



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Η επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της
βροχόπτωσης στην προσαρμογή υδρολογικών μοντέλων**

Εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού

Παπαδημητράκη Δ. Αικατερίνη

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	9
Abstract	11
Περίληψη.....	12
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Το κίνητρο.....	13
1.2 Επιρροές της χωρικής μεταβλητότητας. Παλιές και νέες προσεγγίσεις	13
1.3 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	14
1.4 Διάρθρωση Διπλωματικής εργασίας	14
2. Περιοχή μελέτης και περιγραφή των δεδομένων.....	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Γενική περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	16
2.3 Δομή της περιοχής μελέτης.....	19
2.3.1 Τοπογραφία	19
2.3.2 Γεωλογία	21
2.3.3 Υδρογεωλογία	22
2.3.4 Εδαφική κάλυψη	23
2.4 Κλίμα.....	23
2.4.1 Βροχόπτωση.....	25
2.4.2 Θερμοκρασία.....	34
2.4.3 Σχετική υγρασία, σχετική ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου	35
2.5 Επιφανειακή απορροή.....	36
2.6 Εξατμοδιαπνοή.....	37
3. Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών δεδομένων βροχόπτωσης.....	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Μέθοδος των Πολύγωνων Thiessen	40
3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου πολυγώνων Thiessen	40
3.2.2 Υπολογιστική διαδικασία.....	42
3.3 Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής – Kriging interpolation.....	46
3.3.1 Θεωρητική διερεύνηση και μαθηματική τεκμηρίωση της μεθόδου	46
3.3.2 Ομογενές τυχαίο πεδίο- Στατιστική ομοιογένεια.....	48

3.3.3 Χωρική συσχέτιση τυχαίου πεδίου – Ημιμεταβλητόγραμμα (Semivariogram) ...	49
3.3.4 Ισότροπο τυχαίο πεδίο-Στατιστική ισοτροπία	51
3.3.5 Η έννοια της εκτιμήτρια,.....	52
3.3.6 Εκτίμηση τυχαίου πεδίου με την μέθοδο Ordinary Kriging	54
4. Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης.....	63
4.1 Εισαγωγή.....	63
4.2 Το μοντέλο HYDROGEIOS	64
4.2.1 Πεδίο εφαρμογής.....	64
4.2.4 Μαθηματική Δομή	65
4.3 Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος	66
4.3.1 Κόμβοι - Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες.....	66
4.3.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης, Hydrological Response Unit (HRU)	68
4.4 Σχηματοποίηση υπόγειου συστήματος	71
4.4.1 Κύτταρα υπόγειου συστήματος.....	71
4.4.2 Πηγές.....	72
4.5 Παραμετρική δομή του μοντέλου HYDROGEIOS	74
3.5.2 Δομή μοντέλου υπόγειου συστήματος.....	78
5. Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου.....	82
5.1 Θεωρητική διερεύνηση	82
5.2 Διατύπωση βαθμονόμησης ως πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης	85
5.3 Επαλήθευση	87
5.4 Κριτήρια καλής προσαρμογής	88
5.4.1 Αποτελεσματικότητα	88
5.4.2 Μεροληψία.....	89
5.4.3 Σφάλμα μηδενικών παροχών	90
5.5 Αρχικές συνθήκες.....	91
5.6 Όρια παραμέτρων.....	91
5.7 Βαθμονόμηση μοντέλου στη λεκάνη ελέγχου	92
5.7.1 Προετοιμασία μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	92
5.7.2 Ορισμός στοχικής συνάρτησης ολικής βελτιστοποίησης	93
5.7.3 Περιγραφή της διαδικασίας της βαθμονόμησης	93

5.8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Σεναρίου 1	95
5.8.1 Αποτελέσματα στις θέσεις ελέγχου Καστριού και Κομποτάδων	95
5.8.2 Φυσική σημασία των παραμέτρων.....	97
5.8.3 Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης	100
5.9 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Σεναρίου 2.....	101
5.8.2 Αποτελέσματα στις θέσεις ελέγχου Καστριού και Κομποτάδων	101
5.8.2 Φυσική σημασία των παραμέτρων.....	103
5.8.3 Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης	105
5.10 Συγκριτική διαγραμματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	107
6. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	112
Συμπεράσματα	112
Προτάσεις:.....	113
7 Βιβλιογραφία.....	114
8 Παράρτημα.....	117

Σχήματα

Σχήμα 2.1 Περιοχή μελέτης και τοπογραφία λεκάνης του Σπερχειού.....	17
Σχήμα 2.2 Περιοχή ελέγχου άναντη Κομποτάδων (αριστερά), οι 11 υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου (δεξιά) [†]	18
Σχήμα 2.3 Μοντέλο ψηφιακών υψομέτρων (DEM) περιοχής ελέγχου (αριστερά), κλίση περιοχής ελέγχου (δεξιά).....	20
Σχήμα 2.4 Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πηγή: <i>IGME</i> , 2010)	21
Σχήμα 2.5 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης Σπερχειού (αριστερά) και το αντίστοιχο για την περιοχή ελέγχου (δεξιά).....	22
Σχήμα 2.6 Ψηφιακό μοντέλο εδαφικής κάλυψης περιοχής ελέγχου 9 κλάσεων (αριστερά) και το αντίστοιχο των 2 κλάσεων (δεξιά)	23
Σχήμα 2.7 Κατανομή σταθμών σημειακών μετρήσεων εντός και εκτός της περιοχής ελέγχου	24
Σχήμα 3.1 Υποθετική λεκάνη απορροής με ένα σταθμό σημειακής μέτρησης της βροχοπτώσης. Οι καμπύλες γραμμές αναπαριστούν τις υσοϋέτιες.	41
Σχήμα 3.2 Πολύγωνα Thiessen για την ευρύτερη περιοχή μελέτης	42
Σχήμα 3.3 Πολύγωνα Thiessen για τις υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου.....	43

Σχήμα 4.1 (α) Απεικόνιση του ημι-κατανεμημένου μοντέλου επιφανειακής ροής της περιοχής ελέγχου, (β) κόμβοι κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου στις συμβολές των κλάδων, όπως προέκυψαν στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	65
Σχήμα 4.2 Επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στη σχηματοποίηση του επιφανειακού συστήματος για την περιοχή ελέγχου : Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, DEM (πάνω αριστερά), κόμβοι υδρογραφικού δικτύου (κάτω αριστερά), κλάδοι δικτύου (πάνω δεξιά), υπολεκάνες (κάτω δεξιά).....	67
Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση συστήματος επιφανειακής ροής για τυχαία υπολεκάνη της περιοχής ελέγχου με βάση το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	68
Σχήμα 4.4 Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης.....	69
Σχήμα 4.5 Ενώσεις (unions) υπολεκανών-ΜΥΑ.....	70
Σχήμα 4.6 Χωρική διακριτοποίηση υπόγειου υδροφορέα. Κύτταρα 1, 2 & 3.....	72
Σχήμα 4.7 Θέση πηγών σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής ελέγχου.....	73
Σχήμα 4.8 Σχήμα 4.8 Παράδειγμα ένωσης κυττάρου 0, με 8 υδρολογικές ενότητες και 5 μονάδων υδρολογικής απόκριση.....	74
Σχήμα 4.9 Σχήμα 4.9 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου επιφανειακού υδατικού ισοζυγίου [†]	74
Σχήμα 4.10 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος.....	77
Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος μεταξύ γειτονικών δεξαμενών.....	78
Σχήμα 4.12 Σχήμα Πορεία επίλυσης ρητού σχήματος σε κάθε χρονικό βήμα.....	80
Σχήμα 5.1 Ανάλογο Swiss Cheese στοχικής συνάρτησης 2 παραμέτρων.....	84
Σχήμα 5.2 Ανεστραμμένη επιφάνεια απόκρισης-Swiss Cheese Effect.....	84
Σχήμα 5.3 Ετήσιο Υδρολογικό Ισοζύγιο περιοχής ελέγχου για Σενάριο 1.....	100
Σχήμα 5.4 Ετήσιο Υδρολογικό Ισοζύγιο περιοχής ελέγχου για Σενάριο 2.....	106
<u>Πίνακες</u>	
Πίνακας 2.1 Έκταση υπολεκανών περιοχής έλεγχου ανάντη Κομποτάδων.....	18
Πίνακας 2.2 Υψόμετρα και κλίσεις υπολεκανών ανάντη Κομποτάδων.....	20
Πίνακας 2.3 Στοιχεία σταθμών σημειακής μέτρησης (Πηγή ΥΠΕΧΩΔΕ, 1992).....	24
Πίνακας 2.4 Εποχική κατανομή βροχόπτωσης.....	29
Πίνακας 3.1 Συντελεστές βάρους Thiessen για τις υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου..	43
Πίνακας 5.1 Αρχικές στάθμες υπόγειου υδροφορέα.....	93
Πίνακας 5.2 Συνιστώσες στοχικής συνάρτησης & συντελεστές βάρους τελικής βαθμονόμησης.....	93

Πίνακας 5.3 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο βαθμονόμησης 1951-1971.....	95
Πίνακας 5.4 1 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο επαλήθευσης 1980-2000	96
Πίνακας 5.5 3 Συντελεστής άμεσης απορροής των ΜΥΑ.....	98
Πίνακας 5.6 Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας.....	98
Πίνακας 5.7 Συντελεστής στείρευσης κατείδυσης	99
Πίνακας 5.8 Χωρητικότητα κατακράτησης βροχής.....	99
Πίνακας 5.9 παράμετροι και αρχικές στάθμες υπόγειου συστήματος.....	100
Πίνακας 5.10 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο βαθμονόμησης 1951-1979.....	101
Πίνακας 5.11 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο επαλήθευσης 1980-2000	101
Πίνακας 5.12 Συντελεστής άμεσης απορροής των ΜΥΑ.....	103
Πίνακας 5.13 Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας.....	104
Πίνακας 5.14 Συντελεστής στείρευσης κατείδυσης	104
Πίνακας 5.15 Χωρητικότητα κατακράτησης βροχής.....	105
Πίνακας 5.16 Παράμετροι και αρχικές στάθμες υπόγειου συστήματος.....	105

Ευχαριστίες

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την παρουσία του επιβλέποντος Καθηγητή Ε.Μ.Π. Δ. Κουτσογιάννη τον οποίο τον ευχαριστώ θερμά. Θερμά ευχαριστώ επίσης τον Δρ Πολιτικό Μηχανικό Ανδρέα Ευστρατιάδη για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμπαράστασή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επιστημονικό συνεργάτη κ Α. Κουκουβίνο, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό για την ζωτικής σημασίας βοήθειά του σε σχέση με τα προγράμματα γεωστατιστικής πληροφορίας αλλά και τον επίκουρο καθηγητή Ν. Μαμάση για τις χρήσιμες πληροφορίες του

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή τους.

Abstract

The subject of spatial variability of rainfall has always been a field of study. Its representation and impact in the adaptation of hydrological models has been and is being investigated by scientists.

In this study homogenous and isotropic vector fields of rainfall for the region of Sperhios basin were originally created by using the program ARC-GIS 9.3 for the geostatistical method “Co Kriging”. This was done by introducing data points taken from 14 gauges from the study area during a 50-year period. The data emerged after the primary sample processing, through expansion and completion techniques. The goal was the most adequate depiction of the spatial variability of rainfall and the extraction of the average monthly rainfall time series for the above period.

The hydrological simulation was done using the program HYDROGEIOS supported by the environment MapWindow. The model formalized both the surface and the underground system. The rainfall data was obtained by applying the classical method of Thiessen polygons and the above method of Co Kriging. A semiautomatic calibration of the model was performed through the global optimization for both data packages and two scenarios were developed. The calibration was done in steps each of which required many tests. All the parameters were optimized in selected groups in each test. In this way, firstly were detected which parameters the model is sensitive to and secondly the range of feasible region for which each parameter has a physical interpretation. The aim was to identify that group of parameters which lead to a better simulation in reference to the observed hydrograph. The goodness-of-fit criteria of the model in both calibration and validation were the efficiency, the average bias and the error of zero discharges.

Finally, the two scenarios were compared for both the calibration and the validation period. Particular emphasis was placed on the comparison of the parameters in relation to their physical interpretation and on the average annual water balance in reference to its realistic representation.

Περίληψη

Το ζήτημα της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης ανέκαθεν αποτελούσε πεδίο μελέτης. Η αποτύπωση της καθώς και η επίδρασή της στην προσαρμογή των υδρολογικών μοντέλων αποτέλεσε και αποτελεί αντικείμενο έρευνας των επιστημόνων.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, αρχικά δημιουργήθηκαν διανυσματικά ομογενή και ισότροπα πεδία βροχόπτωσης για την περιοχή της λεκάνης του Σπερχειού, με τη χρήση του προγράμματος ARC-GIS 9.3 για την γεωστατιστική μέθοδο Co Kriging. Αυτό έγινε με την εισαγωγή σημειακών δεδομένων που ελήφθησαν από 14 σημεία της ευρύτερης περιοχής ελέγχου και αφορούσαν σε χρονοσειρές 50 ετών, οι οποίες προέκυψαν μετά από επέξεργασία του πρωτογενούς δείγματος μέσα από τεχνικές επέκτασης και συμπλήρωσης. Στόχος ήταν η όσο το δυνατόν επαρκέστερη αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης και η εξαγωγή χρονοσειρών μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης για την παραπάνω περίοδο.

Στη συνέχεια έγινε η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης ελέγχου με το πρόγραμμα HYDROGEIOS υποστηριζόμενο από το περιβάλλον MapWindow. Στο μοντέλο σχηματοποιήθηκε τόσο το επιφανειακό όσο και το υπόγειο σύστημα και εισήχθησαν τα δεδομένα βροχόπτωσης που προέκυψαν από την εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου πολύγωνων Thiessen και από την παραπάνω μέθοδο του Co Kriging. Ακολούθησε η ημιαυτόματη βαθμονόμηση του μοντέλου, μέσω ολικής βελτιστοποίησης και για τα δύο πακέτα δεδομένων και αναπτύχθηκαν δύο σενάρια απορροής. Η βαθμονόμηση έγινε σε στάδια σε κάθε ένα από τα οποία έλαβε χώρα πλήθος δοκιμών. Βελτιστοποιήθηκαν όλες οι παράμετροι σε επιλεγμένες κάθε φορά ομάδες. Εντοπίστηκε με αυτόν τον τρόπο πρώτον σε ποιές παραμέτρους παρουσιάζει ευαισθησία το μοντέλο και δεύτερον το εύρος τιμών του εφικτού χώρου για τον οποίο η κάθε παράμετρος έχει φυσική ερμηνεία. Στόχος ήταν ο εντοπισμός εκείνης της ομάδας παραμέτρων που οδηγούσαν σε καλύτερη προσομοίωση σε σχέση με το παρατηρημένο υδρογράφημα στη θέση ελέγχου. Κρίτηρια επίδοσης του μοντέλου τόσο για τη βαθμονόμηση όσο και για την επαλήθευση τέθηκαν η αποτελεσματικότητα, η μεροληψία του μέσου καθώς και το σφάλμα μηδενικών παροχών.

Τέλος έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων προσομοίωσης τόσο για την περίοδο βαθμονόμησης όσο και για την περίοδο επαλήθευσης. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη σύγκριση των παραμέτρων ως προς τη φυσική τους ερμηνεία αλλά και στη σύγκριση των μέσων ετήσιων υδατικών ισοζυγίων.

1. Εισαγωγή

1.1 Το κίνητρο

Η σύγχρονη οπτική στην διαχείριση των υδατικών συστημάτων, ανεξάρτητα από το αν ενδιαφέρεται για την προέλευση του νερού, τη χρήση του ή τις επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας στον κύκλο του, δεν μπορεί να αγνοήσει την δυναμική των ταχέως εξελισσόμενων μαθηματικών μοντέλων. Τα υδρολογικά μοντέλα είναι απλοποιημένες προσομοιώσεις ενός τμήματος του υδρολογικού κύκλου. Εξυπηρετούν ένα εύρος σκοπών αλλά κυρίως χρησιμοποιούνται για υδρολογική πρόβλεψη καθώς και για κατανόηση των υδρολογικών διαδικασιών. Η εκτίμηση και παρουσίαση της βροχόπτωσης σαν δεδομένο εισόδου στο μοντέλο κρίνεται ζωτικής σημασίας. Η βροχόπτωση διακατέχεται από πολύπλοκες φυσικές διαδικασίες που είναι κατά βάση μη γραμμικές και εξαιρετικά ευαίσθητες (Bardossy and Plate, 1992). Η εκτίμηση της βροχόπτωσης είναι πολύ σημαντική στα υδρολογικά μοντέλα αφού οποιοδήποτε μοντέλο, όσο καλά και αν είναι βασισμένο σε φυσική βάση και εμπειρικά επαληθευμένο με μετρήσεις του παρελθόντος, δεν μπορεί να παράξει ρεαλιστικά υδρογραφήματα εάν τα δεδομένα της βροχόπτωσης δεν είναι ικανοποιητικά ακριβή. Τα υδρολογικά μοντέλα έχουν αβεβαιότητες που προκύπτουν από διάφορες πηγές: (1) από σφάλματα στα δεδομένα εισόδου καθώς και από την ανακρίβεια στην περιγραφή της μεταβλητότητάς τους, (2) από το ίδιο το μοντέλο που αποτελεί μία απλή προσέγγιση της υδρολογικής πραγματικότητας (Beven, 2001), (3) από τις παραμέτρους του μοντέλου (Seibert, 1997) και (4) από το παρατηρημένο σφάλμα των αποκρίσεων.

1.2 Επιρροές της χωρικής μεταβλητότητας. Παλιές και νέες προσεγγίσεις

Η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης συχνά θεωρείται ως η βασική πηγή σφαλμάτων σε ένα υδρολογικό μοντέλο (Syed et al, 2003). Η βροχόπτωση διακρίνεται από σημαντική χωρική και χρονική μεταβλητότητα, ακόμα και στην κλίμακα μιας σχετικά μικρής λεκάνης απορροής. Πολλές είναι οι μελέτες που κατά καιρούς καταπιάνονται με το ζήτημα της ευαισθησίας των μοντέλων που μαζί με άλλες αβεβαιότητες και μεθόδους παρεμβολής σχετίζονται με τη χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης όπως αυτήν που εισέρχεται στο μοντέλο λόγω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου. Οι Dunkan et al. (2003) μελέτησαν την επίδραση της πυκνότητας ενός δειγματικού υδρογραφικού δικτύου στην ακρίβεια της πρόβλεψης της απορροής σε μία αγροτική

λεκάνη. Παρατήρησαν ότι η πυκνότητα έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της εκτίμησης των υδρολογικών παραμέτρων, με το τυπικό σφάλμα να πέφτει εκθετικά με την αύξηση της πυκνότητας.

Οι Aranud et al. (2002) παρατήρησαν την ουσιαστική επίδραση της μέσης επιφανειακής στις συνθετικές απορροές προσομοιωμένες για τέσσερις πλασματικές λεκάνες διαφόρων μεγεθών. Οι Zehe et al. (2005) παρατήρησε μείωση στην προγνωστική ικανότητα του μοντέλου επιφανειακή μέση βροχόπτωση χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της εκτίμησης παραμέτρων. Οι Finnerty et al. (1997), διερεύνησαν τη μεροληψία του χρόνου απορροής και του όγκου του όταν έκαναν υδρολογική πρόβλεψη σε διαφορετική χωροχρονική κλίμακα από αυτήν που το μοντέλο βαθμονομούνταν. Παρατήρησαν ότι οι παράμετροι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την χωροχρονική κλίμακα βαθμονόμησης

Επιπλέον, η αναγκαιότητα για ακριβή περιγραφή της χρονικής μεταβολής της διασποράς για μικρές λεκάνες απορροής είναι γνωστή, σε μία μικρή λεκάνη ο Krawesky et al. (1991) βρήκαν μεγαλύτερη ευαισθησία στη χρονική ανάλυση παρά στη χωρική. Οι Ogden and Julien (1994) πραγματοποίησαν πειράματα για το σε ποια περίοδο αυτό είναι κυρίαρχο. Επιπλέον, στις μεγαλύτερες λεκάνες η χωρική μεταβλητότητα είναι κυρίαρχη (Liang et al., 2004)

1.3 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Ο Σκοπός της εργασίας είναι η επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στα υδρολογικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, επιλέγεται σαν μέθοδος αποτύπωσης της μηνιαίας χωρικής μεταβλητότητας η γεωστατιστική μέθοδος επιφανειακής ολοκλήρωσης της σημειακής πληροφορίας CoKriging και συγκρίνεται με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο των πολύγωνων Thiessen. Κριτήριο σύγκρισης είναι η προσαρμογή του υδρολογικού μοντέλου. Ο έλεγχος προσαρμογής γίνεται με το πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης και βαθμονόμησης HYDROGEIOS. Με βάση τα εξαγόμενα αποτελέσματα, εξετάζονται οι παράμετροι, τα πολλαπλά κριτήρια επίδοσης της βελτιστοποίησης, οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απόκρισης και το μέσο ετήσιο υδατικό υσοζύγιο ώστε να αποτυπωθεί η ευαισθησία του μοντέλου στην χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης.

1.4 Διάρθρωση Διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια και το Παράρτημα.

- Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή και αναφέρεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας καθώς γίνεται και αναφορά σε παλαιότερες προσεγγίσεις.

- Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης και διατυπώνονται υλοποιούνται οι πρώτες επεξεργασίες δεδομένων εισόδου στο μοντέλο, δηλαδή των βροχοπτώσεων, της θερμοκρασίας και της εξατμοδιαπνοής.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες επιφανειακή ολοκλήρωσης ενώ επιχειρείται και η μαθηματική τεκμηρίωση της γεωστατιστικής μεθόδου Kriging
- Στο 4^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα μοντέλα επιφανειακού και υπόγειου συστήματος για την λεκάνη ελέγχου του Σπερχείου, ως προς τη μαθηματική τους δομή και τη σχηματοποίησή τους.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της βαθμονόμησης, τα βήματα που ακολουθήθηκαν ώστε να οριστούν 2 σενάρια βαθμονόμησης ένα για κάθε είδος βροχόπτωσης και οι τελικοί υπολογισμοί και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων.
- Στο 7^ο Κεφάλαιο παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.
- Το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ αποτελείται από τις μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις, όπως αυτές προέκυψαν από την εξαγωγή των πεδίων Co Kriging

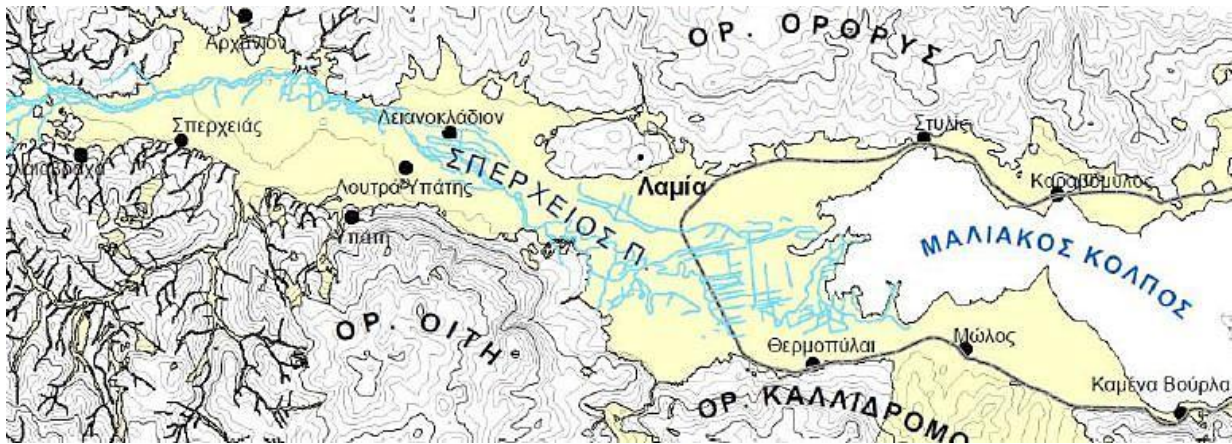
2. Περιοχή μελέτης και περιγραφή των δεδομένων

2.1 Εισαγωγή

Ως δοκιμαστική λεκάνη ορίστηκε το τμήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού που βρίσκεται ανάντη της γέφυρας των Κομποτάδων. Ο λόγος για τον οποίο έγινε η επιλογή αυτού του τμήματος - και όχι ολόκληρης της λεκάνης - για την συγκεκριμένη μελέτη, είναι ότι το υδρογραφικό δίκτυο εδώ δεν επηρεάζεται από υδροηλεκτρικά έργα ή έργα εκτροπής, που εν δυνάμει θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά απορροής της δεδομένης υπολεκάνης του Σπερχειού. Σχεδόν όλες οι υποδομές διαχείρισης των υδάτινων πόρων, που άλλωστε χαρακτηρίζουν και την λεκάνη σαν δυναμικό υδροσύστημα (εξαιτίας του ότι δέχεται έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις λόγω των καλλιεργειών) βρίσκονται κατάντη των Κομποτάδων. Επιπλέον, η ύπαρξη καθώς και η αξιοπιστία των πρωτογενών δεδομένων αποτέλεσε παράγοντα επιλογής της συγκεκριμένης περιοχής. Έτσι όλα τα απαιτούμενα δεδομένα προέρχονται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (ΥΠΕΧΩΔΕ), το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) και από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Έτσι, στην παρούσα φάση της διερεύνησης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί μία γενική εικόνα με βάση το σύνολο των πληροφοριών που συγκεντρώθηκαν σε σχέση με την περιοχή μελέτης δηλαδή την λεκάνη απορροής του Σπερχειού.

2.2 Γενική περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Ανατολικής στερεάς Ελλάδος (Υ.Δ 07). Η λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού γειτονεύει βόρεια με την λεκάνη του Πηνειού, νότια με τις λεκάνες του Βοιωτικού Κηφισού και Μόρνου, νοτιοδυτικά με την λεκάνη του Ευήνου και δυτικά με την λεκάνη του Αχελώου. Η λεκάνη περικλείεται βόρεια από το όρος Όρθρυς και τις διακλαδώσεις της Πίνδου, νότια από τα όρη Καλλίδρομο, Οίτη και Βαρδούσια ενώ δυτικά από τον Τυμφρηστό. Είναι ουσιαστικά μία τεκτονική τάφρος, με διαμήκη άξονα που συμπίπτει περίπου με την κύρια κοίτη του ποταμού Σπερχειού (Σχήμα 2.1). Η έκταση της λεκάνης ανέρχεται σε 1829.5 km^2 και το μέσο υψόμετρο είναι 641 m . Ο Σπερχειός ποταμός πηγάζει δυτικά από συγκρότημα πηγών του όρους Τυμφρηστός και εκβάλλει ύστερα από διαδρομή $82,5 \text{ km}$, ανατολικά, στον Μαλιακό κόλπο (Κακαβάς, 1985). Η κύρια κοίτη του τροφοδοτείται συνολικά από 63 χειμάρρους μόνιμη και περιοδικής παροχής, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι ο Ρουστιανίτης, η Βίστριτσα, ο Γοργοπόταμος, ο Ασωπός και ο Ξηριάς Λαμίας (Κουτσογιάννης, 2003).



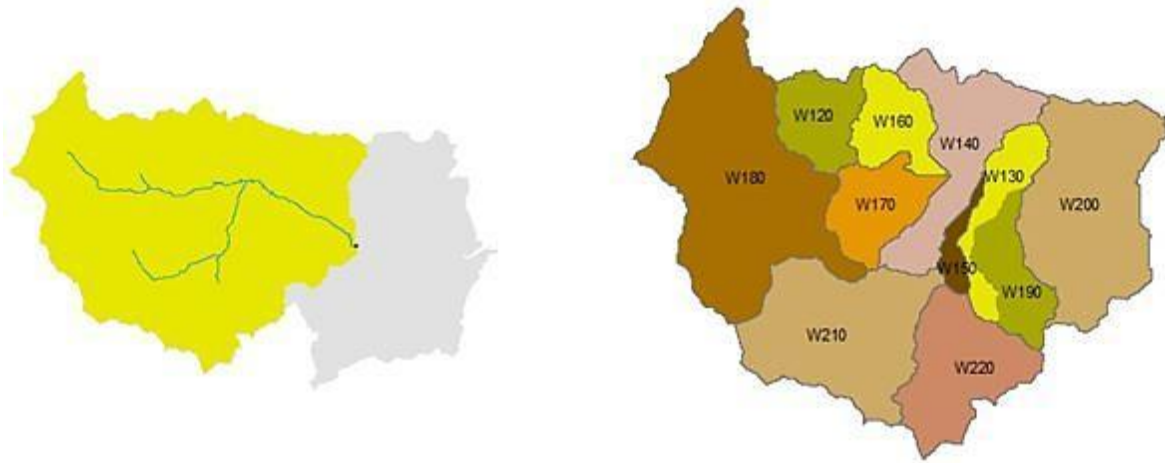
Σχήμα 2.1 Περιοχή μελέτης και τοπογραφία λεκάνης του Σπερχειού

Το τμήμα της λεκάνης ανάντη των Κομποτάδων[†] έχει συνολική έκταση 1128.73 km^2 , δηλαδή αποτελεί το 61.7% της συνολικής έκτασης της λεκάνης του Σπερχειού ενώ για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διερεύνησης χωρίζεται σε 11 μικρότερες υπολεκάνες (Σχήμα 2.2). Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι 11 υπολεκάνες καθώς και η έκταση της κάθε μίας. Η μορφολογία της λεκάνης είναι επίπεδη έως λοφώδης με υψόμετρα που κυμαίνονται από 0 έως 100 m στην κοιλάδα, ενώ περιμετρικά φτάνουν και τα 200 m. Στο μεν Βόρειο τμήμα της (όρος Όρθρυς) παρατηρούνται υψόμετρα έως και 1200 m ενώ στο Νότιο (όρος Οίτη) παρατηρούνται υψόμετρα μέχρι και 2100 m. Ως προς το ανάγλυφο, στην νότια πλευρά θεωρείται απότομο και ήπιο και χαμηλό προς τη θάλασσα. Κατά τα 2/3 η κοιλάδα του Σπερχειού παρουσιάζει έντονες κλίσεις, που δίνουν στον ποταμό χαρακτήρα ορεινό-χειμαρρικό, με οξείες αιχμές πλημμύρων και έντονη στερεοπαροχή. Αντιθέτως, κατά το τελευταίο 1/3 της διαδρομής του ο Σπερχειός μετατρέπεται σταδιακά σε πεδινό ποταμό και διασχίζει χαμηλές περιοχές, όπου προκαλεί συχνά σημαντικές πλημμύρες (Κουτσογιάννης, 2003).

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί του υποβάθρου της λεκάνης του Σπερχειού είναι ασβεστόλιθοι, οφιόλιθοι και σχιστοκερατόλιθοι της Υποπελαγονικής ενότητας, δολομίτες και φλύσχης.

[†] Στο εξής το τμήμα της λεκάνης ανάντη των Κομποτάδων θα λέγεται λεκάνη ελέγχου χάριν συντομίας

Το κλίμα της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την κατάταξη Thornwaite (Καρράς, 1973), χαρακτηρίζεται ξηρό με απόκλιση προς το ημιυγρό με πλεόνασμα ύδατος κατά τον χειμώνα, με θερμική κατάσταση μεσόθερμου κλίματος.



Σχήμα 2.2 Περιοχή ελέγχου ανάντη Κομποτάδων (αριστερά), οι 11 υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου (δεξιά)[†]

Πίνακας 2.1 Έκταση υπολεκανών περιοχής έλεγχου ανάντη Κομποτάδων

	Κωδικός Υπολεκάνης	Έκταση Υπολεκάνης (km^2)
1	W120	55.717
2	W130	45.739
3	W140	109.159
4	W150	15.489
5	W160	52.312
6	W170	62.866
7	W180	265.757
8	W190	51.580
9	W200	189.809
10	W210	169.171
11	W220	105.210

[†] Ο διαχωρισμός της περιοχής ελέγχου σε 11 υπολεκάνες προέκυψε με βάση τη σχηματοποίησης των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών με τη χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, και θα αναλυθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο 3.

Στην λεκάνη ελέγχου, ο θερμότερος και ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιούλιος και ο Ιανουάριος αντίστοιχα. Για τον Ιούλιο η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα είναι $22.5^{\circ}C$ ενώ για τον Ιανουάριο είναι $5.5^{\circ}C$ όπως προκύπτουν μετά από επεξεργασία των καταγεγραμμένων τιμών του μετεωρολογικού σταθμού της Λαμίας για την περίοδο 1961 έως 1990. Η μέσες μηνιαίες τιμές βροχοπτώσεις είναι διαθέσιμες με βάση σημειακές παρατηρήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και μετά από συμπληρώσεις, για την περίοδο από το 1951 έως και το 2000. Από το σύνολο των σημειακών παρατηρήσεων φαίνεται ότι ο πιο υγρός μήνας του έτους είναι ο Δεκέμβριος ενώ ο πιο ξηρός ο Αύγουστος με μέσο μηνιαίο ύψος βροχής $160.8mm$ και $20.4mm$ αντίστοιχα, για την περίοδο 1951 με 2000. Η μέση ετήσια σημειακή βροχόπτωση για την ίδια περίοδο στην περιοχή μελέτης είναι $1037.4mm$. Τέλος, οι χρήσεις γης ως επί το πλείστον αφορούν σε αγροτικές καλλιέργειες με βαμβάκι, δημητριακά, καπνά, ελιές και οπωροφόρα δέντρα, που αναπτύσσονται κατά βάση στην κοιλάδα του Σπερχειού (ΙΓΜΕ,2010).

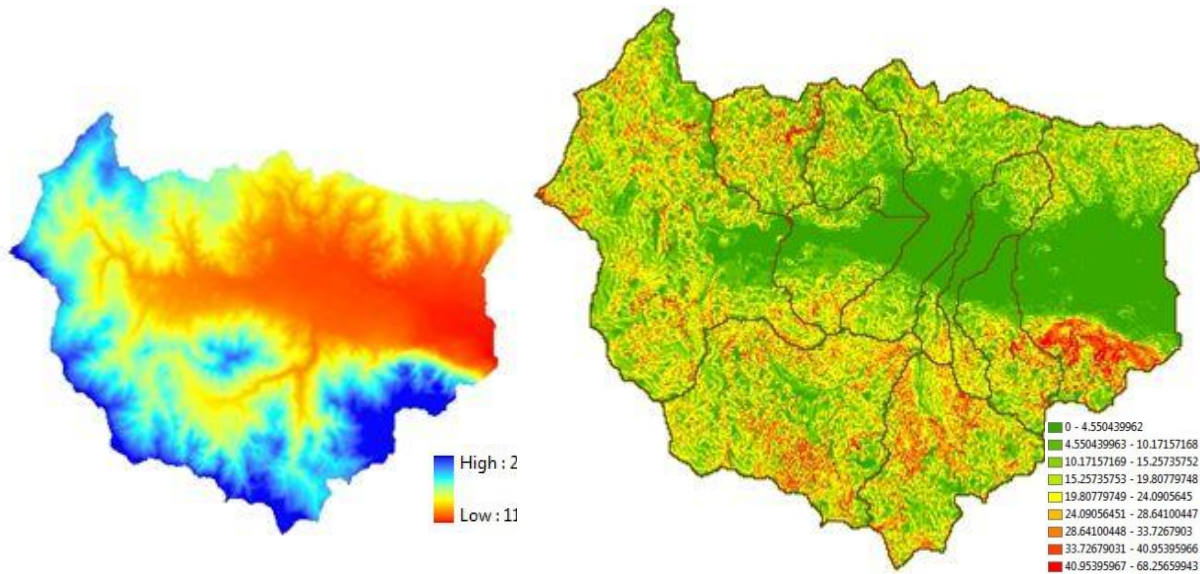
2.3 Δομή της περιοχής μελέτης

Οι φυσιογραφικοί παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη προέκυψαν από διαφορετικές πηγές, οι οποίες ήταν κυρίως οι εξής: (1) Μοντέλο ψηφιακών υψομέτρων, DEM (Digital Elevation Model), (2) Ψηφιακό μοντέλο εδαφικής κάλυψης - χρήσεων γης και (3) Ψηφιακό μοντέλο υδρογεωλογικού υπόβαθρου. Και τα τρία παραπάνω ψηφιακά μοντέλα αναφέρονται στη λεκάνη του Σπερχειού με χωρική ανάλυση $25m \times 25m$. Μία πιο λεπτομερής παρουσίαση της σχέσης των τριών αυτών μοντέλων με τον υπολογισμό των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής ελέγχου δίνεται παρακάτω.

2.3.1 Τοπογραφία

Οι κύριοι ορειογραφικοί άξονες (κορυφογραμμές) του Τυμφρηστού, της Οίτης και του Καλλίδρομου γενικά έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ περίπου. Η γνώση του προσανατολισμού των ορειογραφικών αξόνων είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού ασκεί μεγάλη επίδραση στην κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αλλά και των λοιπών κλιματικών στοιχείων (Κακαβάς, 1984). Στην λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού παρατηρείται μεγάλο εύρος τιμών υψομέτρων (Σχήμα 2.2) και μπορεί να διακριθεί σε τρεις υψομετρικές ζώνες: την πεδινή από $0-250m$, την ορεινή από $500m$ και πάνω καθώς και την μεταξύ αυτών παρεμβαλλόμενη ημιορεινή από $250-500m$. Όπως έχει προαναφερθεί οι κλίσεις της μακρόστενης κοιλάδας του Σπερχειού κατά το 75% του μήκους της είναι πολύ έντονες, δίνοντας στον ποταμό έντονα ορεινό-χειμαρρικό χαρακτήρα ενώ στο υπόλοιπο 25% του μήκους της οι κλίσεις γίνονται σταδιακά όλο και πιο ήπιες μετατρέποντας τον Σπερχειό σε πεδινό ποταμό (Σχήμα 2.2). Τέλος, ο πίνακας 2.2

αποτυπώνει τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά καθώς και τις κλίσεις της κάθε υπολεκάνης της περιοχής ελέγχου.



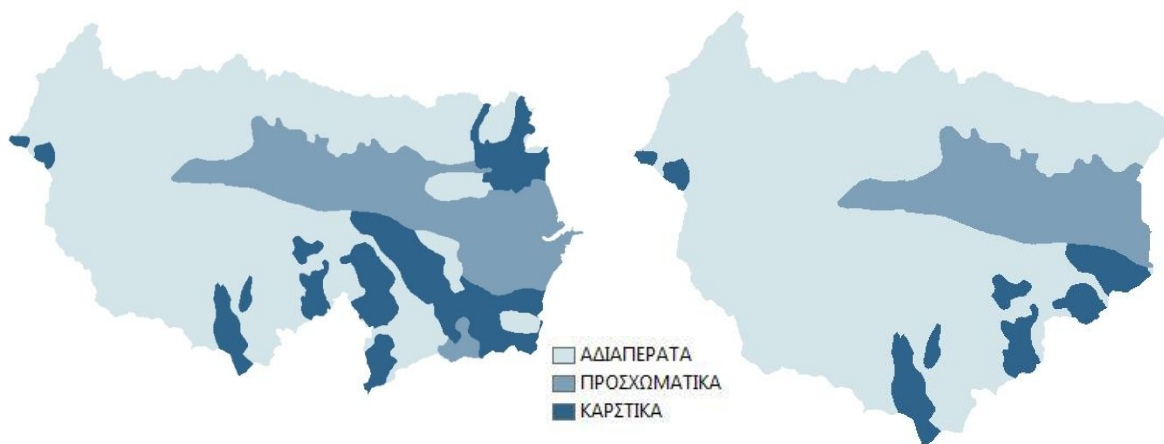
Σχήμα 2.3 Μοντέλο ψηφιακών υψομέτρων (DEM) περιοχής ελέγχου (αριστερά), κλίση περιοχής ελέγχου (δεξιά)

Πίνακας 2.2 Υψόμετρα και κλίσεις υπολεκανών ανάντη Κομποτάδων

Κωδικός υπολεκάνης	Υψόμετρο (m)				Κλίση (degree)			
	Μέγιστο (max)	Ελάχιστο (min)	Μέσο (mean)	Τυπική απόκλιση (St.dev)	Μέγιστο (max)	Ελάχιστο (min)	Μέσο (mean)	Τυπική απόκλιση (St.dev)
W120	1283.65	213.3	701.43	201.67	61.91	0	17.8	9.97
W130	1672.89	74.26	386.78	367.45	46.31	0	10.28	9.05
W140	1406.96	99.31	400.67	236.02	45.82	0	10.9	8.32
W150	1009.2	100.72	332.3	188.3	37.67	0	11.64	9.8
W160	994.49	117.91	428.94	196.46	49.96	0	11.85	8.34
W170	1449.08	118.87	384.99	278.15	40.94	0	9.52	8.7
W180	219.25	1910.41	873.41	331.21	65.2	0	15.87	8.77
W190	2066	80.35	837.96	601.46	60.43	0	13.86	10.7
W200	2112.78	20.09	407.83	454.13	65.98	0	10.98	11.28
W210	1929.97	281.12	996.4	322.23	68.26	0	18.69	9.14
W220	2296.36	282.65	1207.89	385.86	58.05	0	19.58	9.21
ΛΕΚΑΝΗ ΕΛΕΓΧΟΥ	2285.36	11.09	706.14	457.09	68.26	0	14.51	10.07

2.3.3 Υδρογεωλογία

Η τεκτονική καταπόνηση καθώς και ο πετρογραφικός χαρακτήρας του υπόβαθρου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Με βάση την υδρολιθική ταξινόμηση και ομαδοποίηση που πρότεινε το Υπουργείο Ανάπτυξης το 1996, οι σχηματισμοί του υποβάθρου της λεκάνης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στους περατούς σχηματισμούς (ασβεστόλιθοι-δολομίτες), τους ημιπερατούς (ιζήματα φλύσχη) και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, οφιόλιθοι, σχιστοκερατόλιθοι). Η κατανομή των πετρωμάτων στην λεκάνη του Σπερχειού δίνεται με το ψηφιακό μοντέλο υπεδάφους (σχήμα 2.4).



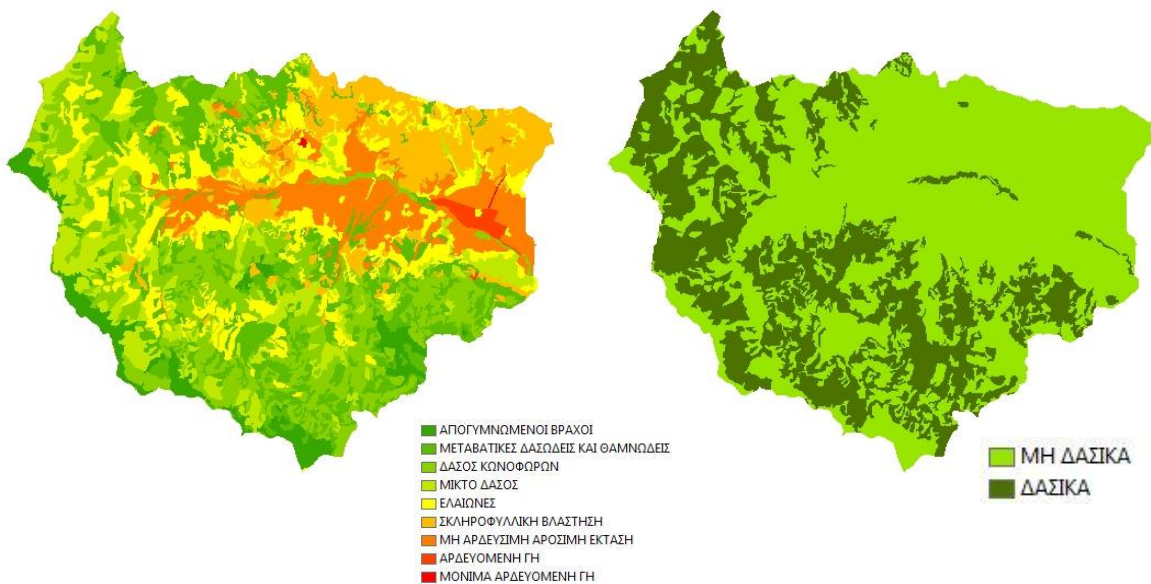
Σχήμα 2.5 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης Σπερχειού (αριστερά) και το αντίστοιχο για την περιοχή ελέγχου (δεξιά)

Οι καρστικοποίηση των ασβεστόλιθων στα ανατολικά όρια της λεκάνης είναι τόσο έντονη έτσι ώστε στα πρηνή των σχηματισμών αυτών να παρατηρούνται πολλές και σημαντικές πηγές, θερμές και κρύες με μεγάλη παροχή νερού. Οι ημιπερατοί σχηματισμοί (φλύσχη) καταλαμβάνουν έκταση Νότια-Νοτιοδυτικά και κυρίως Δυτικά. Εδώ η υδροπερατότητα είναι περιορισμένη και παρατηρείται σε εξαλλοιωμένες ζώνες με έντονη τεκτονική καταπόνηση. Έτσι η πηγές που παρατηρούνται στον φλύσχη είναι αποτέλεσμα των ρηγμάτων που παρατηρούνται. Τέλος, μεγάλη έκταση καταλαμβάνουν οι οφιόλιθοι-σχιστοκερατόλιθοι στα περιθώρια και το υπόβαθρο της λεκάνης προσφέροντας έτσι ένα στεγανό κάλυμμα των υποκείμενων ασβεστόλιθων-δολομιτών.

[†] Η υδατοπερατότητα των πετρωμάτων έχει διαστάσεις ταχύτητας και έχει και κατακόρυφη και οριζόντια έννοια. Σχηματικά αναφέρεται ότι στα συμπαγή ανθρακικά πετρώματα η κατακόρυφη υδροπερατότητα είναι από 5 έως 20 φορές μεγαλύτερη απ' ότι η οριζόντια

2.3.4 Εδαφική κάλυψη

Ο χάρτης χρήσεων γης έγινε με βάση την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση Corine, σύμφωνα με την οποία η ονοματολογία των χρήσεων γης είναι αποτέλεσμα μίας τριών επιπέδων ιεραρχικής ταξινόμησης που καταλήγει σε 44 διαφορετικές κατηγορίες εδαφικής κάλυψης (the CORINE Land Cover nomenclature, *CLC*). Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης ο τελικός χάρτης με τις 27 κατηγορίες που προέκυψε για την λεκάνη του Σπερχειού ποταμού (πηγή: <http://geodata.gov.gr/geodata/>) μετασχηματίστηκε σε χάρτη 9 κλάσεων και εν τέλει σε χάρτη 2 για την λεκάνη ελέγχου, με βάση την έκταση κάλυψης για κάθε κατηγορία (Σχήμα 2.5). Οι λόγοι για τους οποίους έγινε η απλοποίηση και τελικά η χρήση του μοντέλου εδαφικής κάλυψης 2 κλάσεων θα εξηγηθούν περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.6 Ψηφιακό μοντέλο εδαφικής κάλυψης περιοχής ελέγχου 9 κλάσεων (αριστερά) και το αντίστοιχο των 2 κλάσεων (δεξιά)

2.4 Κλίμα

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μίας περιοχής εξαρτώνται κυρίως από τα κλιματικά-μετεωρολογικά στοιχεία της και δευτερευόντως από την εδαφική και γεωλογική διαμόρφωση του τόπου. Το κλίμα στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται ως το τυπικό Μεσογειακό κλίμα. Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο ο κύριος όγκος των βροχών πέφτει στο τέλος του φθινοπώρου και κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Σύμφωνα με την κατάταξη Thornwaite ξηρό με απόκλιση προς ημίγρο με μικρό πλεόνασμα ύδατος τον χειμώνα και με κατάσταση μεσόθερμου κλίματος. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει σημειωθεί ότι η τοπογραφία της περιοχής επιδράει στο κλίμα της. Σαν

αποτέλεσμα, οποιαδήποτε αναφορά σε τοπική μικροκλίμακα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι αυτό παρουσιάζει διακυμάνσεις με βάση το υψόμετρο.

