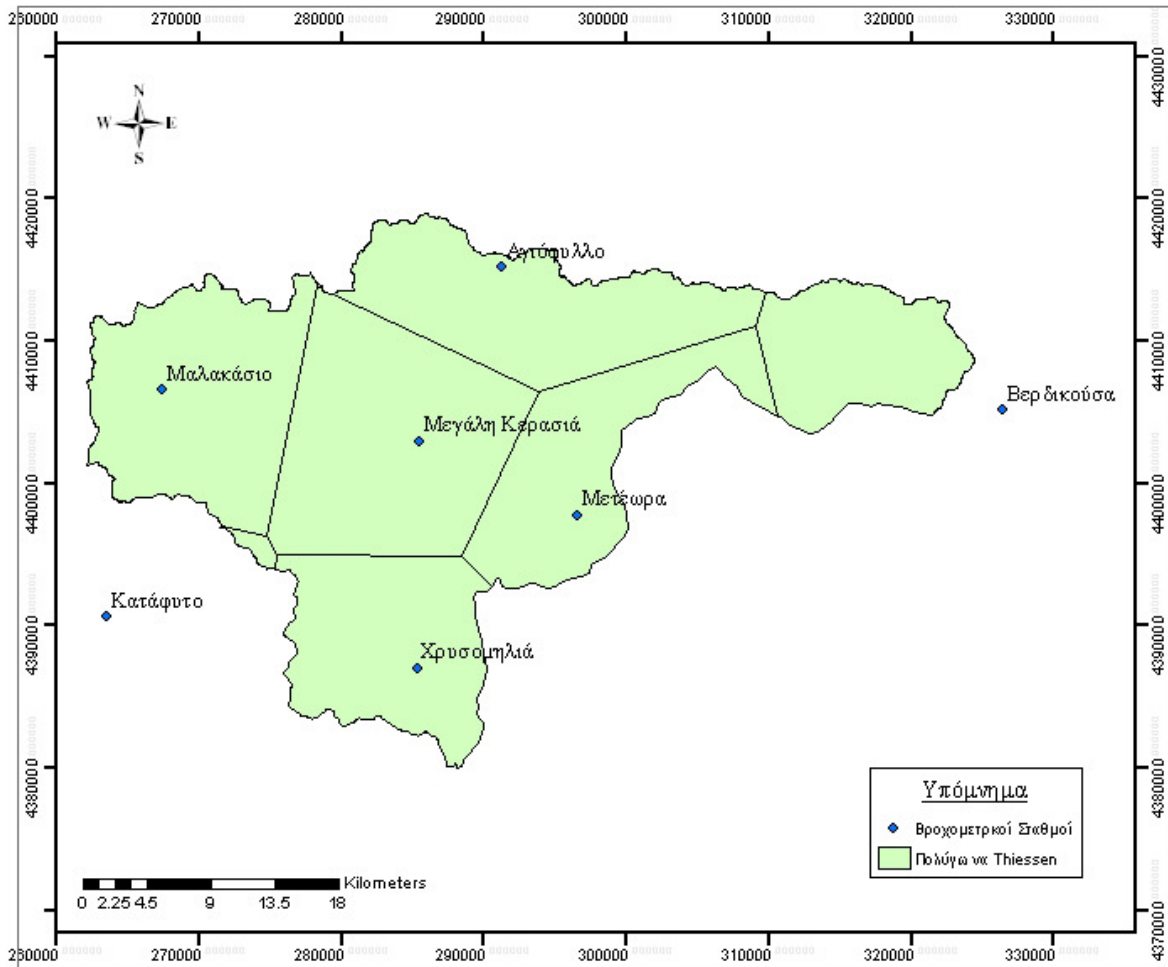
$$\lambda = 1 + \frac{\beta}{P_0 \times 100} \times (z_m - \bar{z}) \quad (4.9)$$

όπου

$\beta$	είναι η βροχοβαθμίδα
$P_0$	είναι η τιμή του ύψους βροχής στην υψομετρική αναγωγή
$z_m$	είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής
$\bar{z}$	είναι ο σταθμικός μέσος των υψόμετρων των βροχομετρικών σταθμών που επηρεάζουν τη λεκάνη απορροής

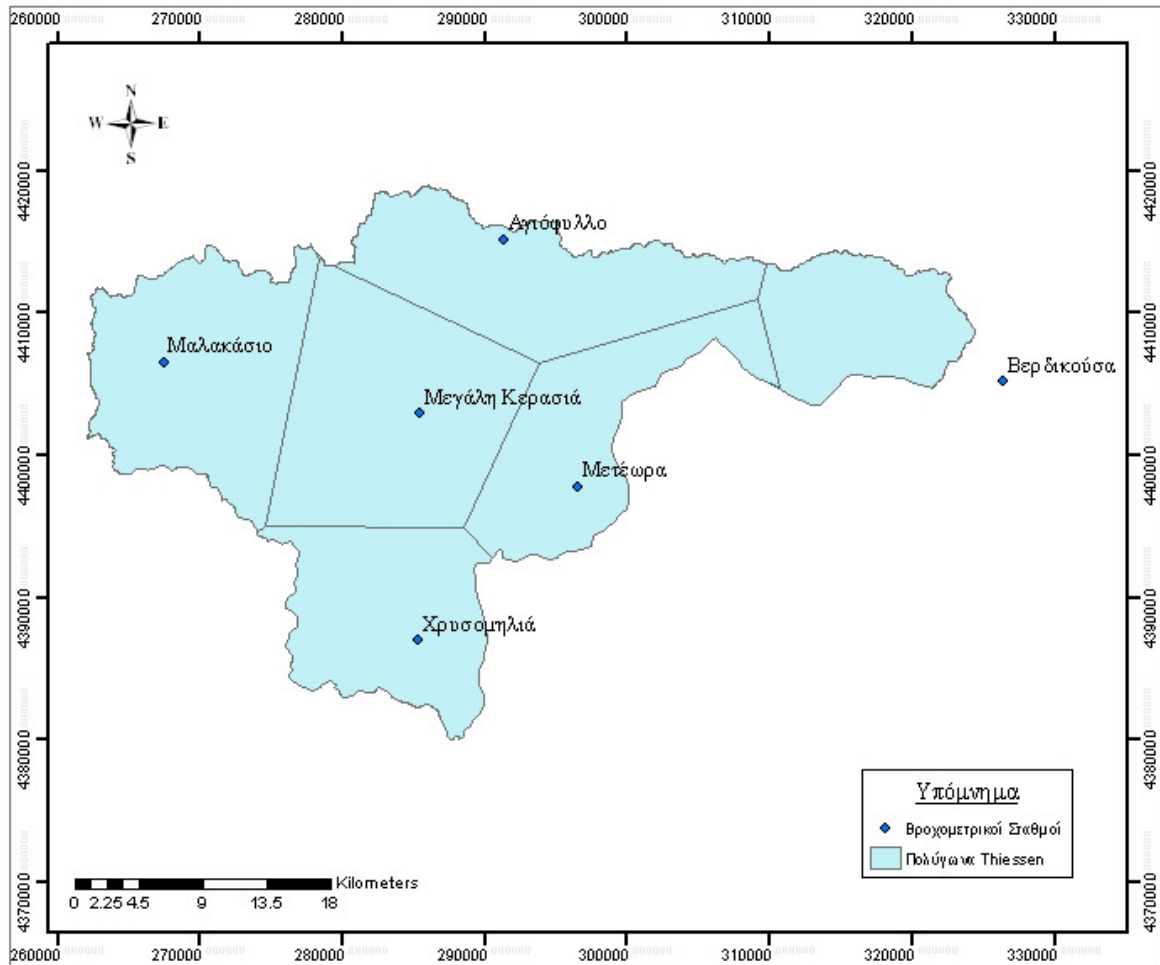
### Εφαρμογή στα δεδομένα

Αρχικά, προσδιορίστηκαν τα πολύγωνα Thiessen των παραπάνω βροχομετρικών σταθμών στο ArcMap με την εντολή *Create Thiessen Polygons* με διαδρομή *Analysis Tools*→*Proximity*→*Create Thiessen Polygons*. Το αποτέλεσμα αυτής της εντολής καθώς και οι θέσεις των σταθμών παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.7: Πολύγωνα Thiessen των σταθμών της λεκάνης απορροής

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, τα δεδομένα του σταθμού Κατάφυτο επηρεάζουν σε πολύ μικρό βαθμό τη λεκάνη απορροής καθώς το αντίστοιχο πολύγωνα Thiessen (στα νοτιοδυτικά) καταλαμβάνει ιδιαίτερα μικρή επιφάνεια. Έτσι, απορρίφθηκε ο σταθμός και έμειναν οι υπόλοιποι έξι σταθμοί. Τα νέα πολύγωνα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



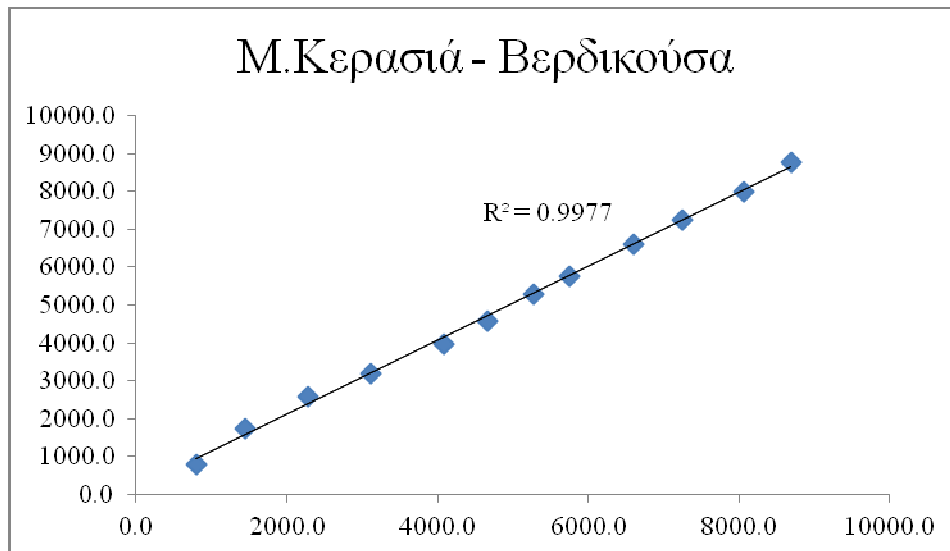
Σχήμα 5.8: Νέα πολύγωνα Thiessen των σταθμών της λεκάνης απορροής

Τα ποσοστά επιρροής του κάθε πολυγώνου και αντίστοιχα του κάθε σταθμού παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

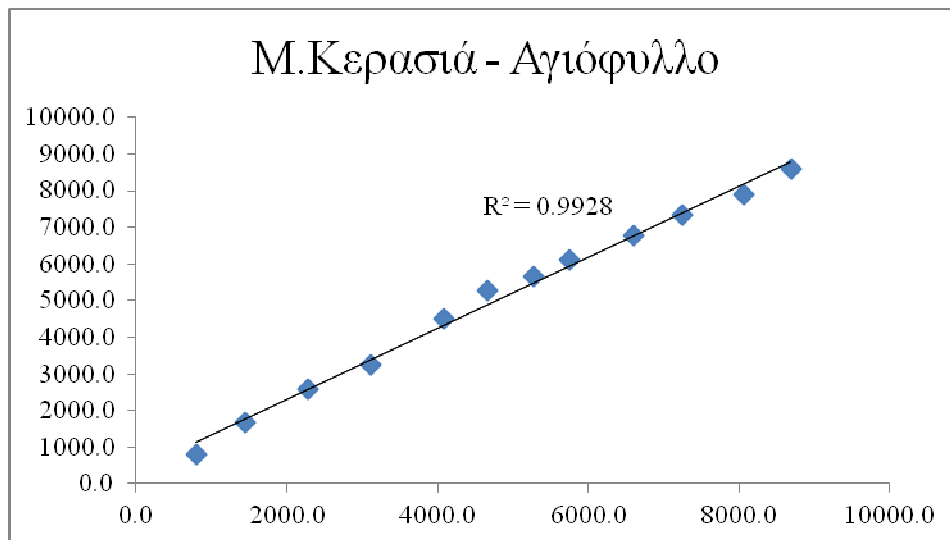
Πίνακας 5.2: Ποσοστά επιρροής των σταθμών στη λεκάνη απορροής

Σταθμός επιρροής	Ποσοστό επιρροής
Χρυσομηλιά	15.35%
Βερδικούσα	10.72%
Μαλακάσιο	19.45%
Μεγάλη Κερασιά	22.38%
Αγιοφυλλο	17.76%
Μετέωρα	14.34%

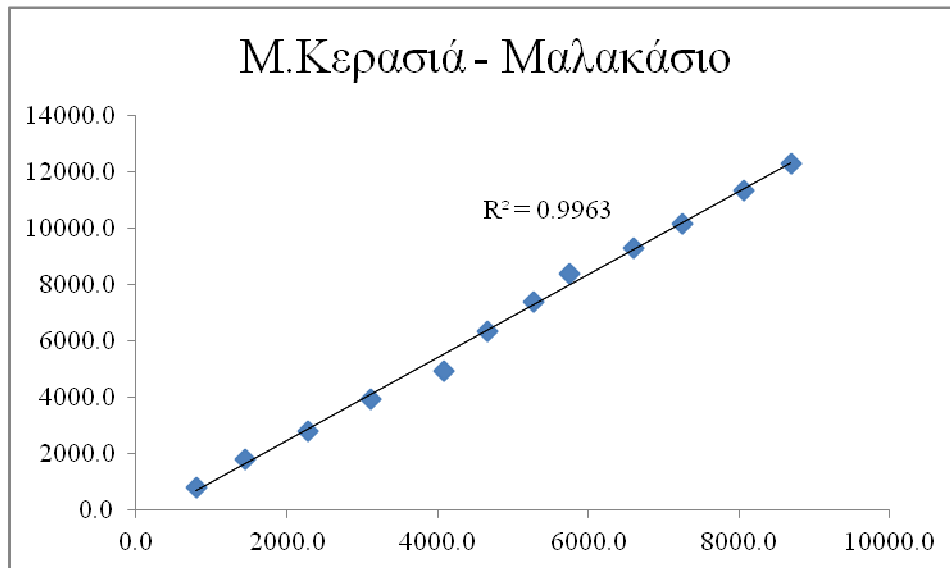
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι ο σταθμός της Μεγάλης Κερασιάς έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στη λεκάνη, έστω και με μικρή διαφορά στα ποσοστά. Έτσι, και λόγω του ότι δεν υπήρχε πληροφορία για την ομογένεια κάποιου συγκεκριμένου σταθμού, επιλέχθηκε αυτός ως σταθμός βάσης και εφαρμόστηκε η μέθοδος της διπλής αθροιστικής καμπύλης σε κάθε έναν από τους υπόλοιπους σταθμούς αφού προηγήθηκε απλή επεξεργασία όλων των δεδομένων των σταθμών σε λογιστικό φύλλο. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε ζεύγος σταθμών παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



