



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**«ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΌΓΚΟΥ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ  
ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ, ΜΕ ΣΥΝΕΧΗ 20ΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ  
ΛΕΚΑΝΗΣ»**

Αποστολάκη Μαρία

Εξεταστική Επιτροπή

Τσάνης Ιωάννης (Επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Χριστόπουλος Διονύσιος

Χανιά

Φεβρουάριος 2005

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξημένη ζήτηση σε νερό έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Στις μεσογειακές χώρες, ιδιαίτερα, όπου το κλίμα τους χαρακτηρίζεται από χαμηλά ύψη βροχόπτωσης, η ανάπτυξη των καλλιεργειών και η άρδευσή τους βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα υπόγεια ύδατα. Λόγω της μικρής διάρκειας των βροχοπτώσεων, η περίοδος άντλησης από τον υπόγειο υδροφόρα είναι μεγάλη (6-8 μήνες) και ο ρυθμός άντλησης ανεξέλεγκτος και μη ορθολογικός, με συνέπειες τόσο περιβαλλοντικές όσο και οικονομικές.

Η ανεξέλεγκτη άντληση των υπογείων υδάτων οδηγεί συχνά σε πτώση του υπόγειου υδροφόρα σε σημείο τέτοιο, που να μην καθίσταται δυνατή η επαναφόρτισή του και η επαναφορά του στα αρχικά επίπεδα. Το παραπάνω πρόβλημα συναντάται στην υδρογεωλογική λεκάνη του Γεροποτάμου (πεδιάδα Μεσσαράς), στην οποία εστιάζεται η παρούσα εργασία. Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την κύρια αγροτική περιοχή της Κρήτης, με καλλιέργειες που αρδεύονται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τα αντλούμενα υπόγεια ύδατα. Στην παρούσα μελέτη γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης και κατανόησης του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής και μια εκτίμηση του όγκου των αντλήσεων, που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός του όγκου των αντλήσεων, που λαμβάνουν χώρα στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη. Ο υπολογισμός βασίζεται αρχικά στην προσομοίωση της διαδικασίας διήθησης των επιφανειακών υδάτων, με τη χρήση του εννοιολογικού μοντέλου Sacramento. Πρόκειται για ένα «επιφανειακό» μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας βροχόπτωσης - απορροής, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη υπόγεια ροή υδάτων. Εν συνεχεία γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με το υπόγειο υδατικό δυναμικό της περιοχής.

Δεδομένου ότι τα στοιχεία και οι μετρήσεις στην περιοχή της Μεσσαράς είναι ιδιαίτερα ελλιπή και κατά συνέπεια υπάρχει μεγάλο ποσοστό αβεβαιότητας, εξετάστηκαν διάφορες πιθανές περιπτώσεις, με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση της ισχύουσας κατάστασης.

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	4
2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	6
2.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	13
2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ .....	18
3. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....	20
3.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	20
3.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ .....	24
3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ .....	29
3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑ FAO .....	29
3.3.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ PENMAN .....	31
3.3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ PAN EVAPORATION .....	32
3.3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	34
3.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	39
3.4.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΒΡΟΧΗΣ.....	39
3.4.2 ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ .....	43
3.4.3 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ .....	44
3.4.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	50
3.4.5 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ .....	54
4. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SACRAMENTO.....	58
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	60
4.1.1 ΦΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	62
4.1.2 ΦΑΣΗ ΑΓΩΓΟΥ .....	68
4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .....	69
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	74
4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	77
4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	80
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΌΓΚΟΥ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ.....	83
5.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΌΓΚΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ .....	84
5.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΑΥΤΙΣΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΣΕΩΝ .....	87
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	90
5.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ .....	90
5.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	92
5.3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ.....	103
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑ .....	107
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	107
6.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΕΡΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ .....	109
6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑ .....	116
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 : Βροχομετρικοί σταθμοί εντός της λεκάνης, υψόμετρο θέσης και μέσο ετήσιο ύψος βροχής .....	16
Πίνακας 2.2 : Μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm για τους 11 σταθμούς εντός της λεκάνης απορροής για 32 χρόνια μελέτης.....	17
Πίνακας 3.1 : Βροχομετρικοί Σταθμοί στην Υδρολογική Λεκάνη του Γεροποτάμου .....	21
Πίνακας 3.2 : Χρήσεις Γης Λεκάνης Γεροποτάμου .....	22
Πίνακας 3.3 : Βάρη Thiessen Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου .....	24
Πίνακας 3.4 : Εύρος Τιμών Συντελεστή Ανάκλασης .....	30
Πίνακας 3.5 : Συντελεστής Συσχέτισης: Κριτήριο Ομοιογένειας Χρονοσειρών .....	41
Πίνακας 3.6 : Σταθμοί με Συμπληρωμένες Χρονοσειρές .....	43
Πίνακας 3.7 : Υπερετήσια Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου.....	44
Πίνακας 3.8 : Υπερετήσια Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Βόρειου και Νότιου Τμήματος.....	47
Πίνακας 3.9 : Ετήσιο Ύψος Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου .....	57
Πίνακας 4.1 : Επιλεγμένες Τιμές των Παραμέτρων του Μοντέλου Sacramento .....	79
Πίνακας 4.2 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 1 <sup>ης</sup> Κατηγορίας.....	81
Πίνακας 4.3 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 2 <sup>ης</sup> Κατηγορίας.....	81
Πίνακας 4.4 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 3 <sup>ης</sup> Κατηγορίας.....	82
Πίνακας 4.5 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 4 <sup>ης</sup> Κατηγορίας.....	82
Πίνακας 5.1 : Απαιτούμενος Όγκος Αντλήσεων σύμφωνα με τις Χρήσεις Γης της Λεκάνης του Γεροποτάμου .....	86
Πίνακας 5.2 : Μεταβολή της Έκτασης της Υδρογεωλογικής Λεκάνης.....	93
Πίνακας 5.3 : Αποκλίσεις 1 <sup>ης</sup> Περίπτωσης .....	94
Πίνακας 5.4 : Μεταβολή της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής.....	95
Πίνακας 5.5 : Αποκλίσεις 2 <sup>ης</sup> Περίπτωσης .....	96
Πίνακας 5.6 : Μεταβολή του Πορώδους .....	97
Πίνακας 5.7 : Αποκλίσεις 3 <sup>ης</sup> Περίπτωσης .....	98
Πίνακας 5.8 : Υπολογισμός της Εκκένωσης του Μοντέλου σε Διαφορετικές Χρονικές Περιόδους.....	99
Πίνακας 5.9 : Αποκλίσεις 4 <sup>ης</sup> Περίπτωσης .....	100
Πίνακας 5.10 : Υπολογισμός της Εκκένωσης του Μοντέλου βάσει των Μηνών Βροχόπτωσης και Αποκλίσεις.....	101
Πίνακας 5.11 : Τυπική Απόκλιση του Storage για τα Τρία Αντιπροσωπευτικά Έτη.....	104

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2.1 : Μηνιαία εξάτμιση σταθμού Γέργερης για τα έτη 1970-2001.....	13
Γράφημα 2.2 : Μέγιστες θερμοκρασίες σταθμού Γέργερης για τα έτη 1977-1997.....	14
Γράφημα 2.3 : Ελάχιστες θερμοκρασίες σταθμού Γέργερης για τα έτη 1977-1997 .....	15
Γράφημα 3.1 : Ιστορική Χρονοσειρά Απορροής Γεροποτάμου .....	21
Γράφημα 3.2 : Ιστορική Χρονοσειρά Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου.....	27
Γράφημα 3.3 : Ιστορική Χρονοσειρά Σχετικής Υγρασίας Σταθμού Τυμπακίου .....	35
Γράφημα 3.4 : Ιστορική Χρονοσειρά Ωρών Ηλιοφάνειας Σταθμού Τυμπακίου .....	36
Γράφημα 3.5 : Ιστορική Χρονοσειρά Ταχύτητας Ανέμου Σταθμού Τυμπακίου .....	37
Γράφημα 3.6 : Ιστορική Χρονοσειρά Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής Σταθμού Τυμπακίου .....	38
Γράφημα 3.7 : Διπλή Αθροιστική Καμπύλη Σταθμού Ασημίου .....	42
Γράφημα 3.8 : Βροχοβαθμίδα Υδρολογικής Λεκάνης Γεροποτάμου .....	45
Γράφημα 3.9 : Υπερετήσια Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου .....	46
Γράφημα 3.10 : Βροχοβαθμίδα Βόρειου Τμήματος Λεκάνης Γεροποτάμου .....	48
Γράφημα 3.11 : Βροχοβαθμίδα Νότιου Τμήματος Λεκάνης Γεροποτάμου .....	49
Γράφημα 3.12 : Αποκλίσεις Ημερήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο.....	51
Γράφημα 3.13 : Αποκλίσεις Μηνιαίας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο.....	52
Γράφημα 3.14 : Αποκλίσεις Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο.....	53
Γράφημα 3.15 : Κανονική Κατανομή Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου .....	56

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΧΑΡΤΩΝ

Σχήμα 4.1 : Τμήματα της υδρολογικής λεκάνης .....	59
Σχήμα 4.2 : Γενική ιδέα του μοντέλου Sacramento.....	60
Σχήμα 4.3 : Παράμετροι του μοντέλου Sacramento.....	61
Σχήμα 4.4 : Σχηματική παρουσίαση της διήθησης.....	64
Σχήμα 4.5 : Καμπύλη αποφόρτισης της ταχείας συνιστώσας της βασικής απορροής .....	66
Χάρτης 3.1 : Κατανομή Σταθμών και Γεωτρήσεων στην Υδρολογική Λεκάνη Γεροποτάμου.....	23
Χάρτης 3.2 : Χωρισμός Λεκάνης Γεροποτάμου σε Πολύγωνα Thiessen.....	26
Χάρτης 3.3 : Χωρική Κατανομή Μέσης Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου (Παρεμβολή Kriging) .....	28

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδρολογική λεκάνη του χειμάρρου Γεροποτάμου καλύπτει μια έκταση 400Km<sup>2</sup> και βρίσκεται στο νότιο-κεντρικό τμήμα της νήσου Κρήτης, περίπου 50Km νότια της πόλης του Ηρακλείου. Η πεδιάδα της Μεσσαράς, με έκταση 95-100Km<sup>2</sup>, αποτελεί την σημαντικότερη αγροτική περιοχή της ευρύτερης περιοχής, αλλά και ολόκληρης της Κρήτης. Οι κύριες χρήσεις γης είναι η καλλιέργεια ποτιστικής ελιάς και η καλλιέργεια αμπελιών. Η υπόλοιπη καλλιεργήσιμη έκταση χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια λαχανικών, φρούτων και δημητριακών. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης του Γεροποτάμου ανέρχεται στα 650mm και το μέσο υψόμετρο εκτιμάται στα 435 μέτρα.

Λόγω της αναπτυγμένης αγροτικής δραστηριότητας και της περιορισμένης περιόδου βροχόπτωσης (Νοέμβριος-Μάρτιος), την κύρια πηγή άρδευσης των καλλιεργειών αποτελεί το υπόγειο υδατικό δυναμικό της περιοχής. Παρά την ύπαρξη ενιαίου αρδευτικού δικτύου, η έλλειψη προγραμματισμού και η ανεξέλεγκτη άρδευση από τις γεωτρήσεις, νόμιμες και παράνομες, έχει οδηγήσει την τελευταία δεκαετία σε ραγδαία πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, με τάση εξάντλησης των υπογείων υδάτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός του όγκου των αντλήσεων, που λαμβάνουν χώρα στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη. Ο υπολογισμός βασίζεται αρχικά στην προσομοίωση της διαδικασίας διήθησης των επιφανειακών υδάτων, με τη χρήση του εννοιολογικού μοντέλου Sacramento. Πρόκειται για ένα «επιφανειακό» μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας βροχόπτωσης - απορροής, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη υπόγεια ροή υδάτων. Εν συνεχεία γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με το υπόγειο υδατικό δυναμικό της περιοχής.

Το υδατικό ισοζύγιο στην περιοχή μελέτης μας, ακολουθεί το γενικότερο τύπο:

$$P = ET + I + Q$$

...όπου P είναι η επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης (σε mm)

ET η εξατμισοδιαπνοή (σε mm)

I ο όγκος του νερού που κατεισδύει (σε mm)

Q η επιφανειακή απορροή, που μετράται στο ποτάμι (σε m<sup>3</sup>/sec)

Η ακριβής διαδικασία, με την οποία υπολογίζονται η επιφανειακή βροχόπτωση (βάσει των σημειακών βροχοπτώσεων στους βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης) και η εξατμισοδιαπνοή (βάσει μετρούμενων παραμέτρων, όπως

θερμοκρασία, υγρασία κλπ) στην υπό μελέτη λεκάνη περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Η απορροή του χειμάρρου είναι μετρημένη απευθείας στο πεδίο. Από την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει ο συνολικός όγκος του ύδατος, που κατεισδύει στη λεκάνη.

Για την υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου οι παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

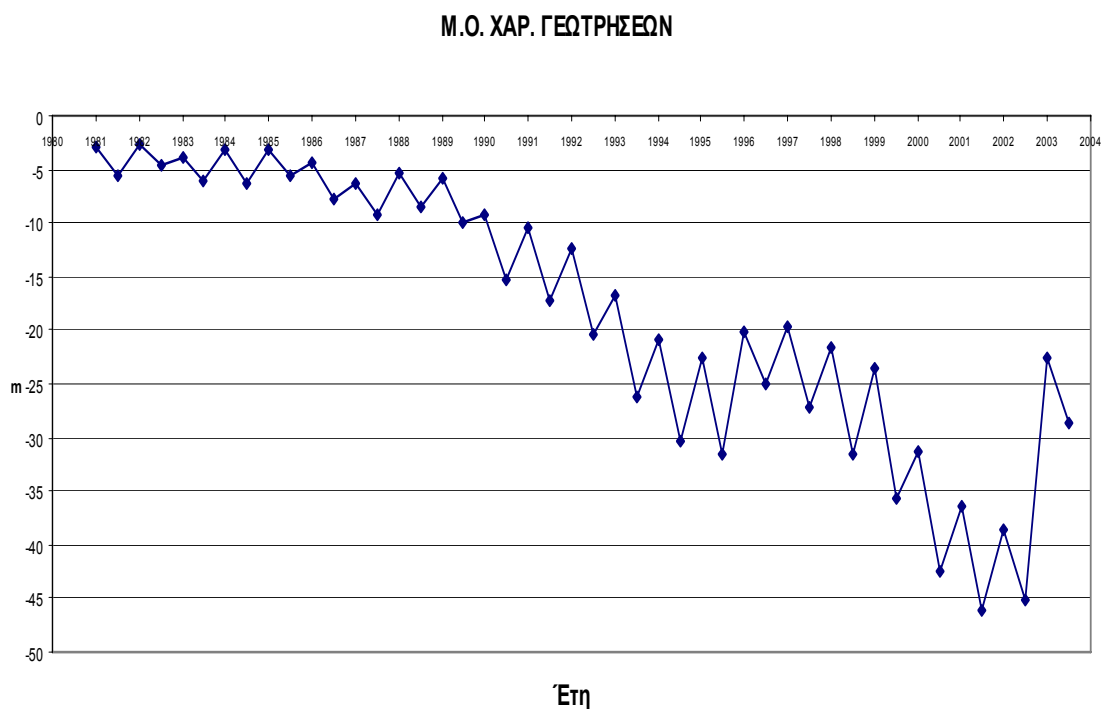
$$P = 635,6\text{mm}$$

$$ET\text{-}Act = 454,6\text{mm}$$

$$I = 104,9\text{mm}$$

$$Q = 76,1\text{mm}$$

Η πραγματική μέση διακύμανση της στάθμης του υδροφορέα της υδρογεωλογικής λεκάνης του Γεροποτάμου έχει καταγραφεί και παρουσιάζεται προσεγγιστικά στο ακόλουθο διάγραμμα:



Το παραπάνω διάγραμμα προέκυψε από μετρήσεις συνολικά 6 γεωτρήσεων σε διάφορα σημεία της λεκάνης. Στις γεωτρήσεις αυτές καταγράφεται η στάθμη του υδροφορέα στην αρχή και στο τέλος της περιόδου των βροχοπτώσεων (Οκτώβριος - Απρίλιος) και εν συνεχεία υπολογίζεται η μέση στάθμη σε ολόκληρη την υδρογεωλογική λεκάνη.

Από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Sacramento με το υπόγειο υδατικό δυναμικό της περιοχής και τις μετρήσεις της στάθμης του υδροφορέα, προκύπτει ο ετήσιος όγκος του ύδατος, που αντλείται. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των αντλήσεων περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Η καινοτομία της μελέτης έγκειται στον ικανοποιητικό υπολογισμό των αντλήσεων της περιοχής με τη χρήση ενός «επιφανειακού» μοντέλου, ελλείψει βασικών υδρογεωλογικών στοιχείων, με τα οποία θα μπορούσε να προσομοιωθεί καλύτερα το υπόγειο υδατικό δυναμικό, και κατά συνέπεια και οι αντλήσεις, με τη εισαγωγή των στοιχείων αυτών σε ένα μοντέλο υπογείων υδάτων.



---

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

---

Η Κρήτη είναι το πέμπτο σε έκταση νησί της Μεσογειακής λεκάνης, επιφάνειας 8.335 τετραγωνικών χιλιομέτρων και περιλαμβάνεται μεταξύ των γεωγραφικών συντεταγμένων:

$\varphi = 34^{\circ}54'$  έως  $35^{\circ}41'$  Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος

$\lambda = 23^{\circ}30'$  έως  $26^{\circ}20'$  Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος

Λόγω της γεωγραφικής της θέσης, της μεγάλης της έκτασης, των υψηλών ορεινών όγκων και της γεωλογικής της ιστορίας καταλαμβάνει ιδιαίζουσα θέση στα όρια μεταξύ κεντρικής και ανατολικής λεκάνης της Μεσογείου. Το επίμηκες σχήμα της με προσανατολισμό από δυτικά προς ανατολικά έχει μήκος 254 χλμ. και πλάτος που κυμαίνεται μεταξύ 12 και 56 χιλιομέτρων. Διασχίζεται από ορεινούς όγκους, υψηλότερους στο δυτικό τμήμα και χαμηλότερους στο ανατολικό. Οι σπουδαιότεροι κατά σειρά ορεινοί όγκοι του νησιού, από δυτικά προς ανατολικά είναι:

- Λευκά Όρη (2.452 m)
- Ίδη ή Ψηλορείτης (2.546 m)
- Δίκτη ή Λασιθιώτικα (2.148 m)

Από τους τρεις αυτούς μεγάλους ορεινούς όγκους ξεκινούν προς όλες τις κατευθύνσεις διακλαδώσεις, οι οποίες σχηματίζουν χαμηλότερους ορεινούς όγκους, όπως στο ανατολικό άκρο τα όρη της Σητείας (1.002 m) και στο νότιο τμήμα του νησιού τα Αστερούσια Όρη (1.231 m).

Στην Κρήτη δεν υπάρχουν πεδιάδες, εκτός από λίγες πεδινές ή λοφώδεις εκτάσεις, οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος των παραλίων ή διασχίζουν το νησί εγκάρσια. Στη βόρεια πλευρά του νησιού, οι σημαντικότερες πεδινές εκτάσεις είναι η πεδινή παραλιακή έκταση Καστελίου Κισσάμου, δυτικά των Χανίων, η πεδινή έκταση ανατολικά του Ρεθύμνου και η εκτεινόμενη ανατολικά του Ηρακλείου έως τα Μάλλια. Στο νότιο-ανατολικό άκρο του νησιού βρίσκεται η πεδινή περιοχή Παχιάς Άμμου – Καμβουσίου – Ιεράπετρας (Ισθμός Ιεράπετρας), στο ανατολικό άκρο η λοφώδης περιοχή της Σητείας και τέλος στο νότιο τμήμα μεταξύ Ίδης και Αστερουσίων Ορέων η πεδιάδα της Μεσσαράς, με έξοδο προς το Λιβυκό Πέλαγος, οποία αποτελεί και την περιοχή μελέτης μας.

Στην ορεινή δυτική και κεντρική Κρήτη υπάρχουν λίγα οροπέδια, τα μεγαλύτερα από τα οποία είναι:

- Οροπέδιο Ασκύφου (700 m) στα Λευκά Όρη
- Οροπέδιο Ομαλού (1.100 m) στα Λευκά Όρη
- Οροπέδιο Νίδας (1.450 m) στο όρος Ίδη
- Οροπέδιο Λασιθίου (850 m)

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του κρητικού τοπίου είναι το πλήθος των φαραγγιών με ψηλές και απόκρημνες πλευρές, κυρίως στη δυτική Κρήτη και στην περιοχή των Σφακιών, καθώς και ο μεγάλος αριθμός σπηλαίων. Τα τελευταία έπαιξαν σημαντικό ρόλο ως κατοικία πρωτόγονων ανθρώπων, ως τόπος λατρείας και ως καταφύγιο και είναι στενά συνδεδεμένα με τους θρύλους και την ιστορία του νησιού. Τα σπουδαιότερα από αυτά είναι:

- Ιδαίον Άνδρο, στο όρος Ίδη
- Δικταίο Σπήλαιο, στο όρος Δίκτη
- Σπήλαια Μελιδονίου και Σεντόνι, στο νομό Ρεθύμνης
- Σπήλαιο Ομαλού, στο νομό Χανίων

Στην Κρήτη δεν υπάρχουν ποταμοί. Λόγω της απότομης καθόδου του ανάγλυφου προς τη θάλασσα σχηματίζονται μόνο χείμαρροι, οι οποίοι αποχετεύουν με ταχύτητα τα επιφανειακά ύδατα των ορεινών όγκων προς τη θάλασσα. Ελάχιστοι από αυτούς διατηρούν ρέον ύδωρ κατά τη θερινή περίοδο. Παρ' ότι οι βροχοπτώσεις στα ορεινά της δυτικής Κρήτης είναι πολύ μεγάλες, οι συνθήκες για την τεχνητή συλλογή ύδατος δεν είναι καθόλου ευνοϊκές, λόγω της παρουσίας του αποκαρστωμένου ασβεστόλιθου. Σε μερικές όμως περιπτώσεις, όπως στον Ομαλό, την Ίδη και το Λασιθί έχουμε φυσική συλλογή των υδάτων της βροχής, εντός καρστικών χοανοειδών βυθισμάτων, των δολινών.

Πηγές συναντώνται μόνο στις πεδιάδες, πλησίον των ακτών με ελάχιστη όμως παροχή κατά τις περιόδους ξηρασίας. Μια σημαντική θερμομεταλλική πηγή στη νότια – κεντρική Κρήτη είναι η πηγή του Λέντα. Πρόκειται για μια πηγή υπόθερμη, αλκαλική, με παροχή 21,5 m<sup>3</sup>/day, η οποία είναι κατάλληλη για λουτροθεραπεία και ποσιθεραπεία. Στην τοποθεσία αυτή βρίσκεται το αρχαίο Λεβηναίον, φημισμένο κέντρο φυσιοθεραπείας.

Τέλος, δυτικά του Ρεθύμνου και πλησίον της θάλασσας βρίσκεται η λίμνη του Κουρνά, η μοναδική της Κρήτης, έκτασης 2/3 του τετραγωνικού χιλιομέτρου [1].

## 2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η λεκάνη της Δυτικής Μεσσαράς μπορεί να διαχωριστεί σε τρία τμήματα, το βόρειο, το νότιο και το κεντρικό τμήμα της λεκάνης τους Γεροποτάμου.

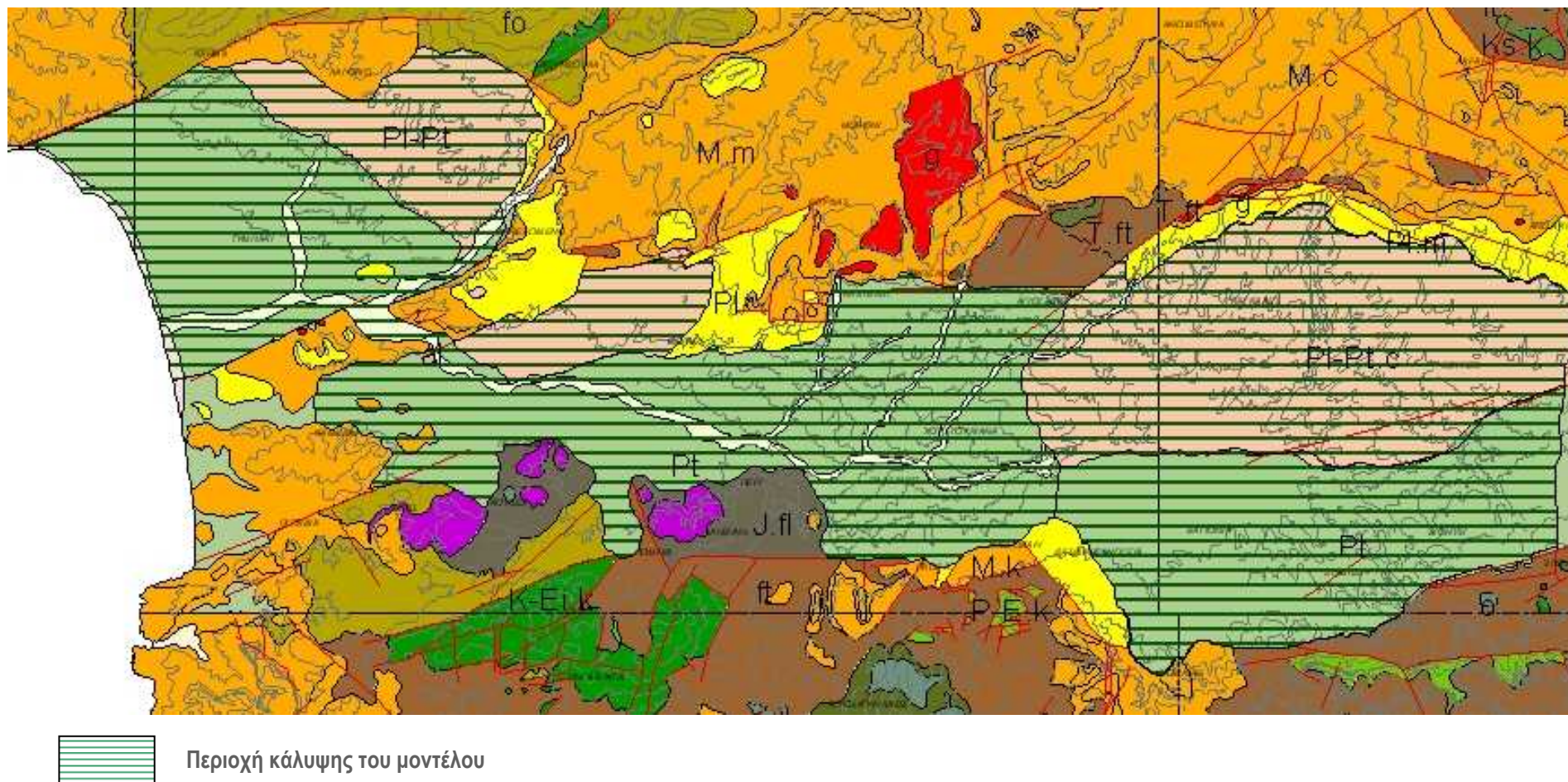
Το *βόρειο τμήμα της λεκάνης* καλύπτεται από νεογενείς αποθέσεις (μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους με ενστρώσεις κροκαλοπαγών και ψαμμιτών και γύψοι) και στα βορειοδυτικά εμφανίζονται και οι προαλπικοί σχηματισμοί του υποβάθρου (φλύσχη της ενότητας Πίνδου και ανθρακικά ενότητας Τρίπολης).

Το *νότιο τμήμα της λεκάνης* καλύπτεται κυρίως από φλύσχη της ενότητας της Τρίπολης και ανθρακικά της ενότητας της Τρίπολης και της Πίνδου. Συναντώνται επίσης και πετρώματα των εσωτερικών οφιολιθικών καλυμμάτων (γενέσιοι, οφιόλιθοι, σχιστόλιθοι).

Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης του Γεροποτάμου της Δυτικής Μεσσαράς καλύπτεται από :

- *Πλειοπλειστοκαινικά* ιζήματα αποτελούμενα από κροκαλοπαγή, άμμους, αργίλους, ποταμολιμναίας προέλευσης, με παρεμβολές λιμναίων μαργαϊκών ασβεστολίθων
- *Ολοκαινικά τεταρτογενή* ιζήματα, αλουβιακές αποθέσεις, αναβαθμίδες, αποτελούμενα από κροκαλοπαγή, άμμους και αργίλους ποταμολιμναίας γενικά προέλευσης [2].

Στο Χάρτη 2.1 παρουσιάζεται ο υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής [2].



Χάρτης 2.1 : Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Μεσσαράς

**Απόσπασμα Υπομνήματος Γεωλογικού Χάρτη****ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ**

cd	Παράκτιες αποθέσεις.
al	Αλλουβιακές αποθέσεις.
SC-CS	Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.
Pt	Πλειστόκαινο αδιαίρετο (κροκαλολατυποπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι)

**ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ - ΝΕΟΓΕΝΕΣ**

Pl-Pt	Κυρίως μάργες, αλλά και άμμοι, κροκαλοπαγή κλπ.
Pl-Pt.c	Σχηματισμός Αγ. Γαλήνης. Κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι.

**ΝΕΟΓΕΝΕΣ**

Pl	Πλειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M	Μειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M.br	Λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων (Μειόκαινο)

**ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ**

o	Οφιόλιθοι. Σερπεντινίτες, περιδοτίτες, διαβάσες, διορίτες και αμφιβολίτες.
---	--

**ΚΑΛΥΜΜΑ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ**

gn	Γνεύσιοι αμφιβολίτες και χαλαζίτες με ενδιαστρώσεις μαρμάρων.
----	---

**ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ**

fo	Φλύσχης.
K-Ei.k	Ασβεστόλιθοι πλακώδεις, με κονδύλους και ενστρώσεις πυριτολίθων και λεπτές ενστρώσεις αργιλικών σχιστολίθων.

**ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ**

ft	Φλύσχης.
E.k, P-E.k, Ks-E.k, Ks.k, Js-K.k,d, Js.k, T-E.k,d, T-Js.k, T.d	Ασβεστόλιθοι (k) και δολομίτες (d).
T.sch	Ασβεστιτικοί μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους.

**ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΩΝ – ΧΑΛΑΖΙΤΩΝ**

Ph	Φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι.
----	-----------------------------------

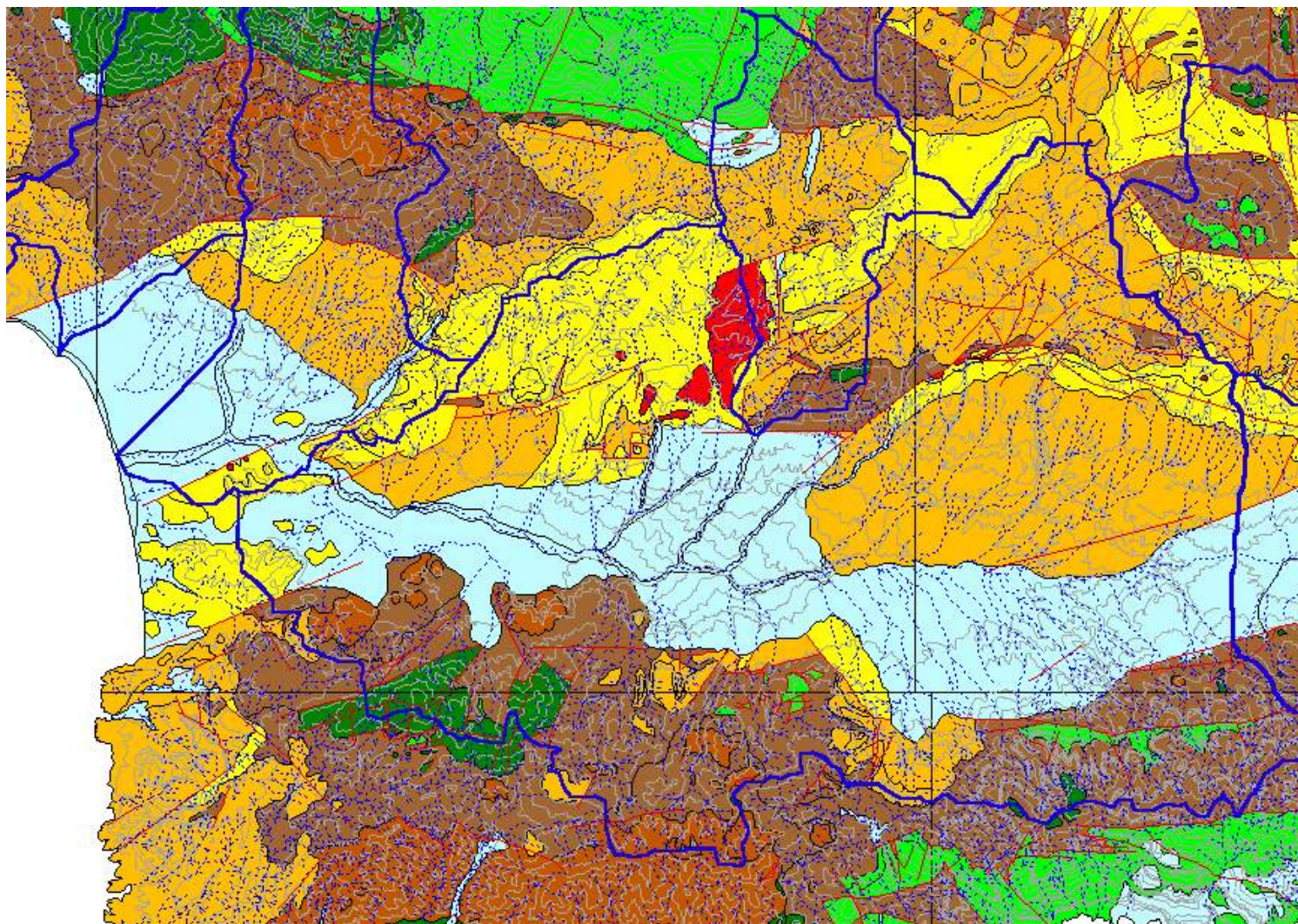
**ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΟΜΑΛΟΥ – ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ**

Ts-Ji.mr,d	Ανθρακικά Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες,
------------	--

**ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ - ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ**

E.fi	Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι με λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και κρυσταλλικών ασβεστολίθων.
Jm-E.k	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Plattenkalk), ανακρυσταλλωμένοι, κατά θέσεις μάρμαρα.
J.sch	Σχιστόλιθοι, ανθρακικοί, χαλαζιακοί, αργιλικοί.
Ts-Ji.k,d	Ασβεστόλιθοι και δολομίτες με λεπτές φυλλιτικές διαστρώσεις και ορίζοντες συνεκτικών λατυποπαγών.
g	Γύψος.





Χάρτης 2.2 : Υδρογεωλογικός Χάρτης περιοχής Μεσσαράς

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

## ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ



Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1)



Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Κ2)



Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (Κ3)

## ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ



Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1)



Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2)



Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3)

## ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ



Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α1)



Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα (Α2)



Όριο υδρολογικών λεκανών

Από τον παραπάνω υδρογεωλογικό χάρτη της περιοχής προκύπτει, ότι τα κύρια υδροφόρα στρώματα στη λεκάνη του Γεροποτάμου είναι οι Τεταρτογενείς αποθέσεις, που περιλαμβάνουν:

➤ Κώνους κορημάτων και πλευρικά κορήματα Ολοκαινικής ηλικίας, αποτελούμενα από λατύπες, ανθρακικής κυρίως σύστασης και ποικίλου μεγέθους, συγκολλημένες σε μεγάλο βαθμό με ερυθρογή. Οι κυριότερες εμφανίσεις τους βρίσκονται στις βόρειες πλευρές των Αστερουσίων και στις νότιες παρυφές του Ψηλορείτη.

➤ Ποταλιμναία, ερυθρά κροκαλοπαγή, άμμους, υλιολίθους και τεφροκύανα αργιλικά πετρώματα Πλειστοκαινικής – Ολοκαινικής ηλικίας.

Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλή υδρογεωλογική συμπεριφορά, κυρίως κατά μήκος του Γεροποτάμου και των μεγαλύτερων παραποτάμων του.

Οι Νεογενείς αποθέσεις, που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο κεντρικό τμήμα της τεκτονικής τάφρου (graben) έχουν γενικά περιορισμένη υδρογεωλογική σημασία, με μικρή σχετικά δυναμικότητα. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται κυρίως από Πλειο-πλειστοκαινικά, θαλάσσια, υφάλμυρα, ποτάμια και λιμναία, ερυθρά κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ερυθρές – κιτρινωπές ή τεφρές ιλυώδεις αργίλους με ενδιαστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Οι υδροφορίες στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται στα κροκαλοπαγή και στις άμμους που επιτρέπουν στο νερό, λόγω του κοκκώδους χαρακτήρα τους, να κατεισδύει σε μεγάλο βάθος και να σχηματίζει υδροφόρους ορίζοντες στις επαφές με το αδιαπέρατο υπόβαθρο. Επίσης, υδροφόρα στρώματα είναι οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, που μέσω των πρωτογενών και δευτερογενών ρωγμών τους και των διακένων τους διηθούν το νερό σε βάθος.

Οι υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται στα πρακτικώς αδιαπέρατα καλύμματα των οφιολίθων, των Αστερούσιων και του Βάτου, είναι μικρές και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες εξασθενούν, αφού τροφοδοτούνται μόνο από τα κατεισδύοντα νερά της βροχής. Τοπικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αποσαθρωμένος μανδύας αυτών των σχηματισμών, όπου μπορεί να αναπτυχθεί φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας.

Το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου, στην περιοχή της λεκάνης Γεροποτάμου αντιπροσωπεύεται κυρίως από φλύσχη και ασβεστόλιθους. Ο φλύσχης είναι θεωρητικά αδιαπέρατος σχηματισμός αλλά, λόγω της ψαμμιτικής σύστασής του, σχηματίζει αποσαθρωμένο μανδύα, στον οποίο αναπτύσσεται φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας στην επαφή του με το υγιές πέτρωμα. Γενικά, στον σχηματισμό αυτό δεν υπάρχουν αξιόλογες υπόγειες υδροφορίες, ενώ είναι αυξημένη η επιφανειακή απορροή. Οι ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται γενικά ως υδροπερατοί και οι υπόγειες υδροφορίες καθορίζονται από τον βαθμό καρστικοποίησης τους και τον κατακερματισμό τους.



Τέλος, από το τεκτονικό κάλυμμα της Τρίπολης επικρατεί ο πρακτικά αδιαπέρατος φλύσχος, κυρίως στις νότιες παρυφές της λεκάνης Γεροποτάμου, ο οποίος παρουσιάζει όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή υπέρκειται των πολύ υδροπερατών ανθρακικών σχηματισμών. Εκτεταμένες εμφανίσεις ασβεστόλιθων της ζώνης Τρίπολης βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, όπου μεγάλο μέρος του υδατικού τους δυναμικού εκφορτίζεται στην περιοχή Ζαρού – Γέργερης με πηγές σημαντικών παροχών.

Η περιοχή αυτή των νοτιοανατολικών παρυφών του Ψηλορείτη κυριαρχείται από τρεις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες: Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών, Καλοχωραφίτη – Σκουρβούλων – Λαλούμα και Βώρων – Φανερωμένης – Αμπελούζου. Η πρώτη, που είναι και σημαντικότερη, αποτελεί το νότιο όριο των ανθρακικών σχηματισμών και το βόρειο πέρας των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων της κυρίως κοιλάδας του Γεροποτάμου. Επίσης, η ζώνη αυτή σε συνδυασμό με τις άλλες βυθίζει κλιμακωτά τα ανθρακικά πετρώματα με ρήγματα που έχουν άλματα της τάξης των 300m.

Οι υδροφορίες του Ψηλορείτη διαπιστώθηκε ότι έχουν υδραυλικές κλίσεις με φορά από Βορρά προς Νότο, αλλά η συνέχεια τους επηρεάζεται από την ρηξιγενή ζώνη Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών. Στην περιοχή αυτή δημιουργούνται συνθήκες υπερπλήρωσης, αλλά συγχρόνως διατηρείται η υδραυλική επικοινωνία με το βυθιζόμενο ρηξιτέμαχος και τους Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς. Αποτέλεσμα της υπερπλήρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων είναι η εκδήλωση μεγάλων καρστικών πηγών στην Γέργερη (200-250 m<sup>3</sup>/h) και στο Ζαρό (450-500m<sup>3</sup>/h) σε υψόμετρα 500-600m. Παράλληλα όμως με την εκφόρτιση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού από τις πηγές, υπάρχει και η πιθανή πλευρική τροφοδοσία προς Νότο τόσο στο βυθιζόμενο ανθρακικό ρηξιτέμαχος όσο και στις Νεογενείς και Τεταρτογενείς, λόγω του υψηλού ενεργού πορώδους τους και της συμβολής των πλευρικών κορημάτων, τα οποία βοηθούν στην πλευρική μετάγγιση του υπόγειου νερού.

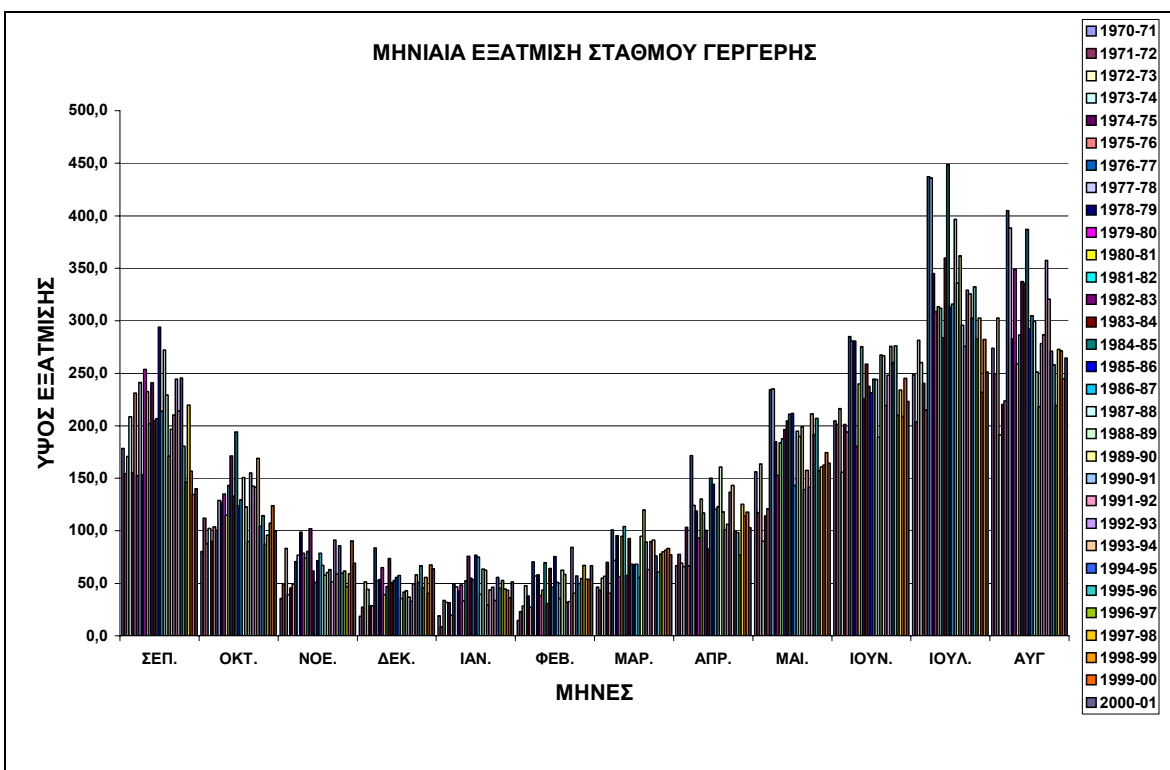
Ειδικότερα για τις πηγές, η παρουσία των οποίων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περιοχή των νοτιοανατολικών παρυφών του Ψηλορείτη και κατ' επέκταση στην λεκάνη του Γεροποτάμου έχει γίνει διαχωρισμός σε τρεις μεγάλες ομάδες, ανάλογα με την γεωλογική δομή. Στην πρώτη ομάδα συγκαταλέγονται οι μεγάλες καρστικές πηγές της ρηξιγενούς ζώνης Γέργερης – Ζαρού – Καμαρών. Στην δεύτερη ομάδα περιλαμβάνονται οι πηγές, που σχετίζονται με τα πετρώματα του οφιολιθικού συμπλέγματος και του φλύσχη της ζώνης Πίνδου και έχουν παροχές της τάξης λίγων m<sup>3</sup>/h. Τέλος, στην τρίτη ομάδα ανήκουν όσες πηγές έχουν σχέση με τα υδροπερατά μέλη και τις γύψους των Νεογενών αποθέσεων (πηγές Πανασού) και παρουσιάζουν παροχές λίγων ως μερικών δεκάδων m<sup>3</sup>/h [3].