Για την τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού ανάντη των Κομποτάδων, μακρές χρονοσειρές παρατηρημένων δεδομένων είναι διαθέσιμες από έναν ικανοποιητικό αριθμό σημειακών μετρήσεων. Παρόλο που μονάχα ένα τμήμα του δικτύου σημειακών μετρήσεων βρίσκεται μέσα στην περιοχή ελέγχου, για τους σκοπούς της ανάλυσης των δεδομένων καθώς και της βελτιστοποίησης των επιδόσεων του υπολογιστικού μέρους της μελέτης, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν και σταθμοί σημειακής μέτρησης που γειτονεύουν με την δοσμένη περιοχή ελέγχου (Σχήμα 2.6). Στον Πίνακα 2.3 δίνονται τα χαρακτηριστικά των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.7 Κατανομή σταθμών σημειακών μετρήσεων εντός και εκτός της περιοχής ελέγχου

Πίνακας 2.3 Στοιχεία σταθμών σημειακής μέτρησης (Πηγή ΥΠΕΧΩΔΕ, 1992)

Όνομασία	Λεκάνη απορροής	Υδατικό Διαμέρισμα	Φορέας	Υψόμετρο	Γεωγραφικό		Περίοδος Λειτουργίας	
					Μήκος (6)	Πλάτος (7)	ΒΜ (8)	ΒΓ (9)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Αθανάσιος Διάκος	Μόρνου	04	ΥΠΔΕ	1050	22°48'	38°30'	1965-1993	1963-
Άνω Μπράλος	Βοιωτικού Κηφισού	07	ΥΠΔΕ	600	22°28'	38°44'	1969-2000	
Γραμμένη Οξιά	Ευήνου	04	ΥΠΔΕ	1160	22°00'	38°44'	1951-1993	
Δρυμαία	Βοιωτικού Κηφισού	07	ΥΠΔΕ	580	22°34'	38°43'	1962-2000	
Ζηλευτό	Σπερχειού	07	ΥΠΔΕ	120	22°16'	38°56'	1954-2000	
Καρπενήσι	Αχελώου	04	ΥΠΔΕ	960	21°48'	38°55'	1967-1993	
Κρίκελλο	Αχελώου	04	ΔΕΗ	1120	21°51'	38°48'	1959-1991	
Λαμία	Σπερχειού	07	ΕΜΥ	144	22°26'	38°54'	1959-2000	
Νεοχώρι	Σπερχειού	07	ΔΕΗ	800	21°52'	38°58'	1960-1993	

Πιτσιωτά	Σπερχειού	07	ΔΕΗ	800	21°54'	39°01'	1960-1992	
Πυρά	Μόρνου	04	ΥΠΔΕ	1140	21°16'	38°45'	1963-2000	
Τρίλοφο	Σπερχειού	07	ΥΠΔΕ	580	22°13'	39°00'	1951-2000	1954-
Τυμφρηστός	Σπερχειού	07	ΔΕΗ	821			1951-1995	
Υπάτη	Σπερχειού	07	ΥΠΔΕ	286	22°14'	38°52'	1951-2000	

Οι συντομογραφίες συμβολίζουν:

<i>ΒΜ</i>	<i>Βροχόμετρο</i>
<i>ΒΓ</i>	<i>Βροχογράφος</i>
<i>ΥΠΔΕ</i>	<i>Υπουργείο Δημοσίων Έργων</i>
<i>ΔΕΗ</i>	<i>Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού</i>
<i>ΕΜΥ</i>	<i>Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία</i>

Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας: 04
Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας: 07

2.4.1 Βροχόπτωση

Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις σαν όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει το αποτέλεσμα της υγροποίησης των ατμοσφαιρικών υδρατμών. Περιγράφει δηλαδή τις μετρήσιμες ποσότητες νερού που φτάνουν στην επιφάνεια της γης. Η βροχόπτωση καθώς και η χιονόπτωση αποτελούν δύο από τα σημαντικότερα κατακρημνίσματα (άλλα είναι το χαλάζι, ο δρόσος, η πάχνη, η βρέχουσα ομίχλη κτλ). Η βροχόπτωση γιατί είναι συνηθέστερη και ποσοτικά υπερέχει των υπόλοιπων κατακρημνισμάτων, και η χιονόπτωση γιατί, ειδικά στα εύκρατα κλίματα όπως της Ελλάδας, αποτελεί την κυριότερη πηγή της εαρινής και ενίοτε της θερινής απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Στην παρούσα διερεύνηση, λόγω του γεγονότος ότι τα σημειακά δεδομένα παρατηρούνται σε ύψη βροχής (σε χιλιοστά), δεν ορίζεται σαν διακριτή της βροχόπτωσης κατακρήμνιση το χιόνι.

Η βροχόπτωση αποτελεί το βασικό δεδομένο εισόδου σε ένα μοντέλο βροχής-απορροής. Έτσι, η ορθή αξιολόγηση της χωρικής κατανομής της στην λεκάνη ελέγχου αποτελεί ένα ζωτικής σημασίας βήμα στην όλη διαδικασία συγκρότησης του μοντέλου και θα αναλυθεί περαιτέρω σε παρακάτω ενότητα της παρούσας μελέτης.

Σημαντικό βήμα πριν την χωρική ολοκλήρωση της βροχής είναι η αξιολόγηση, επεξεργασία αλλά και συμπλήρωση της σημειακής πληροφορίας. Ημερήσια ύψη βροχόπτωσης ελήφθησαν από τους 14 προαναφερθέντες βροχοσταθμούς με χρονοσειρές 20ετίας έως και 50ετίας. Η χρονοσειρές αυτές κρίνεται ότι έχουν επαρκές μήκος ούτως ώστε να παρατηρηθούν περιοδικές μεταβολές και συσχετίσεις που θα ελαχιστοποιήσουν και το σφάλμα εκτίμησης δεδομένων μικρής χρονικής περιόδου. Μία διερεύνηση τέτοιου τύπου θεωρείται απαραίτητη αφού για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρειάστηκε να συμπληρωθούν σημειακές τιμές σε υδρολογικά έτη που δεν υπήρχε καμία παρατήρηση ή υπήρχαν ασυνέχειες στις καταγραφές. Τέλος στα προβλήματα αξιοποίησης των υδατικών πόρων η μηνιαία κλίμακα είναι κατά κανόνα επαρκής και αυτή υιοθετείται στην παρούσα διερεύνηση (Κουτσογιάννης, 1997).

Σαν μέθοδος συμπλήρωσης των μηνιαίων πλέον χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε η απλή γραμμική παλινδρόμηση (Simple linear regression). Για την συμπλήρωση των κενών στην χρονοσειρά ενός βροχοσταθμού, χρησιμοποιήθηκαν τα δείγματα όλων των υπολοίπων σταθμών ένα προς ένα, με γνώμονα την στατιστική συσχέτιση τους με τον υπό συμπλήρωση σταθμό και όχι, όπως θα αναμένονταν, βάσει της γειτνιάσής τους. Ο λόγος είναι, ότι το τοπογραφικό υψόμετρο παίζει σημαντικό ρόλο στα ύψη βροχής που μετρώνται γι' αυτό η μεγάλη διακύμανσή του ορίζει και μεγάλη διακύμανση στα ύψη βροχής. Αυτή είναι και η αιτία που δύο σταθμοί ενώ οριζοντιογραφικά γειτνιάζουν η στατιστική συσχέτισή τους είναι μικρή.

Είναι επιστημονικά αποδεκτή η θεώρηση ότι οι τιμές της βροχόπτωσης σε μία περιοχή συσχετίζονται κατά βάση γραμμικά. Έτσι η γραμμική παλινδρόμηση κρίνεται ως το καταλληλότερο μοντέλο για την ικανοποιητική προσαρμογή των παρατηρήσεών μας. Δοκιμάστηκε και η οργανική που αποτελεί μία βελτιωμένη παραλλαγή της γραμμικής που αίρει το μειονέκτημα της μεροληψίας της διασποράς (Hirsch *et al*, 1993). Παρόλα αυτά όμως η συγκεκριμένη δεν στάθηκε ικανή να συμπληρώσει όλα τα επιθυμητά κενά λόγω της περιοριστικής συνθήκης της μεθόδου (Κουτσογιάννης, 1997, σ.233) και έτσι απορρίφθηκε. Για λόγους υπολογιστικής ταχύτητας το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης έγινε σε περιβάλλον EXCEL 2010. Οι 14 χρονοσειρές που προέκυψαν μετά την συμπλήρωση έχουν κοινό μήκος 50 ετών και αφορούν στην ίδια περίοδο 1951-2000.

Έστω X, Y οι τυχαίες μεταβλητές των οποίων την συσχέτιση θέλω να ελέγξω. Η X είναι η ανεξάρτητη (ή αλλιώς ερμηνευτική) μεταβλητή και δεν θεωρείται τυχαία, ενώ η Y είναι η εξαρτημένη (ή απόκρισης) μεταβλητή και θεωρείται τυχαία. Εδώ η X αντιπροσωπεύει την παρατηρημένη υπάρχουσα τιμή βροχόπτωσης σε έναν σταθμό, ενώ η Y την προς συμπλήρωση στον σταθμό όπου οι χρονοσειρές θέλουν επέκταση ή εμφανίζουν ασυνέχειες. Ως μέτρο συσχέτισης ορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, ρ_{XY} (Pearson product-moment correlation coefficient) και όχι η συνδιασπορά (που η τιμή της εξαρτάται από τις μονάδες μέτρησης των παραπάνω μεταβλητών). Ο συντελεστής Pearson ουσιαστικά αποτελεί κανονικοποίηση της συνδιασποράς και εκφράζει τη γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών, δηλαδή την αναλογική μεταβολή (μείωση ή αύξηση) της μίας τ.μ. που αντιστοιχεί σε μεταβολή της άλλης. Ορίζεται ως εξής:

$$\rho_{XY} = \text{Corr}[X, Y] = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)} \sqrt{\text{Var}(Y)}} \quad (2.1)$$

Ισχύει ότι $-1 \leq \rho_{XY} \leq 1$. Όταν ο συντελεστής είναι κοντά στο 1 ή -1 τότε δηλώνει ισχυρή γραμμική συσχέτιση. Το αντίθετο ισχύει για τιμές κοντά στο 0.

Το απλό γραμμικό μοντέλο μεταξύ των X_i, Y_i για πλήθος δείγματος n διατυπώνεται ως εξής:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.2)$$

Όπου b_0 , είναι δύο άγνωστες σταθερές. Η b_0 λέγεται τεταγμένη (intercept) και η b_1 κλίση (slope) ενώ η $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή $N(0, \sigma^2)$, με σ^2 άγνωστο, και συνήθως καλούνται «σφάλματα» μετρήσεων. Μπορεί να θεωρηθεί ότι τα $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ σφάλματα εμπεριέχουν όλους τους υπόλοιπους παράγοντες συσχέτισης εκτός της X που επηρεάζουν την τιμή της μεταβλητής Y . Εύλογο συμπέρασμα είναι και το ότι οι τ.μ Y_1, Y_2, \dots, Y_n θα ακολουθούν και αυτές την κανονική κατανομή αφού αποτελούν γραμμικές συναρτήσεις των κανονικών τ.μ. $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$. Άρα $Y_i \sim N(b_0 + b_1 X_i, \sigma^2)$

Οι εκτιμήτριες της μέγιστης πιθανοφάνειας των Y_1, Y_2, \dots, Y_n των άγνωστων παραμέτρων b_0 , b_1 , σ^2 θα προκύψουν από την ελαχιστοποίηση (ως προς b_0 , b_1) του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων,

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2.$$

Αποδεικνύεται ότι οι ζητούμενες εκτιμήτριες είναι οι εξής:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \equiv \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (2.3)$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (2.4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (2.5)$$

Έτσι η εξίσωση της εκτιμημένης ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης θα είναι η:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (2.6)$$

Οι Προβλέψεις των Y_i (Y predicted) η προσαρμοσμένες (πάνω στην εκτιμημένη ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης) τιμές των Y_i καλούνται οι εκτιμήσεις :

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i = \bar{Y} + b_1 (X_i - \bar{X}) \quad (2.7)$$

Οι διαφορές των προσαρμοσμένων \hat{Y}_i από τις παρατηρούμενες Y_i καλούνται κατάλοιπα (residuals) ή εκτιμημένα «σφάλματα» και συμβολίζονται με

$$\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i = (Y_i - \bar{Y}) - b_1(X_i - \bar{X}) \quad (2.8)$$

Η μεταβλητότητα του απλού γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης ερμηνεύεται με την δειγματική διασπορά των παρατηρήσεων Y_i . Αποδεικνύεται ότι η διασπορά χωρίζεται σε δύο αθροίσματα τα οποία είναι τα εξής:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (2.9)$$

Αυτά τα τρία αθροίσματα συμβολίζονται και ως εξής: $SST = SSE + SSR$ (2.10)

Όπου:

1. Το SST (sum of squares total) εκφράζει τη συνολική παρατηρούμενη μεταβλητότητα των Y_i
2. Το SSR (sum of squares regression) εκφράζει τη μεταβλητότητα των προσαρμοσμένων τιμών αφού $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i = \bar{Y}$ και άρα

$$\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2.$$

Αυτή η μεταβλητότητα ερμηνεύεται από το μοντέλο αφού σύμφωνα με αυτό οι αναμενόμενες προσαρμοσμένες τιμές των Y_i είναι $b_0 + b_1 X_i$ και επομένως φυσιολογικά διαφέρουν από τον μέσο όρο τους (αφού τα X_i είναι διαφορετικά).

3. Το SSE (sum of squares error) εκφράζει την μεταβλητότητα των Y_i σε σχέση με τις αντίστοιχες προσαρμοσμένες τιμές \hat{Y}_i . Η μεταβλητότητα αυτή οφείλεται στην διασπορά σ^2 των σφαλμάτων

[†] Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 συμπίπτει με το τετράγωνο του δειγματικού συντελεστή του Pearson.

Έτσι η συνολική παρατηρούμενη μεταβλητότητα των Y_i (SST) μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες: (1) στην μεταβλητότητα που ερμηνεύεται από το μοντέλο (SSR), και (2) στην μεταβλητότητα που οφείλεται σε παράγοντες που δεν έχουν συμπεριληφθεί στο μοντέλο (SSE). Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 που εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας των παρατηρήσεων που ερμηνεύονται από το μοντέλο και ορίζεται ως εξής:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = \frac{S_{XY}^2}{S_{XX}S_{YY}} \quad (2.11)$$

Όσο πιο μεγάλη η τιμή του R^2 δηλαδή όσο πιο κοντά παίρνει τιμές στην μονάδα τόσο καλύτερο θεωρείται ότι είναι το μοντέλο αφού θα ερμηνεύει μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης μεταβλητότητας

Οι παραπάνω ποσότητες φαίνονται στο παράδειγμα που ακολουθεί. Σχηματικά απεικονίζεται η επέκταση τμήματος της χρονοσειράς του Οκτωβρίου του σταθμού Αθανάσιος Διάκος για την περίοδο 1951-1958, με βάση το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Η ίδια διερευνητική διαδικασία υλοποιήθηκε για την επέκταση και συμπλήρωση όλων των χρονοσειρών των σταθμών, για κάθε μήνα κάθε έτους.

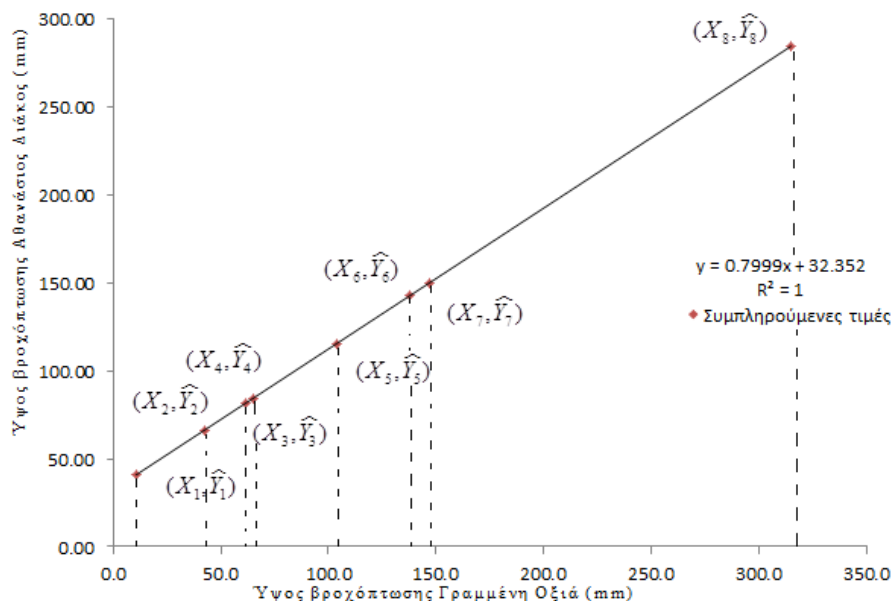
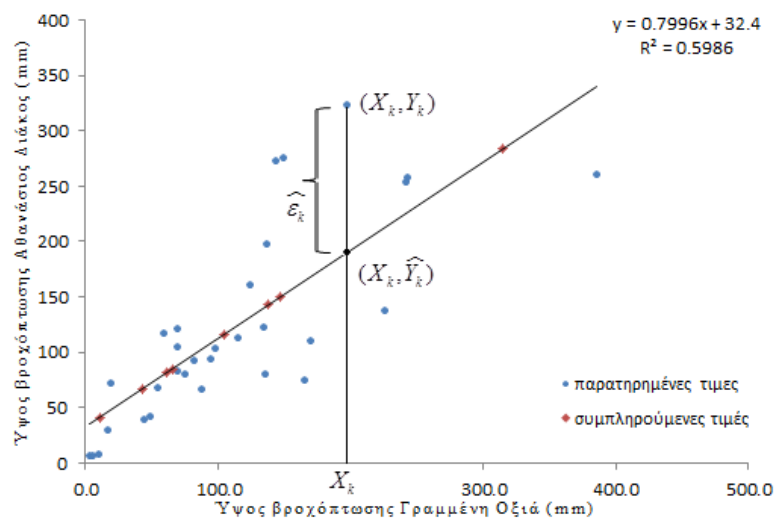
Επιπλέον, γίνεται η προσπάθεια ανίχνευσης περιοδικών τάσεων στην στενή περιοχή ελέγχου. Μελετάται η μέση ετήσια αλλά και οι μέσες εποχικές τάσεις στους σταθμούς που συμμετέχουν στην περιοχή ελέγχου (Διάγραμμα 2.2, 2.4). Αναφερόμαστε έτσι στους σταθμούς: Ζηλευτό, Νεοχώρι, Πιτσιωτά, Τρίλοφο, Τυμφορηστός και Υπάτη. Λόγω της τοπογραφίας της περιοχής παρατηρείται μεγάλη διακύμανση στις τιμές των βροχοπτώσεων με εύρος από 26.2 mm έως 1385.15 mm (Διάγραμμα 2.3). Επιπλέον πιστοποιείται ότι ο χειμώνας και το φθινόπωρο αποτελούν τις εποχές με τα μεγαλύτερα ύψη βροχής (Πίνακας 2.4).

Πίνακας 2.4 Εποχική κατανομή βροχόπτωσης

Χειμώνας	0.38%
Άνοιξη	0.25%
Θέρος	0.08%
Φθινόπωρο	0.29%

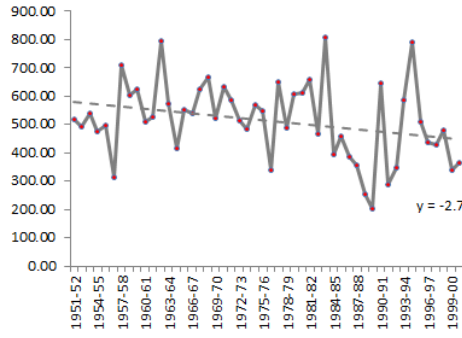
Τέλος οι καταγράφονται μικτές εποχικές τάσεις, κατά βάση πτωτικές και ελαφρώς ανοδικές την άνοιξη στον Τυμφορηστό και την Υπάτη, τον χειμώνα στην Πιτσιωτά και το καλοκαίρι στην Υπάτη.

Ο Συντελεστής Pearson έδειξε μεγαλύτερο βαθμό γραμμικής συσχέτισης του Αθ. Διάκου με την Γραμμένη Οξιά, όπου και υπάρχουν καταγεγραμμένες παρατηρήσεις, $\rho_{XY} = 0.774$. Στο διάγραμμα 2.1 φαίνονται τα ζεύγη τιμών (X_i, Y_i) με $i = 1, 2, 3, \dots, n$, δηλαδή τα ζεύγη (Γραμμένη Οξιά, Αθανάσιος Διάκος) με $n = 31$ όσες και οι παρατηρημένες τιμές και στους δύο σταθμούς, η εκτιμημένη ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης αλλά και η προβλεπόμενες τιμές για τον Αθανάσιο Διάκο (X_i, \hat{Y}_i) για τα έτη που δεν υπάρχουν μετρήσεις. Τέλος σημειώνονται και τα εκτιμημένα σφάλματα.

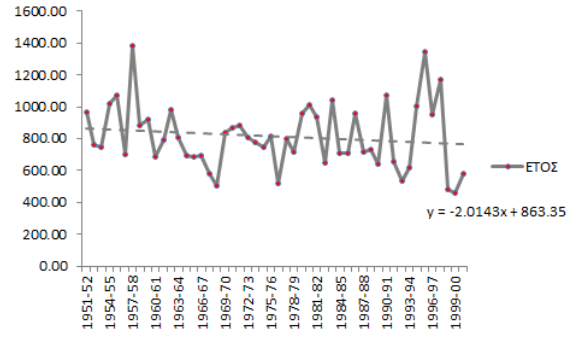


Διάγραμμα 2.1 (α) Βασικά χαρακτηριστικά μοντέλου απλής γραμμικής παλινδρόμησης, συμπληρωμένες τιμές που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο

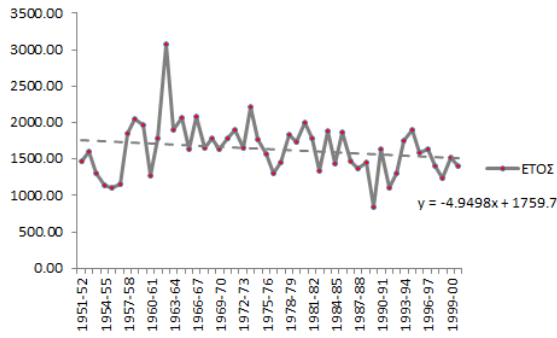
(β)



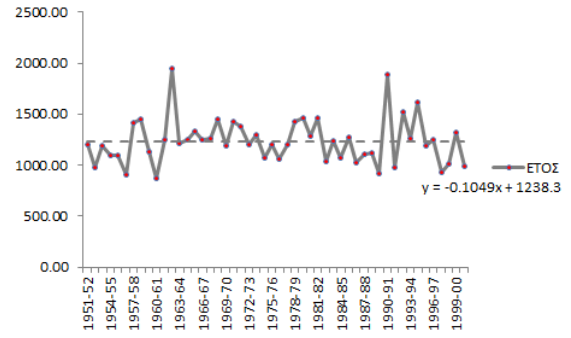
ΖΗΑΕΥΤΟ



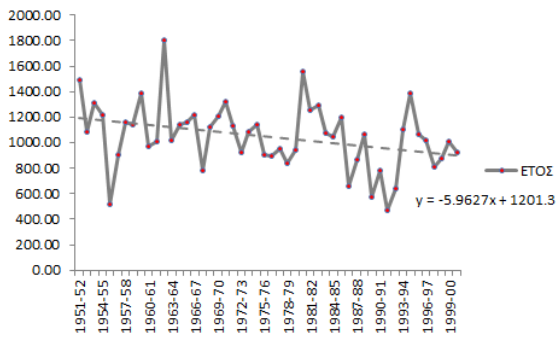
ΥΠΑΤΗ



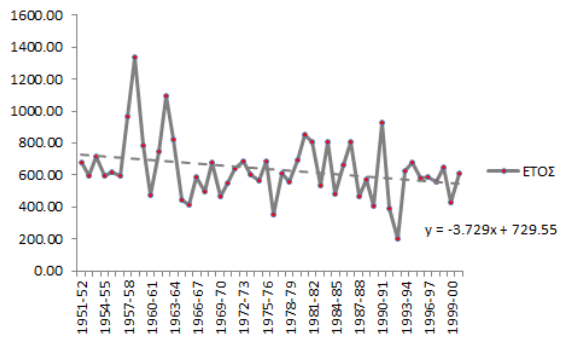
ΝΕΟΧΩΡΙ



ΠΙΤΣΙΩΤΑ

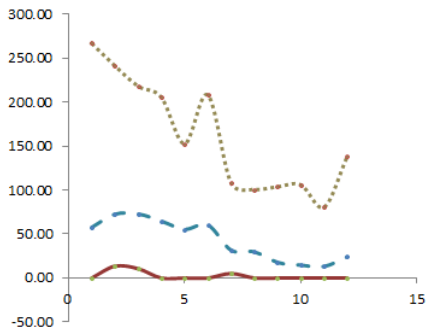


ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ

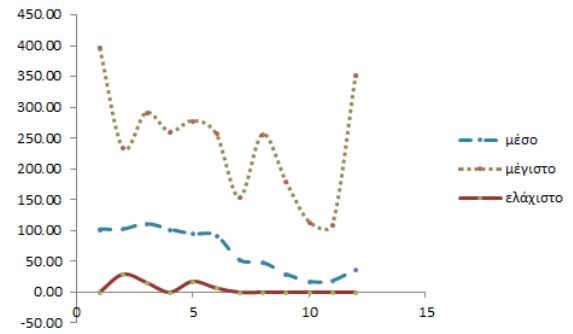


ΤΡΙΛΟΦΟ

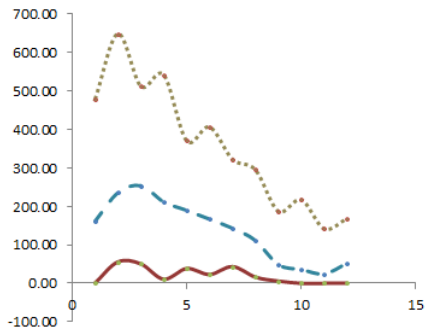
Διάγραμμα 2.2 Μέση ετήσια σημειακή βροχόπτωση (mm) σταθμών περιοχής ελέγχου



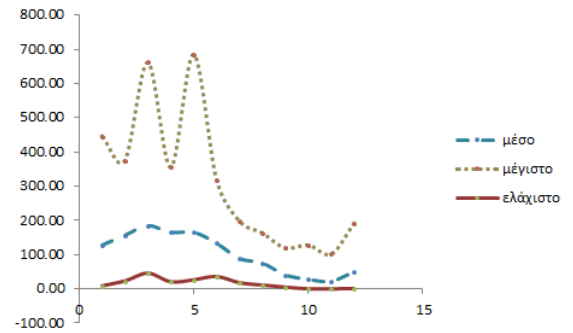
ΖΗΛΕΥΤΟ



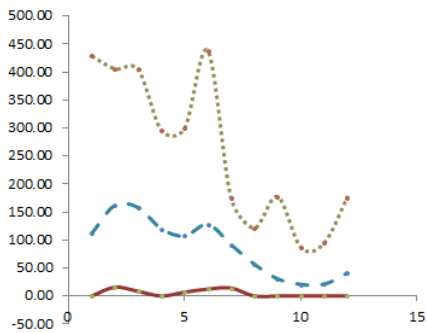
ΥΠΑΤΗ



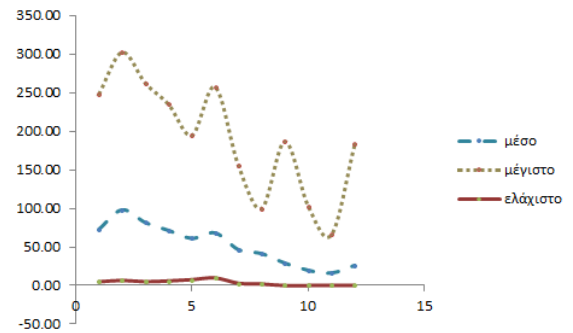
ΝΕΟΧΩΡΙ



ΠΙΤΣΙΩΤΑ

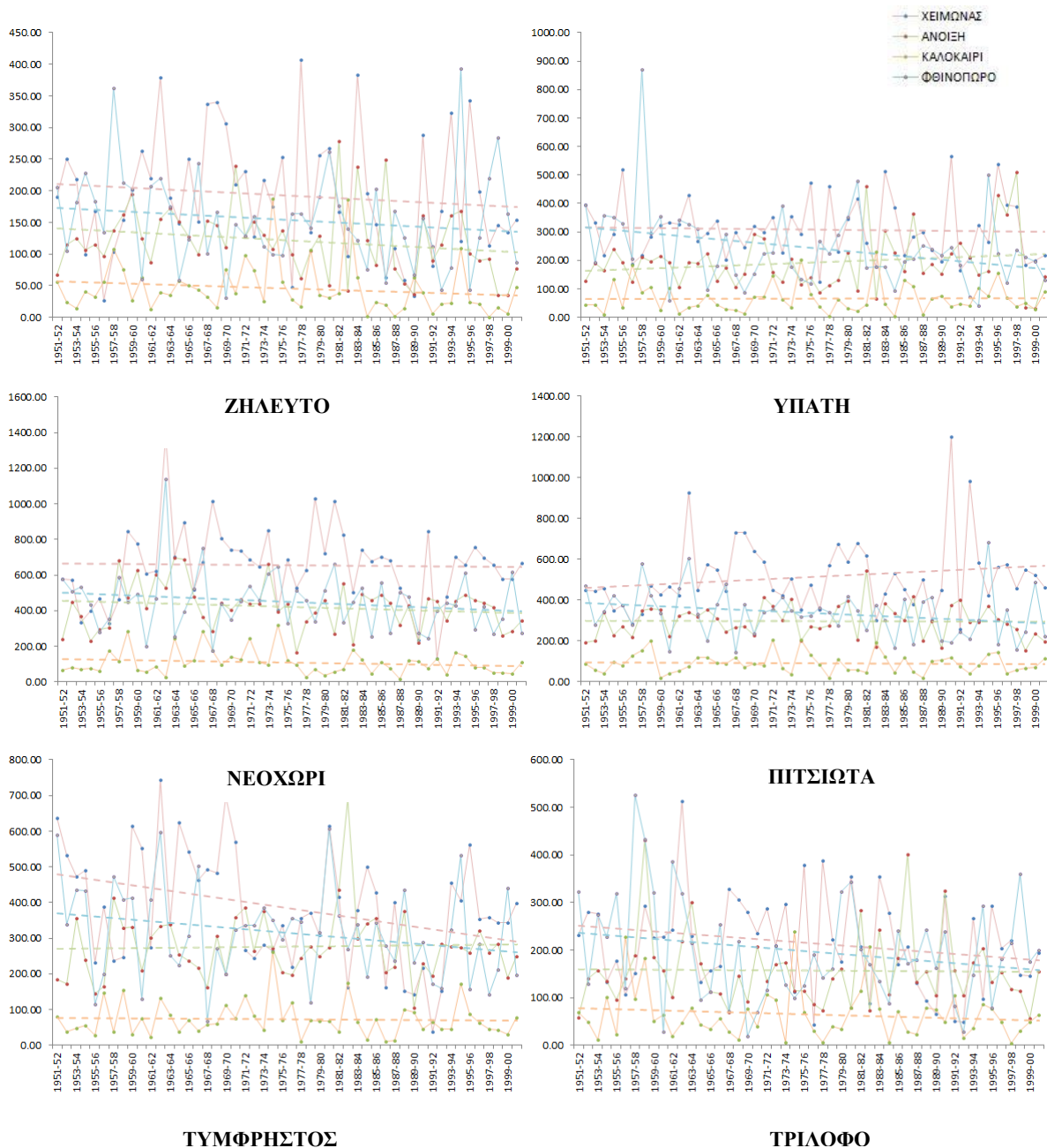


ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ



ΤΡΙΑΛΟΦΟ

Διάγραμμα 2.3 Μέσο, μέγιστο και ελάχιστο μηνιαίο ύψος σημειακής βροχόπτωσης (mm) σταθμών περιοχής ελέγχου



Διάγραμμα 2.4 Μέσες εποχικές γραμμικές τάσεις στους σταθμούς της περιοχής ελέγχου

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται και συγκεντρωτικά οι εξισώσεις των εποχικών τάσεων του διαγράμματος 2.4 για κάθε σταθμό της περιοχής ελέγχου

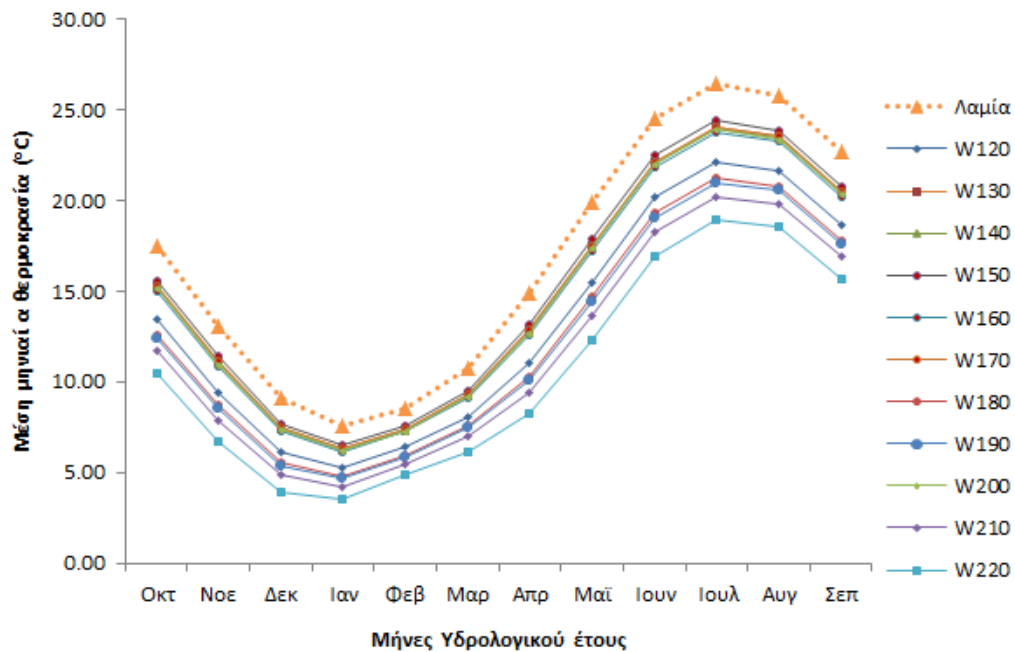
Πίνακας 2.5 Εξισώσεις μοντέλου απλής γραμμικής παλινδρόμησης για τις εποχικές τάσεις

Ονομασία	Εξίσωση μοντέλου			
	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
ΖΗΛΕΥΤΟ	$y = -0.7466x + 212.06$	$y = -0.7499x + 140.94$	$y = -0.4395x + 56.781$	$y = -0.7745x + 174.06$
ΝΕΟΧΩΡΙ	$y = -0.4776x + 667.02$	$y = -1.4518x + 458.06$	$y = -0.8631x + 130.89$	$y = -2.1574x + 503.73$
ΠΙΤΣΙΩΤΑ	$y = 2.1595x + 459.45$	$y = -0.0326x + 297.53$	$y = -0.1896x + 95.104$	$y = -2.0421x + 386.18$
ΤΡΙΑΛΟΦΟ	$y = -1.4752x + 252.46$	$y = -0.1335x + 160.17$	$y = -0.5149x + 78.299$	$y = -1.6053x + 238.62$
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	$y = -3.8539x + 483.53$	$y = 0.2857x + 269.5$	$y = -0.1706x + 76.76$	$y = -2.2239x + 371.47$
ΥΠΑΤΗ	$y = -0.312x + 316.72$	$y = 1.2089x + 163.15$	$y = 0.0898x + 64.135$	$y = -3.001x + 319.34$

2.4.2 Θερμοκρασία

Ως προς τη μέση μηνιαία θερμοκρασία της περιοχής μελέτης, τα μοναδικά διαθέσιμα δεδομένα προέρχονταν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λαμίας. Μάλιστα υπήρχαν πολλά κενά στην χρονοσειρά της μηνιαίας θερμοκρασίας η οποία και συμπληρώθηκε με την μέση μηνιαία τιμή. Η χρονοσειρά επιπλέον επεκτάθηκε ώστε να έχει κοινό μήκος με τις χρονοσειρές βροχόπτωσης, δηλαδή να καλύπτει την περίοδο 1951-2000.

Κάνοντας την θεώρηση ότι η θερμοκρασία σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το υψόμετρο στο οποίο γίνεται η μέτρηση, έγινε η αναγωγή της σημειακής παρατηρημένης θερμοκρασίας της Λαμίας σε επιφανειακή με βάση τη διόρθωση στη θερμοκρασία που προέκυψε για κάθε μία από τις 11 υπό εξέταση υπολεκάνες, λαμβάνοντας υπόψη το μέσο υψόμετρο τους (Πίνακας 2.2). Προτείνεται γραμμική υψομετρική αναγωγή των θερμοκρασιών του σταθμού της Λαμίας (Θερμοβαθμίδα). Έτσι παρατηρείται ότι η πιο κρύος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος ενώ ο πιο θερμός είναι ο Ιούλιος για ολόκληρη την περιοχή ελέγχου, με μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες $5,48^{\circ}\text{C}$ και $22,53^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Το εύρος των τιμών της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στην περιοχή ελέγχου κυμαίνεται από $0,5^{\circ}\text{C}$ έως $26,6^{\circ}\text{C}$. Στο διάγραμμα 2.5 φαίνεται η μέση μηνιαία παρατηρημένη θερμοκρασία καθώς και οι αντίστοιχες ανηγμένες σε κάθε υπολεκάνη της περιοχής ελέγχου.

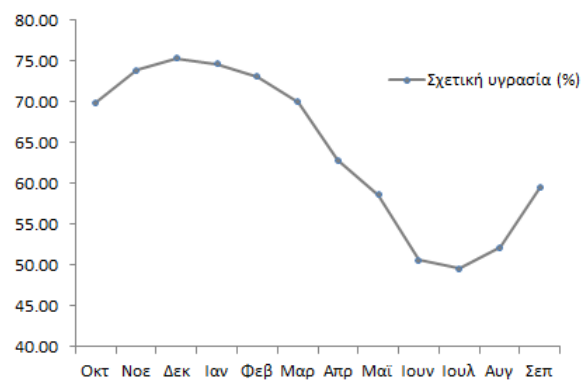


Διάγραμμα 2.5 Μέση μηνιαία θερμοκρασία για τις 11 υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου

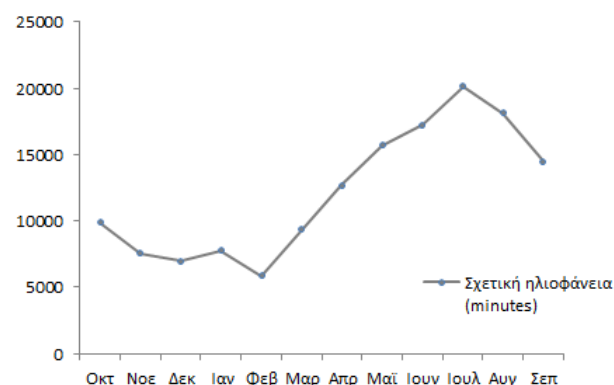
Οι τιμές θερμοβαθμίδας c που είναι υπολογισμένες για τον σταθμό της Λαμίας έχουν ληφθεί από παλαιότερες αξιόπιστες μελέτες για την ίδια περιοχή

2.4.3 Σχετική υγρασία, σχετική ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου

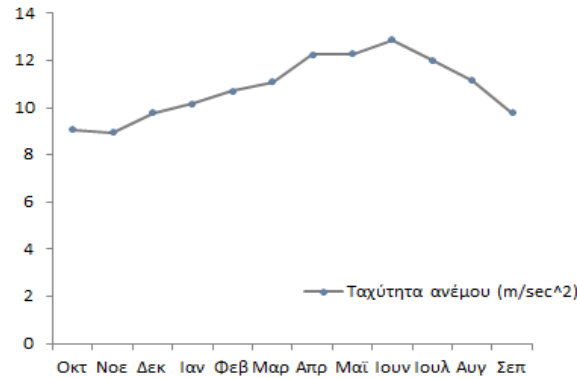
Ως προς τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, διαθέσιμα καθώς και αξιόπιστα ήταν εκείνα του μετεωρολογικού σταθμού της Λαμίας. Μετά την συμπλήρωση και επέκταση του δείγματος, προέκυψαν χρονοσειρές κοινού μήκους για την περίοδο 19951-2000 (Παράρτημα). Οι μέσες μηνιαίες τιμές τους δίνονται των τριών αυτών δεδομένων δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 2.6 Ποσοστό μηνιαίας σχετικής υγρασία (%)



Διάγραμμα 2.7 Σχετική μηνιαία ηλιοφάνεια (minute)



Διάγραμμα 2.8 Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/sec^2)

2.5 Επιφανειακή απορροή

Οι αξιόπιστοι υδρομετρικοί σταθμοί της περιοχής είναι δύο (Σταυρίδης κ.ά., 1992) και βρίσκονται εγκατεστημένοι στις γέφυρες Καστριού και Κομποτάδων. Ο πρώτος ελέγχει υπολεκάνη έκτασης $853.2 km^2$ και ο δεύτερος υπολεκάνη έκτασης $1128.73 km^2$.



Σχήμα 2.7 Θέση υδρομετρικών σταθμών Καστριού και Κομποτάδων

Οι μηνιαίες χρονοσειρές απορροής αναφέρονται στην περίοδο από το 1963 έως το 1980 για το σταθμό στο Καστρί και από το 1949 έως το 1979 για το σταθμό στους Κομποτάδες. Ο πλέον αξιόπιστος είναι ο δεύτερος. Οι δύο αυτές μηνιαίες χρονοσειρές μετρούν την απορροή με μονάδες παροχής, δηλαδή m^3/s . Παρόλο που στο παρελθόν οι συγκεκριμένες χρονοσειρές έχουν συμπληρωθεί και επεκταθεί στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων του, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα αυτών των ετών που προέκυψαν από πραγματικές υδρομετρήσεις και όχι τα πιθανά συμπληρωμένα που βρέθηκαν μεν αλλά πιστοποιήθηκε η αναξιοπιστία τους. Ο κύριος λόγος είναι ότι αυτές οι μετρήσεις θα

χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της προσαρμογής του υδρολογικού μοντέλου που θα προκύψει μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης (Κεφάλαιο 3).

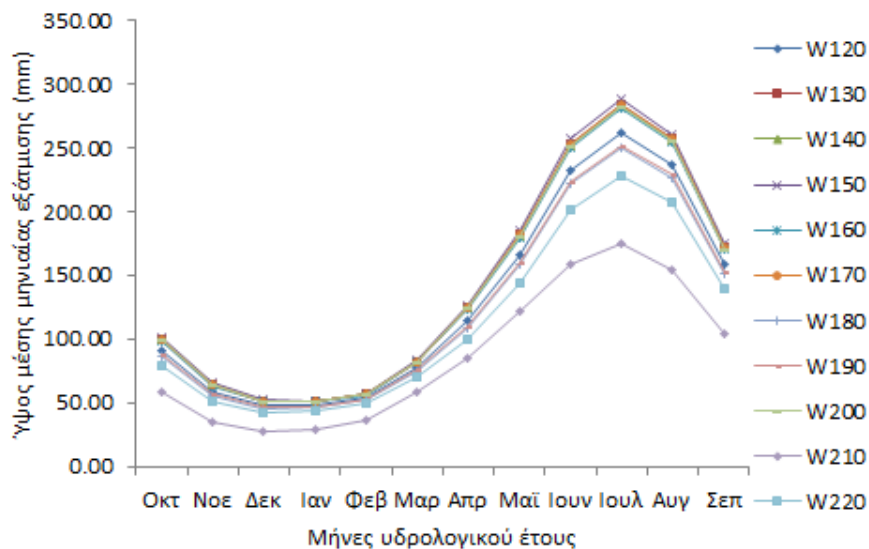
2.6 Εξατμοδιαπνοή

Η εξατμοδιαπνοή (ET από τον αγγλικό όρο *evapotranspiration*) αποτελεί τη διαδικασία με την οποία το νερό επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Η εξατμοδιαπνοή κρίνεται ως μία διαδικασία μείζονος σημασίας επειδή επηρεάζει το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής καθώς αποτελεί βασική συνιστώσα των υδατικών απωλειών αυτής. Η ET είναι το συνισταμένη δύο διαφορετικών διαδικασιών στη φύση: της εξάτμισης συνολικά και της διαπνοής των φυτών. Η εξάτμιση υπολογίζει την ποσότητα του νερού που πηγαίνει στην ατμόσφαιρα από πηγές όπως το έδαφος, τη βλάστηση και τα υδάτινα σώματα. Η εξάτμιση επηρεάζεται (1) από διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές, (2) από την φύση της επιφάνειας εξάτμισης και (3) από τη διαθεσιμότητα νερού. Οι διάφορες φυσικές μεταβλητές εκφράζουν (α) τη διαθέσιμη ενέργεια (π.χ. την προερχόμενη από την καθαρή ακτινοβολία ή την θερμοκρασία του αέρα) που μετατρέπει το νερό από την υγρή στην αέρια φάση του, (β) το ποσοστό υγρασία της εξατμιζόμενης επιφάνειας, που καθορίζει τη χωρητικότητα των υδρατμών που μπορούν να μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα και (γ) την ταχύτητα του ανέμου που αφαιρεί τους υδρατμούς από την παρακείμενη μάζα αέρα και διατηρεί το βαθμό υγρασίας. Η διαπνοή υπολογίζει την κίνηση του νερού διαμέσου των φυτών και την επακόλουθη απώλεια νερού και υδρατμών διαμέσου των στομάτων των φύλλων. Το ποσοστό και ο ρυθμός της διαπνοής εξαρτώνται από το είδος της βλάστησης, το στάδιο ανάπτυξής της, την εποχή του έτους, την ώρα της ημέρας και την διαθεσιμότητα του νερού στην εδαφική ζώνη όπου βρίσκεται το ριζικό τους σύστημα αλλά και τους λοιπούς φυσικούς παράγοντες που αναλύθηκαν παραπάνω.

Ο όρος δυνητική εξατμοδιαπνοή αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που θα προέκυπτε από την εν λόγω διαδικασία αν ίσχυαν οι βέλτιστες συνθήκες, βασική από τις οποίες θεωρείται η απεριόριστη διαθεσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων. Η παραπάνω απαίτηση συμπεριλαμβάνει επιπλέον την απεριόριστη διαθεσιμότητα ενέργειας, καθώς και την ικανότητα των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας να μεταφέρουν τους υδρατμούς μακριά από την εδαφική επιφάνεια. Παρόλο που η πραγματική εξατμοδιαπνοή είναι εκείνη που χρησιμοποιείται στο υδατικό ισοζύγιο, μία εκτίμηση της δυνητική εξατμοδιαπνοής για μία δεδομένη περιοχή ελέγχου, υπό δεδομένες επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, αποτελεί σημαντικό βήμα στη κατασκευή ενός μοντέλου βροχής-απορροής (Weiß & Menzel, 2008). Η πραγματική ET υπολογίζεται εκ των υστέρων. Η διαθεσιμότητα της υγρασίας τελικά θα ορίσει εκείνο το ποσοστό της δυνητικής ET που θα αποτελεί εν τέλει την πραγματική.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα υπολογισμού της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Ως πιο ακριβές κρίνεται το μοντέλο Penman-Monteith αφού είναι μοντέλο φυσικής βάσης και έτσι αυτό μπορεί να υλοποιηθεί καθολικά χωρίς να χρειάζεται εκτίμηση οποιασδήποτε άλλης παραμέτρου (Yates & Strzpek, 1994). Βέβαια ένα από τα μειονεκτήματα του μοντέλου αυτού, όπως και κάθε μοντέλου φυσικής βάσης, είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης πολλών δεδομένων (1) θερμοκρασίας, (2) ταχύτητας αέρα, (3) σχετικής υγρασίας και (4) ηλιοφάνειας. Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα αυτά υφίστανται και έτσι η χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής για κάθε υπολεκάνη της περιοχής ελέγχου έγινε με τη μέθοδο αυτή.

Η υπολογιστική διαδικασία για την εύρεση της δυνητικής ET έγινε στο περιβάλλον του Υδρογνώμονα (Έκδοση 4.0.3). Με την είσοδο των τεσσάρων ειδών χρονοσειρών ως δεδομένα εισόδου (προηγούμενη παράγραφος), υπολογίστηκε η δυνητική ET για κάθε υπολεκάνη της περιοχής ελέγχου ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα και σχηματικά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.9 Μέση μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή με βάση το μοντέλο Penman-Monteith

3. Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών δεδομένων βροχόπτωσης

3.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της κατακρήμνισης είναι επιφανειακά ανομοιομορφο, δηλαδή εξελίσσεται σε κάποια επιφάνεια με ρυθμό που μεταβάλλεται με το χρόνο. Έτσι, το ύψος της βροχόπτωσης h (κατά z) ορισμένο ως τυχαία μεταβλητή παρουσιάζει έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα ενώ η πλήρης γνώση της χωροχρονικής εξέλιξης του φαινομένου ορισμένου ως διανυσματικό πεδίο βροχόπτωσης τριών διαστάσεων, δύο χωρικών (x, y) που ορίζουν την επιφάνεια και μίας χρονικής t είναι δύσκολο και μαθηματικά πολύπλοκο να επιτευχθεί. Παρόλα αυτά κρίνεται αναγκαίο να καταλήξουμε σε μία προσέγγιση της πληροφίας της βροχόπτωσης λόγω του ότι αυτή αποτελεί τη βασική συνιστώσα εισόδου σε όλα τα υδρολογικά μοντέλα.

Η επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης για συγκεκριμένο χρονικό βήμα (εδώ μηνιαίο) είναι η λογική που ακολουθείται. Υπάρχουν οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης της βροχόπτωσης που είναι ουσιαστικά μέθοδοι συντελεστών βάρους των σημειακών τιμών και που η εφαρμογή τους είναι απλή και γρήγορη, και οι στατιστικές/στοχαστικές μέθοδοι παρεμβολής που ενώ είναι πιο πολύπλοκες και υπολογιστικά χρονοβόρες, ποσοτικοποιούν και ελαχιστοποιούν το σφάλμα εκτίμησης σε κάθε σημείο. Για την παρούσα διερεύνηση γίνεται η επιλογή μίας μεθόδου από κάθε κατηγορία. Εφαρμόζεται λοιπόν η μέθοδος των πολύγωνων Thiessen από την πρώτη και η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging από τη δεύτερη.