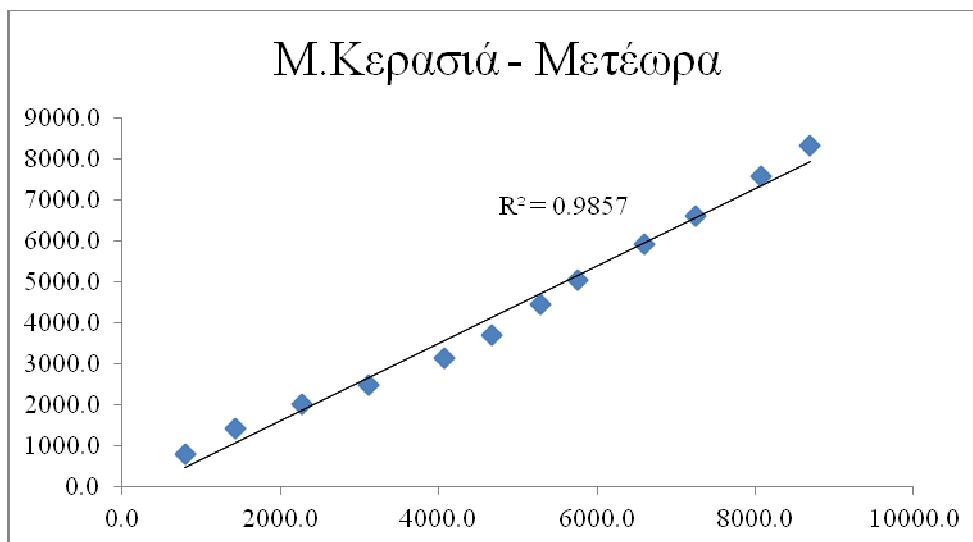
Σχήμα 5.9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τη Μεγάλη Κερασιά και ελεγχόμενο σταθμό τη Βερδικούσα



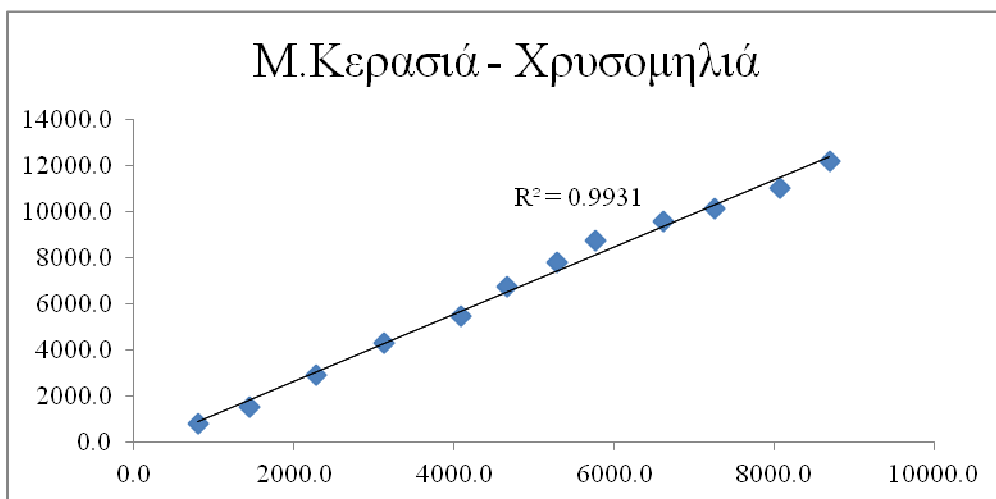
Σχήμα 5.9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τη Μεγάλη Κερασιά και ελεγχόμενο σταθμό το Αγιοφύλλο



Σχήμα 5.9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τη Μεγάλη Κερασιά και ελεγχόμενο σταθμό το Μαλακάσιο



Σχήμα 5.9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τη Μεγάλη Κερασιά και ελεγχόμενο σταθμό τα Μετέωρα



Σχήμα 5.9: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τη Μεγάλη Κερασιά και ελεγχόμενο σταθμό τη Χρυσομηλιά

Οι συντελεστές  $R^2$  για όλα τα ζεύγη είναι πολύ υψηλοί και άρα τα δεδομένα είναι ομογενή και δεν απαιτείται καμία διαδικασία διόρθωσης.

Οι χρονοσειρές δεδομένων που αντλήθηκαν από το Υδροσκόπιο είχαν κάποια κενά, για ελάχιστους μήνες ευτυχώς, τα οποία έπρεπε να συμπληρωθούν. Έτσι, εφαρμόστηκε η διαδικασία που παρουσιάστηκε προηγουμένως για τη συμπλήρωση των βροχομετρικών παρατηρήσεων, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα και των έξι σταθμών.

#### 5.4.2 Θερμοκρασία αέρα

Ως θερμοκρασία αέρα αναφέρεται κυρίως η θερμοκρασία του αέρα υπό σκιά (Τσακίρης, 2013). Η μέτρησή της γίνεται με θερμόμετρα και θερμογράφους που τοποθετούνται μέσα σε ένα μετεωρολογικό κλωβό, στον οποίο ο αέρας μπορεί να κυκλοφορεί ελεύθερα και τα όργανα προστατεύονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Από τα όργανα αυτά μπορούν να ληφθούν ή να υπολογισθούν οι παρακάτω παράμετροι της θερμοκρασίας:

- Η απόλυτη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας ( $T_{max}$  και  $T_{min}$  αντίστοιχα) που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια ορισμένης χρονικής περιόδου.
- Η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας ( $\bar{T}_d$ )
- Η μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας ( $\bar{T}_{mo}$ )
- Η μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας ( $\bar{T}_E$ )
- Το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος (ΗΘΕ), δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία του 24ώρου.
- Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος (ΕΘΕ), 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 υψομέτρου της ατμόσφαιρας. Όμως για την υδρολογία ιδιαίτερα σημαντική είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας εντός της τροπόσφαιρας και στην περίπτωση αυτή η αύξηση του υψομέτρου συνεπάγεται μείωση της θερμοκρασίας. Οι κυριότεροι λόγοι της μείωσης είναι η αραίωση του αέρα και των υδρατμών με το ύψος, η μείωση της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας κλπ.

Η τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε σχέση με τη μονάδα του ύψους, λέγεται θερμοκρασιακή βαθμίδα ή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα και προκύπτει από την επόμενη σχέση.

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

όπου

$T$  είναι η θερμοκρασία  
 $z$  είναι το υψόμετρο

Το αρνητικό πρόσημο τοποθετείται για να δηλώσει ότι η 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/100 m ή 6.0 °C/1 km. Η τιμή αυτή μεταβάλλεται και 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.

Όπως έχει ήδη τονισθεί, για την προσομοίωση μίας λεκάνης απορροής, το μοντέλο PRMS-IV απαιτεί την ύπαρξη χρονοσειρών μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας για ένα τουλάχιστον σταθμό. Έτσι, για την υπό μελέτη λεκάνη, ο μόνος σταθμός που παρείχε τέτοια δεδομένα για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο ήταν αυτός της Μεγάλης Κερασιάς. Τα δεδομένα αυτά περιείχαν ένα σφάλμα καθώς σε κάποιες ελάχιστες περιπτώσεις είχαν εγγραφεί ίδιες τιμές και για τη μέγιστη και για την ελάχιστη θερμοκρασία αέρα με αποτέλεσμα, κατά την εκτέλεση του μοντέλου PRMS-IV, να υπολογίζονται μη ρεαλιστικά αποτελέσματα για διάφορα μεγέθη γιατί η θερμοκρασία αέρα εισέρχεται σε πολλές διαδικασίες αλλά και γιατί οι έξοδοι αρκετών διαδικασιών αποτελούν εισόδους για άλλες. Το σφάλμα αυτό διορθώθηκε, όπου εντοπίστηκε, με μία ελάχιστη δεκαδική αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας αέρα η οποία δεν επηρεάζει τα δεδομένα.

### 5.4.3 Απορροή

Η μετρημένη απορροή αποτελεί έναν παράγοντα καθοριστικής σημασίας για τη μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής και συμβάλλει στην πρόληψη και στο σχεδιασμό έργων. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρημένης απορροής από τον υδρομετρικό σταθμό στη θέση Σαρακίνα στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης για τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού των Nash και Sutcliffe και τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από ερευνητικό έργο του ΕΜΠ (Ναλμπάντης και Κουτσογιάννης, 1997) και παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.2: Μηνιαίες παροχές Πηνειού στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Σαρακίνας (m<sup>3</sup>/s).

Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μια	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
1959-60									4.6	0.04	0	1.14	
1960-61	2.19	3.5	50.12	33.28	20.59		12.42	4.32	0.15	0	0	0	
1961-62	3.25	6.78	7.12	4.46	12.78	31.06	2.18	1.21	0.7	0	0	3.19	6.04
1962-63	18.56	87.74	79.02	90.04	76.28	34.36	26.88	17.45	0.99	0	0	0	35.69
1963-64	4.02	2.57	19.6	1.59	4.46	29.08	16.42	10.27	14.07	3.58	0.74	2.65	9.13
1964-65	5.75	16.56	28.75	19.11			28.88	12.28	3.25	0	0	0	
1965-66	0	1.57	5.77	15.57	5.37	18.26	6.86	5.12	0.74	0	0	5.85	5.44
1966-67	3.96	22.36	28.74		8.05	16.64	23.12	21.46	4.19	1.61	0.24	2.87	
1967-68	1.07	6.69	32.87	52.94	43.24	22.36	13.82	12.86	10.18	0.62	0		
1968-69	4.27	15.94	64.42	46.07	37	56.51	25.96	18.88	7.87	1.41	0.14	3.02	23.46
1969-70	1.59	0.54	30.99	36.41	22.98	71.17	24.7	9.6	3.87	1.72	0.08	0	17.03
1970-71	4.25	4.05	15.38	41.77	34.24	81.66	53	7.69	1.58	0	0.24	0	20.27
1971-72	0.38	3.16	14.49	24.67	38.7	46.34		18.38	0.84	0.91	0.32	0.17	
1972-73	15.53	6.93	3.61	4.19		39.72	47.42	41.83	17.4	4.4	0.6	14.5	
1973-74	24.7		42.44	45.18	66.27	42.06	21.64	15.33	3.76	0.1	0	0	
1974-75	2.59	10.53	4.21	6.26	11.36	29.58	26.5	21.1	1.76	1.28	0.01	0	9.58
1975-76	0.01	4.76	12.08	1.9	33.26	23.94		13.02	4.57	0.95	0	0	
1976-77	1.08	5.41	20.57	8.06	7.75	4.39	4.51	1.14	0.2	0	0	0	4.42
1977-78	0.04	1.86	7.59	18.55	28.3	39.17	29.9	4.48	0	0	0		
1978-79	0.5	2.78	9.91	21.78	31.04	25.21	28.06	25.78	21.32	9.31	0	0	14.52
1979-80		15.4	17.7	20.17	21.19	31.78	19.48	14.67	8.22	1.35	0.5	0.62	
1980-81	6.87	7.15	13.22	10.47	19.28	15.9		8.14	1.63	0	0	0.37	
1981-82	0.41	0.96	15.17	6.33	6.36	12.55	8.08	3.1	0.73	0	0	0.2	4.5
1982-83	1.58	16.76	38.23	9.21	9.11	9.28	7.49	3.14	2.91	1.32	0	0	8.26
1983-84	0.44	2.54	36.61		32.27	25.21	23.95	13.9	8.6	2.58	0	2.78	
1984-85	3.65	4.88	9.85	16.51	16.15								
Μ. τιμή	4.45	10.48	24.34	23.24	25.48	32.10	21.49	12.71	4.97	1.25	0.11	1.62	13.20
Τυπ. Απ	6.30	17.51	19.23	21.24	18.74	19.06	12.94	9.27	5.65	2.06	0.21	3.22	9.51

## 5.5 Κάλυψη γης της λεκάνης απορροής

### 5.5.1 Το υπόβαθρο CORINE

Οι κατηγορίες κάλυψης γης επηρεάζουν σε πολύ σημαντικό βαθμό την απορροή σε μια περιοχή και έτσι πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη σε μια υδρολογική μελέτη. Μια πολύ διαδεδομένη ταξινόμηση των κατηγοριών κάλυψης γης της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι το υπόβαθρο CORINE (Coordination of Information on the Environment). Χρησιμοποιείται σε διάφορες περιβαλλοντικές και όχι μόνο μελέτες, ενώ η κλίμακα του είναι 1:100000 και άρα ικανοποιητική για τέτοιες μελέτες. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το υπόβαθρο κάλυψης γης CORINE του 2000. Η ταξινόμηση του υπόβαθρου CORINE έχει τρία επίπεδα και καταλήγει σε 44 κατηγορίες κάλυψης γης με αντίστοιχους κωδικούς. Οι κατηγορίες αυτές και η διαστρωμάτωσή τους παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.



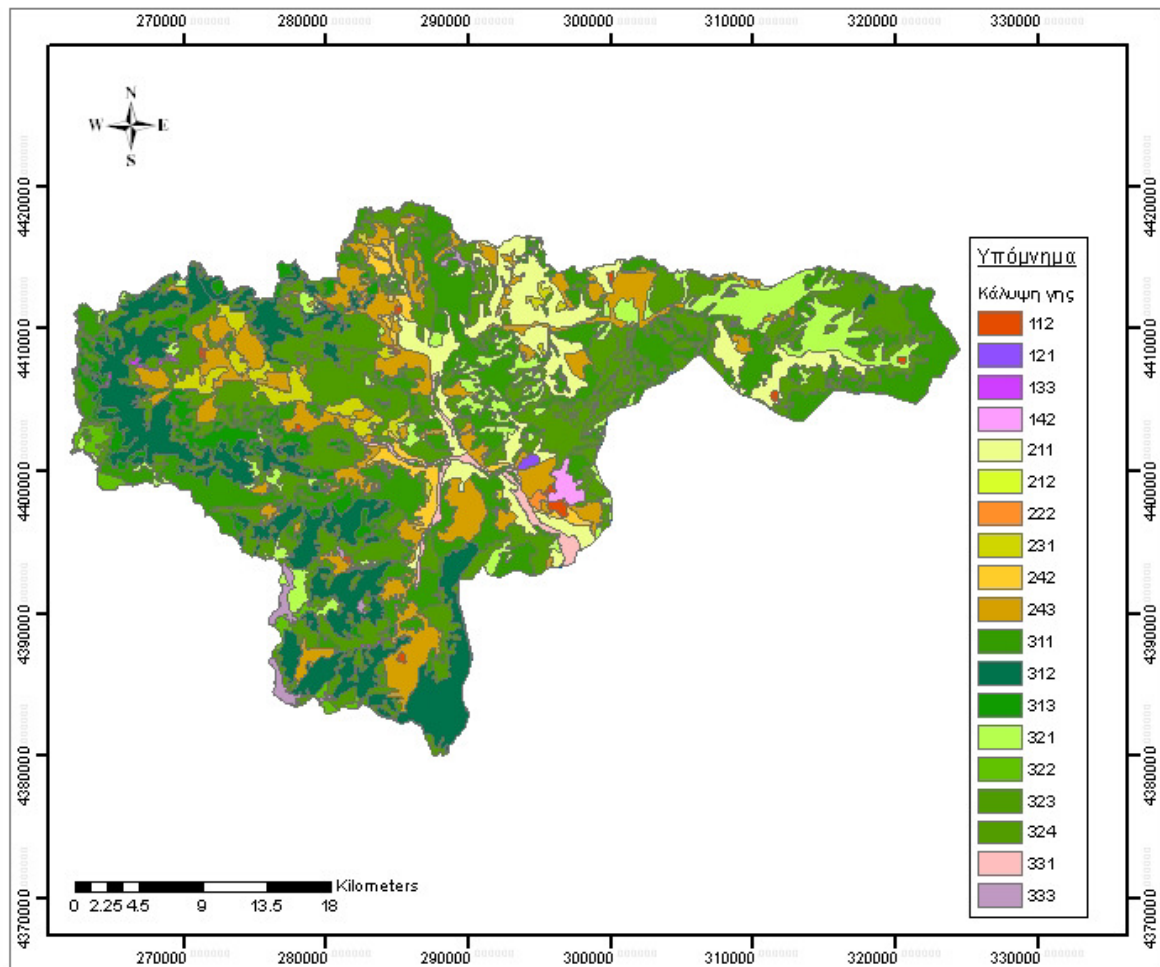
Πίνακας 5.3: Οι κατηγορίες κάλυψης γης κατά το CORINE 2000