## 2.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής καθορίζονται από διάφορους κλιματικούς παράγοντες, όπως ο άνεμος, η εξάτμιση, η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχόπτωση, η χιονόπτωση κ.λ.π. που επηρεάζουν και το υδατικό δυναμικό της. Για την υπό μελέτη περιοχή ισχύουν τα ακόλουθα:

**Άνεμος :** Στοιχεία ανέμων για την περιοχή μελέτης δεν διαθέτουμε. Γενικά όμως μπορούμε να πούμε, ότι στην Κρήτη λόγω της γεωγραφικής της θέσης πνέουν ισχυροί άνεμοι όλων των κατευθύνσεων, με επικρατούντες τους βόρειους και βορειοδυτικούς ανέμους.

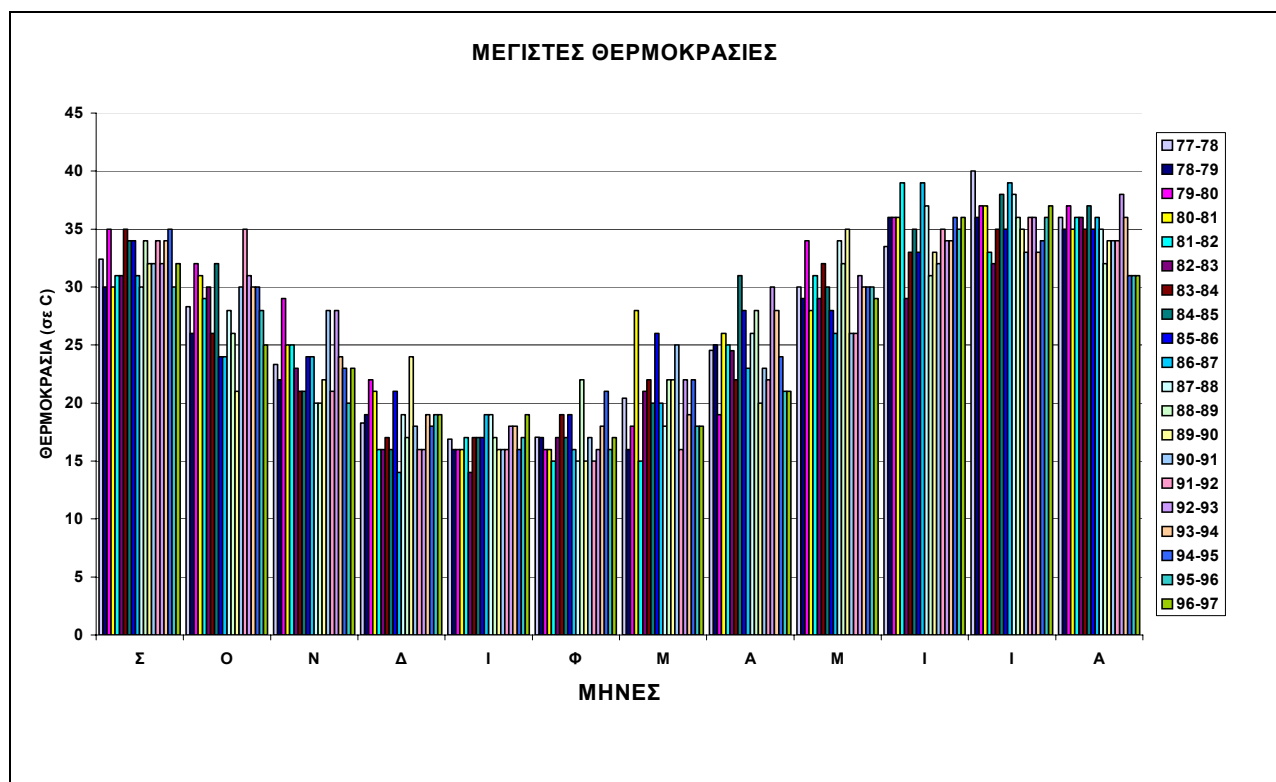
**Εξάτμιση :** Τα στοιχεία που διαθέτουμε αφορούν στη δυνητική εξάτμιση της περιοχής (1970-2001) και ελήφθησαν από το εξατμισήμετρο της Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων Ηρακλείου (Υ.Ε.Β.), που λειτουργεί στην Γέργερη. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει το παρακάτω σχετικό διάγραμμα (Γράφημα 2.1), όπου φαίνεται ότι η μέγιστη εξάτμιση παρατηρείται κατά τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο και η ελάχιστη κατά τους μήνες Δεκέμβρη-Ιανουάριο [4].



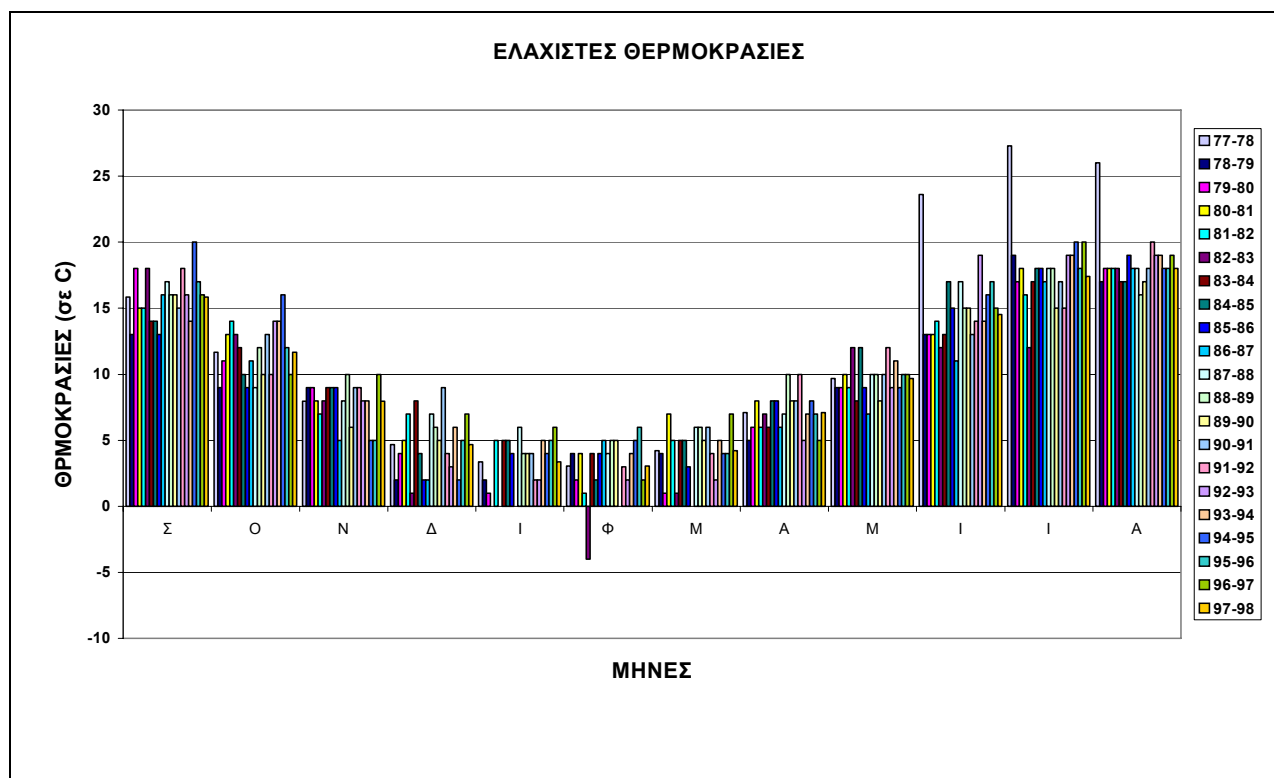
Γράφημα 2.1 : Μηνιαία εξάτμιση σταθμού Γέργερης για τα έτη 1970-2001

**Ηλιοφάνεια :** Η ηλιοφάνεια στην Κρήτη γενικότερα και επομένως και στην περιοχή μελέτης μας είναι από τις μεγαλύτερες στην Ελλάδα.

**Θερμοκρασία :** Στοιχεία θερμοκρασίας ελήφθησαν από το σταθμό της Υ.Ε.Β. Ηρακλείου, ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος από το 1978 στην Γέργερη. Από τα σχετικά γραφήματα (Γραφήματα 2.2 και 2.3) είναι φανερό, ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται κατά τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο και οι ελάχιστες κατά τους μήνες Δεκέμβριο-Ιανουάριο [4].



Γράφημα 2.2 : Μέγιστες θερμοκρασίες σταθμού Γέργερης για τα έτη 1977-1997



Γράφημα 2.3 : Ελάχιστες θερμοκρασίες σταθμού Γέργερης για τα έτη 1977-1997

**Υγρασία :** Γενικότερα στο νησί της Κρήτης, η υγρασία παρουσιάζει μεγάλες τιμές, ενώ δεν πέφτει κάτω από 50%. Στη λεκάνη της Μεσσαράς ειδικότερα, η υγρασία είναι ιδιαίτερα αυξημένη.

**Βροχόπτωση :** Η μελέτη και η επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων έχει μεγάλη σημασία στον καθορισμό του υδατικού δυναμικού και ισοζυγίου, καθώς είναι ο κύριος παράγοντας τροφοδοσίας του υδρογραφικού δικτύου κάθε περιοχής, είτε επιφανειακά είτε υπόγεια.

Τα διαθέσιμα στοιχεία βροχόπτωσης ελήφθησαν από τα βροχόμετρα της Υ.Ε.Β. Ηρακλείου, που βρίσκονται τοποθετημένα στις περιοχές **Ζαρός, Βορίζια, Γέργερη, Μορόνι, Αγ.Βαρβάρα, Πόμπια, Βαγιωνιά, Λαγόλια, Αγ. Κύριλλος, Ασήμι και Καπετανιανά**. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε για τη χρονική περίοδο 1970-2003.

A/A	ΣΤΑΘΜΟΙ	ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΣΤΑΘΜΩΝ	ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ
1	Ζαρός	500	810,1
2	Βορίζια	520	1128,2
3	Γέργερη	450	866,6
4	Μορόνι	400	675,9
5	Αγ.Βαρβάρα	570	951,9
6	Πόμπια	150	493,9
7	Βαγιωνιά	190	514,1
8	Λαγόλια	140	548,8
9	Αγ.Κύριλλος	450	523,0
10	Ασήμι	200	578,5
11	Καπετανιανά	800	688,6

Πίνακας 2.1 : Βροχομετρικοί σταθμοί εντός της λεκάνης, υψόμετρο θέσης και μέσο ετήσιο ύψος βροχής

Από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.4) διαφαίνεται, ότι ο μέσος όρος του ετήσιου ύψους βροχής για τις 33 βροχομετρικές περιόδους είναι για το ορεινό τμήμα της λεκάνης 668,2mm ενώ για το πεδινό 535mm [4].

Υδρ.Ετος	Ζαρός	Βορίζα	Γέργερη	Αγ.Κύριλλος	Πόμπια	Βαγιωνιά	Μορόνι	Ασήμι	Αγ.Βαρβάρα	Καπετανιανά	Λαγόλια
70-71	901,1	1086,4	841,5	511,5	517,4	520,6	604	588	975,9	644,4	610,6
71-72	619	857,9	665,6	470,8	450,1	426,6	462	410,6	705,1	588,6	450
72-73	645	821,3	646,1	474,6	476,1	450	561	442,6	772,1	696,1	520,3
73-74	628	788,2	704,2	389,6	385	366,4	468	450	746,3	560,1	444,4
74-75	838	1027,7	852	572,7	589,5	520	660	615,5	1037,5	727,7	496,5
75-76	902	1116,4	1036	676,9	566,5	618,4	738	734,5	117,1	918,1	676
76-77	593	784,3	569,5	325,8	218,5	347,5	445	380,5	628,7	393,2	394,4
77-78	1301	1751	1230	837,7	777	926,6	1014	1105,5	1301	1441,2	916,4
78-79	795	1058,4	772,5	601,8	515,8	647	711	717,5	937	784,8	564,9
79-80	673	1076,5	739,5	634,5	499,5	708,2	631	697,5	911,9	762,9	554,6
80-81	1109	1430,9	1120	651,8	672,5	836,6	947	751,5	1283,7	737,6	782,4
81-82	964	1318,8	939,5	721,6	699	736	831	673,5	1116,7	885	680,7
82-83	688	1216,2	664,5	397,4	282,5	384	430,2	546,8	877,1	717,9	417,7
83-84	878	1162,4	962,5	642,8	607,9	535,8	869	706	1205,9	800	644,3
84-85	957	1326,1	1026,5	645,8	646,5	619,2	754,8	792,5	1257,6	799,7	683,4
85-86	499	665,5	653,5	448,9	363	399,8	482	475,5	730,5	554,5	365,8
86-87	742	1380,1	1033,4	504	466	534	672,7	636,5	1141,6	716,8	632,6
87-88	933	2076,8	952,5	643,8	553	588,9	786	552,5	1179,1	727,5	630,8
88-89	648,2	1446,4	692	494,3	423,5	424,6	514,5	481,5	810	597,4	429,1
89-90	416,5	588,1	465	251,1	255	310,7	363	349,5	551,8	352	344,8
90-91	592,2	803,5	596,5	592,1	456	494,5	592	499	711,9	627,8	465,9
91-92	726,7	1133,6	784	363,3	330,5	395,9	552	546,5	888,5	781	462,5
92-93	590,5	811,5	713	318,6	344,5	284,5	446	341,6	634,4	341,8	388,1
93-94	942	1192,5	981,2	468,7	505,9	458,9	838,4	492,5	987	584,7	506,2
94-95	950	1192,5	1047,3	460,8	488,7	436,9	675,8	556,6	808,3	518,3	440,1
95-96	1109	1511,5	1286,3	644,7	679,9	663,0	959,1	772,3	1122,9	834,2	639,1
96-97	945,5	1073,6	1006,1	512,7	483,5	527,5	708,5	562,2	1237,8	580,7	488,1
97-98	854	1023,5	915,9	451	472,2	432,5	722,7	579,5	937	653,5	502,9
98-99	372,5	1063	871,8	247,5	528,6	243,2	733,7	279,6	1011	270,6	474,3
99-00	604,9	710,6	714,8	272,2	328,9	278,7	612,1	406,4	814	500,6	425,4
00-01	835,3	1067,7	968,7	507,0	512,9	561,0	828	553,4	921,5	616,2	551,8
01-02	1013,5	1217,8	1035,5	388,0	396,0	387,2	702,1	495,9	949,3	624,8	644,2
02-03	1028,5	1345,9	1139,2	870,6	842,9	447,4	992,9	632,7	1112,5	966,5	812,3
M.O.	810,1	1128,2	866,6	523,0	493,9	514,1	675,9	578,5	951,9	688,6	548,8

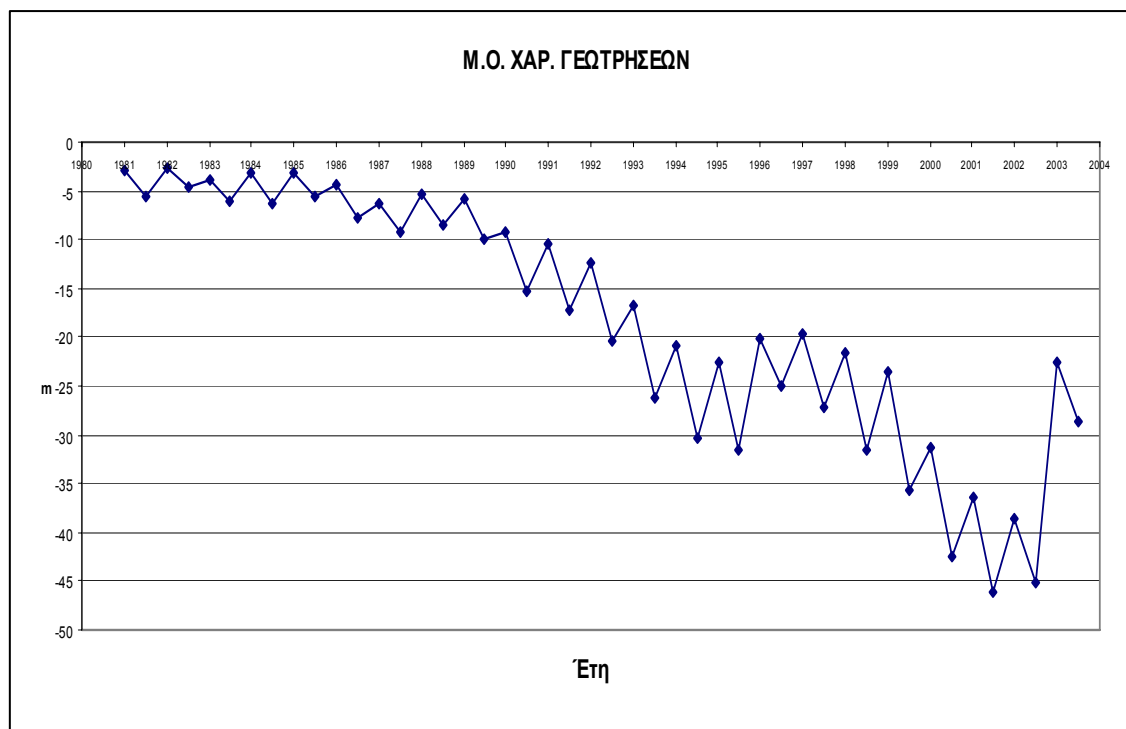
Πίνακας 2.2 : Μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm για τους 11 σταθμούς εντός της λεκάνης απορροής για 33 χρόνια μελέτης

### 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης. Τα κύρια είδη καλλιεργειών είναι οι ποτιστικές ελιές και οι αμπελώνες, η άρδευση των οποίων γίνεται αποκλειστικά από το νερό του υπόγειου υδροφορέα της υδρογεωλογικής λεκάνης του Γεροποτάμου.

Τη δεκαετία του 1970 κατασκευάστηκαν στην ευρύτερη περιοχή δύο αρδευτικά συστήματα, τα οποία θεωρήθηκαν πρότυπα για τη μελλοντική επέκταση του αρδευτικού δικτύου. Εντός της λεκάνης του Γεροποτάμου, εγκαταστάθηκε το αρδευτικό σύστημα της Πόμπιας, το οποίο περιελάμβανε τέσσερις γεωτρήσεις, με ρυθμό άντλησης  $800\text{m}^3/\text{h}$ . Μετρήσεις έδειξαν ότι την περίοδο εκείνη η στάθμη του υδροφορέα κυμαινόταν στα 3-5m από την επιφάνεια του εδάφους και ο συνολικός όγκος του αντλούμενου ύδατος έφτανε τα  $10\text{Mm}^3/\text{yr}$ .

Το 1984 το αρδευτικό δίκτυο επεκτείνεται σε ολόκληρη την πεδιάδα, με αποτέλεσμα την αύξηση των αρδευτικών αναγκών και επομένως του αντλούμενου όγκου υπόγειου ύδατος. Συνέπεια αυτών είναι η έντονη πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Το σχήμα αυτό προέκυψε από το μέσο όρο των αναπληρώσεων και εκκενώσεων του υδροφορέα, από 6 χαρακτηριστικές γεωτρήσεις στην υδρογεωλογική λεκάνη Γεροποτάμου.

Η μεγάλη αυτή πτώση του υδροφορέα οφείλεται στην συνεχή αύξηση των ποτιστικών καλλιεργειών, με αποτέλεσμα ο συνολικός όγκος του αντλούμενου ύδατος μέχρι το 1995 να έχει φτάσει τα 40Mm<sup>3</sup>/yr. Επιπλέον, η συχνή εμφάνιση ξηρών ετών στη δεκαετία του '90 οδήγησε σε εντατικότερη άντληση, με συνέπεια η στάθμη του υδροφορέα το 2001 να εντοπίζεται στα 45m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Λόγω των παραπάνω, η ισορροπία του συστήματος της υδρογεωλογικής λεκάνης σήμερα έχει διαταραχθεί πλήρως. Η μεγάλη πτώση της στάθμης του υδροφορέα (30m το 2004), οι χαμηλές βροχοπτώσεις των τελευταίων ετών και η συνεχιζόμενη και αυξανόμενη άντληση κατά τους θερινούς μήνες καλλιεργούν το φόβο της μη αναστρέψιμης καταστροφής του υπόγειου υδροφορέα. Η επιφανειακή απορροή του χειμάρρου Γεροποτάμου τα τελευταία χρόνια είναι μηδενική, καθώς η μεγάλη εκκένωση του υδροφορέα έχει αυξήσει το ρυθμό διήθησης, με αποτέλεσμα όλος ο όγκος ύδατος της βροχής να διηθείται πριν προλάβει να γίνει επιφανειακή απορροή.

Για την αντιμετώπιση της παρούσας κατάστασης, οι αρμόδιες αρχές και οι τοπικοί φορείς προέβησαν στην κατασκευή του φράγματος του Τ.Ο.Ε.Β. στην περιοχή της Πόμπιας. Ο ρόλος του φράγματος αυτού είναι η συλλογή και συγκράτηση του ύδατος της βροχής, με σκοπό την αύξηση της διήθησης, τον εμπλουτισμό του υδροφορέα και την ανύψωση της στάθμης του.



### 3. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η παρούσα ανάλυση βασίστηκε σε πρωτογενή δεδομένα ημερήσιας χρονικής κλίμακας. Τα δεδομένα αυτά καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1981-2003, ελήφθησαν από διάφορους σταθμούς στην περιοχή μελέτης και αφορούν στις εξής παραμέτρους:

- Βροχόπτωση
- Απορροή
- Θερμοκρασία
- Σχετική Υγρασία
- Ταχύτητα Ανέμου
- Ηλιοφάνεια

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι σταθμοί μέτρησης και η προέλευση των αρχικών δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 3.1 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

##### Βροχόπτωση

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα από συνολικά 11 βροχομετρικούς σταθμούς, εγκατεστημένους στη λεκάνη Γεροποτάμου. Οι παραπάνω σταθμοί λειτουργούν για λογαριασμό της Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων (Υ.Ε.Β.) της Περιφέρειας Κρήτης.

Κάθε υδρολογικό έτος αρχίζει τη 1/9 και τελειώνει τη 31/8 του επομένου έτους.

Οι βροχομετρικοί σταθμοί, που καλύπτουν την περιοχή μελέτης μας, δηλαδή τη λεκάνη της Μεσσαράς παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

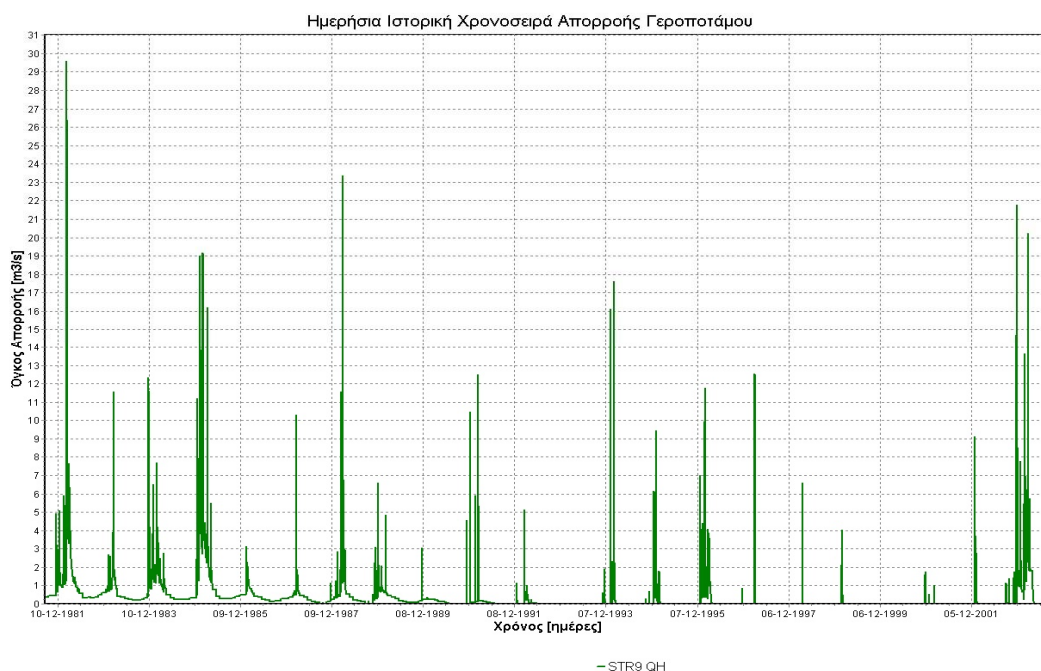
ΣΤΑΘΜΟΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ
Αγία Βαρβάρα	570
Άγιος Κύριλλος	450
Ασήμι	200
Βαγιωνιά	190
Βορίζια	520
Γέργερη	450

Ζαρός	500
Καπετανιανά	800
Λαγόλια	140
Μορόνι	400
Πόμπια	150

Πίνακας 3.1 : Βροχομετρικοί Σταθμοί στην Υδρολογική Λεκάνη του Γεροποτάμου

### Απορροή

Τα δεδομένα που διαθέτουμε για την απορροή του χειμάρρου Γεροποτάμου προέρχονται από σταθμηγράφο τοποθετημένο στην έξοδο της λεκάνης, στην περιοχή της Φαιστού. Οι μετρήσεις της παροχής του χειμάρρου αποδίδονται σε  $\text{m}^3/\text{sec}$ . Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ημερήσια χρονοσειρά απορροής του Γεροποτάμου:



Γράφημα 3.1 : Ιστορική Χρονοσειρά Απορροής Γεροποτάμου

### Θερμοκρασία - Σχετική Υγρασία - Ταχύτητα Ανέμου - Ηλιοφάνεια

Τα πρωτογενή δεδομένα για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιοφάνειας ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Τυμπακίου. Αν και ο σταθμός αυτός βρίσκεται πλησίον και όχι εντός της υπό μελέτη υδρολογικής λεκάνης, θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την ευρύτερη περιοχή της Μεσσαράς, όσον

αφορά σε μετεωρολογικά δεδομένα και δεχόμαστε ότι οι αποκλίσεις από τις μετεωρολογικές συνθήκες της λεκάνης του Γεροποτάμου είναι πολύ μικρές.

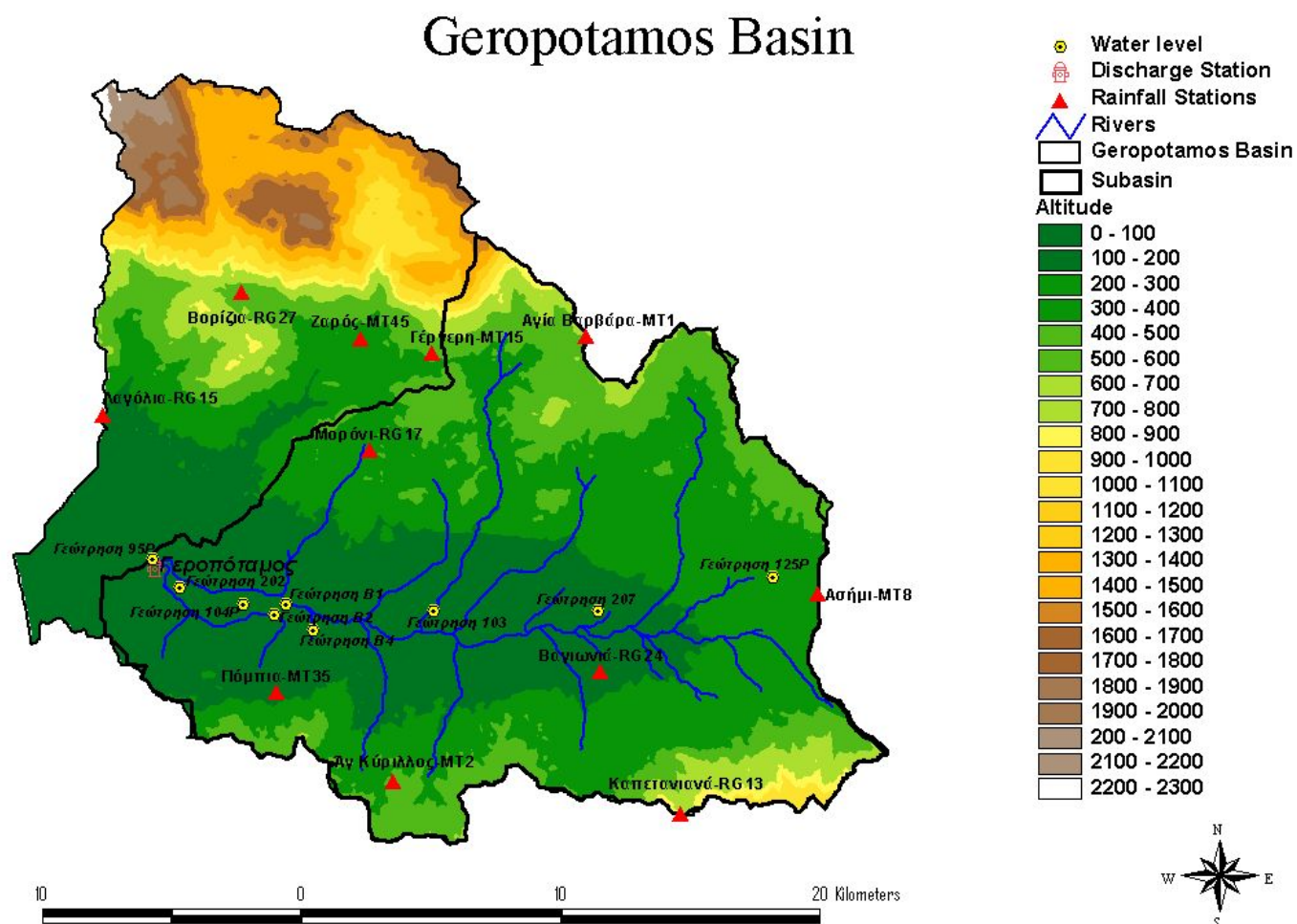
### Χρήσεις Γης

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι διάφορες χρήσεις γης, καθώς και η συνολική αρδευόμενη έκταση που αντιστοιχεί σε κάθε είδος καλλιέργειας για την υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου [5]:

	ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ (ha)			
Έτος	Δημητριακά	Λαχανικά	Ελιές	Αμπέλια
1984-85	2500	1600	3850	2600
1985-86	2500	1600	4000	2600
1986-87	2500	1600	4400	2600
1987-88	2500	1600	5800	2600
1988-89	2500	1600	6500	2600
1989-90	2500	1600	7000	2600
1990-91	2500	1600	7500	2600
1991-92	2500	1600	8000	2600
1992-93	2500	1600	8500	2600
1993-94	2500	1600	9000	2600
1994-95	2500	1600	9500	2600
1995-96	2500	1600	10000	2600
1996-97	2500	1600	11000	2600

Πίνακας 3.2 : Χρήσεις Γης Λεκάνης Γεροποτάμου

Στον παρακάτω χάρτη φαίνεται η κατανομή των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών, των γεωτρήσεων, καθώς και του σταθμηγράφου στην περιοχή μελέτης:



Χάρτης 3.1 : Κατανομή Σταθμών και Γεωτρήσεων στην Υδρολογική Λεκάνη Γεροποτάμου

### 3.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Για την μετατροπή των σημειακών βροχοπτώσεων σε επιφανειακό μέγεθος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thiessen, που επιτρέπει τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχής για ανομοιόμορφη κατανομή σταθμών και μη επίπεδες επιφάνειες.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, οι σταθμοί εντός και πλησίον της λεκάνης συνδέονται με ευθείες γραμμές. Στη συνέχεια σύρονται οι μεσοκάθετοι σε αυτές τις συνδετικές γραμμές, οι οποίες σχηματίζουν πολύγωνα γύρω από κάθε σταθμό. Η επιφάνεια επιρροής του κάθε σταθμού είναι η επιφάνεια του αντιστοίχου πολυγώνου και ορίζεται σαν ποσοστό  $\alpha_j$  (βάρος) της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Η ζυγισμένη μέση τιμή (στο χρόνο  $t$ ) βροχής  $\tilde{P}_t$  των σταθμών  $j = 1, \dots, n$  υπολογίζεται στην συνέχεια ως:

$$\tilde{P}_t = \sum_{j=1}^n \alpha_j * P_{t,j}$$

όπου  $P_{t,j}$  η σημειακή βροχόπτωση στον σταθμό  $J$ .

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βάρη των βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης του Γεροποτάμου:

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΒΑΡΟΣ
Αγία Βαρβάρα	0,13
Άγιος Κύριλλος	0,09
Ασήμι	0,13
Βαγιονιά	0,21
Βορίζια	0,00
Γέργερη	0,06
Ζαρός	0,00
Καπετανιανά	0,07
Λαγόλια	0,00
Μορόνι	0,15
Πόμπια	0,16

Πίνακας 3.3 : Βάρη Thiessen Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου

Στη συνέχεια, η ζυγισμένη αυτή τιμή  $\tilde{P}_t$  οφείλει να διορθωθεί για τη μεταβολή της βροχόπτωσης με το υψόμετρο. Η τιμή  $\tilde{P}_t$  αναφέρεται στο μέσο υψόμετρο των σταθμών (ζυγισμένος μέσος των υψομέτρων των σταθμών με βάρος το  $\alpha_j$ )

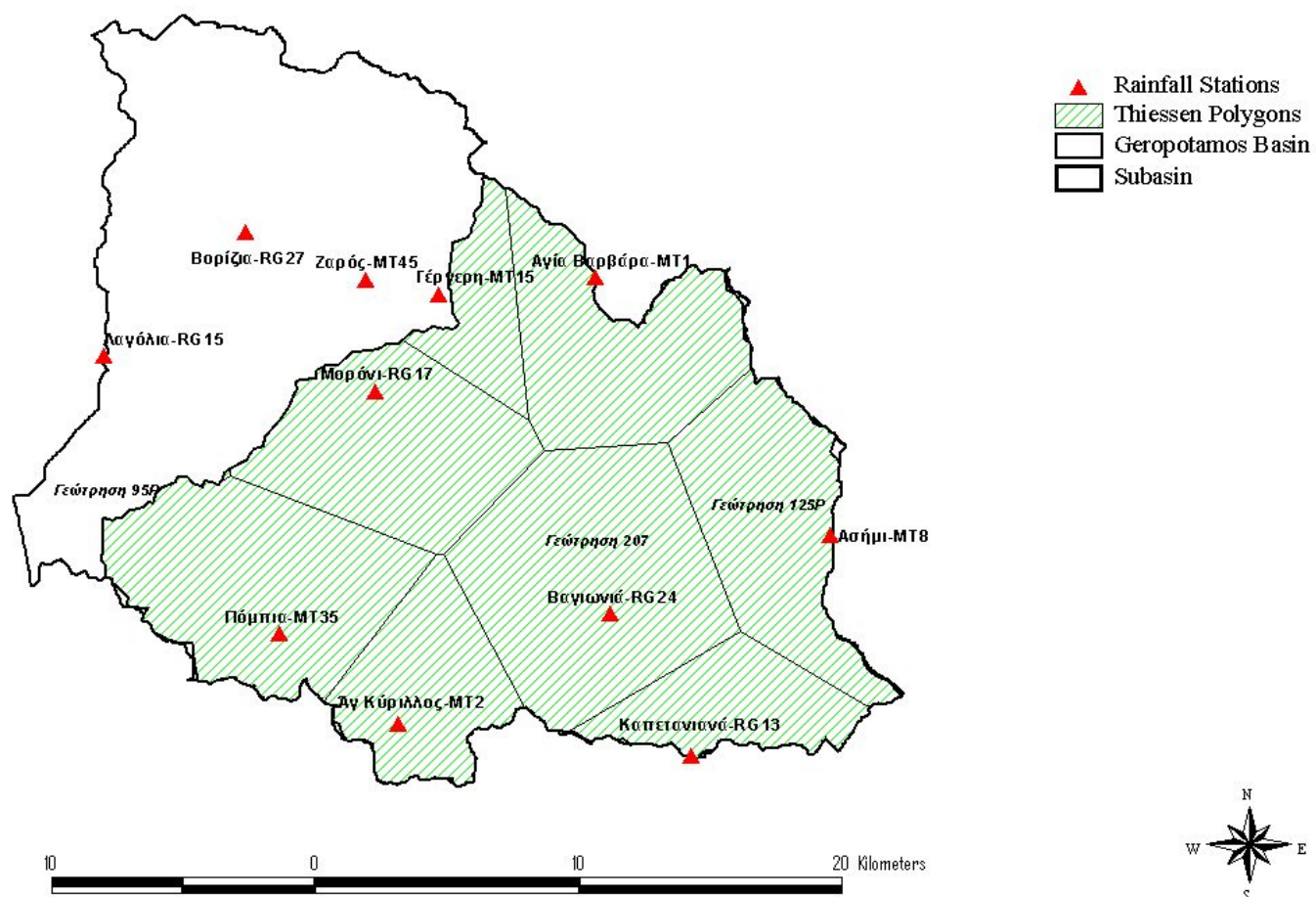
και πρέπει να μεταφερθεί στο υψομετρικό κέντρο βάρους της λεκάνης. Πολλαπλασιάζεται με τον παρακάτω συντελεστή:

$$\lambda = \tilde{P}_i + \frac{\mu \Delta h}{100}$$

...όπου  $\mu$  η βροχομετρική βαθμίδα και  $\Delta h$  η διαφορά μεταξύ του ζυγισμένου μέσου υψομέτρου των σταθμών (μέσο υψόμετρο καταγραφής) και του πραγματικού μέσου υψομέτρου της λεκάνης. Δεδομένου όμως, ότι στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια βροχομετρικά στοιχεία, η αναγωγή της βροχόπτωσης στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης δεν ενδείκνυται, καθώς η ακρίβεια της μεθόδου είναι μειωμένη [6].

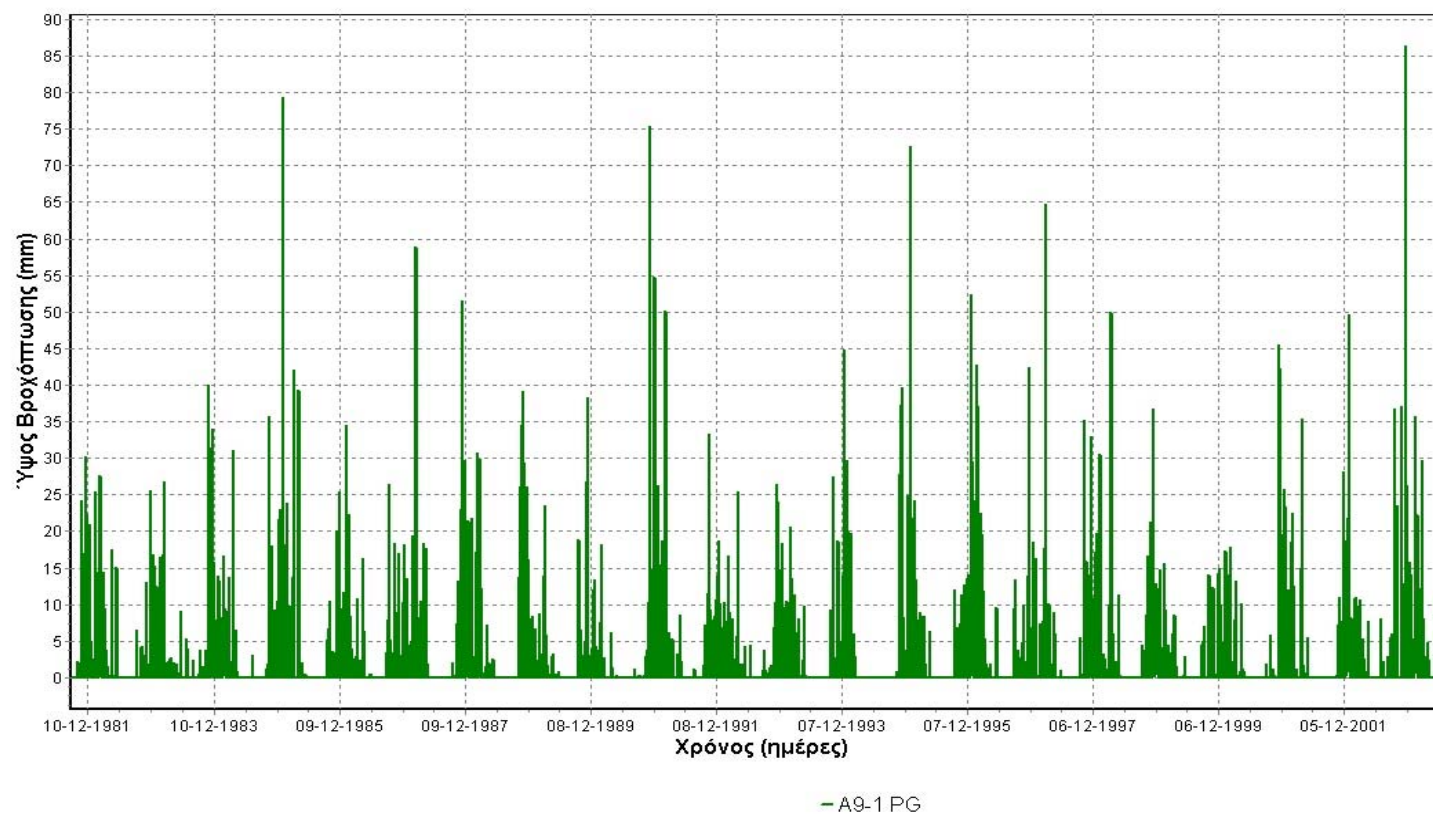
Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται ο χάρτης διαίρεσης της λεκάνης του Γεροποτάμου σε πολύγωνα Thiessen, η χρονοσειρά της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης, όπως προέκυψε από την παραπάνω μέθοδο, καθώς επίσης και ο χάρτης χωρικής κατανομής της μέσης ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης του Γεροποτάμου για τη χρονική περίοδο 1981-2003:

## Thiessen Polygons



Χάρτης 3.2 : Χωρισμός Λεκάνης Γεροποτάμου σε Πολύγωνα Thiessen

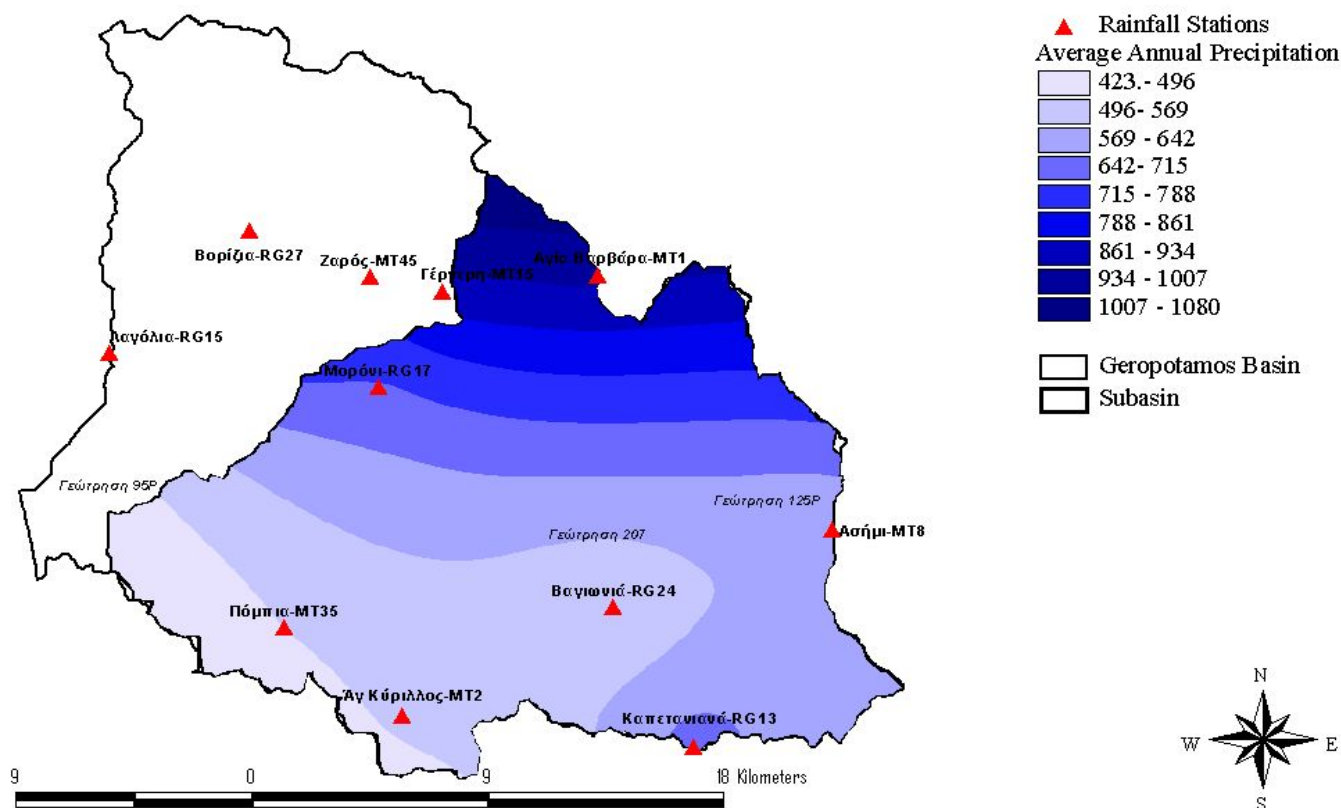
Ημερήσια Ιστορική Χρονοσειρά Επιφανειακής Βροχόπτωσης  
Υδρολογικής Λεκάνης Γεροποτάμου