Η πληροφορία του ύψους της βροχόπτωσης, σε ένα συγκεκριμένο σημείο ελέγχου σε δεδομένο χρόνο t παρέχεται μέσω παρατηρημένων σημειακών μετρήσεων βροχοσταθμών που είναι εγκατεστημένοι σε μία περιοχή. Ο περιορισμένος αριθμός μετεωρολογικών σταθμών που καλύπτουν μία μεγάλη και ετερογενή περιοχή έχει μεγάλη επίδραση σε οποιαδήποτε διαδικασία παρεμβολής. Έτσι οι σύγχρονες έρευνες επικεντρώνονται στη χρήση δεδομένων από ραντάρ και δορυφόρους για μία βελτιωμένη εκτίμηση της μέσης επιφανειακή βροχόπτωσης που απαιτείται για τις μελλοντικές προβλέψεις, που όλο και περισσότερο εξαρτώνται από τηλεσκοπικές τεχνικές. Πάντως τα δεδομένα από βροχοσταθμούς χρησιμοποιούνται και θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω, τα σφάλματα λόγω παρεμβολής δεν προκαλούνται από τη φύση των γεωστατιστικών τεχνικών, αλλά από την αδυναμία των σημειακών δεδομένων να αποτυπώσουν την μεταβλητότητα της τυχαίας μεταβλητής (βροχόπτωση). Το πρόβλημα αυτό επιχειρείται να αμβλυνθεί με έμμεσο τρόπο, όπως με την εισαγωγή επιπρόσθετων πληροφοριών σχετικά με την τοπογραφία ή και άλλα χαρακτηριστικά που έχουν άμεση επίδραση στην χωρική κατανομή της βροχόπτωσης. Στην συγκεκριμένη εργασία στην υλοποίηση των μεθόδων λαμβάνεται υπόψη το γεωγραφικό υψόμετρο.

3.2 Μέθοδος των Πολύγωνων Thiessen

3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου πολυγώνων Thiessen

Οι μέθοδοι που θέτουν συντελεστές βάρους σε βροχοσταθμούς μίας περιοχής για τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης (mean average precipitation, MAP), χρησιμοποιούνται σε υπολογιστικά συστήματα που δεν μπορεί να δοθεί μία πιο λεπτομερής ανάλυση των πεδίων βροχόπτωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές βάρους των σταθμών δεν χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν τη χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης (όπως για παράδειγμα επιχειρούν να κάνουν οι χάρτες ισουετιών καμπύλων).

Παραδοσιακά, η MAP_i που σχετίζεται με ένα πολύγωνο Thiessen i ορίζεται έτσι ώστε να είναι ισοδύναμη με τη σημειακή βροχόπτωση P_i του σταθμού που είναι τοποθετημένος στο κέντρο του πολυγώνου i . Έχω λοιπόν,

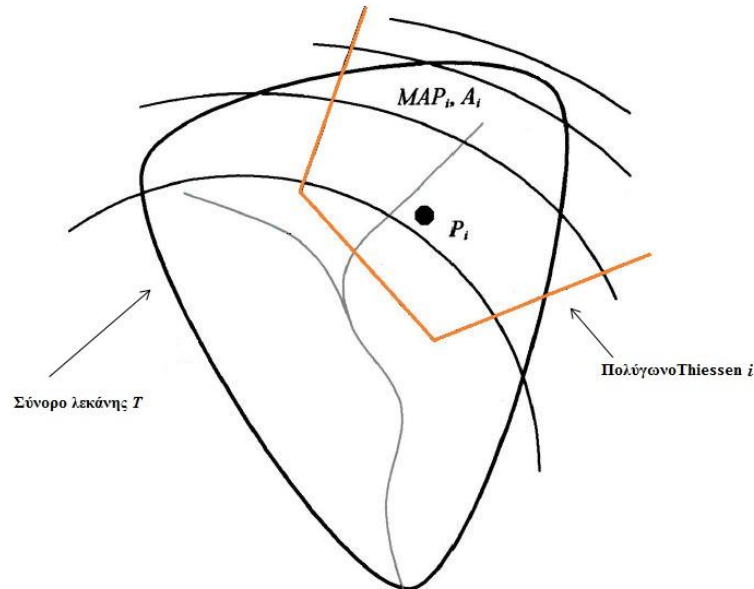
$$MAP_i = P_i \quad (3.1)$$

Έστω η υποθετική λεκάνη του σχήματος 3.1 με ένα βροχοσταθμό και το σχετιζόμενο με αυτόν πολύγωνο Thiessen. Για μία λεκάνη που αποτελείται από πολλά πολύγωνα, η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης MAP_T , υπολογίζεται με το να αθροιστούν οι συνεισφορές τις κάθε περιοχής-πολύγωνα i δηλαδή,

$$MAP_T = \sum_i T_i MAP_i = \sum_i T_i P_i \quad (3.2)$$

$$T_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (3.3)$$

όπου T_i συντελεστής βάρους Thiessen, A_i το εμβαδόν του πολυγώνου και A_T το εμβαδόν ολόκληρης της λεκάνης. Αν το πολύγωνο είναι ακραίο τότε κάποιες από τις πλευρές του θα ταυτίζονται με τα όρια της λεκάνης.



Σχήμα 3.1 Υποθετική λεκάνη απορροής με ένα σταθμό σημειακής μέτρησης της βροχόπτωσης. Οι καμπύλες γραμμές αναπαριστούν τις υσοüeties.

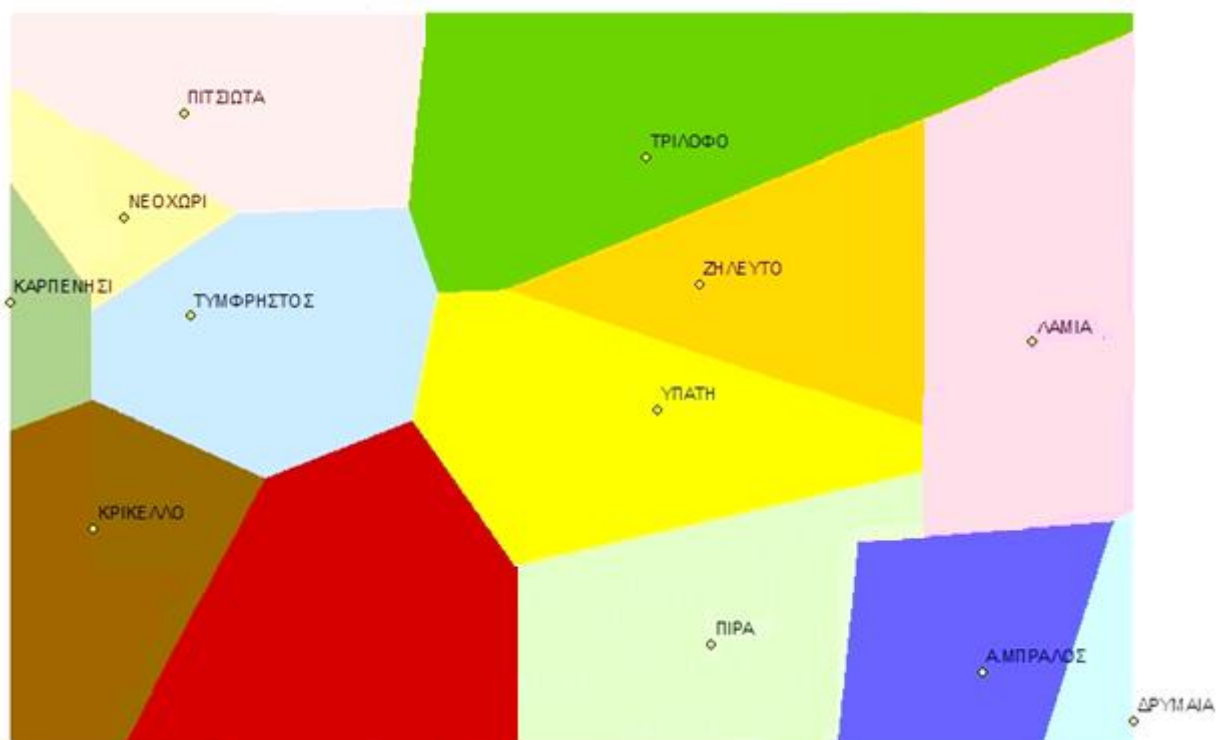
Γίνεται σαφές ότι με βάση την τοποθεσία των σταθμών καθώς και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, η εξίσωση 3.1 δεν είναι γενικά αληθής. Για παράδειγμα, τα σημειακά δεδομένα είναι αραιά παρατηρημένα και δεν αναπαριστούν τις επιφανειακές διαδικασίες επαρκώς, ιδιαίτερα στις πιο ορεινές περιοχές γιατί οι βροχοσταθμοί συχνά τοποθετούνται στα χαμηλότερα υψόμετρα των ορεινών περιοχών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποεκτίμηση την μέση επιφανειακή βροχόπτωση.

Για να ελαχιστοποιηθεί η μεροληψία του μοντέλου επιφανειακής ολοκλήρωσης λόγω του συστηματικού εκτιμώμενου σφάλματος, προτείνεται υψομετρική αναγωγή των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο θα έχω διορθωμένες MAP ως προς την τοπογραφία της περιοχής.

3.2.2 Υπολογιστική διαδικασία

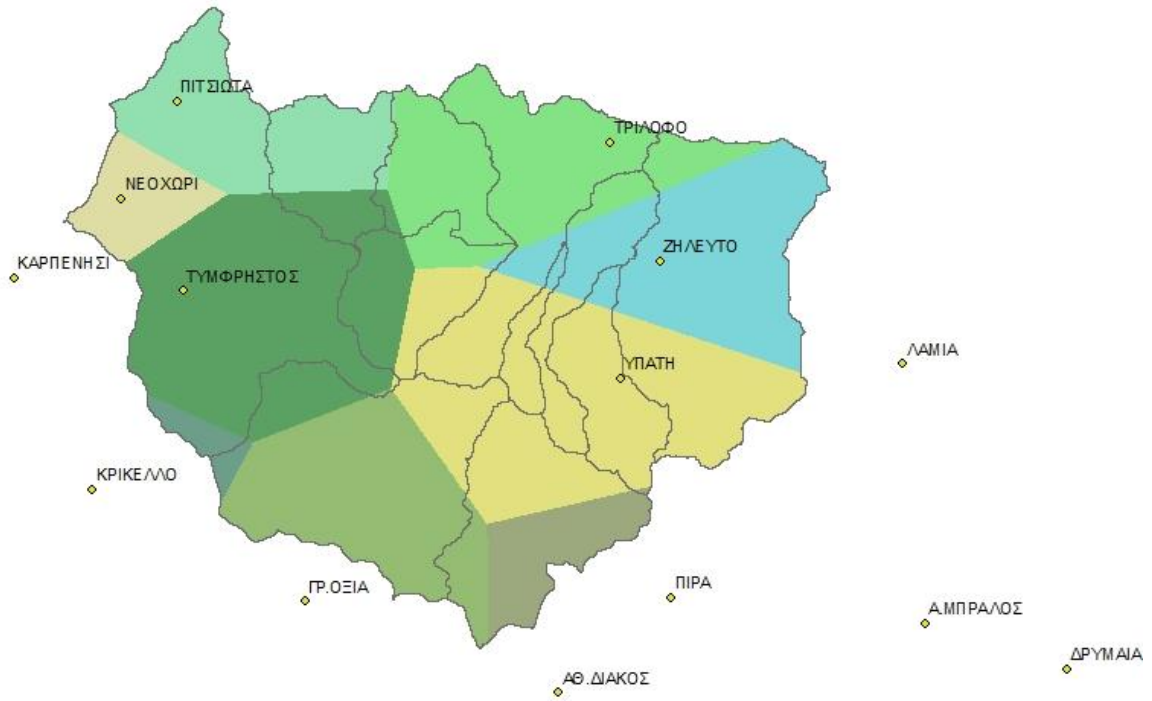
Τα πολύγωνα Thiessen για την περιοχή ελέγχου, σχηματοποιήθηκαν και εμβαδομετρήθηκαν σε περιβάλλον ARC GIS (Geographic Information System). Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: (1) η περιοχή ελέγχου (σε raster και διανυσματική δομή), (2) η σχετική θέση των σταθμών της σημειακής πληροφορίας στην περιοχή του Σπερχειού. Οι υπολογισμοί έγιναν σε περιβάλλον EXCEL 2010.

Με βάση τα παραπάνω προέκυψαν ο χάρτης πολυγώνων του Σχήματος 3.2 για την περιοχή μελέτης και κατ' επέκταση για κάθε λεκάνη ξεχωριστά του Σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.2 Πολύγωνα Thiessen για την ευρύτερη περιοχή μελέτης








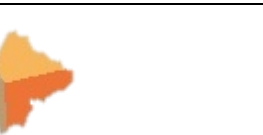
Οι συντελεστές βάρους Thiessen που προέκυψαν με βάση την εξίσωση (3.3) δίνονται στον Πίνακα 3.1 για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά.



Σχήμα 3.3 Πολύγωνα Thiessen για τις υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου

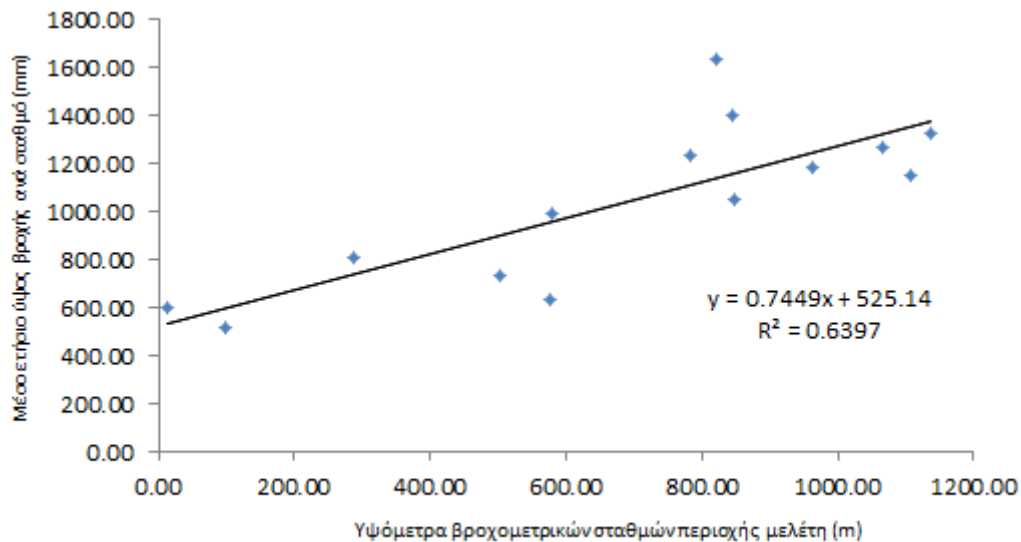
Πίνακας 3.1 Συντελεστές βάρους Thiessen για τις υπολεκάνες της περιοχής ελέγχου

Υπολεκάνη W120		
ΠΙΤΣΙΩΤΑ	0.7291	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.0037	
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	0.2672	
Υπολεκάνη W130		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.4512	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.1962	
ΥΠΑΤΗ	0.3526	
Υπολεκάνη W140		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.0705	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.6761	
ΥΠΑΤΗ	0.2534	

Υπολεκάνη W150		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.1234	
ΥΠΑΤΗ	0.8766	
Υπολεκάνη W160		
ΠΤΣΙΩΤΑ	0.0371	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.9165	
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	0.0464	
Υπολεκάνη W170		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.0097	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.2087	
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	0.4654	
ΥΠΑΤΗ	0.3162	
Υπολεκάνη W180		
ΚΑΡΠΙΕΝΗΣΙ	0.152505	
ΚΡΙΚΕΛΛΟ	0.034235	
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	0.573273	
ΠΤΣΙΩΤΑ	0.238470	
Υπολεκάνη W190		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.0754	
ΠΡΑ	0.0045	
ΥΠΑΤΗ	0.9201	
Υπολεκάνη W200		
ΖΗΛΕΥΤΟ	0.6041	
ΤΡΙΑΟΦΟ	0.0807	
ΥΠΑΤΗ	0.3152	
Υπολεκάνη W210		
ΓΡ.ΟΞΙΑ	0.6993	
ΚΡΙΚΕΛΛΟ	0.0267	
ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ	0.1282	
ΥΠΑΤΗ	0.1458	
Υπολεκάνη W220		
ΓΡ.ΟΞΙΑ	0.1561	
ΠΡΑ	0.4294	
ΥΠΑΤΗ	0.4145	

Προκειμένου να γίνει η υψομετρική διόρθωση των τιμών της επιφανειακής βροχόπτωσης μέσω ενός συντελεστή υψομετρικής αναγωγής λ , πρέπει πρώτα να βρεθεί η μεταβολή ύψους βροχής ανά μονάδα μεταβολής υψομέτρου (βροχοβαθμίδα).

Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 2.4.1 εφόσον η συσχέτιση που προκύπτει μεταξύ των υψομέτρων των σταθμών και των τιμών των ετήσιων παρατηρημένων βροχοπτώσεων παρουσιάζεται ισχυρή. Η βροχοβαθμίδα είναι ουσιαστικά η κλίση του μοντέλου.



Διάγραμμα 3.1 Μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης για εύρεση βροχοβαθμίδας για την περιοχή ελέγχου.

Επομένως η ζητούμενη βροχοβαθμίδα είναι $\beta \approx 0,745$.

Ο ζητούμενος συντελεστής υψομετρικής αναγωγής λ , δίνεται από τη σχέση :

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (3.4)$$

όπου z_s το μέσο υψόμετρο της λεκάνης και z_σ το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών (με βάση του συντελεστές Thiessen που έχουν προκύψει) και h_s το μέσο σταθμισμένο επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής.

Πίνακας 3.2 Συντελεστές υψομετρικής αναγωγής για κάθε υπολεκάνη

	W120	W130	W140	W150	W160	W170	W180	W190	W200	W210	W220
λ	0.938	1.15	0.925	1.067	0.816	0.813	1.05	1.529	1.256	1.03	1.294

3.3 Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής – Kriging interpolation

3.3.1 Θεωρητική διερεύνηση και μαθηματική τεκμηρίωση της μεθόδου

Η μέθοδος Kriging αναπτύχθηκε την δεκαετία του 50 από τον μηχανικό ορυχείων Krige (1951) με σκοπό την πρόγνωση της περιεκτικότητας σε μέταλλευμα μιας περιοχής εξόρυξης αξιοποιώντας μεμονωμένες μετρήσεις περιεκτικότητας σε συγκεκριμένα σημεία. Η περιεκτικότητα αυτή μοντελοποιήθηκε ως μια στοχαστική συνάρτηση σε τρεις διαστάσεις, δηλαδή ως ένα τυχαίο πεδίο (random field). Ο γενικότερος χαρακτήρας του Kriging ως μέθοδος πρόγνωσης τυχαίων πεδίων αναγνωρίστηκε από τον Matheron (1962) ο οποίος μελέτησε τα λεπτά μαθηματικά προβλήματα που σχετίζονται με τον απειροδιάστατο χαρακτήρα του άγνωστου τυχαίου πεδίου. Αυτός είναι και ο λόγος που η μέθοδος βρήκε εφαρμογή σε μια σειρά από προβλήματα πρόγνωσης όπως αυτά της υδρολογίας^{(1)†}.

Ως προς το εξαγόμενο της μεθόδου Kriging, αναφερόμαστε σε αυτό ως τυχαίο πεδίο. Με το όρο τυχαίο πεδίο ορίζεται η γενίκευση εκείνης της στοχαστικής ανέλιξης κατά την οποία η υποκειμένη της παράμετρος δεν χρειάζεται πλέον να είναι μία απλή πραγματική ή ακέραια τιμή του «χρόνου». Αντ' αυτού μπορώ να χρησιμοποιήσω τιμές που είναι διανύσματα πολλών διαστάσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εφόσον αναφερόμαστε σε χωρικά μεταβαλλόμενη διαδικασία, το διάνυσμά μου είναι 1,2 ή 3 διαστάσεων: 2 διαστάσεων συγκεκριμένα αφού μιλάω για επιφάνεια.

Με την αυστηρή έννοια του όρου,

Ως στοχαστική ανέλιξη $\{X_s(\omega), s \in T\}$ ορίζεται η οικογένεια τυχαίων μεταβλητών ορισμένων σε κοινό χώρο πιθανοτήτων $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ με παράμετρο την μεταβλητή s (θέση στο χώρο). Σε κάθε εξαγόμενο ω του τυχαίου πειράματος ορίζουμε μία συνάρτηση $X_s(\omega)$. Εξυπακούεται ότι (1) πρώτον $\omega \in \Omega$ και (2) η ανέλιξη είναι συνεχούς χώρου αφού το σύνολο T (δεικτοσύνολο) ανήκει στο \mathbb{R}_+^2 από τη στιγμή που αναφερόμαστε σε μία συνεχή επιφάνεια.

^{(1)†} Παρόμοια προβλήματα πρόγνωσης τυχαίων πεδίων ή στοχαστικών συναρτήσεων (stochastic processes), όρος που επικράτησε για συναρτήσεις του χρόνου, είχε ήδη μελετηθεί ανεξάρτητα τόσο από τον Kolmogorov (1941) όσο και από τον Wiener (1949), ώστε να μπορούμε να μιλάμε για μία συγκροτημένη θεωρία πρόγνωσης τυχαίων πεδίων των Wiener-Kolmogorov.

Με την ευρεία έννοια του όρου,

Τυχαίο πεδίο βροχόπτωσης Kriging: Στοχαστική ανέλιξη X πάνω στο T , με $T \subseteq \mathbb{R}_+^2$. Η $X(s)$ είναι μία συλλογή τυχαίων μεταβλητών

$$\{X(s) : s \in T\}$$

Αν οι τυχαίες μεταβλητές της οικογένειας $X(s)$ είναι βαθμωτά μεγέθη, και έτσι το πεδίο X γράφεται ως $X(2,1)$ τυχαίο πεδίο (Cressie, 1993).^{(2)†}

Τρία βασικά χαρακτηριστικά του είναι τα παρακάτω:

$$1. \text{Αναμενόμενη ή μέση τιμή: } \bar{X}_s = E[X_s] \quad (3.4)$$

$$2. \text{Χωρική διασπορά: } Var(X_s) = E[(X_s - \bar{X}_s)^2] \quad (3.5)$$

$$3. \text{Χωρική συνδιασπορά: } C(s, s') = Cov[X_s, X_{s'}] = E[(X_s - \mu_s)(X_{s'} - \mu_{s'})] \quad (3.6)^{(4)†}$$

Η χωρική συνδιασπορά είναι σημαντική στην γραμμική εκτίμηση. Και αυτό γιατί μειώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σφάλμα. Έτσι χωρίς μετρήσεις η καλύτερη εκτίμηση του $X(s')$ είναι η $E[X_{s'}]$, δηλαδή η μέση τιμή και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $MSE = Var(X_{s'}) = \sigma_{X_{s'}}^2$. Αντίθετα όταν έχει παρατηρηθεί τότε η εκτίμηση του $X(s')$ μπορεί να διορθωθεί δεδομένου ότι υπάρχει η παραπάνω πληροφορία. Κάνοντας χρήση μίας γραμμικής διόρθωσης στην παρατήρηση έχουμε $X_{s'} = E[X_{s'}] + \rho(s, s')(X_s - E[X_s]) \frac{\sigma_{X_{s'}}}{\sigma_{X_s}}$ ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μειώνεται σε

$$MSE = [1 - \rho(s, s')] \sigma_{X_{s'}}^2$$

Για να ποσοτικοποιηθεί η χωρική συσχέτιση- παρόλες τις ομοιότητες με την γενικότερη θεωρία πρόγνωσης των Wiener-Kolmogorov - η μέθοδος Kriging έχει μια σημαντική διαφορά. Αυτή έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί τη συνάρτηση του μεταβλητογράμματος (variogram) στη θέση της συνάρτησης της συνδιακύμανσης (covariance function) του σχετικού τυχαίου πεδίου. Από θεωρητική σκοπιά η επιλογή αυτή επεκτείνει την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου Kriging και σε τυχαία πεδία τα οποία διαθέτουν μεταβλητόγραμμα και όχι συνάρτηση συνδιακύμανσης.^{(3)†}

^{(2)†} Τυχαίο Πεδίο, Random Field

Έστω στοχαστική ανέλιξη f πάνω στο T , με $T \subseteq \mathbb{R}^N$. Η f είναι μία συλλογή τυχαίων μεταβλητών $\{f(t) : t \in T\}$. Αν οι τυχαίες μεταβλητές της οικογένειας $f(t)$ είναι διανύσματα διάστασης d , τότε το πεδίο f γράφεται ως (N, d) τυχαίο πεδίο (Cressie, 1993).

3.3.2 Ομογενές τυχαίο πεδίο- Στατιστική ομοιογένεια

Με βάση όσα ειπώθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο, γίνεται αντιληπτό ότι το τυχαίο πεδίο αντιπροσωπεύει ένα σύνολο δυνατών καταστάσεων (εδώ επιφανειακής βροχόπτωσης). Σε ένα τυχαίο πεδίο η κατανομή των πιθανοτήτων είναι τέτοια ώστε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σε ένα σημείο K να εξαρτάται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στα γειτονικά σημεία. Αυτού του είδους η χωρική εξάρτηση είναι επί της ουσίας και το χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί από ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών.

Στη γενική περίπτωση ένα τυχαίο πεδίο μεταβάλλει τις στατιστικές του παραμέτρους για τυχαία χωρική μεταβολή. Υπάρχει όμως και μία ειδική κατηγορία τυχαίων πεδίων, τα ομογενή, τα οποία δεν μεταβάλλουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή υπό την επίδραση τυχούσας μεταβολής τ , η συνάρτηση κατανομής του $X_{(s+\tau)}$ ταυτίζεται με την κατανομή του $X(s)$.

Ένα τυχαίο πεδίο λέγεται ομογενές όταν (1) η συνάρτηση της μέσης τιμής είναι σταθερή, και (2) η συνδιασπορά δεν επηρεάζεται από τυχαία χωρική μεταβολή τ - $C(s, s') = C(s + \tau, s' + \tau)$ - και εξαρτάται αποκλειστικά από το διάστημα της απόστασης $r(s' - s)$ μεταξύ δύο σημείων.

Πράγματι, για μία τυχούσα χωρική μετατόπιση τ (εδώ επιλέγω $\tau = -s$) έχω ότι η παραπάνω δοσμένες εξισώσεις (3.4) και (3.6) έχουν ως εξής:

$$\overline{X_s} = E[X_s] = \mu = const$$

$$C(s + \tau, s' + \tau) = C(s' - s)$$

Η στατιστική ομοιογένεια ουσιαστικά σημαίνει πως η μεταβολή των τιμών του τυχαίου πεδίου μπορεί να αποδοθεί σε διακυμάνσεις γύρω από τη συνάρτηση μέσης τιμής (λόγω της παρατήρησης (1)) και ότι οι στατιστικές ιδιότητες του πεδίου δεν εξαρτώνται από τη θέση αλλά από την απόσταση των σημείων του (λόγω της παρατήρησης(2)).

^{(3)†} Η ευρύτητα του πεδίου εφαρμογής της μεθόδου Ordinary Kriging λόγω της χρήση του μεταβλητογράμματος είναι δευτερευούσης σημασίας σε σχέση με τη δυνατότητα πρόγνωσης που παρέχει όταν το τυχαίο πεδίο έχει σταθερή μεν αλλά άγνωστη συνάρτηση μέσης τιμής, τη στιγμή που άλλες μέθοδοι (μία από τις οποίες είναι και η παραλλαγή 'Simple' του Kriging) προϋποθέτουν γνώση της σταθερής μέσης τιμής.

3.3.3 Χωρική συσχέτιση τυχαίου πεδίου – Ημιμεταβλητόγραμμα (Semivariogram)

Το ημιμεταβλητόγραμμα ενός τυχαίου πεδίου ορίζεται με βάση την εξίσωση:

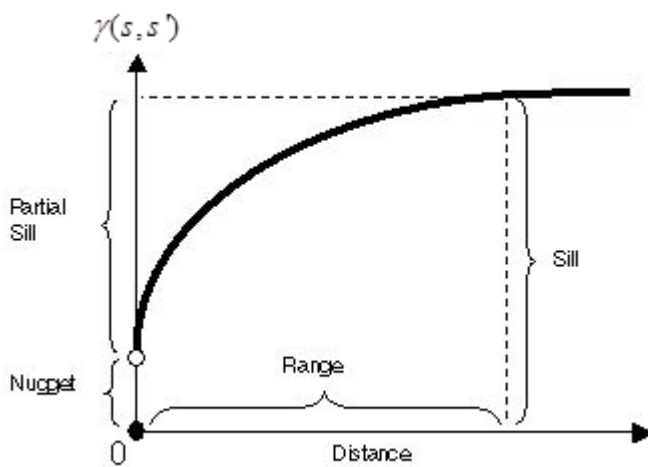
$$\gamma_X(s, r) = \frac{1}{2} E[X(s+r) - X(s)]^2 \quad (3.7)$$

όπου r είναι το βήμα απόστασης. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι το ημιμεταβλητόγραμμα ορίζεται σε σχέση με ζεύγη σημείων και επί της ουσίας μετρά πόσο διαφέρουν οι μεταξύ τους οι τιμές του πεδίου σαν συνάρτηση της απόστασης. Στην περίπτωση στατιστικά ομοιογενούς πεδίου το ημιμεταβλητόγραμμα συνδέεται άμεσα με τη συνδιασπορά αφού:

$$\gamma_X(r) = \text{Var}(X_s) - C_X(r) \quad (3.8)$$

Επομένως σε ομοιογενές πεδίο το ημιμεταβλητόγραμμα τείνει ασυμπτωτικά στη τιμή της διασποράς.

Οι παράμετροι του ημιμεταβλητογράμματος καθορίζει την χωρική εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο γειτονικά πεδία. Πρακτικά, λοιπόν το ημιμεταβλητόγραμμα είναι ένα εργαλείο που δείχνει την εξάρτηση των σημείων του πεδίου σε σχέση με την απόστασή τους (Χριστόπουλος 2004).



Κατώφλι (sill) και εύρος (range): το κατώφλι είναι μία σταθερή τιμή στην οποία φτάνει το ημιμεταβλητόγραμμα σε απόσταση που ονομάζεται εύρος. Το πρώτο έχει σχέση με τη διασπορά του δείγματος ενώ το δεύτερο με την απόσταση πέρα από την οποία οι τιμές δεν σχετίζονται χωρικά.

Nugget effect: η ημιδιασπορά μπορεί να μην είναι μηδέν σε μηδενική απόσταση. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις μπορεί να έχουν θόρυβο, να παρουσιάζουν λάθη ή να μην είναι ταυτόχρονες

- Εκτίμηση πειραματικού ημιμεταβλητογράμματος

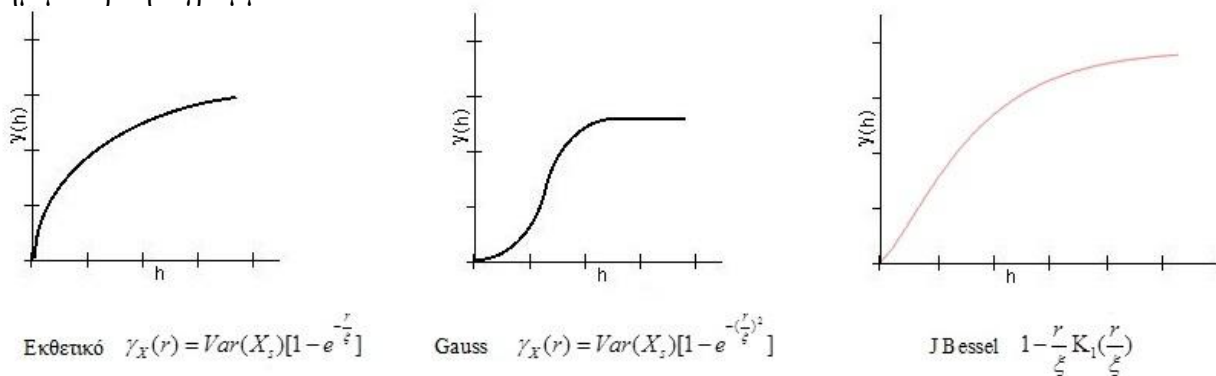
Η εκτίμηση του πειραματικού (experimental) ημιμεταβλητογράμματος γίνεται με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε η μέθοδος των ροπών:

$$\gamma_X = \frac{1}{2n} \sum_{s,s'=1}^{n_r} \{[X(s) - X(s')]^2\} \quad \text{όπου } (s-s') \in B(r_k), k=1, 2, \dots, N_c \quad (3.9)$$

$B(r_k)$ είναι μία κλειστή περιοχή γύρω από το διάνυσμα r_k που ορίζει το μέγεθος της τάξης⁽⁴⁾ του βήματος. Αν ένα σημείο s βρίσκεται μέσα στην τάξη $B(r_k)$ θεωρείται ότι απέχει απόσταση r_k από το σημείο s . Τέλος N_c ορίζεται το πλήθος των τάξεων και n_r το πλήθος των ζευγών που περιέχονται μέσα στην τάξη $B(r_k)$. Ουσιαστικά η μέθοδος των ροπών προσδιορίζει μία τιμή πειραματικού ημιμεταβλητογράμματος για κάθε r_k . Αυτό γίνεται βάσει του μέσου όρου των διαφορών $[X(s) - X(s')]^2$ για όλα τα ζεύγη των σημείων, των οποίων το διάνυσμα της απόστασης ανήκει στην περιοχή $B(r_k)$.

• Υπολογισμός θεωρητικού μοντέλου ημιμεταβλητογράμματος

Σκοπός είναι να βρεθεί το θεωρητικό μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα στο πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα. Ένα θεωρητικό μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό του ημιμεταβλητογράμματος για οποιαδήποτε απόσταση. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του θεωρητικού μοντέλου υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση του τετραγώνου του σφάλματος του γ_X : δηλαδή της διαφοράς μεταξύ του θεωρητικού μοντέλου γ_X και του πειραματικού βαριογράμματος γ_X . Ανάλογα με τον αριθμό των ζευγών που αντιστοιχούν σε κάθε τάξη, δίνεται και διαφορετικός συντελεστής βαρύτητας στις τάξεις κατά την προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου. Στο Σχήμα 3.4 δίνονται κάποια παραδείγματα θεωρητικών ισοτροπικών ημιμεταβλητογραμμάτων.



Σχήμα 3.4 Θεωρητικά ημιβαριογράμματα για τρία είδη κατανομών

Ως προς τις παραμέτρους των παραπάνω κατανομών ως ξ ορίζεται το μήκος συσχέτισης, δηλαδή ένα μήκος που κανονικοποιεί την απόσταση r και ορίζει διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει αλληλεξάρτηση τιμών του πεδίου. Εποπτικά αναφέρουμε ότι το εκθετικό θεωρείται ότι για αποστάσεις μεγαλύτερες των 3ξ δεν παρουσιάζει ισχυρή αλληλεξάρτηση.

^{(4)†} Με τον όρο τάξη εννοούμε τη διάσταση του μέγιστου τετραγωνικού υποπίνακα με μη μηδενική ορίζουσα

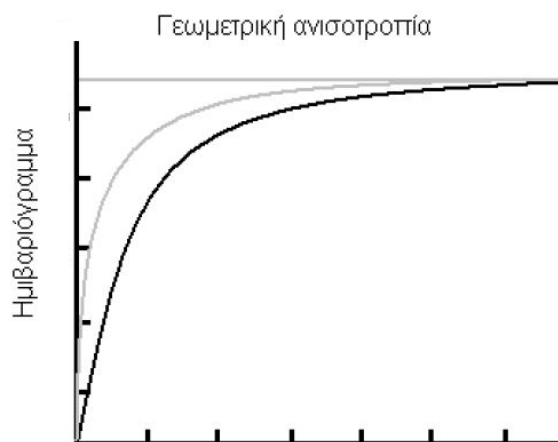
Για την κατανομή Bessel που δίνεται από τον τύπο :

$$1 - \frac{r}{\xi} K_1\left(\frac{r}{\xi}\right) = \gamma(r) = \frac{n_0 \xi^2}{2\pi} \int_0^k \frac{k[1 - J_0(kr)]}{1 + n_1 \xi^2 k^2 + \xi^4 k^4} \quad (3.10)$$

είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης J_0 είδους και n_0 είναι η παράμετρος κλίμακας, ξ το χαρακτηριστικό μήκος και k_c το σημείο της φασματικής αποκοπής (Χριστόπουλος, 2003)

3.3.4 Ισότροπο τυχαίο πεδίο-Στατιστική ισοτροπία

Ένα ισότροπο τυχαίο πεδίο καλείται το πεδίο εκείνο που η συνάρτηση της συνδιασποράς του εξαρτάται μονάχα από το μέτρο της απόστασης r και όχι από την κατεύθυνση αυτού του διανύσματος. Προφανώς όταν ένα πεδίο είναι ισότροπο είναι και ομογενές χωρίς να ισχύει υποχρεωτικά το αντίστροφο. Η διερεύνηση της ανισοτροπίας επομένως ενός πεδίου, δηλαδή η εξάρτηση της συνδιασποράς από την κατεύθυνση του διανύσματος συσχέτισης r είναι μείζονος σημασίας στις γεωστατιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν στην εκτίμησή τους το ημιμεταβλητόγραμμα. Για παράδειγμα ένα πεδίο που εμφανίζει γεωμετρική ανισοτροπία σημαίνει ότι περιλαμβάνει διαφορετικά μήκη συσχέτισης,, ένα για κάθε διάσταση του χώρου. Αφού αυτά τα μήκη είναι διαφορετικά μεταξύ τους, το ημιμεταβλητόγραμμα τείνει προς την συνδιασπορά του πεδίου με διαφορετική ταχύτητα σε κάθε κατεύθυνση (Σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5 τυπικό παράδειγμα ημιμεταβλητογράμματος ανισότροπου πεδίου

3.3.5 Η έννοια της εκτιμήτριας,

• Εκτιμήτρια

Σκοπός: η εκτίμηση παραμέτρων κατανομής κάποιου χαρακτηριστικού πληθυσμού.

Έστω κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ενός πληθυσμού ακολουθεί μία γνωστή κατανομή με άγνωστες παραμέτρους θ , δηλαδή $F(x; \theta)$ όπου $\theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ (π.χ. το $\theta = (\mu, \sigma^2)$). Το ερώτημα είναι ο τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων της κατανομής. Απαραίτητη κρίνεται η γνώση της τιμής του χαρακτηριστικού τουλάχιστον σε κάποιες μονάδες του πληθυσμού.

Ορισμός: Εκτιμήτρια συνάρτηση μίας παραμέτρου θ θα καλείται μία στατιστική συνάρτηση $T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θ (Συμβολισμός εκτιμώμενων τιμών $\hat{\theta}$)

• Ιδιότητες εκτιμητριών

Έστω X_1, X_2, \dots, X_n ένα τυχαίο δείγμα $F(x, \theta)$ και έστω $T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ μία εκτιμήτρια συνάρτηση της παραμετρικής συνάρτησης $g(\theta)$ (π.χ. $g(\theta) = \mu$). Η εκτιμήτρια T είναι και αυτή μία τ.μ. (αφού κάθε φορά που έχω άλλο δείγμα αυτή μου δίνει άλλη τιμή). Η T θεωρείται καλή εκτιμήτρια της $g(\theta)$ θα πρέπει να παίρνει τιμές πολύ κοντά στην $g(\theta)$ με «μεγάλη πιθανότητα». Αυτό μπορεί να συμβεί θέτοντας την απαίτηση η τ.μ. T να έχει μέση τιμή $g(\theta)$ ή σχεδόν $g(\theta)$ και να έχει πολύ μικρή διασπορά

Τυχαίο δείγμα μεγέθους n : από την κατανομή $F(x, \theta)$ θα καλείται το σύνολο των ισόνομων και ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_n που ακολουθούν την κατανομή $F(x, \theta)$

Δειγματοληπτικός χώρος: θα καλείται το σύνολο των δυνατών τιμών του δείγματος (δηλαδή αν $X_i \in \mathbb{R}$ τότε ο δειγματοληπτικός χώρος θα είναι ο \mathbb{R}^n)

Παραμετρικός χώρος: θα καλείται επιτρεπτών τιμών της παραμέτρου θ

Στατιστική (ή δειγματική συνάρτηση): θα λέγεται κάθε συνάρτηση $T(X) = T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ των τυχαίων μεταβλητών του δείγματος X_1, X_2, \dots, X_n που δεν εξαρτάται από τις προς εκτίμηση παραμέτρους. Κάθε στατιστική συνάρτηση είναι και αυτή από μόνη της μία τυχαία μεταβλητή.

Γνωστές στατιστικές συναρτήσεις:

$$\text{Δειγματικός μέσος } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\text{Δειγματική διασπορά } s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$\text{Δειγματικό εύρος } R = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} - \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\} = X_{(n)} - X_{(1)}$$

- Αμερόληπτες εκτιμήτριες, Unbiased Estimators

Ορισμός: μία εκτιμήτρια συνάρτηση T της $g(\theta)$ θα καλείται αμερόληπτη εάν:

$$E[T] = E[T(X_1, X_2, \dots, X_n)] = g(\theta) \quad \forall \theta \quad (3.11)$$

Το μέγεθος $b(T) = E[T] - g(\theta)$ καλείται μεροληψία της εκτιμήτριας T . Όταν η εκτιμήτρια είναι αμερόληπτη τότε $bias = b(T) = 0$.

Προφανώς μας ενδιαφέρουν οι αμερόληπτες εκτιμήτριες εφόσον μία μεροληπτική μπορεί να υποεκτιμά ή να υπερεκτιμά την ζητούμενη παράμετρο.

- Αποτελεσματική εκτιμήτρια, Efficient Estimators

Ορισμός: Έστω T_1, T_2 δύο αμερόληπτες εκτιμήτριες της $g(\theta)$. Η T_1 θα καλείται αποτελεσματικότερη της T_2 εάν ισχύει ότι $Var(T_1) < Var(T_2)$

- Άριστη εκτιμήτρια

Ορισμός: αν μία εκτιμήτρια T έχει μικρότερη διασπορά μεταξύ όλων των αμερόληπτων εκτιμητριών του $g(\theta)$, τότε θα καλείται *άριστη εκτιμήτρια* ή *αμερόληπτη εκτιμήτρια ελάχιστης διασποράς του $g(\theta)$* .

Συμπέρασμα 1: τη βέλτιστη επιλογή εκτιμήτριας, προκειμένου να εκτιμήσουμε μία παραμετρική συνάρτηση του $g(\theta)$, αποτελεί η επιλογή μίας άριστης εκτιμήτριας.

- Κριτήριο επιλογής καλύτερης εκτιμήτριας ανεξάρτητα από το αν είναι αμερόληπτη ή όχι - Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, Mean Square Error

Έστω μία εκτιμήτρια $T = T(X_1, X_2, \dots, X_n)$ μίας παραμέτρου $g(\theta)$. Η ποσότητα $mse(T)$ καλείται μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean square error) της T από την $g(\theta)$

$$mse(T) = E[T - g(\theta)]^2 = Var(T) + b(T)^2 \quad (3.12) \text{ *Αμερόληπτος}$$

εκτιμητής είναι εκείνος που το μέσο τετραγωνικό του σφάλμα είναι ίσο με την διασπορά του.

Συμπέρασμα 2: Βέλτιστη εκτιμήτρια μίας παραμέτρου είναι εκείνη που έχει το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα^{(7)†}

^{(7)†} Η μεροληψία είναι ιδιότητα της εκτιμήτριας και όχι της παραμέτρου που εκτιμάται. Συχνά αναφερόμαστε σε μεροληπτική εκτίμηση αλλά στην πραγματικότητα μιλάμε για εκτίμηση μέσω μίας μεροληπτικής εκτιμήτριας. Επίσης συχνά υπάρχει η σύγχυση μεταξύ της έννοιας του «σφάλματος» μίας μεμονωμένης εκτιμώμενης τιμής με την μεροληψία της εκτιμήτριας. **Το ότι το σφάλμα μια εκτιμώμενης τιμής είναι μεγάλο δεν σημαίνει ότι η εκτιμήτρια είναι μεροληπτική.** Στην πραγματικότητα ακόμα και αν όλες οι εκτιμώμενες τιμές έχουν πολύ μεγάλες τιμές σφάλματος, αν η αναμενόμενη τιμή του σφάλματος είναι μηδέν τότε η εκτιμήτρια είναι αμερόληπτη. Επιπλέον το ότι η εκτιμήτρια είναι μεροληπτική δεν αποκλείει το γεγονός το εκτιμώμενο σφάλμα να είναι μηδέν (μπορεί να σταθήκαμε απλά τυχεροί). Η ιδανική κατάσταση φυσικά, είναι να έχει αμερόληπτη εκτιμήτρια χαμηλής διασποράς και ταυτόχρονα να επιχειρείται ο περιορισμός των στοιχείων του δείγματος που το σφάλμα είναι υπερβολικό.

3.3.6 Εκτίμηση τυχαίου πεδίου με την μέθοδο Ordinary Kriging

Η τιμή στο σημείο εκτίμησης προκύπτει από ένα συνδυασμό γειτονικών τιμών. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να είναι είτε γραμμικός είτε μη-γραμμικός και οι παράμετροί του να προσδιορίζονται από τη βελτιστοποίηση κάποιου στατιστικού μέτρου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης. Η ζητούμενη μέθοδος Kriging βασίζεται σε γραμμική παρεμβολή σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκτίμησης.

Το ζητούμενο της σημειακής εκτίμησης συνίσταται σε πρόβλεψη της τιμής του πεδίου X στο σημείο εκτίμησης, έστω u . Η εκτίμηση γίνεται βάσει ενός συνόλου δεδομένων $X(s_i)$ στα σημεία s_i που βρίσκονται εντός μίας περιοχής Ω . Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει και το σημείο u . Συνεπώς η εκτιμώμενη τιμή στο u είναι η $X(u)$.

Η διαδικασία της εκτίμησης επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία ενός προεπιλεγμένου πλέγματος (grid). Η εκτίμηση συνοδεύεται από την εκτίμηση της αξιοπιστίας η οποία προσδιορίζει την αβεβαιότητα της εκτίμησης στο κάθε σημείο.

Αρχικά προσδιορίζεται μία γειτονιά του u , $\omega(u)$ που περιλαμβάνει έστω n σημεία. Η εκτιμώμενη τιμή μέσα στη γειτονιά είναι

$$X_u = m_x(u) + \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i [X(s_i) - m_x(s_i)] \quad (3.13)$$

Όπου οι συντελεστές λ_i αντιπροσωπεύουν τα γραμμικά βάρη και η $m_x(s)$ η τάση του πεδίου (δηλαδή οι αργές μεταβολές) για τα σημεία s .

Το σφάλμα της εκτίμησης $\varepsilon(u)$ είναι η τυχαία μεταβλητή που ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και την εκτιμώμενη τιμή του πεδίου. Η συνθήκη αμεροληψίας του μηδενισμού της μέσης τιμής του σφάλματος εκτίμησης:

$$E[\varepsilon(u)] = E[X(u) - X(u)] = 0 \quad (3.14)$$

Και αποτελεί έναν πρόσθετο περιορισμό για τα γραμμικά βάρη.

Η μέθοδος Kriging ελαχιστοποιεί τη διασπορά του σφάλματος εκτίμησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εξίσωση του ημιμεταβλητογράμματος (3.9) να μετατραπεί σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων ως προς τους συντελεστές λ_i με γνωστά στοιχεία τα δεδομένα $X(s)$ και την τιμή γ_x στις κατάλληλες αποστάσεις. Τέλος το Ordinary Kriging προϋποθέτει σταθερή συνάρτηση μέσης τιμής εντός περιοχής $\omega(u)$ που μπορεί πάντως να μεταβάλλει την τιμή της από γειτονιά σε γειτονιά

καθώς και ομογενές τυχαίο πεδίο. Έτσι λοιπόν το γραμμικό σύστημα εξισώσεων δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\sum_{j=1}^{n(u)} \lambda_j C_X(s_i - s_j) + \mu = C_X(s_i - u) \quad (3.15)$$

$$j = \sum_{j=1}^{n(u)} \lambda_j = 1 \quad (3.16)$$

Όπου λ τα ζητούμενα γραμμικά βάρη, μ η σταθερά Lagrange και $C_X(s_i - s_j)$ η συνδιασπορά των σημείων αφού το πεδίο είναι ομογενές .

Το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης δίνεται από την εξίσωση:

$$mse(X_u) = Var(X_u) + b(X_u)^2 = Var(X_u) - \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i C_X(u, s_i) - \mu \quad (3.17)$$

Και αντιπροσωπεύει την αξιοπιστία της εκτίμησης στο σημείο u .