1° ΕΠΙΠΕΔΟ	2° ΕΠΙΠΕΔΟ	3° ΕΠΙΠΕΔΟ
1. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	1.1 ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός 1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός
	1.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ-ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	1.2.1 Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες 1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα 1.2.3 Ζώνες λιμένων 1.2.4 Αεροδρόμια
	1.3 ΟΡΥΧΕΙΑ, ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΩΡΟΙ ΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ	1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών 1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων 1.3.3 Χώροι οικοδόμησης
2. ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	1.4 ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΜΗ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ	1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου 1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
	2.1 ΑΡΩΣΙΜΗ ΓΗ	2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη 2.1.3 Ορυζώνες
	2.2 ΜΟΝΙΜΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	2.2.1 Αμπελώνες 2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς 2.2.3 Ελαιώνες
	2.3 ΛΙΒΑΔΙΑ	2.3.1 Λιβάδια
	2.4 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες 2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες 2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης 2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές
3. ΔΑΣΗ ΚΑΙ ΗΜΙΦΥΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	3.1 ΔΑΣΗ	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων 3.1.3 Μικτό δάσος
	3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΘΑΜΝΩΔΟΥΣ Η/ΚΑΙ ΠΟΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
	3.3 ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΜΕ ΛΙΓΗ Ή ΚΑΘΟΛΟΥ ΒΛΑΤΗΣΗ	3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές 3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι 3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση 3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις 3.3.5 Παγετώνες και αέριο χιόνι
4. ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ	4.1 ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΕΝΔΟΧΩΡΑΣ	4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα 4.1.2 Τυρφώνες
	4.2 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι 4.2.2 Αλυκές 4.2.3 Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα
5. ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	5.1 ΧΕΡΣΑΙΑ ΥΔΑΤΑ	5.1.1 Υδατορρέυματα 5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος
	5.2 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΥΔΑΤΑ	5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες 5.2.2 Εκβολές ποταμών 5.2.3 Θάλασσες και ωκεανοί

(Πηγή: Προπτυχιακό Μάθημα Φωτοερμηνείας – Τηλεπισκόπησης, [mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1034/document/CORINE\\_GR.pdf](http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1034/document/CORINE_GR.pdf) )

### 5.5.2 Προετοιμασία των δεδομένων κάλυψης γης για τη λεκάνη

Τα πρωτογενή δεδομένα του CORINE αφορούν τον ελληνικό χώρο στο σύνολό του. Έτσι, πρέπει να γίνει μια πιο ειδική προσέγγιση στις κατηγορίες κάλυψης γης της υπό μελέτη λεκάνης. Αυτό επετεύχθη στο περιβάλλον του λογισμικού ArcMap με μία απλή τομή των επιπέδων της κάλυψης γης του CORINE και του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το *Intersect* με διαδρομή: *Analysis Tools*→*Overlay*→*Intersect*. Έτσι προέκυψε ένα επίπεδο που περιλαμβάνει μόνο τις κατηγορίες κάλυψης γης της υπό μελέτη λεκάνης και παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.5: Χάρτης κάλυψης γης της λεκάνης απορροής σύμφωνα με το CORINE 2000

Από τον παραπάνω χάρτη του Σχήματος 5.4 φαίνεται πως στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής υπάρχουν 19 κατηγορίες κάλυψης γης από τις 44 του CORINE 2000. Η συντριπτική πλειονότητα των κατηγοριών κάλυψης γης αφορά τη βλάστηση και τις γεωργικές εκτάσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι ονομασίες των κατηγοριών κάλυψης γης που υπάρχουν στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.3: Κατηγορίες κάλυψης γης της λεκάνης απορροής

Κωδικός	Κατηγορίες κάλυψης γης
112	Ασυνεχής αστικός ιστός
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες
133	Χώροι οικοδόμησης
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη
222	Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
231	Λιβάδια
242	Σύνθετες καλλιέργειες
243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
311	Δάσος πλατύφυλλων
312	Δάσος κωνοφόρων
313	Μεικτό δάσος
321	Φυσικοί βοσκότοποι
322	Θάμνοι και χερσότοποι
323	Σκληροφυλλική βλάστηση
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η παραπάνω ταξινόμηση των κατηγοριών κάλυψης γης με το CORINE 2000 είναι μη συμβατή με το μοντέλο PRMS-IV γιατί αυτό χρησιμοποιεί διαφορετικό τρόπο ταξινόμησης της κάλυψης γης. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο PRMS-IV χρησιμοποιεί μια μεταβλητή (*cov\_type*) για την κάλυψη γης κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης (HRU), η οποία λαμβάνει τις πέντε παρακάτω τιμές:

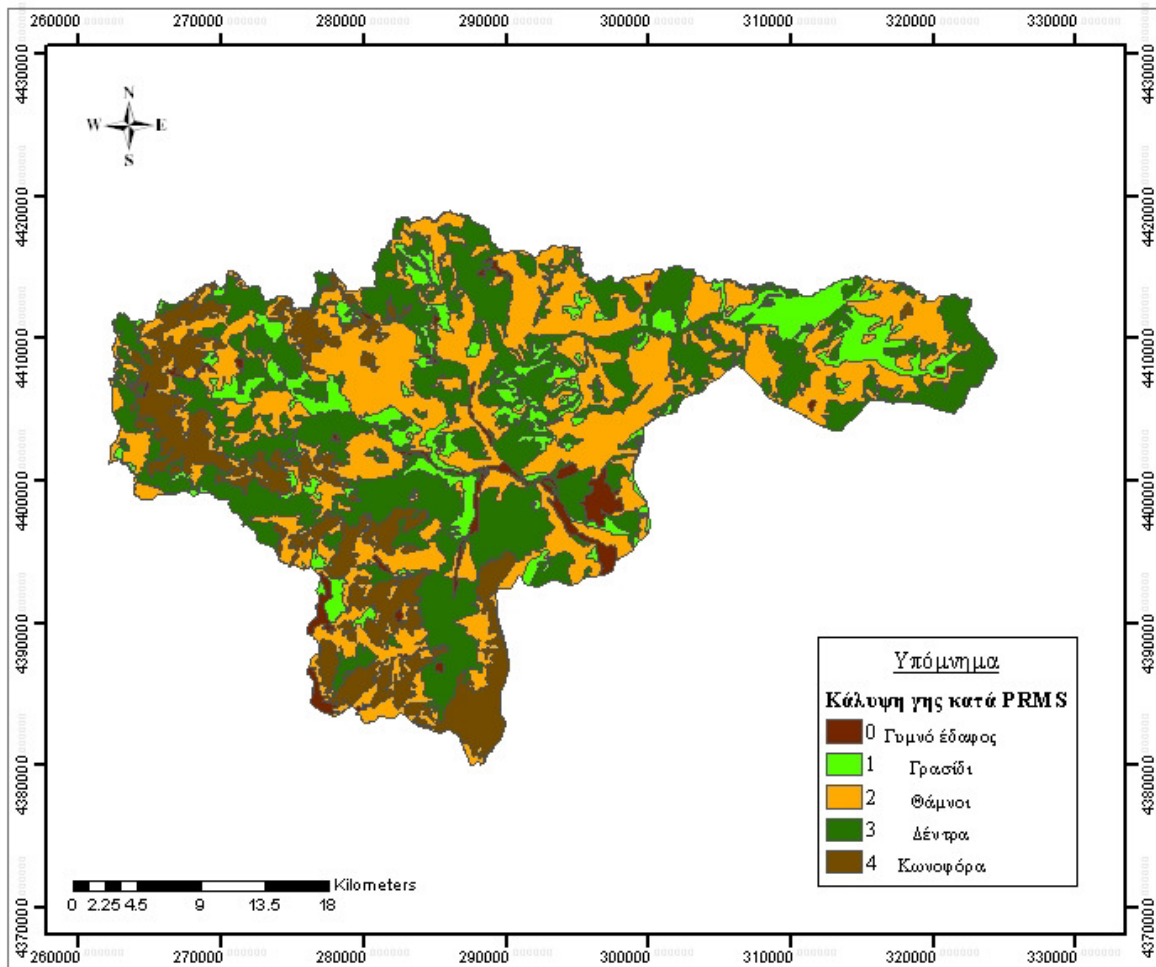
- 0 = γυμνό έδαφος
- 1 = γρασίδι (αγρωστώδη)
- 2 = θάμνοι
- 3 = δέντρα
- 4 = κωνοφόρα

Έτσι, πρέπει να γίνει μία αντιστοίχιση των κατηγοριών του CORINE 2000 με τις κατηγορίες της μεταβλητής του μοντέλου PRMS-IV. Η διαδικασία αυτή εμπεριέχει αναμφίβολα πολλές παραδοχές καθώς πρόκειται ουσιαστικά για μία γενίκευση γιατί οι 19 πολύ ειδικές και ακριβείς κατηγορίες του CORINE πρέπει να ομαδοποιηθούν και να μετατραπούν στις πέντε μόνο κατηγορίες του PRMS-IV. Παρόλα αυτά όμως είναι ένα απαραίτητο βήμα που πρέπει να γίνει για τη σωστή προσομοίωση και λειτουργία του μοντέλου. Η αντιστοίχιση που έγινε παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.4: Αντιστοίχιση κατηγοριών κάλυψης γης του CORINE με το PRMS-IV

Κατηγορίες κάλυψης γης του CORINE 2000		Κατηγορίες κάλυψης γης του PRMS-IV	
Κωδικός	Κατηγορίες	Τιμές cov_type	Κατηγορίες
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	0	Γυμνό έδαφος
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	0	Γυμνό έδαφος
133	Χώροι οικοδόμησης	0	Γυμνό έδαφος
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0	Γυμνό έδαφος
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	2	Θάμνοι
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	3	Δέντρα
222	Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	3	Δέντρα
231	Λιβάδια	1	Γρασίδι (αγρωστώδη)
242	Σύνθετες καλλιέργειες	1	Γρασίδι (αγρωστώδη)
243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	3	Δέντρα
311	Δάσος πλατύφυλλων	3	Δέντρα
312	Δάσος κωνοφόρων	4	Κωνοφόρα
313	Μεικτό δάσος	3	Δέντρα
321	Φυσικοί βοσκότοποι	1	Γρασίδι (αγρωστώδη)
322	Θάμνοι και χερσότοποι	2	Θάμνοι
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	2	Θάμνοι
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	2	Θάμνοι
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0	Γυμνό έδαφος
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0	Γυμνό έδαφος

Με την κατάλληλη προσθήκη των τιμών που αντιστοιχήθηκαν και με λίγη επεξεργασία για την ενοποίηση των όμορων πολυγώνων ίδιας κατηγορίας κατά το PRMS-IV, προκύπτει ο χάρτης των κατηγοριών κάλυψης γης κατά το μοντέλο PRMS-IV ο οποίος παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.6: Χάρτης κάλυψης γης της λεκάνης απορροής κατά PRMS-IV

## 5.6 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRU) της λεκάνης απορροής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο PRMS-IV είναι κατανεμημένο. Αυτό σημαίνει ότι οι φυσικές διεργασίες μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή δεν αναφέρονται χωρικά σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής, αλλά σε στοιχειώδη τμήματα, τέτοια ώστε να αναπαρίσταται η χωρική κατανομή των φυσιογραφικών ή άλλων χαρακτηριστικών της λεκάνης (Ναλμπάντης και Τσακίρης, 2006). Τα στοιχειώδη τμήματα μπορούν να είναι είτε οι υπολεκάνες της λεκάνης απορροής ή οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (Hydrological Response Unit) είναι μία χωρική ενότητα η οποία παρουσιάζει ομοιογενή συμπεριφορά στο σύνολό της από άποψη φυσιογραφικών χαρακτηριστικών όπως η κλίση και το υψόμετρο, αλλά και κάλυψης γης, εδαφολογικών χαρακτηριστικών και άλλων παραμέτρων. Πρόκειται, δηλαδή, για βασικές υπολογιστικές μονάδες που θεωρείται ότι είναι ομογενείς στην υδρολογική τους απόκριση. Έτσι, ο ορισμός και η δημιουργία τους αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία για την εξέλιξη της εργασίας, όχι μόνο γιατί αποτελούν το συστατικό στοιχείο πάνω στο οποίο εφαρμόζονται όλες οι διαδικασίες του μοντέλου PRMS-IV, αλλά και για την όσο το δυνατόν πιο πιστή προσομοίωση της λεκάνης απορροής.

Γενικά, δεν υπάρχει ο ιδανικότερος τρόπος στο διαχωρισμό της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Αυτός εξαρτάται από το μελετητή, το πλήθος των

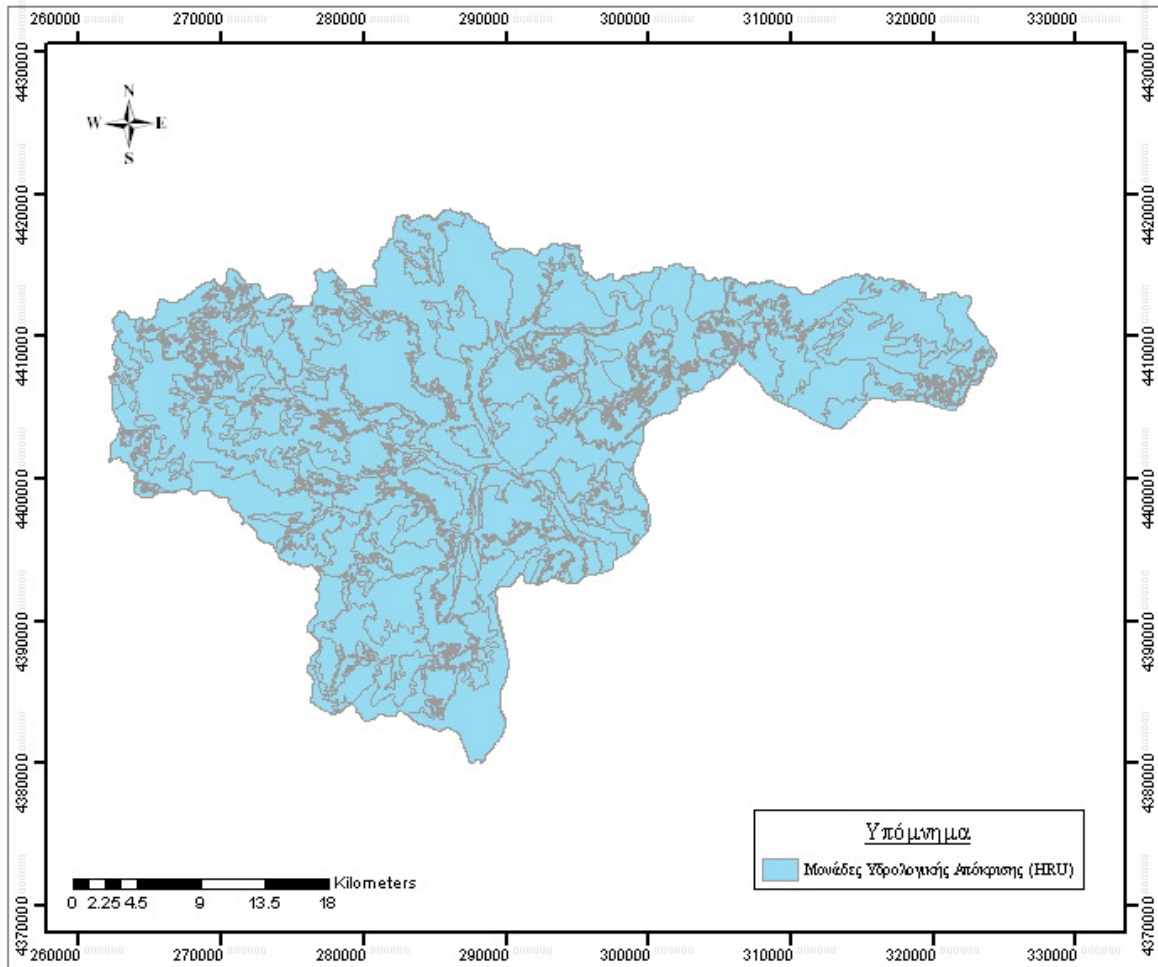
δεδομένων που έχει στη διάθεσή του αλλά και από το σκοπό της μελέτης. Έτσι, υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί δεδομένων που μπορούν να παράγουν τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης για μία λεκάνη απορροής.