Γράφημα 3.2 : Ιστορική Χρονοσειρά Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου



## Average Annual Precipitation Period 1981-2003 Kriging Interpolation



Χάρτης 3.3 : Χωρική Κατανομή Μέσης Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου (Παρεμβολή Kriging)

### 3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Η εξατμισοδιαπνοή μιας λεκάνης μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους. Το πρόγραμμα HYMOS προσφέρει την δυνατότητα υπολογισμού της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Penman Standard κατά FAO
- Modified (Τροποποιημένη)
- FAO pan evaporation (Μέθοδος Εξατμισιμέτρου λεκάνης, class A pan)
- Christiansen
- FAO radiation
- Makkink radiation
- Jensen-Haise
- Blaney-Criddle
- Mass Transfer (Μεταφοράς Μάζας)

Ακολουθεί μια μικρή ανάλυση των βασικότερων από τις παραπάνω μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

#### 3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑ FAO<sup>[7]</sup>

Η μέθοδος Penman κατά FAO περιγράφεται από τη γενική σχέση:

$$ET_o = c * \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * f(u) * (e_s - e_a) \right]$$

...όπου:

$ET_o$  = η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σε mm/day

$\Delta$  = κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών σε θερμοκρασία  $t$  (mb/°C)

$\Gamma$  = η ψυχομετρική σταθερά (mb/°C)

$R_n$  = η καθαρή ακτινοβολία (mm/day)

$f(u)$  = η συνάρτηση ανέμου

$e_s$  = η πίεση κορεσμού υδρατμών σε μέση θερμοκρασία αέρα (mb)

$e_a$  = η πραγματική πίεση υδρατμών (mb)

$c$  = διορθωτικός συντελεστής για την εξισορρόπηση της επίδρασης των ημερησίων και νυκτερινών συνθηκών

**Κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών – θερμοκρασίας**

$$\Delta = \frac{e_s}{T^2} \left( 6790.5 - 5.02808 * T + 174209 * 10^{\frac{-1302.88}{T}} \right)$$

...όπου:  $T = t + 273.16$  (°Kelvin)

$t$  = θερμοκρασία αέρα (°C)

**Ψυχομετρική σταθερά**

$$\gamma = 0.00066 * p * (1 + 0.00115 * t)$$

...όπου  $p$  = η ατμοσφαιρική πίεση (mb)

### Πίεση αέρα

$$p = 1013 - 0.1152 \cdot z + 5.44 \cdot 10^{-6} \cdot z^2 \text{ (mb)}$$

...όπου  $z$  = το υψόμετρο του σταθμού (m)

### Ακτινοβολία

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

...όπου:  $R_{ns}$  = καθαρή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία

$R_{nl}$  = καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία

Η καθαρή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$

...όπου:  $R_s$  = μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ )

$\alpha$  = συντελεστής ανάκλασης (0.25). Ο συντελεστής ανάκλασης παίρνει τιμές, που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Είδος Επιφάνειας	Εύρος
Ελεύθερη επιφάνεια ύδατος	0.08
Ψηλό δάσος	0.11 - 0.16
Ψηλά καλλιεργούμενα φυτά	0.15 - 0.16
Δημητριακά	0.20 - 0.26
Χαμηλά καλλιεργούμενα φυτά	0.20 - 0.26
Γρασίδια και βοσκοτόπια	0.20 - 0.26
Γυμνό έδαφος	0.10 (υγρό)-0.35 (ξηρό)
Χιόνι και πάγος	0.20 (παλαιό)-0.80 (νέο)

Πίνακας 3.4 : Εύρος Τιμών Συντελεστή Ανάκλασης

Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_s = R_a \cdot (a_1 + b_1 \cdot n/N)$$

...όπου:

$R_a$  = ακτινοβολία εκτός της γήινης σφαίρας ( $\text{Wm}^2$  - συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και της χρονικής περιόδου)

$n/N$  = ο λόγος της πραγματικής προς τη μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας (συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και της χρονικής περιόδου)

$a_1$  = κλάσμα της έξω-γήινης ακτινοβολίας σε νεφελώδεις μέρες (0.25)

$a_1 + b_1$  = κλάσμα της έξω-γήινης ακτινοβολίας σε διαυγείς μέρες (0.75)

Η καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση:

$$R_{nl} = \sigma \cdot T^4 \cdot (a_2 - b_2 \sqrt{e_a}) \cdot (a_3 + b_3 \cdot n/N)$$

...όπου:

$\sigma$  = η σταθερά Stefan-Boltzman ( $\sigma = 2 \cdot 10^{-9}$ )

$a_2, b_2$  = σταθερές στον όρο των υδρατμών με τιμές 0.34 και 0.044 αντίστοιχα

$a_3, b_3$  = σταθερές στον όρο της ακτινοβολίας με τιμές 0.10 και 0.90 αντίστοιχα

### Συνάρτηση ανέμου

$$f(u) = 0.26 * (1 + U_{24}/100)$$

...όπου  $U_{24}$  = ταχύτητα ανέμου 24ώρου (Km/day), μετρημένη σε ύψος 2 m

### Πίεση υδρατμών ( $e_s - e_a$ )

Η πίεση κορεσμού υδρατμών  $e_s$  υπολογίζεται από τον τύπο των Goff-Gratch ( $e_{gg}$ ), ενώ η πραγματική πίεση υδρατμών μπορεί να υπολογιστεί από τους παρακάτω τύπους ανάλογα με τα διαθέσιμα κλιματολογικά δεδομένα.

$$e_a = e_s * Rh/100$$

$$e_a = e_s(t_{wb}) - \gamma * (t_{db} - t_{wb})$$

$$e_a = e_s * (t_{dew})$$

...όπου:

$Rh$  = η μέση σχετική υγρασία (%)

$t_{wb}, t_{db}$  = θερμοκρασία υγρής και ξηρής λυχνίας (wet bulb και dry bulb)(°C)

$t_{dew}$  = θερμοκρασία σημείου δρόσου (°C)

### Συντελεστής διόρθωσης

Ο συντελεστής διόρθωσης είναι συνάρτηση της μέγιστης σχετικής υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας και του λόγου της ημερήσιας προς τη νυκτερινή ταχύτητα ανέμου. Είναι δε ιδιαίτερα σημαντικός για νεφελώδεις περιοχές με δυνατούς και ξηρούς ανέμους.

### 3.3.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ PENMAN<sup>[7]</sup>

Στην μέθοδο αυτή, σε σχέση με τις επιμέρους εξισώσεις της μεθόδου Penman-FAO, έχουν τροποποιηθεί οι παρακάτω εξισώσεις:

#### Κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών – θερμοκρασίας

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(237.3 + T)^2}$$

...όπου:

$T = t + 273.16$  (° Kelvin)

$t$  = θερμοκρασία αέρα (°C)

$e_s$  = η πίεση κορεσμού υδρατμών σε μέση θερμοκρασία αέρα  $T$ .

### Πίεση κορεσμού υδρατμών

$$e_s(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right)$$

Σε σχέση με την εξίσωση Goff-Gratch και για θερμοκρασίες μεταξύ 0 και 50 °C, το προκύπτον λάθος από την παραπάνω εξίσωση είναι μικρότερο του 0.06%.

### Ψυχομετρική σταθερά

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda}$$

...όπου:

$c_p$  = ειδική θερμότητα αέρα (=1.013 MJ/kg/°C)

$p$  = ατμοσφαιρική πίεση (kPa)

$\varepsilon$  = λόγος των μοριακών μαζών των υδρατμών και του ξηρού αέρα ( $\varepsilon=0.622$ )

$\lambda$  = η λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης, η οποία προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = 2501 - 2.361 * t, t \text{ (}^\circ\text{C)}$$

...για 20 °C  $\lambda=2453.78\text{kJ/kg} = 2.45 \text{ MJ/kg}$ )

### Πίεση αέρα

$$P = 101.3 * \left( \frac{T - 0.0065 * z}{T} \right)^{5.256}$$

...όπου:

$P$  = ατμοσφαιρική πίεση στο υψόμετρο του σταθμού (kPa)

$Z$  = το υψόμετρο του σταθμού (m)

$T$  = μέση θερμοκρασία αέρα (K)

### 3.3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ PAN EVAPORATION<sup>[7]</sup>

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς από τις μετρήσεις των εξατμισιμέτρων:

$$E_{To} = K_p * E_{pan}$$

...όπου:

$E_{To}$  = η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς σε mm/day

$E_{pan}$  = η μέση ημερήσια εξάτμιση από το εξατμισίμετρο (mm/day)

$K_p$  = συντελεστής εξατμισίμετρου (FAO, pub. No 24, 1977). Οι τιμές του συντελεστή  $K_p$  αναφέρονται σε εξατμισίμετρα Class A (μεταλλικά εξατμισίμετρα επιφανείας, διαμέτρου 122cm και ύψους 25cm, τοποθετημένα σε ύψος 10cm πάνω από το έδαφος). Ο συντελεστής του εξατμισιμέτρου αποτελεί συνάρτηση της μέσης σχετικής υγρασίας, της 24ωρης ταχύτητας του ανέμου και των συνθηκών περιβάλλοντος του οργάνου (Μήκος αναπτύγματος – fetch length).

Γενικά διακρίνονται δύο περιπτώσεις ως προς το περιβάλλον του οργάνου:

1. Το εξατμισίμετρο περιβάλλεται από καλλιεργούμενες εκτάσεις

2. Το εξατμισίμετρο είναι τοποθετημένο σε ξηρή/ χέρσα περιοχή αλλά περιβάλλεται σε κάποια απόσταση από αρδευόμενες καλλιέργειες ή από ξηρικές καλλιέργειες.

Στην πρώτη περίπτωση το μήκος αναπτύγματος είναι η απόσταση κατά την κατεύθυνση του ανέμου μεταξύ της καλλιεργούμενης εκτάσεως και του οργάνου. Στην δεύτερη περίπτωση, είναι η απόσταση κατά την κατεύθυνση του ανέμου μεταξύ της ξηρής επιφανείας και του οργάνου.

Όπως προκύπτει από την περιγραφή των μεθόδων Penman-FAO και τροποποιημένη Penman, απαραίτητα κλιματολογικά στοιχεία για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς σε μηνιαίο βήμα αποτελούν τα παρακάτω:

- Οι χρονοσειρές μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας (°C)
- Οι χρονοσειρές μέσης ημερήσιας σχετικής υγρασίας (%)
- Οι χρονοσειρές μέγιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας (%) (μόνο για την Penman-FAO)
- Οι χρονοσειρές ημερήσιας ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2m από την εξατμίζουσα επιφάνεια (Km/day)
- Οι χρονοσειρές του λόγου της πραγματικής προς τη μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας (-)
- Ο λόγος της ημερήσιας προς τη νυκτερινή ταχύτητα ανέμου (μόνο για την Penman-FAO)

Για την εφαρμογή της μεθόδου Εξατμισιμέτρου λεκάνης, class A pan, απαραίτητα στοιχεία αποτελούν:

- Οι χρονοσειρές των μετρήσεων του οργάνου
- Οι χρονοσειρές μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας (%)
- Οι χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2m από την εξατμίζουσα επιφάνεια (Km/day)
- Η γνώση των χαρακτηριστικών και του περιβάλλοντος του οργάνου

Το HYMOS με βάση τις χρονοσειρές της μέσης ημερήσιας σχετικής υγρασίας (%), τις χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2m από την εξατμίζουσα επιφάνεια (Km/day), υπολογίζει αυτόματα τον συντελεστή  $K_p$ . Ο χρήστης πρέπει να έχει ορίσει προηγουμένως το μήκος αναπτύγματος και την περίπτωση (1 ή 2), στην οποία ανήκει το εν λόγω εξατμισίμετρο.

### 3.3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

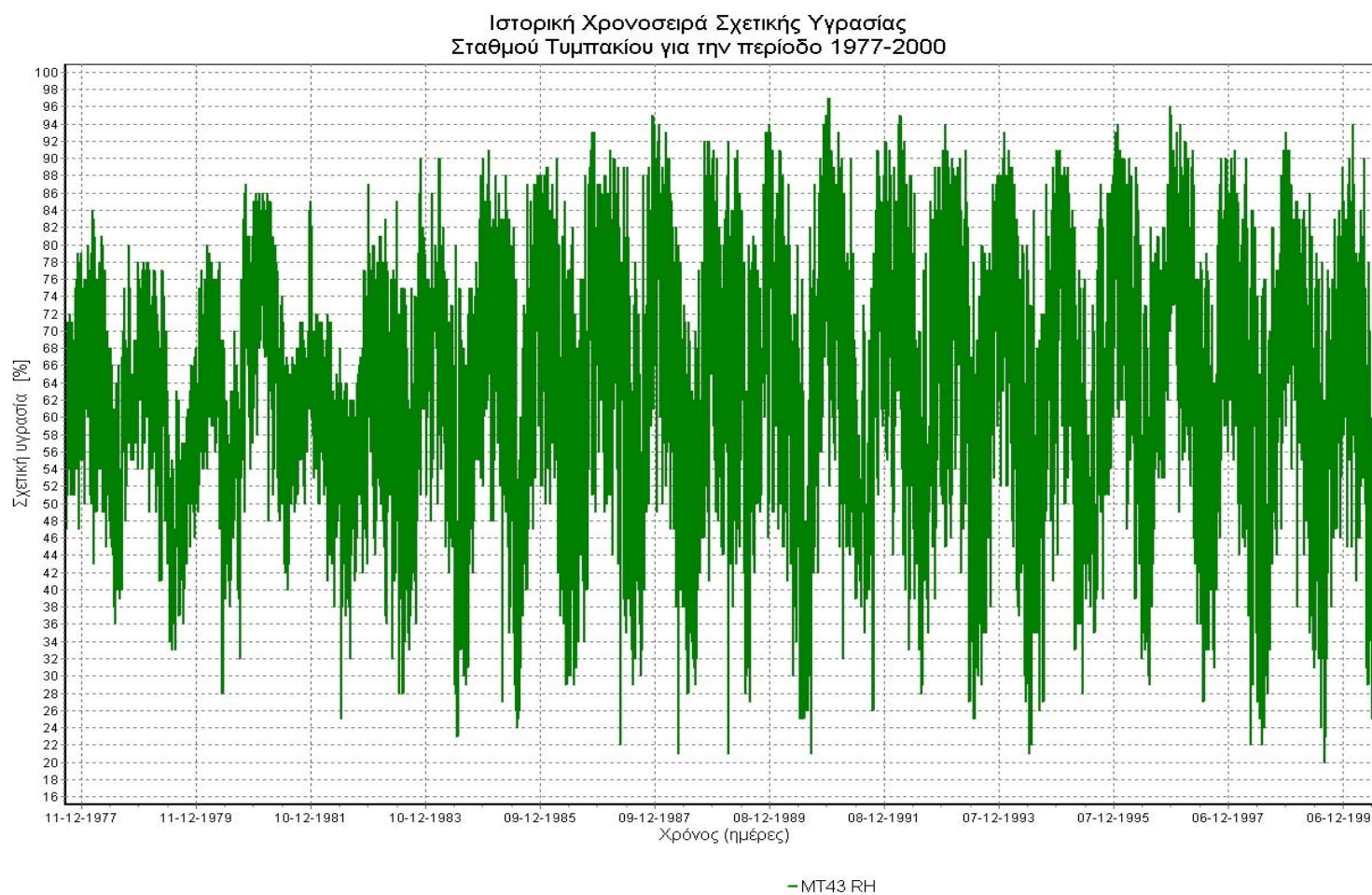
Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η Τροποποιημένη Μέθοδος Penman. Ο υπολογισμός έγινε με το πρόγραμμα HYMOS για τη χρονική περίοδο 1977-2000. Η χρονοσειρά δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που προέκυψε επεκτάθηκε για τα επόμενα τρία έτη, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη χρονοσειρά ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής να καλύπτει ολόκληρη την περίοδο ανάλυσης (1981-2003).

Τα ημερήσια δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής είναι τα εξής:

- Χρονοσειρά Μέσης Ημερήσιας Θερμοκρασίας
- Χρονοσειρά Ταχύτητας Ανέμου
- Χρονοσειρά Σχετικής Υγρασίας
- Χρονοσειρά Ωρών Ηλιοφάνειας

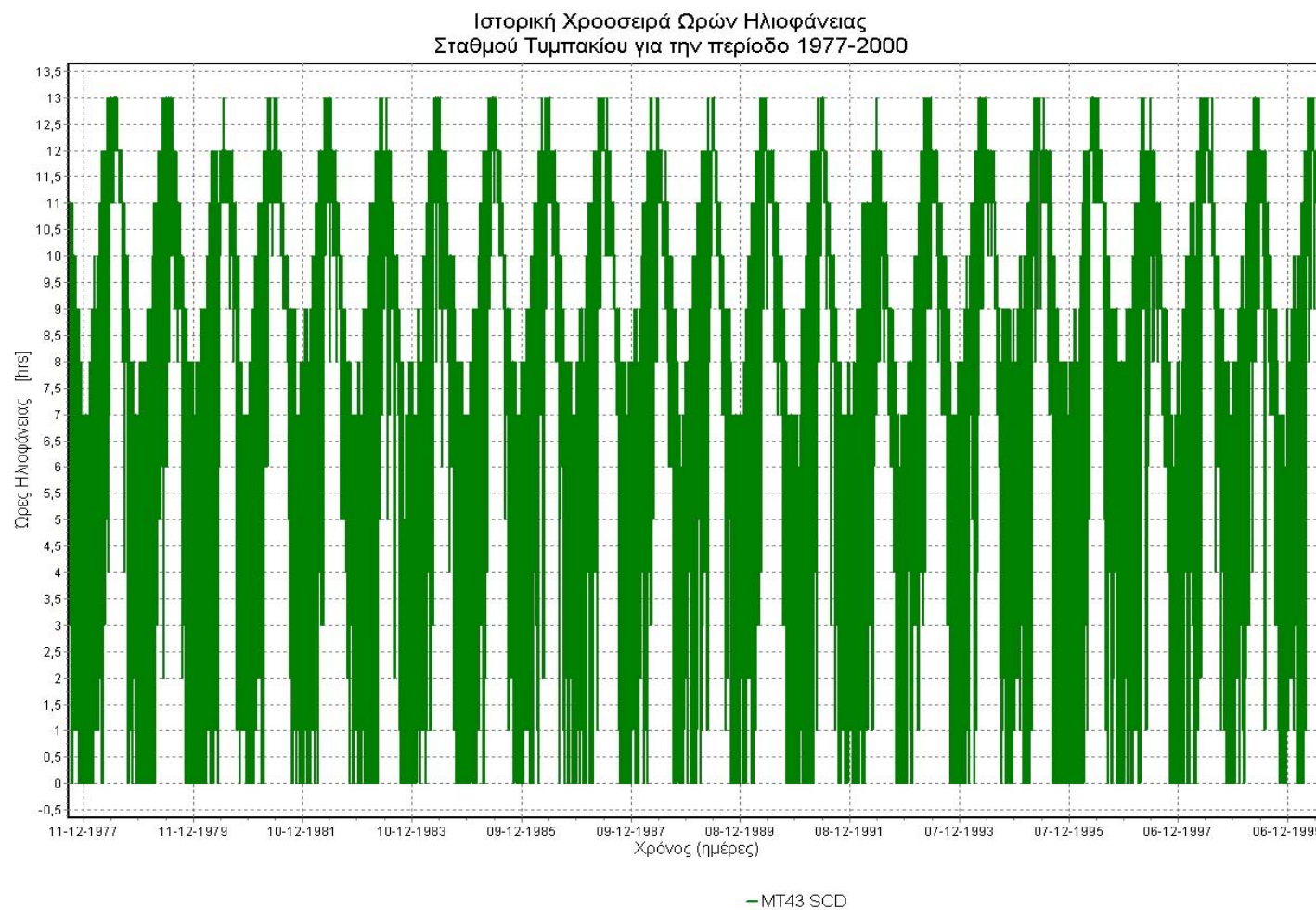
Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής βασίστηκε σε πρωτογενή δεδομένα, που ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Τυμπακίου. Ο σταθμός αυτός δεν βρίσκεται εντός της υπό μελέτη υδρολογικής λεκάνης, αλλά πλησίον αυτής. Δεδομένου όμως ότι η περιοχή του Τυμπακίου αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την ευρύτερη περιοχή της Μεσσαράς, όσον αφορά στα μετεωρολογικά δεδομένα, δεχόμαστε ότι οι αποκλίσεις από τις μετεωρολογικές συνθήκες της λεκάνης του Γεροποτάμου είναι πολύ μικρές και επομένως τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια.

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι ιστορικές χρονοσειρές των πρωτογενών δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού του Τυμπακίου, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, καθώς επίσης και η χρονοσειρά της εξατμισοδιαπνοής, όπως προέκυψε για τη χρονική περίοδο 1981-2003.

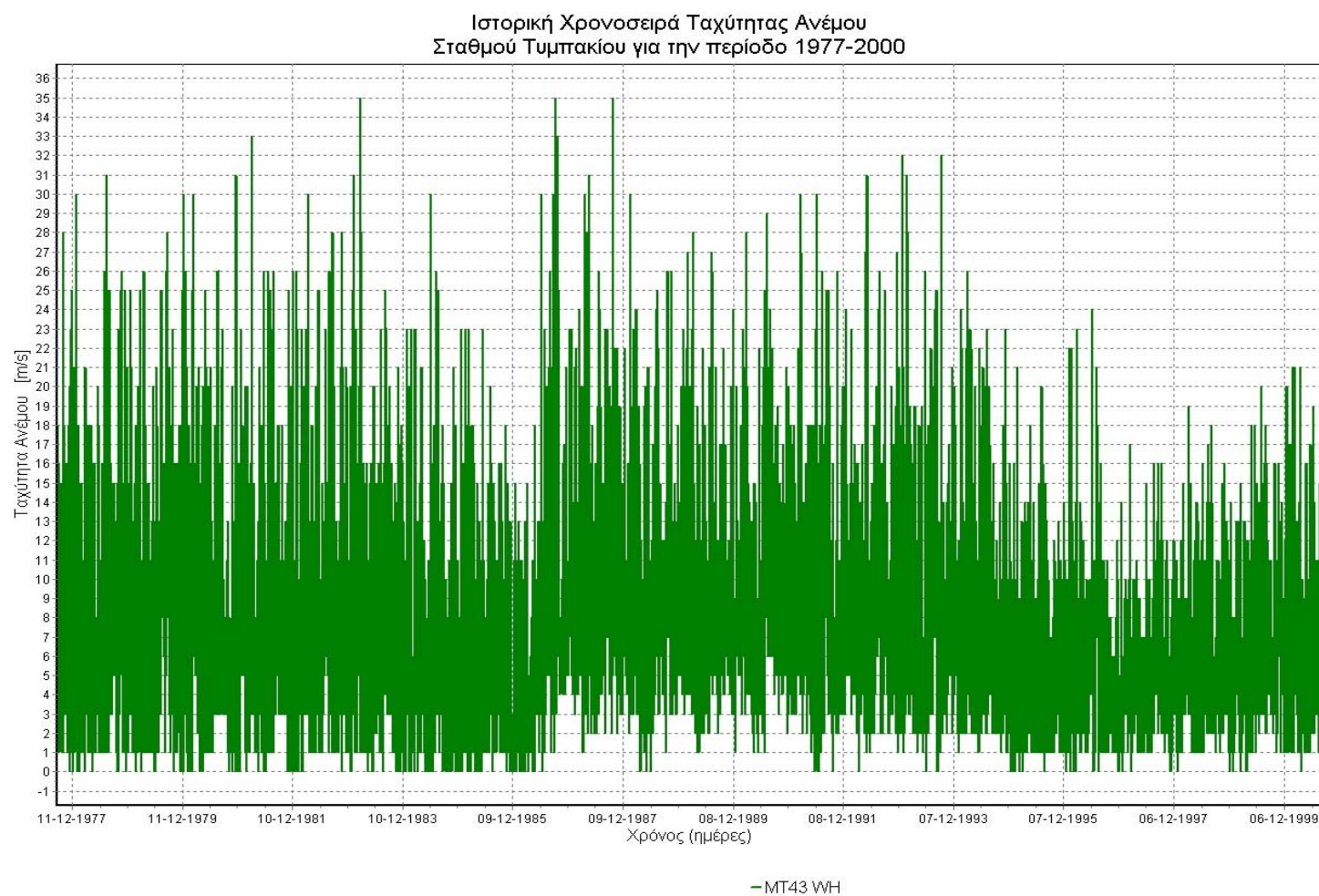


Γράφημα 3.3 : Ιστορική Χρονοσειρά Σχετικής Υγρασίας Σταθμού Τυμπακίου

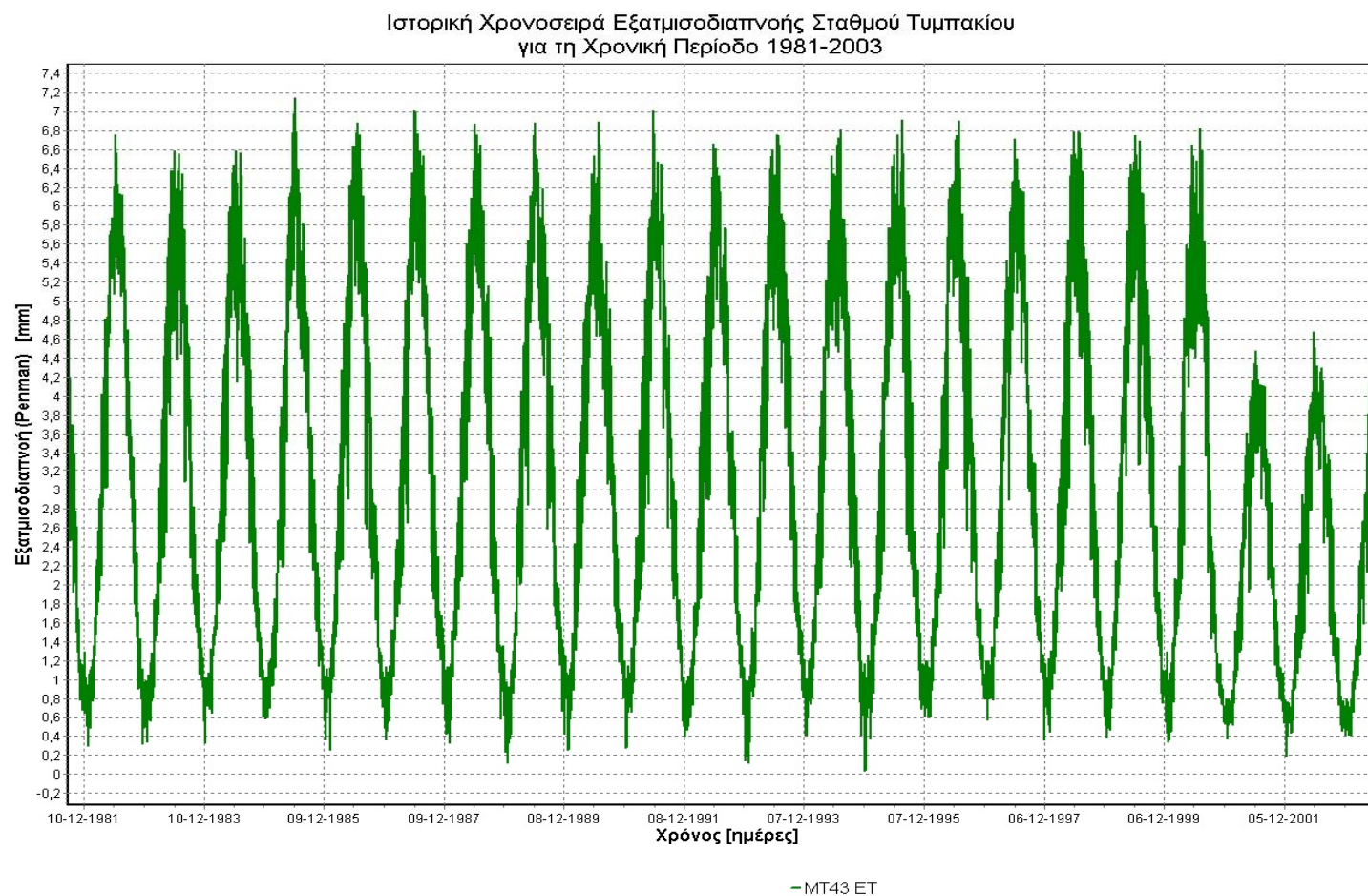




Γράφημα 3.4 : Ιστορική Χρονοσειρά Ωρών Ηλιοφάνειας Σταθμού Τυμπακίου



Γράφημα 3.5 : Ιστορική Χρονοσειρά Ταχύτητας Ανέμου Σταθμού Τυμπακίου



Γράφημα 3.6 : Ιστορική Χρονοσειρά Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής Σταθμού Τυμπακίου

### 3.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση για τις χρονοσειρές βροχόπτωσης, επιφανειακής βροχόπτωσης και απορροής της λεκάνης του Γεροποτάμου.

#### 3.4.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΕΠΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΒΡΟΧΗΣ

Για τους συνολικά 11 βροχομετρικούς σταθμούς της λεκάνης του Γεροποτάμου έγινε έλεγχος συνέπειας των χρονοσειρών βροχόπτωσης με την μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης, με τη βοήθεια του προγράμματος HYMOS. Ο έλεγχος συνέπειας (ή έλεγχος ομοιογένειας) μιας χρονοσειράς μετρήσεων βροχής αποσκοπεί στον εντοπισμό τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Σε περίπτωση που εντοπιστούν τέτοιες αλλαγές, η αποκατάσταση της συνέπειας αποσκοπεί στην τροποποίηση των μετρήσεων σε τρόπο, ώστε να αρθούν τα αποτελέσματα των αλλαγών συνθηκών [6].

Οι έλεγχοι συνέπειας γίνονται κατ' αρχήν στη χρονική κλίμακα των μετρήσεων (π.χ. ημερήσια ή ωριαία για βροχογράφους). Ωστόσο, τα συστηματικά σφάλματα που αναφέρονται σε μακρές περιόδους εντοπίζονται ευκολότερα σε αδρότερες χρονικές κλίμακες, όπως ετήσια [6].

Ο έλεγχος των συστηματικών ασυνεπειών μιας σειράς βροχομετρικών δεδομένων είναι σχεδόν αδύνατος, αν δεν διατίθεται κανένα άλλο δεδομένο, εκτός από την ίδια τη σειρά μετρήσεων του σταθμού. Αν όμως διατίθενται δεδομένα από περισσότερους του ενός βροχομετρικούς σταθμούς μιας περιοχής, τότε γίνεται εφικτός ο έλεγχος (έλεγχος χωρικής συνέπειας), αξιοποιώντας την ισχυρή συσχέτιση των υψών βροχής γειτονικών σταθμών [6].

Η πιο διαδεδομένη τεχνική για τον έλεγχο της ασυνέπειας βροχομετρικών δεδομένων βασίζεται στη διπλή αθροιστική καμπύλη (double mass curve). Διπλή αθροιστική καμπύλη είναι η απεικόνιση, σε διάγραμμα με άξονες κοινής αριθμητικής διαβάθμισης, της σημειοσειράς που προκύπτει από τα διαδοχικά ύψη βροχής δύο σταθμών, αφού τα τελευταία μετατραπούν σε αθροιστικές σειρές. Ειδικότερα, ο ένας άξονας αναφέρεται στο αθροιστικό ύψος ενός βροχομετρικού σταθμού βάσης (ή και του μέσου όρου περισσότερων βροχομετρικών σταθμών), με διαπιστωμένη συνέπεια μετρήσεων και ο άλλος άξονας αναφέρεται στο αθροιστικό ύψος του υπό έλεγχο βροχομετρικού σταθμού. Σε περίπτωση, που οι μετρήσεις του υπό έλεγχο σταθμού είναι συνεπείς, η σειρά των σημείων θα σχηματίζει μια ευθυγραμμία, που θα περνά από την αρχή των αξόνων. Αυτή η παρατήρηση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συνέπειας, ενώ αποκλίσεις από την ευθυγραμμία ερμηνεύονται ως ασυνέπειες μετρήσεων και συγκεκριμένα:

- Η θλάση στη σημειοσειρά, δηλαδή ο σχηματισμός δύο ευθειών με διαφορετικές κλίσεις  $m$  και  $m'$ , ερμηνεύεται ως συστηματική ασυνέπεια, που καλύπτει τη μια από τις δυο περιόδους διαφορετικών κλίσεων.
- Τα άλμα στη σημειοσειρά, δηλαδή ο σχηματισμός δυο παράλληλων ευθειών, ερμηνεύεται ως μεμονωμένο σφάλμα για τη χρονική στιγμή, στην οποία αντιστοιχεί το άλμα. Την ίδια ερμηνεία έχει και η περίπτωση, που σχηματίζεται μια ευθεία, η οποία όμως δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων [6].

Για την άρση των ασυνεπειών, που εμφανίζονται στη διπλή αθροιστική καμπύλη με τη μορφή της θλάσης, πρέπει πρώτα να επιλεγεί η μια από τις δυο υποπεριόδους, της οποίας τα δεδομένα θεωρούνται ορθά και να αναχθούν τα δεδομένα της άλλης υποπεριόδου. Η αναγωγή γίνεται με πολλαπλασιασμό των υψών βροχής με το συντελεστή  $\lambda$  [6]:

$$\lambda = \frac{m}{m'}$$

Δεδομένου ότι η κατασκευή των διπλών αθροιστικών καμπυλών έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος HYMOS, οι συντελεστές αναγωγής  $\lambda$  για τον κάθε υπό εξέταση σταθμό λαμβάνονται από την αναλυτική έκθεση (αρχείο εξόδου), που παρέχεται από το πρόγραμμα.

Ευνοϊκές προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η κλιματική ομοιογένεια των βροχομετρικών σταθμών, που συγκρίνονται και η ισχυρή συσχέτιση των υψών βροχής τους. Η τήρηση των προϋποθέσεων αυτών ελέγχεται τόσο εμπειρικά, όσο και στατιστικά [6].

Ο εμπειρικός έλεγχος συνίσταται στην επιλογή των ζευγών σταθμών που συγκρίνονται με τρόπο τέτοιο, ώστε να βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους και σε παρόμοιες τοπογραφικές και μικροκλιματικές συνθήκες. Στην παρούσα ανάλυση, η λεκάνη μελέτης μας διαιρέθηκε σε δύο επιμέρους τμήματα, στο βόρειο και το νότιο τμήμα της λεκάνης του Γεροποτάμου. Έτσι, τα δεδομένα κάθε σταθμού ελέγχθηκαν ως προς την αξιοπιστία τους με βάση τους γειτονικούς του σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται στο ίδιο τμήμα της λεκάνης με τον υπό έλεγχο σταθμό.

Ο στατιστικός έλεγχος γίνεται με βάση το συντελεστή συσχέτισης  $R^2$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $R^2$  τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση των υψών βροχής των δύο σταθμών. Θεωρούμε ότι για να είναι αξιόπιστη η μέθοδος πρέπει ο υπό έλεγχο σταθμός να έχει συντελεστή γραμμικής συσχέτισης με τους σταθμούς βάσης μεγαλύτερο του 0,8. Το κριτήριο αυτό ελέγχθηκε για τους συνολικά 11 σταθμούς που εξετάστηκαν στην υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ικανοποιητικά, όπως φαίνεται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:

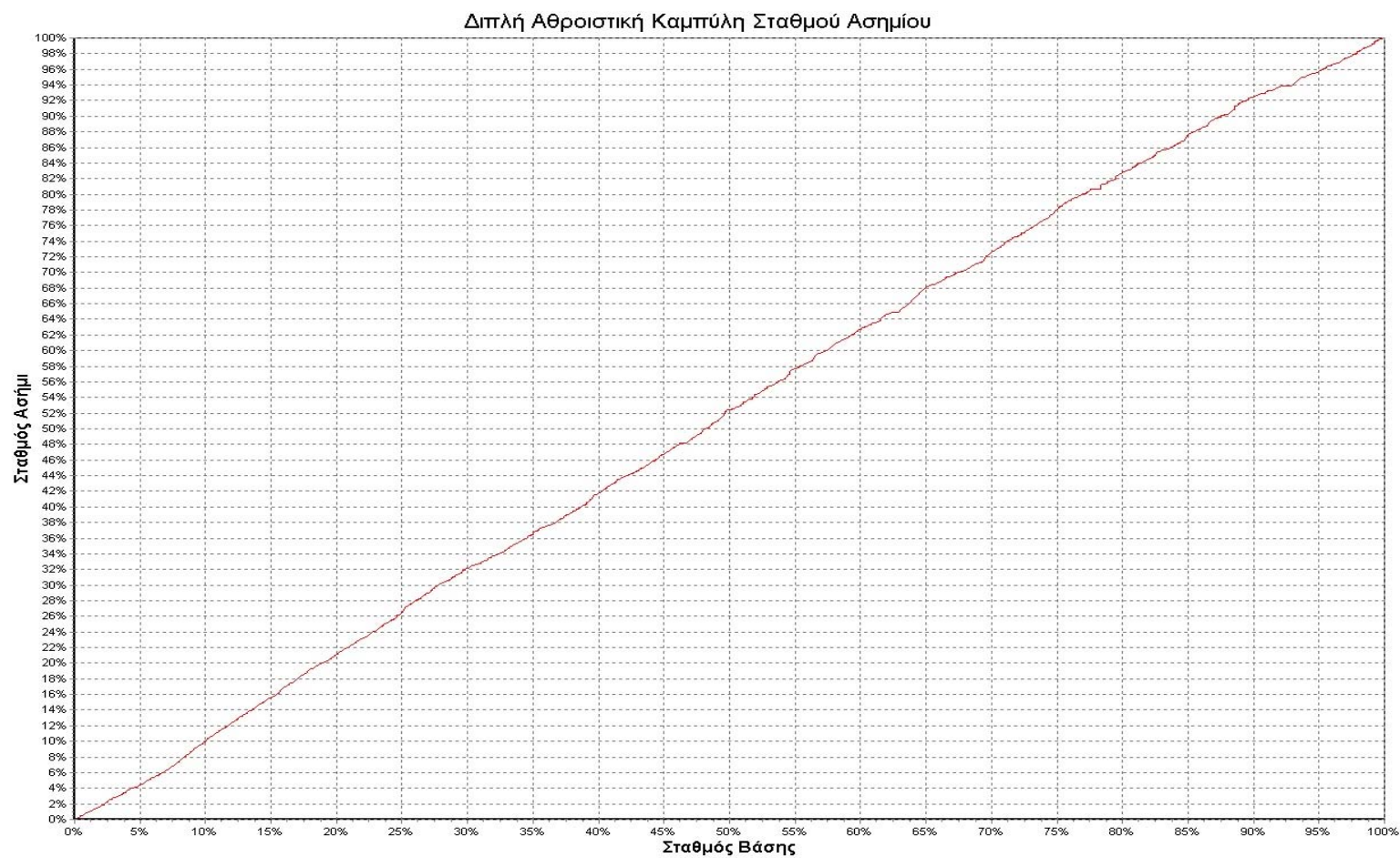
ΣΤΑΘΜΟΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ
Αγ. Βαρβάρα	0,9982
Αγ. Κύριλλος	0,9997
Ασήμι	0,9989
Βαγιωνιά	0,9997
Βορίζια	0,9949
Γέργερη	0,9990
Ζαρός	0,9992
Καπετανιανά	0,9993
Λαγόλια	0,9989
Μορόνι	0,9904
Πόμπια	0,9975

Πίνακας 3.5 : Συντελεστής Συσχέτισης: Κριτήριο Ομοιογένειας Χρονοσειρών

Από τα διαγράμματα διπλής αθροιστικής καμπύλης των έντεκα σταθμών της λεκάνης του Γεροποτάμου προκύπτει, ότι οι σταθμοί Ζαρού, Βοριζίων και Μορονίου παρουσιάζουν σχετικά ανομοιογενές δείγμα. Για τη διόρθωση των βροχομετρικών υψών συνήθως θεωρούνται αξιόπιστες οι πιο πρόσφατες μετρήσεις και η διόρθωση γίνεται στο παλιότερο υποσύνολο.

Στο διάγραμμα, που ακολουθεί φαίνεται ενδεικτικά η διπλή αθροιστική καμπύλη για ένα σταθμό, εκείνο του Ασημίου.





Γράφημα 3.7 : Διπλή Αθροιστική Καμπύλη Σταθμού Ασημίου

### 3.4.2 ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

Η συμπλήρωση των κενών στις διαθέσιμες χρονοσειρές βροχόπτωσης, ώστε να είναι πλήρεις για τη χρονική περίοδο ανάλυσης 1981-2003, έγινε με τη μέθοδο της χωρικής παρεμβολής (spatial filling in) με τη βοήθεια του προγράμματος HYMOS. Με τη μέθοδο αυτή, η χρονοσειρά του εκάστοτε δείγματος συμπληρώνεται με βάση τους ζυγισμένους μέσους όρους των δειγμάτων γειτονικών σταθμών. Τα βάρη των δειγμάτων των γειτονικών σταθμών είναι αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασής τους (σε Km) από τον υπό μελέτη σταθμό.

Η συμπλήρωση κάθε στοιχείου της υπό συμπλήρωση χρονοσειράς, βάσει των χρονοσειρών ίδιου βήματος N γειτονικών σταθμών δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [8]:

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(t) / D_i^b}{\sum_{i=1}^N 1 / D_i^b}$$

... όπου P(t) το στοιχείο που λείπει από την υπό συμπλήρωση χρονοσειρά  
 $P_i(t)$  το αντίστοιχο στοιχείο της χρονοσειράς του γειτονικού σταθμού i  
 N το πλήθος των γειτονικών σταθμών  
 $D_i$  η απόσταση του υπό μελέτη σταθμού από το γειτονικό σταθμό i  
 b η δύναμη, στην οποία υψώνεται η απόσταση (στην παρούσα εργασία b = 2)

Οι σταθμοί, των οποίων οι χρονοσειρές συμπληρώθηκαν με την παραπάνω μέθοδο, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες χρονικές περίοδοι βρίσκονται συγκεντρωμένοι στον ακόλουθο πίνακα:

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	
<b>Ασήμι</b>	1/9/1982 – 31/8/1985	1/9/1990 – 31/8/1991
<b>Βαγιωνιά</b>	1/9/1991 – 31/8/1993	
<b>Άγιος Κύριλλος</b>	1/1/1999 – 31/8/1999	

Πίνακας 3.6 : Σταθμοί με Συμπληρωμένες Χρονοσειρές



### 3.4.3 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ

Για το σύνολο των βροχομετρικών σταθμών της υδρολογικής λεκάνης του Γεροποτάμου υπολογίστηκαν οι υπερετήσιες τιμές βροχόπτωσης κάθε σταθμού και υπολογίστηκε η συνολική βροχοβαθμίδα της λεκάνης.