Το Ordinary Kriging που στην παρούσα μελέτη θα εφαρμοστεί διακρίνεται από κάποιους περιορισμούς: (1) θεωρεί ότι το τυχαίο πεδίο είναι ομογενές και ισότροπο και (2) για μία αξιόπιστη εκτίμηση προϋποθέτει η κατανομή της πιθανότητας της ιδιότητας που εξετάζεται να είναι συμμετρικά και όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κανονική κατανομή.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί την χωρική συσχέτιση της μεταβλητής ενδιαφέροντος (βροχόπτωση) με τον εαυτό της για να ορίσει τα βάρη με τον βέλτιστο τρόπο. Υπάρχουν δύο τουλάχιστον λόγοι για τους οποίους κρίνεται απαραίτητο να εξετάζεται και η χωρική συσχέτιση της μεταβλητής ενδιαφέροντος με άλλες μεταβλητές. Πρώτον, όταν τα δεδομένα είναι αραιά για την μεταβλητή ενδιαφέροντος και δεύτερον και δεύτερον όταν δεν υπάρχει μονάχα μία μεταβλητή που κατά κύριο λόγο να μας ενδιαφέρει. Στην παρούσα διερεύνηση τα δεδομένα κρίνονται αραιά, πράγμα που αποδεικνύεται και λόγω της αδυναμίας να προσεγγιστεί η κανονική κατανομή για τις σημειακές παρατηρημένες μετρήσεις και συνεπώς μία εφαρμογή της μεθόδου Co-Kriging η οποία λαμβάνει υπόψη της και τη συσχέτιση της μεταβλητής με τα υψόμετρα, $X_s = [X_1(s), X_2(s)]$ κρίνεται ότι θα βελτίωση αισθητά την αξιοπιστία της εκτίμησης

3.3.7 Υπολογιστική διαδικασία

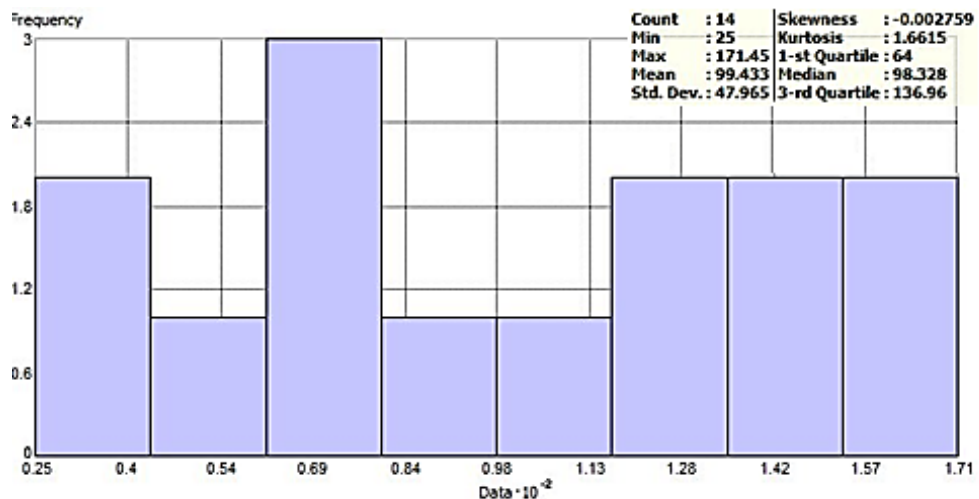
Η εύρεση των τυχαίων πεδίων Kriging έγινε σε υπολογιστικό περιβάλλον ARC GIS με ενσωματωμένο αλγόριθμο για την συγκεκριμένη γεωστατιστική μέθοδο και όλες της παραλλαγές της. Το θεωρητική τεκμηρίωση του συγκεκριμένου αλγορίθμου, μετά από διεξοδική διερεύνηση πιστοποιείται ότι είναι η παραπάνω. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν είναι: (1) Μοντέλο ψηφιακών υψομέτρων, DEM (Digital Elevation Model), σε κάρναβο 25x25 και

250x250 m, (2) τα σημεία της παρατηρημένης βροχόπτωσης και (3) οι μέσες μηνιαίες παρατηρημένες βροχοπτώσεις σε αυτά.

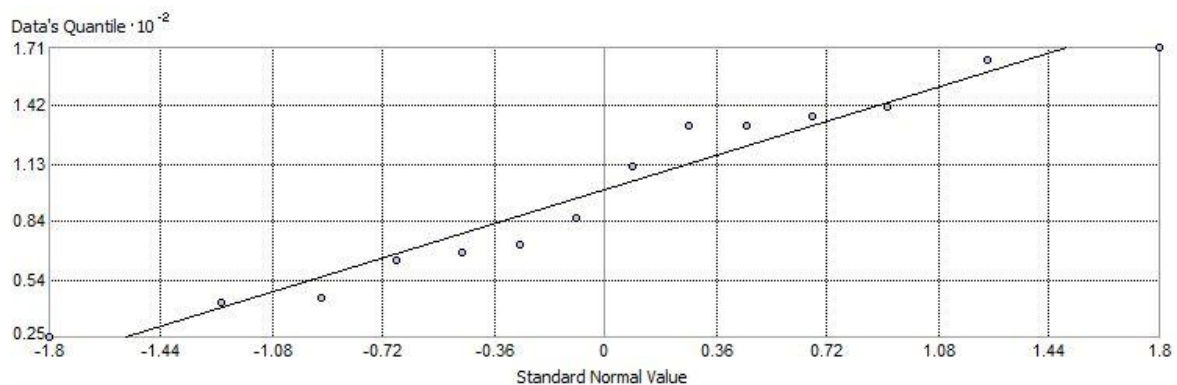
Παρακάτω παρουσιάζεται επισκοπικά η υπολογιστικά διαδικασία για τον μήνα Ιανουάριο του υδρολογικού έτους 1998 (άρα Ιαν '99). Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για όλους τους μήνες όλων των υδρολογικών ετών των διαθέσιμων χρονοσειρών, δηλαδή για την περίοδο 1951-2000.

Βήμα 1^ο: Διερεύνηση των σημειακών δεδομένων. Μία πρώτη επισκόπηση των χαρακτηριστικών

- Κανονικότητα σημειακών δεδομένων



Διάγραμμα 3.2 Ιστόγραμμα σημειακών παρατηρήσεων Ιανουαρίου 1999

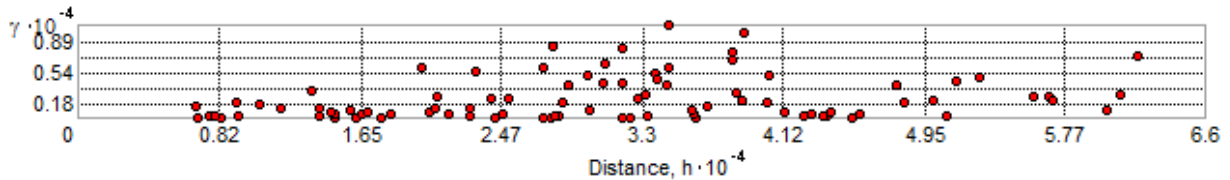


Διάγραμμα 3.3 QQPlot για κανονική κατανομή

Από τα παραπάνω φαίνεται το πόσο ικανοποιητικά προσεγγίζουν τα δεδομένα μας την κανονική κατανομή, που αποτελεί και αναγκαία προϋπόθεση για αξιόπιστα αποτελέσματα της μεθόδου

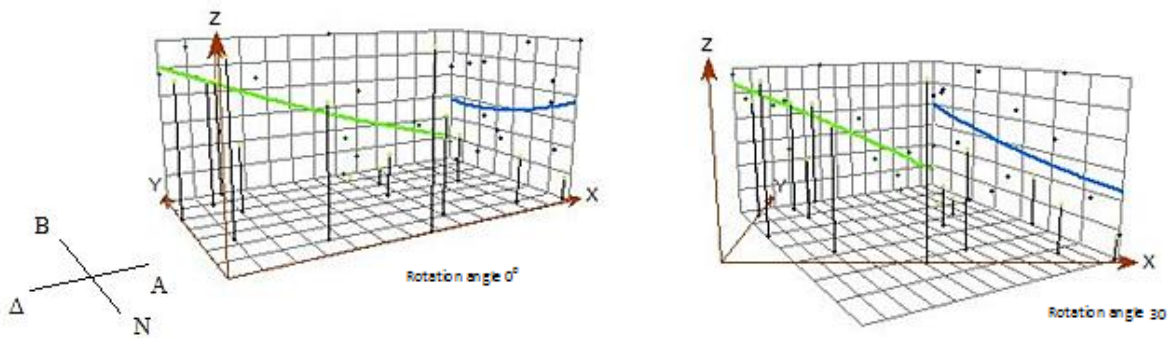
Kriging. Ζητούμενο επισκοπικά είναι η ασυμμετρία να είναι μηδενική και η μέση τιμή με τη διάμεσο να ταυτίζονται.

- Ανισοτροπία τυχαίου πεδίου



Διάγραμμα 3.4 Νέφος ημιβαριογράμματος (semivariogram cloud)

Σε ένα νέφος ημιμεταβλητογράμματος αυτό που αναμένεται είναι οι τα σημεία (κόκκινα) που αντιστοιχούν σε μικρότερες αποστάσεις να παρουσιάζουν καλύτερη συσχέτιση. Έτσι αν υπάρχουν πολλά σημεία που συμβαίνει το παράδοξο, ενώ βρίσκονται κοντά το γ να παίρνει μεγάλη τιμή θα πρέπει να μας τίθεται το ερώτημα της πιθανής ανισοτροπίας του πεδίου πράγμα που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη αν θέλουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Βέβαια αν παρατηρούνται μεμονωμένα σημεία και όχι πολλά στον αριθμό που εμφανίζουν αυτήν την ανορθοδοξία, μπορεί να γίνει περαιτέρω διερεύνηση για τυχόν ανακρίβεια στις μετρήσεις

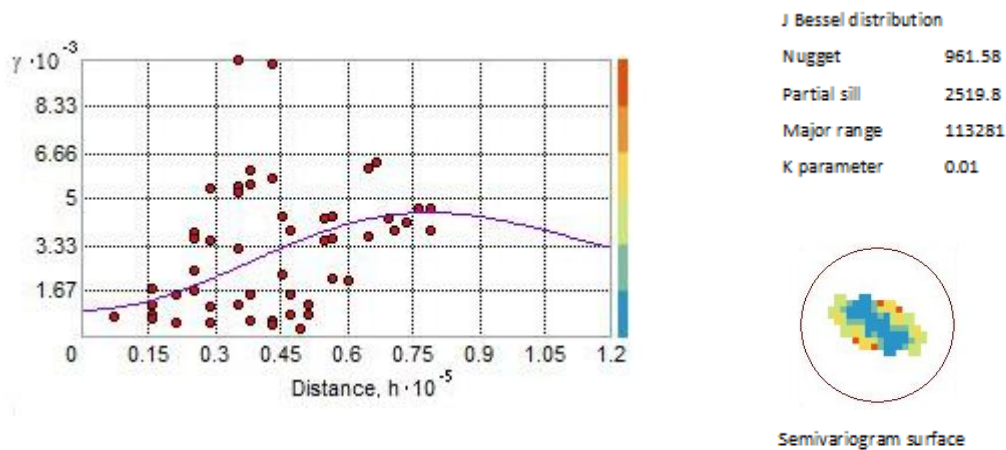


Διάγραμμα 3.4 Καθολικές τάσεις σημειακών παρατηρήσεων

Αντιστοίχως η ύπαρξη τάσεων αποτυπώνει εξάρτηση του ημιμεταβλητογράμματος και από τη διεύθυνση του διανύσματος. Η μη ύπαρξη τάσης θα εμφανίζονταν με μία οριζόντια γραμμή. Οι τάσεις που παρατηρούνται ή που θα ληφθούν εξ αρχής υπόψη με κάποιες πολυωνυμικές προσεγγίσεις που είναι ενσωματωμένες στον αλγόριθμο ή που θα διερευνήσω περαιτέρω την ανισοτροπία του πεδίου.

Βήμα 2^ο: Προσαρμογή θεωρητικού ημιμεταβλητόγραμματος

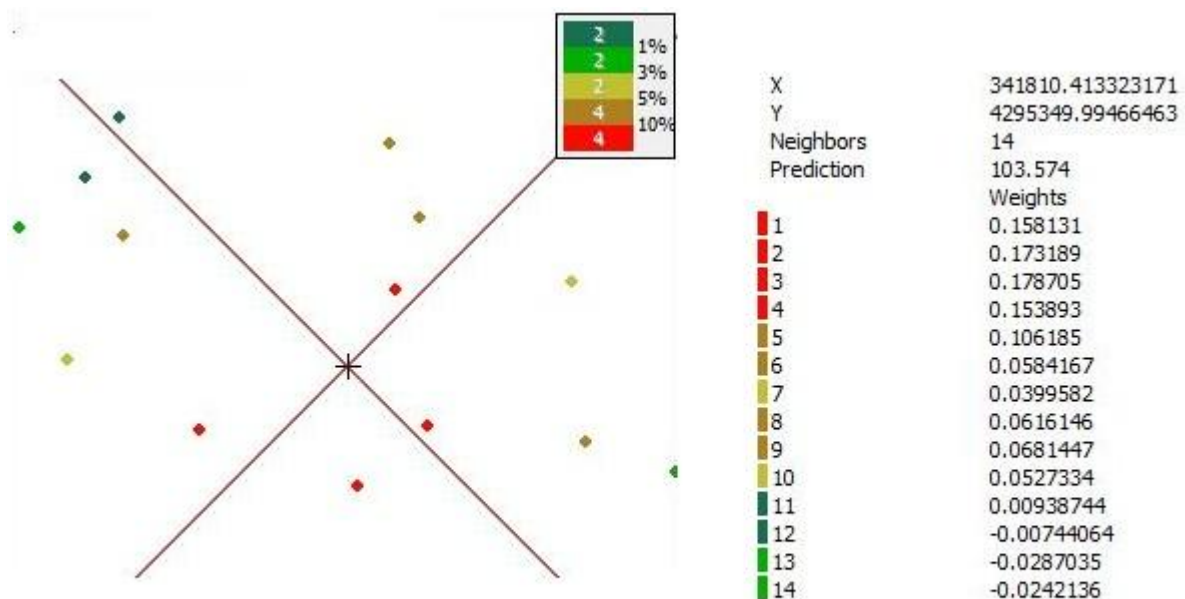
Σε αυτό το βήμα καθορίστηκαν οι παράμετροι του ημιμεταβλητογράμματος. Μετά από διερεύνηση της προσαρμογής του μοντέλου, επιλέχθηκε η κατανομή J Bessel ως το καλύτερο θεωρητικό μοντέλο. Ο σκοπός εξ' αρχής ήταν να επιλεγεί ένα θεωρητικό μοντέλο κατάλληλο για όλα τα τυχαία πεδία για λόγους αυτοματοποίησης της μεθόδου αλλά και για λόγους ομοιομορφίας και επαλήθευσης. Οι βέλτιστες παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται απευθείας από τον αλγόριθμο. Σε εξαιρετικά λίγες περιπτώσεις χρειάστηκε επέμβαση για διόρθωση κυρίως της παραμέτρου nugget.



Διάγραμμα 3.4 Ημιβαραριογραμμα εμπειρικό και θεωρητικό (J Bessel)

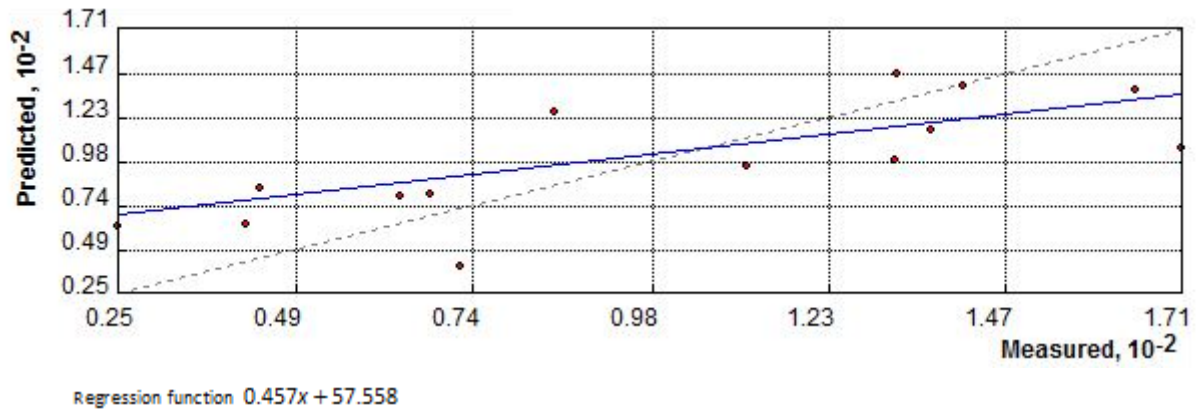
Βήμα 3^ο : επιλογή κατάλληλης γειτονιάς και εκτίμηση των συντελεστών βάρους

Έγινε η επιλογή γειτονιά με n=5 σημεία και nmin=2.



Διάγραμμα 3.5 Γειτονιά και συντελεστές βάρους για Ιανουάριο 1999

Βήμα 3^ο: Επαλήθευση Μεθόδου



Διάγραμμα 3.6 Χιαστί επαλήθευση της μεθόδου

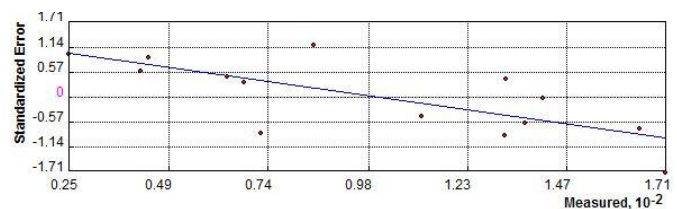
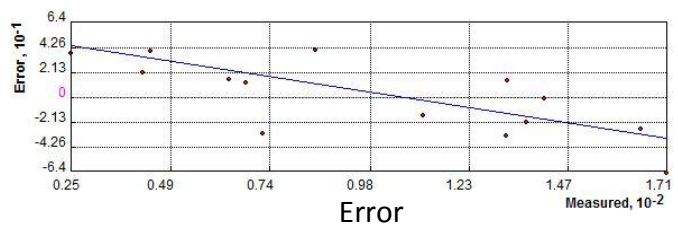
Η χιαστί επαλήθευση δείχνει τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των εκτιμώμενων και των παρατηρημένων τιμών στις θέσεις των βροχοσταθμών. Ο αλγόριθμος ακολούθησε ρουτίνα 1-1 αντικατάστασης των 14 τιμών και με κάθε μία εκτιμώμενη κάνει την πρόβλεψη για τα υπόλοιπα 13 σημεία.

Σε αυτό το βήμα υπολογίζονται τα σφάλματα και οι δείκτες αξιοπιστίας της μεθόδου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η μέθοδος είναι αξιόπιστη όταν το η μέση τιμή σφάλματος είναι κοντά στο μηδέν και το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα κοντά στο 1.

Prediction errors

Mean:	0.1027
Root-Mean-Square:	30.91
Average Standard Error:	36.8
Mean Standardized:	0.001654
Root-Mean-Square Standardized:	0.8298

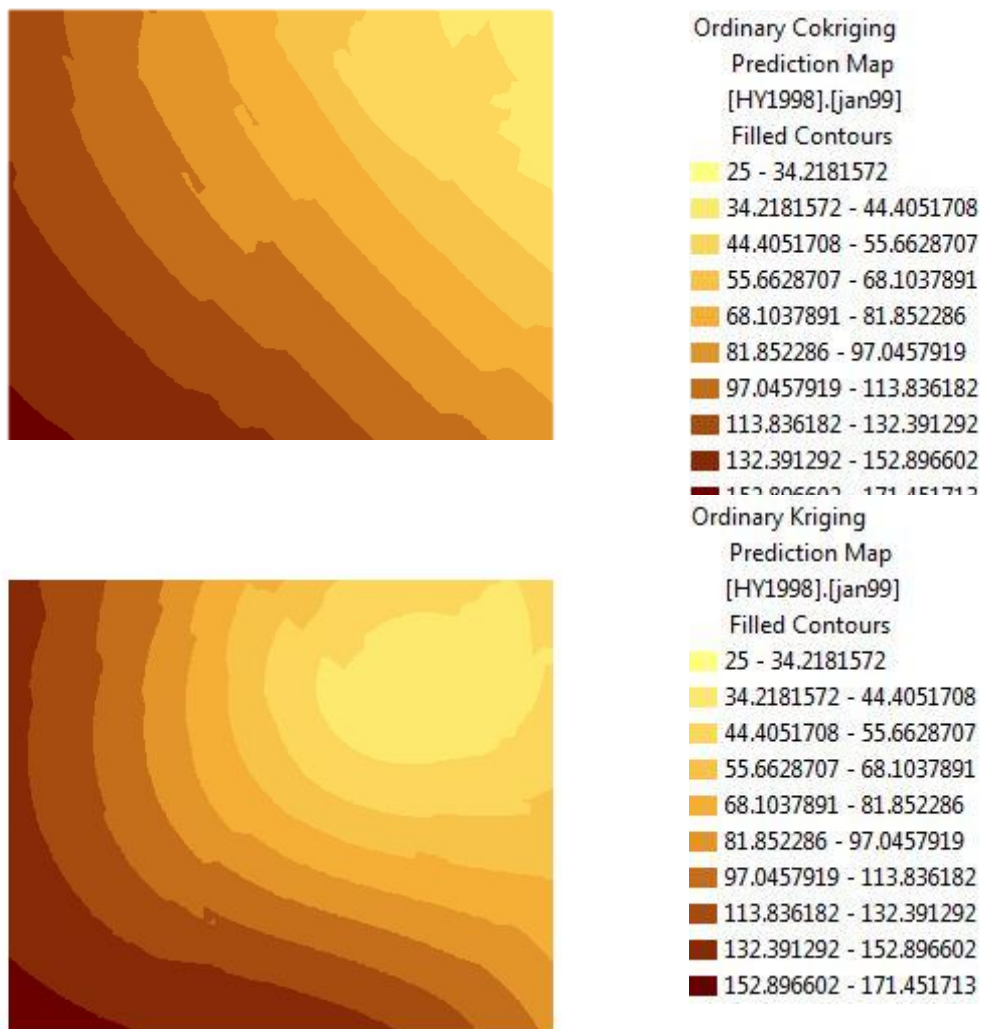
Samples: 14 of 14



Σχήμα 3.6 Συγκεντρωτικά σφάλματα πρόβλεψης

Βήμα 4^ο: Εξαγωγή τυχαίου πεδίου Kriging και Co Kriging

Τα πεδία εξάγονται και από τις δύο μεθόδους και τα χαρακτηριστικά τους τυπώνονται. Παρατηρείται ότι η αξιοπιστία της πρόβλεψης της μεθόδου Co Kriging είναι υψηλότερη, ακόμη και στο συγκεκριμένο παράδειγμα που θεωρητικά τα δεδομένα παρουσιάζουν κανονικότητα (η μεση τιμή και ο διάμεσος ταυτίζονται και η ασυμμετρία είναι πολύ κοντά στο μηδέν). Επομένως το όχι και τόσο πυκνό δίκτυο της περιοχής ορίζει επί της ουσίας ανεπαρκή μία χωρική συσχέτιση της βροχόπτωσης με τον εαυτό της και γι' αυτό επιδιώκεται να λάφθει υπόψη και τη χωρική συσχέτιση λόγω υψομέτρου. Τελικά στην παρούσα εργασία χρησιμοποιώ την παραλλαγή Co Kriging.

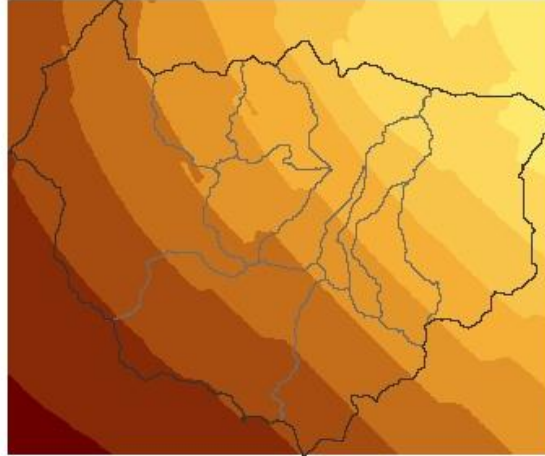


Σχήμα 3.7 Τυχαία πεδία Co Kriging (πάνω) και Kriging (κάτω)

Input datasets Dataset HY1998 Location C:\DDIPLOM Type Feature Class Data field jan99 Points 14 Dataset grid250x250 Location C:\DDIPLOM\ Type Raster Method Kriging Type Ordinary Output type Prediction Dataset # 1 Trend type None Searching neighborhood Standard Type Standard Neighbors to include 5 Include at least 2 Sector type Four and 45 degree Angle 0 Major semiaxis 113280.77909592241 Minor semiaxis 113280.77909592241 Dataset # 2 Trend type None	Searching neighborhood Standard Type Standard Neighbors to include 5 Include at least 2 Sector type Four and 45 degree Angle 0 Major semiaxis 113280.77909592241 Minor semiaxis 113280.77909592241 Variogram [Semivariogram; Semivariogram] Number of lags 12 Lag size 9979.2 Nugget [961.5792851684773; 125217.4103318963] Measurement error [0; 0] Model type J-Bessel Parameter 0.01 Range 113280.77909592241 Anisotropy No Partial sill [2519.816916192069; 9268.960092781657; 9268.960092781657; 209085.32050232048]	Input datasets Dataset HY1998 Location C:\DDIPLOM Type Feature Class Data field jan99 Points 14 Method Kriging Type Ordinary Output type Prediction Dataset # 1 Trend type None Searching neighborhood Standard Type Standard Neighbors to include 5 Include at least 2 Sector type Four and 45 degree Angle 0 Major semiaxis 62389.006044625654 Minor semiaxis 62389.006044625654 Variogram Semivariogram Number of lags 12 Lag size 5496.1 Nugget 451.0063370826835 Measurement error 0 Model type J-Bessel Parameter 1.4887902416124514 Range 62389.006044625654 Anisotropy No	Partial sill 2362.8435305646613
---	--	--	------------------------------------

Σχήμα 3.8 Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των 2 μεθόδων Co Kriging (αριστερά) και Kriging (δεξιά)

Βήμα 5^ο: Εύρεση μέσης μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη
 Αφού μετατρέψω το τυχαίο πεδίο σε δομή raster κάνω κατάλληλους υπολογισμούς με τις υπολεκάνες που βρίσκονται επίσης σε δομή raster



Σχήμα 3.8 Co Kriging και περιοχή ελέγχου

ΚΩΔΙΚΟΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ	Μέσο υψόμετρο υπολεκάνης (m)	Μέση μηνιαία τιμή βροχόπτωσης- Jan99
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W120	701	90.17
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W130	387	69.98
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W140	401	70.40
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W150	332	85.82
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W160	429	77.97
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W170	385	90.50
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W180	873	113.39
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W190	838	81.31
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W200	408	57.93
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W210	996	119.12
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W220	1208	108.08

4. Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης

4.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των μοντέλων βροχής-απορροής τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε σε μία πιο ουσιαστική χρήση χρονοσειρών που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν μονάχα για στατιστική επεξεργασία, τόσο βροχόπτωσης όσο και απορροής. Η όλο και πιο γενικευμένη χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης σταδιακά άμβλυνε προβλήματα που ανέκυπταν με τη χρήση των προγενέστερων μοντέλων απορροής λόγω ελλείψεων στις καταγραφές. Και αυτό γιατί σχεδόν πάντα τα δεδομένα βροχόπτωσης έχουν καλύτερη χωρική κατανομή και αντιστοιχούν σε μεγαλύτερου μήκους χρονοσειρές (Andreassian et al., 2001). Ένα τέτοιο υδρολογικό μοντέλο μπορεί και περιγράφει τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μία πεπερασμένη χωρική ενότητα όπως αυτήν της λεκάνης απορροής (Ευστρατιάδης,, 2009).

Η διαχείριση των υδατικών πόρων, των πλημμύρων καθώς και των κλιματικών αλλαγών, αποτελούν ζητήματα που όλο και περισσότερο διεθνώς προσεγγίζονται με υδρολογικά μοντέλα συνεχούς χρόνου (continuous-time) και όχι με μοντέλα περιγραφής μεμονωμένων γεγονότων (event-type models). Και αυτό επειδή η παρουσίαση του πρόσφατου ιστορικού της λεκάνης απορροής μπορεί να έχει θετική επίδραση στην ακρίβεια των υδρολογικών μεταβλητών εξόδου του μοντέλου (Blazkova, 2002). Τέλος τα μοντέλα αυτά συνήθως, ως προς τη μαθηματική τους δομή είναι εννοιολογικά (conceptual models). Έτσι χαρακτηρίζονται όσα μοντέλα διατυπώνουν παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που έχει οριστεί (π.χ. υπολεκάνη).

Οι παράμετροι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Βασικό πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων διεργασιών με έντονη χωρική ομοιογένεια μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων (Ευστρατιάδης, 2009).

Η μελέτη της αβεβαιότητας των υδρολογικών μοντέλων, λόγω της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης, καθώς και η διερεύνηση του αντίκτυπου που έχει η είσοδος επισφαλών δεδομένων βροχόπτωσης σε αυτά, προϋποθέτει την χρήση ενός υδρολογικού μοντέλου με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Έτσι στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης γίνεται η χρήση του μοντέλου HYDROGEIOS, που υιοθετεί συνεχή χρονική κλίμακα και εννοιολογική μαθηματική δομή, και αποτελεί άρθρωμα του συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας MAP WINDOW και υιοθετείται μηνιαία χρονική διακρίσιμότητα.

4.2 Το μοντέλο HYDROGΕΙΟΣ

Το μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης HYDROGΕΙΟΣ , όπως και κάθε παραμετρικό μοντέλο, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη-γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής:

$$y' = h(s_0, x, \theta)$$

Όπου s_0 οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού κλπ), x οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς φορτίσεις (δυναμική ΕΤ, βροχόπτωση κλπ), θ τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος και y' οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του μοντέλου (απορροή, πραγματική ΕΤ, εκφόρτιση υπόγειων νερών κλπ). Όλες οι μεταβλητές μεταβάλλονται στο χρόνο, δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών για χρονικό ορίζοντα T , και αναπαριστούν διεργασίες σε συγκεκριμένη θέση ή περιοχή της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφονται από το διάνυσμα $\vec{\theta}$ αποτυπώνουν τις ιδιότητες του φυσικού συστήματος που είναι γνωστές είτε από μετρήσεις πεδίου είτε εκτιμώνται έμμεσα έτσι ώστε να αποτυπώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα και πιο αξιόπιστα την παρατηρημένη συμπεριφορά του συστήματος (παράμετροι).

4.2.1 Πεδίο εφαρμογής

Ως προς το πεδίο εφαρμογής σε όλα τα υδρολογικά μοντέλα είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Ο λόγος για τον οποίο επιβάλλεται η ανάπτυξη ξεχωριστών πεδίων για κάθε μοντέλο είναι οι διαφορετικές πρακτικές διαχείρισής τους και η διαφορετική χωροχρονική κλίμακα εξέλιξης των σχετικών φυσικών διεργασιών. Οι ολιστική θεώρηση των φυσικών διεργασιών και των επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης των υδατικών πόρων πλέον επιτάσσει τη συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών με αποτέλεσμα το δύο πλέον μοντέλα να αποτελούν συνιστώσες του ίδιου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων.

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσομοίωσης το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διαδικασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, που εκτιμά τις ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις υδροσυστήματος λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης τω υδατικών πόρων (Ευστρατιάδης, 2009).

4.2.2 Χωρική κλίμακα

Η χωρική διακριτότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων αφού με βάση αυτή ολοκληρώνονται οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου καθώς και οι παράμετροι που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος έτσι ώστε να μετατραπούν οι σημειακές διεργασίες σε επιφανειακές. Η κατάταξη των υδρολογικών μοντέλων με βάση την χωρική κλίμακα καταλήγει σε τέσσερις κατηγορίες μοντέλων: τα αδιαμέριστα (lumped), τα ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped), τα ημικατανεμημένα (semi-distributed) και τα κατανεμημένα (distributed) (Ajami et al., 2004).

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ ανταποκρίνεται στην ημι-κατανεμημένη χωρική διακριτότητα. Οι λεκάνες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία χωρίζονται σε διακριτές περιοχές που αντιστοιχούν σε φυσικές υπολεκάνες είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

Υπολογιστικά αυτό αποτυπώνεται με τον εξής τρόπο: αρχικά, εκτιμάται το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) μιας λεκάνης απορροής. Οι κόμβοι τοποθετούνται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (στις συμβολές των κλάδων ή σε άλλα σημεία ελέγχου) και σε χαρακτηριστικές θέσεις της λεκάνης. Όσον αφορά στο πεδίο της υπόγειας ροής, εκεί ακολουθείται μία πολυκυτταρική χάραξη καθώς δημιουργείται ένα εννοιολογικό δίκτυο διασυνδεδεμένων δεξαμενών, η στάθμη των οποίων αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του αντίστοιχου τμήματος του υδροφορέα. Μετά το πέρας των παραπάνω υπολογισμών για κάθε χωρική ενότητα η αντίστοιχη απόκριση (δηλαδή η απορροή) μεταφέρεται στην έξοδο της λεκάνης. (Ευστρατιάδης, 2009).



Σχήμα 4.1 (α) Απεικόνιση του ημι-κατανεμημένου μοντέλου επιφανειακής ροής της περιοχής ελέγχου, (β) κόμβοι κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου στις συμβολές των κλάδων, όπως προέκυψαν στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Ως προς την μαθηματική δομή η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο. Τα εννοιολογικά μοντέλα διατυπώνουν, όχι τους μαθηματικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από τη σχηματοποίηση (π.χ. υπολεκάνη). Συγκεκριμένα, θεωρούν όγκους ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται χωρικά και χρονικά μεταβλητές κατάστασης καθώς και ροές συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται τα προβλήματα κλίμακας που εισάγουν τα μοντέλα φυσικής βάσης (αναπαράσταση υδρολογικών διεργασιών μικρής κλίμακας). Ειδικότερα τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα, όπως το μοντέλο της παρούσας μελέτης, αναφέρονται και ως μοντέλα εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μία υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

4.3 Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος

4.3.1 Κόμβοι - Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες

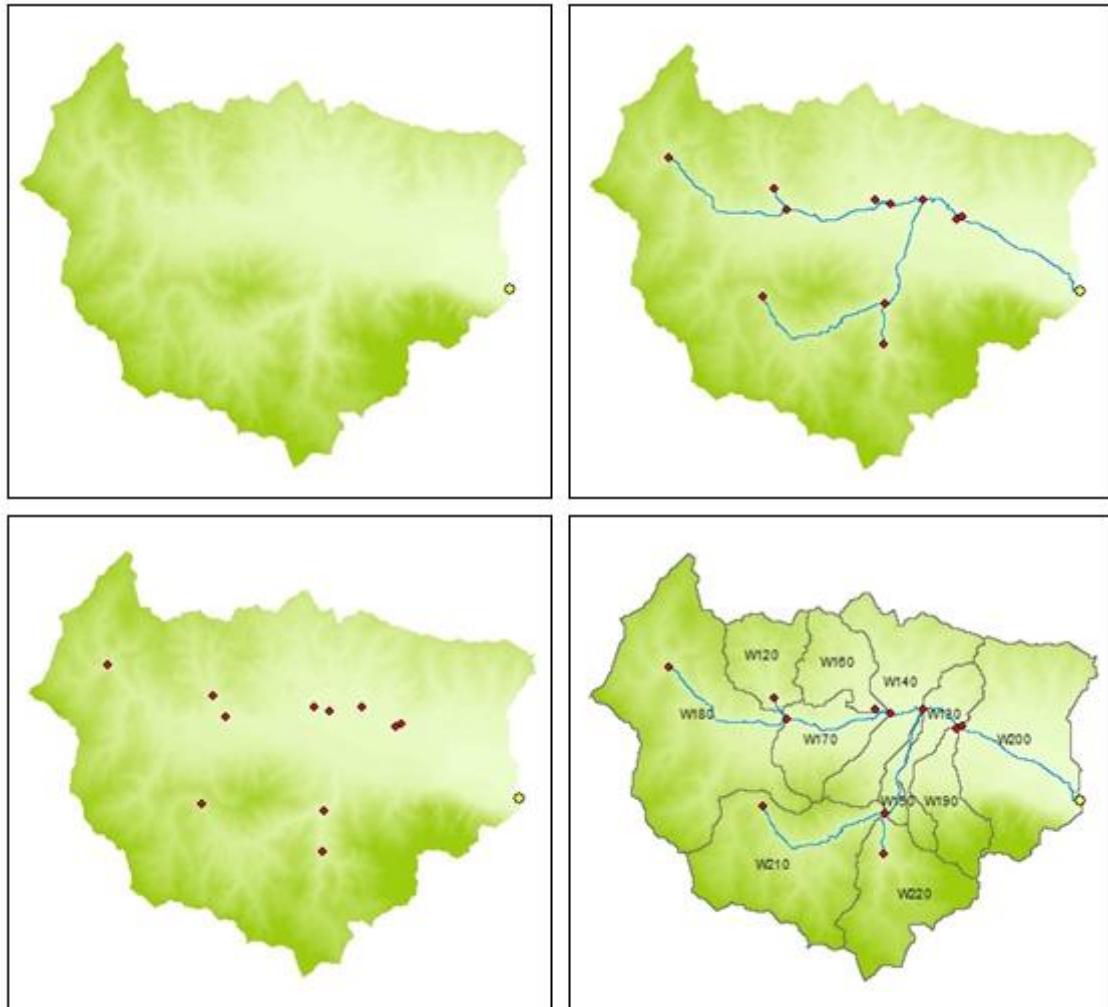
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αναφερόμαστε σε μία ημικατανεμημένη διακριτοποίηση της επιφάνειας περιοχής μελέτης. Αρχικά δίνονται τα όρια της περιοχής ελέγχου με τον ορισμό ενός και μοναδικού κόμβου εξόδου επί ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στο κόμβο εξόδου θεωρείται ότι συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής. Με αυτά ως πρωτογενή δεδομένα γίνεται και η σχηματοποίηση του επιφανειακού δικτύου δηλαδή (1) οι κόμβοι του δικτύου, (2) οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου (υδατορεύματα), (3) οι υπολεκάνες.

Ως προς τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, αυτοί δημιουργούνται στην έξοδο της λεκάνης καθώς και στις θέσεις συμβολής των κλάδων αυτόματα. Δύο επιπλέον κόμβοι τοποθετήθηκαν επιπλέον στις θέσεις μέτρησης παροχής δηλαδή στις γέφυρες Καστριού και Κομποτάδων.

Ως προς το υδρογραφικό δίκτυο, αυτό είναι δενδροειδούς τύπου και καταλήγει αναγκαστικά στον κόμβο εξόδου της λεκάνης ελέγχου. Η τοπολογία του δικτύου ορίζεται πλήρως από τον ανάντη και κατάντη κόμβο κάθε υδατορεύματος. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε κλάδου που υπολογίζονται αυτόματα είναι το μήκος του L καθώς και ο συντελεστής διήθησης δ .

Ως προς τον επιμερισμό της λεκάνης ελέγχου, ο υδροκρίτης κάθε υπολεκάνης χαράσσεται ανάντη ενός κόμβου με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε κλάδος του υδατορεύματος να αντιστοιχεί σε μία υπολεκάνη.

Στον κόμβο αυτόν θεωρείται ότι συγκεντρώνεται ακαριαία όλη η απορροή μέσω μικρών χειμάρρων που καταλήγουν σε αυτόν χωρίς να σχηματίζουν κάποιο εμφανές κύριο υδατόρευμα.



Σχήμα 4.2 Επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στη σχηματοποίηση του επιφανειακού συστήματος για την περιοχή ελέγχου : Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, DEM (πάνω αριστερά), κόμβοι υδρογραφικού δικτύου (κάτω αριστερά), κλάδοι δικτύου (πάνω δεξιά), υπολεκάνες (κάτω δεξιά).

Τα δεδομένα εισόδου κάθε υπολεκάνης είναι οι χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου είναι η πραγματική εξατμοδιαπνοή, η κατείδυση προς την κορεσμένη ζώνη και η επιφανειακή απορροή.

Η συνολική απορροή κάθε υπολεκάνης προκύπτει από την πρόσθεση της επιφανειακής που προκύπτει από την προσομοίωση, με την εκφόρτιση όλων των πηγών που ανήκουν στην υπολεκάνη αυτή (βασική ή υπόγεια ροή), δύο μεγέθη που θεωρείται ότι μεταφέρονται απ' ευθείας στον κατάντη κόμβο της λεκάνης και από εκεί στο υδρογραφικό δίκτυο ως σημειακή φόρτιση



Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση συστήματος επιφανειακής ροής για τυχαία υπολεκάνη της περιοχής ελέγχου με βάση το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

4.3.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης, Hydrological Response Unit (HRU)

Η αναγκαιότητα ύπαρξης μοντέλων που να αποτυπώνουν με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια την πολυπλοκότητα και την ετερογένεια των χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής αλλά και των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν και ελέγχουν την απόκρισή της, οδήγησε στην όλο και πιο εκτεταμένη χρήση κατανεμημένων ή ακόμα και μοντέλων φυσικής βάσης.

Οι παράγοντες ελέγχου των υδρολογικών δυναμικών και ροών που αναπτύσσονται μέσα σε μία λεκάνη απορροής, μπορούν να διακριθούν σε φυσικούς και ανθρωπογενείς. Οι αλληλεξαρτήσεις των διάφορων παραγόντων είναι σύνθετες και πολύπλοκες. Παρόλα αυτά μπορούν να ομαδοποιηθούν, αποτελώντας έτσι αλληλένδετα υποσυστήματα που καταδεικνύουν τόσο τις υδρολογικές δυναμικές που αναπτύσσονται όσο και τις ροές. Μάλιστα οι μεταφορές μεταξύ των υποσυστημάτων ενός ευρύτερου συστήματος είναι κορυφαίας σημασίας ζήτημα στην υπολογιστική διαδικασία ενός μοντέλου τόσο μικροσκοπικά όσο και μακροσκοπικά.

Με την είσοδο της έννοιας των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (MYA) στα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα, εμπνευστής της οποίας ήταν ο Wolfgang Albert Flügel (1995), επιχειρήθηκε

για πρώτη φορά να προσομοιωθεί αυτή η σχέση μεταξύ των διαφορετικών τύπο συστημάτων. Η ΜΥΑ εδώ αντιστοιχούν σε συμπαγείς χωρικές ενότητες με κοινή κατανομημένη ετερογένεια ως προς το κλίμα, την εδαφική κάλυψη και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Και αφού υφίσταται κατανομημένη σχηματοποίηση, συνεπάγεται και μία μονάδα ανά κυψέλη του καννάβου, άρα πολύ μεγάλο αριθμό ιδιοτήτων.

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ οι μονάδες υδρολογικής αποκρίσεις είναι διαφοροποιημένες αφού υποδηλώνουν τύπους εδάφους και υπεδάφους με κοινά γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, οι οποίοι παράγονται από την ένωση (union) σχετικών γεωγραφικών επιπέδων (επίπεδα, από τον αγγλικό όρο layers). Έτσι η βασική διαφορά που προκύπτει είναι ότι πλέον δεν αναφερόμαστε σε αυστηρά οριοθετημένες συμπαγείς γεωγραφικές ενότητες αλλά για ένα σύνολο από ανεξάρτητα χωρία, τυχαίας γεωμετρίας που εκτείνονται ακανόνιστα σε όλη τη λεκάνη.

Σε κάθε ΜΥΑ ο μηχανισμός των υδρολογικών διεργασιών θεωρείται ενιαίος, οπότε και θεωρούνται κοινές παράμετροι σε όλη την έκταση που καλύπτει η συγκεκριμένη λεκάνη ελέγχου.



Σχήμα 4.4 Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης

κουτιού» (black box). Έτσι οι παράμετροι σχετίζονται έστω και εννοιολογικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φυσικού συστήματος που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες. Προφανές είναι, ότι ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου είναι ευθέως ανάλογος του αριθμού των ΜΥΑ .

Στην παρούσα διερεύνηση είναι διαθέσιμα δύο θεματικά επίπεδα με τη βοήθεια του Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας, ένα για την υδρογεωλογία με τρεις κλάσεις και ένα για την εδαφική κάλυψη της περιοχής ελέγχου με δύο κλάσεις (Σχήμα 2.4, Σχήμα 2.5), άρα 2x3 συνδυασμοί χαρακτηριστικών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, στα πλαίσια της παραμετροποίησης του επιφανειακού συστήματος, προκύπτουν έξι ΜΥΑ.

Τελευταίο στάδιο της σχηματοποίησης είναι η διαμέριση των υπολεκανών (subbasin partition). Η διαδικασία αυτή αναφέρεται στην ένωση των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης με τις υπολεκάνες. Το στοιχείο που προκύπτει δέχεται κοινές φορτίσεις (βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή) και η δυναμική του περιγράφεται από κοινές παραμέτρους. Ο μέγιστος αναμενόμενος αριθμός ενώσεων (unions) είναι 11x6 αφού έχω 11 υπολεκάνες και 6 ΜΥΑ. Από την υφιστάμενη διαμέριση των υπολεκανών προέκυψαν 45 από τις 66 ενώσεις (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Ενώσεις (unions) υπολεκανών-ΜΥΑ

Σημειώνεται ότι μπορεί να οριστεί και ύψος νερού (mm) στην αρχή της προσομοίωσης που να αποτελεί την αρχική συνθήκη του μοντέλου του επιφανειακού συστήματος. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης μελέτης κάτι τέτοιο δεν έχει νόημα, γι' αυτό και δεν ορίζεται.

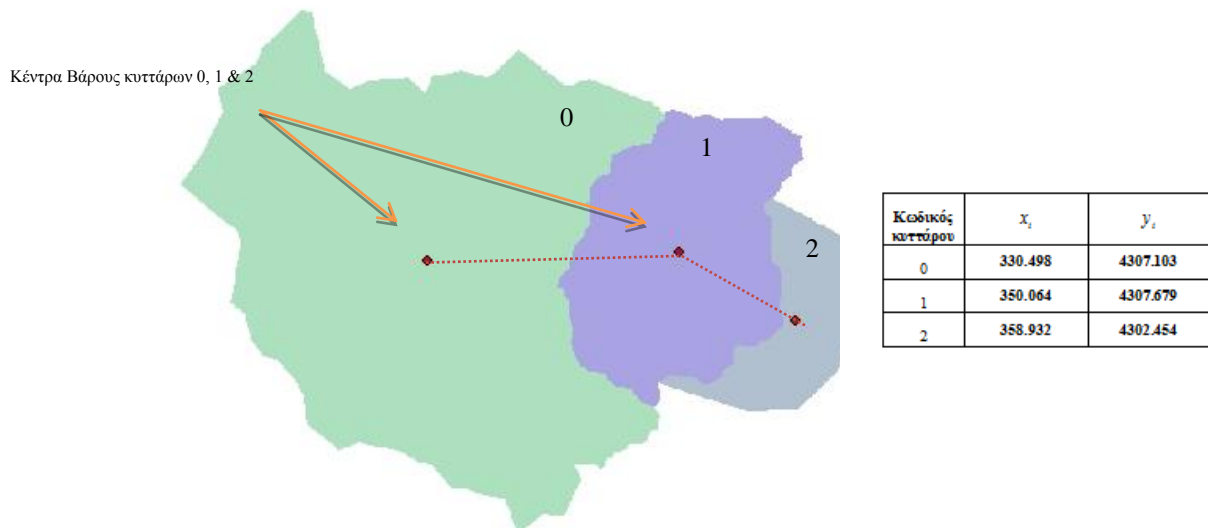
4.4 Σχηματοποίηση υπόγειου συστήματος

4.4.1 Κύτταρα υπόγειου συστήματος

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ επιχειρεί να αποδώσει μακροσκοπικά, την κύρια διαδικασία του υπόγειου συστήματος χωρίς χωρική κατανομή. Λόγω του γεγονότος ότι στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης υπάρχει έλλειψη χωρικά κατανεμημένων μετρήσεων του πεδίου, η υιοθέτηση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αφητηριακά, λόγω της εννοιολογικής του φύσης, κρίνεται επαρκής. Η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής γίνεται με τη διαμόρφωση ενός συστήματος πολυγωνικών κυττάρων. Δύο από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του πολυκυτταρικού μοντέλου είναι (1) η άμεση αναπαράσταση της εξίσωσης του ισοζυγίου και (2) η ευελιξία του καννάβου τους που επιτρέπει τη διακριτοποίηση με περιορισμένο αριθμό κυττάρων, πεδίων ροής με ακανόνιστες γεωμετρίες.

Τα πολυκυτταρικά μοντέλα επιχειρείται να είναι ισοδύναμα με τη θεωρία των πεπερασμένων όγκων (finite volume) με απλοποιημένη επιφανειακή ολοκλήρωση, έτσι ώστε να παρέχεται υπολογιστική ταχύτητα και ακρίβεια. Έτσι η χάραξη θα πρέπει να ακολουθεί την πιεζομετρία του πεδίου ροής, δηλαδή: (1) η χάραξη των κυττάρων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακμές τους να είναι παράλληλες προς τις ισοδυναμικές γραμμές, και (2) τα κέντρα βάρη των γειτονικών κυττάρων να ορίζουν ευθεία κάθετη στην κοινή ακμή (Rozos & Koutsoyiannis, 2005).

Η πρώτη συνθήκη δεν μπορεί να ικανοποιηθεί λόγω έλλειψης πιεζομετρικών πληροφοριών για τον υδροφορέα και συνεπώς η χάραξη δεν μπορεί να γίνει βάσει της συγκεκριμένης εννοιολογικής προσέγγισης. Επιλέγεται να γίνει ακολουθώντας τα όρια των υπολεκανών που προέκυψαν από τη σχηματοποίηση του επιφανειακού μοντέλου καθώς και τα γεωγραφικά όρια της περιοχής ελέγχου. Για αυτήν την αδρομερή χάραξη, άλλο ένα στοιχείο που ελήφθη υπόψη ήταν και το γεγονός ότι, παρατηρημένες απορροές που θα μπορούσαν να επαληθεύσουν το μοντέλο, υπήρχαν στο Καστρί και τους Κομποτάδες. Έτσι επιλέχθηκε να χαραχθούν μονάχα δύο κύτταρα με κοινή ακμή διερχόμενη από το Καστρί και εφαπτόμενη στις οριογραμμές των υποκείμενων λεκανών. Κατάντη των Κομποτάδων σχηματοποιείται ακόμα ένα κύτταρο, το οποίο είναι εικονικό (dummy cell), για την συγκέντρωση των υπόγειων διαφυγών όλης της περιοχής ελέγχου.