Στην υπό μελέτη λεκάνη επιλέχθηκε να ορισθούν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης με βάση τις κατηγορίες κάλυψης γης της λεκάνης και τις κλίσεις του εδάφους της. Έτσι, έγινε μία τομή μεταξύ των πολυγώνων κάλυψης γης και των πολυγώνων κλίσης του εδάφους της λεκάνης απορροής όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στο ArcMap είναι το *Intersect* με διαδρομή: *Analysis Tools*→*Overlay*→*Intersect*. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθούν πολύγωνα τα οποία είχαν τα δύο προηγούμενα χαρακτηριστικά (κατηγορία κάλυψης γης και κλάση κλίσης εδάφους) και, άρα, αποτελούσαν ομογενείς εκτάσεις ως προς αυτά και μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί η σημασία της έκτασης που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής αλλά και οι παραπάνω μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Δηλαδή, οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης που δημιουργήθηκαν με την προηγούμενη διαδικασία είχαν εκτάσεις που κυμαίνονταν από λίγα m<sup>2</sup> μέχρι και δεκάδες km<sup>2</sup>. Επίσης, το πλήθος τους ανερχόταν σε μερικές χιλιάδες καθιστώντας τες δύσκολα διαχειρίσιμες. Όπως είναι φυσικό, οι μικρές έκτασης μονάδες υδρολογικής απόκρισης έχουν αμελητέο ρόλο στη συνολική απόκριση της λεκάνης απορροής. Για να εξαλειφθεί αυτό το πρόβλημα και για να μειωθεί το πλήθος τους σε πιο διαχειρίσιμο αριθμό επιλέχθηκε να συνενωθούν με γειτονικές μονάδες υδρολογικής απόκρισης με μεγαλύτερη έκταση. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε ξανά το εργαλείο γενίκευσης *Eliminate* με διαδρομή: *Data Management Tools*→*Generalization*→*Eliminate*. Για τον ορισμό μιας τιμής της έκτασης κάτω από την οποία τα πολύγωνα θα συνενώνονταν με τα γειτονικά τους, έγιναν πολλές δοκιμές με δύο κριτήρια:

- Να μην αλλοιώνεται σε υπερβολικό βαθμό η αρχική πληροφορία των δύο χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν (χάρτης κάλυψης γης και χάρτης κλίσεων εδάφους) έτσι ώστε η προσομοίωση της λεκάνης απορροής να είναι όσο πιο πιστή στην πραγματικότητα γίνεται.
- Να μειωθεί το πλήθος τους σε πιο λογικό αριθμό για να μπορεί να γίνει πιο εύκολα η περαιτέρω αξιοποίηση και επεξεργασία τους χωρίς όμως υπερβολική μείωση, το αποτέλεσμα της οποίας δεν θα ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Μετά τις δοκιμές επιλέχθηκε να ορισθεί ως κατώτατη τιμή της επιφάνειας που θα καλύπτει κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης το 1.5 km<sup>2</sup>. Έτσι, επιλέχθηκαν όλα τα πολύγωνα με έκταση μικρότερη από 1.5 km<sup>2</sup> με την εντολή *Select By Attributes* και εφαρμόστηκε το εργαλείο *Eliminate*. Οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης που προέκυψαν ήταν 119 και παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.1: Χάρτης μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRU)





## 6 Εφαρμογή του μοντέλου PRMS

---

### 6.1 Κατάρτιση και βαθμονόμηση του μοντέλου PRMS

#### 6.1.1 Κατάρτιση του μοντέλου

Η κατάρτιση του μοντέλου PRMS για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής γίνεται με τη δημιουργία τριών αρχείων, τη συμπλήρωσή τους με τις κατάλληλες εγγραφές και τη σωστή διάταξή τους σε αυτά. Τα αρχεία αυτά είναι το αρχείο δεδομένων (Data File - .dat), το αρχείο παραμέτρων (Parameter File - .param) και το αρχείο ελέγχου (Control File - .control). Έχουν μορφή .txt και μπορούν να διαβαστούν και να υποστούν επεξεργασία εύκολα από οποιονδήποτε επεξεργαστή κειμένου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο επεξεργαστής κειμένου Notepad++ ο οποίος αποτελεί ελεύθερο λογισμικό. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι όλες οι μεταβλητές, οι παράμετροι και τα υπόλοιπα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτά τα αρχεία έχουν συγκεκριμένη ονομασία η οποία δεν αλλάζει. Μόλις αυτά τα αρχεία είναι έτοιμα, το τρέξιμο του μοντέλου γίνεται με την εκτέλεση ενός αρχείου .bat σε ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη (Graphical User Interface - GUI). Τα αρχεία αυτά και ο τρόπος συμπλήρωσής τους περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του PRMS-IV από τους Markstrom et al. (2015).

#### Αρχείο δεδομένων (Data File)

Το αρχείο δεδομένων περιλαμβάνει όλες τις μετρημένες χρονοσειρές που πρόκειται να αποτελέσουν είσοδο στο μοντέλο. Αυτές οι χρονοσειρές μπορεί να είναι δεδομένα κατακρημνισμάτων, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, απορροής αλλά και άλλων μετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, το χρονικό βήμα του μοντέλου PRMS-IV είναι ημερήσιο. Έτσι, κάθε ημέρα της χρονοσειράς δηλώνεται από το έτος, το μήνα, την ημέρα του μήνα, την ώρα, το λεπτό και το δευτερόλεπτο. Προφανώς, τα τρία τελευταία παίρνουν την τιμή 0. Στη συνέχεια, ακολουθεί η τιμή της υδρολογικής ή μετεωρολογικής μεταβλητής ενός συγκεκριμένου σταθμού μέτρησης, έτσι όπως τα στοιχεία αυτά ορίζονται σε προγενέστερο τμήμα του αρχείου. Συνεπώς, δημιουργείται μία ενιαία χρονοσειρά όλων των δεδομένων η οποία έχει μορφή πίνακα. Κάθε γραμμή αυτού του πίνακα αποτελεί μία ημέρα. Οι τιμές των έξι πρώτων στηλών της κάθε γραμμής αποτελούν τον χρονικό προσδιορισμό όπως περιγράφηκε και η κάθε επόμενη στήλη της γραμμής περιέχει τις ημερήσιες τιμές μίας υδρολογικής ή μετεωρολογικής μεταβλητής ενός συγκεκριμένου σταθμού μέτρησης.

Έτσι, με τη διάταξη που παρουσιάστηκε, έγινε εγγραφή των χρονοσειρών των δεδομένων της υπό μελέτη λεκάνης απορροής στο αρχείο δεδομένων, αφού πρώτα έγινε επεξεργασία τους σε λογιστικό φύλλο για ευκολία. Μέρος του αρχείου δεδομένων παρουσιάζεται στη συνέχεια.

```

13 precip 6
14 tmin 1
15 tmax 1
16 #####
17 1972 10 1 0 0 0 0 0 0 0 0 6 15
18 1972 10 2 0 0 0 0 0 0 0 0 7 16
19 1972 10 3 0 0 0 0 9.3 16 14.3 0 7 10 15
20 1972 10 4 0 0 0 26.7 15.1 34.6 27.2 22.5 13.2 12 14
21 1972 10 5 0 0 0 0 0 0 0 56 6 20
22 1972 10 6 0 0 0 0 0 0 0 0 5 13
23 1972 10 7 0 0 0 6.3 0 0 0 0 7 15
24 1972 10 8 0 0 0 38.1 10.5 0 6.5 0 9 15
25 1972 10 9 0 0 0 9.8 6.9 63.9 56.3 45.5 97 8 15
26 1972 10 10 0 0 0 35.7 0 34.2 22.6 18 27.3 10 14
27 1972 10 11 0 0 0 16.7 0 0 0 0 10 19
28 1972 10 12 0 0 0 0 0 0 0 0 12 20
29 1972 10 13 0 0 0 0 0 0 0 0 14 21
30 1972 10 14 0 0 0 4.2 19.8 10.4 7 33 13 20
31 1972 10 15 0 0 0 66.3 60.3 60.4 54.4 13.5 97.4 12 20
32 1972 10 16 0 0 0 6.3 11.3 13.3 4.5 46 9 15
33 1972 10 17 0 0 0 4.2 0 0 4 0 7 10
34 1972 10 18 0 0 0 0 0 0 0 10.3 6 10
35 1972 10 19 0 0 0 0 0 0 0 0 5 13
36 1972 10 20 0 0 0 0 0 0 0 0 2 10
37 1972 10 21 0 0 0 0 0 0 0 15 4 10
38 1972 10 22 0 0 0 21.8 12.3 36.6 37.2 19.8 32.9 5 10
39 1972 10 23 0 0 0 0 0 0 0 5 8 0 6 10

```

Σχήμα 6.1: Μέρος του αρχείου δεδομένων

### Αρχείο παραμέτρων (Parameter File)

Το αρχείο παραμέτρων περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους και τις διαστάσεις που απαιτούνται για την προσομοίωση με το PRMS-IV. Οι παράμετροι είναι τιμές εισόδου οι οποίες δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Οι κατάλληλες παράμετροι καθορίζονται ανάλογα με το ποια ενότητα (module) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας διαδικασίας του PRMS-IV. Οι διαστάσεις είναι τιμές που περιγράφουν το πλήθος των τιμών κάθε παραμέτρου και κάθε μεταβλητής.

Στο αρχείο παραμέτρων το τμήμα καθορισμού των διαστάσεων προηγείται του αντίστοιχου τμήματος των παραμέτρων. Για το διαχωρισμό τους, έχει τίτλο **\*\* Dimensions \*\***. Σε αυτό κάθε ορισμός διάστασης ξεκινάει με τέσσερα σύμβολα της δίεσης (####) για το διαχωρισμό από τα προηγούμενα. Στην επόμενη σειρά δηλώνεται το όνομα της διάστασης. Στην τρίτη και τελευταία σειρά δηλώνεται το μέγεθος της διάστασης με ακέραια τιμή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω έγινε ο καθορισμός των διαστάσεων στο αρχείο παραμέτρων και μέρος του αντίστοιχου τμήματος παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

```

1 Sarakina
2 Version: 1.7
3 ** Dimensions **
4 #####
5 nmonths
6 12
7 #####
8 ndays
9 366
10 #####
11 nrain
12 6
13 #####
14 ntemp
15 1
16 #####
17 nobs
18 1
19 #####
20 ndepl
21 1

```

Σχήμα 6.2: Μέρος του τμήματος διαστάσεων του αρχείου παραμέτρων

Έπειτα από τον καθορισμό των διαστάσεων ακολουθεί το τμήμα καθορισμού των παραμέτρων με τίτλο **\*\* Parameters \*\***. Σε αυτό το τμήμα καθορίζονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από τις ενότητες (modules) του PRMS-IV που έχουν επιλεγεί για την προσομοίωση, οι οποίες δεν μεταβάλλονται κατά την εκτέλεση του μοντέλου. Περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι παραμέτρων όπως γεωγραφικές παράμετροι, παράμετροι για τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, παράμετροι με διάφορους συντελεστές για τις υδρολογικές διεργασίες, παράμετροι για τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης των διάφορων μεταβλητών κ.α. Για κάθε δήλωση παραμέτρου ακολουθείται η εξής σύνταξη: Αρχικά, στην πρώτη γραμμή εγγράφονται τέσσερα σύμβολα της δίσησης (####) για το διαχωρισμό από τα προηγούμενα. Έπειτα, στην επόμενη γραμμή δηλώνεται το όνομα της παραμέτρου. Στην τρίτη γραμμή δηλώνεται το νούμερο της διάστασης της παραμέτρου. Στην τέταρτη γραμμή δηλώνεται το όνομα της διάστασης. Στην πέμπτη γραμμή δηλώνεται το πλήθος των τιμών, με ακέραιο αριθμό, που αποτελούν την είσοδο της παραμέτρου. Η έκτη γραμμή δηλώνει τον τύπο των τιμών της παραμέτρου με επιλογές: 1 για ακέραιες, 2 για πραγματικές απλής ακρίβειας, 3 για πραγματικές διπλής ακρίβειας και 4 για χαρακτήρες. Οι επόμενες γραμμές περιλαμβάνουν τις τιμές της παραμέτρου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω έγινε ο καθορισμός των παραμέτρων στο αρχείο παραμέτρων και μέρος του αντίστοιχου τμήματος παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

```

55 #####
56 temp_units
57 1
58 one
59 1
60 1
61 1
62 #####
63 runoff_units
64 1
65 one
66 1
67 1
68 1
69 #####
70 hru_area
71 1
72 nhru
73 119
74 2
75 1382.70970
76 1193.12633

```

Σχήμα 6.3: Μέρος του τμήματος παραμέτρων του αρχείου παραμέτρων

Τόσο οι διαστάσεις όσο και η παράμετροι μπορούν να δηλωθούν με οποιαδήποτε σειρά στο αρχείο παραμέτρων.

### Αρχείο ελέγχου (Control File)

Το αρχείο ελέγχου περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους του PRMS-IV που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Οι πέντε βασικοί τύποι των παραμέτρων που ορίζονται σε αυτό το αρχείο είναι:

- Αυτές που σχετίζονται με την εκτέλεση του μοντέλου
- Αυτές που σχετίζονται με τις εισόδους του μοντέλου
- Αυτές που σχετίζονται με τις εξόδους του μοντέλου
- Αυτές που σχετίζονται με τις αρχικές συνθήκες
- Αυτές που σχετίζονται με τις ενεργές ενότητες (modules) του μοντέλου

Συγκεκριμένα, το αρχείο ελέγχου χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ονομάτων των αρχείων εισόδου και εξόδου, για το περιεχόμενο των αρχείων εισόδου και εξόδου, για τις ημερομηνίες αρχής και τέλους της προσομοίωσης και για τις ενεργές ενότητες.