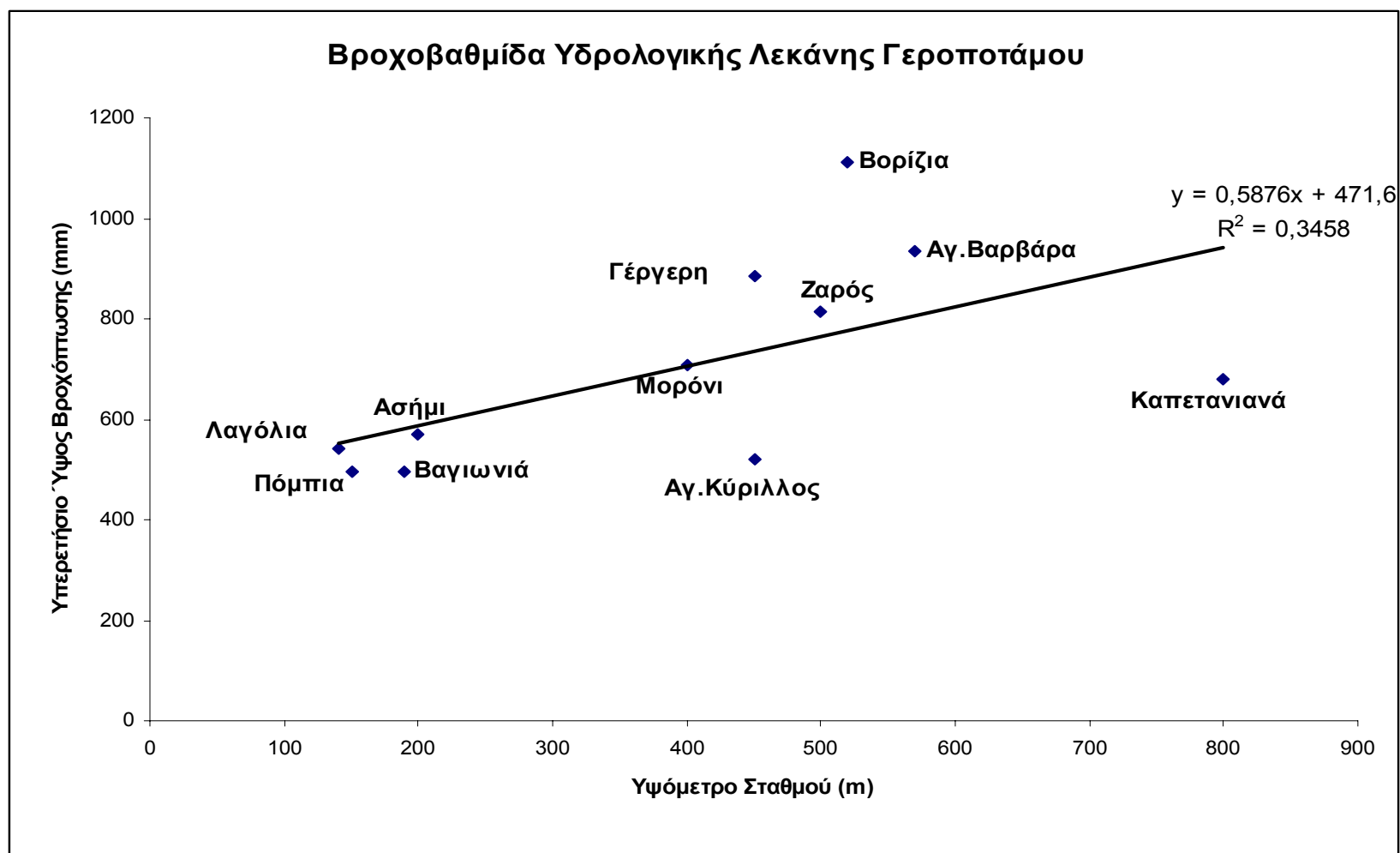
Για την διαμόρφωση της σχέσης ύψους βροχής - υψόμετρου χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο ύπαρξης τουλάχιστον 10 ετήσιων τιμών στο αρχείο ιστορικών βροχοπτώσεων κάθε σταθμού. Στην παρούσα περίπτωση υπήρχαν διαθέσιμες 30 ετήσιες τιμές για κάθε σταθμό και συγκεκριμένα για τα υδρολογικά έτη 1973-2003. Οι σταθμοί της λεκάνης, που χρησιμοποιήθηκαν, το υψόμετρο και οι αντίστοιχες υπερετήσιες τιμές βροχόπτωσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Σταθμός	Υψόμετρο	Υπερετήσιο Ύψος Βροχόπτωσης
<b>Αγ. Βαρβάρα</b>	570	936
<b>Βορίζια</b>	520	1113
<b>Γέργερη</b>	450	885
<b>Ζαρός</b>	500	814
<b>Λαγόλια</b>	140	541
<b>Μορόνι</b>	400	706
<b>Αγ. Κύριλλος</b>	450	521
<b>Ασήμι</b>	200	571
<b>Βαγιωνιά</b>	190	494
<b>Καπετανιανά</b>	800	678
<b>Πόμπια</b>	150	496

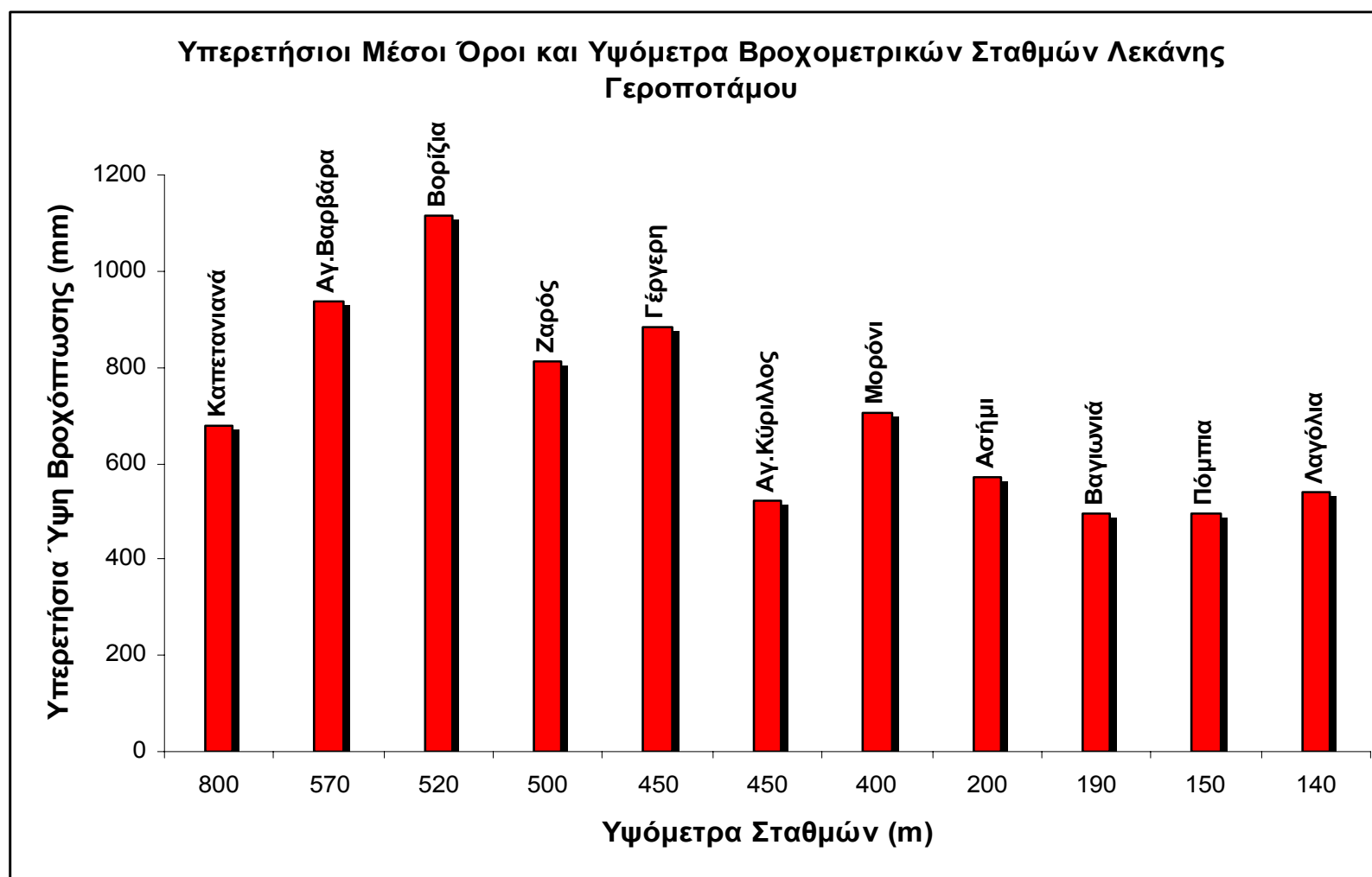
Πίνακας 3.7 : Υπερετήσια Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου

Τα μέσα ετήσια ύψη βροχής και το υψόμετρο των σταθμών παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.

Από τη γραμμική συσχέτιση των μέσων ετησίων βροχοπτώσεων και των υψόμετρων των αντιστοίχων σταθμών μέτρησης προέκυψε μέση αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο ίση με 59mm /100 m, όπως εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 3.8 : Βροχοβαθμίδα Υδρολογικής Λεκάνης Γεροποτάμου



Γράφημα 3.9 : Υπερετήσεις Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Λεκάνης Γεροποτάμου

Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε, ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ , που προκύπτει κατά τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας στη λεκάνη του Γεροποτάμου είναι ιδιαίτερα χαμηλός και επομένως δεν μπορούμε να θεωρήσουμε τη συσχέτιση ικανοποιητική και τη βροχοβαθμίδα ιδιαίτερα αξιόπιστη.

Για το λόγο αυτό και προκειμένου να εξάγουμε καλύτερα και ακριβέστερα συμπεράσματα, χωρίζουμε τη λεκάνη του Γεροποτάμου σε δύο τμήματα: στο βόρειο και στο νότιο τμήμα. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη νέα βροχοβαθμίδα, που αντιπροσωπεύει κάθε ένα από τα τμήματα αυτά.

Οι σταθμοί, που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

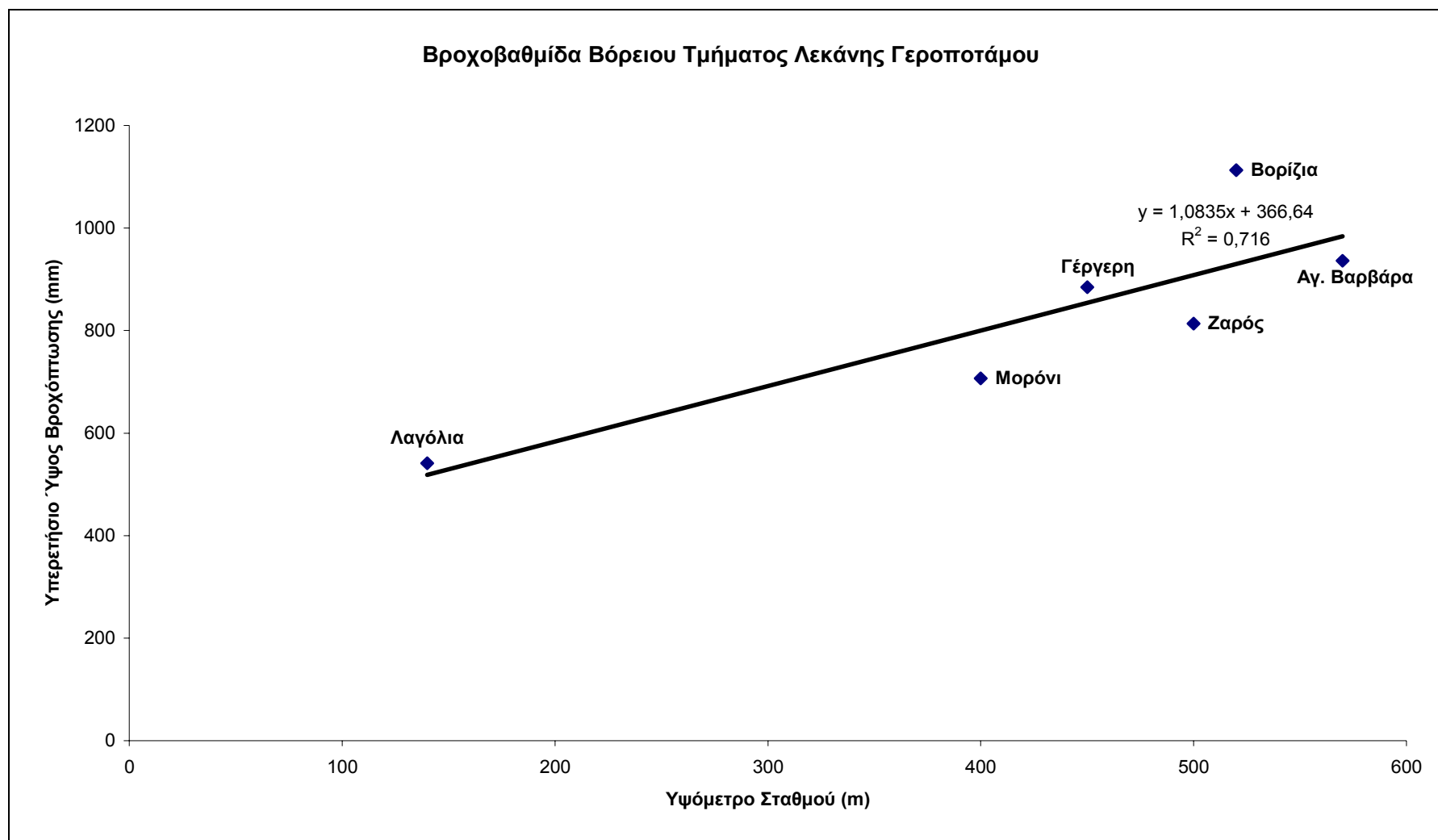
Σταθμός	Υψόμετρο	Υπερετήσιο Ύψος Βροχόπτωσης
<b>Βόρεια Λεκάνη Γεροποτάμου</b>		
<b>Αγ. Βαρβάρα</b>	570	936
<b>Βορίζια</b>	520	1113
<b>Ζαρός</b>	500	814
<b>Γέργερη</b>	450	885
<b>Μορόνι</b>	400	706
<b>Λαγόλια</b>	140	541
<b>Νότια Λεκάνη Γεροποτάμου</b>		
<b>Καπετανιανά</b>	800	678
<b>Αγ. Κύριλλος</b>	450	521
<b>Ασήμι</b>	200	571
<b>Βαγιωνιά</b>	190	494
<b>Πόμπια</b>	150	496

Πίνακας 3.8 : Υπερετήσια Ύψη Βροχόπτωσης Σταθμών Βόρειου και Νότιου Τμήματος Λεκάνης Γεροποτάμου

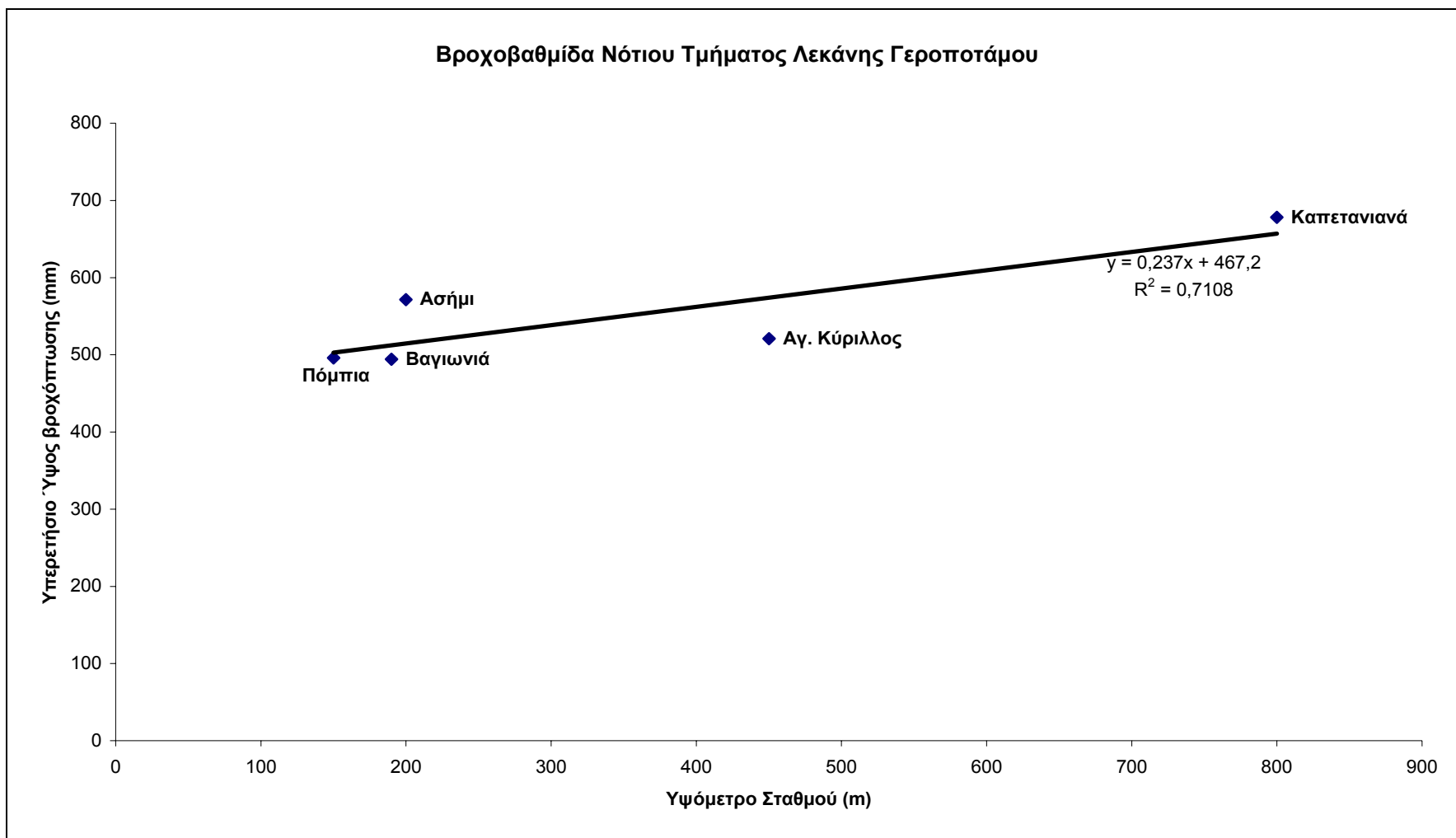
Από τη γραμμική συσχέτιση των μέσων ετησίων βροχοπτώσεων και των υψομέτρων των αντιστοιχών σταθμών μέτρησης για το βόρειο και το νότιο τμήμα της λεκάνης αντίστοιχα, προέκυψαν τα εξής:

- Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης παρατηρείται μέση αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο ίση με 108mm / 100 m
- Στο νότιο τμήμα της λεκάνης παρατηρείται μέση αύξηση της βροχόπτωσης με το υψόμετρο ίση με 24mm / 100 m

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Γράφημα 3.10 : Βροχοβαθμίδα Βόρειου Τμήματος Λεκάνης Γεροποτάμου



Γράφημα 3.11 : Βροχοβαθμίδα Νότιου Τμήματος Λεκάνης Γεροποτάμου

### 3.4.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

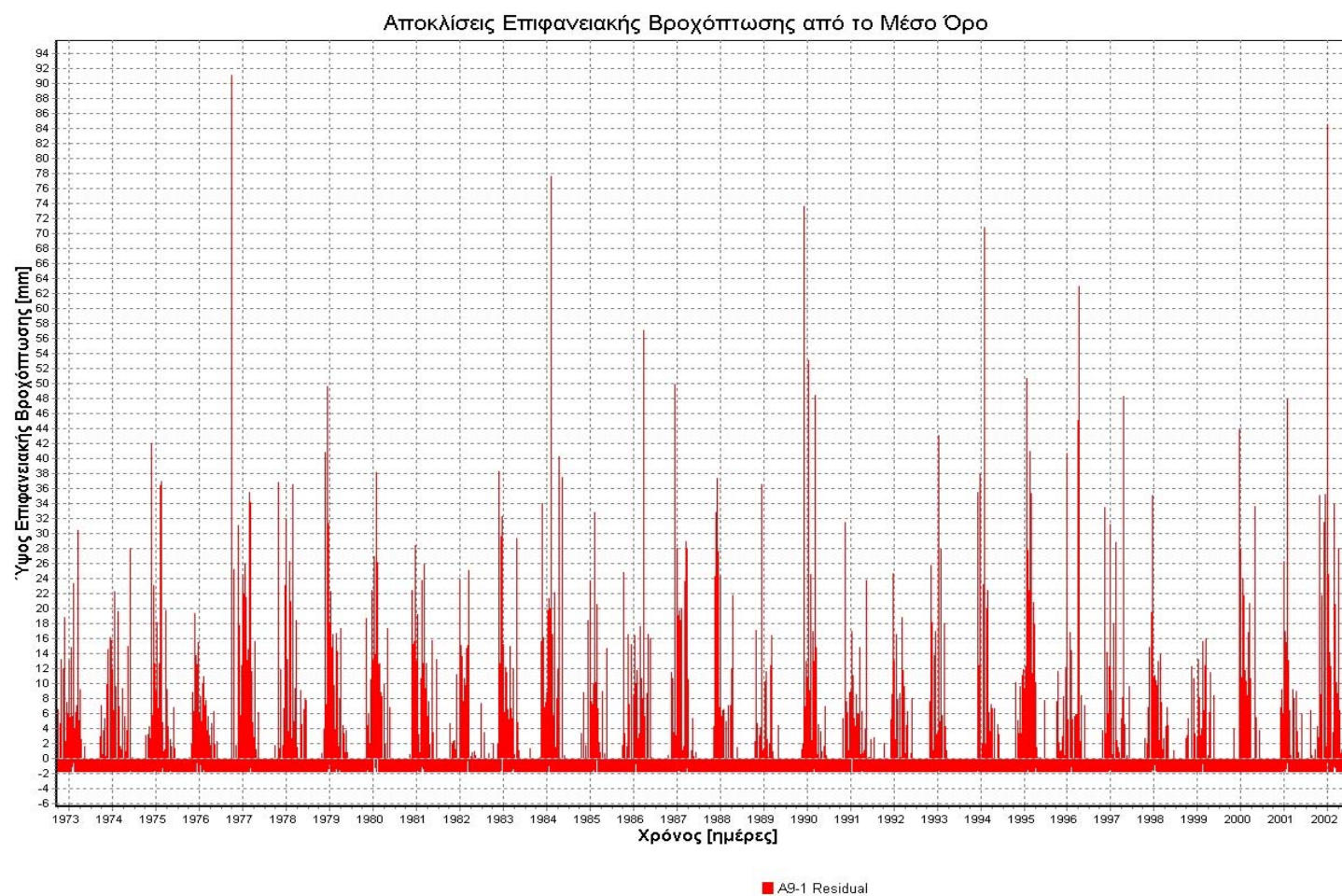
Για την στατιστική επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων (σημειακής βροχόπτωσης, επιφανειακής βροχόπτωσης, απορροής) της λεκάνης του Γεροποτάμου κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα της καμπύλης αποκλίσεων από το μέσο όρο, για τη χρονική περίοδο 1981-2003.

Η καμπύλη αποκλίσεων από το μέσο όρο μπορεί να κατασκευαστεί με ημερήσιο, μηνιαίο ή ετήσιο χρονικό βήμα. Στην περίπτωση ημερήσιου βήματος μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη διάρκεια και την ένταση των γεγονότων βροχής στη διάρκεια κάθε έτους και να εντοπιστούν ακραία γεγονότα βροχόπτωσης, που ενδέχεται να οδηγήσουν σε πλημμυρικό επεισόδιο. Επιπλέον, μπορεί να γίνει μια γενική εκτίμηση της συχνότητας των ακραίων γεγονότων. Στην περίπτωση μηνιαίου χρονικού βήματος, η καμπύλη αποκλίσεων από το μέσο όρο παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού περιόδων έντονης ξηρασίας ή αντιθέτως περιόδων με βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας. Στην περίπτωση τέλος ετήσιου χρονικού βήματος μπορούμε να διακρίνουμε την ύπαρξη υγρών και ξηρών ετών, για μεγάλο εύρος διαθέσιμων δεδομένων.

Οι παραπάνω καμπύλες κατασκευάστηκαν για την επιφανειακή βροχόπτωση και την απορροή της υδρολογικής λεκάνης του Γεροποτάμου, καθώς επίσης και για την ημερήσια βροχόπτωση των συνολικά 11 βροχομετρικών σταθμών της περιοχής μελέτης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στη συνέχεια τα διαγράμματα της επιφανειακής βροχόπτωσης.

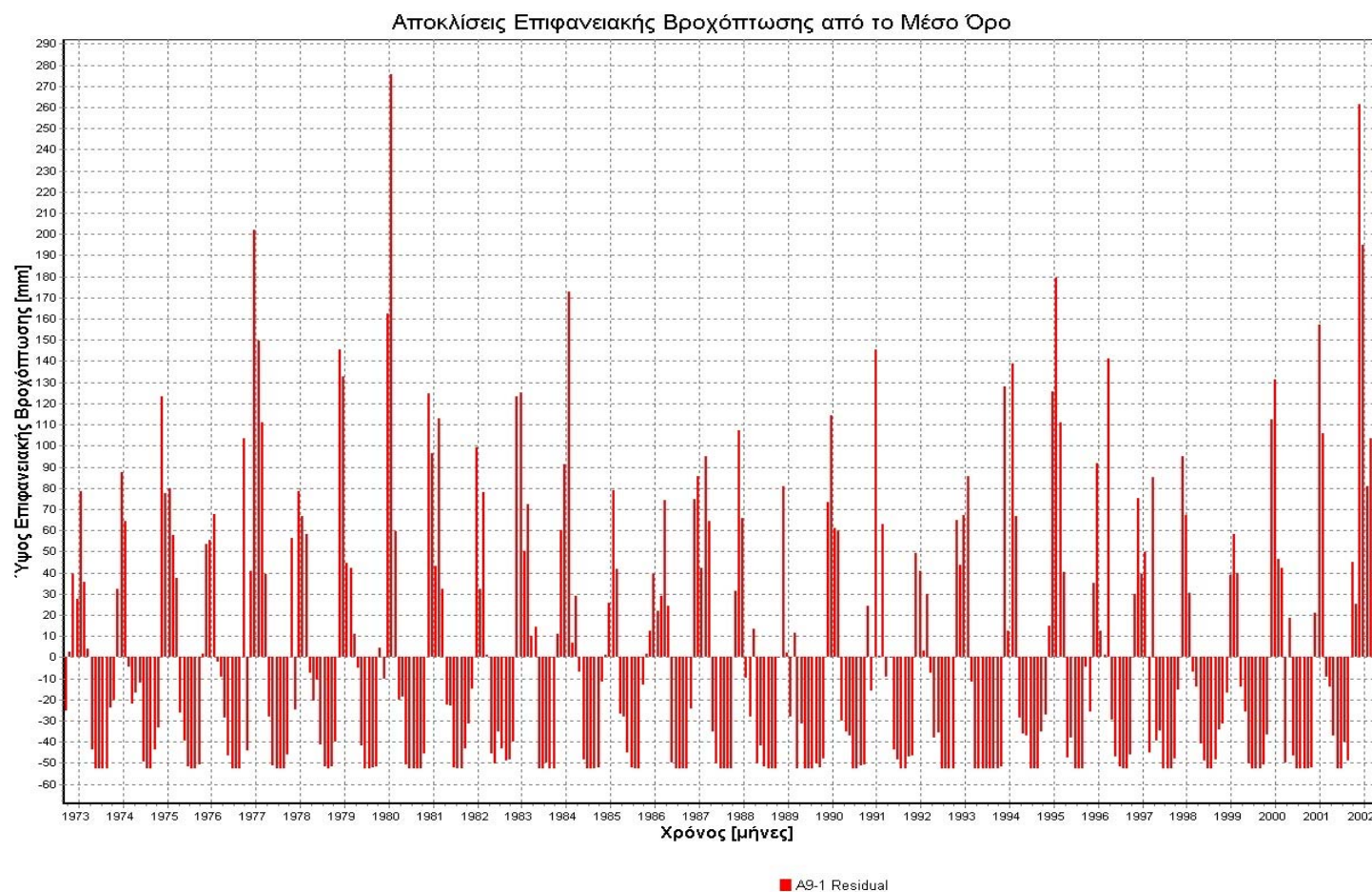
Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω κατασκευάστηκαν καμπύλες αποκλίσεων της επιφανειακής βροχόπτωσης από το μέσο όρο τόσο με ημερήσιο όσο και με μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα (Γραφήματα 3.12, 3.13, 3.14, αντίστοιχα).

Από το γράφημα ημερήσιου βήματος διακρίνουμε τα ακραία επεισόδια βροχής (άνω των 70mm) με μια συχνότητα εμφάνισης 6 με 8 χρόνια. Από το γράφημα μηνιαίου βήματος διακρίνουμε μεγάλες βροχοπτώσεις την περίοδο 1973-1984 και δύο περιόδους έντονης ξηρασίας, 1989-1993 και 1997-2000. Τέλος, από το γράφημα ετήσιου βήματος διακρίνουμε εύκολα δύο ιδιαίτερα υγρά και ένα ιδιαίτερα ξηρό έτος.

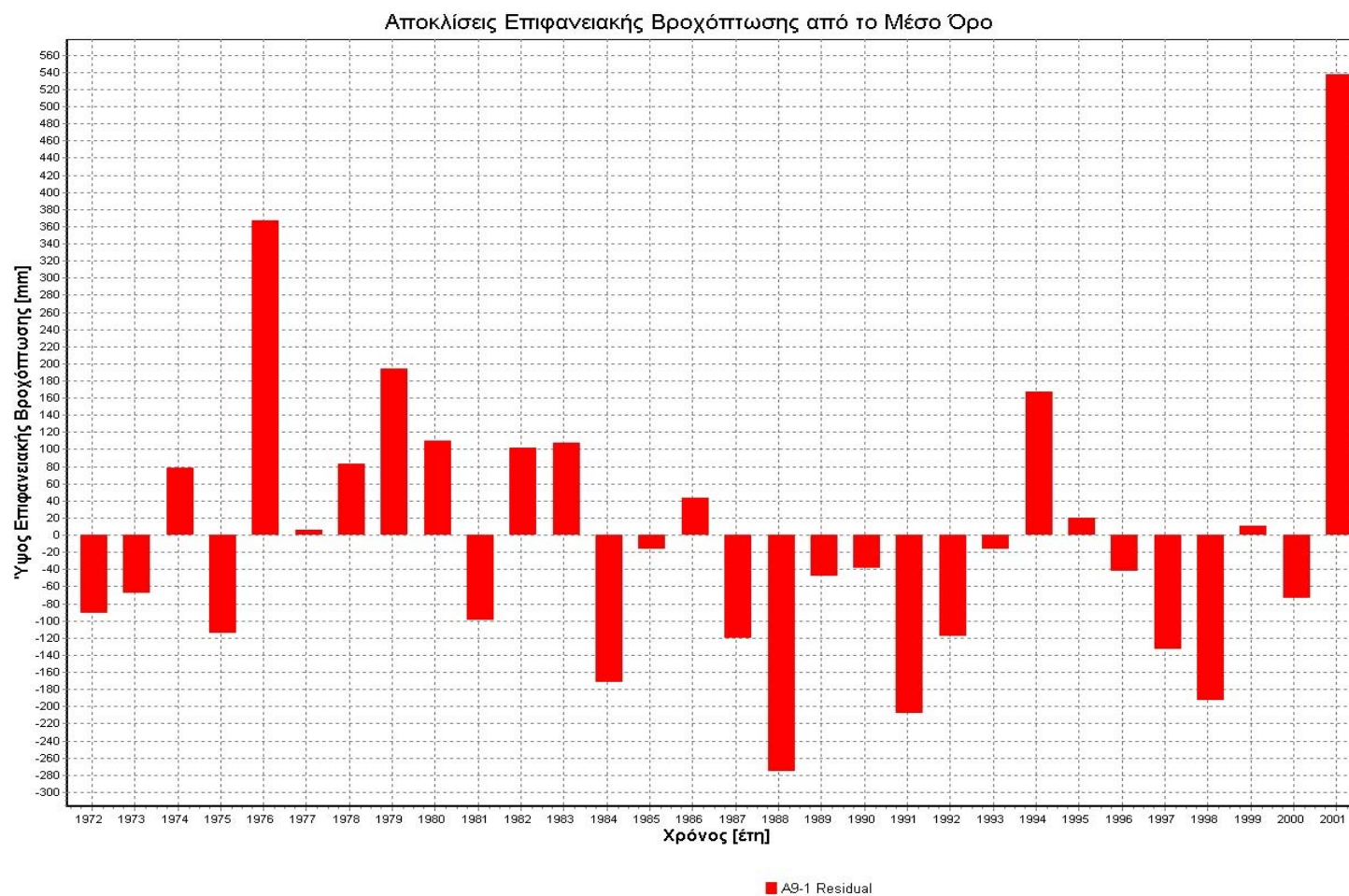


Γράφημα 3.12 : Αποκλίσεις Ημερήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο





Γράφημα 3.13 : Αποκλίσεις Μηνιαίας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο



Γράφημα 3.14 : Αποκλίσεις Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου από το Μέσο Όρο

### 3.4.5 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Η χρονοσειρά της ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης μήκους τριάντα (30) ετών χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης σε όλη την υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου. Η χρονοσειρά αυτή αποτελεί επιφανειακή εκτίμηση και έχει υποστεί αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η διαφορά ανάμεσα στο μέσο υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών που συμμετείχαν στον υπολογισμό της (μέσο υψόμετρο καταγραφής) και στο πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης.

Η υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου διαθέτει ικανοποιητική έως πολύ καλή κάλυψη από δίκτυο βροχομετρικών σταθμών. Επίσης, οι σταθμοί αυτοί καλύπτουν εξ ολοκλήρου την πλειοψηφία των ορεινών περιοχών της λεκάνης, αλλά και τις σημαντικότερες ημιορεινές και πεδινές περιοχές. Ως εκ τούτου, οι ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση που υπολογίστηκε για την περίοδο 1973-2003, αποτελεί ένα πολύ αντιπροσωπευτικό δείγμα της διακύμανσης της ετήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη του Γεροποτάμου.

Για τον προσδιορισμό της συχνότητας εμφάνισης της ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης εφαρμόστηκε η ακόλουθη μεθοδολογία:

1. Το πιθανοτικό ομοίωμα της κανονικής κατανομής (normal distribution) ρυθμίστηκε πάνω στο δείγμα 30-ετούς διάρκειας της ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης. Η επιλογή της κανονικής κατανομής έγινε διότι είναι ευρέως γνωστό (Linsley *et al.*, 1988) ότι περιγράφει συνήθως πολύ ικανοποιητικά τις ετήσιες βροχοπτώσεις.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στην κανονική κατανομή είναι η εξής:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

...όπου  $-\infty < x < +\infty$ ,  $-\infty < \mu < +\infty$  και  $\sigma > 0$ .

Με αντικατάσταση  $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$  προκύπτει η μορφή:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad \text{με} \quad -\infty < z < +\infty$$

Η ανηγμένη μεταβλητή  $z$  ανήκει σε κανονική κατανομή με μέσο όρο 0 και τυπική απόκλιση 1.

Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας είναι η εξής:

$$P(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

Οι τιμές  $P(z)$  συναρτήσει της μεταβλητής  $z$  υπάρχουν σε πίνακες της τυπικής κανονικής κατανομής. Για ευκολία, στον πίνακα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση η τιμή της μεταβλητής  $z$  προκύπτει από την αθροιστική πιθανότητα σε ποσοστό (%) [9].

2. Ακολούθως, ελήφθησαν οι εκτιμήσεις του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης από το ρυθμισμένο πιθανοτικό ομοίωμα για χαρακτηριστικές συχνότητες εμφάνισης  $v = 0.80, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05, 0.02$  (ή, αντίστοιχα, περιόδους επαναφοράς  $T = 1.25, 2, 5, 10, 20$  και  $50$  ετών), καθώς και οι τιμές του ανώτατου και κατώτατου ορίου εμπιστοσύνης.

Τα όρια εμπιστοσύνης υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$x_{T,\max} = x_T + z_{1-\alpha/2} S_T$$

$$x_{T,\min} = x_T - z_{1-\alpha/2} S_T$$

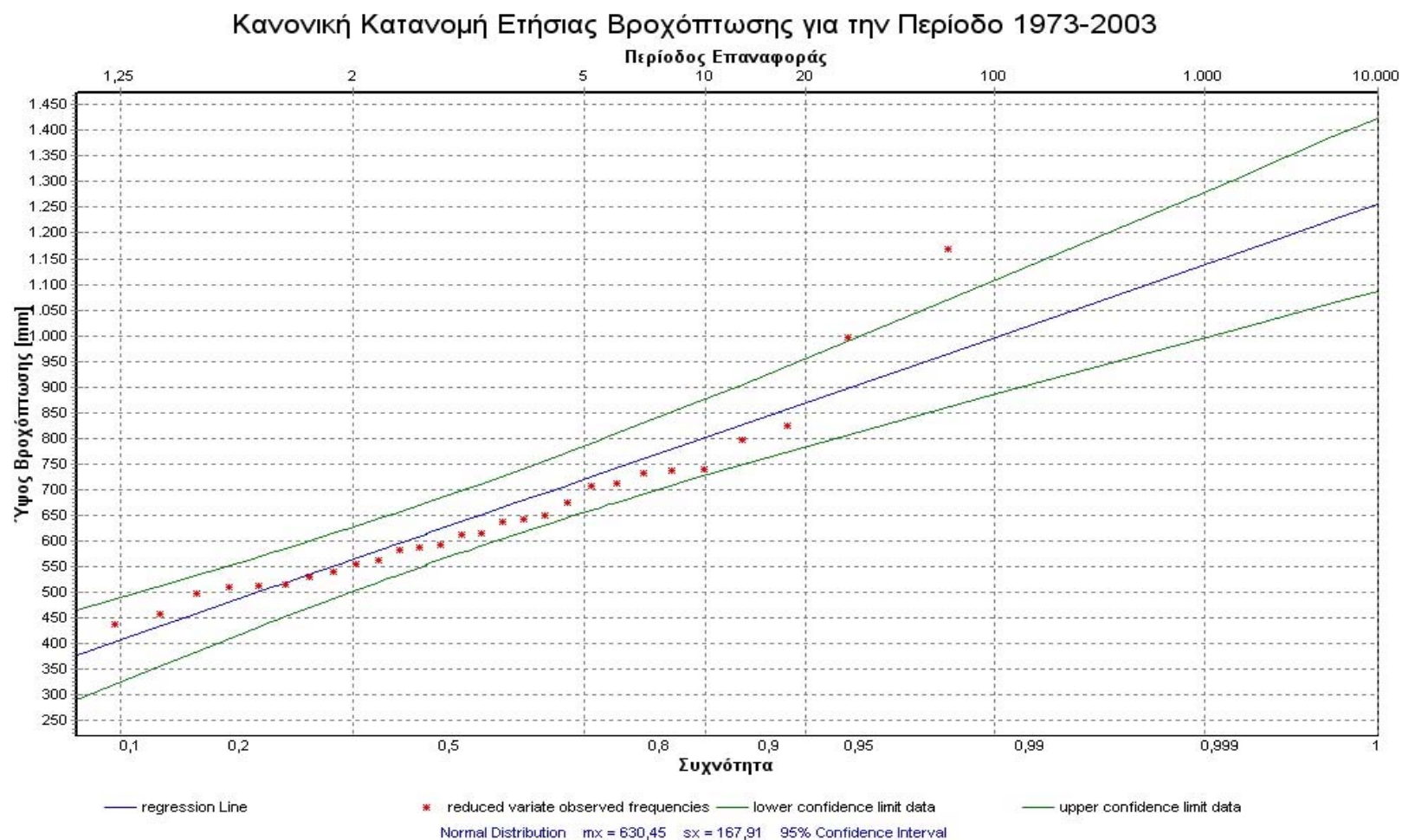
...όπου  $z_{1-\alpha/2}$  είναι η μεταβλητή της τυποποιημένης κανονικής κατανομής για αθροιστική πιθανότητα μεταξύ των ορίων  $1-\alpha$  και  $S_T$  η τυπική απόκλιση του  $x_T$  που είναι ίση με:

$$S_T = \delta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}$$

...όπου:

$\hat{\sigma}$  η τυπική απόκλιση του δείγματος μεγέθους  $N$  παρατηρήσεων και

$$\delta = \left(1 + \frac{K_T^2}{2}\right)^{1/2} \text{ για κανονική κατανομή [9].}$$



**Γράφημα 3.15 : Κανονική Κατανομή Ετήσιας Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου**

Για τον υπολογισμό του ετήσιου ύψους επιφανειακής βροχόπτωσης για χαρακτηριστικές συχνότητες εμφάνισης  $v = 0.80, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05, 0.02$  (ή, αντίστοιχα, περιόδους επαναφοράς  $T = 1.25, 2, 5, 10, 20$  και  $50$  ετών) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση της αθροιστικής πιθανότητας [9]:

$$P(z) = P(X \leq x) = 1 - \frac{1}{T}$$

Η ανηγμένη τιμή  $z$  για κάθε  $P(z)$  προέκυψε από κατάλληλο πίνακα. Με την εκτίμηση του θεωρητικού μέσου όρου  $\mu$  και της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  από το μέσο όρο  $\bar{x}$  και την τυπική απόκλιση  $\hat{\sigma}$  του δείγματος (μέγεθος των ροπών) υπολογίζεται η ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση από τη σχέση [9]:

$$x_T = \mu + \sigma z$$

Για τον υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην κανονική κατανομή, ο παράγοντας συχνότητας  $K_T$  συμπίπτει με την ανοιγμένη μεταβλητή ( $K_T = z$ ).

Με βάση τα παραπάνω προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας:

Πιθανότητα εμφάνισης %	Λεκάνη Γεροποτάμου	Άνω Δ.Ε. 95%	Κάτω Δ.Ε. 95%
$P_{80}$ ( $T=1.25$ έτη)	489,07	558,99	419,14
$P_{50}$ ( $T=2$ έτη)	630,45	690,54	570,36
$P_{20}$ ( $T=5$ έτη)	771,83	841,76	701,90
$P_{10}$ ( $T=10$ έτη)	845,71	926,81	764,61
$P_5$ ( $T=20$ έτη)	906,66	998,83	814,49
$P_2$ ( $T=50$ έτη)	975,34	1081,29	869,39

**Πίνακας 3.9 : Ετήσιο Ύψος Επιφανειακής Βροχόπτωσης Λεκάνης Γεροποτάμου για διάφορες χαρακτηριστικές συχνότητες**



#### 4. TO MONTELO SACRAMENTO<sup>[8]</sup>

Το Γενικευμένο Μοντέλο Υδρολογικής Προσομοίωσης (Burnash et al., 1973) είναι ένα από τα πιο γνωστά μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από το Κοινό Ομοσπονδιακό-Πολιτειακό Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμύρων με έδρα την Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών και έγινε ευρύτατα γνωστό ως μοντέλο Sacramento, για να αποτελέσει στη συνέχεια τη θεωρητική βάση για την ανάπτυξη πολλών άλλων μοντέλων.

Το μοντέλο Sacramento ανήκει στην κατηγορία των εννοιολογικών μοντέλων και προσομοιώνει τις κυριότερες φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε λεκάνες απορροής, που δε δέχονται εισροές από ανάντη λεκάνες. Όπως όλα τα μοντέλα της κατηγορίας του, το Sacramento έχει ως βάση ένα σύστημα από στοιχειώδεις διεργασίες ή συνιστώσες που αναπαριστούν φυσικές διεργασίες, όπως είναι η διήθηση, η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας και η εξατμισοδιαπνοή. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύστημα διασυνδεδεμένων δεξαμενών, διαμέσου των οποίων ρέει το νερό. Η ροή γίνεται σύμφωνα με κατάλληλες εξισώσεις που περιγράφουν τις επιμέρους διεργασίες.

Στη μορφή που εφαρμόσαμε το μοντέλο στην παρούσα εργασία, θεωρήσαμε τη λεκάνη απορροής του Γεροποτάμου ως μια ενότητα, χωρίς να πάρουμε υπόψη οποιαδήποτε χωρική μεταβολή των υδρολογικών μεταβλητών. Συνεπώς μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το μοντέλο ως καθολικό (lumped). Επιπλέον, οι υδρολογικές μεταβλητές δεν έχουν, κατά τη λειτουργία του μοντέλου, στοχαστικό χαρακτήρα και για τον λόγο αυτό μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το μοντέλο ως προσδιοριστικό (ντετερμινιστικό).

Η προσομοίωση της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής σε μια λεκάνη απορροής έχει σαν στόχο:

- Τη συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών παροχής
- Τη δημιουργία παροχών από τεχνητή βροχόπτωση
- Την πραγματική εκτίμηση των πλημμύρων
- Τον προσδιορισμό της επίδρασης από την αλλαγή στη χρήση γης ή στη χρήση του ύδατος, ή γενικότερα τον προσδιορισμό της επίδρασης της ανθρώπινης παρέμβασης στη διαδικασία απορροής, όπως αφαίρεση ή παροχή ύδατος από ή προς τον υπόγειο υδροφόρα και ανάλυση της επίδρασης των υδραυλικών έργων (φράγματα, τάφροι, υδαταποθήκες) στη διαδικασία απορροής, κατά τη σχεδιαστική και διαχειριστική φάση των συστημάτων υδατικών πόρων.

