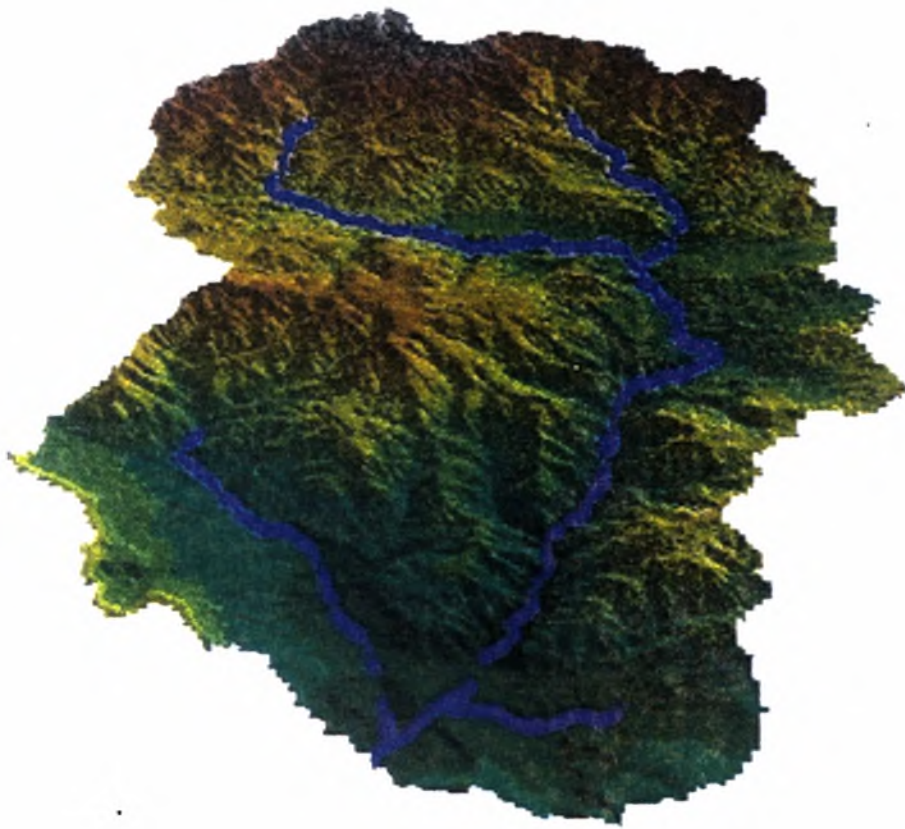


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

*“Υδρολογική Προσομοίωση
Επιφανειακού Υδατικού Δυναμικού
Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος”*



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΠΑΣΤΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΛΟΥΚΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ, PhD

ΒΟΛΟΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2002



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 2311/1
Ημερ. Εισ.: 30-10-2003
Δωρεά:
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2002
ΜΠΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070363

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου και επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Λουκά Αθανάσιο για την πολύτιμη και ανεκτίμητη βοήθεια που μου πρόσφερε απλόχερα όποτε του το ζήτησα κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας. Επίσης θα το θεωρούσα παράλειψη αν δεν ανέφερα ότι όλα τα χρόνια της πανεπιστημιακής μου μόρφωσης μου μετέδωσε έναν ξεχωριστό τρόπο σκέψης, πολύτιμες γνώσεις που θα με συνοδεύουν για πάντα αλλά και τη λέξη φιλότιμο που δυστυχώς έχει χαθεί στη σημερινή κοινωνία.

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου στον υδραυλικό τομέα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας Καθηγητή Λιακόπουλο Αντώνη και Λέκτορα Μυλόπουλο Νικήτα για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε. Σιδηρόπουλο του Τμήματος Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Α.Π.Θ. και στον Διευθυντή του Τμήματος Ανάπτυξης Υδάτων του Υπουργείου Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Κύπρου Ι. Ιακωβίδη για την παροχή των δεδομένων της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Βασιλειάδη Λάμπρο για την πραγματικά συγκινητική του προσφορά να με βοηθήσει όποτε χρειάστηκε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, όλους τους καθηγητές μου, την Γραμματεία του Τμήματος για την ευγένεια και την προθυμία να με εξυπηρετήσει πάντοτε σε διάφορα ζητήματα καθώς και τους καλούς μου φίλους και συμφοιτητές που γνώρισα κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια στο Πανεπιστήμιο, αναγνωρίζοντας ότι χωρίς αυτήν θα ήταν αδύνατο να εκπληρώσω τις υποχρεώσεις μου και να πάρω το Δίπλωμα του Πολιτικού Μηχανικού.

Κλείνοντας, αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου και στον καθηγητή μου Δρ. Λουκά Αθανάσιο.

*Μπαστρογιάννης Νικόλαος
Βόλος, Σεπτέμβριος 2002*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σύνταξη, εφαρμογή και σύγκριση αδρομερών μοντέλων υδατικού ισοζυγίου που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η εφαρμογή των μοντέλων που επιλέχθηκαν έγινε στη λεκάνη της Γερμασόγειας της Κύπρου. Αυτά είναι το μοντέλο Abulohom et al (2001) , Giakoumakis et al (1991), Thomthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984).

Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου των μοντέλων. Η πρώτη εκτιμήθηκε με τη βοήθεια τριών μεθόδων ενώ η δεύτερη με την χρησιμοποίηση επτά μοντέλων. Για κάθε μοντέλο υδατικού ισοζυγίου εφαρμόστηκαν είκοσι ένα συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων και μοντέλων. Συνολικά οι συνδυασμοί που έγιναν ήταν εξήντα τρεις.

Αφού συντάχθηκαν τα τρία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, ακολούθησε η βελτιστοποίηση (calibration) των παραμέτρων των μοντέλων και ο υπολογισμός των δεδομένων εξόδων (output) του καθενός για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο) 1986-1992. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση (validation) των μοντέλων για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Οκτώβριο έως Σεπτέμβριο) 1992-1998, έτσι ώστε να ελεγχθεί αν τα μοντέλα προσομοιώνουν επαρκώς την απορροή για μια χρονική περίοδο διαφορετική από την χρονική περίοδο βελτιστοποίησης των μοντέλων. Η πιστοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που είχαν υπολογιστεί κατά την βελτιστοποίηση.

Ο σκοπός της υδρολογικής προσομοίωσης του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου ήταν να επιλεγεί το καταλληλότερο από τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκαν για την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, μαζί με τον αποδοτικότερο συνδυασμό μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	Σελ
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	1
1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ	4
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ-ΛΕΚΑΝΗ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ	7
2.1 ΥΔΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ	7
2.2 ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ	10
2.3 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ	11
2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ	13
3. ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	16
3.1 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ	16
3.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΑΠΛΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ	17
3.3 ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	19
3.3.1 Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες ισοζυγίου	19
3.3.2 Εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου	23
3.3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη απορροής	24
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	28
4.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ	28
4.1.1 Μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων	28
4.1.2 Βροχομετρικοί σταθμοί	31
4.1.3 Βροχομετρικά δίκτυα	32
4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	33
4.2.1 Μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου	33
4.2.2 Μέθοδος των πολυγώνων Thiessen	34
4.2.3 Μέθοδος των ισουέτιων καμπυλών	34
4.2.4 Μέθοδος βροχοβαθμίδας	36
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ	37

4.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ	46
5.	ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	49
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
5.2	ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	50
5.3	ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	51
5.3.1	Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου	52
5.3.2	Μικρομετεωρολογικές μέθοδοι	55
5.4	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	55
5.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	58
5.5.1	Μοντέλα βασισμένα σε συσχετίσεις	58
5.5.2	Μοντέλα βασισμένα στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής	67
5.6	ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ	67
5.6.1	Υπολογισμός μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας	68
5.6.2	Περιγραφή των μοντέλων εξατμισοδιαπνοής	73
5.6.3	Σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης δυναμικής εξατμισοδιαπνοής	77
6.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	80
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	80
6.2	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ THORNTHWAITE ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ ALLEY	80
6.3	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ THORNTHWAITE-MATHER	83
6.4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ GIAKOUMAKIS ET AL	86
6.5	ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ABULOHOM ET AL	89
7.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	92
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	92
7.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	96
7.2.1	Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom	96
7.2.2	Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Giakoumakis	108
7.2.3	Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Alley	118
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	128
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	132
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	133
A.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	134

A.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	141
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	148
B.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΒΥΛΟΗΟΜ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1986-ΣΕΠ1992	149
B.1.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	149
B.1.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	156
B.1.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	163
B.2	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΒΥΛΟΗΟΜ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1992-ΣΕΠ1998	170
B.2.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	170
B.2.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	177
B.2.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	184
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	191
Γ.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1986-ΣΕΠ1992	192
Γ.1.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	192
Γ.1.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	199
Γ.1.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	206
Γ.2	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1992-ΣΕΠ1998	213
Γ.2.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	213
Γ.2.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	220
Γ.2.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	227
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	234
Δ.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ALLEY ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1986-ΣΕΠ1992	235
Δ.1.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	235
Δ.1.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	242
Δ.1.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	249
Δ.2	ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ALLEY ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΟΚΤ1992-ΣΕΠ1998	256
Δ.2.1	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα	256
Δ.2.2	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος	263
Δ.2.3	Μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen	270
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε	277
E.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	278
E.2	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ Γ.Σ.Π.	278
E.3	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	279

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υδρολογία σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό είναι η επιστήμη που ασχολείται με την παρουσία του νερού στη γη, την κυκλοφορία του, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον.

Η *Τεχνική Υδρολογία* αποτελεί το εφαρμοσμένο τμήμα της Υδρολογίας που ασχολείται με την μελέτη των υδρολογικών φαινομένων που έχουν σχέση με τον προγραμματισμό, σχεδιασμό και τη λειτουργία των υδραυλικών έργων, δηλαδή όλων των τεχνικών έργων που κατασκευάζονται για τον έλεγχο, τη διατήρηση και την αξιοποίηση του νερού. Επίσης παρέχει χρήσιμα στοιχεία για μια σειρά άλλων μελετών και δραστηριοτήτων που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με το νερό. Τέλος σημαντικός είναι ο ρόλος της Τεχνικής Υδρολογίας αλλά και της Υδρολογίας γενικότερα στην παρακολούθηση, μελέτη και ανάλυση του περιβάλλοντος.

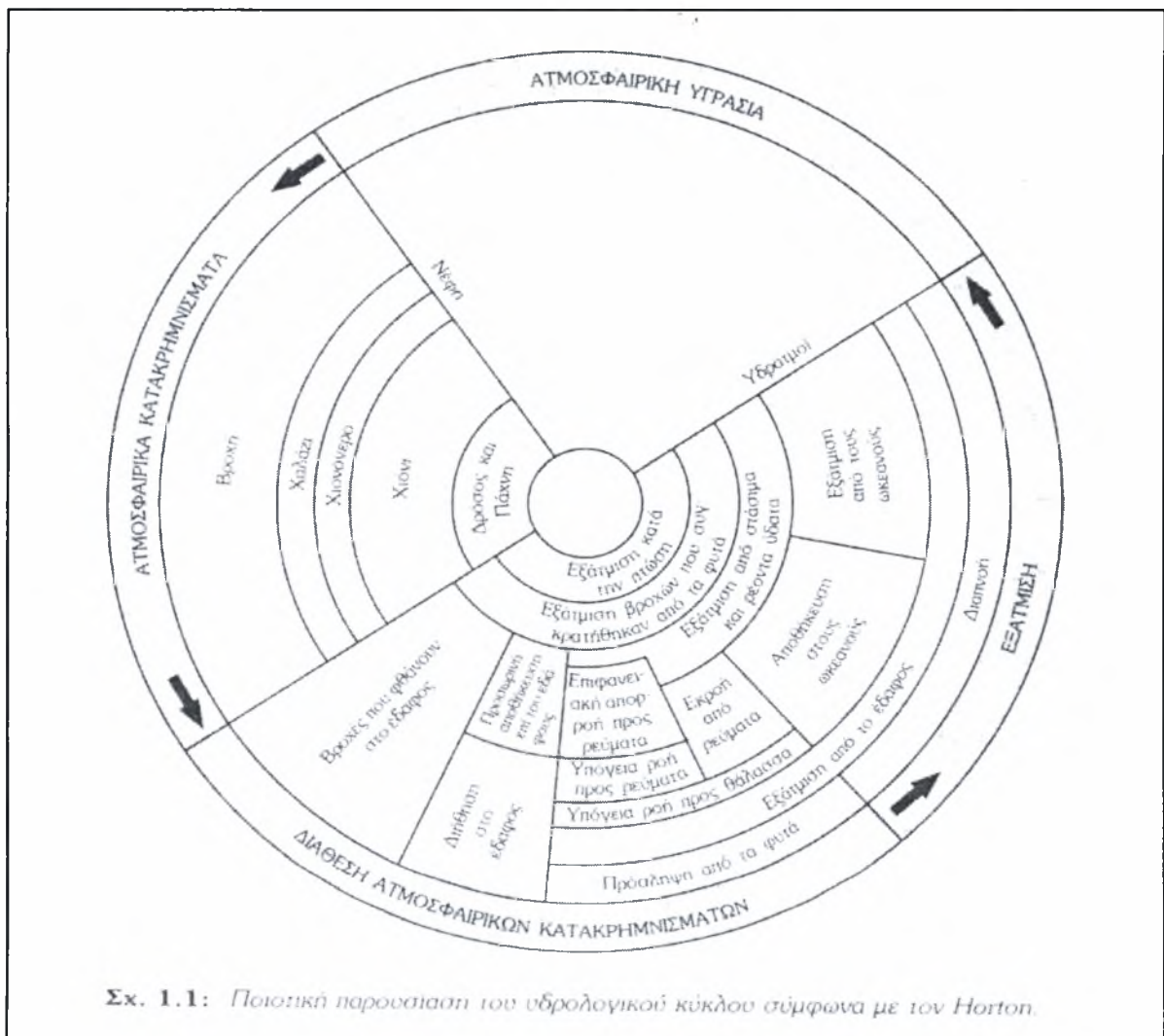
1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο Υδρολογικός Κύκλος αποτελεί την σχηματική περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ θάλασσας, ατμόσφαιρας και ξηράς. Σ' αυτή την αλυσίδα των εμφανίσεων το νερό παρουσιάζεται με όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός), στερεό (χιόνι/ χαλάζι) .

Η σειρά των εμφανίσεων του νερού στη φύση δεν έχει πρακτικά αρχή και τέλος. Όμως η αρχή θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού προς τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λ.π.

Οι υδρατμοί μεταφέρονται από αέριες μάζες και μπορεί κάτω από κατάλληλες συνθήκες να συμπυκνωθούν σε σύννεφα και στη συνέχεια με μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων να επανεμφανιστούν στην επιφάνεια της γης.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται στο έδαφος και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα που καταλήγουν σε λίμνες και θάλασσες. Κατά την πορεία αυτή ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Το ίδιο συμβαίνει και για το τμήμα του νερού που επίσης χάνει ένα τμήμα του που εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά.

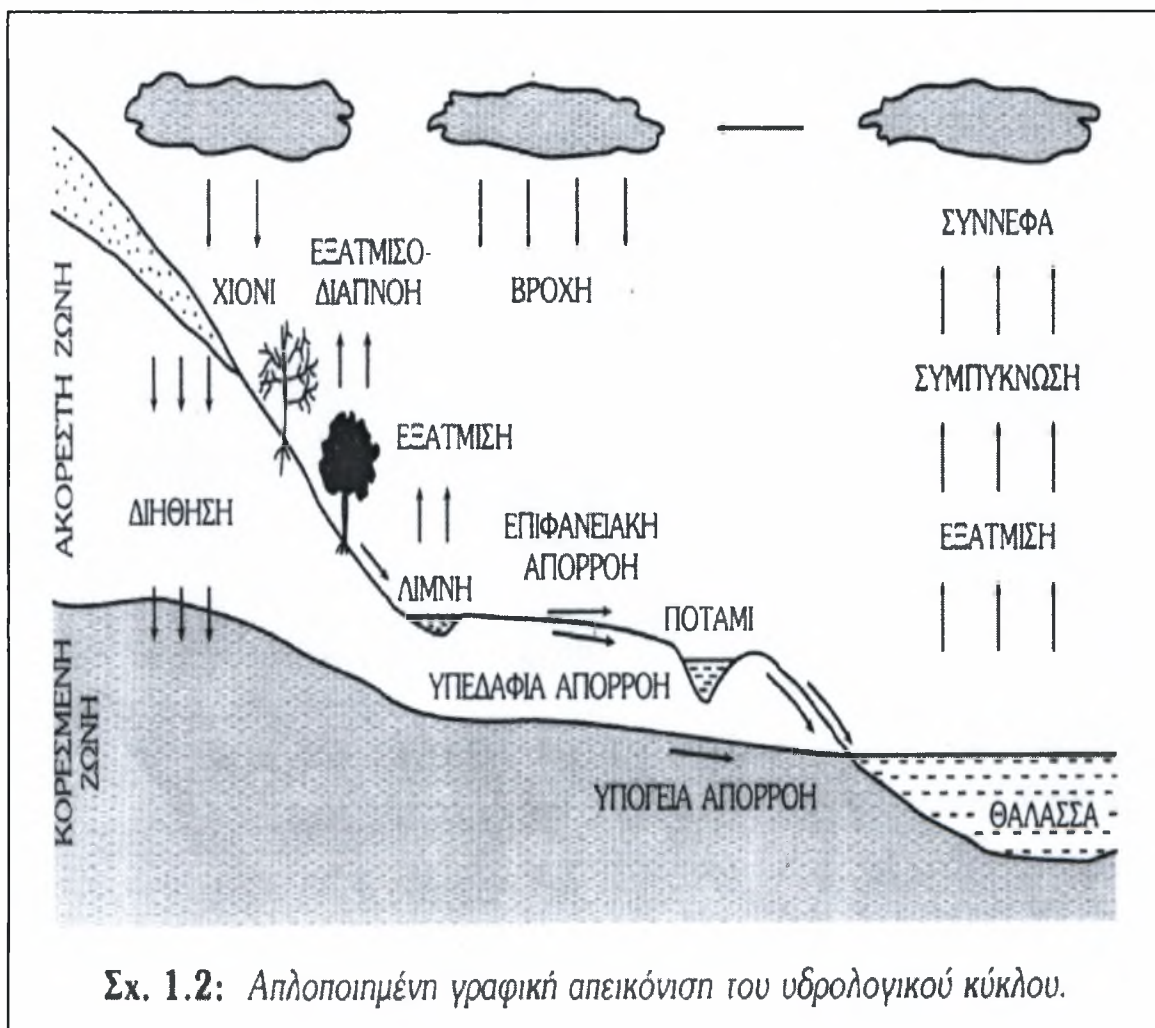


Το υπόλοιπο του νερού που διηθείται, αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα σημεία και στη συνέχεια καταλήγει επιφανειακά ή υπόγεια. Τέλος, το νερό της θάλασσας με την εξάτμιση επανέρχεται στην ατμόσφαιρα και με τον τρόπο αυτό κλείνει ο υδρολογικός κύκλος. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ποιοτικά ο υδρολογικός κύκλος σύμφωνα με τον Horton (Σακκάς, 1983),

ενώ στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (Σακκάς, 1983).

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί:

- α. Μεταφορά νερού
- β. Προσωρινή αποθήκευση
- γ. Μεταβολή της κατάστασης νερού



1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Αντικείμενο της υδρολογίας είναι η ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων και νόμων για τις διάφορες διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα για τη χωροχρονική εξέλιξη των υδρολογικών φαινομένων. Είναι γεγονός ότι οι διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου εμπεριέχουν παραμέτρους και διαδικασίες πολλές φορές αλληλοεξαρτώμενες. Μερικές μάλιστα από αυτές ερευνώνται και από άλλες επιστήμες όπως η Μετεωρολογία, η Γεωλογία, η Μηχανική των ρευστών, κ.ά.

Η Υδρολογία ως δευτερογενής επιστήμη στηρίζεται στα επιμέρους συμπεράσματα τα οποία συγκεντρώνει από τις διάφορες επιστήμες και τα χρησιμοποιεί για την περαιτέρω ανάλυσή τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Υδρολογία παρουσιάζει η ένταση των διαδικασιών του υδρολογικού κύκλου. Για παράδειγμα πέρα από τις μέσες τιμές παροχής ενός υδατορεύματος που αναμφισβήτητα παρέχουν πληροφορίες για το ύψος του εκμεταλλεύσιμου όγκου νερού, μεγάλη αξία έχουν και οι πληροφορίες για τις υψηλές τιμές που έχουν σχέση με τον κίνδυνο της πλημμύρας στην περιοχή καθώς και οι χαμηλές ροές που σχετίζονται με τα φαινόμενα ξηρασίας στην περιοχή.

Η Τεχνική υδρολογία αποτελεί βασικό επιστημονικό κλάδο για τη μελέτη των Υδραυλικών Έργων. Τα Υδραυλικά Έργα όπως είναι γνωστό χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α. Έργα αξιοποίησης των Υδατικών Πόρων.

β. Έργα ελέγχου και διατήρησης των Υδατικών Πόρων.

Είναι προφανές ότι ανάλογα με τον τύπο του έργου χρησιμοποιούνται άλλες υδρολογικές παράμετροι και διαφορετικές χρονικές και χωρικές βάσεις. Έτσι για παράδειγμα για ένα έργο αντιπλημμυρικής προστασίας είναι το μέγεθος της αιχμής της απορροής καθώς και η συχνότητα εμφάνισής του. Αντίθετα για ένα έργο άρδευσης μιας αγροτικής έκτασης ενδιαφέρει κυρίως ο μέσος και ο ελάχιστος όγκος της απορροής χωρίς ή με τη δυνατότητα αποθήκευσης.

Τέλος σε περιοχές που πλήττονται από ξηρασία οι πιο σημαντικές πληροφορίες αναφέρονται στις ελάχιστες βροχοπτώσεις, στην χωρική τους κατανομή και στη συχνότητα εμφάνισής τους. Επίσης, για έργα διαχείρισης υδατικών πόρων θα πρέπει να είναι γνωστά τα ποσά του εισερχόμενου (κατακρημνίσεις), του εξερχόμενου (επιφανειακή και υπόγεια απορροή) και του αποθηκευμένου νερού (στο έδαφος ή σε υδροτεχνικά έργα) σε μια ή περισσότερες λεκάνες απορροής. Η εύρεση αυτών των ποσών νερού

πραγματοποιείται εφαρμόζοντας την αρχή της συνέχειας ή διατήρησης της μάζας, η οποία στην Υδρολογία παίρνει τη μορφή της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου. Από τα παραδείγματα αυτά που αναφέρονται ενδεικτικά είναι εύκολο να κατανοηθεί το εύρος και η ποικιλία των προβλημάτων στα οποία καλείται να παίξει καθοριστικό ρόλο η Τεχνική Υδρολογία.

1.4 Σκοπός και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύνταξη, εφαρμογή και σύγκριση αδρομερών μοντέλων υδατικού ισοζυγίου που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η εφαρμογή των μοντέλων που επιλέχθηκαν έγινε στη λεκάνη της Γερμασόγειας της Κύπρου. Αυτά είναι το μοντέλο Abulohom (2001) , Γιακουμάκη (1991), Thornthwaite τροποποιημένο από τον Alley (1984). Τα μοντέλα χαρακτηρίζονται αδρομερή (lumped) μιας και δεν γίνεται διάκριση της λεκάνης σε υπολεκάνες ή υδρολογικές περιοχές με ομοιογενή χαρακτηριστικά, δηλαδή θεωρείται ολόκληρη η λεκάνη ομοιογενής.

Με δεδομένα εισόδου την επιφανειακή κατακρήμνιση και δυνητική εξατμισοδιαπνοή τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν την απορροή στην έξοδο της λεκάνης σε μηνιαία βάση, χρησιμοποιώντας κάποιες παραμέτρους. Έχοντας σημειακά ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας από σταθμούς της λεκάνης, υπολογίστηκαν η μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση και η μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης με τη βοήθεια τριών μεθόδων κατανομής βροχόπτωσης και εφτά μοντέλων εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής αντίστοιχα. Η κατανομή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ολόκληρη τη λεκάνη έγινε με μια μέθοδο (της θερμοβαθμίδας) λόγω έλλειψης πολλών δεδομένων από διάφορους σταθμούς.

Αφού συντάχθηκαν τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου και εκτιμήθηκαν τα δεδομένα εισόδου με διάφορες μεθόδους και μοντέλα, ακολούθησε η βελτιστοποίηση (calibration) των παραμέτρων των μοντέλων και ο υπολογισμός των μηνιαίων όγκων απορροής στην έξοδο της λεκάνης για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο) 1986-1992. Η βελτιστοποίηση (calibration) αυτή έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου SIMPLEX και σαν στατιστική παράμετρος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η Model Efficiency (Eff) που προτάθηκε από τους Nash and Sutcliffe (1970). Στη συνέχεια έγινε

πιστοποίηση (validation) των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο) 1992-1998 σε μηνιαία πάλι βάση.

Έχοντας τα δεδομένα απορροής στην έξοδο της λεκάνης, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η σειρά τιμών της επιφανειακής απορροής που εκτιμήθηκε από τα μοντέλα να συμφωνεί κατά το μέγιστο (δηλ. $Eff=1$) δυνατό με τη μετρημένη σειρά απορροής. Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη υδρολογική προσομοίωση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης όπου έχει κατασκευαστεί το φράγμα και ο ταμιευτήρας της Γερμασόγειας, κάνοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μοντέλου-βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής οι οποίοι ήταν εξήντα τρεις (63) για την βελτιστοποίηση (calibration) όπως και για την πιστοποίηση (validation). Επίσης έγινε σύγκριση όλων αυτών των συνδυασμών με διάφορες στατιστικές παραμέτρους καθώς και με τις τιμές της στατιστικής παραμέτρου Model Efficiency (Eff). Ο απώτερος στόχος αυτών των συγκρίσεων ήταν η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μοντέλου-βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής για την καλύτερη προσομοίωση της μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας, η οποία είναι ταυτόχρονα και η μηνιαία εισροή στον ταμιευτήρα της Γερμασόγειας. Έτσι, η όσο το δυνατόν καλύτερη υδρολογική προσομοίωση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης απορροής βοηθά την καλύτερη διαχείριση του αποθηκευμένου νερού και αυξάνει την πιθανότητα ικανοποίησης της ζήτησης από τη συγκεκριμένη ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα της Γερμασόγειας.

Κεφάλαιο 2^ο: Περιοχή μελέτης-Λεκάνη Γερμασόγειας

2.1 Υδατική Ανάπτυξη στην Κύπρο

Η έγκαιρη διάγνωση του προβλήματος της υδατικής ανεπάρκειας και η ορθολογιστική και μεθοδική αντιμετώπιση του υπήρξε καθοριστικός παράγοντας για τη σημερινή πραγματικότητα στην Κύπρο. Η ανάπτυξη των υδάτινων πόρων υπήρξε εντυπωσιακή αν συγκριθεί με άλλες χώρες του μεγέθους της Κύπρου. Πειστική μαρτυρία είναι τα 105 και πλέον φράγματα και υδατοδεξαμενές που κατασκευάστηκαν, με χωρητικότητα 304,7 περίπου εκατομμυρίων κυβικών μέτρων νερού (Σχήμα 2.1). Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η Κύπρος βρίσκεται στην πρώτη θέση του καταλόγου της Διεθνούς Επιτροπής Μεγάλων Φραγμάτων στην περιοχή της Ευρώπης, με αναλογία πενήντα μεγάλα φράγματα για κάθε 10000 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Η Κύπρος χαρακτηρίζεται από εύκρατο μεσογειακό κλίμα με ήπιο χειμώνα, μακρό ζεστό καλοκαίρι και πολύ περιορισμένο φθινόπωρο και άνοιξη. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 500 mm με εύρος από 300 mm στις κεντρικές πεδιάδες έως 1100 mm στις οροσειρές. Η ανομοιομορφία στην κατανομή της βροχόπτωσης δεν είναι μόνο γεωγραφική αλλά και διαχρονική. Η ηλιοφάνεια είναι μεγάλη σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, με 11,5 ώρες κατά μέσο όρο την ημέρα το καλοκαίρι και 5,5 ώρες το χειμώνα. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία το καλοκαίρι φθάνει τους 36°C στις κεντρικές πεδιάδες και τους 27°C στις οροσειρές, ενώ η μέση ελάχιστη θερμοκρασία πέφτει στους 5°C και 0°C αντίστοιχα. Η μεγάλη διάρκεια της ηλιοφάνειας, η σχετική ξηρασία και η διαρκής κίνηση του αέρα έχουν ως αποτέλεσμα την εξατμισοδιαπνοή μεγάλων ποσοτήτων νερού, που σε ετήσια βάση, αντιστοιχεί στο 80% της βροχόπτωσης.

Όλοι οι υδάτινοι πόροι που διαθέτει η Κύπρος προέρχονται από τη βροχόπτωση. Η ποσότητα νερού που αντιστοιχεί στην ολική επιφάνεια του νησιού ανέρχεται στα 4600 Εκατομμύρια Κυβικά Μέτρα (ΕΚΜ), αλλά μόνο το 20% ή 900 ΕΚΜ προσφέρονται για ανάπτυξη αφού τα υπόλοιπα 80% περίπου επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα ως απευθείας εξάτμιση.

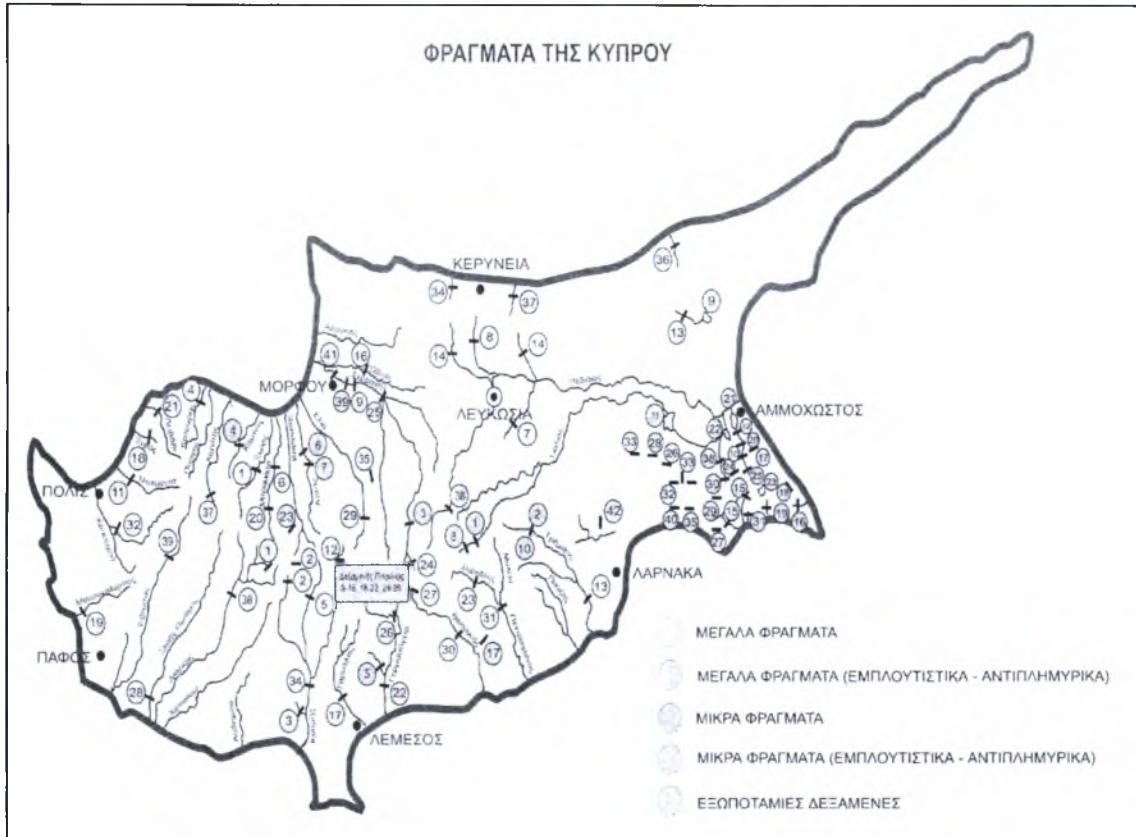
Η μέση ετήσια ποσότητα των 900 ΕΚΜ νερού κατανέμεται με μια αδρή αναλογία 2:1 σε επιφανειακή ροή και σε υπόγεια νερά δηλαδή 600 ΕΚΜ προς 300 ΕΚΜ αντίστοιχα.

Τα κυριότερα υδροφόρα στρώματα βρίσκονται κατά μήκος των ακτών του νησιού και σε παράλιες πεδιάδες, όπου, ενώ η βροχόπτωση είναι χαμηλή, η παρουσία ιζηματογενών πετρωμάτων και των αλλουβιακών προσχώσεων των ποταμών που έχουν μεγάλη διαπερατότητα, επιτρέπουν τη διείσδυση και αποθήκευση των επιφανειακών νερών.

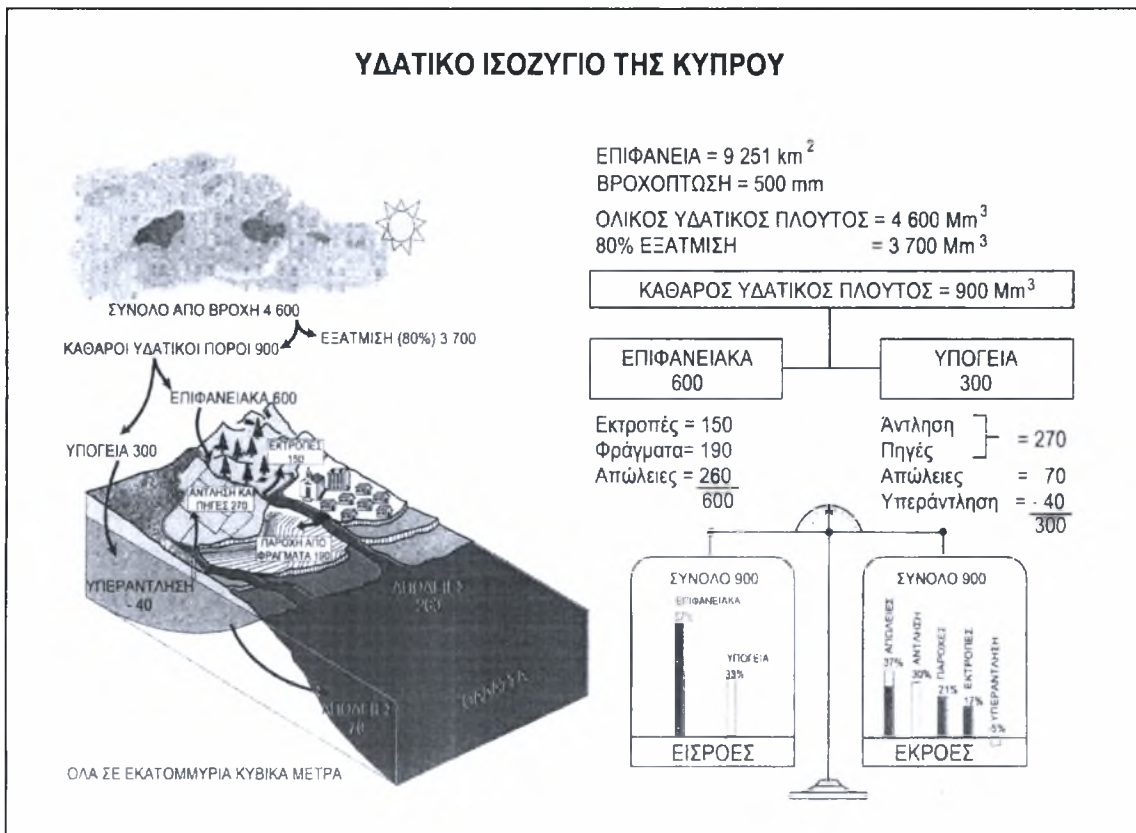
Έτσι από τα 300 ΕΚΜ που εμπλουτίζουν τα υδροφόρα στρώματα, γύρω στα 270 ΕΚΜ αντλούνται από γεωτρήσεις ή εμφανίζονται σε πηγές, ενώ υπολογίζεται ότι περίπου 70 ΕΚΜ νερού καταλήγουν υπόγεια στη θάλασσα, από τα γνωστά υδροφόρα στρώματα κυρίως τους χειμερινούς μήνες.

Από την επιφανειακή ροή των 600 ΕΚΜ νερού περίπου, 150 ΕΚΜ εκτρέπονται από τους ποταμούς κατά το χειμώνα και την άνοιξη και χρησιμοποιούνται για άρδευση. Η αποθηκευτική ικανότητα των φραγμάτων και δεξαμενών ανέρχεται στα 300 ΕΚΜ περίπου. Η ετήσια όμως παροχή νερού που εξασφαλίζεται από τη διαχρονική λειτουργία των μεγαλύτερων φραγμάτων, ανάλογα και με τη χρήση του νερού, μόλις που φτάνει τα 190 ΕΚΜ. Το υπόλοιπο από τα επιφανειακά νερά, 260 ΕΚΜ, καταλήγουν στη θάλασσα και χάνονται.

Αν γινόταν ένας ισολογισμός του υδατικού ισοζυγίου της Κύπρου, τότε στις εισροές περιλαμβάνεται ο μέσος ετήσιος υδατικός πλούτος των 900 ΕΚΜ, που αναλύεται σε 67% επιφανειακά νερά και 33% υπόγεια νερά, ενώ οι εκροές αναλύονται σε 37% απώλειες, 30% άντληση και ροή από πηγές, 21% μέση ετήσια παροχή από τα φράγματα και 17% εκτροπές για άρδευση από ποταμούς. Οι εκροές αυτές δημιουργούν ένα μικρό έλλειμμα της τάξης του 5% που προέρχεται από την υπεράντληση ορισμένων υδροφόρων στρωμάτων. Σχηματικά και περιληπτικά φαίνεται το υδατικό ισοζύγιο της Κύπρου στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1: Χάρτης και Φράγματα Κύπρου, (Φράγματα Κύπρου, 2001).



Σχήμα 2.2: Υδατικό Ισοζύγιο Κύπρου, (Υδατική Ανάπτυξη στην Κύπρο, 1996).

2.2 Λεκάνη απορροής Γερμασόγειας Κύπρου

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γερμασόγεια βρίσκεται στη νότια πλευρά του βουνού Τρόδος και διοχετεύεται στη θάλασσα σε ένα σημείο περίπου 5 km ανατολικά της πόλης της Λεμεσού. Διοχετεύει μια έκταση 175 km² που ανέρχεται σε υψόμετρο 1400 m πάνω από την μέση στάθμη της θάλασσας. Περί το 80% της λεκάνης αποτελείται από πυριγενή πετρώματα, αλλοιωμένο βασάλτη και λάβες, ενώ τα κατώτερα στρώματα από ασβεστόλιθο και ίλη.

Ο ετήσιος μέσος όρος κατακρήμνισης πάνω από τη λεκάνη είναι 638 mm, κυμαινόμενος από 450 mm κοντά στην ακτή μέχρι 850 mm στα ορεινά. Η ετήσια μέση απορροή του Γερμασόγεια εκτιμάται σε 22,5 εκατομμύρια m³, 65% της οποίας απαντάται κατά την διάρκεια του χειμώνα. Ο ποταμός είναι συνήθως ξερός κατά τους θερινούς μήνες. Εντός των 5 km από την ακτή, σχηματίζεται μια αμμώδης κοίτη με συγκέντρωση ιλύος σημαντικού πάχους, καθιστώντας την μεγάλης τοπικής σημασίας για την εκμετάλλευση του εδαφικού νερού.

Ένα χωμάτινο φράγμα με αποθηκευτική χωρητικότητα 13,6 εκατομμυρίων m³ κατασκευάστηκε το 1969 αποκόπτοντας τελείως τη ροή στα κατάντη του υπόγειου υδροφορέα. Το φράγμα συγκεντρώνει και αποθηκεύει την απορροή της άνω λεκάνης της Γερμασόγειας, η οποία έχει έκταση 156 km². Το πάχος των αποθέσεων ιλύος κυμαίνεται από 20 m κοντά στο φράγμα μέχρι 30 m λίγο πριν το πολύ μικρό σχηματιζόμενο δέλτα κοντά στην ακτή. Το πλάτος της κοίτης είναι περίπου 250 m κοντά στο φράγμα, εκτεινόμενο μέχρι τα 500 m λίγο πριν το δέλτα και έως 3 km ανοιχτά του δέλτα. Μόνο το πάνω τμήμα του υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιείται για απορρόφηση λόγω της αστικοποίησης του δέλτα.

Στον υπόγειο υδροφορέα αυτόν στηρίχθηκε για πολλά χρόνια η τοπική άρδευση και η υδροδότηση της Λεμεσού και των γειτονικών χωριών. Σήμερα η ροή στον υπόγειο υδροφορέα βασίζεται αποκλειστικά στις περιπτωσιακές ανακουφίσεις και υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα για επαναροή, αφότου το φράγμα ξέκοψε την όποια ροή στα κατάντη του, με μια επιτυχημένη κουρτίνα από τσιμεντοκονίαμα. Ο υπόγειος υδροφορέας ενεργεί τώρα ως μέσον φυσικού φίλτρου του απελευθερωμένου αποταμιευμένου νερού που αντλείται για την υδροδότηση της Λεμεσού και αποτελεί μια επιπρόσθετη αποθηκευμένη ποσότητα η οποία μπορεί να διαχειριστεί σε συνδυασμό με το φράγμα.

Η λήψη νερού από τον υπόγειο υδροφορέα χρησιμοποιείται για να ικανοποιήσει τα 5,6 εκατομμύρια m^3 /έτος των αναγκών της πόλης της Λεμεσού και τα 2,5 εκατομμύρια m^3 /έτος για τις ανάγκες της Γερμασόγειας και των άλλων χωρίων της περιοχής. Μόνο 0,05 εκατομμύρια m^3 /έτος χρησιμοποιούνται για άρδευση. Η απόδοση των αγωγών κυμαίνεται από 80 μέχρι 150 m^3/h , η διαπερατότητα εκτείνεται από 110 έως 150 m/day , ενώ η συγκεκριμένη απόδοση είναι περίπου 20%.

Η αποθηκευτική χωρητικότητα του υπόγειου υδροφορέα μεταξύ φράγματος και παραλιακού δέλτα έχει εκτιμηθεί ότι είναι 6,5 εκατομμύρια m^3 . Υπό τον όρο ότι ο υπόγειος υδροφορέας δεν είναι γεμάτος, θεωρείται ότι κάπου 2,5 εκατομμύρια m^3 /μήνα μπορούν να διηθηθούν και να επαναφορτίσουν τον υπόγειο υδροφορέα εάν ο βαθμός απελευθέρωσης είναι αμετάβλητος. Κάπου 5 εκατομμύρια m^3 μπορούν εκείθεν να αντληθούν από τον υπόγειο υδροφορέα με αφαίρεση από την αποθηκευμένη ποσότητα.

Για κάθε σημαντική εφαρμογή συνδυαστικής χρήσης, η καλή γνώση του διαθέσιμου επιφανειακού νερού και της διαχείρισης του υδατορεύματος είναι απαραίτητη. Στην περίπτωση της μελέτης ένα μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής για την αποτίμηση του επιφανειακού νερού και ένα μαθηματικό μοντέλο του υπογείου νερού για το υδατόρευμα έχουν βαθμονομηθεί και χρησιμοποιηθεί.

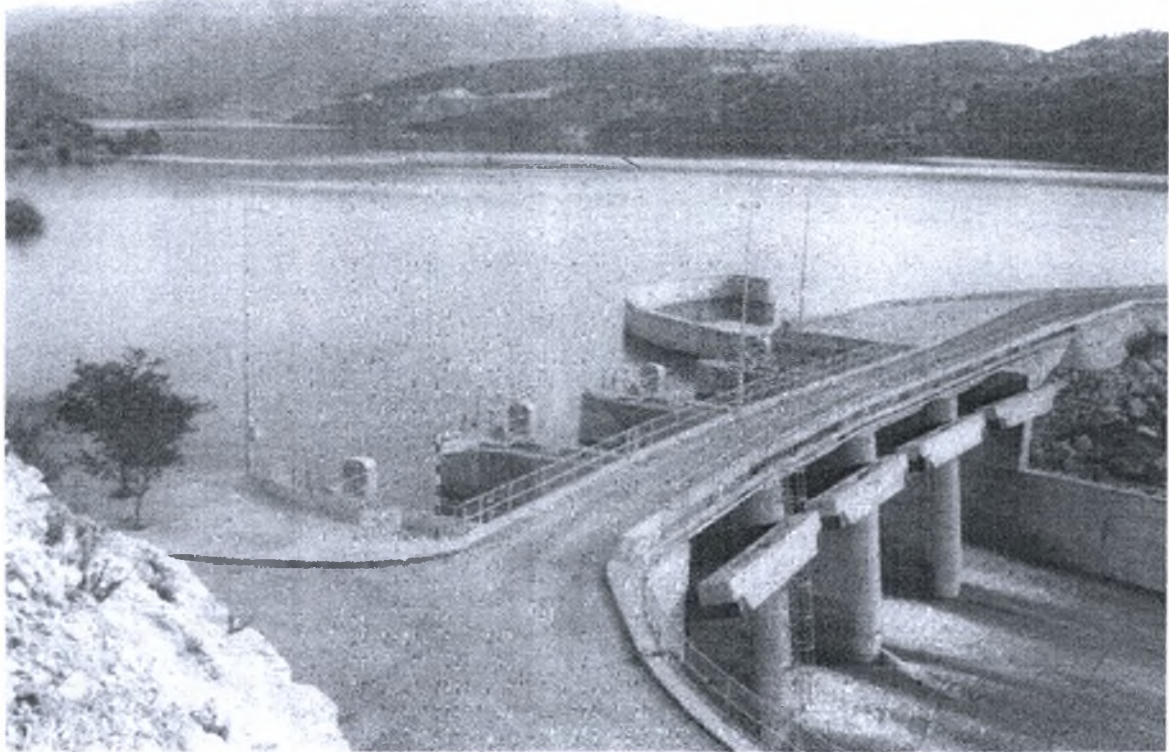
Τα τελευταία 16 χρόνια, κατά την διάρκεια των οποίων έχει εφαρμοσθεί η συνδυαστική χρήση, η ετήσια απόσπαση από το υδατόρευμα αυξήθηκε από 4 σε 9,1 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ενώ η τεχνητή επαναφόρτιση κυμαίνεται από 2 έως 8,8 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά έτος. Οι βαθμοί απελευθέρωσης είναι της τάξεως των 15 με 25 χιλιάδων m^3/d ενώ η εισροή υπογείου νερού στην κυρίως πεδιάδα κυμαίνεται από 18 έως 30 χιλιάδες m^3/d .

2.3 Λεπτομέρειες για το φράγμα Γερμασόγειας Κύπρου

Το φράγμα της Γερμασόγειας Κύπρου (Σχήμα 2.3 και 2.4) βρίσκεται βόρεια της Φοινικάριας αποκόπτοντας την φυσική ροή του ποταμού Γερμασόγεια ο οποίος εκβάλλει ανατολικά της πόλης της Λεμεσού. Η απορροή του ποταμού είναι 22,5 MCM/έτος.

Σκοπός του κατασκευής είναι η τροφοδότηση του τοπικού οικιακού δικτύου, καθώς και η άρδευση της περιοχής του Ακρωτηρίου δυτικά της Λεμεσού. Η περιοχή της λεκάνης

απορροής έχει έκταση 156,7 Km². Ο ταμιευτήρας έχει έκταση 110 εκτάρια και χωρητικότητα 13,6 MCM.



Σχήμα 2.3: Φράγμα Γερμασόγειας Κύπρου, (Φράγματα Κύπρου, 2001)



Σχήμα 2.4: Φράγμα Γερμασόγειας Κύπρου, (Υδατική Ανάπτυξη στην Κύπρο, 1996)

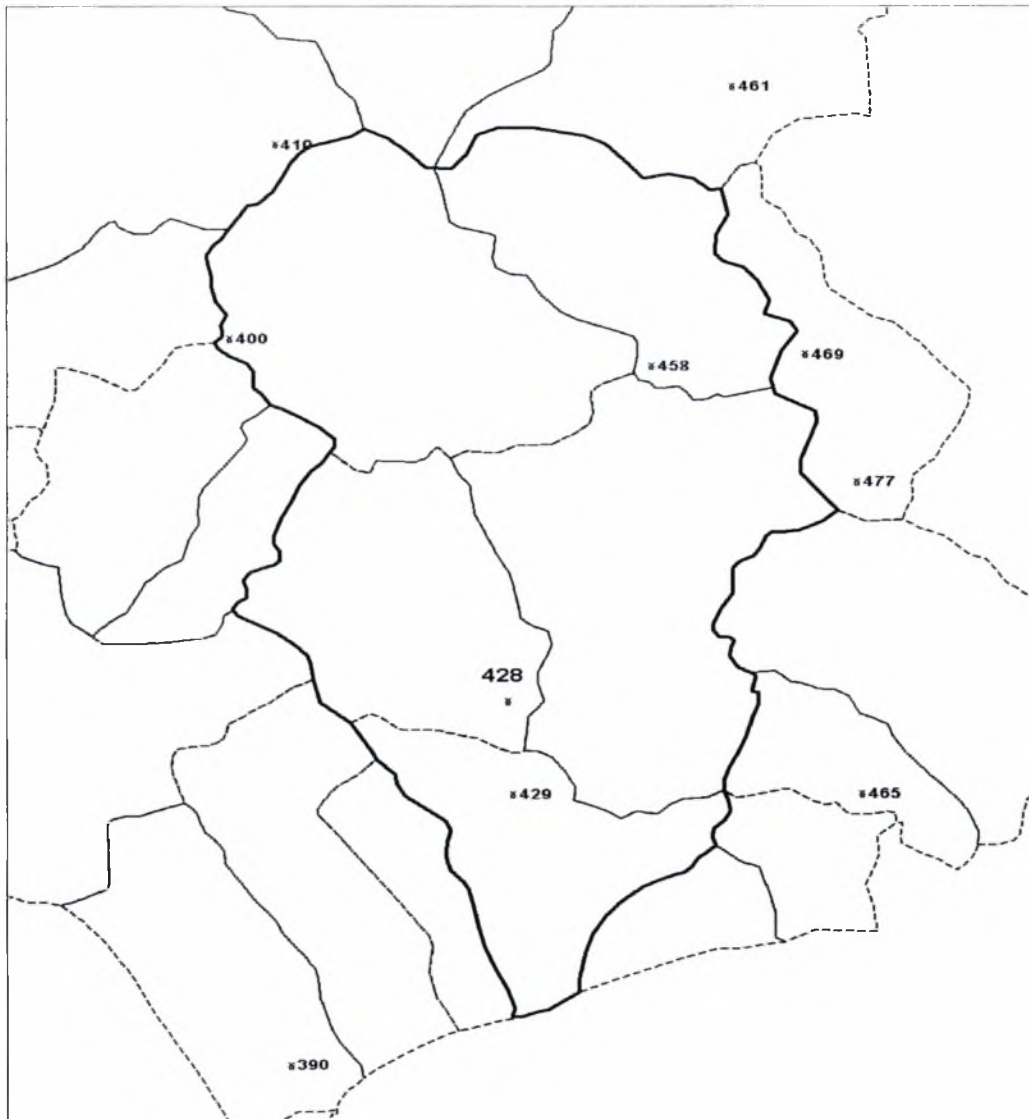
Το ανάχωμα του φράγματος αποτελείται από κεντρικό πυρήνα ιλύος, το ύψος του πάνω από το βυθό του ποταμού είναι 33,52 m και το μήκος του 294,1 m. Ο αγωγός υπερχειλίσης έχει μήκος 115 m, μέγεθος 6,40x36,8 m και χωρητικότητα εκκένωσης 850 m³/sec. Η εκροή γίνεται μέσω χαλύβδινων αγωγών διαμέτρου 0,60 m, μήκους 240 m και χωρητικότητα εκκένωσης 1,95 m³/sec.

2.4 Μετεωρολογικοί και υδρολογικοί σταθμοί της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου

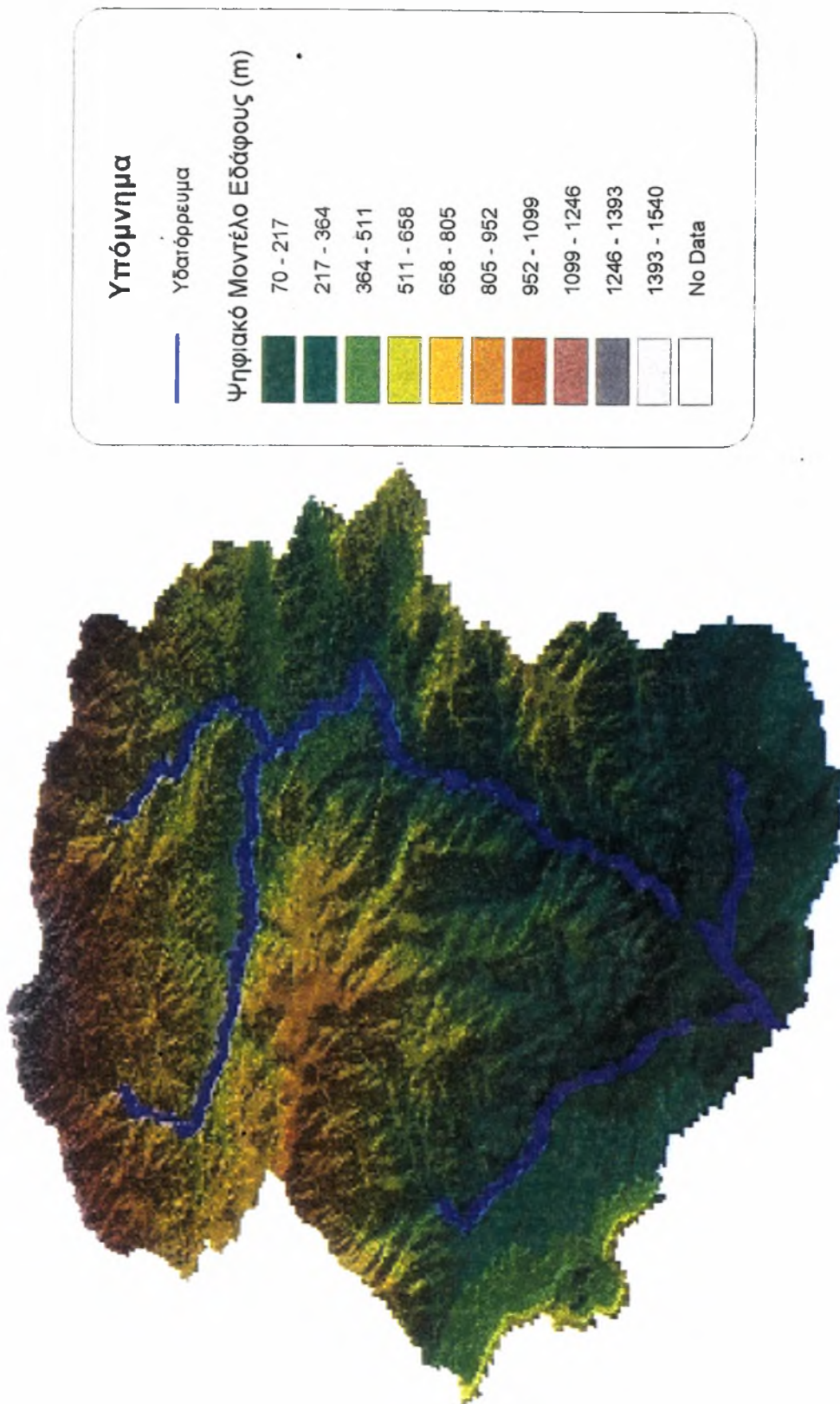
Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου καθώς και οι ακόλουθοι μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή:

- α. Σταθμός 390 (Limassol) με υψόμετρο 12m
- β. Σταθμός 410 (Ay.Theodoros-L/sol) με υψόμετρο 995m
- γ. Σταθμός 428 (Akrounda) με υψόμετρο 100m
- δ. Σταθμός 429 (Yermasoyia) με υψόμετρο 70m
- ε. Σταθμός 461 (Kambi) με υψόμετρο 850m
- ζ. Σταθμός 465 (Parekklisha) με υψόμετρο 145m
- η. Σταθμός 469 (Erhtagonia) με υψόμετρο 500m
- θ. Σταθμός 477 (Kellaki) με υψόμετρο 610m
- ι. Σταθμός 400 (Kalokhorio) με υψόμετρο 740m
- κ. Σταθμός 458 (Arakapas) με υψόμετρο 335m

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης από τους σταθμούς 390 (Limassol), 400 (Kalokhorio), 410 (Ay.Theodoros-L/sol) και 429 (Yermasoyia), και τα δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας από τους σταθμούς 390 (Limassol) και 429 (Yermasoyia). Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι τα δεδομένα ημερήσιας απορροής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από το σταθμό που υπάρχει στην έξοδο της λεκάνης απορροής της Άνω Γερμασόγειας Κύπρου, ανάντι του φράγματος και του ταμιευτήρα της περιοχής.



Σχήμα 2.5: Χάρτης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου



Σχήμα 2.6: Λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου

Κεφάλαιο 3^ο: Υδατικό Ισοζύγιο λεκάνης απορροής

3.1 Υδατικό ισοζύγιο

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου περιγράφει την προφανή συνέπεια της αρχής διατήρησης της μάζας, ότι δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα των διακινήσεων και των μεταβολών αποθήκευσης νερού σε ένα όγκο αναφοράς είναι μηδέν, σε οποιαδήποτε χρονική διάρκεια. Συμβολικά η εξίσωση γράφεται:

$$\Delta S = I - O \quad (3.1)$$

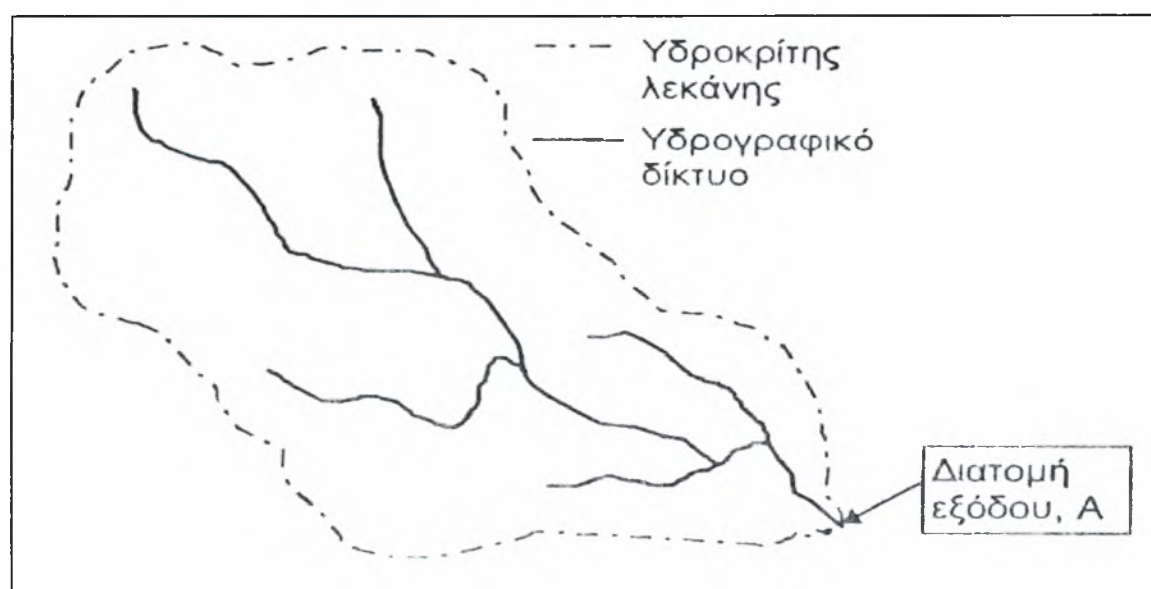
Όπου ΔS η διάφορα της αποθήκευσης νερού στον όγκο αναφοράς στην συγκεκριμένη περίοδο, και I και O οι συνολικές εισροές και εκροές, αντίστοιχα, προς και από τον όγκο αναφοράς για την ίδια περίοδο. Και οι τρεις όροι αναλύονται σε διάφορες συνιστώσες, αλλά η ανάλυση εξαρτάται πάντα από το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς (π.χ. λεκάνη απορροής, τμήμα λεκάνης, υπόγειος υδροφορέας, λίμνη, κτλ.). Πάντως, σε κάθε περίπτωση η εξάτμιση ή η εξατμισοδιαπνοή συγκαταλέγεται πάντα στον όρο O , αφού πρόκειται για υδρολογική απώλεια. Ειδικότερα, σε εδαφικές εκτάσεις στον όρο O υπεισέρχεται πάντα η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και όχι η δυνητική. Οι μέθοδοι αυτοί πρακτικώς εκτιμούν την δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Εξαίρεση αποτελεί κατ' αρχήν η μέθοδος Penman- Monteith, που θεωρητικά μπορεί να εκτιμήσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή αν είναι γνωστή η πραγματική επιφανειακή αντίσταση της φυτοκάλυψης. Ωστόσο η προϋπόθεση αυτή μπορεί να υλοποιηθεί μόνο σε ερευνητικές υπολεκάνες και έτσι στις πραγματικές υδρολογικές εφαρμογές η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.

Κατά συνέπεια, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή εδαφικών επιφανειών στην πράξη μπορεί να εκτιμηθεί με αξιόπιστο τρόπο μόνο από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα για τις υπόλοιπες συνιστώσες του ισοζυγίου. Όμως η προϋπόθεση αυτή μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις εκπληρώνεται, όπως αναλυτικότερα θα δούμε πιο κάτω. Όταν αυτή η προϋπόθεση δεν εκπληρώνεται για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής επιστρατεύονται διάφορα μαθηματικά

μοντέλα του υδρολογικού κύκλου, απλούστερα ή συνθετότερα, ή χρησιμοποιούνται απλές εμπειρικές σχέσεις που έχουν εξαχθεί από λεκάνες με επάρκεια δεδομένων και υδροκλιματικές συνθήκες κατά το δυνατόν όμοιες με αυτές της υπό μελέτης λεκάνης. Οι μεθοδολογίες εκτίμησης διασαφηνίζονται παρακάτω, με την παράθεση των απλούστερων και εύκολα κατανοητών τεχνικών της βασικής υδρολογικής βιβλιογραφίας. Τονίζεται ότι σήμερα διατίθενται και χρησιμοποιούνται στην πράξη πολύ συνθετότερα και ακριβέστερα υδρολογικά μοντέλα.

3.2 Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου απλής υδρολογικής λεκάνης

Για λόγους εύκολης κατανόησης θεωρούμε μια "απλή" υδρολογική λεκάνη, όπου ο χαρακτηρισμός "απλή" αναφέρεται στην μορφολογία και την υδρολογική δίαιτα της λεκάνης, και έχει την έννοια ότι η λεκάνη (α) έχει σχετικά μικρή έκταση και παρουσιάζει σχετική ομοιομορφία τόσο ως προς την τοπογραφία και γεωλογία, όσο και ως προς τις υδροκλιματικές συνθήκες, (β) βρίσκεται σε φυσική κατάσταση, χωρίς αξιόλογα έργα αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού της που να επηρεάζουν την υδρολογική δίαιτα, (γ) δεν έχει αξιόλογους υπόγειους υδροφορείς ούτε παρουσιάζει υπόγειες εισροές ή εκροές από ή προς γειτονικές λεκάνες, (δ) δεν παρουσιάζει αξιόλογες χιονοπτώσεις κατά την διάρκεια του χειμώνα. Μια τέτοια λεκάνη φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα απλής υδρολογικής λεκάνης, (Κουτσογιάννης, 1999).

Θεωρούμε ότι ο όγκος αναφοράς ορίζεται προς τα πάνω από την επιφάνεια της λεκάνης, πλευρικά από μια κατακόρυφη κυλινδρική επιφάνεια γύρω από τον υδροκρίτη της λεκάνης, και προς τα κάτω από ένα οριζόντιο επίπεδο αρκετά χαμηλότερα από την επιφάνεια της λεκάνης. Η μοναδική εισροή στο συγκεκριμένο όγκο αναφοράς είναι η βροχόπτωση P , ενώ η εκροή έχει δυο συνιστώσες: την (πραγματική) εξατμισοδιαπνοή ET_a και την επιφανειακή απορροή Q , η οποία εξέρχεται από την διατομή της εξόδου A . Η μοναδική αποθήκευση νερού στον όγκο αναφοράς είναι η αποθήκευση στο έδαφος, υπό μορφή εδαφικής υγρασίας, την οποία συμβολίζουμε με S . Σημειώνουμε ότι η προσωρινή αποθήκευση νερού υπό μορφή εδαφικής υγρασίας έχει πάντα σημαντικό ρόλο τόσο από πλευράς υδρολογίας όσο και για τις ζωτικές λειτουργίες της χλωρίδας, και δεν μπορεί να αγνοηθεί στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, ακόμα και στην απλή περίπτωση που εξετάζεται στη παρούσα διπλωματική, όπου δεν έχουμε ανάπτυξη αξιόλογων υπόγειων υδροφορέων.

Με αυτά τα δεδομένα, η εξίσωση ισοζυγίου για τον συγκεκριμένο όγκο αναφοράς γράφεται:

$$\Delta S = P - ET_a - Q \quad (3.2)$$

Από αυτούς τους τέσσερις όρους της εξίσωσης μπορεί να μετρηθεί εύκολα ο όρος P και κάπως δυσκολότερα ο όρος Q . Κατά συνέπεια, υπάρχουν, στην καλύτερη περίπτωση (δηλαδή όταν είναι γνωστά τα P και Q) δυο άγνωστοι ($\Delta S, ET_a$) οι οποίοι προφανώς δεν μπορούν να υπολογιστούν από μια εξίσωση. Ωστόσο, στην ειδική αλλά πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση όπου η περίοδος που μας ενδιαφέρει είναι ένα ή περισσότερα έτη, μπορούμε ευλόγως να υποθέσουμε ότι $\Delta S = 0$, δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις S έχουν εποχιακό χαρακτήρα. Σε αυτή την ειδική περίπτωση, μπορούμε να υπολογίσουμε την ετήσια ή υπερετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή με εφαρμογή της προηγούμενης σχέσης, δηλαδή:

$$ET_a = P - Q \quad (3.3)$$

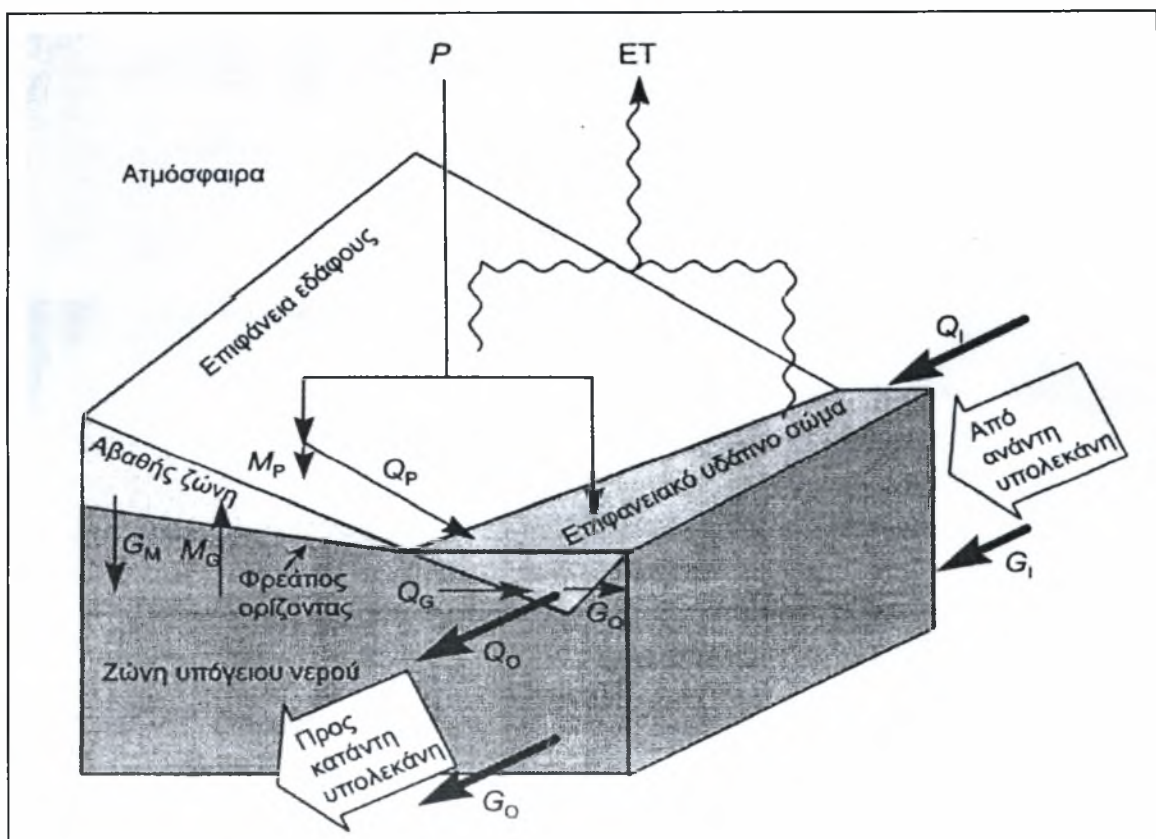
Αν μας ενδιαφέρει μικρότερη περίοδος, όπως παραδείγματος χάριν μηνιαία στη παρούσα διπλωματική εργασία, τότε θα πρέπει να καταφύγουμε στη χρήση μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών (μοντέλα υδατικού ισοζυγίου).

3.3 Οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μια λεπτομερή εικόνα του υδατικού ισοζυγίου μιας λεκάνης απορροής, επικεντρώνοντας στον τρόπο με τον οποίο συμμετέχουν σε αυτό τα υπόγεια νερά.

3.3.1 Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες ισοζυγίου

Για να γραφεί μια εξίσωση ισοζυγίου θα πρέπει προηγουμένως να καθοριστούν με ακρίβεια (α) ο όγκος αναφοράς, στον οποίο αφορά, (β) η χρονική κλίμακα (ή το χρονικό βήμα) μελέτης, (γ) οι φυσικές διαδικασίες (είσοδοι και έξοδοι) στον όγκο αναφοράς αυτό, (δ) οι τεχνητές απολήψεις από τον όγκο αναφοράς και οι επιστροφές προς αυτόν, και (ε) τα μεγέθη της μεταβλητής αποθήκευσης στον όγκο αναφοράς και τη χρονική κλίμακα που έχουν επιλεγεί.



Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου, (Κουτσογιάννης, 1999).

Όγκοι αναφοράς. Κατά μήκος ενός υδατορεύματος, θεωρούμε δύο διαδοχικές διατομές οι οποίες ορίζουν τις αντίστοιχες λεκάνες. Επικεντρώνουμε την προσοχή μας στο ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ των δύο υπολεκανών, το οποίο παριστάνεται, εντελώς σχηματικά, στο Σχήμα 3.2.

Στο Σχήμα 3.2 διακρίνονται τρεις βασικοί όγκοι αναφοράς: (α) τα *επιφανειακά υδάτινα σώματα* (ποτάμιο δίκτυο, λίμνες), (β) την *αβαθή ζώνη*, δηλαδή την εδαφική ζώνη που περιέχει νερό με πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής, και (γ) τη *ζώνη υπόγειου νερού* (υπόγειοι υδροφορείς), που περιέχει νερό σε συνθήκες κορεσμού και με πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Χαρακτηριστική διεπιφάνεια μεταξύ της αβαθούς ζώνης και της ζώνης υπόγειου νερού είναι ο φρεάτιος ορίζοντας.

Ο συνολικός όγκος αναφοράς, ο οποίος συμπεριλαμβάνει και τους τρεις επί μέρους όγκους, αποτελεί ένα ανοικτό σύστημα, το οποίο επικοινωνεί με γειτονικά συστήματα και συγκεκριμένα (α) με την ατμόσφαιρα, (β) με το ανάντη τμήμα της λεκάνης (εφόσον υπάρχει τέτοιο) και (γ) με το κατάντη τμήμα της λεκάνης ή τον αποδέκτη της λεκάνης. Χαρακτηριστικές διεπιφάνειες μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων είναι το έδαφος (διεπιφάνεια μεταξύ αβαθούς ζώνης και ατμόσφαιρας) και οι κατακόρυφες παρειές μεταξύ του υπό εξέταση συστήματος και των ανάντη και κατάντη τμημάτων λεκάνης. Το κάτω όριο του όγκου αναφοράς έχει καθοριστεί σε αρκετά μεγάλο βάθος, ώστε η υπόγεια ροή κάτω από αυτό να είναι αμελητέα.

Διακινήσεις. Οι φυσικές εισοδοι και έξοδοι σε όλους τους επί μέρους όγκους αναφοράς του συστήματος που εξετάζουμε (διακινήσεις νερού από μια ζώνη σε άλλη) φαίνονται στο Σχήμα 3.2 και διευκρινίζονται στον Πίνακα 3.1. Ο συμβολισμός που ακολουθείται γενικά βασίζεται στα σύμβολα Q , M και G , τα οποία συμβολίζουν ποσότητες νερού που εισρέουν στα επιφανειακά υδάτινα σώματα, την αβαθή ζώνη και τη ζώνη υπόγειου νερού, αντίστοιχα. Τα ίδια σύμβολα, όταν χρησιμοποιούνται ως δείκτες δείχνουν την προέλευση της κάθε διακίνησης νερού. Επί πλέον, χρησιμοποιούνται ως δείκτες τα σύμβολα I και O για να δείξουν τη διακίνηση από το ανάντη τμήμα λεκάνης και προς το κατάντη τμήμα λεκάνης αντίστοιχα. Στις εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου οι διακινήσεις εκφράζονται σαν ισοδύναμα ύψη νερού ή ως όγκοι. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διακινήσεις που σχετίζονται με τη ζώνη υπόγειου νερού:

1. Η *επαναφόρτιση* των υδροφορέων από την αβαθή ζώνη, G_M , πραγματοποιείται με το μηχανισμό της βαθιάς διήθησης.

2. Η επαναφόρτιση των υδροφορέων από τα επιφανειακά υδάτινα σώματα, G_Q , πραγματοποιείται σε περιοχές όπου, στη διεπιφάνεια του επιφανειακού υδάτινου σώματος με τον υπόγειο υδροφορέα, η πίεση προς την πλευρά του πρώτου είναι μεγαλύτερη από αυτήν προς την πλευρά του τελευταίου. Σημειώνεται ότι, πολύ συχνά, ένα επιφανειακό υδάτινο σώμα βρίσκεται πάνω από την αβαθή ζώνη και δεν υπάρχει άμεση διεπιφάνεια με τον υπόγειο υδροφορέα. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι προφανές ότι υπάρχει θετική διαφορά πίεσης μεταξύ επιφανειακού υδάτινου σώματος και υπόβαθρου, αλλά η επαναφόρτιση γίνεται έμμεσα, αφού μεσολαβήσει μια φάση κίνησης του νερού σε συνθήκες ακόρεστης ροής στην αβαθή ζώνη.
3. Η εκφόρτιση υδροφορέων, Q_G , διακίνηση αντίστροφη της G_Q , πραγματοποιείται σε περιοχές όπου υπάρχει αρνητική διαφορά πίεσης μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του σε επαφή υδροφορέα. Συχνά η εκφόρτιση ενός υπόγειου υδροφορέα δεν γίνεται σε ήδη σχηματισμένο επιφανειακό υδάτινο σώμα αλλά στο έδαφος (πηγή νερού), οπότε και είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό του επιφανειακού υδάτινου σώματος στη θέση της πηγής.
4. Η τριχοειδής ανύψωση, M_G , αποσπά νερό από τους υδροφορείς, μεταφέροντας το προς τα πάνω, στην αβαθή ζώνη, με το μηχανισμό των δυνάμεων τριχοειδούς.
5. Η υπόγεια εισροή, G_I , αποτελεί την τροφοδοσία του τμήματος λεκάνης που εξετάζεται από ανάντη υδροφορείς, οι οποίοι βρίσκονται σε συνθήκες μεγαλύτερης πίεσης. Η διακίνηση αυτή μπορεί να υπάρχει ακόμη και αν το τμήμα λεκάνης αποτελεί ολόκληρη επιφανειακή υπολεκάνη, με την έννοια ότι το ανάντη όριο του είναι ο υδροκρίτης της λεκάνης. Σε αυτή την περίπτωση το αντίστοιχο μέγεθος της επιφανειακής Q_I είναι μηδενικό, αλλά το G_I δεν είναι απαραίτητα μηδενικό, δεδομένου ότι ο υδροκρίτης της υπόγειας υπολεκάνης δεν ταυτίζεται πάντα με αυτόν της επιφανειακής.
6. Η υπόγεια εκροή, G_O , αποτελεί την τροφοδοσία του τμήματος λεκάνης που εξετάζεται προς κατάντη υδροφορείς, οι οποίοι βρίσκονται σε συνθήκες χαμηλότερης πίεσης, ή ακόμη και προς τη θάλασσα.

Πίνακας 3.1: Ανάλυση και συσχετισμός των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου.

<u>Σύμβολο</u>	<u>Ονομασία</u>	<u>Προορισμός</u>	<u>Προέλευση</u>
P	Κατακρημνίσματα	Ατμόσφαιρα	Έδαφος, επιφ. υδάτινα σώματα
ET_a	Εξατμισοδιαπνοή	Έδαφος, επιφ. υδάτινα σώματα, φυτά	Ατμόσφαιρα
M_p	Διήθηση	Έδαφος	Αβαθής ζώνη
M_G	Τριχοειδής ανύψωση	Υπόγειοι υδροφορείς	Αβαθής ζώνη
Q_i	Επιφανειακή εισροή	Ανάντη επιφ. υδάτινα σώματα	Επιφ. υδάτινα σώματα
Q_o	Επιφανειακή εκροή	Επιφ. υδάτινα σώματα	Κατάντη επιφ. υδάτινα σώματα
Q_p	Άμεση απορροή	Έδαφος	Επιφ. υδάτινα σώματα
Q_G	Εκφόρτιση υδροφορέων	Υπόγειοι υδροφορείς	Επιφ. υδάτινα σώματα
G_i	Υπόγεια εισροή	Ανάντη υπόγειοι υδροφορείς	Υπόγειοι υδροφορείς
G_o	Υπόγεια εκροή	Υπόγειοι υδροφορείς	Κατάντη υπόγειοι υδροφορείς
G_M	Επαναφόρτιση από έδαφος	Αβαθής ζώνη	Υπόγειοι υδροφορείς
G_Q	Επαναφόρτιση από επιφ. υδάτινα σώματα	Επιφ. υδάτινα σώματα	Υπόγειοι υδροφορείς

Τεχνητές απολήψεις και επιστροφές. Πρόκειται για ανθρώπινες παρεμβάσεις στο φυσικό υδατικό σύστημα. Οι απολήψεις νερού γίνονται για την κάλυψη συγκεκριμένων υδατικών αναγκών (π.χ., άρδευση, ύδρευση κτλ.). Οι επιστροφές νερού περιλαμβάνουν ένα τμήμα των απολήψεων που αποδίδεται πάλι στο φυσικό υδατικό σύστημα (π.χ., στραγγίσματα αρδευτικού νερού). Οι χρήσεις του νερού διακρίνονται σε *καταναλωτικές* και σε *μη καταναλωτικές*. Στις μη καταναλωτικές χρήσεις οι επιστροφές είναι ίσες με τις απολήψεις και, για αυτό μπορούν να παραλειφθούν κατά τη σύνταξη του ισοζυγίου.

Αποθηκεύσεις. Αποθήκευση νερού γίνεται κατά αρχήν και στους τρεις επί μέρους όγκους αναφοράς που προαναφέρθηκαν. Στην πραγματικότητα στο ισοζύγιο δεν ενδιαφέρει το απόλυτο μέγεθος της αποθήκευσης αλλά η διαφορά ΔS στην αρχή και το τέλος του χρονικού βήματος που εξετάζεται. Η σημαντικότητα των αποθηκεύσεων στο ισοζύγιο εξαρτάται σαφώς από τη χρονική κλίμακα μελέτης και συγκεκριμένα:

1. Η αποθήκευση των επιφανειακών σωμάτων ΔS_Q περιλαμβάνει δύο συνιστώσες: την αποθήκευση στο ποτάμιο σύστημα και την αποθήκευση στις φυσικές λίμνες και τους τεχνητούς ταμιευτήρες. Η πρώτη είναι σημαντική στην ωριαία ή την ημερήσια κλίμακα (σε μεγάλα ποτάμια, π.χ. στο Νείλο, ακόμη και στη μηνιαία), αλλά είναι αμελητέα σε μεγαλύτερες κλίμακες. Η δεύτερη είναι σημαντική σε μηνιαία, ετήσια ή ακόμα και υπερετήσια κλίμακα, ανάλογα με την αποθηκευτική ικανότητα των λιμνών ή ταμιευτήρων.
2. Η αποθήκευση της αβαθούς ζώνης ΔS_M είναι σημαντική σε μηνιαία κλίμακα και μη σημαντική σε ετήσια ή μεγαλύτερη κλίμακα.
3. Η αποθήκευση της ζώνης υπόγειου νερού ΔS_G είναι σημαντική σε ετήσια ή και υπερετήσια κλίμακα, ανάλογα με το μέγεθος, την μεταφορικότητα και την αποθηκευτικότητα των υδροφορέων

3.3.2 Εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου

Για τις εξισώσεις ισοζυγίου που θα αναπτυχθεί σε αυτό το εδάφιο θα γίνουν δύο βασικές παραδοχές: (α) η χρονική κλίμακα μελέτης είναι υπερετήσια, και πάντως μεγαλύτερη από το μέσο χρόνο παραμονής του νερού στους υπόγειους υδροφορείς, και (β) δεν υπάρχουν σημαντικές ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο φυσικό υδατικό σύστημα. Η πρώτη παραδοχή μας επιτρέπει να αγνοήσουμε τις αποθηκεύσεις στο σύστημα και η δεύτερη καθιστά

αμελητέες τις απολήψεις και επιστροφές. Επομένως, οι εξισώσεις που θα αναπτυχθούν περιλαμβάνουν μόνο τις φυσικές διακινήσεις νερού.

Θεωρώντας ως όγκο αναφοράς το συνολικό σύστημα του Σχήματος 3.2 και κάτω από τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν, μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου ως :

$$(P + Q_l + G_l) - (E + Q_o + G_o) = 0 \quad (3.4)$$

ή ισοδύναμα

$$(P - E) - (Q_o - Q_l) - (G_o - G_l) = 0 \quad (3.5)$$

Με τις ίδιες συνθήκες και για όγκο αναφοράς που ταυτίζεται με τη ζώνη υπόγειου νερού, η εξίσωση ισοζυγίου γράφεται:

$$(G_M + G_o + G_l) - (M_G + Q_G + G_o) = 0 \quad (3.6)$$

3.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη υπόγειας απορροής

Παρακάτω αξιοποιούνται οι εξισώσεις ισοζυγίου (3.4)-(3.6), προκειμένου να οριστούν ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της επιφανειακής, υπόγειας και συνολικής απορροής καθώς και οι σχέσεις ανάμεσα στα μεγέθη αυτά (οι ορισμοί των μεγεθών βασίζονται κυρίως στον Dingman, 1994, χωρίς όμως να ταυτίζονται).

1. Καθαρή επαναφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων

Ορίζεται ως:

$$G_N = G_M + G_Q + M_G \quad (3.7)$$

και αναφέρεται επίσης στην ελληνική υδρογεωλογική βιβλιογραφία ως κατεΐσδυση. Περιγράφει ποσοτικά το φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς. Χρησιμοποιώντας την καθαρή επαναφόρτιση όπως ορίζεται στην εξίσωση (3.7), η εξίσωση ισοζυγίου για την ζώνη υπόγειου νερού απλοποιείται και γράφεται:

$$(G_N - Q_G) - (G_o - G_l) = 0 \quad (3.8)$$

2. Συνολική φυσική υδρολογική παραγωγή

Περιγράφει την ποσότητα νερού που πραγματικά έχει παραχθεί στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς. Ορίζεται ως η διαφορά εισροών και εκροών στις διατομές εισόδου και εξόδου του εξεταζόμενου όγκου αναφοράς, ήτοι:

$$\Pi = (Q_o - Q_l) + (G_o - G_l) \quad (3.9)$$

Λόγω της (3.5) έχει την ισοδύναμη έκφραση:

$$\Pi = P - E \quad (3.10)$$

Η συνολική υδρολογική παραγωγή αναλύεται καταρχήν σε δύο όρους, τον όρο επιφανειακής απορροής Π'_Q και τον όρο υπόγειας ροής Π'_G , όπου:

$$\Pi'_Q = Q_o - Q_l \quad (3.11)$$

$$\Pi'_G = G_o - G_l \quad (3.12)$$

$$\Pi = \Pi'_Q + \Pi'_G \quad (3.13)$$

Παρατηρούμε ότι οι δύο αυτοί όροι δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικοί δείκτες των ποσοτήτων των επιφανειακών και υπόγειων νερών που παράγονται στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από το γεγονός ότι οι όροι αυτοί μπορούν να πάρουν και αρνητικές τιμές ενώ ασφαλώς σε κάθε περίπτωση η συνολική υδρολογική παραγωγή είναι θετική. Έτσι, ο όρος επιφανειακής απορροής μπορεί να γίνει αρνητικός αν υπάρχουν σημαντικές επαναφορτίσεις υπογείων υδροφορέων από επιφανειακά υδάτινα σώματα. Αντίστοιχα ο όρος υπόγειας απορροής μπορεί να γίνει αρνητικός αν υπάρχει σημαντική εκφόρτιση υδροφορέων στο εξεταζόμενο τμήμα της λεκάνης. Για τους λόγους αυτούς οι φυσικές παραγωγές επιφανειακού και υπόγειου νερού δεν ταυτίζονται με τα μεγέθη Π'_Q και Π'_G , αντίστοιχα, αλλά ορίζονται με διαφορετικό τρόπο, όπως φαίνεται αμέσως πιο κάτω.

3. Φυσική παραγωγή επιφανειακού νερού

Περιγράφει την ποσότητα επιφανειακής απορροής που πραγματικά έχει παραχθεί στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς και ορίζεται ως:

$$\Pi_Q = (Q_o - Q_l) + G_Q = \Pi'_Q + G_Q \quad (3.14)$$

4. Φυσική παραγωγή υπόγειου νερού

Περιγράφει την ποσότητα υπόγειας απορροής που πραγματικά έχει παραχθεί στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς και ορίζεται ως:

$$\Pi_G = (G_o - G_l) + Q_G = \Pi'_G + Q_G \quad (3.15)$$

Παρατηρούμε ότι λόγω της (3.8) η φυσική παραγωγή υπόγειου νερού ταυτίζεται με την καθαρή επαναφόρτιση, ήτοι:

$$\Pi_G = G_N \quad (3.16)$$

Επίσης, το άθροισμα των παραγωγών επιφανειακού και υπόγειου νερού δεν ταυτίζεται με την συνολική υδρολογική παραγωγή, αλλά την υπερβαίνει, ήτοι:

$$\Pi_G + \Pi_Q = \Pi + Q_G + G_Q \geq \Pi \quad (3.17)$$

Αυτή η φαινομενική ασυμφωνία αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι ένα τμήμα της απορροής, το $Q_G + G_Q$, έχει υπάρξει σε ένα χρονικό διάστημα (ή σε μια περιοχή) ως υπόγειο νερό και σε ένα άλλο διάστημα (ή περιοχή) ως επιφανειακό νερό.

5. Δείκτες σχετικής φυσικής παραγωγής

Οι δείκτες αυτοί είναι αδιάστατα μεγέθη που εκφράζουν τους λόγους των επί μέρους φυσικών παραγωγών προς τη συνολική υδρολογική παραγωγή. Ορίζονται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\pi'_Q = \frac{\Pi'_Q}{\Pi} \quad (3.18)$$

$$\pi_Q = \frac{\Pi_Q}{\Pi} \quad (3.19)$$

$$\pi'_G = \frac{\Pi'_G}{\Pi} \quad (3.20)$$

$$\pi_G = \frac{\Pi_G}{\Pi} \quad (3.21)$$

όπου προφανώς ισχύει:

$$\pi'_Q + \pi'_G = 1 \quad (3.22)$$

$$\pi_Q + \pi_G \geq 1 \quad (3.23)$$

6. Συντελεστές απορροής

Οι συντελεστές αυτοί είναι επίσης αδιάστατα μεγέθη που εκφράζουν τους λόγους της συνολικής και των επί μέρους φυσικών παραγωγών προς τον όγκο των κατακρημνισμάτων στον εξεταζόμενο όγκο αναφοράς. Ορίζονται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\psi = \frac{\Pi_Q}{P} \quad (3.24)$$

$$\psi'_Q = \frac{\Pi'_Q}{P} \quad (3.25)$$

$$\psi_Q = \frac{\Pi_Q}{P} \quad (3.26)$$

$$\psi'_G = \frac{\Pi'_G}{P} \quad (3.27)$$

$$\psi_G = \frac{\Pi_G}{P} \quad (3.28)$$

όπου προφανώς ισχύει:

$$\psi'_Q + \psi'_G = \psi \quad (3.29)$$

$$\psi_Q + \psi_G \geq \psi \quad (3.30)$$

Είναι προφανές ότι οι εξισώσεις ισοζυγίου (3.4)-(3.6) δεν αρκούν για την εκτίμηση όλων των διακινήσεων νερού που υπεισέρχονται σε αυτό. Απλώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση μιας ή δύο συνιστωσών, όταν είναι γνωστές οι υπόλοιπες. Όπως είναι γνωστό, τα κατακρημνίσματα και η επιφανειακή απορροή μπορούν να μετρηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με τις υπόλοιπες συνιστώσες. Έτσι, η ακριβής γνώση του συνόλου των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου, απαιτεί το συνδυασμό μετρήσεων, μαθηματικών μοντέλων, εμπειρικών τεχνικών, εμπειρίας και κρίσης μηχανικού.

Κεφάλαιο 4^ο: Μέθοδοι εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης

4.1 Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα

Από όλες τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις τη σημαντικότερη θέση για την Τεχνική Υδρολογία κατέχουν οι μετρήσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα η βροχόπτωση και το χιόνι έχουν άμεση επίπτωση στο υδατικό ισοζύγιο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μέτρηση και η ανάλυση των βροχομετρικών παρατηρήσεων για τις υδρολογικές μελέτες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό των έργων αξιοποίησης και προστασίας των υδατικών πόρων.

4.1.1 Μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

Για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα με διαφορετικούς στόχους:

- (α) Απλή παρατήρηση (π.χ. βροχόμετρο)
- (β) Μηχανική αυτόματη καταγραφή (π.χ. βροχογράφος)
- (γ) Ηλεκτρονική καταχώρηση (αισθητές- data loggers και λήψη στοιχείων σε μεγάλα χρονικά διαστήματα).
- (δ) Σύγχρονη καταχώρηση και τηλεμετάδοση (αισθητές και τηλεμετάδοση σε κεντρικούς Η/Υ).

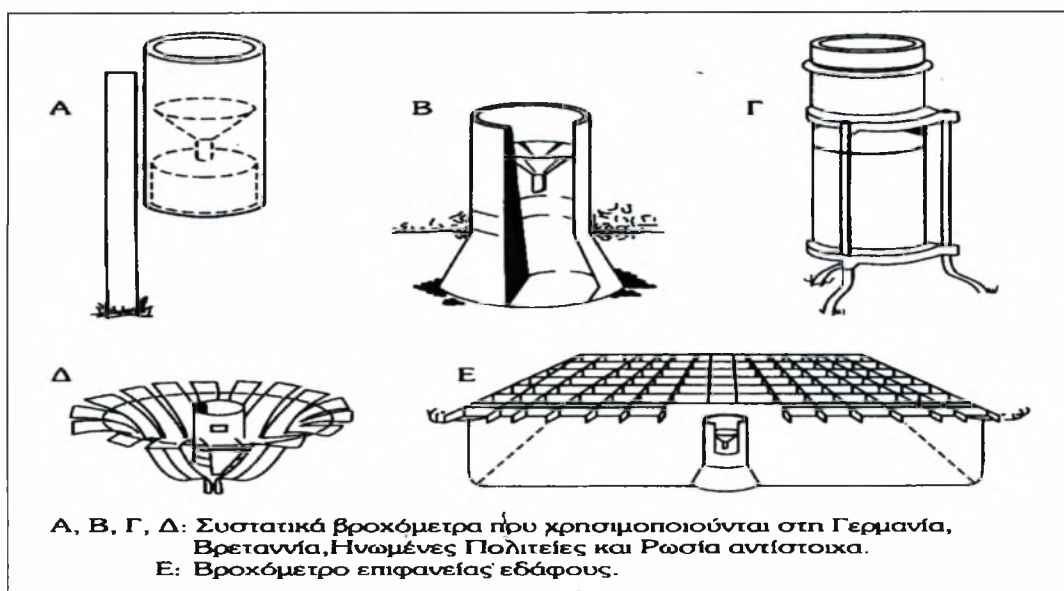
Τα κύρια όργανα μέτρησης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι:

- (α) Βροχόμετρα
- (β) Βροχογράφοι
- (γ) Ραντάρ
- (δ) Δορυφόροι

Το *βροχόμετρο* είναι μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο με στόμιο στο επάνω μέρος για την εισδοχή των κατακρημνισμάτων. Η επιφάνεια του στομίου

κυμαίνεται από 200-500 cm^2 . Μέσα στο βροχόμετρο υπάρχει ειδικά κατασκευασμένο μικρότερο δοχείο συλλογής, όπου τα κατακρημνίσματα οδηγούνται δια μέσου χοάνης. Το όργανο τοποθετείται κατακόρυφα στην επιφάνεια του εδάφους και οι αναγνώσεις γίνονται σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση. Το ύψος των κατακρημνισμάτων μεταξύ δύο διαδοχικών αναγνώσεων είναι θεωρητικά ίσο με το λόγο του όγκου του νερού στο δοχείο συλλογής δια της επιφάνειας του στομίου. Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται ειδικοί υάλινοι ογκομετρικοί σωλήνες, προσαρμοσμένοι συνήθως μέσα στο βροχόμετρο που δίνουν το ύψος με απλή ανάγνωση της κλίμακας τους. Σε πολλές περιπτώσεις για κάθε mm βροχής αντιστοιχεί 1 cm στην κλίμακα του σωλήνα ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ακρίβεια.