Στο αρχείο ελέγχου η δήλωση κάθε παραμέτρου ακολουθεί συγκεκριμένη διάταξη και δομή. Στην πρώτη γραμμή εγγράφονται τέσσερα σύμβολα της δίσωσης (####) για το διαχωρισμό από τα προηγούμενα. Στη δεύτερη γραμμή ορίζεται το όνομα της παραμέτρου ελέγχου. Στην τρίτη γραμμή καθορίζεται το πλήθος των τιμών της παραμέτρου που έχει ορισθεί. Στην τέταρτη γραμμή δηλώνεται ο τύπος των δεδομένων της παραμέτρου με ακέραιους δείκτες (1 για ακέραιες, 2 για πραγματικές και 4 για χαρακτήρες). Στην πέμπτη γραμμή ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων, μία τιμή ανά γραμμή. Άρα, κάθε δήλωση παραμέτρου αποτελείται από τουλάχιστον πέντε γραμμές. Όπως και στο αρχείο παραμέτρων, έτσι και στο αρχείο ελέγχου, η σειρά με την οποία δηλώνεται κάθε παράμετρος ελέγχου δεν έχει σημασία.

Το αρχείο ελέγχου για την προσομοίωση της υπό μελέτη λεκάνης απορροής δημιουργήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες ενότητες (modules). Αρχικά, οι διαδικασίες του ορισμού της λεκάνης απορροής, της διαδοχικότητας, του ηλιακού πίνακα, των δεδομένων των χρονοσειρών, της συγκράτησης από το φύλλωμα, του χιονιού και της ροής υπογείων υδάτων δεν χρειάζεται να εγγραφούν στο αρχείο ελέγχου γιατί εκτελούνται αυτόματα καθώς κάθε μία από τις παραπάνω διαδικασίες προσομοιώνεται με μία μόνο ενότητα (module) όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1. Οι ενότητες των υπόλοιπων διαδικασιών καθορίζονται στο αρχείο ελέγχου. Έτσι, για τη κατανομή της θερμοκρασίας στις HRU's χρησιμοποιήθηκε η ενότητα temp\_1sta. Για τη κατανομή των κατακρημνισμάτων στις HRU's χρησιμοποιήθηκε η ενότητα precip\_1sta. Για την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στις HRU's χρησιμοποιήθηκε η ενότητα ddsolrad. Για την περίοδο διαπνοής χρησιμοποιήθηκε η ενότητα transp\_tindex. Για τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιήθηκε η ενότητα rotet\_hs. Για την επιφανειακή απορροή χρησιμοποιήθηκε η ενότητα srunoff\_smidx. Για τη ζώνη εδάφους χρησιμοποιήθηκε η ενότητα soilzone, η οποία παρόλο που είναι μοναδική, επιβάλλεται να καθορισθεί. Για την απορροή υδατορευμάτων χρησιμοποιήθηκε η ενότητα strmflow. Τέλος, για τη σύνοψη χρησιμοποιήθηκε η ενότητα basin\_sum. Σύμφωνα με τις παραπάνω επιλογές των ενοτήτων για κάθε διαδικασία, ορίστηκαν και οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτές στο αρχείο παραμέτρων. Οι υπόλοιπες μεταβλητές ελέγχου που αφορούν τη διαχείριση των δεδομένων (είσοδος, έξοδος), της εκτέλεσης και των αρχικών συνθηκών, καθορίστηκαν κατάλληλα σύμφωνα με τα δεδομένα και τις θέσεις των διαφόρων αρχείων. Μέρος του αρχείου ελέγχου που δημιουργήθηκε παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

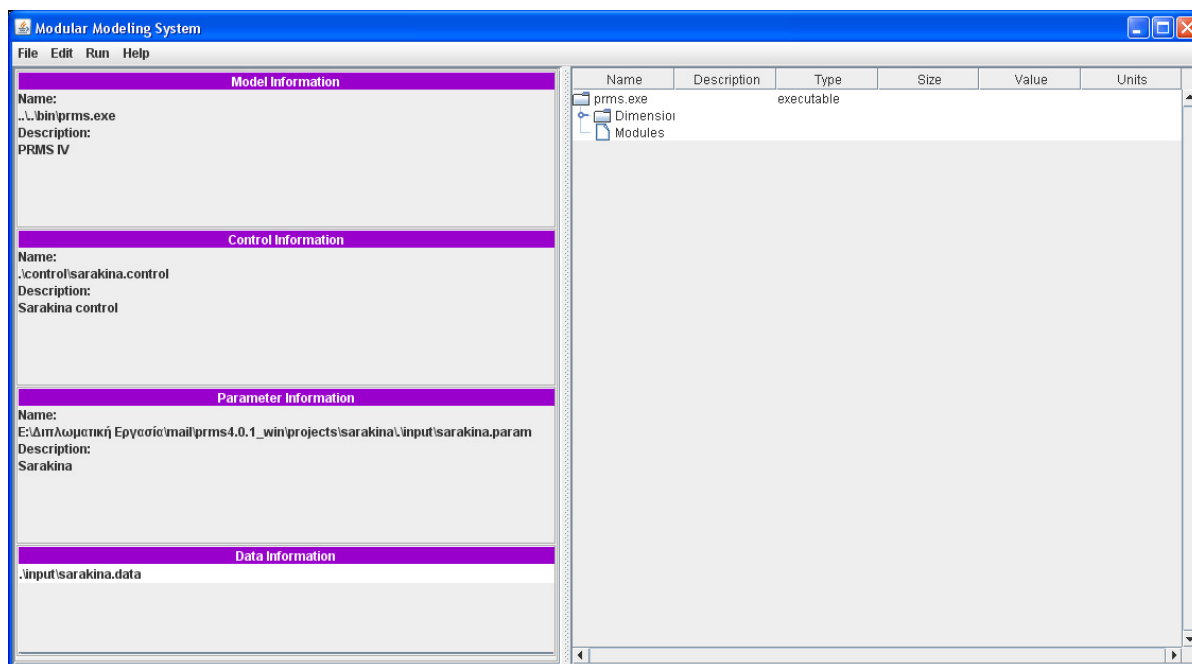
```

67 #####
68 soilzone_module
69 1
70 4
71 soilzone
72 #####
73 summary_module
74 1
75 4
76 basin_sum
77 #####
78 srunoff_module
79 1
80 4
81 srunoff_smidx
82 #####
83 strmflow_module
84 1
85 4
86 strmflow
87 #####
88 transp_module
89 1
90 4
91 transp_tindex

```

Σχήμα 6.4: Μέρος του αρχείου ελέγχου

Έτσι, πλέον το μοντέλο έχει καταρτιστεί και μπορεί να γίνει εκτέλεσή του μέσω του αντίστοιχου αρχείου .bat. Αρχικά, ελέγχεται αν υπάρχουν λάθη σύνταξης και διάταξης στα παραπάνω αρχεία και εμφανίζονται τα ανάλογα μηνύματα. Στη συνέχεια, αν είναι όλα σωστά ορισμένα, ανοίγει το γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) του μοντέλου PRMS-IV το οποίο παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.5: Γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) του μοντέλου PRMS-IV

Από αυτό το περιβάλλον μπορεί να γίνει το τρέξιμο του μοντέλου με την εντολή *Run*→*Single Run* καθώς και επεξεργασία των παραμέτρων του με την εντολή *Edit*→*Parameters & Dimensions* όπου ουσιαστικά γίνεται επεξεργασία του αρχείου παραμέτρων που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

### 6.1.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Από τη στιγμή που το μοντέλο είναι πλήρως καταρτισμένο, το επόμενο βήμα που πρέπει να γίνει είναι η βαθμονόμησή του. Με τη διαδικασία αυτή, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, εκτιμώνται οι τιμές των παραμέτρων για τις οποίες το μοντέλο προσαρμόζεται στον καλύτερο δυνατό βαθμό στα δεδομένα. Το μέτρο καλής προσαρμογής είναι ο συντελεστής των Nash και Sutcliffe. Έτσι, ουσιαστικά γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου για τις οποίες αυτό παρουσιάζει τον υψηλότερο δυνατό συντελεστή Nash και Sutcliffe. Τα μετρημένα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του παραπάνω συντελεστή ήταν οι μηνιαίες τιμές της απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σαρακίνα οι οποίες αντλήθηκαν από παλαιότερη έρευνα (Ναλμπάντης και Κουτσογιάννης, 1997). Ως περίοδος βαθμονόμησης θεωρήθηκε η χρονική περίοδος από το υδρολογικό έτος 1972-73 ως το υδρολογικό έτος 1979-80. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί, παρόλο που υπήρχαν διαθέσιμα βροχομετρικά και υδρομετρικά δεδομένα από το 1959-60 και έπειτα, τα δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του σταθμού Μεγάλη Κερασιά, τα οποία αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία το PRMS-IV περιορίζονταν στην περίοδο από το 1972-73 και έπειτα.

Η διαδικασία βαθμονόμησης που έγινε ήταν χειροκίνητη, δηλαδή με πολλές δοκιμές και λάθη προσεγγίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων για τις οποίες το μοντέλο έδινε τις προσομοιωμένες τιμές της ημερήσιας απορροής, που εισέρχονταν με τη σειρά τους στο συντελεστή Nash και Sutcliffe, αφού πρώτα μετατρέπονταν σε μηνιαίες, και έδιναν υψηλή τιμή του. Ήταν μία ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία αλλά έτσι έγινε πλήρης κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου στο αποτέλεσμα που είναι η προσομοιωμένη απορροή.

Η μεταβολή των παραμέτρων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης δεν έγινε ξεχωριστά στο αρχείο παραμέτρων αλλά από μία επιλογή του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI) του μοντέλου η οποία παρουσιάζει πίνακες με όλες τις παραμέτρους (ανάλογα με τις διαστάσεις τους) οι οποίες μπορούν να υποστούν επεξεργασία και με αποθήκευσή τους αλλάζει αυτόματα και το αρχείο παραμέτρων. Η επιλογή αυτή παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Dimension	hru_area	hru_aspect	hru_deplcv	hru_elev
1	1.382,71	146,18	1	1.150
2	1.193,126	168,79	1	1.345
3	500,266	176,984	1	630
4	1.213,849	207,251	1	687
5	1.846,716	198,721	1	670
6	951,995	202,762	1	702
7	986,94	183,764	1	702
8	499,948	205,606	1	1.071
9	780,697	170,074	1	735
10	1.094,042	218,621	1	1.237
11	1.110,875	122,638	1	815
12	1.893,98	228,406	1	1.325
13	774,72	166,598	1	1.051
14	9.549,26	159,701	1	1.031
15	6.563,65	196,22	1	807
16	4.415,343	188,257	1	987
17	5.003,745	189,888	1	1.183
18	723,295	220,004	1	936
19	4.858,677	194,133	1	920
20	2.335,768	172,535	1	838
21	2.303,817	186,621	1	855
22	684,714	202,949	1	1.084
23	5.584,748	191,244	1	870
24	2.586,318	211,53	1	700
25	3.272,091	203,155	1	783

Σχήμα 6.6: Επιλογή για επεξεργασία των παραμέτρων στο γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) του μοντέλου PRMS-IV

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι δεν επηρεάζουν όλες οι παράμετροι τα αποτελέσματα του μοντέλου. Υπάρχουν παράμετροι που δεν χρειάζεται και δεν πρέπει να μεταβληθούν κατά την εκτέλεση του μοντέλου. Τέτοιες είναι, για παράδειγμα, παράμετροι που αφορούν τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (εμβαδό, υψόμετρο, κλίση), τους δείκτες για τις μονάδες μέτρησης των διαφόρων μεγεθών, τους δείκτες για τον τύπο και το χρονικό βήμα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Έτσι, εντοπίστηκαν οι παράμετροι που αφορούν τις αμιγώς υδρολογικές διεργασίες του μοντέλου, σύμφωνα με τις ενότητες (modules) που επιλέχθηκαν στο αρχείο ελέγχου, οι οποίες ήταν 41. Από αυτές ελέγχθηκε ποιες επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το αποτέλεσμα του μοντέλου. Όσες δεν το επηρέαζαν σε μεγάλο βαθμό πήραν είτε την προκαθορισμένη τιμή τους ή μία λογική τιμή η οποία ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Οι παράμετροι που βρέθηκε πως επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το μοντέλο είναι επτά (7) και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- **hs\_krs**: Αποτελεί τον μηνιαίο παράγοντα ρύθμισης σε δεκαδικό κλάσμα που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής κατά Hargreaves - Samani για κάθε HRU.
- **smidx\_coef** και **smidx\_exp**: Αποτελούν το συντελεστή και τον εκθέτη, αντίστοιχα, στον αλγόριθμο μη γραμμικής συμβάλλουσας επιφάνειας για κάθε HRU.

- **soil\_moist\_max**: Αποτελεί τη μέγιστη δυνατή ικανότητα συγκράτησης της τριχοειδούς δεξαμενής από την επιφάνεια εδάφους μέχρι ένα ορισμένο βάθος για τον κύριο τύπο βλάστησης για κάθε HRU, σε in.
- **soil\_rechr\_max**: Αποτελεί το μέγιστο απόθεμα της εδαφικής ζώνης επαναφόρτισης (το υπερκείμενο τμήμα της τριχοειδούς δεξαμενής) για κάθε HRU, σε in.
- **soil2gw\_max**: Αποτελεί τη μέγιστη ποσότητα υπερχειλίσης της τριχοειδούς δεξαμενής που δρομολογείται απευθείας στην GWR για κάθε HRU, σε in.
- **ssr2gw\_rate**: Αποτελεί το γραμμικό συντελεστή στη σχέση που χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση του νερού από τις δεξαμενές βαρύτητας στις υπόγειες δεξαμενές για κάθε HRU.