Σχήμα 4.6 Χωρική διακριτοποίηση υπόγειου υδροφορέα. Κύτταρα 1, 2 & 3

η

«μαύρου κουτιού» (black box) αφού οι παράμετροι που προκύπτουν για το υπόγειο σύστημα δεν σχετίζονται εννοιολογικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φυσικού συστήματος που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες. Αυτή η αποσύνδεση των μοντέλου από τις πραγματικές φυσικές διεργασίες δεν συνεισφέρει στην κατανόηση των μηχανισμών του συστήματος πράγμα απαραίτητο στις περιπτώσεις ανάπτυξης συνδυασμένων μοντέλων και έτσι κάτι τέτοιο στην συγκεκριμένη διερεύνηση - αν και δόκιμο - δεν επιχειρήθηκε. Το γεγονός αυτό, δημιούργησε δυσκολίες στην διαδικασία της προσομοίωσης του μοντέλου ως προς τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου που προέκυπταν και εμφάνιζαν ιδιαίτερος μεγάλη υπόγεια ροή σε σχέση με την επιφανειακή. Το συγκεκριμένο ζήτημα κρίνεται δευτερεύον για τον σκοπό της παρούσας μελέτης όπου μας ενδιαφέρει κατά βάση η επαλήθευση και η βαθμονόμηση του μοντέλου.

4.4.2 Πηγές

Οι πηγές δίνονται από τον χρήστη ως σημειακό επίπεδο πληροφορίας και αποτελούν τη επιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού και του υπόγειου συστήματος. Κάθε πηγή συνδέεται με το πλησιέστερο κύτταρο. Η πηγή - που είναι και αυτή ένα εικονικό κύτταρο - ως σύστημα επιφανειακών εκφορτίσεων εισάγεται στο σύστημα με γνωστό πιεζομετρικό υψόμετρο ταυτιζόμενο με το μέσω υψόμετρο του συστήματος, γι' αυτό και κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή τους στην συγκεκριμένη προσομοίωση όπου και δεν έχω καθόλου πιεζομετρικά στοιχεία και άρα στοιχεία για τον υδροφορέα μου.

Οι πηγές που επιλέγεται να τοποθετηθούν είναι δύο στον αριθμό, η μία ανάντη της γέφυρας στο καστρί και η άλλη ανάντη της γέφυρας των Κομποτάδων. Πλέον οι παροχές όλων των πηγών μεταφέρονται απ' ευθείας στον κατάντη κόμβο και προστίθενται στην επιφανειακή απορροή (Σχήμα 4.7)

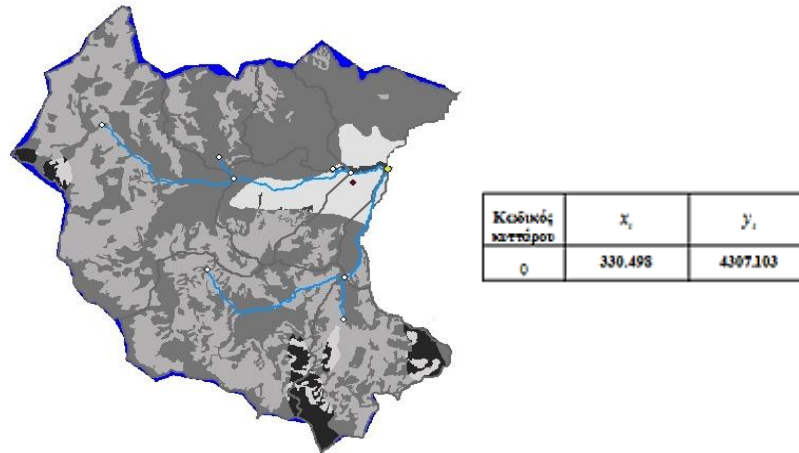


Σχήμα 4.7 Θέση πηγών σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής ελέγχου

Τα σημεία τοποθέτησης κάθε άλλο παρά τυχαία είναι καθώς επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιωθεί η εννοιολογική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων του υπογείου με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος και να αμβλυνθεί έτσι το πρόβλημα που έχει ανακύψει λόγω της αδρομερούς χάραξης του υπόγειου συστήματος. Αυτό γιατί πλησίον των επιλεγμένων θέσεων διατίθενται δείγματα παροχής και μπορώ να τις χρησιμοποιήσω σαν χρονοσειρές ελέγχου στη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Τέλος, ας σημειωθεί ότι ως προς την τοπολογία του, το υπόγειο δίκτυο χαρακτηρίζεται πλήρως από τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους των κυττάρων, το μέσο μήκος που διανύει η ροή μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων (κεντροβαρική απόσταση) και το μήκος της κοινής τους ακμής (Σχήμα 4.7).

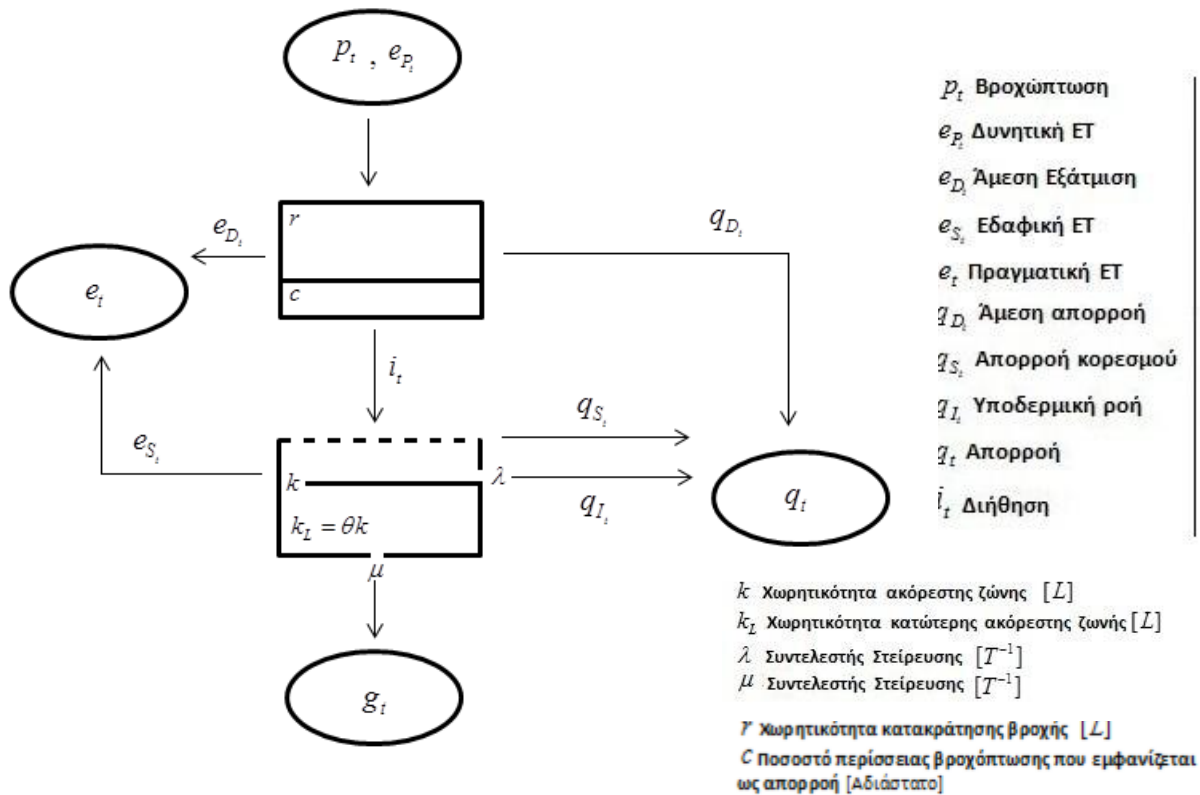
Στο μοντέλο της υπόγεια υδρολογίας οι μεταβλητές εισόδου, λόγω της φυσικής τροφοδοσίας του υδροφορέα από τη βροχόπτωση που είναι και το ζητούμενο στην παρούσα μελέτη, είναι δύο: (1) η κατανεμημένη κατείσδυση της εδαφικής υγρασίας και (2) η γραμμική διήθηση κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου. Η μεν κατείσδυση του κάθε κυττάρου δίνεται με την ένωση κυττάρου υδροφορέα-υπολεκανών-μονάδων υδρολογικής απόκρισης. Η δε διήθηση που δέχεται κάθε κύτταρο προκύπτει με βάση την τομή κυττάρου-υδατορευμάτων.



Σχήμα 4.8 Σχήμα 4.8 Παράδειγμα ένωσης κυττάρου 0, με 8 υδρολογικές ενότητες και 5 μονάδων υδρολογικής απόκριση

4.5.1 Δομή μοντέλου επιφανειακού συστήματος

Η παραμετρική-εννοιολογική δομή του μοντέλου που περιγράφει τις υδρολογικές διεργασίες ενός εδαφικού στοιχείου μοναδιαίας επιφάνειας, προϋποθέτει ένα υδραυλικό ανάλογο δύο διασυνδεδεμένων δεξαμενών. Η ανώτερη περιγράφει τις διαδικασίες πάνω στην επιφάνεια του εδάφους ενώ η κάτω είναι η δεξαμενή συγκέντρωσης υγρασίας (Σχήμα 4.9)



Σχήμα 4.9 Σχήμα 4.9 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου επιφανειακού υδατικού ισοζυγίου[†]

- Η ανώτερη δεξαμενή χωρητικότητας r , αναπαριστά τις διεργασίες πάνω στην επιφάνεια του εδάφους: (1) την κατακράτηση της βροχής, (2) την επιφανειακή εξάτμιση, (3) τη διήθηση που τροφοδοτεί το υπέδαφος (ακόρεστη ζώνη), σε μηνιαία χρονική κλίμακα.
- Η δεξαμενή συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας, χωρητικότητας k , παρέχει τη δυνατότητα (1) εκροής προς το έδαφος λόγω υπερχειλίσης, (2) πλευρικής εκροής διαμέσου του υπεδάφους από οπή που βρίσκεται στο όριο ανώτερης και κατώτερης ζώνης και (3) κατακόρυφης εκροής μέσω οπής του πυθμένα. Χωρίζεται σε δύο περιοχές το όριο των οποίων είναι το k_L η οποία αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος του ριζοστρώματος και οριοθετεί τη διαφοροποίηση του μηχανισμού εξατμοδιαπνοής.
- Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω των συντελεστών στείρευσης λ, μ αντίστοιχα.
- Οι ροές που σημειώνονται με τα βέλη αναπαριστούν: (1) την εδαφική εξατμοδιαπνοή, (2) την πλημμυρική απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, (3) την υποδερμική απορροή και (4) την κατείσδυση από την ακόρεστη ζώνη προς την κορεσμένη ζώνη και τον υδροφορέα (αποτελώντας έτσι ταυτόχρονα απόκριση για το επιφανειακό και φόρτιση για το υπόγειο μοντέλο).
- Ο t δείκτης αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[\tau, \tau + \Delta T]$, όπου ΔT το βήμα της προσομοίωσης, που εδώ είναι μηνιαίο.
- Ως προς τις φορτίσεις του μοντέλου, εκτός από την βροχόπτωση p_t και δυναμική εξατμοδιαπνοή e_p γνωστή θεωρείται και η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας, s_t , στην αρχή του χρονικού διαστήματος.
- Ως προς τις αποκρίσεις του μοντέλου, αυτές είναι η συνολική απορροή q_t , η πραγματική εξατμοδιαπνοή e_t και η κατείσδυση g_t .

$$q_t = q_{D_t} + q_{s_t} + q_{I_t} \quad (4.1)$$

$$e_t = e_{D_t} + e_{s_t} \quad (4.2)$$

[†] 1. Στην συγκεκριμένη μελέτη, εφόσον η προσομοίωση ξεκινά από την αρχή του υδρολογικού έτους, η αρχική τιμή μπορεί να θεωρηθεί και ίση με το μηδέν.

2. Οι μεταβλητές που εκφράζονται σε ισοδύναμα ύψη νερού θα συμβολίζονται με μικρό γράμμα, ενώ οι αντίστοιχοι όγκοι με κεφαλαίο.

Άμεση απορροή q_D : εκφράζει την ποσότητα της βροχής (μετά την αφαίρεση των απωλειών λόγω εξάτμισης) που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος, χωρίς να τροφοδοτεί την δεξαμενή.

Ροή λόγω κορεσμού q_s : συναντάται και με το όρο «ταχεία απορροή» και εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, και αναπαρίσταται ως υπερχείλιση της δεξαμενής.

Υποδερμική ροή q_t : εκφράζει την πλευρική αποστράγγιση της ακόρεστης ζώνης, η οποία πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση (εκροή από την πλευρική οπή).

Άμεση εξάτμιση e_D : εκφράζει τον ταχύ μετασχηματισμό μέρους της βροχής σε απώλειες λόγω εξάτμισης, από νερό που επιφανειακά κατακρατείται και δεν προλαβαίνει να διηθηθεί στο έδαφος. Εδαφική εξατμοδιαπνοή e_s : εκφράζει την ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητική ΕΤ μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη και κατώτερη εδαφική ζώνη.

- Με βάση αυτά μπορούμε να εκτιμήσουμε πλέον την εδαφική υγρασία στο πέρας του χρονικού διαστήματος s_{t+1} σύμφωνα με την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου που πλέον παίρνει την παραμετρική μορφή: $s_{t+1} = s_t + p_t - q_t - e_t - g_t$ όπου $s_0 = 0$ † (4.3)

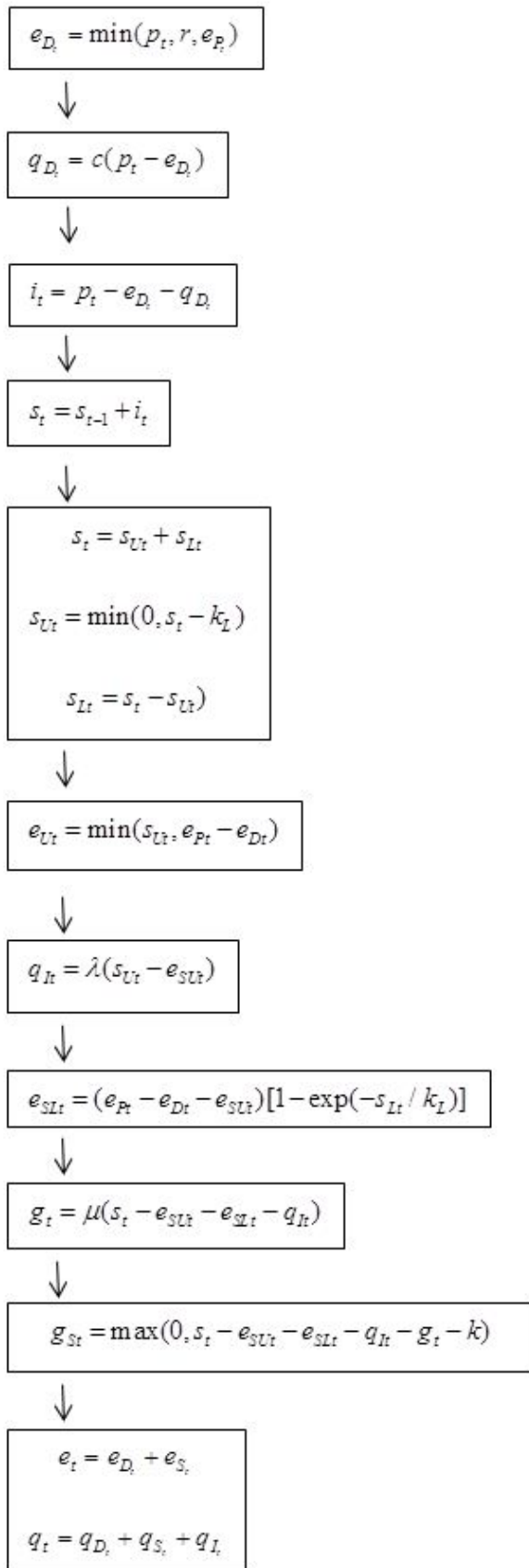
Το παραπάνω μοντέλο προσωμοίωσης εφαρμόζεται στο ελάχιστο χωρικό στοιχείο όπως έχει οριστεί, δηλαδή στην ένωση ΜΥΑ/υπολεκάνη. Αυτό γιατί οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου, p_i, e_{pi} μεταβάλλονται για κάθε υπολεκάνη i όπου $i = 1, 2, \dots, 11$ ενώ οι παράμετροι του μοντέλου μεταβάλλονται για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης j όπου $j = 1, 2, \dots, 6$. Έτσι τα μεγέθη που προκύπτουν ολοκληρώνονται χωρικά στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης, δηλαδή ο όγκος απορροής για κάθε υπολεκάνη, η πραγματική εξατμοδιαπνοή καθώς και η κατείσδυση έχουν ως εξής:

$$Q_i = \sum_{j=1}^6 q_{ij} F_{ij} \quad (4.4)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^6 e_{ij} F_{ij} \quad (4.5)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^6 g_{ij} F_{ij} \quad \text{με } F_{ij} \text{ η κοινή επιφάνεια τους} \quad (4.6)$$

Η υπολογιστική διαδικασία που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9, δίνεται παρακάτω



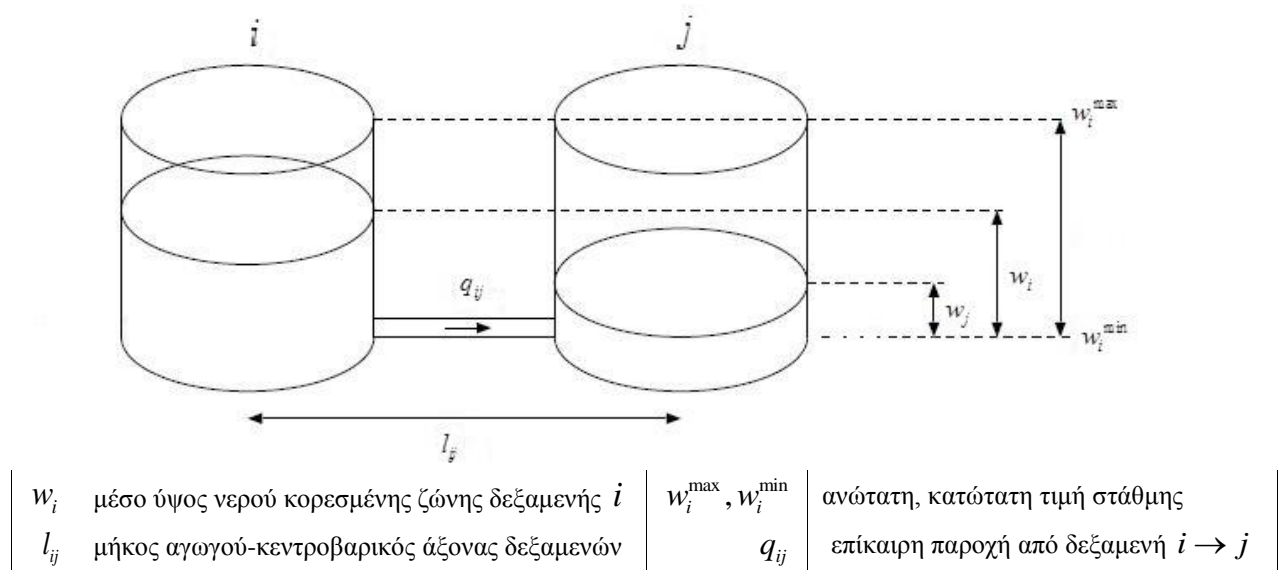
1. Η κατακράτηση δεν μπορεί να ξεπεράσει σε τιμή την παράμετρο r του μοντέλου.
2. Η άμεση απορροή εκφράζει το ποσοστό της περίσσειας βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός χρονικού βήματος χωρίς να τροφοδοτεί την ακόρεστη ζώνη. Το c είναι αδιάστατη παράμετρος και σχετίζεται με τη διαπερατότητα της εδαφικής επιφάνειας.
3. Με τον όρο διήθηση ουσιαστικά εννοούμε την τροφοδοσία της λεκάνης εδαφικής υγρασίας
4. Το τρέχον απόθεμα s_t ενδέχεται να υπερβαίνει το απόθεμα της δεξαμενής k . Η περίσσεια της εδαφικής υγρασίας πάνω από το όριο υπερχειλίσης αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το κορεσμένο έδαφος, οπότε και αφήνεται να λιμνάσει και ακολούθως να εξατμιστεί ή να κατεισδύσει (πιο ρεαλιστικές αποκρίσεις συνεπεί με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης)
5. Η εδαφική ΕΤ πραγματοποιείται κατά προτεραιότητα από την ανώτερη ζώνη οπότε και η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας της εν λόγω ζώνης μειώνεται κατά την ποσότητα $e_{S_{L_t}}$
6. Ποσοστό λ της περίσσειας υγρασίας της ανώτερης ζώνης διαφεύγει πλευρικά μέσω της οριζόντιας οπής και παράγει υποδερμική ροή q_{H_t} .
7. όταν το απόθεμα της ανώτερης ζώνης είναι μηδενικό ή δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση για την εξατμοδιαπνοή. Τότε μέρος του ελλείμματος που προκύπτει καλύπτεται από την υγρασία στην κατώτερη ζώνη $e_{S_{L_t}}$
8. εφόσον πραγματοποιηθεί υπερχειλίση το απόθεμα της υγρασίας στο πέρας του χρονικού βήματος είναι ίσο με τη χωρητικότητα τη δεξαμενής, k .

Σχήμα 4.10 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος

3.5.2 Δομή μοντέλου υπόγειου συστήματος

Το παραμετρικό μοντέλο του υπόγειου συστήματος περιγράφεται με εννοιολογικές δεξαμενές (που δέχονται τις δύο κατακόρυφες φορτίσεις των υπερκείμενων στρωμάτων), και με εικονικά στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί) που συνδέουν τις δεξαμενές μεταξύ τους. Η μεταβολή στη στάθμη απεικονίζει την πιεζομετρία στον υδροφορέα και η ροή πραγματοποιείται από τις δεξαμενές υψηλότερης σε δεξαμενές χαμηλότερης στάθμης.

Το υδραυλικό ανάλογο δύο γειτονικών, διασυνδεδεμένων με έναν εννοιολογικό αγωγό, δεξαμενών δίνεται στο σχήμα 3.10



Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση παραμετρικής δομής μοντέλου υπόγειου συστήματος μεταξύ γειτονικών δεξαμενών

- Η στάθμη του νερού w_i στη δεξαμενή αποτελεί μεταβλητή κατάστασης του συστήματος και αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος νερού στην περιοχή του κυττάρου.
- Σε συνθήκες φρεάτιου υδροφορέα η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ ανώτατης και κατώτατης στάθμης w_i^{\max}, w_i^{\min} . Όταν ξεπεραστεί η οροφή της δεξαμενής τότε ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος

[†] Στην τελική επιφανειακή απορροή Q_i προστίθεται και η εκροή των πηγών που προκύπτει από την επίλυση του υπόγειου μοντέλου, δηλαδή η βασική ροή Q_{bi} . Προφανώς για να γίνει αυτό προϋπόθεση είναι μία ακόμη επαναληπτική διαδικασία.

- Το υδραυλικό φορτίο της δεξαμενής i , h_i υπολογίζεται ως εξής:

$$h_i = \begin{cases} w_i^{\min} + w_i & w_i \leq w_i^{\max} \\ w_i^{\max} + (w_i - w_i^{\max})\theta & w_i > w_i^{\max} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου $\theta \gg 1$ ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης .
Αν $h_i > h_j$ τότε η ροή πραγματοποιείται από τη δεξαμενή $i \rightarrow j$.

- Μία αδιάστατη παράμετρος του μοντέλου είναι η τιμή της ειδικής απόδοσης S_{yi} , ενώ μία δεύτερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα K_i για την δεξαμενή i που έχει μονάδες ταχύτητας.
- Ο αποθηκευμένος όγκος της δεξαμενής i ,

$$V_i = w_i \cdot F_i, \quad \text{όπου } F_i \text{ το εμβαδόν βάσης της δεξαμενής} \quad (4.8)$$

$$F_i = S_{yi} A_i \quad \text{όπου } A_i \text{ το εμβαδόν του αντίστοιχου κυττάρου} \quad (4.9)$$

- Η ροή q_{ij} στον εννοιολογικό αγωγό χαρακτηρίζεται πλήρως από τρία μεγέθη, το μήκος του l_{ij} , το εμβαδόν της κορεσμένης διατομής a_{ij} και η υδραυλική του αγωγιμότητα k_{ij} .
- $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ δηλαδή η κεντροβαρική απόσταση των κυττάρων.
- Αν ο υδροφορέας είναι φρεάτιος και β_{ij} το μήκος της κοινής ακμής των δύο δεξαμενών (αν ισχύει η συνθήκη του αδιαπέρατου ορίου τότε η ακμή λαμβάνεται μηδενική, οπότε και δεν πραγματοποιείται ροή), τότε έχω

$$a_{ij} = \begin{cases} w_i \beta_{ij} & w_i \geq w_j^{\min} + w_j \\ (w_i^{\min} + w_i - w_j) \beta_{ij} & w_i < w_j^{\min} + w_j \end{cases} \quad (4.10)$$

Αν ο υδροφορέας είναι περιορισμένος τότε το εμβαδόν της διατομής δεν εξαρτάται από τη στάθμη αλλά από τη σχετική θέση των υψομέτρων του πυθμένα και οροφής των δύο δεξαμενών.

- Η υδραυλική αγωγιμότητα k_{ij} που εκφράζει τη μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό θεωρείται σταθερή και προκύπτει από τον συνδυασμό των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών i και j , K_i και K_j . Συγκεκριμένα εδώ χρησιμοποιείται ο αρμονικός μέσος τους επομένως:

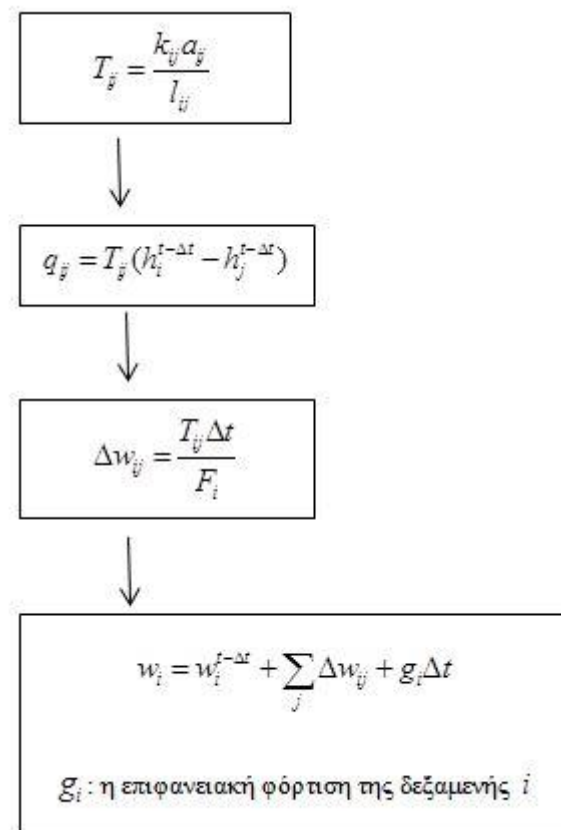
$$k_{ij} = \frac{2K_i K_j}{(K_i + K_j)} \quad (4.11)$$

- Η επίκαιρη παροχή q_{ij} μεταξύ δύο δεξαμεμών δίνεται από την εξίσωση Darcy σύμφωνα με τη

σχέση:
$$q_{ij} = k_{ij} a_{ij} \frac{h_i - h_j}{l_{ij}} \quad (4.12)$$

- Η επίλυση του μοντέλου των υπόγειων νερών γίνεται με χρονικό βήμα Δt το οποίο είναι μικρότερο από τη χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης, Δt , που αντιστοιχεί στην περίοδο φόρτισης. Το βήμα επιλέγεται με κριτήριο την επίτευξη της αριθμητικής ευστάθειας. Για κάθε, λοιπόν, περίοδο φόρτισης η επίλυση του δικτύου ροής γίνεται $N_\delta = \Delta \tau / \Delta t$. Στην παρούσα διερεύνηση $N_\delta = 30$.

- Στο ρητό σχήμα επίλυσης υπολογίζονται οι μεταβολές στάθμης εντός όλων των δεξαμεμών λόγω της ανταλλαγής νερού μεταξύ όλων των δεξαμεμών που επικοινωνούν μεταξύ τους, στο χρονικό βήμα Δt (δηλαδή η κίνηση του νερού που πραγματοποιείται στο υδραυλικό ανάλογο για χρόνο από $t - \Delta t$ έως t (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.12 Σχήμα Πορεία επίλυσης ρητού σχήματος σε κάθε χρονικό βήμα

Το παραπάνω μοντέλο προσομοίωσης εφαρμόζεται στο ελάχιστο χωρικό στοιχείο όπως έχει οριστεί με τις ενώσεις και τομές των κυττάρων με την επιφανειακή διαμέριση. Οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου, δηλαδή η κατανεμιωμένη κατείδυση και η γραμμική διήθηση κάθε

κυττάρου, g_k, δ_k μεταβάλλονται για κάθε συνδυασμό υπολεκάνης i όπου $i=1,2,\dots,11$, με μονάδα υδρολογικής απόκρισης j όπου $j=1,2,\dots,6$, ενώ οι παράμετροι του υπόγειου μοντέλου μεταβάλλονται για κάθε κύτταρο. Έτσι τα μεγέθη που προκύπτουν ολοκληρώνονται χωρικά στην επιφάνεια των κυττάρων, με F_k η έκταση του κυττάρου k .

$$g_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^6 q_{ij} F_{ijk} \quad (4.13)$$

$$\delta_k = \frac{1}{F_k} \sum_{t=1}^n \Delta_t L_{tk} / L_t \quad (4.14)$$

όπου F_{ijk} η κοινή επιφάνεια τους (τομή) και L_{tl} το μήκος του κλάδου t που αναπτύσσεται στο κύτταρο k , n το πλήθος των κλάδων και Δ_t ο όγκος των απωλειών κατά μήκος του κλάδου t .

5. Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου

5.1 Θεωρητική διερεύνηση

Με τον όρο βαθμονόμηση (calibration) υποδηλώνεται εκείνη η συστηματική διαδικασία εκτίμησης των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου, με τέτοιο τρόπο ώστε οι έξοδοι (outputs) ή αποκρίσεις (οι προσομοιωμένες τιμές) του μοντέλου, ως προς ένα σύνολο παρατηρημένων εισόδων (inputs) να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο ένα αντίστοιχο σύνολο παρατηρημένων (δηλαδή πραγματικών) αποκρίσεων του φυσικού ή μαθηματικού συστήματος που αναπαριστά το μοντέλο.

Οι παράμετροι των εξισώσεων που περιγράφουν «εσωτερικές» διεργασίες του συστήματος δεν είναι γνωστές οπότε αυτό που ζητείται δεν είναι η βελτιστοποίηση της απόκρισης ως προς ένα εξωτερικό κριτήριο αλλά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής έτσι ώστε η προσομοιωμένη να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη (Ευστρατιάδης, 2009). Γι' αυτό και η εκτίμηση παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων, σε αντίθεση με το ευθύ πρόβλημα της βελτιστοποίησης είναι γνωστή και ως αντίστροφο πρόβλημα (inverse problem).

Η χρησιμότητα του αντίστροφου προβλήματος είναι μεγάλη. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα αφορά στην ανάλυση της δομής του λεγόμενου εννοιολογικού μοντέλου, τις οριακές συνθήκες, την υπόγεια ροή αλλά και τις διαδικασίες μεταφοράς ρύπων (Abbaspour et al., 2004).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί το εν λόγω ζήτημα της βαθμονόμησης, κακώς θεωρείται ότι αφορά αποκλειστικά τα εννοιολογικά σχήματα και αποδεικνύεται ότι είναι κοινό για όλες τις κατηγορίες μοντέλων καθώς σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων στις παρατηρήσεις του παρελθόντος. Από την μία στα μοντέλα της φυσικής βάσης που τα δεδομένα εισόδου θεωρείται ότι αντικατοπτρίζουν πραγματικές ιδιότητες του συστήματος, λόγω της περιορισμένης χωρικής διακριτότητας της πληροφορίας κάποια από αυτά τα μεγέθη υπολογίζονται μέσω της βαθμονόμησης με αποτέλεσμα πλέον να μην αντιπροσωπεύουν πλέον φυσικό μέγεθος και η όλη προσέγγιση να μεταπίπτει σε εννοιολογική (Mrockowski *et al.*, 1997). Από την άλλη, και τα μοντέλα μαύρου κουτιού, που μάλιστα ο όρος παράμετρος δεν είναι καν αποδεκτός (ονομάζονται και non-parametric models) «ωθούνται» από τις διαθέσιμες πληροφορίες και δεν υπάρχει άλλος τρόπος υπόθεσης ή μέτρησης των χαρακτηριστικών μεγεθών τους (data-driven).

Τελικά μία βαθμονόμηση θεωρείται πετυχημένη όταν:

- Το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράξει όλο το φάσμα των αποκρίσεων της λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια
- Στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Ο πρώτος στόχος σημαίνει ότι το μοντέλο μετά τη βαθμονόμηση αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τις πραγματικές αποκρίσεις του συστήματος για δεδομένες φορτίσεις και ο δεύτερος εξασφαλίζει ότι οι παράμετροι που εντοπίζονται πράγματι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος και δεν είναι αποτέλεσμα φυσικής διαδικασίας τύπου μαύρου κουτιού, δηλαδή χωρίς φυσικό υπόβαθρο (Ευστρατιάδης, 2009).

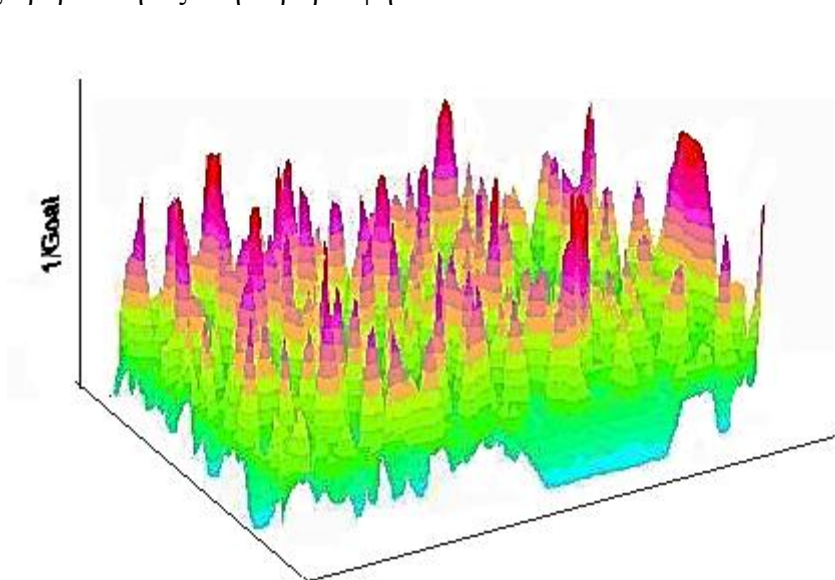
Τα τελευταία χρόνια, το αντίστροφο πρόβλημα έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές σε σχέση με το προγενέστερο της αυτό των ευλόγων παραμέτρων. Επιπλέον, σε αντιδιαστολή με τη διαδικασία εκτίμησης αποκρίσεων του μοντέλου από δεδομένα εισόδου στο μοντέλο (παράμετροι) που είναι μοναδική, η διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων από μεταβλητές του μοντέλου (αποκρίσεις) είναι μη μοναδική εκ φύσεως εξαιτίας των συσχετίσεων των παραμέτρων, των λαθών που υπεισέρχονται με τις μετρήσεις και του επιπέδου του βαθμού των απλοποιήσεων που ένα μοντέλο κάνει μεταξύ άλλων παραμέτρων. Επομένως μία ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε ένα υδρολογικό μοντέλο είναι ζωτικής σημασίας για μία ουσιαστική και αποτελεσματική εφαρμογή του μοντέλου. Η βαθμονόμηση παραμέτρων καθώς και η πρόβλεψη της αβεβαιότητας σε ένα μοντέλο είναι, λοιπόν, δύο έννοιες στενά συνδεδεμένες.

Η ολική βελτιστοποίηση με μία στοχική συνάρτηση (αντικειμενική συνάρτηση, objective function) σε ένα πρόβλημα με πολλές παραμέτρους είναι συχνά δύσκολη λόγω της πολυπλοκότητας στη δομή της στοχικής συνάρτησης. Μία δυσκολία για παράδειγμα είναι ο μεγάλος αριθμός από τοπικά ελάχιστα που σχετίζονται με την στοχική συνάρτηση. Διεθνώς η παραπάνω αναλογία γλαφυρά αποτυπώνεται με το παράδειγμα του ελβετικού τυριού (block of Swiss cheese) (Σχήμα 5.1). Ο χώρος της στοχικής συνάρτησης g , είναι ένα κομμάτι ελβετικό τυρί (απλοποιημένος σε 2 μόνο παραμέτρους) με πολλές τρύπες. Κάθε τρύπα αποτυπώνει και ένα τοπικό ελάχιστο με το μέγεθος της τρύπας να αποτυπώνει το εύρος της αβεβαιότητας. Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η επίδραση του 'ελβετικού τυριού' - Swiss Cheese effect - πάνω στην επιφάνεια απόκρισης της στοχικής συνάρτησης (Abbaspour et al., 2004).



Σχήμα 5.1 Ανάλογο Swiss Cheese στοχικής συνάρτησης 2 παραμέτρων

Σε αυτό το σχήμα για καλύτερη εποπτεία η στοχική συνάρτηση έχει αντιστραφεί και τα ελάχιστα εμφανίζονται ως κορυφές. Εδώ, λοιπόν φαίνεται ότι για κάθε δοσμένη στοχική συνάρτηση μπορούν να εξαχθούν πολλά σεν παραμέτρων για τα οποία η εκάστοτε στοχική συνάρτηση δεν διαφέρει σημαντικά. Έτσι υπάρχουν πολλές πιθανές λύσεις βασισμένες σε διαφορετικά σεν παραμέτρων. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί έμφαση στο να εξακριβωθούν όλες αυτές οι λύσεις (Yapo et al., 1998; Beven et al., 1992; Duan et al., 2003, Abbaspour et al., 2004). Μία τέτοια ανάλυση ονομάζεται και αλλιώς ανάλυση ευαισθησίας. Από την στιγμή που υπάρχουν πολλές πιθανές λύσεις, κάθε ρουτίνα βελτιστοποίησης παραμέτρων βρίσκει ένα τέτοιο ελάχιστο για τη δοσμένη στοχική συνάρτηση. Έτσι, η εύρεση του ολικά ελαχίστου στα υδρολογικά προβλήματα δεν έχει και ιδιαίτερο νόημα. Από τη στιγμή που το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των παραμέτρων δεν είναι μοναδικό, κρίνεται ζωτικής σημασίας να καθορίσουμε πιο είναι το μέγεθος της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη.



Σχήμα 5.2 Ανεστραμμένη επιφάνεια απόκρισης-Swiss Cheese Effect

5.2 Διατύπωση βαθμονόμησης ως πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης

Η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\text{minimize } e(\theta) = [e_1(\theta), e_2(\theta), \dots, e_n(\theta)] , \quad \theta \in \Theta \quad (5.1)$$

όπου e το διάνυσμα σφάλματος ή υπόλοιπο (residual) και ορίζεται ως η διαφορά των προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποκρίσεων, δηλαδή

$$e = y' - y \quad (5.2)$$

Θ , όπου $\Theta \in \mathbb{R}^n$ είναι ο εφικτός χώρος και ορίζεται από δύο διανύσματα ακραίων τιμών $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ τα οποία εκφράζουν τα παρατηρημένα όρια διακύμανσης τιμών των παραμέτρων. Αυτά μπορεί να είναι είτε μαθηματικά όρια είτε όρια που προκύπτουν με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και την υδρολογική εμπειρία.

Προφανώς το παραπάνω πρόβλημα είναι πολυκριτηριακό από τη στιγμή που η (5.1) είναι διανυσματική και μάλιστα όχι καλώς ορισμένο λόγω του μεγάλου αριθμού υπολοίπων και της ισχυρής συσχέτισης αυτών (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2010). Για το λόγο αυτό, στην απλούστερή του μορφή διατυπώνεται μία ενιαία αριθμητική έκφραση που περιγράφει ένα καθολικό μέτρο καλής προσαρμογής (goodness-of-fit) του μοντέλου στις μετρημένες αποκρίσεις y , το οποίο και θεωρείται ως στοχική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων είναι αποτέλεσμα αυτής της βελτιστοποίησης.

Έστω ότι για κάθε κριτήριο που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη μεταβλητή f_i , εισάγεται και ένας μη μηδενικός συντελεστής βάρους w_i με $i = 1, 2, \dots, m$. Η συνάθροιση των επιμέρους κριτηρίων $g(\theta)$ αποτελεί τη στοχική συνάρτηση και το ισοδύναμο βαθμωτό πρόβλημα που προκύπτει είναι της μορφής:

$$\text{minimize } g(\theta) = g[w_1 f_1, w_2 f_2, \dots, w_m f_m], \quad \theta \in \Theta \quad (5.3)$$

$$g(\theta) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(\theta) \quad (5.4)$$

Με την τεχνική αυτή επιδιώκεται η εύρεση ενός καθολικά βέλτιστου συνόλου παραμέτρων $\theta^* = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \in \Theta$ που θα ελαχιστοποιεί τη στοχική συνάρτηση, λογική που βασίζεται στην τυπική στατιστική θεώρηση περί προσαρμογής εμπειρικών μοντέλων σε μετρήσεις (Gupta et al, 1998).

Παραδοσιακά η παραπάνω διαδικασία της βαθμονόμησης γίνεται εμπειρικά με τη χρήση της λογικής «δοκιμή-σφάλμα» (trial and error) για την εκτίμηση των παραμέτρων. Κάτι τέτοιο

παρουσιάζεται εξαιρετικά χρονοβόρο ανάλογα με τον αριθμό των ανεξάρτητων παραμέτρων και καθώς τις αλληλεπίδρασης που μπορεί να εμφανίζουν. Επιπλέον, εξαιτίας της υποκειμενικότητας κρίνεται δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια η εμπιστοσύνη της προσομοίωσης του μοντέλου. Εξαιτίας αυτού, πολυετής έρευνες κατευθύνθηκαν προς την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και αποδοτικών διαδικασιών αυτόματης βαθμονόμησης (Madsen et al., 2002). Αυτές οι καινοτόμες διαδικασίες περιλαμβάνουν συνδυαστικούς αλγόριθμους προσομοιωμένης απόπτωσης ^{(2)†} (Hartmann & Bardossy, 2005), γενετικοί αλγόριθμοι (Seibert, 2002) και πολύπλοκοι εξελικτικοί ^{(1)†} (Duan et al., 1993a, b).

Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση του μοντέλου που υιοθετήθηκε σε αυτήν την εργασία ακολούθησε μία λογική ημιαυτόματης βαθμονόμησης, εφόσον έτσι παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να επεμβαίνει στην πορεία της βελτιστοποίησης, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις, κατευθύνοντας έτσι - με βάση την εμπειρία του - την αναζήτηση προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Αυτή η λογική αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση ύπαρξης ισοδύναμα καλών λύσεων. Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υιοθετεί τον εξελικτικό αλγόριθμο απόπτωσης-απλόκου, όπως έχει τεκμηριωθεί και περιγραφεί στην μελέτη «Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων», Ευστρατιάδης, Οκτώβριος 2008. Ο συγκεκριμένος εξελικτικός αλγόριθμος προσπαθεί να αντιμετωπίσει τις παραπάνω δυσχέρειες που δημιουργούνται λόγω των μη-κυρτών χώρων αναζήτησης όπως για παράδειγμα την ύπαρξη πολλαπλών τοπικών ακρότατων.

Παρακάτω δίνεται η γενική θεωρητική περιγραφή του αλγορίθμου, όπως ακριβώς αυτή παρουσιάζεται στην πρωτότυπη εργασία: «Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται κατά στάδια, που

^{(1)†} Γενικό πρότυπο εξελικτικού αλγορίθμου (evolutionary algorithms): ακολουθούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διαδικασιών χρησιμοποιώντας πληθυσμούς λύσεων που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους καθώς εξελίσσονται, με εφαρμογή των λεγόμενων γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη). Ο όρος μετάλλαξη υποδηλώνει τυχαίες μεταβολές κάθε κλίμακας που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρό ποσοστό του πληθυσμού, επιτρέποντας τη μετάβαση σε απομακρυσμένες, σε σύγκριση με τον τρέχοντα πληθυσμό, περιοχές του πεδίου αναζήτησης

^{(2)†} Απόπτωση (annealing) ονομάζεται η φυσική διεργασία ψύξης των μετάλλων, που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τους. Κατά τη διαδικασία ψύξης, επιτρέπεται η μετάβαση του συστήματος σε καταστάσεις υψηλότερης ενέργειας, ακολουθώντας έναν πιθανοτικό κριτήριο που στη στατιστική μηχανική αναφέρεται ως νόμος του Boltzman. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του συστήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η υπερπήδηση των τοπικών ενεργειακών ακρότατων, προς όφελος της απόκτησης μιας τέλει κρυσταλλικής δομής. Αναγκαία προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι ο αργός ρυθμός ψύξης, διαφορετικά η διαδικασία καταλήγει σε μια άμορφη μάζα, που αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό ενεργειακό ακρότατο. Στις αρχές της παραπάνω διεργασίας βασίζεται η τεχνική της προσομοιωμένης απόπτωσης, που εισήγαγαν στη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων οι Kirkpatrick et al. (1983).

ονομάζονται γενιές (generations). Σε κάθε γενιά, ένα ή περισσότερα άτομα αντικαθίσταται από νέα σημεία (απογόνους), διατηρώντας σταθερό μέγεθος πληθυσμού. Οι απόγονοι παράγονται είτε από τη διασταύρωση πολλαπλών γονέων, στη βάση ενός τροποποιημένου σχήματος κατερχόμενου απλόκου^{(3)†} (downhill simplex), είτε μέσω μετάλλαξης (mutation). Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται αυτόματα, μέσω μιας προσαρμοστικής στρατηγικής προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing)».

5.3 Επαλήθευση

Η αναγκαιότητα ελέγχου ενός υδρολογικού μοντέλου μέσω της επαλήθευσης με ανεξάρτητα παρατηρημένα δεδομένα, έχει εδώ και πολύ καιρό σημειωθεί από τον παγκόσμιο οργανισμό μετεωρολογίας WMO (Refsgaard et al., 1995).

Οι βέλτιστες παράμετροι που προκύπτουν μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης με βάση τη λογική ελαχιστοποίησης της στοχικής συνάρτησης είναι λογικό να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις παρατηρημένες τιμές για την περίοδο βαθμονόμησης καθώς και οι βελτιστοποιημένες παράμετροι έχουν κάποιο φυσικό νόημα. Υπάρχει όμως περίπτωση, εισάγοντας άλλα ιστορικά δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση και με την ίδια στοχική συνάρτηση, οι προσέγγιση να μην είναι ικανοποιητική. Δηλαδή το μοντέλο μου να εμφανίζει αδυναμία αναπαραγωγής αποκρίσεων ανεξάρτητης χρονικής περιόδου. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι πολύ πιθανό το μοντέλο μου να λειτουργεί σαν μαύρο κουτί δηλαδή μακροσκοπικά οι παράμετροι να μην αντιπροσωπεύουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Αυτός είναι και ο λόγος που κρίνεται απαραίτητο να γίνει κάποιου είδους επαλήθευση της διαδικασίας με την εισαγωγή νέων παρατηρημένων τιμών.

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ η επαλήθευση του μοντέλου γίνεται με το να διαχωρίσω αρχικά τα δεδομένα μου σε εκείνα που θα χρησιμοποιήσω για βαθμονόμηση και σε εκείνα που θα χρησιμοποιήσω για επαλήθευση. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως data-split και αποτελεί την πιο παραδοσιακή προσέγγιση αξιολόγησης της προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου όχι όμως και την πιο καθολικώς αποδεκτή αφού πολλοί επιστήμονες ισχυρίζονται ότι δεν αποτελεί ισχυρό τεστ στην αξιολόγηση μοντέλων κατανεμημένης δομής

^{(3)†} Κατερχόμενο άπλοκο: πρόκειται για μία κλασική τεχνική αναζήτησης τοπικών ακρότατων, που βασίζεται σε διαδοχικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς ενός συνόλου $n+1$ εφικτών σημείων που αντιπροσωπεύουν τις κορυφές ενός απλόκου στο n -διάστατο χώρο. Το άπλοκο διερευνά το πεδίο αναζήτησης, πραγματοποιώντας τυποποιημένες προσδιοριστικές κινήσεις που εξασφαλίζουν σύγκλιση στο εγγύτερο τοπικό ακρότατο (ανάκλαση ως προς τη χειρότερη κορυφή, επέκταση στην κατεύθυνση της ανάκλασης, συμπίεση προς το κεντροειδές του, συρρίκνωση γύρω από τη καλύτερη κορυφή).