Τα βροχόμετρα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες χώρες έχουν συνήθως διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 4.1). Όλα όμως τα όργανα, ανεξαρτήτως χαρακτηριστικών, μετρούν το ύψος των κατακρημνισμάτων με ορισμένο σφάλμα το οποίο σε ετήσια βάση κυμαίνεται από 2-20% για τη βροχή και μέχρι 50% για το χιόνι (Seymour, 1986). Για τη μείωση του σφάλματος που αναφέρθηκε λαμβάνονται διάφορα μέτρα και μεταξύ αυτών η χρήση βροχομέτρων επιφανείας εδάφους, καθώς και η χρήση αλεξήνεμου γύρω από το όργανο, είναι από τα πιο σημαντικά. Πάντως παρά τα μέτρα που λαμβάνονται, το ύψος των κατακρημνισμάτων που συλλέγει το βροχόμετρο είναι διαφορετικό από εκείνο που θα έφθανε στην συγκεκριμένη θέση της επιφανείας του εδάφους αν το όργανο δεν ήταν τοποθετημένο εκεί.



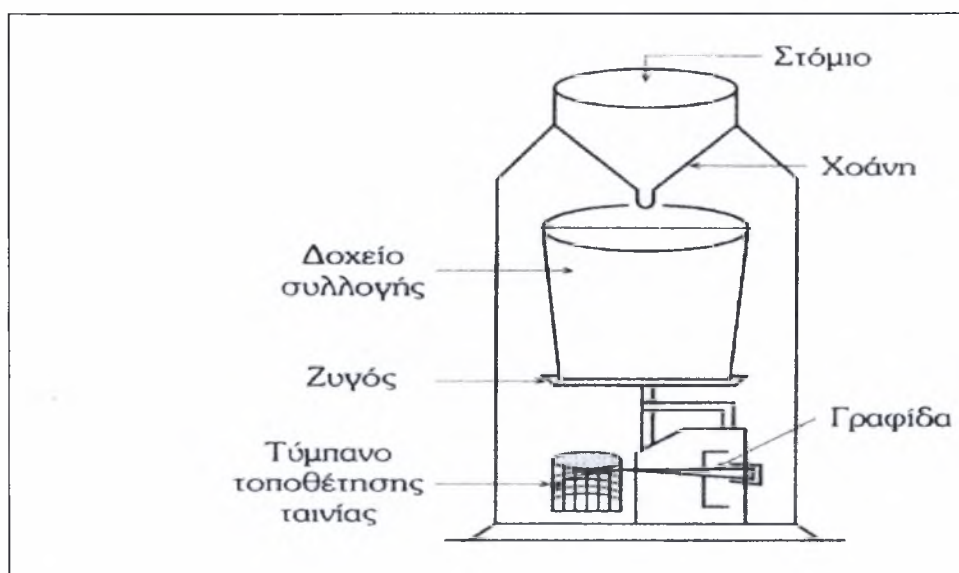
Σχήμα 4.1: Τύποι βροχομέτρων, (Τσακίρης, 1995)

Το γεγονός ότι το βροχόμετρο δεν παρέχει πληροφορίες για την κατανομή των κατακρημισμάτων με το χρόνο, οδήγησε τους τεχνικούς στην κατασκευή του βροχογράφου ή αυτογραφικού βροχόμετρου. Το όργανο αυτό, εκτός από το συνολικό ύψος κατακρημισμάτων, παρέχει και τις παραπάνω πληροφορίες. Αυτές καταγράφονται σε ειδικά διαβαθμισμένη ταινία, τοποθετημένη γύρω από μεταλλικό τύμπανο που περιστρέφεται με ωρολογιακό μηχανισμό ή ηλεκτρική ενέργεια. Οι κύριοι τύποι βροχογράφων είναι:

(α) Βροχογράφος με πλωτήρα (Hellman type).

(β) Βροχογράφος ανατρεπόμενου κάδου (Tipping bucket type).

(γ) Βροχογράφος ζυγού (Weighting type). Ο βροχογράφος αυτός βασίζεται στο ζύγισμα



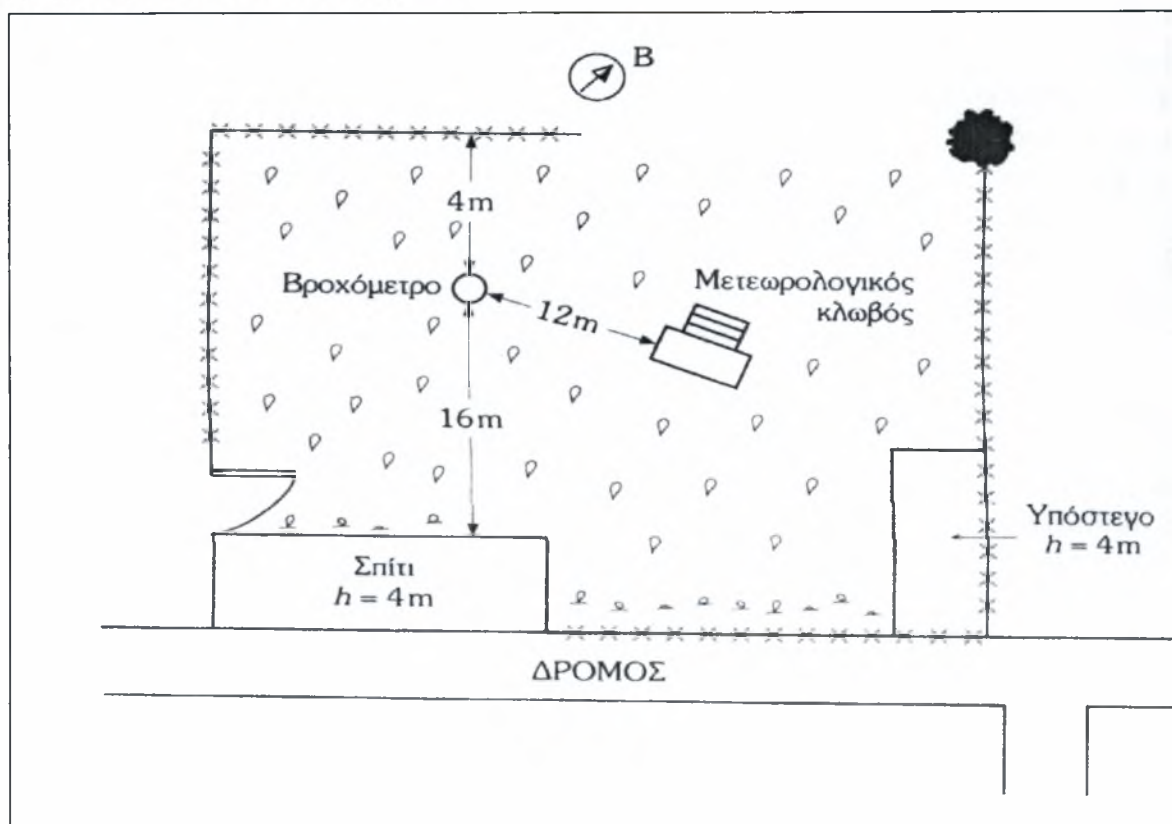
Σχήμα 4.2: Τομή βροχογράφου τύπου ζυγού (Weighting type), (Τσακίρης, 1995).

του νερού που αποθηκεύεται και με ειδικό μηχανισμό καταγράφει το βάρος στην ταινία του κυλίνδρου που περιστρέφεται (Σχήμα 4.2).

Τα βροχόμετρα και οι βροχογράφοι μετρούν το ύψος των κατακρημισμάτων, μόνο στα σημεία που είναι τοποθετημένα, ενώ στην πράξη μας ενδιαφέρει το ύψος αυτών σε μία ευρεία περιοχή. Το ύψος αυτό εκτιμάται με διάφορους μεθόδους από τα όργανα που είναι τοποθετημένα στις διάφορες θέσεις και η ακρίβεια εκτίμησης εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των οργάνων ή διαφορετικά από την πυκνότητα του βροχομετρικού δικτύου. Όμως πυκνό βροχομετρικό δίκτυο σημαίνει και μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει προσπάθειες για την κάλυψη της εικόνας των κατακρημισμάτων από ένα μόνο όργανο με τη χρήση ραντάρ ή ακόμα και με τη βοήθεια δορυφόρων.

4.1.2 Βροχομετρικοί σταθμοί

Για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων πέρα από τα όργανα που είναι απαραίτητα πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλες εκείνες συνθήκες που να επιτρέπουν την μέτρηση με την απαιτούμενη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό τα όργανα μέτρησης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις ειδικά διαμορφωμένες και περιφραγμένες που ονομάζονται βροχομετρικοί σταθμοί. Ένας βροχομετρικός σταθμός μπορεί να έχει βροχόμετρο ή βροχογράφο ή και τα δύο. Γενικά δεν τοποθετείται σε κεκλιμένο έδαφος και καλύπτεται με γρασίδι ή χονδρόκοκκο αδρανές υλικό ώστε να αποφεύγεται η αναπήδηση των σταγόνων. Το βροχόμετρο στερεώνεται στο έδαφος ώστε το ύψος του από αυτό να είναι ένα μέτρο. Οι αποστάσεις του βροχόμετρου από πιθανά εμπόδια πρέπει να είναι μεγαλύτερες του τετραπλασίου του ύψους του εμποδίου. Χαρακτηριστική διάταξη ενός μετεωρολογικού σταθμού που περιλαμβάνει βροχόμετρο φαίνεται στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3: Τυπική διάταξη μετεωρολογικού σταθμού με βροχόμετρο, (Τσακίρης, 1995).

4.1.3 Βροχομετρικά Δίκτυα

Είναι φανερό ότι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μιας περιοχής επηρεάζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και τη θέση της περιοχής σε σχέση με τη διεύθυνση των κυκλωνικών συστημάτων. Για την καταγραφή και ανάλυση των κατακρημνισμάτων είναι απαραίτητη η εγκατάσταση δικτύου βροχομετρικών σταθμών.

Η πυκνότητα και η ποιότητα (δηλαδή ακρίβεια μετρήσεων) ενός βροχομετρικού δικτύου εξαρτάται κύρια από τους σκοπούς που υπηρετεί και την απαιτούμενη ακρίβεια των παρατηρήσεων. Για πεδινές περιοχές Μεσογειακού κλίματος απαιτείται ένας σταθμός για 600-900 Km² ή το λιγότερο ένας σταθμός για 900-3000 Km². Για ορεινές περιοχές Μεσογειακού κλίματος απαιτείται ένας σταθμός ανά 100-250 Km² ή το λιγότερο ένας σταθμός ανά 250-1000 Km².

Βέβαια με αυστηρά κριτήρια δίκτυο αποτελεί ένα σύνολο σταθμών των οποίων οι μετρήσεις έχουν κάποια συνάφεια μεταξύ τους. Μπορούν δηλαδή να υπάρξουν αξιόπιστες συσχετίσεις μεταξύ των βροχομετρικών παρατηρήσεων των σταθμών ώστε να είναι δυνατή η συμπλήρωση πιθανόν ελλειπουσών παρατηρήσεων και η επέκταση των παρατηρήσεων σε περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των σταθμών με μεθόδους όπως αυτή της παρεμβολής.

Η πυκνότητα των σταθμών, ο εξοπλισμός που διαθέτουν καθώς και ο τρόπος καταχώρησης των παρατηρήσεων (απλή καταγραφή σε μητρώα, αυτόματη καταγραφή και ένταξη σε data loggers, τηλεμετάδοση σε κεντρικούς Η/Υ) εξαρτάται επίσης από οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Συνήθως είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αξιολογηθεί η προσφορά ενός αξιόπιστου βροχομετρικού σταθμού ενώ η κοινωνία δύσκολα θα δεχόταν μια υπέρογκη επιβάρυνση για την εγκατάσταση και λειτουργία ενός σύγχρονου δικτύου.

Όπως παρατηρούν διεθνείς οργανισμοί οι φάσεις δημιουργίας ενός δικτύου είναι:

- (α) Δημιουργία ανεξάρτητων σταθμών για τοπικές ανάγκες.
- (β) Πύκνωση των σταθμών και υποτυπώδες δίκτυο.
- (γ) Εγκατεστημένο δίκτυο με σημαντικό βαθμό συνάφειας μεταξύ των σταθμών.
- (δ) Μείωση του δικτύου των σταθμών με κατάργηση μερικών από αυτούς που δεν επηρεάζουν την συνάφεια (coherence).

4.2 Επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης απορροής

Η μέτρηση βροχής που κάνει ένα βροχόμετρο αφορά το σημείο που είναι εγκατεστημένο. Τον υδρολόγο όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις, ενδιαφέρει όχι τόσο το ύψος της βροχής σε κάποιο σταθμό αλλά το ύψος της βροχής που έπεσε σε μια ολόκληρη περιοχή. Πρέπει λοιπόν οι παρατηρήσεις των σταθμών να τροποποιηθούν έτσι που να δίνουν το μέσο ύψος και αν είναι δυνατόν την κατανομή της βροχής πάνω στην περιοχή. Αυτό μπορεί να γίνει με μια από τις παρακάτω μεθόδους:

4.2.1 Μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου

Με τη μέθοδο αυτή αθροίζονται τα ύψη βροχής, που παρατηρήθηκαν σε όλους τους σταθμούς μιας περιοχής και το άθροισμα αυτό διαιρείται με τον αριθμό των σταθμών. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο τρόπος αυτός δίνει ένα κάποιο μέσο ύψος βροχής της περιοχής και καθόλου την κατανομή της. Αν n είναι ο αριθμός των σταθμών και p_1, \dots, p_n είναι τα ύψη βροχής, που μετρήθηκαν σε καθένα σταθμό, στη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ονικής περιόδου, το μέσο ύψος βροχής (p_m) που αντιστοιχεί στην περιοχή για την συγκεκριμένη περίοδο μπορεί να βρεθεί με την σχέση:

$$P_m = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (4.1)$$

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η περιοχή είναι σχετικά ομοιόμορφη και υπάρχει πυκνό δίκτυο βροχομετρικών σταθμών. Δεν πρέπει να εφαρμόζεται όταν το ανάγλυφο της περιοχής είναι πολύ ανώμαλο και οι σταθμοί λιγοστοί και όχι συμμετρικά κατανεμημένοι.

4.2.2 Η μέθοδος των πολύγωνων Thiessen

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί γενικά του αριθμητικού μέσου όρου στο ότι το ύψος βροχής που παρατηρείται σε κάθε σταθμό σταθμίζεται με μια αντιπροσωπευτική έκταση. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω: οι βροχομετρικοί σταθμοί μιας περιοχής τοποθετούνται πάνω στο χάρτη και ενώνονται μεταξύ τους με ευθείες γραμμές. Στα μέσα των γραμμών αυτών χρειάζονται άλλες κάθετες γραμμές που συναντιούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν πολύγωνα γύρω από κάθε σταθμό. Το ύψος της βροχής που μετρήθηκε σε κάθε σταθμό θεωρείται ότι είναι το ύψος που έπεσε στο πολύγωνο που τον περιβάλλει. Για να βρεθεί το μέσο ύψος βροχής μιας περιοχής, το ύψος βροχής κάθε σταθμού πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν του πολύγωνου που τον περιβάλλει, τα γινόμενα αυτά αθροίζονται και το άθροισμα διαιρείται με το συνολικό εμβαδόν της έκτασης. Αν p_1, \dots, p_n είναι τα ύψη βροχής που παρατηρήθηκαν σε κάθε έναν από τους n σταθμούς που είναι μέσα η και γύρω στην περίμετρο μιας περιοχής, a_1, \dots, a_n είναι τα εμβαδά των πολύγωνων που περιβάλλουν αντίστοιχα τους σταθμούς μέσα στα όρια της περιοχής και A είναι το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής, το μέσο ύψος βροχής της περιοχής p_m μπορεί να βρεθεί με τη σχέση:

$$p_m = \frac{p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n}{A} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n p_i a_i \quad (4.2)$$

Με τη μέθοδο αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθούν και οι σταθμοί που βρίσκονται γύρω από την περιοχή κάνοντας έτσι πιο αντιπροσωπευτικό το τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος στηρίζεται στην παραδοχή ότι το ύψος βροχής μεταβάλλεται γραμμικά από σταθμό σε σταθμό και έτσι δεν επιτρέπει στον αναλυτή να χρησιμοποιήσει την επιδεξιότητα του για την εκτίμηση της επίδρασης του ανάγλυφου του εδάφους.

4.2.3 Η μέθοδος των ισοϋέτιων καμπυλών

Η μέθοδος των ισοϋέτιων καμπυλών είναι η πιο πλήρης και αντικειμενική για την εκτίμηση της μέσης βροχόπτωσης μιας περιοχής γιατί παίρνει υπόψη την τοπογραφία μιας

περιοχής, τα χαρακτηριστικά της βροχής και αλλά στοιχεία που βοηθούν στην σωστή εκτίμηση. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: πρώτα παίρνεται ένα χάρτης της περιοχής στον οποίο φαίνεται η τοπογραφική της διαμόρφωση και τοποθετούνται οι θέσεις των βροχομετρικών σταθμών. Μετά, στη θέση κάθε σταθμού τοποθετούνται τα ύψη βροχής που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου της οποίας επιχειρείται η ανάλυση. Στη συνέχεια χαράσσονται οι ισοϋέτιες καμπύλες που είναι καμπύλες που ενώνουν σημεία ίσου ύψους βροχής. Κατά τη χάραξη τους, όπως και παραπάνω αναφέρθηκε, εκτός από τα ύψη βροχής των σταθμών παίρνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της βροχής, η τοπογραφική διαμόρφωση, η τυχόν ύπαρξη σχέσεων ανάμεσα στο ύψος της βροχής και τα υψόμετρα και κάθε άλλο στοιχείο που μπορεί να φανεί χρήσιμο στη διαμόρφωση σωστής γνώμης. Ακόμη, στη διαδικασία χρησιμοποιούνται και σταθμοί εκτός της περιοχής. Για τον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης της περιοχής βρίσκονται τα εμβαδά των ζωνών που περικλείονται ανάμεσα σε διαδοχικές ισοϋέτιες, τα εμβαδά αυτά πολλαπλασιάζονται με το μέσο όρο του ύψους βροχής των ισόβροχων που τα περικλείουν, τα γινόμενα που προκύπτουν προστίθενται και το άθροισμα αυτό διαιρείται με το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής. Αν p_1, p_2, \dots, p_n είναι το ύψος βροχής των n ισοϋέτιων καμπυλών που χαράχθηκαν σε μια περιοχή, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, $a_{1,2}, a_{2,3}, \dots, a_{n-1,n}$ είναι τα εμβαδά είναι τα εμβαδά των ζωνών ανάμεσα σε διαδοχικές ισοϋέτιες, $(p_1+p_2)/2, (p_2+p_3)/2, \dots, (p_{n-1}+p_n)/2$ είναι τα μέσα ύψη βροχής που αντιστοιχούν σε κάθε ζώνη και A είναι το εμβαδόν ολόκληρης της περιοχής, η μέση βροχόπτωση (p_m) που πέφτει στην περιοχή, στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο μπορεί να εκφρασθεί με τη σχέση:

$$\begin{aligned}
 P_m &= \frac{(p_1 + p_2)a_{1,2} + (p_2 + p_3)a_{2,3} + \dots + (p_{n-1} + p_n)a_{n-1,n}}{2A} = \\
 &= \frac{1}{2A} \sum_{i=1}^n (p_i + p_{i+1})a_{i,i+1} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Γενικά η μέθοδος αυτή εκτός από τη μέση βροχόπτωση δίνει και την κατανομή της στην περιοχή και επιτρέπει τον χωρισμό της περιοχής σε τμήματα που συμβάλουν ανάλογα με την απορροή.

4.2.4 Μέθοδος βροχοβαθμίδας

Η υψομετρική μέθοδος της βροχοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψόμετρου και χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά εκατό μέτρα αύξηση του υψόμετρου. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια απλή γραμμική σχέση που συσχετίζει τα υψόμετρα των σταθμών με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε σταθμού και εφόσον υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση, η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής, σε οποιοδήποτε υψόμετρο.

Η μέθοδος της βροχοβαθμίδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την συμπλήρωση παρατηρήσεων όσο και για την εύρεση της μέσης βροχόπτωσης μιας λεκάνης, με ανάγωση στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Η διαδικασία της βροχοβαθμίδας πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή και τα μεγέθη να αναφέρονται σε μεγάλο χρονικό βήμα (π.χ. έτος) και στη συνέχεια με μεθόδους επιμερισμού να γίνεται εκτίμηση μεγεθών μικρότερων χρονικών βημάτων (π.χ. μήνας).

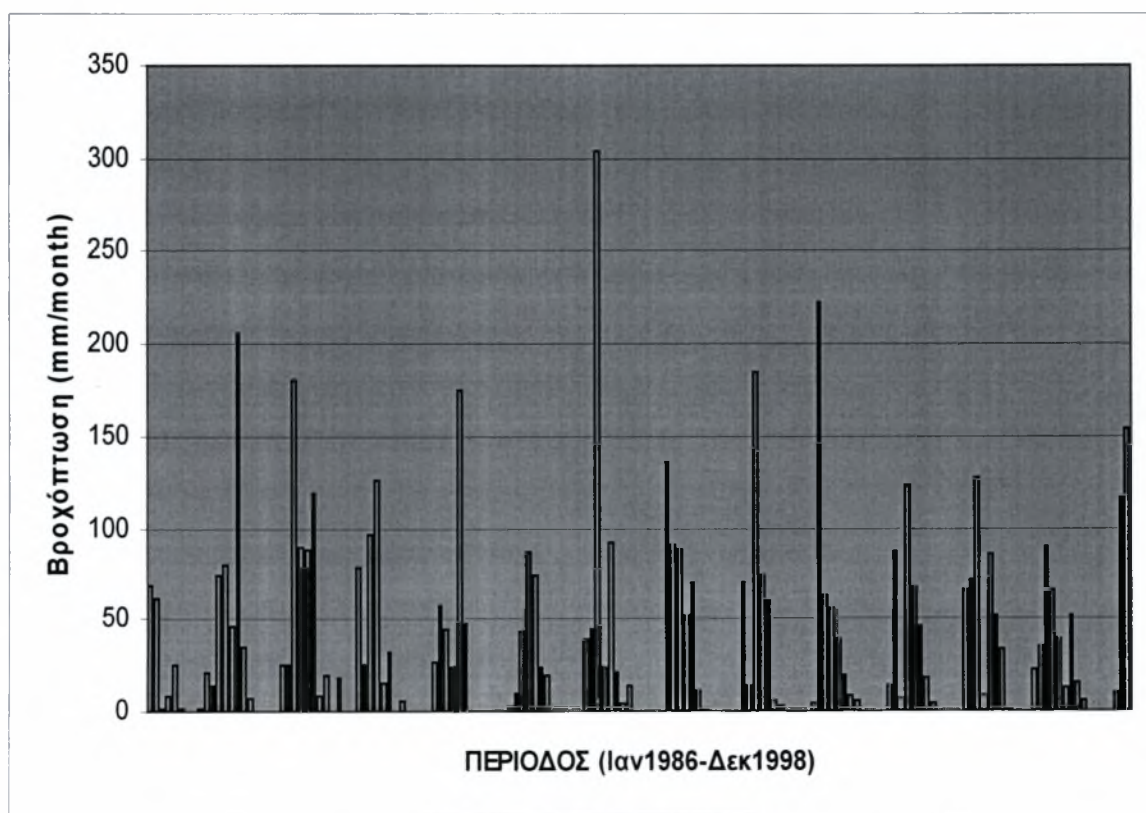
Πολλές φορές η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης που χαράσσεται για τον προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας προκύπτει με χαμηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ελεγχθούν οι δυνατότητες εξαίρεσης κάποιων σταθμών ή ο χωρισμός της περιοχής σε υποπεριοχές στις οποίες να προκύπτει η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης με ικανοποιητικό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης.

Γενικά δεν έχει έννοια η βροχοβαθμίδα σε ολόκληρα υδατικά διαμερίσματα λόγω της ποικιλίας των τοπικών συνθηκών που συναντώνται σε μια ευρύτερη περιοχή ενός υδατικού διαμερίσματος. Αντίθετα είναι απαραίτητο το κάθε υδατικό διαμέρισμα να χωρίζεται σε περιοχές με ομοιογενείς συνθήκες ώστε σε κάθε τέτοια περιοχή να υπάρχει ένα αξιόπιστο μέγεθος βροχοβαθμίδας. Η γενική μεθοδολογία χωρισμού μιας ευρύτερης περιοχής σε ομοιογενείς υποπεριοχές (σε σχέση πάντα με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα) είναι γνωστή στην Υδρολογία με τον όρο περιοχοποίηση (regionalization).

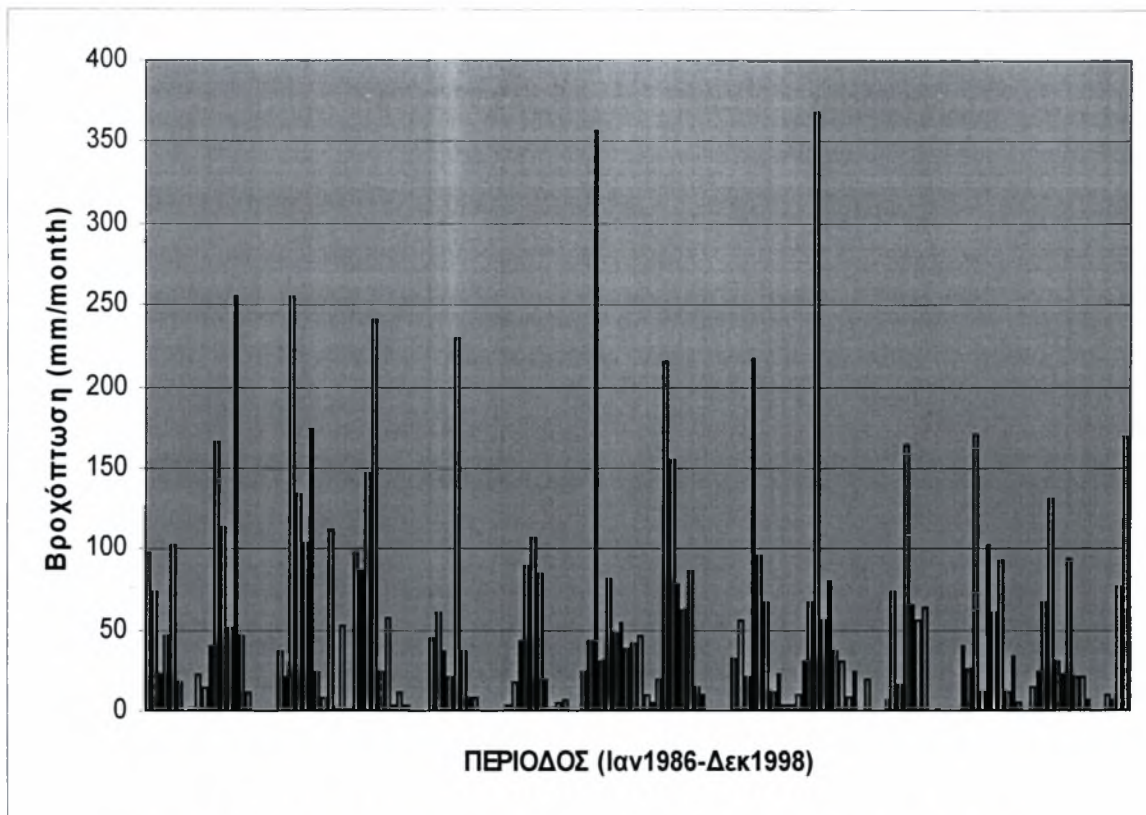
4.3 Μέθοδοι εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η κατανομή της βροχόπτωσης σε ολόκληρη την λεκάνη της Γερμασόγειας Κύπρου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια τριών από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες και πιο συγκεκριμένα με τη μέθοδο του αριθμητικού μέσου όρου, των πολυγώνων Thiessen και της βροχοβαθμίδας.

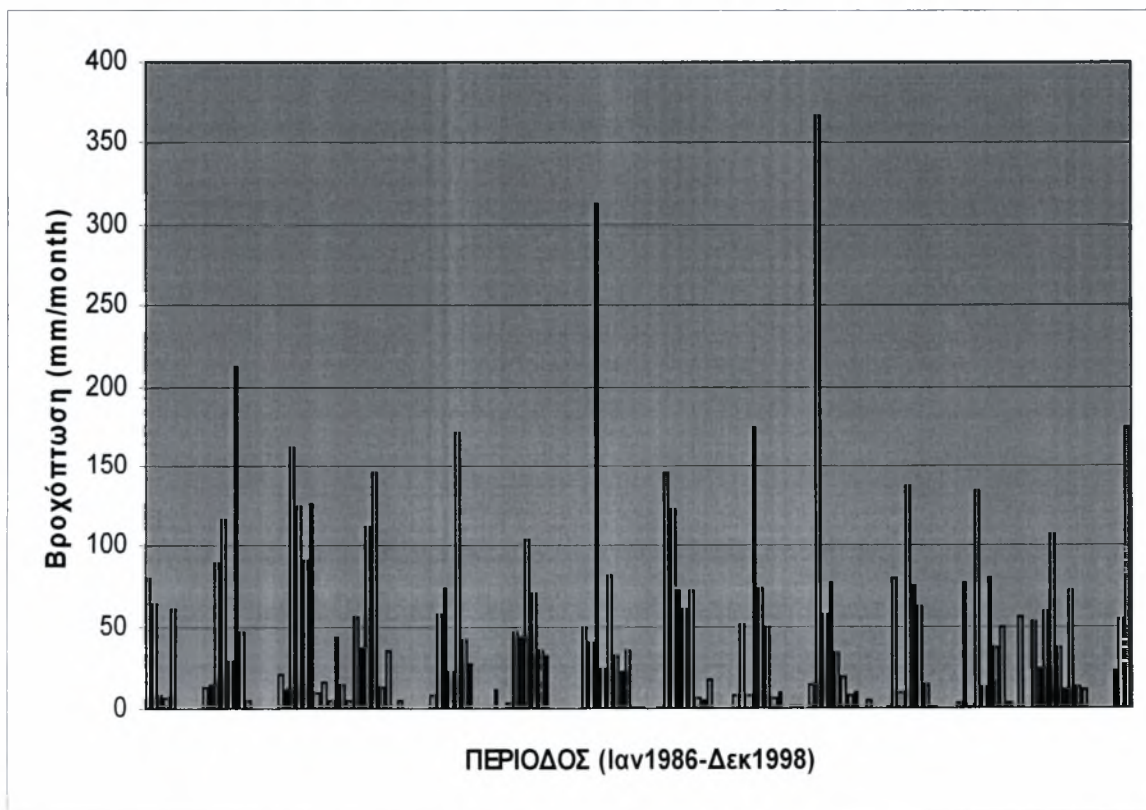
Τα δεδομένα των ημερήσιων τιμών της βροχόπτωσης σε mm, που πάρθηκαν από τους βροχομετρικούς σταθμούς 390, 400, 410 και 429, επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να μετατραπούν οι ημερήσιες τιμές σε μηνιαίες (mm/month). Η χρονική περίοδος για την οποία επεξεργάστηκαν τα δεδομένα ήταν από τον Ιανουάριο του 1986 έως τον Δεκέμβριο του 1998. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογραφήματα για την περίοδο Ιαν1986-Δεκ1998 των σταθμών 390, 400 και 429 (Σχήματα 4.4, 4.5, 4.6):



Σχήμα 4.4: Υετογράφημα περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 του σταθμού 390.



Σχήμα 4.5: Υετογράφημα περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 του σταθμού 400.

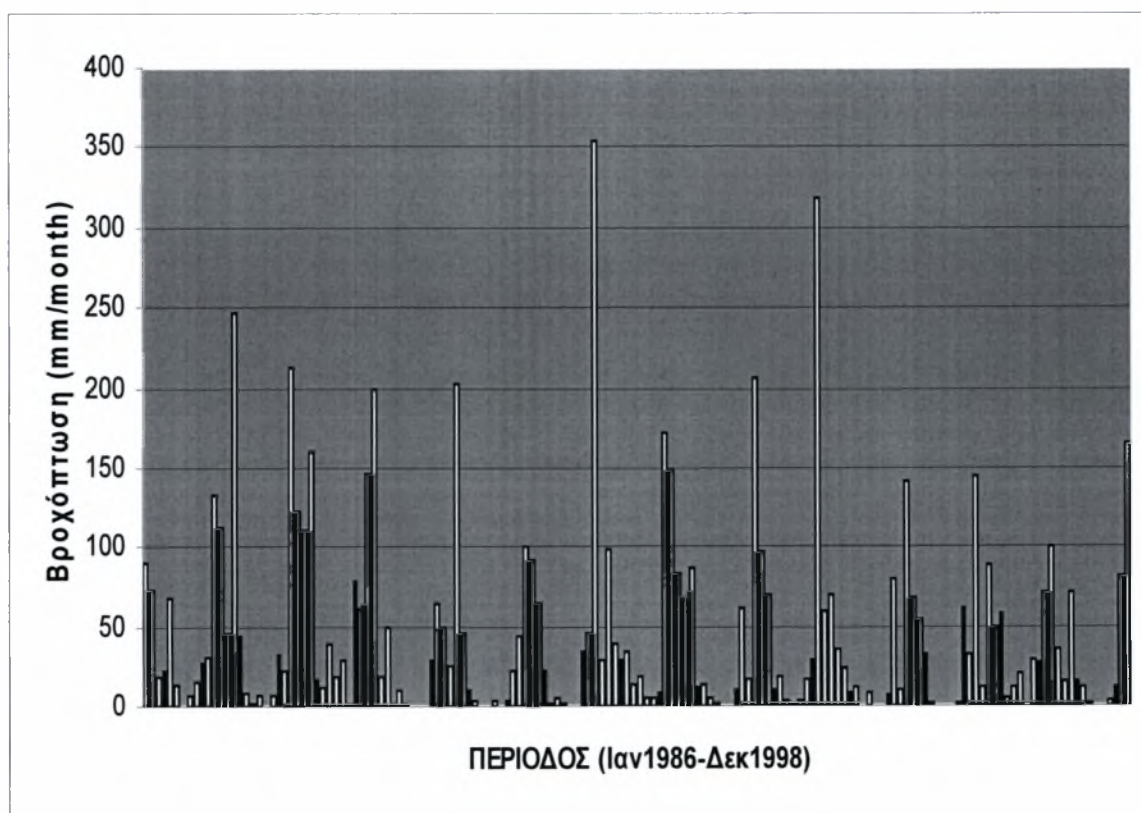


Σχήμα 4.6: Υετογράφημα περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 του σταθμού 429.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι τρεις μέθοδοι κατανομής της βροχόπτωσης στην λεκάνη της Γερμασόγειας Κύπρου, καθώς και η σύγκριση μεταξύ αυτών:

(α) Μέθοδος αριθμητικού μέσου όρου

Με τη μέθοδο αυτή αθροίστηκαν τα ύψη βροχόπτωσης, που παρατηρήθηκαν στους σταθμούς 390, 400, 429 και το άθροισμα αυτό διαιρέθηκε με τον αριθμό των σταθμών (Εξίσωση 4.1). Έτσι το αποτέλεσμα αυτής της διαίρεσης αποτέλεσε την τιμή της επιφανειακής βροχόπτωσης για ολόκληρη την λεκάνη της Γερμασόγειας Κύπρου για την περίοδο 86-98, το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.7:



Σχήμα 4.7: Υετογράφημα μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου, (Μέθοδος Αριθμητικού Μέσου Όρου).

(β) Μέθοδος βροχοβαθμίδας

Αφού υπολογίσθηκαν οι μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης, στη συνέχεια βρέθηκαν οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης για κάθε σταθμό από το 1986 έως το 1998 (Πίνακας 4.1) καθώς και το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης του καθενός για την περίοδο 1986-1998 (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.1: Ετήσια βροχόπτωση (mm) των σταθμών 390, 400, 410, 429.

ΣΤΑΘΜΟΣ	429	400	390	410
	ΕΤΗΣΙΑ	ΕΤΗΣΙΑ	ΕΤΗΣΙΑ	ΕΤΗΣΙΑ
ΕΤΟΣ	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ(mm)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ(mm)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ(mm)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ(mm)
1986	336,8	605,5	277,5	774,8
1987	601,3	789,5	603,7	957,9
1988	634,7	941,5	543,5	1060,6
1989	336,8	483,7	308,8	570,5
1990	364,5	367,3	301,8	399,1
1991	641,2	734,7	594	918,5
1992	467,9	742,2	381,8	817,8
1993	299,3	361,4	306,3	456,9
1994	754,6	948,4	617,7	~
1995	243,4	294,1	234,2	~
1996	504,1	588,5	524,7	~
1997	477,8	551	393,6	~
1998	391,5	455	404,6	~

Πίνακας 4.2: Μέση ετήσια βροχόπτωση των σταθμών 390, 400, 410, 429 περιόδου 86-98

ΣΤΑΘΜΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m) ΣΤΑΘΜΟΥ	ΜΕΣΟ ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ(mm)
390	12	422,48
429	70	465,68
400	740	604,83
410	995	744,51

Από τον Πίνακα 2.2 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το υψόμετρο του σταθμού αυξάνει και το ύψος της βροχόπτωσης. Έτσι βρέθηκε η γραμμική σχέση που συσχετίζει το υψόμετρο του κάθε σταθμού με το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (Σχήμα 4.8) και για την περίπτωση αυτή η σχέση που βρέθηκε είναι η εξής:

$$y = 0,2923x + 426,61 \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,9595$$

όπου : y = ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (P) σε mm και x = υψόμετρο σταθμού (El) σε m.

Σύμφωνα με τη Σχέση (4.4), για κάθε αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης αυξάνεται κατά 29,23 mm κατά μέσο όρο. Επίσης, εφόσον ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ υψηλός και ίσος με 0,9595 ($R^2 > 0,70$) η σχέση (4.4) μπορεί άνετα να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχόπτωσης σε οποιοδήποτε υψόμετρο.

Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του σταθμού 400, της περιόδου των ετών 1986 έως 1998 γιατί είναι ο μόνος σταθμός εντός της λεκάνης απορροής με το μεγαλύτερο υψόμετρο (740 m). Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο (575 m) της λεκάνης της Γερμασόγειας, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$P_k = P_{T(k)} - \frac{165 * 29,23}{100} \quad (4.5)$$

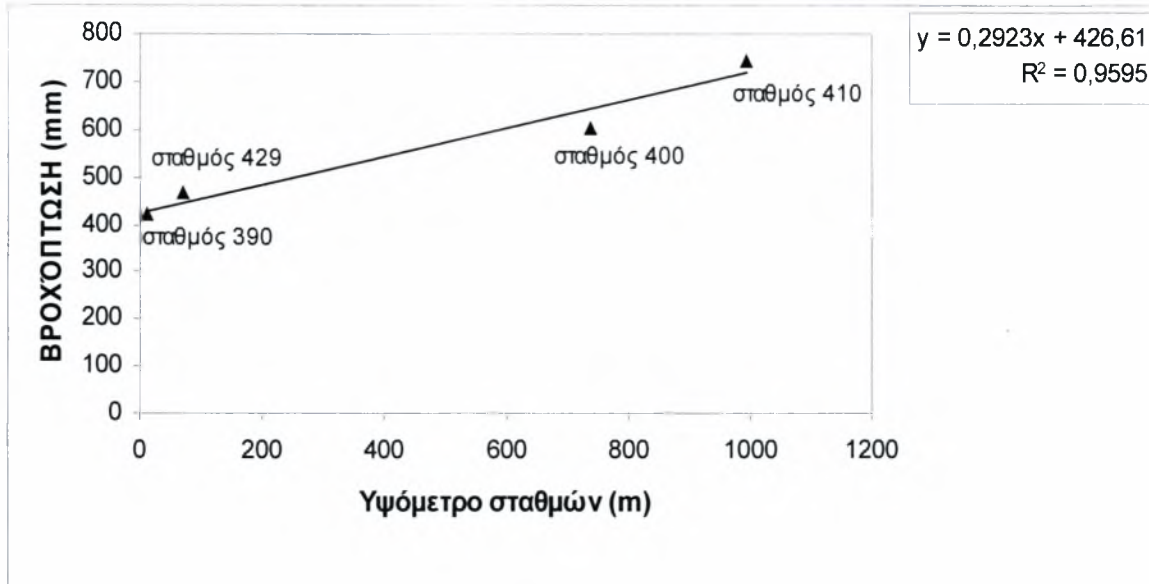
και

$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (4.6)$$

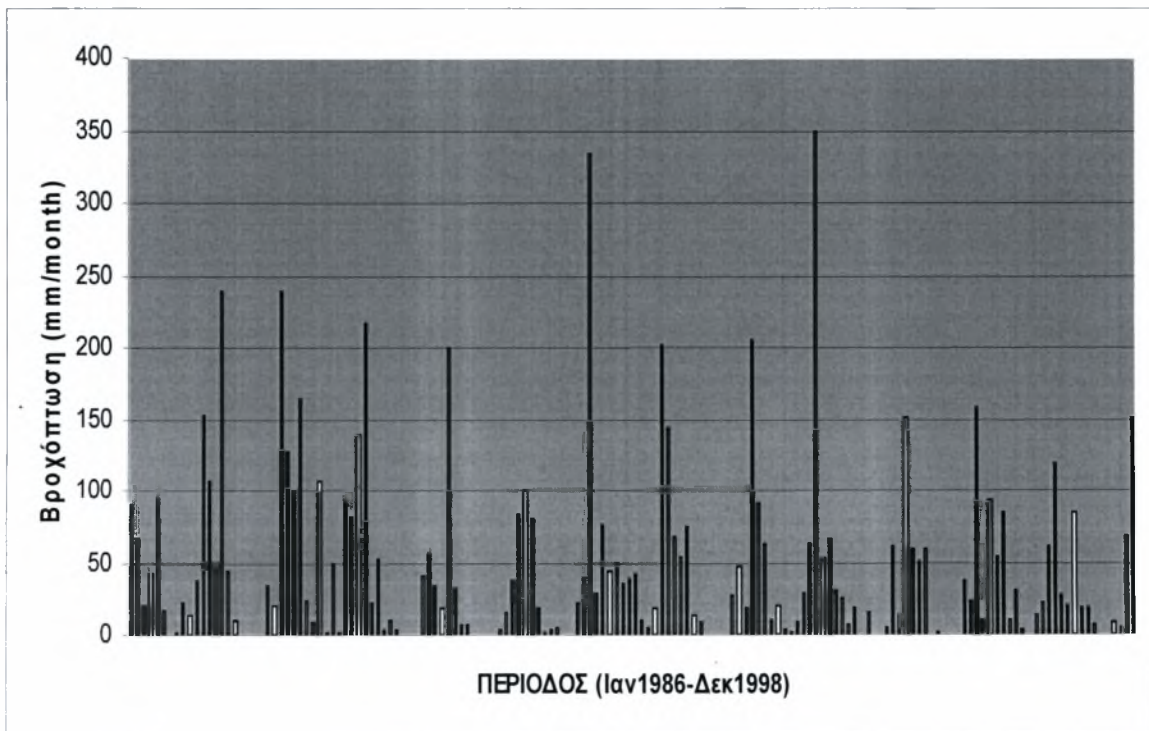
όπου :

- $P_{T(k)}$ = ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο σταθμό 400 (Πίνακας 4.1), κατά το έτος k , σε mm,
- P_k = ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στη λεκάνη της Γερμασόγειας (Πίνακας 4.3, Σχήμα 4.10), κατά το έτος k , σε mm,
- P_i^k = μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k , στη λεκάνη της Γερμασόγειας (Σχήμα 4.9), σε mm,
- $P_{T(i)}^k$ = μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k , στο σταθμό 400 (Σχήμα 4.5), σε mm,
- 29,23 = βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε με τη Σχέση (4.4),
- 165 = διαφορά ανάμεσα στο υψόμετρο του σταθμού 400 και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης της Γερμασόγειας (740 – 575).

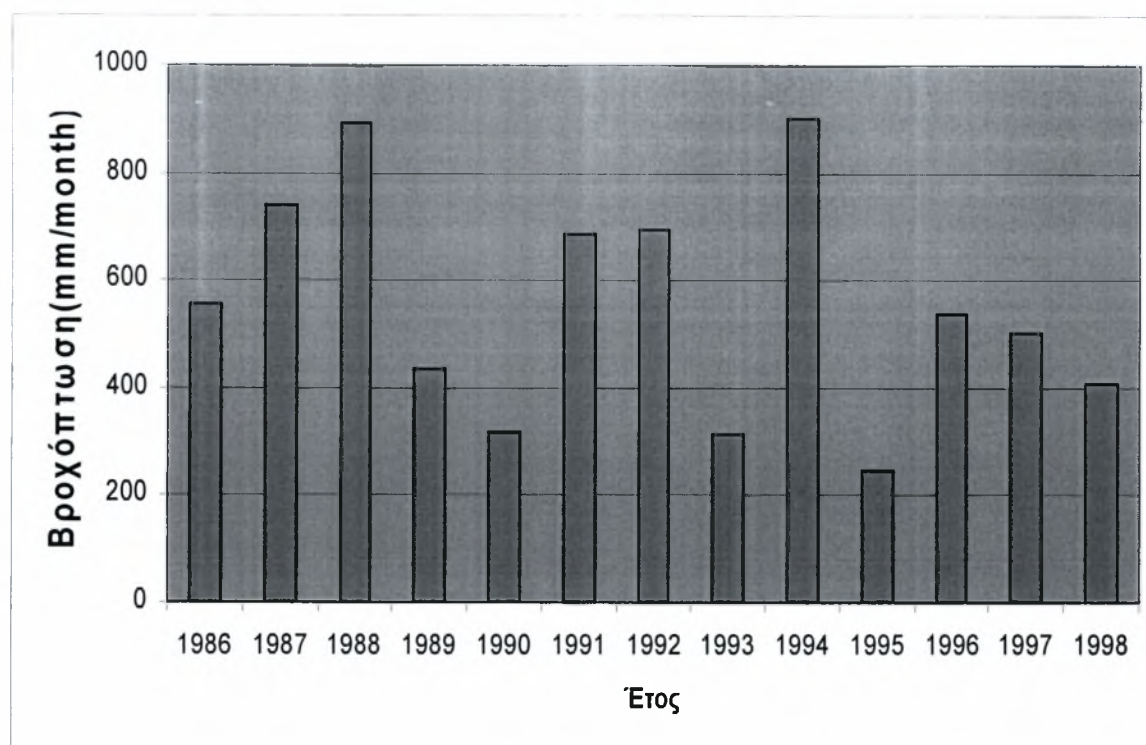
Με την εφαρμογή των Σχέσεων (4.5) και (4.6) υπολογίζονται οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης της Γερμασόγειας για την περίοδο 1986-1998 (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.8: Γραμμική συσχέτιση υψόμετρου με το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης της περιόδου 1986-1998 των σταθμών 390, 400, 410 και 429 της λεκάνης της Γερμασόγειας.



Σχήμα 4.9: Υετογράφημα μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 της λεκάνης απορρόης της Γερμασόγειας Κύπρου, (Μέθοδος Βροχοβαθμίδας).



Σχήμα 4.10: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm) περιόδου 1986-1998 της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

Πίνακας 4.3: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm) λεκάνης Γερμασόγειας Κύπρου (1986-98).

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ
1986-1998	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ (mm)
ΕΤΟΣ	ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ
1986	557,32
1987	741,32
1988	893,32
1989	435,52
1990	319,12
1991	686,52
1992	694,02
1993	313,22
1994	900,22
1995	245,92
1996	540,32
1997	502,82
1998	406,82

(γ) Μέθοδος των πολυγώνων Thiessen

Με τη βοήθεια της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen υπολογίστηκαν οι παράγοντες βάρους που αντιστοιχούν στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού των σταθμών 400 και 429, όπως προκύπτει με τη χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους (Σχήμα 4.11). Το μέσο επιφανειακό βροχομετρικό ύψος της λεκάνης της Γερμασόγειας P_o προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων υψών βροχόπτωσης P_i των σταθμών πολλαπλασιασμένες επί τις αντίστοιχες εκτάσεις επηρεασμού δια της συνολικής έκτασης A της λεκάνης. Σύμφωνα με τη Σχέση (4.2) έχουμε:

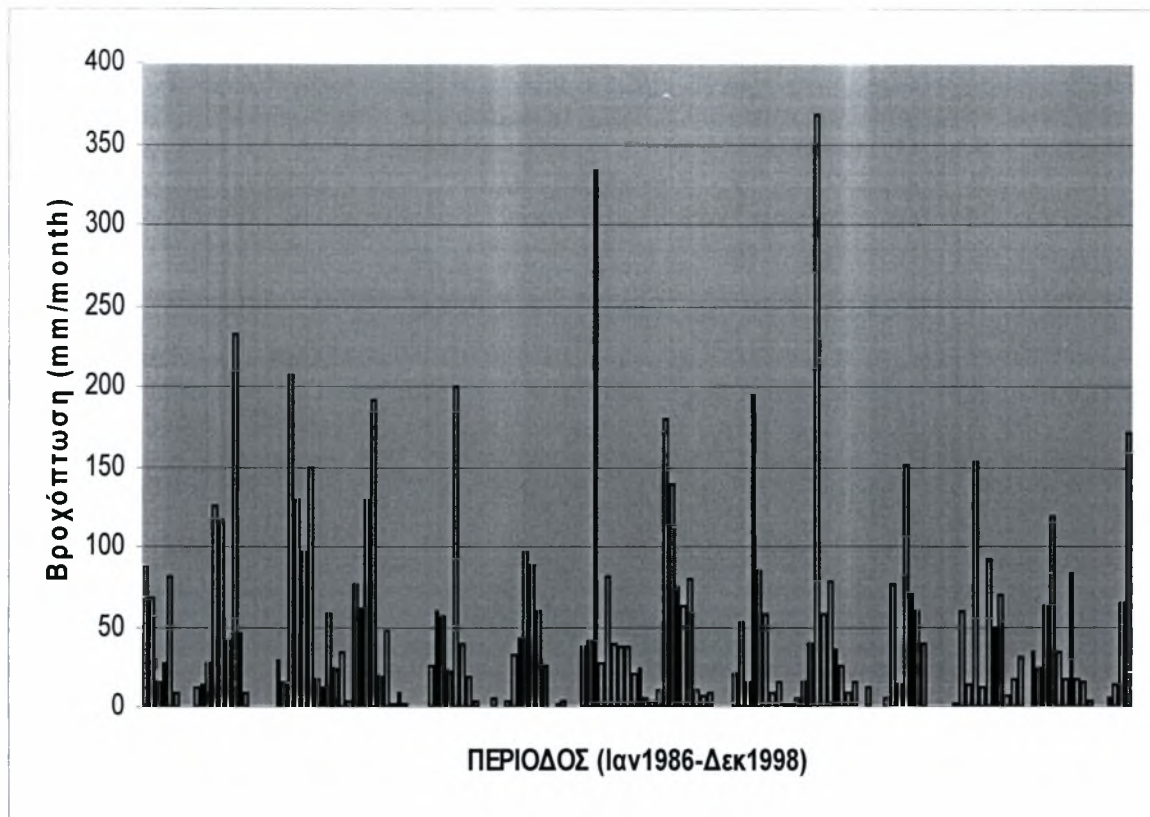
$$P_o = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2}{A} = \sum \left(\frac{A_1}{A} P_1 + \frac{A_2}{A} P_2 \right)$$

όπου:

- P_1, P_2 το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης των σταθμών 400 και 429 αντίστοιχα,
- $\frac{A_1}{A} = 49\%$, το ποσοστό εκτάσεως επηρεασμού του σταθμού 400 (%),
- $\frac{A_2}{A} = 51\%$, το ποσοστό εκτάσεως επηρεασμού του σταθμού 429 (%),

Ισχύει, όπως είναι γνωστό, ότι: $\sum \left(\frac{A_i}{A} \right) = 100\%$

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται η μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση, όπως αυτή υπολογίστηκε με τη βοήθεια της μεθόδου των πολυγώνων Thiessen, της λεκάνης απορροή της Γερμασόγειας Κύπρου για την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1986 έως τον Δεκέμβριο του 1998.



Σχήμα 4.12: Υετογράφημα μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου, (Μέθοδος Πολυγώνων Thiessen).

4.4 Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου

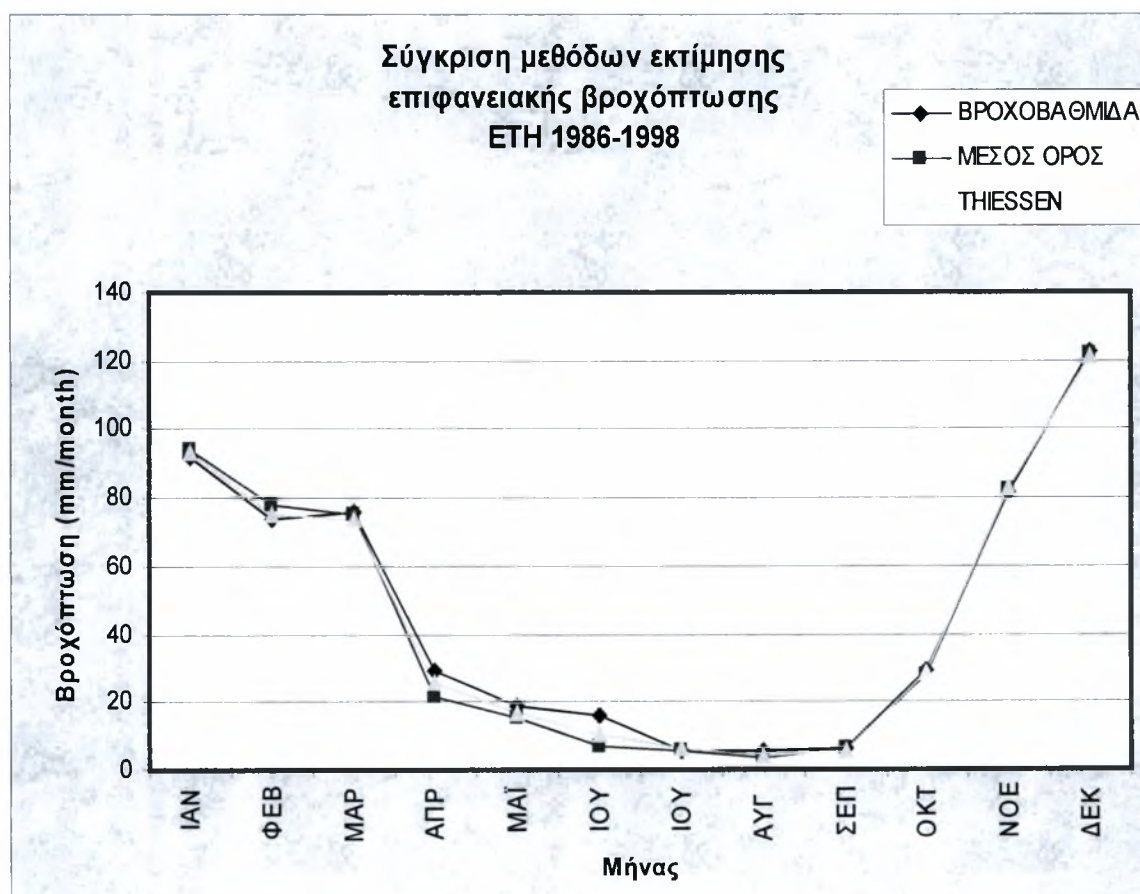
Κάνοντας σύγκριση των τριών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατανομή της επιφανειακής βροχόπτωσης στη λεκάνη της Γερμασόγειας Κύπρου, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν καμία εντελώς απόκλιση μεταξύ τους. Η συσχέτιση (correlation) μεταξύ των μεθόδων ανά δύο προσεγγίζει την μονάδα, γεγονός που ισχυροποιεί το παραπάνω συμπέρασμα (Πίνακας 4.5). Η σύγκριση έγινε για τις μέσες τιμές των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης για την περίοδο 1986-1998 (Σχήμα 4.13). Επίσης έγινε σύγκριση των τριών μεθόδων για κάθε έτος ξεχωριστά από το 1986 έως το 1998 (Σχήματα A.2-A.14 Παραρτήματος Α). Και εδώ η συσχέτιση (correlation) ήταν πολύ υψηλή με τιμή που κυμαινόταν από 0,9248 (συσχέτιση Μέσου όρου και βροχοβαθμίδας έτους 1988) έως 0,9998 (συσχέτιση Μέσου όρου και Thiessen έτους 1991), όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Συσχέτιση (correlation) των τριών μεθόδων επιφανειακής βροχόπτωσης ανά δύο μεταξύ τους για την περίοδο των ετών από το 1986 έως το 1998.

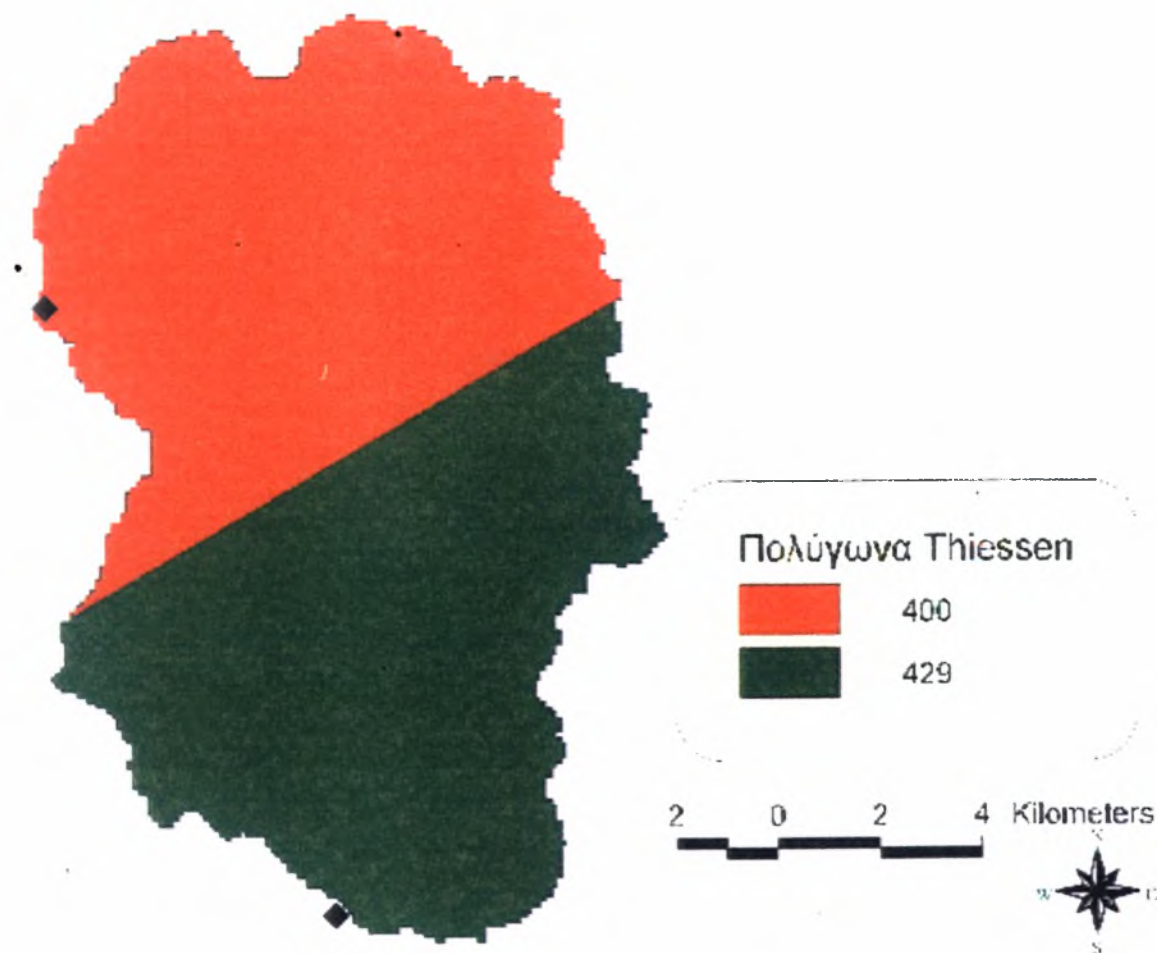
ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ
1986-1998	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑΣ	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑΣ	ΜΕΣΟΥ ΟΡΟΥ
ΕΤΟΣ	ΜΕΣΟΥ ΟΡΟΥ	THIESSEN	THIESSEN
1986	0,9705	0,9925	0,9885
1987	0,9955	0,9984	0,9989
1988	0,9248	0,9754	0,9825
1989	0,9918	0,9945	0,9995
1990	0,9967	0,9983	0,9988
1991	0,9963	0,9971	0,9998
1992	0,9664	0,9938	0,9880
1993	0,9758	0,9929	0,9921
1994	0,9922	0,9983	0,9957
1995	0,9793	0,9941	0,9952
1996	0,9758	0,9918	0,9949
1997	0,9427	0,9808	0,9870
1998	0,9881	0,9966	0,9965

Πίνακας 4.5: Μέση συσχέτιση (correlation) των τριών μεθόδων επιφανειακής βροχόπτωσης ανά δύο μεταξύ τους για όλη την περίοδο από το 1986 έως το 1998.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	THIESSEN
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	~	0,9970	0,9989
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0,9970	~	0,9992
THIESSEN	0,9989	0,9992	~



Σχήμα 4.13: Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης της μέσης μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου για την περίοδο των ετών 1986 έως 1998.



Σχήμα 4.11: Χάραξη πολυγώνων Thiessen για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής Γερμασόγειας Κύπρου

Κεφάλαιο 5^ο: Μοντέλα εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής

5.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της εξάτμισης τόσο από μια υδάτινη επιφάνεια όσο και από μια έκταση καλυμμένη με φυτά είναι σήμερα πολύ καλύτερα κατανοητό από ότι μισό αιώνα πριν. Ο λόγος είναι ότι γινόταν διάκριση παλιότερα ανάμεσα στο φαινόμενο της διαπνοής που θεωρείται ως ο ενεργός έλεγχος της εξάτμισης του νερού από το φυτό, και της εξάτμισης από μια υδάτινη επιφάνεια που μελετούνταν ως ένα καθαρά φυσικό φαινόμενο.

Είναι φανερό ότι το νερό που βρίσκεται πάνω στα φύλλα ή στα ανοικτά στόματα των φύλλων χρειάζεται μια ποσότητα θερμότητας (λανθάνουσα θερμότητα) για να γίνει υδρατμός. Ο υδρατμός αυτός θα μεταφερθεί στην ατμόσφαιρα με μεταγωγή και διάχυση. Η καθαρά αυτή φυσική ακολουθία είναι η ίδια είτε πρόκειται για υδάτινη επιφάνεια είτε για βλάστηση είτε για γυμνό έδαφος. Συνεπώς, η γνώση ορισμένων ατμοσφαιρικών συνθηκών μοιάζει ότι επαρκεί για την πλήρη μελέτη του φαινομένου. Παράλληλα στις μαθηματικές σχέσεις που θα προκύψουν, θα εισχωρήσουν και μερικοί συντελεστές που θα αναφέρονται στα ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας για την οποία μελετάτε η εξάτμιση. Ο ενιαίος λοιπόν τρόπος μελέτης, τόσο της εξάτμισης όσο και της διαπνοής οδηγεί στην υιοθέτηση και ενός ενιαίου ονόματος της εξατμισοδιαπνοής (evapotranspiration).

Η εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων γίνεται είτε με την απευθείας εμπειρική συσχέτιση της εξατμισοδιαπνοής με ορισμένους κλιματικούς παράγοντες είτε με καθαρά πειραματικές μεθόδους που βασίζονται αντίστοιχα, σε δυο βασικές αρχές, τη διατήρηση της ενέργειας και την διατήρηση της μάζας. Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που δαπανάται με μορφή λανθάνουσας θερμότητας στην αεριοποίηση του νερού, και στην συνέχεια η ίδια η ποσότητα του νερού. Με βάση την διατήρηση της μάζας γίνεται απείθειας υπολογισμός της μάζας του νερού που μετατρέπεται σε υδρατμό.

Στηριζόμενοι στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, υπολογίζεται η μέγιστη ποσότητα υδρατμών που θα μεταφερθεί από μια περιοχή στην ατμόσφαιρα κάτω από τις ειδικές μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται δυνητική εξατμισο-

διαπνοή (potential evapotranspiration) και παριστάνεται με το E_p . Στον υπολογισμό αυτό γίνεται η παραδοχή ότι η υπάρχουσα ποσότητα νερού επαρκεί για να καλύψει τις ατμοσφαιρικές απαιτήσεις. Αν συμβαίνει το αντίθετο, τότε το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκο. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη να εισαχθεί ακόμα ένας όρος, ο όρος της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής E_a (actual evapotranspiration) ο οποίος θα παριστάνει την πραγματική ποσότητα υδρατμού που μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα και ο οποίος δεν θα εξαρτάται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες αλλά και από αυτήν την επάρκεια του νερού.

Για παράδειγμα σε μια περιοχή όπου υπάρχει επάρκεια νερού αμέσως μετά την βροχόπτωση οι τιμές της δυνατής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ταυτίζονται και οι πιθανές μεταβολές από σημείο σε σημείο οφείλονται σε καθαρά μετεωρολογικά αίτια. Με την πάροδο όμως του χρόνου, καθώς η ποσότητα του διαθέσιμου νερού μειώνεται, η τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται μικρότερη από αυτήν της δυνατής και αρχίζει να εξαρτιέται από την υγρασία του εδάφους, το βάθος του ριζοστρώματος καθώς και άλλα φυτικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά σε πρακτικές εφαρμογές για τον υπολογισμό του νερού που χάνεται σε βαθιές διηθήσεις, χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες τιμές της δυνατής εξατμισοδιαπνοής μια και σε μηνιαία βάση αυτές διαφέρουν ελάχιστα από τις μέσες μηνιαίες της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.

5.2 Πρακτική σημασία της εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης, είναι από τις σημαντικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου, η οποία υπολογίζεται στη παρούσα διπλωματική και είναι ένα από τα δεδομένα εισόδου στα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου αυτής. Ο υδρολογικός κύκλος, ξεκινά με την διαρκή προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες, είτε μέσα από διήθηση των υπογείων νερών είτε άμεσα σαν επιφανειακή απορροή. Η επιφανειακή απορροή είναι το δεδομένο εξόδου που εκτιμάνε τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου της παρούσας εργασίας. Τέλος, ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

Το νερό εισερχόμενο στη φάση εξάτμισης του υδρολογικού κύκλου είναι πλέον μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για όλο το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Σε πολλά μέρη του κόσμου οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο και συνεπώς η ορθολογιστική τους χρήση μέσω και της γνώσης της εξατμισοδιαπνοής είναι επιβεβλημένη. Η εξατμισοδιαπνοή από διάφορες επιφάνειες της γης και η βροχόπτωση, καθορίζουν το ποσόν της επιφανειακής απορροής των λεκανών. Επίσης προσδιορίζουν σε ένα μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία επιφανειακή απορροή ή πλημμύρες σε περίπτωση μεγάλων βροχοπτώσεων. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή πολλές φορές θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή νερού στο σχεδιασμό των προτεινόμενων αρδευτικών συστημάτων. Το ποσόν και ο ρυθμός εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες είναι απαραίτητη πληροφορία για το σχεδιασμό φραγμάτων, ή την εκτίμηση των φυσικών λιμνών που απαιτούνται για την οικιακή και βιομηχανική παροχή νερού, την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, τις μονάδες ψύξης των υδροηλεκτρικών σταθμών, της ναυτιλίας κλπ.

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

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου που εκφράζει τη διατήρηση της μάζας σε μια εδαφική κατατομή μπορεί να γραφεί:

$$P + I + \Delta SW \pm RO - D - ET_a = 0 \quad (5.1)$$

όπου P είναι η βροχόπτωση, I είναι η άρδευση, RO είναι η επιφανειακή απορροή, D είναι η βαθιά διήθηση, ΔSW είναι η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατατομής και ET_a είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή.

5.3 Μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής

Οι διάφοροι ερευνητές έχοντας κατά νου συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν αναπτύξει πολλές μεθόδους για την άμεση και έμμεση μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής (Πίνακας 5.1).

Για λόγους ευκολίας της περιγραφής τους, οι μέθοδοι ανάλογα με το αν βασίζονται σε έννοιες της υδρολογίας ή της μικρομετεωρολογίας μπορούν να καταταχθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες:

5.3.1 Μέθοδοι Υδατικού Ισοζυγίου

Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από την Εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου (5.1).

Έμμεση Μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής

Έμμεσα η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί σαν υπολειπόμενος όρος της Εξίσωσης (5.1) του υδατικού ισοζυγίου, ενώ οι άλλες συνιστώσες είτε μετρώνται είτε υπολογίζονται. Επειδή σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής της λεκάνης, προτιμήθηκαν μοντέλα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής παρά η έμμεση μέτρηση αυτής. Όταν δεν υπάρχει άρδευση έχουμε:

$$ET_a = P + \Delta SW \pm RO - D \quad (5.2)$$

Η παραπάνω Εξίσωση (5.2) μπορεί να εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε κλίμακα και μέγεθος, από ήπειρο και υδρολογική λεκάνη, έως μικρές καλλιεργούμενες εκτάσεις ή ακόμα και ανεξάρτητα φυτά.

Η υδρολογική προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την περισυλλογή δεδομένων, με σκοπό υδατικούς σχεδιασμούς. Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία η βροχόπτωση, η επιφανειακή απορροή και το ΔSW μετρώνται. Τα σφάλματα στην μέτρηση αυτή των παραμέτρων είναι μερικές φορές πολύ σημαντικά. Οι υποθέσεις που αφορούν βαθιά διήθηση χρειάζεται επαλήθευση. Έχει αποδειχθεί ότι οι μετρήσεις μπορεί να μην ανταποκρίνονται στις ποσότητες του νερού που είτε διηθείται είτε εξατμίζεται από το έδαφος, επειδή μεγάλες ποσότητες υδρατμών και νερού ρέουν και προς τις δυο κατευθύνσεις σαν αποτέλεσμα των κλίσεων της θερμοκρασίας και του υδραυλικού φορτίου.

Οι Davidson (1969) μέτρησαν την ροή εδαφικού νερού σε διάφορα βάθη με κανονική ή περιορισμένη εξάτμιση στην επιφάνεια, με σκοπό να μπορούν να εκτιμήσουν καλύτερα τη διήθηση ή τη βαθιά στράγγιση για την εκτίμηση της ET_a στις υδρολογικές μελέτες. Όταν το D μετρηθεί κατάλληλα, το ET_a μπορεί να εκτιμηθεί από τις αλλαγές στο ΔSW που γίνονται στη διάρκεια της περιόδου ανάμεσα σε βροχές. Άλλες φορές, κυρίως στις μελέτες του υδατικού ισοζυγίου, το ΔSW υποτίθεται ότι είναι μηδέν, τα PI και RO μετρούνται και το D είτε αγνοείται είτε μετρείται με κάποιον τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$$EP = PI + RO \quad (5.3)$$

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για χρονικά διαστήματα στην διάρκεια των οποίων μπορεί κανείς να υποθέσει ότι το περιεχόμενο νερό δεν μεταβάλλεται.

Η προσέγγιση της ET_a μέσω του υδατικού ισοζυγίου, συγκρινόμενη με τις μετρήσεις της ροής των υδρατμών που γίνονται πάνω από το έδαφος, υπερέχει ως προς την εύκολη επεξεργασία των δεδομένων και την ολοκλήρωση των ρυθμών εξαγωγής από το εδαφικό υδατικό δυναμικό, ανάμεσα στις παρατηρήσεις. Μειονεκτήματα της είναι η χαμηλού επιπέδου ακρίβεια των μετρήσεων και οι δυσκολίες εκτίμησης της ET_a στην διάρκεια των περιόδων βροχής. Ακόμη και με τη χρησιμοποίηση προσεκτικών μετρήσεων είναι δύσκολο να ανιχνεύσει κανείς αλλαγές εδαφικού νερού με ακρίβεια μεγαλύτερη των $\pm 2\text{mm}$ νερού. Τα σφάλματα που συνδέονται με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου την κάνουν μη επαρκή σε ημερήσια βάση. Εάν η στράγγιση μπορεί να μετρηθεί επαρκώς, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαστήματα 2 ή 3 ημερών. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεγάλες εκτάσεις, το κύριο πρόβλημα δεν είναι αυτή καθ' αυτή η μέθοδος, αλλά η έλλειψη καλών μέσων τιμών (ως προς το χώρο) των συνιστωσών της, εξ' αιτίας της μεταβλητότητας της βροχόπτωσης πάνω από μεγάλες επιφάνειες και της ανομοιογένειας της τοπογραφίας και των εδαφών που βρίσκονται κάτω από αυτές.

Άμεση Μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής με Λυσίμετρα

Μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη και δυνητικά ίσως η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής είναι η μέτρηση της με τα ζυγιζόμενα λυσίμετρα, όπου κάθε συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου μετρείται ακριβώς, και η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύεται άμεσα σαν απώλεια βάρους. Το λυσίμετρο είναι ένα κυλινδρικό δοχείο

(βάθους 1-2 μέτρα και διαμέτρου 1-6 μέτρα) στο οποίο ένα τμήμα χώματος και βλάστησης απομονώνεται και το υδατικό τους ισοζύγιο απομονώνεται και ελέγχεται. Η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος εδάφους-βλάστησης και ο εγκλεισμός του με την ελάχιστη ενόχληση και την μη τροποποίηση του μικροκλίματος της περιβάλλουσας επιφάνειας, είναι οι ουσιαστικοί παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται σοβαρά στη χρήση των λυσιμέτρων.

Πίνακας 5.1: Περίληψη για την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής για διάφορες κλίμακες χρόνου και χώρου, (Τσακίρης, 1995).

	Λεπτό	Ωρα	Ημέρα	Εβδομάδα	Μήνας	Έτος	Δεκαετίες
Ευρύτερη περιοχή					Penman - Monteith, $\Gamma_c \neq 0$		Υδατικό ισοζύγιο, $\Delta SW = 0$
Λεκάνη			Μεθ. κατακορ. απόκλισης			Υδατικό ισοζύγιο, $\Delta SW = 0$	
Ομοιόμορφη έκταση			Penman - Monteith, $\Gamma_c = 0$ με υγρή βλάστηση				
			Ενεργ. Ισοζύγ.				
			Αεροδυν. Μέθοδος		Penman - Monteith, $\Gamma_c \neq 0$		
			Μέθοδος Κατατομών				
			Μεθ. κατακορ. απόκλισης				
Ομάδα φυτιών				Ζυγισμένο λυσίμετρο			Μη ζυγισμένο λυσίμετρο

5.3.2 Μικρομετεωρολογικές Μέθοδοι

Με αυτές τις μεθόδους η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκτιμάται από τις μετεωρολογικές μεταβλητές (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα του ανέμου, ακτινοβολία) που μετριέται στην (ή πάνω από την) εξατμίζουσα επιφάνεια. Για τις περισσότερες των μεθόδων στιγμιαία δεδομένα συγκεντρώνονται και ολοκληρώνονται. Απαιτείται εξοπλισμός ευαίσθητων οργάνων και μηχανημάτων περισυλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Έτσι αυτές οι μέθοδοι είναι πολλές φορές υψηλού κόστους και περιορίζονται επομένως σε μικρές κρίσιμες περιόδους. Η εξατμισοδιαπνοή μετριέται σε περιόδους μικρότερες της μίας ώρας ή στη βάση ημερήσιων και μερικές φορές μηνιαίων τιμών. Προς το παρόν μπορούν να εφαρμόζονται σε μεγάλες, επίπεδες επιφάνειες με ομοιόμορφη φυτοκάλυψη. Πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή όταν εφαρμόζονται σε αεροδυναμικά τραχείες φυτοκαλυμμένες επιφάνειες και κάτω από συνθήκες οριζόντιας μεταφοράς. Οι περισσότερες μέθοδοι είναι κατάλληλες για ερευνητικούς σκοπούς και μόνο λίγες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνήθεις μετρήσεις, για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι οι εξής (όπως παρουσιάζονται και περιληπτικά στο πίνακα 5.1):

- Μέθοδος των Κατακόρυφων Απολίξεων (*Eddy Covariance* ή *Eddy Correlation Method*)
- Αεροδυναμική Μέθοδος ή Μέθοδος των Βαθμίδων (*Gradient or Aerodynamic Method*)
- Μέθοδος Κατανομών (*Profile Method*)
- Μέθοδος Συντελεστή Μαζικής Μεταφοράς (*Bulk Transfer Method*)
- Μέθοδος Ενεργειακού Ισοζυγίου ή Μέθοδος του Λόγου Bowen (*Energy Balance or Bowen Ratio Method*)
- Προσέγγιση Penman (*Penman Approach*)

5.4 Συσχέτιση πραγματικής και δυνατής εξατμισοδιαπνοής

Από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να συσχετίσουν εμπειρικά σε ετήσια κλίμακα την πραγματική εξατμισοδιαπνοή μιας λεκάνης κατ' αρχήν με την βροχόπτωση P και στην συνέχεια με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p . Αναπτύχθηκαν έτσι διάφορες απλές εμπειρικές εξισώσεις, που συνοψίζουν την εμπειρία

από πολλές λεκάνες της Ευρώπης και της Αμερικής, οι οποίες είναι χρήσιμες για προκαταρκτικές εκτιμήσεις του υδατικού ισοζυγίου για περιπτώσεις που δεν διατίθενται δεδομένα απορροής. Η διάφορα ανάμεσα στην πραγματική και την δυνατή εξατμισοδιαπνοή μπορεί να είναι μικρή στην περίπτωση που υπάρχει επάρκεια νερού και η επιφάνεια είναι πλήρως καλυμμένη με βλάστηση. Στις περιπτώσεις όμως που για μικρά χρονικά διαστήματα παρατηρείται έλλειψη νερού ή η βλάστηση δεν καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του εδάφους, είναι φανερό ότι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή θα είναι αισθητά μικρότερη της δυνατής. Οι περισσότερες εμπειρικές εξισώσεις στηρίζονται στην λογική ότι για εξαιρετικά ξηρές συνθήκες, δηλαδή όταν ο λόγος E_p/P παίρνει πολύ ψηλές τιμές, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή τείνει να είναι ίση με την βροχόπτωση ή $E/P \rightarrow 1$, έτσι ώστε η απορροή πρακτικώς να μηδενίζεται. Αντίθετα, για εξαιρετικά υγρές συνθήκες, δηλαδή όταν $E_p/P \rightarrow 0$, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή τείνει να είναι ίση με την δυνατή ή $E/P \rightarrow E_p/P$.

Διάφορες σχέσεις της μορφής :

$$E = KE_p \quad (5.4)$$

έχουν προταθεί για να συνδέσουν την πραγματική με την δυνατή εξατμισοδιαπνοή, όπου K είναι συνάρτηση της βροχόπτωσης, εδαφικής υγρασίας και ακτινοβολίας. Στην απλούστερη τους μορφή το K παίρνει την τιμή $K=1$ για υγρασία μεγαλύτερη του σημείου μαράνσεως και $K=0$ για υγρασία ίση με αυτή του σημείου μαράνσεως. δηλαδή η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι κλάσμα της υγρασίας που παραμένει στο έδαφος.

Επίσης έχουν διατυπωθεί εξισώσεις που συνδέουν την βροχόπτωση και την δυνητική εξατμισοδιαπνοή με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή:

$$E = P \left[1 - e^{-\left(\frac{E_p}{P}\right)} \right] \quad (5.5)$$

$$E = E_p \tanh\left(-\frac{E_p}{P}\right) \quad (5.6)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποδίδονται στον OI'dekor, όπου βασίζονται σε προηγούμενες εργασίες των Schreiber, Ule και Penck, και χρονολογούνται στα 1911.

Ο Budyko (1948) πρότεινε εξισώσεις με βάση την βροχόπτωση και την καθαρή ακτινοβολία με μοναδική διάφορα από τις παραπάνω την αντικατάσταση της δυνατής εξατμισοδιαπνοής E_p από την ετήσια καθαρή ακτινοβολία, εκφρασμένη σε ισοδύναμο ύψος νερού (R_n/λ):

$$E_1 = P \left[1 - e^{-\frac{R_n/\lambda}{P}} \right] \quad (5.7)$$

$$E_2 = (R_n/\lambda) \tanh\left(-\frac{R_n/\lambda}{P}\right) \quad (5.8)$$

Ο ίδιος παρατήρησε ότι τα πραγματικά δεδομένα βρίσκονται ανάμεσα στις δυο καμπύλες που ορίζουν οι εξισώσεις που διατύπωσε και γι' αυτό τελικά πρότεινε να υπολογίζεται η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ως ο γεωμετρικός μέσος των δυο τιμών E_1 και E_2 :

$$E = \sqrt{E_1 E_2} \quad (5.9)$$

Τέλος ο Turc (1954) συνέδεσε την πραγματική εξατμισοδιαπνοή με την βροχόπτωση και κάποιους θερμοκούς δείκτες:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L_T}\right)^2}} \quad \text{για } P/L_T > 0.316 \quad (5.10)$$

και

$$E = P \quad \text{για } P/L_T \leq 0.316 \quad (5.11)$$

όπου L_T θερμικός δείκτης που υποκαθιστά την δυνητική εξατμισοδιαπνοή και συναρτάται με την μέση ετήσια θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{C}$) με βάση την σχέση:

$$L_T = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (5.12)$$

5.5 Προσομοίωση της εξατμισοδιαπνοής

Ένα μοντέλο που θα περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες της ροής του νερού μέσα από το σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα και θα βασίζεται σε καταξιωμένες φυσικές αρχές θα μπορεί να εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Όμως η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου δεν είναι εφικτή αφενός μεν γιατί όλες οι διεργασίες της ροής του νερού δεν είναι εξολοκλήρου κατανοητές και αφετέρου εάν ήταν κατανοητές η μαθηματική τους παρουσίαση θα απαιτούσε ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων στον υπολογιστή. Έτσι τα μοντέλα προσομοίωσης της εξατμισοδιαπνοής ποικίλουν, από τα σύνθετα, που έχουν φυσικό υπόβαθρο και αναφέρονται και στις φυσικές διεργασίες που διέπουν την εξατμισοδιαπνοή, ως τα πλέον απλά που βασίζονται σε συσχετίσεις της εξατμισοδιαπνοής με μια άλλη παράμετρο. Ένα μοντέλο βέβαια δεν μπορεί να αναμένεται να εκτιμά μια μεταβλητή καλύτερα από την μέτρηση της. Επειδή όμως η μέτρηση της φυσικής εξατμισοδιαπνοής έχει αποδειχθεί δύσκολη και δαπανηρή, γίνονται μέχρι σήμερα πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων υπολογισμού, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Για λόγους ευκολίας, τα διάφορα μοντέλα για την δυνητική και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, ευρέως ταξινομούνται σε εκείνα που βασίζονται σε συσχετίσεις και σε εκείνα που βασίζονται στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής.

5.5.1 Μοντέλα βασισμένα σε συσχετίσεις

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε μια ή περισσότερες μετεωρολογικές μεταβλητές και εκτιμούν την εξατμισοδιαπνοή με διάφορους βαθμούς επιτυχίας. Οι απαιτήσεις σε μετεωρολογικά δεδομένα είναι μικρές, οι μέθοδοι είναι απλές και χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα στην παρούσα διπλωματική. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε συσχετίσεις και για αυτό η χρήση τους είναι αρκετά τοπική. Η ακρίβεια τους ελαττώνεται αισθητά εάν χρησιμοποιηθούν έξω από την περιοχή βαθμονόμησης τους.

α) Μοντέλα βασισμένα στην ηλιακή ακτινοβολία

Οι μεγαλύτερες ποσότητες της ενέργειας που καταναλώνεται στην εξατμισοδιαπνοή προέρχονται από δυο πηγές: την ενέργεια από την ακτινοβολία και την ενέργεια από αέρα

που είναι θερμότερος από ότι η επιφάνεια. Και οι δυο αυτές μορφές ενέργειας βασικά ανάγονται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η περισσότερη από την ενέργεια που απαιτείται για την εξατμισοδιαπνοή, ακόμη και στις ξηρές περιοχές, προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ως εκ τούτου η εξατμισοδιαπνοή σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία και η εξάρτησή της από αυτήν μεταβάλλεται, διότι το κλίμα και οι συνθήκες επιφάνειας αλλάζουν με την εποχή του έτους. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις ξηρές περιοχές η μεταφορά ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο και η προς τα κάτω μεταφορά της αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό της αντίστοιχης ενέργειας που παρέχεται για εξατμισοδιαπνοή στις υποτροπικές και ημίξηρες περιοχές. Πολλές από τις μεθόδους που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία εμπεριέχουν και κάποιον όρο εξαρτώμενο από την θερμοκρασία.

Παρακάτω αναφέρονται οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον Turc (1954) και τους Jensen-Haise (1963) οι οποίες δίνουν μικρότερες τιμές από τις πραγματικές για το E_p κατά την διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι υπερεκτιμούν την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.

i) Μοντέλο Turc (1954)

Η σχέση που δίνει ο Turc (1954) για τον υπολογισμό του E_p είναι η ακόλουθη:

$$E_p = \frac{P + 80}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + 45}{L^{T_c}}\right)^2}} \text{ mm/10 μέρες} \quad (5.13)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοή σε mm/10 μέρες,
- P η βροχόπτωση σε mm/10 μέρες,
- T_a η μέση θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$,

$$\bullet L^{T_c} = \frac{(T + 2)\sqrt{H_{sh}}}{16}, \quad (5.14)$$

• H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία ($\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$) που υπολογίζεται με βάση τον τύπο: $H_{sh} = H_{sh}^{top} (a + bn / N)$ (5.15). Στη Σχέση (5.15) το H_{sh}^{top} δίδεται από τον Πίνακα 5.2 σαν συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους για περίοδο δέκα ημερών. Τα a και b είναι εμπειρικές σταθερές που σύμφωνα με τον Koormanis (1969) παίρνουν τις τιμές:

$a = 0.20$ και $b = 0.53$ για εύκρατα κλίματα και $a = 0.28$ και $b = 0.45$ για τροπικά. Το n παριστάνει την πραγματική διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας, ενώ το N την μέγιστη δυνατή διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας.

ii) Μοντέλο Jensen – Haise (1963)

Η σχέση που δίνουν οι Jensen- Haise (1963) για τον υπολογισμό της E_p είναι η ακόλουθη:

$$E_p = (0.025T_a + 0.008) H_{sh} / 59 \quad (5.16)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοή σε mm/μέρα,
- H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Σχέση 5.15)
- T_a η μέση θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$

β) Μοντέλα βασισμένα στην θερμοκρασία

Μέθοδοι βασισμένες σχεδόν αποκλειστικά στην θερμοκρασία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής στις περιοχές που παρουσιάζουν έλλειψη μετεωρολογικών και κλιματολογικών δεδομένων, όπως και στην περίπτωση της Γερμασόγειας Κύπρου. Αυτές οι μέθοδοι στηρίζονται στην έντονη συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για μικρές εκτάσεις και για συγκεκριμένα χρονικές περιόδους για τις οποίες εκτιμήθηκαν οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές. Μερικά από τα βασισμένα στη θερμοκρασία μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική περιγράφονται παρακάτω:

i) Μοντέλο Thornthwaite (1948)

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμησή αυτής:

$$E_p = 1.6 L_d (10 T_a / I)^a \quad (5.17)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοή σε mm / μήνα,
- T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής σε °C,
- I ο δείκτης θερμότητας που δίνεται από την σχέση:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5}\right)^{1.514} \quad (T_n \text{ η μέση κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα}) \quad (5.18)$$

- $\alpha = 0.000000675 I^3 - 0.000077 I^2 + 0.01792 I + 0.49239$ (5.19)
- L_d διορθωτικός συντελεστής που είναι συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους (34.43° Β για την Γερμασόγεια) και δίνεται από τον Πίνακα 5.4.

Η μέθοδος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, αφού η υπολογιζόμενη εξατμισοδιαπνοη υποεκτιμάται, όταν η ακτινοβολία που προσλαμβάνει η γη έχει τη μέγιστη τιμή της (στη διάρκεια του καλοκαιριού και κατά συνέπεια είναι εκτός φάσης το φθινόπωρο). Αυτό αποδίδεται στην χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία. Μεγάλη υποεκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με αυτή την μέθοδο διαφαίνεται στα ξηρά και ημίξηρα κλίματα όπως είναι αυτό της Γερμασόγειας. Επίσης η χρησιμοποίηση της μεθόδου για μικρά χρονικά διαστήματα δεν είναι κατάλληλη επειδή η μέση θερμοκρασία μικρών χρονικών περιόδων δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο για την ενέργεια που διατίθεται στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής. Είναι περισσότερο επιτυχής η μέθοδος για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η εξατμισοδιαπνοή είναι όμοιες συναρτήσεις της καθαρής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου αυτοσυσχετίζονται όταν οι θεωρούμενες χρονικές περίοδοι είναι μεγάλες.

ii) Μέθοδος Blaney- Criddle (1959)

Οι Blaney- Criddle (1959) ανέπτυξαν μια μέθοδο για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ή όπως την ονόμασαν "καταναλωτικής χρήσης". Η "καταναλωτική χρήση" c_u σε μηνιαία βάση δίνεται:

$$c_u = k_m f \quad (5.20)$$

όπου k_m είναι ένας εμπειρικός μηνιαίος συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (συναρτήσεως του τύπου του φυτού) και f είναι ένας μηνιαίος παράγοντας καταναλωτικής χρήσης ίσος

με: $0.01(1.8T_a + 32)P$ (5.21), όπου T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και P είναι το μηνιαίο ποσοστό (%) των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο πόσο ωρών ημέρας. Η ολική καταναλωτική χρήση για μια εποχή C_u είναι

$$C_u = \sum c_u = \sum k_m f \quad (5.21)$$

Στη λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος της Blaney- Criddle (Doorenbos-Pruitt, 1977) όπου η εκτίμηση για την εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τον τύπο:

$$E_p = k P (0.46T_a + 8.13) \quad (5.22)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοή σε mm / μήνα,
- k ο φυτικός συντελεστής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας ίσος με 0.80 (γενικά εξαρτώμενος από τον τύπο βλάστησης, την εποχή και την τοποθεσία και με τιμές $0.5 < k < 1.2$),
- T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$,
- P μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας τον χρόνο, που δίδεται από τον Πίνακα 5.3.

iii) Μοντέλο Kharrufa (1985)

Σύμφωνα με τον Kharrufa (1985) η εξατμισοδιαπνοή συσχετίζεται με την θερμοκρασία με την εξής εξίσωση:

$$E_p = 0.34 P T_a^{1.3} \quad (5.23)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοή σε mm / μήνα,
- T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$,
- P μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας τον χρόνο, που δίδεται από τον Πίνακα 5.3.

iv) Μοντέλο Hargreaves (1974)

Ο Hargreaves (1974) ανέπτυξε μια μέθοδο για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής που είναι απλή και απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα. Η μέθοδος μπορεί να γραφτεί ως:

$$E_p = 0.0023 H_{sh}^{top} TD^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (5.24)$$

όπου:

- E_p η δυνατή εξατμισοδιαπνοη σε mm / μήνα,
- T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε °C,
- TD η διάφορα μεταξύ μέσης μηνιαίας μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε °C,
- H_{sh}^{top} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $cal\ cm^{-2}\ day^{-2}$ στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας που δίδεται από τον Πίνακα 5.2 ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους.

γ) Μοντέλα βασισμένα στην υγρασία

Ο Dalton (1800) παρήγαγε μια γενική σχέση που εκτιμά την εξάτμιση σαν συνάρτηση της τάσης των υδρατμών:

$$E = C(e_o - e_a) \quad (5.25)$$

όπου C είναι μια εμπειρική σταθερά που εμπεριέχει κάποια εξάρτηση από τον άνεμο, e_o είναι η τάση των υδρατμών στην επιφάνεια και e_a είναι η πραγματική τάση των υδρατμών στον αέρα, σε κάποιο σημείο πάνω από την επιφάνεια. Παρ' όλα αυτά, η απλουστευμένη αυτή σχέση, δεν μπορεί να εφαρμόζεται εύκολα λόγω δυσκολίας προσδιορισμού του e_o . Μόνον όταν η επιφάνεια είναι κορεσμένη (π.χ. μια λίμνη) μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η τάση των υδρατμών στην επιφάνεια είναι ίση με την τάση κεκορεσμένων ατμών στην επιφάνεια (e_s) στην θερμοκρασία επιφάνειας T_s .

Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες παραλλαγές της σχέσης (5.25). Ο Rohwer (1931) δίνει:

$$E = (0.44 + 0.118u)(e_s - e_a) \quad (5.26)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του ανέμου. Αυτή η Σχέση (5.26) παρήχθη από δεδομένα εξατμισιμέτρου λεκάνης σε ύψος πάνω από 1500 μέτρα στο Colorado. Ο Penman (1948) πρότεινε:

$$E = 0.40(e_s - e_a)(1 + 0.17u_2) \quad (5.27)$$

όπου u_2 είναι ο άνεμος μετρούμενος στα 2 μέτρα πάνω από το έδαφος.

Ο Harbeck (1962) ανέπτυξε μια ελαφρά διαφορετική εξίσωση για την εκτίμηση της εξάτμισης από ταμιευτήρες νερού:

$$E = Nu_2(e_s - e_a) \quad (5.28)$$

όπου N συντελεστής σχετιζόμενος με το εμβαδόν της επιφάνειας του ταμιευτήρα.

Πίνακας 5.2: Προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh}^{top} στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας.

h, month	Jan.			Feb.			March			April			May			June			July			August			Sept.			Oct.			Nov.			Dec.				
	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11	111	1	11
60	1035	980	900	795	670	505	355	230	135	65	10																											
70	980	935	860	770	670	570	470	375	290	210	135	80	35	10																								
80	930	885	810	710	610	510	410	310	210	110	60	25	10																									
90	880	835	760	660	560	460	360	260	160	60	30	10																										
100	830	785	710	590	490	390	290	190	90	30	15																											
110	780	735	660	540	440	340	240	140	40	15																												
120	730	685	610	490	390	290	190	90	30	15																												
130	680	635	560	450	350	250	150	50	10																													
140	630	585	510	410	310	210	110	40	10																													
150	580	535	460	370	270	170	70	20	10																													
160	530	485	410	330	230	130	50	10	10																													
170	480	435	360	290	190	90	30	10	10																													
180	430	385	310	250	150	50	10	10	10																													
190	380	335	260	210	110	10	10	10	10																													
200	330	285	210	170	70	10	10	10	10																													
210	280	235	160	130	30	10	10	10	10																													
220	230	185	110	90	10	10	10	10	10																													
230	180	135	60	50	10	10	10	10	10																													
240	130	85	10	10	10	10	10	10	10																													
250	80	35	10	10	10	10	10	10	10																													
260	30	10	10	10	10	10	10	10	10																													
270	10	10	10	10	10	10	10	10	10																													
280	10	10	10	10	10	10	10	10	10																													
290	10	10	10	10	10	10	10	10	10																													
300	10	10	10	10	10	10	10	10	10																													

Πίνακας 5.3: Μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας P.

Βόρειον Πόλος;	Ιανουάρ.	Φεβρ.	Μάρτ.	*Απρίλ.	Μάιος	Ιούνιος	Ιουλίου	Αύγουστ.	Σεπτέμβρ.	Οκτώβρ.	Νοέμβρ.	Δεκέμβρ.
0	8,50	7,66	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50
5	8,32	7,57	8,47	8,29	8,65	8,41	8,67	8,60	8,23	8,42	8,07	8,30
10	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
15	7,94	7,36	8,43	8,44	8,98	8,80	9,05	8,83	8,28	8,36	7,75	7,88
20	7,74	7,25	8,41	8,52	9,15	9,00	9,25	8,96	8,30	8,18	7,58	7,66
25	7,53	7,14	8,39	8,61	9,33	9,23	9,45	9,09	8,32	8,05	7,40	7,42
30	7,30	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,33	7,97	7,19	7,15
32	7,20	6,97	8,37	8,76	9,62	9,59	9,77	9,27	8,34	7,95	7,11	7,05
34	7,10	6,91	8,36	8,80	9,72	9,70	9,88	9,33	8,36	7,90	7,02	6,92
36	6,99	6,85	8,35	8,85	9,82	9,82	9,99	9,40	8,37	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,90	9,92	9,95	10,10	9,47	8,38	7,80	6,82	6,66
40	6,76	6,72	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,39	7,75	6,72	6,52
42	6,63	6,65	8,31	9,00	10,14	10,22	10,35	9,62	8,40	7,69	6,62	6,37
44	6,49	6,58	8,30	9,06	10,26	10,38	10,49	9,70	8,41	7,63	6,49	6,21
46	6,34	6,50	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,57	6,36	6,04
48	6,17	6,41	8,27	9,18	10,53	10,71	10,80	9,89	8,44	7,51	6,23	5,86
50	5,98	6,30	8,24	9,24	10,68	10,91	10,99	10,00	8,46	7,45	6,10	5,65
52	5,77	6,19	8,21	9,29	10,85	11,13	11,20	10,12	8,49	7,39	5,93	5,43
54	5,55	6,08	8,18	9,36	11,03	11,38	11,43	10,26	8,51	7,30	5,74	5,18
56	5,30	5,95	8,15	9,45	11,22	11,67	11,69	10,40	8,53	7,21	5,54	4,89
58	5,01	5,81	8,12	9,55	11,46	12,00	11,98	10,55	8,55	7,10	5,31	4,56
60	4,67	5,65	0,08	9,65	11,74	12,39	12,31	10,70	8,57	6,99	5,04	4,22
Νότιον												
0	8,50	7,66	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50
5	8,68	7,76	8,51	8,15	8,34	8,05	8,33	8,38	8,19	8,56	8,37	8,68
10	0,86	7,87	8,53	8,09	8,18	7,86	8,14	8,27	8,17	8,62	8,53	8,88
15	9,05	7,98	8,55	8,02	8,02	7,65	7,95	8,15	8,15	8,68	8,70	9,10
20	9,24	8,09	8,57	8,94	7,85	7,43	7,76	8,03	8,13	8,76	8,87	9,33
25	9,46	8,21	8,60	7,84	7,66	7,20	7,54	7,90	8,11	8,86	9,04	9,58
30	9,70	8,33	8,62	7,73	7,45	6,96	7,31	7,76	8,07	8,97	9,24	9,85
32	9,81	8,39	8,63	7,69	7,36	6,85	7,21	7,70	8,06	9,01	9,33	9,96
34	9,92	8,45	8,64	7,64	7,27	6,74	7,10	7,63	8,05	9,06	9,42	10,08
36	10,03	8,51	8,65	7,59	7,18	6,62	6,99	7,56	8,04	9,11	9,51	10,21
38	10,15	8,57	8,66	7,54	7,08	6,50	6,87	7,49	8,03	9,16	9,61	10,34
40	10,27	8,63	8,67	7,49	7,97	6,37	6,76	7,41	8,02	9,21	9,71	10,49
42	10,40	8,70	8,68	7,44	6,85	6,23	6,64	7,33	8,01	9,26	9,82	10,64
44	10,54	8,78	8,69	7,38	6,73	6,08	6,51	7,25	7,99	9,31	9,94	10,80
46	10,69	8,86	8,70	7,32	6,61	5,92	6,37	7,16	7,96	9,37	10,07	10,97

Πίνακας 5.4: Διορθωτικός συντελεστής L_d .

month/ latitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$^{\circ}N$												
0	1,04	,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	,99	1,02
10	1,00	,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	,98	,99
15	,97	,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	,95	,97
20	,95	,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	,93	,94
25	,93	,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	,99	,91	,91
26	,92	,88	1,03	1,06	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	,99	,91	,91
27	,92	,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	,99	,90	,90
28	,91	,88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	,98	,90	,90
29	,91	,87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	,98	,90	,89
30	,90	,87	1,03	1,07	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	,98	,89	,88
31	,90	,87	1,03	1,07	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	,98	,89	,88
32	,89	,86	1,03	1,09	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	,98	,88	,87
33	,88	,86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	,97	,88	,86
34	,88	,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	,97	,87	,86
35	,87	,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	,97	,86	,85
36	,87	,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	,97	,86	,84
37	,86	,84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	,97	,85	,83
38	,85	,84	1,03	1,10	1,23	1,24	1,25	1,17	1,04	,96	,84	,83
39	,85	,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	,96	,84	,82
40	,84	,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	,96	,83	,81
41	,83	,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	,96	,82	,80
42	,82	,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	,95	,82	,79
43	,81	,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	,95	,81	,77
44	,81	,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	,95	,80	,76
45	,80	,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	,94	,79	,75
46	,79	,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	,94	,79	,74
47	,77	,80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	,93	,78	,73
48	,76	,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	,93	,77	,72
49	,75	,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	,93	,76	,71
50	,74	,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	,92	,76	,71
$^{\circ}S$												
5	1,06	,95	1,04	1,00	1,02	,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,0
10	1,08	,97	1,05	,99	1,01	,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,1
15	1,12	,98	1,05	,98	,98	,94	,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,1
20	1,14	1,00	1,05	,97	,96	,91	,95	,99	1,00	1,08	1,09	1,1
25	1,17	1,01	1,05	,96	,94	,88	,93	,98	1,00	1,10	1,11	1,1
30	1,20	1,03	1,06	,95	,92	,85	,90	,96	1,00	1,12	1,14	1,2
35	1,23	1,04	1,06	,94	,89	,82	,87	,94	1,00	1,13	1,17	1,2
40	1,27	1,06	1,07	,93	,86	,78	,84	,92	1,00	1,15	1,20	1,2
42	1,28	1,07	1,07	,92	,85	,76	,82	,92	1,00	1,16	1,22	1,2
44	1,30	1,08	1,07	,92	,83	,74	,81	,91	,99	1,17	1,23	1,2
46	1,32	1,10	1,07	,91	,82	,72	,79	,90	,99	1,17	1,25	1,2
48	1,34	1,11	1,08	,90	,80	,70	,76	,89	,99	1,18	1,27	1,2
50	1,37	1,12	1,08	,89	,77	,67	,74	,88	,99	1,19	1,29	1,2

δ) Μοντέλα βασισμένα σε μετρήσεις εξατμισιμέτρων

Με αυτά τα μοντέλα, μετριέται η εξάτμιση από σταθερές επιφάνειες γνωστών διαστάσεων και συσχετίζεται με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή με ένα συντελεστή. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η ET_p ελέγχεται αποκλειστικά από την ατμόσφαιρα. Οι πιο γνωστές από αυτά τα μοντέλα είναι:

- Μέθοδος εξατμισιμέτρου λεκάνης (*Evaporation pan method*)
- Μέθοδος ατμομέτρου (*Atmometer method*)

5.5.2 Μοντέλα βασισμένα στις διεργασίες της Εξατμισοδιαπνοής

Τα πιο γνωστά από αυτά τα μοντέλα είναι:

- Μέθοδοι Συνδυασμού (*Combination methods*)
- Μέθοδος Εξατμισοδιαπνοής Ισορροπίας (*Equilibrium Evapotranspiration*)
- Μέθοδος των Priestley-Taylor

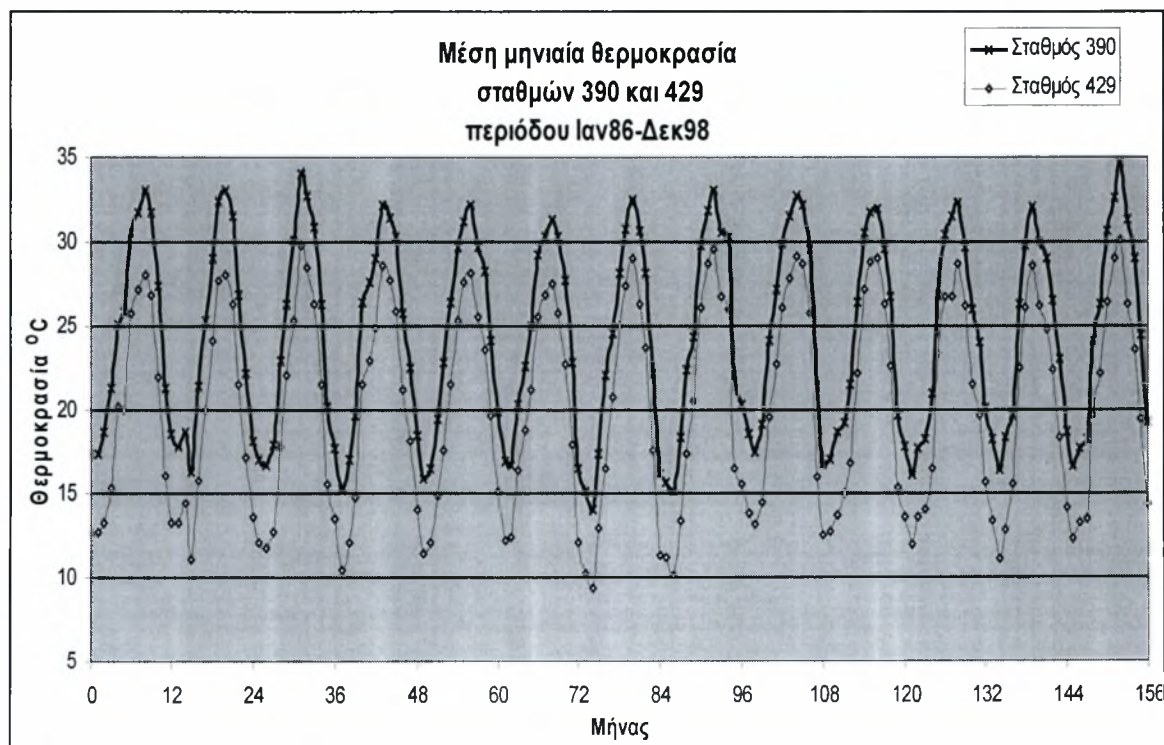
5.6 Μοντέλα εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκτιμήθηκε με την βοήθεια μοντέλων βασισμένα σε συσχετίσεις. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα μοντέλα βασισμένα στη θερμοκρασία (Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves, Kharrufa) και δύο μοντέλα βασισμένα στην ηλιακή ακτινοβολία (Turc, Jensen-Haise). Σε όλα τα μοντέλα πάντως έπρεπε να υπολογιστεί η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

5.6.1 Υπολογισμός μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας της λεκάνης απορροής Γερμασόγειας Κύπρου

Η κατανομή της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την λεκάνη της Γερμασόγειας Κύπρου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Τα δεδομένα των ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας σε °C, που πάρθηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς 390 και 429, επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να μετατραπούν οι ημερήσιες τιμές σε μηνιαίες. Έχοντας τις μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών και έτσι προέκυψε η μέση ημερήσια θερμοκρασία των σταθμών. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε με τη βοήθεια του μέσου όρου η μέση μηνιαία θερμοκρασία των σταθμών. Η χρονική περίοδος για την οποία επεξεργάστηκαν τα δεδομένα ήταν από τον Ιανουάριο του 1986 έως τον Δεκέμβριο του 1998.

Στο παρακάτω Σχήμα (5.1) φαίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας των σταθμών 390 και 429:



Σχήμα 5.1: Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιόδου Ιαν86-Δεκ98 των σταθμών 390 και 429.

Αφού υπολογίσθηκαν οι μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας, στη συνέχεια βρέθηκαν οι ετήσιες τιμές θερμοκρασίας για κάθε σταθμό της περιόδου 1986-1998 (Πίνακας 5.5)

καθώς και η μέση ετήσια θερμοκρασία του καθενός (Πίνακας 5.6).

Πίνακας 5.5: Ετήσια θερμοκρασία σταθμών 429, 390 για την περίοδο των ετών 1986-1998

ΣΤΑΘΜΟΣ	429	390
	ΕΤΗΣΙΑ	ΕΤΗΣΙΑ
ΕΤΟΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
1986	20,06	19,40
1987	19,42	18,89
1988	19,73	19,27
1989	20,18	19,27
1990	20,20	19,33
1991	19,96	19,24
1992	19,17	18,31
1993	20,16	19,19
1994	20,82	19,63
1995	20,28	19,07
1996	20,39	19,70
1997	19,66	19,17
1998	20,83	20,30

Πίνακας 5.6: Μέση ετήσια θερμοκρασία περιόδου 86-98 και υψόμετρο σταθμών 390,429.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ
ΛΕΚΑΝΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ	ΣΤΑΘΜΟΥ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C)
390	12	19,29
429	70	20,07

Από το πίνακα 5.6 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το υψόμετρο του σταθμού αυξάνει και η μέση ετήσια θερμοκρασία. Έτσι βρέθηκε η γραμμική σχέση που συσχετίζει το υψόμετρο

του κάθε σταθμού με την μέση ετήσια θερμοκρασία (Σχήμα 5.2) και για την περίπτωση αυτή η σχέση που βρέθηκε είναι η εξής:

$$y = 0,0134x + 19,13 \quad (5.29)$$

όπου y = ετήσια θερμοκρασία (T) σε °C και x = υψόμετρο σταθμού (El) σε m.

Σύμφωνα με τη Σχέση 5.29, για κάθε αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m η ετήσια βροχόπτωση αυξάνεται κατά 1,34 βαθμούς Κελσίου.

Για την εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του σταθμού 429, της περιόδου των ετών 1986 έως 1998 γιατί είναι ο μόνος σταθμός με δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας και εντός της λεκάνης. Η εκτίμηση των μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο (575 m) της λεκάνης της Γερμασόγειας, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$T_k = T_{T(k)} - \frac{505 * 1,34}{100} \quad (5.30)$$

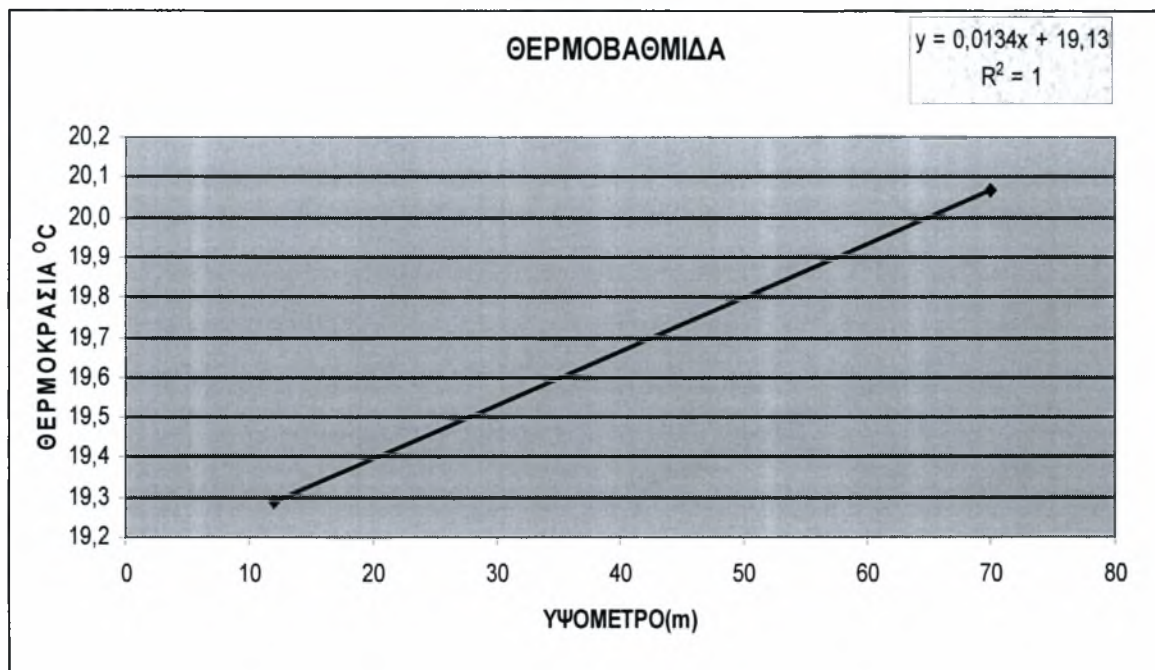
και

$$T_i^k = \frac{T_k * T_{T(i)}^k}{T_{T(k)}} \quad (5.31)$$

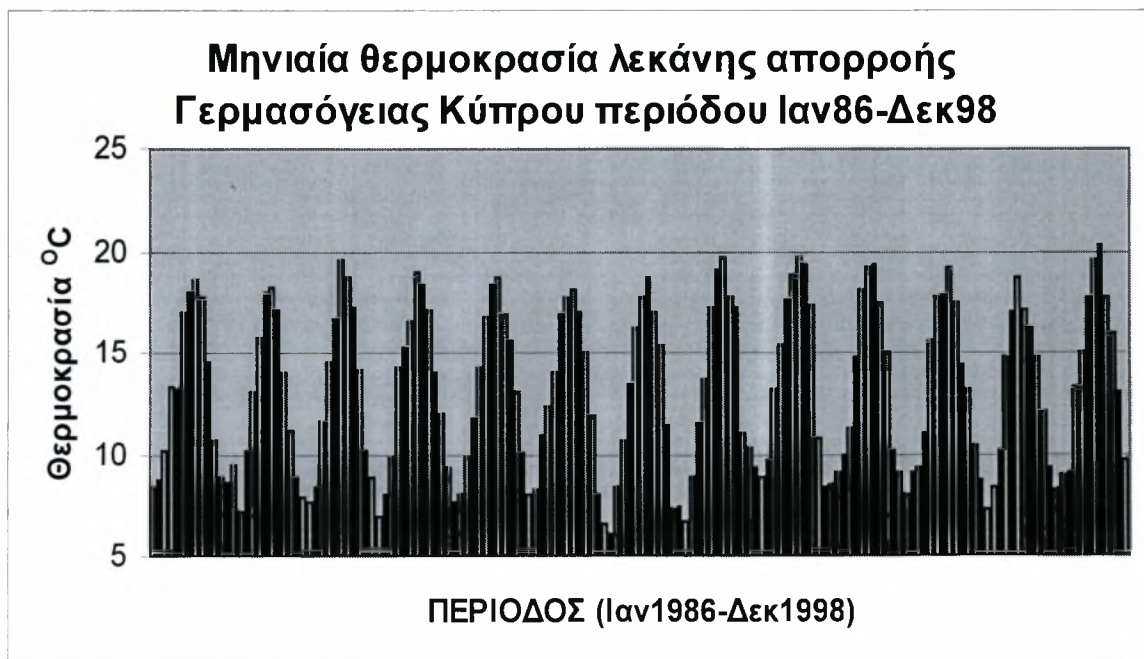
όπου :

- $T_{T(k)}$ = ετήσια θερμοκρασία στο σταθμό 429 (Πίνακας 5.5), κατά το έτος k,
- T_k = ετήσια θερμοκρασία στη λεκάνη της Γερμασόγειας (Πίνακας 5.7, Σχήμα 5.4), κατά το έτος k,
- T_i^k = μηνιαία θερμοκρασία, κατά το μήνα i και το έτος k, στη λεκάνη της Γερμασόγειας (Σχήμα 5.3),
- $T_{T(i)}^k$ = μηνιαία θερμοκρασία, κατά το μήνα i και το έτος k, στο σταθμό 429 (Σχήμα 5.1),
- 1,34 = θερμοβαθμίδα που υπολογίστηκε με τη Σχέση (5.29),
- 505 = διαφορά ανάμεσα στο υψόμετρο του σταθμού 429 και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης της Γερμασόγειας (575 – 70).

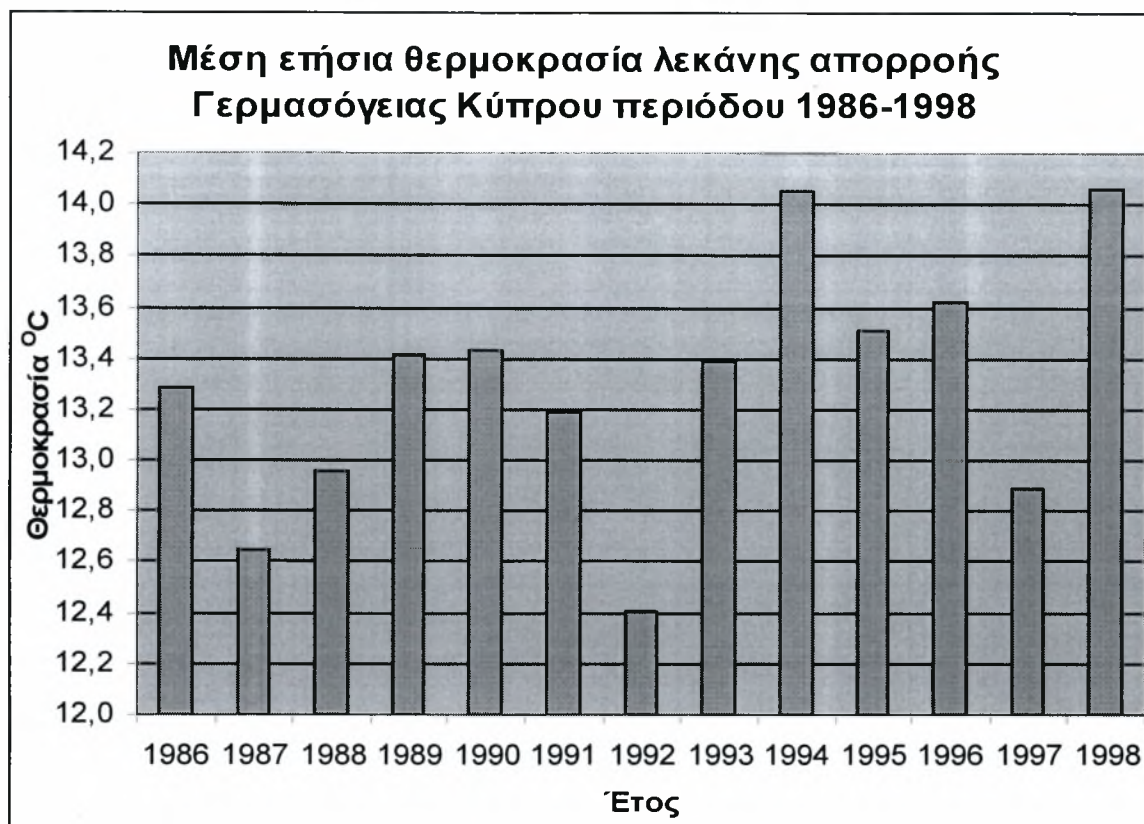
Με την εφαρμογή των Σχέσεων (5.30) και (5.31) υπολογίζονται η μέση μηνιαία θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης της Γερμασόγειας για την περίοδο 1986-1998 (Σχήμα 5.3), (μέθοδος θερμοβαθμίδας).



Σχήμα 5.2: Γραμμική συσχέτιση υψόμετρου με την μέση ετήσια θερμοκρασία της περιόδου 1986-1998 των σταθμών 390 και 429 της λεκάνης της Γερμασόγειας.



Σχήμα 5.3: Μηνιαία θερμοκρασία περιόδου Ιαν1986-Δεκ1998 της λεκάνης Γερμασόγειας.



Σχήμα 5.4: Μέση ετήσια θερμοκρασία των ετών 1986-1998 λεκάνης Γερμασόγειας.

Πίνακας 5.7: Μέση ετήσια θερμοκρασία περιόδου 1986-1998 λεκάνης Γερμασόγειας.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΛΕΚΑΝΗ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ
1986 - 1998	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ
ΕΤΟΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
1986	13,29
1987	12,65
1988	12,96
1989	13,41
1990	13,43
1991	13,19
1992	12,40
1993	13,39
1994	14,05
1995	13,51
1996	13,62
1997	12,89
1998	14,06

5.6.2 Περιγραφή των μοντέλων εξατμισοδιαπνοής

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα μοντέλα εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία έτσι ώστε να εκτιμηθεί η εξατμισοδιαπνοή, η οποία αποτελεί δεδομένο εισόδου (input) για τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου.

α) Μοντέλο *Thorntwaite*

Εφόσον υπολογίστηκε η μηνιαία θερμοκρασία T_a της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας, στη συνέχεια βρέθηκε ο διορθωτικός συντελεστής L_d από τον Πίνακα 5.4 με γραμμική παρεμβολή για το γεωγραφικό πλάτος της λεκάνης ($34,43^\circ$ Β) και για κάθε μήνα του χρόνου (Πίνακας 5.8). Υπολογίζοντας μετά τον αθροιστικό δείκτη θερμότητας I από τη Σχέση (5.18), τη μέση κανονική μηνιαία θερμοκρασία της περιόδου 1986-1998 και τον συντελεστή a από τη Σχέση (5.19), (Πίνακας 5.8), εκτιμήθηκε τελικά η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης από τη Σχέση (5.17).

Πίνακας 5.8: Μηνιαίος διορθωτικός συντελεστής L_d , κανονική μέση θερμοκρασία T_n , δείκτης θερμότητας i , αθροιστικός δείκτης θερμότητας I και συντελεστής a της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

ΜΗΝΑΣ	ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ L_d	ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ T_n	Δείκτης θερμότητας	Αθροιστικός δείκτης θερμότητας I	Συντελεστής a
ΙΑΝ	0,88	8,04	2,05	54,58	1,35
ΦΕΒ	0,85	8,17	2,10		
ΜΑΡ	1,03	9,24	2,53		
ΑΠΡ	1,09	11,91	3,72		
ΜΑΪ	1,20	14,37	4,95		
ΙΟΥΝ	1,20	17,05	6,41		
ΙΟΥΛ	1,22	18,60	7,31		
ΑΥΓ	1,16	18,85	7,46		
ΣΕΠ	1,03	17,43	6,62		
ΟΚΤ	0,97	15,19	5,38		
ΝΟΕ	0,87	11,59	3,57		
ΔΕΚ	0,86	9,11	2,48		

β) Μοντέλο *Blaney-Criddle*

Εφόσον υπολογίστηκε η μηνιαία θερμοκρασία T της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας, στη συνέχεια βρέθηκε το μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας από τον Πίνακα 5.3 με γραμμική παρεμβολή για το γεωγραφικό πλάτος της λεκάνης ($34,43^\circ \text{ B}$) και για κάθε μήνα του χρόνου (Πίνακας 5.9). Εκτιμώντας τον φυτικό συντελεστή της λεκάνης της Γερμασόγειας ίσο με 0,80, εκτιμήθηκε τελικά η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης από τη Σχέση (5.22).

Πίνακας 5.9: Μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας P% της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας.

Μ Η Ν Α Σ	Μ Η Ν Ι Α Ι Ο Π Ο Σ Ο Σ Τ Ο Ω Ρ Ω Ν Η Μ Ε Ρ Α Σ Ρ %
ΙΑΝ	7,08
ΦΕΒ	6,90
ΜΑΡ	8,36
ΑΠΡ	8,81
ΜΑΪ	9,74
ΙΟΥΝ	9,73
ΙΟΥΛ	9,90
ΑΥΓ	9,35
ΣΕΠ	8,36
ΟΚΤ	7,89
ΝΟΕ	7,00
ΔΕΚ	6,89

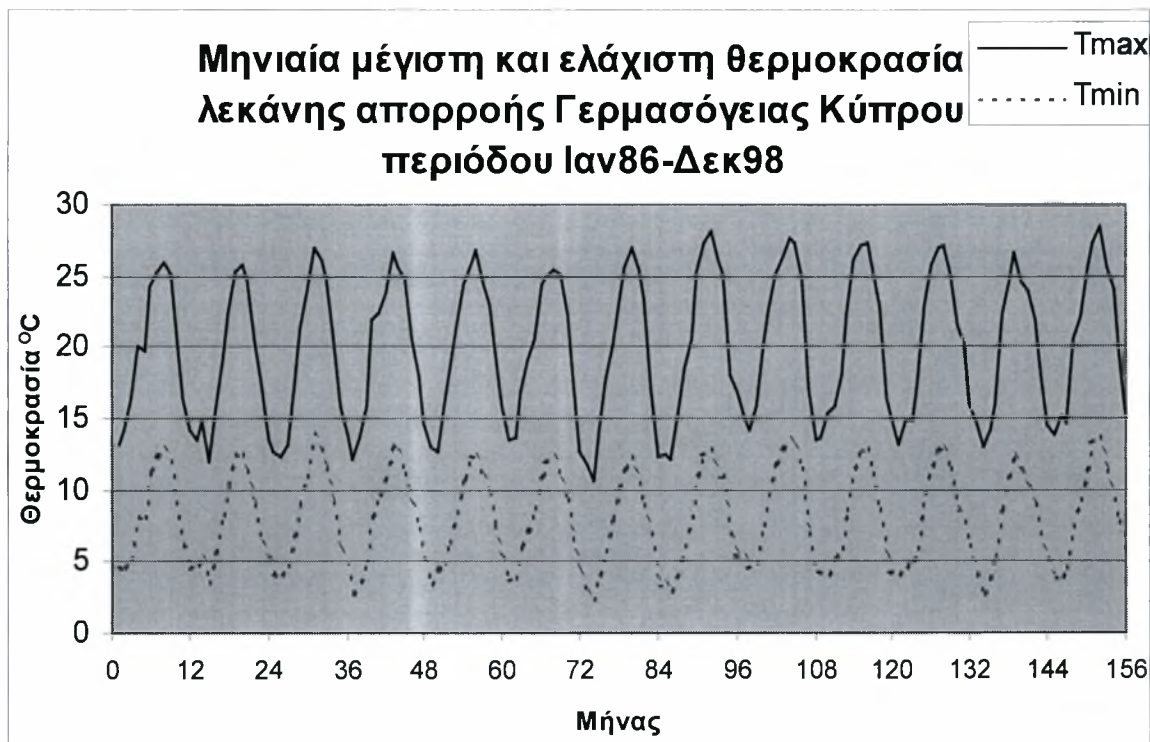
γ) Μοντέλο *Kharrufa*

Έχοντας το μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας P_a από τον Πίνακα 5.9 και τη μηνιαία θερμοκρασία T_a της λεκάνης, εκτιμήθηκε η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης της Γερμασόγειας από τη Σχέση (5.23).

δ) Μοντέλο *Hargreaves*

Στο μοντέλο αυτό απαιτούνταν να υπολογισθεί η διαφορά TD της μηνιαίας μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας της λεκάνης. Έτσι, με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας, η οποία αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα αναλυτικά, υπολογίστηκαν η μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία με πανομοιότυπο τρόπο (Σχήμα 5.5). Η προσπίπτουσα ακτινοβολία

H_{sh}^{top} στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας βρέθηκε από τον Πίνακα 5.2 ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους της λεκάνης της Γερμασόγειας ($34,43^\circ$ Β). Τέλος, με υπολογισμένα τη μέση θερμοκρασία της λεκάνης T_a , την διαφορά TD και την προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh}^{top} , εκτιμήθηκε η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης με τη βοήθεια της Σχέσης (5.24).



Σχήμα 5.5: Μηνιαία μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία περιόδου 1986-1998 της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

ε) Μοντέλο Jensen-Haise

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh} υπολογίστηκε από τη Σχέση (5.15). Στη σχέση αυτή η προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh}^{top} βρέθηκε όπως στο προηγούμενο μοντέλο που περιγράφηκε, το a και το b πήραν τιμές 0,20 και 0,53 αντίστοιχα για εύκρατα κλίματα όπως αυτό της Κύπρου, και ο λόγος $\frac{n}{N}$ είχε τις τιμές που φαίνονται στο Πίνακα 5.10.

Με γνωστά τη μέση θερμοκρασία της λεκάνης T_a και την προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh} , εκτιμήθηκε η ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης με τη βοήθεια της

Σχέσης (5.16) και στη συνέχεια η μηνιαία, η οποία προέκυψε από την ημερήσια πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα.

Πίνακας 5.10: Μηνιαίος λόγος n/N της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

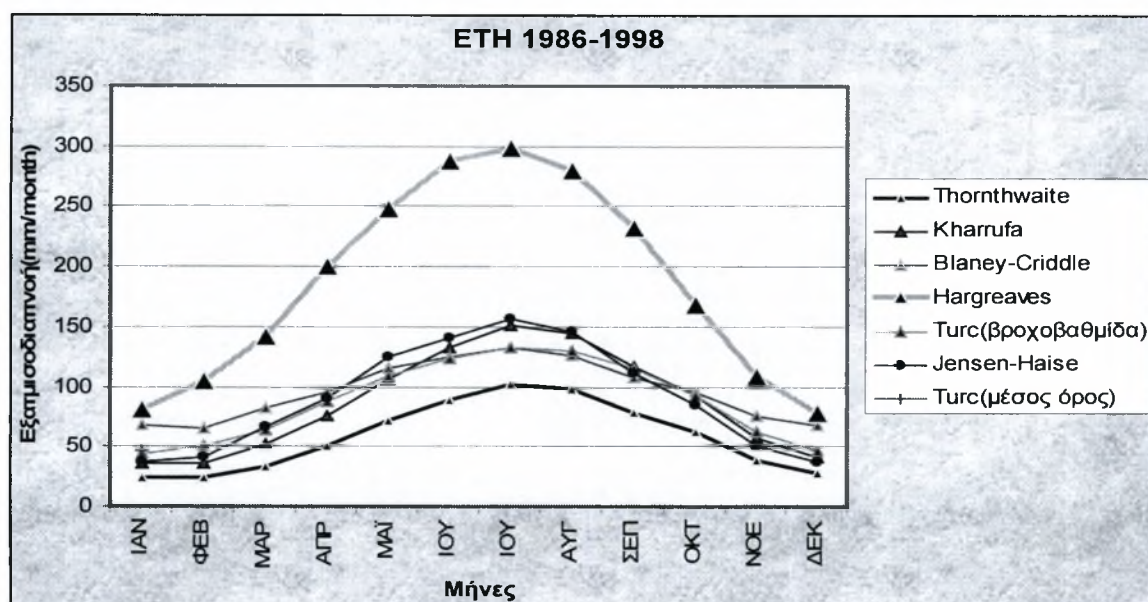
ΜΗΝΑΣ	Πραγματική διάρκεια ωρών ηλιοφάνειας n	Μέγιστη δυνατή διάρκεια ωρών ηλιοφάνειας N	Λόγος n/N
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	7,08	10,09	0,70
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	6,90	10,95	0,63
ΜΑΡΤΙΟΣ	8,36	11,95	0,70
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	8,81	13,06	0,67
ΜΑΙΟΣ	9,74	13,98	0,70
ΙΟΥΝΙΟΣ	9,73	14,47	0,67
ΙΟΥΛΙΟΣ	9,90	14,27	0,69
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	9,35	13,47	0,69
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	8,36	12,42	0,67
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	7,89	11,33	0,70
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	7,00	10,36	0,68
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	6,89	9,86	0,70

στ) Μοντέλο Turc

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh} υπολογίστηκε όπως στο μοντέλο Jensen-Haise και η παράμετρος L^{Tc} από τη Σχέση (5.14) συναρτήσκει της μηνιαίας θερμοκρασίας T της λεκάνης και της H . Με τη βοήθεια της Σχέσης (5.13) υπολογίστηκε η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης ανά δεκαήμερο και στη συνέχεια αυτή μετατράπηκε σε μηνιαία. Πρέπει να τονισθεί ότι επειδή στη Σχέση (5.13) υπεισέρχεται ο όρος της βροχόπτωσης P , υπολογίστηκαν δύο τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Ο λόγος είναι ότι η επιφανειακή βροχόπτωση ευρέθη με δύο μεθόδους: της βροχοβαθμίδας και του μέσου όρου. Ακόμη, στη παρούσα διπλωματική εργασία η κατανομή της βροχόπτωσης επιφανειακά έγινε και με μία ακόμα μέθοδο, αυτή των πολυγώνων Thiessen. Όμως θεωρήθηκε σκόπιμο να μην βρεθεί και μια ακόμη τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής γιατί οι τιμές της επιφανειακής βροχόπτωσης με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen σχεδόν ταυτίζονται με τις τιμές που υπολογίστηκαν με τις άλλες μεθόδους και επομένως το μοντέλο Turc θα έδινε πανομοιότυπες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 1986-1998 που υπολογίστηκαν παρουσιάζουν μια καταπληκτική συσχέτιση (correlation) που προσεγγίζει την μονάδα. Ως εκ τούτου θα ήταν και περιττό και υπερβολή να βρεθεί και μια ίδια ακόμη τιμή με το μοντέλο του Turc.

3 Σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Σε αυτή την ενότητα γίνεται σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής για τις μέσες μηνιαίες τιμές (Σχήμα 5.6) της περιόδου των ετών 1986-1998 αλλά και για κάθε έτος χωριστά (Σχήματα Α.16-Α.28 του παραρτήματος Α).



Σχήμα 5.6: Σύγκριση μοντέλων εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο των ετών 1986-1998 της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

Στους παρακάτω Πίνακες (5.11.α και 5.11.β) παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στα μοντέλα εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ανά δύο. Όπως φαίνεται στον πίνακα ο συντελεστής συσχέτισης παρουσιάζει μεγάλες τιμές, οι οποίες σε μερικές περιπτώσεις προσεγγίζουν την μονάδα.

Πίνακας 5.11.α: Συσχέτιση μοντέλων εξατμισοδιαπνοής περιόδου 1986-1998 .

ΜΟΝΤΕΛΟ	THORNTHWAITE	KHARRUFA	BLANEY-CRIDDLE	HARGREAVES
THORNTHWAITE	~	0,9999	0,9812	0,9640
KHARRUFA	0,9999	~	0,9823	0,9653
BLANEY-CRIDDLE	0,9812	0,9823	~	0,9908
HARGREAVES	0,9640	0,9653	0,9908	~
TURC (βροχοβαθμίδα)	0,9890	0,9901	0,9876	0,9828
JENSEN-HAISE	0,9788	0,9797	0,9984	0,9944
TURC (μέσος όρος)	0,9881	0,9892	0,9881	0,9839

Πίνακας 5.11.β: Συσχέτιση μοντέλων εξατμισοδιαπνοής περιόδου 1986-1998 .

ΜΟΝΤΕΛΟ	TURC (βροχοβαθμίδα)	JENSEN-HAISE	TURC (μέσος όρος)
THORNTHWAITE	0,9890	0,9788	0,9881
KHARRUFA	0,9901	0,9797	0,9892
BLANEY-CRIDDLE	0,9876	0,9984	0,9881
HARGREAVES	0,9828	0,9944	0,9839
TURC (βροχοβαθμίδα)	~	0,9858	0,9999
JENSEN-HAISE	0,9858	~	0,9862
TURC (μέσος όρος)	0,9999	0,9862	~

Από τα Σχήματα A.16 έως A.28 του Παραρτήματος A και το Σχήμα 5.6 φαίνεται ότι το μοντέλο του Hargreaves υπερεκτιμάει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε σχέση με τα άλλα, τα οποία δίνουν τιμές σχετικά κοντά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο για να υπολογίσει την τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιεί στη Σχέση (5.24) σαν παράγοντα γινομένου την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας H_{sh}^{top} και όχι την προσπίπτουσα ακτινοβολία H_{sh} , η οποία είναι μικρότερη της H_{sh}^{top} μιας και είναι πολλαπλασιασμένη με ένα μειωτικό συντελεστή μικρότερο της μονάδας. Μάλιστα τους καλοκαιρινούς μήνες η υπερεκτίμηση γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, σε σχέση με τους χειμερινούς. Για αυτό το μοντέλο του Jensen-Haise, το οποίο χρησιμοποιεί στη Σχέση (5.16) σαν παράγοντα γινομένου την H_{sh} και όχι την H_{sh}^{top} , βγάζει μικρότερες τιμές και οι οποίες συγκλίνουν αρκετά στις τιμές των άλλων μοντέλων.

Το μοντέλο του Thornthwaite δίνει τις μικρότερες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής γιατί το μοντέλο αυτό υποεκτιμάει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα όπως είναι και αυτό της Κύπρου. Γενικά το μοντέλο αυτό παρουσιάζει αυτό το μειονέκτημα όταν η ακτινοβολία που προσλαμβάνει η γη έχει τη μέγιστη τιμή της (στη διάρκεια του καλοκαιριού και κατά συνέπεια είναι εκτός φάσης το φθινόπωρο). Αυτό αποδίδεται στην χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία.

Επίσης, από τα Σχήματα A.16 έως A.28 του Παραρτήματος A και το Σχήμα 5.6 παρατηρούμε ότι το μοντέλο του Blaney-Criddle ενώ τους χειμερινούς μήνες υπερεκτιμάει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή και μάλιστα δίνει τις μεγαλύτερες τιμές μετά το μοντέλο του Hargreaves , σταδιακά αρχίζει να τις υποεκτιμάει (άνοιξη και φθινόπωρο) και να φτάσει στους καλοκαιρινούς μήνες να δίνει τις μικρότερες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από όλα τα μοντέλα εκτός φυσικά του Thornthwaite.

Τέλος, όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν το μέγιστο τους καλοκαιρινούς μήνες, πράγμα απολύτως κατανοητό μιας και το καλοκαίρι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή έχει τις μεγαλύτερες τιμές λόγω ότι οι θερμοκρασία και η ακτινοβολία στη γη έχουν τότε την μέγιστη τιμή ενώ η βροχόπτωση την ελάχιστη. Έτσι, τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία υπολογίζουν την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ,της ακτινοβολίας και της βροχόπτωσης (υγρασίας) και μάλιστα αναλογικά, με αποτέλεσμα να δικαιολογείται το παραπάνω συμπέρασμα.

Κεφάλαιο 6^ο: Περιγραφή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτά είναι: το μοντέλο Thornthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984), το μοντέλο Abulohom et al (2001) και το μοντέλο Giakoumakis et al (1991). Επίσης, γίνεται αναφορά και για το μοντέλο Thornthwaite-Mather (1957).

6.2 Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου *Thornthwaite* τροποποιημένο από *Alley*

Το απλό διαδεδομένο μοντέλο του Thornthwaite (1948), όπως τροποποιήθηκε από τον Alley (1984), βασίζεται πρωτίστως στην εξομοίωση της υδρολογικής λειτουργίας της λεκάνης απορροής με τη λειτουργία μιας απλής δεξαμενής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας, S . Η δεξαμενή υπερχειλίζει όταν το απόθεμα υπερβεί τη χωρητικότητα της δεξαμενής, K . Η υπερχειλίση αναπαριστά την επιφανειακή απορροή. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με το εν λόγω μοντέλο, επιφανειακή απορροή πραγματοποιείται μόνο όταν γεμίσει η δεξαμενή ή αλλιώς, κορεστεί το έδαφος από υγρασία.

Για την υπολογιστική λειτουργία του μοντέλου, θεωρείται γνωστή σε κάθε χρονική περίοδο n η βροχόπτωση P_n και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_{Pn} , καθώς και η αποθήκευση στο τέλος της προηγούμενης περιόδου S_{n-1} . Τα εξαγόμενα του μοντέλου είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_n , η επιφανειακή απορροή Q_n καθώς και η αποθήκευση στο τέλος της τρέχουσας περιόδου S_n .

Σε περιόδους όπου η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή ($P_n > E_{Pn}$), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ταυτίζεται με τη δυνητική. Το περίσσειμα ($P_n - E_{Pn}$) αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία, εφόσον δεν έχει κορεστεί το έδαφος. Όταν κορεστεί, η ποσότητα που δεν μπορεί πλέον να αποθηκευτεί, απορρέει επιφανειακά.

Σε περιόδους όπου η βροχόπτωση είναι μικρότερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή ($P_n < E_{Pn}$), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι μικρότερη από την δυνητική. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κατ' αρχήν όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης P_n εξατμίζεται και επίσης, εφόσον υπάρχει αποθηκευμένη εδαφική υγρασία, εξατμίζεται και ένα επιπλέον μέρος από αυτήν. Ο ρυθμός της επιπλέον εξατμισοδιαπνοής είναι ανάλογος της διαφοράς ($E_{Pn} - P_n$) καθώς και της εδαφικής αποθήκευσης και ειδικότερα του λόγου S / K .

Η παραπάνω λειτουργία του μοντέλου, μπορεί να κωδικοποιηθεί μαθηματικά με τον ακόλουθο τρόπο:

α) $P_n \geq E_{Pn}$

$$S_n = \min(S_{n-1} + P_n - E_{Pn}, K) \quad (6.1)$$

$$Q_n = \max(S_{n-1} + P_n - E_{Pn} - K, 0) \quad (6.2)$$

β) $P_n < E_{Pn}$

$$S_n = S_{n-1} \exp((P_n - E_{Pn}) / K) \quad (6.3)$$

$$Q_n = 0 \quad (6.4)$$

Σε κάθε περίπτωση, η εξατμοδιαπνοή προκύπτει άμεσα από την σχέση:

$$E_n = (S_{n-1} - S_n) + P_n - Q_n \quad (6.5)$$

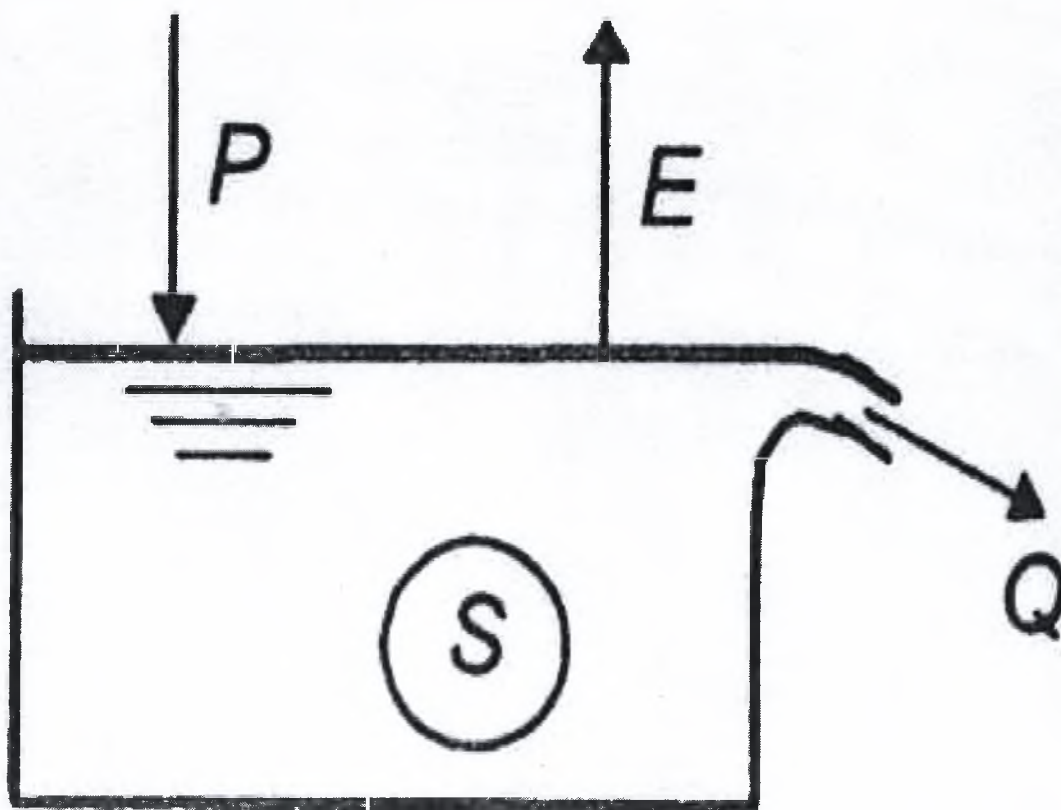
Συμπερασματικά, το απλό μοντέλο Thornthwaite με δεδομένα εισόδου τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή δίνει ως εξόδους την απορροή και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, χρησιμοποιώντας μια μόνο παράμετρο, την χωρητικότητα της εδαφικής δεξαμενής, K . Τυπικά, η χωρητικότητα αυτή, ανηγμένη σε ισοδύναμο ύψος, κυμαίνεται ανάμεσα στα 100-200 mm. Εάν υπάρχουν δεδομένα απορροής, η παράμετρος K μπορεί να εκτιμηθεί σε τρόπο ώστε η σειρά τιμών της επιφανειακής απορροής που εξάγεται από το μοντέλο να συμφωνεί κατά το δυνατό με τη μετρημένη σειρά απορροής.

Το μοντέλο τυπικά λειτουργεί σε μηνιαία κλίμακα και είναι κατάλληλο μόνο για "απλές" λεκάνες που εκπληρώνουν τις προϋποθέσεις του εδαφίου 3.2, και ειδικότερα για λεκάνες

χειμαρρικής δίαιτας χωρίς θερινές απορροές αλλά και χιονοπτώσεις. Πάντως μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να καλύπτει και τις λεκάνες όπου παρατηρούνται χιονοπτώσεις. Σε αυτή την περίπτωση σε όλες τις παραπάνω εξισώσεις θα πρέπει να αντικατασταθεί η βροχόπτωση P_n από το μέγεθος:

$$W_n = P_n + X_{n-1} - X_n \quad (6.6)$$

όπου X_n είναι το ισοδύναμο ύψος του συσσωρευμένου χιονιού, στο έδαφος, ανοιγμένο στην συνολική επιφάνεια της λεκάνης



Σχήμα 6.1: Σκαρίφημα απλής υδρολογικής λεκάνης, (Κουτσογιάννης, 1999).

6.3 Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου *Thornthwaite-Mather*

Η εκτίμηση των απορροών στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής, σε μηνιαία βάση, είναι δυνατό να γίνει με τη βοήθεια ενός μαθηματικού ομοιώματος που αποτελεί παραλλαγή του ομοιώματος των **Thornthwaite-Mather** (1957) και βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο. Το μοντέλο αυτό έχει τρεις βασικές παραμέτρους, **τη μέγιστη εδαφική υγρασία και τους συντελεστές βαθιάς διήθησης και υστέρησης**, η εκτίμηση των οποίων γίνεται είτε με βελτιστοποίηση αυτών είτε με απευθείας υπολογισμό με τη βοήθεια των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και της βλάστησης της λεκάνης. Τα μόνα δεδομένα εισόδου είναι οι μέσες μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας της λεκάνης. Με την εφαρμογή του μοντέλου εκτιμούνται οι μηνιαίες τιμές της **πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, του πλεονάσματος νερού, της βαθιάς διήθησης και της απορροής** της λεκάνης, για κάθε μήνα και για κάθε υδρολογικό έτος, με βάση τις παρακάτω εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου:

- Βροχόπτωση κατά το μήνα i : P_i [mm]

- Θερμοκρασία κατά το μήνα i : T_i [°C]

- Δυναμική εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα i : $[ET_p]_i$ [mm]

- Υδατικό πλεόνασμα κατά το μήνα i : $[F_p]_i$ [mm]

$$\text{Αν } P_i - [ET_p]_i > 0 \text{ τότε } [F_p]_i = P_i - [ET_p]_i \quad (6.7)$$

$$\text{Αν } P_i - [ET_p]_i \leq 0 \text{ τότε } [F_p]_i = 0 \quad (6.8)$$

- Υδατικό έλλειμμα κατά το μήνα i : $[D_p]_i$ [mm]

$$\text{Αν } P_i - [ET_p]_i < 0 \text{ τότε } [D_p]_i = |P_i - [ET_p]_i| \quad (6.9)$$

$$\text{Αν } P_i - [ET_p]_i \geq 0 \text{ τότε } [D_p]_i = 0 \quad (6.10)$$

- Αθροιστικό υδατικό έλλειμμα κατά το μήνα i : $APWL_i$ [mm]

Αν $[D_p]_i \neq 0$ τότε

$$APWL_i = APWL_{i-1} + [D_p]_i \quad (6.11)$$

Αν $[F_p]_i \neq 0$ τότε

$$APWL_i = -S_o \ln \left\{ \frac{S_{i-1} + [F_p]_i}{S_o} \right\} \quad \text{όταν} \quad S_{i-1} + [F_p]_i < S_o \quad (6.12)$$

$$APWL_i = 0 \quad \text{όταν} \quad S_{i-1} + [F_p]_i \geq S_o \quad (6.13)$$

όπου S_o = μέγιστη εδαφική υγρασία [mm]

- Εδαφική υγρασία κατά το μήνα i : S_i [mm]

$$\text{Αν } [D_p]_i \neq 0 \text{ τότε } S_i = S_o e^{-\frac{APWL_i}{S_o}} \quad (6.14)$$

$$\text{Αν } [F_p]_i \neq 0 \text{ τότε } S_i = S_{i-1} + [F_p]_i \quad (6.15)$$

- Κατανάλωση εδαφικής υγρασίας κατά το μήνα i : ΔS_i [mm]

$$\Delta S_i = S_{i-1} - S_i \quad \text{όταν} \quad S_{i-1} - S_i > 0 \quad (6.16)$$

$$\Delta S_i = 0 \quad \text{όταν} \quad S_{i-1} - S_i \leq 0 \quad (6.17)$$

- Πραγματική εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα i : $[ET_c]_i$ [mm]

$$[ET_c]_i = [ET_p]_i \quad \text{όταν} \quad \Delta S_i = 0 \quad (6.18)$$

$$[ET_c]_i = P_i + \Delta S_i \quad \text{όταν} \quad \Delta S_i > 0 \quad (6.19)$$

- Όγκος απορροής κατά το μήνα i : VS_i [mm]

$$VS_i = 0 \quad \text{όταν} \quad SN_i < 0 \quad (6.20)$$

$$VS_i = SN_i - S_i \quad \text{όταν} \quad SN_i \geq 0 \quad (6.21)$$

$$\text{όπου : } SN_i = S_{i-1} + [D_p]_i \quad \text{ή} \quad SN_i = S_{i-1} - [F_p]_i \quad (6.22)$$

- Βαθειά διήθηση κατά το μήνα i: G_i [mm]

$$G_i = b * VS_i \quad (6.23)$$

όπου : b = συντελεστής (%) βαθείας διήθησης

- Διαθέσιμος όγκος για απορροή κατά το μήνα i: V_i [mm]

$$V_i = (1 - b) * VS_i \quad (6.24)$$

- Άμεση απορροή κατά το μήνα i: $[R_1]_i$ [mm]

$$[R_1]_i = a * V_i \quad (6.25)$$

όπου : a = συντελεστής (%) υστέρησης της απορροής

- Έμμεση απορροή κατά το μήνα i: $[R_2]_i$ [mm]

$$[R_2]_i = (1 - a) * DVO_i \quad (6.26)$$

όπου : DVO_i = αρχική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα i

- Τελική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα i: DVF_i [mm]

$$DVF_i = DVO_i - [R_2]_i + (1 - a) V_i \quad (6.27)$$

- Αρχική υγρασιακή κατάσταση εδάφους κατά το μήνα i: DVO_i [mm]

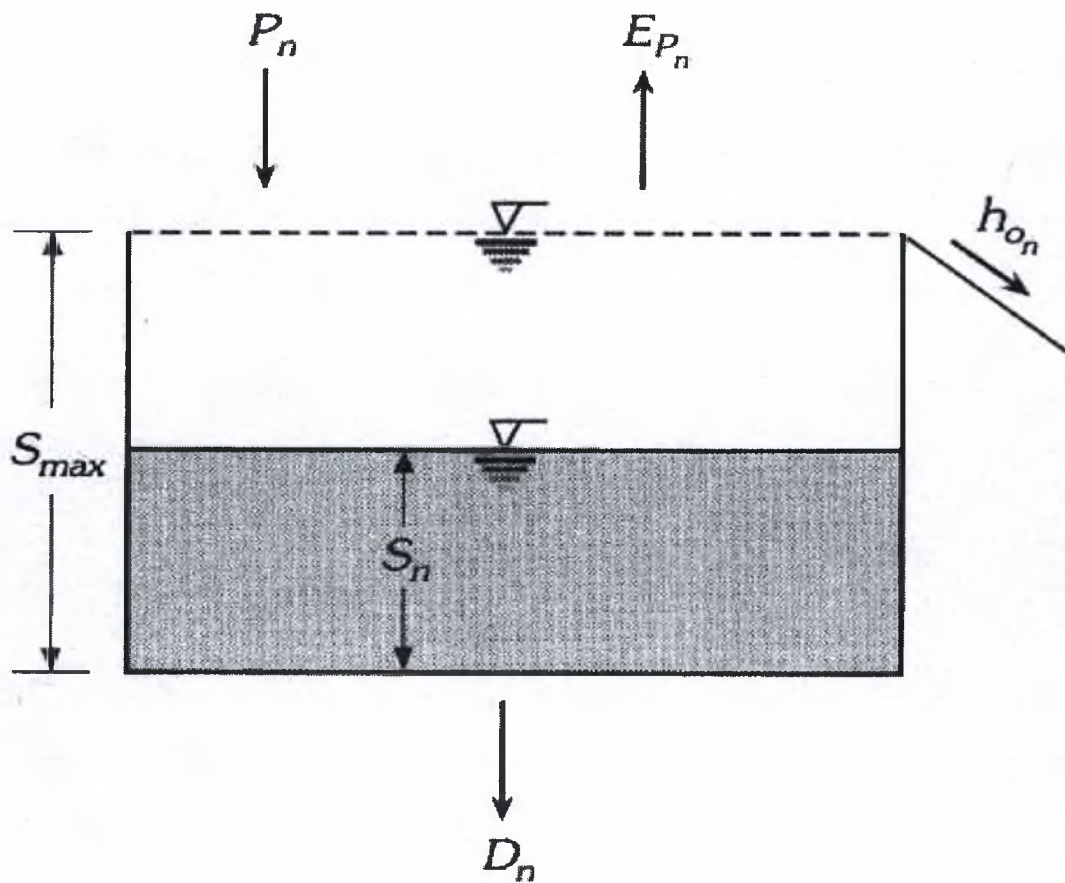
$$DVO_i = DVF_{i-1} \quad (6.28)$$

- Ολική απορροή κατά το μήνα i: R_i [mm]

$$R_i = [R_1]_i + [R_2]_i \quad (6.29)$$

6.4 Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου *Giakoumakis et al*

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο απλού υδατικού ισοζυγίου στην ανώτερα επιφανειακή ζώνη του εδάφους (ζώνη ριζοστρώματος), (Giakoumakis et al , 1991).



Σχήμα 6.2: Σχηματική παρουσίαση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου του Γιακουμάκη, (Τσακίρης ,1995)

Από το παραπάνω Σχήμα 6.2 γίνεται σαφές ότι η ζώνη ριζοστρώματος του εδάφους, θεωρείται ως δεξαμενή αποθήκευσης μέγιστης χωρητικότητας S_{max} , στην οποία η ποσότητα S_n παριστάνει τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία κατά το μήνα n . Επομένως η διάφορα $(S_{max} - S_n)$ είναι το μέσο μηνιαίο έλλειμμα υγρασίας στην επιφάνεια μιας μοναδιαίας λεκάνης. Είναι προφανές ότι το ύψος της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας

αυξάνει από την βροχόπτωση P_n και μειώνεται τόσο από την δυναμική εξατμισοδιαπνοή E_{Pn} , όσο και από την βαθιά διήθηση D_n .

Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται μηνιαία ύψη βροχής και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής. Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι η εξής:

$$S'_n = S_{n-1} + P_n - E_{Pn} \quad (6.30)$$

όπου:

S_n : διαθέσιμη εδαφική υγρασία (mm ύψους νερού), $0 \leq S \leq S_{\max}$

P_n : ύψος βροχής (mm ύψους νερού).

E_{Pn} : ύψος δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (mm ύψους νερού).

($n = 1, 2, \dots, 12$) δείκτης που προσδιορίζει το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρονται οι μεταβλητές. Εδώ κάθε τιμή του n αντιστοιχεί σε ένα μήνα.

Ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής S'_n , Σχέση (6.30), το αντίστοιχο ύψος επιφανειακής απορροής του μήνα n , h_{on} , εκτιμάται ως ακολούθως :

• Εάν $S'_n < 0$ τότε:

$$S_n = 0 \quad (6.31)$$

$$h_{on} = 0 \quad (6.32)$$

$$D_n = 0 \quad (6.33)$$

όπου D_n , ύψος βαθιάς διήθησης το μήνα n , (mm ύψους νερού).

• Εάν $0 \leq S'_n \leq S_{\max}$ τότε:

$$S_n = S'_n \quad (6.34)$$

$$h_{on} = 0 \quad (6.35)$$

$$D_n = 0 \quad (6.36)$$

- Εάν $S'_n > S_{\max}$ τότε:

$$S'_n = S_{\max} \quad (6.37)$$

$$h_{on} = K' (S'_n - S_{\max}) \quad (6.38)$$

$$D_n = K (S'_n - S_{\max}) \quad (6.39)$$

όπου : $K' = 1 - K$.

Οι υπολογισμοί με το μοντέλο αυτό, αρχίζουν το μήνα Οκτώβριο του πρώτου υδρολογικού έτους της εξεταζόμενης χρονοσειράς.

Στο μοντέλο περιέχονται δυο παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν (παράμετροι βαθμονόμησης) : η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία S_{\max} της επιφανειακής εδαφικής ζώνης, (mm ύψους νερού), και ο συντελεστής βαθιάς διήθησης K , που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (ανάγλυφο, διηθητικότητα του εδάφους, φυτοκάλυψη κτλ.), ή να γίνει βελτιστοποίηση αυτών (calibration)

Για τον περιορισμό του αριθμού των παραμέτρων βαθμονόμησης, η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία S_{\max} , μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εξίσωση της Soil Conservation Service, (1986):

$$S_{\max} = 25.4 [(1000/CN) - 10] \quad (6.40)$$

όπου CN : ο αριθμός της καμπύλης, (Curve Number), που προσδιορίζεται από πίνακες, με βάση τις συνθήκες εδάφους, γεωλογίας, φυτοκάλυψης και χρήσης γης της λεκάνης απορροής, ($0 < CN < 100$).

Ακόμα, μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του Curve Number (CN), οπότε και της μέγιστης εδαφικής υγρασίας S_{\max} .

6.5 Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου *Abulohom et al*

Το μοντέλο Abulohom et al (2001) είναι ένα μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής, το οποίο βασίζεται σε εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου. Χρησιμοποιεί σαν δεδομένα εισόδου (input) σε μηνιαία βάση την βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Το δεδομένο εξόδου (output) από το μοντέλο είναι η απορροή στην έξοδο της λεκάνης. Η μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$R = P - L \quad (6.41)$$

όπου R η συνολική απορροή, P η βροχόπτωση, L οι συνολικές απώλειες.

Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται οι τρεις παράμετροι a_1, a_2, a_3 , οι οποίοι υφίστανται βελτιστοποίηση (calibration). Επίσης, γίνεται βελτιστοποίηση και για άλλες δυο παραμέτρους b_1, b_2 , με τη διαφορά όμως ότι αυτές παίρνουν συγκεκριμένες τιμές.

Η συνολική απορροή εμπεριέχει δύο συνιστώσες: την άμεση απορροή και την βασική απορροή.

- *Άμεση απορροή*

Η εξίσωση που δίνει την άμεση απορροή είναι:

$$(R_d)_j = a_1 (m_{j-1})^{b_1} (P_a)_j \quad (6.42)$$

όπου $(R_d)_j$ η άμεση απορροή του μήνα j , a_1 και b_1 παράμετροι που βελτιστοποιούνται, m_{j-1} η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στην αρχή του μήνα j και $(P_a)_j$ η ενεργός βροχόπτωση του μήνα j , η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$(P_a)_j = P_j - (E_a)_j \{1 - \exp[-P_j / (E_a)_j]\} \quad (6.43)$$

Στην Εξίσωση (6.43) το P_j είναι η βροχόπτωση του μήνα j και το $(E_a)_j$ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή του μήνα j .

- *Βασική απορροή*

Η εξίσωση που δίνει την άμεση απορροή είναι:

$$(R_g)_j = a_2 (m_{j-1})^{b_2} \quad (6.44)$$

όπου $(R_g)_j$ η άμεση απορροή του μήνα j και a_2, b_2 παράμετροι που εκτιμούνται με βελτιστοποίηση.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα ζεύγη (a, b) και (a_2, b_2) είναι υψηλά συσχετισμένα μεταξύ τους. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, τα b και b_2 παίρνουν τις εξής συγκεκριμένες τιμές: $b_1 = 0$ ή $0,5$ ή 1 ή 2 και $b = 0,5$ ή 1 ή 2 . Φυσικά για κάθε λεκάνη απορροής χρησιμοποιείται μια μόνο τιμή.

Η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία m_j στο τέλος του μήνα j δίδεται από την εξίσωση:

$$m_j = m_{j-1} + P_j - (E_a)_j - (R_c)_j \quad (6.45)$$

όπου $(R_c)_j$ είναι η συνολική υπολογισμένη απορροή του μήνα j και είναι ίση με:

$$(R_c)_j = (R_d)_j + (R_g)_j \quad (6.46)$$

Το αποτέλεσμα της Σχέσης (6.45) είναι η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στο τέλος του τρέχων μήνα και ταυτόχρονα η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στην αρχή του επόμενου μήνα.

• Εξατμισοδιαπνοή

Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή $(E)_j$ βασίζεται σε δύο ποσότητες: στο διαθέσιμο αποθηκευμένο νερό για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα j και στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή $(E_p)_j$ του μήνα j . Δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$(E_a)_j = \min[(E_p)_j (1 - a_3^{w_j/(E_p)_j}), w_j] \quad (6.47)$$

όπου w_j το διαθέσιμο αποθηκευμένο νερό για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα j , το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$w_j = P_j + m_{j-1} \quad (6.48)$$

και a_3 μία άγνωστη παράμετρος που εκτιμάται μέσω της βελτιστοποίησης του μοντέλου.

Από την Σχέση (6.47) εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η $(E)_j$ αυξάνεται όταν αυξάνεται η $(E_p)_j$ και το w_j

- $(E_a)_j = 0$ όταν $w_j = 0$ ή $(E_p)_j = 0$

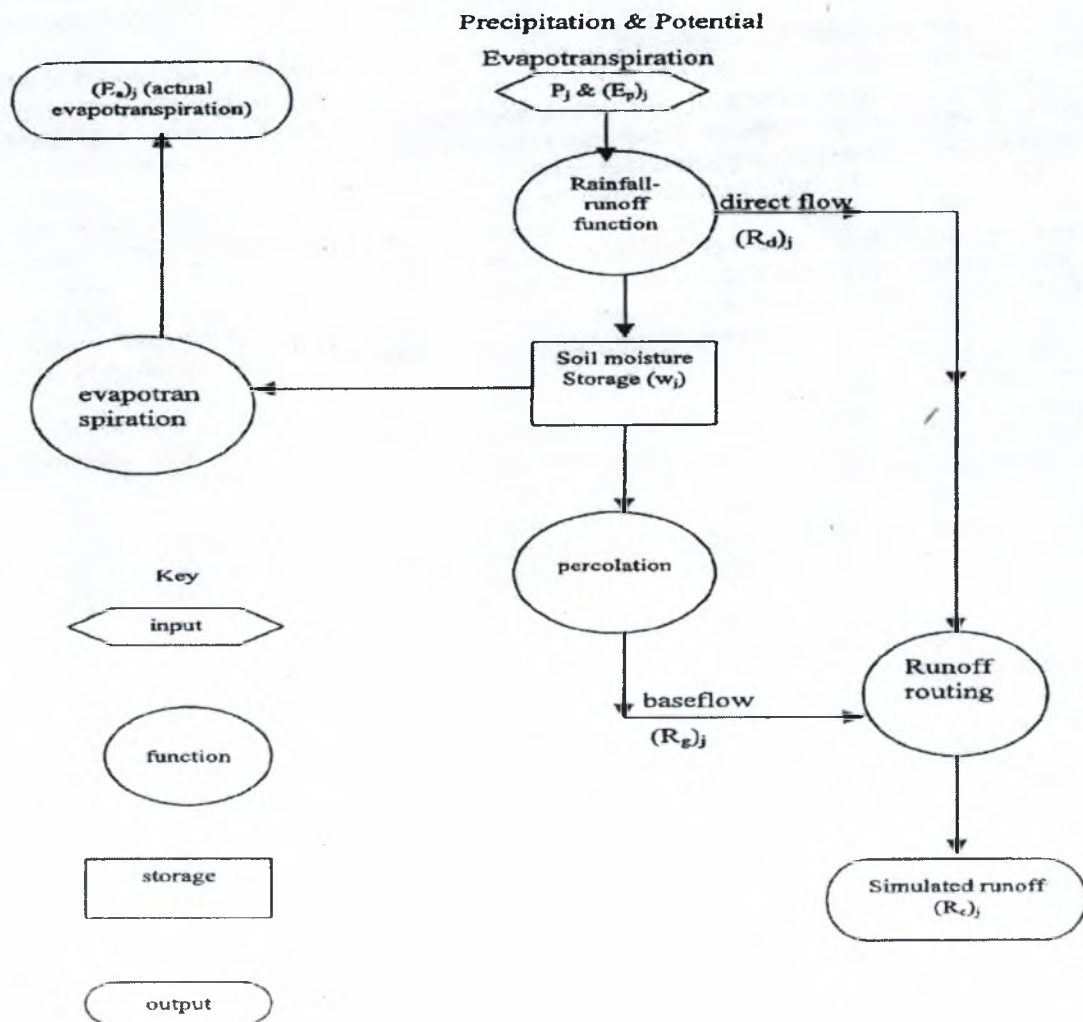
- $(E_a)_j \leq (E_p)_j$ όταν $(E_p)_j \leq w_j$

- $(E_a)_j \rightarrow (E_p)_j$ όταν $w_j \rightarrow \infty$

Όταν τα δεδομένα της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής $(E_p)_j$ δεν είναι διαθέσιμα, τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοής $(E_a)_j$ εκτιμάται ως εξής:

$$(E_a)_j = \min(a_3 w_j, w_j) \tag{6.49}$$

Τέλος, το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom et al (2001) μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά στο παρακάτω λογικό διάγραμμα (Σχήμα 6.3):



Σχήμα 6.3: Λογικό διάγραμμα του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου του Abulohom, et al 2001

Κεφάλαιο 7^ο: Εφαρμογή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Η υδατική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των μοντέλων του Abulohom et al (2001), του Giakoumakis et al (1991) και του Thornthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984).

Τα δεδομένα εισόδου (input) των μοντέλων είναι: η μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση P_n , η μηνιαία επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή $(E_p)_n$ και η αποθηκευμένη υγρασία S_{n-1} στην αρχή του τρέχων μήνα (ή στο τέλος του προηγούμενου) ενώ τα εξαγόμενα (output) είναι: η μηνιαία επιφανειακή απορροή Q_n , η μηνιαία επιφανειακή πραγματική εξατμισοδιαπνοή και η αποθηκευμένη υγρασία S_n στο τέλος του τρέχων μήνα (ή στην αρχή του επόμενου). Ακόμη πρέπει να τονιστεί ότι μόνο το μοντέλο του Abulohom et al (2001) υπολογίζει την βασική απορροή (υπόγεια ροή).

Αφού συντάχθηκαν τα τρία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, ακολούθησε η βελτιστοποίηση (calibration) των παραμέτρων των μοντέλων και ο υπολογισμός των δεδομένων εξόδων (output) του καθενός για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο) 1986-1992. Η βελτιστοποίηση (calibration) έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου SIMPLEX και σαν στατιστική παράμετρος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η Model Efficiency (Eff) που προτάθηκε από τους Nash and Sutcliffe (1970).

Η μέθοδος SIMPLEX δεσμευμένων μεταβλητών της επίλυσης του Microsoft Excel χρησιμοποιεί τον κώδικα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, μειωμένης γενικευμένης κλίσης (Generalized Reduced Gradient), που ανέπτυξαν ο Leon Lasdon του Πανεπιστημίου του Texas, στο Austin, και ο Allan Waren του Πανεπιστημίου του Cleveland. Η επίλυση του Microsoft Excel χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί η μέγιστη τιμή του Model Efficiency (που είναι ίση με τη μονάδα), μεταβάλλοντας τις παραμέτρους των μοντέλων. Η διαδικασία της επίλυσης απαιτεί ορισμένες ρυθμίσεις όπως ο μέγιστος χρόνος (100 secs),

οι επαναλήψεις (100), η ακρίβεια των λύσεων (0,000001), η ανοχή (5%) η οποία είναι το ποσοστό κατά το οποίο η λύση ικανοποιεί τους ακέραιους περιορισμούς των παραμέτρων και μπορεί να διαφέρει από την πραγματική βέλτιστη τιμή και ο στόχος να εξακολουθεί να θεωρείται αποδεκτός και η σύγκλιση (0,001), δηλαδή η σχετική μεταβολή της λύσης κατά τις τελευταίες πέντε επαναλήψεις για την οποία η διαδικασία επίλυσης σταματά.

Οι παράμετροι των μοντέλων μεταβλήθηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η στατιστική παράμετρος Model Efficiency (Eff) η οποία είναι ίση με:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (7.1)$$

όπου:

- $Qobs_i$, η παρατηρημένη απορροή του μήνα i ,
- $Qsim_i$, η υπολογισμένη απορροή του μήνα i ,
- \overline{Qobs} ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

Αφού υπολογίστηκε η μηνιαία απορροή της λεκάνης, κατασκευάστηκαν διαγράμματα μηνιαίας υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής για την περίοδο Οκτ1986-Σεπ1992 καθώς και τα διαγράμματα διασποράς αυτών, τα οποία χρησιμοποιούν την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής και την ευθεία 1:1 της παρατηρημένης απορροής. Όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μοντέλου-βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής είναι εξήντα τρεις (τρία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, επτά μοντέλα εξατμισοδιαπνοής και τρεις μέθοδοι επιφανειακής βροχόπτωσης, δηλ. $3*7*3=63$). Όλα τα παραπάνω διαγράμματα των εξήντατριών συνδυασμών φαίνονται στα παραρτήματα Β, Γ και Δ.

Στη συνέχεια, αφού είχαν υπολογιστεί οι παράμετροι των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου από την βελτιστοποίηση, πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση (validation) των μοντέλων για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Οκτώβριο έως Σεπτέμβριο) 1992-1998, με σταθερές τις τιμές των παραμέτρων. Κατασκευάστηκαν διαγράμματα όμοια με αυτά της βελτιστοποίησης, τα οποία φαίνονται στα παραρτήματα Β, Γ και Δ. Η πιστοποίηση των μοντέλων έγινε για να φανεί κατά πόσο τα μοντέλα, με σταθερές και βελτιστοποιημένες

τις παραμέτρους για μια χρονική περίοδο, μπορούν να προσομοιώσουν την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας για μια άλλη οποιαδήποτε χρονική περίοδο και συγκεκριμένα για την περίοδο Οκτ1986-Σεπ1998.

Ακόμη, τα μοντέλα πιστοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας και άλλες στατιστικές παραμέτρους, οι οποίες ήταν οι εξής:

α) Συντελεστής συσχέτισης C_c (coefficient of correlation)

$$C_c = \sqrt{\frac{\sum [(Qsim_i) - \overline{Qobs}]^2}{\sum [(Qobs_i) - \overline{Qobs}]^2}} \quad (7.2)$$

όπου:

- $Qobs_i$, η παρατηρημένη απορροή του μήνα i ,
- $Qsim_i$, η υπολογισμένη απορροή του μήνα i ,
- \overline{Qobs} ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

β) Συντελεστής προσδιορισμού R^2 (coefficient of determination)

$$R^2 = (C_c)^2 \quad (7.3)$$

όπου:

- C_c ο συντελεστής συσχέτισης (coefficient of correlation).

γ) Κανονικό σφάλμα εκτίμησης S_e (standard error of estimates)

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Qobs_i) - (Qsim_i)]^2}{N}} \quad (7.4)$$

όπου:

- $Qobs_i$, η παρατηρημένη απορροή του μήνα i ,
- $Qsim_i$, η υπολογισμένη απορροή του μήνα i .

- N ο αριθμός των μηνών της εξεταζόμενης περιόδου.

δ) Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{obs,i} - Q_{sim,i}}{Q_{obs,i}} \right| \times 100 \quad (7.5)$$

όπου:

- $Q_{obs,i}$ η παρατηρημένη απορροή του μήνα i,
- $Q_{sim,i}$ η υπολογισμένη απορροή του μήνα i.
- N ο αριθμός των μηνών της εξεταζόμενης περιόδου.

ε) Ποσοστιαία προκατάληψη %Bias (Percentage Bias)

$$\%Bias = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{sim,i} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,i}} \times 100 \quad (7.6)$$

όπου:

- $Q_{obs,i}$ η παρατηρημένη απορροή του μήνα i,
- $Q_{sim,i}$ η υπολογισμένη απορροή του μήνα i.
- N ο αριθμός των μηνών της εξεταζόμενης περιόδου.

στ) Στατιστική παράμετρος M_q (Vandewiele et al, 1998)

$$M_q = \frac{ocv}{mcv} \quad (7.7)$$

όπου:

$$\bullet \quad ocv = \frac{\left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}]^2 \right\}}{\overline{Q_{obs}}} \quad (7.8)$$

ο συντελεστής μεταβλητότητας της παρατηρημένης απορροής Q_{obs} ,

$$\bullet mcv = \frac{2 \left\{ \sum_{i=1}^N [\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{sim,i}}]^2 / (N - X) \right\}^{0,5}}{(\overline{Q_{sim}})^{0,5}} \quad (7.9)$$

ο συντελεστής μεταβλητότητας της υπολογισμένης απορροής Q_{sim} .

Το $\overline{Q_{obs}}$ και $\overline{Q_{sim}}$ είναι ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής αντίστοιχα, το N ο αριθμός των βημάτων υπολογισμού και το X ο αριθμός των παραμέτρων βελτιστοποίησης του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου.

Στις παρακάτω παραγράφους φαίνονται αναλυτικά σε πίνακες οι παράμετροι των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου που βελτιστοποιήθηκαν καθώς και όλες οι στατιστικές παράμετροι πιστοποίησης αυτών. Ακόμη, παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής της λεκάνης της Γερμασόγειας για κάθε μοντέλο με μέγιστο και ελάχιστο Model Efficiency (Eff) αντίστοιχα όπως και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς.

7.2 Βελτιστοποίηση και Πιστοποίηση μοντέλων υδατικού ισοζυγίου

Στην ενότητα 7.2 παρουσιάζονται διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς καθώς και συγκεντρωτικοί πίνακες που περιλαμβάνουν τις τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης του κάθε μοντέλου και των στατιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρα σύγκρισης της αξιοπιστίας της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας.

7.2.1 Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του μοντέλου ήταν η Model Efficiency (Eff). Η περίοδος βελτιστοποίησης του μοντέλου ήταν από τον Οκτώβριο του 1986 έως τον Σεπτέμβριο του 1992 (έξη υδρολογικά έτη). Οι παράμετροι a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 του μοντέλου υπολογίστηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η Model

Efficiency με την μέθοδο SIMPLEX. Αφού έγινε ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων ακολούθησε η πιστοποίηση του μοντέλου για την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1992 έως τον Σεπτέμβριο του 1998 (έξη υδρολογικά έτη). Η βασική στατιστική παράμετρος, από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιοπιστία της πιστοποίησης, ήταν η Model Efficiency (Eff). Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής που προέρχονται από την εφαρμογή του μοντέλου με τον συνδυασμό μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που δίνει την καλύτερη και χειρότερη υδρολογική προσομοίωση (maxEff και minEff αντίστοιχα) της απορροής της λεκάνης της Γερμασόγειας, και για την βελτιστοποίηση και για την πιστοποίηση του μοντέλου, συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα ενδεικτικά διαγράμματα διασποράς (Σχήματα 7.1-7.8). Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής του μοντέλου του Abulohom παρουσιάζονται στο παράρτημα Β της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (Σχήματα Β.1-Β.84).

Από τα διαγράμματα σύγκρισης παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής των Σχημάτων 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, όπως και από τα διαγράμματα του Παραρτήματος Β, βλέπουμε πως το μοντέλο Abulohom προσομοιώνει πολύ καλά την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας, πράγμα το οποίο το υποδηλώνουν και οι μεγάλες τιμές του Model Efficiency (Eff), το οποίο διακυμαίνεται από την τιμή 0,79 έως την τιμή 0,86 για την βελτιστοποίηση. Στην πιστοποίηση οι τιμές πέφτουν (από 0,35 έως 0,66), πράγμα απολύτως φυσιολογικό, αλλά και πάλι αυτές οι τιμές είναι αρκετά υψηλές για πιστοποίηση μοντέλου γενικά.

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης του μοντέλου Abulohom, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής είναι σχεδόν όμοια (μορφή) αλλά και παρουσιάζουν και ίδια κλίμακα (μεγάλες τιμές Eff). Ο συνολικός πλημμυρικός όγκος είναι περίπου ίδιος ενώ και οι μέγιστες απορροές (peaks) σχεδόν ταυτίζονται, εκτός από την περίπτωση των μέγιστων απορροών του Μαρτίου 1987 όπου η παρατηρημένη απορροή είναι μεγαλύτερη αρκετά από την υπολογισμένη, πράγμα όμως που δικαιολογείται μιας και πρόκειται για μεμονωμένο απότομο γεγονός πλημμύρας.

Στην περίπτωση της πιστοποίησης του μοντέλου Abulohom, τα διαγράμματα παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής παρουσιάζουν μια μικρή διαφορετικότητα κυρίως στην κλίμακα (μείωση Eff) ενώ η ομοιότητα των διαγραμμάτων παραμένει μεγάλη.

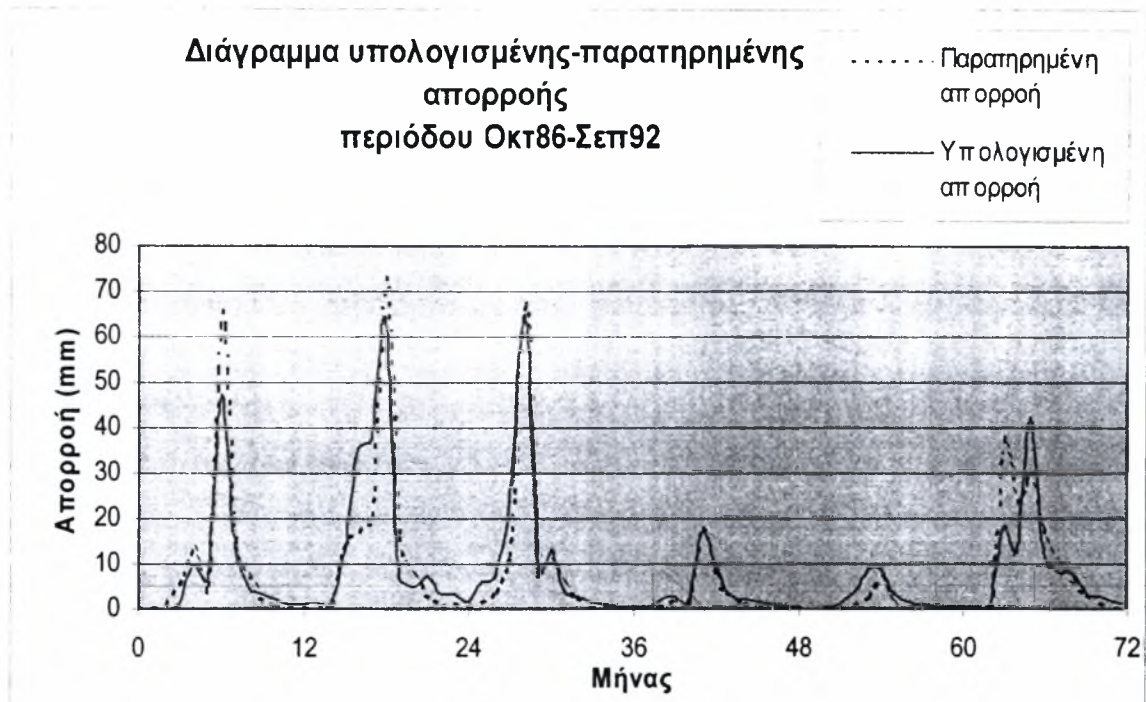
Κατά την διάρκεια μόνο του τρίτου υδρολογικού έτους (Οκτ94-Σεπ95) φαίνεται μια χρονική υστέρηση της απορροής, όπως και μια διαφορά ανάμεσα στις μέγιστες παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής.

Από τα διαγράμματα διασποράς των Σχημάτων 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, όπως και από τα διαγράμματα του Παραρτήματος Β, παρατηρούμε ότι η γραμμή παλινδρόμησης παρατηρημένης-υπολογισμένης απορροής βρίσκεται κάτω από την γραμμή 1:1 της παρατηρημένης απορροής, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο του Abulohom υποεκτιμά την υπολογισμένη απορροή έναντι της παρατηρημένης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζουν οι δύο γραμμές, τόσο μεγαλύτερη είναι η υποεκτίμηση της υπολογισμένης απορροής. Μάλιστα στα διαγράμματα διασποράς που προέρχονται από την πιστοποίηση του μοντέλου αυτή η γωνία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη γωνία στην βελτιστοποίηση του μοντέλου, δηλαδή στην πιστοποίηση είναι μεγαλύτερη η υποεκτίμηση. Αυτό σημαίνει ότι είναι μεγαλύτερες οι αποκλίσεις ανάμεσα στην παρατηρημένη και υπολογισμένη απορροή και αυτό φαίνεται και από τις μικρότερες τιμές Eff και R^2 των διαγραμμάτων της πιστοποίησης σε σχέση με αυτά της βελτιστοποίησης του μοντέλου.

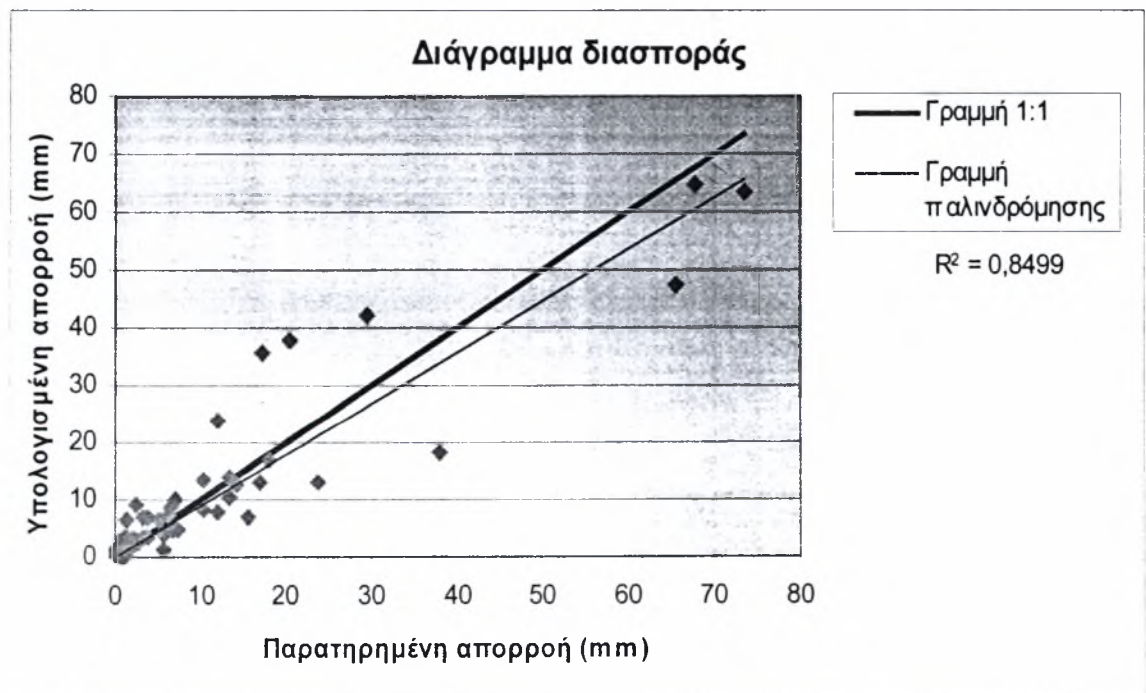
Συμπερασματικά, πρέπει να τονισθεί ότι το μοντέλο Abulohom κάνει αρκετά καλή προσομοίωση του υδατικού επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου, τόσο κατά την βελτιστοποίηση του μοντέλου όσο και κατά την πιστοποίηση αυτού. Η υποεκτίμηση της παρατηρημένης απορροής είναι μικρή όπως φαίνεται από τα διαγράμματα διασποράς ενώ επίσης το μοντέλο καταφέρνει να προσομοιώνει αρκετά ακόμα και τις μέγιστες τιμές απορροής, εκτός από λίγα μεμονωμένα γεγονότα μικρής διάρκειας. Το εμβαδόν (πλημμυρικός όγκος) που περικλείουν οι δύο καμπύλες παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής είναι περίπου ίδιο, πράγμα που υποδηλώνει την ομοιότητα των καμπύλων (μορφή και κλίμακα).

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 του μοντέλου που βελτιστοποιήθηκαν, ενώ στον Πίνακα 7.2 οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης Eff και των στατιστικών παραμέτρων $Cc, R^2, Se, Mg, MAPE, \%Bias$ τόσο για την βελτιστοποίηση όσο και για την πιστοποίηση του μοντέλου.