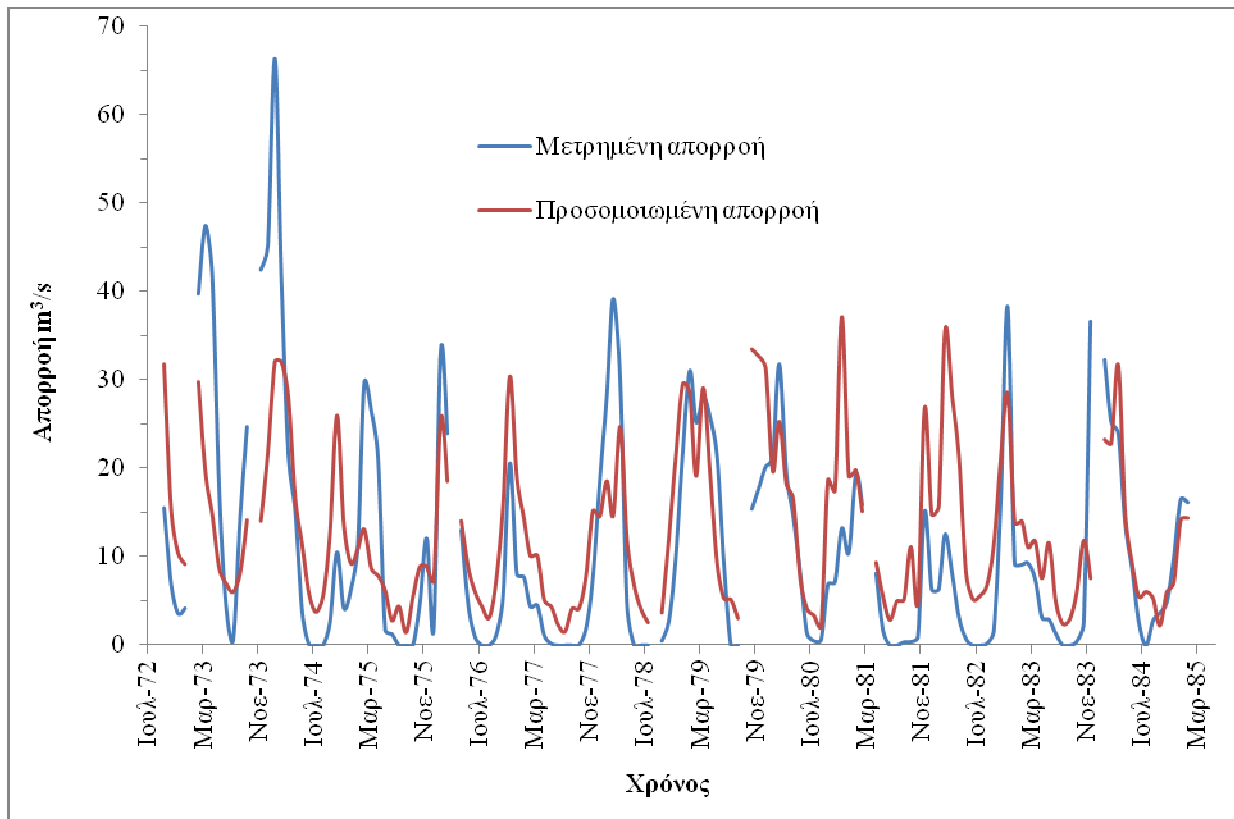
Ο υψηλότερος συντελεστής NSE που υπολογίστηκε με τη μεταβολή των παραπάνω 7 παραμέτρων είχε την τιμή 0.553. Στους υπολογισμούς αυτής της τιμής αποφασίστηκε να μην συμπεριληφθεί το πρώτο υδρολογικό έτος της περιόδου βαθμονόμησης, 1972-73, γιατί αποτέλεσε την περίοδο προθέρμανσης του μοντέλου και οι τιμές της προσομοιωμένης απορροής απείχαν αρκετά από αυτές της μετρημένης, καθώς και οι έξι πρώτοι μήνες του υδρολογικού έτους 1973-74 (από Οκτώβριο μέχρι και Μάρτιο), γιατί οι τιμές της μετρημένης απορροής ήταν ιδιαίτερα υψηλές σε αυτούς του μήνες σε σχέση με τα υπόλοιπα υδρολογικά έτη προσομοίωσης και επηρέαζαν σε σημαντικό βαθμό τον συντελεστή NSE (οι προσομοιωμένες τιμές δεν τις προσέγγιζαν ικανοποιητικά). Οι τιμές των 7 παραμέτρων από τις οποίες προέκυψε ο παραπάνω συντελεστής NSE μπορούν να θεωρηθούν βέλτιστες τιμές και παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.1: Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου

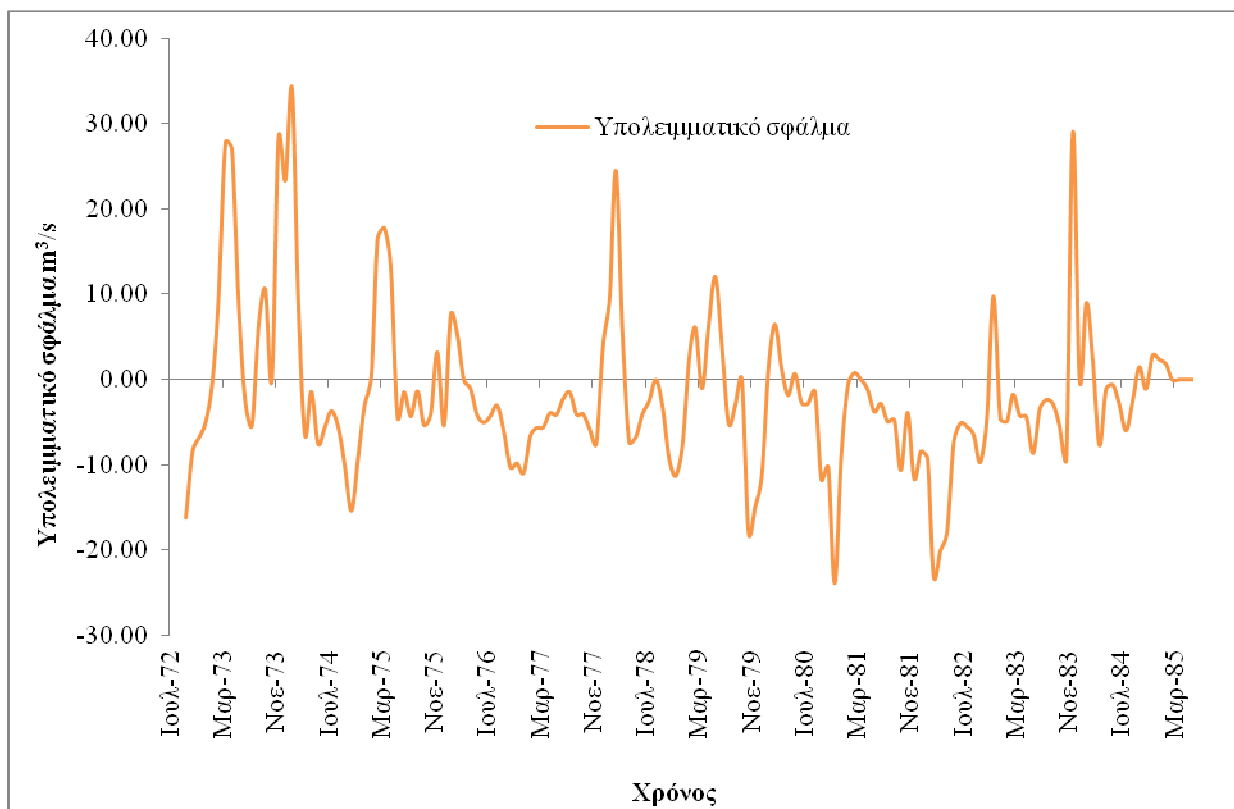
Όνομα Παραμέτρου	Εύρος τιμών	Μονάδες	Βέλτιστη τιμή
hs_krs	0.0005 - 1.0	δεκαδικό κλάσμα	0.060
smidx_coef	0.001 - 0.06	δεκαδικό κλάσμα	0.001
smidx_exp	0.1 - 0.5	1/in	0.250
soil_moist_max	0.001 - 10.0	in	6.5
soil_rechr_max	0.001 - 5.0	in	0.2
soil2gw_max	0.0 - 5.0	in	2
ssr2gw_rate	0.05 - 0.8	κλάσμα/d	0.8

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του βαθμονομημένου πλέον μοντέλου για την περίοδο επαλήθευσης, η οποία είναι από το 1980-81 μέχρι το 1984-85. Ο συντελεστής που NSE που προέκυψε είχε την τιμή 0.531. Και σε αυτή την περίπτωση τρεις μήνες δεν συνυπολογίστηκαν στο συντελεστή γιατί παρουσίαζαν πολύ μέτρια προσαρμογή στο μοντέλο. Ο συντελεστής αυτός είναι αρκετά κοντά στο συντελεστή που προέκυψε στην περίοδο βαθμονόμησης. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η προσομοιωμένη με την μετρημένη απορροή καθώς και το υπολειμματικό τους σφάλμα.





Σχήμα 6.7: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή



Σχήμα 6.8: Υπολειμματικό σφάλμα απορροής

Πρέπει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τους συντελεστές που προέκυψαν, αλλά και όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, το μοντέλο προσαρμόζεται στα δεδομένα αλλά όχι σε τόσο υψηλό βαθμό. Αυτό οφείλεται, μεταξύ άλλων, και στην έλλειψη δεδομένων μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα της λεκάνης απορροής για τα υδρολογικά έτη 1959-60 με 1971-72 για τα οποία όμως υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα βροχοπτώσεων καθώς και μετρημένης απορροής. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην αξιοποίηση μόνον υδρολογικών δεδομένων από το 1972-73 και έπειτα και υποδεικνύει πόσο σημαντικό ρόλο έχουν τα παραπάνω δεδομένα θερμοκρασίας για τη σωστή λειτουργία του μοντέλου PRMS-IV. Κατ' επέκταση, η περίοδος προσομοίωσης περιορίστηκε σε 13 μόνον υδρολογικά έτη, (1972-73 με 1984-85), ενώ θα μπορούσε να είναι 26 υδρολογικά έτη, όσα δηλαδή τα έτη των διαθέσιμων δεδομένων μετρημένης απορροής του Πίνακα 5.2.

Έπειτα, φαίνεται πως το μοντέλο αδυνατεί να προσεγγίσει κάποιες αιχμές των μετρημένων απορροών, όπως για παράδειγμα του Φεβρουαρίου του 1974. Για αυτό άλλωστε τέτοιες περιπτώσεις δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του συντελεστή NSE.

Επίσης, άλλος ένας παράγοντας που συνέβαλε στην όχι τόσο υψηλή προσαρμογή του μοντέλου, είναι η έλλειψη πληροφορίας σχετικά με κάποιες παραμέτρους του μοντέλου που αφορούν το έδαφος και το υπόγειο νερό και οι οποίες τέθηκαν ίσες με τις προεπιλεγμένες τιμές τους.

Προφανώς, στην περίπτωση που δεν υπήρχαν οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω, η προσαρμογή του μοντέλου θα ήταν κατά πολύ καλύτερη και η χειροκίνητη βαθμονόμησή του λιγότερο χρονοβόρα.

## **6.2 Εφαρμογή του μοντέλου σε περίπτωση που η λεκάνη ήταν μη μετρούμενη**

Στην περίπτωση που η λεκάνη απορροής θεωρηθεί μη μετρούμενη, δεν μπορεί να γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου καθώς οι μετρημένες απορροές δεν λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή των παραμέτρων. Όλες οι παράμετροι του μοντέλου έχουν τις ίδιες τιμές με την προηγούμενη περίπτωση μετρούμενης λεκάνης εκτός από τις 7 που χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση. Αυτές μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή από το διάστημα μεταβολής τους που φαίνεται στον Πίνακα 6.1. Έτσι, θεωρώντας πως αυτές οι παράμετροι είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή μέσα στο παραπάνω διάστημα, κατασκευάστηκαν 100 διαφορετικοί τυχαίοι συνδυασμοί των τιμών των 7 παραμέτρων σε λογιστικό φύλλο. Στη συνέχεια, έγινε διαδοχική εφαρμογή όλων των συνδυασμών στο μοντέλο το οποίο εκτελούνταν κάθε φορά για την πλήρη χρονική περίοδο μελέτης, δηλαδή από το υδρολογικό έτος 1972-73 μέχρι και το 1984-85. Έτσι, προέκυψαν 100 χρονοσειρές της προσομοιωμένης ημερήσιας απορροής. Για να μπορέσει να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα σχετικά με το αν και κατά πόσο ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, υπολογίστηκε ο συντελεστής NSE για κάθε έναν συνδυασμό παραμέτρων για την πλήρη χρονική περίοδο μελέτης. Όπως και στην περίπτωση της μετρούμενης λεκάνης, δεν συμπεριλήφθηκε στο υπολογισμούς των NSE το πρώτο έτος, που αποτελεί την προθέρμανση ή το «ζέσταμα» του μοντέλου, καθώς και το πρώτο εξάμηνο του υδρολογικού έτους 1973-74, δηλαδή από Οκτώβριο του 1973 μέχρι και Μάρτιο του 1974, γιατί παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές μετρημένης απορροής. Οι 100 συντελεστές που προέκυψαν για τους αντίστοιχους 100 συνδυασμούς παραμέτρων που περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6.2: Συντελεστές NSE για τους 100 συνδυασμούς των 7 παραμέτρων

Συνδυασμός	NSE	Συνδυασμός	NSE	Συνδυασμός	NSE	Συνδυασμός	NSE
1	0.583	26	0.323	51	0.411	76	0.358
2	0.384	27	0.291	52	0.472	77	0.349
3	0.366	28	0.335	53	0.415	78	0.390
4	0.330	29	0.312	54	0.475	79	0.580
5	0.396	30	0.302	55	0.554	80	0.413
6	0.280	31	0.404	56	0.320	81	0.321
7	0.367	32	0.363	57	0.378	82	0.408
8	0.347	33	0.358	58	0.353	83	0.371
9	0.405	34	0.401	59	0.274	84	0.275
10	0.312	35	0.345	60	0.424	85	0.348
11	0.420	36	0.126	61	0.408	86	0.316
12	0.342	37	0.349	62	0.634	87	0.315
13	0.367	38	0.365	63	0.313	88	0.454
14	0.375	39	0.305	64	0.462	89	0.146
15	0.424	40	0.411	65	-0.344	90	0.337
16	0.338	41	0.314	66	0.430	91	0.442
17	0.289	42	0.318	67	0.351	92	0.334
18	0.429	43	0.314	68	0.317	93	0.414
19	0.305	44	0.349	69	0.401	94	0.314
20	0.497	45	0.401	70	0.354	95	0.457
21	0.498	46	0.350	71	0.374	96	0.366
22	0.381	47	0.354	72	0.342	97	0.325
23	0.325	48	0.433	73	0.261	98	0.324
24	0.445	49	0.466	74	0.333	99	0.365
25	0.365	50	0.397	75	0.400	100	0.577

Η μέση τιμή των παραπάνω 100 συντελεστών NSE είναι 0.367 ενώ η διάμεση τιμή 0.364. Οι δύο τιμές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και, έτσι, οποιαδήποτε μπορεί να χαρακτηρίσει το δείγμα των συντελεστών. Φυσικά, είναι ιδιαίτερα χαμηλές και δηλώνουν πολύ χαμηλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί οι τιμές των 7 παραμέτρων που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το μοντέλο, επιλέχθηκαν τυχαία από το εύρος τιμών τους θεωρώντας πως ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή.

### 6.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Αρχικά, και οι δύο περιπτώσεις, μετρούμενης και μη μετρούμενης λεκάνης, δεν έδωσαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές του συντελεστή NSE. Βέβαια, το γεγονός αυτό έχει διαφορετική βαρύτητα και σημασία για την κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση της μετρούμενης λεκάνης έγινε πολύ μεγάλη προσπάθεια μέσω της χειροκίνητης βαθμονόμησης, ώστε να επιτευχθεί μια προσέγγιση των βέλτιστων τιμών των 7 παραμέτρων που επηρεάζουν το μοντέλο σε μεγαλύτερο βαθμό. Θεωρείται πως αυτό επιτεύχθηκε σύμφωνα πάντα με τα διαθέσιμα δεδομένα και τις ελλείψεις τους, τόσο σχετικά με τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, όσο και με τις μεμονωμένες ελλείψεις των δεδομένων απορροής του Πίνακα 5.2. Στην

περίπτωση της μη μετρούμενης λεκάνης οι χαμηλές τιμές των συντελεστών NSE οφείλονται στην τυχειότητα με την οποία επιλέχθηκαν οι τιμές των 7 παραμέτρων, αλλά δίνουν μία άποψη για το πώς και πόσο μπορεί να προσαρμοστεί ένα μοντέλο σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι ορισμένες τιμές του συντελεστή NSE του Πίνακα 6.2 είναι υψηλότερες από την τιμή που προέκυψε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου στην περίπτωση μετρούμενης λεκάνης. Το γεγονός αυτό επαληθεύει όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως για τη μικρή διάρκεια της περιόδου βαθμονόμησης εξαιτίας έλλειψης δεδομένων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα.