Ο τελευταίος στόχος μπορεί να γίνει αντιληπτός μόνο αν το μοντέλο προσομοίωσης διαθέτει μια σαφή φυσική βάση. Η διαδικασία βροχόπτωσης-

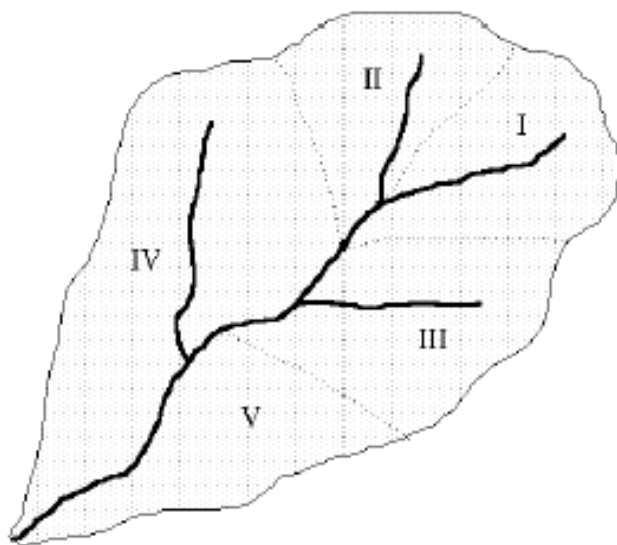
απορροής σε μια λεκάνη είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και ένα αρκετά λεπτομερές μοντέλο απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφοριών και αρκετό υπολογιστικό χρόνο. Λεπτομερείς πληροφορίες συνήθως δεν είναι διαθέσιμες και επομένως η σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής είναι αναπόφευκτη.

Το μοντέλο Sacramento αποτελεί μια καλή συμβιβαστική λύση ανάμεσα στο φυσικό υπόβαθρο που απαιτείται, στο διαθέσιμο όγκο πληροφοριών και στην ταχύτητα υπολογισμού για την προσομοίωση της διαδικασίας απορροής σε μια λεκάνη, για διάστημα πολλών ετών. Μέχρι κάποιο βαθμό, μπορούν να ενσωματωθούν και οι επιδράσεις από την ανθρώπινη παρέμβαση, τουλάχιστον ποιοτικά.

Στην προσομοίωση της διαδικασίας απορροής από το μοντέλο Sacramento γίνεται διάκριση ανάμεσα στη *φάση του εδάφους* και στη *φάση του ανοιχτού αγωγού* (ποτάμι, χείμαρρος).

Η φάση του εδάφους αντιπροσωπεύεται από ένα καθολικό παραμετρικό μοντέλο μέτρησης της υγρασίας. Η λεκάνη διαιρείται σε ένα ή περισσότερα τμήματα, τα οποία απορρέουν στο βασικό αγωγό (Σχήμα 4.1).

Μέσα σε κάθε τμήμα της λεκάνης γίνεται παραδοχή για την ομοιογένεια της περιοχής, σχετικά με τη βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Η παράμετρος της απόστασης δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της προσομοίωσης, σε αντίθεση με την παράμετρο του χρόνου. Με αυτή την παραδοχή, η καθολική προσέγγιση αποκλίνει από τα μοντέλα κατανομής της λεκάνης.



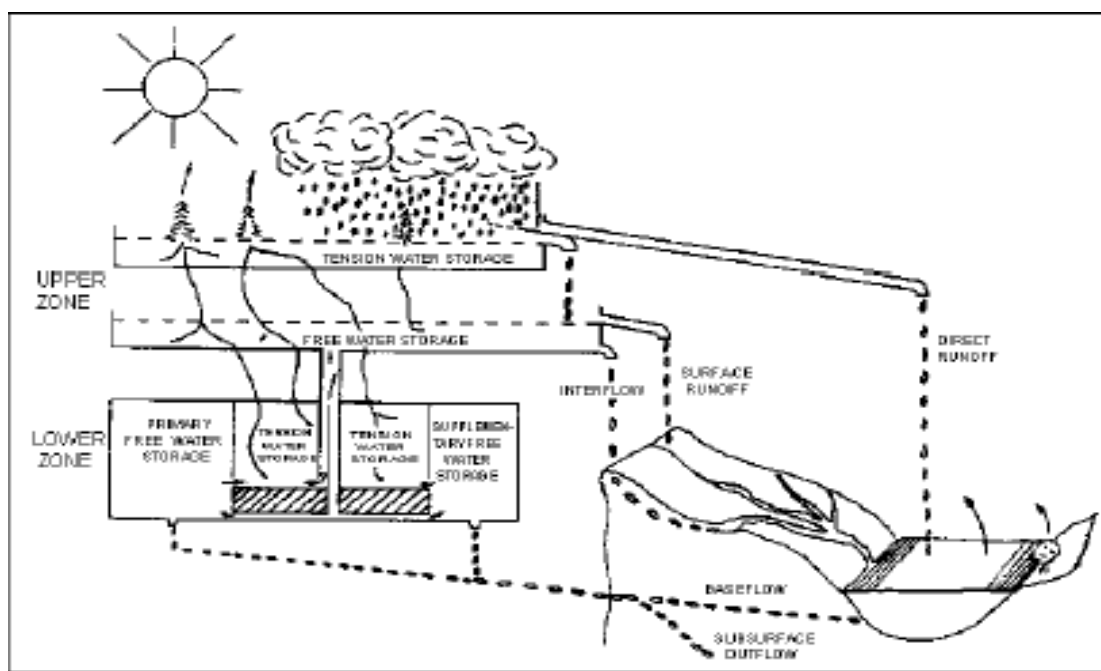
Σχήμα 4.1 : Τμήματα της υδρολογικής λεκάνης



Η διάδοση και εξασθένιση των πλημμυρικών κυμάτων μέσα στον ανοιχτό αγωγό μπορεί να προσομοιωθεί με μεθόδους διαφορετικού βαθμού ακριβείας, οι οποίες κυμαίνονται από το απλό άθροισμα μέσω του μοναδιαίου υδρογραφήματος, μέχρι την προσεγγιστική μέθοδο των στρωμάτων. Οι διαθέσιμες μέθοδοι δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς για την προσομοίωση της διάδοσης των κυμάτων πλημμύρας μέσα σε ένα σύστημα ανοιχτού αγωγού. Συνιστάται η εφαρμογή ενός δυναμικού υδραυλικού μοντέλου για τα χαρακτηριστικά μέρη του υδρογραφήματος, που είναι σημαντικά στο σχεδιασμό. Η εκροή από τη φάση του εδάφους στο μοντέλο Sacramento μπορεί τότε να συμπεριφέρεται σαν πλάγια και προς τα ανάντη εισροή στο μοντέλο του αγωγού.

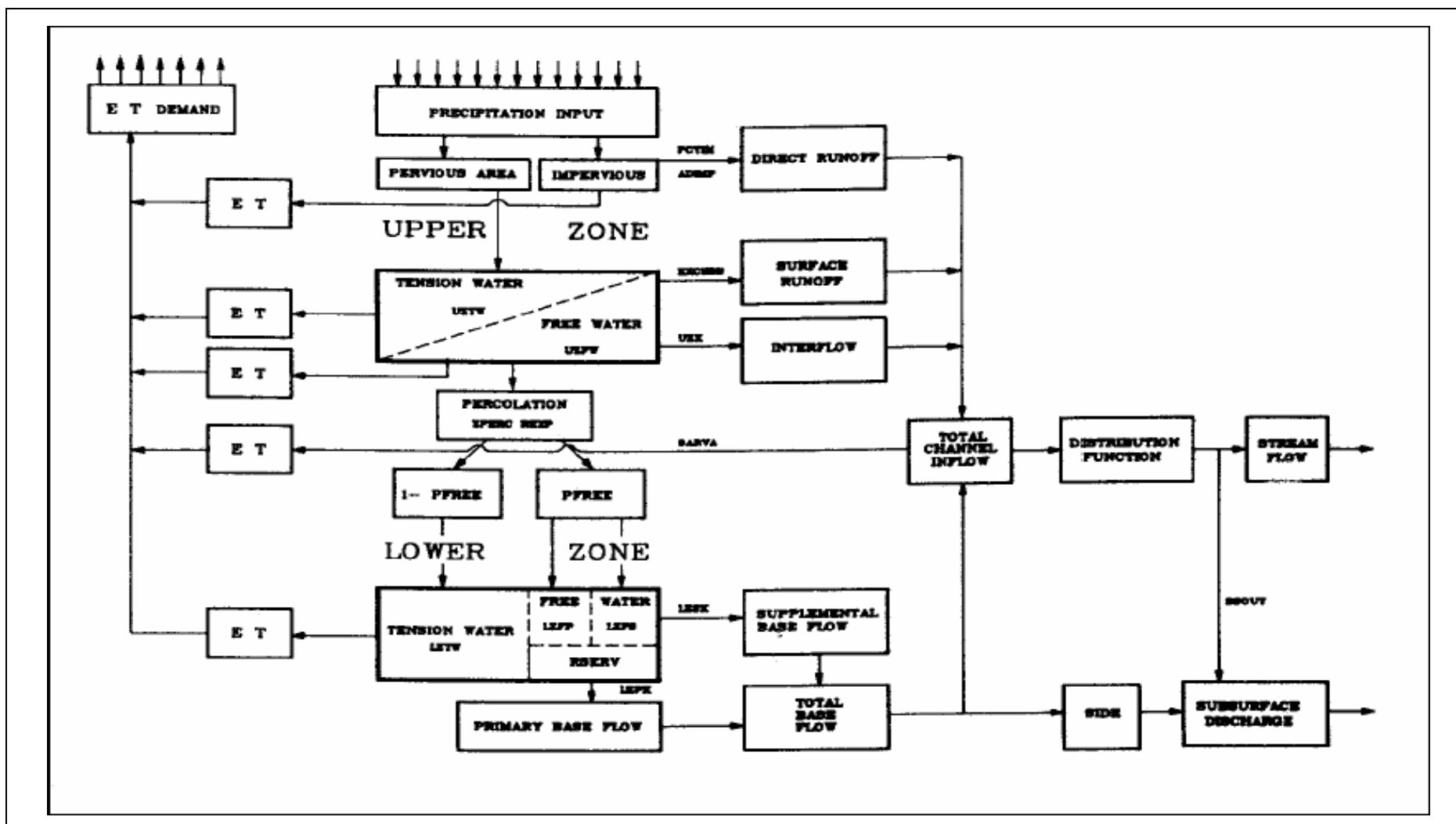
#### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ<sup>[8]</sup>

Η γενική ιδέα του μοντέλου Sacramento, με τις βασικές παραμέτρους αποθήκευσης και ροής, φαίνεται στο Σχήμα 4.2 (Burnash et al, 1973). Οι παράμετροι του μοντέλου φαίνονται στο Σχήμα 4.3, όπου καθορίζονται και οι ονομασίες των παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται για τη βασική λειτουργία του μοντέλου.



Σχήμα 4.2 : Γενική ιδέα του μοντέλου Sacramento

Οι παράμετροι του μοντέλου, η λειτουργία και η αλληλεπίδρασή τους αναπτύσσονται λεπτομερώς παρακάτω. Για τους αποθηκευτικούς χώρους γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στη χωρητικότητά τους (συμβολίζεται με το γράμμα M στο τέλος της ονομασίας) και στο αρχικό περιεχόμενό τους (συμβολίζεται με C στο τέλος της ονομασίας).



Σχήμα 4.3 : Παράμετροι του μοντέλου Sacramento

#### 4.1.1 ΦΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στην παράμετρο της φάσης του εδάφους του μοντέλου Sacramento γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στο διαπερατό και αδιαπέρατο τμήμα της λεκάνης. Για τις αδιαπέρατες περιοχές, η βροχόπτωση απορρέει απευθείας στον ανοιχτό αγωγό (άμεση απορροή). Ωστόσο, οι αδιαπέρατες περιοχές, οι οποίες παροχετεύουν το νερό σε μια διαπερατή περιοχή πριν αυτό φτάσει στον αγωγό, δεν θεωρούνται αδιαπέρατες. Το σύστημα παροχέτευσης του διαπερατού τμήματος της λεκάνης (του βασικού τμήματος, γενικότερα) διαιρείται στις παρακάτω ζώνες:

- Στην ανώτερη ζώνη, που αντιπροσωπεύει το επιφανειακό αποθηκευτικό σύστημα της λεκάνης (υγρασία εδάφους)
- Στην κατώτερη ζώνη, που αντιπροσωπεύει το υπόγειο αποθηκευτικό σύστημα της λεκάνης (υπόγειο νερό)

Και οι δύο ζώνες διαθέτουν δεξαμενές αποθήκευσης του υπό πίεση και του ελεύθερου ύδατος. Το νερό υπό πίεση θεωρείται εκείνο που είναι άμεσα προσκολλημένο στα σωματίδια του εδάφους (υγρασία εδάφους). Ο όρος ελεύθερο νερό αναφέρεται στο νερό εκείνο, που δεν είναι προσκολλημένο στο έδαφος, αλλά μπορεί να κινηθεί υπό την επίδραση δυνάμεων βαρύτητας, είτε κατακόρυφα σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα είτε πλευρικά διαμέσου των επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων. Γενικά, καλύπτονται αρχικά οι απαιτήσεις για νερό υπό πίεση, πριν το νερό εισέλθει στη δεξαμενή του ελεύθερου ύδατος, παρόλο που συναντώνται κάποιες σημαντικές εξαιρέσεις.

##### Ανώτερη Ζώνη

Ο όγκος νερού της ανώτερης ζώνης αντιπροσωπεύει εκείνο τον όγκο της βροχόπτωσης, που απαιτείται σε ξηρές συνθήκες:

- για την ικανοποίηση των αναγκών της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα (interception)
- για να παρέχει επαρκή υγρασία στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της διήθησης.

Αν ξεπεραστεί η μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης της ανώτερης ζώνης, τότε το νερό είναι διαθέσιμο για προσωρινή ελεύθερη αποθήκευση στην ανώτερη ζώνη, απ' όπου διηθείται στο σύστημα της κατώτερης ζώνης και απορρέει στον αγωγό μέσω της παραμέτρου της ενδιάμεσης ροής (πλευρική αποστράγγιση). Η προτιμώμενη κατεύθυνση ροής από την ανώτερη ζώνη είναι η κατακόρυφη, που σημαίνει διήθηση στο σύστημα της κατώτερης ζώνης.

Η ενδιάμεση ροή συμβαίνει μόνο όταν ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβεί το ρυθμό διήθησης. Η ανώτερη ζώνη αντιμετωπίζεται σαν γραμμικό αποθηκευτικό στοιχείο, το οποίο εκφορτίζεται εκθετικά:

$$\text{Απορροή} = (\text{Αποθήκευση}) * (\text{Συντελεστής Μείωσης της Αποθήκευσης})$$

Αν συμβολίσουμε το συντελεστή εκφόρτισης της δεξαμενής ελεύθερου ύδατος της ανώτερης ζώνης με UZK και το απόθεμα της δεξαμενής ελεύθερου ύδατος στην ανώτερη ζώνη με UZFWC, τότε η πλευρική αποστράγγιση που πραγματοποιείται είναι:

$$Q_{\text{interflow}} = \text{UZFWC} * \text{UZK} \quad (1)$$

Όταν ο ρυθμός της βροχόπτωσης υπερβεί το ρυθμό της διήθησης και τη μέγιστη ικανότητα παροχέτευσης με πλευρική αποστράγγιση, τότε η δεξαμενή ελεύθερου ύδατος στην ανώτερη ζώνη (UZFWM) έχει πληρωθεί εντελώς και το πλεόνασμα της βροχόπτωσης προκαλεί την επιφανειακή απορροή.

### Κατώτερη Ζώνη

Η κατώτερη ζώνη αποτελείται από τη δεξαμενή του υπό πίεση ύδατος, δηλαδή το βάθος του ύδατος που κατακρατείται από τα κατώτερα στρώματα του εδάφους, μετά την ύγρανση και την παροχέτευση ελεύθερου ύδατος και δύο επιπλέον δεξαμενές: την *κύρια* και τη *βοηθητική* δεξαμενή ελεύθερου ύδατος, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τους αποθηκευτικούς χώρους που οδηγούν σε μια συνιστώσα αργής υπόγειας ροής και μια συνιστώσα ταχείας υπόγειας ροής, αντίστοιχα. Η εμφάνιση αυτών των δύο δεξαμενών της κατώτερης ζώνης έχει σαν σκοπό την καλύτερη δυνατότητα αναπαραγωγής των παρατηρούμενων καμπυλών μείωσης, λόγω της υπόγειας ροής.

### Ένταση της διήθησης

Ο ρυθμός διήθησης από την ανώτερη ζώνη στην κατώτερη εξαρτάται αφ' ενός μεν από τις απαιτήσεις για διήθηση από την κατώτερη ζώνη, δηλαδή τις απαιτήσεις που καθορίζονται από το απόθεμα νερού στην κατώτερη ζώνη, σε σχέση με τη χωρητικότητά της και αφ' ετέρου από το απόθεμα ελεύθερου ύδατος στην ανώτερη ζώνη, σε σχέση με την χωρητικότητά της. Η ελάχιστη διήθηση συμβαίνει όταν και οι τρεις δεξαμενές της κατώτερης ζώνης είναι πλήρεις. Τότε, ο ρυθμός διήθησης εξισώνεται με το ρυθμό εκφόρτισης της κύριας και βοηθητικής δεξαμενής. Συμβολίζοντας την ελάχιστη διήθηση με PBASE, θα έχουμε:

$$\text{PERC}_{\text{min.dem.}} = \text{PBASE} = \text{LZFPM} * \text{LZPK} + \text{LZFSM} * \text{LZSK} \quad (2)$$

...όπου:

LZFPM = χωρητικότητα κύριας δεξαμενής ελεύθερου ύδατος στην κατώτερη ζώνη

LZFSM = χωρητικότητα βοηθητικής δεξαμενής ελεύθερου ύδατος στην κατώτερη ζώνη

LZPK = παράγοντας εκφόρτισης κύριας δεξαμενής

LZSK = παράγοντας εκφόρτισης βοηθητικής δεξαμενής

Η μέγιστη διήθηση στην κατώτερη ζώνη λαμβάνει χώρα, αν η ζώνη είναι εντελώς ξηρή, δηλαδή εάν το περιεχόμενό της ισούται με μηδέν. Τότε ο μέγιστος ρυθμός διήθησης εκφράζεται ως συνάρτηση του PBASE:

$$\text{PERC}_{\text{min.dem.}} = \text{PBASE} (1 + \text{ZPERC}) \quad (3)$$

...όπου συνήθως ισχύει  $ZPERC \gg 1$ . Η πραγματική διήθηση στην κατώτερη ζώνη εξαρτάται από το απόθεμα της ζώνης σε σχέση με τη χωρητικότητά της. Υπολογιστικά, αυτό σημαίνει ότι το  $ZPERC$  πρέπει να πολλαπλασιαστεί με μια συνάρτηση  $G$  του σχετικού αποθέματος της κατώτερης ζώνης, έτσι ώστε η συνάρτηση αυτή:

- να ισούται με 1, στην περίπτωση που η κατώτερη ζώνη είναι εντελώς ξηρή
- να ισούται με 0 στην περίπτωση που η κατώτερη ζώνη είναι απόλυτα κορεσμένη
- να αντιπροσωπεύει μια προσεγγιστική εκθετική μείωση του βαθμού διήθησης, σε περίπτωση συνεχούς επαναφόρτισης.

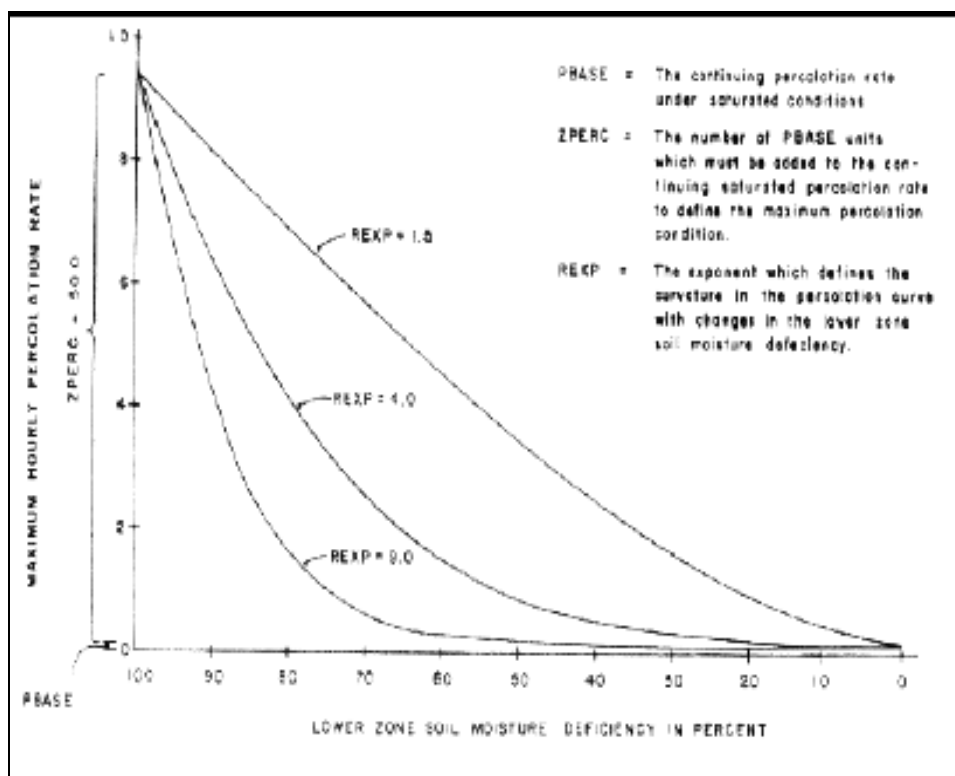
Στο μοντέλο Sacramento η εξίσωση αυτή έχει την παρακάτω μορφή:

$$G = \left( \frac{\sum (\chi\omega\rho\eta\tau\iota\kappa\acute{o}\tau\eta\tau\alpha \cdot \kappa\alpha\tau\acute{o}\tau\epsilon\rho\eta\varsigma \cdot \zeta\acute{o}\nu\eta\varsigma - \pi\epsilon\rho\iota\epsilon\chi\acute{o}\mu\epsilon\nu\omicron \cdot \kappa\alpha\tau\acute{o}\tau\epsilon\rho\eta\varsigma \cdot \zeta\acute{o}\nu\eta\varsigma)}{\sum (\chi\omega\rho\eta\tau\iota\kappa\acute{o}\tau\eta\tau\alpha \cdot \kappa\alpha\tau\acute{o}\tau\epsilon\rho\eta\varsigma \cdot \zeta\acute{o}\nu\eta\varsigma)} \right)^{REXP}$$

$$\Rightarrow G = \left( \frac{\sum \acute{\epsilon}\lambda\lambda\epsilon\iota\mu\mu\alpha \cdot \kappa\alpha\tau\acute{o}\tau\epsilon\rho\eta\varsigma \cdot \zeta\acute{o}\nu\eta\varsigma}{\sum \chi\omega\rho\eta\tau\iota\kappa\acute{o}\tau\eta\tau\alpha \cdot \kappa\alpha\tau\acute{o}\tau\epsilon\rho\eta\varsigma \cdot \zeta\acute{o}\nu\eta\varsigma} \right) \quad (4)$$

... και η πραγματική διήθηση δίνεται από τη σχέση (βλέπε Σχήμα 4.4):

$$PERC_{act.dem.} = PBASE (1 + ZPERC \cdot G) \quad (5)$$



Σχήμα 4.4 : Σχηματική παρουσίαση της διήθησης

Ο πραγματικός ρυθμός της διήθησης τότε γίνεται συνάρτηση του  $PERC_{act, dem.}$  και του σχετικού περιεχομένου της ανώτερης ζώνης σε ελεύθερο νερό:

$$PERC = PERC_{act, dem.} * UZFWC/UZFWM \quad (6)$$

### Κατανομή του διηθούμενου ύδατος

Το διηθούμενο νερό παροχετεύεται στις τρεις δεξαμενές της κατώτερης ζώνης, σε μια για το νερό υπό πίεση και δυο για το ελεύθερο νερό. Με βάση τα προηγούμενα σχόλια θα μπορούσε κανείς να αναμένει ότι η δεξαμενή του υπό πίεση ύδατος στην κατώτερη ζώνη πληρώνεται πριν λάβει χώρα η διήθηση στις δεξαμενές ελεύθερου ύδατος στην ίδια ζώνη. Εντούτοις, οι μεταβολές στις συνθήκες του εδάφους και στην ποσότητα της βροχόπτωσης πάνω από τη λεκάνη προκαλούν αποκλίσεις από την παραπάνω ιδεατή συμπεριφορά. Αυτό συνεπάγεται ότι η διήθηση στις δεξαμενές ελεύθερου ύδατος και επομένως και η υπόγεια ροή λαμβάνουν χώρα πριν πληρωθεί εντελώς η δεξαμενή του υπό πίεση ύδατος. Γι' αυτό, το μοντέλο επιτρέπει σε ένα μέρος του ύδατος που διηθείται να διηθηθεί και προς τις δύο δεξαμενές ελεύθερου ύδατος. Όταν η δεξαμενή του υπό πίεση ύδατος είναι πληρωμένη, όλο το διηθούμενο νερό παροχετεύεται στην κύρια και στη βοηθητική δεξαμενή ελεύθερου ύδατος ανάλογα με το σχετικό έλλειμμα της καθεμίας.

### Υπόγεια Ροή

Αν το πραγματικό περιεχόμενο της κύριας και της βοηθητικής δεξαμενής ύδατος συμβολίζεται με  $LZFPC$  και  $LZFSC$ , αντίστοιχα, τότε η ροή βάσης  $QBASE$  έρχεται σε συμφωνία με τη θεωρία της γραμμικής δεξαμενής:

$$QBASE = LZFK * LZPK + LZFSK * LZSK \quad (7)$$

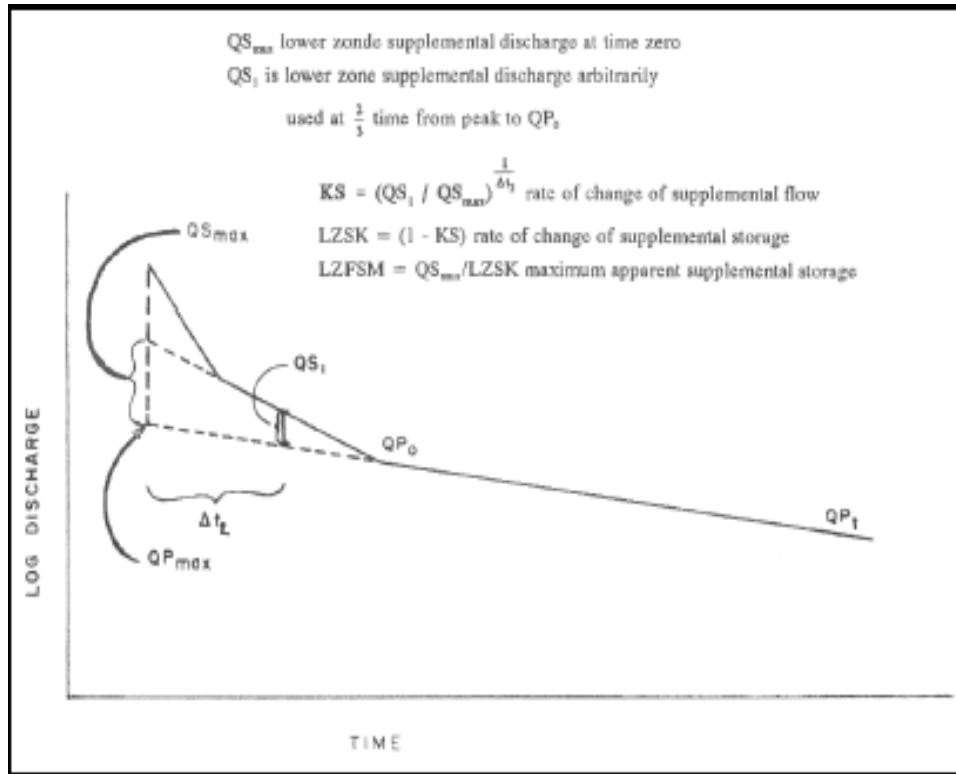
Οι παράγοντες παροχέτευσης  $LZPK$  και  $LZSK$  μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν από το τμήμα του υδρογραφήματος όπου παρατηρείται μείωση, σχεδιάζοντας το τμήμα αυτό του υδρογραφήματος σε ημι-λογαριθμικό χαρτί (η παροχή είναι σε λογαριθμική κλίμακα). Στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης μείωσης ενεργεί μόνο η συνιστώσα της αργής αρχικής ροής, ενώ στα υψηλότερα σημεία συνεισφέρουν και οι δύο συνιστώσες της αρχικής ροής.

Σε αναλυτική μορφή και αναφορικά με το Σχήμα 4.5, ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$LZPK = 1 - \frac{(QP_1)^{\frac{1}{\Delta t_1}}}{QP_0} \quad (8)$$

$$LZFPM = \frac{QP_{max}}{LZPK} \quad (9)$$

....όπου  $LZPK$  είναι ο συντελεστής εκφόρτισης της Κύριας Δεξαμενής του Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης,  $QP_0$ ,  $QP_1$  είναι αντίστοιχα η παροχή του υδατορεύματος στην αρχή της εκφόρτισης και  $\Delta t_1$  χρονικά βήματα αργότερα και  $QP_{max}$  είναι η μέγιστη παρατηρημένη κύρια βασική ροή.



Σχήμα 4.5 : Καμπύλη αποφόρτισης της ταχείας συνιστώσας της βασικής απορροής

Σε ότι αφορά στη δευτερεύουσα βασική ροή (εκροή από την Βοηθητική Δεξαμενή Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης) ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$LZSK = 1 - \frac{(QS_2)^{\frac{1}{\Delta t_2}}}{QS_{max}} \quad (10)$$

$$LZFSM = \frac{QS_{max}}{LZSK} \quad (11)$$

...όπου LZSK είναι ο συντελεστής εκφόρτισης της Βοηθητικής Δεξαμενής Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης,  $\Delta t_2$  είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων από τη χρονική στιγμή, που θεωρείται ότι η δευτερεύουσα βασική ροή είναι μέγιστη, μέχρι τα  $2/3$  του χρόνου από τη στιγμή της μέγιστης δευτερεύουσας βασικής ροής μέχρι τη στιγμή που αυτή μηδενίζεται, και  $QS_{max}$ ,  $QS_2$  είναι αντίστοιχα η δευτερεύουσα βασική ροή του υδατορεύματος στην αρχή της αποφόρτισης και  $\Delta t_2$  χρονικά βήματα αργότερα.

Ο παράγοντας παροχέτευσης LZPK προκύπτει από τη σχέση:

$$K = (QP_t / QP_0) 1/t \Rightarrow LZPK = 1 - K \quad (12)$$

...όπου K = συντελεστής μείωσης της αρχικής ροής στη μονάδα του χρόνου

t = αριθμός μονάδων χρόνου, γενικότερα ημέρες

$P_0$  = η απορροή, όταν συμβαίνει μείωση στο βαθμό αρχικής ροής

$QP_t$  = η απορροή μετά από t μονάδες χρόνου

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής μείωσης  $K$  σχετίζεται με τον παράγοντα αντίδρασης  $a$  στη σχέση  $QP_t = QP_0 \exp(-at)$ , οπότε  $a = -\ln K$  ή  $K = \exp(-a)$ .

Η ποσότητα του νερού που έχει παροχετευτεί σε μια ημέρα είναι:

$$\int_0^1 QP_t dt = QP_0 \int_0^1 \exp(-at) dt = \frac{QP_0}{a} (1 - \exp(-a)) = LZFPC (1+K) = LZFPC * LZPK$$

Αν υποθέσουμε ότι ως  $QP_{\max}$  συμβολίζουμε τη μέγιστη τιμή της κύριας ροής, τότε το μέγιστο περιεχόμενο ύδατος στην κατώτερη ζώνη θα είναι:

$$LZFPM = QP_{\max} / LZPK \quad (13)$$

...και κατ' ανάλογο τρόπο καθορίζεται η χωρητικότητα της βοηθητικής δεξαμενής ελεύθερου ύδατος στην κατώτερη ζώνη ή τουλάχιστον με τη διαδικασία αυτή προκύπτει μια πρώτη εκτίμηση για τις χωρητικότητες των δεξαμενών ελεύθερου ύδατος στην κατώτερη ζώνη.

Η συνολική αρχική ροή συνεισφέρει ολικά ή εν μέρει στη ροή μέσα στον αγωγό. Ολική συνεισφορά έχουμε όταν η υπόγεια διαφυγή (δηλαδή η απορροή από τη λεκάνη, η οποία δεν μετράται στην εκβολή) είναι απύσχα. Διαφορετικά, ένα τμήμα της συνολικής αρχικής ροής αντιπροσωπεύει την υπόγεια διαφυγή.

### Εξάτμιση

Η εξάτμιση σε σημαντικό βαθμό συμβαίνει από εκείνο το τμήμα της λεκάνης, το οποίο καλύπτεται από υδατορεύματα, λίμνες και παρόχθια βλάστηση. Η εξατμισοδιαπνοή από το υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης καθορίζεται από τα σχετικά αποθέματα υπό πίεση ύδατος στις δύο ζώνες. Ας συμβολίσουμε με  $ED$  τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή από την ανώτερη ζώνη θα είναι:

$$E_1 = ED * (UZTWC/UZTWM) \quad (14)$$

...δηλαδή ο πραγματικός ρυθμός είναι μια γραμμική συνάρτηση του σχετικού αποθέματος νερού στην ανώτερη ζώνη. Στην περίπτωση που ισχύει  $E_1 < ED$  το νερό αφαιρείται από την κατώτερη ζώνη σαν μια συνάρτηση του αποθέματος του υπό πίεση ύδατος στην κατώτερη ζώνη σχετικά με τη χωρητικότητα του υπό πίεση ύδατος:

$$E_2 = (ED - E_1) * LZTWC/(UZTWM + LZTWM) \quad (15)$$

Αν η εξατμισοδιαπνοή πρέπει να πραγματοποιηθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε ο λόγος του περιεχομένου προς την χωρητικότητα της δεξαμενής ελεύθερου ύδατος να υπερβαίνει το σχετικό περιεχόμενο της δεξαμενής ύδατος υπό πίεση, τότε το νερό μετατρέπεται από ελεύθερο σε υπό πίεση, έτσι ώστε να εξισορροπηθούν τα σχετικά φορτία. Η διόρθωση αυτή γίνεται χωριστά για την ανώτερη και την κατώτερη ζώνη. Παρόλα αυτά, ένα τμήμα  $RSERV$  της δεξαμενής ελεύθερου ύδατος στην κατώτερη ζώνη δεν είναι διαθέσιμο για τη διαδικασία της διαπνοής.



## Αδιαπέρατες και Προσωρινά Αδιαπέρατες Περιοχές

Εκτός από την απορροή από την διαπερατή περιοχή, ο αγωγός μπορεί να πληρωθεί με βρόχινο νερό από την αδιαπέρατη περιοχή. Όσον αφορά στο μέγεθος της αδιαπέρατης περιοχής πρέπει να τονιστεί, ότι στο μοντέλο Sacramento γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στις μόνιμα και προσωρινά αδιαπέρατες περιοχές. Οι προσωρινά αδιαπέρατες περιοχές δημιουργούνται, όταν πληρούνται όλες οι απαιτήσεις για υπό πίεση νερό, όταν δηλαδή ένα διαρκώς αυξανόμενο τμήμα της λεκάνης αποκτά χαρακτηριστικά αδιαπέρατης ζώνης.

### Διόδευση της Επιφανειακής Απορροής

Πριν την απορροή από την αδιαπέρατη περιοχή, πριν δηλαδή η χερσαία και πλευρική ροή φτάσουν στον αγωγό, είναι πιθανό να μετατραπούν σύμφωνα με το μοναδιαίο υδρογράφημα, με αποτέλεσμα μια προσαρμοσμένη χρονική κατανομή αυτών των δυο βαθμών ροής.

#### 4.1.2 ΦΑΣΗ ΑΓΩΓΟΥ

Στη ροή μέσα στον αγωγό συνεισφέρουν:

- η απορροή από την αδιαπέρατη περιοχή
- η χερσαία ροή από την διαπερατή περιοχή
- η πλευρική αποστράγγιση
- η βασική ροή (ολικά ή κατά μέρος)

Η πορεία και μείωση του υδρογραφήματος της εισροής μπορεί να περιγραφεί από:

- το άθροισμα των εκροών από τα διάφορα τμήματα της λεκάνης
- μια προσέγγιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος για την εκροή από κάθε τμήμα της λεκάνης χωριστά
- τη μέθοδο «Standard Muskingum Method»
- την προσεγγιστική μέθοδο των στρωμάτων: Το υδρογράφημα της εισροής χωρίζεται σε ένα αριθμό στρωμάτων, όπου κάθε στρώμα έχει το δικό του συντελεστή.

### Μέθοδος «Standard Muskingum Method»

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή (McCarthy, 1938), η εκροή  $Q$  σε χρόνο  $i+1$  υπολογίζεται ως εξής (όπου με  $I$  συμβολίζεται η εισροή):

$$Q_{i+1} = c_1 I_i + c_2 I_{i+1} + c_3 Q_i \quad (16)$$

...όπου:

$$c_1 = \frac{\Delta T + 2Kx}{2K(1-x) + \Delta T}$$

$$c_2 = \frac{\Delta T - 2Kx}{2K(1-x) + \Delta T}$$

$$c_3 = \frac{2K(1-x) - \Delta T}{2K(1-x) + \Delta T}$$

Η παράμετρος  $K$  είναι ένας παράγοντας αναλογικότητας με διαστάσεις χρόνου. Το  $K$  είναι ο χρόνος που διαρκεί η διαδρομή ενός πλημμυρικού κύματος μέσα στον παραπόταμο. Η παράμετρος  $x$  είναι ένας αδιάστατος παράγοντας βαρύτητας, με εύρος τιμών  $0 \leq x \leq 0,5$ . Σε φυσικούς χείμαρρους, έχουν βρεθεί τιμές για το  $x$  από 0 έως 0,3. Στον προσδιορισμό του  $x$  δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, καθώς το τελικό αποτέλεσμα έχει μικρή ευαισθησία στις μεταβολές του.

Μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί, ότι η παράσταση  $c_1+c_2+c_3$  ισούται με 1 και επιπλέον τα  $\Delta T$  και  $K$  πρέπει να έχουν την ίδια μονάδα χρόνου. Η χρήση της μεθόδου απαιτεί επιλογή των  $\Delta T$ ,  $K$  και  $x$ .

Το διάστημα μεταβολής  $\Delta T$  πρέπει να είναι μικρότερο από το  $K$ , διαφορετικά θα λείπουν κορυφές του υδρογραφήματος από την κατάντη πλευρά. Προτείνεται το  $K$  να επιλέγεται ως το  $\frac{1}{2}$  έως το  $\frac{1}{4}$  του  $K$ . Αν, παρόλα αυτά, επιλεγεί ένα διάστημα  $\Delta T$ , το οποίο είναι πολύ μικρότερο από το  $K$ , τότε το  $c_2$  γίνεται αρνητικό. Αυτό θα οδηγήσει σε πτώση ή ακόμα και σε αρνητικές εκροές, όταν η εισροή αρχίσει να αυξάνεται. Για την αποφυγή αρνητικών συντελεστών το διάστημα μεταβολής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ  $2Kx \leq \Delta T \leq K$ . Για τιμές του  $x$  κοντά στο 0,5 η απαίτηση αυτή αφήνει μικρά περιθώρια για την επιλογή του  $\Delta T$ . Αν κάποιος ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για το υψηλότερο τμήμα του πλημμυρικού κύματος, η παραπάνω συνθήκη μπορεί κάπως να μετριαστεί, αν δεχτούμε ελαφρώς αρνητικές τιμές για το  $c_2$ .

## 4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ<sup>[10]</sup>

Για να τρέξουμε το μοντέλο Sacramento, πρέπει να εκτιμηθούν οι παρακάτω παράμετροι και χωρητικότητες:

**UZTWM** : Πρόκειται για το βάθος εκείνο του ύδατος, το οποίο πρέπει να καλυφθεί στις διαπερατές περιοχές, πριν οποιαδήποτε ποσότητα νερού καταστεί ικανή για ελεύθερη αποθήκευση. Εφόσον το νερό υπό πίεση (tension water) της ανώτερης ζώνης πρέπει να συμπληρωθεί πριν δημιουργηθεί ροή από την περίσσεια του νερού στην αδιαπέρατη ζώνη, ο όγκος του μπορεί να προσδιοριστεί από την ανάλυση του υδρογραφήματος. Ο όγκος του υπό πίεση ύδατος της ανώτερης ζώνης μπορεί να εκτιμηθεί, καθώς ακολουθεί ξηρή περίοδο, όταν η εξατμισοδιαπνοή έχει μειώσει την υγρασία του εδάφους. Ο όγκος της βροχόπτωσης που συγκρατείται, πριν η απορροή αυξηθεί πέραν εκείνης που μπορεί να παραχθεί από τη βροχόπτωση στην αδιαπέρατη περιοχή, καλείται UZTWM. Γενικά, ο όγκος (tension) της ανώτερης ζώνης κυμαίνεται μεταξύ 25 και 175mm, ανάλογα με το είδος του εδάφους.

**UZFWM :** Το ελεύθερο νερό της ανώτερης ζώνης αντιπροσωπεύει εκείνο το βάθος νερού, το οποίο πρέπει να καλυφθεί πάνω από την διαπερατή περιοχή της υδρολογικής λεκάνης σε περίσσεια του UZTWM, με σκοπό να διατηρηθεί το υγρό μέτωπο στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Ο όγκος αυτός παρέχει την κύρια λειτουργία στην εξίσωση της διήθησης και ενισχύει τον όγκο του νερού που υφίσταται αποστράγγιση από τη μια ζώνη στην άλλη. Γενικά, το μέγεθός του κυμαίνεται από 10-100mm. Δεν είναι ιδιαίτερα εφικτό να καθοριστεί ο όγκος του ελεύθερου ύδατος της ανώτερης ζώνης απευθείας από παρατηρήσεις, γι' αυτό απαιτούνται ειδικά προγράμματα υπολογιστή για το υπολογισμό του ακριβούς βάθους.

**LZTWM :** Πρόκειται για το μέγιστο όγκο του υπό πίεση ύδατος της κατώτερης ζώνης, σε mm νερού. Ο όγκος αυτός είναι μια από τις πλέον δύσκολες στην εκτίμησή τους παράμετρος. Εφόσον το υπόλοιπο της υγρασίας στο χώρο αποθήκευσης μπορεί να υπάρχει για αρκετά χρόνια, ο συνολικός του όγκος μπορεί να μην είναι εύκολα εξαγόμενος από τις διαθέσιμες πηγές. Αν μια περίοδος ξηρασίας κατά τη διάρκεια παρατήρησης της λεκάνης ή της υπό μελέτης περιοχής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία διαπνοής των φυτών με βαθύ ρίζωμα, τότε η περίοδος παρατήρησης είναι συνήθως αρκετή για τον προσδιορισμό του όγκου του υπό πίεση ύδατος της κατώτερης ζώνης. Ωστόσο, τα δεδομένα του πεδίου δεν είναι συνήθως αρκετά για αυτό το σκοπό. Ως εκ τούτου, εκτός και αν ληφθούν ιδιαίτερα μέτρα, το βάθος αποθήκευσης του υπό πίεση ύδατος της κατώτερης ζώνης μπορεί κατά λάθος να ληφθεί ως το μέγιστο έλλειμμα που καταγράφηκε κατά την περίοδο παρατήρησης, αντί για την πραγματική χωρητικότητα της ζώνης. Έχει παρατηρηθεί ότι η ανάπτυξη των φυτών σε μια περιοχή είναι μια σχετικά αποτελεσματική ένδειξη του όγκου του υπό πίεση ύδατος της κατώτερης ζώνης. Σε περιοχές με έντονη δασική βλάστηση από κωνοφόρα δέντρα με βαθύ ρίζωμα, το βάθος της κατώτερης ζώνης μπορεί να είναι γύρω στα 600mm. Σε περιοχές με χρόνια βλάστηση με βαθύ ρίζωμα, το βάθος αυτό είναι περίπου 150mm. Αντιθέτως, σε περιοχές όπου η βλάστηση αποτελείται κυρίως από δέντρα και φυτά ρηχού ριζώματος, το βάθος αυτό μπορεί να φτάνει μόλις τα 75mm. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η ζώνη αυτή αντιπροσωπεύει εκείνο τον όγκο του νερού, ο οποίος κατακρατείται από τα υπάρχοντα φυτά κατά τη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας.