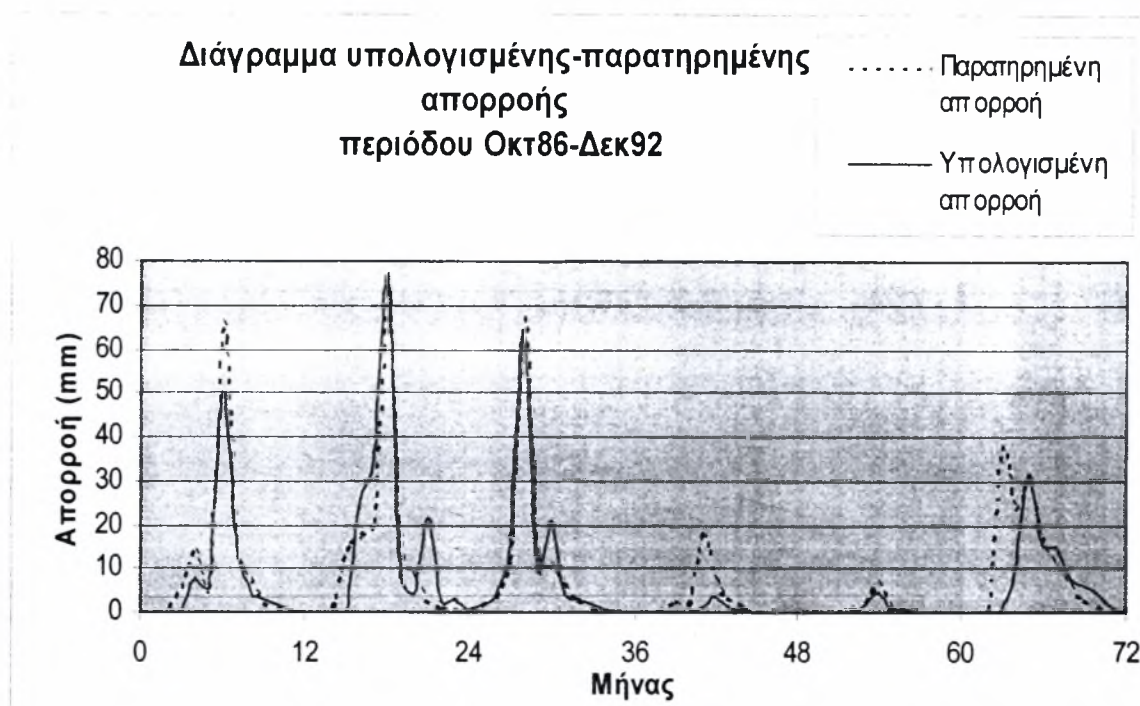
Στον Πίνακα 7.3 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, αντίστοιχα, της αντικειμενικής συνάρτησης Eff, καθώς και ο αντίστοιχος συνδυασμός μεθόδου εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.



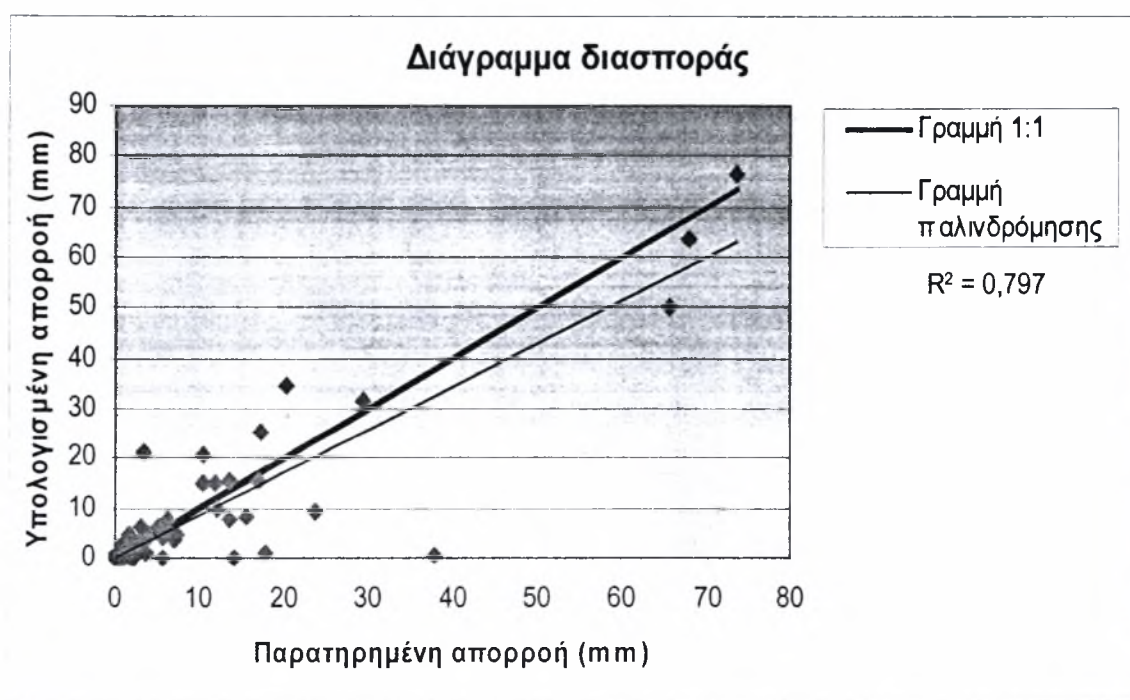
Σχήμα 7.1: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Μέσου όρου-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και E_T αντίστοιχα), ($\max Eff=0,86$ -Βελτιστοποίηση).



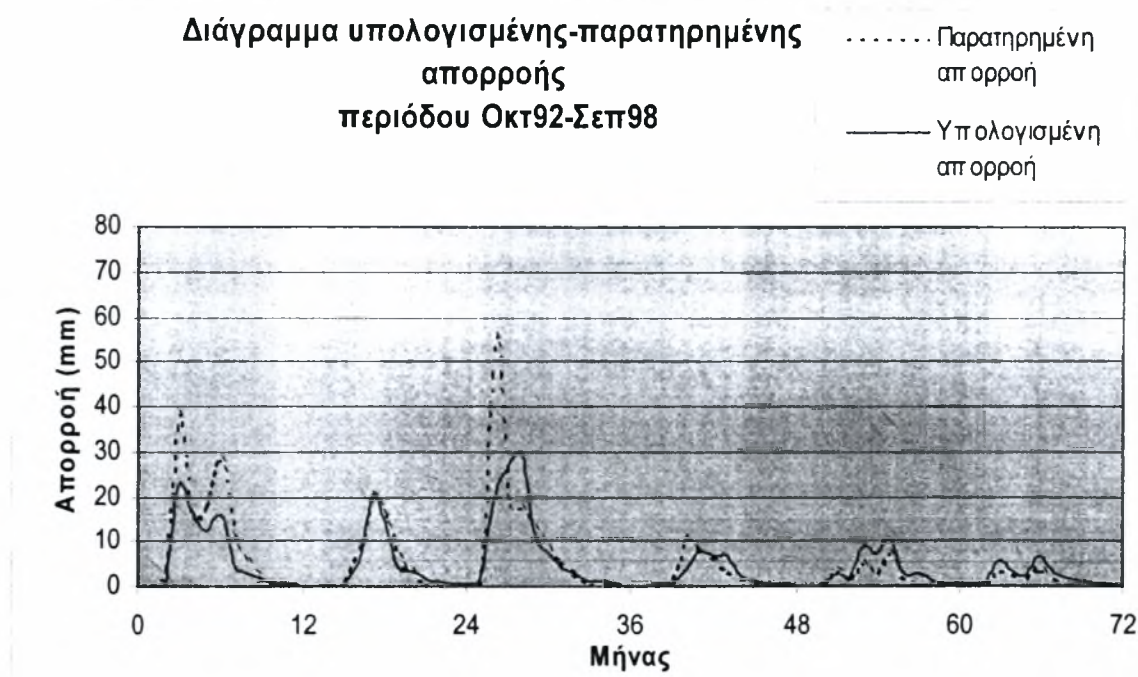
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Μέσου όρου-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και E_T αντίστοιχα), ($\max Eff=0,86$ -Βελτιστοποίηση).



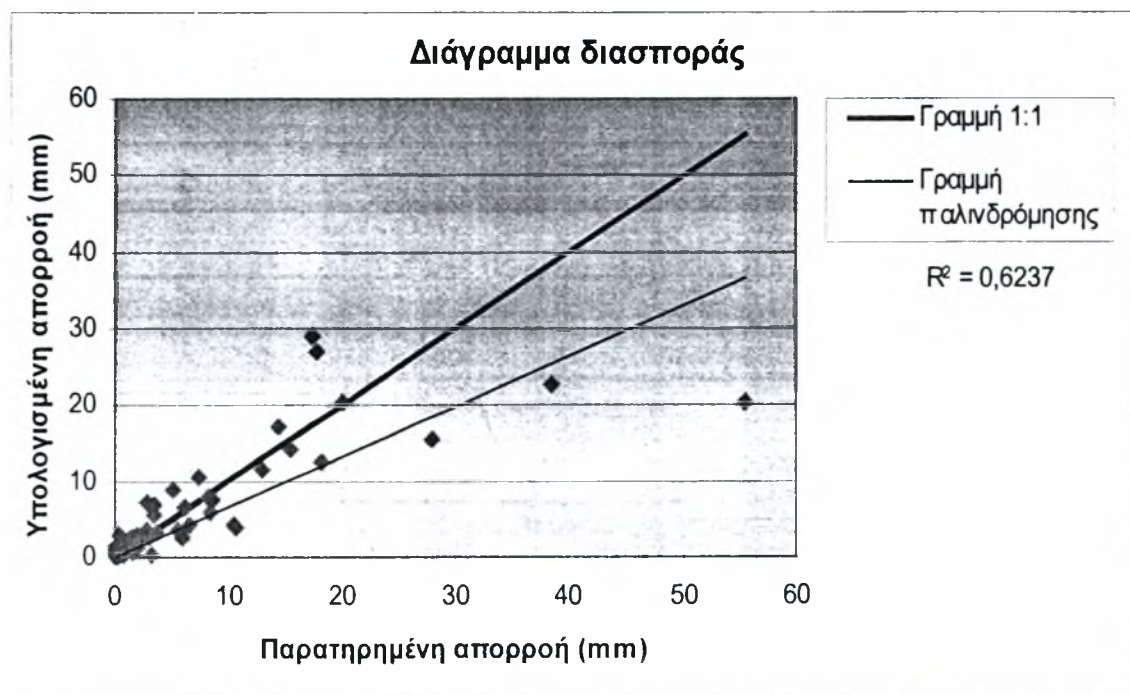
Σχήμα 7.3: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,79$ -Βελτιστοποίηση).



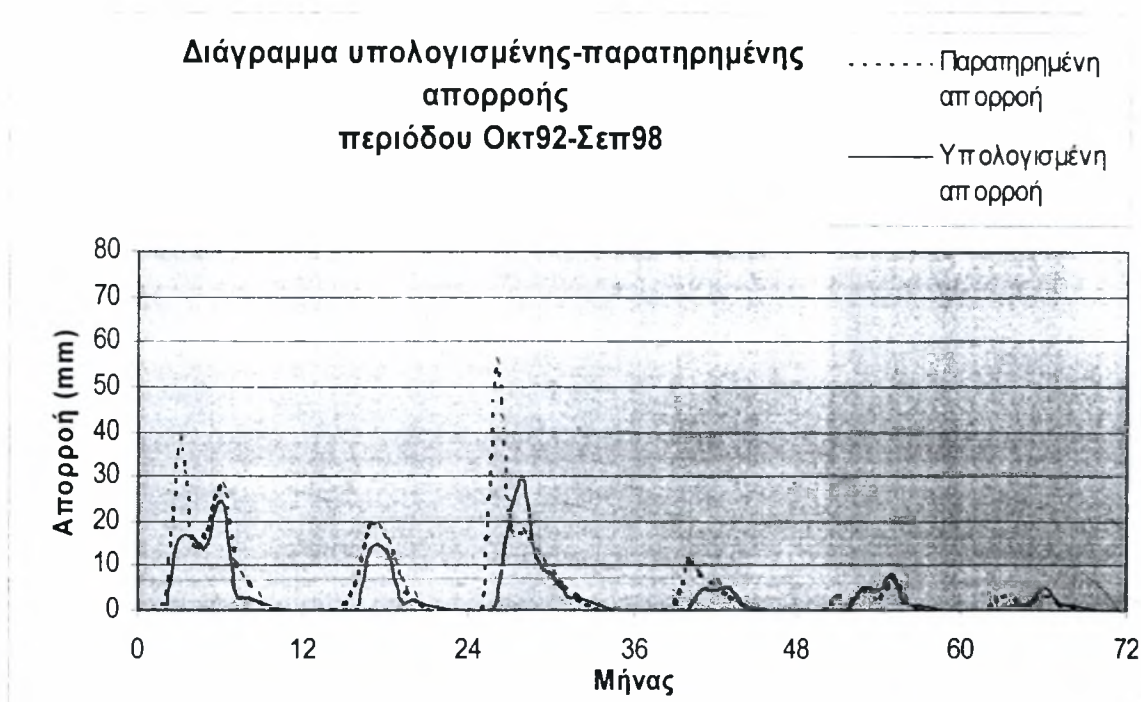
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,79$ -Βελτιστοποίηση).



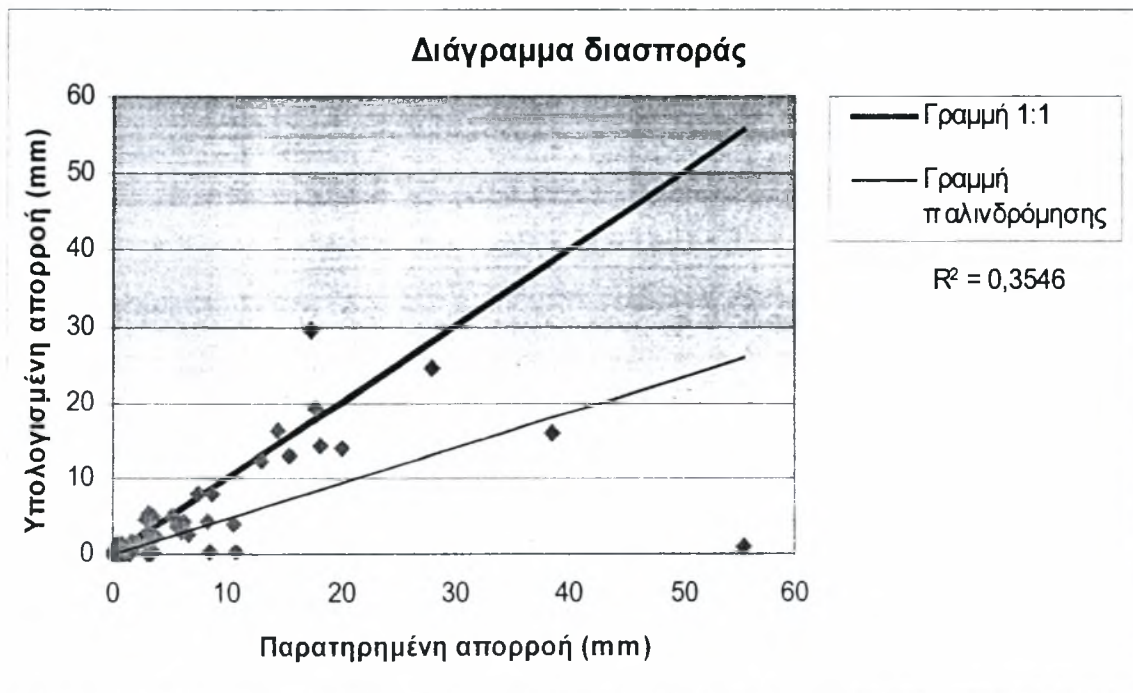
Σχήμα 7.5: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\max Eff=0,66$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.6: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\max Eff=0,66$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.7: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,35$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Abulohom, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,35$ -Πιστοποίηση).

Πίνακας 7.1: a_1, a_2, b_1, b_2, a_3 για τους συνδυασμούς βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής του μοντέλου **Abulohom**.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	a_1	a_2	b_1	b_2	a_3
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ					
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ					
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	THORNTHWAITE	0,00000445	0,00002823	2,00	2,00	0,3346
»	KHARRUFA	0,00000515	0,00004229	2,00	2,00	0,6433
»	BLANEY-CRIDDLE	0,00000864	0,00007909	2,00	2,00	0,6813
»	HARGREAVES	0,00000755	0,00007745	2,00	2,00	0,7559
»	TURC(M.O)	0,00000611	0,00006041	2,00	2,00	0,6403
»	JENSEN-HAISE	0,00000588	0,00005498	2,00	2,00	0,6306
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,00000617	0,00006120	2,00	2,00	0,6348
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	THORNTHWAITE	0,00000307	0,00002649	2,00	2,00	0,6834
»	KHARRUFA	0,00000353	0,00002955	2,00	2,00	0,7848
»	BLANEY-CRIDDLE	0,00000578	0,00004588	2,00	2,00	0,7857
»	HARGREAVES	0,00000585	0,00004755	2,00	2,00	0,8132
»	TURC(M.O)	0,00000417	0,00003813	2,00	2,00	0,7819
»	JENSEN-HAISE	0,00000398	0,00003587	2,00	2,00	0,7809
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,00000417	0,00003813	2,00	2,00	0,7819
THIESEN	THORNTHWAITE	0,00000413	0,00002591	2,00	2,00	0,6253
»	KHARRUFA	0,00000473	0,00003319	2,00	2,00	0,7542
»	BLANEY-CRIDDLE	0,00000755	0,00005212	2,00	2,00	0,7650
»	HARGREAVES	0,00000751	0,00005493	2,00	2,00	0,7968
»	TURC(M.O)	0,00000555	0,00004509	2,00	2,00	0,7516
»	JENSEN-HAISE	0,00000522	0,00004119	2,00	2,00	0,7542
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,00000564	0,00004293	2,00	2,00	0,7486

Πίνακας 7.2: Cc, R², Se, Mq, MAPE, %Bias, Eff για τους συνδυασμούς βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής μοντέλου Abulohom.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	Cc		R ²		Se		Mq		%Bias		Eff	
		ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ												
	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	0,89	0,62	0,80	0,39	6,78	7,51	2,19	1,53	0,98	1,14	13,88	14,85
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	THORNTHWAITE	0,90	0,71	0,81	0,50	6,49	6,73	2,74	2,14	1,41	2,24	69,84	126,08
	KHARRUFA	0,90	0,77	0,81	0,60	6,41	5,98	2,98	2,56	2,05	3,15	123,64	200,70
»	BLANEY-CRIDDLE	0,90	0,82	0,81	0,67	6,39	5,46	3,13	2,77	3,57	5,40	238,55	369,70
	HARGREAVES	0,90	0,72	0,81	0,51	6,48	6,62	2,78	2,19	1,43	2,19	71,25	123,37
»	TURC(M.O)	0,90	0,70	0,82	0,49	6,41	6,76	2,80	2,20	1,21	1,89	52,44	100,50
	JENSEN-HAISE	0,90	0,72	0,81	0,51	6,50	6,64	2,76	2,18	1,38	2,11	66,66	116,35
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,90	0,66	0,80	0,44	6,56	7,10	3,09	2,04	3,55	4,75	237,54	323,50
	THORNTHWAITE	0,91	0,74	0,82	0,54	6,21	6,46	3,30	2,30	5,60	7,10	387,45	495,54
»	KHARRUFA	0,92	0,76	0,85	0,58	5,65	6,11	3,51	2,48	5,91	7,20	411,24	503,49
	BLANEY-CRIDDLE	0,93	0,77	0,86	0,59	5,55	6,00	3,53	2,48	6,73	8,01	470,58	562,22
»	HARGREAVES	0,91	0,74	0,84	0,55	5,98	6,37	3,39	2,37	5,69	7,18	394,96	502,39
	TURC(M.O)	0,91	0,73	0,83	0,53	6,13	6,47	3,39	2,36	5,46	7,00	378,27	489,74
»	JENSEN-HAISE	0,92	0,74	0,84	0,55	5,97	6,36	3,39	2,36	5,69	7,21	394,53	504,00
	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,90	0,63	0,81	0,39	6,49	7,33	2,91	2,07	2,02	3,62	121,43	236,84
»	THORNTHWAITE	0,91	0,71	0,83	0,50	6,15	6,55	3,24	2,42	3,95	6,21	266,30	430,95
	KHARRUFA	0,92	0,75	0,85	0,57	5,80	6,11	3,37	2,59	4,69	6,91	321,01	482,28
»	BLANEY-CRIDDLE	0,92	0,77	0,85	0,59	5,75	5,96	3,40	2,58	5,58	7,85	386,63	550,72
	HARGREAVES	0,91	0,72	0,83	0,51	6,02	6,48	3,29	2,48	4,14	6,45	280,89	448,49
»	TURC(M.O)	0,91	0,70	0,83	0,49	6,11	6,66	3,31	2,46	4,06	6,42	275,37	447,28
	JENSEN-HAISE	0,91	0,72	0,83	0,51	6,03	6,49	3,29	2,48	3,83	6,02	258,31	416,71
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,91	0,72	0,83	0,51	6,03	6,49	3,29	2,48	3,83	6,02	258,31	416,71
	THORNTHWAITE	0,91	0,72	0,83	0,51	6,03	6,49	3,29	2,48	3,83	6,02	258,31	416,71

Πίνακας 7.3: **Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Eff** των συνδυασμών μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής-μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης του μοντέλου **Abulohom**.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΒΥΛΟΗΟΜ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,86	HARGREAVES	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,79	THORNTHWAITE	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ
ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΒΥΛΟΗΟΜ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,66	HARGREAVES	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,35	THORNTHWAITE	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ

Πριν γίνει ο σχολιασμός του Πίνακα 7.2, θα πρέπει να αναλυθούν ορισμένα χαρακτηριστικά των στατιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Καταρχήν, ως αντικειμενική συνάρτηση επιλέχθηκε η Model Efficiency (Eff) γιατί σαν στατιστική παράμετρος μπορεί να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την ομοιότητα και την ισότητα (μορφή και κλίμακα αντίστοιχα) των δύο καμπυλών παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής αντίστοιχα. Για αυτό και καλείται στατιστική παράμετρος Μορφής-Κλίμακας. Ο χαρακτηρισμός παράμετρος Μορφής οφείλεται στο γεγονός ότι εμπεριέχει στο τύπο της (στον παρανομαστή) την απόκλιση της παρατηρημένης απορροής από τον μέσο όρο αυτής, ενώ στον αριθμητή υπολογίζεται η διαφορά των τιμών παρατηρημένης-υπολογισμένης απορροής (για αυτό και είναι και παράμετρος Κλίμακας).

Οι στατιστικές παράμετροι R^2 και C_e είναι παράμετροι Μορφής γιατί εισάγουν στον τύπο τους μόνο τις διαφορές της απορροής από τον μέσο όρο της και δείχνουν το πόσο όμοια είναι δύο σχήματα.

Οι στατιστικές παράμετροι Se, MAPE, %Bias είναι παράμετροι Κλίμακας διότι υπολογίζουν διαφορές παρατηρημένης-υπολογισμένης απορροής, δηλαδή δείχνουν τόσο πόσο απέχουν μεταξύ τους οι αντίστοιχες καμπύλες (ισότητα σχημάτων) και όχι αν είναι αυτές όμοια σχήματα.

Η στατιστική παράμετρος Mq είναι παράμετρος Μορφής-Κλίμακας γιατί εμπεριέχει τόσο μέσους όρους και διαφορές απορροής από αυτούς όσο και διαφορές μεταξύ των τιμών παρατηρημένης-υπολογισμένης απορροής. Είναι μια στατιστική παράμετρος που είναι αναγκαία για την πιστότητα ενός μοντέλου.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι στατιστικές παράμετροι παίρνουν θετικές τιμές εκτός από την %Bias η οποία μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές. Για αυτό και μόνο αυτή δείχνει αν ένα μοντέλο υπερεκτιμάει (θετική τιμή %Bias) ή υποεκτιμάει (αρνητική τιμή %Bias) την υπολογισμένη απορροή έναντι της παρατηρημένης.

Από τον Πίνακα 7.2 παρατηρούμε γενικά ότι οι τιμές όλων των στατιστικών παραμέτρων δείχνουν ότι το μοντέλο του Abulohom κάνει πολύ καλή εκτίμηση της απορροής. Οι τιμές είναι καλύτερες στην περίπτωση της βελτιστοποίησης, αλλά και στην πιστοποίηση παραμένουν αρκετά ικανοποιητικές. Αυτό σημαίνει ότι οι καμπύλες της παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής παρουσιάζουν ομοιότητα στο σχήμα τους (μορφή) αλλά και είναι και ίσα σχεδόν σχήματα (κλίμακα). Ακόμη επειδή η στατιστική παράμετρος %Bias είναι θετική το μοντέλο δίνει μεγαλύτερες τιμές εκτιμημένης απορροής, συνολικά για όλο το δείγμα των 72 μηνών, σε σχέση με τις παρατηρημένες.

Το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του Hargreaves υπερέχει σε όλες τις στατιστικές παραμέτρους από τα άλλα μοντέλα. Ο συνδυασμός του μοντέλου αυτού με την μέθοδο εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης του αριθμητικού μέσου όρου δίνει για την περίπτωση της βελτιστοποίησης τις καλύτερες τιμές του Eff, Cc, R², Se, Mq από όλους τους άλλους συνδυασμούς, όπως και τις μεγαλύτερες τιμές ποσοστιαίας προκατάληψης και μέσου απόλυτου σφάλματος, οι οποίες όμως οφείλονται σε μεμονωμένα γεγονότα του δείγματος των 72 μηνών και δεν αντιπροσωπεύουν την συνολική υδρολογική προσομοίωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου μεμονωμένου γεγονότος για όλους τους συνδυασμούς, οι οποίοι δίνουν σχεδόν όλοι μεγάλες τιμές %Bias, αποτελεί ο Ιούνιος του 1991 κατά πρώτο λόγο και κατά δεύτερο ο Ιούλιος του ίδιου έτους. Σε αυτούς τους δύο μήνες επειδή η τιμή της παρατηρημένης απορροής είναι πάρα πολύ μικρή (0.02 mm), σε σχέση με την τιμή που εκτιμάει το μοντέλο, παρατηρώντας τον τύπο που δίνει την

%Bias βλέπουμε πως αυτοί οι δύο μήνες ανεβάζουν κατακόρυφα την συνολική ποσοστιαία προκατάληψη.

Στην περίπτωση της πιστοποίησης, και πάλι το μοντέλο του Hargreaves υπερέχει από όλα τα άλλα μοντέλα, συνδυαζόμενο όμως αυτή την φορά με την μέθοδο εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης της βροχοβαθμίδας δίνοντας τις καλύτερες τιμές για το Cc, R², Se, Mq, Eff.

Όσον αφορά τις χειρότερες τιμές που δίνει κάποιο μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, αυτές προέρχονται από το μοντέλο του Thornthwaite, το οποίο όμως με τη σειρά του και αυτό παρέχει αρκετά καλές τιμές γενικά (π.χ. Eff=0,79). Αυτό που έχουμε να παρατηρήσουμε είναι ότι τόσο για την βελτιστοποίηση όσο και για την πιστοποίηση το μοντέλο του Thornthwaite δίνει τις χειρότερες τιμές από όλες όταν συνοδεύεται με τη μέθοδο εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης της βροχοβαθμίδας.

Από τον Πίνακα 7.3 παρατηρούμε ότι το μοντέλο Abulohom παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του Eff χρησιμοποιώντας ως μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο του Hargreaves και στην βελτιστοποίηση και στην πιστοποίηση του. Αντίθετα, παρουσιάζει το ελάχιστο Eff όταν εφαρμόζεται το μοντέλο του Thornthwaite και στην βελτιστοποίηση αλλά και στην πιστοποίηση του. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μοντέλο του Hargreaves υπερεκτιμά την δυνητική εξατμισοδιαπνοή πιο πολύ από όλα τα μοντέλα ενώ το μοντέλο του Thornthwaite αντίθετα την υποεκτιμά πιο πολύ από όλα τα άλλα μοντέλα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο του Abulohom κάνει καλύτερη υδρολογική προσομοίωση (τόσο κατά την βελτιστοποίηση όσο και κατά την πιστοποίηση του) για λεκάνες απορροής με μεγάλη εξατμισοδιαπνοή, δηλαδή για λεκάνες απορροής με ξηρό κλίμα και μεγάλες θερμοκρασίες που συνεπάγεται και μεγάλη τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως είναι αυτό της Γερμασόγειας στην Κύπρο.

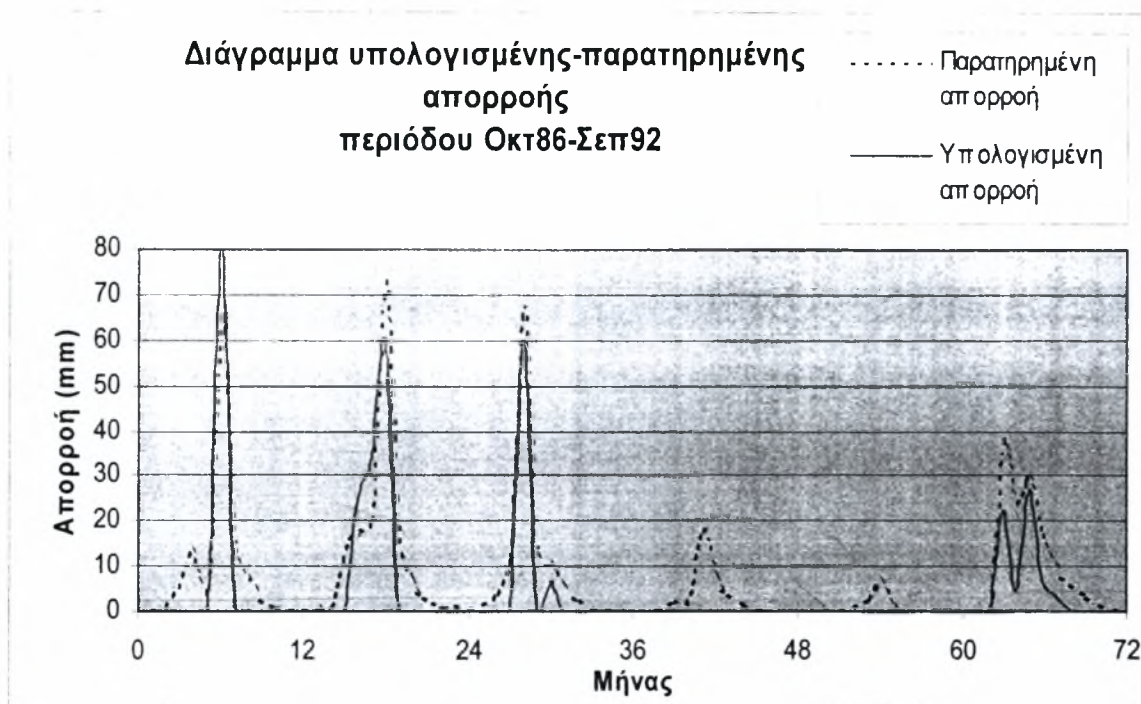
Συμπερασματικά, το μοντέλο του Abulohom προσομοιώνει ιδανικά το επιφανειακό υδατικό δυναμικό της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου, όπως φαίνεται από την σύγκριση των διαγραμμάτων παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής αλλά και από τις πολύ καλές τιμές που παίρνουν οι στατιστικές παράμετροι Eff, Cc, R², Se και Mq, χρησιμοποιώντας κατά πρώτο λόγο σαν μέθοδο εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης τον αριθμητικό μέσο όρο και σαν μοντέλο εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο του Hargreaves.

7.2.2 Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Giakoumakis

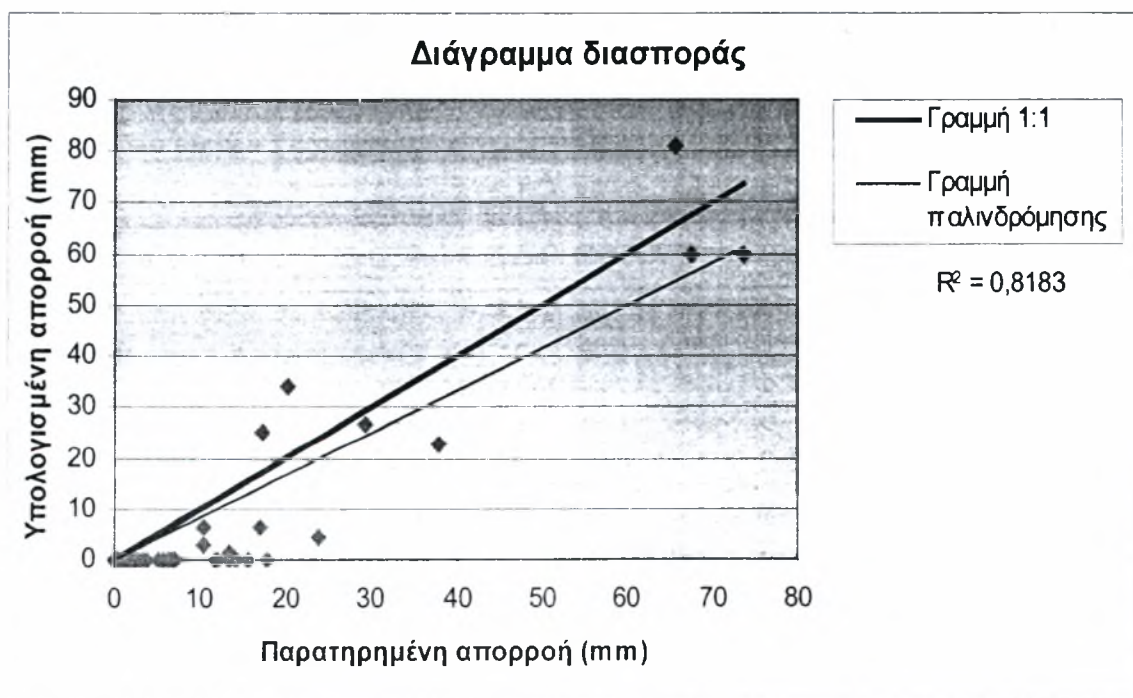
Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του μοντέλου ήταν η Model Efficiency (Eff). Η περίοδος βελτιστοποίησης του μοντέλου ήταν από τον Οκτώβριο του 1986 έως τον Σεπτέμβριο του 1992 (έξη υδρολογικά έτη). Οι παράμετροι a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 του μοντέλου υπολογίστηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η Model Efficiency με την μέθοδο SIMPLEX. Αφού έγινε ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων ακολούθησε η πιστοποίηση του μοντέλου για την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1992 έως τον Σεπτέμβριο του 1998 (έξη υδρολογικά έτη). Η βασική στατιστική παράμετρος, από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιοπιστία της πιστοποίησης, ήταν η Model Efficiency (Eff). Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής που προέρχονται από την εφαρμογή του μοντέλου με τον συνδυασμό μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που δίνει την καλύτερη και χειρότερη υδρολογική προσομοίωση (maxEff και minEff αντίστοιχα) της απορροής της λεκάνης της Γερμασόγειας, και για την βελτιστοποίηση και για την πιστοποίηση του μοντέλου, συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα ενδεικτικά διαγράμματα διασποράς (Σχήματα 7.9-7.16). Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής του μοντέλου του Giakoumakis παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (Σχήματα Γ.1-Γ.84).

Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων CN (Curve Number) και K (συντελεστής διήθησης) του μοντέλου που βελτιστοποιήθηκαν καθώς και της μέγιστης χωρητικότητας Smax της δεξαμενής, ενώ στον Πίνακα 7.5 οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης Eff και των στατιστικών παραμέτρων $Cc, R^2, Se, Mg, MAPE, \%Bias$ τόσο για την βελτιστοποίηση όσο και για την πιστοποίηση του μοντέλου.

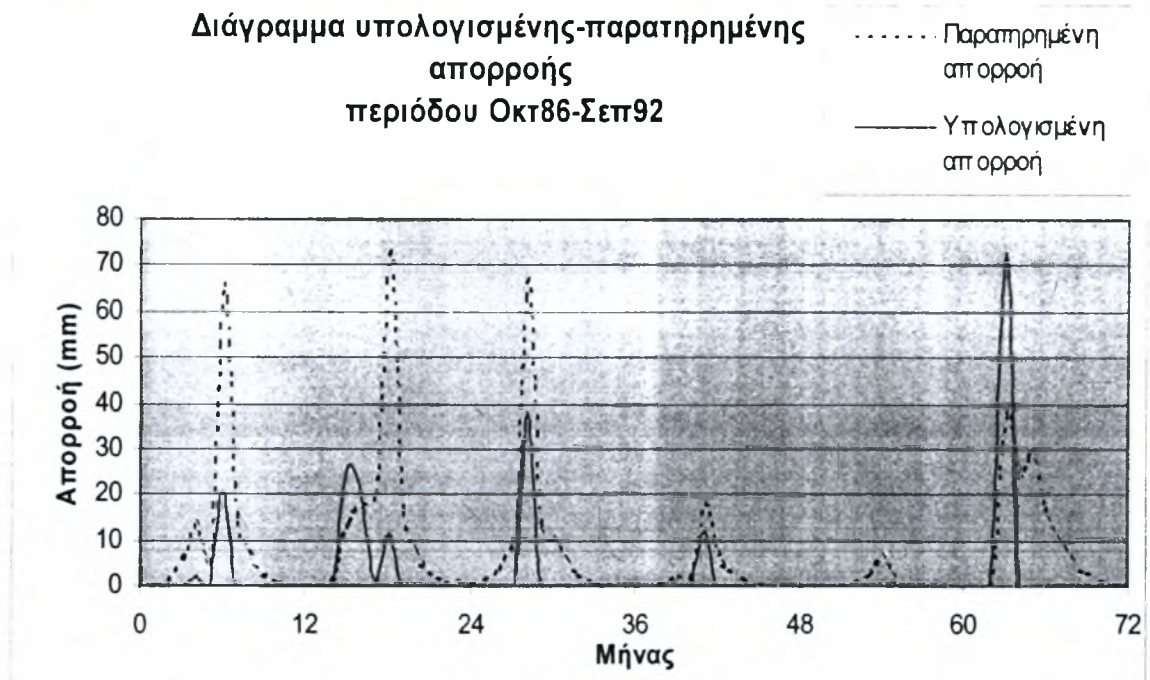
Στον Πίνακα 7.6 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, αντίστοιχα, της αντικειμενικής συνάρτησης Eff, καθώς και ο αντίστοιχος συνδυασμός μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.



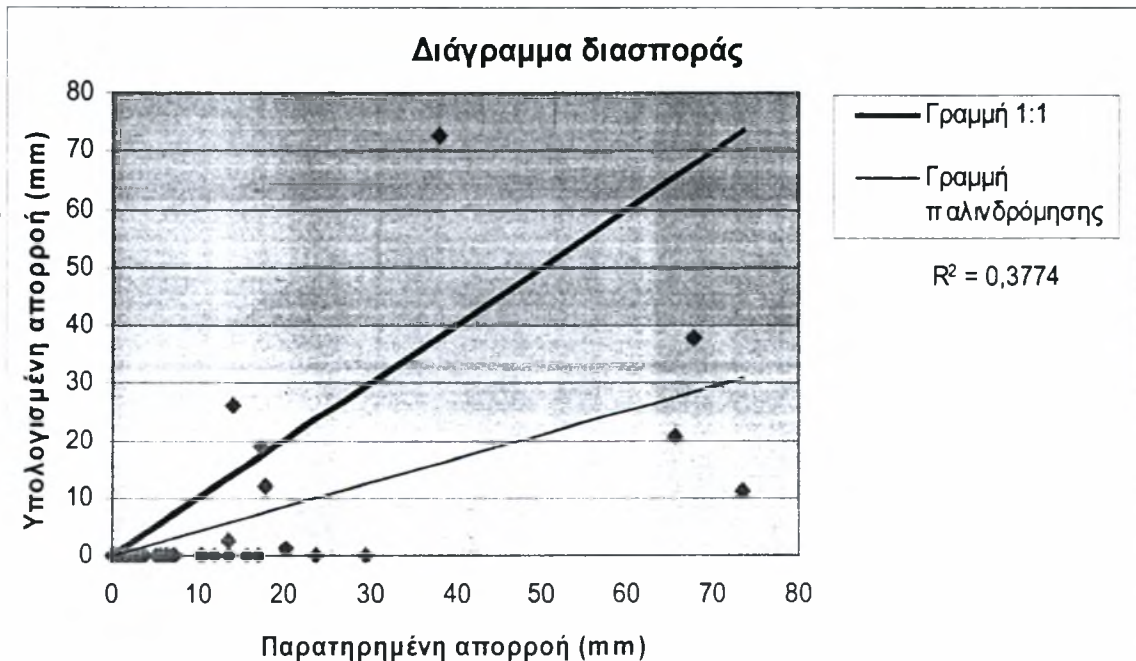
Σχήμα 7.9: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0,79$ -Βελτιστοποίηση).



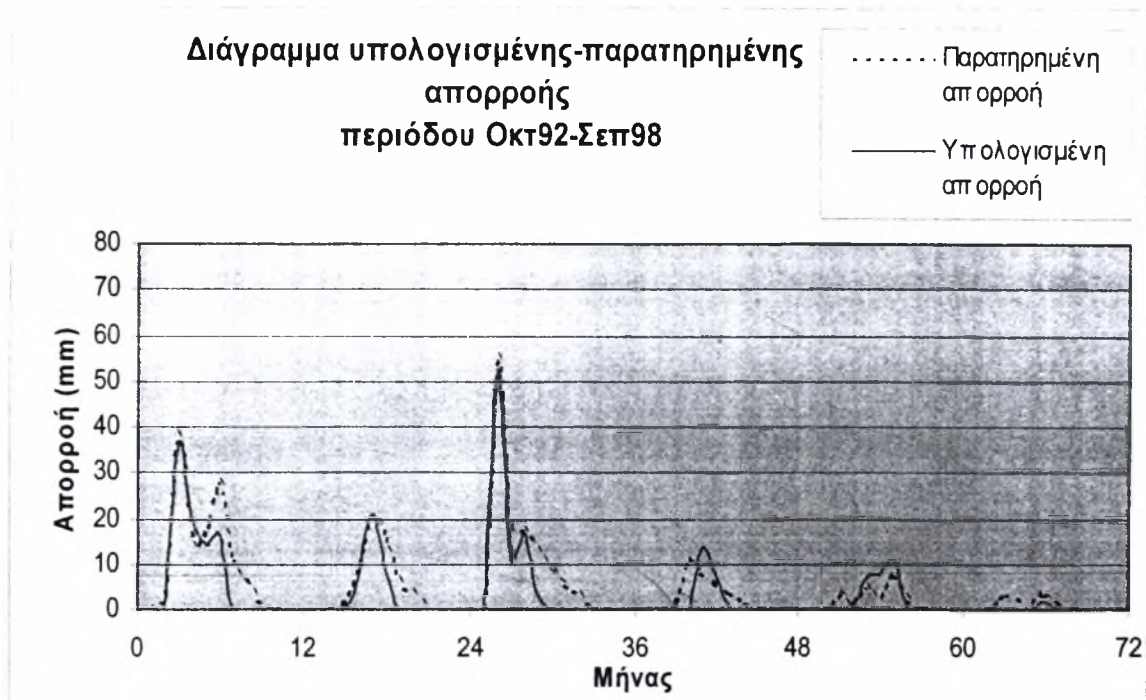
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0.79$ -Βελτιστοποίηση).



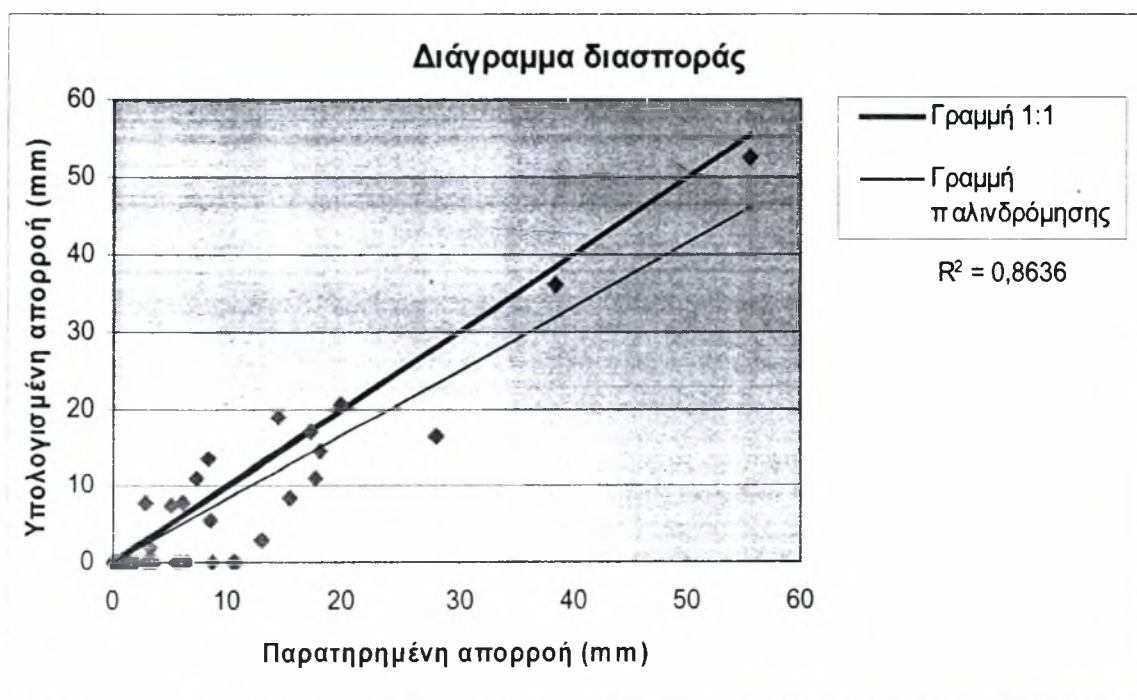
Σχήμα 7.11: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Thiessen-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,25$ -Βελτιστοποίηση).



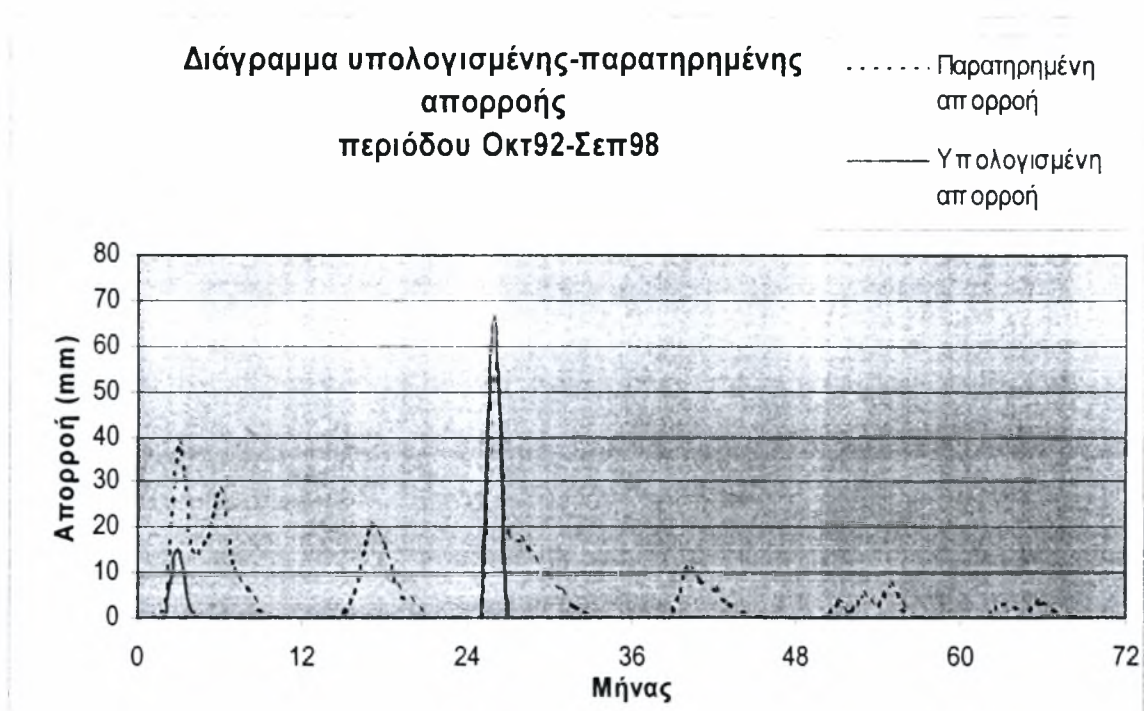
Σχήμα 7.12: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Thiessen-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,25$ -Βελτιστοποίηση).



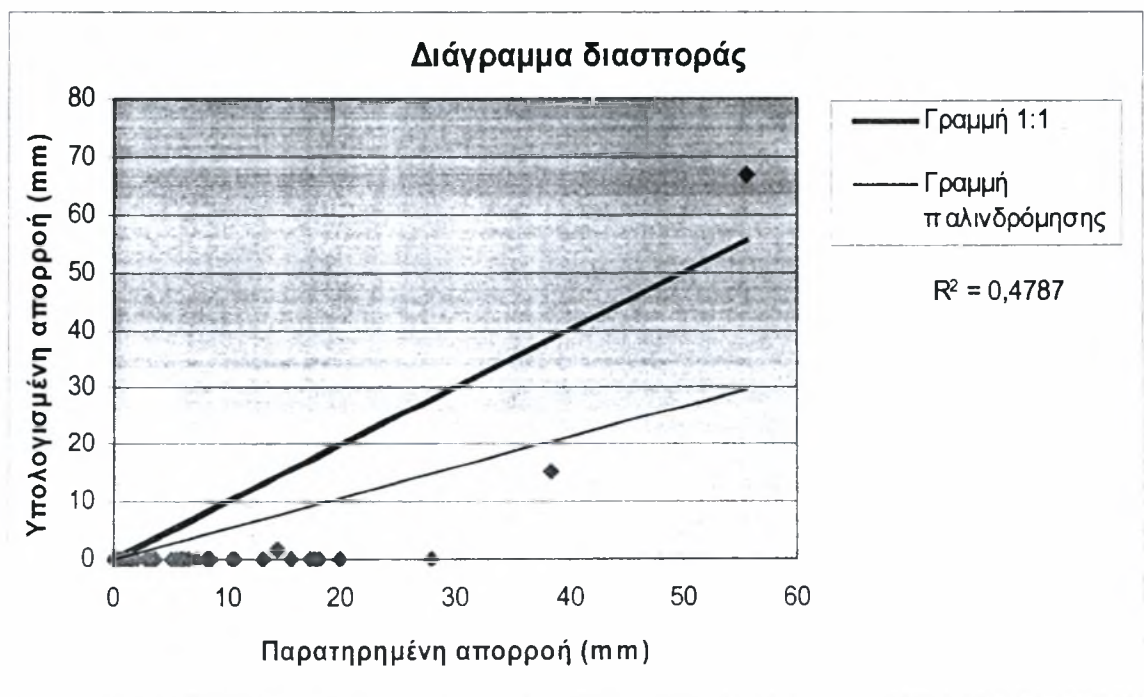
Σχήμα 7.13: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Thiessen-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0,84$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Thiessen- Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0,84$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.15: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Blanney/Criddle (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,33$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.16: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Giakoumakis, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Blanney/Criddle (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\text{minEff}=0,33$ -Πιστοποίηση).

Πίνακας 7.4: CN, Smax, K για τους συνδυασμούς μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του μοντέλου **Giakoumakis**.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	CN (%)	Smax (mm)	K
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	THORNTHWAITE	49,39	260,24	0,56
»	KHARRUFA	51,88	235,64	0,48
»	BLANEY-CRIDDLE	57,50	187,72	0,24
»	HARGREAVES	71,93	99,11	0,56
»	TURC(M.O)	63,27	147,46	0,62
»	JENSEN-HAISE	56,92	192,20	0,57
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	63,18	148,03	0,63
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	THORNTHWAITE	60,78	163,91	0,68
»	KHARRUFA	55,18	206,29	0,55
»	BLANEY-CRIDDLE	61,97	155,85	0,44
»	HARGREAVES	75,58	82,08	0,62
»	TURC(M.O)	65,83	131,82	0,64
»	JENSEN-HAISE	53,90	217,21	0,48
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	65,73	132,45	0,64
THIESSEN	THORNTHWAITE	61,40	159,69	0,66
»	KHARRUFA	54,78	209,70	0,49
»	BLANEY-CRIDDLE	69,24	112,85	0,54
»	HARGREAVES	76,27	79,01	0,61
»	TURC(M.O)	65,41	134,32	0,61
»	JENSEN-HAISE	53,17	223,72	0,39
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	65,27	135,16	0,61

Πίνακας 7.5: Cc, R², Se, Mq, MAPE, %Bias, Eff για τους συνδυασμούς βροχόπτωσης-εξατμισοδιαπνοής μοντέλου Giakoumakis.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	Cc		R ²		Se		Mq		MAPE		%Bias		Eff	
		ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ														
	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ														
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	THORNTHWAITE	0,92	0,81	0,84	0,66	6,82	6,77	1,18	0,75	0,91	0,93	-62,83	-66,14	0,79	0,47
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	KHARRUFA	0,90	0,84	0,81	0,71	7,42	6,67	1,02	0,67	0,93	0,94	-64,08	-67,29	0,75	0,48
»	BLANEY-CRIDDLE	0,84	0,73	0,71	0,53	9,03	7,61	0,90	0,49	0,95	0,98	-64,85	-70,28	0,63	0,33
»	HARGREAVES	0,67	0,77	0,45	0,60	12,04	7,08	0,79	0,56	0,97	0,96	-65,10	-68,81	0,34	0,42
»	TURC(M.O)	0,88	0,87	0,77	0,76	7,89	5,53	1,10	0,82	0,92	0,93	-62,55	-66,82	0,72	0,64
»	JENSEN-HAISE	0,88	0,89	0,78	0,78	7,93	5,62	1,03	0,76	0,94	0,93	-63,82	-67,30	0,71	0,63
»	TURC(Βροχοβαθμιδα)	0,88	0,87	0,77	0,75	7,89	5,58	1,10	0,81	0,92	0,93	-62,60	-66,91	0,72	0,64
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	THORNTHWAITE	0,90	0,93	0,81	0,87	7,00	4,10	1,47	1,28	0,87	0,86	-58,14	-58,00	0,78	0,80
»	KHARRUFA	0,87	0,84	0,76	0,71	8,23	6,47	1,01	0,79	0,94	0,93	-64,00	-65,98	0,69	0,51
»	BLANEY-CRIDDLE	0,79	0,79	0,63	0,63	10,03	7,00	0,88	0,54	0,95	0,97	-65,29	-69,53	0,54	0,43
»	HARGREAVES	0,65	0,77	0,42	0,59	12,35	7,11	0,79	0,53	0,95	0,97	-65,32	-68,60	0,30	0,41
»	TURC(M.O)	0,86	0,90	0,74	0,81	8,32	5,04	1,12	0,89	0,91	0,92	-62,24	-65,40	0,68	0,70
»	JENSEN-HAISE	0,87	0,78	0,75	0,62	8,28	6,96	1,00	0,70	0,94	0,94	-63,97	-66,50	0,69	0,44
»	TURC(Βροχοβαθμιδα)	0,86	0,90	0,74	0,81	8,30	5,07	1,12	0,89	0,91	0,92	-62,27	-65,50	0,69	0,70
THIESSEN	THORNTHWAITE	0,90	0,93	0,81	0,87	6,97	3,68	1,45	1,40	0,87	0,86	-58,58	-54,32	0,78	0,84
»	KHARRUFA	0,87	0,84	0,75	0,70	8,33	6,04	0,99	0,77	0,94	0,94	-63,98	-66,14	0,68	0,58
»	BLANEY-CRIDDLE	0,79	0,79	0,63	0,63	9,95	6,95	0,94	0,66	0,94	0,95	-63,79	-67,99	0,55	0,44
»	HARGREAVES	0,62	0,76	0,38	0,57	12,77	7,22	0,76	0,56	0,96	0,97	-65,21	-67,94	0,25	0,39
»	TURC(M.O)	0,86	0,88	0,73	0,78	8,44	5,26	1,11	0,89	0,92	0,92	-62,23	-65,59	0,67	0,68
»	JENSEN-HAISE	0,87	0,80	0,76	0,64	8,22	6,37	1,00	0,76	0,94	0,94	-63,90	-65,80	0,69	0,53
»	TURC(Βροχοβαθμιδα)	0,86	0,88	0,73	0,78	8,41	5,29	1,11	0,89	0,92	0,92	-62,28	-65,71	0,68	0,67

Πίνακας 7.6: **Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Eff** των συνδυασμών μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής-μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχοπτώσης του μοντέλου **Giakoumakis**.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,79	THORNTHWAITE	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,25	HARGREAVES	THIESSEN
ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,84	THORNTHWAITE	THIESSEN
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,33	BLANEY-CRIDDLE	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ

Από τα διαγράμματα σύγκρισης παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής των Σχημάτων 7.9, 7.11, 7.13, 7.15, όπως και από τα διαγράμματα του Παραρτήματος Γ, βλέπουμε πως το μοντέλο Giakoumakis προσομοιώνει ικανοποιητικά την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας, πράγμα το οποίο το υποδηλώνουν και οι σχετικά υψηλές, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων, τιμές του Model Efficiency (Eff), το οποίο διακυμαίνεται από την τιμή 0,25 έως την τιμή 0,79 για την βελτιστοποίηση. Στην πιστοποίηση οι τιμές κυμαίνονται από 0,33 έως 0,84 και είναι αρκετά καλές για πιστοποίηση μοντέλου.

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης του μοντέλου Giakoumakis, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής παρουσιάζουν μια ικανοποιητική ομοιότητα τόσο στην κλίμακα όσο και στη μορφή. Στην περίοδο όμως Φεβ1989-Ιαν1992 το μοντέλο μηδενίζει σχεδόν την απορροή, πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με την παρατηρημένη σειρά απορροής, αν και αυτή εμπεριέχει πολύ μικρές τιμές απορροής που προσεγγίζουν σε πολλές περιπτώσεις το μηδέν. Ο μηδενισμός της υπολογισμένης απορροής από το μοντέλο για αυτή την περίοδο οφείλεται στην προσπάθεια του μοντέλου μέσα από την βελτιστοποίηση να αποδώσει όσο το δυνατό

μεγαλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση της Model Efficiency (Eff) για όλη την περίοδο βελτιστοποίησης (Οκτ1986-Σεπ1992). Αυτή η εσωτερική “μπαλάντζα” του μοντέλου οδηγεί στον μηδενισμό της υπολογισμένης απορροής.

Στην περίπτωση της πιστοποίησης του μοντέλου Giakoumakis, τα διαγράμματα παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής παρουσιάζουν μια κάπως ικανοποιητική ομοιότητα σε μορφή και κλίμακα για τα πρώτα δύο με τρία το πολύ υδρολογικά χρόνια, ενώ για τα επόμενα μέχρι το τέλος της περιόδου πιστοποίησης η υπολογισμένη απορροή μηδενίζεται.

Από τα διαγράμματα διασποράς των Σχημάτων 7.10, 7.12, 7.14, 7.16, όπως και από τα διαγράμματα του Παραρτήματος Γ, παρατηρούμε ότι η γραμμή παλινδρόμησης παρατηρημένης-υπολογισμένης απορροής βρίσκεται κάτω από την γραμμή 1:1 της παρατηρημένης απορροής, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο του Giakoumakis υποεκτιμά την υπολογισμένη απορροή έναντι της παρατηρημένης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζουν οι δύο γραμμές, τόσο μεγαλύτερη είναι η υποεκτίμηση της υπολογισμένης απορροής. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο στην βελτιστοποίηση όσο και στην πιστοποίηση αν και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 παίρνει μεγάλες σχετικά τιμές, εντούτοις αυτό το γεγονός πρέπει να θεωρείται πλασματικό μιας και οι τιμές της απορροής παίρνουν μηδενικές τιμές.

Από το Πίνακα 7.4 παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές του CN προέρχονται από την εφαρμογή του μοντέλου του Hargreaves σε συνδυασμό με όλες τις μεθόδους μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Αυτό εξηγείται εύκολα από το γεγονός ότι το μοντέλο του Hargreaves δίνει μεγάλες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαθέσιμη εδαφική υγρασία S_n . Σύμφωνα όμως με το μοντέλο του Giakoumakis, για να υπάρξει απορροή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη η διαθέσιμη εδαφική υγρασία S_n από την μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής S_{max} η οποία μειώνεται από την αύξηση του CN. Έτσι, για να υπάρξει απορροή οι τιμές του CN είναι μεγάλες ώστε να μειωθεί η S_{max} και να γίνει μικρότερη από την S_n . Το αποτέλεσμα είναι το μοντέλο του Hargreaves να δίνει τις μεγαλύτερες τιμές για το CN και επομένως και τις μικρότερες τιμές για το S_{max} . Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με το μοντέλο του Thornthwaite, το οποίο υποεκτιμά πιο πολύ από όλα τα μοντέλα την δυνητική εξατμισοδιαπνοή με αποτέλεσμα να δίνει μικρές τιμές για το CN και μεγάλες για το S_{max} . Γενικά πάντως, όλοι οι συνδυασμοί μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής

εξατμισοδιαπνοής δίνουν μεγάλες τιμές για το CN και επομένως και μικρότερες για το Smax, γεγονός που υποδηλώνει το ζεστό κλίμα με λίγες βροχοπτώσεις που έχει η Κύπρος.

Από τον Πίνακα 7.5 συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του Thornthwaite υπερέχει σε όλες τις στατιστικές παραμέτρους από τα άλλα μοντέλα για την περίπτωση της βελτιστοποίησης. Ο συνδυασμός του μοντέλου αυτού με την μέθοδο εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης της βροχοβαθμίδας δίνει τις καλύτερες τιμές του Eff, Cc, R^2 , Se από όλους τους άλλους συνδυασμούς.

Στην περίπτωση της πιστοποίησης, και πάλι το μοντέλο του Thornthwaite υπερέχει από όλα τα άλλα μοντέλα, συνδυαζόμενο όμως αυτή την φορά με την μέθοδο εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης των πολυγώνων Thiessen δίνοντας τις καλύτερες τιμές για το Cc, R^2 , Se, Mq, MAPE, %Bias, Eff. Μάλιστα ο συνδυασμός αυτός δίνει μια πολύ μεγάλη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης Eff για πιστοποίηση μοντέλου, η οποία είναι ίση με 0,84.

Όσον αφορά τις χειρότερες τιμές στατιστικών παραμέτρων που δίνει κάποιο μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, αυτές προέρχονται από το μοντέλο του Hargreaves, για την περίπτωση της βελτιστοποίησης, συνδυαζόμενο από τη μέθοδο εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης των πολυγώνων Thiessen. Όσον αφορά την πιστοποίηση οι χειρότερες τιμές προέρχονται από τον συνδυασμό της μεθόδου της Βροχοβαθμίδας με το μοντέλο των Blaney-Criddle. Γενικά η μέθοδος της Βροχοβαθμίδας δίνει χειρότερες τιμές από τις άλλες μεθόδους βροχόπτωσης, οι οποίες όταν συνοδεύονται από το μοντέλο του Hargreaves παρουσιάζουν τις λιγότερο καλές τιμές σε σχέση με τους συνδυασμούς τους με τα άλλα μοντέλα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Από τον Πίνακα 7.6 παρατηρούμε ότι το μοντέλο Giakoumakis παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του Eff (0,79) χρησιμοποιώντας ως μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής το μοντέλο του Thornthwaite σε συνδυασμό με την μέθοδο της βροχοβαθμίδας στην βελτιστοποίηση ενώ στην πιστοποίηση η μέγιστη τιμή (0,84) προέρχεται από τον συνδυασμό Thornthwaite-πολυγώνων Thiessen. Ο συνδυασμός Hargreaves-πολυγώνων Thiessen παρουσιάζει το ελάχιστο Eff (0,25) στην βελτιστοποίηση ενώ στην πιστοποίηση η μικρότερη τιμή προέρχεται από τον συνδυασμό Βροχοβαθμίδας-Blaney/Criddle.

Ανακεφαλαιώνοντας, πρέπει να τονισθεί ότι το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Giakoumakis κάνει καλή υδρολογική προσομοίωση της απορροής για τα τρία πρώτα υδρολογικά έτη της βελτιστοποίησης. Το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του Thornthwaite είναι το πλέον ενδεικνυόμενο για το μοντέλο Giakoumakis τόσο στην βελτιστοποίηση όσο και στην πιστοποίηση, ενώ ως μέθοδος εκτίμησης μέσης

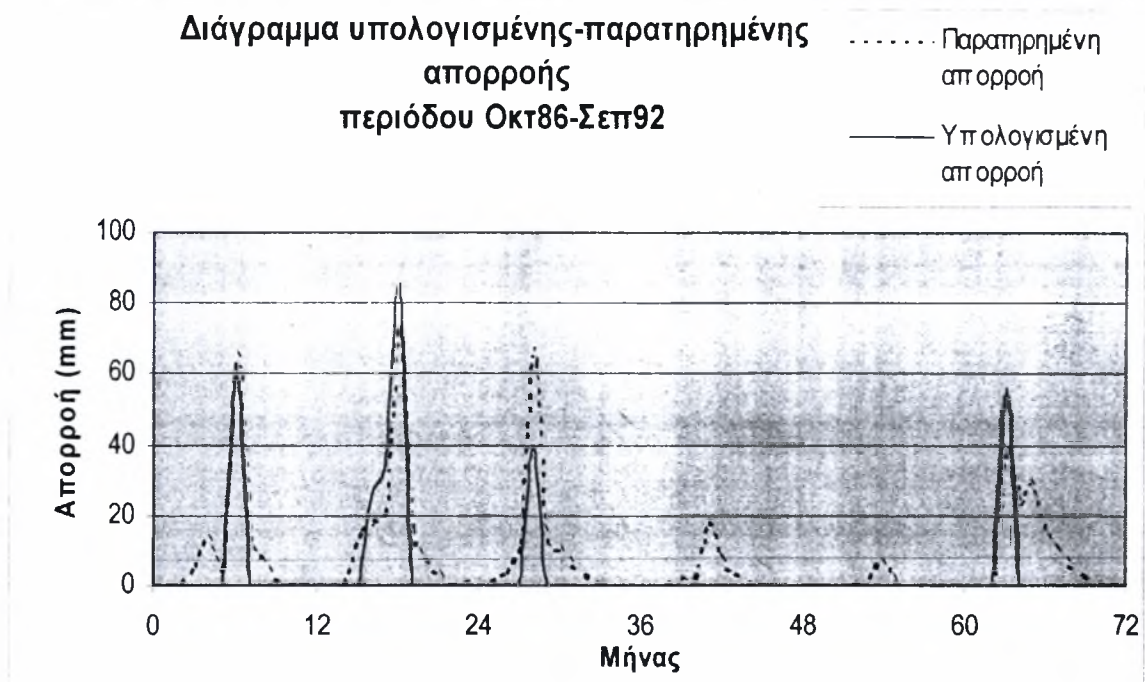
επιφανειακής βροχόπτωσης προτείνεται η μέθοδος της Βροχοβαθμίδας για την βελτιστοποίηση ενώ για την πιστοποίηση η μέθοδος αυτή πρέπει να αποφεύγεται και να χρησιμοποιείται η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen.

7.2.3 Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Alley

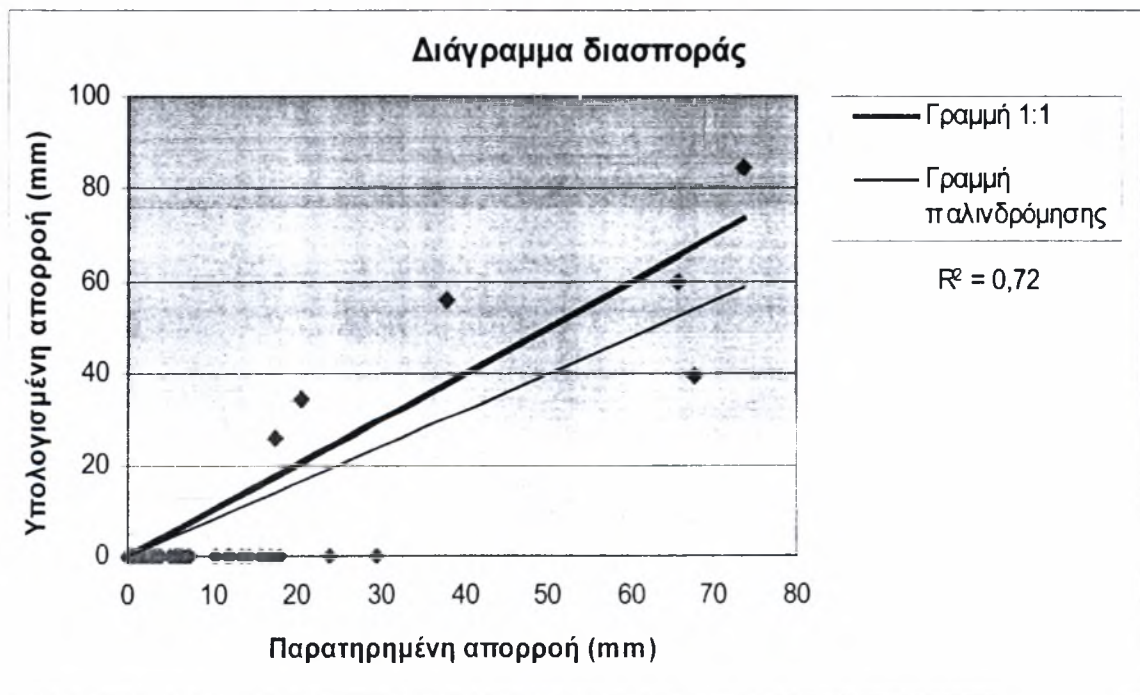
Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του μοντέλου ήταν η Model Efficiency (Eff). Η περίοδος βελτιστοποίησης του μοντέλου ήταν από τον Οκτώβριο του 1986 έως τον Σεπτέμβριο του 1992 (έξη υδρολογικά έτη). Η παράμετρος K (χωρητικότητα δεξαμενής) του μοντέλου υπολογίστηκε έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η Model Efficiency με την μέθοδο SIMPLEX. Αφού έγινε ο υπολογισμός των τιμών της παραμέτρου ακολούθησε η πιστοποίηση του μοντέλου για την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1992 έως τον Σεπτέμβριο του 1998 (έξη υδρολογικά έτη). Η βασική στατιστική παράμετρος, από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιοπιστία της πιστοποίησης, ήταν η Model Efficiency (Eff). Παρακάτω ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής που προέρχονται από την εφαρμογή του μοντέλου με τον συνδυασμό μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που δίνει την καλύτερη και χειρότερη υδρολογική προσομοίωση (maxEff και minEff αντίστοιχα) της απορροής της λεκάνης της Γερμασόγειας, και για την βελτιστοποίηση και για την πιστοποίηση του μοντέλου, συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα ενδεικτικά διαγράμματα διασποράς (Σχήματα 7.17-7.24). Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα διαγράμματα υπολογισμένης-παρατηρημένης απορροής του μοντέλου του Alley παρουσιάζονται στο παράρτημα Δ της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως και τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς (Σχήματα Δ.1-Δ.84).

Στον Πίνακα 7.7 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμέτρου K του μοντέλου που βελτιστοποιήθηκε ενώ στον Πίνακα 7.8 οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης Eff και των στατιστικών παραμέτρων $Cc, R^2, Se, Mg, MAPE, \%Bias$ τόσο για την βελτιστοποίηση όσο και για την πιστοποίηση του μοντέλου.

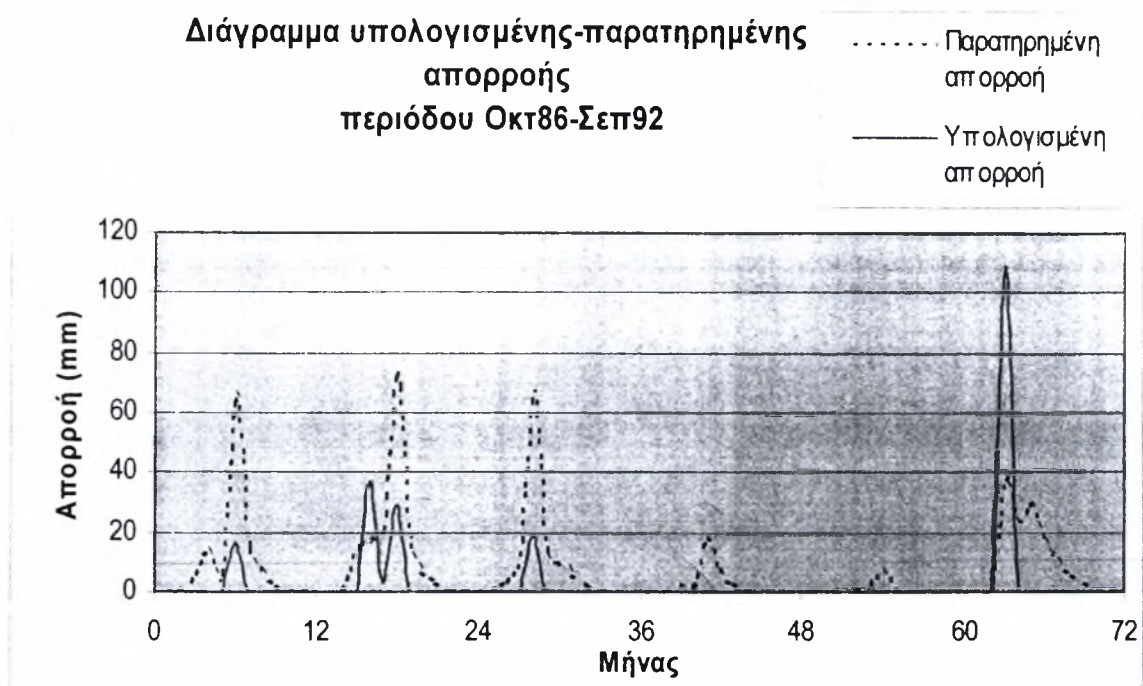
Στον Πίνακα 7.9 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, αντίστοιχα, της αντικειμενικής συνάρτησης Eff, καθώς και ο αντίστοιχος συνδυασμός μεθόδου εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.



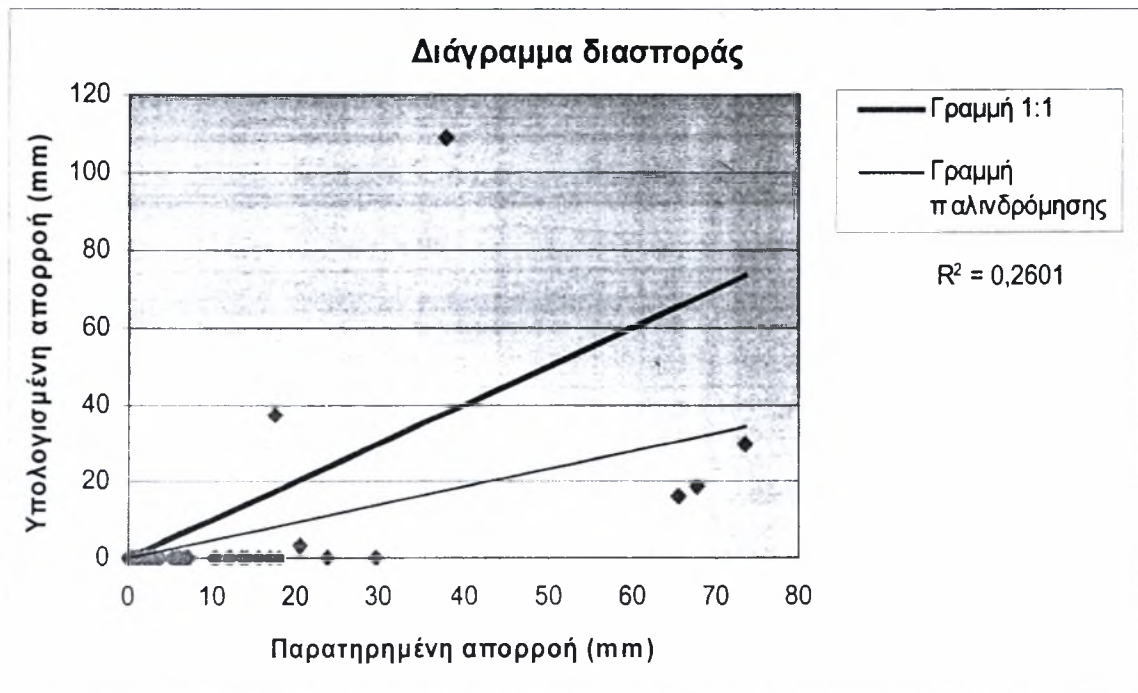
Σχήμα 7.17: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Blanney/Criddle (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\max Eff=0,66$ -Βελτιστοποίηση).



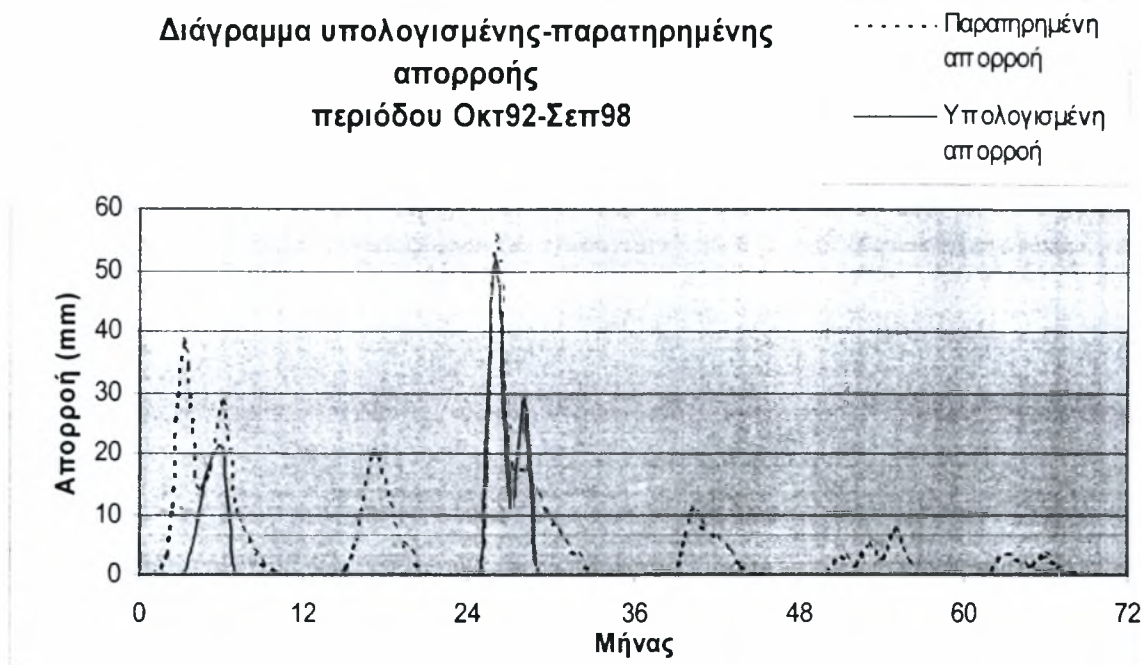
Σχήμα 7.18: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Βροχοβαθμίδας-Blanney Criddle (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\max Eff=0,66$ -Βελτιστοποίηση).



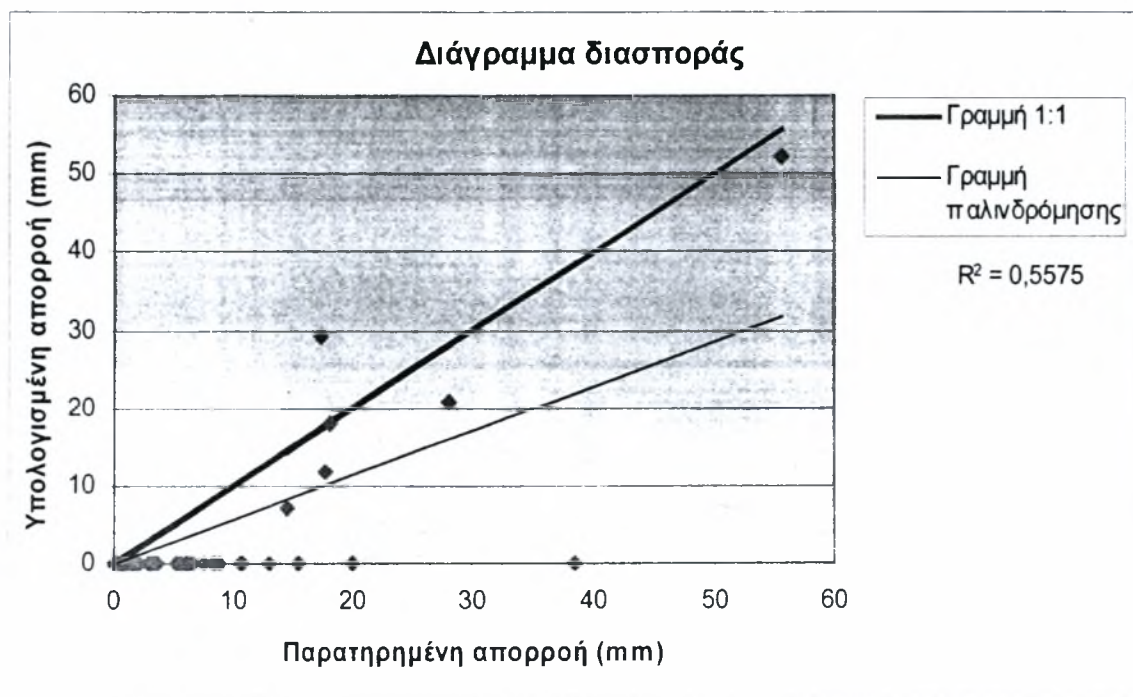
Σχήμα 7.19: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Thiessen-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\min Eff = -0,04$ /Βελτιστοποίηση).



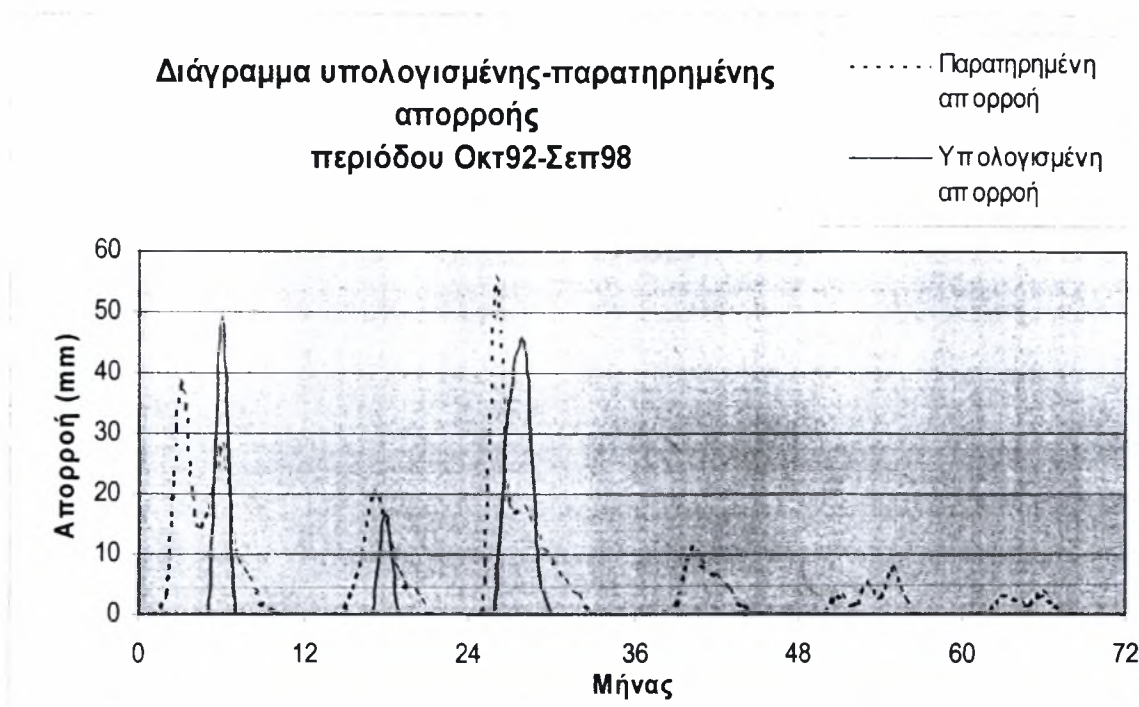
Σχήμα 7.20: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Thiessen-Hargreaves (μέθοδος εκτίμησης P και ET_p αντίστοιχα), ($\min Eff = -0,04$ /Βελτιστοποίηση).



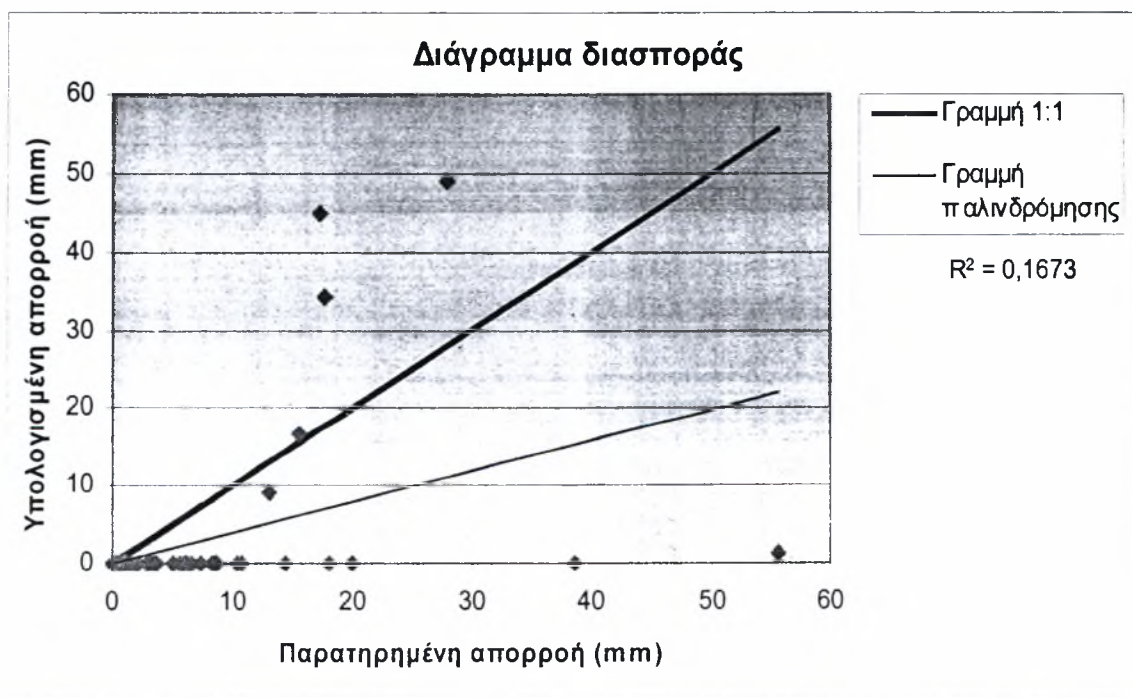
Σχήμα 7.21: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Thiessen-Turc(M.O) (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0,45$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.22: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Thiessen-Turc(M.O) (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\max Eff=0,45$ -Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.23: Σύγκριση παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Μέσος όρος-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\min Eff = -0,24$ /Πιστοποίηση).



Σχήμα 7.24: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής, με το μοντέλο Alley, του συνδυασμού Μέσος όρος-Thornthwaite (μέθοδος εκτίμησης P και ET_P αντίστοιχα), ($\min Eff = -0,24$ /Πιστοποίηση).

Πίνακας 7.7: Χωρητικότητα δεξαμενής K για τους συνδυασμούς μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης-μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του μοντέλου **Alley**.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	K (mm)
<i>ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ</i>	THORNTHWAITE	~
»	KHARRUFA	300,34
»	BLANEY-CRIDDLE	213,68
»	HARGREAVES	173,43
»	TURC(M.O)	286,02
»	JENSEN-HAISE	292,66
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	287,13
<i>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</i>	THORNTHWAITE	379,62
»	KHARRUFA	304,10
»	BLANEY-CRIDDLE	202,20
»	HARGREAVES	167,28
»	TURC(M.O)	287,60
»	JENSEN-HAISE	294,59
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	288,50
<i>THIESSEN</i>	THORNTHWAITE	362,77
»	KHARRUFA	274,77
»	BLANEY-CRIDDLE	193,16
»	HARGREAVES	158,68
»	TURC(M.O)	261,73
»	JENSEN-HAISE	267,90
»	TURC(Βροχοβαθμίδα)	263,00

Πίνακας 7.8: Cc, R², Se, Mq, MAPE, %Bias, Eff για τους συνδυασμούς βροχοπτώσεως-εξατμισοδιαπνοής μοντέλου Alley.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΟΝΤΕΛΟ	Cc		R ²		Se		Mq		MAPE		%Bias		Eff	
		ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ	ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ														
	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ														
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΤΗΘΡΝΤΗΩΑΙΤΕ	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	ΚΗΑΡΡΥΦΑ	0,87	0,60	0,77	0,35	11,12	8,32	1,15	0,58	0,97	0,95	-61,58	-67,24	0,44	0,19
	BLANEY-CRIDDLE	0,86	0,64	0,75	0,42	8,61	8,48	0,95	0,41	0,95	0,99	-64,70	-70,78	0,66	0,16
»	HARGREAVES	0,62	0,64	0,39	0,42	13,06	8,66	0,77	0,43	0,99	0,99	-65,62	-70,65	0,22	0,13
	TURC(M.O)	0,90	0,75	0,80	0,56	9,17	7,62	1,12	0,52	0,95	0,96	-62,88	-68,93	0,62	0,32
»	JENSEN-HAISE	0,89	0,66	0,79	0,44	9,37	7,94	1,12	0,59	0,96	0,95	-62,32	-67,32	0,60	0,27
	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,90	0,74	0,80	0,55	9,26	7,69	1,11	0,51	0,95	0,96	-62,94	-69,11	0,61	0,31
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΗΘΡΝΤΗΩΑΙΤΕ	0,86	0,41	0,74	0,17	14,53	10,30	1,41	0,67	0,98	0,98	-55,79	-63,91	0,04	-0,24
»	ΚΗΑΡΡΥΦΑ	0,79	0,37	0,62	0,14	12,29	9,80	1,05	0,49	0,99	0,97	-62,55	-67,64	0,31	-0,12
	BLANEY-CRIDDLE	0,78	0,68	0,61	0,46	11,06	8,12	0,96	0,39	0,97	0,98	-64,53	-70,78	0,44	0,23
»	HARGREAVES	0,57	0,64	0,32	0,42	14,50	8,37	0,78	0,36	0,98	0,99	-65,89	-71,08	0,04	0,18
	TURC(M.O)	0,82	0,39	0,67	0,15	10,54	9,52	1,00	0,45	0,97	0,96	-63,74	-68,45	0,49	-0,06
»	JENSEN-HAISE	0,81	0,38	0,65	0,14	10,71	9,62	1,01	0,50	0,98	0,97	-63,22	-67,20	0,48	-0,08
	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,82	0,39	0,68	0,15	10,34	9,55	1,00	0,44	0,96	0,96	-63,81	-68,62	0,51	-0,06
THIESSEN	ΤΗΘΡΝΤΗΩΑΙΤΕ	0,87	0,65	0,76	0,42	13,51	8,58	1,39	0,78	0,97	0,98	-56,61	-63,95	0,17	0,14
»	ΚΗΑΡΡΥΦΑ	0,84	0,68	0,71	0,46	10,90	7,61	1,12	0,75	0,97	0,96	-61,65	-64,71	0,46	0,32
	BLANEY-CRIDDLE	0,77	0,65	0,59	0,42	10,93	9,04	0,89	0,49	0,96	0,99	-64,80	-70,12	0,45	0,05
»	HARGREAVES	0,51	0,64	0,26	0,42	15,07	9,33	0,73	0,48	1,00	0,99	-65,89	-70,36	-0,04	-0,01
	TURC(M.O)	0,86	0,76	0,74	0,58	9,27	6,85	1,08	0,70	0,95	0,94	-62,97	-66,48	0,61	0,45
»	JENSEN-HAISE	0,87	0,71	0,75	0,51	9,09	7,26	1,10	0,75	0,95	0,95	-62,33	-64,74	0,62	0,39
	TURC(Βροχοβαθμίδα)	0,87	0,76	0,76	0,58	9,04	6,88	1,08	0,69	0,94	0,94	-63,06	-66,70	0,63	0,45

Πίνακας 7.9: **Μέγιστες και ελάχιστες τιμές Eff** των συνδυασμών μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής-μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης του μοντέλου **Alley**.

ΜΟΝΤΕΛΟ ALLEY	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,66	BLANEY-CRIDDLE	ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	-0,04	HARGREAVES	THIESSEN
ΜΟΝΤΕΛΟ ALLEY	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	Eff	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΕΘΟΔΟΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	0,45	TURC(M.O)	THIESSEN
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	-0,24	THORNTHWAITE	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ

Από τα διαγράμματα σύγκρισης παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής των Σχημάτων 7.17, 7.19, 7.21, 7.23, όπως και από τα διαγράμματα του Παραρτήματος Δ, βλέπουμε πως το μοντέλο Alley δεν προσομοιώνει ικανοποιητικά την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας, πράγμα το οποίο το υποδηλώνουν και οι σχετικά χαμηλές, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων, τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης του Model Efficiency (Eff), όπως και η μορφή και η κλίμακα των καμπυλών της παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής. Παρατηρούμε πως υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις μηνιαίες τιμές της μετρημένης και της υπολογισμένης απορροής, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις το μοντέλο μηδενίζει την απορροή χωρίς να συμβαίνει το ίδιο με την παρατηρημένη απορροή. Αυτό δείχνει ότι δεν αντιπροσωπεύει καθόλου καλά την πραγματικότητα για την λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο περιέχει μόνο μία παράμετρο βελτιστοποίησης και επίσης δεν υπολογίζει βασική απορροή (υπόγεια ροή) αλλά μόνο την άμεση απορροή (επιφανειακή).

Στον Πίνακα 7.7 βλέπουμε πως η χωρητικότητα της δεξαμενής παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές όταν εφαρμόζεται το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του

Hargreaves, το οποίο υπερεκτιμά πάρα πολύ την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, και τις μικρότερες τιμές όταν εφαρμόζεται το μοντέλο του Thornthwaite, το οποίο υποεκτιμά πιο πολύ από όλα τα μοντέλα την δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η παραπάνω διαπίστωση βρίσκει την ίδια εξήγηση με την εξήγηση που δόθηκε για το μοντέλο του Giakoumakis (εδάφιο 7.2.2), στο οποίο παρατηρείται ακριβώς το ίδιο.