5.4 Κριτήρια καλής προσαρμογής

5.4.1 Αποτελεσματικότητα

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υδρολογικών μοντέλων προκύπτει από τη σύγκριση των τιμών των αποκρίσεων των παρατηρημένων με τις προσομοιωμένες. Υπάρχει μία μεγάλη γκάμα κριτηρίων αποτελεσματικότητας, δηλαδή κριτηρίων που ορίζουν με μαθηματικούς όρους το πόσο καλά μία προσομοίωση προσαρμόζεται στις διαθέσιμες παρατηρημένες τιμές.

Εδώ επιλέγεται το κριτήριο να υπάγεται στην κατηγορία των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων (mse) που αποτελούν και το κριτήριο επιλογής της καλύτερης εκτιμήτριας. Υπενθυμίζεται ότι, από τη σχέση (3.14) έχω: $mse(T) = E[T - g(\theta)]^2 = Var(T) + b(T)^2$ όπου T η εκτιμήτρια συνάρτηση. Βέλτιστη εκτιμήτρια μίας παραμέτρου είναι εκείνη που έχει το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανεξάρτητα από το αν είναι αμερόληπτη ή όχι. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι ενδεχομένως να χρειαστεί και κάποιο κριτήριο ελέγχου της μεροληψίας (βλέπε ενότητα 5.3.2). Ένα από τα πιο γνωστά κριτήρια αποτελεσματικότητας, αυτό των Nash-Sutcliffe (1970) (efficiency E) που χρησιμοποιείται και στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (5.5)$$

Όπου \bar{y} η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς, T ο χρονικός ορίζοντας της περιόδου ελέγχου και t το χρονικό βήμα.

Από τον ορισμό γίνεται αντιληπτό ότι η αποτελεσματικότητα είναι αδιάστατο μέτρο προσαρμογής που συγκρίνει τη διασπορά των σφαλμάτων με τη διασπορά των μετρήσεων. Δείχνει δηλαδή το σε τι ποσοστό η αβεβαιότητα που παρατηρείται εξηγείται από το μοντέλο συνεπώς και το αν η προσομοιωμένη τιμή αποτελεί καλύτερη εκτιμήτρια από τη μέση τιμή των παρατηρήσεων.

Η μέγιστη τιμή του μέτρου αποτελεσματικότητας είναι το 1 που δηλώνει και την τέλεια προσαρμογή του μοντέλου. Κάτω όριο δεν υπάρχει, ενώ η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι ισοδύναμη με τη μέση παρατηρημένη τιμή, οπότε και η υδρολογική αβεβαιότητα (που εκφράζεται από την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων) ταυτίζεται με την αβεβαιότητα του μοντέλου.

Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του δείκτη αποτελεσματικότητας είναι ότι διαφορά ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές υπολογίζονται υψωμένες στο τετράγωνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μεγάλες τιμές να υπερεκτιμώνται και οι χαμηλές εμφανώς να υποεκτιμώνται και επί τις ουσίας να μην λαμβάνονται υπόψη. Για την ποσοτικοποίηση της

πρόβλεψης αυτό οδηγεί το μοντέλο σε μία υπερεκτίμηση σε περιόδους υψηλών τιμών απορροής και σε μία υποεκτίμηση σε περιόδους χαμηλής (καλοκαιρινούς μήνες). Έτσι ο δείκτης Nash-Sutcliffe τίθεται υπό αμφισβήτηση για περιόδους χαμηλών απορροών.

5.4.2 Μεροληψία

Μια στοιχειώδης απαίτηση, που συχνά τίθεται στα υδρολογικά μοντέλα, είναι η αναπαραγωγή του υπερετήσιου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, που σημαίνει ότι η μέση τιμή της προσομοιωμένης απόκρισης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην αντίστοιχη μέση παρατηρημένη τιμή. Ωστόσο, εξαιτίας της μη γραμμικότητας των εν λόγω μοντέλων, η παραπάνω υπόθεση δεν προκύπτει από την ελαχιστοποίηση των μέτρων μέσου τετραγωνικού σφάλματος, όπως η αποτελεσματικότητα. Συνεπώς, για τον έλεγχο της αναπαραγωγής της παρατηρημένης μέσης τιμής εισάγεται ένα μέτρο μεροληψίας (bias),

$$AVERBIAS = \frac{\overline{y'} - \bar{y}}{\bar{y}} \quad (5.6)$$

όπου $\overline{y'}$ η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς και \bar{y} της παρατηρημένης για το ίδιο μήκος δείγματος. Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το μέτρο μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με την αποτελεσματικότητα ή μεμονωμένα, εφόσον υπάρχουν χονδρικές εκτιμήσεις σχετικά με τη μέση τιμή

Είναι προφανές ότι αν $EFF = 1$, τότε $BIAS = 0$, χωρίς ωστόσο να ισχύει το αντίστροφο. Συνεπώς, ένα μοντέλο ενδέχεται να αναπαράγει με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια τη μέση τιμή της παρατηρημένης απόκρισης, χωρίς αυτό απαραίτητα να συνεπάγεται και καλή προσαρμογή του.

Εκτός της μέσης τιμής, ορίζονται μέτρα μεροληψίας ως προς δύο ακόμη τυπικούς στατιστικούς δείκτες, την τυπική απόκλιση, σ_y , τον συντελεστή μεταβλητότητας, δηλαδή τον λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή

$$SDEVBIAS = \frac{\sigma_{y'} - \sigma_y}{\sigma_y} \quad (5.7)$$

$$CVARBIAS = \frac{\sigma'_y / \bar{y}' - \sigma_y / \bar{y}}{\sigma_y / \bar{y}} \quad (5.8)$$

Θετική τιμή της μεροληψίας υποδηλώνει υπερεκτίμησή του αντίστοιχου δείκτη, ενώ αρνητική υποδηλώνει υποεκτίμησή του. Επισημαίνεται ότι στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, επειδή στόχος είναι ο μηδενισμός της μεροληψίας, όλα τα σχετικά μέτρα εκφράζονται ως απόλυτες τιμές.

5.4.3 Σφάλμα μηδενικών παροχών

Το σφάλμα των μηδενικών παροχών είναι ένα εμπειρικό μέτρο, με το οποίο ελέγχεται αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή, αντίστροφα, μηδενίζει αδικαιολόγητα την απορροή ενός ποταμού ή μιας πηγής. Πρόκειται για μια σημαντική πληροφορία, που μάλιστα δεν υπόκειται σε κανενός είδους σφάλμα μέτρησης, όπως συμβαίνει με την παροχή, ειδικά όταν η τελευταία εκτιμάται με βάση αραιές υδρομετρήσεις (Ευστρατιάδης, 2009)

Για την μαθηματική διατύπωση του μέτρου μηδενικών τιμών εισάγεται η ακόλουθη μεταβλητή:

$$z_t = \begin{cases} y_t & \text{αν } y'_t = 0 \\ y'_t & \text{αν } y_t = 0 \\ 0 & \text{αν } y'_t, y_t \neq 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Αν T_0 ο αριθμός των χρονικών βημάτων κατά τα οποία το μοντέλο είτε δεν αναπαράγει την παρατηρημένη μηδενική τιμή ($y'_t > 0, y_t = 0$) είτε μηδενίζει την παροχή, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα ($y'_t = 0, y_t > 0$), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι:

$$e_o^2 = \frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^T z_t^2 \quad (5.10)$$

5.5 Αρχικές συνθήκες

Στα υδρολογικά μοντέλα όταν μιλάμε για αρχικές συνθήκες συνήθων αναφερόμαστε στις στάθμες εδαφικής υγρασίας καθώς και τις στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού. Εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος), η εδαφική υγρασία που έχει παραμείνει στο έδαφος είναι πρακτικά μηδενική, καθώς έχει στο σύνολό της καταναλωθεί για εξατμοδιαπνοή στη διάρκεια του καλοκαιριού. Συνεπώς, για όλες τις δεξαμενές που αναπαριστούν την αναρρύθμιση της εδαφικής υγρασίας, δηλαδή για κάθε συνδυασμό μονάδα (unit), το αρχικό ύψος νερού μπορεί να υποτεθεί μηδενικό. Αν η προσομοίωση ξεκινά σε ενδιάμεση εποχή του υδρολογικού έτους, προτιμότερο είναι να ληφθεί ως εκτίμηση της αρχικής υγρασίας του μέσο ύψος νερού της εν λόγω περιόδου που δεν λαμβάνεται υπόψη στο πρώτο υδρολογικό έτος. Σε κάθε περίπτωση, η αρχική αυτή συνθήκη έχει ελάσσονα σημασία, εκτός και αν έχει παρατηρηθεί ένα έντονο φαινόμενο στα πρώτα βήματα της προσομοίωσης, το οποίο πρέπει να αναπαραχθεί από το μοντέλο.

Αντίθετα, ο καθορισμός της στάθμης εκκίνησης των υπόγειων δεξαμενών είναι κομβικής σημασίας, και προϋποθέτει αρκετή εμπειρία και τη διεξαγωγή αρκετών δοκιμών. Εφόσον η διακριτοποίηση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας του προσδίδει εννοιολογικό χαρακτήρα, τότε οι αρχικές συνθήκες πρέπει να είναι συμβατές με τη σύλληψη του μοντέλου, δηλαδή να αποδίδουν σωστά την κατεύθυνση κίνησης του νερού, την εκφόρτιση στις πηγές (η στάθμη των οποίων θεωρείται ότι ταυτίζεται με το μέσο υψόμετρο ανάπτυξής τους) και τις τυχόν διαφυγές (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009).

5.6 Όρια παραμέτρων

Τα όρια των παραμέτρων εκφράζουν μία εκ των προτέρων υποψία σχετικά με την περιοχή στην οποία βρίσκεται η ολικά βέλτιστη λύση. Η θέσπιση ορίων συντελεί (1) στο να μειωθεί το εύρος αναζήτησης και να επιτευχθεί σύγκλιση πολύ γρηγορότερα και (2) στο να δοθεί αφηρητικά μία εννοιολογική ερμηνεία των παραμέτρων σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Η θέσπιση τέτοιων ορίων είναι μία διαδικασία επίπονη αφού μία λάθος υποψία μπορεί να αποκλείσει περιοχές του εφικτού χώρου που θα μπορούσαν να δώσουν βέλτιστη λύση. Γι' αυτό και κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να γίνεται συνεχείς έλεγχος των βέλτιστων τιμών που παίρνουν οι παράμετροι. Αν αυτές βρίσκονται εκτός των ορίων (πάντως εντός του εφικτού χώρου που με όρους αδιάστατων συντελεστών ορίζεται από 0 έως 1) τότε πρέπει να επανεξεταστούν τα όρια και να αλλάξουν. Αν παίρνει τιμή πολύ κοντά στο άνω ή κάτω όριο που έχει τεθεί, τότε πρέπει να μεγαλώσει το εύρος αλλάζοντας το συγκεκριμένο όριο ώστε να ελεγχθεί η περίπτωση εύρεσης βέλτιστης λύσης στην γειτονική περιοχή του εφικτού χώρου.

5.7 Βαθμονόμηση μοντέλου στη λεκάνη ελέγχου

5.7.1 Προετοιμασία μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Σκοπός είναι η δημιουργία δύο σεναρίων, τα οποία διαφοροποιούνται μόνο ως προς τις χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης των υπολεκανών. Συγκεκριμένα, το πρώτο έχει ως δεδομένα εισόδου αυτά που προέκυψαν από με τη μέθοδο Thiessen και το άλλο αυτά που προέκυψαν με τη μέθοδο Co-Kriging. Η δυνητική εξατομοδιαπνοή είναι κοινή και για τα δύο σενάρια. Οι χρονοσειρές εισόδου της βροχόπτωσης και της ET κάθε υπολεκάνης αναφέρονται στα υδρολογικά έτη 1951-52 ως 2000-01 και εισάγονται ως αρχεία .hts (αρχεία Υδρογνώμονα).

Ως προς τα δεδομένα ελέγχου, που είναι οι μετρήσεις απορροής στη γέφυρα Καστριού και Κομποτάδων, είναι προφανώς κοινά και για τα δύο σενάρια. Οι χρονοσειρές εισόδου της μηνιαίας απορροής κάθε υπολεκάνης αφορούν στην περίοδο από το 1963 έως και το 1980 για το καστρί και στην περίοδο από το 1949 έως και το 1979 για τους Κομποτάδες και επίσης εισέρχονται στο σύστημα ως αρχεία .hts

Η περίοδος προσομοίωσης χωρίζεται σε δύο υποπεριόδους:

- | | |
|--------------------------|-----------------|
| 1. Περίοδος βαθμονόμησης | 10/1951-09/1971 |
| 2. Περίοδος επαλήθευσης | 10/1971-09/2001 |

Ως προς τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου, για την εδαφική υγρασία, θεωρήθηκε παντού μηδενική αφού η προσομοίωση ξεκινάει στην αρχή του υδρολογικού έτους, δηλαδή τον Οκτώβριο του 1951, οπότε έχουν αποκατασταθεί η πλέον ξηρές συνθήκες.

Ως προς τις στάθμες των κυττάρων υπήρξε ιδιαίτερη δυσκολία καθώς υπήρχε έλλειψη οποιουδήποτε είδους δεδομένων εκτός από κάποιες τυπικές τιμές που παρέχονταν από την μελέτη του ΙΓΜΕ (2010). Με βάση αυτές έγιναν δοκιμαστικές βαθμονομήσεις για διάφορες στάθμες και παρατηρήθηκε μικρή ευαισθησία του μοντέλου ως προς αυτές, πράγμα αναμενόμενο αφού δεν έχουν ληφθεί πουθενά υπόψη παρατηρημένες πηγές στην περιοχή, εκτός από τις δύο εικονικές (κεφάλαιο 2). Έτσι διατηρήθηκαν οι «εποπτικές» αρχικές τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1 Αρχικές στάθμες υπόγειου υδροφορέα

Όνομασία κυττάρου	Κατώτερη στάθμη	Ανώτερη στάθμη	Αρχική στάθμη
Κύτταρο 0	100	200	150
Κύτταρο 1	50	150	100
Κύτταρο 2	30	160	30
Πηγή ανάντη Καστριού	150	100000*	150
Πηγή ανάντη Κομποτάδων	100	100000*	100

*dummy cell

5.7.2 Ορισμός στοχικής συνάρτησης ολικής βελτιστοποίησης

Η στοχική συνάρτηση που ουσιαστικά είναι μία σταθμισμένη στοχική των τριών κριτηρίων καλής προσαρμογής που περιγράφηκαν παραπάνω στην ενότητα 5.4 πολλαπλασιασμένα με τους κατάλληλους συντελεστές. Οι συντελεστές προέκυψαν ύστερα από εξαντλητικές δοκιμές όπου και φάνηκε η ανταγωνιστική συμπεριφορά των κριτηρίων με αποτέλεσμα να επιλεγθούν εκείνα τα βάρη που δίνουν έμφαση στα πρωτεύοντα χαρακτηριστικά του συστήματος (όπως το υδρογράφημα στην περιοχή των Κομποτάδων) χωρίς όμως να αμελούνται τα υπόλοιπα. Τελικά εκτιμήθηκε ένας συμβιβασμός (πίνακας 5.2) που θα εξασφάλιζε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλα τα κριτήρια του μοντέλου με βάση βέβαια και την ιεράρχηση που η στοχική συνάρτηση θέτει.

Πίνακας 5.2 Συνιστώσες στοχικής συνάρτησης & συντελεστές βάρους τελικής βαθμονόμησης

	EFF	AVBIAS	Σφάλμα στείρευσης
Έξοδος Κομποτάδων	1	0.5	1
Έξοδος Καστριού	0.5	1	-

5.7.3 Περιγραφή της διαδικασίας της βαθμονόμησης

Ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, αυτές είναι 63:

- 11 παράμετροι για συντελεστές διήθησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου
- 36 παράμετροι για τις MYA, δηλαδή για τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης
- 6 παράμετροι υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους για τα κύτταρα του υδροφορέα
- 2 παράμετροι για υδραυλική αγωγιμότητα των πηγών.

Λόγω της αδρομερούς χάραξης του μοντέλου δεν κρίνεται σωστό να βαθμονομηθούν όλες οι παράμετροι (52 αν αφαιρέσω της διήθησης που δεν βαθμονομούνται) αφού έτσι κινδυνεύω να

μην έχω ρεαλιστικά αποτελέσματα του μοντέλου (υπερπροσαρμογή που οδηγεί στο συμπέρασμα λειτουργίας του μοντέλου μου σαν μαύρο κουτί). Επιπλέον, επιχειρείται μία ομαδοποίηση των παραμέτρων με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Για παράδειγμα βαθμονομούνται οι παράμετροι μόνο 2 από τις 6 MYA, που είναι αυτές με την μεγαλύτερη έκταση.

Η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι στα μηνιαία μοντέλα βροχής-απορροής, που βαθμονομούνται με μοναδικό κριτήριο την προσαρμογή του προσομοιωμένου στο παρατηρημένο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης, αρκούν μόλις πέντε έως έξι παράμετροι για μια ικανοποιητική αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών του υδρογραφήματος (Beven, 1989· Kuczera & Mroczkowski, 1998· Wagener et al., 2001). Η εμπειρική αυτή διαπίστωση μπορεί να γενικευτεί για σύνθετα υδρολογικά μοντέλα, όπως η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, στα οποία προσομοιώνονται πολλαπλές διεργασίες και, ως εκ τούτου, εμπλέκονται πολύ περισσότερες παράμετροι (Ευστρατιάδης, 2009).

Αρχικά έγινε βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων με το μέγιστο εύρος του εφικτού χώρου. Έπειτα έγινε μεγάλος αριθμός δοκιμών διαφορετικών ομάδων παραμέτρων με ταυτόχρονη αλλαγή των ορίων του εφικτού χώρου αλλά και των συντελεστών βάρους των κριτηρίων. Με αυτόν το τρόπο αποκτήθηκε μία αδρομερής εικόνα για τις παραμέτρους και τη χαρακτηριστικά τους καθώς επίσης έγινε και αντιληπτό σε ποιες παραμέτρους δεν παρουσιάζει ευαισθησία το μοντέλο και οι οποίες τελικά δεν βαθμονομήθηκαν. Σημειώνεται ότι σχεδόν σε καμία περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε ομάδα μεγαλύτερη των 15 παραμέτρων.

Από τη στιγμή αυτή και έπειτα ελήφθη ιδιαίτερη μέριμνα στην προσπάθεια απόδοσης φυσικής ερμηνείας των παραμέτρων επεμβαίνοντας στα όρια διακύμανσης. Ένα παράδειγμα είναι ότι ορίστηκαν διαφορετικά εύρη τιμών ανάλογα με τον τύπο του υπεδάφους για παραμέτρους που επηρεάζονται από το των τύπο υπεδάφους όπως ο συντελεστής κατείσδυσης. Από τη βαθμονόμηση διαφορετικών ομάδων φάνηκε και ποιες είναι οι βέλτιστες τιμές που μπορεί να πάρει η κάθε απόκριση. Στο τέλος επιλέχθηκε η βέλτιστη συμβιβαστική λύση, με κύριο μέλημα την ικανοποιητική αναπαραγωγή του υδρογραφήματος στην έξοδο της περιοχής ελέγχου (Κομποτάδες), όπου το δείγμα θεωρείται πιο αξιόπιστο. Συνεχίστηκαν να δοκιμάζονται ομάδες παραμέτρων χωρίς πλέον να αλλάζουν τα βάρη των κριτηρίων που έχουν πλέον ορισθεί, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης και την καλύτερη επίδοση των αποκρίσεων καθώς και άλλων πτυχών του μοντέλου, όπως αυτή του μακροπρόθεσμο υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.

Όλα τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση των βαθμών ελευθερίας (παραμέτρων) του μοντέλου σε 13 για το σενάριο 2 και σε 10 για το σενάριο 1. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο προέκυψαν αρκετές ισοδύναμες μαθηματικά λύσεις. Για τον τελική επιλογή της βέλτιστης (μην ξεχνάμε όμως συμβιβαστικής!) λύσης απορρίφθηκαν αυτές που:

- Δεν παρουσίαζαν καλή προσαρμογή στην περίοδο επαλήθευσης
- Η στοχική συνάρτηση ελαχιστοποιούνταν λόγω σταθμισμένου αθροίσματος των κριτηρίων καλής προσαρμογής, ενώ μεμονωμένα κάποια από αυτά παρουσίαζαν κακή προσαρμογή
- Οι τιμές των παραμέτρων οδηγούσαν μη ρεαλιστικό σε υδατικό ισοζύγιο πράγμα που αποδείκνυε και τη μη απόδοση υδρολογικής φυσικής ερμηνείας

5.8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Σεναρίου 1

5.8.1 Αποτελέσματα στις θέσεις ελέγχου Καστριού και Κομποτάδων

Η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για την περίοδο βαθμονόμησης δίνεται παρακάτω:

Στοχική Συνάρτηση: $g(\text{calibration}) = 0.376$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για την περίοδο βαθμονόμησης

Πίνακας 5.3 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο βαθμονόμησης 1951-1971

Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα (m^3/s)	Μεροληψία μέσου (m^3/s)	Μεροληψία τυπικής απόκλισης (m^3/s)	Μεροληψία συντελεστή διασποράς (m^3/s)	Σφάλμα στείρευσης (m^3/s)
Κομποτάδες	0.803	0.124	0.137	0.015	-
Καστρί	0.768	0.00	0.212	0.212	-

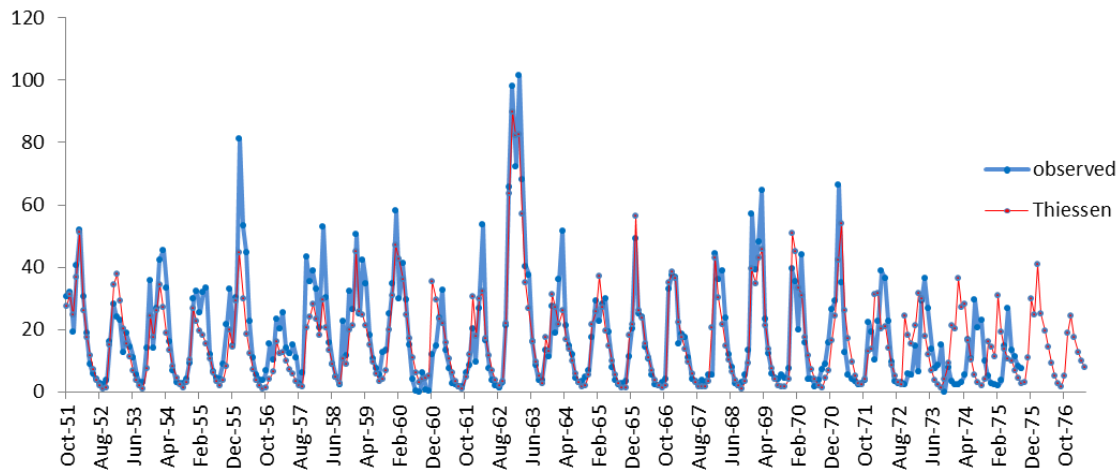
Η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για την περίοδο επαλήθευσης δίνεται παρακάτω:

Στοχική Συνάρτηση: $g(\text{validation}) = 0.901$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για την περίοδο επαλήθευσης.

Πίνακας 5.4 1 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο επαλήθευσης 1980-2000

Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα (m^3/s)	Μεροληψία μέσου (m^3/s)	Μεροληψία τυπικής απόκλισης (m^3/s)	Μεροληψία συντελεστή διασποράς (m^3/s)	Σφάλμα στείρευσης (m^3/s)
Κομποτάδες	0.701	0.186	0.007	0.151	0
Καστρί	0.245	0.132	0.274	0.359	4.7

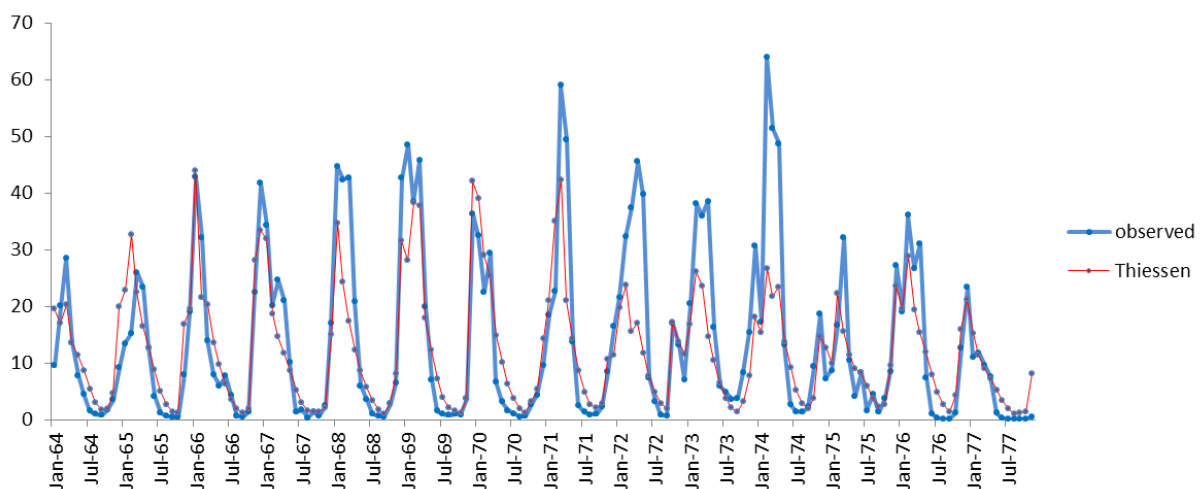


Διάγραμμα 5.1 Προσομοιωμένη και παρατηρημένη μηνιαία απορροή στη γέφυρα Κομποτάδων.

Το μοντέλο παρουσιάζει εξαιρετικά καλή επίδοση ως προς το σημείο ελέγχου στους Κομποτάδες πράγμα που φαίνεται και από τα κριτήρια της αποτελεσματικότητας και για την περίοδο της βαθμονόμησης αλλά και για την περίοδο επαλήθευσης που οι τιμές τους είναι 75.3% και 75.6% αντίστοιχα. Αναπαράγονται όλες οι πτυχές του υδρογραφήματος και κυρίως οι εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων.

Ως προς την επίδοση του μοντέλου στο σημείο ελέγχου της Γέφυρας του Καστριού είναι εξαιρετική για την περίοδο της βαθμονόμησης όπου ο δείκτης αποτελεσματικότητας ισούται με 80.5% αλλά καθόλου ικανοποιητική για την περίοδο της επαλήθευσης που η αποτελεσματικότητα ισούται με 23.6%. Η βέλτιστη εκτίμηση αποτελεσματικότητας της επαλήθευσης από άλλες ομάδες παραμέτρων βρέθηκε 31% που επίσης δεν θεωρείται αρκετή. Έτσι στη συμβιβαστική λύση υιοθετήθηκε τελικά η πρώτη τιμή. Η παραπάνω αντίφαση μπορεί να εξηγηθεί με έναν από

τους δύο παρακάτω τρόπους: ή (1) οι παράμετροι που έχουν προκύψει από τη βαθμονόμηση δεν έχουν φυσική ερμηνεία και άρα το μοντέλο υλοποιεί ένα σύνολο από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς που δεν αποτυπώνουν πραγματικές υδρολογικές διεργασίες, υιοθετεί δηλαδή τη δομή μαύρου κουτιού, ή (2) τα δεδομένα της γέφυρας Καστριού δεν είναι αξιόπιστα. Το πρώτο μάλλον δεν φαίνεται να ευσταθεί σε πρώτη ανάγνωση αν και θα διερευνηθεί διεξοδικότερα στην επόμενη ενότητα. Και αυτό γιατί το ίδιο σύνολο παραμέτρων για τη γέφυρα Κομποτάδων που έχει αξιόπιστες μετρήσεις το μοντέλο έχει άριστη επίδοση. Άρα μάλλον ισχύει αυτό που εξαρχής υποπτευόμασταν ως προς την αναξιοπιστία των υδρομετρήσεων του Καστριού.



Διάγραμμα 5.2 Προσομοιωμένη και παρατηρημένη μηνιαία απορροή στη γέφυρα Καστριού.

5.8.2 Φυσική σημασία των παραμέτρων

Η φυσική σημασία των παραμέτρων σε πρώτη φάση εξασφαλίστηκε με τον ορισμό του εύρους του εφικτού χώρου των παραμέτρων. Παρακάτω γίνεται μία πιο διεξοδική διερεύνηση της φυσικής ερμηνείας των εκτιμώμενων παραμέτρων.

Ως προς το επιφανειακό σύστημα:

- Ο συντελεστής άμεσης απορροής φαίνεται να επηρεάζεται από την κλίση και την περατότητα. Σε μικρές κλίσεις και διαπερατά πετρώματα παρατηρείται χαμηλός συντελεστής επιφανειακής απορροής ενώ σε μεγάλες κλίσεις και αδιαπέρατα πετρώματα το αντίθετο. Μάλιστα φαίνεται ότι η κλίση είναι ο πρωτεύων παράγοντας ενώ η περατότητα ο δευτερεύων. Για παράδειγμα οι ΜΥΑ 4 λόγω υψηλών κλίσεων έχει συντελεστή άμεσης απορροής περίπου 8.5% παρόλο που αναπτύσσεται σε καρστικά πετρώματα, το ίδιο και η

ΜΥΑ 6. Μοναδική αντίφαση στην παραπάνω υπόθεση που δημιουργεί υποψία φυσικής ασυνέπειας είναι ο ιδιαίτερα χαμηλός συντελεστής της ΜΥΑ1.

Πίνακας 5.5 3 Συντελεστής άμεσης απορροής των ΜΥΑ

α/α ΜΥΑ	Κλίση	Περατότητα	Συντελεστής άμεσης απορροής
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	0.956%
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	4.356%
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	3.308%
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	8.472%
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	8.753%

- Η χωρητικότητα των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, δηλαδή των ΜΥΑ, θεωρούνται από τις πλέον κρίσιμες και φαίνεται να επηρεάζονται κατά βάση από την κλίση. Έτσι, οι τιμές τους στις περιοχές μικρής κλίσης είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στις περιοχές μεγάλης κλίσης, για την ίδια κατηγορία περατότητας πετρωμάτων

Πίνακας 5.6 Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας

α/α ΜΥΑ	Κλίση	Περατότητα	Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	341.548 mm
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	267.559 mm
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	700.000 mm
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	712.904 mm
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	671.170 mm

- Ως προς τον συντελεστή στείρευσης της κατείσδυσης είναι προφανές ότι επηρεάζονται από την περατότητα των πετρωμάτων. Μάλιστα η απόκλιση είναι ιδιαίτερα έντονη μεταξύ των τιμών που αφορούν σε προσχωματικά εδάφη (φλύσχης) και καρστικά.

Πίνακας 5.7 Συντελεστής στέρησης κατείδυσης

a/a MYA	Κλίση	Περατότητα	Συντ/στής στέρησης κατείδυσης
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	29.764%
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	29.764%
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	40.000%
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	29.764%
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	40.000%

- Ως προς την χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής προκύπτουν ίδιες για όλες τις MYA και είναι και ιδιαίτερα χαμηλή. Έτσι μία αντίστοιχη ποσότητα σε βροχή μπορεί να εξατμιστεί άμεσα προτού διηθηθεί στην ακόρεστη ζώνη. Στους θερινούς μήνες όλη η βροχή μετασχηματίζεται σε εξάτμιση και το υπόλοιπο καλύπτεται από την αποθηκευμένη εδαφική υγρασία.

Πίνακας 5.8 Χωρητικότητα κατακράτησης βροχής

a/a MYA	Κλίση	Περατότητα	χωρητικότητα κατακράτησης βροχής
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	6.404 mm
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	6.404 mm
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	6.404 mm
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	6.404 mm
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	6.404 mm

- Τέλος, όσον αφορά στις παραμέτρους που αφορούν στην παραγωγή υποδερμικής ροής, δηλαδή την πλευρική ροή που εμφανίζεται κατάντη ως απορροή, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα, καθώς υπάρχει αρκετή ασάφεια ως προς τον ορισμό της εν λόγω διεργασίας

Ως προς το υπόγειο σύστημα:

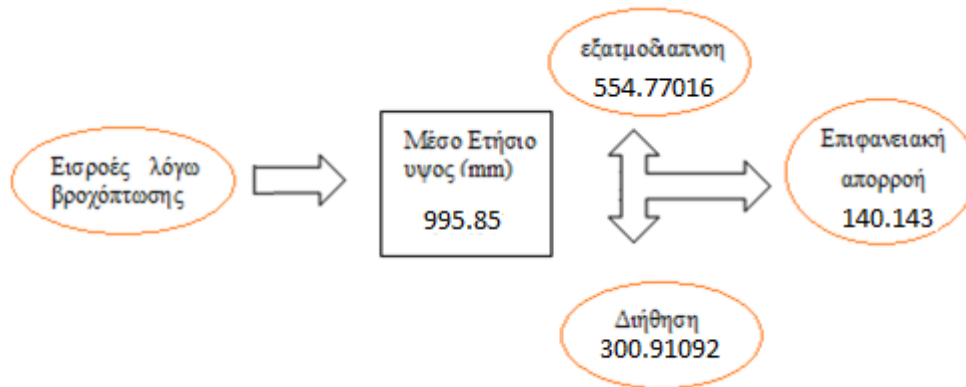
Λόγω της αδρομερούς σχηματοποίησης του υπόγειου υδροφορέα αποφεύγεται η προσπάθεια φυσικής ερμηνείας των παραμέτρων. Παρόλα αυτά στον παρακάτω πίνακα για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται συνολικά οι τιμές των παραμέτρων των υπογείων, δηλαδή της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των κυττάρων 1 και 2 καθώς και η υδραυλική αγωγιμότητα των πηγών και του εικονικού κυττάρου 3.

Πίνακας 5.9 παράμετροι και αρχικές στάθμες υπόγειου συστήματος

Όνομασία	Αρχική Στάθμη (m)	Αγωγιμότητα (m/s)	Πορώδες
Κύτταρο 0	150.000	5E-07	1.967%
Κύτταρο 1	100.000	5E-07	1.967%
Κύτταρο 2	30.000	0.017547	-
Πηγή ανάντη Καστριού	150.000	0.139495	-
Πηγή ανάντη Κομποτάδων	100.000	0.109396	-

5.8.3 Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης ελέγχου



Σχήμα 5.3 Ετήσιο Υδρολογικό Ισοζύγιο περιοχής ελέγχου για Σενάριο 1

Πλέον υπολογίζεται ότι η απορροή των πηγών είναι 256.97mm . Διαπιστώνεται ότι η ετήσια απορροή των πηγών είναι κατά 160.84mm μεγαλύτερη από το μέσο ετήσιο ύψος της επιφανειακής απορροής. Έτσι λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σενάριο 1 περιγράφει μη ρεαλιστικές υδρολογικές διεργασίες. Θα ήταν αφελές να πούμε ότι κάτι τέτοιο μας εκπλήσσει αφού η αδρομερής σχηματοποίηση του υπόγειου λόγω έλλειψης πληροφορίας αναγκάζει το υπόγειο μοντέλο να λειτουργεί ως μαύρο κουτί. Αυτό αποτυπώνει και μία εγγενή αδυναμία των εννοιολογικών μοντέλων συνδυασμένης προσομοίωσης να περιγράψουν με ρεαλιστικό τρόπο τις αποκρίσεις του υδροφορέα ελλείψει στοιχείων για αυτό μονάχα με το επιφανειακό σύστημα.

5.9 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Σεναρίου 2

5.8.2 Αποτελέσματα στις θέσεις ελέγχου Καστριού και Κομποτάδων

Η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για την περίοδο βαθμονόμησης δίνεται παρακάτω:

Στοχική Συνάρτηση: $g(\text{calibration}) = 0.475$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για την περίοδο βαθμονόμησης

Πίνακας 5.10 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο βαθμονόμησης 1951-1979

Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα (m^3/s)	Μεροληψία μέσου (m^3/s)	Μεροληψία τυπικής απόκλισης (m^3/s)	Μεροληψία συντελεστή διασποράς (m^3/s)	Σφάλμα στείρευσης (m^3/s)
Κομποτάδες	0.717	0.194	0.180	0.018	-
Καστρί	0.811	0.001	0.190	0.190	-

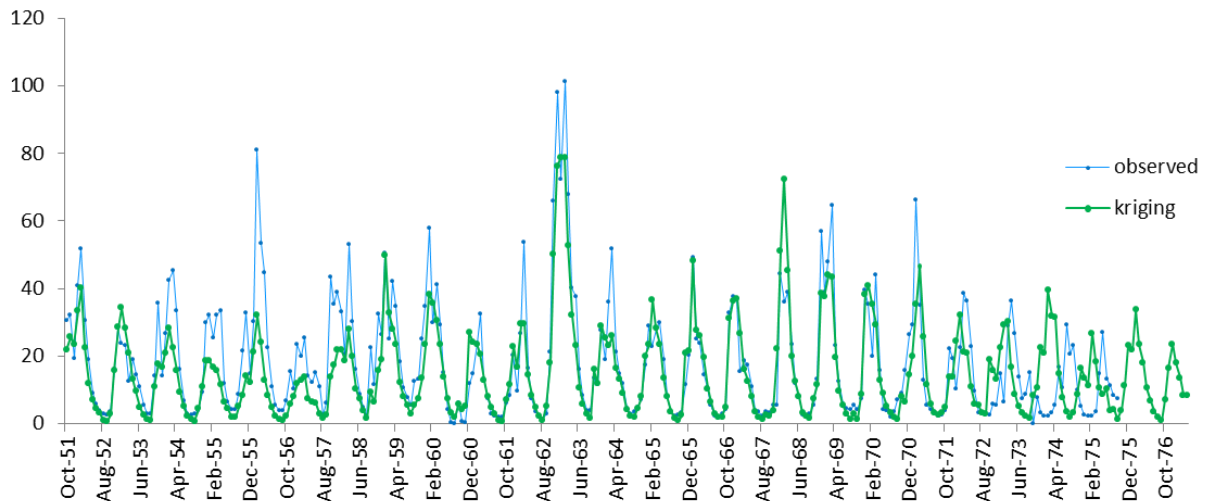
Η τελική τιμή της στοχικής συνάρτησης για την περίοδο επαλήθευσης δίνεται παρακάτω:

Στοχική Συνάρτηση: $g(\text{validation}) = 0.723$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για την περίοδο επαλήθευσης

Πίνακας 5.11 Βέλτιστες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις χρονοσειρές μηνιαίας απορροής για την περίοδο επαλήθευσης 1980-2000

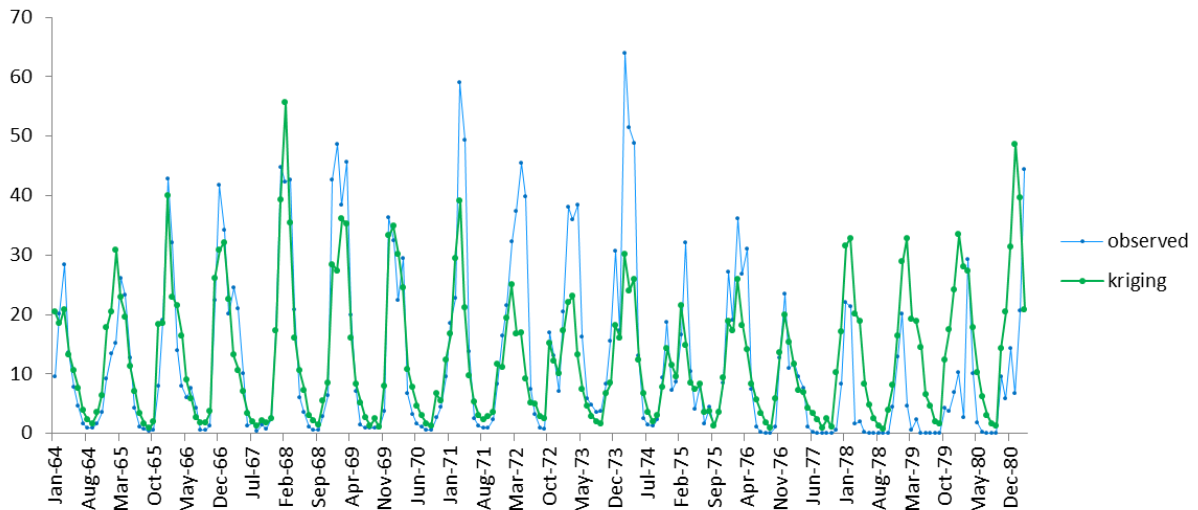
Υδρογράφημα	Αποτελεσματικότητα (m^3/s)	Μεροληψία μέσου (m^3/s)	Μεροληψία τυπικής απόκλισης (m^3/s)	Μεροληψία συντελεστή διασποράς (m^3/s)	Σφάλμα στείρευσης (m^3/s)
Κομποτάδες	0.777	0.122	0.026	0.132	0
Καστρί	0.283	0.081	0.284	0.337	3.33



Διάγραμμα 5.3 Προσομοιωμένη και παρατηρημένη μηνιαία απορροή στη γέφυρα Κομποτάδων.

Το μοντέλο παρουσιάζει εξαιρετικά καλή επίδοση ως προς το σημείο ελέγχου στους Κομποτάδες πράγμα που φαίνεται και από τα κριτήρια της αποτελεσματικότητας και για την περίοδο της βαθμονόμησης αλλά και για την περίοδο επαλήθευσης που οι τιμές τους είναι 71.3% και 76.9% αντίστοιχα. Αναπαράγονται όλες οι πτυχές του υδρογραφήματος και κυρίως οι εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων

Ως προς την επίδοση του μοντέλου στο σημείο ελέγχου της Γέφυρας του Καστριού είναι εξαιρετική για την περίοδο της βαθμονόμησης όπου ο δείκτης αποτελεσματικότητας ισούται με 81.3% αλλά καθόλου ικανοποιητική για την περίοδο της επαλήθευσης που η αποτελεσματικότητα ισούται με 28.0%. Η βέλτιστη εκτίμηση αποτελεσματικότητας της επαλήθευσης από άλλες ομάδες παραμέτρων βρέθηκε 31% που επίσης δεν θεωρείται αρκετή. Έτσι στη συμβιβαστική λύση υιοθετήθηκε τελικά η πρώτη τιμή. Η παραπάνω αντίφαση μπορεί να εξηγηθεί με έναν από τους δύο παρακάτω τρόπους: ή (1) οι παράμετροι που έχουν προκύψει από τη βαθμονόμηση δεν έχουν φυσική ερμηνεία και άρα το μοντέλο υλοποιεί ένα σύνολο από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς που δεν αποτυπώνουν πραγματικές υδρολογικές διεργασίες, υιοθετεί δηλαδή τη δομή μαύρου κουτιού, ή (2) τα δεδομένα της γέφυρας Καστριού δεν είναι αξιόπιστα. Το πρώτο μάλλον δεν φαίνεται να ευσταθεί σε πρώτη ανάγνωση αν και θα διερευνηθεί διεξοδικότερα στην επόμενη ενότητα. Και αυτό γιατί το ίδιο σύνολο παραμέτρων για τη γέφυρα Κομποτάδων που έχει αξιόπιστες μετρήσεις το μοντέλο έχει άριστη επίδοση. Άρα μάλλον ισχύει αυτό που εξαρχής υποπευόμασταν ως προς την αναξιοπιστία των υδρομετρήσεων του Καστριού.



Διάγραμμα 5.4 Προσομοιωμένη και παρατηρημένη μηνιαία απορροή στη γέφυρα Καστριού.

5.8.2 Φυσική σημασία των παραμέτρων

Η φυσική σημασία των παραμέτρων σε πρώτη φάση εξασφαλίστηκε με τον ορισμό του εύρους του εφικτού χώρου των παραμέτρων. Παρακάτω γίνεται μία πιο διεξοδική διερεύνηση της φυσικής ερμηνείας των εκτιμώμενων παραμέτρων.

Ως προς το επιφανειακό σύστημα:

- Ο συντελεστής άμεσης απορροής φαίνεται να επηρεάζεται από την κλίση και την περατότητα. Σε μικρές κλίσεις και διαπερατά πετρώματα παρατηρείται χαμηλός συντελεστής επιφανειακής απορροής ενώ σε μεγάλες κλίσεις και αδιαπέρατα πετρώματα το αντίθετο. Μάλιστα φαίνεται ότι η κλίση είναι ο πρωτεύων παράγοντας ενώ η περατότητα ο δευτερεύων. Για παράδειγμα οι ΜΥΑ 6,4 λόγω υψηλών κλίσεων έχει συντελεστή άμεσης απορροής περίπου 8.7% και 9.7 αντίστοιχα παρόλο που η ΜΥΑ 6 αναπτύσσεται σε καρστικά πετρώματα, το ίδιο και η ΜΥΑ 3. Η ΜΥΑ 2 παρουσιάζει τον χαμηλότερο συντελεστή άμεσης απορροής αφού οι κλίσεις είναι πολύ μικρές.

Πίνακας 5.12 Συντελεστής άμεσης απορροής των ΜΥΑ

a/a ΜΥΑ	Κλίση	Περατότητα	Συντελεστής άμεσης απορροής
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	9.983%
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	2.984%
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	3.308%
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	9.734%
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	8.753%

- Η χωρητικότητα των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, δηλαδή των ΜΥΑ, θεωρούνται από τις πλέον κρίσιμες και φαίνεται να επηρεάζονται κατά βάση από την περατότητα. Έτσι, οι τιμές τους στις αδιαπέρατες περιοχές είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στις περιοχές καρστικών.

Πίνακας 5.13 Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας

a/a ΜΥΑ	Κλίση	Περατότητα	Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας (mm)
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	700.0
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	700.0
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	487.7
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	700.0
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	487.7

- Ως προς τον συντελεστή στείρευσης της κατείσδυσης είναι προφανές ότι επηρεάζονται από την περατότητα των πετρωμάτων. Μάλιστα η απόκλιση είναι ιδιαίτερα έντονη μεταξύ των τιμών που αφορούν σε προσχωματικά εδάφη (φλύσχης) και καρστικά.

Πίνακας 5.14 Συντελεστής στείρευσης κατείσδυσης

a/a ΜΥΑ	Κλίση	Περατότητα	Συντ/στής στείρευσης κατείσδυσης
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	14.292 %
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	24.882 %
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	40.000%
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	14.388 %
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	40.000 %

- Ως προς την χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής προκύπτουν για τις ΜΥΑ ιδιαίτερα χαμηλές τιμές με εξαίρεση τα καρστικά μεγάλης κλήσης.

Πίνακας 5.15 Χωρητικότητα κατακράτησης βροχής

a/a MYA	Κλίση	Περατότητα	χωρητικότητα κατακράτησης βροχής (mm)
1	15.25%-24.09%	Αδιαπέρατα	3.8
2	0%-10.17%	Ημιπερατά	1.58
3	33.7%-40.95%	Καρστικά	0.0
4	19.8%-28.6%	Αδιαπέρατα	3.8
5	28.6%-33.7%	Ημιπερατά	-
6	40.95%-68.25%	Καρστικά	17.9

- Τέλος, όσον αφορά στις παραμέτρους που αφορούν στην παραγωγή υποδερμικής ροής, δηλαδή την πλευρική ροή που εμφανίζεται κατάντη ως απορροή, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα, καθώς υπάρχει αρκετή ασάφεια ως προς τον ορισμό της εν λόγω διεργασίας

Ως προς το υπόγειο σύστημα:

Λόγω της αδρομερούς σχηματοποίησης του υπόγειου υδροφορέα αποφεύγεται η προσπάθεια φυσικής ερμηνείας των παραμέτρων. Παρόλα αυτά στον παρακάτω πίνακα για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται συνολικά οι τιμές των παραμέτρων των υπογείων, δηλαδή της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των κυττάρων 1 και 2 καθώς και η υδραυλική αγωγιμότητα των πηγών και του εικονικού κυττάρου 3.

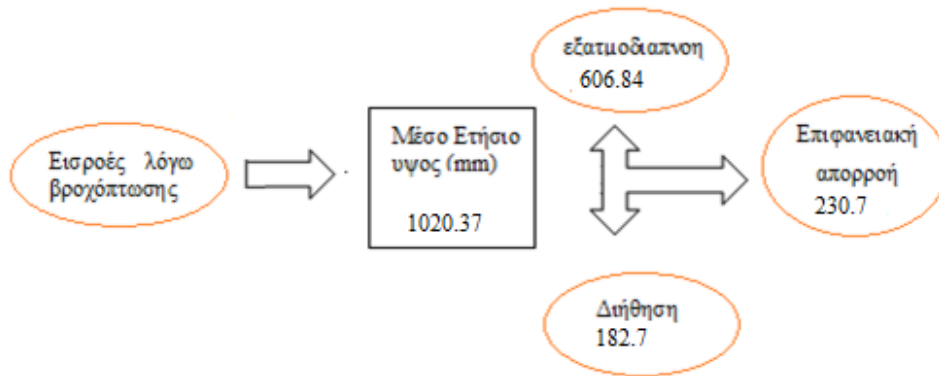
Πίνακας 5.16 Παράμετροι και αρχικές στάθμες υπόγειου συστήματος

Ονομασία	Αρχική Στάθμη (m)	Αγωγιμότητα (m/s)	Πορώδες
Κύτταρο 0	150.000	1E-07	1.894 %
Κύτταρο 1	100.000	1E-07	1.894 %
Κύτταρο 2	30.000	0.194260	-
Πηγή ανάντη Καστριού	150.000	0.135701	-
Πηγή ανάντη Κομποτάδων	100.000	0.164997	-

5.8.3 Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης

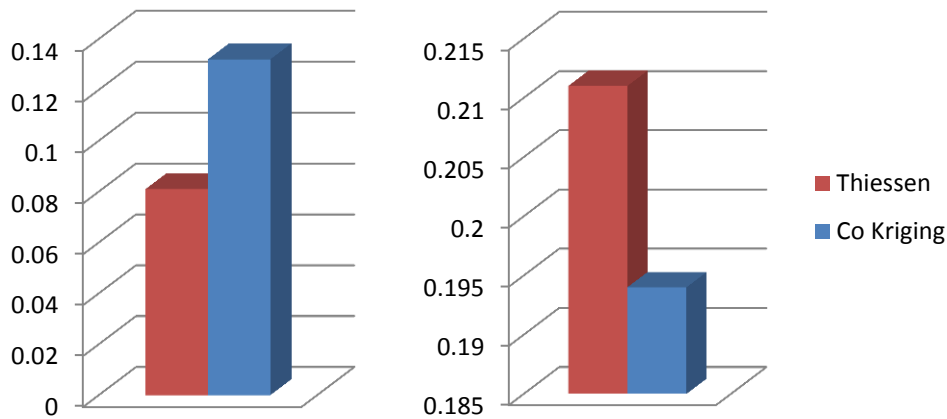
Στο σχήμα 5.4 απεικονίζεται το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης. Διαπιστώνεται ότι η ετήσια απορροή των πηγών είναι κατά 48mm μεγαλύτερη από το μέσο ετήσιο ύψος της

επιφανειακής απορροής. Έτσι λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σενάριο 2 περιγράφει με σχετικά ρεαλιστικό τρόπο τις υδρολογικές διεργασίες.