## 7 Σύνοψη - Συμπεράσματα - Προεκτάσεις

---

### 7.1 Σύνοψη - Προβλήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη και την ανάδειξη των επιπτώσεων της έλλειψης δεδομένων απορροής σε λεκάνες που αναφέρονται ως μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέσω της προσομοίωσης με το υδρολογικό μοντέλο PRMS των υδρολογικών διεργασιών τμήματος της λεκάνης απορροής του Πηνειού Θεσσαλίας με έξοδο τον υδρομετρικό σταθμό Σαρακίνα. Για τις μη μετρούμενες λεκάνες γενικά, έγινε επισκόπηση των δράσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της διεθνούς πρωτοβουλίας PUB, και περιγράφηκε το γενικότερο αντικείμενο της προσομοίωσης μέσω υδρολογικών μοντέλων της σχέσης βροχόπτωσης - απορροής και, ειδικότερα, το μοντέλο PRMS που εφαρμόστηκε. Σχετικά με την εφαρμογή στην υπό μελέτη λεκάνη, έγινε συλλογή γεωγραφικών και υδρολογικών δεδομένων από διάφορες υπηρεσίες και παλαιότερες έρευνες στην περιοχή. Αυτά τα δεδομένα αναλύθηκαν κατάλληλα με διάφορα λογισμικά για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο PRMS και να γίνει σωστή προσομοίωση της λεκάνης απορροής. Έτσι, έγινε εφικτή η κατάρτιση του μοντέλου και, στη συνέχεια, η βαθμονόμησή του. Έπειτα, διερευνήθηκε η περίπτωση που η λεκάνη ήταν υποθετικά μη μετρούμενη με την αξιοποίηση του μοντέλου στον υπολογισμό του συντελεστή NSE για 100 διαφορετικούς συνδυασμούς των 7 παραμέτρων οι οποίες, όπως διαπιστώθηκε, επηρεάζουν περισσότερο το αποτέλεσμα, δηλαδή την προσομοιωμένη απορροή. Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των περιπτώσεων που η λεκάνη είναι μετρούμενη ή μη μετρούμενη.

Όπως σχεδόν σε κάθε υδρολογική μελέτη, στην πορεία των εργασιών εμφανίστηκαν διάφορα προβλήματα που έπρεπε να λυθούν. Αυτά αναφέρονται στη συνέχεια.

- Οποιαδήποτε προσομοίωση μιας λεκάνης απορροής με ένα μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία. Απαιτείται η πολύ καλή γνώση της υδρολογίας και των λειτουργιών του μοντέλου που εφαρμόζεται καθώς και ικανοποιητική γνώση του λογισμικού ArcMap. Επίσης, απαιτείται η αναζήτηση και συλλογή των κατάλληλων δεδομένων που θα επιτρέψουν την καλύτερη δυνατή προσομοίωση. Ο μελετητής καλείται να πραγματοποιήσει μία πολύ απαιτητική σύνθεση όλων των πληροφοριών που έχει αντλήσει.
- Το μοντέλο PRMS είναι καταναμημένο στο χώρο. Αυτό σημαίνει ότι οι φυσικές διεργασίες μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή δεν γίνονται στο σύνολο της λεκάνης απορροής αλλά σε μικρότερες χωρικές οντότητές της, τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) των οποίων η σύνθεση των επιμέρους αποτελεσμάτων δίνει το συνολικό αποτέλεσμα για τη λεκάνη. Επομένως, ο διαχωρισμός της λεκάνης απορροής αποτελεί ένα ιδιαίτερης σημασίας βήμα για τη σωστή προσομοίωση με το συγκεκριμένο μοντέλο. Το μοντέλο PRMS δεν απαιτεί συγκεκριμένη διαδικασία διαχωρισμού της λεκάνης απορροής σε επιμέρους HRUs και αφήνει το χρήστη να επιλέξει τον τρόπο διαχωρισμού σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα και την ακρίβεια που απαιτείται. Έτσι, έπρεπε να βρεθεί η κατάλληλη διαδικασία και ο τρόπος διαχωρισμού και, για αυτό, έγιναν διάφορες δοκιμές και σκέψεις μέχρι τον τελικό διαχωρισμό. Αυτός έγινε σύμφωνα με τις κατηγορίες κάλυψης γης και τις κλάσεις των κλίσεων του εδάφους της υπό μελέτη

λεκάνης. Ενδέχεται, όμως, ο διαχωρισμός που επιλέχθηκε να μην είναι αντιπροσωπευτικός της πραγματικής χωρικής κατανομής των υδρολογικών διεργασιών.

- Ένα άλλο πρόβλημα που προέκυψε και το οποίο συναντάται σε πολλές μελέτες στον ελληνικό χώρο, ήταν οι ελλείψεις των μετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, όλα τα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών που επιλέχθηκαν περιείχαν ελλείψεις, οι οποίες βέβαια ήταν για μικρά χρονικά διαστήματα και δεν εμφανίζονταν ταυτόχρονα σε περισσότερους από έναν σταθμό, πράγμα που ευνόησε την όσο το δυνατό σωστότερη συμπλήρωσή τους. Όπως έχει αναφερθεί, το μοντέλο PRMS, εκτός από τα βροχομετρικά δεδομένα απαιτεί και δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα για έναν τουλάχιστον σταθμό της λεκάνης απορροής. Αυτά τα δεδομένα βρέθηκαν μόνον για το σταθμό Μεγάλη Κερασιά και ξεκινούσαν από το υδρολογικό έτος 1972-73. Το γεγονός αυτό περιόρισε τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου από το 1972-73 και έπειτα, παρόλο που υπήρχαν διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα από το 1953-54 και δεδομένα απορροής από το 1959-60. Επίσης, τα δεδομένα μηνιαίας απορροής περιείχαν ελλείψεις σε μεμονωμένους μήνες και αυτό επηρέασε οπωσδήποτε τα αποτελέσματα ως προς τον συντελεστή NSE.
- Επίσης, τα δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε ελάχιστες περιπτώσεις είχαν την ίδια τιμή και για τα δύο μεγέθη. Αυτό το σφάλμα επηρέαζε τη συνολική απόκριση της λεκάνης γιατί οι θερμοκρασία εισέρχεται σε διάφορες ενότητες του PRMS-IV και, έτσι, κατά την προσομοίωση εμφανίζονταν μη ρεαλιστικές τιμές της προσομοιωμένης απορροής. Επειδή οι περιπτώσεις αυτές ήταν πολύ λίγες σε σχέση με τον μεγάλο όγκο των ημερήσιων δεδομένων μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, για να εξαλειφθεί αυτό το σφάλμα, επιλέχθηκε να προστεθεί μια τιμή ίση με 0.1 °C στις τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας στις περιπτώσεις που εμφανιζόταν το συγκεκριμένο σφάλμα.

## 7.2 Συμπεράσματα

Όπως αποδείχτηκε από την εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του Πηνειού Θεσσαλίας, η έλλειψη μετρήσεων απορροής επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την προσομοιωμένη απορροή γιατί, στην περίπτωση αυτή, δεν μπορεί να γίνει βαθμονόμηση και επαλήθευση ούτως ώστε να προκύψουν οι βέλτιστες παράμετροι και, κατ' επέκταση, η προσομοιωμένη απορροή που θα προσεγγίζει την πραγματικότητα..

Το μοντέλο Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση λεκανών απορροής, καθόσον οι υπολογιστικές ενότητες που περιλαμβάνει παρέχουν πολλές, διαφορετικές και εναλλακτικές λύσεις για την προσομοίωση όλων των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση του είναι η ύπαρξη διαθέσιμων ημερήσιων βροχομετρικών δεδομένων και δεδομένων ημερήσιας μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα για έναν τουλάχιστον σταθμό παρατήρησης, καθώς και να έχει προηγηθεί κατάλληλος διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs). Επίσης, επειδή το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί στις ΗΠΑ, οι μονάδες ενός μεγάλου μέρους των μεγεθών του δεν εμφανίζονται στο SI και το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από δύο ενότητες του είναι ένα, αμετάβλητο και προσαρμόζεται καλύτερα στην περιοχή των ΗΠΑ. Αυτά δεν στάθηκαν, ωστόσο, εμπόδιο στη συγκεκριμένη εργασία γιατί αυτή δεν απαιτούσε τη χρήση των εν λόγω μεγεθών.

Ο δρόμος για τη σωστή προσομοίωση και τις σωστές προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής είναι ακόμα μακρύς και απαιτεί την ανάπτυξη νέων μοντέλων και εργαλείων που

θα αφορούν τέτοιες λεκάνες. Επίσης, απαιτείται διαφορετική προσέγγιση στην προσομοίωση ούτως ώστε να λαμβάνονται ακόμα πιο αναλυτικά δεδομένα για τη λεκάνη απορροής (γεωγραφικά, κάλυψη γης, χαρακτηριστικά εδάφους και υπογείων υδάτων) μιας και οι τεχνολογικές εξελίξεις το επιτρέπουν, ούτως ώστε να μπορεί να καλυφθεί κατά μία έννοια η απουσία μετρήσεων απορροής, παρόλο που αυτές δεν είναι δυνατό να υποκατασταθούν πλήρως. Τέλος, όλα τα παραπάνω πρέπει και να υποστηρίζονται από το επιστημονικό υπόβαθρο και, έτσι, η παραγωγή νέων επιστημονικών θεωριών που αφορούν τις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής είναι αναγκαία.

### **7.3 Προεκτάσεις**

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί, οι προεκτάσεις της παρούσας εργασίας που μπορούν να γίνουν μελλοντικά είναι οι εξής:

- Η εφαρμογή και σε άλλες λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου και, σε επόμενο στάδιο, η εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόκριση ενός μεγάλου συνόλου λεκανών απορροής.
- Στην περίπτωση που η λεκάνη θεωρήθηκε μη μετρούμενη, δημιουργήθηκαν 100 συνδυασμοί των 7 παραμέτρων, οι οποίες έχουν εισαχθεί χειροκίνητα στο μοντέλο. Αυτό δεν υποκαθιστά την έλλειψη των μετρήσεων απορροής, αλλά επιτρέπει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Για ασφαλή, όμως, εκτίμηση της αβεβαιότητας στην προσομοιωμένη απορροή είναι γνωστό ότι απαιτείται μεγάλο μέγεθος δείγματος των συνθετικών τιμών των παραμέτρων (π.χ., 10000). Αυτό, με την σειρά του, απαιτεί την κατάρτιση κατάλληλου κώδικα για την αυτόματη εισαγωγή των παραμέτρων στο μοντέλο.

# Αναφορές

---

## Στην ελληνική γλώσσα

- Ναλμπάντης, Ι. και Κουτσογιάννης, Δ. (1997), *Ερευνητικό Έργο. Αναβάθμιση και επικαιροποίηση της υδρολογικής πληροφορίας της Θεσσαλίας*, Τεύχος 4 Τελική Έκθεση.
- Ναλμπάντης, Ι. (2007), *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπαγεωργάκη, Ι. (2012), *Ταξινόμηση ανάγλυφου με υδρολογικά κριτήρια: Εφαρμογή σε λεκάνες απορροής της Αττικής*, Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσακίρης, Γ., (Υπεύθυνος Έκδοσης) (2006), *Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός & Διαχείριση Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Τσακίρης, Γ., (Υπεύθυνος Έκδοσης) (2013), *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

## Ξενόγλωσσες

- Christiansen, D. E., Markstrom, S. L., and Hay, L. E., (2011), Impacts of climate change on growing season in the United States. *Earth Interactions*, 15(33), 1–17.
- Frank, E.C., and Lee, R., (1966), *Potential solar beam irradiation on slopes*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service Research Paper RM–18, 116 p.
- Hamon, W.R., (1961), Estimating potential evapotranspiration. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *Journal of the Hydraulic Division*, 87, HY3, 107–120.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A., (1985), Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fencica, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H.V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., and Cudennec, C. (2013), A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255.
- Jensen, M.E., and Haise, H.R., (1963), Estimating evapotranspiration from solar radiation: Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of Irrigation and Drainage*, 89, 15–41.
- Jensen, M.E., Rob, D.C.N., and Franzoy, C.E., (1969), Scheduling irrigations using climate-crop-soil data, *Proceedings: New Orleans, La., National Conference on Water Resources Engineering of the American Society of Civil Engineers*, p. 20.
- Leaf, C.F., and Brink, G.E., (1973), *Hydrologic simulation model of Colorado subalpine forest*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research Paper RM–107, 23 p.

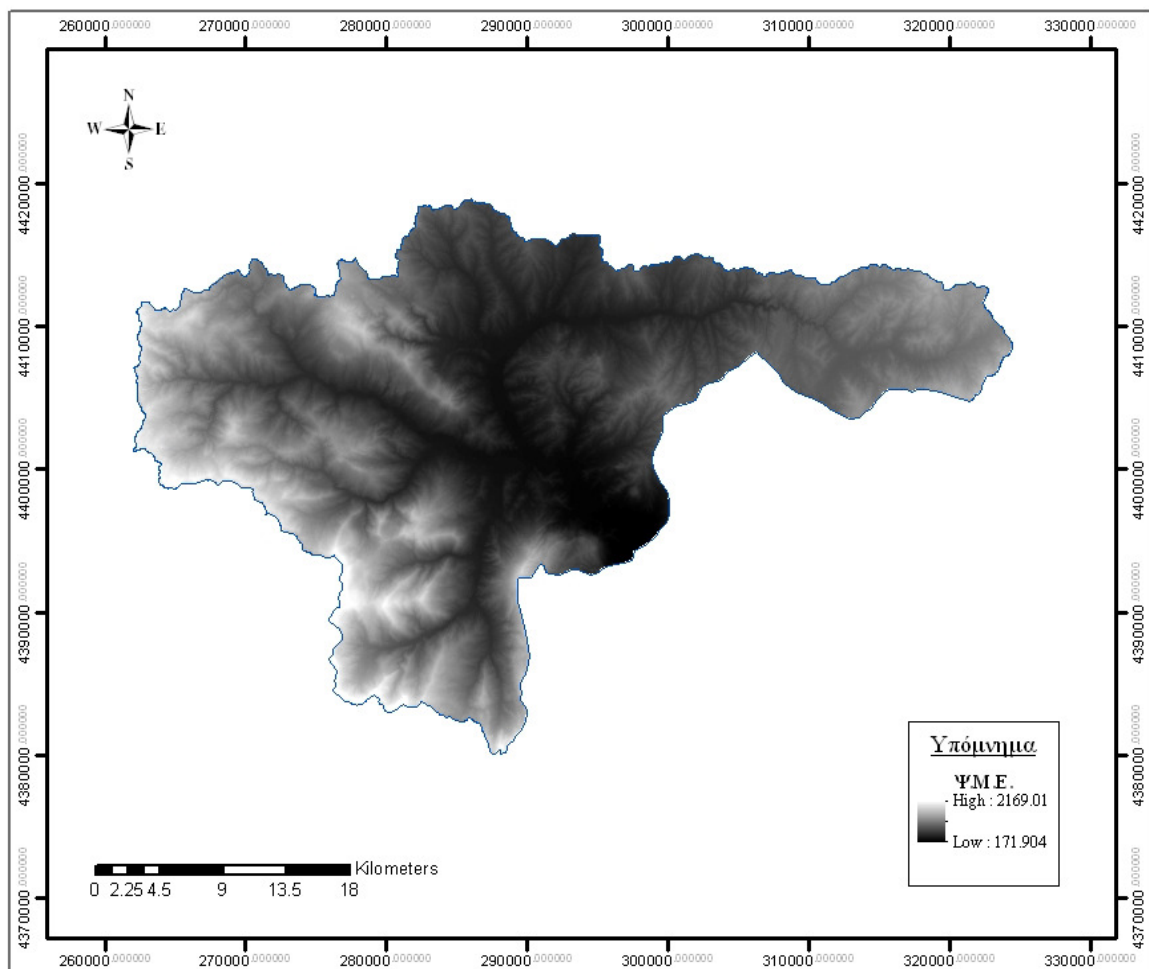


- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G., (1983), *Precipitation-runoff modeling system—User's manual*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238.
- Markstrom, S.L., Regan, R.S., Hay, L.E, Viger, R.L., Webb, R.M., Payn, R.A. and LaFontaine, J.H. (2015), *PRMS-IV, the Precipitation-Runoff Modelling System, Version 4, Techniques and Methods 6-B7*. Reston, Virginia, USA.
- Meeus, J., (1999), *Astronomical algorithms*. Richmond, Va., Willmann-Bell, Inc., 477 p.
- Monteith, J.L., (1965), Evaporation and environment, in *The state and movement of water in living organisms: Symposia for the Society of Experimental Biology*, 19, 205–234.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970), River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290
- Penman, H.L., (1948), Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, England*, series A, 193, 120–145.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J., (1972), On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92.
- Swift, L.W., Jr., (1976), Algorithm for solar radiation on mountain slope. *Water Resources Research*, 12(1), 108–112.