Στον Πίνακα 7.8 φαίνεται πως οι τιμές του C_c και του R^2 είναι υψηλές, πράγμα που υποδηλώνει ότι η μορφή μεταξύ των δύο καμπυλών παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής είναι περίπου όμοια, ενώ μόνο το μοντέλο του Hargreaves αποτελεί εξαίρεση παρουσιάζοντας πολύ χαμηλές τιμές. Όπως όμως και στο μοντέλο του Giakoumakis, έτσι και στο μοντέλο του Alley, αυτή η ομοιότητα είναι πλασματική μιας και οφείλεται στο μηδενισμό σχεδόν όλων των τιμών της απορροής.

Όσον αφορά τις παραμέτρους Se και Mq , αυτές παίρνουν χειρότερες τιμές από τις αντίστοιχες τιμές που δίνουν τα άλλα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ και πάλι το μοντέλο του Hargreaves παρουσιάζει τις ελάχιστες. Επειδή αυτές οι στατιστικές παράμετροι δείχνουν πόσο καλή είναι η κλίμακα μεταξύ δύο σχημάτων, διαπιστώνουμε ότι το μοντέλο του Alley, εκτός από την μορφή, αποδίδει και χαμηλή κλίμακα μεταξύ των δύο καμπυλών παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής.

Η στατιστική παράμετρος %Bias παίρνει αρνητικές τιμές, γεγονός που καταδεικνύει το ότι η εκτιμημένη απορροή υποεκτιμάται, πράγμα που φαίνεται και από τα διαγράμματα της σύγκρισης παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής όπως και από τα αντίστοιχα διαγράμματα διασποράς, στα οποία η γραμμή παλινδρόμησης βρίσκεται κάτω από την γραμμή 1:1 (Σχήματα 7.17-7.24, Δ.1-Δ.84 Παραρτήματος Δ).

Από τους Πίνακες 7.8 και 7.9 αποδεικνύεται το γεγονός ότι το μοντέλο του Alley δεν αποδίδει ακριβώς την πραγματικότητα, παρατηρώντας τις χαμηλές τιμές της βασικής στατιστικής παραμέτρου και αντικειμενικής συνάρτησης Model Efficiency (Eff), οι οποίες είναι σε μερικές περιπτώσεις και αρνητικές ακόμα και στην περίπτωση της βελτιστοποίησης (συνδυασμός πολυγώνων Thiessen-Hargreaves). Μάλιστα στην περίπτωση του συνδυασμού Βροχοβαθμίδα-Thornthwaite το μοντέλο δεν υπολογίζει καθόλου απορροή και την μηδενίζει παντού. Αν είναι να προσεχθεί ένας συνδυασμός με μια ικανοποιητική τιμή του Eff (0,66) στην βελτιστοποίηση, αυτός είναι ο συνδυασμός βροχοβαθμίδα/Blaney-Criddle, ο οποίος όμως στην πιστοποίηση παρουσιάζει μια πολύ μικρή τιμή του Eff (0,16). Στην πιστοποίηση γενικά οι τιμές του Eff είναι κάκιστες και σε

πολλές περιπτώσεις αρνητικές, οι οποίες φτάνουν έως και την τιμή $-0,24$ (συνδυασμός μέσος όρος-Thornthwaite). Μόνο το μοντέλο του Turc σε συνδυασμό με την μέθοδο των πολυγώνων Thiessen παρέχει μια ικανοποιητική κάπως τιμή του Eff (0,45).

Συμπερασματικά, το μοντέλο του Alley δεν κάνει καλή υδρολογική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας και δεν μπορεί σίγουρα να εφαρμοστεί σε αυτήν την συγκεκριμένη λεκάνη. Αυτό ίσως να οφείλεται στον μη υπολογισμό της βασικής απορροής (υπόγεια ροή) ή στην χρησιμοποίηση από το μοντέλο μιας μόνο παραμέτρου βελτιστοποίησης ή και στο ότι για να εφαρμοστεί σε μια λεκάνη απορροής θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παραδοχές της “απλής” λεκάνης απορροής που αναπτύχθηκαν στο εδάφιο 3.2 ενώ η λεκάνη της Γερμασόγειας δεν ικανοποιεί αυτές.

Κεφάλαιο 8^ο: Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η υδρολογική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου, η οποία πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου του Abulohom et al (2001), του Giakoumakis et al (1991) και του Thornthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984). Ο σκοπός αυτής της υδρολογικής προσομοίωσης ήταν να επιλεγεί το καταλληλότερο από τα παραπάνω μοντέλα για την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, μαζί φυσικά και με τον αποδοτικότερο συνδυασμό, σε σύνολο είκοσι ενός για κάθε μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, μεθόδου εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και μοντέλου εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Αφού συντάχθηκαν τα τρία μοντέλα, ακολούθησε η βελτιστοποίηση (calibration) των παραμέτρων των μοντέλων και ο υπολογισμός των δεδομένων εξόδων (output) του καθενός για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο) 1986-1992. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση (validation) των μοντέλων για την περίοδο των υδρολογικών ετών (Οκτώβριο έως Σεπτέμβριο) 1992-1998, έτσι ώστε να φανεί αν τα μοντέλα αποδίδουν την πραγματικότητα στη λεκάνη απορροής για μια άλλη χρονική περίοδο, χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που είχαν υπολογιστεί κατά την βελτιστοποίηση.

Τα συμπεράσματα στα οποία οδήγησε η παραπάνω διαδικασία ήταν τα παρακάτω:

- 1) Η αποδοτικότητα της υδρολογικής προσομοίωσης εξαρτάται από: τον αριθμό των παραμέτρων των μοντέλων που υφίστανται βελτιστοποίηση, τον υπολογισμό ή μη υπολογισμό της βασικής ροής (υπόγεια ροή) από το μοντέλο, την ισχύ των παραδοχών μιας “απλής” υδρολογικής λεκάνης στην συγκεκριμένη λεκάνη, την αξιοπιστία των δεδομένων και την επιλογή κατάλληλης μεθόδου εκτίμησης των δεδομένων εισόδου των μοντέλων,
- 2) Η μεγαλύτερη ομοιότητα μορφής και κλίμακας ανάμεσα στα διαγράμματα της παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής προέρχεται από την εφαρμογή του μοντέλου του Abulohom, γεγονός που αποδεικνύεται και από τις υψηλές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της Model Efficiency (Eff) που δίνει το συγκεκριμένο μοντέλο,



- 3) Η μεγαλύτερη τιμή της Model Efficiency είναι 0,86 και προέρχεται από την εφαρμογή του μοντέλου του Abulohom και του συνδυασμού Μέσος όρος-Hargreaves,
- 4) Το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του Hargreaves είναι το πλέον ενδεικνυόμενο για το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom τόσο στην βελτιστοποίηση όσο και στην πιστοποίηση, ενώ ως μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης προτείνονται και οι τρεις μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και για την βελτιστοποίηση και για την πιστοποίηση,
- 5) Τα μοντέλα του Giakoumakis και του Alley προσομοιώνουν λιγότερα καλά την απορροή από το μοντέλο του Abulohom γιατί χρησιμοποιούν λιγότερες παραμέτρους βελτιστοποίησης και δεν υπολογίζουν την βασική απορροή (υπόγεια ροή),
- 6) Χαρακτηριστικά της προσομοίωσης του μοντέλου του Alley κατά πρώτο λόγο και του μοντέλου του Giakoumakis κατά δεύτερο είναι ο μηδενισμός της απορροής για ένα χρονικό διάστημα, πράγμα που δεν συμφωνεί με την παρατηρημένη σειρά απορροής της λεκάνης,
- 7) Τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, άλλα λιγότερο και άλλα περισσότερο, υποεκτιμούν την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας έναντι της παρατηρημένης απορροής αυτής,
- 8) Το μοντέλο εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής του Thornthwaite είναι το πλέον ενδεικνυόμενο για το μοντέλο Giakoumakis τόσο στην βελτιστοποίηση όσο και στην πιστοποίηση, ενώ ως μέθοδος εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης προτείνεται η μέθοδος της βροχοβαθμίδας για την βελτιστοποίηση ενώ για την πιστοποίηση η μέθοδος αυτή πρέπει να αποφεύγεται και να χρησιμοποιείται η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen,
- 9) Από το 4^ο και 8^ο συμπέρασμα, παρατηρούμε ότι το μοντέλο του Abulohom προσομοιώνει καλύτερα την απορροή χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Hargreaves το οποίο πρέπει να τονισθεί ότι υπερεκτιμά πιο πολύ από όλα τα άλλα μοντέλα την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε αντίθεση με το μοντέλο του Thornthwaite που την υποεκτιμά και το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο του Giakoumakis για να κάνει αποδοτικότερη προσομοίωση. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο του Abulohom λειτουργεί καλύτερα σε ζεστά και ξηρά κλίματα με μεγάλη εξατμισοδιαπνοή και επομένως θερμοκρασία και ακτινοβολία ενώ το μοντέλο του Giakoumakis σε

κλίματα με μικρότερες τιμές εξατμισοδιαπνοής. Έτσι λοιπόν, αν λάβουμε υπόψη μας ότι η Κύπρος έχει ένα από τα ζεστότερα κλίματα της Μεσογείου με μεγάλες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και επομένως και εξατμισοδιαπνοής, τότε γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι το μοντέλο του Abulohom ταιριάζει πιο πολύ για να προσομοιώσει την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας Κύπρου σε σχέση με το μοντέλο του Giakoumakis,

- 10) Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι για την όσο το δυνατόν καλύτερη και σωστότερη υδρολογική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου προτείνεται ανεπιφύλακτα το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Abulohom, στο οποίο τα δεδομένα εισόδου της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μπορούν να υπολογιστούν από όλες τις μεθόδους και τα μοντέλα αντίστοιχα αλλά κατά κύριο λόγο από την μέθοδο του αριθμητικού μέσου όρου και το μοντέλο του Hargreaves. Η υπεροχή του μοντέλου Abulohom έναντι των άλλων μοντέλων στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης Eff, των στατιστικών παραμέτρων και στην ομοιότητα (μορφής και κλίμακας) των καμπυλών παρατηρημένης και υπολογισμένης απορροής καθώς και το γεγονός ότι χρησιμοποιεί όλες τις μεθόδους εκτίμησης μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και τα μοντέλα εκτίμησης δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με την ίδια σχεδόν μεγάλη αποδοτικότητα, αποτελούν τους λόγους προτίμησης του συγκεκριμένου μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για την υδρολογική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας Κύπρου.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abulohom, M.S., Shah, S.M.S., Ghumman, A.R., (2001). Development of a Rainfall-Runoff Model, its Calibration and Validation.
- Alley, W.M., (1984). On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resour. Res.*, 20, 1137-1149.
- Blaney, H. F., and W. D. Criddle (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigated data, SCS, TP-96, USDA.
- Budyko, M. I. (1948). Evapotranspiration under Natural Conditions, GIMIZ, Leningrad.
- Davidson, J.M., Stone, L.R., Nielsen, D.R., and La Rue, M.E., (1969). Field measurement and use of soil-water properties. *Water Resour. Res.* 5, 1312-1321.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., (1977). Crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Pap.*, 156.
- Giakoumakis S., Tsakiris G. and Efremides D., (1991). On the Rainfall-runoff Modeling in a Mediterranean Island Environment. *Advances in Water Resources Technology*, Balkema, Rotterdam.
- Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature, *Appl. Eng. Agric.*, 1(2) 96-99.
- Hydrologic Engineering Center (HEC), (2000). *Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS. User's Manual*, Version 1.0, 214 p.
- Jensen, M.E., and Haise, H.R, (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drainage Div. ASCE* 89, 15-41.
- Kharrufa NS.(1985). Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beitrag zur Hydrologie Sonderheft* 5.1: 39-47.
- Monteith, J.L., (1965). Evaporation and environment. *Symp.Soc. Exp. Biol.* 19,205-234.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part-1 A discussion of principles, *J. Hydrol.* **10**(3), 282-290.
- Penman, H. L., (1948). Natural Evaporation from open water, bare soil, and grass, *Royal Society of London Proceedings, Series A*, 193, 120-145.
- Soil Conservation Service (SCS), (1972). *National Engineering Handbook*, Washington D.C., Section 4, Hydrology.
- Thornthwaite, C. W and Mather, J. R. (1955). The water balance, *Publication in Climatology. Lab. Climatol. Dresel Inst. Technol.* 8(8), 1-104.
- Thornthwaite, C. W and Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publication in Climatology*, Vol. 10, no 3, Centerton, N.J., Dresel Inst.
- Thornthwaite, C. W, (1948). An approach toward a radiation classification of climate. *Geogr.Rev.* 38(1), 55-94.

- Turc, L., (1954). Le bilan d'eau des sols: relations entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement, Ann. Agron., 5, 491-595.
- Vandewiele, G.L., Xu, C-Y. and Win, N-L (1998). Monthly water balance for 55 basins in 10 Countries. Hydrological Sciences Journal, 43(5), 687-699.
- Xu, C.Y. and V.P. Singh (1998). A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. Water Resources Management, 12(1), 20-50.
- Xu, C.Y. and V.P. Singh (1999). Estimation of Parameters of a Conceptual Water Balance Model for Ungauged Catchments. Water Resources Management, 13, 353-368.
- Xu, C.Y. and V.P. Singh (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. Hydrol. Process., 15, 305-319.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, (1999). Τεχνική Υδρολογία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων (3^η Έκδοση).
- Τσακίρης, Γ., (1995). Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία.
- Υδατική Ανάπτυξη στην Κύπρο, (1996). Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων.
- Φράγματα της Κύπρου, (2001). Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων.

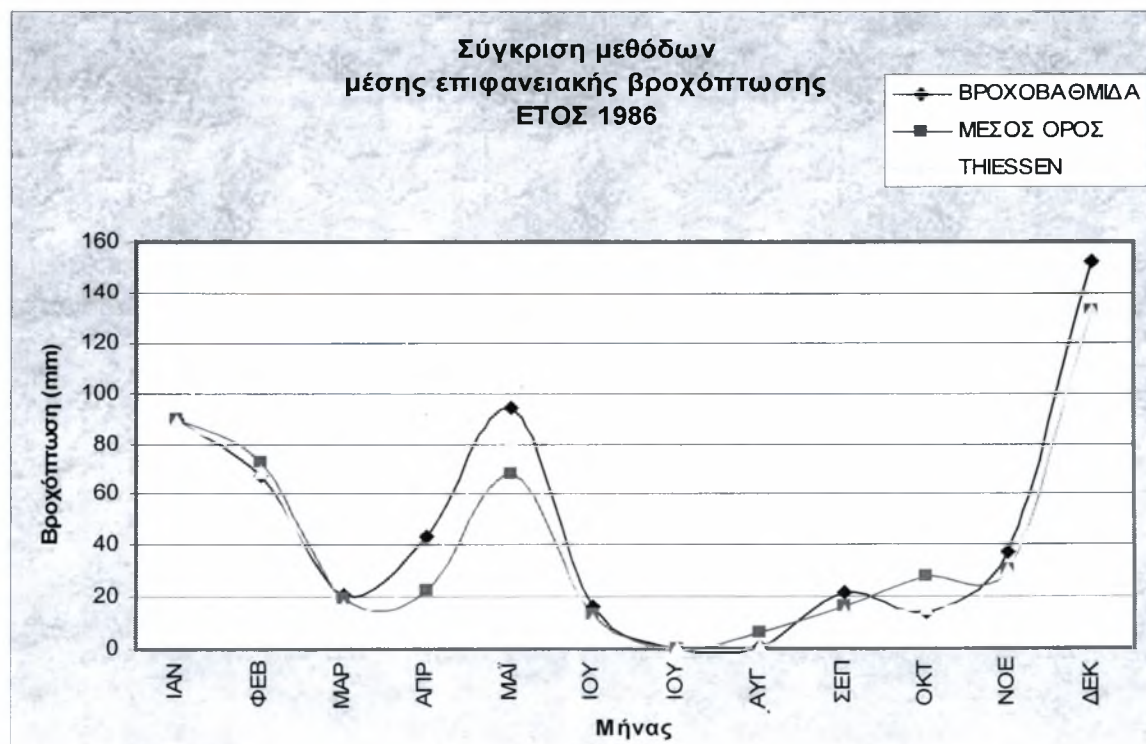
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΣΗΣ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ**

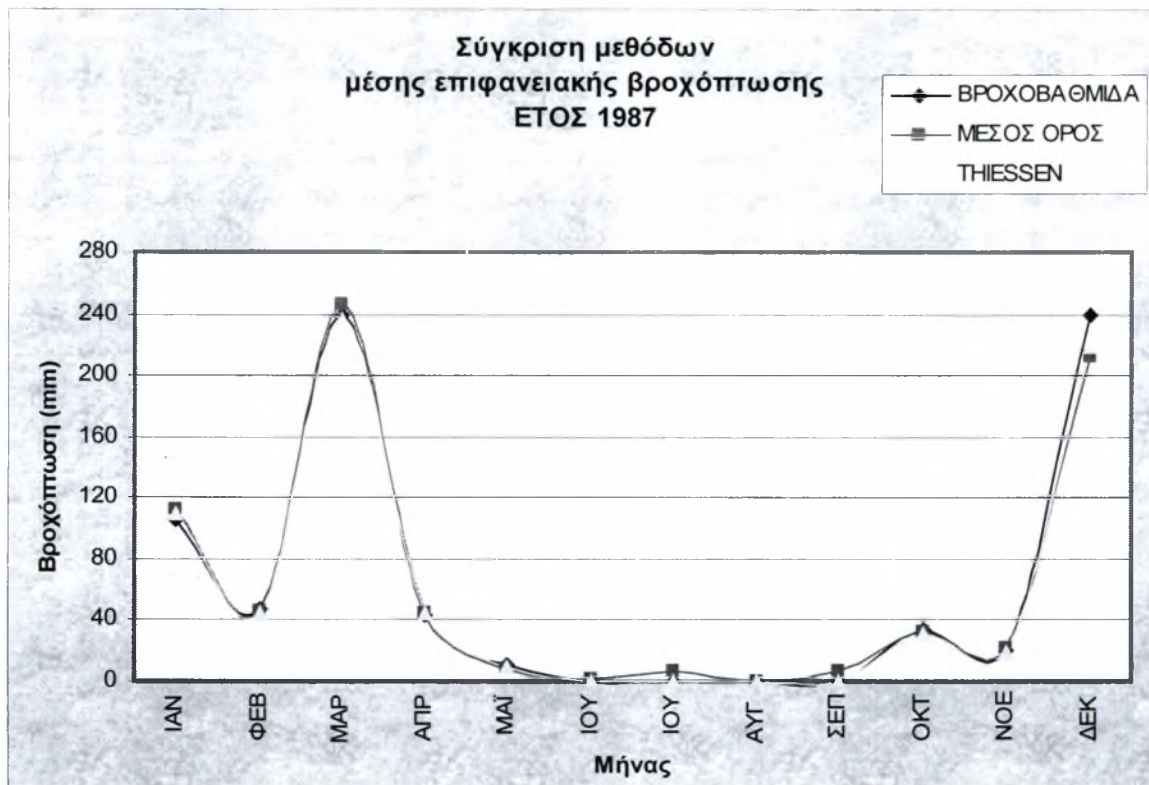
A.1 Σύγκριση μεθόδων μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης



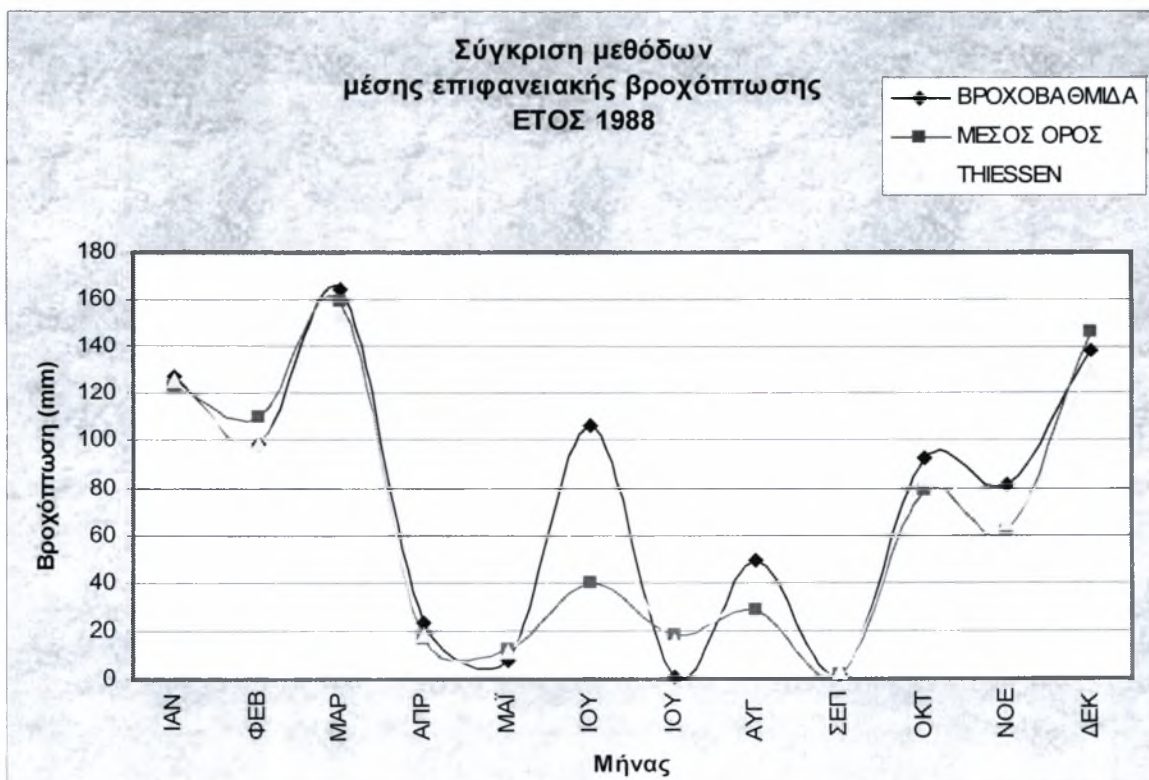
Σχήμα Α.1



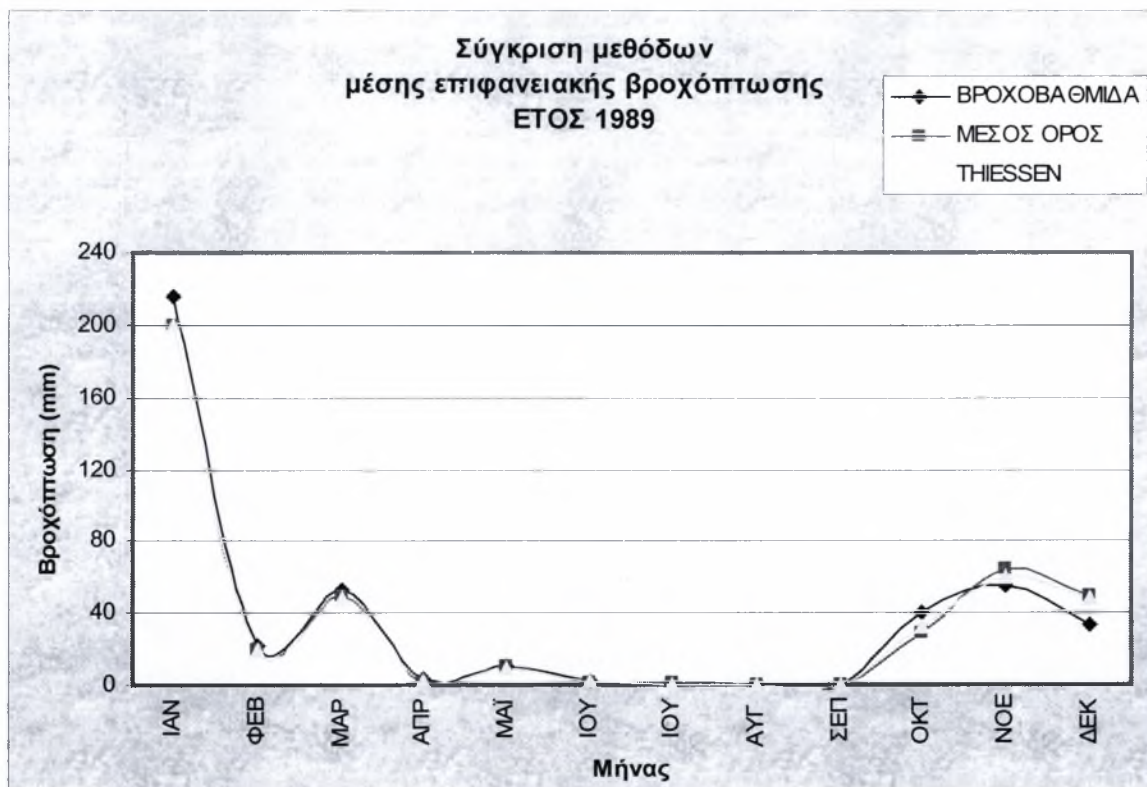
Σχήμα Α.2



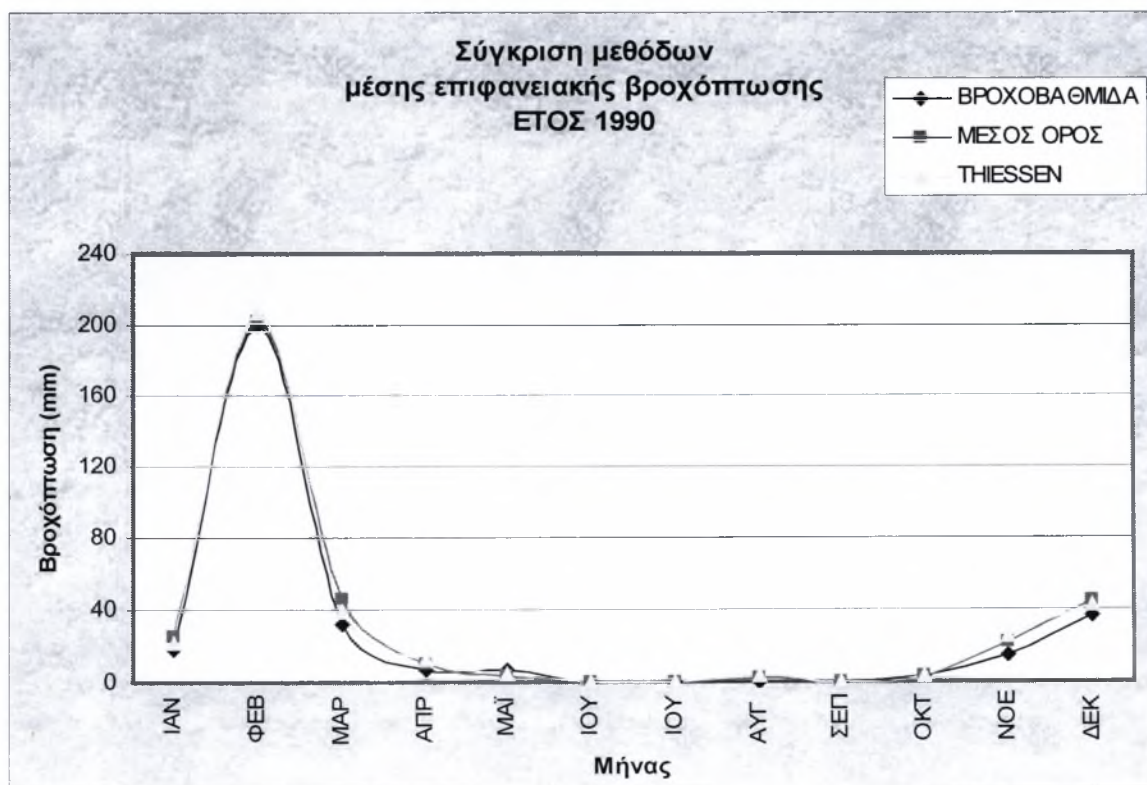
Σχήμα Α.3



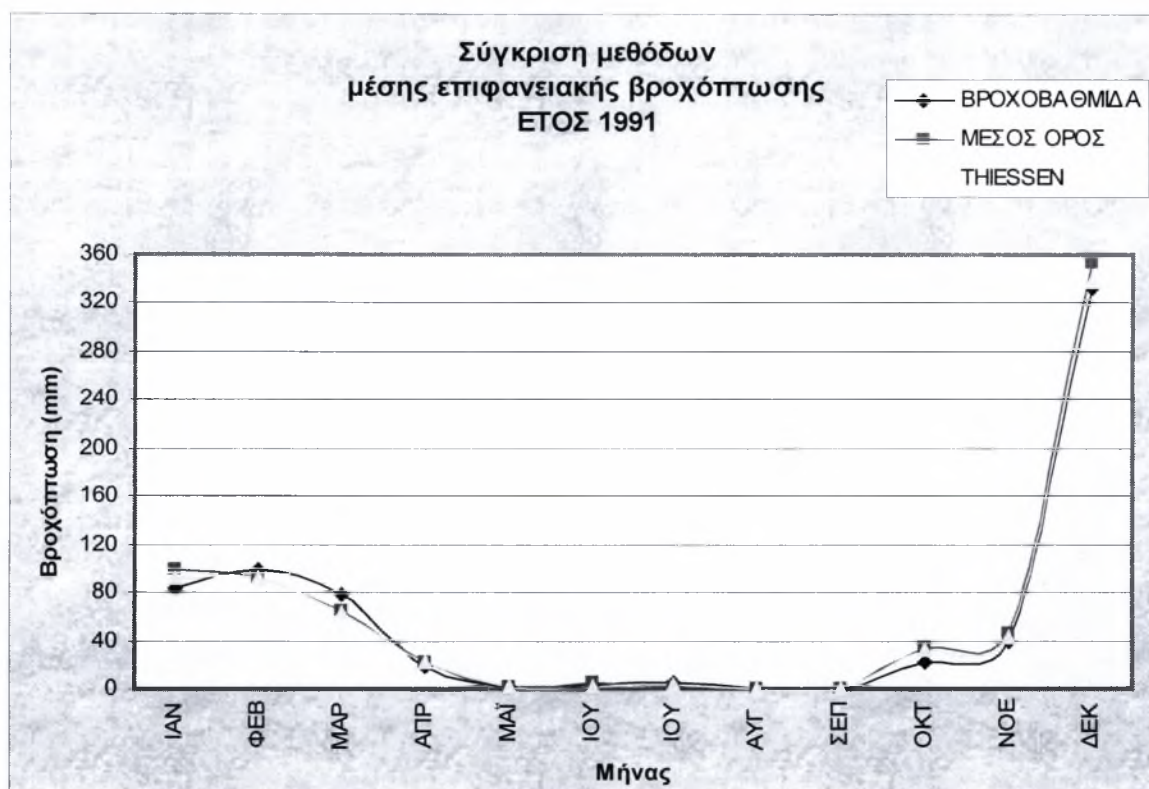
Σχήμα Α.4



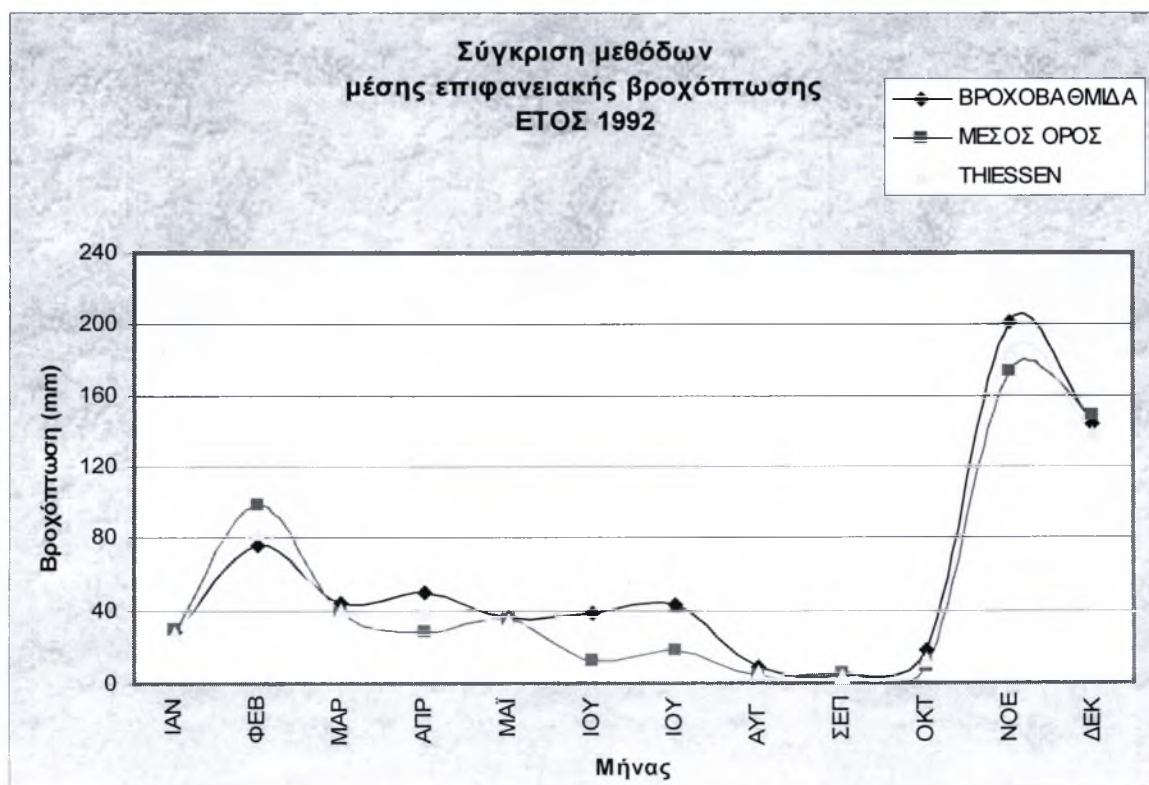
Σχήμα Α.5



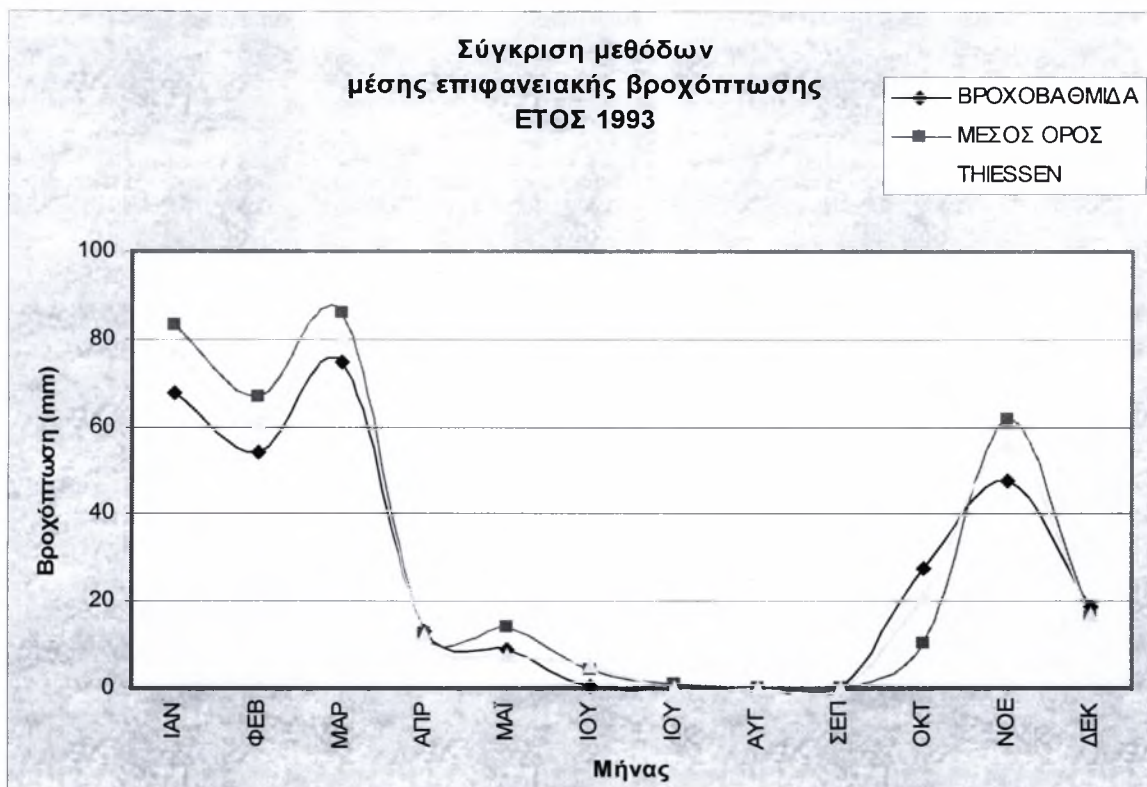
Σχήμα Α.6



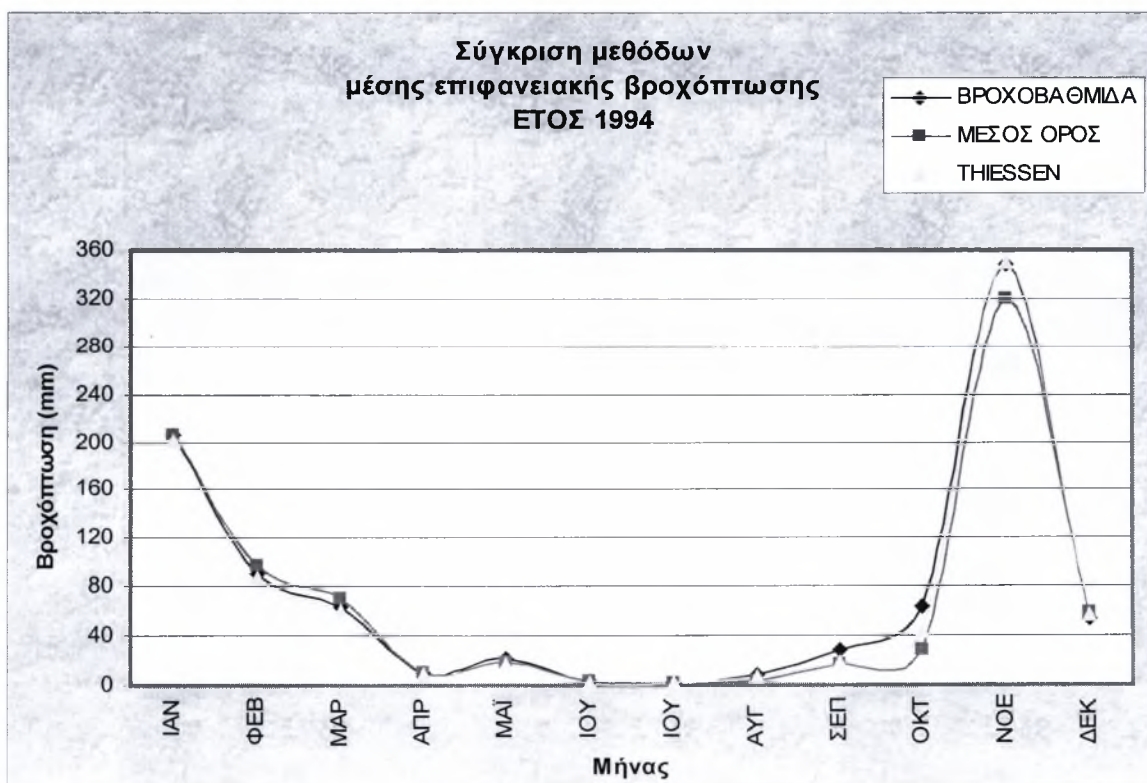
Σχήμα Α.7



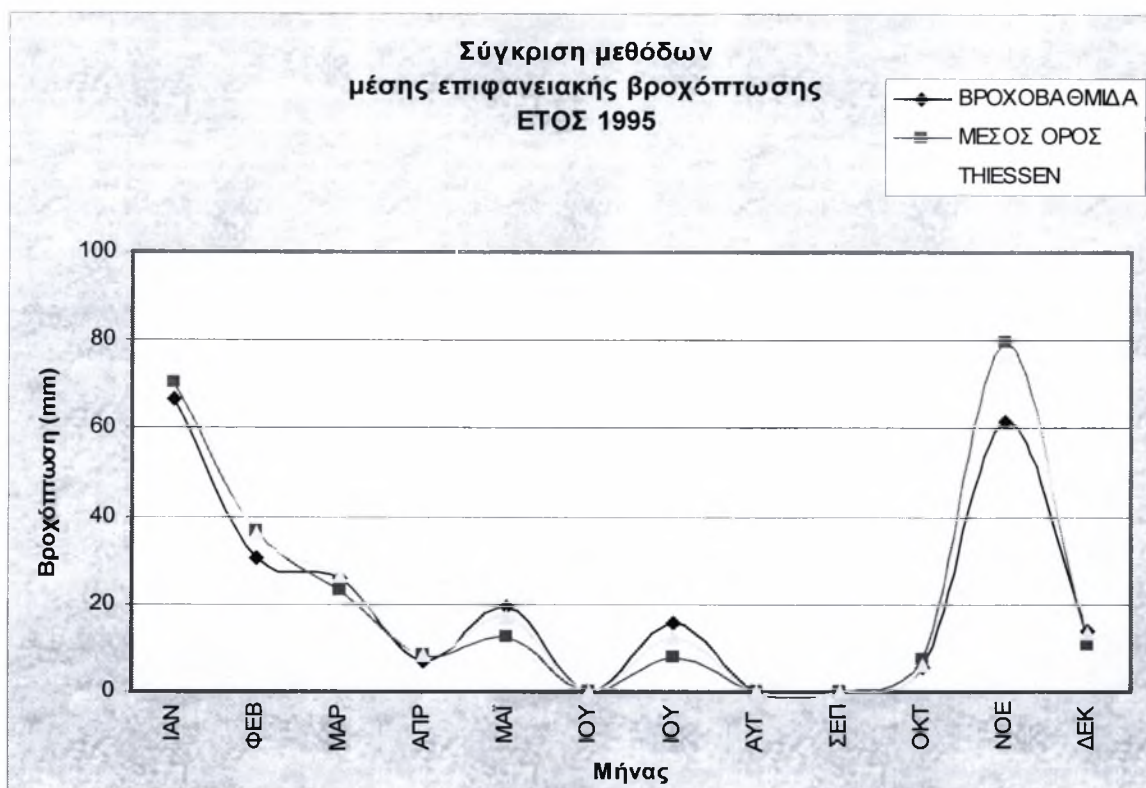
Σχήμα Α.8



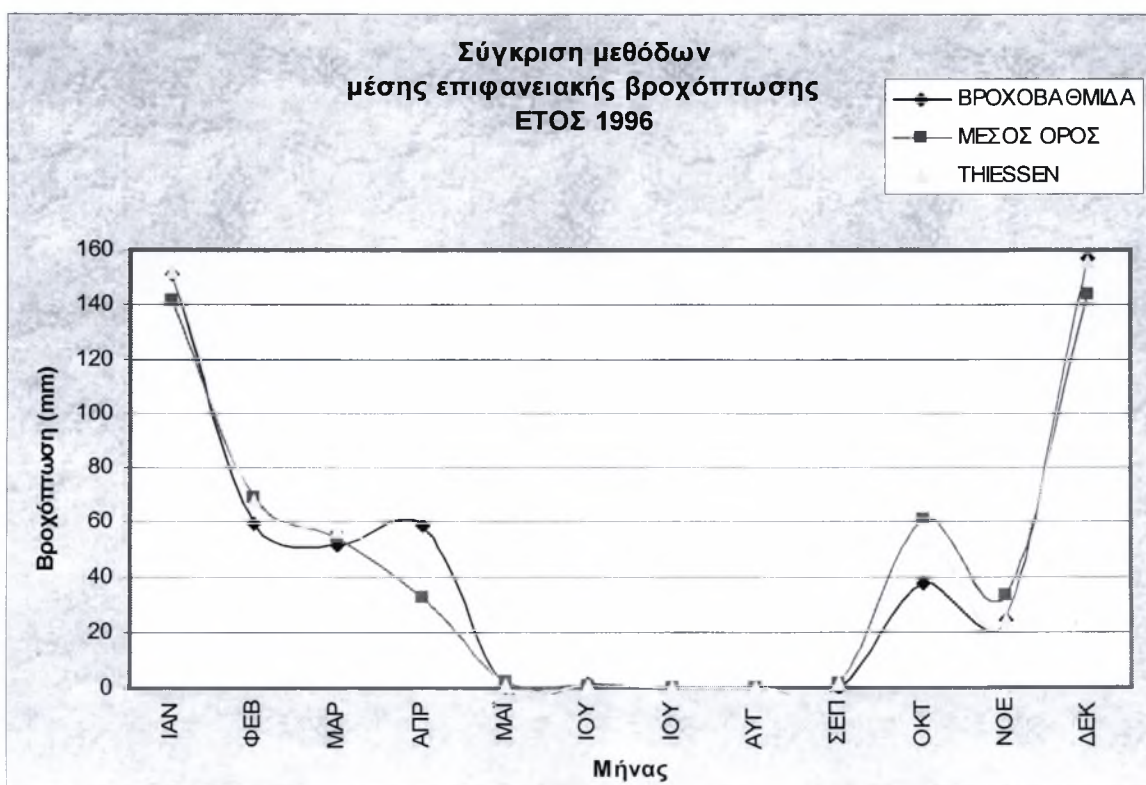
Σχήμα Α.9



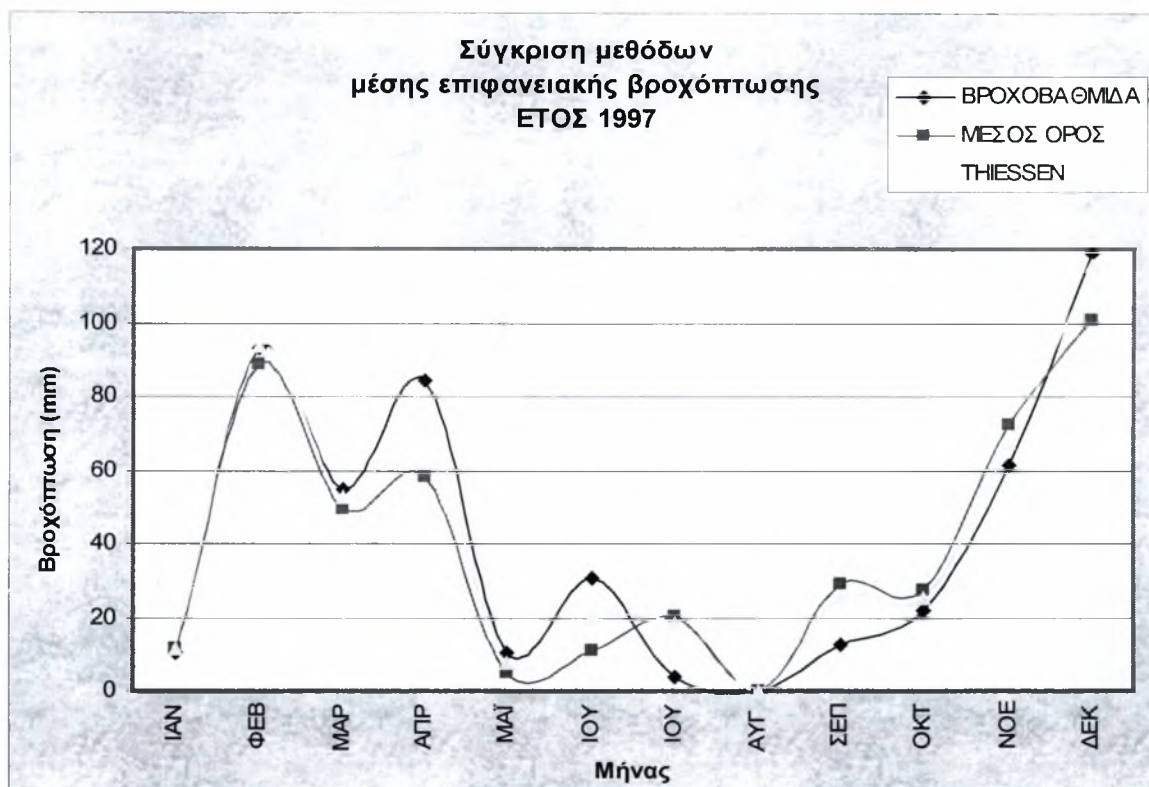
Σχήμα Α.10



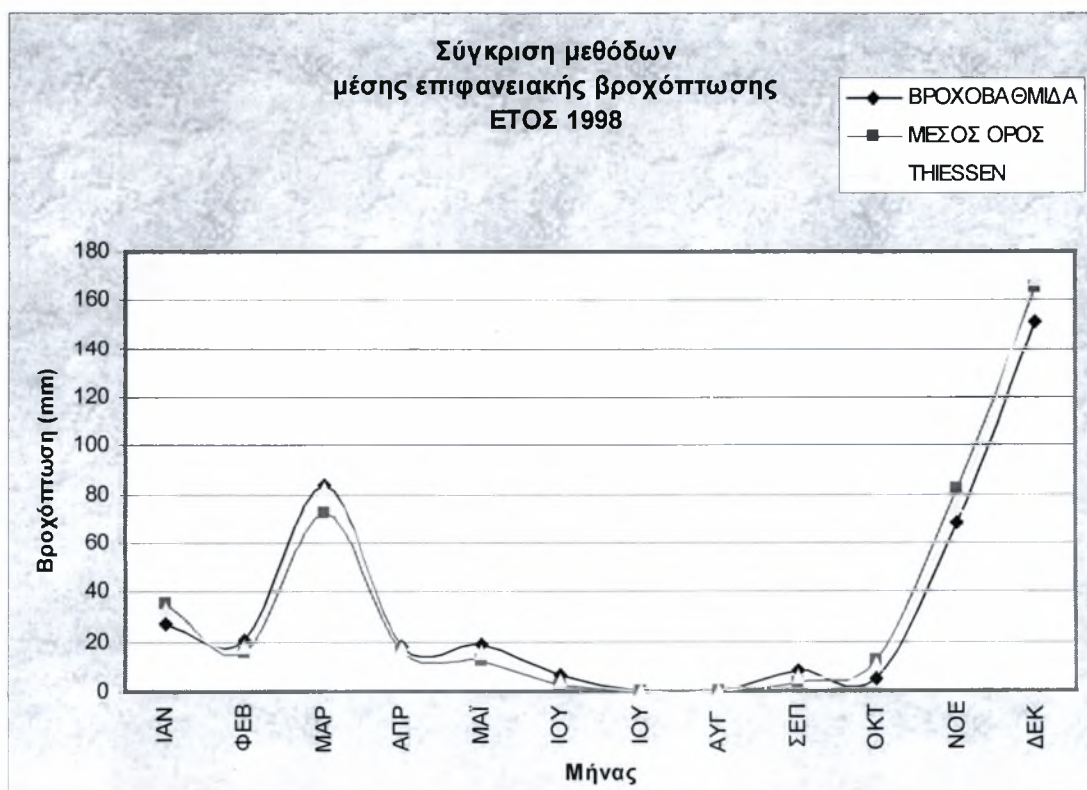
Σχήμα Α.11



Σχήμα Α.12

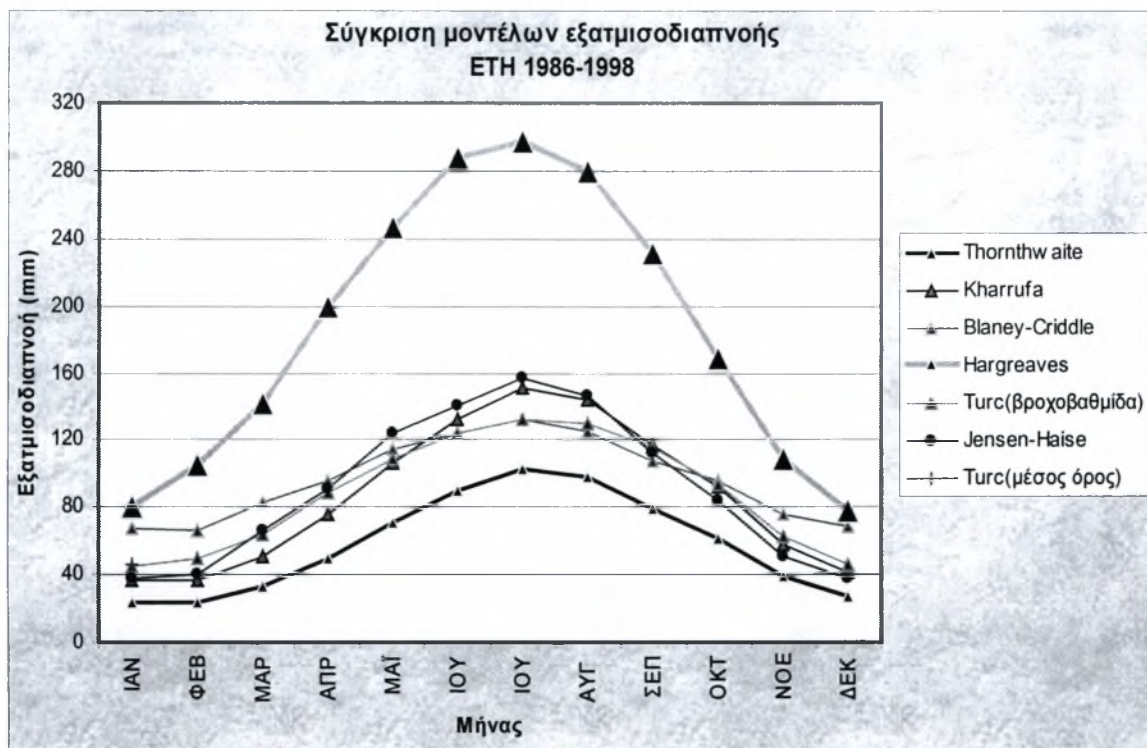


Σχήμα Α.13

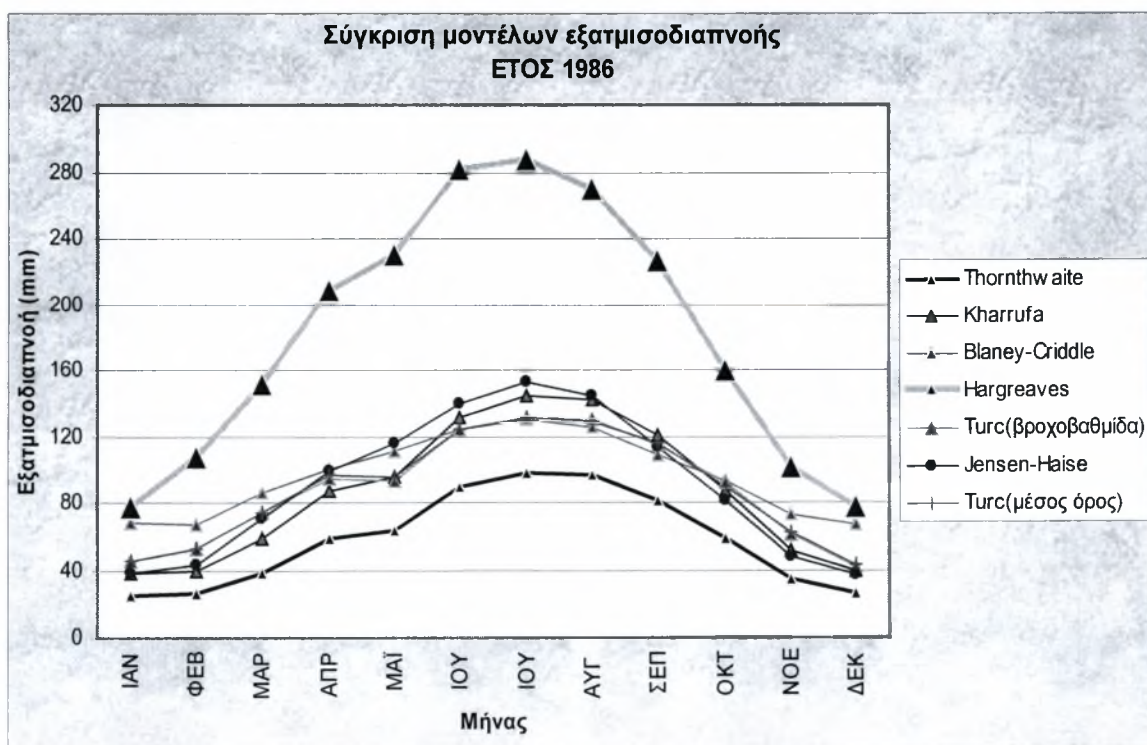


Σχήμα Α.14

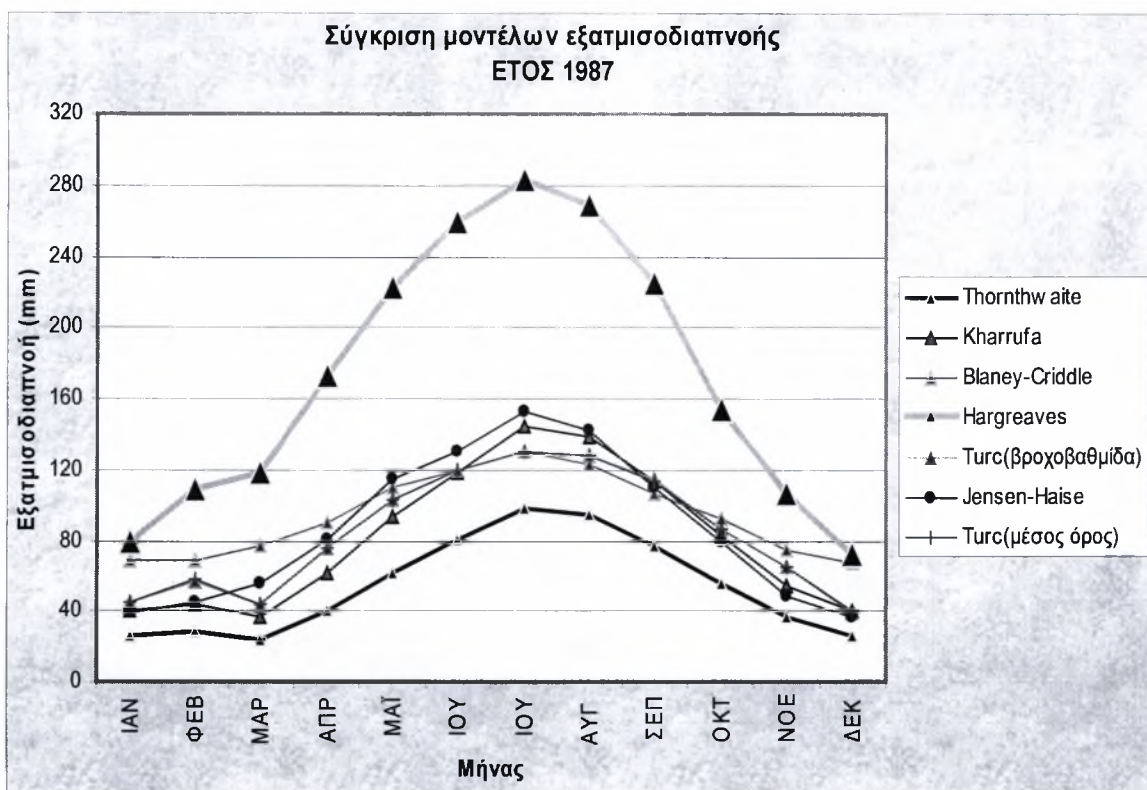
Α.2 Σύγκριση μοντέλων εξατμισοδιαπνοής



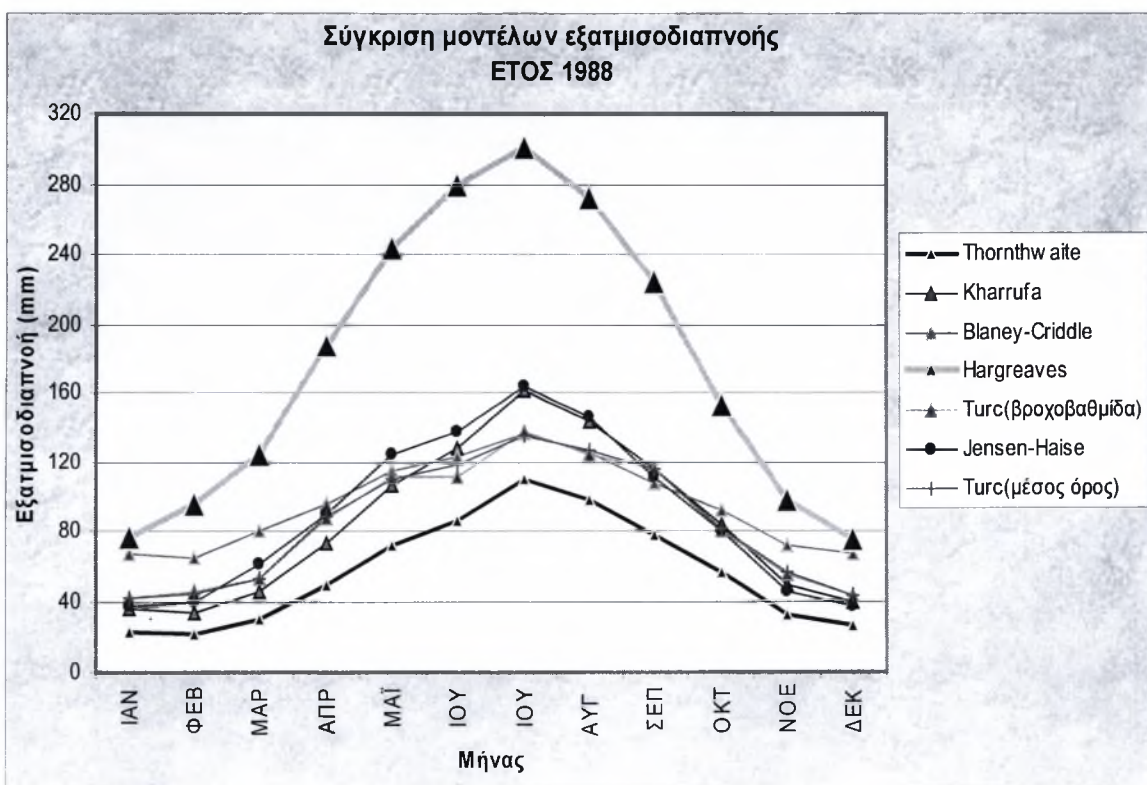
Σχήμα Α.15



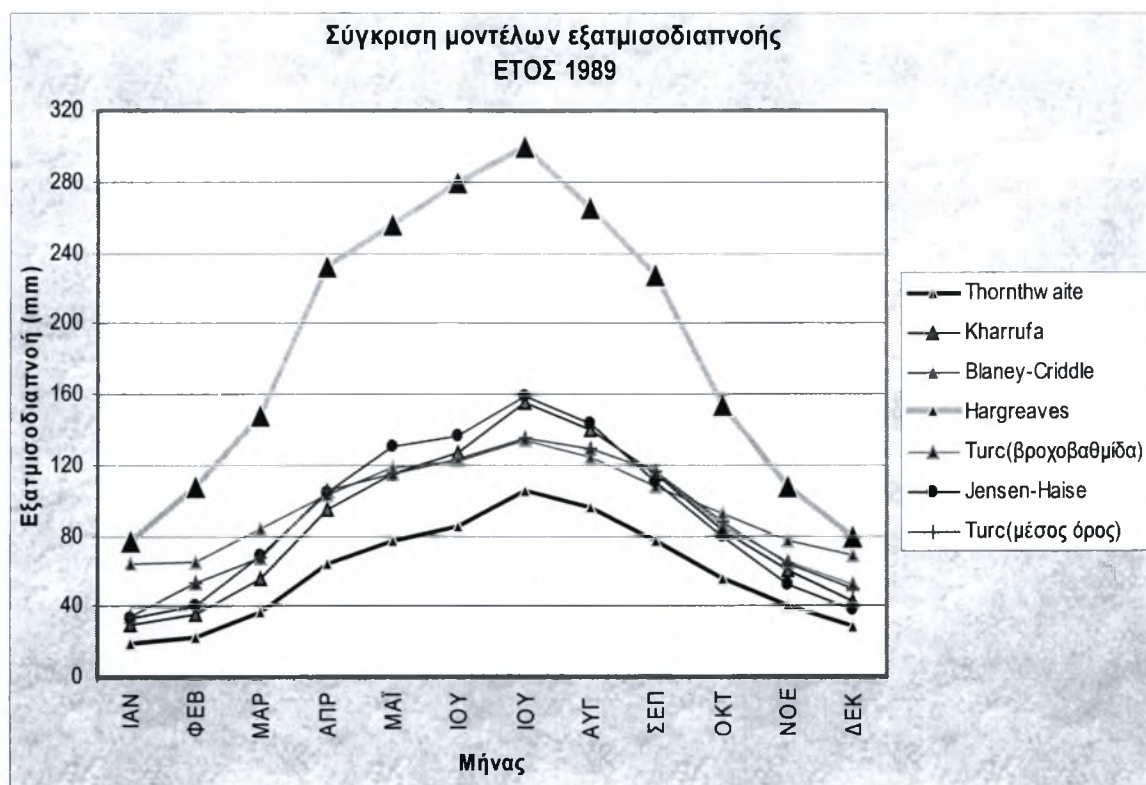
Σχήμα Α.16



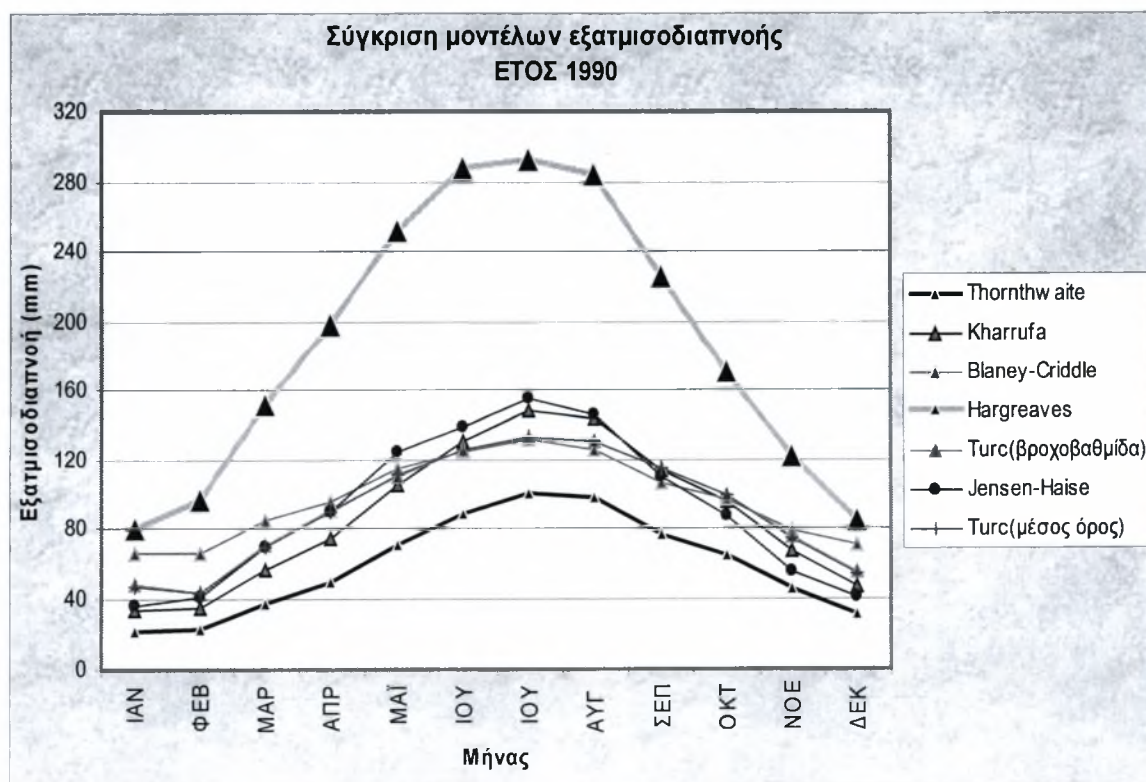
Σχήμα Α.17



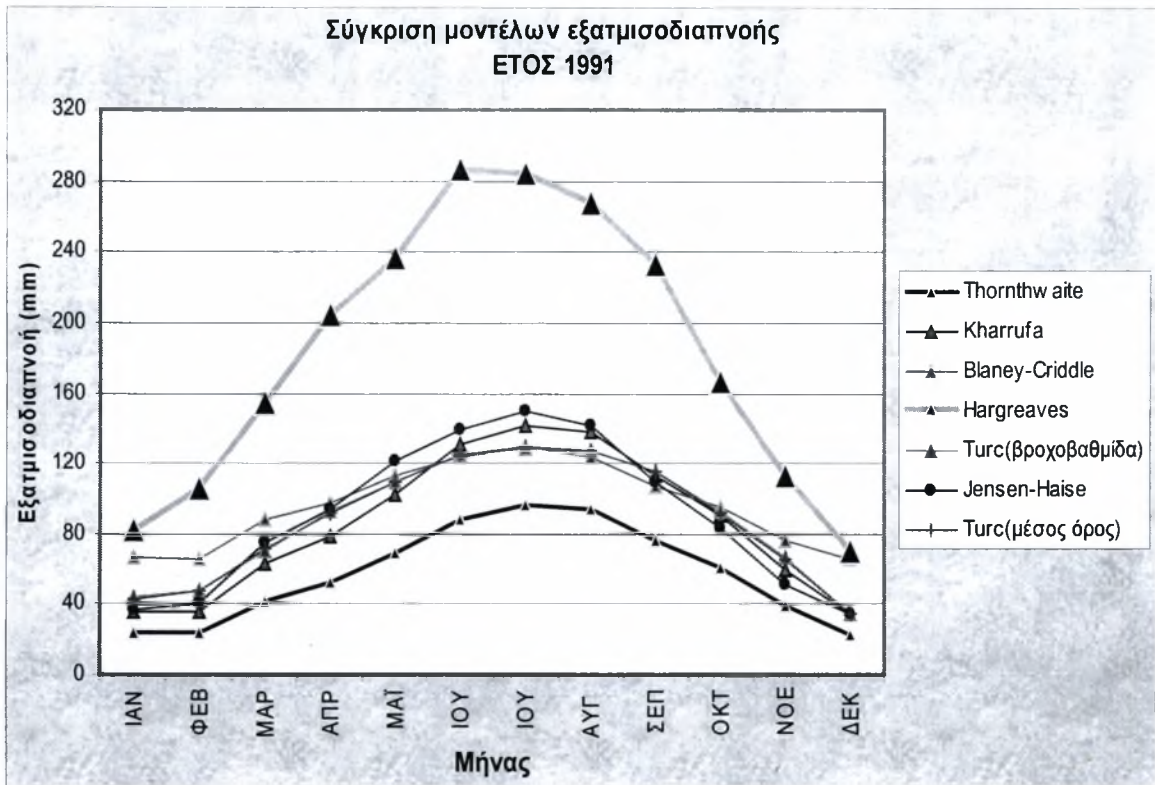
Σχήμα Α.18



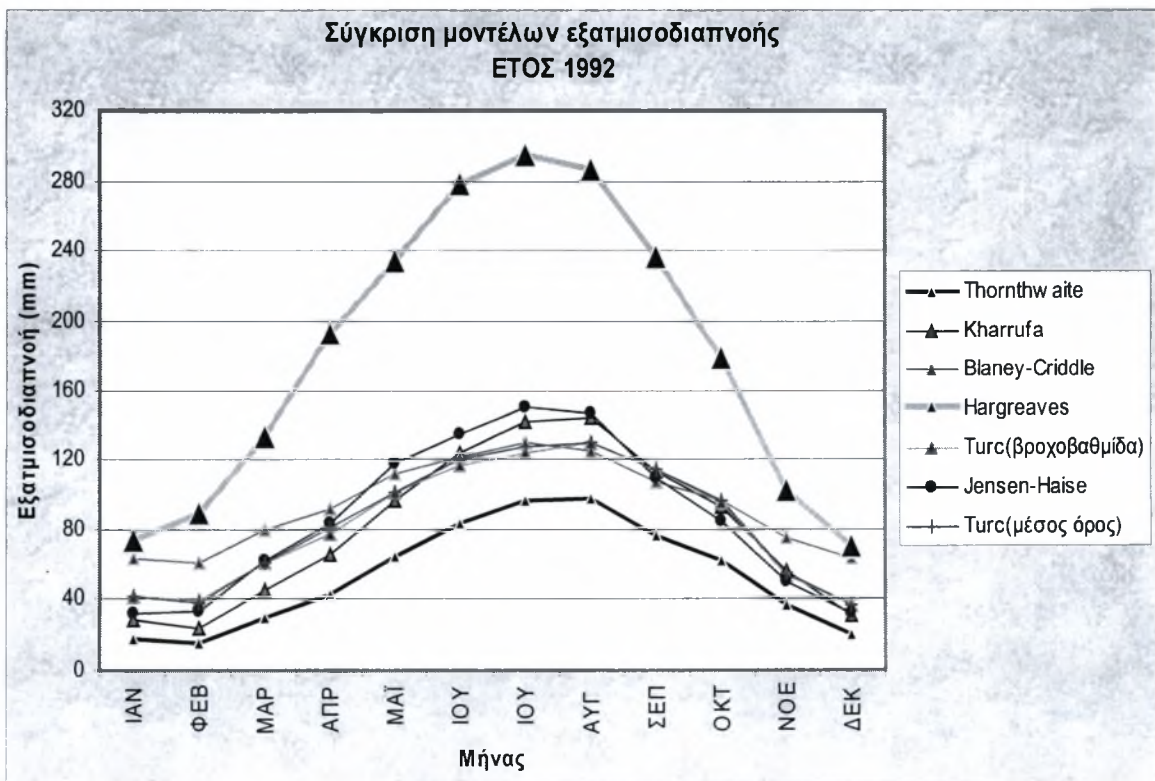
Σχήμα Α.19



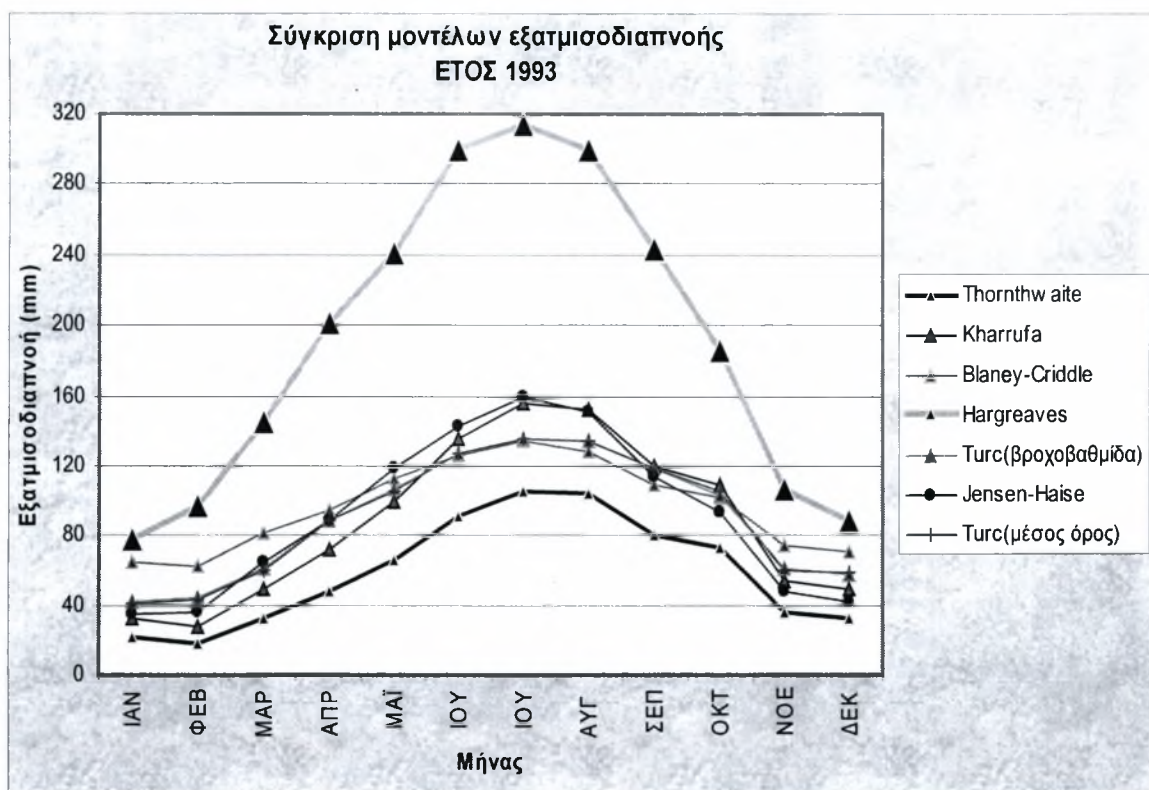
Σχήμα Α.20



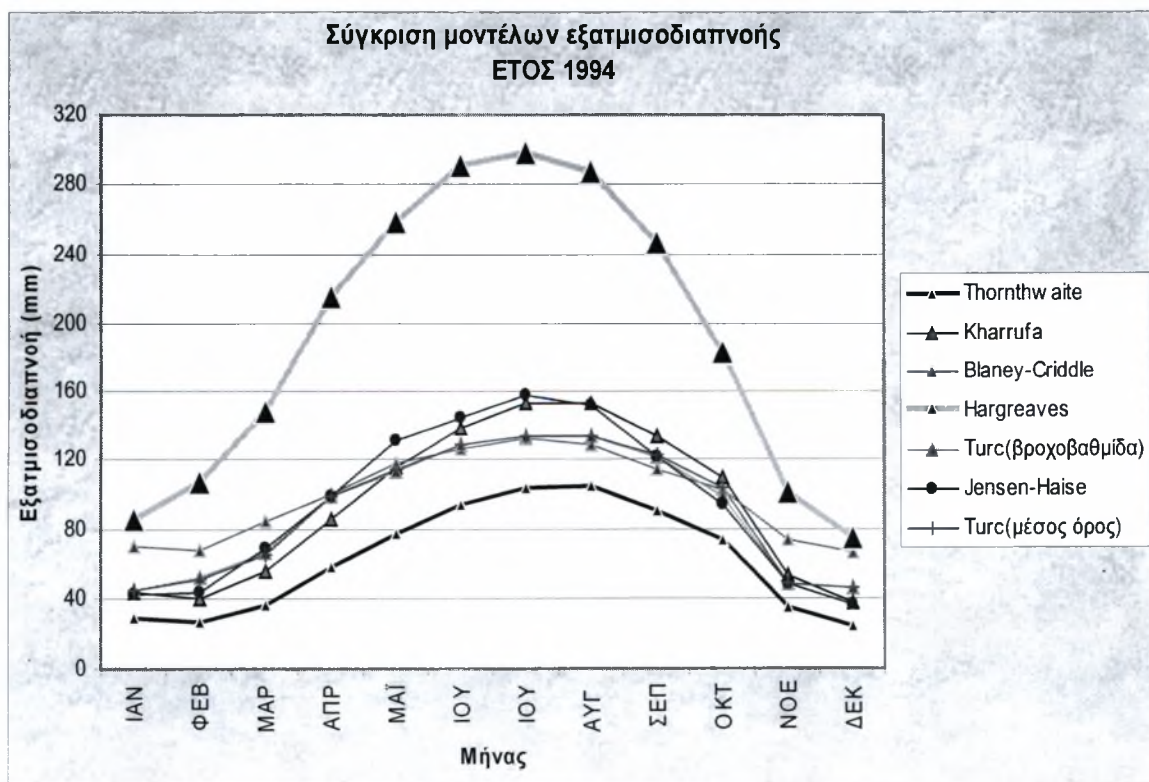
Σχήμα Α.21



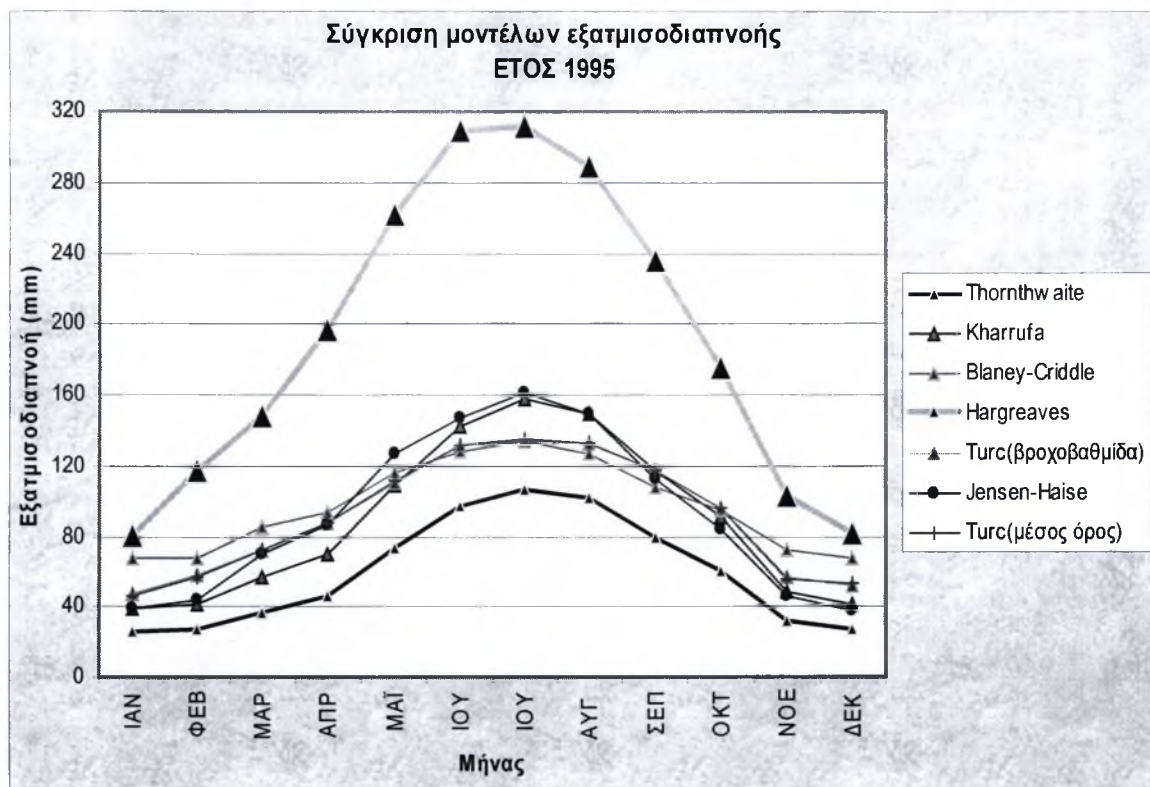
Σχήμα Α.22



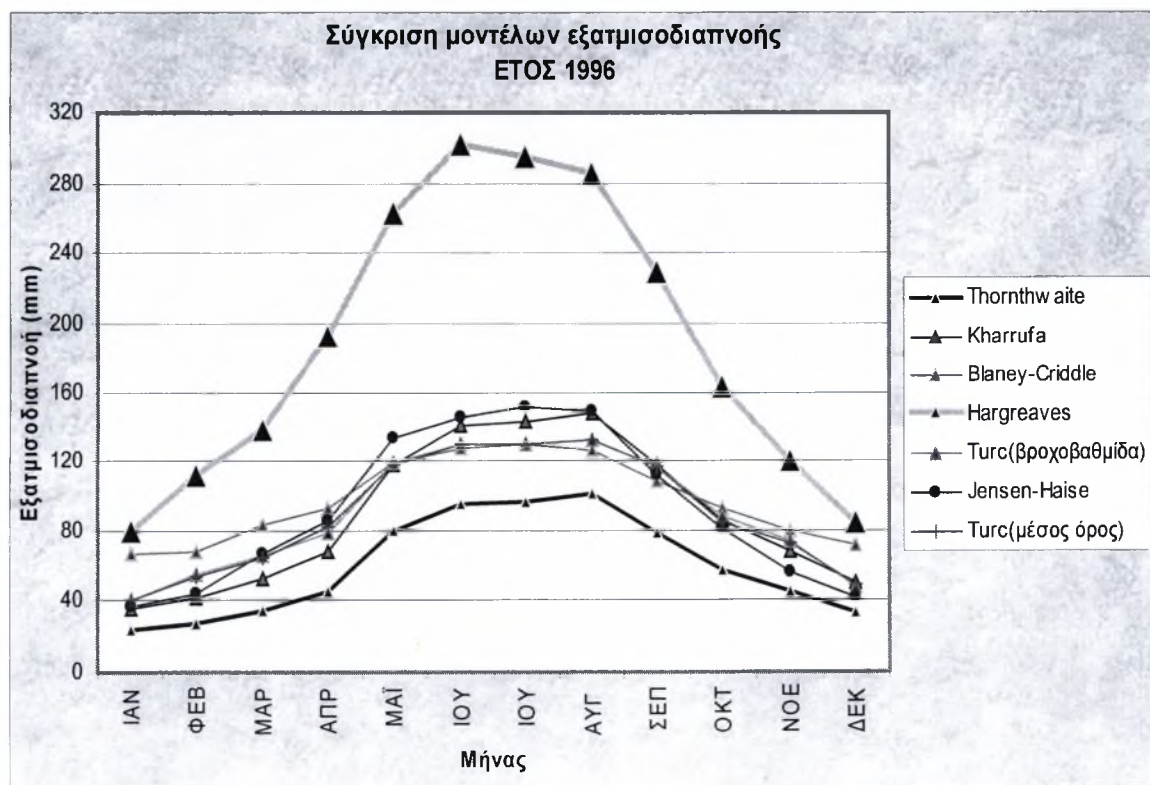
Σχήμα Α.23



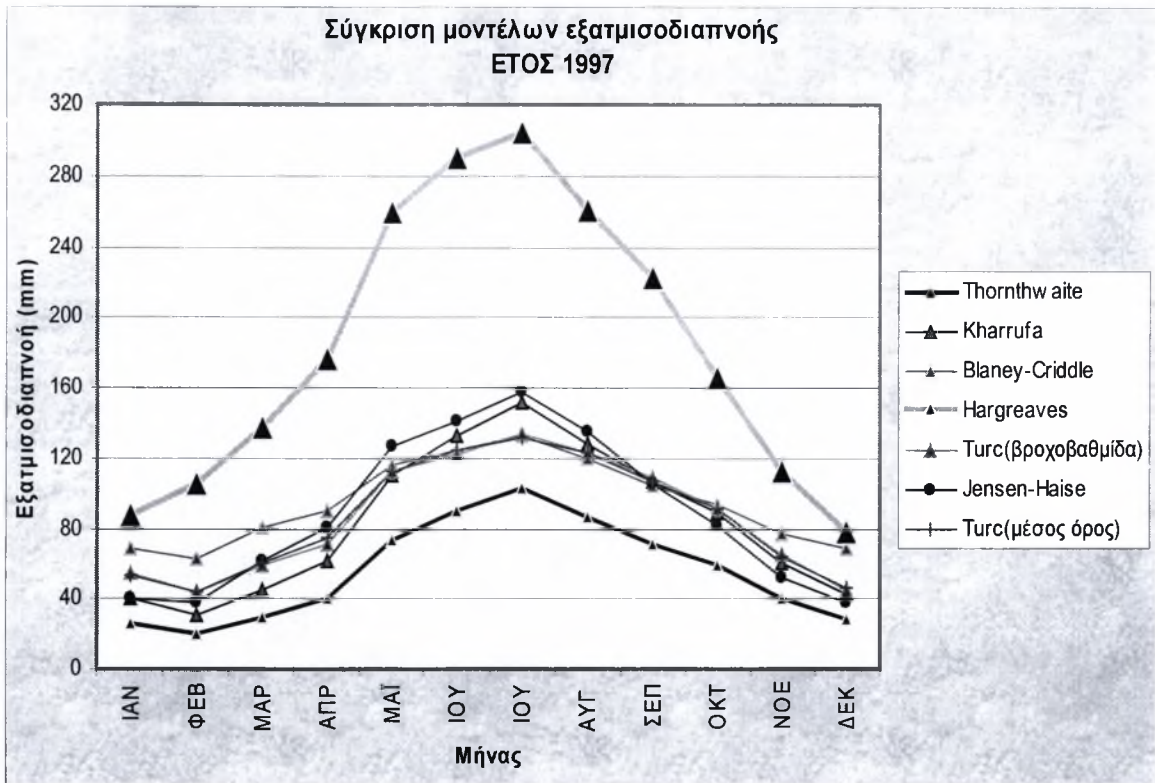
Σχήμα Α.24



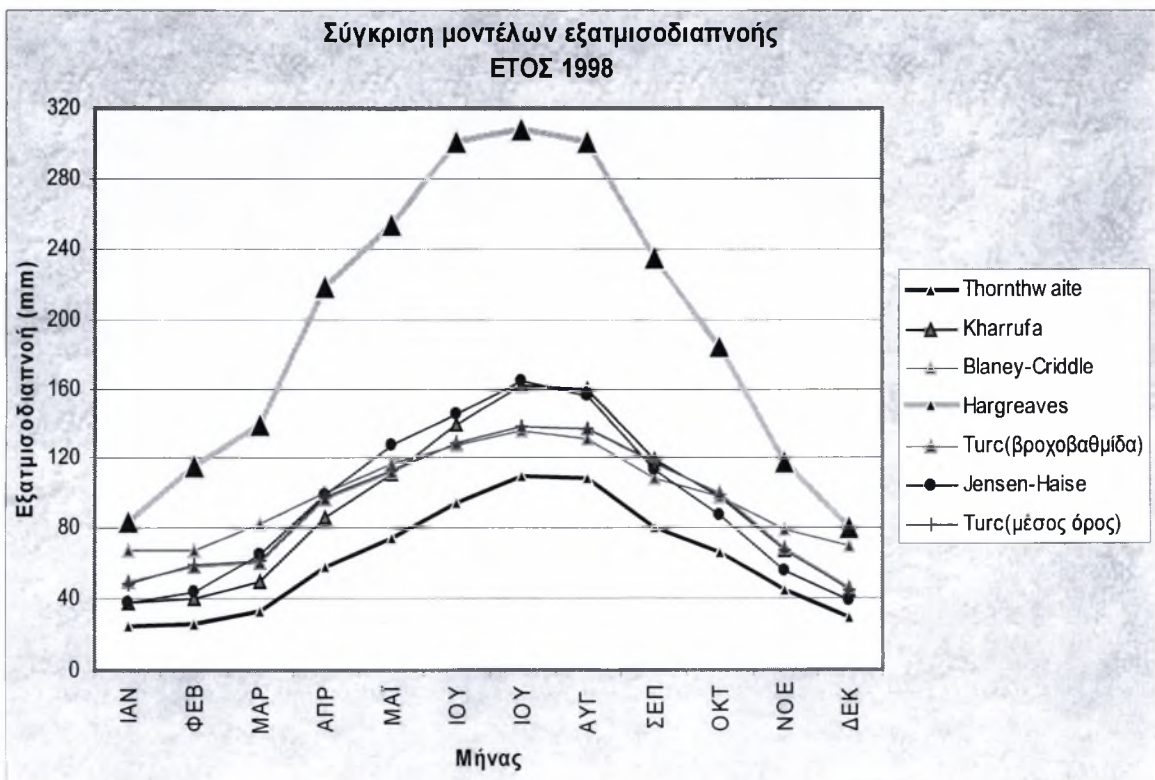
Σχήμα Α.25



Σχήμα Α.26



Σχήμα Α.27



Σχήμα Α.28

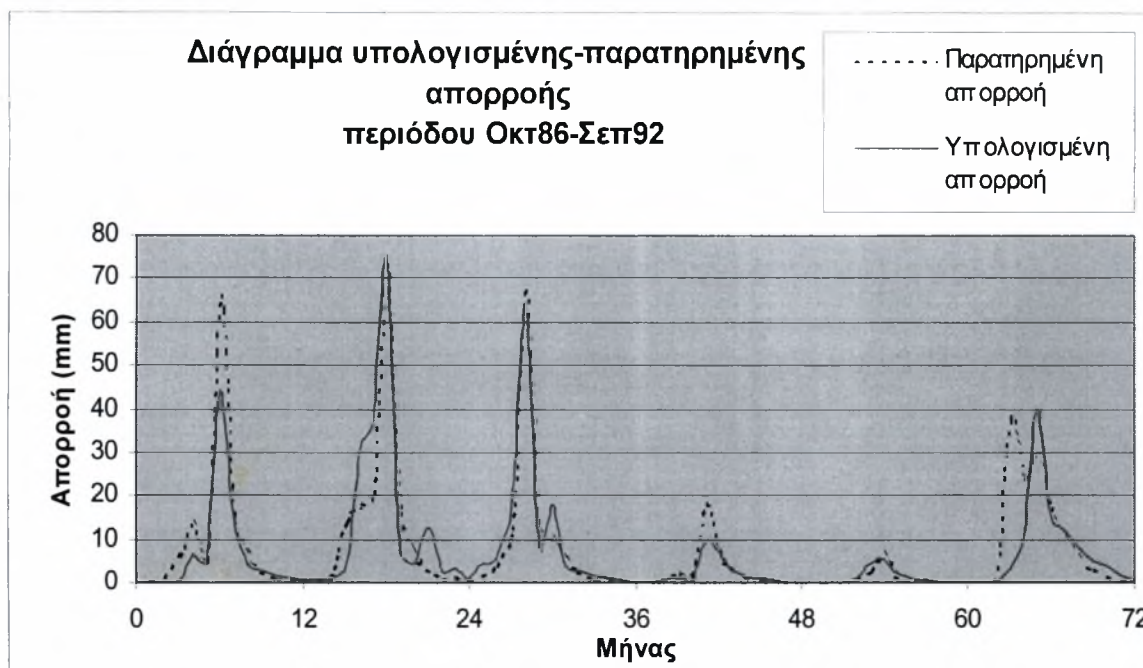
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΒΥΛΟΝΟΜ**

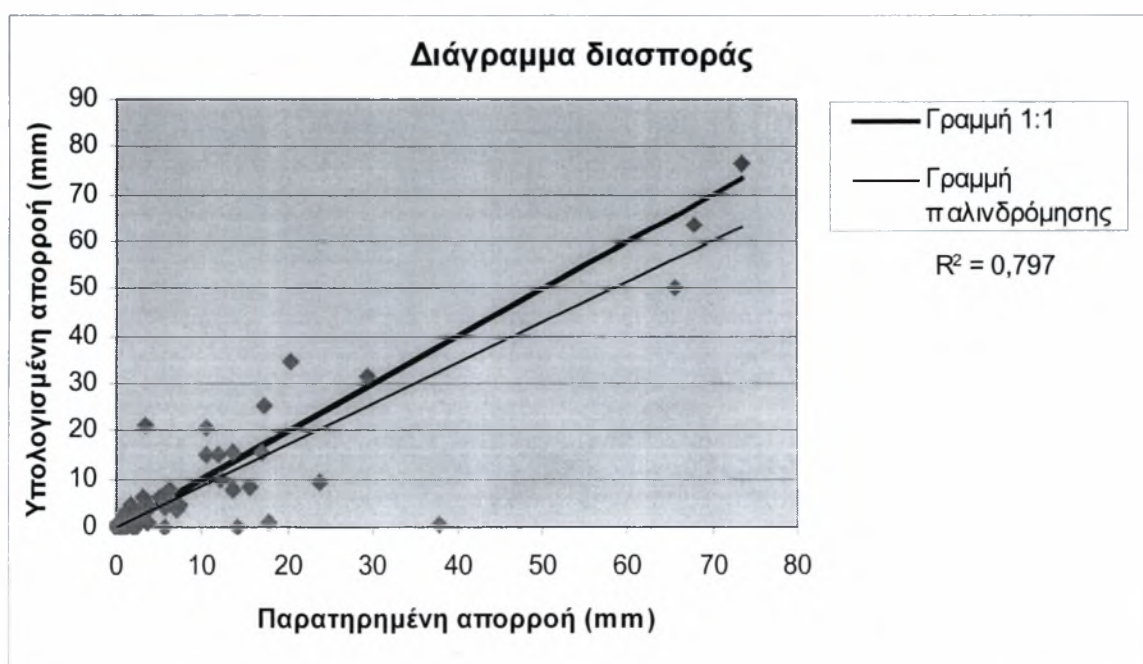
B.1 Βελτιστοποίηση μοντέλου Abulohom περιόδου Οκτ1986-Σεπ1992

B.1.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Thornthwaite

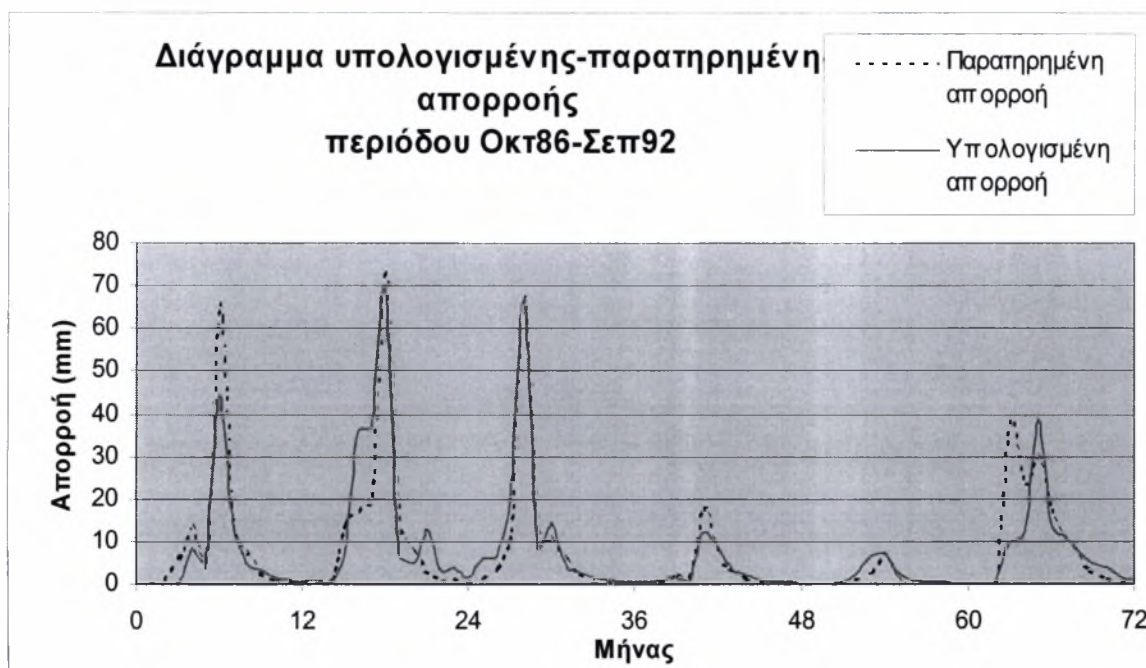


Σχήμα Β.1

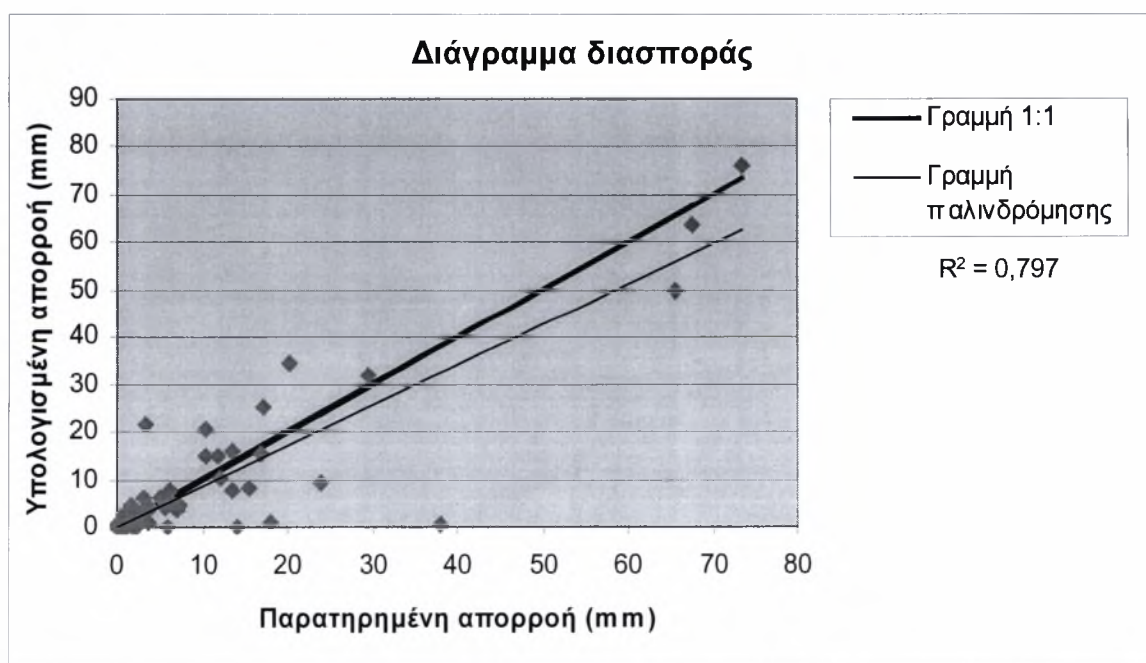


Σχήμα Β.2

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

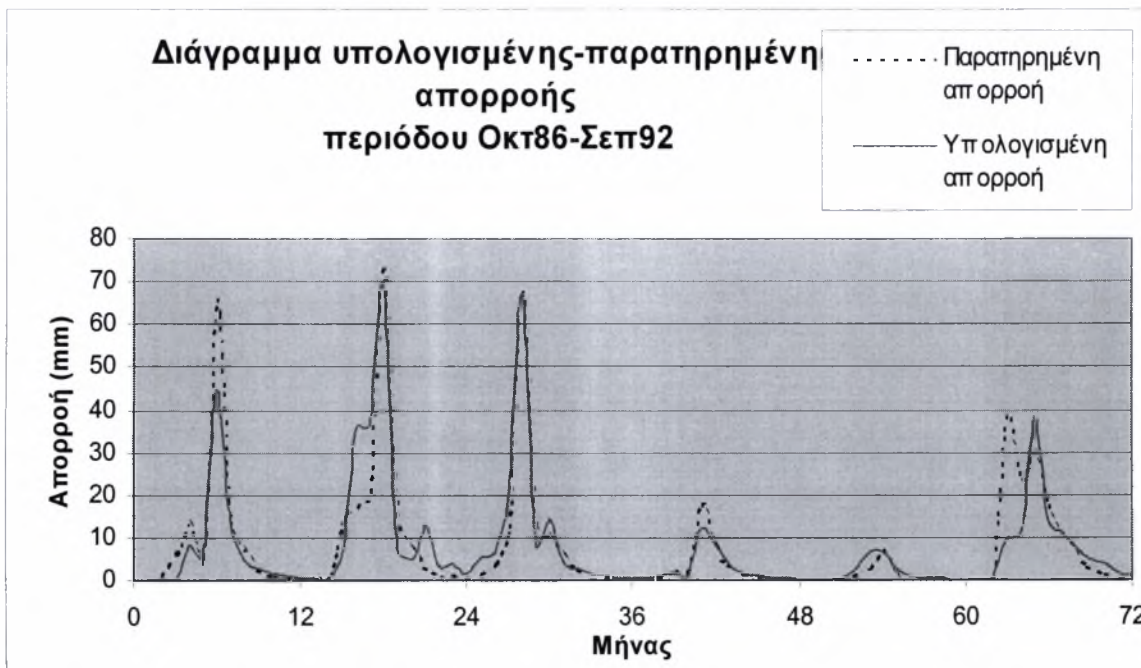


Σχήμα Β.3

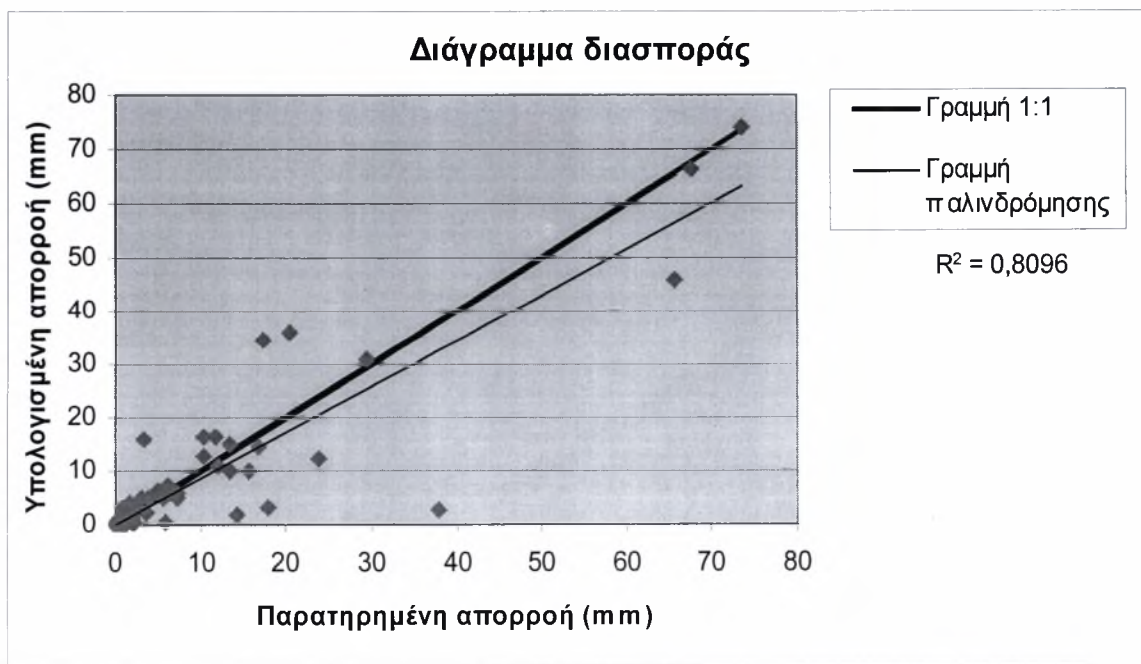


Σχήμα Β.4

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

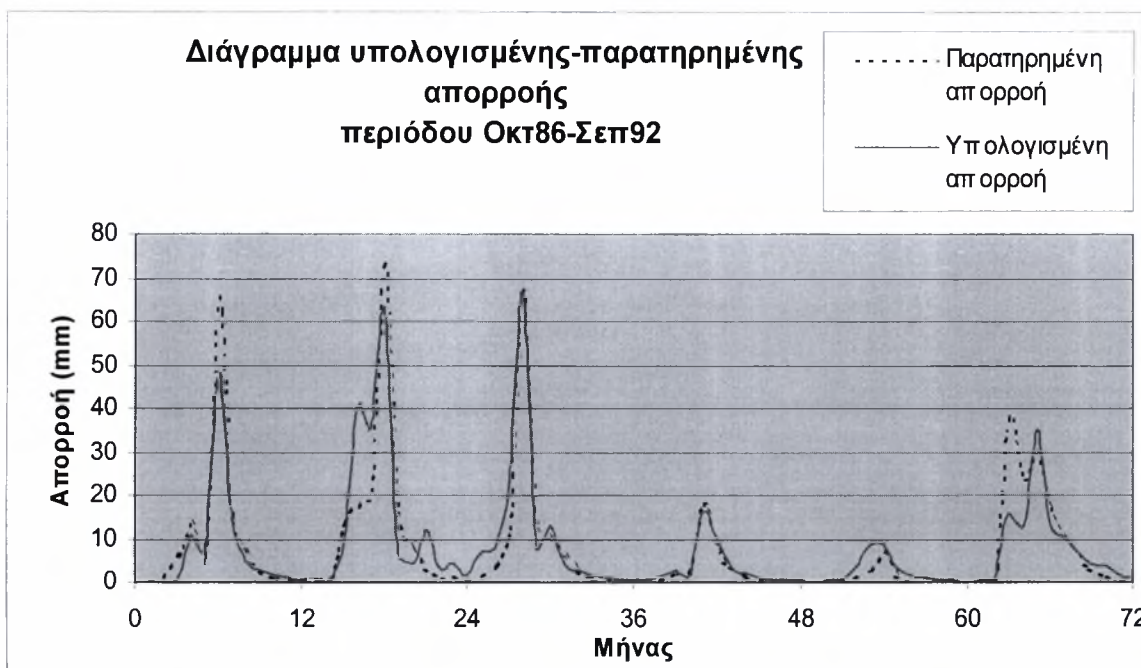


Σχήμα Β.5

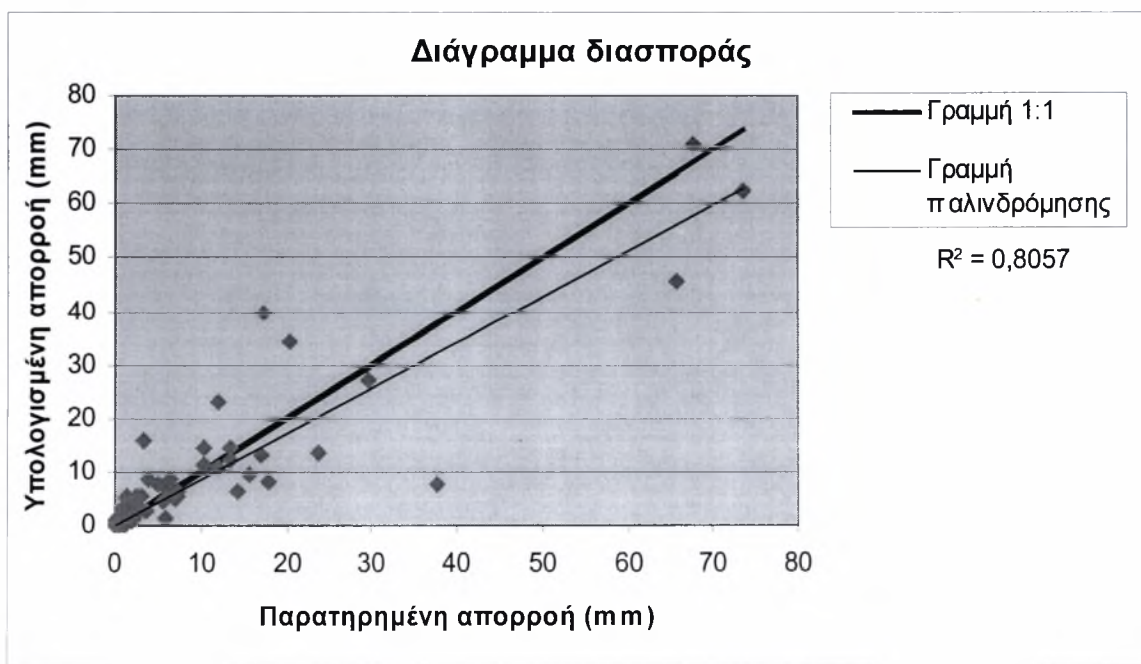


Σχήμα Β.6

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

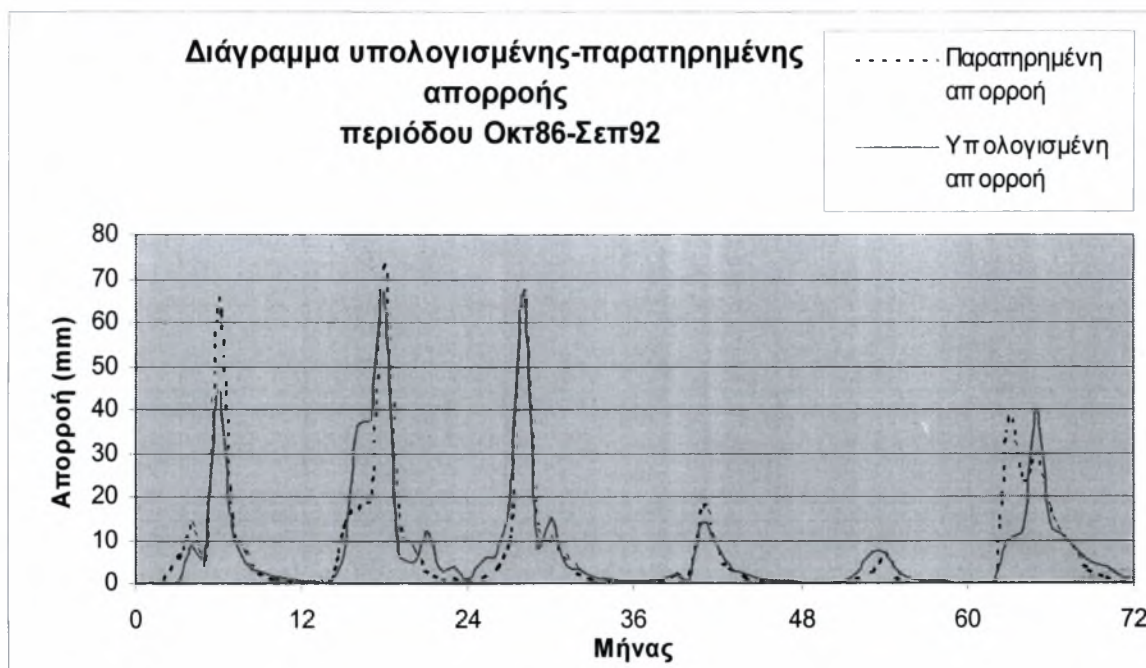


Σχήμα Β.7

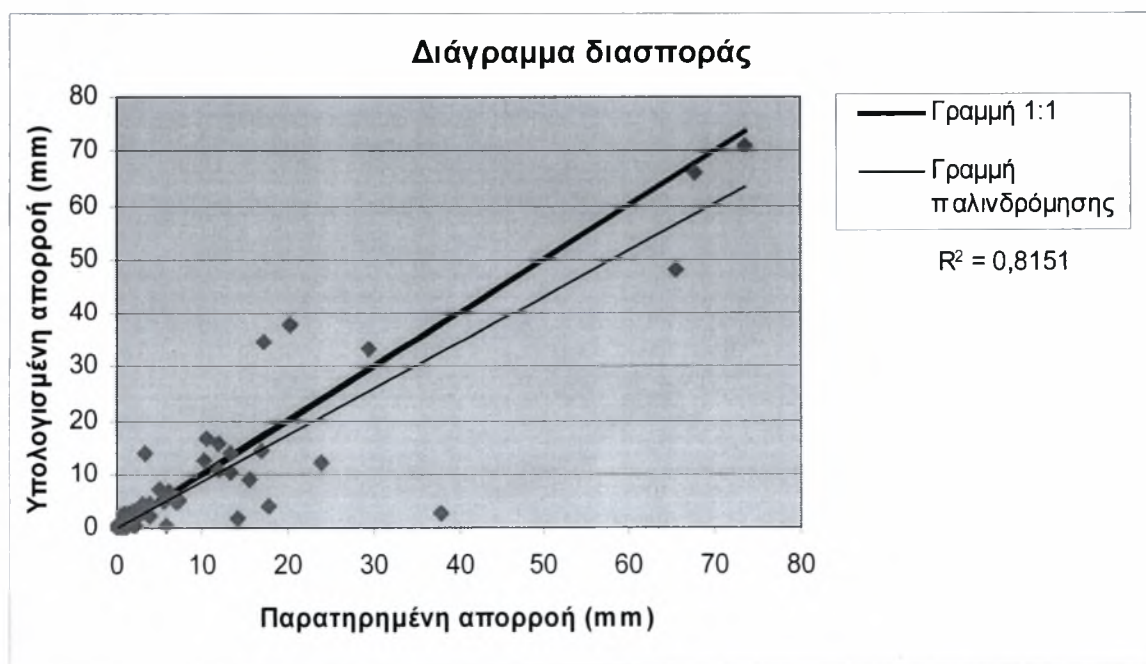


Σχήμα Β.8

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

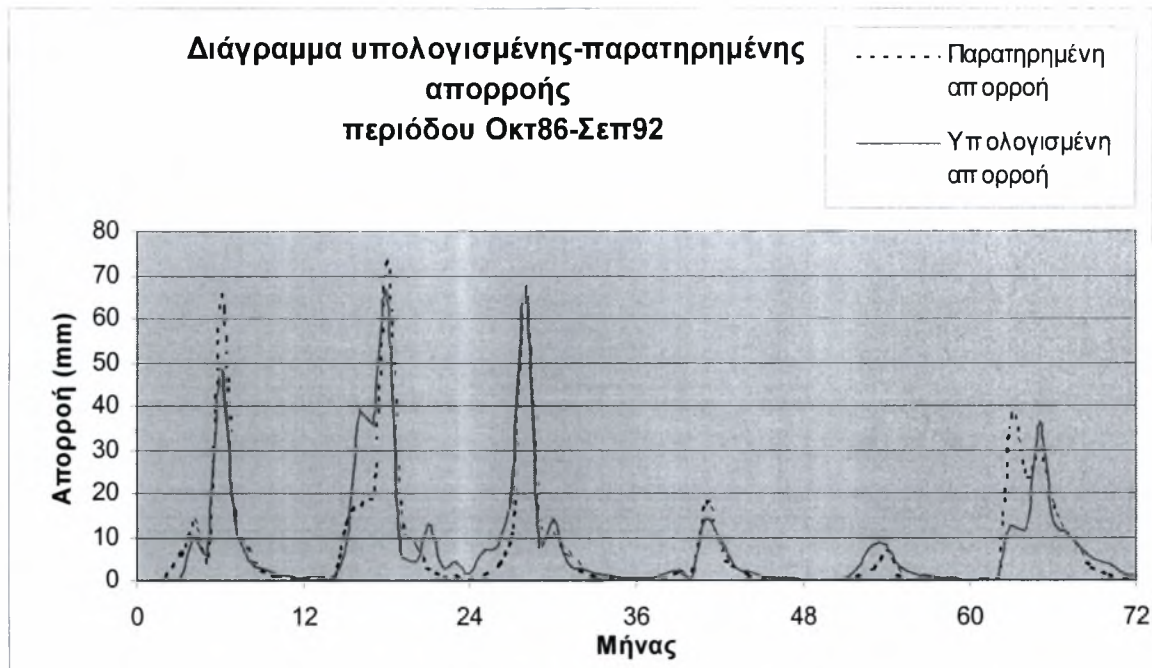


Σχήμα Β.9

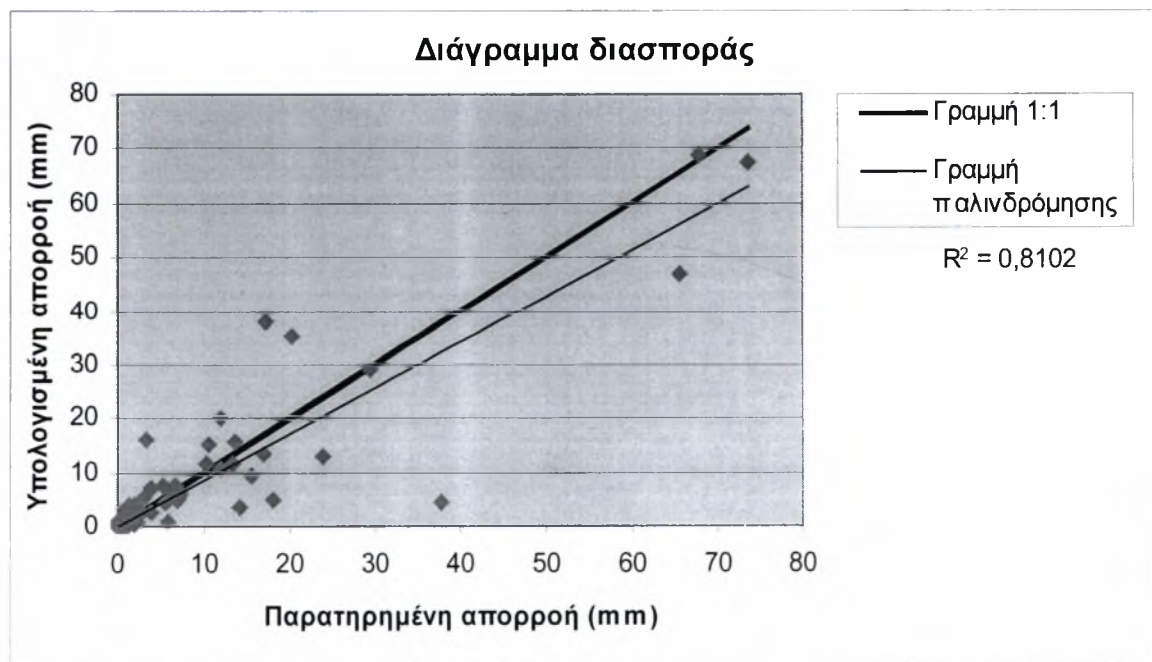


Σχήμα Β.10

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

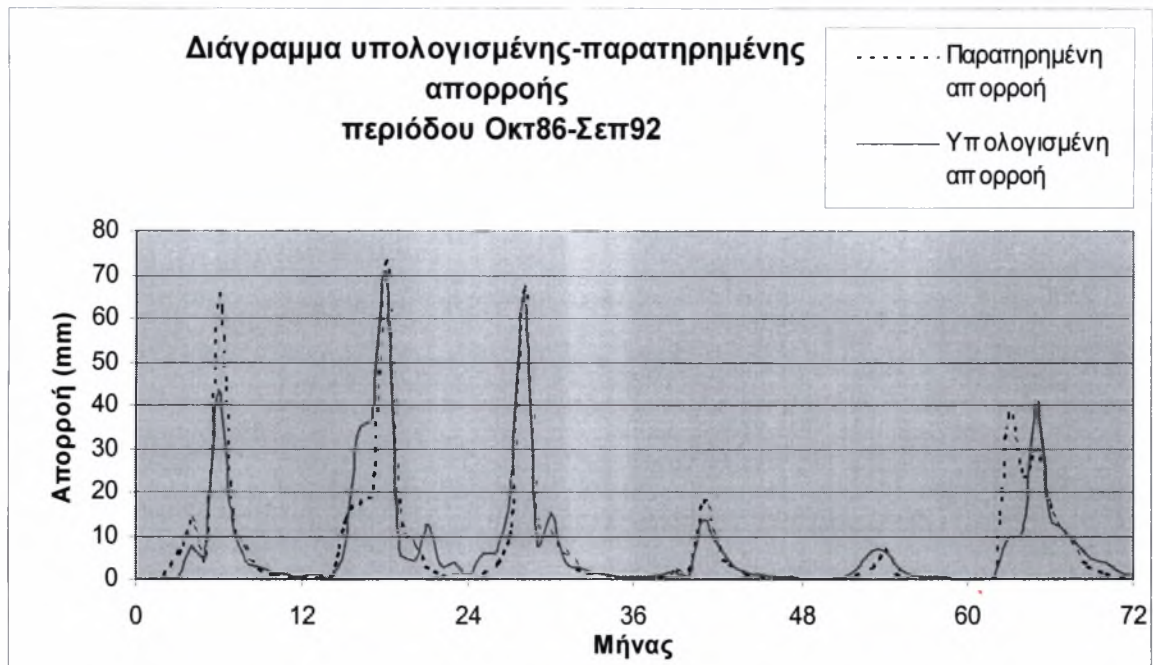


Σχήμα Β.11

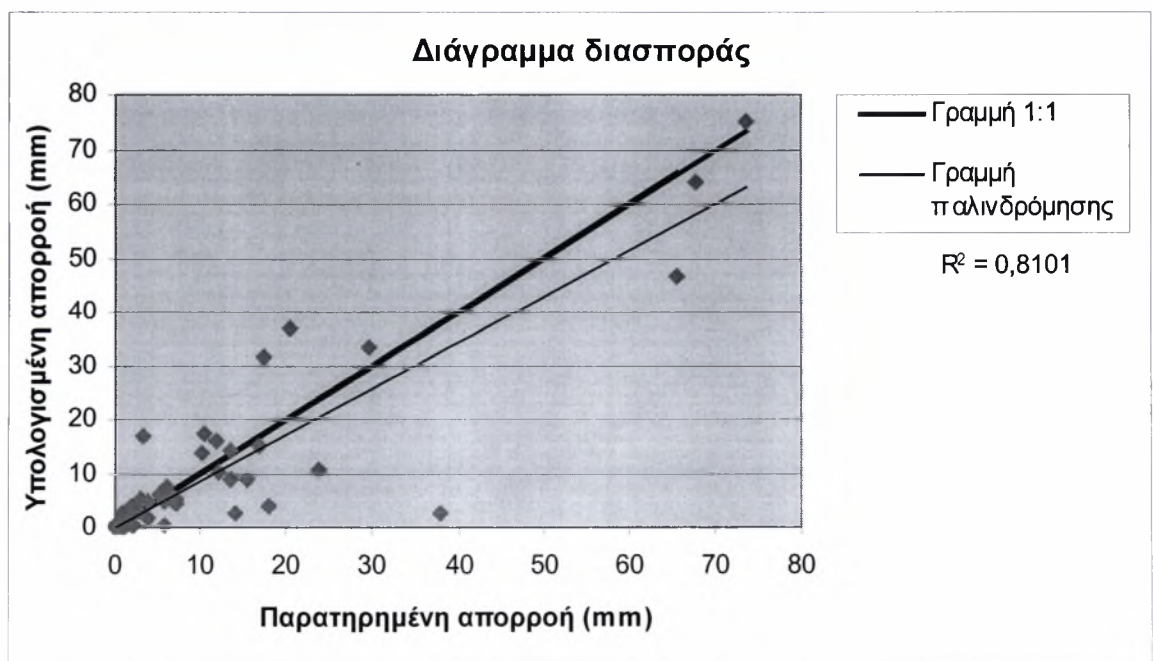


Σχήμα Β.12

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



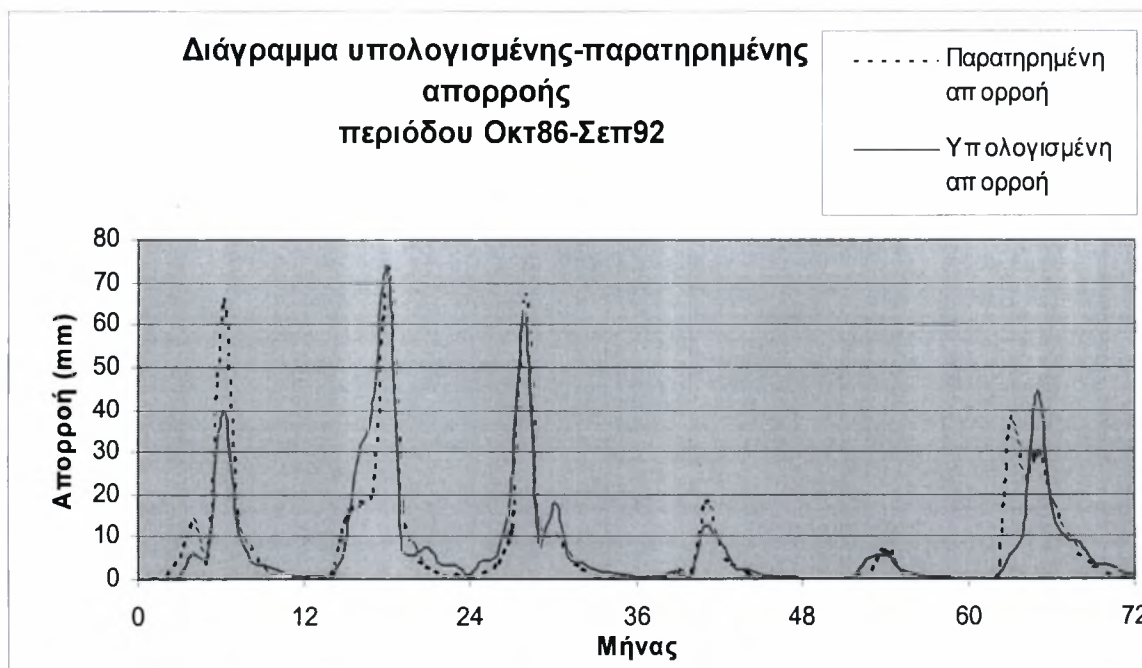
Σχήμα Β.13



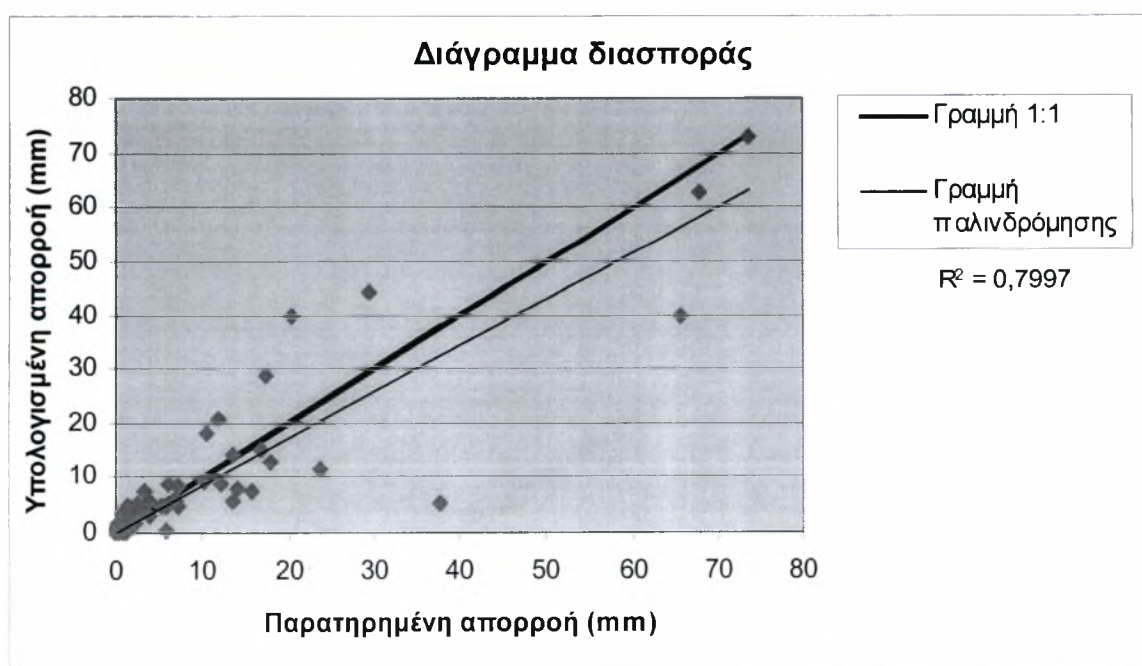
Σχήμα Β.14

B.1.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

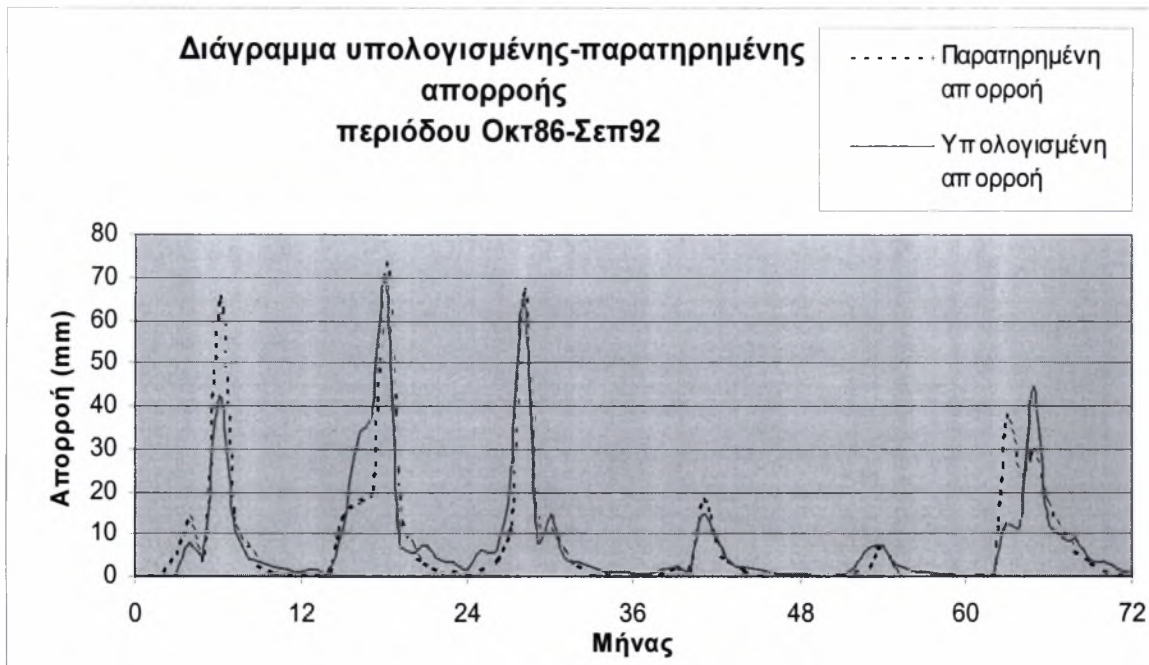


Σχήμα Β.15

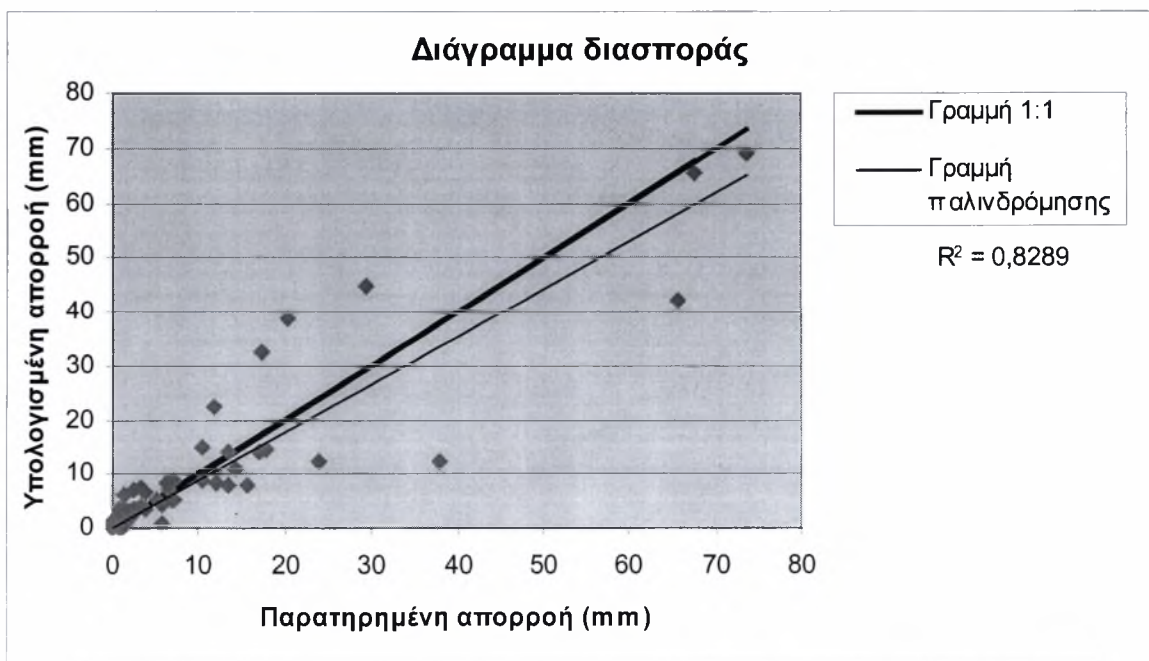


Σχήμα Β.16

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

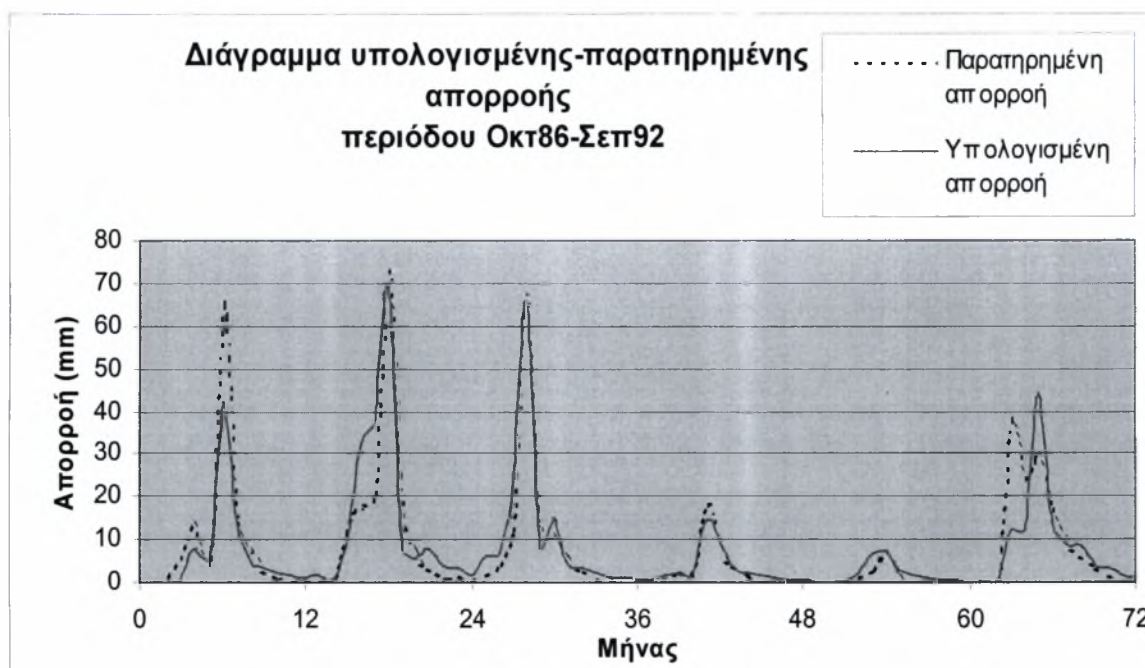


Σχήμα Β.17

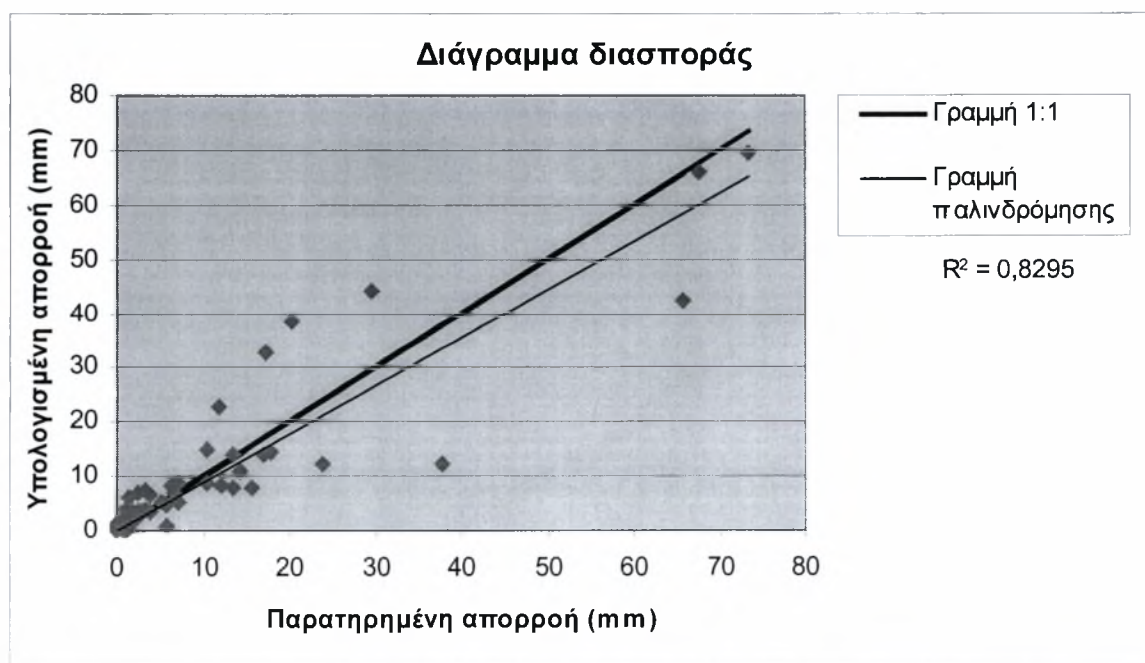


Σχήμα Β.18

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

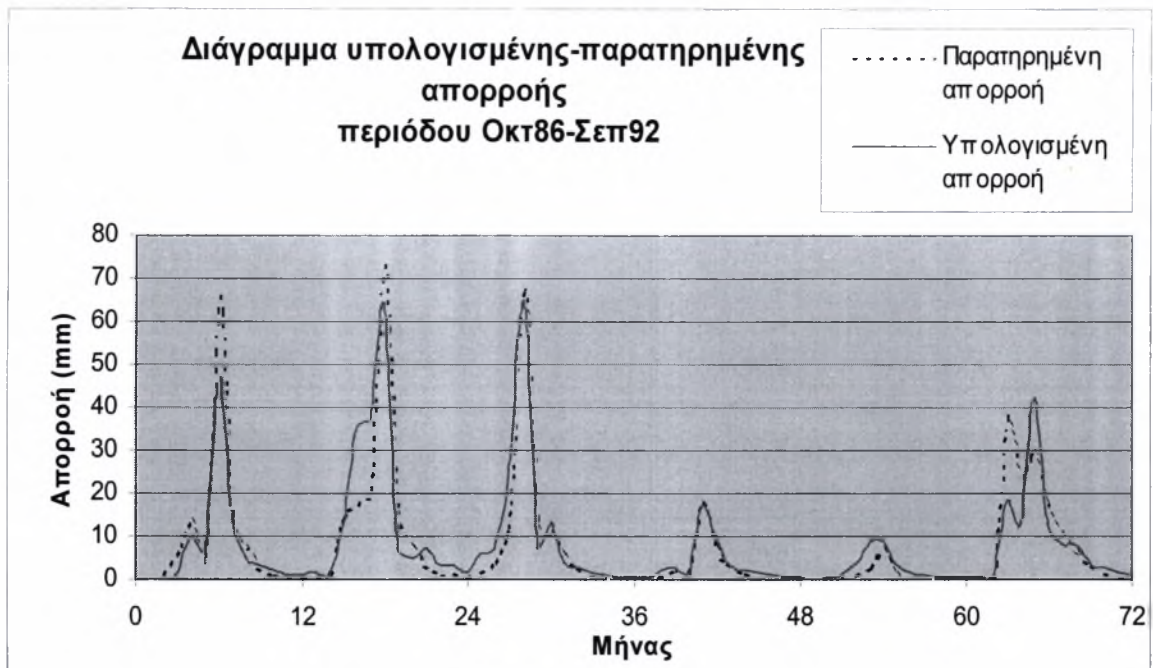


Σχήμα Β.19

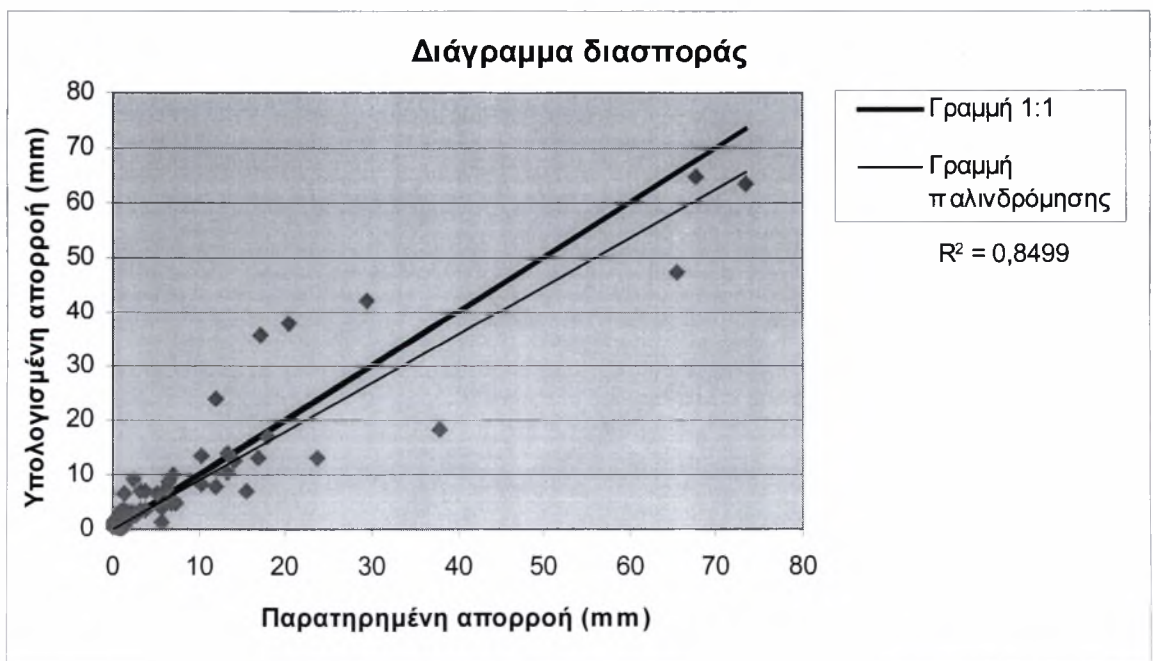


Σχήμα Β.20

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

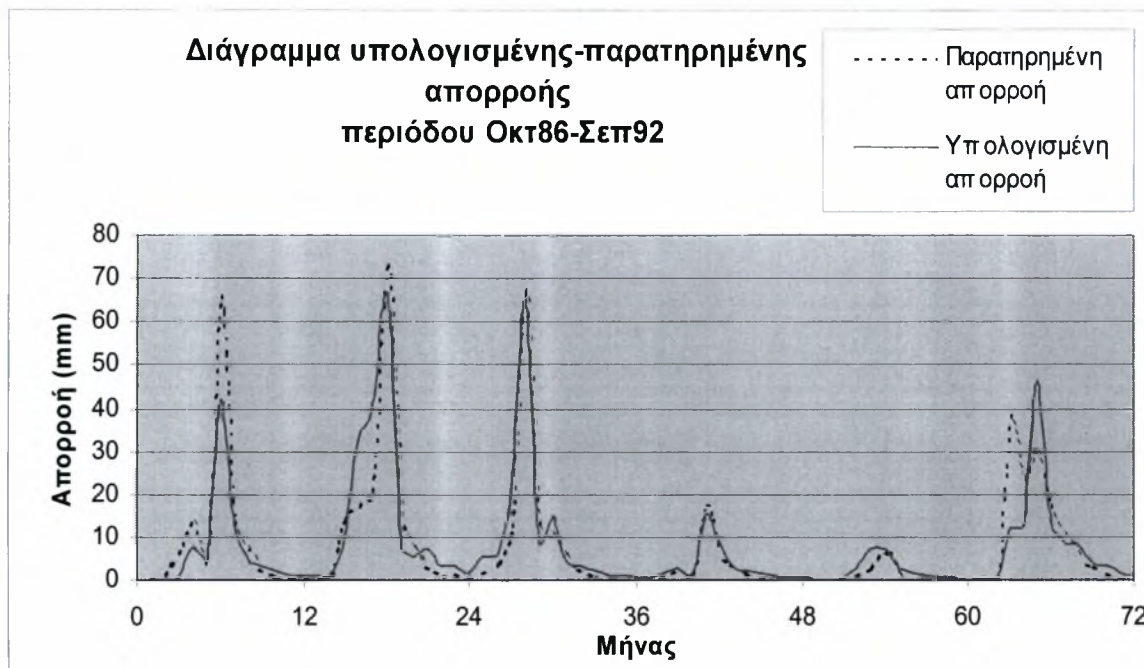


Σχήμα Β.21

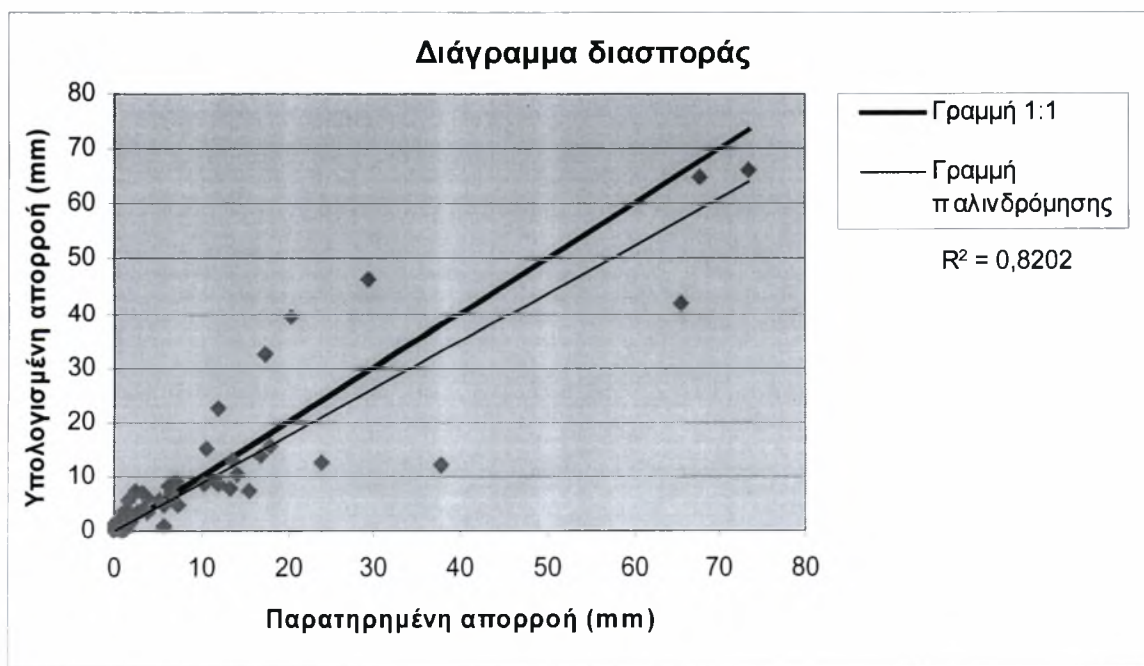


Σχήμα Β.22

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

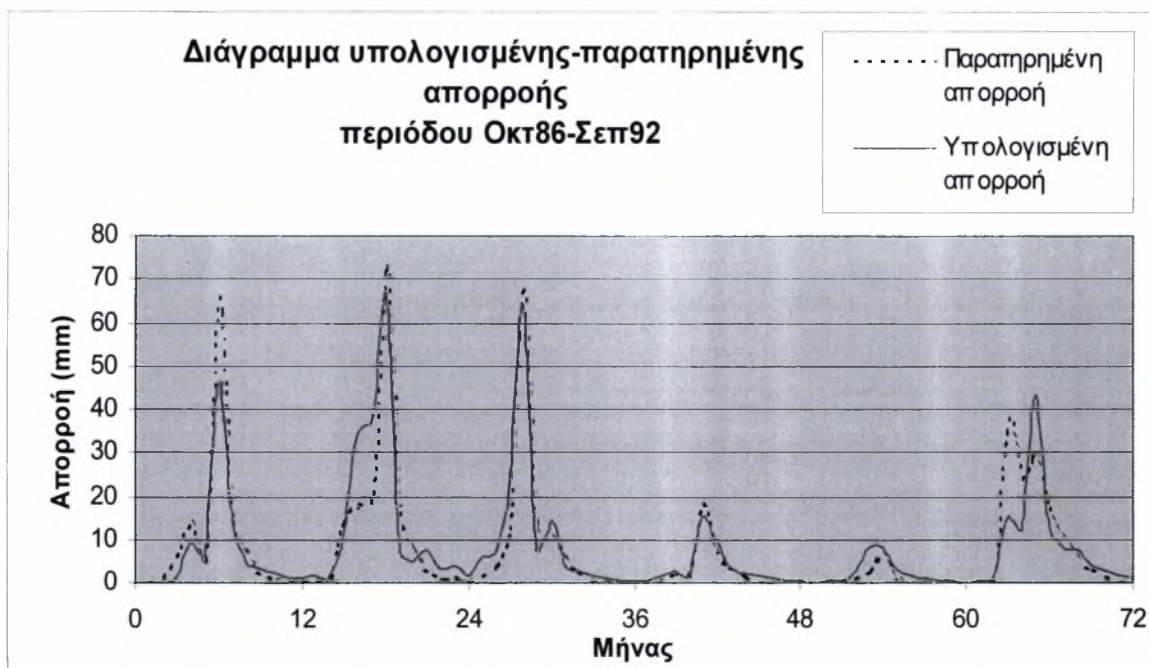


Σχήμα Β.23

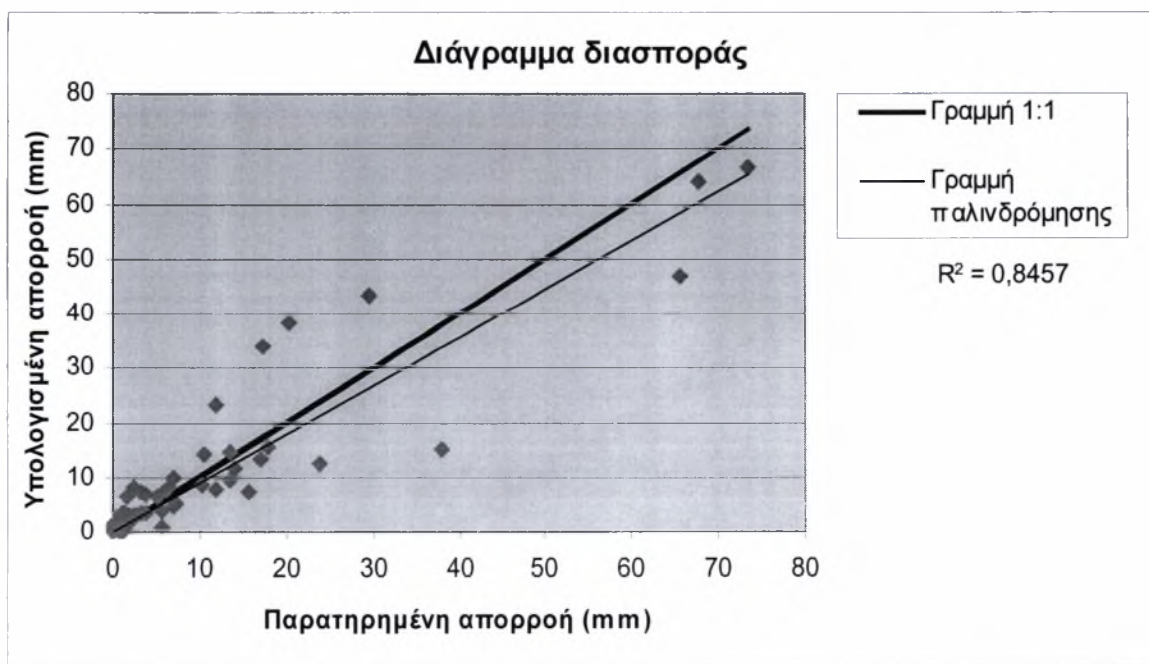


Σχήμα Β.24

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

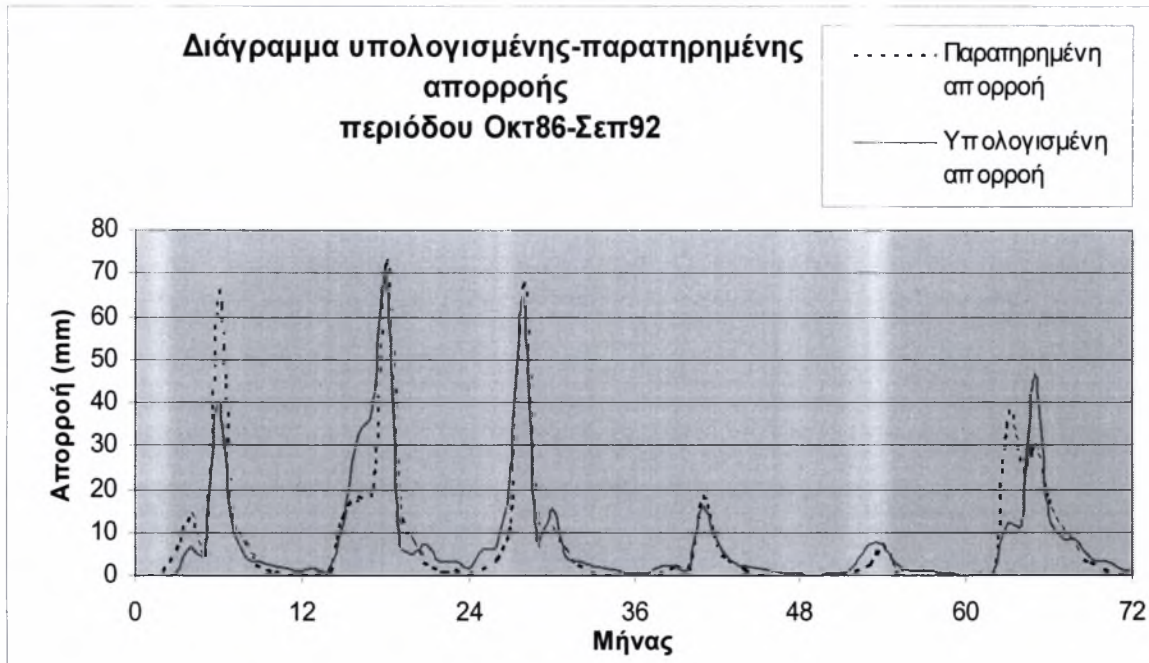


Σχήμα Β.25

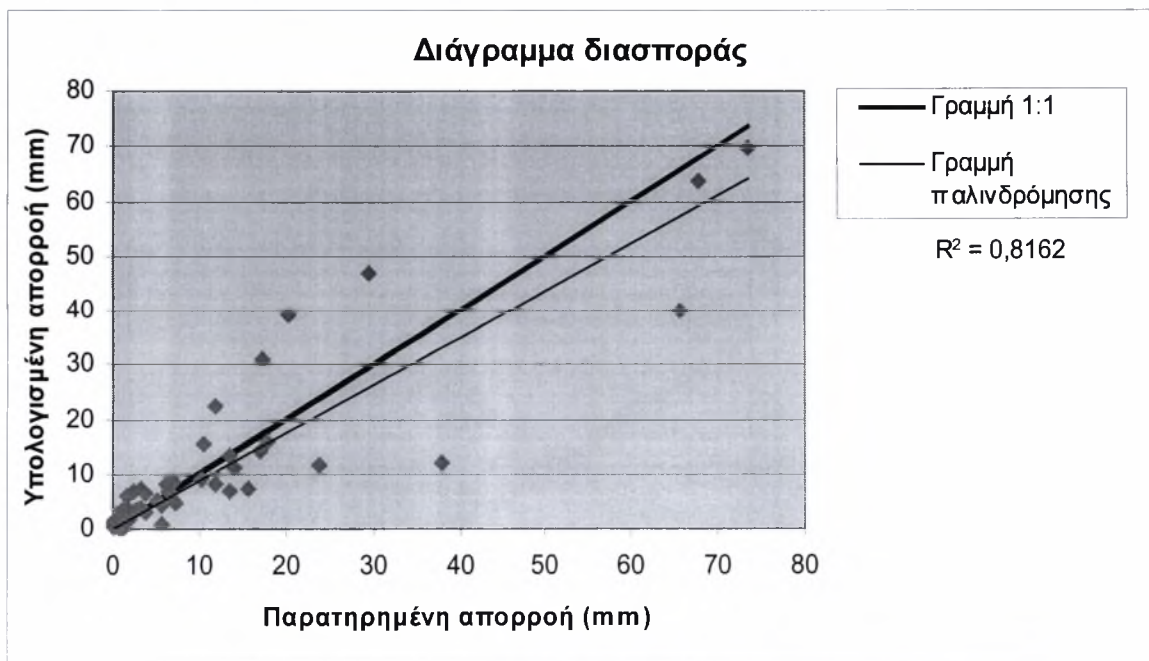


Σχήμα Β.26

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



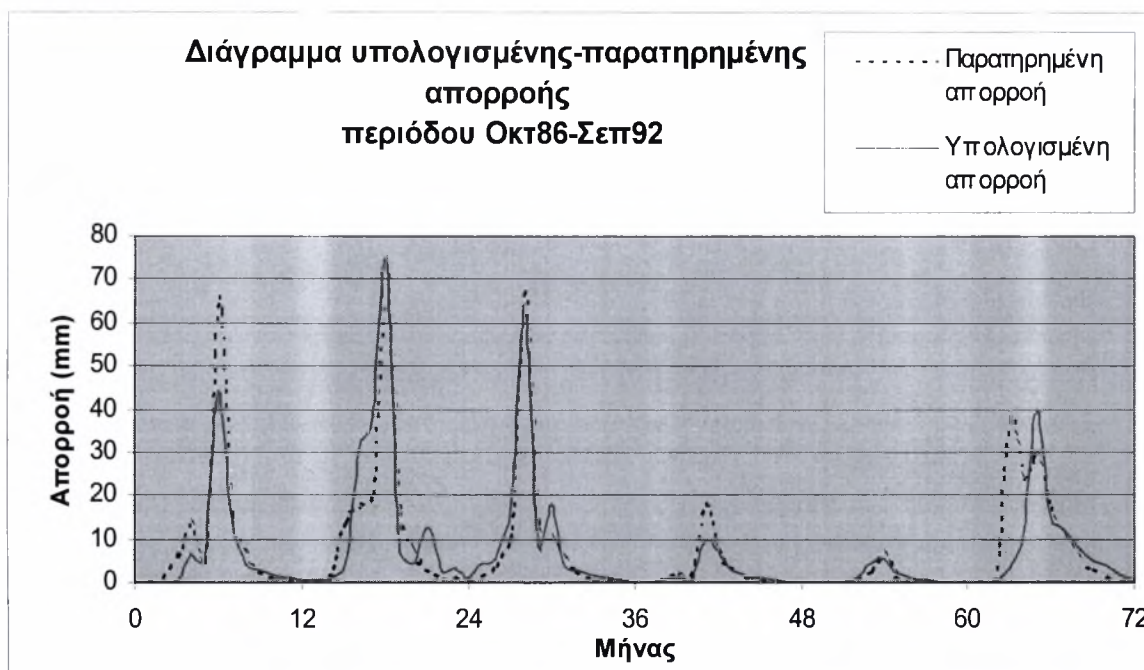
Σχήμα Β.27



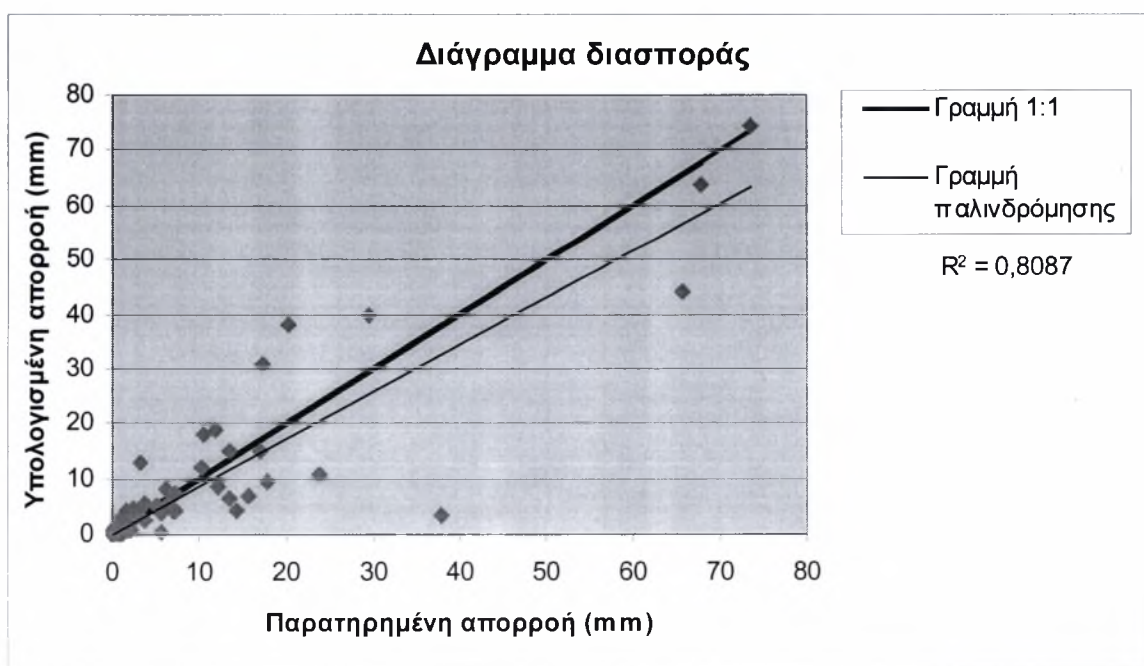
Σχήμα Β.28

B.1.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

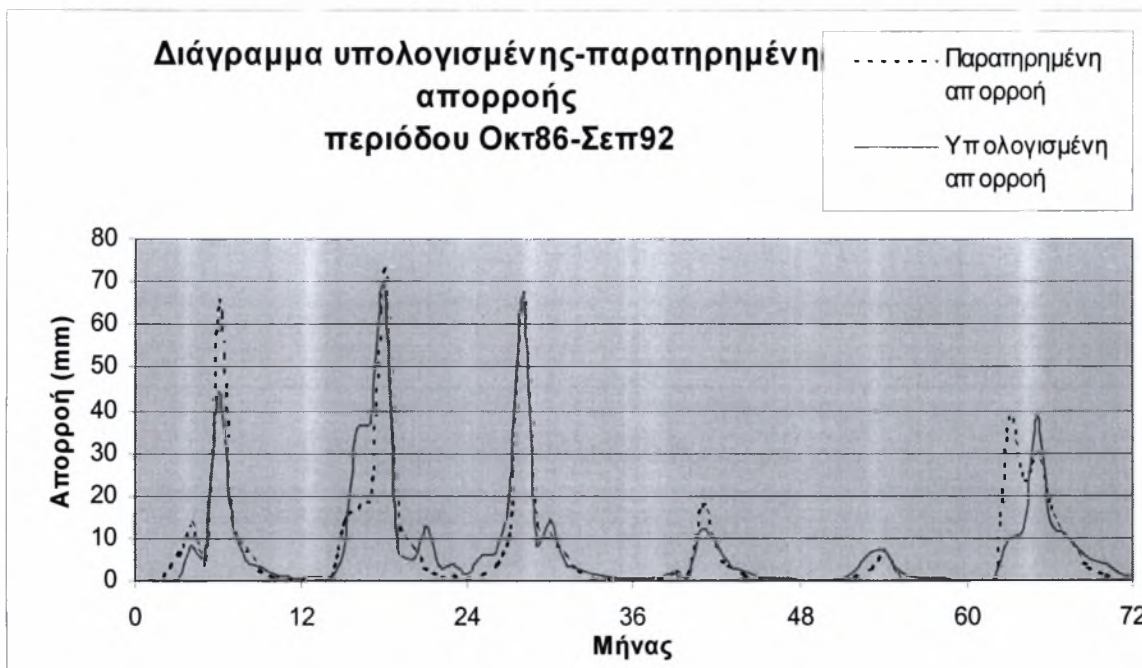


Σχήμα Β.29

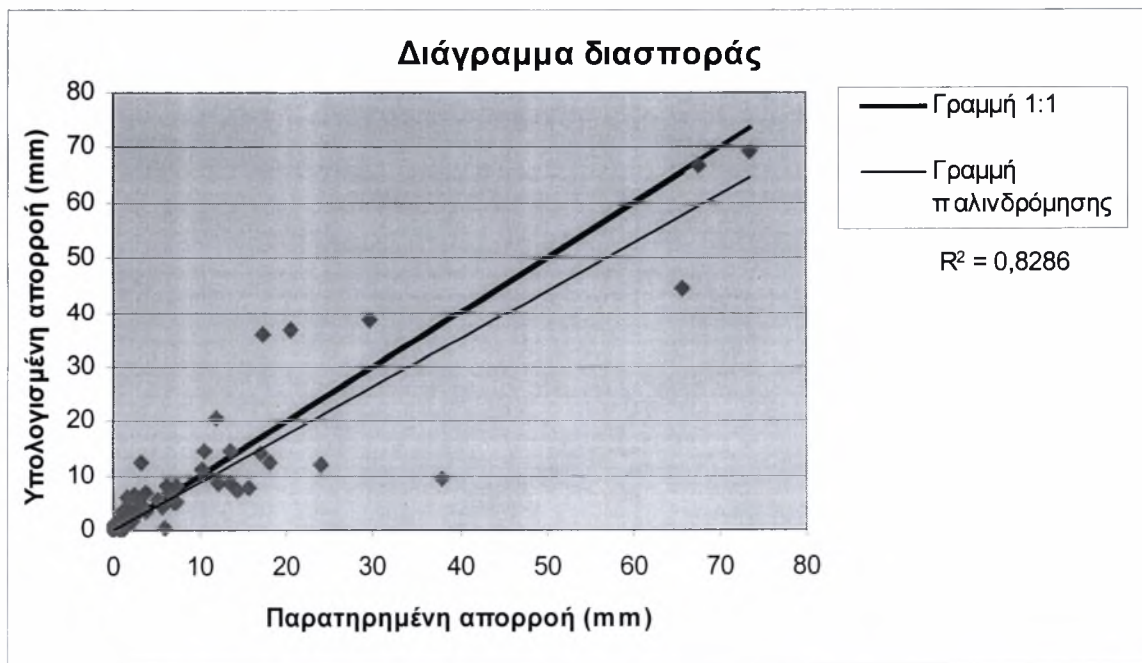


Σχήμα Β.30

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

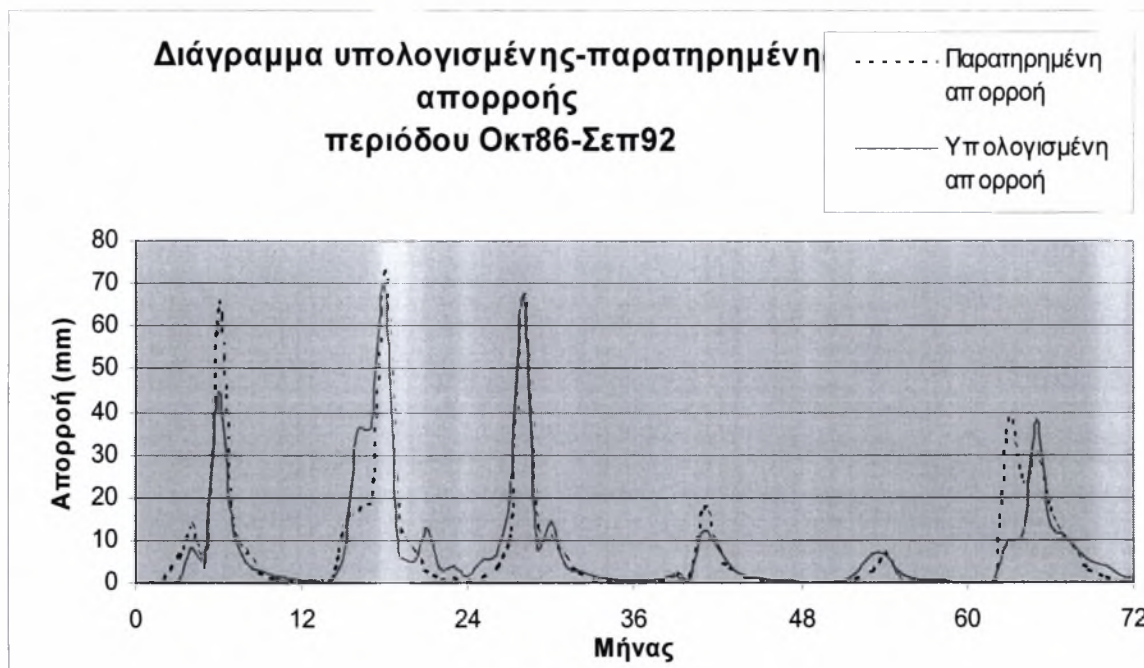


Σχήμα Β.31

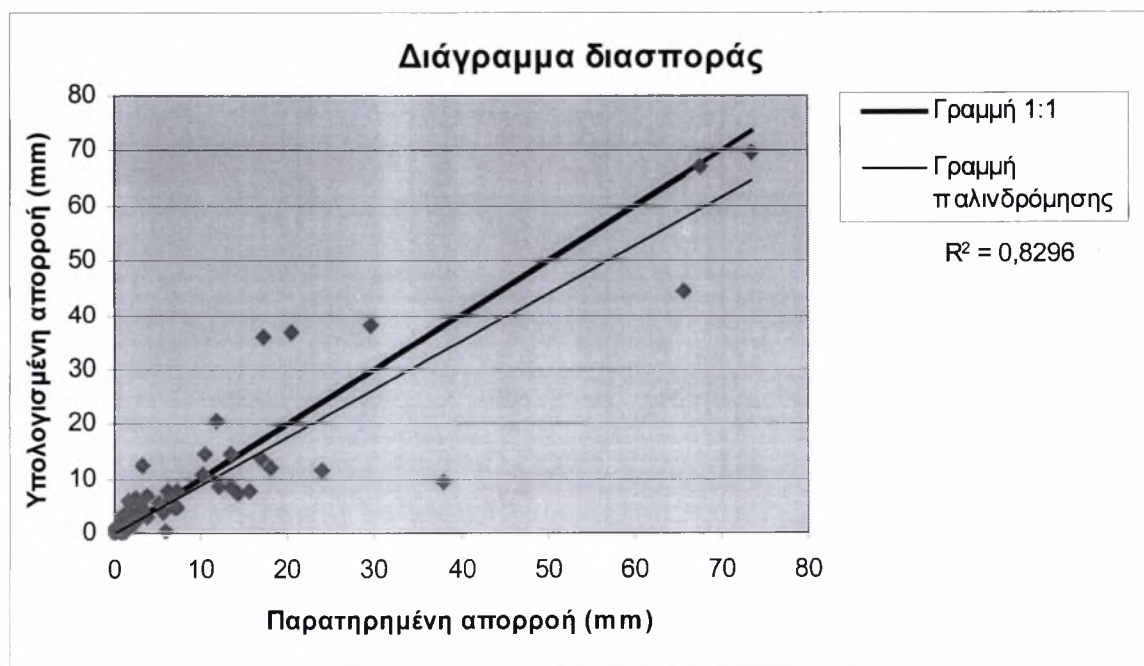


Σχήμα Β.32

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Turc (βροχοβαθμίδα)

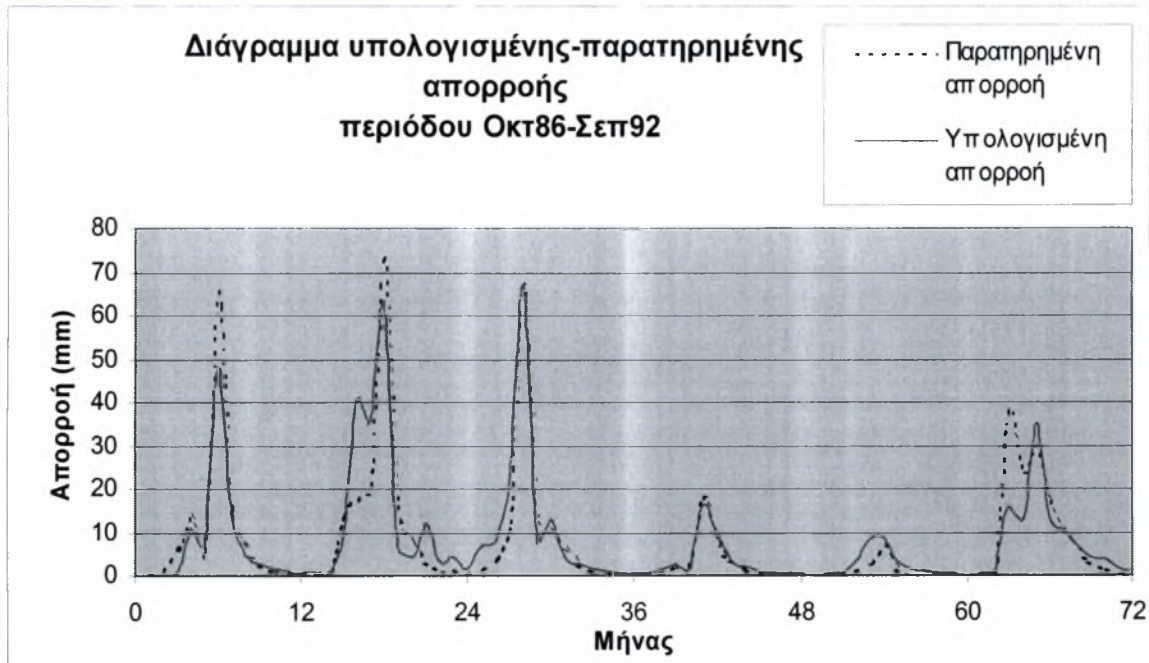


Σχήμα Β.33

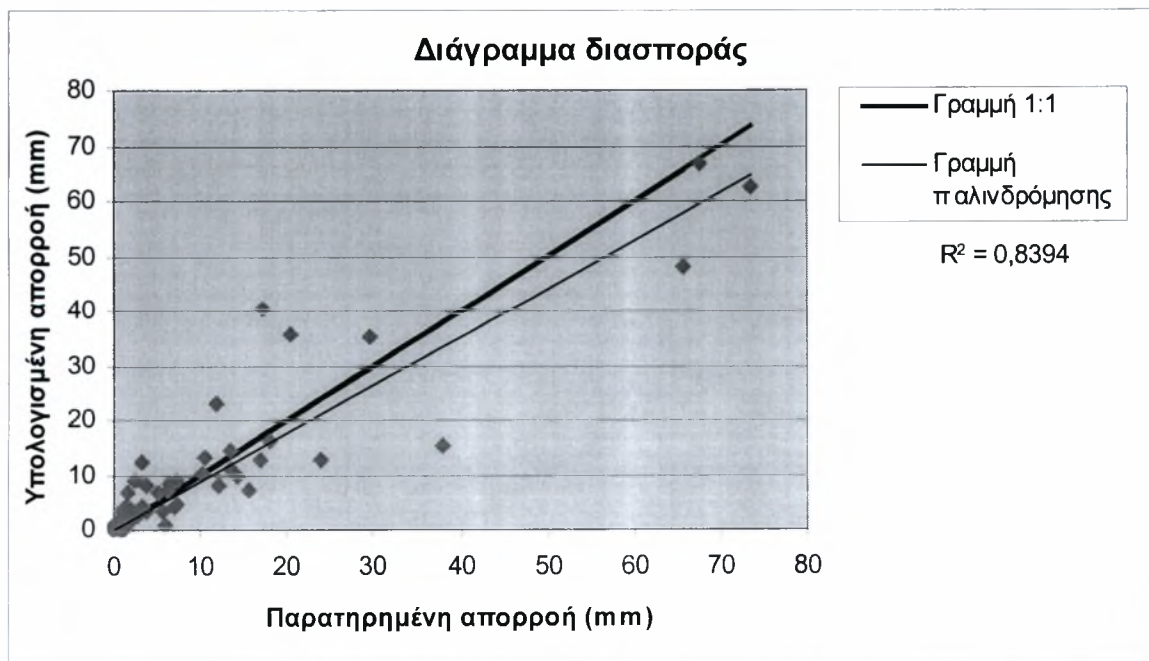


Σχήμα Β.34

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

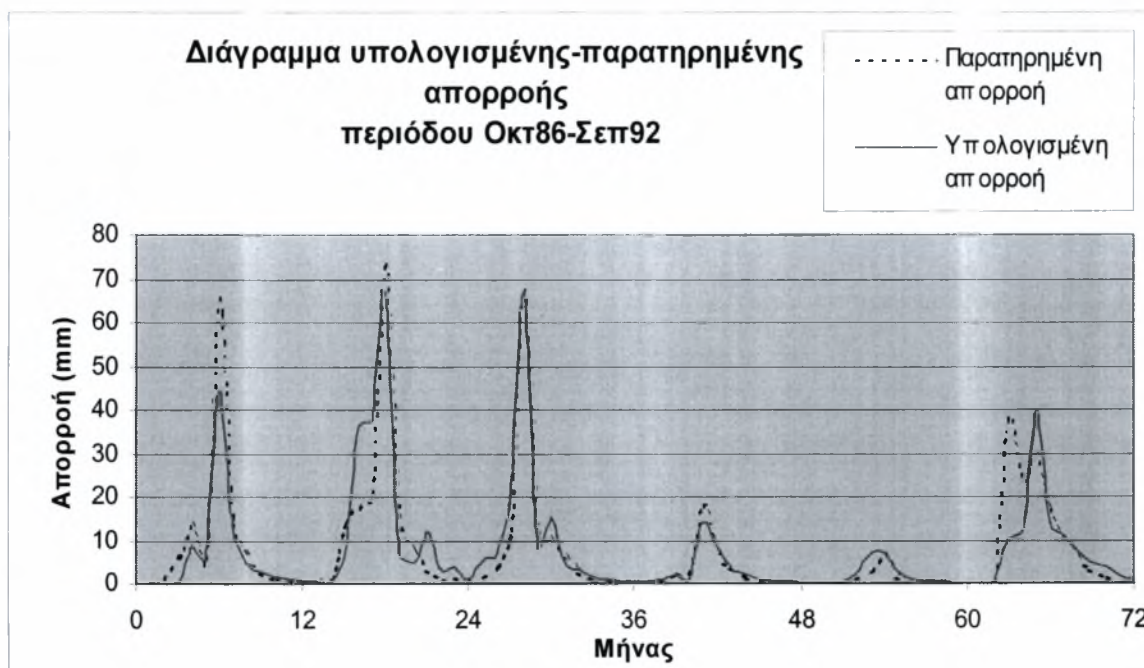


Σχήμα Β.35

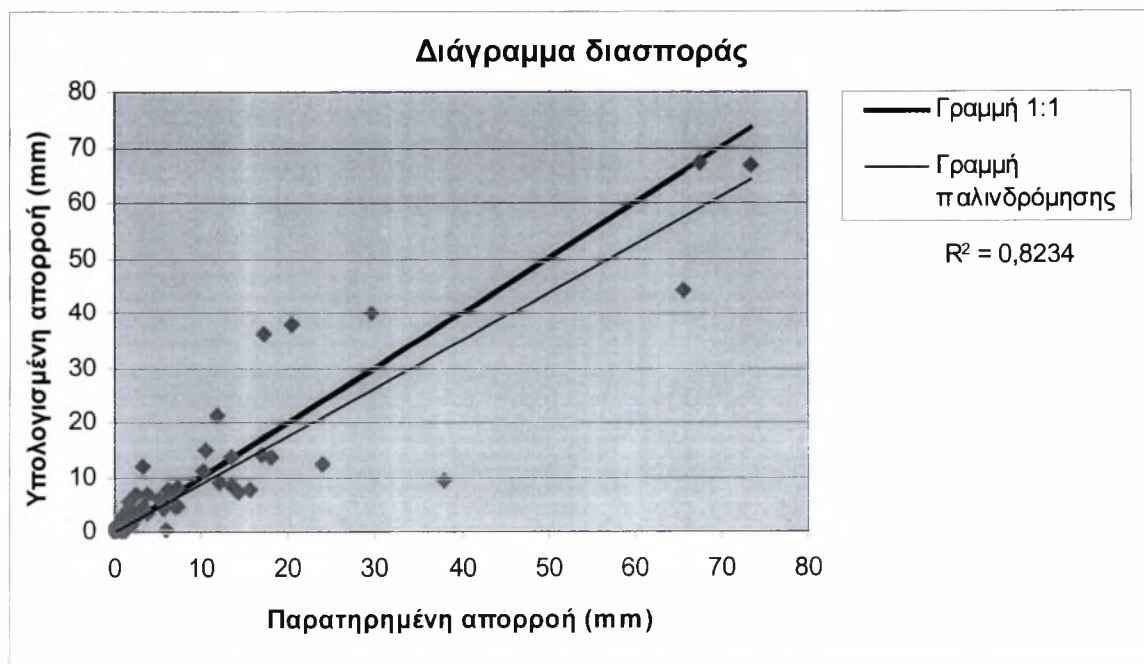


Σχήμα Β.36

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

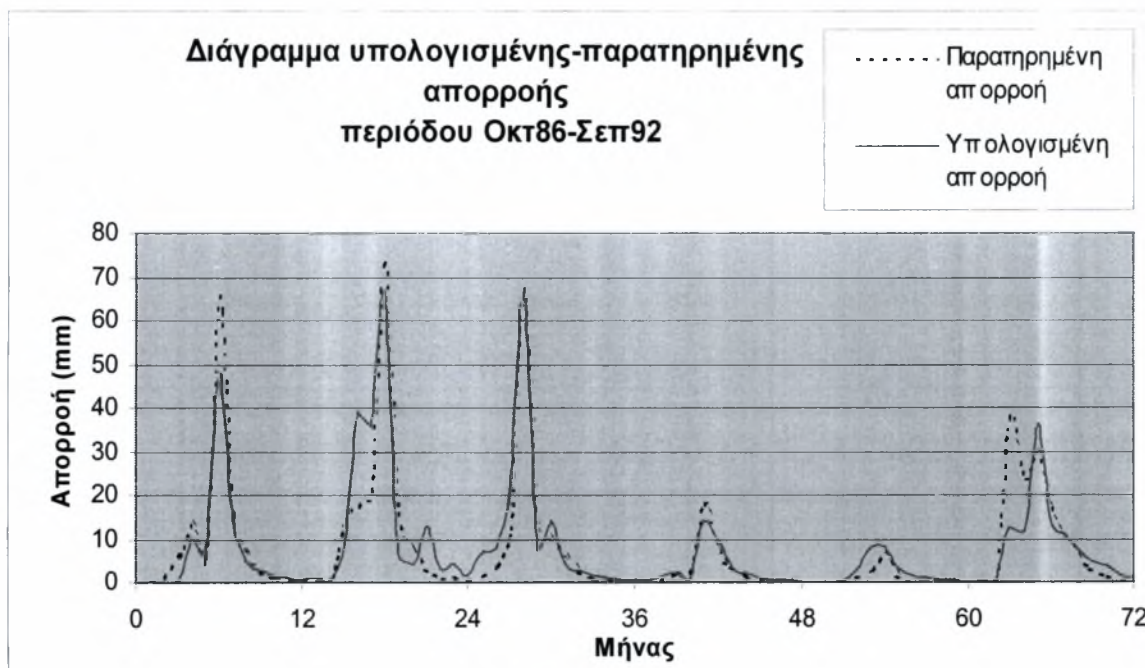


Σχήμα Β.37

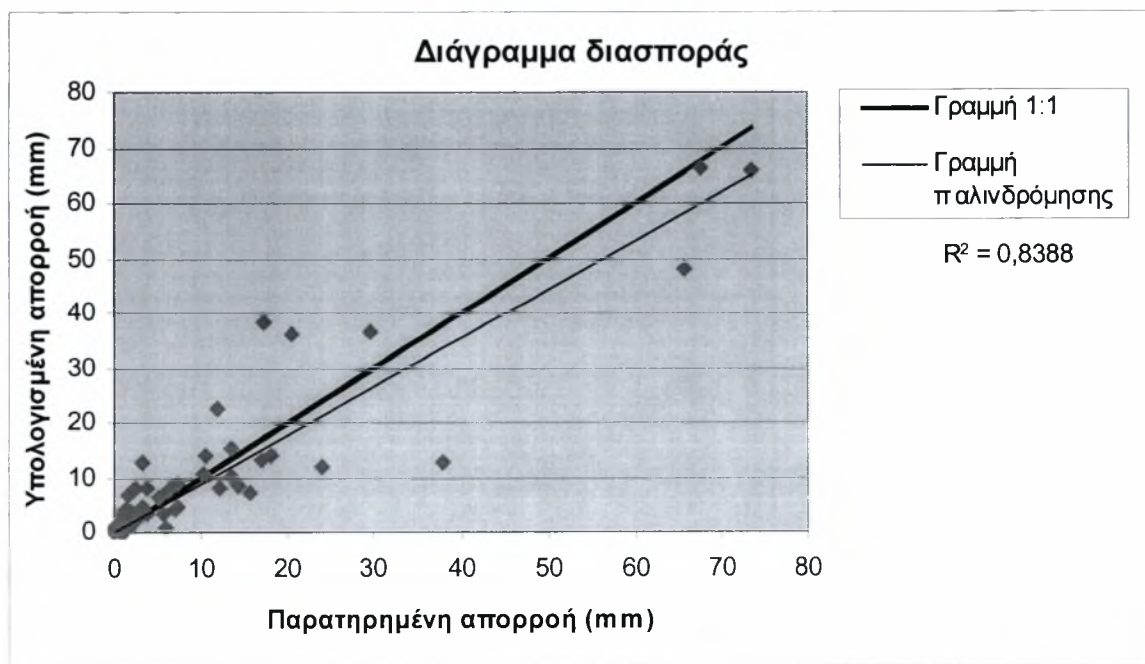


Σχήμα Β.38

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

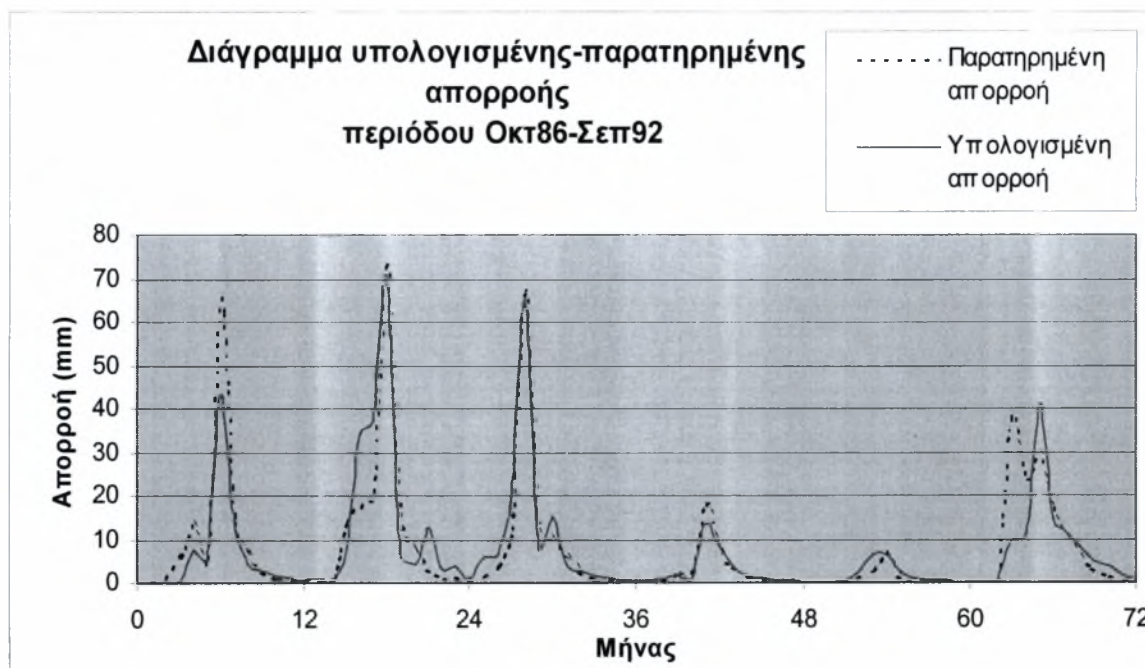


Σχήμα Β.39

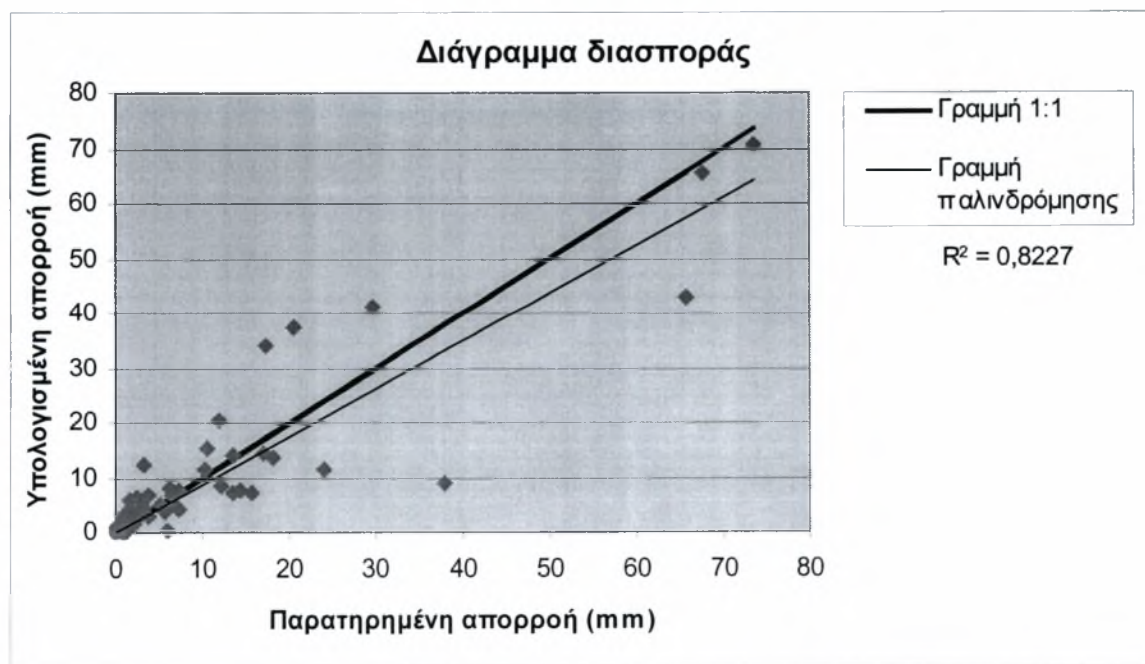


Σχήμα Β.40

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Β.41

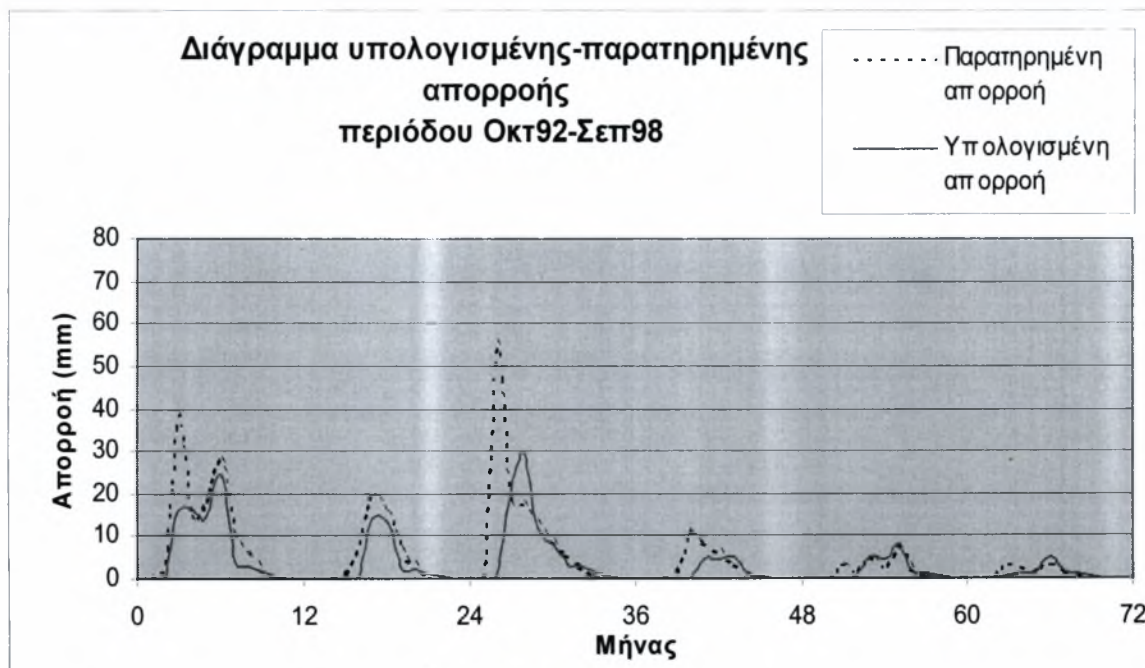


Σχήμα Β.42

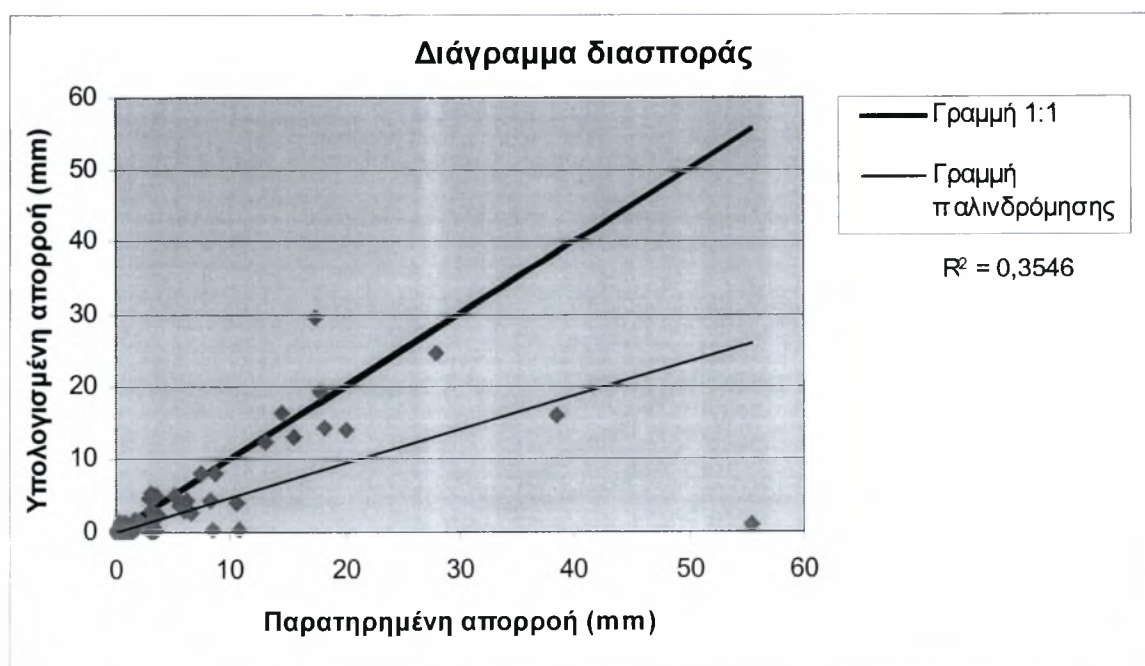
B.2 Πιστοποίηση μοντέλου Abulohom περιόδου Οκτ1992-Σεπ1998