**LZFSM :** Πρόκειται για το μέγιστο όγκο του ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης, ο οποίος υφίσταται αποστράγγιση σε βαθμό που εκφράζεται από την παράμετρο LZSK. Το κατώτερο όριο του συμπληρωματικού μεγίστου (supplemental maximum) του ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την ανάλυση του υδρογραφήματος. Η εγκυρότητα αυτού του υπολογισμού για τον προσδιορισμό του μεγίστου όγκου εξαρτάται από το βαθμό, στον οποίο το υδρογράφημα αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ικανότητα βασικής απορροής της λεκάνης. Αν ένα μέρος μόνο της υπόγειας απορροής μπορεί να παρατηρηθεί στον αγωγό ροής, ο εκτιμώμενος όγκος που βασίζεται στην επιφανειακή ροή πρέπει να αυξηθεί, έτσι ώστε να

περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες, προσθέτοντας τον παράγοντα SIDE (υπόγεια διαφυγή).

**LZFPM** : Πρόκειται για το μέγιστο όγκο του ελεύθερου ύδατος, ο οποίος υφίσταται αποστράγγιση σε βαθμό που εκφράζεται από την παράμετρο LZSK. Για αυτή την παράμετρο ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που έγιναν για την παράμετρο LZFSM.

**UZK** : Ο βαθμός πλευρικής αποστράγγισης της ανώτερης ζώνης εκφράζεται ως ρυθμός της ημερήσιας απορροής στα διαθέσιμα αποθέματα. Η τιμή του κυμαίνεται από 0,18 έως 1,0 κατά προσέγγιση, ενώ το 0,4 θεωρείται γενικά μια αποτελεσματική αρχική εκτίμηση. Η παράμετρος αυτή δεν μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από παρατηρήσεις του πεδίου και γι' αυτό απαιτούνται ειδικά προγράμματα υπολογιστή.

**LZSK** : Πρόκειται για το βαθμό πλευρικής αποστράγγισης στη βοηθητική δεξαμενή ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης, ο οποίος εκφράζεται ως τμήμα των αποθεμάτων ανά ημέρα.

**LZPK** : Πρόκειται για το βαθμό πλευρικής αποστράγγισης στην κύρια δεξαμενή ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης, ο οποίος εκφράζεται ως τμήμα των αποθεμάτων ανά ημέρα.

**ZPERC** : Η ανάλογη αύξηση στη διήθηση από κορεσμένες σε ξηρές συνθήκες εκφράζεται από την παράμετρο ZPERC. Η τιμή της παραμέτρου αυτής εκτιμάται καλύτερα από δοκιμές στον υπολογιστή. Η αρχική εκτίμηση μπορεί να προκύψει από το διαδοχικό υδρογράφημα ενός ή δύο μηνών, που ακολουθούν μια ξηρή περίοδο. Η τιμή της ZPERC πρέπει να προσδιοριστεί εξ' αρχής, έτσι ώστε να είναι δυνατός ένας λογικός προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών απορροής.

**REXP** : Πρόκειται για τον εκθέτη στην εξίσωση της διήθησης, ο οποίος καθορίζει το βαθμό στον οποίο οι απαιτήσεις για διήθηση αλλάζουν από τις ξηρές συνθήκες,  $(ZPERC+1)*PBASE$ , στις υγρές συνθήκες,  $PBASE$ . Η τιμή αυτού του εκθέτη πρέπει να προσδιοριστεί εξ' αρχής, όπως και στην περίπτωση της παραμέτρου ZPERC. Η αλληλεπίδραση των  $PBASE$ , ZPERC και REXP ίσως απαιτήσει μεταβολή των τριών αυτών όρων, στην περίπτωση που καταστεί σαφές ότι κάποιος άλλος όρος πρέπει να αλλάξει. Κατασκευάζοντας την καμπύλη διήθησης, που προκύπτει από τους τρεις αυτούς όρους, μπορούμε να διαπιστώσουμε τις απαιτούμενες αλλαγές. Η διακύμανση της τιμής του REXP, που έχει παρατηρηθεί, είναι συνήθως μεταξύ των 1,0 και 3,0. Γενικά η τιμή 1,8 αποτελεί ικανοποιητική αρχική συνθήκη.

**PFREE** : Πρόκειται για ένα μέρος του ύδατος που διηθείται και διοχετεύεται απευθείας στους ελεύθερους υδροφορείς της κατώτερης ζώνης. Η τιμή του δεν μπορεί να εκτιμηθεί από την ανάλυση του υδρογραφήματος. Προτείνεται ως

αρχική τιμή, η τιμή 0,20. Γενικότερα, οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 0,40. Η ανάλυση της αρχικής ροής επιτρέπει ικανοποιητικό προσδιορισμό του PFREE.

**RSERV** : Πρόκειται για ένα μέρος του ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης, το οποίο δεν διατίθεται για τη διαδικασία της διαπνοής. Η τιμή του γενικότερα κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0,40, ενώ η πλέον χρησιμοποιούμενη τιμή είναι 0,30. Η παράμετρος αυτή έχει πολύ μικρή ευαισθησία.

**PCTIM** : Πρόκειται για μόνιμα αδιαπέρατο τμήμα της λεκάνης, το οποίο είναι παρακείμενο στους αγωγούς ροής. Μπορεί να προσδιοριστεί από καταγίδες μικρής έντασης και διάρκειας, έπειτα από μακρά περίοδο ξηρασίας. Τότε ο όγκος της άμεσης απορροής (άμεση απορροή = παρατηρούμενη απορροή – αρχική ροή) διαιρούμενος με τον όγκο της βροχόπτωσης δίνει το ποσοστό του αδιαπέρατου τμήματος της λεκάνης. Η παράμετρος PCTIM δεν πρέπει να προσεγγίζει τη μονάδα.

**ADIMP** : Πρόκειται για τμήμα της λεκάνης, το οποίο γίνεται αδιαπέρατο όταν καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις σε νερό υπό πίεση. Μπορεί να εκτιμηθεί από καταγίδες μικρής έντασης και διάρκειας, έπειτα από πολύ υγρές περιόδους. Όπως και προηγουμένως, ο όγκος της άμεσης απορροής διαιρούμενος με τον όγκο της βροχόπτωσης δίνει το ποσοστό του αδιαπέρατου τμήματος. Η εκτίμηση του ADIMP προκύπτει από τη σχέση:

$$ADIMP = \text{Ολικό Ποσοστό Αδιαπέρατης Περιοχής} - PCTIM \quad (17)$$

**SARVA** : Πρόκειται για τμήμα της λεκάνης, το οποίο είναι καλυμμένο από υδατορεύματα, λίμνες και παρόχθια βλάστηση, υπό κανονικές συνθήκες. Η περιοχή SARVA θεωρείται η ίδια ή μικρότερη από την PCTIM. Πρέπει να γίνει αναφορά σε λεπτομερή χάρτη, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η έκταση των περιοχών που παροχετεύουν απευθείας στους χειμάρρους και να προσεγγιστούν οι διαφορές μεταξύ των περιοχών SARVA και PCTIM. Γενικά, η τιμή της SARVA κυμαίνεται μεταξύ 40% και 100% της τιμής της PCTIM.

**SIDE** : Αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο της βασικής ροής, το οποίο δεν μπορεί να παρατηρηθεί στον αγωγό ροής. Όταν το έδαφος είναι κορεσμένο και η διήθηση πραγματοποιηθεί κατά ένα βαθμό μεγαλύτερο από την παρατηρούμενη βασική ροή, τότε εμφανίζεται η ανάγκη για παροχέτευση πρόσθετης υγρασίας στο έδαφος. Το SIDE είναι ο λόγος του μη παρατηρούμενου προς το παρατηρούμενο μέρος της βασικής ροής. Όταν τα κορεσμένα εδάφη δεν παροχετεύουν στον επιφανειακό αγωγό, το SIDE επιτρέπει το σωστό καθορισμό του PBASE, με σκοπό να επιτευχθεί ο βαθμός διήθησης για κορεσμένα εδάφη. Στην περιοχή, όπου όλη η παροχή από τους υδροφορείς της βασικής ροής φτάνει στους επιφανειακούς αγωγούς, το SIDE θα είναι μηδέν. Τιμές μηδενικές ή κοντά στο μηδέν εμφανίζονται σε μεγάλο αριθμό λεκανών. Παρόλα αυτά, σε περιοχές που υφίστανται υπερβολική υπόγεια διαφυγή, το SIDE μπορεί να φτάσει την τιμή 5,0. Είναι πιθανό σε κάποιες περιοχές η τιμή του SIDE να είναι ακόμα υψηλότερη.

**SSOUT** : Πρόκειται για την υπόγεια διαφυγή κατά μήκος του αγωγού ροής, η οποία πρέπει να παρέχεται από τη ροή, πριν το νερό καταστεί διαθέσιμο για επιφανειακή απορροή. Ο όγκος αυτός, εκφρασμένος σε mm/μονάδα χρόνου είναι γενικότερα κοντά στο μηδέν. Συνιστάται να χρησιμοποιείται η τιμή μηδέν και το SSOUT εφαρμόζεται μόνο αν το διάγραμμα του  $\log Q$  συναρτήσει του χρόνου απαιτεί την πρόσθεση μιας σταθεράς, ώστε να επιτευχθεί έγκυρη εκτίμηση. Αν οι σταθεροί όγκοι της ροής προστεθούν στο παρατηρούμενο ρεύμα ροής, η κλίση στο διάγραμμα απορροής θα μεταβληθεί. Η τιμή αυτή, η οποία απαιτείται για την γραμμικοποίηση της καμπύλης πτώσης, είναι η κατάλληλη τιμή για το SSOUT. Θα πρέπει να καταστεί σαφές, ότι στις περιπτώσεις που απαιτείται το SSOUT, η αποτελεσματική εκτίμηση του χώρου αποθήκευσης του ελεύθερου ύδατος της κατώτερης ζώνης και του βαθμού απορροής θα απαιτήσουν συνυπολογισμό του SSOUT.

**UNIT HYDROGRAPH SURFACE RUNOFF** : Το μοναδιαίο υδρογράφημα (Unit Hydrograph, UH) προκύπτει από ωριαίες και ημερήσιες τιμές. Επομένως, μόνο ωριαίο ή ημερήσιο υδρογράφημα μπορεί να εισαχθεί. Μπορούν να εισαχθούν το μέγιστο 12 μη-μηδενικές τιμές υδρογραφήματος, μαζί με το μέγεθος του βήματος. Αν το πρόγραμμα δουλέψει με ωριαίες τιμές και τα δεδομένα για το ωριαίο υδρογράφημα είναι 20 ώρες, τότε πρέπει να εισάγουμε 9 τιμές με βήμα 2, που σημαίνει ότι τα σημεία θα απέχουν μεταξύ τους  $\Delta t = 2$  ώρες. Ο μέγιστος αριθμός δεδομένων για το ωριαίο υδρογράφημα είναι 49 ώρες (48 μη-μηδενικές τιμές).

Οι μονάδες, που εισάγονται στο μοναδιαίο υδρογράφημα δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία, αρκεί να είναι σύμφωνες μεταξύ τους. Αρχικά οι δεδομένες τιμές (με το δεδομένο βήμα) μετατρέπονται σε τιμές με απόσταση μιας ώρας. Έπειτα υπολογίζεται το άθροισμα και όλες οι τιμές διαιρούνται με αυτό, έτσι ώστε το άθροισμα των προσαρμοσμένων τιμών να είναι πάντα 1.

Για να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του μοναδιαίου υδρογραφήματος σε επιφανειακή απορροή, μπορούμε να το τρέξουμε με τις αρχικές τιμές και με τα UZK και LZSK ίσα με  $10^{-5}$ . Η μοναδική δεξαμενή που θα είναι τότε άδεια θα είναι η κύρια δεξαμενή της κατώτερης ζώνης θα ισούται με το γινόμενο  $LZPWC * LZPK$ . Σημειώνουμε ότι τα LZPK, LZSK και UZK δίδονται ως τμήματα της απορροής ανά ημέρα. Για να πάρουμε ωριαία τιμή, η ημερήσια τιμή προσαρμόζεται ως εξής:

$$UZK(hr) = [1 - (1 - UZK(day))^{1/24}] \quad (18)$$

...κ.λ.π. για τις υπόλοιπες γραμμικές δεξαμενές.

## 4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ<sup>[7]</sup>

Τα στοιχεία που απαιτείται να εισάγουμε γενικότερα, προκειμένου να εφαρμόσουμε το μοντέλο για μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, είναι τα εξής:

- Το όνομα του τμήματος της λεκάνης
- Την έκταση του τμήματος σε Km<sup>2</sup>
- Τη χρονοσειρά της βροχόπτωσης
- Τη χρονοσειρά της εξάτμισης
- Χωρητικότητες και αρχικά περιεχόμενα (σε mm) των δεξαμενών της ανώτερης και κατώτερης ζώνης:

Ανώτερη Ζώνη			Κατώτερη Ζώνη	
Δεξαμενή Νερού υπό πίεση	Δεξαμενή Ελεύθερου Νερού	Δεξαμενή Νερού υπό πίεση	Βοηθητική Δεξαμενή Ελεύθερου Νερού	Κύρια Δεξαμενή Ελεύθερου Νερού
UZTWM	UZFWM	LZTWM	LZFSM	LZFPM
UZTWC	UZFWC	LZTWC	LZFSC	LZFPC

- Τις παραμέτρους:

UZK	(τεμάχιο/ημέρα)	RSERV	(-)
LZSK	(τεμάχιο/ημέρα)	PCTIM	(-)
LZPK	(τεμάχιο/ημέρα)	ADIMP	(-)
ZPERC	(-)	SARVA	(-)
REXP	(-)	SIDE	(-)
PFREE	(-)	SSOUT	(mm/dt)

- Συνιστώσες από το μοναδιαίο υδρογράφημα (μέγιστο 12 τιμές) για την καθοδήγηση της επιφανειακής απορροής
- Το μέγεθος του βήματος (dt) που θα εφαρμοστεί στις συνιστώσες του μοναδιαίου υδρογραφήματος
- Τις παραμέτρους PM, PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub> (αν χρησιμοποιούνται, είναι σημαντικές μόνο στην περίπτωση που ισχύει dt > ώρα)

Οι μεταβλητές του μοντέλου διακρίνονται σε μεταβλητές εισόδου, μεταβλητές εξόδου και παραμέτρους:

- **Δεδομένα χρονοσειρών εισόδου**
  - ο Χρονοσειρά υψών σημειακής βροχόπτωσης R<sub>i</sub> (σε mm) για N σταθμούς μέτρησης (i = 1, 2, 3,...,N) που βρίσκονται στο εσωτερικό ή στην άμεση γειτονία της λεκάνης
  - ο Χρονοσειρά δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ED (σε mm) από δεδομένα εξατμισιμέτρου ή από μία οποιαδήποτε εμπειρική ή ημι-εμπειρική μέθοδο
  - ο Χρονοσειρά παροχής για N σταθμούς μέτρησης (i = 1, 2, 3,...,N) που βρίσκονται στο εσωτερικό ή στην άμεση γειτονία της λεκάνης

- **Δεδομένα χρήσης γης για τη λεκάνη απορροής**
  - ο Ποσοστό επιφάνειας που είναι μόνιμα αδιαπέρατη PCTIM (αδιάστατος αριθμός)
  - ο Μέγιστο ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας του εδάφους ADIMP (αδιάστατος αριθμός)
  - ο Συνολικό ποσοστό κάλυψης από υδατορεύματα, λίμνες και παρόχθια βλάστηση SARVA (αδιάστατος αριθμός)
- **Παράμετροι δεξαμενών του μοντέλου**
  - ο Χωρητικότητα Δεξαμενής Ύδατος υπό Πίεση της Ανώτερης Ζώνης UZTWM (mm)
  - ο Χωρητικότητα Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Ανώτερης Ζώνης UZFWM (mm)
  - ο Συντελεστής εκφόρτισης Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Ανώτερης Ζώνης UZK (% του αποθέματος ανά χρονικό βήμα)
  - ο Χωρητικότητα Δεξαμενής Ύδατος υπό Πίεση της Κατώτερης Ζώνης LZTWM (mm)
  - ο Χωρητικότητα Κύριας Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZFPM (mm)
  - ο Συντελεστής εκφόρτισης Κύριας Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZPK (% του αποθέματος ανά χρονικό βήμα)
  - ο Χωρητικότητα Βοηθητικής Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZFSM (mm)
  - ο Συντελεστής εκφόρτισης Βοηθητικής Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZSK (% του αποθέματος ανά χρονικό βήμα)
- **Παράμετροι μηχανισμού διήθησης**
  - ο Εκθέτης σχέσης, REXP (αδιάστατος αριθμός)
  - ο Ποσοστό του όγκου ύδατος που διηθείται απευθείας στις Δεξαμενές Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης, PFREE (αδιάστατος αριθμός)
- **Παράμετροι υπόγειων διαφυγών**
  - ο Ο λόγος, σε σχέση με την παρατηρημένη βασική ροή, της εκροής από τις Δεξαμενές Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης που δεν εμφανίζεται ως βασική ροή, SIDE (αδιάστατος αριθμός)
  - ο Απώλειες από το υδατόρευμα, SSOUT (mm)
- **Ενδιάμεσες μεταβλητές κατάστασης της λεκάνης απορροής**
  - ο Απόθεμα νερού Δεξαμενής Ύδατος υπό Πίεση της Ανώτερης Ζώνης UZTWC (mm)
  - ο Απόθεμα νερού Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Ανώτερης Ζώνης UZFWC (mm)
  - ο Απόθεμα νερού Δεξαμενής Ύδατος υπό Πίεση της Κατώτερης Ζώνης LZTWC (mm)
  - ο Απόθεμα νερού Κύριας Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZFPC (mm)



- ο Αποθέμα νερού Βοηθητικής Δεξαμενής Ελεύθερου Ύδατος της Κατώτερης Ζώνης LZFSC (mm)

Οι άλλες ενδιάμεσες μεταβλητές που αναφέρθηκαν πιο πάνω αποτελούν αποθέματα των δεξαμενών του μοντέλου και έχουν, όπως είναι φυσικό, ως κατώτατο όριο διακύμανσης το 0 και ως ανώτατο όριο την χωρητικότητα της αντίστοιχης δεξαμενής.

Στο παρόν ερευνητικό έργο δε θεωρήθηκε σκόπιμη η εφαρμογή ενός μοντέλου διόδευσης πλημμύρας, καθώς ο στόχος ήταν η χρήση ενός μοντέλου βροχόπτωσης-απορροής για θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Σε τέτοια προβλήματα είναι γνωστό, ότι σπάνια γίνεται χρήση χρονικής κλίμακας μικρότερης από 1 ημέρα. Στην κλίμακα όμως αυτή για τα περισσότερα ελληνικά ποτάμια δεν τίθεται πρόβλημα διόδευσης, λόγω του μικρού χρόνου απόκρισής τους (μερικές ώρες). Τα ίδια ισχύουν και για το Μοναδιαίο Υδρογράφημα.

**Μέσα ετήσια ισοζυγία της λεκάνης απορροής για την περίοδο προσομοίωσης:** Με βάση τις δεδομένες τιμές των υδρολογικών μεταβλητών, το μοντέλο υπολογίζει τις παρακάτω συνιστώσες του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης σε mm:

- Επιφανειακή βροχόπτωση από μετρήσεις σημειακής βροχόπτωσης
- Μετρημένη συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης
- Υπολογισμένη συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης
- Υπολογισμένη επιφανειακή απορροή στην έξοδο της λεκάνης
- Υπολογισμένη υποδερμική απορροή στην έξοδο της λεκάνης
- Υπολογισμένη βασική ροή στην έξοδο της λεκάνης
- Δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης από μετρήσεις ή ανεξάρτητες από το μοντέλο εκτιμήσεις
- Υπολογισμένη από το μοντέλο πραγματική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης
- Αποθέματα νερού στο έδαφος στο τέλος της θεωρούμενης περιόδου ρύθμισης. Υπενθυμίζεται ότι τα αποθέματα στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης εισάγονται από τον χρήστη ως δεδομένα και έτσι είναι γνωστή και η μεταβολή των αποθεμάτων, η οποία και συνδέεται άμεσα με το μέσο ετήσιο ισοζύγιο της λεκάνης σύμφωνα με τη γενική σχέση:

$$(\text{εισροές}) = (\text{εκροές}) + (\text{αύξηση αποθεμάτων})$$

### 4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τα καθολικά εννοιολογικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής εφαρμόζονται ευρέως στην υδρολογία από τις αρχές της δεκαετίας του '70, οπότε και πρωτοεμφανίστηκαν. Γνωστά παραδείγματα αυτών των μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα είναι το Μοντέλο Sacramento (Burnash et al., 1973; Burnash, 1995), το Μοντέλο HBV (Bergstroem and Forsman, 1973; Bergstroem, 1995) και το Μοντέλο NAM (Nielsen and Hansen, 1973; HanvØ et al., 1995). Ένα καθολικό εννοιολογικό μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής αποτελείται από ένα πλήθος αλληλένδετων μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν με απλή μορφή τη συμπεριφορά της φάσης του εδάφους στον υδρολογικό κύκλο, με παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές ολόκληρης της λεκάνης. Παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να δοθούν πιθανές τιμές για τις παραμέτρους αυτές, γενικότερα δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν οι παράμετροι από τα φυσιογραφικά, κλιματικά και εδαφικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη λεκάνης. Έτσι, η τελική εκτίμηση των παραμέτρων πρέπει να γίνει με βαθμονόμηση βάσει των παρατηρημένων τιμών [11].

Με τον όρο βαθμονόμηση (calibration) εννοούμε τη μεταβολή εκείνων των παραμέτρων εισόδου, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του μοντέλου, με σκοπό να φτάσουμε στη μέγιστη δυνατή απόδοση και να επιτύχουμε την καλύτερη δυνατή προσαρμογή των υπολογισμένων από το μοντέλο τιμών στις παρατηρημένες τιμές.

Συνήθως, η βαθμονόμηση γίνεται χειροκίνητα από τον χρήστη του μοντέλου με τη διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος (trial-and-error). Η διαδικασία της χειροκίνητης βαθμονόμησης ωστόσο μπορεί να γίνει ιδιαίτερα κουραστική και χρονοβόρα, ανάλογα με το πλήθος των παραμέτρων και το βαθμό αλληλεπίδρασής τους. Επιπλέον, λόγω της υποκειμενικότητας του χρήστη είναι δύσκολο να εκτιμηθεί απόλυτα η εγκυρότητα της προσομοίωσης του μοντέλου. Εξαιτίας αυτού, έχει ξεκινήσει έρευνα για την ανάπτυξη πλέον αποτελεσματικών και επαρκών μεθόδων αυτόματης βαθμονόμησης [11].

Παρόλο που έχει ξεκινήσει μεγάλη έρευνα για την ανάπτυξη επαρκών και αποτελεσματικών καθολικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, δεν έχει γίνει ιδιαίτερη προσπάθεια για την προσαρμογή των αλγορίθμων αυτών σε συγκεκριμένα μοντέλα. Με βάση αυτό, ένα βασικό στοιχείο είναι η κατάλληλη μορφοποίηση της συνάρτησης, που βελτιστοποιείται αριθμητικά. Η εφαρμογή της αυτόματης βαθμονόμησης βασίζεται κυρίως στο απλό κριτήριο της σύγκρισης, όπως για παράδειγμα στο άθροισμα του τετραγώνου του σφάλματος μεταξύ παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής. Αυτό το απλό κριτήριο είναι ωστόσο ανεπαρκές στο να λάβει σωστά υπόψη του την προσομοίωση όλων των σημαντικών χαρακτηριστικών του συστήματος, τα οποία επηρεάζουν τις παρατηρήσεις και τα οποία χρησιμοποιούνται από το

μελετητή, για την εκτίμηση της ποιότητας της προσαρμογής του βαθμονομημένου μοντέλου [11].

Η χειροκίνητη βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου από το χρήστη συνίσταται στην πραγματοποίηση δοκιμών με βάση ένα ιστορικό δείγμα των υδρολογικών μεταβλητών βροχόπτωσης, απορροής και εξατμισοδιαπνοής το οποίο ονομάζεται “δείγμα βαθμονόμησης”. Κατά τις δοκιμές αυτές μεταβάλλονται με συστηματικό τρόπο είτε μία μόνο παράμετρο, είτε μία ομάδα παραμέτρων, με στόχο την όσο το δυνατό καλύτερη προσαρμογή των υπολογισμένων από το μοντέλο παροχών στο δείγμα των παρατηρημένων παροχών. Η ποιότητα της προσαρμογής ή αλλιώς η επίδοση του μοντέλου εκφράζεται ποσοτικά με ένα ή περισσότερα αριθμητικά κριτήρια που μετρούν την “απόσταση” μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων υδρογραφημάτων.

Υπενθυμίζεται ότι μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται επαλήθευσή του (verification), κατά την οποία εκτιμάται η επίδοση του μοντέλου για ένα ιστορικό δείγμα υδρολογικών μεταβλητών (δείγμα επαλήθευσης) διαφορετικό από το δείγμα βαθμονόμησης. Τα αριθμητικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική έκφραση της επίδοσης του μοντέλου είναι τα ίδια με εκείνα της βαθμονόμησης.

Στην περίπτωση που μελετάμε, η εξεταζόμενη περίοδος αφορά σε ημερήσιες χρονοσειρές για τα υδρολογικά έτη 1977-2003. Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται με σκοπό την καλή προσαρμογή των τιμών της παροχής που υπολογίζει το μοντέλο προς τις τιμές της παρατηρημένης παροχής. Σαν κριτήρια καλής προσαρμογής θεωρήσαμε το συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  και το συνολικό όγκο της απορροής ( $m^3/sec$ ).

Στον παρακάτω πίνακα βρίσκονται συγκεντρωμένες οι τελικώς επιλεγμένες τιμές για κάθε παράμετρο, καθώς επίσης και το εύρος των τιμών, που προτείνεται από το εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου για μερικές από τις παραμέτρους.

	Προτεινόμενο Εύρος Τιμών	Επιλεγμένη Τιμή
<b>Κατηγορία 1<sup>η</sup></b>		
<b>PCTIM</b>		0.013
<b>ADIMP</b>		0.010
<b>SARVA</b>	(0.4-1.0)*PCTIM	0.013
<b>Κατηγορία 2<sup>η</sup></b>		
<b>LZSK</b>		0.490
<b>LZPK</b>		0.002
<b>SSOUT</b>		0.070
<b>Κατηγορία 3<sup>η</sup></b>		
<b>UZTW-C</b>	25-175	270
<b>UZTW-I</b>		270
<b>UZFW-C</b>	10-100	100
<b>UZFW-I</b>		40
<b>LZTW-C</b>	75-600	100
<b>LZTW-I</b>		0
<b>LZFP-C</b>		300
<b>LZFP-I</b>		0
<b>LZFS-C</b>		30
<b>LZFS-I</b>		0
<b>REXP</b>	1.0-3.0	1.500
<b>UZK</b>	0.18-1.0	0.005
<b>SIDE</b>	0.0-5.0	0.565
<b>Κατηγορία 4<sup>η</sup></b>		
<b>PFREE</b>	0.0-0.4	0.480
<b>RSERV</b>	0.0-0.4	0.190

Πίνακας 4.1 : Επιλεγμένες Τιμές των Παραμέτρων του Μοντέλου Sacramento

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έδωσε συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 70\%$  και υπολογισμένη απορροή ίση με την παρατηρημένη ( $\sim 400\text{Mm}^3$ ).

Παρόλο που η βαθμονόμηση έγινε για τη χρονική περίοδο 1977-2002, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα του μοντέλου μόνο για την περίοδο 1981-2002, καθώς τα στοιχεία διακύμανσης της στάθμης του υδροφορέα είναι διαθέσιμα μόνο για αυτή την περίοδο.

#### 4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η χρήση ενός μοντέλου προϋποθέτει τον καθορισμό πλήθους παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να εκτιμηθούν σωστά, για να προκύψουν ορθά αποτελέσματα. Ωστόσο, η βαρύτητα και η επιρροή της κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα του μοντέλου δεν είναι η ίδια. Προκειμένου να καθοριστούν εκείνες οι παράμετροι, στις οποίες το μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία, προτείνεται η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας. Με τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η επίδραση της μεταβολής κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα του μοντέλου (ποσοστιαίες μεταβολές) και εντοπίζονται οι πλέον «ευαίσθητες» παράμετροι.

Το μοντέλο Sacramento διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, που πρέπει να εκτιμηθούν για τη συγκεκριμένη λεκάνη μελέτης. Οι παράμετροι του μοντέλου χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο εκτίμησής τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Παράμετροι, που προσδιορίζονται με βάση την τοπογραφία, τη γεωλογία και τις χρήσεις γης της λεκάνης που εξετάζεται.
- Παράμετροι, που προκύπτουν από ανάλυση των παρατηρημένων υδρογραφήματων στην έξοδο της λεκάνης, χωρίς να γίνει χρήση του μοντέλου Sacramento ή κάποιου άλλου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής.
- Παράμετροι, για τις οποίες οποιαδήποτε εκτίμηση είναι αδύνατη ή στην καλύτερη περίπτωση μπορούν να γίνουν μόνο χονδρικές εκτιμήσεις, με βάση τις πηγές πληροφοριών, που αναφέρονται στην παραπάνω κατηγορία. Για τις παραμέτρους αυτές είναι απαραίτητο να γίνει βαθμονόμηση, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή προσαρμογή των τιμών της παροχής που υπολογίζει το μοντέλο προς τις τιμές της παρατηρημένης παροχής.
- Μια τελευταία κατηγορία παραμέτρων είναι εκείνες, οι οποίες δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την επίδοση του μοντέλου ή αλλιώς η παροχή που υπολογίζεται από το μοντέλο δεν είναι ευαίσθητη στις μεταβολές αυτών των παραμέτρων. Υπάρχει βέβαια πάντα η προϋπόθεση, οι μεταβλητές αυτές να μεταβάλλονται σε ορισμένο διάστημα, που επιβάλλει η λογική της λειτουργίας του μοντέλου, αλλά και η μέχρι σήμερα εμπειρία από τη χρήση του.

Οι παράμετροι της πρώτης κατηγορίας, που αποτελούν ουσιαστικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι οι ακόλουθες: PCTIM, ADIMP, SARVA. Ειδικά οι παράμετροι PCTIM και ADIMP, όταν αυτές εκτιμώνται από τα παρατηρημένα υδρογραφήματα, θεωρούνται ότι ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν επίσης οι συντελεστές εκφόρτισης των δεξαμενών Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης LZSK, LZPK που υπολογίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια με βάση τις εξισώσεις (8) και (10) αντίστοιχα. Επίσης στην κατηγορία αυτή υπάγεται και η παράμετρος SSOUT. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι παράμετροι UZTWM, UZFWM, UZK, Z, REXP, LZTWM, LZFSM, LZFPM και SIDE. Τέλος, στην τέταρτη κατηγορία ανήκουν οι παράμετροι PFREE και RSERV [7].

Γενικότερα παρατηρήθηκε ότι οι παράμετροι εκείνες, οι οποίες πιθανότατα επηρεάζουν την ποιότητα της προσαρμογής ή αλλιώς η απόδοση του μοντέλου είναι οι εξής: UZTW, UZFW, LZTW, LZFS, LZFP, LZPK, LZSK, PFREE, RSERV, PCTIM, ADIMP, SARVA, SIDE και SSOUT. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους αυτές.

Οι πίνακες που ακολουθούν κατασκευάστηκαν με σκοπό να εξετάσουμε ποια ή ποιες παράμετροι επηρεάζουν άμεσα και ουσιαστικά την απόδοση του μοντέλου. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ της υπολογισμένης από το μοντέλο και της παρατηρημένης απορροής (πρώτη γραμμή), καθώς επίσης και η μεταβολή της συνολικής απορροής (δεύτερη γραμμή) κατά τη μεταβολή κάθε μιας από τις παραπάνω παραμέτρους. Για την παρούσα ανάλυση ευαισθησίας αυξομειώσαμε την τιμή της κάθε παραμέτρου κατά 20%, 40% και 60% έτσι, ώστε να μπορέσουμε να διακρίνουμε τις μεταβολές του συντελεστή συσχέτισης και της συνολικής απορροής.

<b>Κατηγορία 1<sup>η</sup></b>						
	<b>-60%</b>	<b>-40%</b>	<b>-20%</b>	<b>+20%</b>	<b>+40%</b>	<b>+60%</b>
<b>PCTIM</b>	0,78%	0,30%	0,12%	0,14%	0,29%	0,59%
	-4,64%	-2,48%	-1,32%	-3,67%	-6,14%	-9,86%
<b>ADIMP</b>	-0,02%	-0,02%	-0,02%	0,02%	0,03%	0,05%
	0,61%	0,40%	0,20%	-0,20%	-0,40%	-0,61%
<b>SARVA</b>	0,42%	0,23%	0,12%	0,00	0,00	0,00
	-14,40%	-8,58%	-4,98%	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 4.2 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 1<sup>ης</sup> Κατηγορίας

<b>Κατηγορία 2<sup>η</sup></b>						
	<b>-60%</b>	<b>-40%</b>	<b>-20%</b>	<b>+20%</b>	<b>+40%</b>	<b>+60%</b>
<b>LZSK</b>	9,48%	3,04%	0,60%	0,63%	2,18%	4,49%
	0,64%	0,34%	0,14%	-0,11%	-0,20%	-0,27%
<b>LZPK</b>	17,25%	2,92%	2,92%	3,00%	3,00%	3,00%
	7,01%	12,31%	12,31%	-4,77%	-4,77%	-4,77%
<b>SSOUT</b>	0,35%	0,21%	0,09%	-0,06%	-0,08%	-0,03%
	-26,87%	-17,24%	-8,28%	7,66%	14,61%	20,91%

Πίνακας 4.3 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 2<sup>ης</sup> Κατηγορίας

<b>Κατηγορία 3<sup>η</sup></b>						
	<b>-60%</b>	<b>-40%</b>	<b>-20%</b>	<b>+20%</b>	<b>+40%</b>	<b>+60%</b>
<b>UZTW-C</b>	6,33%	3,31%	0,00	2,5%	8,98%	16,57%
	-65,4%	-31,7%	0,00	60,8%	46,4%	26,4%
<b>UZTW-I</b>	2,06%	1,33%	0,72%	0,77%	2,65%	37,10%
	5,57%	4,15%	2,51%	-2,87%	-5,95%	-11,19%
<b>UZFW-C</b>	28,91%	4,87%	0,00	0,00	0,00	-0,02%
	-6,30%	-1,28%	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>UZFW-I</b>	0,08%	0,02%	-0,02%	0,05%	0,12%	0,23%
	1,27%	0,85%	0,43%	-0,43%	-0,85%	-1,28%
<b>LZTW-C</b>	5,06%	3,41%	1,84%	1,28%	5,2%	7,38%
	-41,05%	-24,29%	-10,71%	8,52%	15,84%	21,53%

<b>LZTW-I</b>	-0,03% 0,06%	-0,02% 0,04%	-0,02% 0,02%	0,24% -1,11%	0,69% -2,23%	1,10% -3,35%
<b>LZFP-C</b>	4,70% -6,05%	1,94% -1,34%	0,59% -0,21%	0,18% -0,03%	0,78% 0,03%	1,72% 0,14%
<b>LZFP-I</b>	4,81% -1,11%	0,41% 3,12%	4,41% -4,35%	5,15% -7,80%	6,09% -9,62%	7,44% -11,51%
<b>LZFS-C</b>	1,75% 2,41%	0,30% 1,52%	0,08% 0,72%	0,11% -0,69%	0,29% -1,33%	0,54% -1,91%
<b>LZFS-I</b>	-0,03% 0,37%	-0,03% 0,30%	-0,03% 0,20%	11,39% -1,87%	33,21% -3,77%	48,21% -5,61%
<b>SIDE</b>	0,63% -39,52%	0,38% -23,91%	0,15% -10,96%	-0,05% 9,36%	-0,02% 17,40%	0,05% 24,38

Πίνακας 4.4 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 3<sup>ης</sup> Κατηγορίας

<b>Κατηγορία 4η</b>						
	<b>-60%</b>	<b>-40%</b>	<b>-20%</b>	<b>+20%</b>	<b>+40%</b>	<b>+60%</b>
<b>PFREE</b>	3,42% 6,65%	2,32% 5,45%	1,31% 3,21%	2,00% -5,19%	6,61% -13,02%	8,74% -24,78%
<b>RSERV</b>	0,18% 1,81%	0,06% 1,09%	0,02% 0,52%	0,08% -0,49%	0,15% -0,89%	0,20% -1,21%

Πίνακας 4.5 : Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων 4<sup>ης</sup> Κατηγορίας

Θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι αρνητική μεταβολή αντιστοιχεί σε αύξηση του συντελεστή συσχέτισης ή της συνολικής απορροής, ενώ θετική μεταβολή αντιστοιχεί σε μείωσή τους. Παρόλα αυτά, στην ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων μας ενδιαφέρει η απόλυτη τιμή της μεταβολής της κάθε παραμέτρου.

Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε, ότι τόσο ο συντελεστής συσχέτισης όσο και η συνολική απορροή επηρεάζονται άμεσα από όλες σχεδόν τις εξεταζόμενες παραμέτρους, σε διαφορετικό κάθε φορά βαθμό.

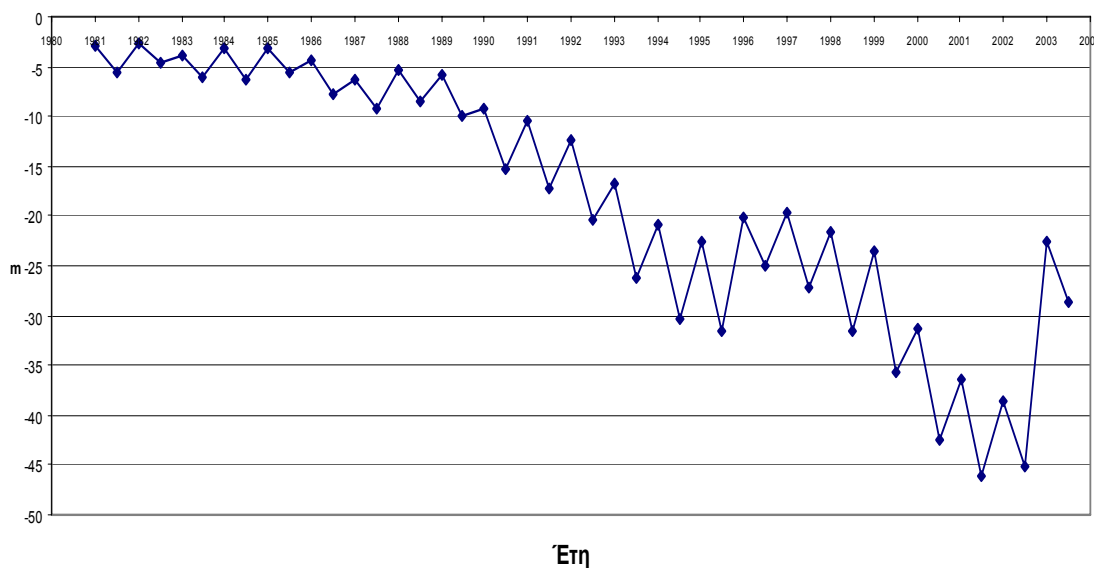
Όσον αφορά στο συντελεστή συσχέτισης, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μεταβολή λαμβάνει χώρα κατά την αύξηση της τιμής της κάθε παραμέτρου. Συγκεκριμένα, εκείνες οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο το συντελεστή συσχέτισης είναι οι **LZSK, LZPK, UZTW-C, UZTW-I, LZFP-I, LZFS-I και PFREE**, ενώ οι παράμετροι που τον επηρεάζουν λιγότερο είναι οι **ADIMP, SSOUT, SARVS, UZFW-I, SIDE και RSERV**.

Αντιστοίχως, οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τη συνολική απορροή είναι οι **SSOUT, UZTW-C, LZTW-C και SIDE**, ενώ οι παράμετροι που την επηρεάζουν λιγότερο είναι οι **ADIMP, LZSK, LZTW-I και RSERV**.

## 5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΌΓΚΟΥ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ

Οι αντλήσεις που λαμβάνουν χώρα στην υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου εκτιμήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου Sacramento, σε συνδυασμό με τα δεδομένα που διαθέτουμε για τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης μας. Τα δεδομένα της στάθμης του υδροφορέα βασίζονται σε μετρήσεις, που ελήφθησαν από συνολικά 6 γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία της λεκάνης. Σε αυτές τις γεωτρήσεις μετράται η στάθμη του υδροφορέα στην αρχή και στο τέλος της περιόδου των βροχοπτώσεων (Οκτώβριος - Απρίλιος). Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίστηκε η μέση διακύμανση του υδροφορέα σε ολόκληρη την υδρογεωλογική λεκάνη, οπότε και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης του υδροφορέα:

Μ.Ο. ΧΑΡ. ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ



Η εκτίμηση των αντλήσεων βασίζεται ουσιαστικά στη σύγκριση των εκκενώσεων του υδροφορέα, που λαμβάνονται από την εφαρμογή του μοντέλου Sacramento και από το παραπάνω διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης. Η εκκένωση που λαμβάνεται από το μοντέλο οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες και θεωρούμε ότι αυτή θα ήταν η φυσική εκκένωση του υδροφορέα, στην περίπτωση που δεν υπήρχαν οι αντλήσεις. Από το διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης λαμβάνουμε την πραγματική εκκένωση, που λαμβάνει χώρα στον υδροφορέα, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας οφείλεται στις αντλήσεις. Από την αφαίρεση των δύο εκκενώσεων (πραγματική



εκκένωση – εκκένωση Sacramento) προκύπτει τελικά ο συνολικός όγκος του ύδατος, που αντλείται από τον υδροφορέα.

### 5.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΌΓΚΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ

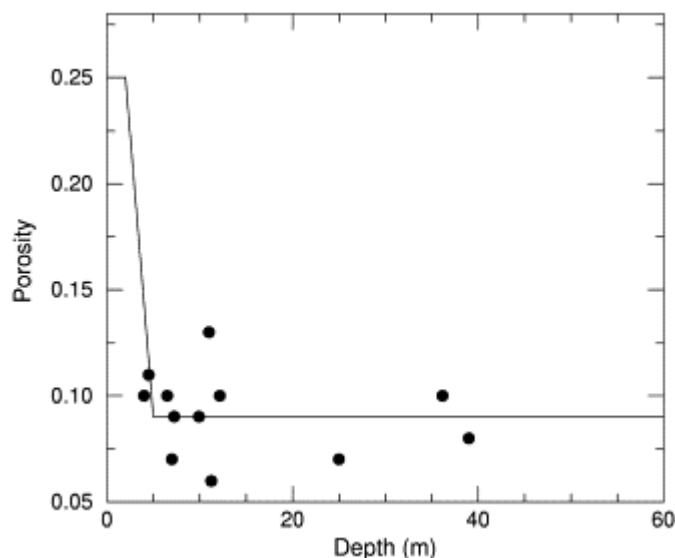
Η εκτίμηση του όγκου των αντλήσεων από την υδρογεωλογική λεκάνη του Γεροποτάμου αποτελεί την πιο αβέβαιη διαδικασία, καθώς υπεισέρχονται δεδομένα μεγάλης αβεβαιότητας (π.χ. πορώδες, υπόγειες διαφυγές). Στην παρούσα ενότητα έγινε προσπάθεια εκτίμησης των αντλήσεων για την περίοδο 1981-2003. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των εκτιμώμενων αντλήσεων είναι:

- Εκκένωση Υδροφορέα Χαρακτηριστικών Γεωτρήσεων : Η εκκένωση του υδροφορέα από τις χαρακτηριστικές γεωτρήσεις αναλύεται στις εξής παραμέτρους:

$$\text{Εκκένωση Υδροφορέα} = \text{Φυσική Εκκένωση (Εξατμισοδιαπνοή + Υπόγειες Διαφυγές Καλοκαιριού)} + \text{Αντλήσεις}$$

Η εκκένωση λόγω εξατμισοδιαπνοής θεωρείται αμελητέα.

- Πορώδες Υδρογεωλογικής Λεκάνης Γεροποτάμου: Η μόνη πηγή πληροφοριών σχετικά με το πορώδες της υδρογεωλογικής λεκάνης του Γεροποτάμου σε συνάρτηση με το βάθος προέρχεται από το παρακάτω προσεγγιστικό διάγραμμα [5]:



- Το σύνολο των γεωτρήσεων που λειτουργούν νόμιμα στην περιοχή της Μεσσαράς το 1981, σύμφωνα με την καταγραφή τους από την Υ.Ε.Β., και στη συνέχεια υπολογισμός των αντλήσεων με βάση την αντλούμενη παροχή και το μέσο χρόνο συνολικής άντλησης.