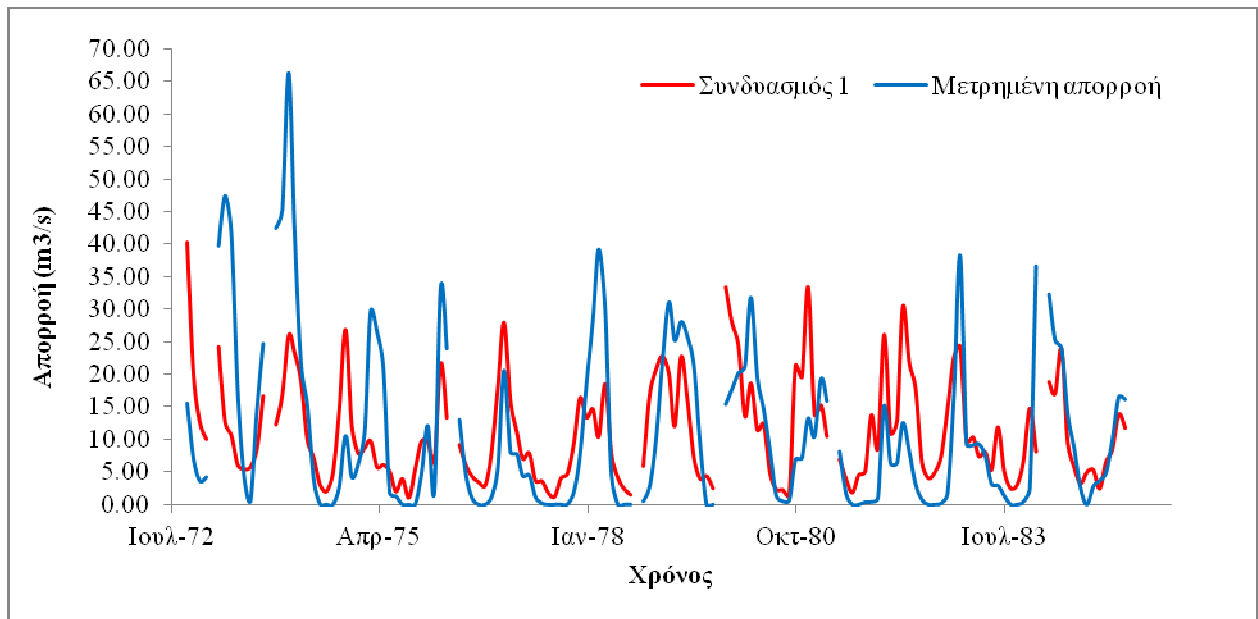
## **Διαδικτυακές**

Προπτυχιακό Μάθημα Φωτοερμηνείας – Τηλεπισκόπησης, Πίνακας κατηγοριών κάλυψης γης του CORINE 2000, [mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1034/document/CORINE\\_GR.pdf](http://mycourses.ntua.gr/courses/SURVEY1034/document/CORINE_GR.pdf)

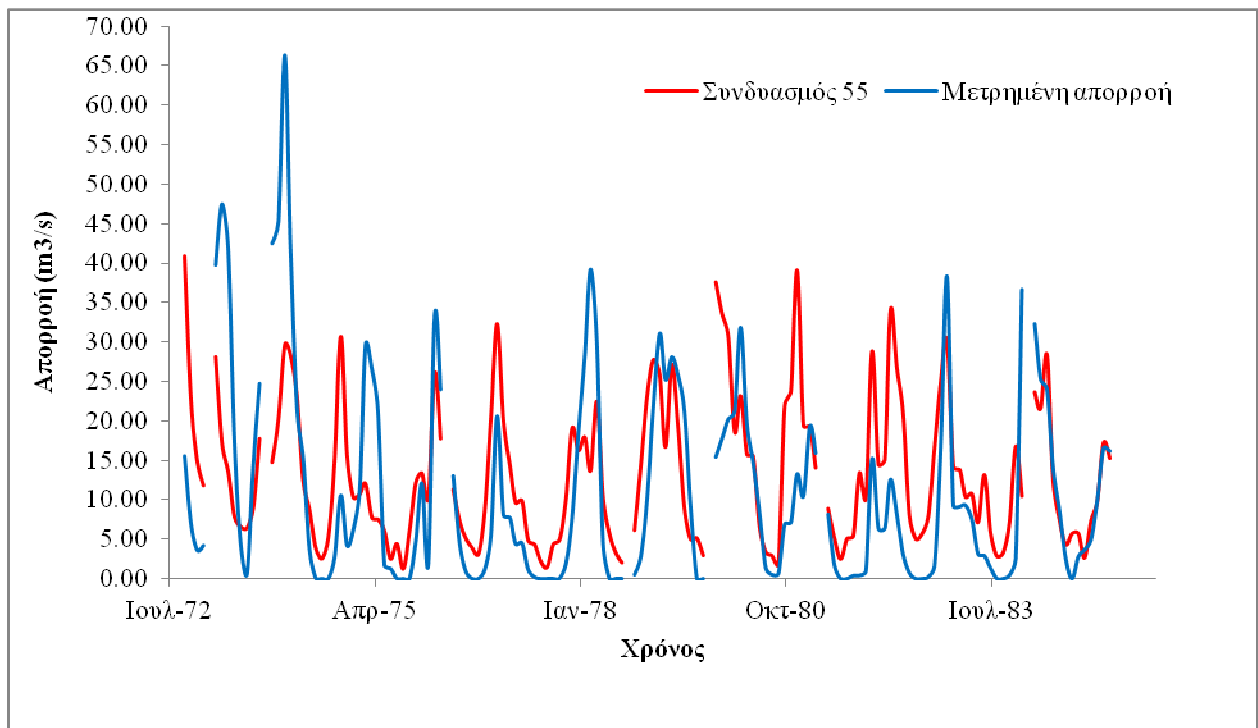
## Παράρτημα Α: Σχήματα



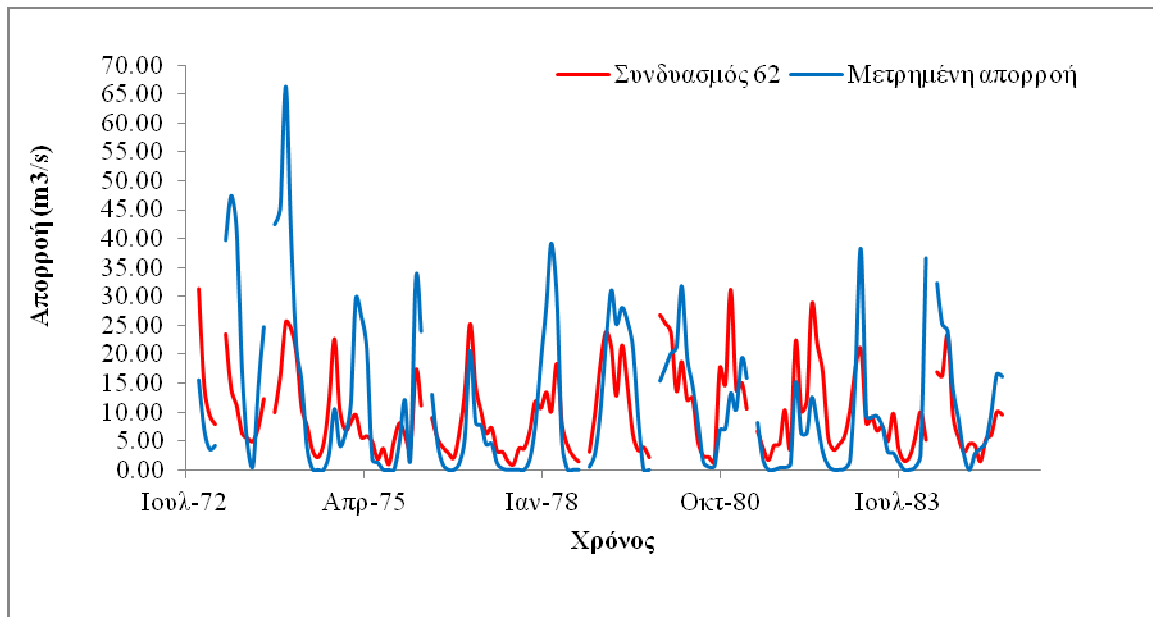
Σχήμα Α.1: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους της λεκάνης απορροής



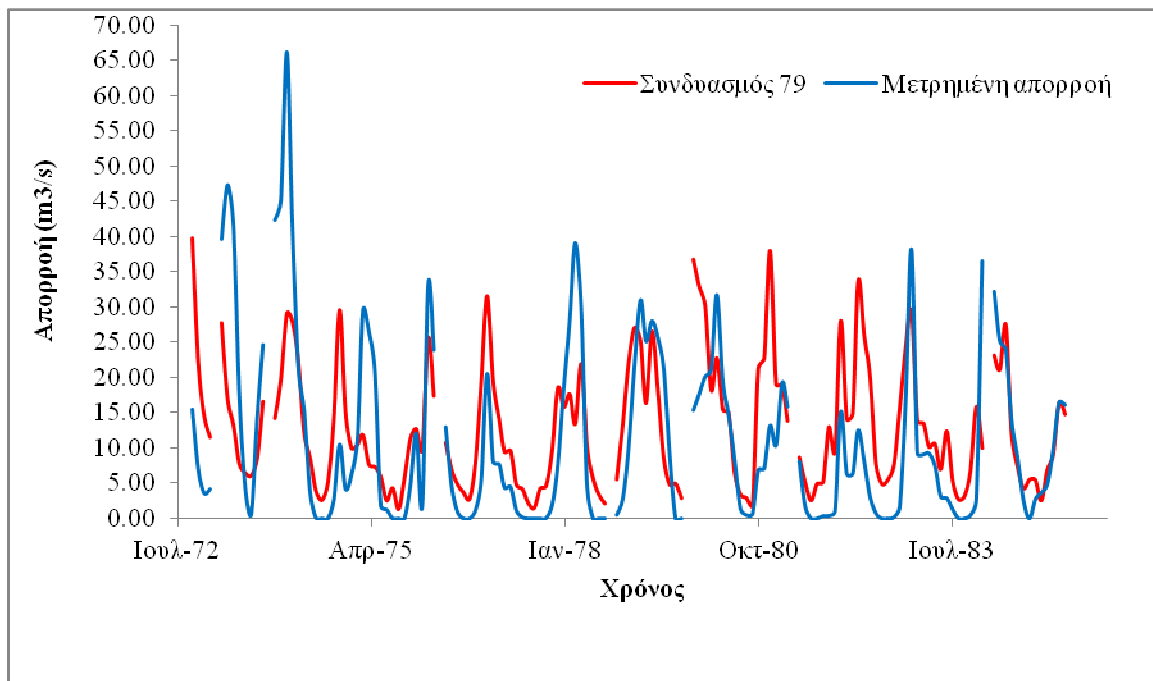
Σχήμα Α.2: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή για τον συνδυασμό 1



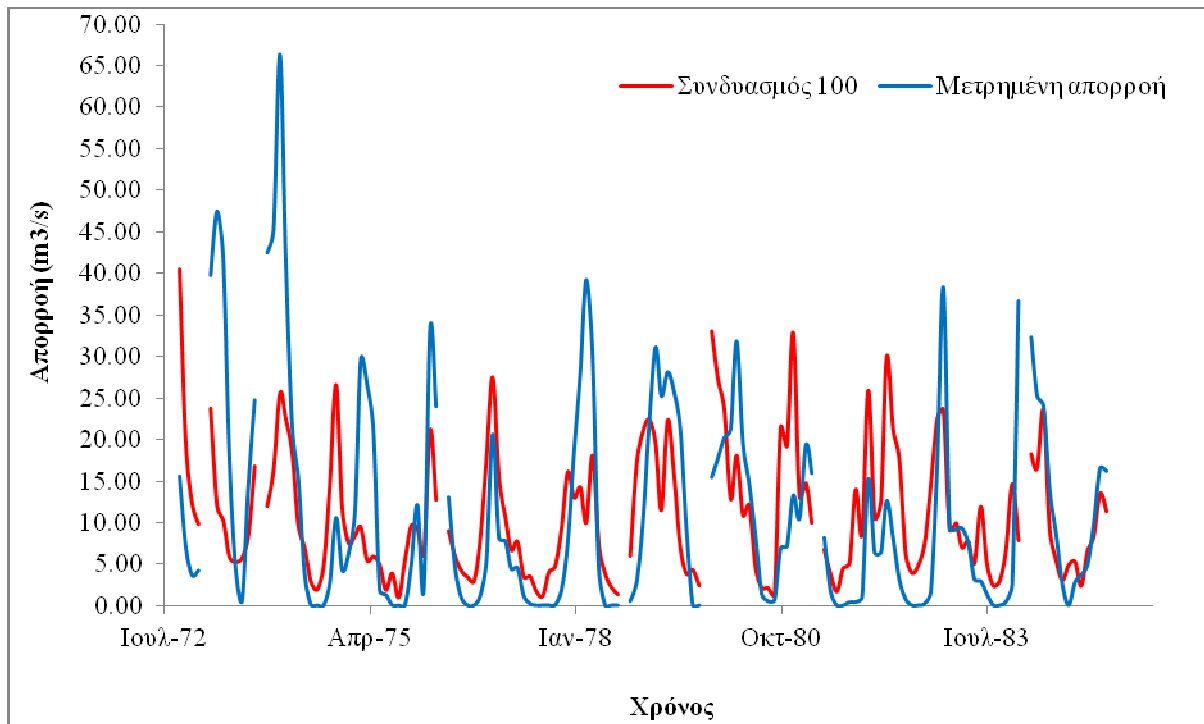
Σχήμα Α.3: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή για τον συνδυασμό 55



Σχήμα Α.4: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή για τον συνδυασμό 62



Σχήμα Α.5: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή για τον συνδυασμό 79



Σχήμα Α.6: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή για τον συνδυασμό 100