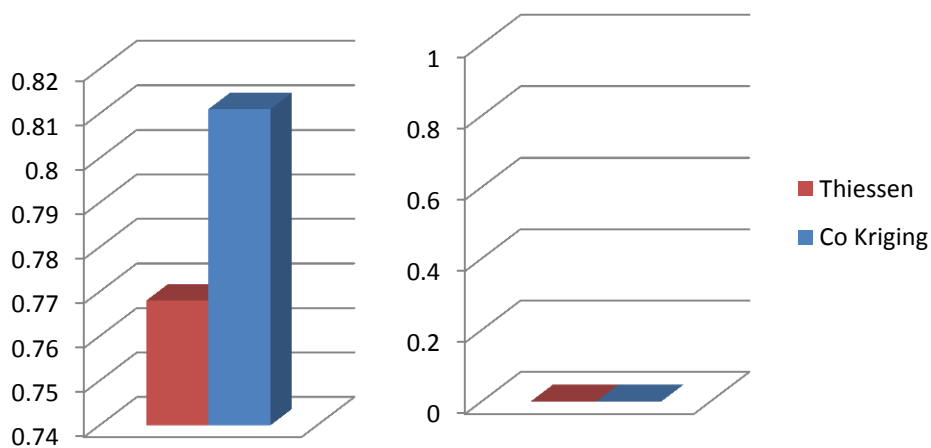


Σχήμα 5.4 Ετήσιο Υδρολογικό Ισοζύγιο περιοχής ελέγχου για Σενάριο 2

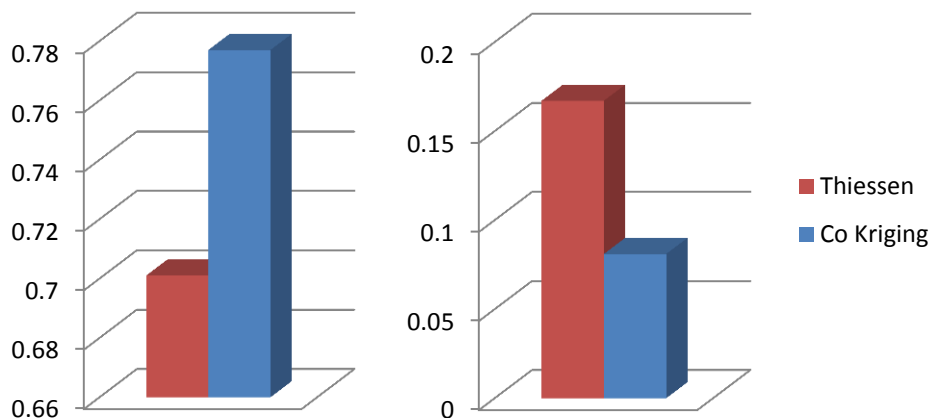
5.10 Συγκριτική διαγραμματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων



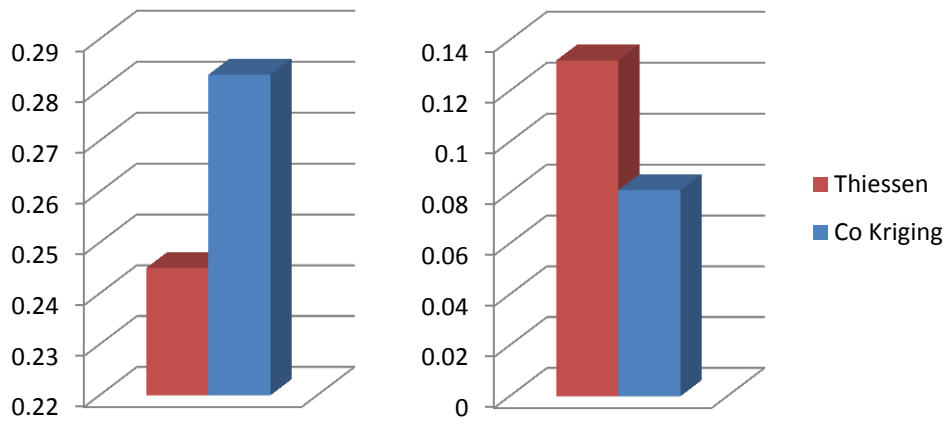
Διάγραμμα 5.5 Αποτελεσματικότητα και μεροληψία μέσω της βαθμονόμησης στους Κομποτάδες



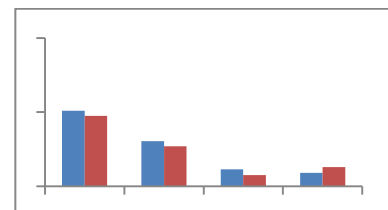
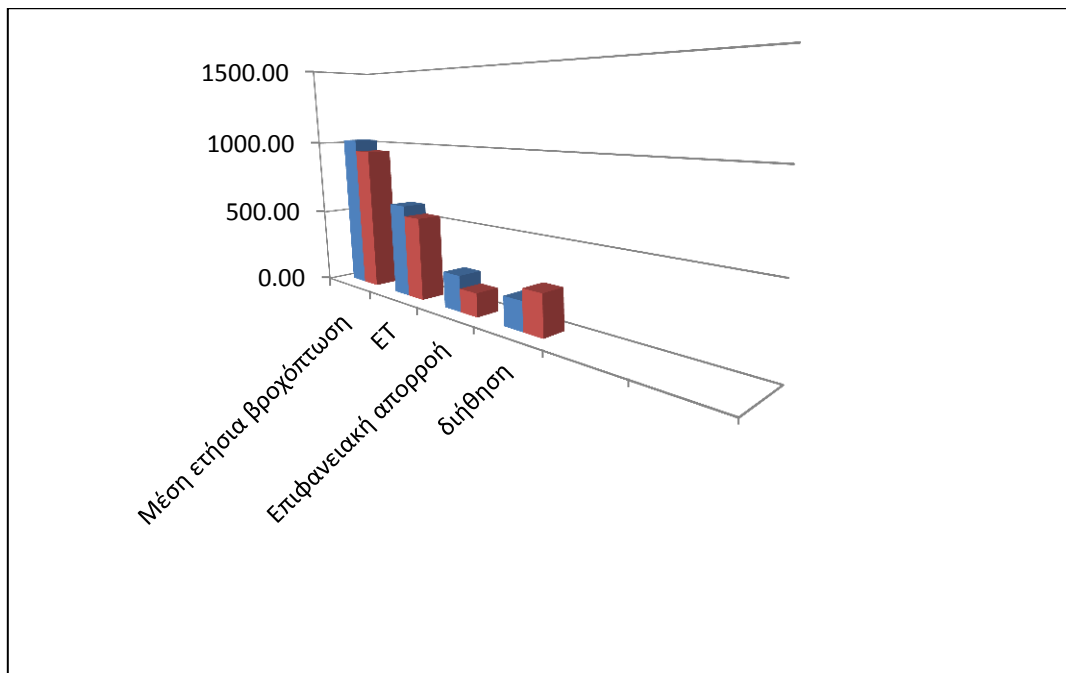
Διάγραμμα 5.6 Αποτελεσματικότητα και μεροληψία της βαθμονόμησης στο Καστρί



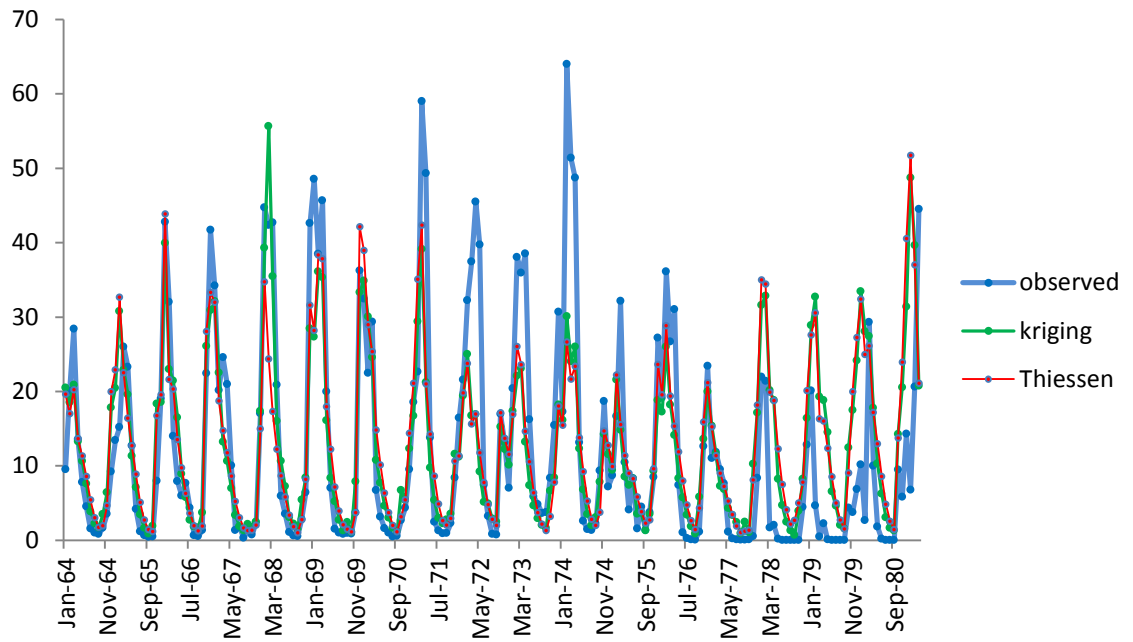
Διάγραμμα 5.6 Αποτελεσματικότητα & μεροληψία της επαλήθευσης στους Κομποτάδες



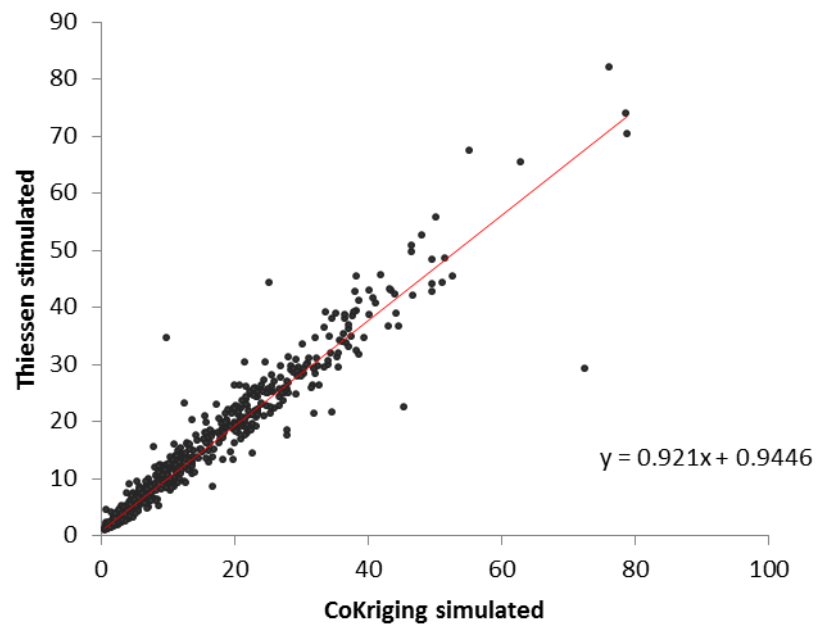
Διάγραμμα 5.6 Αποτελεσματικότητα και μεροληψία της επαλήθευσης στο Καστρί



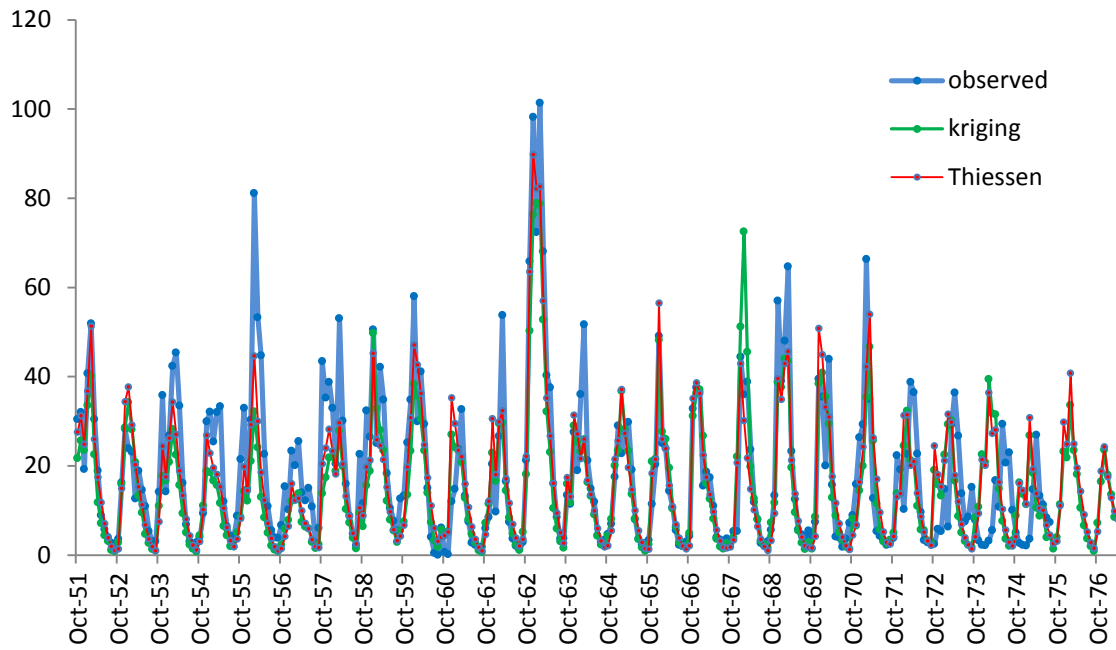
Διάγραμμα 5.11 Μέσο Ετήσιο Υδατικό Ισοζύγιο



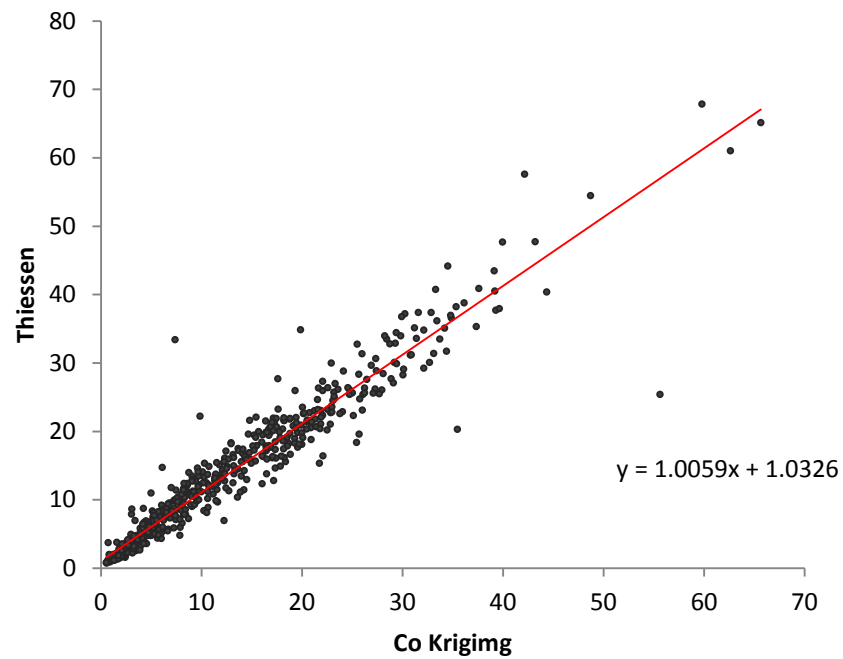
Διάγραμμα 5.10 Προσομοιωμένες τιμές απορροής Καστριού



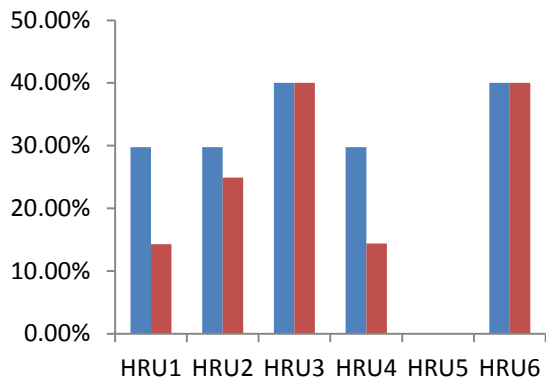
Διάγραμμα 5.8 Προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής Καστρί



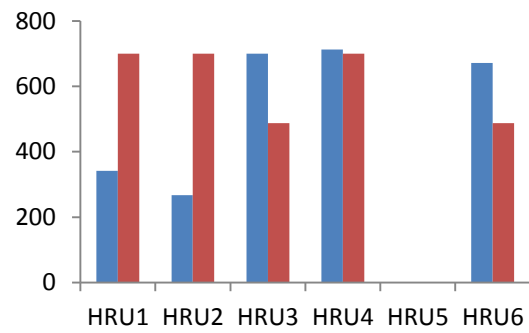
Διάγραμμα 5.7 Προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής Κομποτάδων



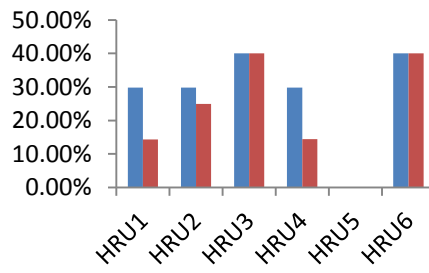
Διάγραμμα 5.9 Προσομοιωμένες τιμές απορροής Κομποτάδων



Συντελεστής άμεσης απορροής



Χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας



Συντελεστής στείρευσης της κατείσδυση

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας είναι τα ακόλουθα

- Τα πεδία βροχόπτωσης παρουσιάζουν γεωμετρική ανισοτροπία. Όπως φαίνεται από τη διερεύνηση των δεδομένων, αυτό οφείλεται σε δύο αιτίες: (1)τη διασπορά των σημειακών δεδομένων σε διαφορετικά υψόμετρα αλλά οριζοντιογραφικά κοντά (μικρό μέτρο διανύσματος απόστασης) (2) την κίνηση των μετώπων βροχής που αναπόφευκτα δημιουργούν μία ενιαία τάση ως προς κάποια διεύθυνση (BN, ΑΔ)
- Η ανισοτροπία λόγω υψομετρικών διαφορών ελήφθη εμμέσως υπόψη με την εφαρμογή τελικά της μεθόδου Co Kriging που βελτίωσε σημαντικά τις επιδόσεις της προσαρμογής των πεδίων σε σχέση με το Ordinary Kriging, ενώ η ανισοτροπία λόγω ύπαρξης τάσης δεν συνυπολογίστηκε.
- Η προσαρμογή των τυχαίων πεδίων Co Kriging κρίνεται ικανοποιητική για τους χειμερινούς μήνες μετά το πέρας της διαδικασίας της χιαστί επαλήθευσης αλλά όχι και για τους καλοκαιρινούς όπου η ύπαρξη εξαιρετικά χαμηλών σημειακών δεδομένων (πολλές φορές μηδενικών) οδηγεί σε υπερεκτίμηση του υψους βροχής
- Η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης εισέρχεται στο μοντέλο μέσω των χρονοσειρών που προέκυψαν από την μέθοδο Co Kriging
- Η διαδικασία της συνδυασμένης προσομοίωσης μονάχα με δεδομένα του επιφανειακό μοντέλο είναι εξαιρετικά δύσκολη και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής αφού συχνά οδηγεί σε απρόσμενα καλή βαθμονόμηση που είναι απόρροια λειτουργίας υπόγειου με δομή μαύρου κουτιού χωρίς εννοιολογική σημασία.
- Η περαιτέρω διερεύνηση της φυσικής σημασίας των παραμέτρων που βαθμονομούνται κρίνεται απαραίτητη και γίνεται εφόσον διαπιστωθεί ότι το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο είναι ρεαλιστικό
- Πολλαπλοί συνδυασμοί παραμέτρων καταλήγουν στην ίδια επίδοση του μοντέλου.
- Η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης επιδρά στην προσαρμογή του μοντέλου και αυτό αποτυπώνεται στην περιγραφή του υδατικού ισοζυγίου.
- Η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης δεν φαίνεται ότι επηρεάζει τη διαδικασία της βαθμονόμησης με βάση τον έλεγχο των κριτηρίων επίδοσης .
- Η μέθοδος Thiessen στη συγκεκριμένη εφαρμογή οδηγεί σε μη αποδεκτό υδατικό ισοζύγιο

- Η μέθοδος Kriging στη συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζει πιο ρεαλιστική εικόνα του υδατικού ισοζυγίου.

Προτάσεις:

- Προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της βροχής ως προς τα εξαγόμενα της βαθμονόμησης σε συνδυασμένα υδρολογικά μοντέλα. Έτσι θα διαπιστωθεί αν ακόμα και μετά την εισαγωγή ενός ρεαλιστικότερου υπόγειου μοντέλου θα οδηγηθούμε και πάλι σε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις προσωμοιωμένες φυσικές διεργασίες.
- Τα πεδία Kriging κατάφεραν να εισαγάγουν με ένα πιο επαρκή τρόπο την χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης σε ένα μοντέλο. Ο υπολογιστικός φόρτος της παραγωγής των πεδίων είναι εξαιρετικά μεγάλος καθώς η εξαγωγή του κάθε μήνα θέλει ξεχωριστή προσαρμογή. Αυτός είναι και ο λόγος που η μέθοδος Kriging σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να προταθεί για αντικατάσταση της απλούστερης και υπολογιστικά εξαιρετικά γρήγορης μεθόδου Thiessen. Έτσι, προτείνεται η ίδια διερεύνηση του ζητήματος με εφαρμογή μηνιαίας βροχοβαθμίδας.
- Στην περίπτωση εξαγωγής πεδίων Kriging κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των σημειακών δεδομένων για να απαλλαγθούν από μη επιθυμητά στατιστικά χαρακτηριστικά και να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την κανονική κατανομή ώστε η μέθοδος να εξάγει ομογενές και βέλτιστο πεδίο. Επιπλέον, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς η ανισοτροπίας του πεδίου ως προς την κίνηση των μετώπων βροχής. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσπάθεια περιγραφής της ανισοτροπίας ως μίας καθολικής τάσης που εισαγεται συμπληρωματικά στους υπολογισμούς.

7 Βιβλιογραφία

1. Abbaspour, K.C., (2004), Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated, *Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology*
2. Andréassian V., Lerat J., Loumagne C., Mathevet T., Michel C., Oudin L. & Perrin C., 2007, *What is really undermining hydrologic science today?*
3. Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L., and Dominguez, R. 2002, Influence of rainfall spatial variability on flood prediction, *Journal of Hydrology*
4. Bardossy, A., and J. Plate, 1992, *Space-time model for daily rainfall using atmospheric simulation patterns, Water Resour. Res. 28*
5. Beven, K. J., 2002, Towards an alternative blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response modelling system, *Hydrol. Process*
6. Blazkova Sarka & Beven Keith, (2002), Use of distributed data to reduce uncertainty in flood runoff predictions, *T.G. Masaryk Water Research Institute, Prague, Czech Republic Environmental Science, Lancaster University, UK*
7. Boutsikas Michael, (2001), Notes from the post graduated class, Regression analysis, *University of Pireus.*
8. Büttner, G., G. Feranec and G. Jaffrain, (2006). CORINE Land Cover nomenclature illustrated guide
9. Chiang Shen , Yasuto Tachikawa & Takara Kaoru, (2007), Hydrological model performance comparison through uncertainty recognition and quantification, *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan*
10. Christopoulos Dionissios T., (2003), Spartan Gibbs random fields models for geostatistical applications, *Society for industrial and applied Mathematics*
11. Cressie a. C. Noel, (1993) Random fields, statistics for Spatial Data, *Stanford Univerisity, California*
12. Duncan B.N., West J.J., Yoshida Y., Fiore, A.M, Ziemke, J,R., The influence of European pollution on ozone in the Near East and northern Africa, *Goddard Earth Sciences and Technology Center, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD, USA*
13. Fiedler Fritz R. , (2003), Simple, Practical Method for Determining Station Weights
14. Finnerty, B. D., Smith, M. B., Seo, D .J., Koren, V. and Moglen, G. E. 1997. Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs. *Journal of Hydrology*
15. Flügel Wolfgang-Albert (1996) Hydrological response units as modeling entities for hydrological river basin simulation and their methodological potential for modeling

- complex environmental process systems-Results from the Sieg catchment, *Friedrich-Schiller-University of Jena, Dept. Geoinformatics, Hydrology and Modelling, Germany*
16. Hughson Lance, Huntley David & Razack M, (1995), CoKriging limity Transmissitivity Data using widely sampled specific capacity from pump tests in an alluvial aquifer, *Department of Geological sciences, San Diego State University, now at New Mexico*
 17. Kraweski, F.W, Lakshmi, V., Georgakakos, K.P & Subhash, C.J. (1991) A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model.
 18. Lavabre, 2001: Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models.
 19. Liang, X., Guo, J. and Leung L.R., 2004. Assesment oft he effects of spatial resolutions on daily water flux simulations, *University of Illinois*
 20. Michael Boutsikas, (2011), Notes from the post graduated class, Stochastic processes, *University of Pireus*
 21. Myers Donald, (1958), Co-Kriging: Methods and alternatives, *Department of Mathematics, university of Arizona, Tuscon, Arizona, U.S.A*
 22. Ogden, F.A. and Julien, P.Y. 1994. Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution. *Journal of Hydrology*
 23. Seibert, J. 1997, *Estimation of parameter Uncertainty in the HBV Model, Nordic Hydrology*
 24. Syed, K.H., Goodrich, D.C., Myers, D.E and Sorooshian., S., 2003. *Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff.*
 25. Weiss M.& Menzel, (2008), A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modeling in semi-arid environments, *Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany*
 26. Willcox Karen, (2008), Approximation Methods, *Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Aeronautics and Astronautics*
 27. Yates D., Strzepek K., (July 1994) Potential Evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin under climate change, *International Institute for applied System Analysis, Laxenburg, Austria*
 28. Yuan Lin & Kalbfleisch John D., (1999), On the Bessel distribution and related problems, *Department of statistics, University of Waterloo, Ontario, Canada*
 29. Zehe, E., Becker, R., Bárdossy, A. and Plate, E., 2005, Uncertainty of simulated catchment runoff

1. Ευστρατιάδης, Α., (2008), Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, *Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*
2. Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, (2009), Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης - Θεωρητική τεκμηρίωση, *Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*
3. Κακαβάς Ν. Ι., (1984), Υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού, *Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα*
4. Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4), (2010), *Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*
5. Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ. Τεχνική Υδρολογία, *Τομέας υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*
6. Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., Ευστρατιάδης Α., (2003), *Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού, Εθνικό μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*
7. Μακρόπουλος, Χ., και Α. Ευστρατιάδης, (2011), Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων και Υδροπληροφορικής, *Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,*
8. Ρόζος, Ε.,(2010), Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας, *Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα*
9. Τσιούμας Β., Ζοραπας Β., (2010), Υδρογεωλογική μελέτη. Υδατικό Διαμέρισμα Αν. Στερεάς Ελλάδος (δυτ.07), *Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα*

8 Παράρτημα

Παρακάτω παρατήθενται οι χρονοσειρές της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης όπως αυτές προέκυψαν από τη μέθοδο Co Kriging για την περίοδο 1951-2000. Χρησιμοποιήθηκαν και οι 14 βροχοσταθμοί της ευρύτερης περιοχής, ενώ τα υψόμετρα προέκυψαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM). Επίσης δίνονται και τα διαγράμματα σύγκρισης με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τη μέθοδο Thiessen

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W120												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	284.97	147.49	94.99	164.94	164.94	55.77	23.61	23.61	27.14	40.28	6.73	11.13
1952-53	61.77	190.46	194.45	153.03	87.75	78.92	58.42	79.13	18.88	19.65	9.81	14.30
1953-54	162.45	159.51	81.05	112.90	145.26	115.22	85.95	59.01	22.98	6.09	10.69	6.05
1954-55	81.97	127.11	155.76	91.70	71.67	89.27	69.50	25.28	37.48	12.56	38.20	106.60
1955-56	121.77	133.71	56.79	111.72	168.94	103.76	44.02	51.65	34.49	6.28	7.80	10.66
1956-57	42.90	79.96	71.32	85.16	72.62	100.03	21.25	63.31	87.98	41.23	21.43	55.19
1957-58	186.83	136.27	127.18	98.51	64.90	182.37	103.64	60.90	63.05	33.55	2.52	184.01
1958-59	73.11	151.00	116.44	288.18	60.87	113.59	132.14	69.09	60.19	88.56	43.37	103.32
1959-60	109.44	131.00	159.05	202.86	120.78	122.40	113.57	92.66	35.96	1.72	8.09	121.53
1960-61	64.94	55.19	245.98	103.76	88.68	101.84	56.31	43.27	31.30	27.58	4.21	4.04
1961-62	120.29	129.42	179.50	55.95	164.04	164.04	51.92	47.14	27.21	11.48	3.81	106.41
1962-63	228.71	335.34	342.46	258.45	222.42	116.96	73.66	110.68	29.01	27.37	15.44	9.18
1963-64	197.32	56.21	214.71	94.34	82.59	142.68	89.34	108.49	79.10	18.54	13.73	23.56
1964-65	83.40	101.81	192.83	125.77	183.07	113.30	124.14	86.98	60.67	22.30	0.64	0.80
1965-66	49.14	217.76	123.81	268.10	40.12	127.94	124.14	65.39	52.99	7.87	19.77	36.12
1966-67	93.74	311.73	192.88	144.33	52.94	38.69	88.22	68.11	8.83	8.83	16.92	61.84
1967-68	43.04	46.93	222.90	301.41	301.41	95.38	24.49	75.86	61.62	0.00	25.12	21.58
1968-69	116.75	114.65	275.56	141.21	152.93	183.46	32.62	20.65	29.78	13.02	4.71	66.98
1969-70	19.31	114.58	290.64	155.60	111.56	129.89	27.74	57.52	34.09	36.35	24.19	24.19
1970-71	137.67	70.17	130.85	149.39	190.83	261.76	57.45	25.99	6.21	6.21	29.39	66.31
1971-72	77.46	149.46	88.92	152.67	136.25	80.37	140.34	69.01	26.00	87.14	53.50	57.33
1972-73	225.07	92.85	43.23	134.19	134.19	142.78	77.48	45.04	30.36	29.77	35.36	34.98
1973-74	142.54	106.86	173.98	85.71	193.45	120.28	169.58	77.00	29.57	7.77	10.99	73.35
1974-75	134.84	173.50	71.93	46.38	176.33	91.62	54.55	76.00	148.13	23.52	70.43	10.40
1975-76	80.44	140.84	181.84	179.60	157.76	75.72	99.41	51.07	41.74	34.14	16.82	7.54
1976-77	120.99	152.63	138.77	56.28	60.64	33.56	81.75	48.04	56.20	52.84	13.05	76.15
1977-78	18.31	149.20	170.43	232.24	144.90	80.53	109.96	21.42	8.22	3.39	5.04	5.04
1978-79	89.35	117.21	177.09	211.60	147.27	51.64	112.29	112.29	29.41	49.94	11.37	25.11
1979-80	202.19	164.55	162.51	191.06	92.05	145.55	82.24	73.29	35.95	9.13	7.70	17.50
1980-81	254.19	169.83	225.00	306.86	115.21	52.81	87.59	38.73	11.98	13.92	26.85	53.56
1981-82	97.25	130.14	248.08	63.27	149.03	180.66	119.78	114.22	39.32	5.90	11.14	32.27
1982-83	84.33	180.50	128.52	43.14	118.72	111.78	42.44	39.55	104.82	68.36	35.53	24.19
1983-84	75.89	172.85	204.98	108.26	200.05	137.91	153.85	68.75	8.48	8.48	73.40	20.55
1984-85	5.24	144.81	127.55	293.15	70.10	141.48	107.07	33.51	13.70	12.86	1.95	4.36
1985-86	79.95	250.05	55.24	134.15	193.79	102.78	79.97	84.01	56.50	56.50	14.28	14.46
1986-87	141.51	141.51	136.66	162.04	89.16	97.67	97.67	47.47	48.85	11.98	15.07	4.06
1987-88	139.41	167.64	109.08	106.81	158.73	107.63	64.25	30.41	12.09	0.27	6.13	14.93
1988-89	44.95	280.07	149.12	106.81	8.97	137.92	70.46	76.23	34.48	52.57	9.94	22.93
1989-90	112.66	99.78	106.48	9.83	76.28	29.44	111.15	54.61	8.65	8.36	88.17	11.85
1990-91	55.79	157.09	357.12	130.46	130.46	88.97	143.43	98.11	8.72	14.19	55.22	3.34
1991-92	57.15	57.15	71.12	19.60	43.15	78.77	117.13	107.11	52.65	21.96	1.31	14.70
1992-93	79.26	89.54	113.06	49.02	49.02	98.50	42.55	105.56	26.42	2.74	2.22	11.65
1993-94	17.03	221.35	221.35	159.47	159.47	45.97	115.35	98.48	20.86	43.88	20.12	20.12
1994-95	267.84	162.32	135.19	172.85	76.04	76.04	86.21	47.98	17.98	73.49	36.31	64.31
1995-96	43.41	90.20	202.38	138.83	190.98	162.00	74.41	60.59	14.41	23.03	48.91	35.25
1996-97	132.14	123.13	164.13	205.30	104.92	120.14	98.90	66.52	22.85	6.58	35.30	18.79
1997-98	80.65	73.84	187.74	82.73	120.18	98.37	42.93	95.75	21.82	5.23	11.07	46.29
1998-99	51.46	211.84	175.04	90.17	93.18	91.77	90.40	33.29	16.78	16.85	13.45	45.55
1999-00	103.85	243.89	135.41	67.41	154.70	71.59	43.19	40.87	19.31	11.89	9.39	23.93
2000-01	99.30	83.35	119.25	147.97	129.08	70.28	85.94	47.22	16.29	47.98	26.01	21.26

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W130												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	274.32	132.74	96.62	163.48	163.48	57.13	16.17	16.17	26.97	40.07	6.72	10.33
1952-53	45.07	158.39	196.22	135.02	66.76	77.70	44.38	65.74	16.94	18.93	9.60	11.10
1953-54	161.97	151.84	83.03	125.11	119.08	92.48	65.40	39.83	17.80	5.97	10.49	6.31
1954-55	82.22	123.80	153.59	83.96	40.27	90.44	70.09	11.82	37.05	12.28	34.46	105.83
1955-56	123.33	133.14	56.23	151.04	166.89	104.40	32.49	31.79	31.18	6.19	7.60	8.56
1956-57	43.35	80.81	70.54	106.63	58.16	95.22	18.70	42.41	90.67	39.95	19.21	45.18
1957-58	188.67	121.80	127.48	95.90	62.40	135.77	75.91	43.51	62.02	31.27	1.67	191.25
1958-59	63.26	155.20	107.88	286.15	49.38	112.76	117.97	50.99	56.77	55.37	32.27	104.97
1959-60	76.98	129.55	119.70	161.37	117.65	118.51	86.73	77.53	35.68	2.36	10.01	105.77
1960-61	42.41	50.17	212.42	103.63	75.60	102.53	46.09	32.97	30.91	26.87	3.06	5.40
1961-62	121.71	96.29	167.70	55.22	158.97	158.97	23.15	32.59	25.21	9.59	4.09	105.91
1962-63	183.41	233.93	335.71	216.10	139.92	109.70	50.52	109.52	25.85	26.04	11.84	9.25
1963-64	199.21	53.53	125.53	99.28	79.64	122.43	45.02	94.39	61.15	14.31	10.53	24.16
1964-65	65.94	81.13	97.10	104.11	173.54	113.14	80.95	70.16	59.39	5.36	0.41	0.76
1965-66	42.44	163.75	97.84	258.34	35.15	123.92	80.95	47.76	33.59	7.75	19.84	29.25
1966-67	86.42	249.97	131.74	104.96	52.48	44.03	56.03	58.40	4.49	4.49	17.05	49.10
1967-68	42.08	61.62	176.59	284.02	284.02	94.49	17.69	56.46	41.05	0.20	24.67	21.57
1968-69	112.18	115.76	277.19	140.56	104.15	152.97	22.65	17.69	14.84	4.87	4.98	47.08
1969-70	19.37	56.02	247.65	127.22	102.76	123.60	14.17	58.58	33.98	38.41	23.76	23.76
1970-71	105.02	41.35	99.00	112.26	168.05	196.33	57.45	21.80	6.47	6.47	29.39	51.83
1971-72	79.77	97.60	68.20	150.97	126.55	55.63	104.98	44.29	23.27	85.14	53.78	40.80
1972-73	205.15	76.52	44.37	137.22	137.22	135.69	43.48	26.82	25.59	28.83	34.79	18.80
1973-74	118.75	87.02	147.19	85.55	194.59	117.48	112.69	44.88	28.42	6.72	10.44	30.65
1974-75	87.57	96.97	58.33	41.48	179.61	52.30	37.32	59.22	137.26	14.96	69.49	6.81
1975-76	42.39	107.28	155.44	108.02	159.65	67.51	79.09	44.54	30.56	25.17	17.69	5.06
1976-77	96.27	116.88	107.06	32.82	33.29	27.68	80.67	28.96	37.93	40.48	5.67	55.75
1977-78	18.84	85.74	174.15	229.58	139.40	68.13	84.28	19.53	7.66	3.16	5.50	5.50
1978-79	88.45	115.55	136.97	149.33	108.65	34.77	85.64	85.64	28.64	51.38	11.42	18.15
1979-80	202.09	155.00	135.39	153.38	97.91	139.90	69.32	42.26	32.89	4.75	7.52	15.14
1980-81	249.09	129.07	143.84	306.76	88.66	21.32	65.96	23.73	10.59	11.28	18.26	49.33
1981-82	73.75	117.12	133.26	61.91	151.10	182.91	110.59	113.73	38.17	5.91	11.60	31.78
1982-83	52.98	163.59	91.23	42.28	116.93	113.06	40.95	28.37	103.63	72.56	35.23	15.45
1983-84	72.00	152.90	204.93	81.21	208.12	133.38	154.25	43.39	10.82	10.82	51.18	10.17
1984-85	18.43	115.19	130.67	280.63	58.38	114.43	81.02	33.68	9.92	13.26	2.07	7.53
1985-86	82.60	214.20	55.30	98.16	139.05	96.79	32.04	71.81	57.20	57.20	19.28	13.85
1986-87	141.45	141.45	129.64	128.98	86.53	97.25	97.25	34.78	47.02	11.34	15.43	3.66
1987-88	130.62	145.10	89.65	96.10	130.54	91.68	50.46	31.42	9.19	0.26	3.70	8.83
1988-89	46.41	255.62	149.11	96.10	10.10	141.49	36.12	74.01	34.73	52.66	10.11	23.41
1989-90	107.65	95.33	101.17	8.36	57.27	28.83	111.94	52.95	14.47	8.68	88.25	17.88
1990-91	51.47	177.92	303.58	137.24	137.24	86.40	142.64	83.45	6.23	14.23	55.42	4.07
1991-92	49.40	49.40	70.97	22.09	50.22	66.93	90.97	104.62	52.99	21.02	1.05	9.02
1992-93	48.12	51.30	101.91	45.57	45.57	80.15	40.15	103.74	20.70	2.71	2.20	6.73
1993-94	7.94	221.89	221.89	145.66	157.73	42.36	81.02	93.64	18.15	44.32	19.98	19.98
1994-95	260.90	132.40	101.87	164.39	62.02	62.02	64.69	29.10	17.35	71.39	34.62	56.18
1995-96	32.81	65.42	160.00	139.81	168.31	160.95	54.72	58.35	10.67	17.30	47.55	33.65
1996-97	112.90	65.13	152.20	207.23	101.31	121.95	73.55	52.88	18.25	5.31	37.81	11.32
1997-98	74.29	111.23	153.61	62.13	94.66	97.02	24.53	93.86	21.82	2.18	5.84	42.55
1998-99	36.56	212.13	140.65	69.98	73.19	90.51	43.82	24.99	15.78	17.08	13.20	32.97
1999-00	88.61	178.84	100.32	45.52	146.98	52.46	23.97	36.91	18.56	11.66	4.47	17.50
2000-01	92.14	70.60	89.26	145.31	105.21	65.94	78.66	41.78	11.85	48.70	26.66	13.41

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W140												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	276.35	131.94	94.29	164.11	164.11	55.61	18.48	18.48	27.23	39.59	6.79	10.45
1952-53	47.63	163.20	194.53	134.65	70.87	77.60	47.14	71.54	17.05	19.37	9.93	11.78
1953-54	161.55	153.05	82.05	121.20	124.49	98.67	69.79	44.10	18.11	6.08	10.65	6.12
1954-55	81.89	123.80	149.55	84.48	45.72	89.00	70.72	15.17	37.52	12.40	37.38	106.95
1955-56	123.36	131.98	55.04	128.15	164.60	103.16	35.24	37.00	32.01	6.29	7.78	8.96
1956-57	43.18	79.99	69.31	90.56	60.36	96.10	19.97	46.25	91.48	40.24	19.75	47.89
1957-58	189.41	124.52	124.91	93.95	62.06	140.63	80.36	49.94	62.82	31.86	1.97	191.58
1958-59	65.61	154.78	108.25	277.15	50.55	112.42	121.38	57.07	58.11	66.13	35.75	105.03
1959-60	81.93	129.11	123.08	162.46	119.28	118.82	90.87	81.40	35.96	1.91	9.91	110.77
1960-61	45.16	49.45	212.89	102.23	77.50	101.64	48.31	35.56	31.10	26.20	3.49	4.76
1961-62	121.42	104.03	168.07	55.02	157.40	157.40	28.00	35.10	25.38	10.11	4.25	107.30
1962-63	191.66	250.94	338.64	218.91	156.26	109.27	54.09	108.25	26.47	26.10	12.64	9.06
1963-64	198.46	53.73	136.38	95.42	79.20	129.07	55.52	99.63	64.61	15.46	11.06	24.09
1964-65	68.62	84.98	109.74	100.86	172.83	110.21	89.37	74.05	60.47	9.88	0.53	0.68
1965-66	43.41	161.65	98.24	249.60	32.58	123.57	89.37	51.82	39.10	7.40	20.40	30.95
1966-67	86.95	257.32	136.98	108.68	51.45	39.80	61.92	62.34	5.52	5.52	16.76	51.70
1967-68	42.04	55.67	182.93	281.71	281.71	93.66	19.75	61.60	43.11	0.15	24.53	21.68
1968-69	111.39	115.21	277.10	137.98	105.05	161.79	24.81	18.65	17.84	5.92	4.85	52.69
1969-70	18.82	59.58	241.68	125.88	102.22	125.59	16.59	59.29	33.83	38.34	23.55	23.55
1970-71	109.33	44.47	97.92	120.89	170.07	207.78	56.51	21.73	5.48	5.48	29.43	55.61
1971-72	78.87	102.54	71.14	148.71	127.19	60.52	111.33	48.17	24.12	84.93	53.74	45.26
1972-73	206.20	80.45	43.64	135.42	135.42	136.70	49.54	32.46	26.49	29.19	35.40	22.55
1973-74	121.88	89.94	151.16	83.70	193.35	115.45	124.40	50.79	28.19	7.13	10.77	39.32
1974-75	90.90	109.95	60.87	42.24	181.35	59.12	41.72	61.52	142.69	16.37	69.61	7.76
1975-76	45.47	115.40	158.46	108.30	161.14	69.43	85.07	45.51	32.38	27.84	18.00	5.64
1976-77	98.71	115.70	107.12	34.83	40.22	28.54	80.83	34.50	42.26	44.00	6.59	60.05
1977-78	18.94	92.18	173.69	227.95	139.23	69.67	86.36	19.10	7.86	3.34	5.14	5.14
1978-79	88.81	114.60	144.52	156.91	112.01	35.05	88.69	88.69	28.77	50.92	11.37	20.53
1979-80	200.98	155.73	136.90	158.42	92.07	140.71	70.16	49.35	33.27	5.70	7.52	15.05
1980-81	250.69	132.47	147.19	300.13	92.23	27.74	69.60	24.01	11.46	12.61	20.70	51.13
1981-82	77.24	117.55	142.87	62.26	148.67	184.33	112.50	114.18	38.97	6.07	11.51	31.89
1982-83	60.86	165.15	95.51	40.95	113.73	111.80	40.97	30.77	102.93	70.63	35.50	17.80
1983-84	71.34	153.56	202.12	81.92	199.28	132.51	153.53	50.11	9.39	9.39	58.13	10.89
1984-85	12.90	115.72	123.81	275.79	59.93	117.75	86.93	33.87	10.51	13.03	1.95	6.09
1985-86	81.31	219.45	55.10	97.28	148.80	95.83	40.10	75.70	57.39	57.39	17.56	13.36
1986-87	140.73	140.73	130.38	131.10	85.41	97.40	97.40	36.55	47.08	11.79	15.60	3.65
1987-88	133.71	145.80	90.90	97.60	131.00	93.79	53.01	31.30	9.84	0.26	4.57	9.85
1988-89	46.13	257.87	145.90	97.60	9.99	140.71	41.97	72.08	34.34	52.27	9.83	23.03
1989-90	107.24	95.26	102.35	8.42	62.21	28.38	106.42	52.41	14.47	8.71	87.86	15.21
1990-91	51.65	169.21	310.94	133.08	133.08	85.67	140.19	86.52	6.58	14.37	54.06	3.77
1991-92	49.39	49.39	69.75	20.74	45.61	67.09	96.26	103.98	51.62	21.02	1.15	9.92
1992-93	54.03	57.15	102.94	43.74	43.74	81.47	39.97	100.70	22.55	2.68	2.18	7.47
1993-94	10.75	219.82	219.82	147.05	147.05	42.65	85.94	93.22	18.74	43.21	19.99	19.99
1994-95	262.82	137.72	105.14	159.01	64.25	64.25	69.66	33.48	17.78	70.11	35.06	58.27
1995-96	33.88	69.78	167.45	138.47	172.39	159.02	58.35	58.49	11.49	17.62	47.56	34.00
1996-97	119.34	76.52	150.88	204.97	97.78	120.30	76.89	56.53	18.80	5.75	37.69	12.93
1997-98	74.29	102.24	160.25	64.08	98.68	97.16	27.72	95.64	21.52	2.73	7.13	43.35
1998-99	40.46	209.15	145.92	70.40	75.08	88.73	43.70	26.50	15.07	17.36	13.24	36.34
1999-00	91.73	189.62	105.43	46.62	147.51	55.50	27.65	38.38	18.72	11.95	6.12	19.07
2000-01	94.02	72.18	91.00	143.52	109.07	66.85	80.64	41.76	12.63	48.42	26.55	14.92