- Η ετήσια βροχόπτωση, καθώς και η κατανομή των βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Η λειτουργία ολοκληρωμένου αρδευτικού δικτύου μετά το έτος 1985.
- Μείωση των υπόγειων διαφυγών που προκύπτουν το υδρολογικό έτος 1981-82 (περίπου  $14\text{Mm}^3$ ) μέχρι τον τελικό μηδενισμό τους στη δεκαετία του '90. Αυτό βασίζεται στο γεγονός, ότι η απώληση  $A_G$  ποσότητας από τον υδροφορέα θα έχει ως συνέπεια ή και προϋποθέτει:
  - ο είτε τη μείωση της επιφανειακής εκροής
  - ο είτε τη μείωση της υπόγειας εκροής
  - ο είτε τη μείωση της υπόγειας αποθήκευσης υπόγειου νερού
  - ο είτε οποιοδήποτε συνδυασμό των παραπάνω [6]
- Ετήσια απορροή της πηγής Φαιστού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η πηγή μετά τη δεκαετία του '90 δίνει μηδενική παροχή.
- Χρήσεις γης – έκταση αρδευόμενων εκτάσεων : Από τις χρήσεις γης της λεκάνης του Γεροποτάμου, την αρδευόμενη έκταση και τις ανάγκες σε νερό για κάθε είδος καλλιέργειας μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του ύδατος που θα απαιτείτο συνολικά για άρδευση και επομένως τον συνολικό όγκο του ύδατος που θα έπρεπε να αντλείται.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι υπολογισμένες αντλήσεις με βάση τις χρήσεις γης της λεκάνης.

ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ													
	Έκταση (m <sup>2</sup> )				Ανάγκες σε Νερό (m <sup>3</sup> /yr)				Απαιτούμενος Όγκος Αντλήσεων (Mm <sup>3</sup> /yr)				
Έτος	Δημητριακά	Λαχανικά	Ελιές	Αμπέλια	Δημητριακά	Λαχανικά	Ελιές	Αμπέλια	Δημητριακά	Λαχανικά	Ελιές	Αμπέλια	Σύνολο
<b>1984-85</b>	25.000	16.000	38.500	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	9,63	6,5	<b>31,98</b>
<b>1985-86</b>	25.000	16.000	40.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	10	6,5	<b>32,35</b>
<b>1986-87</b>	25.000	16.000	44.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	11	6,5	<b>33,35</b>
<b>1987-88</b>	25.000	16.000	58.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	14,5	6,5	<b>36,85</b>
<b>1988-89</b>	25.000	16.000	65.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	16,25	6,5	<b>38,6</b>
<b>1989-90</b>	25.000	16.000	70.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	17,5	6,5	<b>39,85</b>
<b>1990-91</b>	25.000	16.000	75.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	18,75	6,5	<b>41,1</b>
<b>1991-92</b>	25.000	16.000	80.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	20	6,5	<b>42,35</b>
<b>1992-93</b>	25.000	16.000	85.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	21,25	6,5	<b>43,6</b>
<b>1993-94</b>	25.000	16.000	90.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	22,5	6,5	<b>44,85</b>
<b>1994-95</b>	25.000	16.000	95.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	23,75	6,5	<b>46,1</b>
<b>1995-96</b>	25.000	16.000	100.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	25	6,5	<b>47,35</b>
<b>1996-97</b>	25.000	16.000	110.000	26.000	250	600	250	250	6,25	9,6	27,5	6,5	<b>49,85</b>

Πίνακας 5.1 : Απαιτούμενος Όγκος Αντλήσεων σύμφωνα με τις Χρήσεις Γης της Λεκάνης του Γεροποτάμου

Τα περισσότερα από τα παραπάνω δεδομένα δεν υπεισέρχονται άμεσα στους υπολογισμούς, αλλά λαμβάνονται ως υποκειμενικά κριτήρια. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι ετήσιες αντλήσεις, όπως αυτές υπολογίστηκαν με βάση τα παραπάνω:

Έτος	Βροχόπτωση	Πτώση	Πορώδες	Εκκένωση	Αντλήσεις	Υπ. Διαφυγές
81-82	739,9	1,95	0,150	27,79	<b>6</b>	14,79
82-83	530,9	2,01	0,140	26,73	<b>10</b>	12,93
83-84	731,6	3,14	0,125	37,29	<b>19</b>	13,59
84-85	737,6	2,39	0,130	29,52	<b>11</b>	12,62
85-86	458,7	3,36	0,100	31,92	<b>18</b>	10,62
86-87	613,9	2,98	0,110	31,14	<b>19</b>	9,74
87-88	674,1	3,13	0,095	28,25	<b>18</b>	7,65
88-89	510,0	4,11	0,095	37,09	<b>25</b>	9,09
89-90	354,6	6,21	0,090	53,10	<b>45</b>	7,10
90-91	582,6	6,58	0,090	56,26	<b>47</b>	8,96
91-92	592,1	8,18	0,090	69,94	<b>60</b>	9,87
92-93	422,9	9,63	0,070	64,04	<b>55</b>	9,04
93-94	513,1	9,54	0,080	72,50	<b>63</b>	9,50
94-95	614,5	8,95	0,080	68,02	<b>60</b>	8,02
95-96	797,6	4,86	0,090	41,55	<b>30</b>	11,55
96-97	650,2	7,54	0,080	57,30	<b>48</b>	9,30
97-98	588,1	9,87	0,075	70,32	<b>62</b>	8,32
98-99	497,6	12,17	0,070	80,93	<b>72</b>	8,93
99-00	438,2	11,13	0,080	84,59	<b>75</b>	9,59
00-01	641,5	9,71	0,080	73,80	<b>60</b>	13,80
2001-02	556,5	6,51	0,080	49,48	<b>38</b>	11,48
2002-03	1168,1	6,01	0,075	42,82	<b>30</b>	12,82

## 5.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΑΥΤΙΣΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΣΕΩΝ

Ένα επιπλέον κριτήριο, για τη σωστή προσομοίωση του μοντέλου και την ορθότητα των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε, αποτελεί ο έλεγχος ταύτισης των αναπληρώσεων. Στο παρόν κεφάλαιο συγκρίνεται η ετήσια αναπλήρωση του υδροφορέα, που λαμβάνεται από το μοντέλο με εκείνη που προκύπτει από την εφαρμογή της γενικής εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου ( $P = ET + R + I$ ) για την υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου (400Km<sup>2</sup>).

Δεδομένου, ότι για τον υπολογισμό του όγκου των αντλήσεων χρησιμοποιείται η εκκένωση που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου, ο έλεγχος ταύτισης πραγματοποιήθηκε για τις αναπληρώσεις και όχι για τη συνολική αποθήκευση του έτους. Στην περίπτωση ελέγχου ταύτισης της συνολικής ετήσιας αποθήκευσης δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αναπλήρωσης και εκκένωσης και επομένως υπάρχει το ενδεχόμενο η διαφορά τους να προκύπτει σωστή, αλλά οι επιμέρους τιμές (αναπλήρωσης και εκκένωσης) να είναι λανθασμένες. Θεωρούμε λοιπόν, ότι σωστή αναπλήρωση από το μοντέλο συνεπάγεται και σωστή εκκένωση.

Η γενική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου σε μια υδρολογική λεκάνη είναι η ακόλουθη:

$$P - ET_{act} - R = I$$

... όπου ο όρος I εκφράζει το συνολικό όγκο του ύδατος που κατείσδύει στο υπέδαφος, κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων. Δεδομένου ότι οι βροχοπτώσεις στη λεκάνη του Γεροποτάμου διαρκούν κατά τους μήνες Οκτώβριο – Απρίλιο, η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου για εκείνη την περίοδο θα έχει τη μορφή:

$$Precip_{winter} = I_{winter} + R_{winter} - Act - ET_{winter}$$

Η κατείσδυση  $I_{winter}$  της παραπάνω εξίσωσης αναλύεται στους εξής επιμέρους όρους:

$$I_{winter} = \text{Καθαρή Αναπλήρωση Υδροφορέα} + \text{Υπ. Διαφυγές Καλοκαιριού} \\ + \text{Υπ. Διαφυγές Χειμώνα} + \text{Επ. Διαφυγές Καλοκαιριού} \\ + \text{Υγρασία Εδάφους (Ακόρεστη ζώνη)}$$

Οι επιφανειακές διαφυγές του χειμώνα έχουν μετρηθεί στην απορροή και γι' αυτό δεν υπεισέρχονται στην κατείσδυση. Στη βασική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου υπολογίστηκε η απορροή μόνο του χειμώνα, με σκοπό να συνυπολογιστούν στην κατείσδυση και οι επιφανειακές διαφυγές του καλοκαιριού, δηλαδή η απορροή του Γεροποτάμου (βασική απορροή), που εμφανίζεται για ορισμένο χρονικό διάστημα μετά την παύση των βροχοπτώσεων.

Το υδατικό ισοζύγιο του μοντέλου Sacramento αναλύεται στους εξής όρους:

$$Precipitation = Act - ET + Runoff + BaseFlow + Storage$$

...όπου ο όρος Storage αναφέρεται στον όγκο του ύδατος που είναι αποθηκευμένος στο υπέδαφος (ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη), έχοντας αφαιρεθεί οι επιφανειακές και υπόγειες διαφυγές. Το άθροισμα των παραμέτρων Runoff και Baseflow παρέχουν την συνολική απορροή του υδατορεύματος.

Η αποθήκευση  $Storage_{winter}$  που δίνει το Sacramento από τη διαφορά των μηνών βροχόπτωσης (Οκτώβριος – Απρίλιος) αναλύεται στους παρακάτω όρους:

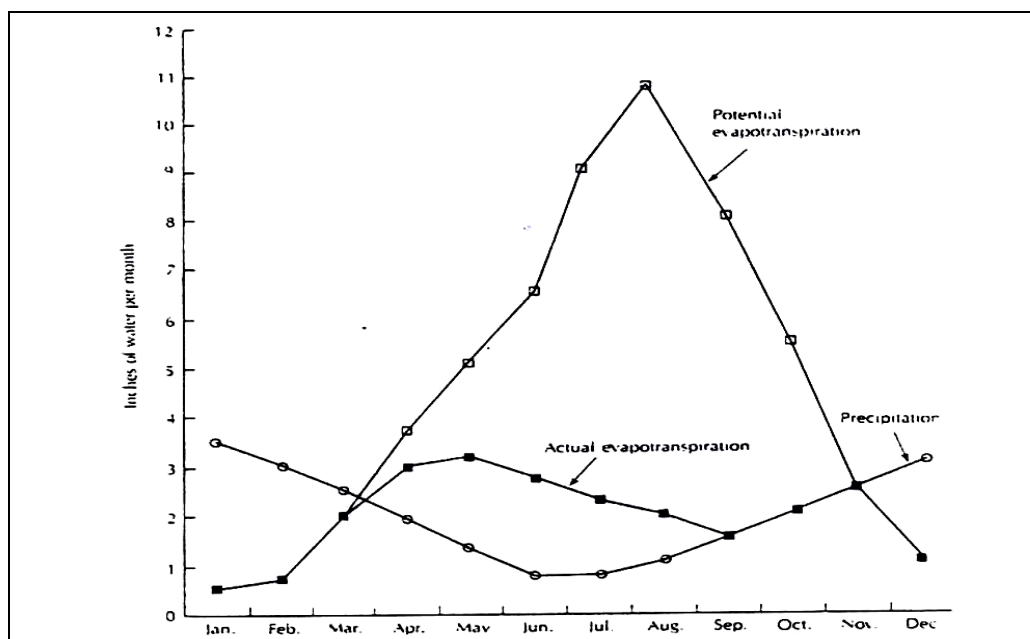
$$Storage_{winter} = \text{Αναπλήρωση Υδροφορέα} + \text{Υπ. Διαφυγές Καλοκαιριού} \\ + \text{Επ. Διαφυγές Καλοκαιριού} + \text{Υγρασία Εδάφους}$$

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την σύγκριση των αναπληρώσεων περιγράφεται παρακάτω:

- Αρχικά υπολογίστηκαν οι υπόγειες διαφυγές του χειμώνα, οι οποίες θεωρήθηκαν ίσες με τις υπόγειες διαφυγές του καλοκαιριού, αυξημένες κατά ένα ποσοστό που οφείλεται στη φόρτιση του υδροφορέα λόγω των βροχοπτώσεων.

- Στη συνέχεια υπολογίστηκε η απορροή του χειμώνα, η οποία ισούται με την συνολική απορροή του έτους αφαιρώντας την απορροή του καλοκαιριού (επιφανειακές διαφυγές καλοκαιριού).
- Από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου υπολογίστηκε η αναπλήρωση για διαφορετικές τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, με εύρος τιμών από 45% έως 75% της συνολικής βροχόπτωσης του έτους. Ενδεικτικά αναφέρουμε, ότι η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή για την υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου κυμαίνεται από 65% έως 75% της ετήσιας βροχόπτωσης. Επιπλέον, υπολογίστηκε η αναπλήρωση με την τιμή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής που προκύπτει από το μοντέλο Sacramento.
- Η αναπλήρωση του μοντέλου Sacramento υπολογίστηκε από το αρχείο εξόδου από την διαφορά του Storage των μηνών Απριλίου – Οκτωβρίου. Στην αναπλήρωση αυτή προστέθηκαν και οι υπόγειες διαφυγές του χειμώνα, καθώς το μοντέλο τις έχει αφαιρέσει από την παράμετρο του Storage.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ταύτιση των αναπληρώσεων προκύπτει για τιμές εξατμισοδιαπνοής μικρότερες του 50% της ετήσιας βροχόπτωσης. Το αποτέλεσμα αυτό εξηγείται με βάση το παρακάτω σχήμα:



Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται γραφικά η πραγματική και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για μια περιοχή με ξηρό, θερμό καλοκαίρι και ψυχρό, υγρό χειμώνα, συνθήκες που αντιπροσωπεύουν την περιοχή μελέτης μας. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πολύ μικρότερη της δυνητικής.

Από το σχήμα αυτό διαπιστώνουμε επίσης, ότι ένα μέρος της συνολικής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εμφανίζεται το καλοκαίρι, με αποτέλεσμα η εξατμισοδιαπνοή του χειμώνα να είναι μικρότερη της συνολικής. Επομένως, η

εξαμυσοδιαπνοή του χειμώνα για τη λεκάνη του Γεροποτάμου θα πρέπει να ληφθεί μικρότερη του 65-70% και γύρω στο 45%-50%. Με βάση το συμπέρασμα αυτό, τα αποτελέσματα του ελέγχου ταύτισης των αναπληρώσεων θεωρούνται ορθά και αποδεκτά.

### 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Ο υπολογισμός των αντλήσεων, που λαμβάνουν χώρα στην υδρολογική λεκάνη του Γεροποτάμου έγινε βάσει κάποιων δεδομένων, ορισμένα εκ των οποίων δεν είναι απόλυτα ακριβή, αλλά εμφανίζουν κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Δεδομένου ότι τα πραγματικά στοιχεία που ισχύουν στο πεδίο δεν είναι γνωστά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αβεβαιότητας, για την εξέταση και τον έλεγχο όλων των πιθανών περιπτώσεων.

Η βροχόπτωση αποτελεί το βασικότερο δεδομένο εισόδου, για την εφαρμογή του μοντέλου Sacramento και την εξαγωγή των ανάλογων αποτελεσμάτων. Αν και στην περιοχή μελέτης το ύψος της βροχόπτωσης μετράται από ειδικά όργανα, υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας, με αποτέλεσμα η χρονοσειρά αυτή να μην αποτελεί στοιχείο ακριβές και αδιαμφισβήτητο. Για το λόγο αυτό, ο παράγοντας της βροχόπτωσης μελετάται χωριστά σε ειδικό υποκεφάλαιο, προκειμένου να δοθεί η απαιτούμενη έμφαση και να ελεγχθεί η πιθανή μεταβολή και επίδραση της βροχόπτωσης στα τελικά αποτελέσματα.

Συνεπώς, η ανάλυση αβεβαιότητας που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος εξετάζονται οι πιθανές τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων (π.χ. έκταση υδρογεωλογικής λεκάνης, πορώδες κ.λ.π.) και στο δεύτερο ελέγχεται το ποσοστό αβεβαιότητας της βροχόπτωσης.

#### 5.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΜΕΓΑΛΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ορισμένα από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντλήσεων δεν είναι απόλυτα ακριβή, αλλά εμφανίζουν κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα εκείνα, που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας και τα οποία εξετάστηκαν εκτενέστερα, είναι τα παρακάτω:

- **Έκταση υδρογεωλογικής λεκάνης Γεροποτάμου :** Η συνολική έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Γεροποτάμου είναι 398Km<sup>2</sup>. Οι μεγάλες υδροφορίες, ωστόσο, βρίσκονται στην κύρια υδρογεωλογική λεκάνη, η έκταση της οποίας δεν είναι καταγεγραμμένη και απόλυτα γνωστή. Βιβλιογραφικές πηγές υποστηρίζουν, ότι η έκταση της υδρογεωλογικής λεκάνης κυμαίνεται μεταξύ 95Km<sup>2</sup> («Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων της Κρήτης», Περιφέρεια Κρήτης, Διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων) και 112Km<sup>2</sup> («Water

resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: Estimation of the annual water budget using a rainfall-runoff model», B. Croke, N. Cleridou, A. Kolovos, I. Vardavas, J. Papamastorakis). Στην παρούσα ανάλυση αβεβαιότητας εξετάζονται αυτές οι δύο περιπτώσεις, έκταση 95Km<sup>2</sup> και 112Km<sup>2</sup>.

➤ **Δυνητική εξατμισοδιαπνοή :** Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή αποτελεί εκείνο τον παράγοντα του υδατικού ισοζυγίου, με το μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας, καθώς δεν αποτελεί ένα μέγεθος άμεσα μετρούμενο. Στην παρούσα ανάλυση αβεβαιότητας η αρχικά υπολογισμένη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, που εισάγεται στο μοντέλο Sacramento, μεταβάλλεται (αυξομείωση κατά 20% και 40%) με σκοπό να εξεταστεί κατά πόσο η μεταβολή της μπορεί να επηρεάσει την εκκένωση του υδροφορέα, που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου.

➤ **Πορώδες :** Για τον καθορισμό της τιμής του πορώδους σε μια περιοχή απατούνται εκτενείς γεωλογικές μετρήσεις και αναλύσεις, οι οποίες όμως δεν έχουν πραγματοποιηθεί στην υδρογεωλογική λεκάνη του Γεροποτάμου και επομένως δεν διαθέτουμε σαφή δεδομένα. Βάσει βιβλιογραφικών πηγών («Water resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: Estimation of the annual water budget using a rainfall-runoff model», B. Croke, N. Cleridou, A. Kolovos, I. Vardavas, J. Papamastorakis), για βάθος 0-40 μέτρα το πορώδες λαμβάνει αντίστοιχες τιμές 0,25-0,07. Δεδομένου λοιπόν, ότι η τιμή του πορώδους στην περιοχή μελέτης μας δε διατηρείται σταθερή αλλά μεταβάλλεται με το βάθος, εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις πιθανών τιμών πορώδους (αυξομείωση του αρχικού πορώδους κατά 10%, 20% και 50%) και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες εκκενώσεις πεδίου.

➤ **Χρονική διάρκεια εκκένωσης του υδροφορέα :** Το διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης του υδροφορέα, από το οποίο ελήφθησαν οι πραγματικές εκκενώσεις, κατασκευάστηκε βάσει μετρήσεων, που πραγματοποιούνται στην αρχή και στο τέλος της χειμερινής περιόδου. Καθώς, όμως, δεν είναι σταθερή η ημερομηνία μέτρησης για όλα τα υδρολογικά έτη, η εκκένωση του υδροφορέα που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου Sacramento υπολογίστηκε για διάφορες χρονικές περιόδους και συγκεκριμένα για την περίοδο Απριλίου – Σεπτεμβρίου, για την περίοδο Απριλίου – Οκτωβρίου και για τα μέσα των χειμερινών μηνών (15 Απριλίου – 15 Οκτωβρίου). Επιπλέον, δεδομένου ότι η χειμερινή περίοδος κάθε υδρολογικού έτους εξαρτάται από τη διάρκεια των βροχοπτώσεων, εξετάστηκε η εκκένωση του υδροφορέα, που προκύπτει το μοντέλο Sacramento για διαφορετική χρονική περίοδο για κάθε υδρολογικό έτος, ανάλογα με τη διάρκεια της εκάστοτε βροχόπτωσης. Για την εκτίμηση της περιόδου άντλησης χρησιμοποιήθηκε η βροχόπτωση του σταθμού της Πόμπιας και όχι η επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης, στην οποία υπεισέρχονται και οι βόρειοι σταθμοί, οι οποίοι δίνουν μεγαλύτερες βροχοπτώσεις σε ένταση και διάρκεια απ' ό,τι οι νότιοι σταθμοί. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η περίοδος βροχόπτωσης για κάθε υδρολογικό έτος:



Υδρολογικό Έτος	Ετήσια Βροχόπτωση (mm)	Περίοδος Άντλησης	Εκκένωση
1981-82	699	Ιούνιος – Οκτώβριος	192,84
1982-83	281	Μάρτιος – Οκτώβριος	286,14
1983-84	595	Ιούνιος – Οκτώβριος	118,97
1984-85	641	Ιούνιος – 15 Οκτωβρίου	163,97
1985-86	356	Απρίλιος – Σεπτέμβριος	215,54
1986-87	466	Ιούνιος-15 Οκτωβρίου	139,84
1987-88	553	Μάιος –Σεπτέμβριος	235,47
1988-89	422	Απρίλιος-15 Οκτωβρίου	261,13
1989-90	250	15 Μαρτίου-Οκτώβριος	203,68
1990-91	445	Μάιος-Σεπτέμβριος	197,47
1991-92	322	Μάιος-Οκτώβριος	229,1
1992-93	340	Ιούνιος-Οκτώβριος	86,68
1993-94	430	Απρίλιος-Οκτώβριος	238,39
1994-95	490	Μάιος-15 Σεπτεμβρίου	204,43
1995-96	653	Μάιος-Αύγουστος	212,8
1996-97	461	Μάιος- Σεπτέμβριος	249,55
1997-98	454	Μάιος- Σεπτέμβριος	224,02
1998-99	512	Μάιος-15 Οκτωβρίου	153,89
1999-00	313	Απρίλιος-Οκτώβριος	148,75
2000-01	496	Ιούνιος -Οκτώβριος	117,17
2001-02	380	Απρίλιος-Αύγουστος	218,5

### 5.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση αβεβαιότητας παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στους ακόλουθους πίνακες. Στους πίνακες αυτούς φαίνεται η βροχόπτωση κάθε υδρολογικού έτους, η αντίστοιχη απορροή, ο όγκος των αντλήσεων που προέκυψε από κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, καθώς επίσης και οι εκτιμήσεις του όγκου των αντλήσεων, οι οποίες είχαν γίνει αρχικά.

Κάθε πίνακας συνοδεύεται από τον πίνακα των αποκλίσεων, τον πίνακα δηλαδή όπου φαίνεται η απόκλιση του υπολογισμένου κάθε φορά όγκου αντλήσεων σε σχέση με τις αρχικές εκτιμήσεις που είχαν γίνει. Οι αποκλίσεις υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Απόκλιση} = \frac{\text{Εκτιμώμενη Άντληση} - \text{Υπολογισμένη Άντληση}}{\text{Εκτιμώμενη Άντληση}}$$

Έκταση υδρογεωλογικής λεκάνης Γεροποτάμου ίση με 95Km<sup>2</sup> και 112 Km<sup>2</sup>

Έτος	PRECIP	Απορροή (Mm3)	Αντλήσεις για Έκταση 112 Km <sup>2</sup>	Αντλήσεις για Έκταση 95 Km <sup>2</sup>	Εκτιμώμενες Αντλήσεις
81-82	739,9	46,5	1,5	1,3	6
82-83	530,9	19,2	8,8	7,5	10
83-84	731,6	29,9	17,5	14,8	19
84-85	737,6	48,7	4,6	3,9	11
85-86	458,7	13,9	24,3	20,6	18
86-87	613,9	11	9,5	8,1	19
87-88	674,1	20,4	13,3	11,3	18
88-89	510,0	11,7	27,1	23,0	25
89-90	354,6	4,5	49,2	41,7	45
90-91	582,62	5,2	50,6	43,0	47
91-92	592,1	2,6	56,5	48,0	60
92-93	422,9	0	70,0	59,4	55
93-94	513,05	7,067	67,3	57,1	63
94-95	614,46	4,926	59,1	50,1	60
95-96	797,6	11,995	24,8	21,0	25
96-97	650,22	2,387	45,9	39,0	44
97-98	588,05	0,88	59,6	50,5	62
98-99	497,59	1,332	78,8	66,8	72
99-00	438,16	0	81,6	70,5	75
00-01	641,45	0,7	57,6	48,8	46,1
01-02	556,51	2,3	47,4	39,7	30,9

Πίνακας 5.2 : Μεταβολή της Έκτασης της Υδρογεωλογικής Λεκάνης

Έτος	Αποκλίσεις για Έκταση 112 Km <sup>2</sup>	Αποκλίσεις για Έκταση 95 Km <sup>2</sup>
81-82	75	79
82-83	12	25
83-84	8	22
84-85	58	64
85-86	35	15
86-87	50	57
87-88	26	37
88-89	9	8
89-90	9	7
90-91	8	9
91-92	6	20
92-93	27	8
93-94	7	9
94-95	2	17
95-96	17	30
96-97	4	19
97-98	4	19
98-99	9	7
99-00	9	6
00-01	4	19
01-02	25	5

Πίνακας 5.3 : Αποκλίσεις 1<sup>ης</sup> Περίπτωσης

## Μεταβολή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Έτος	PRECIP	Απορροή (Mm3)	Αντλήσεις 0,6ET (Mm3)	Αντλήσεις 0,8ET (Mm3)	Αντλήσεις ET (Mm3)	Αντλήσεις 1,2ET (Mm3)	Αντλήσεις 1,4ET (Mm3)	Εκτιμήσεις (Mm3)
81-82	739,9	46,5	0,7	0,3	1,3	3,0	5,0	6
82-83	530,9	19,2	4,2	4,8	7,5	10,3	13,1	10
83-84	731,6	29,9	13,0	13,4	14,8	16,9	19,2	19
84-85	737,6	48,7	2,6	2,7	3,9	5,8	8,3	11
85-86	458,7	13,9	15,1	17,6	20,6	23,5	26,0	18
86-87	613,9	11	4,1	5,0	8,1	11,2	14,0	19
87-88	674,1	20,4	8,9	9,7	11,3	13,3	15,9	18
88-89	510,0	11,7	17,3	19,5	23,0	26,3	29,0	25
89-90	354,6	4,5	35,3	38,8	41,7	44,0	45,7	45
90-91	582,62	5,2	39,8	40,7	43,0	45,4	47,7	47
91-92	592,1	2,6	44,2	45,0	48,0	51,0	53,7	60
92-93	422,9	0	53,3	56,4	59,4	62,0	63,9	55
93-94	513,05	7,1	51,9	54,0	57,1	59,7	62,0	63
94-95	614,46	4,9	47,3	48,4	50,1	52,1	54,6	60
95-96	797,6	12,0	19,8	19,9	21,0	22,5	24,2	25
96-97	650,22	2,4	36,7	37,2	39,0	42,2	45,4	44
97-98	588,05	0,9	47,1	47,6	50,5	53,8	56,8	62
98-99	497,59	1,3	60,4	63,1	66,8	69,9	72,4	72
99-00	438,16	0,0	64,8	67,7	70,5	72,9	75,0	75
00-01	641,45	0,7	50,3	49,0	48,8	49,4	50,5	46,1
01-02	556,51	2,3	41,5	40,1	39,7	40,0	41,4	30,9

Πίνακας 5.4 : Μεταβολή της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής

Έτος	Αποκλίσεις για 0,6ΕΤ (%)	Αποκλίσεις για 0,8ΕΤ (%)	Αποκλίσεις για ΕΤ (%)	Αποκλίσεις για 1,2ΕΤ (%)	Αποκλίσεις για 1,4ΕΤ (%)
81-82	88,1	95,5	78,9	50,5	16,6
82-83	57,5	51,8	25,5	3,0	30,8
83-84	31,3	29,6	21,9	11,0	1,0
84-85	76,5	75,7	64,3	47,6	24,6
85-86	16,1	2,3	14,6	30,5	44,2
86-87	78,6	73,5	57,4	40,9	26,3
87-88	50,3	45,9	37,1	26,1	11,7
88-89	30,7	22,1	7,9	5,3	16,1
89-90	21,6	13,7	7,3	2,3	1,6
90-91	15,3	13,3	8,6	3,4	1,6
91-92	26,3	25,0	20,1	15,0	10,5
92-93	3,0	2,5	8,0	12,6	16,2
93-94	17,6	14,4	9,4	5,2	1,7
94-95	21,2	19,4	16,5	13,1	9,1
95-96	33,9	33,6	29,9	24,8	19,2
96-97	23,6	22,6	18,8	12,0	5,3
97-98	24,0	23,2	18,5	13,3	8,4
98-99	16,2	12,3	7,2	2,9	0,5
99-00	13,7	9,8	6,1	2,8	0,0
00-01	16,2	18,3	18,7	17,6	15,8
01-02	9,1	5,4	4,5	5,2	8,9

Πίνακας 5.5 : Αποκλίσεις 2<sup>ης</sup> Περίπτωσης

## Μεταβολή του πορώδους συναρτήσει του βάθους

Έτος	PRECIP	Απορροή (Mm3)	Πορώδες -10% (Mm3)	Πορώδες -20% (Mm3)	Πορώδες +10% (Mm3)	Πορώδες +20% (Mm3)	Πορώδες +50% (Mm3)	Εκτιμήσεις (Mm3)
81-82	739,9	46,5	-1,5	-9,0	4,0	6,8	15,2	6
82-83	530,9	19,2	4,8	-1,3	10,1	12,8	20,8	10
83-84	731,6	29,9	11,1	3,4	18,6	22,3	33,5	19
84-85	737,6	48,7	1,0	-6,6	6,9	9,8	18,7	11
85-86	458,7	13,9	17,4	12,2	23,8	27,0	36,6	18
86-87	613,9	11	5,0	-2,3	11,2	14,3	23,7	19
87-88	674,1	20,4	8,5	2,6	14,1	17,0	25,4	18
88-89	510,0	11,7	19,3	13,1	26,7	30,4	41,6	25
89-90	354,6	4,5	36,4	29,1	47,0	52,3	68,3	45
90-91	582,62	5,2	37,3	29,3	48,6	54,2	71,1	47
91-92	592,1	2,6	41,0	30,0	54,9	61,9	82,9	60
92-93	422,9	0	53,0	45,8	65,8	72,2	91,4	55
93-94	513,05	7,067	49,8	39,8	64,3	71,6	93,3	63
94-95	614,46	4,926	43,3	33,3	56,9	63,7	84,1	60
95-96	797,6	11,995	16,9	9,0	25,2	29,3	41,8	25
96-97	650,22	2,387	33,2	24,2	44,7	50,4	67,6	44
97-98	588,05	0,88	43,5	32,9	57,6	64,6	85,7	62
98-99	497,59	1,332	58,7	48,1	74,9	83,0	107,3	72
99-00	438,16	0	62,0	49,5	78,9	87,4	112,8	75
00-01	641,45	0,7	41,4	29,7	56,2	63,5	85,7	46,1
01-02	556,51	2,3	34,8	28,7	44,7	49,6	64,4	30,9

Πίνακας 5.6 : Μεταβολή του Πορώδους

Έτος	Αποκλίσεις για πορώδες -10% (%)	Αποκλίσεις για πορώδες -20% (%)	Αποκλίσεις για πορώδες +10% (%)	Αποκλίσεις για πορώδες +20% (%)	Αποκλίσεις για πορώδες +50% (%)
81-82	125,2	250,6	32,6	13,7	152,7
82-83	52,2	113,4	1,3	28,0	108,2
83-84	41,5	82,3	2,3	17,4	76,2
84-85	91,1	159,6	37,5	10,6	69,9
85-86	3,2	32,1	32,3	50,0	103,2
86-87	73,8	111,9	41,0	24,6	24,5
87-88	52,8	85,3	21,4	5,7	41,3
88-89	22,8	47,7	6,9	21,7	66,2
89-90	19,1	35,4	4,5	16,3	51,7
90-91	20,6	37,6	3,4	15,3	51,2
91-92	31,7	49,9	8,4	3,2	38,2
92-93	3,6	16,8	19,7	31,3	66,2
93-94	21,0	36,8	2,1	13,6	48,1
94-95	27,9	44,5	5,2	6,2	40,2
95-96	43,8	69,9	16,1	2,2	39,3
96-97	30,8	49,6	6,9	5,0	40,8
97-98	29,8	46,9	7,2	4,2	38,2
98-99	18,5	33,2	4,0	15,3	49,0
99-00	17,3	34,0	5,2	16,5	50,3
00-01	31,0	50,5	6,4	5,9	42,8
01-02	8,5	24,6	17,5	30,5	69,6

Πίνακας 5.7 : Αποκλίσεις 3<sup>ης</sup> Περίπτωσης

## Υπολογισμός της εκκένωσης του μοντέλου σε διαφορετικές χρονικές περιόδους

Έτος	PRECIP	Απορροή (Mm3)	Αντλήσεις Περιόδου Απριλίου-Σεπτεμβρίου (Mm3)	Αντλήσεις Περιόδου Απριλίου-Οκτωβρίου (Mm3)	Αντλήσεις Περιόδου 15 Απριλίου-15 Οκτωβρίου (Mm3)	Εκτιμώμενες Αντλήσεις
81-82	739,9	46,5	0,9	1,3	-2,5	6
82-83	530,9	19,2	7,2	7,5	3,4	10
83-84	731,6	29,9	9,9	14,8	10,5	19
84-85	737,6	48,7	1,6	3,9	0,0	11
85-86	458,7	13,9	17,2	20,6	16,0	18
86-87	613,9	11	6,1	8,1	5,9	19
87-88	674,1	20,4	4,5	11,3	3,9	18
88-89	510,0	11,7	19,3	23,0	16,7	25
89-90	354,6	4,5	41,6	41,7	39,2	45
90-91	582,62	5,2	36,7	43,0	36,5	47
91-92	592,1	2,6	48,2	48,0	46,0	60
92-93	422,9	0	49,6	59,4	51,1	55
93-94	513,05	7,067	57,4	57,1	53,5	63
94-95	614,46	4,926	48,8	50,1	45,6	60
95-96	797,6	11,995	20,7	21,0	16,1	25
96-97	650,22	2,387	32,8	39,0	31,4	44
97-98	588,05	0,88	48,2	50,5	45,2	62
98-99	497,59	1,332	65,8	66,8	62,4	72
99-00	438,16	0	69,4	70,5	66,7	75
00-01	641,45	0,7	49,9	48,8	48,7	46,1
01-02	556,51	2,3	35,2	39,7	34,8	30,9

Πίνακας 5.8 : Υπολογισμός της Εκκένωσης του Μοντέλου σε Διαφορετικές Χρονικές Περιόδους



Έτος	Αποκλίσεις Περιόδου Απριλίου-Σεπτεμβρίου	Αποκλίσεις Περιόδου Απριλίου-Οκτωβρίου	Αποκλίσεις Περιόδου 15 Απριλίου-15 Οκτωβρίου
81-82	85	79	142
82-83	28	25	66
83-84	48	22	45
84-85	85	64	100
85-86	4	15	11
86-87	68	57	69
87-88	75	37	78
88-89	23	8	33
89-90	8	7	13
90-91	22	9	22
91-92	20	20	23
92-93	10	8	7
93-94	9	9	15
94-95	19	17	24
95-96	31	30	46
96-97	32	19	35
97-98	22	19	27
98-99	9	7	13
99-00	5	6	11
00-01	17	19	19
01-02	7	5	8

Πίνακας 5.9 : Αποκλίσεις 4<sup>ης</sup> Περίπτωσης

## Υπολογισμός της εκκένωσης του μοντέλου βάσει των μηνών βροχόπτωσης

Έτος	PRECIP	Απορροή (Mm3)	Αντλήσεις για την εκάστοτε περίοδο βροχόπτωσης	Εκτιμώμενες Αντλήσεις	Αποκλίσεις
81-82	739,9	46,5	9,5	6	58
82-83	530,9	19,2	-0,5	10	105
83-84	731,6	29,9	26,0	19	37
84-85	737,6	48,7	13,9	11	27
85-86	458,7	13,9	11,4	18	36
86-87	613,9	11	17,9	19	6
87-88	674,1	20,4	5,9	18	67
88-89	510,0	11,7	12,3	25	51
89-90	354,6	4,5	33,7	45	25
90-91	582,62	5,2	37,5	47	20
91-92	592,1	2,6	48,2	60	20
92-93	422,9	0	55,8	55	1
93-94	513,05	7,067	49,9	63	21
94-95	614,46	4,926	48,6	60	19
95-96	797,6	11,995	21,3	25	29
96-97	650,22	2,387	33,6	44	30
97-98	588,05	0,88	49,0	62	21
98-99	497,59	1,332	66,3	72	8
99-00	438,16	0	70,5	75	6
00-01	641,45	0,7	62,7	46,1	4
01-02	556,51	2,3	28,7	30,9	24

Πίνακας 5.10 : Υπολογισμός της Εκκένωσης του Μοντέλου βάσει των Μηνών Βροχόπτωσης και Αποκλίσεις

Τα γενικότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα, που προκύπτουν από τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν αναφέρονται συγκεντρωτικά παρακάτω:

- Στην πρώτη περίπτωση, όπου εξετάστηκαν οι δύο πιθανές εκτάσεις της υδρογεωλογικής λεκάνης ( $112\text{Km}^2$  και  $95\text{Km}^2$ ) παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση των υπολογισμένων από το Sacramento αντλήσεων με τις αρχικά εκτιμώμενες αντλήσεις. Και στις δύο περιπτώσεις εντοπίζονται μεγάλες αποκλίσεις στα πρώτα χρόνια, ενώ οι μέσες αποκλίσεις (σε απόλυτη τιμή) είναι 19% και 23% για έκταση  $112\text{Km}^2$  και  $95\text{Km}^2$ , αντίστοιχα. Παρόλο που η βέλτιστη επιλογή σχετικά με την έκταση της υδρολογικής λεκάνης φαίνεται να είναι εκείνη των  $112\text{Km}^2$ , σύμφωνα με τις αποκλίσεις, οι υπόγειες διαφυγές στην περίπτωση αυτή δεν ακολουθούν την αναμενόμενη πορεία. Συγκεκριμένα, οι υπόγειες διαφυγές με το πέρασμα των χρόνων θα πρέπει να μειώνονται, ακολουθώντας την πτωτική τάση του υδροφόρου ορίζοντα, δεδομένου ότι αυτός λειτουργεί σαν υπερχειλιστής. Στην περίπτωση όμως των  $112\text{Km}^2$  οι υπόγειες διαφυγές συνεχώς αυξάνονται, με αποτέλεσμα να απορρίπτεται αυτή η εναλλακτική τιμή της έκτασης.
- Στη δεύτερη περίπτωση εξετάστηκαν διάφορες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται στην περίπτωση, κατά την οποία αυξάνουμε την εξατμισοδιαπνοή κατά 40%, οπότε η μέση απόλυτη απόκλιση των υπολογισμένων αντλήσεων από τις αρχικά εκτιμώμενες αντλήσεις είναι μόλις 13%.
- Στην τρίτη περίπτωση μελετήθηκε η μεταβολή του πορώδους συναρτήσει του βάθους. Στην περίπτωση μείωσης του πορώδους κατά 20% παρατηρήθηκαν αρνητικές τιμές των υπόγειων διαφυγών για τη δεκαετία του '90. Κατά συνέπεια, απορρίφθηκε η περίπτωση αυτή και δεν εξετάστηκε καθόλου η περίπτωση μείωσης του πορώδους κατά 50%. Ως βέλτιστη επιλογή κρίνεται η περίπτωση αύξησης του αρχικού πορώδους κατά 10%, οπότε και παρατηρείται η μικρότερη μέση απόκλιση των υπολογισμένων αντλήσεων από τις αρχικά εκτιμώμενες.
- Στην τέταρτη περίπτωση μελετήθηκαν διαφορετικές περίοδοι άντλησης. Τα βέλτιστα αποτελέσματα προέκυψαν από την περίπτωση περιόδου άντλησης Απριλίου – Οκτωβρίου, γεγονός το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις πληροφορίες μας από τις αρμόδιες υπηρεσίες.
- Στην πέμπτη περίπτωση εξετάστηκε κάθε υδρολογικό έτος χωριστά, ως προς την περίοδο βροχοπτώσεων και επομένως την περίοδο άντλησης. Στην περίπτωση αυτή παρέχονται αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς η μέση απόλυτη απόκλιση των υπολογισμένων αντλήσεων σε σχέση με τις αρχικά εκτιμώμενες είναι 29%.

### 5.3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

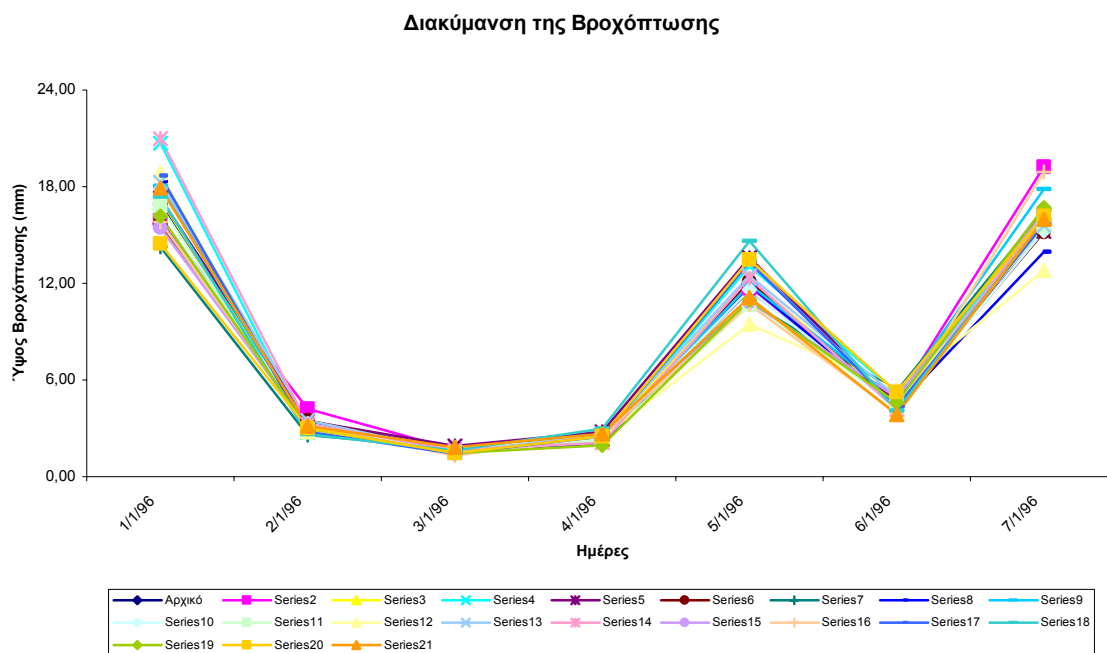
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η βροχόπτωση αποτελεί το βασικότερο στοιχείο εισόδου του μοντέλου Sacramento και επηρεάζει άμεσα τα τελικά αποτελέσματα. Στη μέτρηση της βροχόπτωσης όμως υπεισέρχεται ένα σφάλμα, το οποίο πρέπει να ελεγχθεί, για να εξετάσουμε πώς αυτό επιδρά στα αποτελέσματα.

Για την ανάλυση αβεβαιότητας της βροχόπτωσης δεν χρησιμοποιήθηκε ολόκληρη η χρονοσειρά της περιόδου μελέτης 1981-2002. Από την περίοδο αυτή επιλέχθηκαν τρία έτη, τα οποία θεωρούνται αντιπροσωπευτικά όλων των πιθανών καταστάσεων από την άποψη της βροχόπτωσης (υγρό, ξηρό και κανονικό έτος). Τα έτη αυτά είναι:

- Υγρό Έτος → 1995-1996
- Ξηρό Έτος → 1992-1993
- Κανονικό Έτος → 1987-1988

Για την ανάλυση αβεβαιότητας της βροχόπτωσης δημιουργήσαμε 20 νέες χρονοσειρές, με τη μέθοδο Random Number Generation, με απόκλιση 10%. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η βροχόπτωση ακολουθεί κανονική κατανομή. Θεωρώντας σαν μέση τιμή τη μετρημένη τιμή της βροχόπτωσης, οι 20 νέες χρονοσειρές προέκυψαν με τυχαία μεταβολή και με απόκλιση από τη μέση τιμή  $\pm 10\%$ .