B.2.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξαμισοδιαπνοής: Thornthwaite

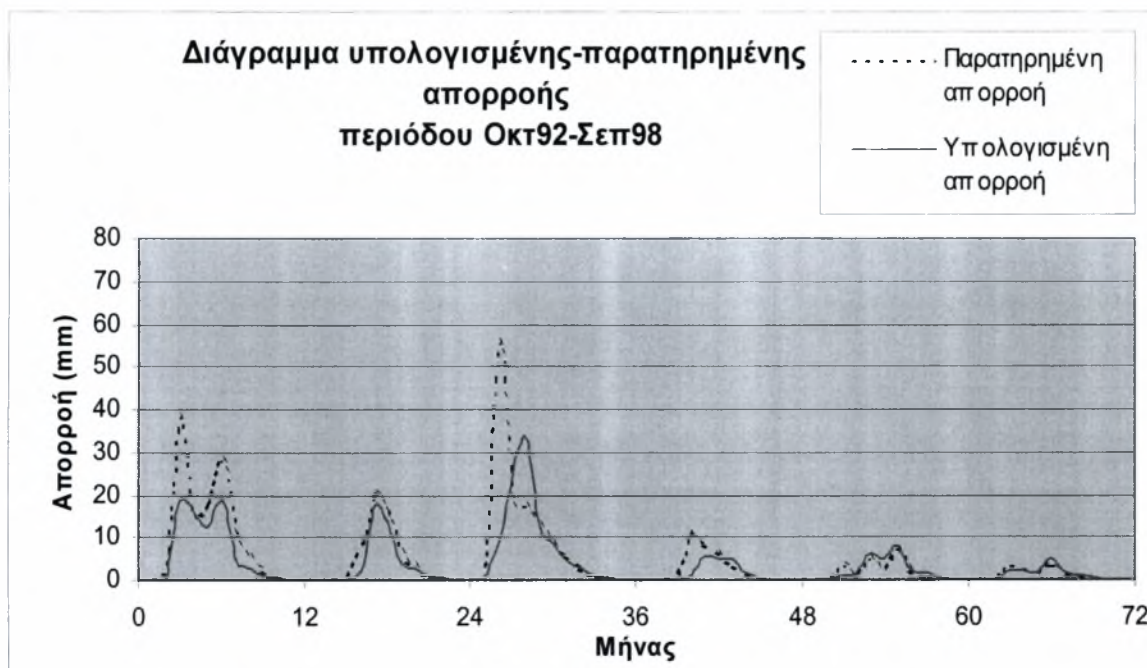


Σχήμα Β.43

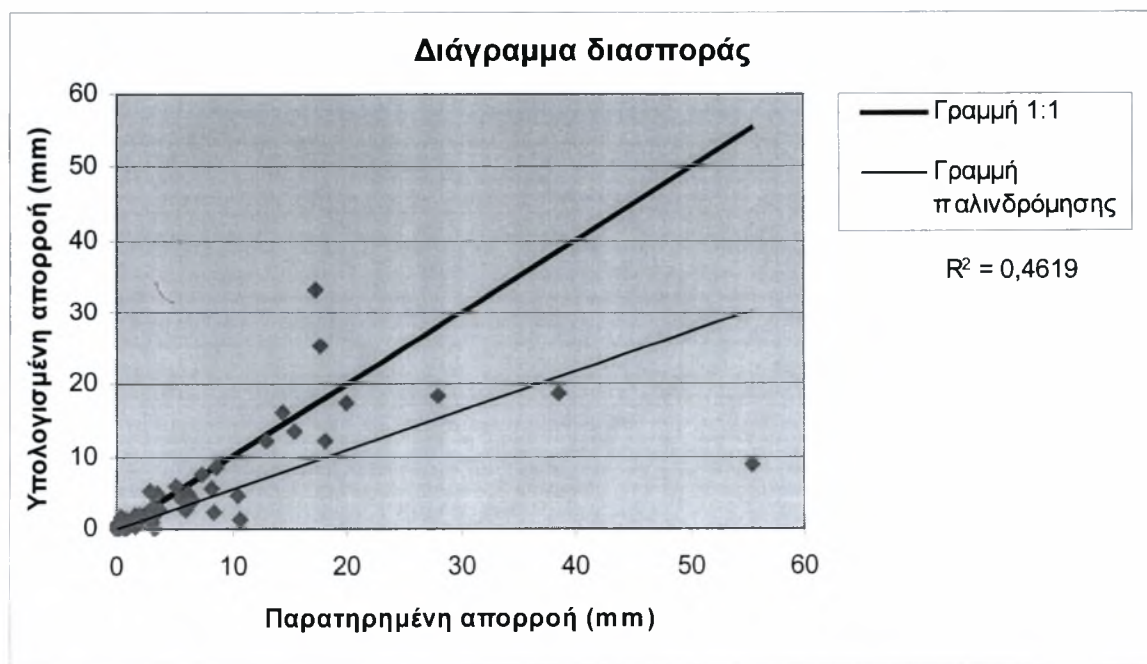


Σχήμα Β.44

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

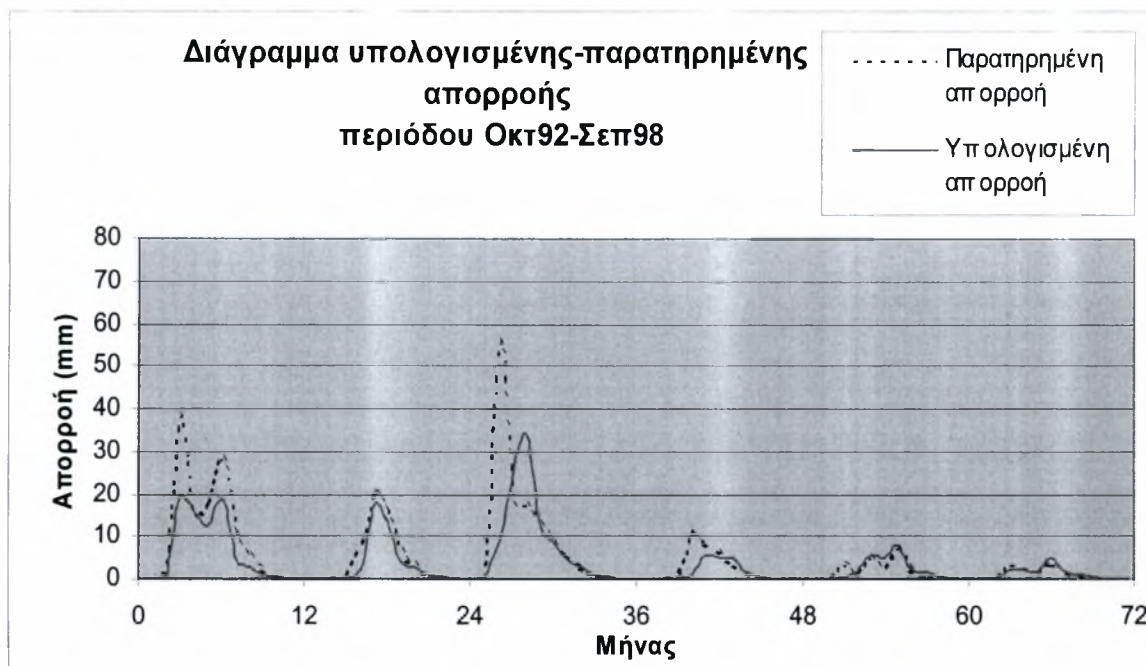


Σχήμα Β.45

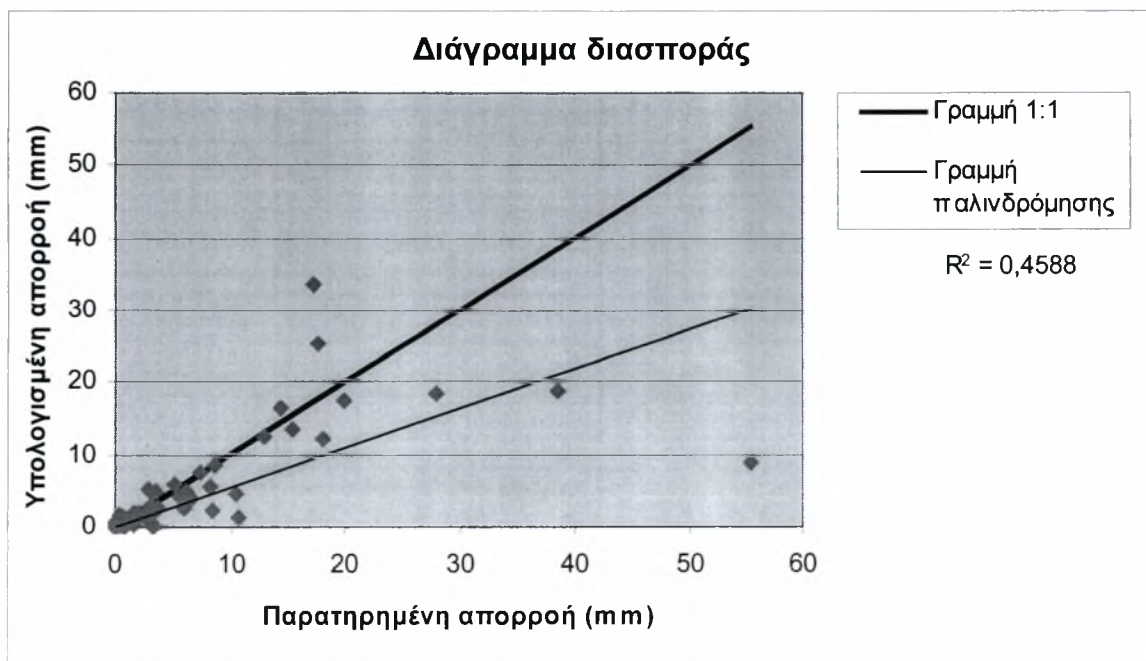


Σχήμα Β.46

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

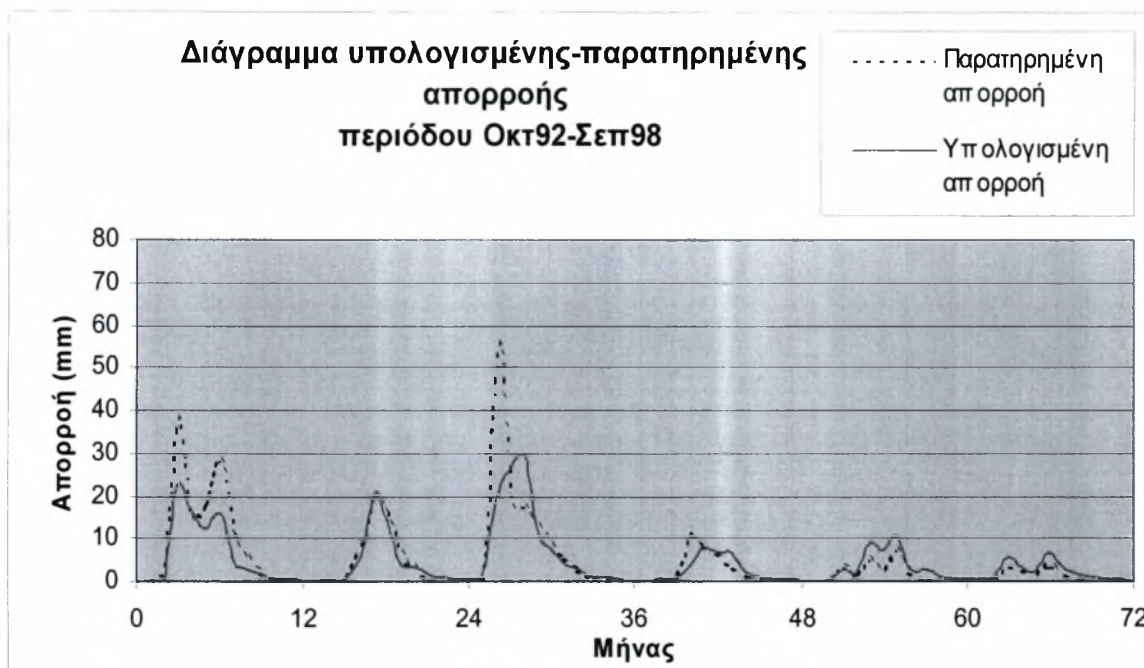


Σχήμα Β.47

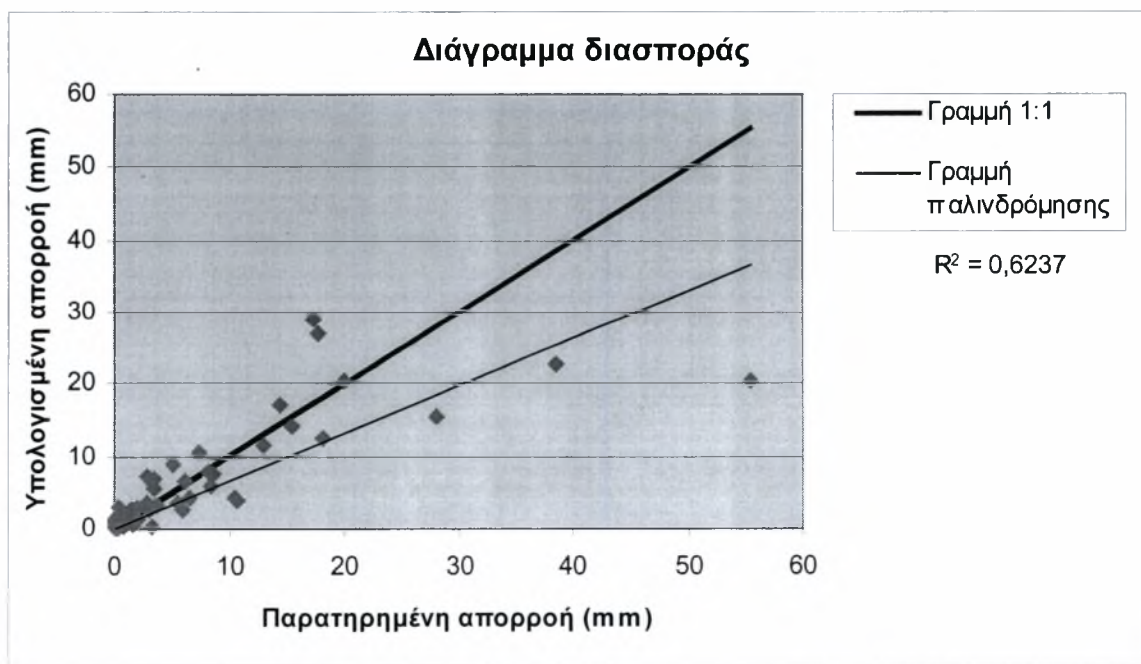


Σχήμα Β.48

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

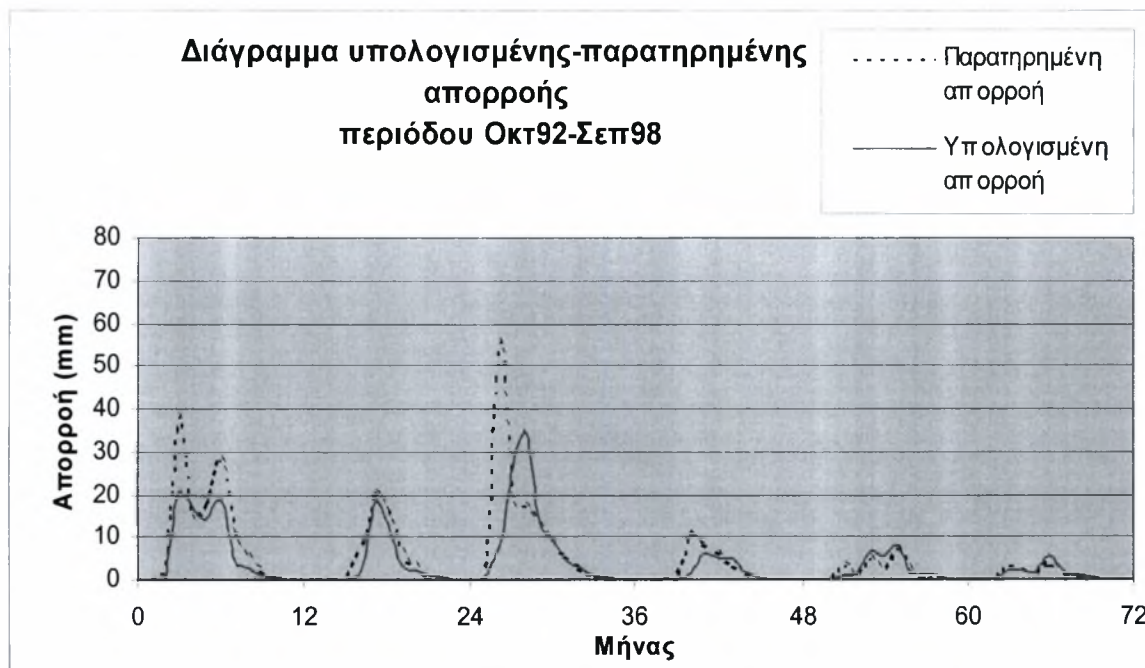


Σχήμα Β.49

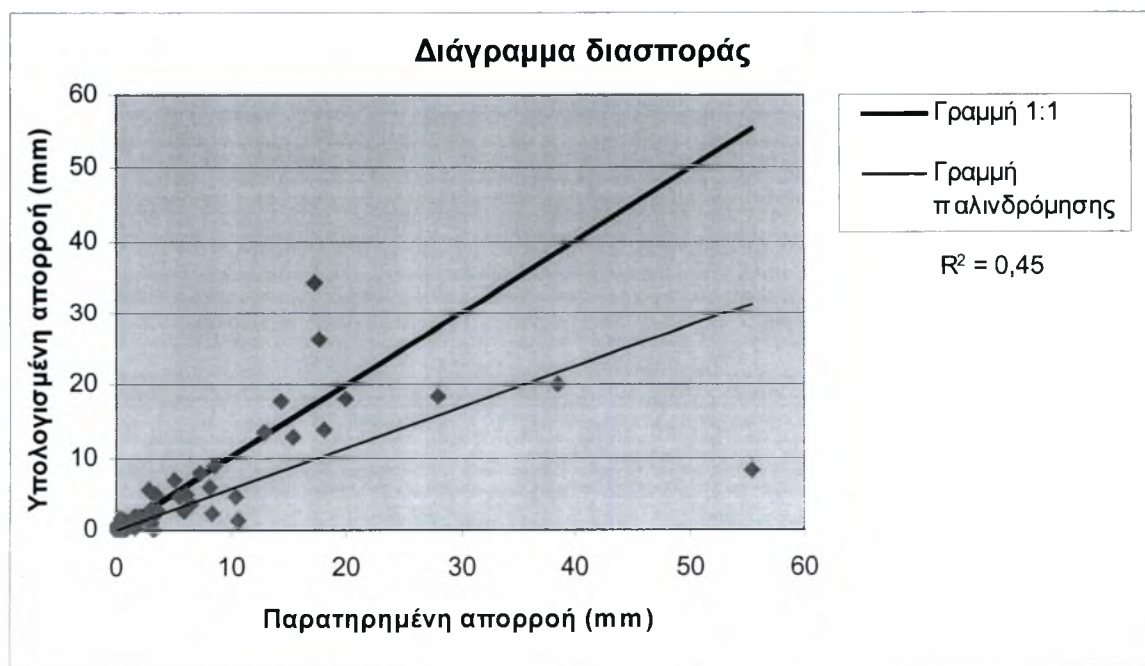


Σχήμα Β.50

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

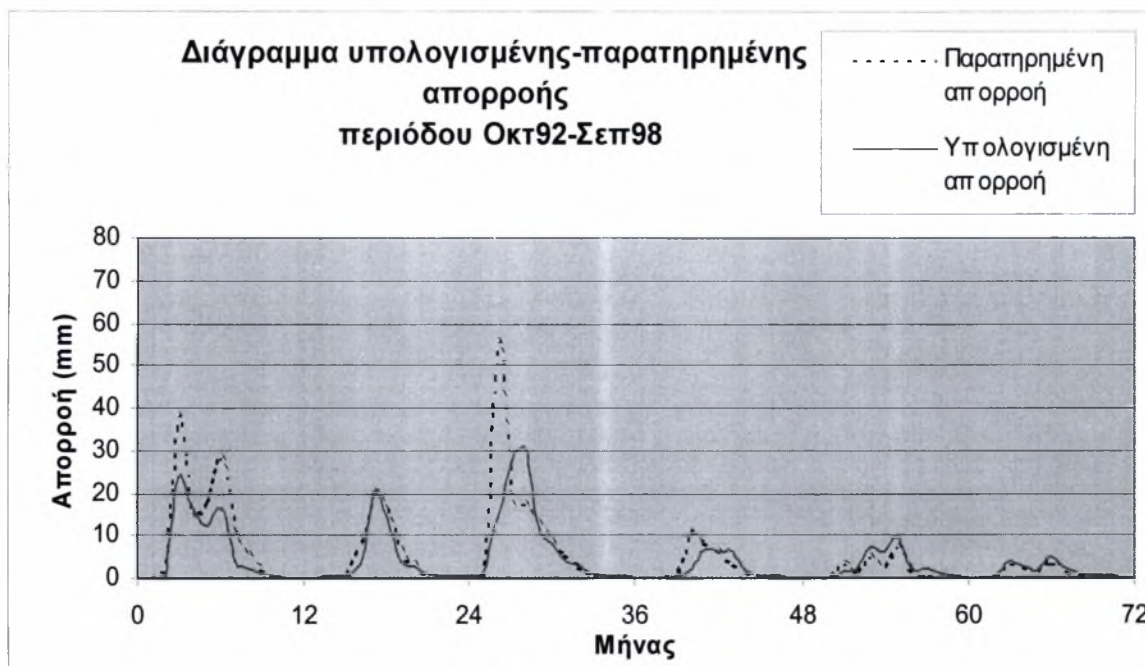


Σχήμα Β.51

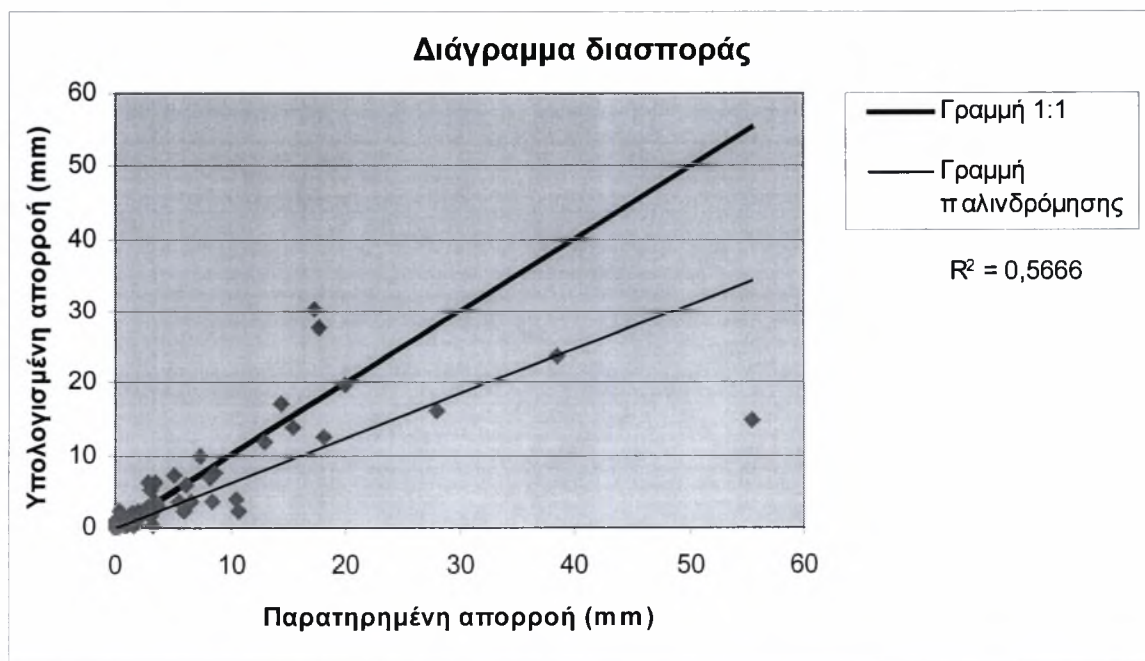


Σχήμα Β.52

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

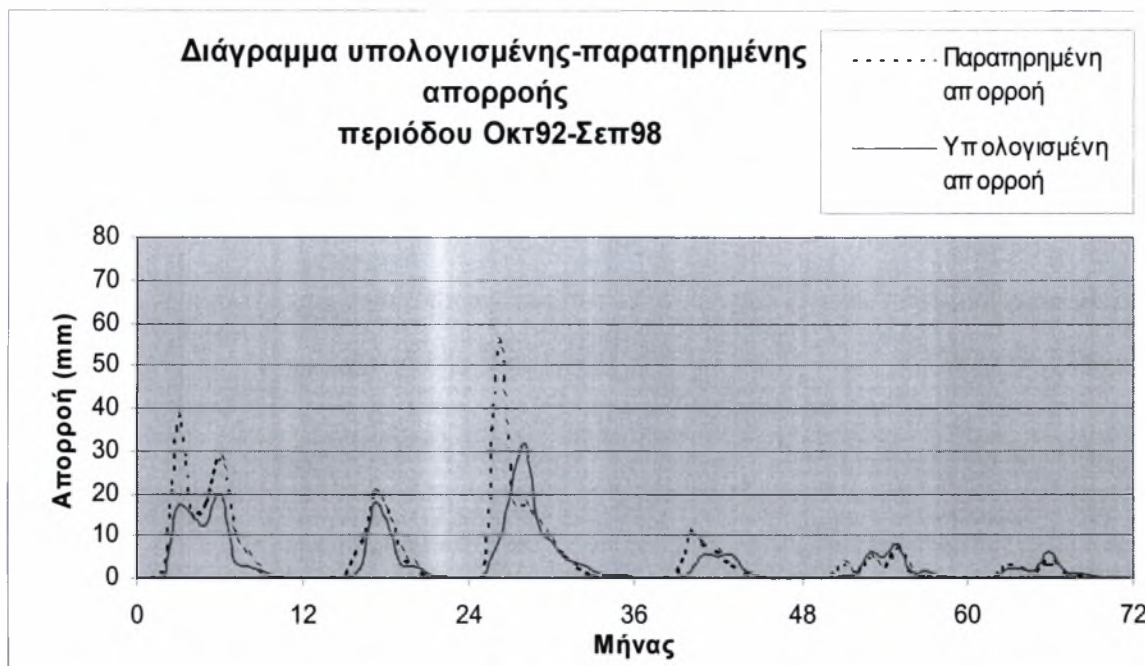


Σχήμα Β.53

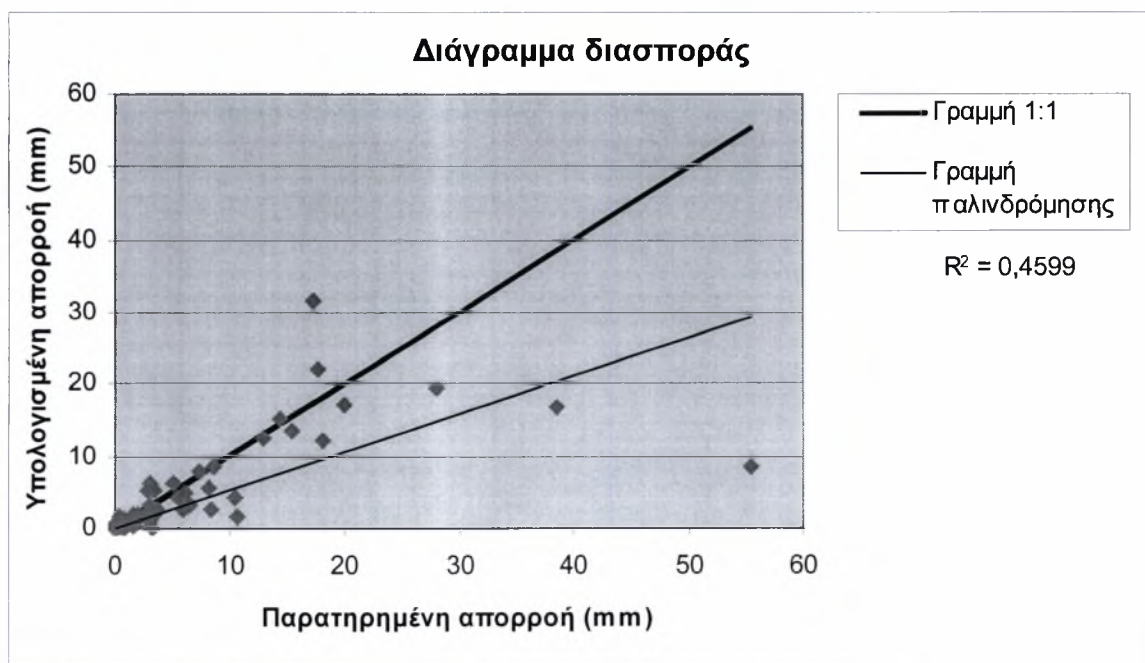


Σχήμα Β.54

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



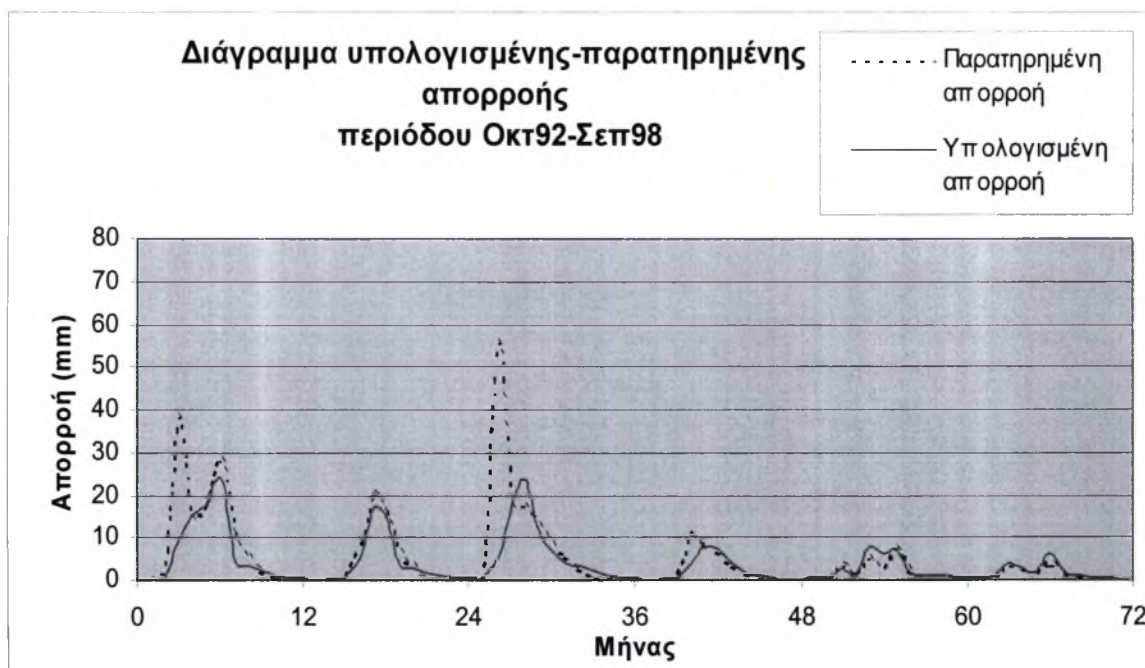
Σχήμα Β.55



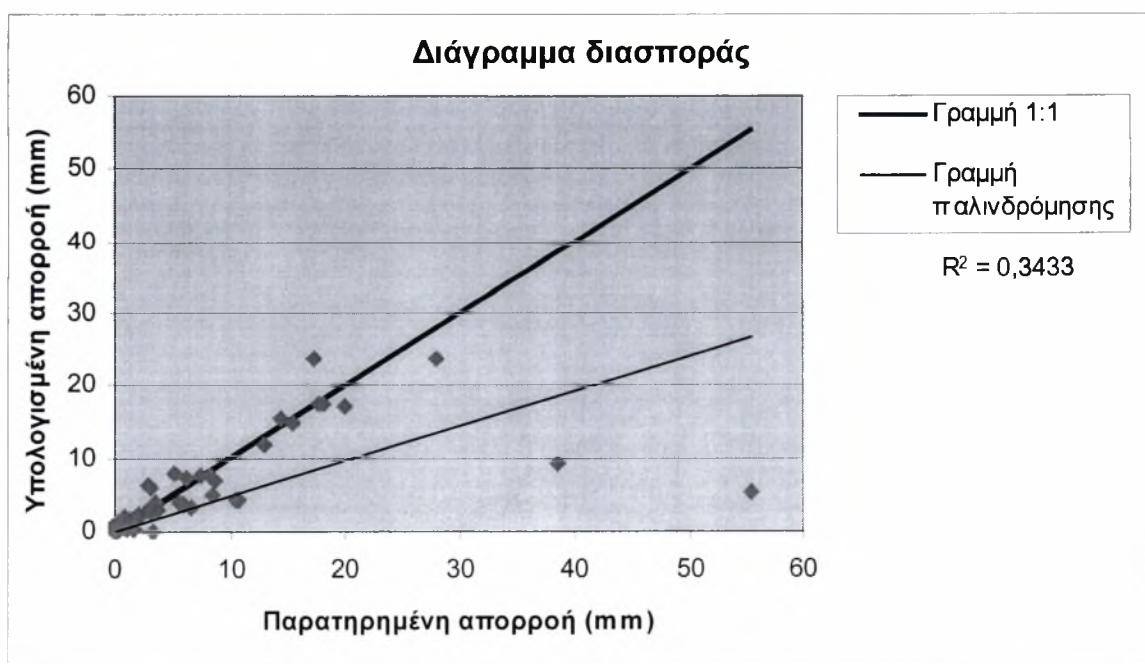
Σχήμα Β.56

B.2.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

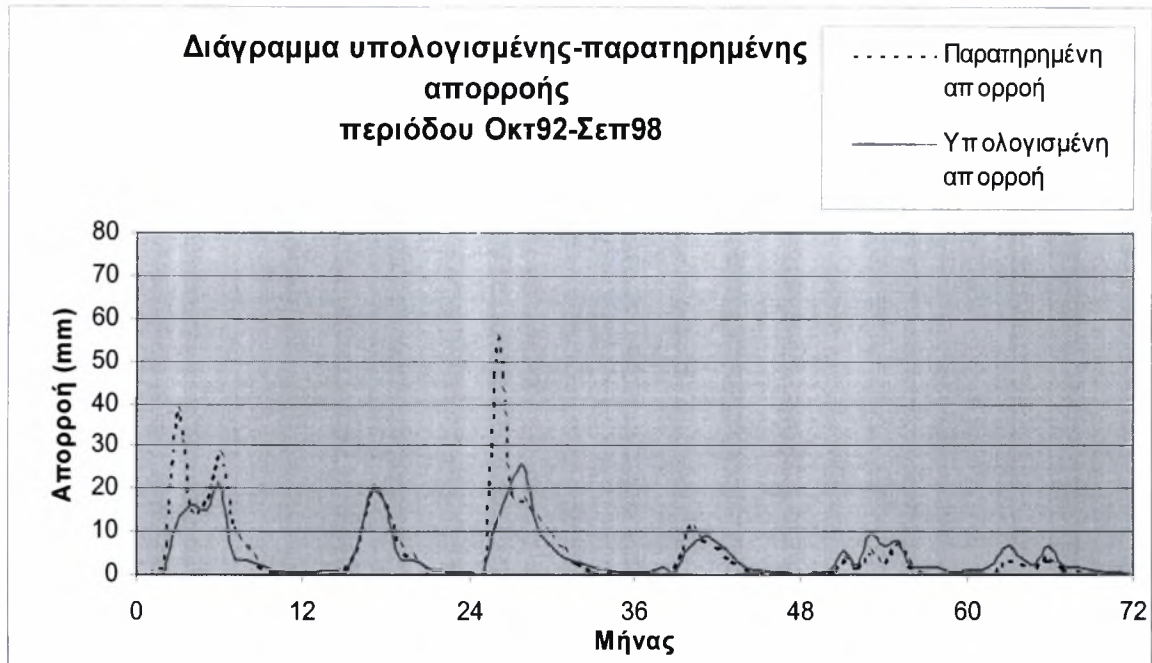


Σχήμα Β.57

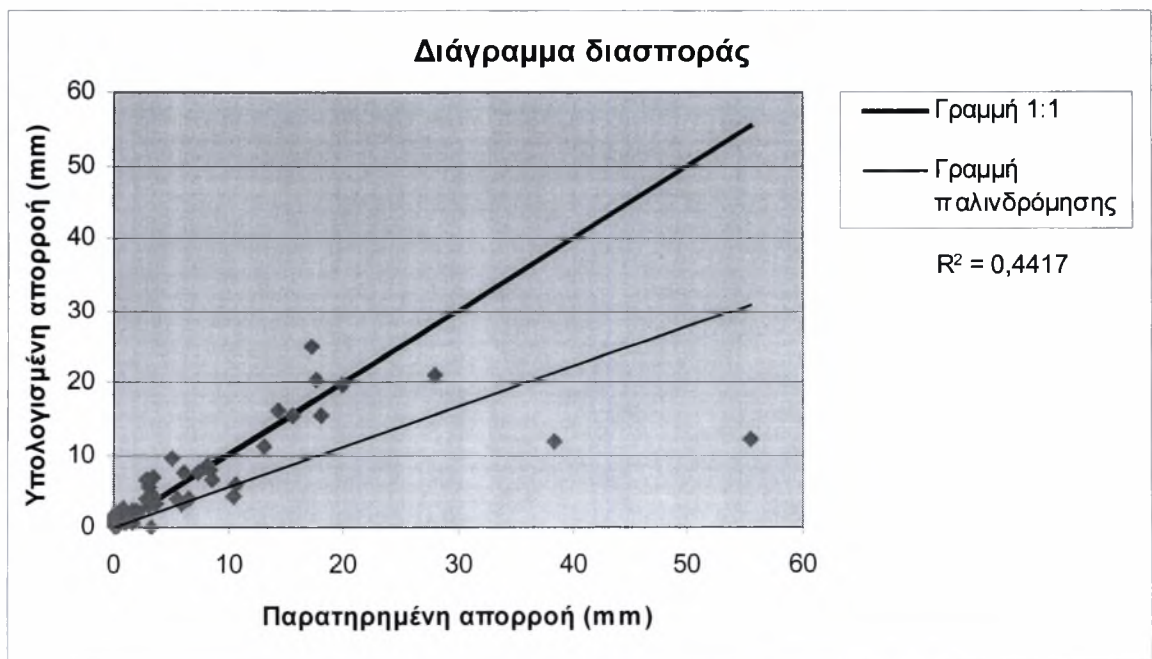


Σχήμα Β.58

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

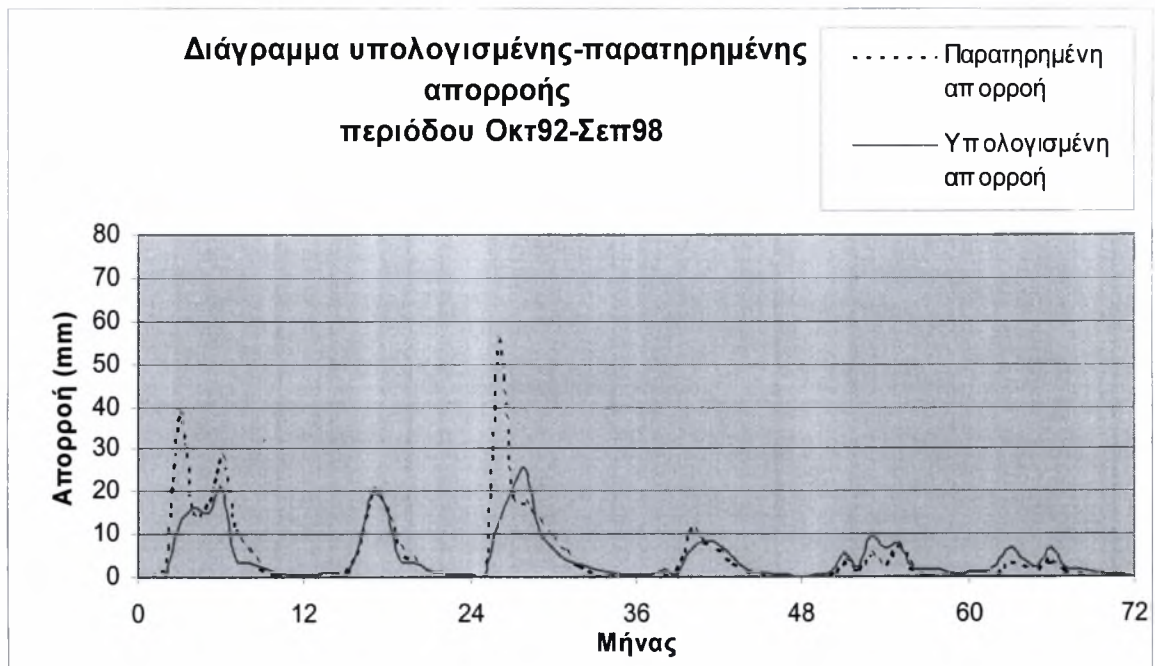


Σχήμα Β.59

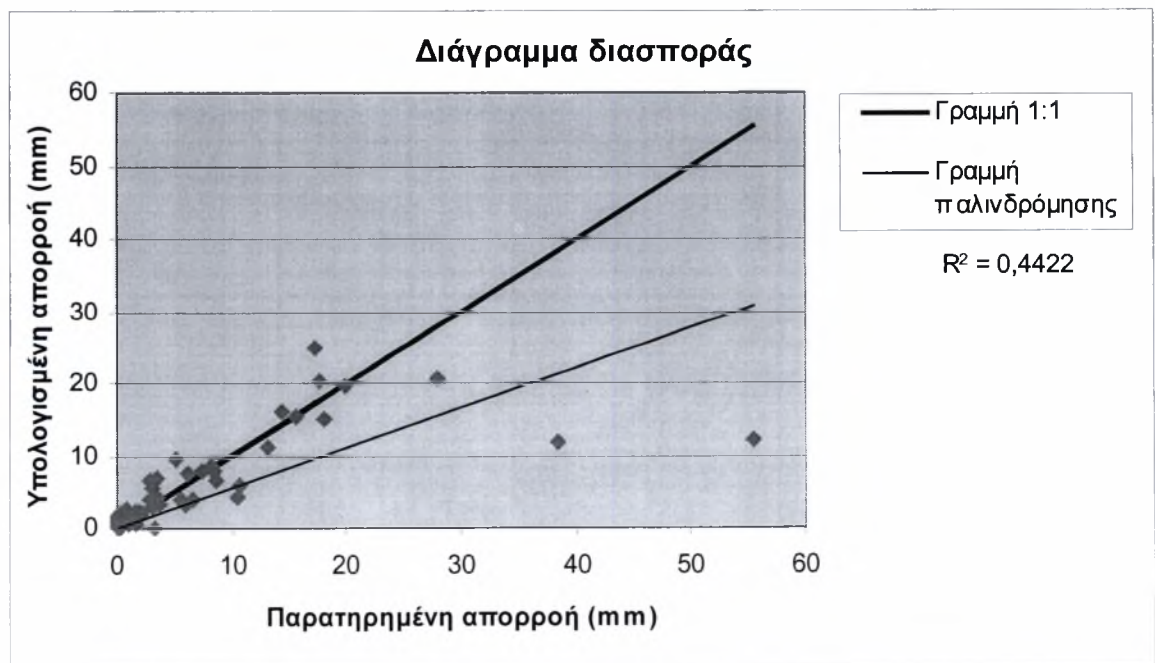


Σχήμα Β.60

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

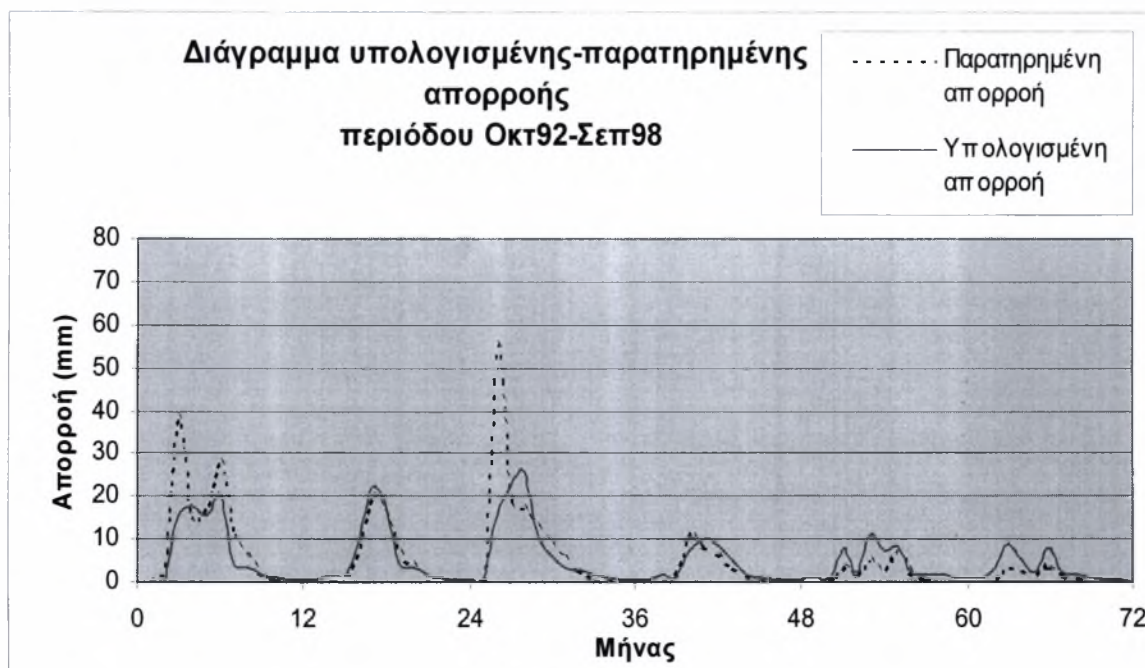


Σχήμα Β.61

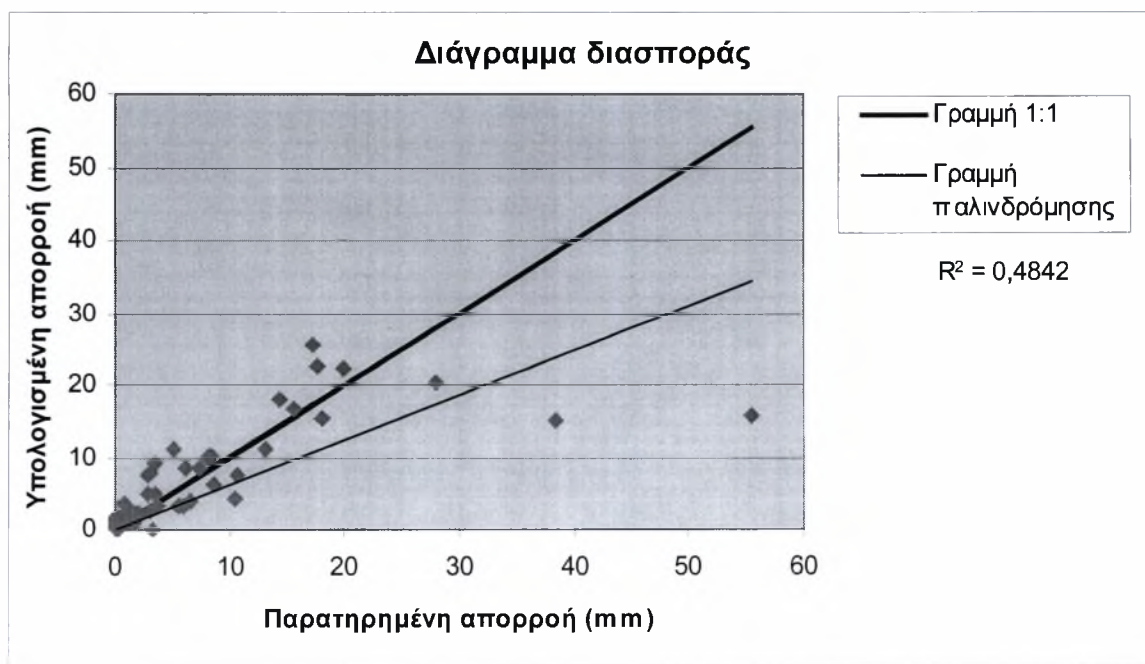


Σχήμα Β.62

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

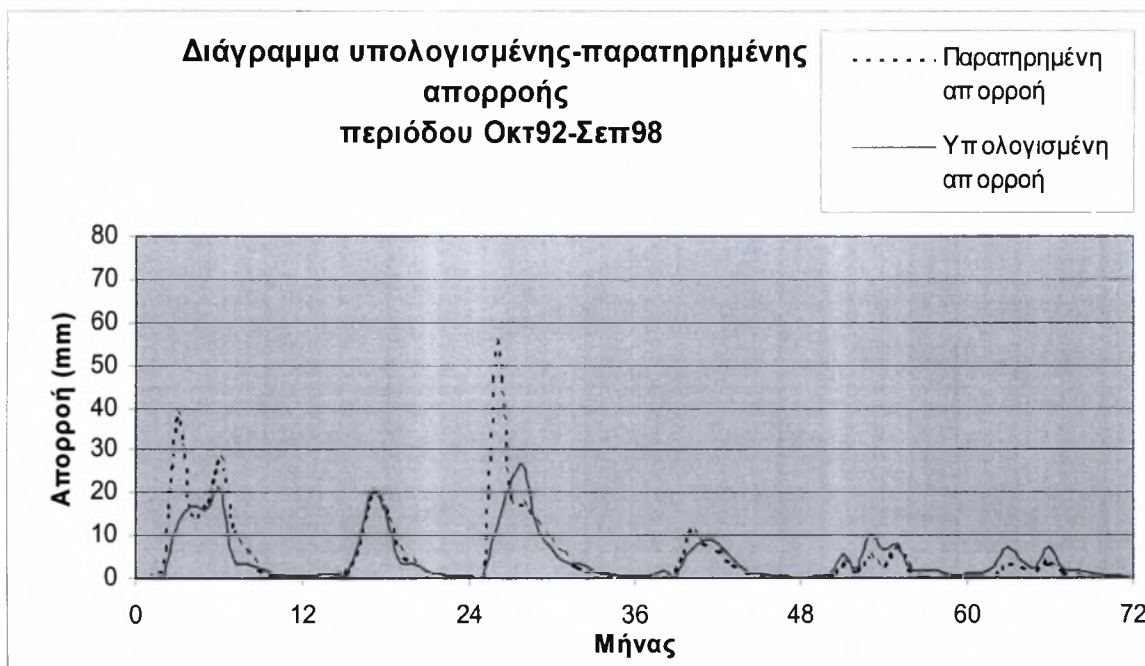


Σχήμα Β.63

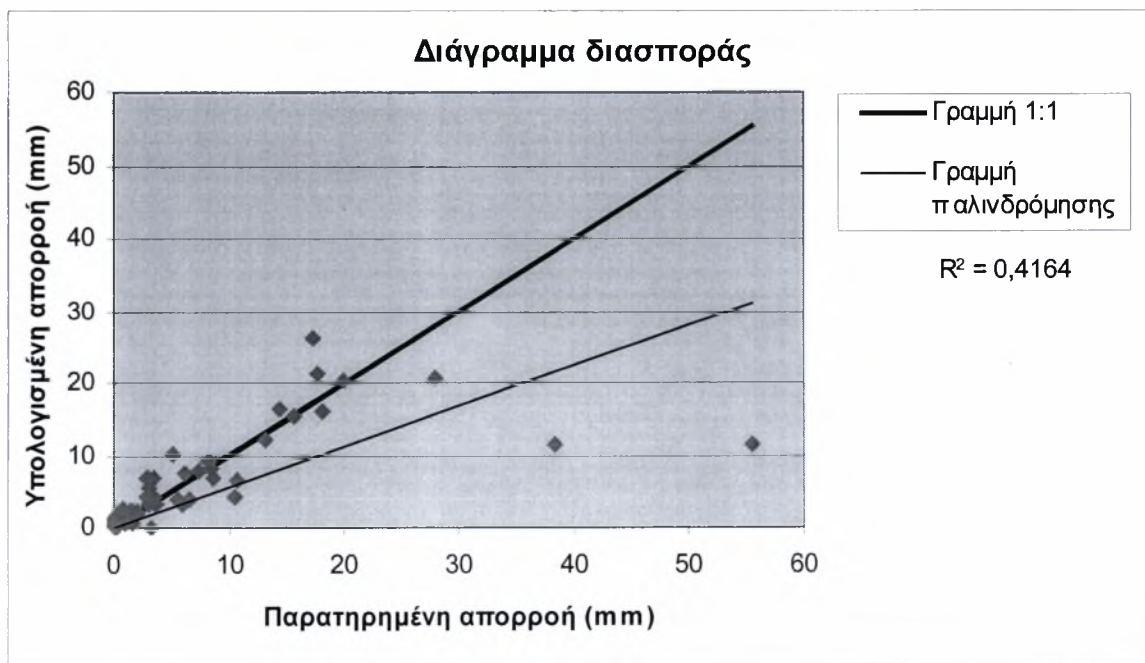


Σχήμα Β.64

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

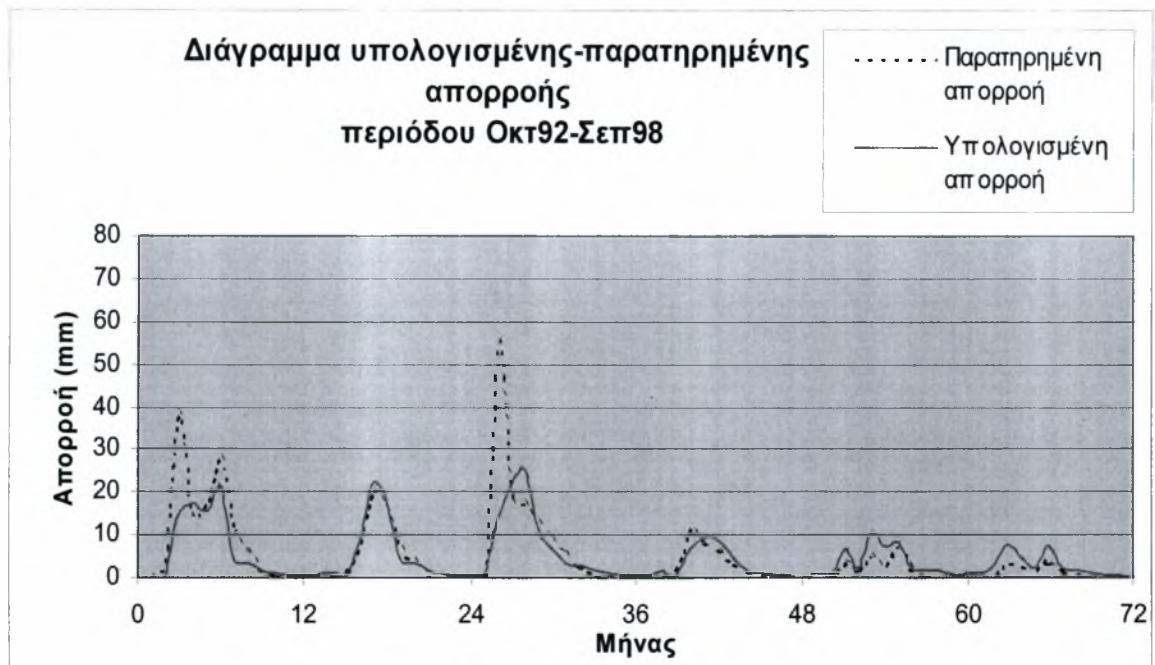


Σχήμα Β.65

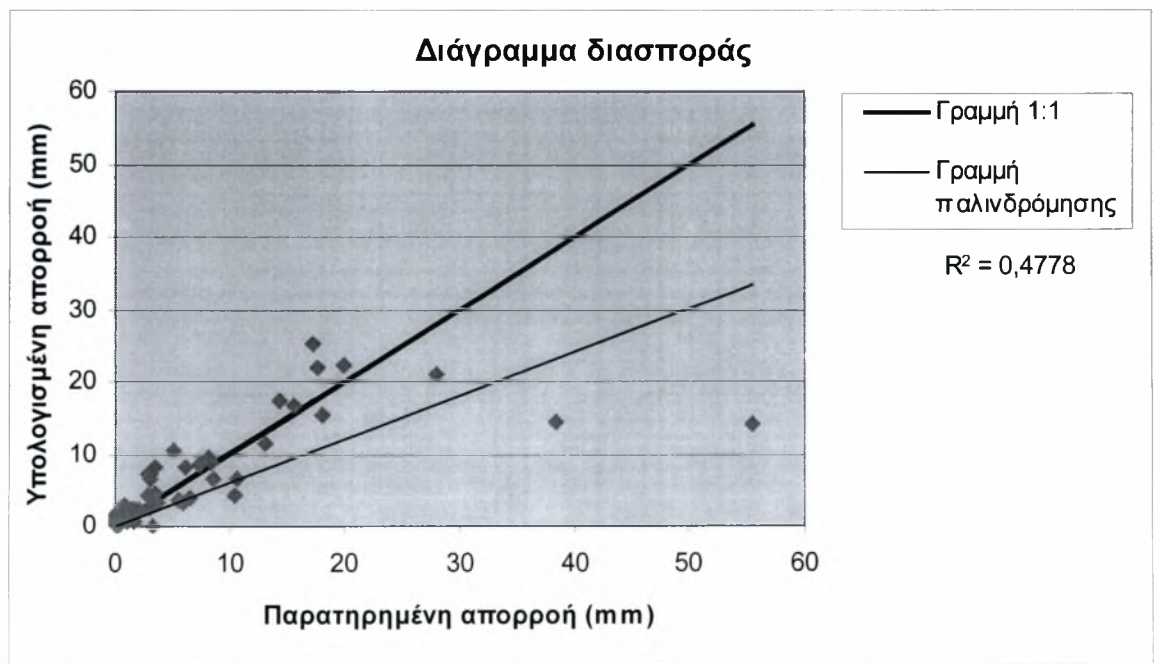


Σχήμα Β.66

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

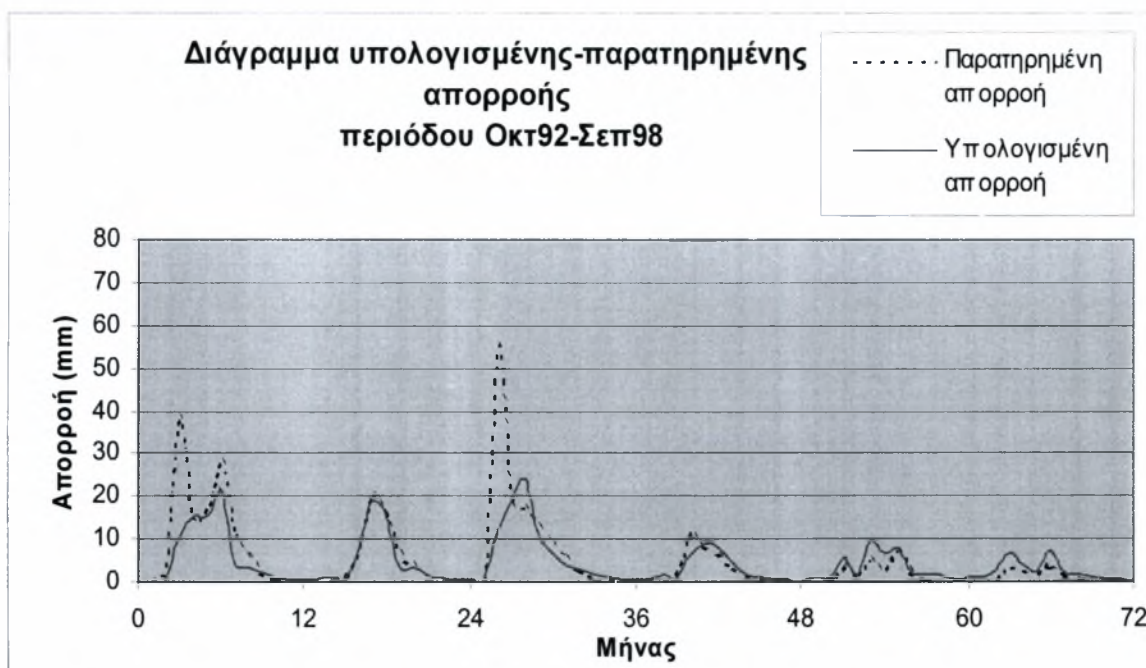


Σχήμα Β.67

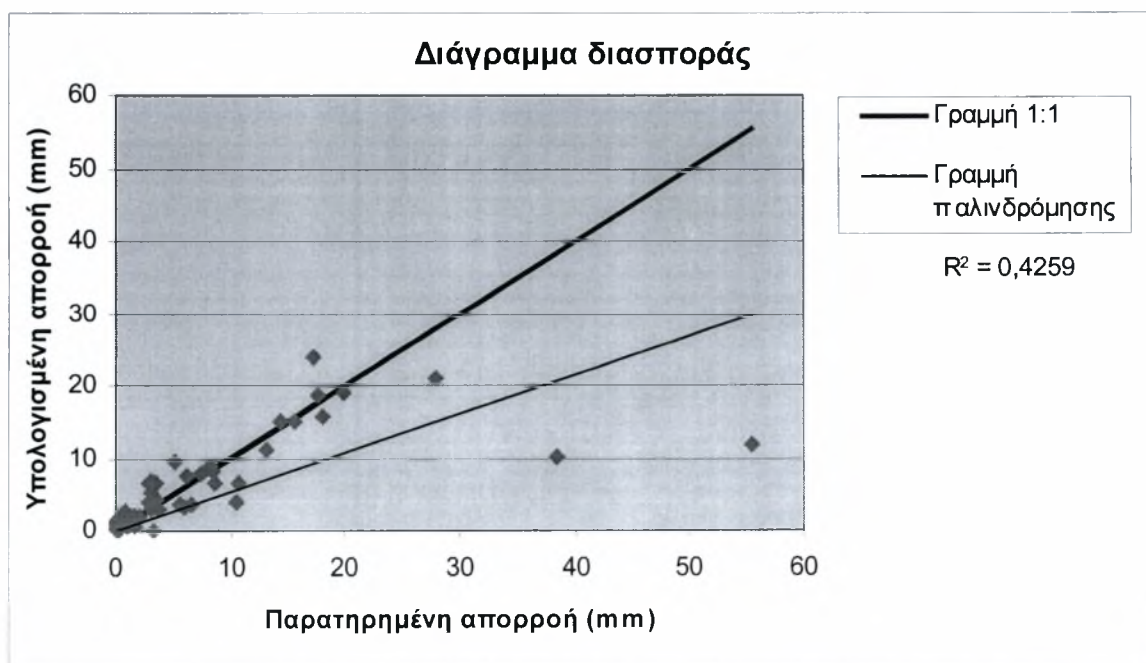


Σχήμα Β.68

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



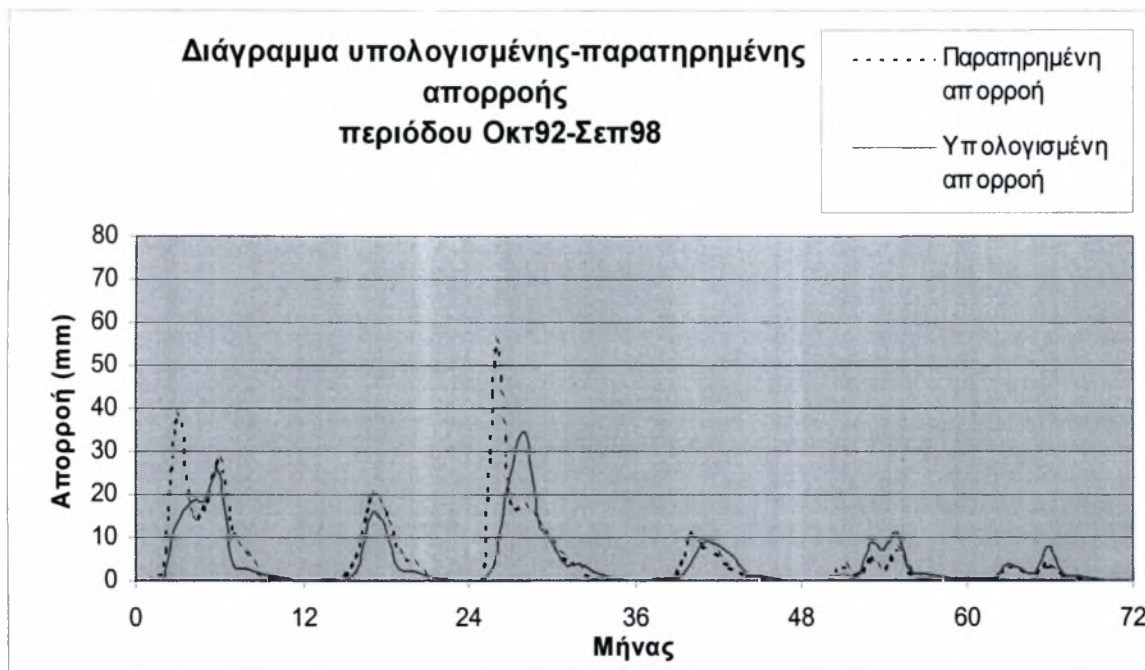
Σχήμα Β.69



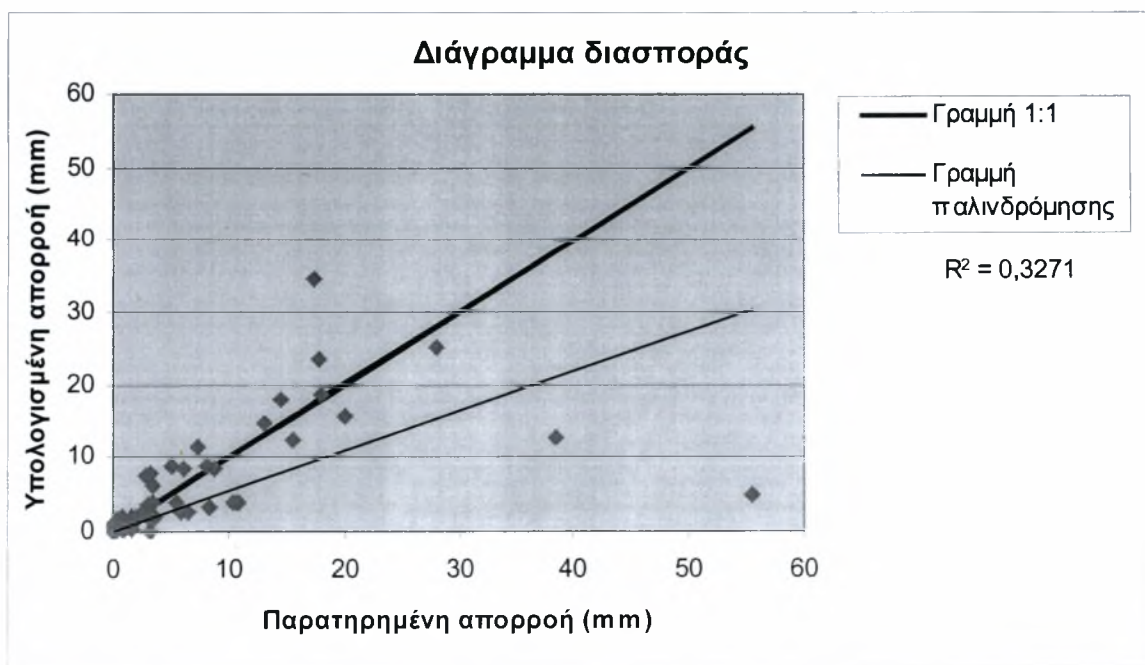
Σχήμα Β.70

B.2.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

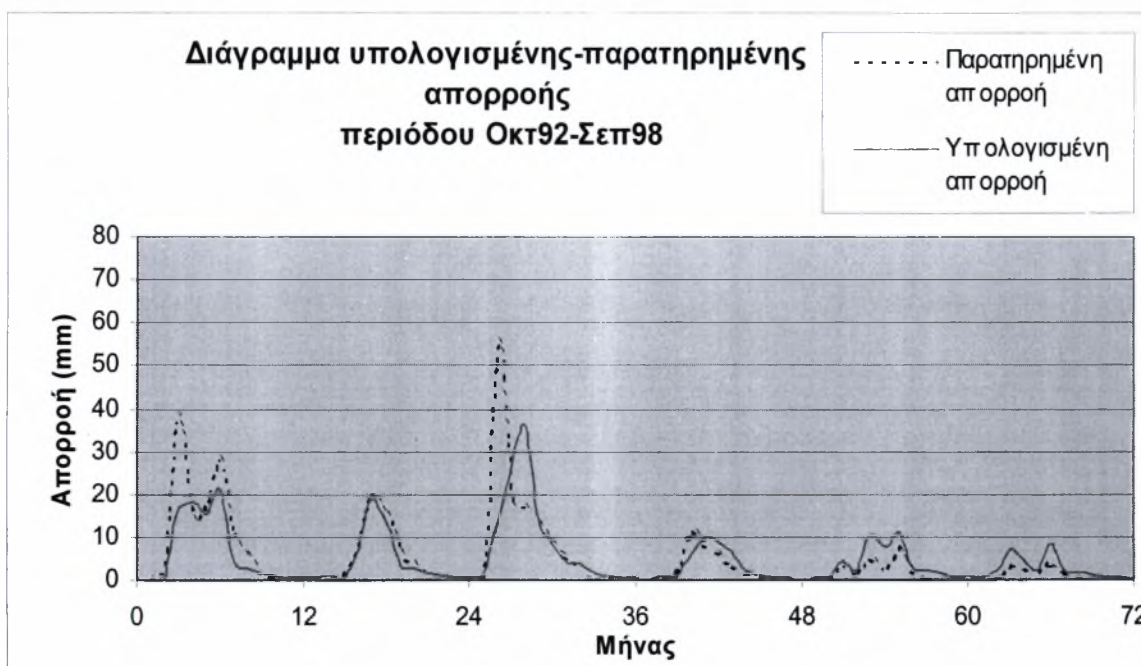


Σχήμα Β.71

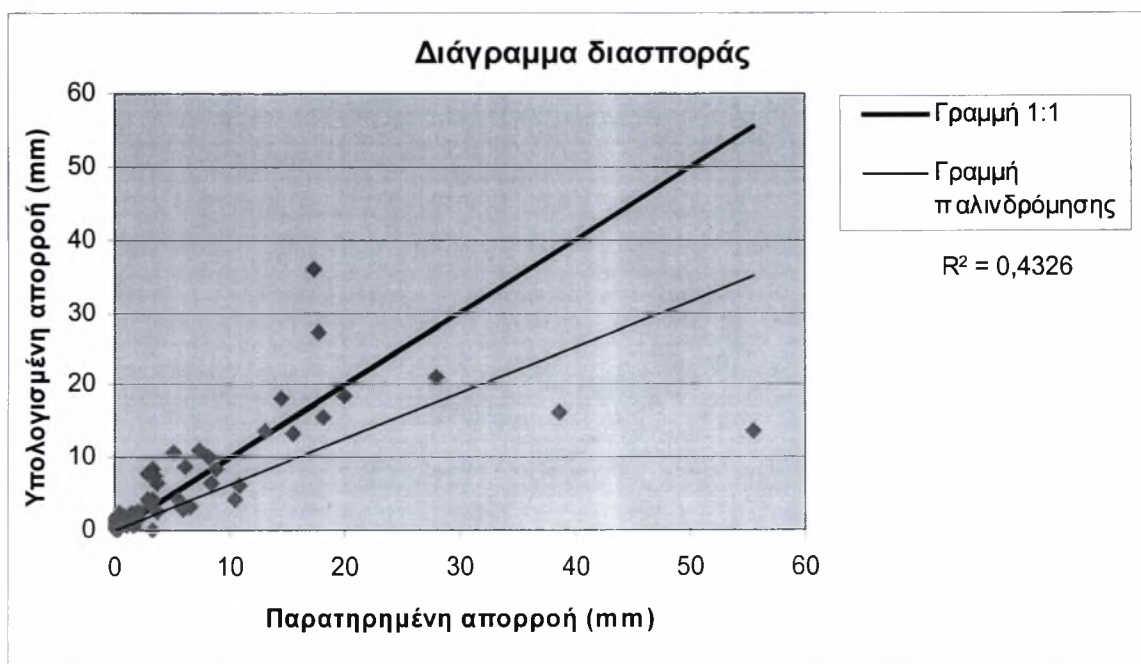


Σχήμα Β.72

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

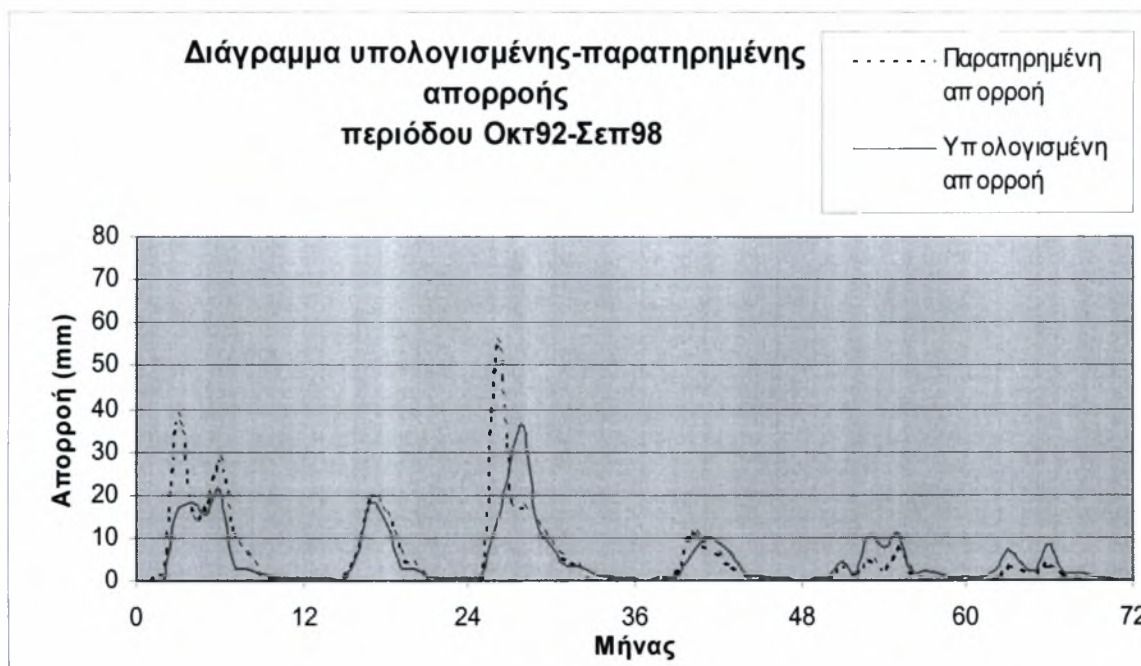


Σχήμα Β.73

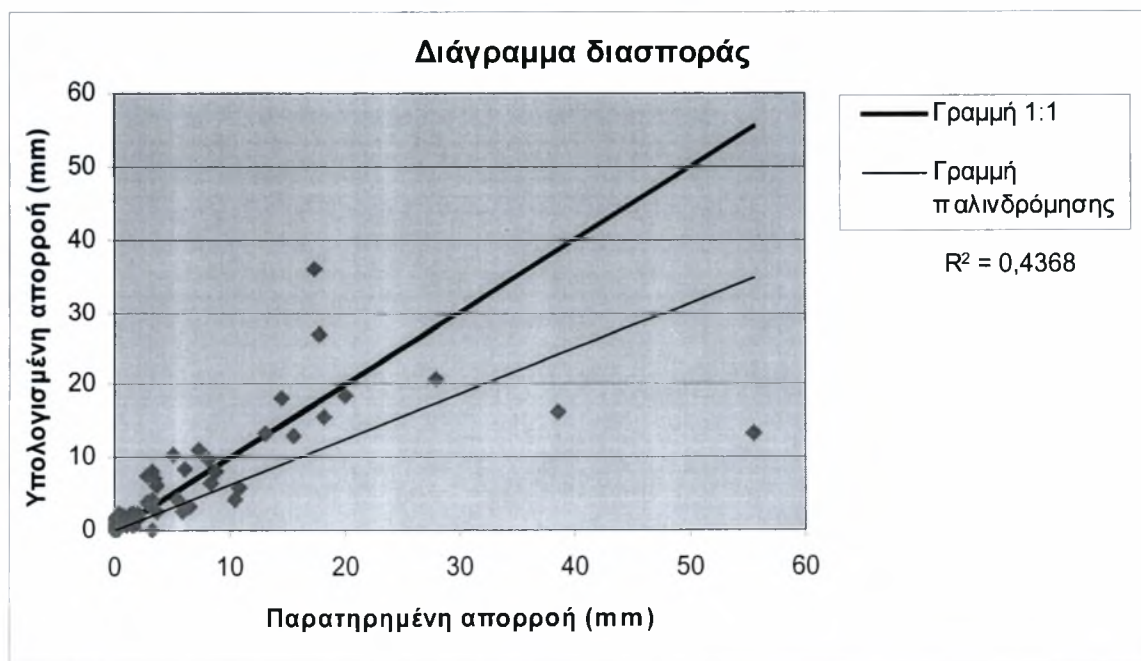


Σχήμα Β.74

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

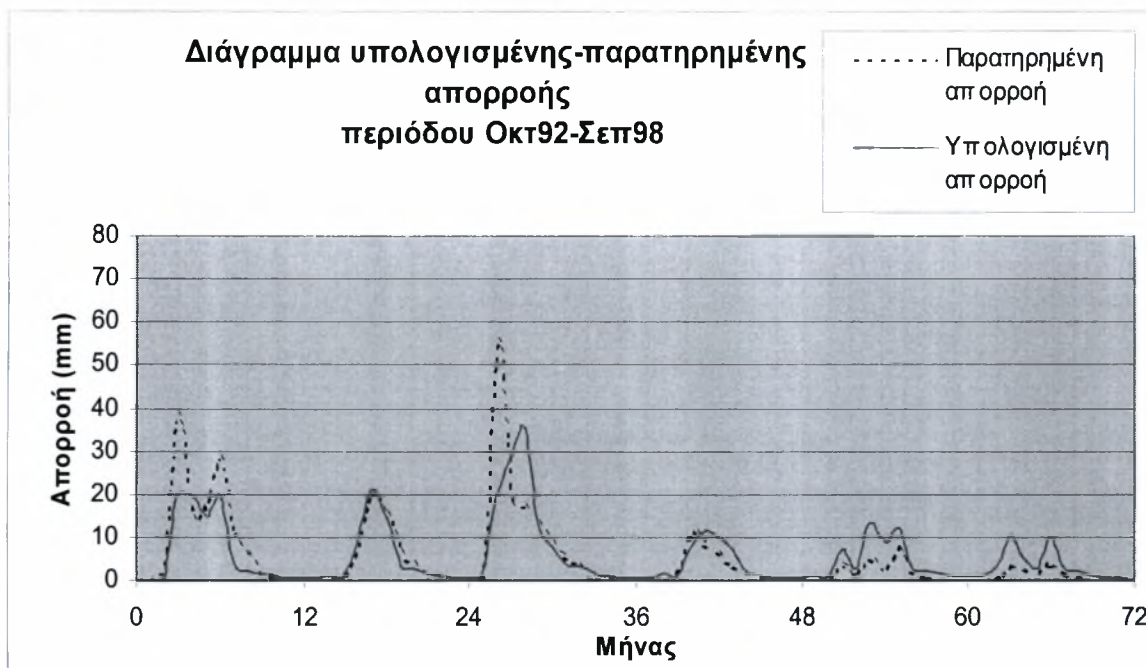


Σχήμα Β.75

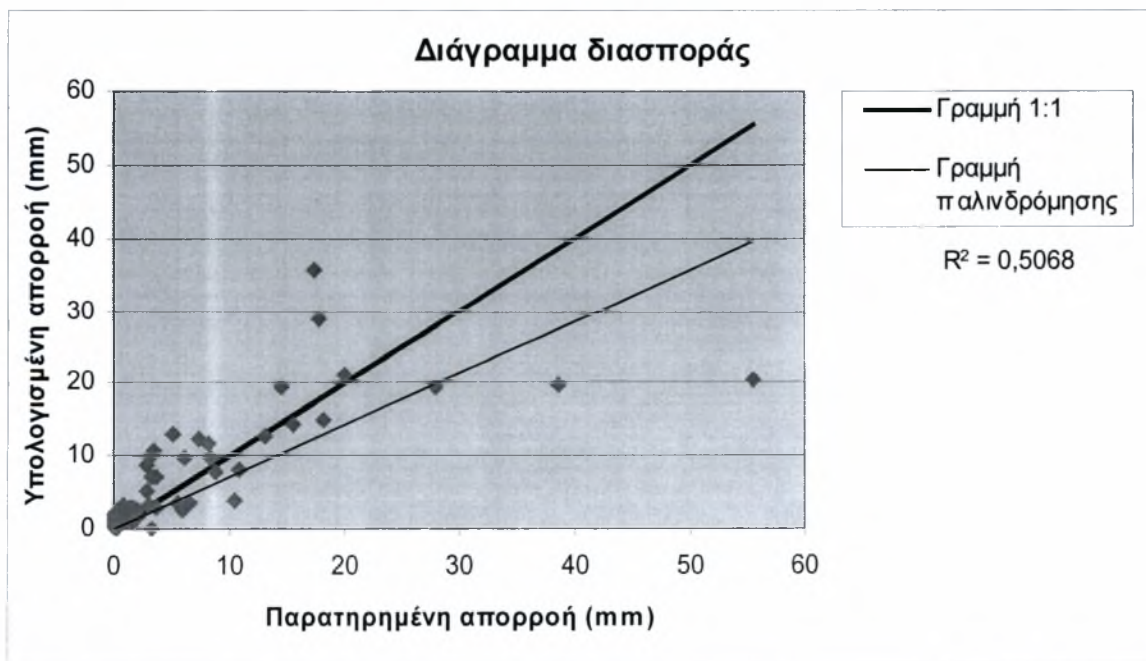


Σχήμα Β.76

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

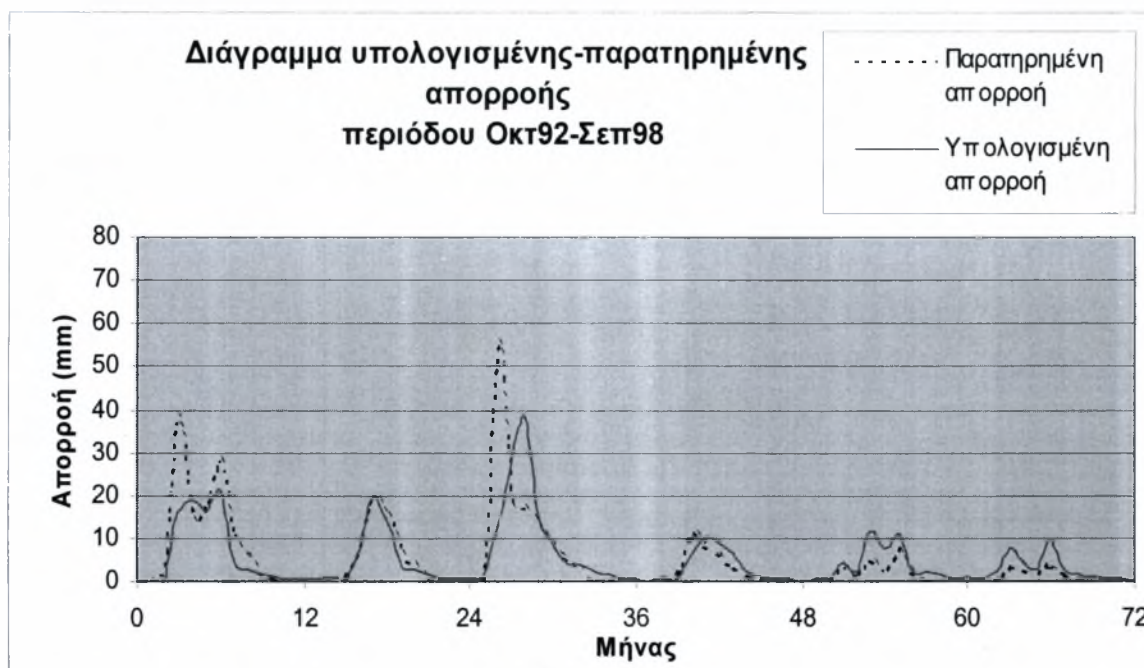


Σχήμα Β.77

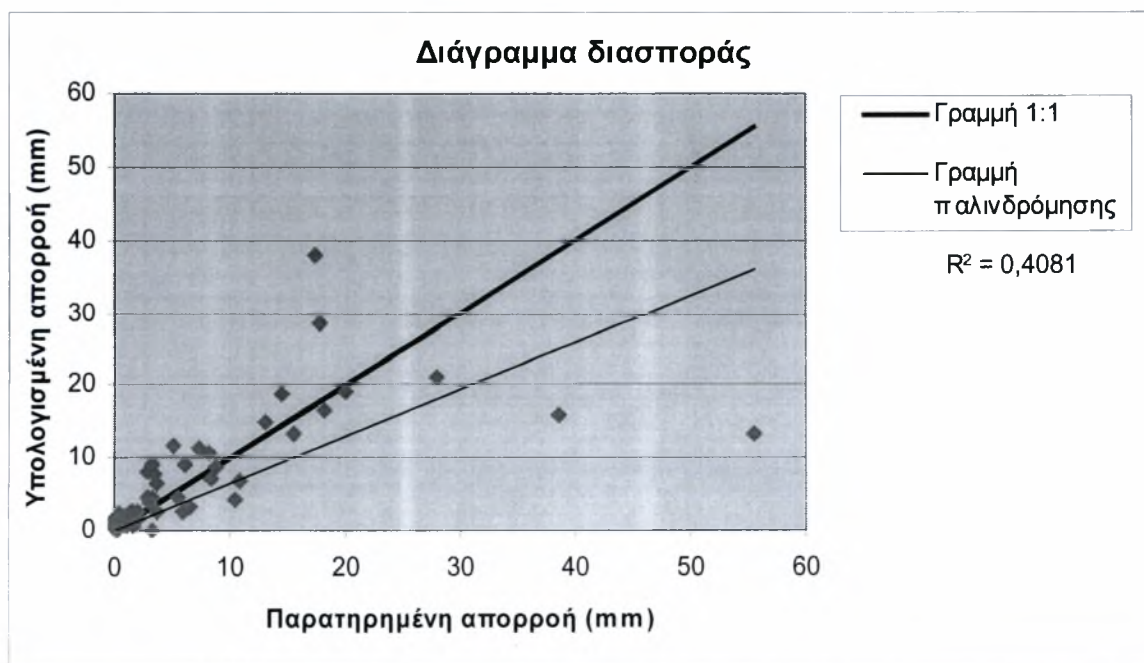


Σχήμα Β.78

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

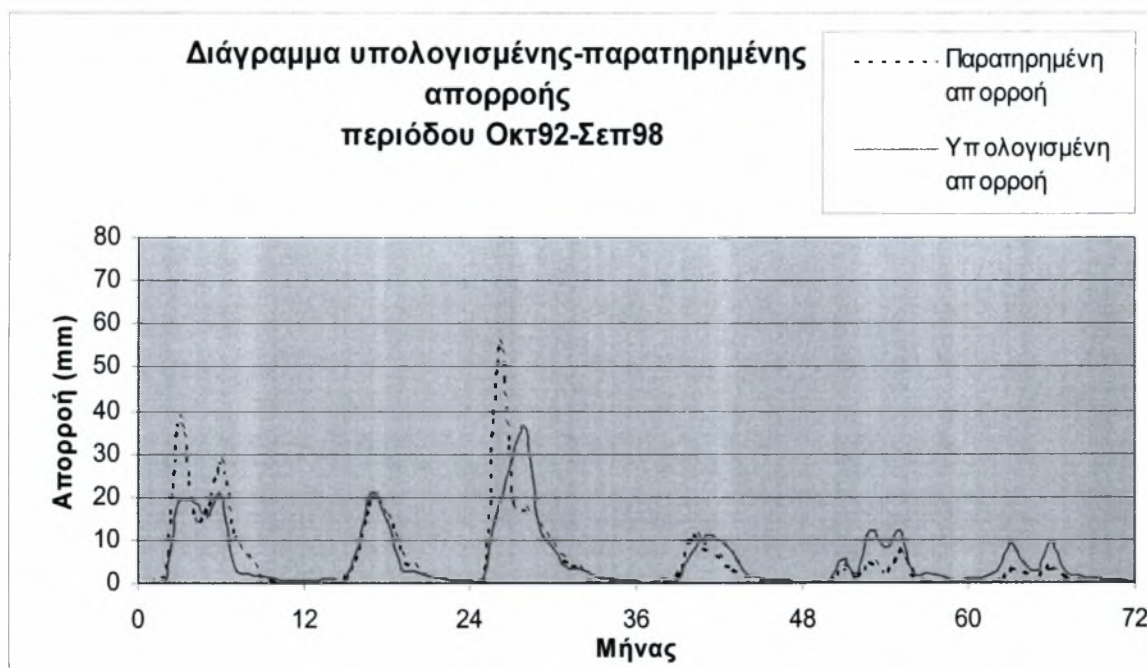


Σχήμα Β.79

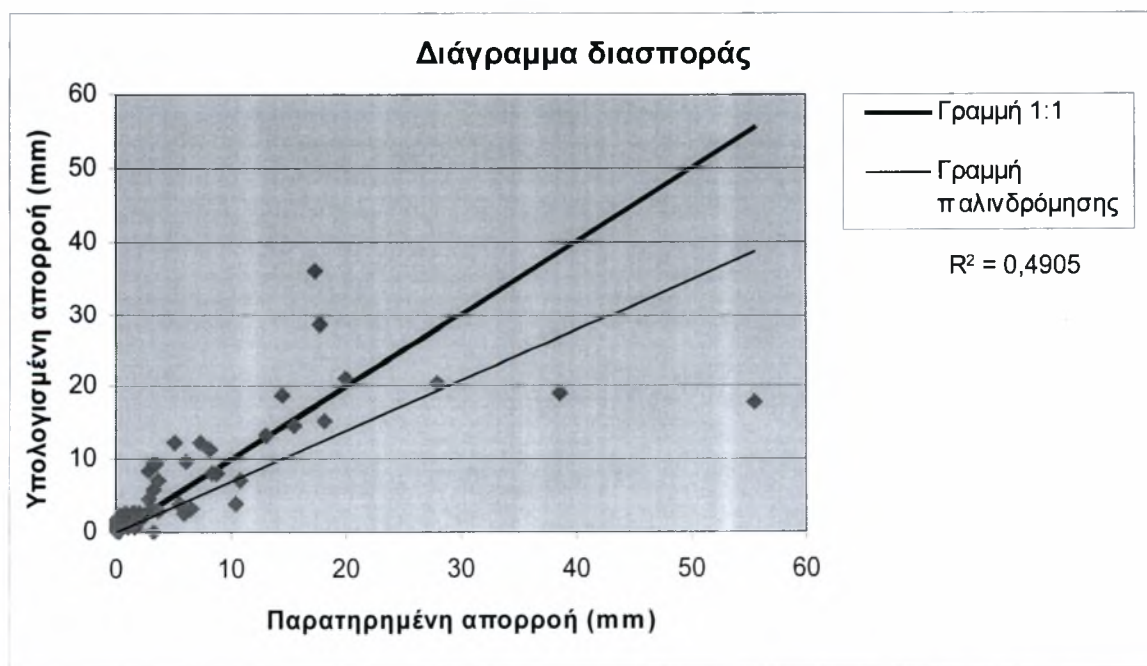