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W150												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	275.70	146.16	96.14	162.98	162.98	57.26	16.51	16.51	27.23	39.79	6.83	10.39
1952-53	50.40	172.20	195.94	148.46	69.94	77.70	48.68	64.55	17.63	18.27	9.60	12.08
1953-54	162.03	151.57	82.06	121.08	124.80	95.49	71.42	44.52	20.68	5.81	10.55	6.29
1954-55	81.37	123.55	151.90	86.37	45.81	90.24	69.26	13.52	37.52	12.41	32.08	105.18
1955-56	123.92	133.62	55.14	156.04	166.78	103.92	34.88	33.58	31.81	6.03	7.51	9.16
1956-57	43.01	80.37	69.45	108.21	62.37	95.38	18.14	47.54	90.44	39.40	20.51	46.28
1957-58	187.76	125.39	126.59	97.81	62.11	159.68	88.10	42.55	61.38	31.49	1.61	187.33
1958-59	64.91	155.81	111.36	292.15	52.19	111.29	121.63	51.63	57.21	52.73	33.02	104.57
1959-60	90.53	129.37	144.91	191.81	117.83	119.47	95.37	81.38	35.33	2.57	9.04	106.85
1960-61	50.58	54.10	235.77	103.49	78.72	102.09	48.01	34.81	30.69	26.53	3.07	5.58
1961-62	121.43	109.25	175.93	54.97	161.86	161.86	33.16	37.55	25.80	9.82	4.37	105.23
1962-63	197.59	290.41	337.04	235.57	167.28	112.80	60.52	109.63	25.98	26.18	13.04	9.37
1963-64	198.71	54.08	171.14	98.32	80.31	126.57	51.49	93.88	67.02	14.55	11.73	24.37
1964-65	71.15	92.43	139.91	125.38	175.88	115.40	92.05	74.44	58.94	5.27	0.42	0.77
1965-66	43.41	218.12	119.57	285.46	44.04	125.41	92.05	50.76	36.09	7.90	20.16	30.47
1966-67	87.96	286.45	164.75	108.68	51.45	45.94	68.24	57.77	4.99	4.99	16.72	50.90
1967-68	41.87	59.91	203.23	291.11	291.11	94.18	18.13	58.43	51.27	0.15	24.65	21.45
1968-69	115.30	117.14	277.10	141.70	143.74	158.10	24.86	18.51	18.23	7.91	4.91	47.07
1969-70	19.27	93.33	303.16	125.88	109.83	123.62	19.21	59.36	34.67	38.52	23.36	23.36
1970-71	109.33	54.96	125.64	120.02	181.56	221.76	55.70	25.21	7.50	7.50	28.82	54.07
1971-72	80.89	128.44	78.93	150.60	129.16	62.45	114.05	56.59	23.55	83.84	53.67	43.80
1972-73	219.62	80.09	44.29	138.50	138.50	137.08	55.28	28.37	27.34	29.50	34.96	23.38
1973-74	125.40	97.28	157.64	85.63	195.22	116.76	130.87	53.77	29.85	6.62	10.23	40.79
1974-75	115.67	115.30	65.06	42.91	179.06	59.12	40.46	69.11	136.13	17.91	69.28	7.29
1975-76	56.81	118.07	165.98	106.96	158.90	68.71	81.06	47.26	34.46	27.06	17.73	5.55
1976-77	107.96	149.28	132.90	47.06	36.99	30.18	80.16	31.70	41.87	43.02	8.79	57.50
1977-78	18.62	116.18	175.12	230.88	140.96	73.14	100.88	21.82	7.47	3.02	5.64	5.64
1978-79	87.44	114.44	150.06	179.93	130.23	47.55	102.10	102.10	28.77	51.19	11.76	18.98
1979-80	203.44	160.05	149.78	170.35	99.36	138.83	74.92	48.05	34.54	5.93	7.35	17.00
1980-81	249.65	159.50	192.84	306.63	100.72	28.45	73.62	35.10	10.18	11.02	19.40	49.67
1981-82	80.76	127.95	194.96	61.90	150.59	182.76	358.73	113.33	38.12	6.09	11.61	30.81
1982-83	58.81	173.22	109.28	43.13	117.79	111.38	40.56	31.47	102.64	72.93	35.17	16.98
1983-84	72.79	162.64	203.62	101.35	211.42	134.54	155.01	47.43	11.80	11.80	52.10	15.75
1984-85	18.85	134.06	135.84	283.43	63.65	130.83	88.51	34.45	11.62	13.59	2.00	7.59
1985-86	82.68	233.87	55.16	133.83	163.26	98.22	48.30	72.74	56.93	56.93	18.56	13.84
1986-87	140.10	140.10	131.74	148.20	87.36	97.42	97.42	42.51	47.04	11.26	15.91	4.10
1987-88	132.19	164.61	103.11	104.45	153.59	98.37	54.88	31.49	9.39	0.25	4.07	11.63
1988-89	46.35	268.20	150.89	104.45	10.28	142.68	48.32	76.13	34.68	52.95	9.91	23.27
1989-90	113.17	97.31	102.33	8.32	58.75	28.71	114.36	53.11	15.54	8.93	90.46	17.42
1990-91	57.69	177.14	327.38	137.48	137.48	86.92	142.51	88.07	8.05	14.30	56.85	4.07
1991-92	52.36	52.36	71.38	21.32	53.01	73.55	100.73	105.43	54.57	20.71	1.11	11.28
1992-93	59.36	65.42	105.97	47.01	47.01	91.19	42.74	108.99	21.27	2.61	2.12	9.18
1993-94	8.82	224.26	224.26	154.09	154.09	43.05	98.49	95.34	19.14	44.61	20.21	20.21
1994-95	257.98	144.36	118.38	170.18	68.85	68.85	71.59	34.97	17.78	71.23	34.36	57.90
1995-96	36.84	72.60	178.15	140.93	175.86	161.37	64.86	59.16	12.83	20.94	46.56	32.85
1996-97	113.97	86.02	161.05	208.75	106.39	121.96	84.04	56.02	20.70	5.52	38.01	14.21
1997-98	76.87	103.45	168.91	75.30	109.02	96.38	31.49	91.72	22.10	3.45	6.85	43.97
1998-99	39.89	211.34	160.91	85.82	85.39	90.27	43.10	28.22	17.03	17.02	13.41	34.56
1999-00	90.66	208.18	117.12	62.47	149.06	61.45	29.88	37.64	18.63	11.57	4.65	19.72
2000-01	92.26	76.97	109.48	148.08	116.73	66.57	79.49	47.83	13.38	48.55	26.39	15.31

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W160												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	279.80	137.80	95.52	164.55	164.55	56.21	20.96	20.96	27.23	39.89	6.82	
1952-53	53.76	175.68	194.84	142.15	78.30	78.28	52.32	75.85	17.90	19.18	9.84	12.84
1953-54	161.55	155.61	81.66	117.96	133.94	106.93	77.52	51.04	20.13	6.06	10.68	6.12
1954-55	81.47	125.14	151.65	87.67	57.00	89.32	69.75	19.56	37.38	12.41	38.53	106.62
1955-56	123.26	133.02	55.44	119.69	166.33	103.43	39.35	43.93	33.21	6.27	7.71	9.73
1956-57	42.86	79.58	69.81	88.56	65.99	97.75	20.64	53.92	89.77	40.47	20.59	51.43
1957-58	187.43	130.11	125.83	96.53	63.25	158.73	90.93	55.65	62.40	32.64	2.22	190.87
1958-59	68.94	154.10	111.58	283.68	55.04	111.94	126.66	63.16	58.92	77.44	39.48	104.23
1959-60	93.59	129.63	138.24	176.42	119.90	120.47	100.79	87.29	35.93	1.76	8.94	116.22
1960-61	53.10	51.57	225.83	102.85	82.45	101.37	51.74	39.14	31.17	26.48	3.86	4.34
1961-62	120.98	115.70	172.53	55.34	160.15	160.15	38.81	40.64	26.26	10.71	4.23	106.14
1962-63	207.86	289.84	340.65	234.97	182.62	112.58	60.52	109.23	27.52	26.26	14.00	9.25
1963-64	198.01	54.70	169.85	93.34	80.70	136.18	70.93	104.04	71.12	16.97	12.24	24.08
1964-65	75.28	93.01	144.21	109.12	177.00	110.73	104.63	80.51	60.12	15.73	0.58	0.73
1965-66	45.95	183.98	108.85	255.65	34.75	126.04	104.63	57.89	46.34	7.58	20.20	33.32
1966-67	89.70	280.85	161.09	123.45	51.45	38.19	74.23	65.17	6.99	6.99	16.73	55.85
1967-68	42.22	50.72	200.63	290.39	290.39	94.38	22.11	68.47	51.16	0.07	24.82	21.45
1968-69	114.00	115.80	277.71	139.77	123.98	173.17	28.49	19.78	23.22	8.65	4.83	59.25
1969-70	18.91	81.58	259.55	137.39	105.74	127.07	21.63	58.99	34.19	37.89	23.54	23.54
1970-71	121.29	55.55	110.90	134.43	178.91	232.31	56.97	23.20	5.39	5.39	29.18	60.66
1971-72	78.62	122.31	78.89	149.67	131.10	69.84	124.75	57.65	23.55	85.41	53.65	43.80
1972-73	213.75	86.17	44.29	136.63	136.63	139.25	62.68	38.88	28.10	29.34	35.51	27.93
1973-74	130.67	97.28	161.17	84.50	194.21	116.98	146.34	62.17	28.81	7.31	10.64	54.44
1974-75	109.17	138.80	66.19	43.92	179.50	74.37	48.38	68.02	145.07	19.24	69.75	9.09
1975-76	59.87	128.09	167.98	107.73	159.07	72.26	92.15	47.88	36.41	31.08	17.67	6.54
1976-77	107.62	130.06	119.61	44.16	49.77	30.70	81.05	41.35	48.87	48.71	9.00	67.15
1977-78	18.62	116.62	173.40	230.42	141.35	74.17	96.32	19.80	7.90	3.27	5.09	5.09
1978-79	88.34	115.61	158.61	180.34	126.88	41.59	98.67	98.67	29.01	50.61	11.38	22.89
1979-80	202.37	159.54	146.77	172.26	91.77	142.39	74.98	60.26	34.42	7.16	7.58	16.01
1980-81	252.27	149.38	192.84	303.42	102.14	38.60	78.13	30.48	11.95	13.35	23.85	52.33
1981-82	85.17	122.77	185.76	62.45	149.05	183.23	358.73	113.52	39.01	6.03	11.41	31.60
1982-83	72.86	171.39	109.25	41.82	115.72	111.73	41.51	34.86	103.24	69.24	35.29	20.99
1983-84	73.57	162.35	202.72	92.25	198.82	134.65	154.63	59.09	8.47	8.47	65.81	14.72
1984-85	8.56	126.77	123.59	283.35	64.35	128.22	96.42	33.96	11.87	13.25	1.98	4.89
1985-86	80.64	231.83	54.92	109.88	169.03	99.02	58.60	79.98	56.91	56.91	15.93	13.84
1986-87	140.24	140.24	132.07	142.01	87.14	97.51	97.51	41.23	47.14	11.57	15.49	3.76
1987-88	136.40	153.81	97.78	102.28	140.68	99.22	57.89	31.13	10.73	0.25	5.27	12.00
1988-89	45.94	266.81	147.76	102.28	9.87	141.18	54.01	73.93	34.86	52.59	10.03	24.44
1989-90	108.68	97.04	103.87	9.12	69.42	28.59	107.86	52.95	9.09	8.64	88.43	12.46
1990-91	53.45	163.34	330.76	132.45	132.45	87.55	141.86	91.67	7.42	14.26	54.94	3.55
1991-92	52.36	52.36	69.71	20.43	43.40	71.67	105.87	104.94	52.59	21.10	1.19	11.95
1992-93	65.20	70.31	107.43	46.27	46.27	88.42	40.97	102.42	24.65	2.64	2.14	9.34
1993-94	13.98	222.94	222.94	152.12	152.12	44.61	98.48	95.46	19.64	43.92	19.93	19.93
1994-95	264.25	148.47	116.53	164.59	68.69	68.69	77.44	40.69	17.57	71.20	35.33	61.44
1995-96	37.53	78.24	183.85	139.51	180.64	160.36	65.75	59.41	12.86	19.29	47.29	33.80
1996-97	126.12	97.34	155.49	206.10	100.50	120.25	85.92	61.39	20.41	6.10	36.58	15.52
1997-98	77.30	89.82	173.24	72.22	108.03	97.11	34.07	94.08	21.89	3.78	8.98	44.57
1998-99	45.58	210.23	159.08	77.97	82.34	89.78	43.98	29.29	15.79	17.11	13.40	40.78
1999-00	97.18	212.44	118.45	55.66	150.50	62.61	34.51	39.33	18.74	11.83	7.85	21.51
2000-01	96.48	76.36	101.60	145.16	117.64	68.27	82.62	44.14	14.28	48.27	26.23	17.73

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W170												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	283.51	151.04	94.61	163.54	163.54	55.10	19.99	19.99	27.07	39.98	6.74	10.78
1952-53	56.99	185.01	194.35	154.99	79.11	78.50	54.11	71.81	18.48	19.87	9.90	13.55
1953-54	161.06	156.25	81.80	112.08	136.89	104.60	79.92	52.03	22.84	6.15	10.69	6.05
1954-55	82.08	125.61	154.25	90.22	56.95	88.74	70.30	19.99	37.50	12.85	34.22	106.35
1955-56	120.91	132.68	56.93	128.38	166.90	103.37	39.91	42.43	33.31	6.34	7.88	10.09
1956-57	43.01	79.50	72.08	90.56	72.84	98.69	19.61	55.49	89.50	41.10	21.30	50.89
1957-58	188.16	131.78	127.14	97.78	63.86	176.99	97.24	50.95	63.30	32.92	2.04	185.42
1958-59	69.33	151.60	116.58	289.93	55.79	113.83	127.50	60.28	60.03	64.13	38.61	103.94
1959-60	102.47	130.54	157.60	205.50	120.41	121.55	106.58	86.83	35.99	1.79	8.54	114.49
1960-61	59.91	56.30	249.42	103.25	85.18	101.48	52.60	39.63	31.31	27.08	3.72	4.79
1961-62	120.51	124.29	181.79	55.58	165.20	165.20	42.35	43.18	26.73	10.95	3.89	107.28
1962-63	217.87	318.77	341.95	253.01	209.62	114.36	68.47	109.91	28.38	27.23	14.59	9.09
1963-64	197.76	55.76	198.19	96.33	82.14	135.06	70.34	101.13	74.84	16.45	12.97	23.69
1964-65	78.10	97.79	170.53	134.72	183.40	113.74	110.57	80.82	60.86	12.92	0.59	0.74
1965-66	46.41	233.87	127.05	288.27	44.91	126.41	110.57	59.28	46.34	8.25	20.04	33.59
1966-67	92.87	307.07	183.14	144.28	51.96	42.20	77.02	63.39	6.87	6.87	17.21	57.10
1967-68	42.78	51.63	218.86	301.75	301.75	95.33	21.17	67.60	57.00	0.04	24.91	21.65
1968-69	113.38	114.38	275.97	140.73	158.44	171.20	28.88	20.20	23.56	10.72	4.79	56.65
1969-70	19.04	108.28	319.57	165.11	114.69	129.25	24.36	57.87	34.09	37.05	24.06	24.06
1970-71	129.33	65.43	137.40	136.26	190.98	246.54	56.39	27.24	7.07	7.07	29.62	61.44
1971-72	77.93	147.74	87.14	151.08	133.83	72.07	129.02	65.82	24.94	85.41	53.70	50.63
1972-73	229.38	87.99	43.17	133.69	133.69	141.75	68.54	36.42	29.83	29.34	35.64	31.31
1973-74	134.89	103.39	169.44	84.91	193.88	118.44	148.41	67.92	30.09	8.17	11.18	58.44
1974-75	131.23	146.03	70.61	46.18	178.25	81.35	47.23	75.42	144.11	22.00	70.10	8.89
1975-76	71.93	129.98	177.83	109.90	159.54	72.42	90.37	50.54	39.43	31.00	17.09	6.36
1976-77	119.73	161.36	145.23	54.34	48.06	32.73	81.60	39.81	49.66	48.29	12.87	67.37
1977-78	18.55	138.40	171.14	229.33	145.36	79.21	109.52	22.73	8.20	3.43	5.24	5.24
1978-79	89.68	116.84	168.43	203.93	141.24	51.04	108.91	108.91	29.63	50.45	11.95	22.20
1979-80	201.84	163.26	162.69	186.17	93.92	143.84	80.31	61.32	36.15	8.18	7.83	18.11
1980-81	253.98	174.84	218.78	304.24	111.76	43.19	81.57	39.25	10.72	12.62	23.41	51.91
1981-82	93.19	131.69	230.65	62.98	148.48	181.55	116.05	114.47	39.19	5.98	11.36	32.61
1982-83	69.99	181.40	124.27	43.90	119.32	112.13	42.01	36.57	104.66	71.66	35.74	21.19
1983-84	74.11	169.69	204.44	111.05	207.00	137.83	152.98	57.68	10.40	10.40	62.51	19.99
1984-85	10.71	145.76	129.46	291.26	68.89	141.47	99.00	34.16	13.11	13.10	2.12	6.28
1985-86	80.31	249.08	55.87	147.69	182.15	99.46	62.83	78.18	57.30	56.91	15.98	13.84
1986-87	140.24	141.47	137.92	162.29	87.85	98.08	98.08	47.19	50.57	12.16	15.46	4.39
1987-88	136.79	173.68	111.38	106.14	165.26	105.18	60.81	30.80	10.88	0.27	5.44	15.15
1988-89	45.48	278.97	148.12	106.14	9.17	137.15	63.59	76.42	35.77	52.21	10.68	24.76
1989-90	116.59	99.71	105.75	8.45	65.87	28.90	113.82	55.02	11.05	8.71	89.00	16.79
1990-91	59.07	164.65	347.18	131.07	131.07	86.19	142.78	94.09	9.20	14.23	54.86	3.62
1991-92	55.06	55.06	72.48	19.47	48.40	77.85	109.02	106.86	51.70	22.01	1.35	13.53
1992-93	69.44	78.81	110.04	46.46	46.46	97.02	43.62	108.23	23.65	2.78	2.23	10.78
1993-94	12.08	220.70	220.70	159.47	159.47	42.65	110.82	96.86	20.33	44.23	20.50	20.50
1994-95	262.60	156.52	131.65	171.31	76.82	76.82	79.84	41.22	18.07	72.38	35.93	61.09
1995-96	41.18	83.52	190.86	137.94	185.63	160.89	72.22	59.97	14.30	22.13	48.79	35.32
1996-97	121.97	106.85	166.43	204.94	106.61	119.97	94.69	61.93	22.54	6.24	36.58	16.86
1997-98	78.70	84.03	178.80	80.73	116.46	98.43	40.09	96.75	21.96	4.92	9.09	45.49
1998-99	46.66	210.85	168.91	90.50	92.00	90.48	45.55	31.87	16.86	17.11	13.32	38.32
1999-00	96.89	229.79	125.97	68.06	152.55	67.34	36.91	40.23	19.72	12.06	6.74	22.60
2000-01	96.40	82.68	120.10	148.72	124.80	68.89	84.49	48.53	15.02	48.18	26.44	18.85

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W180												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	295.23	169.15	92.24	162.08	162.08	53.72	25.02	25.02	26.91	39.18	6.75	11.51
1952-53	71.01	210.79	192.45	173.77	96.18	79.03	65.56	78.21	20.40	21.36	10.53	16.18
1953-54	160.70	162.23	82.54	100.74	158.72	119.99	93.98	65.85	27.84	6.48	10.93	5.91
1954-55	83.03	127.89	149.87	97.34	84.75	87.93	73.76	31.20	36.93	13.43	33.95	108.81
1955-56	119.61	128.95	57.71	116.63	162.49	103.15	48.32	55.93	35.68	6.66	8.06	11.78
1956-57	42.95	79.34	74.53	79.50	80.94	102.97	21.25	72.60	90.70	42.02	24.56	57.28
1957-58	191.76	143.01	125.43	100.60	64.79	216.54	122.56	61.16	64.24	34.59	2.68	164.17
1958-59	76.26	154.42	126.16	296.85	65.94	116.65	138.58	71.12	64.03	84.82	46.10	105.38
1959-60	130.53	130.60	194.72	240.78	122.62	125.83	131.43	97.39	35.67	2.00	6.83	123.32
1960-61	80.30	62.83	278.99	101.45	96.68	101.40	61.75	47.01	32.11	25.52	4.41	4.06
1961-62	122.27	147.10	193.71	55.05	171.26	171.26	66.68	52.64	28.26	12.62	4.01	110.17
1962-63	253.67	409.53	351.44	294.89	288.94	121.22	91.09	109.93	31.32	25.35	17.32	9.42
1963-64	196.72	55.80	280.23	90.64	84.22	148.60	106.77	110.67	89.50	19.46	16.40	23.45
1964-65	93.35	118.12	263.42	160.63	194.23	117.29	148.66	93.46	61.00	24.83	0.75	0.56
1965-66	52.25	285.91	154.44	307.48	57.53	130.40	148.66	70.48	54.42	8.39	20.43	38.59
1966-67	98.05	361.21	238.92	184.59	49.02	42.43	104.90	69.27	10.54	10.54	17.91	67.09
1967-68	42.02	44.40	258.75	321.50	321.50	94.75	25.99	78.73	77.29	0.00	24.85	21.85
1968-69	118.99	112.60	279.38	136.93	209.18	189.57	37.06	21.42	37.23	19.64	4.88	70.34
1969-70	18.94	170.35	359.85	193.54	125.10	136.51	35.12	59.39	36.06	38.46	23.82	23.82
1970-71	158.16	87.92	166.09	158.19	209.91	299.36	57.71	33.07	8.61	8.61	30.25	69.69
1971-72	78.43	190.39	102.27	148.64	141.85	88.03	149.86	83.81	26.92	85.41	53.70	60.32
1972-73	248.52	98.95	43.54	130.69	130.69	147.86	90.21	47.88	34.15	32.54	34.90	44.26
1973-74	155.46	119.50	192.95	82.69	196.54	114.53	192.85	94.07	31.94	7.46	11.26	95.19
1974-75	177.43	202.72	79.03	50.85	182.24	107.49	57.88	89.42	150.28	30.40	70.77	11.23
1975-76	111.17	150.76	198.93	113.48	164.24	78.45	103.48	56.35	48.35	36.43	17.75	6.36
1976-77	139.85	161.36	175.44	73.28	70.58	37.83	83.32	52.17	59.62	55.12	19.69	81.25
1977-78	19.95	190.50	171.84	223.91	151.27	90.82	133.60	25.83	8.20	3.59	4.87	4.87
1978-79	90.19	119.35	202.92	258.61	183.83	71.77	142.28	142.28	31.01	50.94	12.50	26.89
1979-80	202.60	173.93	181.80	220.16	87.78	150.54	95.12	84.65	38.74	12.06	7.94	21.03
1980-81	261.51	201.92	218.78	296.22	111.76	70.61	95.34	50.94	11.47	13.92	28.73	54.81
1981-82	113.84	144.94	346.09	63.69	147.17	187.08	123.66	115.08	40.34	6.40	11.70	34.91
1982-83	90.11	196.83	157.03	44.60	118.59	117.71	43.90	44.66	102.58	68.02	36.77	27.15
1983-84	76.64	189.86	203.03	140.00	201.72	142.03	151.99	75.68	10.88	10.88	75.26	29.95
1984-85	9.03	175.43	131.11	300.71	78.92	160.19	115.69	35.96	16.00	12.62	2.03	4.29
1985-86	79.21	277.58	56.62	184.12	223.83	100.67	98.22	85.94	58.21	58.21	13.41	12.81
1986-87	141.24	141.24	144.15	195.95	85.01	97.99	97.99	56.87	51.29	12.98	16.05	4.79
1987-88	145.01	195.84	129.75	115.74	190.24	119.86	71.26	31.47	13.08	0.29	7.08	19.41
1988-89	47.20	299.79	142.19	115.74	9.25	134.68	92.20	73.75	35.39	51.78	10.62	24.76
1989-90	122.64	102.92	110.64	9.54	77.87	26.62	106.21	54.23	11.12	9.06	90.16	14.00
1990-91	62.86	155.66	394.03	125.03	125.03	86.95	138.04	107.19	11.19	14.66	52.50	3.12
1991-92	64.09	64.09	73.30	17.79	47.87	91.42	132.72	105.35	51.56	22.08	1.53	19.02
1992-93	100.46	118.95	118.39	48.61	48.61	116.16	46.43	110.25	26.80	3.03	2.38	14.46
1993-94	18.32	216.83	216.83	171.75	171.75	44.76	139.74	97.56	22.49	43.19	20.26	20.26
1994-95	264.11	182.36	166.16	172.39	88.38	88.38	94.35	53.18	17.18	70.51	35.97	67.44
1995-96	51.06	104.84	226.01	135.51	203.37	157.68	86.75	59.09	16.70	24.47	49.43	36.73
1996-97	134.75	159.28	177.27	203.63	109.61	119.97	113.83	71.22	26.10	7.07	36.00	23.70
1997-98	84.44	63.33	208.77	101.92	142.01	100.83	53.41	102.90	21.85	7.29	12.59	49.10
1998-99	56.57	203.18	203.39	113.39	111.87	85.85	45.79	38.61	17.93	17.91	12.73	49.82
1999-00	109.62	299.99	162.57	84.92	156.92	85.03	53.25	43.98	20.50	12.99	9.53	25.94
2000-01	99.91	94.02	149.75	150.36	149.31	71.88	90.36	54.61	18.37	47.54	27.26	24.52

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W190												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	272.62	141.58	98.42	157.24	157.24	58.11	14.39	14.39	25.70	39.62	6.77	10.36
1952-53	46.98	161.71	198.15	143.07	65.62	76.68	44.84	59.27	17.11	17.52	9.29	11.14
1953-54	162.58	150.65	83.88	128.12	117.37	89.54	65.16	39.53	19.24	5.46	10.35	6.58
1954-55	82.40	123.12	155.03	84.66	42.19	91.58	69.41	31.20	35.48	12.24	29.86	104.69
1955-56	124.38	133.50	56.13	175.86	167.81	105.14	31.54	29.23	30.80	5.70	7.33	8.57
1956-57	43.45	81.55	70.47	121.59	58.72	93.86	17.23	43.52	91.55	38.45	19.39	43.60
1957-58	189.69	121.22	128.59	98.49	61.38	147.18	80.19	37.49	60.07	30.60	1.36	185.61
1958-59	62.87	156.70	108.80	299.07	51.22	112.53	117.03	46.12	55.21	51.01	29.59	105.29
1959-60	83.00	130.03	132.00	183.88	113.99	119.32	88.90	76.75	33.96	3.32	9.45	101.94
1960-61	46.57	52.83	225.83	105.29	74.63	103.49	45.28	31.77	29.86	26.83	2.61	6.19
1961-62	122.28	97.76	171.81	54.55	162.20	162.20	26.92	33.73	25.41	9.14	4.33	104.82
1962-63	185.23	253.20	333.25	226.62	138.63	113.79	54.67	112.09	24.86	26.78	11.78	9.61
1963-64	200.17	53.30	149.55	105.78	79.47	119.14	41.81	89.72	61.37	13.48	10.87	24.67
1964-65	67.44	84.62	117.03	119.94	172.64	119.28	81.48	69.49	57.01	3.14	0.20	0.81
1965-66	43.07	198.20	110.35	279.54	43.09	124.89	81.48	46.50	30.92	7.93	20.07	28.75
1966-67	85.76	266.25	150.54	120.07	52.55	50.87	60.00	54.43	4.20	4.20	17.32	48.63
1967-68	41.71	67.52	187.08	286.84	286.84	94.33	16.19	54.16	45.77	0.22	24.54	21.46
1968-69	118.38	118.64	279.80	144.65	128.38	147.54	22.27	16.77	14.48	5.76	5.14	43.66
1969-70	20.06	77.22	282.63	144.20	106.87	121.84	15.33	59.05	35.70	39.31	23.51	23.51
1970-71	108.84	47.97	115.48	110.27	173.64	200.84	55.82	23.36	8.46	8.46	28.71	69.69
1971-72	82.73	111.59	71.61	153.37	126.69	56.56	106.32	47.98	22.79	82.08	53.78	38.68
1972-73	211.27	75.21	45.60	139.13	139.13	134.57	45.88	23.07	25.62	28.96	34.09	17.52
1973-74	155.46	89.46	149.29	87.03	196.57	117.80	116.89	46.66	29.13	6.33	10.05	31.10
1974-75	103.97	99.08	59.02	40.76	178.00	54.17	35.42	62.27	129.87	15.58	69.29	6.17
1975-76	50.37	107.60	160.19	108.82	160.11	66.85	74.68	44.93	31.67	23.72	17.44	5.26
1976-77	101.51	137.78	120.56	39.94	30.63	28.51	79.73	25.96	37.60	38.66	6.56	54.58
1977-78	19.02	100.20	177.09	229.77	140.36	69.13	92.03	21.07	7.28	2.69	5.86	5.86
1978-79	87.19	114.05	139.13	161.80	121.45	43.45	94.65	94.65	28.38	52.71	11.69	16.31
1979-80	203.16	158.38	143.29	158.13	103.88	137.66	71.96	84.65	33.20	4.56	7.18	16.36
1980-81	245.09	141.64	174.07	314.56	92.47	19.52	67.55	30.45	9.80	9.78	16.40	48.19
1981-82	75.39	122.92	167.27	61.96	153.46	181.53	109.69	114.11	36.14	6.35	12.17	31.30
1982-83	50.22	167.50	98.14	43.67	118.97	113.92	40.36	27.90	103.15	73.42	35.77	14.07
1983-84	73.02	157.85	208.00	91.84	216.28	133.84	153.76	41.08	13.07	13.07	46.17	12.78
1984-85	25.09	126.96	145.59	281.94	59.59	121.24	81.11	34.19	10.79	13.73	2.11	9.04
1985-86	84.81	223.37	55.74	122.18	149.35	98.47	38.71	69.42	57.58	57.58	20.24	14.10
1986-87	140.88	140.88	129.50	141.54	86.50	97.03	97.03	38.72	45.52	11.33	16.38	4.06
1987-88	128.64	157.75	97.71	100.37	146.92	95.05	51.39	32.02	9.00	0.26	3.07	9.18
1988-89	46.82	262.11	153.63	100.37	10.56	140.67	38.91	76.58	34.40	52.92	10.03	23.30
1989-90	111.91	95.96	100.51	8.83	55.52	28.77	115.97	53.07	19.76	9.23	90.86	20.63
1990-91	54.71	185.82	315.39	142.44	142.44	87.45	142.76	84.18	7.09	14.56	58.00	4.43
1991-92	52.82	52.82	73.87	22.63	57.38	71.48	94.39	105.43	56.38	20.52	0.88	9.64
1992-93	52.54	59.48	103.99	48.36	48.36	87.71	41.89	110.02	19.32	2.72	2.21	8.00
1993-94	6.43	223.87	223.87	150.19	150.19	43.56	89.24	95.08	18.50	45.64	20.13	20.13
1994-95	257.19	135.72	111.95	172.73	64.28	64.28	65.75	30.32	18.42	71.56	32.89	55.18
1995-96	35.55	67.65	167.41	141.20	170.08	161.71	57.75	58.23	11.23	19.30	46.75	32.57
1996-97	108.64	69.11	159.03	211.74	107.18	123.32	78.79	51.88	19.58	5.09	38.72	12.04
1997-98	76.61	114.53	159.19	70.34	101.47	96.28	26.26	90.49	22.25	2.47	5.58	42.97
1998-99	35.38	214.15	151.80	81.31	80.83	90.97	42.59	26.20	17.36	17.10	13.16	31.78
1999-00	88.42	191.68	110.08	56.08	147.93	56.67	25.16	36.15	18.63	11.46	3.30	17.20
2000-01	89.58	74.11	102.62	150.02	109.93	65.25	76.60	45.86	12.52	49.19	27.38	13.26

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W200												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	265.95	119.81	98.48	162.36	162.36	55.57	13.20	13.20	26.86	39.11	6.31	9.93
1952-53	37.41	136.22	198.23	119.54	60.62	72.48	37.31	58.50	15.47	16.96	8.82	9.29
1953-54	163.63	147.29	82.87	138.59	108.21	83.45	54.25	31.82	14.11	4.79	9.86	6.56
1954-55	84.56	120.70	157.69	78.59	33.75	90.84	69.81	7.57	36.28	11.52	32.90	106.29
1955-56	124.95	134.04	53.36	175.03	168.76	103.11	26.89	26.33	29.25	5.00	7.26	7.27
1956-57	43.88	82.93	67.18	129.64	49.94	89.85	17.46	35.75	93.87	37.16	16.80	41.62
1957-58	194.97	112.85	127.69	90.84	57.23	106.35	59.65	37.17	61.25	29.38	1.42	187.53
1958-59	58.95	154.54	97.63	267.83	45.87	112.43	109.78	43.14	51.27	50.11	28.72	107.88
1959-60	61.62	130.37	91.48	137.72	112.56	115.96	73.44	68.56	33.92	3.22	11.06	99.07
1960-61	33.35	45.81	186.86	105.42	67.19	104.89	42.15	27.15	28.52	29.27	2.59	5.89
1961-62	123.61	74.94	154.81	53.11	149.33	149.33	10.56	25.53	23.76	7.72	4.21	105.13
1962-63	159.61	164.06	321.24	190.59	105.23	109.38	38.23	107.48	23.36	27.90	9.69	8.32
1963-64	204.48	51.72	76.86	105.96	75.07	111.93	32.34	85.93	50.29	12.42	9.20	24.64
1964-65	56.54	65.65	54.22	85.53	160.92	115.98	63.50	60.64	57.15	3.33	0.16	0.93
1965-66	40.37	109.06	73.48	230.55	30.49	118.20	63.50	41.38	25.89	7.01	19.83	26.17
1966-67	85.76	208.65	95.62	76.26	53.30	47.70	40.18	52.47	3.53	3.53	16.76	46.05
1967-68	41.90	69.92	187.08	256.61	256.61	92.10	14.98	49.50	30.70	0.33	22.37	21.36
1968-69	115.71	115.81	270.28	142.93	65.24	135.39	17.98	15.37	10.30	2.05	5.07	43.87
1969-70	20.51	23.17	192.98	98.28	91.24	116.81	7.31	56.66	33.07	39.17	23.52	23.52
1970-71	91.04	26.52	72.60	93.46	148.58	165.03	56.17	18.74	7.19	7.19	29.29	45.58
1971-72	80.42	63.26	71.61	151.26	120.88	44.14	89.29	26.67	21.30	80.19	52.64	31.44
1972-73	186.18	66.77	44.28	135.22	135.22	128.57	26.19	19.44	21.92	27.34	33.08	11.66
1973-74	109.27	74.64	127.21	87.31	187.31	117.98	84.77	32.86	26.39	5.36	10.36	16.94
1974-75	58.42	72.23	46.34	36.30	176.39	33.31	30.10	46.31	131.31	11.00	67.78	4.91
1975-76	31.77	86.89	140.76	107.37	160.40	63.51	70.64	38.79	24.86	20.18	17.98	4.51
1976-77	81.55	87.72	75.32	17.88	25.38	23.94	79.50	25.96	31.40	33.04	2.25	51.85
1977-78	19.09	53.71	176.44	227.25	132.20	58.81	64.13	17.33	6.77	2.66	5.86	5.86
1978-79	89.66	109.03	117.28	106.85	86.21	24.29	69.12	69.12	27.05	51.00	10.60	14.93
1979-80	198.35	147.34	118.16	128.71	103.55	131.00	62.87	32.51	29.99	2.90	7.27	12.41
1980-81	238.50	93.12	100.12	312.81	69.98	10.55	54.50	12.08	10.23	10.20	14.75	46.52
1981-82	65.70	105.72	77.20	61.53	147.86	177.43	109.69	116.17	35.04	6.02	12.31	32.17
1982-83	40.29	146.18	68.51	40.41	111.05	112.82	40.74	21.64	105.63	73.24	35.88	11.19
1983-84	69.52	140.51	206.70	61.60	207.00	128.26	148.86	34.86	11.87	11.87	43.83	4.94
1984-85	26.01	96.17	135.07	261.11	50.07	94.99	66.24	30.72	7.69	13.05	2.15	8.88
1985-86	84.42	223.37	55.31	68.06	107.70	96.98	12.23	66.82	57.46	57.46	21.50	14.21
1986-87	143.88	143.88	117.48	111.15	81.19	96.17	96.17	26.17	41.60	11.98	15.60	2.99
1987-88	120.34	124.40	74.17	85.46	108.69	84.28	44.41	31.66	8.83	0.26	2.69	5.00
1988-89	46.31	237.78	148.90	85.46	10.61	139.77	21.63	71.22	33.74	52.41	9.81	22.43
1989-90	99.69	90.12	94.42	9.11	53.25	30.57	112.44	50.86	18.31	8.17	88.44	21.00
1990-91	44.67	188.96	274.53	145.14	145.14	87.38	141.66	76.88	4.17	14.55	56.25	4.33
1991-92	49.06	49.06	147.74	24.45	53.93	61.33	78.80	103.45	55.00	20.72	0.73	6.68
1992-93	35.45	38.56	96.92	47.71	47.71	70.15	38.07	102.88	17.93	2.69	2.22	4.08
1993-94	4.73	215.52	215.52	136.07	136.07	42.83	61.62	92.61	16.25	44.52	19.66	19.66
1994-95	262.60	117.95	88.13	161.15	49.17	49.17	52.81	19.27	17.75	71.72	34.32	52.54
1995-96	29.21	57.02	137.04	135.88	157.87	160.15	41.88	57.06	7.55	13.02	49.51	32.70
1996-97	106.16	38.54	142.02	201.40	99.38	121.89	61.96	45.57	15.46	4.65	38.23	7.73
1997-98	72.79	127.56	159.19	50.14	79.38	93.87	15.86	91.38	21.14	0.44	3.80	39.94
1998-99	29.44	219.62	118.39	57.93	60.77	89.96	40.33	20.63	15.46	17.30	12.98	29.93
1999-00	85.88	149.05	83.70	29.16	139.65	42.36	16.23	33.70	17.33	11.18	2.76	13.53
2000-01	88.30	63.32	70.71	141.44	92.81	62.48	71.70	36.19	9.66	49.22	26.82	10.54

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W210												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	292.07	178.03	94.74	163.09	163.09	54.52	18.75	18.75	26.95	39.78	6.82	10.93
1952-53	64.20	203.29	194.79	179.48	80.82	79.55	59.27	64.74	20.03	20.50	10.16	14.99
1953-54	161.15	156.36	83.23	100.33	143.85	102.43	83.87	56.51	28.23	6.37	10.85	6.02
1954-55	82.47	126.12	154.38	95.69	58.52	88.48	71.46	22.28	37.24	13.72	26.63	106.01
1955-56	118.45	131.13	58.68	145.33	165.66	103.39	41.89	41.02	34.03	6.57	7.93	10.98
1956-57	42.55	79.04	75.78	91.54	74.98	100.82	17.71	60.61	89.42	41.63	24.21	50.07
1957-58	188.29	135.91	128.29	102.50	64.67	211.11	113.10	44.14	63.46	33.69	1.81	163.18
1958-59	70.73	153.21	127.41	308.68	58.85	114.71	131.85	56.67	63.06	56.86	37.25	104.16
1959-60	123.46	130.87	198.90	266.03	122.55	124.68	120.68	88.69	36.10	2.25	7.18	111.62
1960-61	73.41	65.68	290.66	102.92	91.67	101.10	55.15	41.36	31.89	26.19	3.53	5.57
1961-62	121.26	143.99	199.86	55.59	175.04	175.04	52.45	48.85	27.99	11.65	4.13	107.77
1962-63	237.88	402.27	348.99	289.89	261.31	118.25	83.87	110.00	29.95	26.24	16.15	9.35
1963-64	197.67	56.75	267.32	97.13	85.32	137.94	72.84	96.90	83.60	16.15	15.10	23.87
1964-65	85.76	112.38	234.72	180.02	197.04	118.38	125.76	84.18	60.64	9.30	0.64	0.66
1965-66	48.16	334.07	166.42	349.55	65.57	129.81	125.76	60.87	38.97	9.49	19.83	34.44
1966-67	98.42	364.04	230.25	192.41	53.30	47.60	87.65	60.34	7.11	7.11	18.08	46.05
1967-68	42.43	51.06	261.29	327.51	327.51	96.24	20.37	64.86	73.20	0.02	24.93	21.66
1968-69	115.95	114.56	279.27	142.08	232.25	169.90	31.15	20.40	26.33	14.73	4.93	52.89
1969-70	18.88	172.13	428.29	219.01	132.76	133.26	30.89	58.72	35.61	37.93	23.78	23.78
1970-71	142.48	84.29	185.12	139.73	214.32	282.01	55.23	35.29	10.45	10.45	29.29	61.95
1971-72	79.17	197.06	105.07	149.59	139.13	76.88	133.21	82.89	25.04	86.45	52.64	51.10
1972-73	258.07	92.09	43.52	134.43	134.43	147.00	76.63	34.04	33.70	34.10	35.78	38.64
1973-74	143.52	115.89	188.69	84.19	198.06	117.36	163.11	80.69	33.02	7.33	11.40	70.39
1974-75	178.87	157.63	79.82	50.85	181.20	90.31	45.05	90.49	142.08	28.26	70.07	8.85
1975-76	87.13	139.75	194.91	112.44	161.79	72.96	88.19	56.55	45.10	20.18	17.98	6.64
1976-77	81.55	223.96	194.97	76.64	49.40	37.39	82.79	38.63	48.09	48.21	19.32	65.65
1977-78	19.04	180.65	173.56	228.11	152.29	89.96	137.83	28.43	8.44	3.47	5.51	5.51
1978-79	90.02	119.34	190.58	257.03	176.91	73.62	138.75	138.75	31.10	50.68	13.48	22.71
1979-80	204.97	173.32	188.30	215.50	96.07	146.32	62.87	66.53	39.49	10.35	7.89	22.41
1980-81	260.16	220.00	295.62	304.30	131.32	10.55	87.69	56.28	9.08	11.62	22.19	51.49
1981-82	105.89	151.99	336.16	63.76	148.22	184.26	116.57	114.22	39.51	6.18	11.77	33.60
1982-83	69.88	202.07	154.98	47.58	124.69	115.49	43.10	40.44	104.13	74.44	36.24	22.01
1983-84	75.55	185.77	204.49	147.15	218.88	143.48	153.40	58.86	14.52	14.52	57.96	29.52
1984-85	16.75	181.16	137.61	305.73	77.36	162.23	104.54	30.72	15.62	13.33	2.25	8.04
1985-86	80.03	283.20	57.25	215.49	212.67	99.04	76.48	75.90	57.97	57.97	15.99	13.52
1986-87	141.55	141.55	146.38	199.67	87.50	98.72	98.72	59.40	54.32	12.49	16.18	5.40
1987-88	139.64	211.55	137.08	116.71	207.76	116.23	65.73	31.37	11.10	0.27	5.91	18.58
1988-89	46.45	301.87	147.90	116.71	9.44	136.37	79.23	79.00	36.93	52.04	11.33	25.89
1989-90	130.18	104.09	108.82	7.57	61.86	27.84	119.32	56.53	16.80	9.16	91.95	20.26
1990-91	68.72	167.14	383.31	129.89	129.89	84.37	142.13	101.05	12.55	14.28	54.91	4.33
1991-92	60.56	60.56	75.66	17.62	53.93	90.03	121.41	107.73	51.87	22.41	1.61	16.52
1992-93	84.21	101.47	114.76	46.66	46.66	127.04	48.16	117.43	22.31	2.84	2.26	14.22
1993-94	4.73	219.99	219.99	173.12	173.12	41.14	133.90	97.55	21.83	44.52	21.10	19.66
1994-95	255.71	170.52	160.00	177.79	91.49	91.49	87.57	45.81	17.89	71.62	35.94	61.74
1995-96	47.67	92.86	209.79	137.00	194.27	160.13	84.97	60.22	7.55	27.07	48.74	35.80
1996-97	119.07	129.21	184.43	204.83	115.33	121.89	107.99	45.57	26.58	6.46	37.50	20.77
1997-98	81.85	77.21	197.56	98.98	137.44	99.47	49.70	98.92	22.18	6.82	9.63	48.00
1998-99	49.55	208.87	198.41	119.12	113.10	88.23	45.79	37.26	18.76	17.42	13.04	38.29
1999-00	98.17	274.24	150.42	90.78	155.40	78.97	44.41	42.34	20.75	12.47	5.56	23.98
2000-01	96.06	94.20	156.75	154.00	142.40	69.93	87.58	57.55	16.83	48.05	26.71	19.85

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ W220												
Υδρ. Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1951-52	279.91	167.20	96.65	163.29	163.29	56.91	14.40	14.40	26.66	39.83	6.88	10.28
1952-53	56.45	183.95	196.40	167.63	71.02	78.52	51.80	55.22	18.70	18.26	9.66	12.75
1953-54	162.06	150.39	82.49	116.91	127.73	92.78	72.89	47.48	24.67	5.88	10.63	6.20
1954-55	81.09	123.63	153.47	89.73	48.35	90.00	69.39	14.19	36.82	12.93	24.42	103.86
1955-56	122.00	133.17	56.23	185.89	167.02	103.65	35.16	30.74	32.07	6.12	7.48	9.64
1956-57	42.32	80.02	71.66	121.59	66.68	96.11	15.98	50.47	90.00	39.44	22.46	44.33
1957-58	186.29	127.18	127.97	101.84	62.46	185.21	99.43	34.66	60.97	31.73	1.32	169.05
1958-59	65.76	155.77	118.48	307.68	56.51	111.09	123.51	46.06	58.68	63.58	29.91	103.85
1959-60	106.92	129.83	176.68	252.68	119.40	121.10	105.41	82.28	35.50	4.50	7.95	102.04
1960-61	61.79	61.79	268.43	103.80	83.17	101.62	48.25	34.75	30.98	26.41	2.69	6.73
1961-62	121.22	122.21	189.20	55.01	168.76	168.76	41.43	42.27	26.61	10.03	4.47	104.54
1962-63	209.49	349.46	340.55	264.92	186.31	118.81	71.94	109.85	26.31	26.29	13.79	9.44
1963-64	198.13	55.24	228.30	107.47	82.89	126.02	48.83	87.60	71.73	14.13	13.06	24.47
1964-65	76.56	101.81	187.95	161.62	185.33	123.60	99.71	76.04	58.76	3.11	0.44	0.66
1965-66	45.74	299.47	150.81	333.95	60.18	127.88	99.71	51.04	38.97	8.96	20.19	30.66
1966-67	92.09	329.18	204.04	192.41	52.51	55.39	76.31	52.88	4.92	4.92	17.20	51.87
1967-68	41.88	65.56	235.11	309.52	309.52	94.94	16.60	55.83	62.73	0.15	24.69	21.28
1968-69	121.39	117.57	279.15	143.67	201.86	152.67	25.96	17.28	18.13	9.46	4.86	42.75
1969-70	19.20	142.41	388.31	197.04	122.56	124.30	23.47	59.72	35.42	38.51	23.19	23.19
1970-71	124.86	70.47	162.61	122.47	198.45	240.21	54.25	29.93	11.03	11.03	29.29	52.03
1971-72	82.17	165.58	92.16	150.26	133.02	66.89	118.72	69.48	22.69	83.79	53.87	43.18
1972-73	238.11	81.61	44.29	134.43	138.89	140.29	60.80	24.43	29.61	31.65	34.29	25.73
1973-74	133.27	103.95	170.33	86.52	197.63	117.12	142.30	60.92	31.96	6.43	10.41	44.80
1974-75	152.86	120.16	70.58	45.86	179.37	69.15	36.46	78.65	132.32	21.79	69.29	6.75
1975-76	72.64	126.73	179.60	107.63	158.84	68.43	75.94	51.33	38.45	26.66	17.62	5.99
1976-77	122.65	197.03	170.23	64.88	35.12	33.67	80.38	28.46	42.69	41.68	12.36	55.30
1977-78	18.60	149.30	175.62	231.27	145.01	80.82	122.49	25.82	7.46	3.03	6.20	6.20
1978-79	87.39	119.34	163.95	220.05	159.33	65.44	124.53	124.53	29.49	51.11	12.90	17.72
1979-80	205.99	168.06	171.22	188.77	105.49	139.15	83.26	49.75	39.49	6.82	7.36	19.83
1980-81	253.70	191.22	247.39	307.70	114.37	25.52	78.60	49.06	8.44	9.41	16.33	47.98
1981-82	86.70	151.99	273.07	62.16	149.99	182.63	111.10	112.91	38.18	6.18	11.69	31.01
1982-83	56.79	187.52	131.16	46.23	123.28	112.67	41.02	33.10	102.75	76.01	35.26	15.90
1983-84	73.85	175.18	203.89	126.68	224.51	138.62	155.26	46.37	15.96	15.96	46.30	21.72
1984-85	28.01	162.61	157.76	295.14	68.60	143.74	90.77	36.34	13.34	13.82	2.08	10.14
1985-86	83.66	257.72	55.78	184.77	187.93	98.83	60.32	75.90	56.92	56.92	19.72	13.88
1986-87	140.23	140.23	136.63	175.43	88.35	97.83	97.83	51.19	49.74	11.32	16.15	4.79
1987-88	132.43	193.13	122.28	112.71	186.95	105.71	57.24	31.37	9.34	0.25	4.01	12.23
1988-89	46.32	284.54	152.33	112.71	10.19	136.37	54.18	79.31	35.33	52.95	10.22	23.92
1989-90	122.90	100.65	103.50	8.60	54.71	28.67	122.32	54.35	24.34	9.14	93.44	22.07
1990-91	63.73	185.94	353.43	138.58	138.58	86.86	142.82	91.68	10.19	14.10	58.24	4.59
1991-92	58.16	58.16	72.66	20.92	53.93	82.46	108.97	106.74	56.42	20.83	1.30	12.09
1992-93	68.33	82.16	109.82	49.66	49.66	105.27	45.77	118.66	22.31	2.62	2.12	11.91
1993-94	7.40	224.82	224.82	163.24	163.24	42.57	113.92	96.56	19.90	44.52	20.82	20.82
1994-95	261.34	150.41	138.17	178.01	78.12	78.12	76.71	38.92	17.88	71.52	34.31	61.74
1995-96	42.09	77.59	190.70	140.93	180.15	161.68	71.73	59.69	14.77	24.58	46.18	32.83
1996-97	109.41	93.83	175.80	208.79	115.80	122.42	94.37	56.55	23.85	5.35	37.50	16.21
1997-98	80.36	104.31	181.00	87.52	123.34	96.48	36.72	91.48	22.29	4.39	6.84	45.81
1998-99	39.79	211.98	184.67	108.08	101.91	90.40	43.34	31.95	19.10	17.04	13.33	33.00
1999-00	91.90	235.90	136.60	80.92	150.35	69.80	33.94	37.99	19.05	11.57	3.21	19.43
2000-01	91.18	85.63	137.49	152.12	127.29	66.69	80.42	54.49	14.51	48.54	26.44	68.00