Για να ελέγξουμε τη διακύμανση της βροχόπτωσης, μετά την εφαρμογή της μεθόδου Random Number Generation, πήραμε ένα δείγμα τιμών διάρκειας 7 ημερών (1-7 Ιανουαρίου 1996), όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

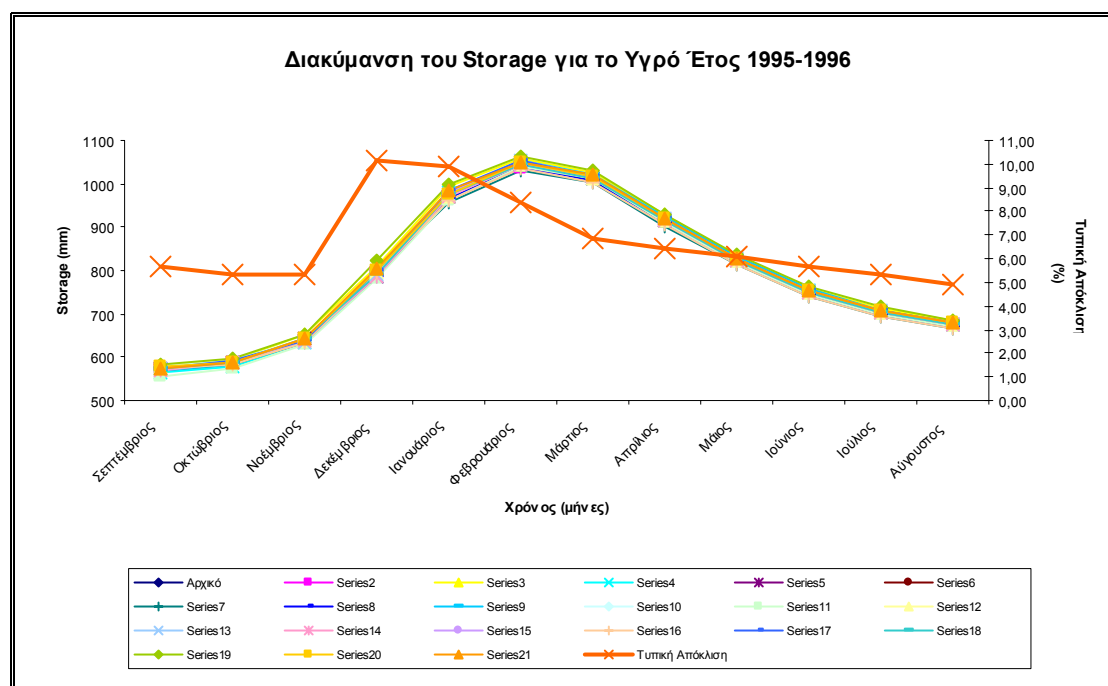


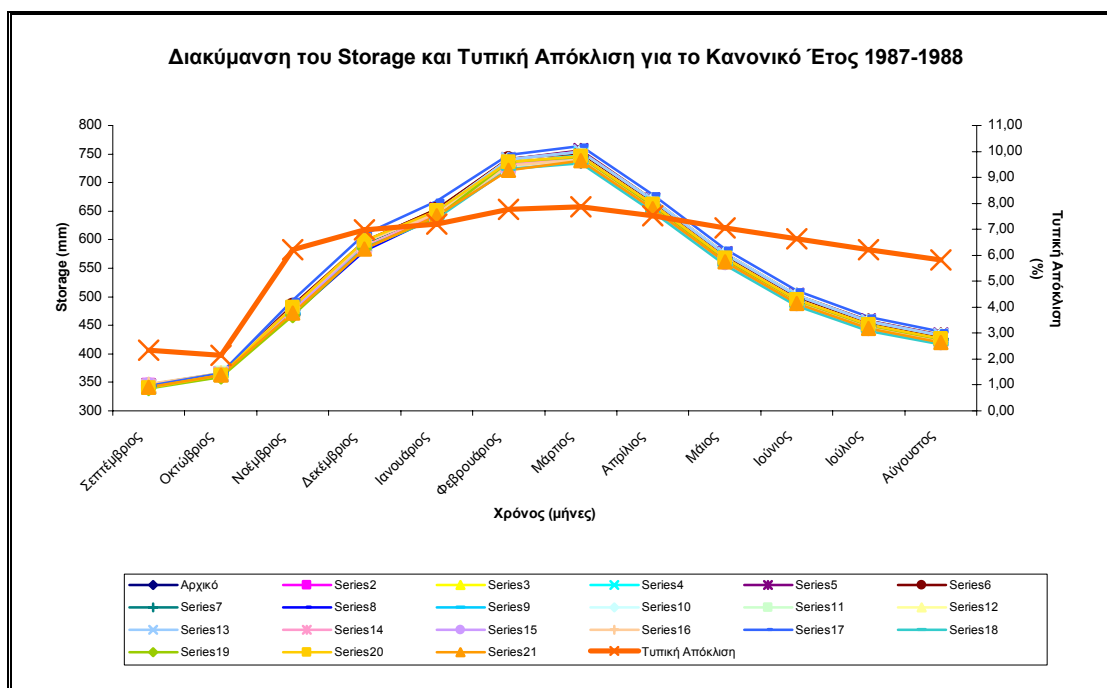
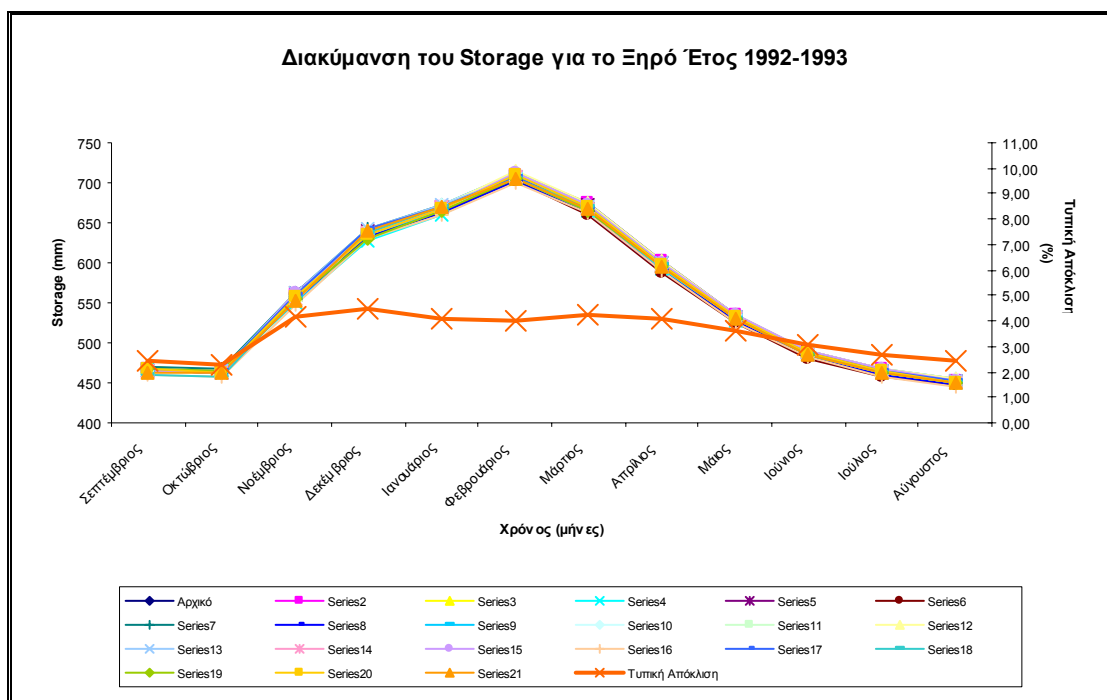
Για κάθε μια χρονοσειρά ημερήσιας βροχόπτωσης λαμβάνουμε σαν δεδομένα εξόδου από το μοντέλο Sacramento μια αντίστοιχη χρονοσειρά μηνιαίου Storage. Για κάθε έτος που μελετάται υπολογίστηκε η μηνιαία τυπική απόκλιση του Storage για τις 20 νέες χρονοσειρές, που προέκυψαν. Οι τιμές της τυπικής απόκλισης φαίνονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:

	Υγρό Έτος 1995-1996		Ξηρό Έτος 1992-1993		Κανονικό Έτος 1987-1988	
	Storage	Τυπ.Αποκλ.	Storage	Τυπ.Αποκλ.	Storage	Τυπ.Αποκλ.
<b>Σεπτέμβρης</b>	572,86	5,66	465,87	2,43	342,49	2,34
<b>Οκτώβρης</b>	586,7	5,36	463,55	2,27	363,49	2,15
<b>Νοέμβρης</b>	639,57	5,36	557,52	4,19	476,3	6,21
<b>Δεκέμβρης</b>	796,62	10,11	636,89	4,45	592,28	6,97
<b>Ιανουάριος</b>	976,98	9,91	668,59	4,07	647,18	7,20
<b>Φεβρουάριος</b>	1049,2	8,38	707,73	4,01	733,92	7,76
<b>Μάρτιος</b>	1018,21	6,84	668,88	4,26	747,13	7,86
<b>Απρίλιος</b>	918,56	6,46	596,6	4,08	662,21	7,52
<b>Μάιος</b>	826,48	6,11	531,21	3,61	568,44	7,07
<b>Ιούνιος</b>	753,38	5,69	486,86	3,06	495,97	6,63
<b>Ιούλιος</b>	705,76	5,32	463,49	2,68	451,44	6,21
<b>Αύγουστος</b>	677,77	4,91	450,73	2,44	426,74	5,83

Πίνακας 5.11 : Τυπική Απόκλιση του Storage για τα Τρία Αντιπροσωπευτικά Έτη

Για την καλύτερη κατανόηση της μηνιαίας τυπικής απόκλισης του Storage κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα, όπου φαίνονται οι 20 χρονοσειρές του Storage και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση συναρτήσει του χρόνου, για κάθε ένα από τα αντιπροσωπευτικά έτη που μελετάμε:





Από την παραπάνω ανάλυση αβεβαιότητας της βροχόπτωσης προκύπτει, ότι για σφάλμα στις μετρήσεις της βροχόπτωσης 10% αντιστοιχεί σε σφάλμα των αποτελεσμάτων του Storage της τάξεων του 2,5%-10%. Συγκεκριμένα, για το υγρό έτος 1995-1996 το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ του 5%-10%, για το ξηρό

έτος 1992-1993 το σφάλμα είναι της τάξης του 2,5%-4,5%, ενώ για το κανονικό έτος 1987-1988 το σφάλμα βρίσκεται μεταξύ του 2%-8%.

Για το υγρό έτος 1995-1996 οι μέγιστες τιμές της τυπικής απόκλισης παρατηρούνται κατά τους μήνες Νοέμβριο-Μάρτιο. Στο ξηρό έτος 1992-1993 η τυπική απόκλιση είναι σχεδόν σταθερή (περίπου 3,5%) και γίνεται μέγιστη κατά τους μήνες Νοέμβριο-Μάρτιο. Τέλος, για το κανονικό έτος 1987-1988 η τυπική απόκλιση αυξάνεται αισθητά τους μήνες Νοέμβριο μέχρι Μάρτιο, οπότε και αρχίζει και πάλι να μειώνεται.

Φυσικά, τα δύο μεγέθη δεν είναι απόλυτα συγκρίσιμα, καθώς οι τιμές της βροχόπτωσης έχουν ημερήσιο βήμα, σε αντίθεση με τις τιμές του Storage, που έχουν μηνιαίο βήμα. Έτσι, ήταν αναμενόμενο το σφάλμα στις ημερήσιες μετρήσεις της βροχόπτωσης να αποδώσει σφάλμα μικρότερο στις μηνιαίες τιμές του Storage. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι η βροχόπτωση όντως επηρεάζει τα αποτελέσματά μας.

---

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑ

---

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αυξημένη ζήτηση σε νερό έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Στις μεσογειακές χώρες, ιδιαίτερα, όπου το κλίμα τους χαρακτηρίζεται από χαμηλά ύψη βροχόπτωσης, η ανάπτυξη των καλλιεργειών και η άρδευσή τους βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα υπόγεια ύδατα. Λόγω της μικρής διάρκειας των βροχοπτώσεων, η περίοδος άντλησης από τον υπόγειο υδροφορέα είναι μεγάλη (6-8 μήνες) και ο ρυθμός άντλησης ανεξέλεγκτος και μη ορθολογικός, με συνέπειες τόσο περιβαλλοντικές όσο και οικονομικές.

Η ανεξέλεγκτη άντληση των υπογείων υδάτων οδηγεί συχνά σε πτώση του υπόγειου υδροφορέα σε σημείο τέτοιο, που να μην καθίσταται δυνατή η επαναφόρτισή του και η επαναφορά του στα αρχικά επίπεδα. Επιπλέον, η συστηματική και ανεξέλεγκτη άντληση υπόγειου νερού έχει τις παρακάτω γενικότερες επιπτώσεις [6]:

- Η άντληση υπόγειου νερού σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές μετακινεί τη διεπιφάνεια που σχηματίζεται ανάμεσα στο υπόγειο γλυκό νερό και το νερό της θάλασσας. Το υπόγειο μέτωπο του θαλασσινού νερού προωθείται προς την ξηρά (εισχώρηση θαλασσινού νερού-υφαλμύρωση) και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό ή ακόμη και θαλασσινό νερό. Αυτή η επίπτωση μπορεί να είναι πρακτικά μη αναστρέψιμη, αφού η επαναφορά στην προϋπάρχουσα φυσική κατάσταση μπορεί να διαρκέσει πάρα πολλά χρόνια.
- Ανάλογα φαινόμενα παρατηρούνται σε υδροφορείς, που γειτνιάζουν με άλλους υδροφορείς, που περιέχουν νερό χαμηλότερης ποιότητας ή μολυσμένο με ρυπογόνες ουσίες.
- Η ταπείνωση της στάθμης των φρεάτιων υδροφορέων και η αφαίρεση σημαντικών ποσοτήτων νερού από περιορισμένους υδροφορείς μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις των εδαφών, δεδομένου ότι το βάρος των υπερκείμενων υλικών εξισορροπείται σε μεγαλύτερο βαθμό από δυνάμεις που αναπτύσσονται στο στερεό ιστό του εδαφικού υλικού, αφού η υδραυλική πίεση μειώνεται.
- Η ταπείνωση της στάθμης των φρεάτιων οριζόντων ή της πίεσης των περιορισμένων υδροφορέων αυξάνει το κόστος άντλησης σε γραμμική αναλογία.
- Η ταπείνωση ενός φρεάτιου υδροφορέα από ένα κάτοχο γεώτρησης μπορεί να οδηγήσει γειτονικές αβαθέστερες γεωτρήσεις σε αστοχία, δημιουργώντας ουσιαστικά και νομικά προβλήματα.



- Η μείωση της επιφανειακής απορροής των ποταμών μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις απολήψεις επιφανειακού νερού.
- Η μείωση της επιφανειακής ή υπόγειας τροφοδοσίας των λιμνών και των υδροτόπων οδηγεί σε μείωση της στάθμης και της έκτασής τους, πράγμα που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις τυχόν απολήψεις νερού από αυτά τα υδάτινα σώματα.
- Η μείωση της εκροής υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στα παράκτια οικοσυστήματα.

Η υδρογεωλογική λεκάνη του Γεροποτάμου, στην οποία εστιάζεται η παρούσα εργασία, περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω και αφορούν στις μεσογειακές χώρες. Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την κύρια αγροτική περιοχή της Κρήτης, με καλλιέργειες που αρδεύονται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τα αντλούμενα υπόγεια ύδατα. Ο ανεξέλεγκτος όμως ρυθμός άντλησης έχει ως αποτέλεσμα οι παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις να έχουν ήδη αρχίσει να λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Γεροποτάμου. Η υδρολογική λεκάνη του Τυμπακίου, η οποία βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με τη λεκάνη του Γεροποτάμου, αντιμετωπίζει το σοβαρό πρόβλημα της υπαλμύρωσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει η απειλή της υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων και της υπό μελέτη λεκάνης.

Στην παρούσα μελέτη έγινε μια προσπάθεια προσέγγισης και κατανόησης του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής και μια εκτίμηση του όγκου των αντλήσεων, που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή. Το παρόν ερευνητικό έργο μπορεί να αποτελέσει σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο, σε μια προσπάθεια σωστής διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής και ειδικότερα του υπόγειου υδατικού δυναμικού της. Επιπλέον, οι αρνητικές συνέπειες της υπεράντλησης μπορούν να δώσουν αφορμή και έναυσμα για τη δημιουργία καλύτερης υποδομής (π.χ. κατασκευή φραγμάτων), με απώτερο σκοπό την εύρεση εναλλακτικών μεθόδων άρδευσης των καλλιεργειών.

Για την αποφυγή των αρνητικών επιπτώσεων της κακής διαχείρισης θα πρέπει να γίνεται σωστή και ορθολογική εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων. Μια προσέγγιση του ορθότερου τρόπου εκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού της λεκάνης του Γεροποτάμου γίνεται στο κεφάλαιο, που ακολουθεί.

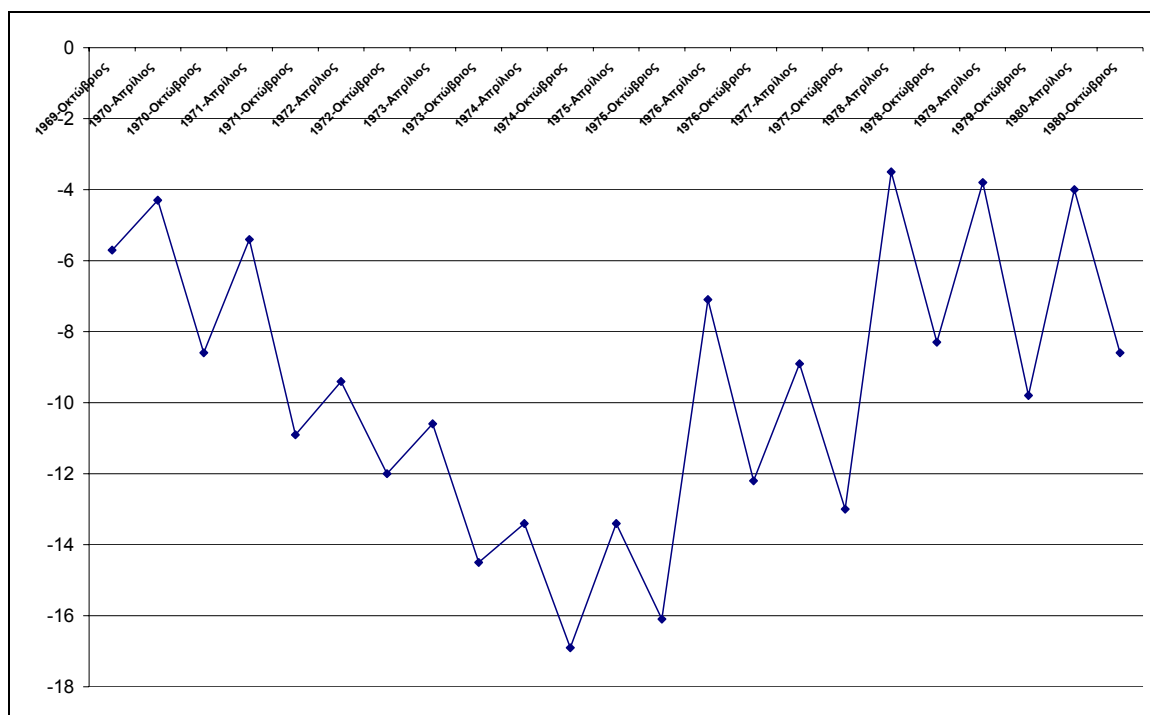
## 6.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΕΡΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Πολλές περιοχές της Ελλάδας, συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής μελέτης, έχουν ήδη υποστεί κάποιες από τις παραπάνω συνέπειες από την κακή εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη γίνεται μια προσέγγιση του όρου «ορθολογική διαχείριση» των υπόγειων αποθεμάτων της λεκάνης του Γεροποτάμου.

Παλιότερα επικρατούσε η άποψη, ότι η απολήψιμη ποσότητα νερού από τους υπόγειους υδροφορείς δεν πρέπει να υπερβαίνει τη φυσική επαναφόρτιση. Δεδομένου όμως ότι η εκμετάλλευση του υπόγειου νερού ανακατανέμει ποσοτικά τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου, η αρχή αυτή δεν θεωρείται σωστή. Έτσι, είναι δυνατό να αντλούνται ποσότητες μεγαλύτερες από τη φυσική επαναφόρτιση, είτε εις βάρος της εκφόρτισης (βασικής ροής) είτε από το περίσσειμα της ενισχυμένης επαναφόρτισης που θα προκληθεί από την εκμετάλλευση. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη αύξηση της εκμετάλλευσης μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις, μερικές από τις οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Υπάρχει, επομένως, κάποιο όριο ασφαλείας, το οποίο λέγεται *ασφαλής απόδοση* και ορίζεται ως η ετήσια ποσότητα νερού που μπορεί να αποληφθεί, χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα [6].

Θα πρέπει πρώτα να παρατηρήσουμε, ότι οποιαδήποτε εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων μέσω γεωτρήσεων επιφέρει την τοπική ή ευρύτερη ταπείνωση της στάθμης των υδροφορέων. Έτσι, σε ένα αρχικό τουλάχιστον στάδιο θα υπάρχει μείωση της αποθήκευσης του υπόγειου νερού. Βέβαια, κατά κανόνα ο τελικός στόχος είναι να σταθεροποιηθούν οι στάθμες των υδροφορέων, με την κατάλληλη πολιτική διαχείρισης έτσι ώστε τελικά, μετά από το αρχικό στάδιο να μην υπάρχει μεταβολή της αποθήκευσης σε υπερετήσια κλίμακα. Στην περίπτωση αυτή, η εκμετάλλευση αφορά στα *ανανεώσιμα υπόγεια αποθέματα*, τα οποία αναπληρώνονται με τη διαδικασία της επαναφόρτισης έτσι, ώστε τελικά να υπάρχει ισοζύγιο εισροών και εκροών. Βεβαίως, ο χρόνος που χρειάζεται για να αποκατασταθεί η ισορροπία εισροών και εκροών μπορεί στην πραγματικότητα να είναι πολύ μεγάλος, της τάξης των εκατοντάδων ετών, εξαρτώμενος από τα μεγέθη και τα χαρακτηριστικά (υδρολογικά, υδραυλικά, γεωλογικά) της λεκάνης και των υδροφορέων, καθώς και τη διάταξη και τους ρυθμούς άντλησης των γεωτρήσεων. Αν εξακολουθεί να μειώνεται συνεχώς η αποθήκευση κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης των υδροφορέων, χωρίς η εκμετάλλευση να τείνει σε κάποιο σημείο ισορροπίας εισροών – εκροών (κάτι που συνήθως προκαλείται από κακή διαχείριση και είναι γνωστό ως *υπερεκμετάλλευση*), τότε η απόληψη επεκτείνεται και στα λεγόμενα *γεωλογικά αποθέματα*, τα οποία δεν αναπληρώνονται πλέον με τη διαδικασία της επαναφόρτισης [6].

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της στάθμης του υδροφορέα στην υδρογεωλογική λεκάνη του Γεροποτάμου για τη χρονική περίοδο 1970-1980:



Παρατηρούμε ότι κατά τα έτη 1971-1975 λαμβάνει χώρα μια έντονη πτώση της στάθμης του υδροφορέα από φυσικά όμως αίτια, καθώς τη δεκαετία 1970-1980 δεν πραγματοποιούνται αντλήσεις στην πεδιάδα της Μεσσαράς. Η πτώση αυτή φτάνει μέχρι τα 18 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και οφείλεται πιθανόν στις χαμηλές βροχοπτώσεις των ετών αυτών, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα:

ΈΤΟΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ
1969-1970	487,98
1970-1971	627,65
1971-1972	499,45
1972-1973	542,94
1973-1974	539,81
1974-1975	562,31
1975-1976	708,63
1976-1977	516,19
1977-1978	997,52
1978-1979	636,92
1979-1980	713

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές, ότι η στάθμη του υδροφορέα επανέρχεται στα φυσιολογικά της επίπεδα εντός της δεκαετίας. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για πτώση στάθμης μέχρι 18 μέτρα ο υδροφορέας έχει την ικανότητα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση με τη διαδικασία της επαναφόρτισης. Δεδομένου αυτού, θεωρούμε σαν όριο ασφαλείας το βάθος των 15 μέτρων, με βάση το οποίο θα γίνει στη συνέχεια η διαχείριση του υπόγειου δυναμικού της Μεσσαράς. Θεωρούμε δηλαδή, ότι

είναι επιτρεπτή η πτώση της στάθμης του υδροφορέα από τις αντλήσεις μέχρι αυτό το βάθος, από το οποίο είναι δυνατή η επαναφορά του στα αρχικά του επίπεδα μέσω της φυσικής επαναφόρτισης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο όγκος ύδατος που απαιτούν οι καλλιέργειες της πεδιάδας της Μεσσαράς, ο οποίος θεωρούμε ότι ισούται με τον όγκο του ύδατος που πρέπει να αντληθεί για την άρδυσή τους. Στην περίπτωση εμφάνισης ξηρών ετών, ο όγκος του ύδατος που πρέπει να αντληθεί για την άρδευση των καλλιεργειών θα είναι μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο. Για το λόγο αυτό, για τα έτη εκείνα, των οποίων το ύψος της βροχόπτωσης κυμαίνεται μεταξύ 500-600mm θεωρούμε μια αύξηση του όγκου των αντλήσεων κατά 10%. Αντιστοίχως, για τα έτη, των οποίων το ύψος βροχόπτωσης κυμαίνεται μεταξύ 300-500mm θεωρούμε αύξηση του όγκου των αντλήσεων κατά 20%. Οι αντλήσεις, που τελικά προκύπτουν φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Στον ίδιο πίνακα εμφανίζονται και οι πραγματικές αντλήσεις που έλαβαν χώρα στη λεκάνη.

Έτος	PRECIP	Αρχικές Αντλήσεις (Mm <sup>3</sup> )	Διορθωμένες Αντλήσεις (Mm <sup>3</sup> )	Πραγματικές Αντλήσεις (Mm <sup>3</sup> )
81-82	739,9	8	8	6
82-83	530,9	8	8	10
83-84	731,6	25	25	19
84-85	737,6	32	32	11
85-86	458,7	32	39	18
86-87	613,9	33	33	19
87-88	674,1	37	37	18
88-89	510,0	39	42	25
89-90	354,6	40	48	45
90-91	582,62	41	45	47
91-92	592,1	42	47	60
92-93	422,9	44	52	55
93-94	513,05	45	49	63
94-95	614,46	46	46	60
95-96	797,6	47	47	30
96-97	650,22	50	50	48
97-98	588,05	55	61	62
98-99	497,59	60	72	72
99-00	438,16	62	74	75
00-01	641,45	65	65	60
01-02	556,51	65	72	38

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ο συνολικός όγκος του ύδατος που αντλείται τη χρονική περίοδο 1981-2002 είναι περίπου ίσος με εκείνο που πραγματικά απαιτείται για την άρδευση των καλλιεργειών. Η διαφορά όμως

έγκειται στην ποσότητα που αντλείται κάθε χρόνο, ανάλογα με την βροχόπτωση του έτους.

Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της 5ετίας 1990-1995 η ποσότητα του ύδατος που αντλείται είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την απαιτούμενη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη χαμηλή βροχόπτωση των ετών αυτών (ξηρά έτη) επέφερε τη μεγάλη πτώση του υδροφορέα (35m). Παρά το γεγονός, ότι τα επόμενα έτη αντλείται ο πραγματικά απαιτούμενος όγκος ύδατος, η μεγάλη αυτή πτώση του υδροφορέα έχει ήδη οδηγήσει σε αλλαγή της συμπεριφοράς του συστήματος και έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη διαδικασία αναπλήρωσης-εκκένωσης, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η επαναφορά του υδροφορέα μέσω της φυσικής επαναφόρτισης. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι οι υδρογεωλογικές συνθήκες, που επικρατούν σε τόσο μεγάλο βάθος είναι διαφορετικές από τις αρχικές, μπορούμε να πούμε, ότι η κακή διαχείριση κατά την 5ετία αυτή ευθύνεται και για την συνέχιση της πτωτικής τάσης της στάθμης του υδροφορέα.

Στην περίπτωση που η άντληση των υπογείων αποθεμάτων, κυρίως κατά την 5ετία 1990-1995, δεν ήταν ανεξέλεγκτη, αλλά λάμβανε χώρα σύμφωνα με τις πραγματικές αρδευτικές ανάγκες της περιοχής, θα επέφερε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση που ακολουθεί.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου Sacramento, η αναπλήρωση και η εκκένωση του υδροφορέα για κάθε υδρολογικό έτος φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Θεωρούμε ότι η εκκένωση που προκύπτει από το μοντέλο είναι φυσική, οφείλεται δηλαδή σε φυσικά αίτια (επιφανειακές και υπόγειες διαφυγές, εξατμισοδιαπνοή) και δεν υπεισέρχονται σε αυτή οι αντλήσεις, που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και ο όγκος ύδατος που πρέπει να αντληθεί για την άρδευση των καλλιεργειών της λεκάνης, όπως αυτός υπολογίστηκε παραπάνω.

Έτος	PREC	Αναπλήρ. (mm)	Εκκένωση (mm)	Αναπλήρ. (Mm <sup>3</sup> )	Εκκένωση (Mm <sup>3</sup> )	Αντλήσεις (Mm <sup>3</sup> )	Αντλήσεις (mm)
81-82	739,9	313,19	279,16	29,8	26,5	8	8,68
82-83	530,9	166,76	202,93	15,8	19,3	8	9,55
83-84	731,6	334,04	236,26	31,7	22,4	25	28,95
84-85	737,6	278,14	269,38	26,4	25,6	32	37,05
85-86	458,7	120,4	118,91	11,4	11,3	39	45,16
86-87	613,9	207,48	242,62	19,7	23,0	33	38,21
87-88	674,1	298,74	178,22	28,4	16,9	37	42,84
88-89	510,0	95,88	148,18	9,1	14,1	42	48,63
89-90	354,6	61,69	119,7	5,9	11,4	48	55,58
90-91	582,62	268,12	140,09	25,5	13,3	45	52,11
91-92	592,1	193,24	231,43	18,4	22,0	47	54,42
92-93	422,9	133,05	48,73	12,6	4,6	52	60,21

<b>93-94</b>	513,05	102,99	162,66	9,8	15,5	49	56,74
<b>94-95</b>	614,46	287,22	188,72	27,3	17,9	46	53,26
<b>95-96</b>	797,6	331,84	216,11	31,5	20,5	47	54,42
<b>96-97</b>	650,22	202,7	193,16	19,3	18,4	50	57,89
<b>97-98</b>	588,05	157,81	208,37	15,0	19,8	61	70,63
<b>98-99</b>	497,59	141,14	148,75	13,4	14,1	72	83,37
<b>99-00</b>	438,16	134,03	148,75	12,7	14,1	74	85,68
<b>00-01</b>	641,45	364,68	263,24	34,6	25,0	65	75,26
<b>01-02</b>	556,51	289,2	102,78	27,5	9,8	72	83,37

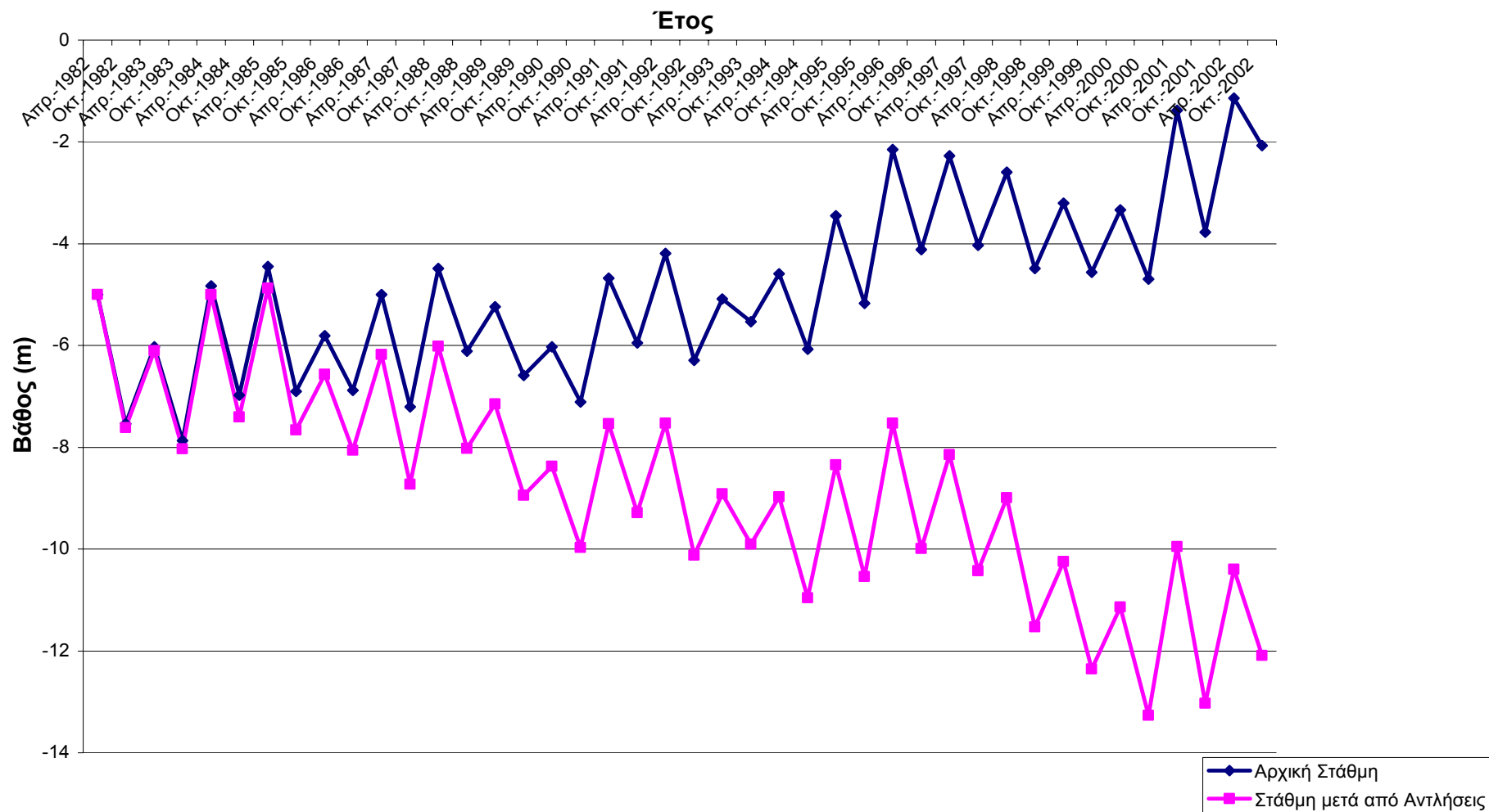
Με βάση τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα και θεωρώντας ότι το 1981 η στάθμη του υδροφορέα βρίσκεται σε βάθος 5 μέτρων, μετατρέπουμε τους παραπάνω όγκους ύδατος σε στάθμη υδροφορέα. Βλέπουμε δηλαδή κάθε χρόνο σε ποιο βάθος βρίσκεται ο υδροφορέας, σύμφωνα με την αναπλήρωση και την εκκένωση που προέκυψαν από το μοντέλο. Επιπλέον, ελέγχουμε τη στάθμη του υδροφορέα μετά από τις αντλήσεις, θεωρώντας ότι σε αυτή την περίπτωση η εκκένωση του υδροφορέα είναι ίση με το άθροισμα της φυσικής εκκένωσης (εκκένωση μοντέλου) και των αντλήσεων που λαμβάνουν χώρα. Για κάθε υδρολογικό έτος προκύπτουν δύο τιμές της στάθμης, μια στο τέλος της περιόδου της αναπλήρωσης (Απρίλιος) και μια στο τέλος της περιόδου της εκκένωσης του υδροφορέα (Οκτώβριος).

<b>Χρονική Στιγμή</b>	<b>Αρχική Στάθμη Υδροφορέα</b>	<b>Στάθμη Υδροφορέα μετά τις Αντλήσεις</b>
Απρίλιος 1982	-5	-5
Οκτώβριος 1982	-7,5	-7,6
Απρίλιος 1983	-6,0	-6,1
Οκτώβριος 1983	-7,9	-8,0
Απρίλιος 1984	-4,8	-5,0
Οκτώβριος 1984	-7,0	-7,4
Απρίλιος 1985	-4,4	-4,9
Οκτώβριος 1985	-6,9	-7,7
Απρίλιος 1986	-5,8	-6,6
Οκτώβριος 1986	-6,9	-8,1
Απρίλιος 1987	-5,0	-6,2
Οκτώβριος 1987	-7,2	-8,7
Απρίλιος 1988	-4,5	-6,0
Οκτώβριος 1988	-6,1	-8,0
Απρίλιος 1989	-5,2	-7,1
Οκτώβριος 1989	-6,6	-8,9
Απρίλιος 1990	-6,0	-8,4
Οκτώβριος 1990	-7,1	-10,0
Απρίλιος 1991	-4,7	-7,5
Οκτώβριος 1991	-5,9	-9,3
Απρίλιος 1992	-4,2	-7,5
Οκτώβριος 1992	-6,3	-10,1
Απρίλιος 1993	-5,1	-8,9
Οκτώβριος 1993	-5,5	-9,9
Απρίλιος 1994	-4,6	-9,0

Οκτώβριος 1994	-6,1	-11,0
Απρίλιος 1995	-3,5	-8,3
Οκτώβριος 1995	-5,2	-10,5
Απρίλιος 1996	-2,1	-7,5
Οκτώβριος 1996	-4,1	-10,0
Απρίλιος 1997	-2,3	-8,1
Οκτώβριος 1997	-4,0	-10,4
Απρίλιος 1998	-2,6	-9,0
Οκτώβριος 1998	-4,5	-11,5
Απρίλιος 1999	-3,2	-10,2
Οκτώβριος 1999	-4,6	-12,4
Απρίλιος 2000	-3,3	-11,1
Οκτώβριος 2000	-4,7	-13,3
Απρίλιος 2001	-1,4	-10,0
Οκτώβριος 2001	-3,8	-13,0
Απρίλιος 2002	-1,1	-10,4
Οκτώβριος 2002	-2,1	-12,1

Η παραπάνω διακύμανση του υδροφορέα, τόσο η αρχική όσο και εκείνη που προκύπτει έπειτα από τις αντλήσεις, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

## Διακύμανση Στάθμης Υδροφορέα Υδρογεωλογικής Λεκάνης Γεροποτάμου





Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι για όλα τα υδρολογικά έτη τηρείται το «όριο ασφαλείας» των 15 μέτρων. Ακόμα και στα τέλη της δεκαετίας του '90, που ο όγκος ύδατος που πρέπει να αντληθεί είναι ιδιαίτερα μεγάλος ( $74\text{Mm}^3$ ), η στάθμη του υδροφορέα δεν παρουσιάζει ταπείνωση μεγαλύτερη από τα 13 μέτρα. Μπορούμε συνεπώς να πούμε, ότι στην περίπτωση άντλησης εκείνης της ποσότητας ύδατος, η οποία απαιτείται πραγματικά για την άρδευση των καλλιεργειών, δεν θα παρατηρηθεί η μεγάλη πτώση που συνέβη στη στάθμη του υδροφορέα. Ο υδροφορέας έχει την δυνατότητα να καλύψει τις αρδευτικές ανάγκες της πεδιάδας της Μεσσαράς χωρίς να υπερβεί το «όριο ασφαλείας» και να επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα εντός μια δεκαετίας, όπως αποδείχτηκε παραπάνω.

### 6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑ

Κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας αντιμετωπίσαμε διάφορα προβλήματα. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, τη βελτίωση των αποτελεσμάτων που τελικά προέκυψαν, αλλά και τη διευκόλυνση της περαιτέρω έρευνας στη συγκεκριμένη περιοχή προτείνουμε τα ακόλουθα:

- Την εκπόνηση μιας ολοκληρωμένης υδρογεωλογικής μελέτης, με σκοπό την καταγραφή των υδροφόρων στρωμάτων, τον ακριβή καθορισμό της τιμής του πορώδους, καθώς επίσης και τη σαφή οριοθέτηση της υδρογεωλογικής λεκάνης.
- Την εγκατάσταση μετεωρολογικών σταθμών, για την πλήρη κάλυψη της περιοχής και την εξασφάλιση όλων των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων, καθώς επίσης και τον εκσυγχρονισμό των υπαρχόντων σταθμών και οργάνων.
- Την εγκατάσταση δικτύου γεωτρήσεων για την εντατική παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα.
- Την καταγραφή των αρδευόμενων εκτάσεων, καθώς επίσης και της ποσότητας του αντλούμενου ύδατος.

Εκτός, όμως, από τις «τεχνικές» βελτιώσεις, που οφείλουν να γίνουν, απαιτείται και η κατάλληλη μέριμνα από την πλευρά της πολιτείας, για την συνέχιση του ερευνητικού έργου σε μια τέτοια περιοχή, με μεγάλη αγροτική και κατ' επέκταση οικονομική ανάπτυξη και με τόσο έντονο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Τα αποτελέσματα της έρευνας πρέπει να δώσουν ώθηση σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς και πολίτες, για μια σωστή και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, με σκοπό την έγκαιρη αντιμετώπιση του προβλήματος και την πρόληψη και αποφυγή ανάλογων καταστάσεων. Επιπλέον, η έρευνα οφείλει να εστιαστεί στην περαιτέρω πιθανολογική και στατιστική ανάλυση της βροχόπτωσης, με σκοπό να καθοριστεί η μορφή της κατανομής της βροχόπτωσης και να λυθεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας του σημαντικού αυτού παράγοντα.

---

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Πέτρος Ι. Πέννας, «**Το Κλίμα της Κρήτης**», Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη 1977
- [2] Περιφέρεια Κρήτης, Διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, «**Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων της Κρήτης, Φάση Α – Στάδιο Α.2.3 : Επεξεργασία και Διαχείριση Υδρογεωλογικών Δεδομένων**», Αθήνα, Δεκέμβριος 2000
- [3] Ο.ΑΝ.Α.Κ. – Ε.Μ.Π., «**Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Ανατολικής Κρήτης, Μέρος Α΄**», 1994
- [4] Πουντουράκης Αντώνης, «**Ανάλυση Υδατικού Δυναμικού της Υδρολογικής Λεκάνης Γεροποτάμου με τη Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών**», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά 2003
- [5] B. Croke, N. Cleridou, A. Kolovos, I. Vardavas, J. Papamastorakis, «**Water resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: estimation of the annual water budget using a rainfall-runoff model**», Environmental Modelling & Software 15 (2000), 387-402
- [6] Δ. Κουτσογιάννης, Θ. Ξανθόπουλος, «**Τεχνική Υδρολογία**», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, Έκδοση 3, Αθήνα 1999
- [7] Περιφέρεια Κρήτης, Διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης, Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, «**Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων της Κρήτης, Φάση Α – Στάδιο Α.2.2 : Επεξεργασία και Διαχείριση Υδρογεωλογικών Δεδομένων**», Αθήνα, Δεκέμβριος 2000
- [8] HYMOS Manual
- [9] Γ. Τσακίρης, «**Υδατικοί Πόροι : Ι. Τεχνική Υδρολογία**», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1995
- [10] **R.J.C. Burnash, The NWS River Forecast System – Catchment Modelling**, Chapter 10
- [11] Henrik Madsen, Geoffrey Wilson, Hans Christian Ammentorp, «**Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models**», Journal of Hydrology 261 (2002), 48-59
- [12] Για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν:
- Sang-Ki Moon, Nam C. Woo, Kwang S. Lee, «**Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge**», Journal of Hydrology 292 (2004), 198-209

- I. K. Tsanis, S. Naum, «**The effect of spatially distributed meteorological parameters on irrigation water demand assessment**», *Advances in Water Resources* 26 (2003), 311-324
- A. Poulouvassilis, M. Anadranistakis, A. Liakatas, S. Alexandris, P. Kerkides, «**Semi-empirical approach for estimating actual evapotranspiration in Greece**», *Agricultural Water Management* 51 (2001), 143-152
- Bryce D. Finnerty, Michael B. Smith, Dong-Jun Seo, Victor Koren, Glenn E. Moglen, «**Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs**», *Journal of Hydrology* 203 (1997), 21-38
- I.M. Vardavas, J. Papamastorakis, A. Fountoulakis, M. Manousakis, «**Water resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: estimation of potential lake evaporation**», *Ecological modeling* 102 (1997), 363-374
- P. Kerkides, H. Michalopoulou, G. Papaioannou, R. Pollatou, «**Water balance estimates over Greece**», *Agricultural Water Management* 32 (1996), 85-104
- Deg-Hyo Bae, Konstantine P. Georgakakos, «**Climatic variability of soil water in the American Midwest: Part 1. Hydrologic modeling**», *Journal of Hydrology* 162 (1994), 355-377