Σχήμα Β.80

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

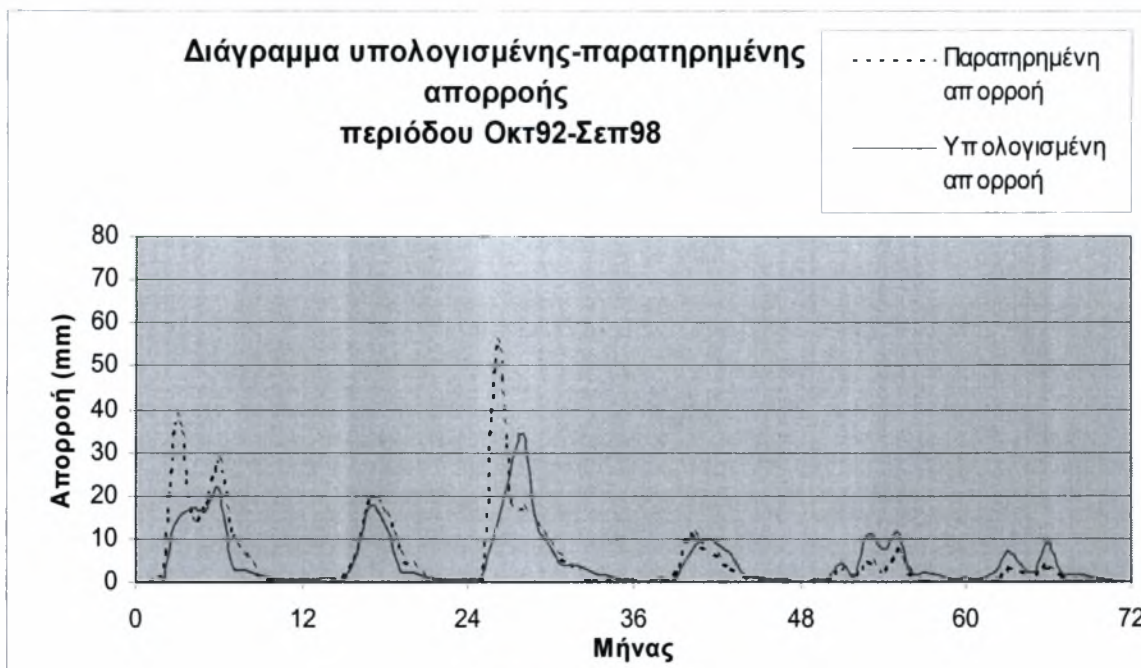


Σχήμα Β.81

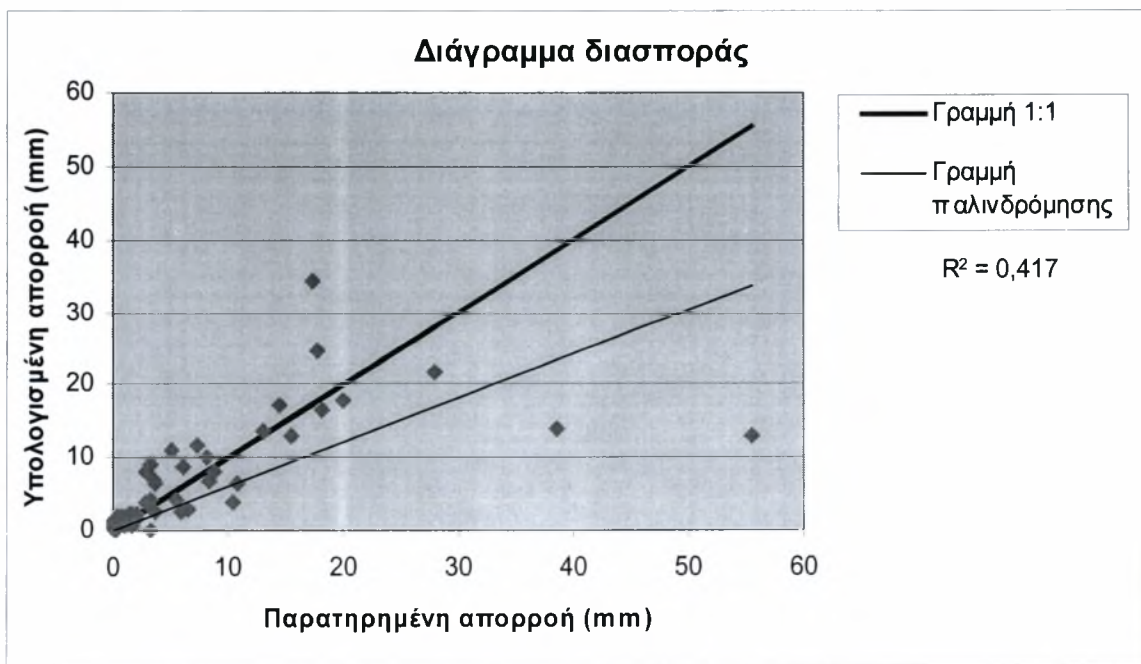


Σχήμα Β.82

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Β.83



Σχήμα Β.84

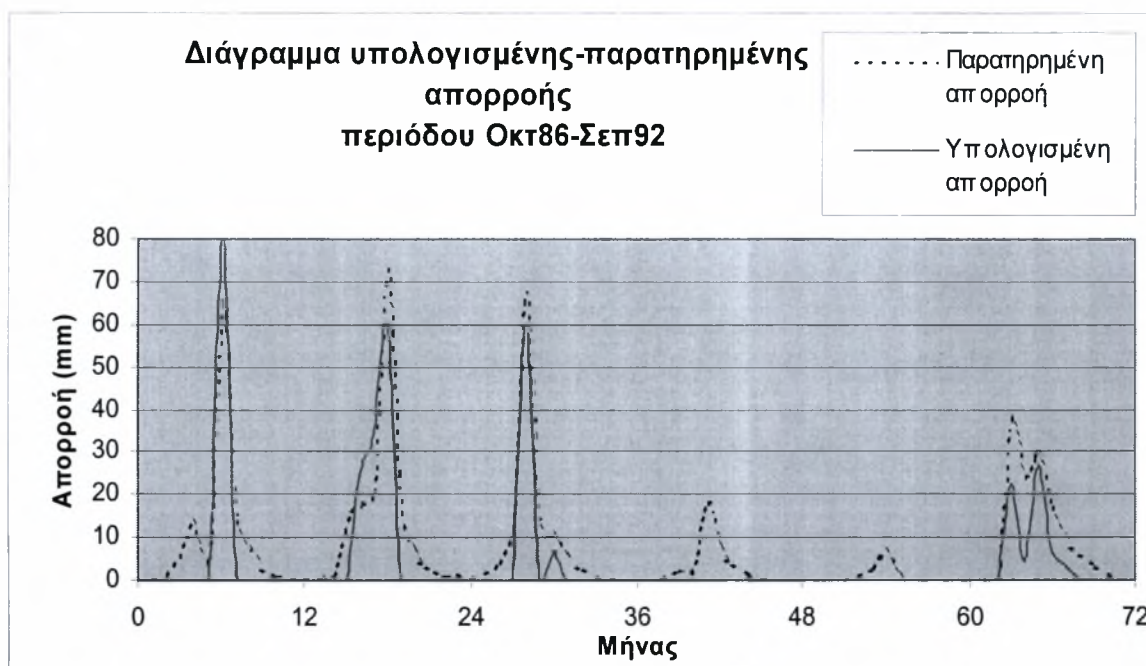
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ

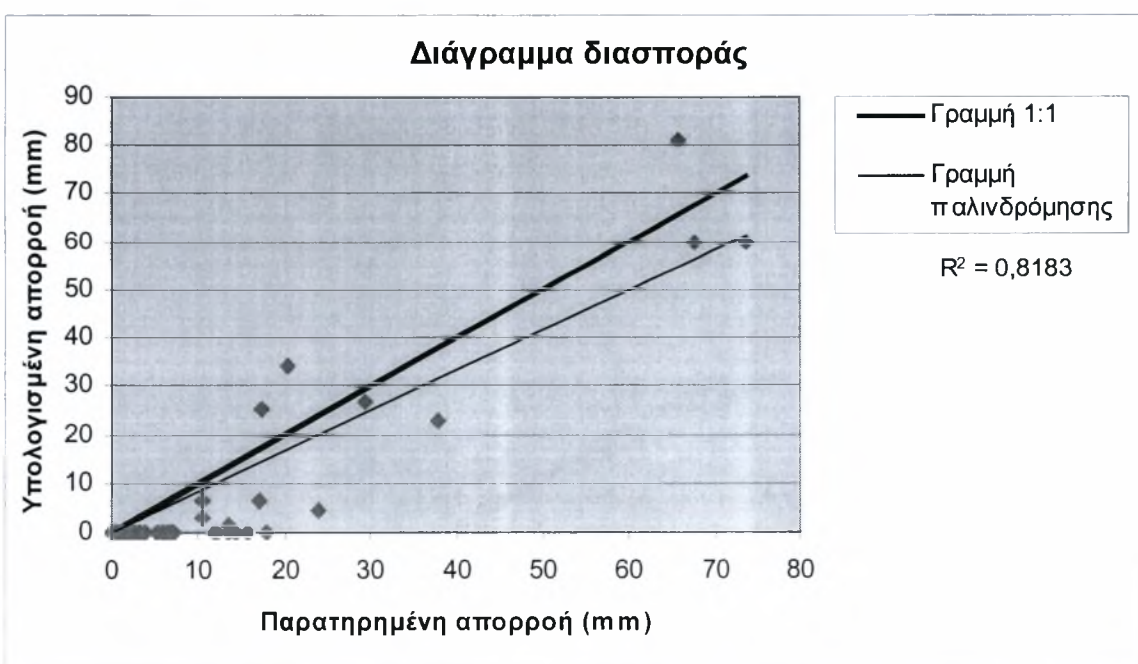
Γ.1 Βελτιστοποίηση μοντέλου Giakoumakis περιόδου Οκτ1986-Σεπ1992

Γ.1.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Thornthwaite

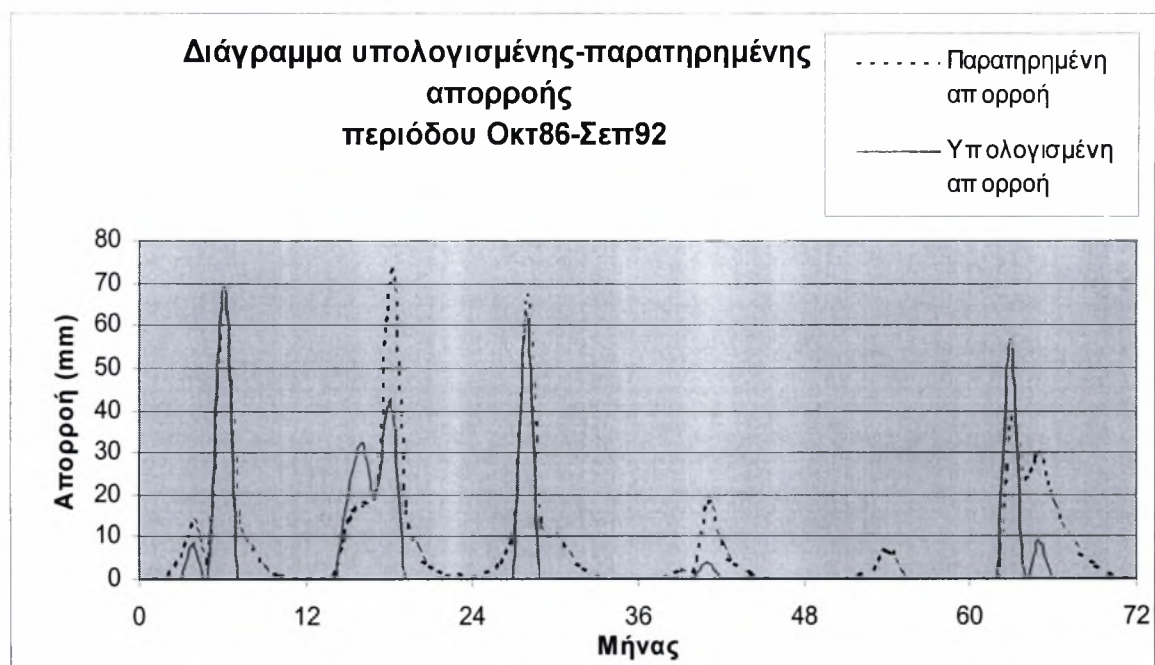


Σχήμα Γ.1

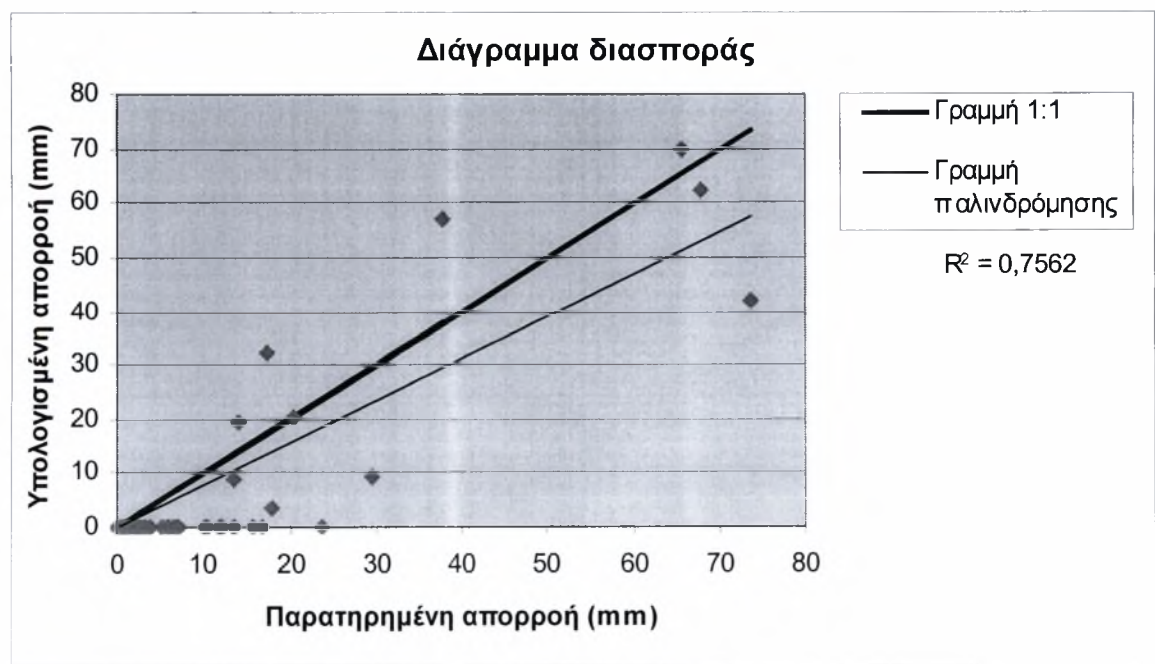


Σχήμα Γ.2

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

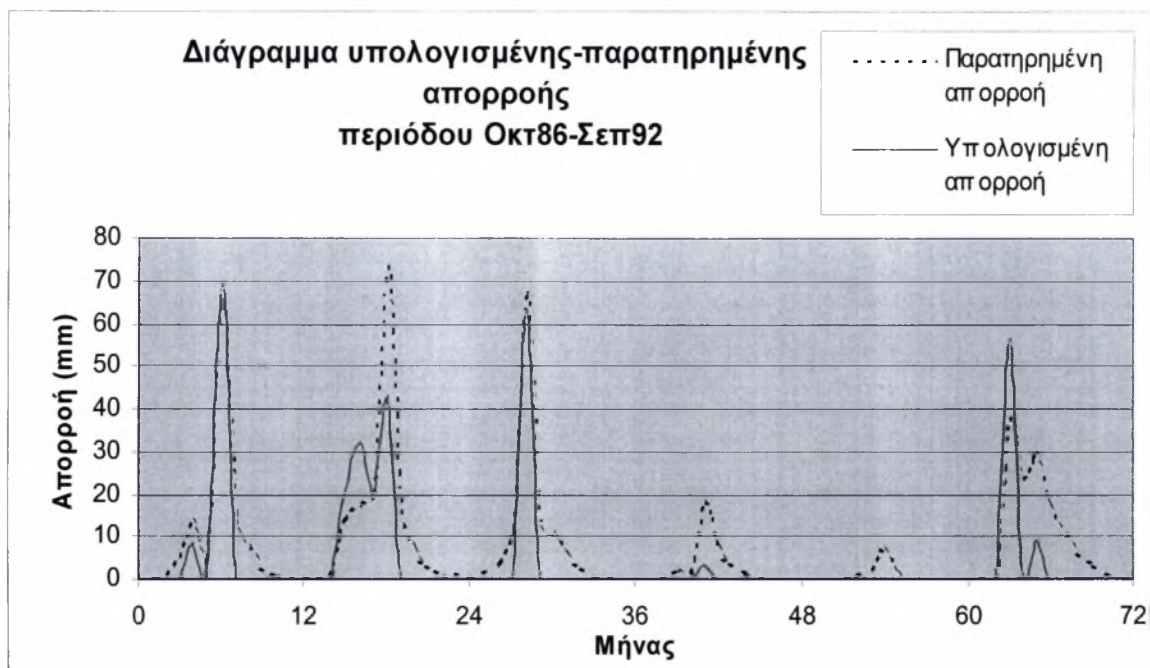


Σχήμα Γ.3

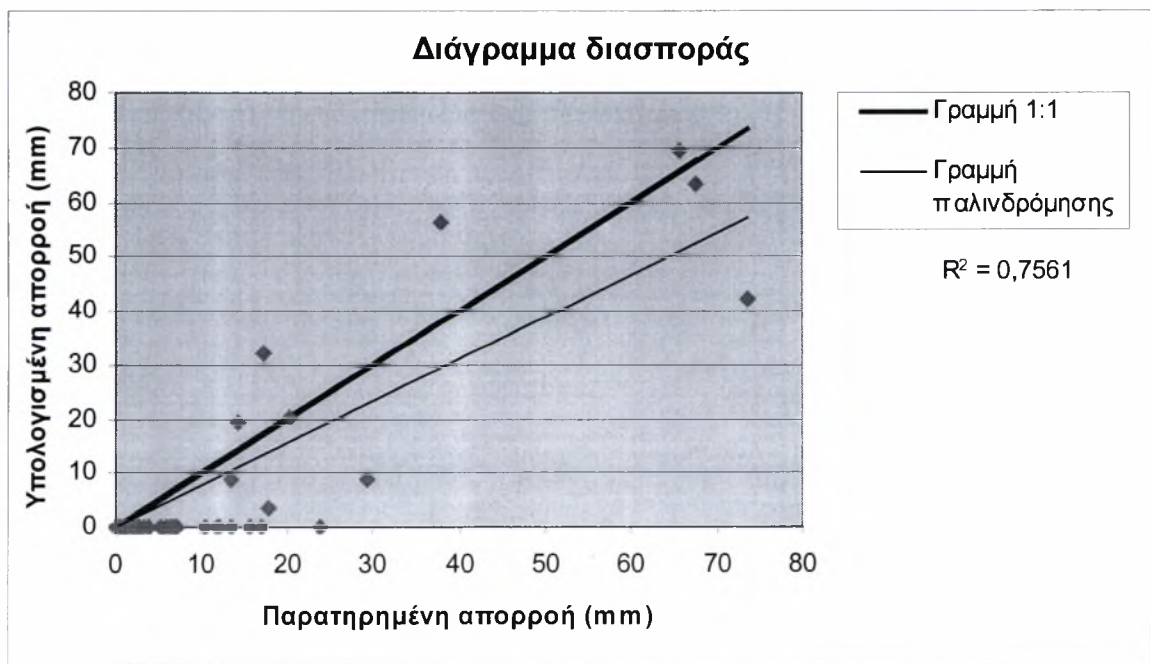


Σχήμα Γ.4

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Turc (βροχοβαθμίδα)

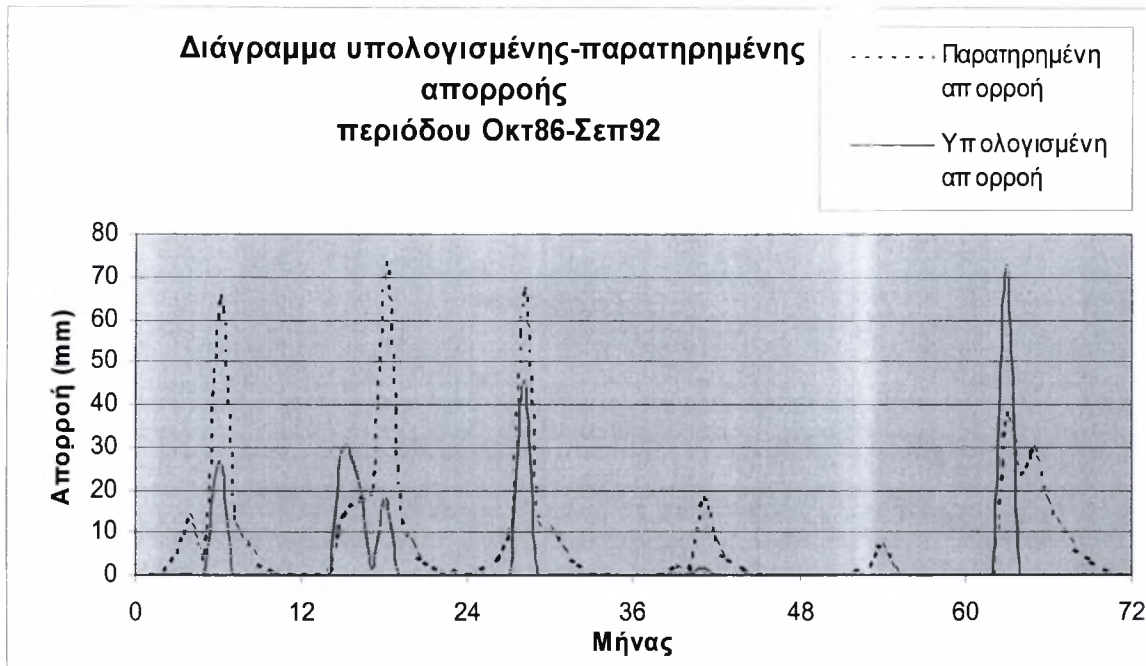


Σχήμα Γ.5

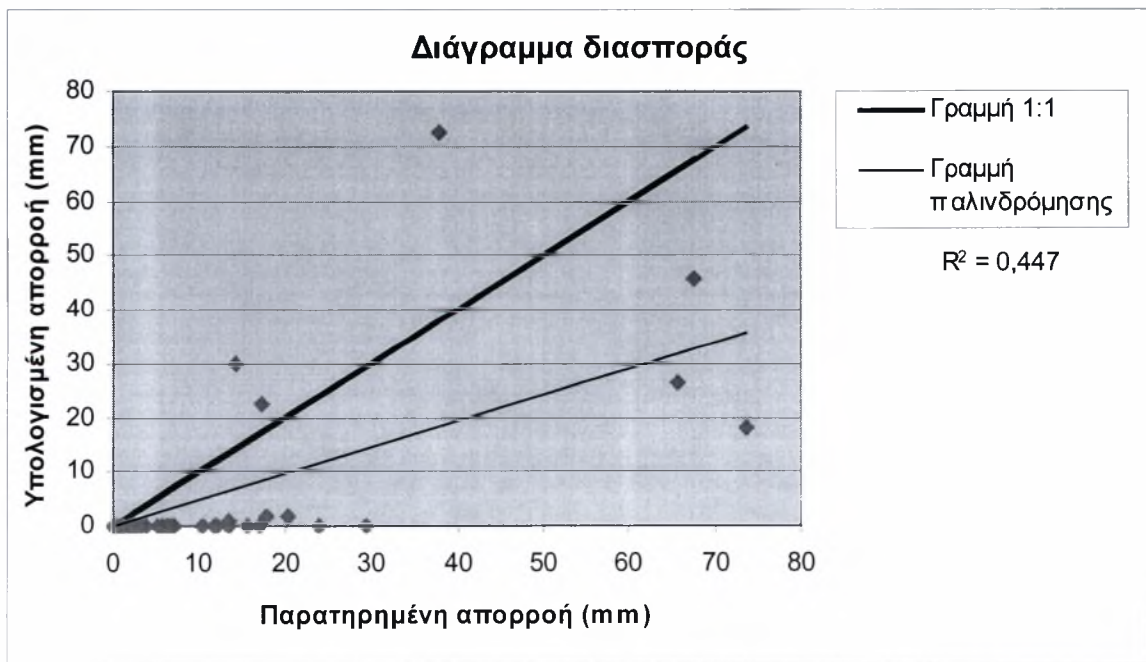


Σχήμα Γ.6

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

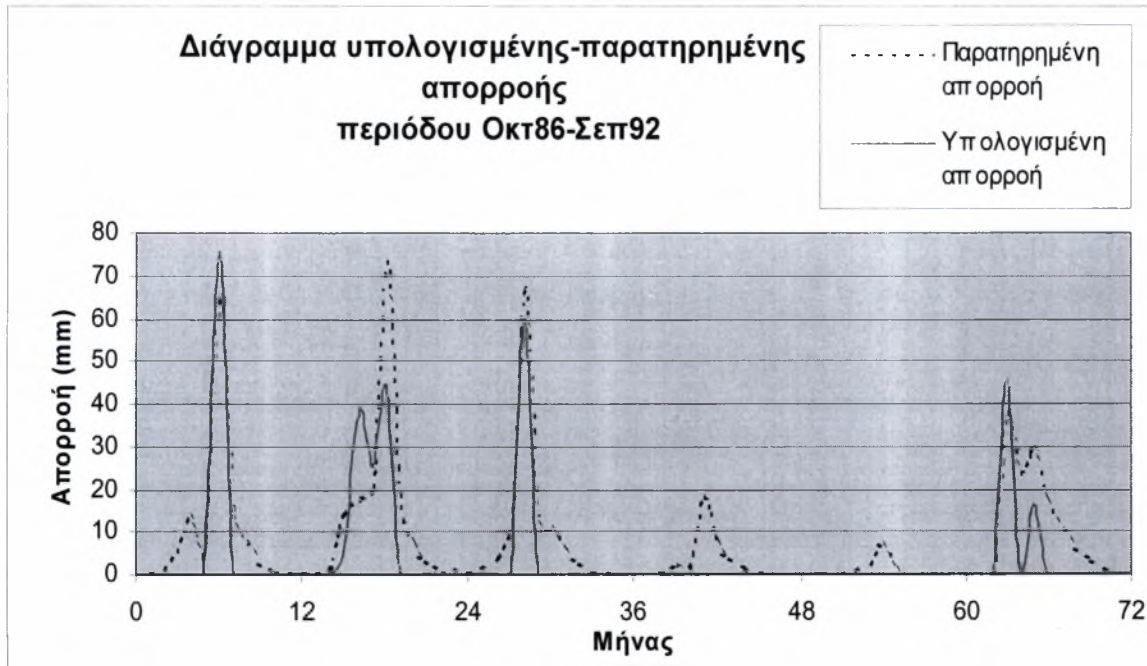


Σχήμα Γ.7

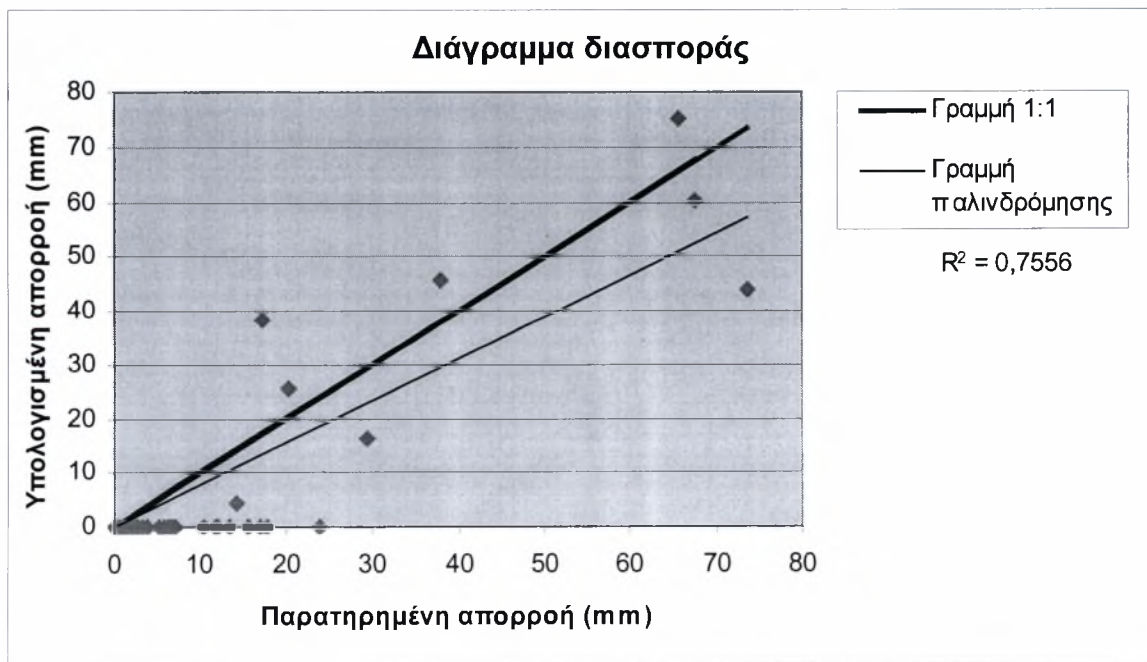


Σχήμα Γ.8

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

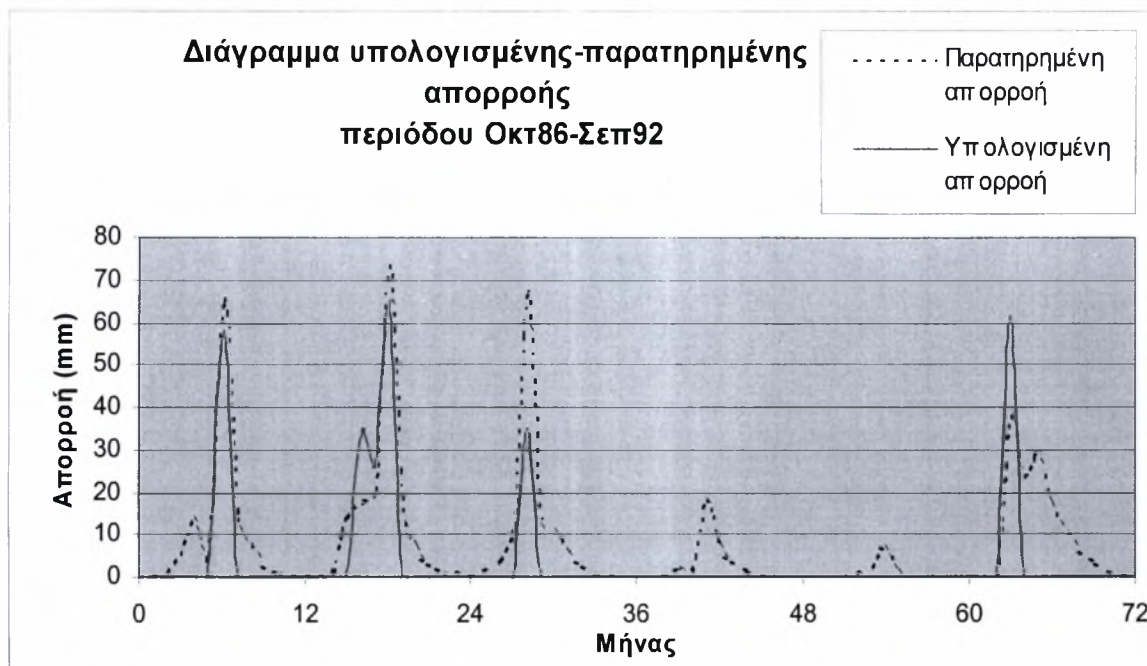


Σχήμα Γ.9

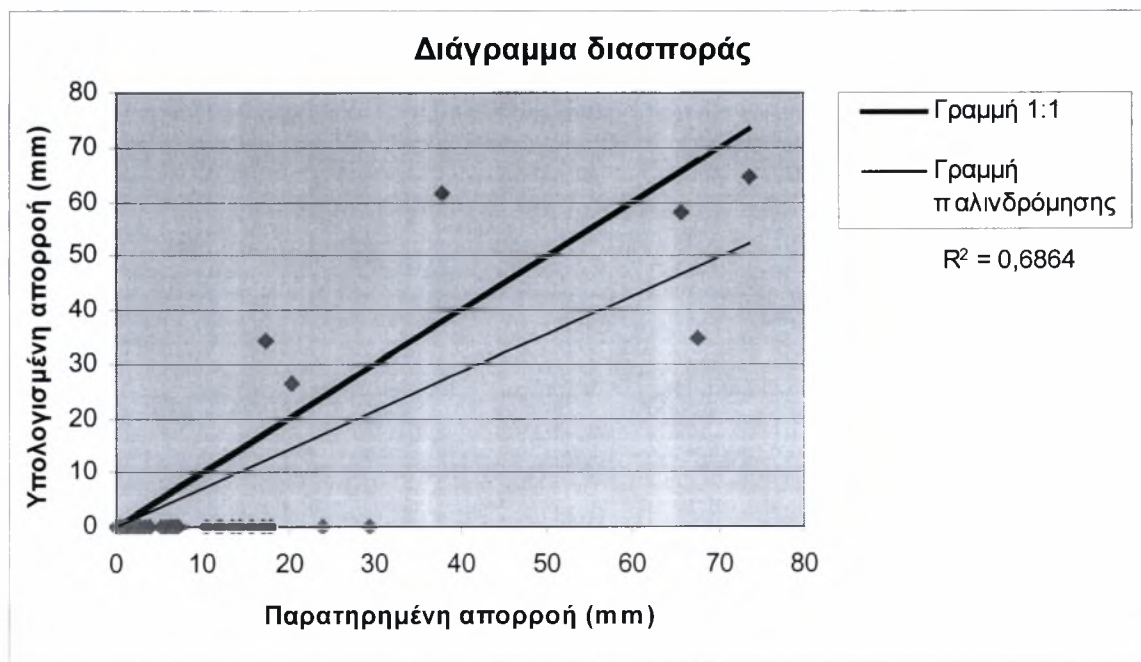


Σχήμα Γ.10

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

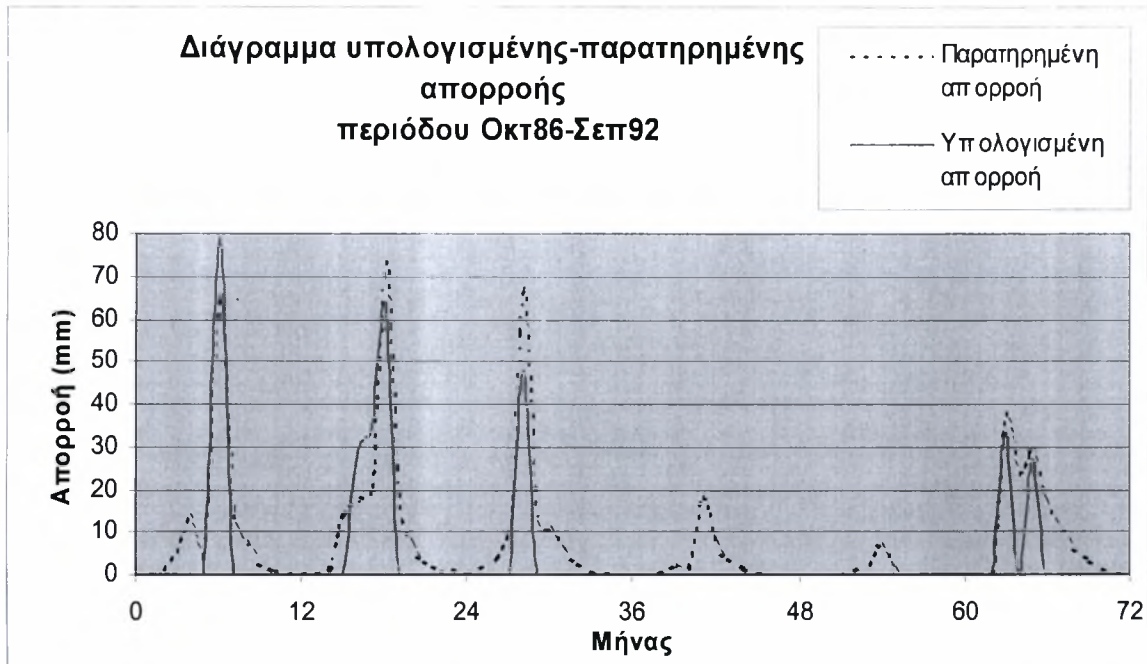


Σχήμα Γ.11

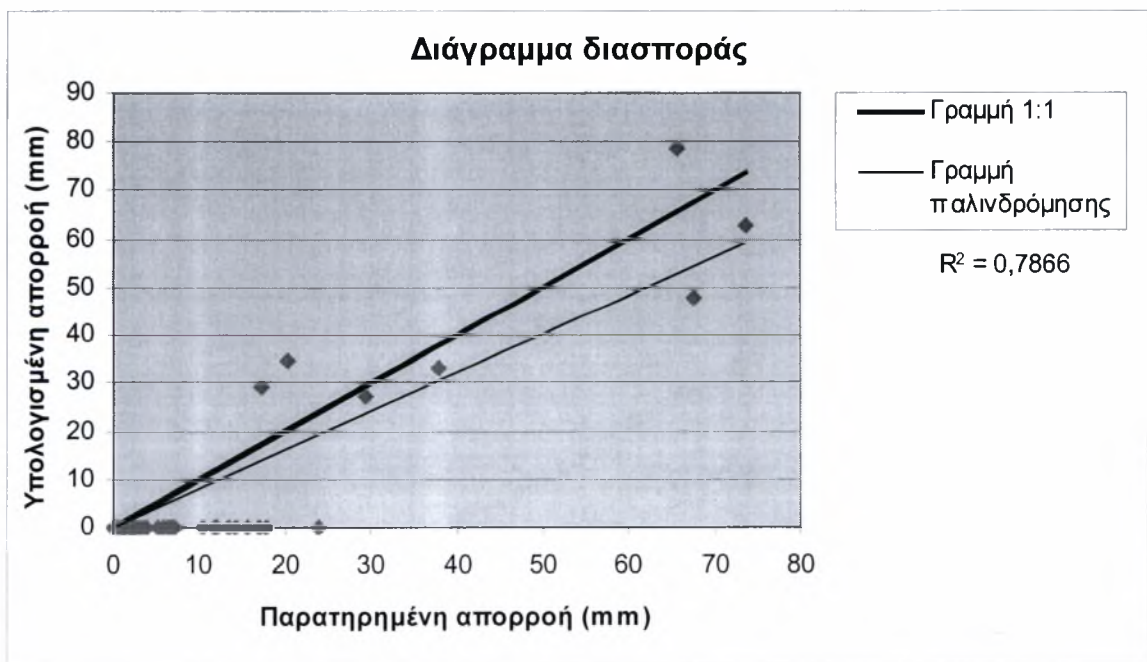


Σχήμα Γ.12

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



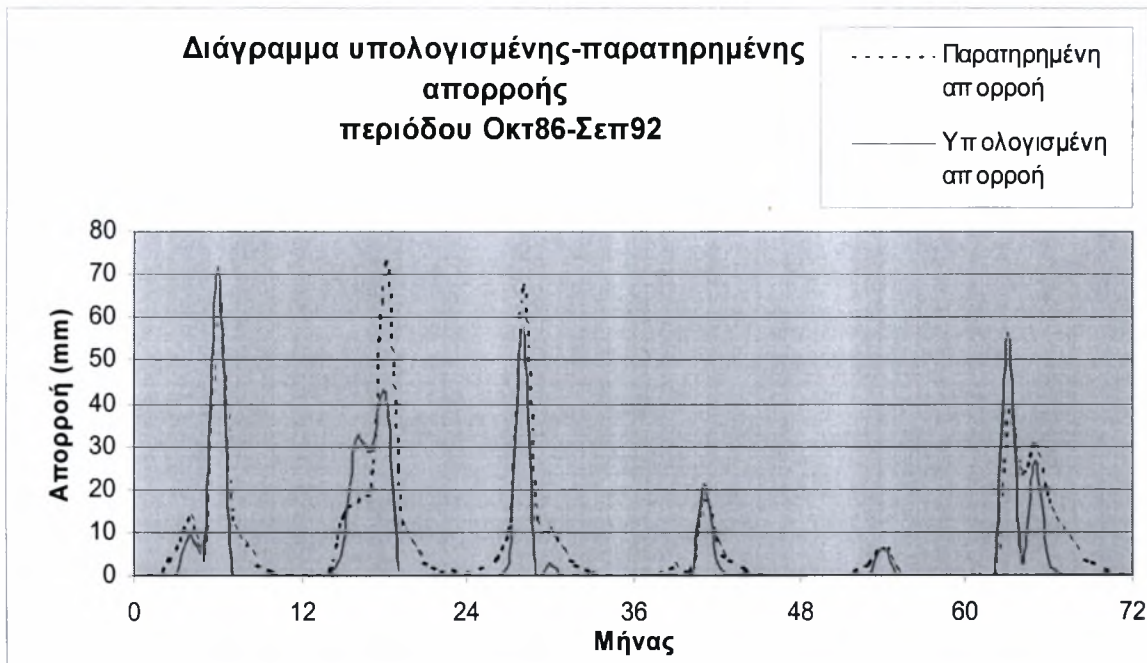
Σχήμα Γ.13



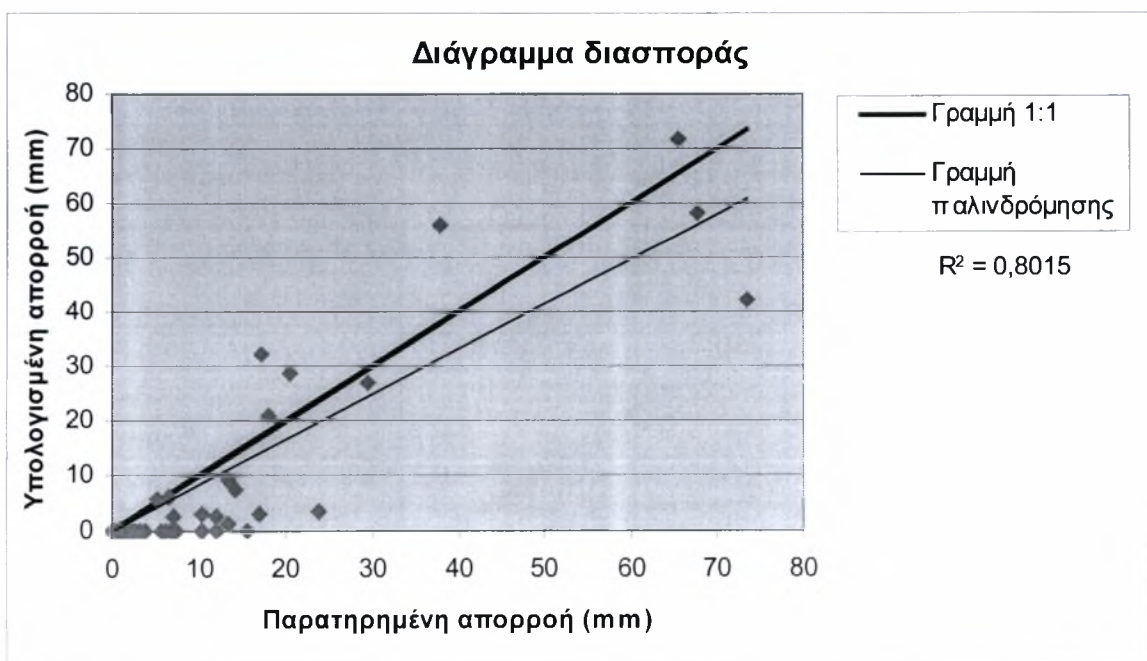
Σχήμα Γ.14

Γ.1.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχοπτώσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

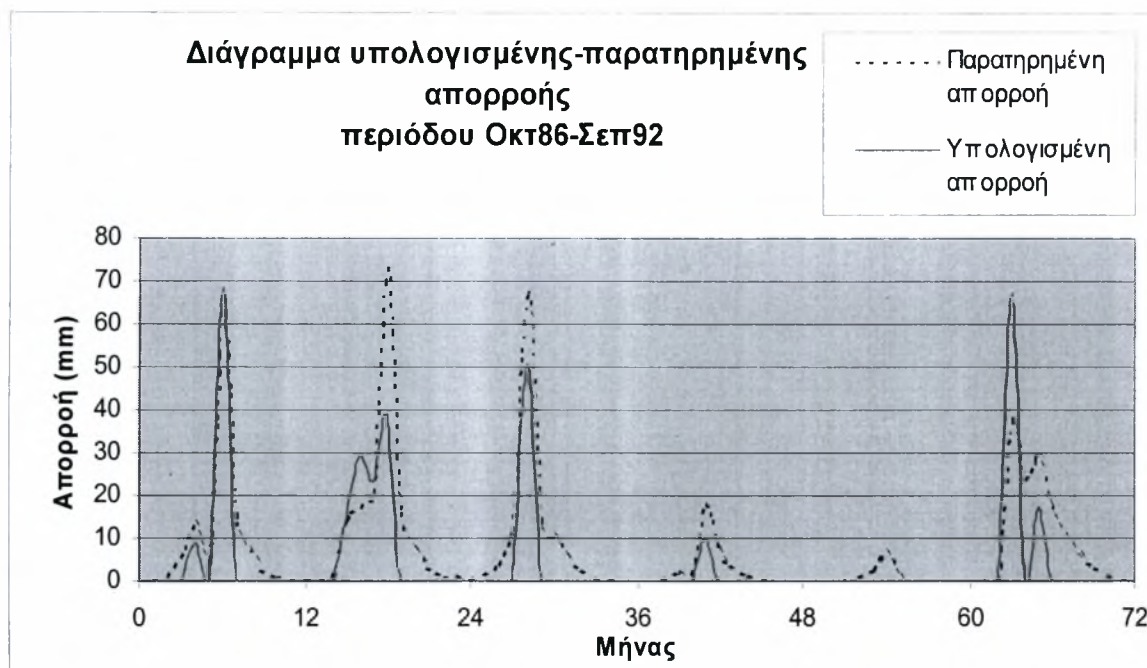


Σχήμα Γ.15

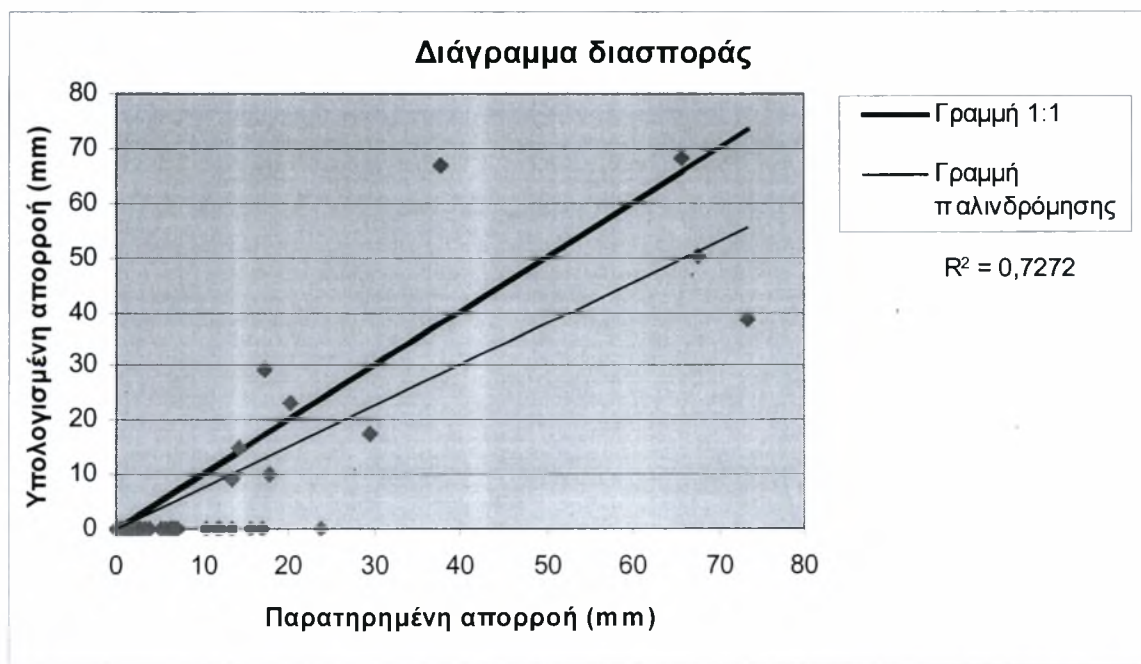


Σχήμα Γ.16

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Turc (μέσος όρος)

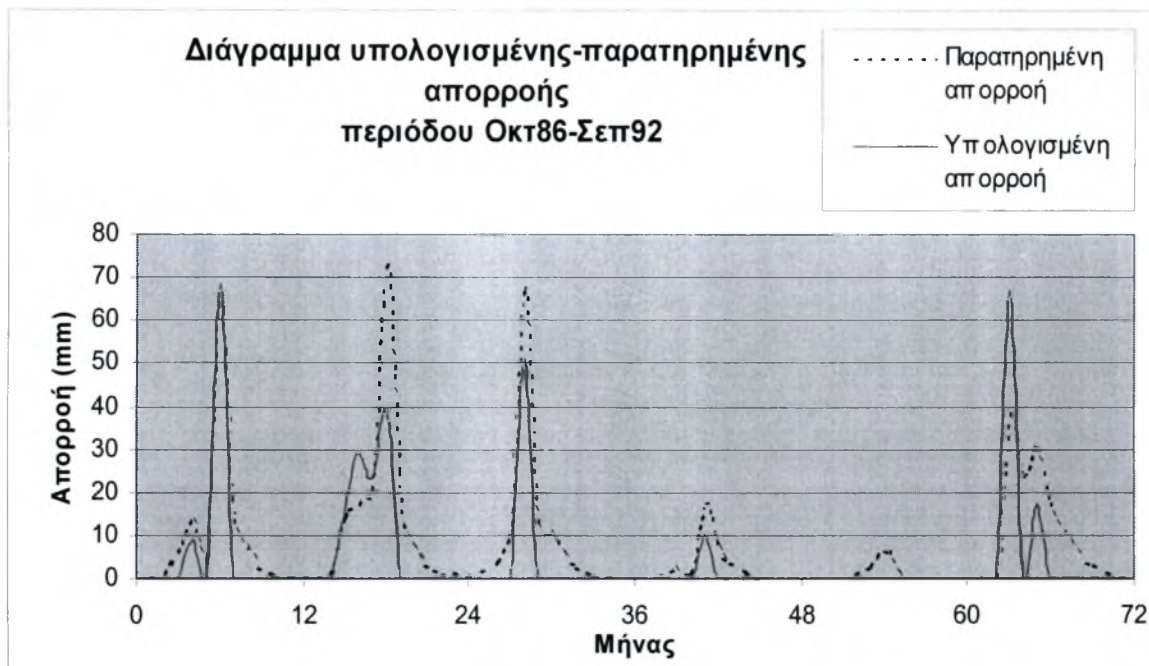


Σχήμα Γ.17

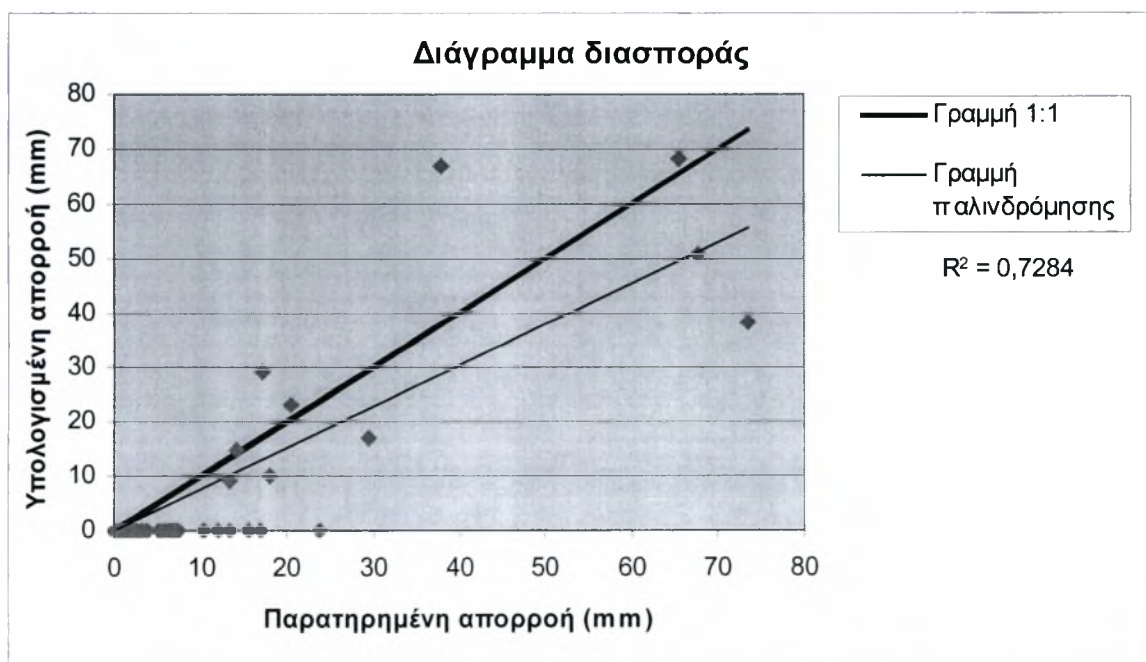


Σχήμα Γ.18

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

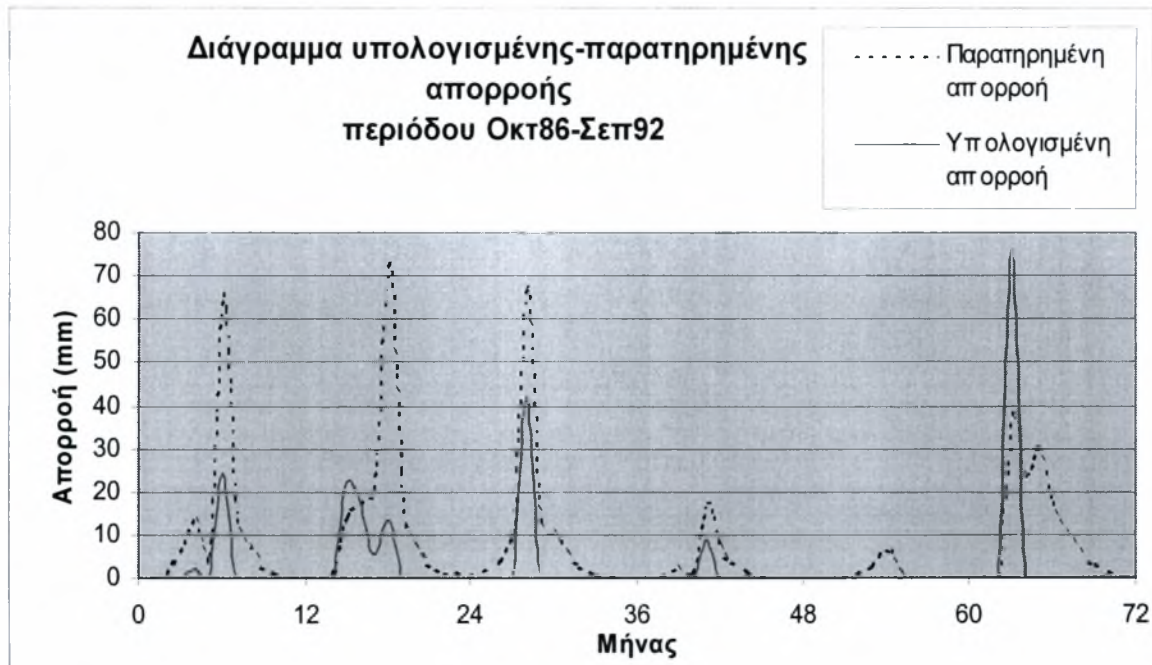


Σχήμα Γ.19

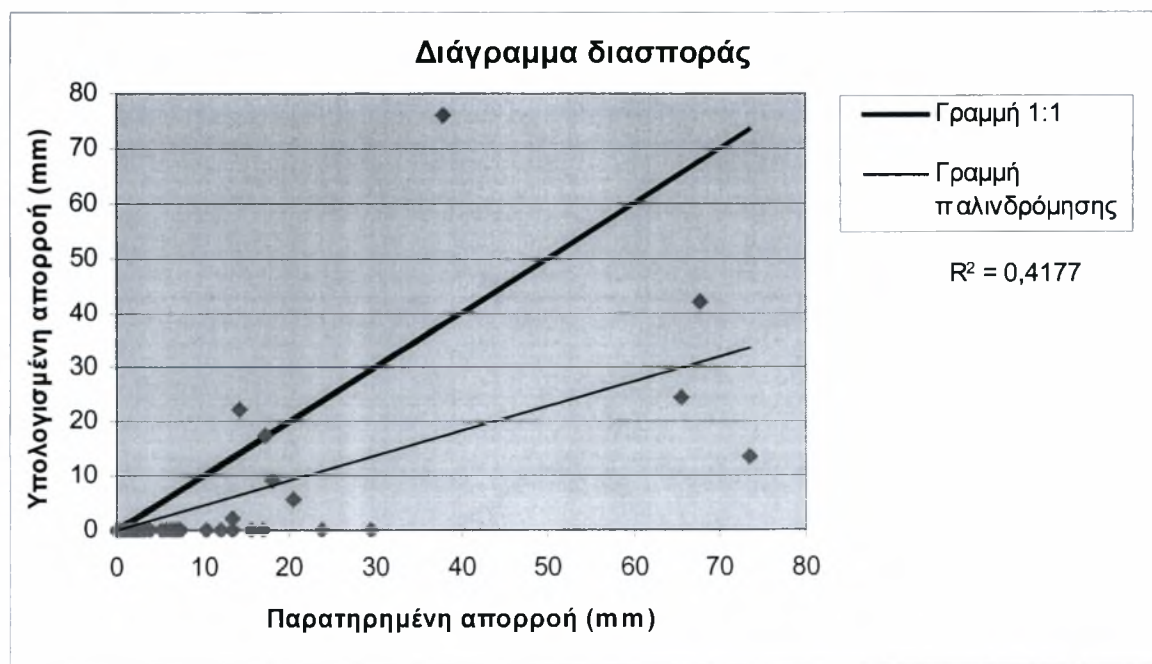


Σχήμα Γ.20

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

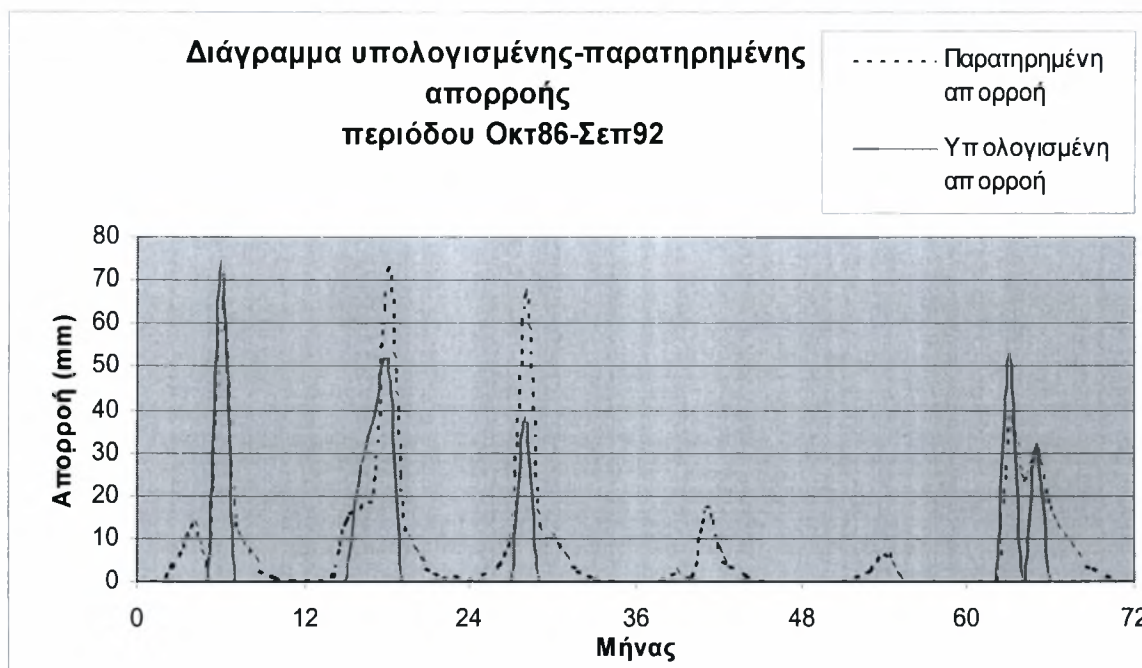


Σχήμα Γ.21

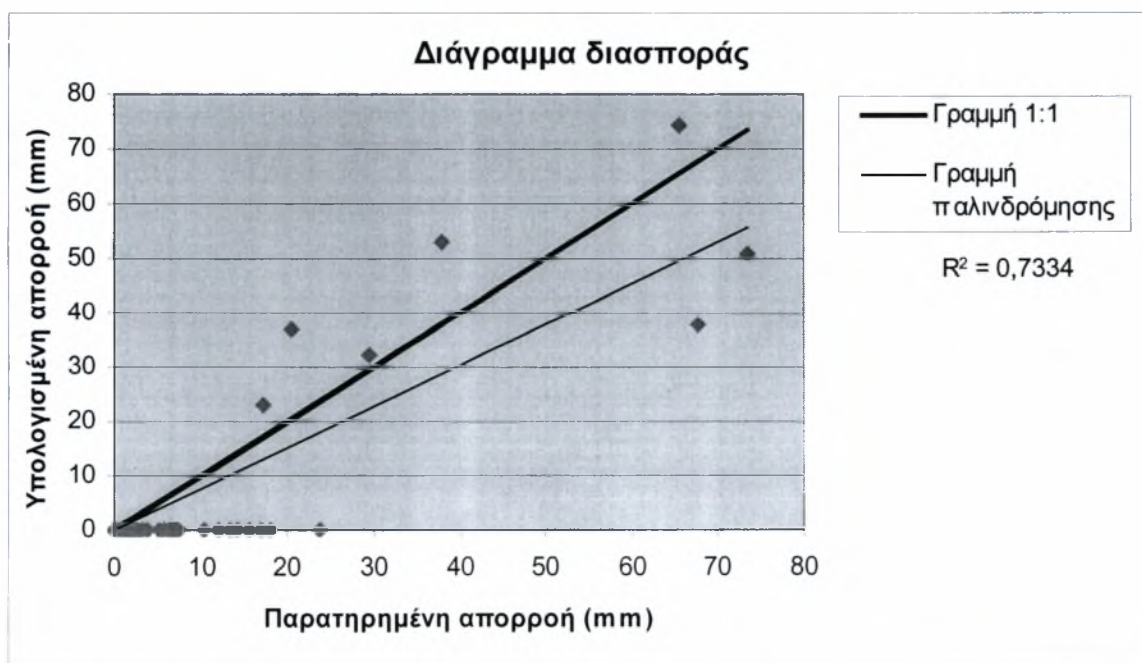


Σχήμα Γ.22

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

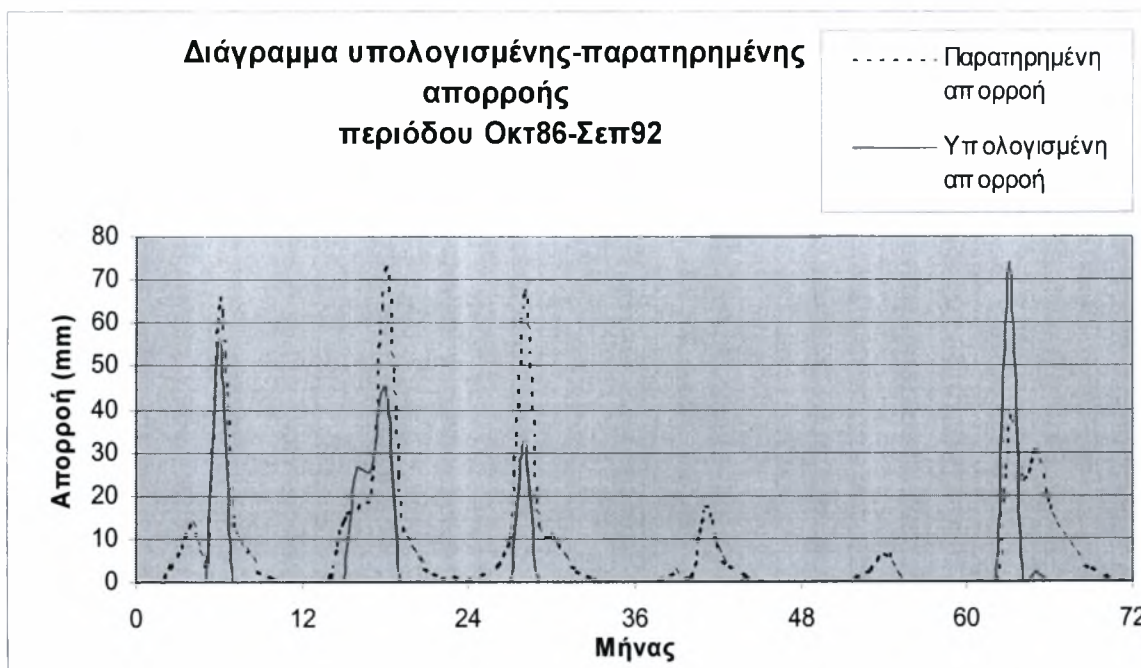


Σχήμα Γ.23

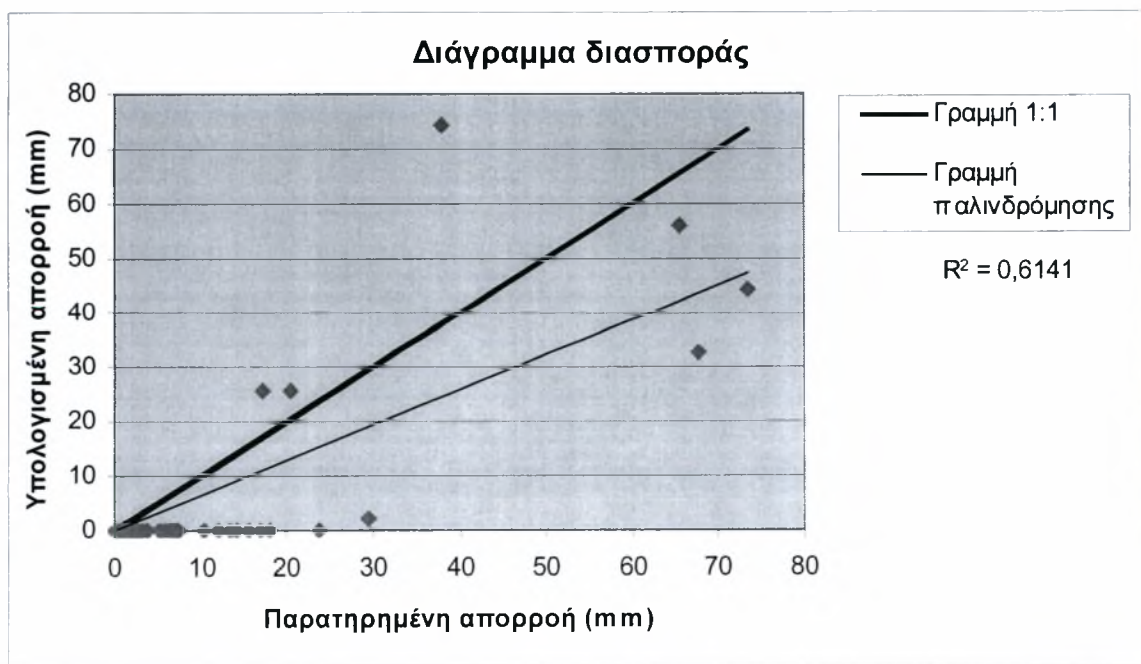


Σχήμα Γ.24

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

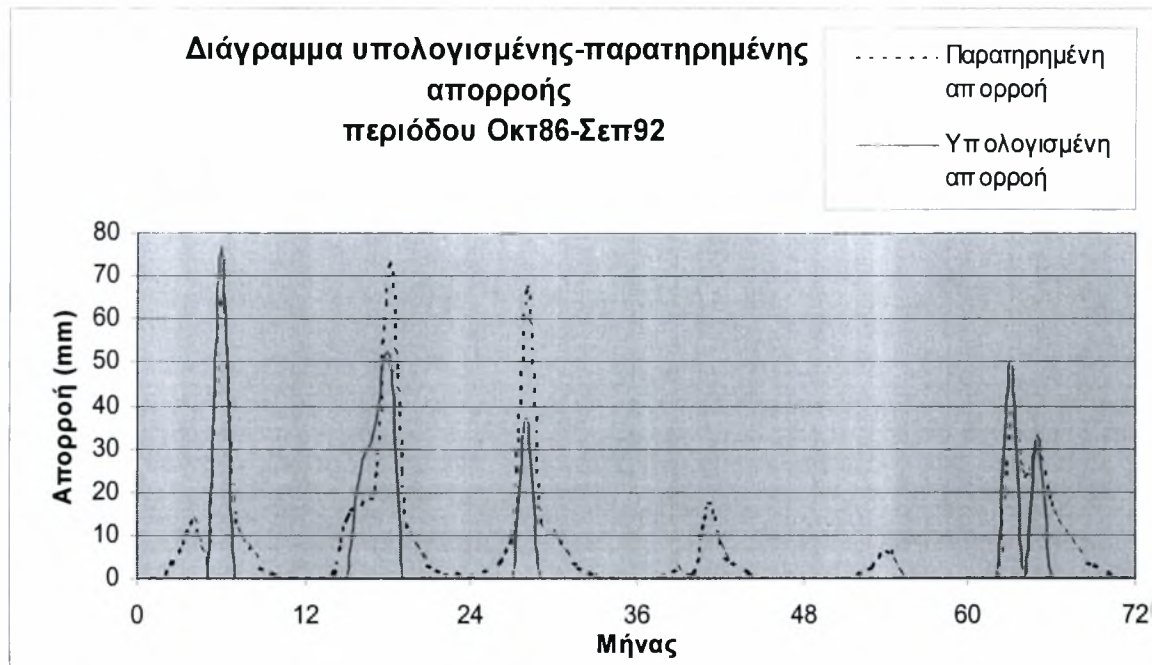


Σχήμα Γ.25

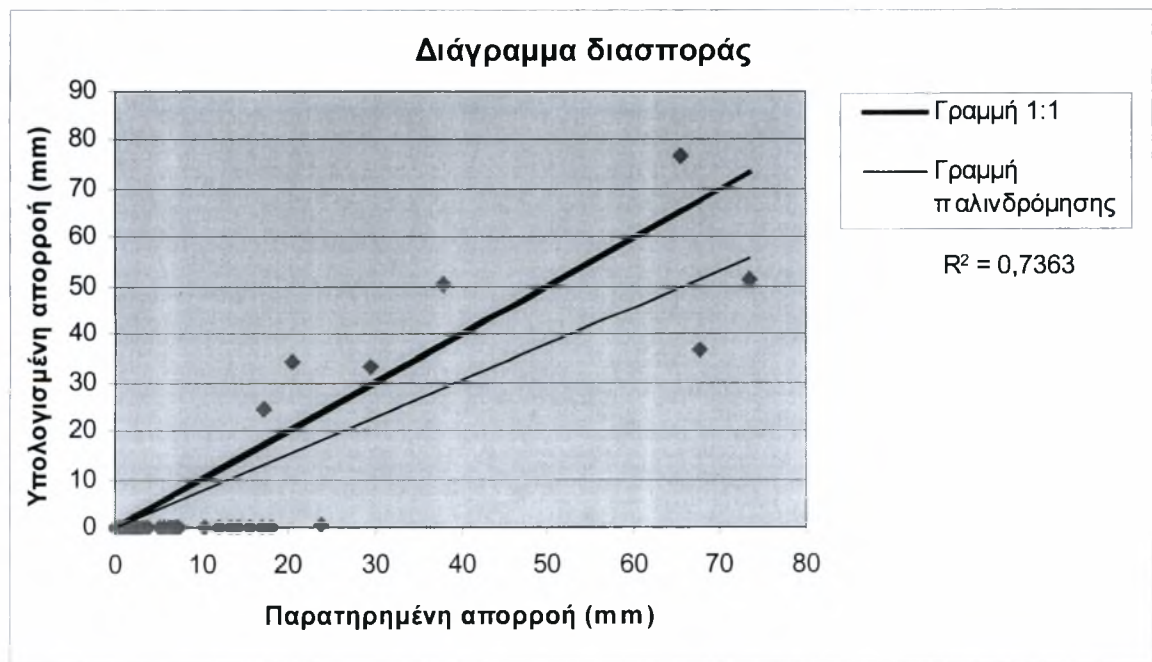


Σχήμα Γ.26

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



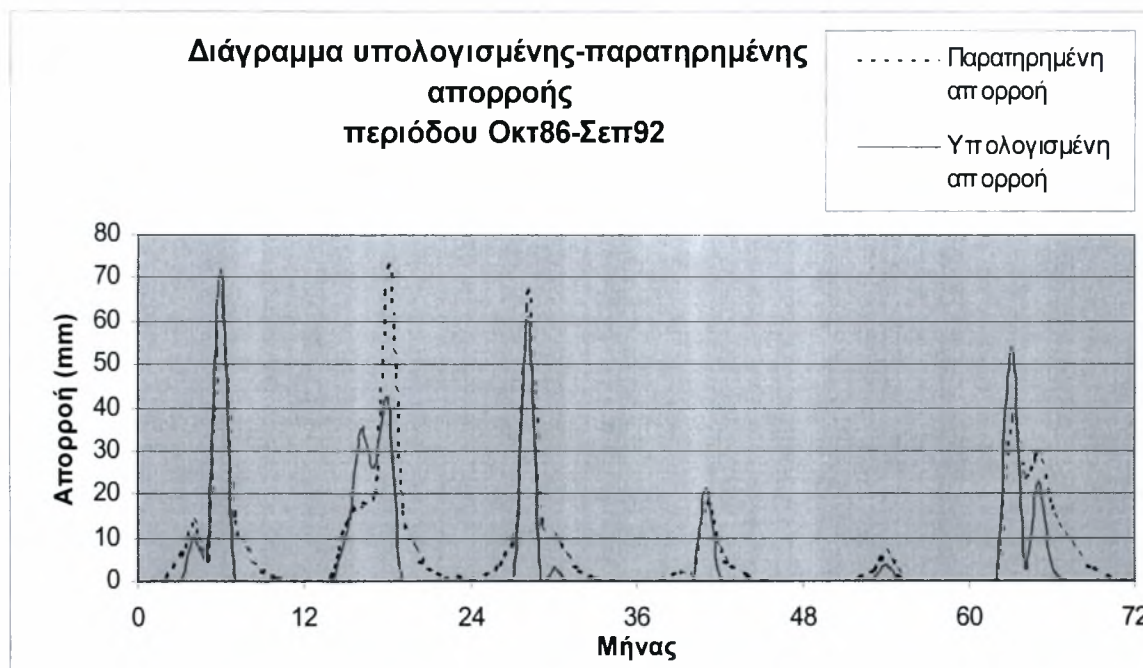
Σχήμα Γ.27



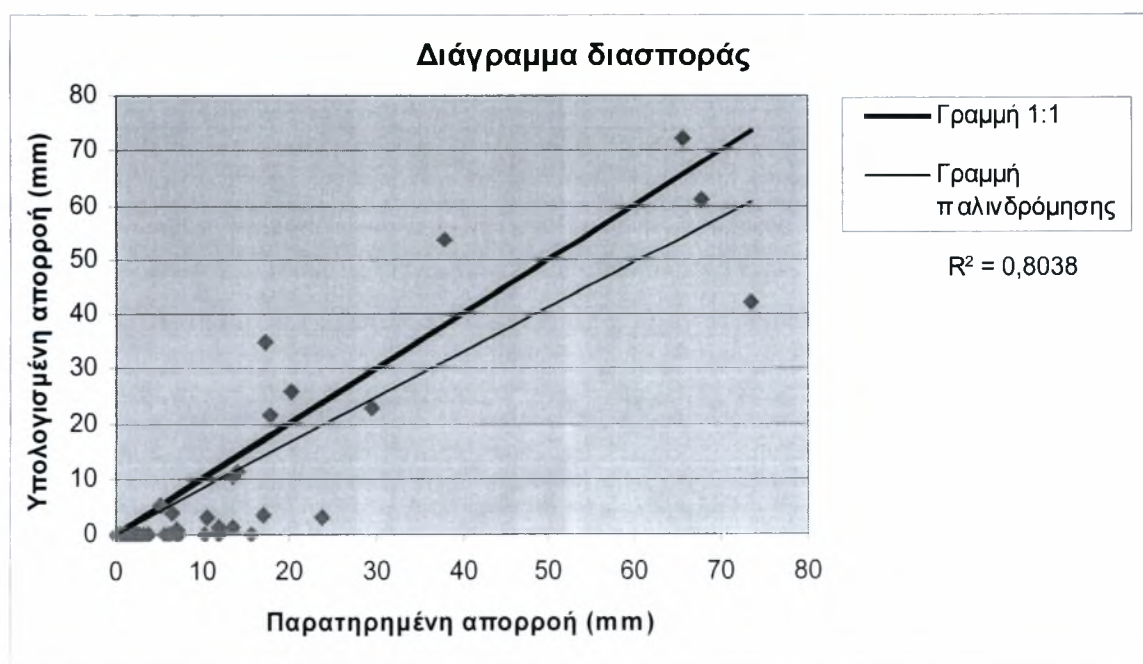
Σχήμα Γ.28

Γ.1.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

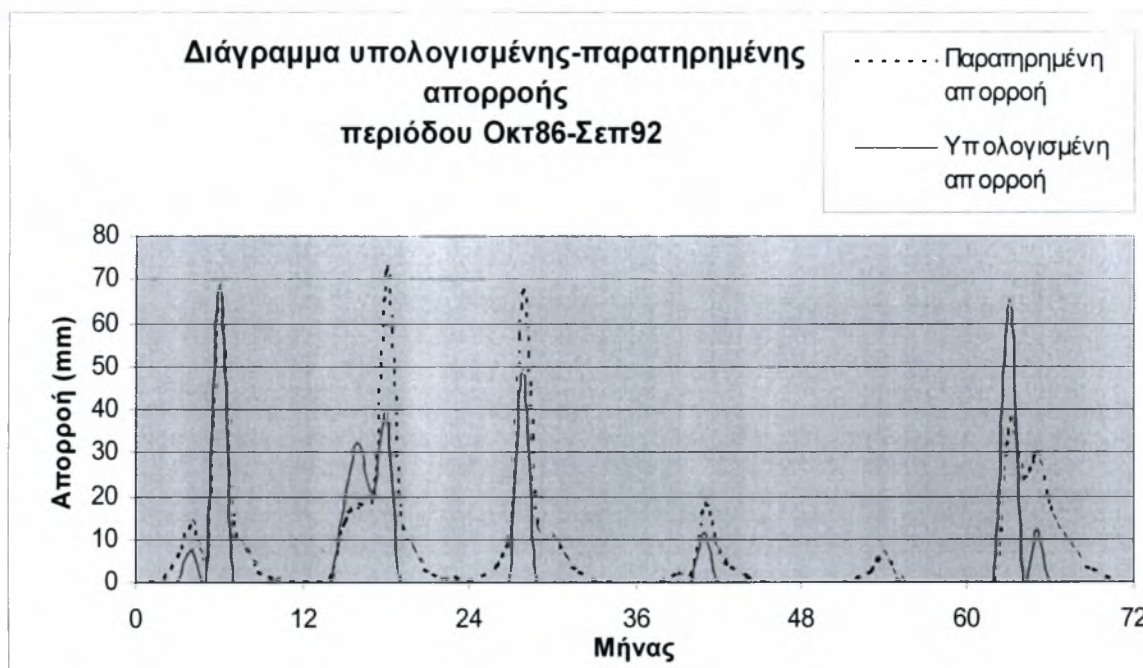


Σχήμα Γ.29

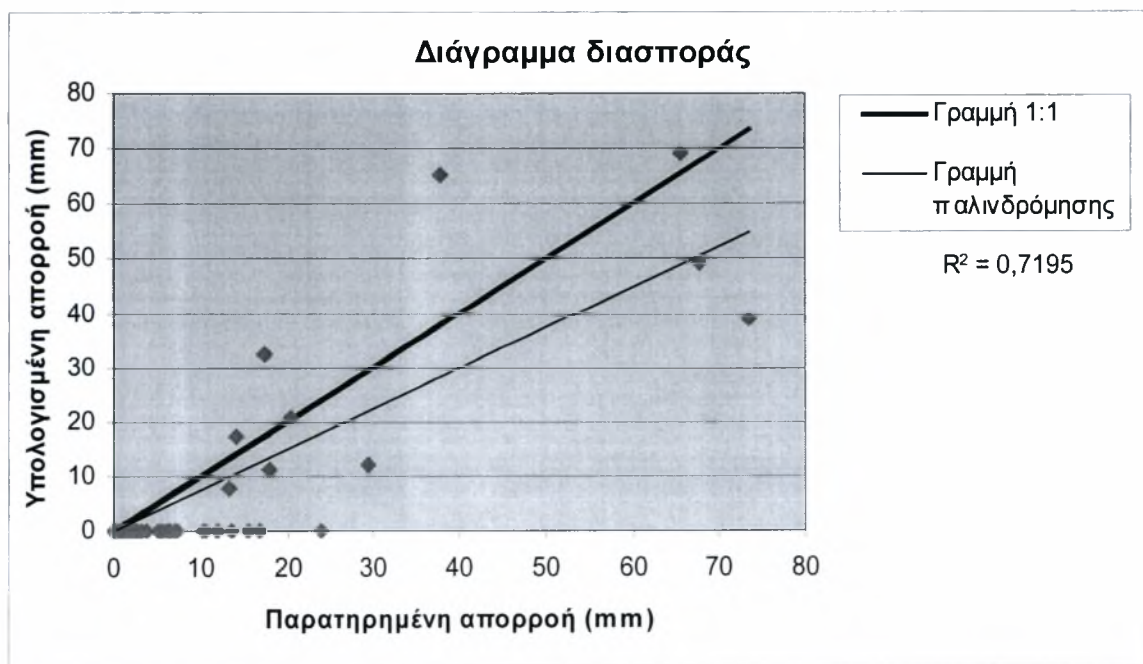


Σχήμα Γ.30

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

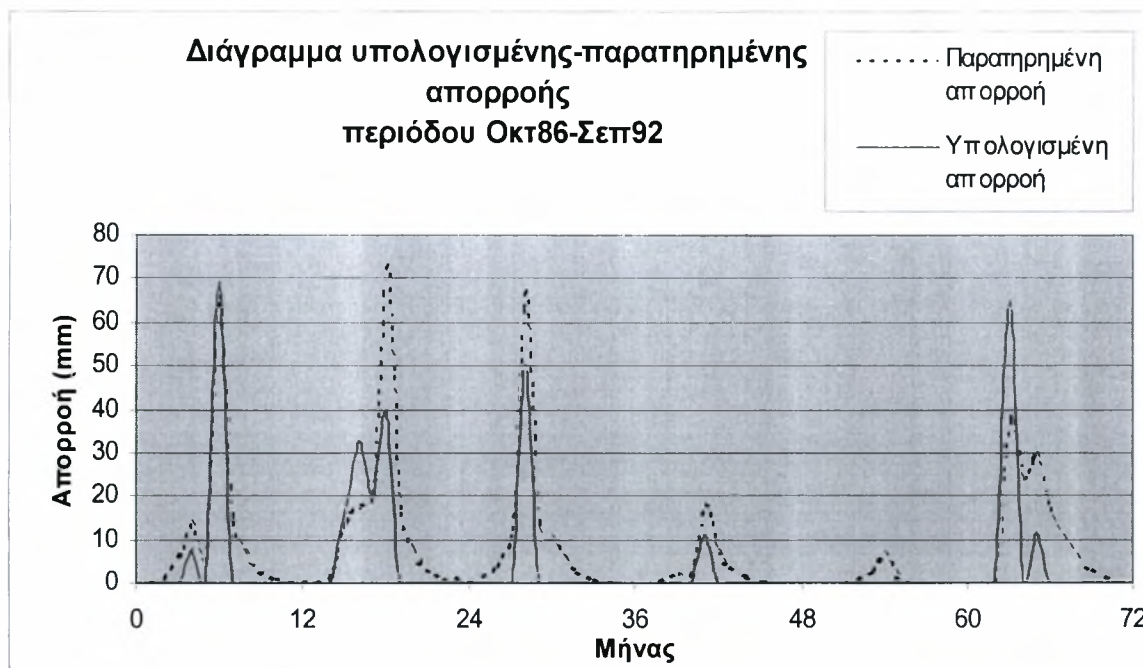


Σχήμα Γ.31

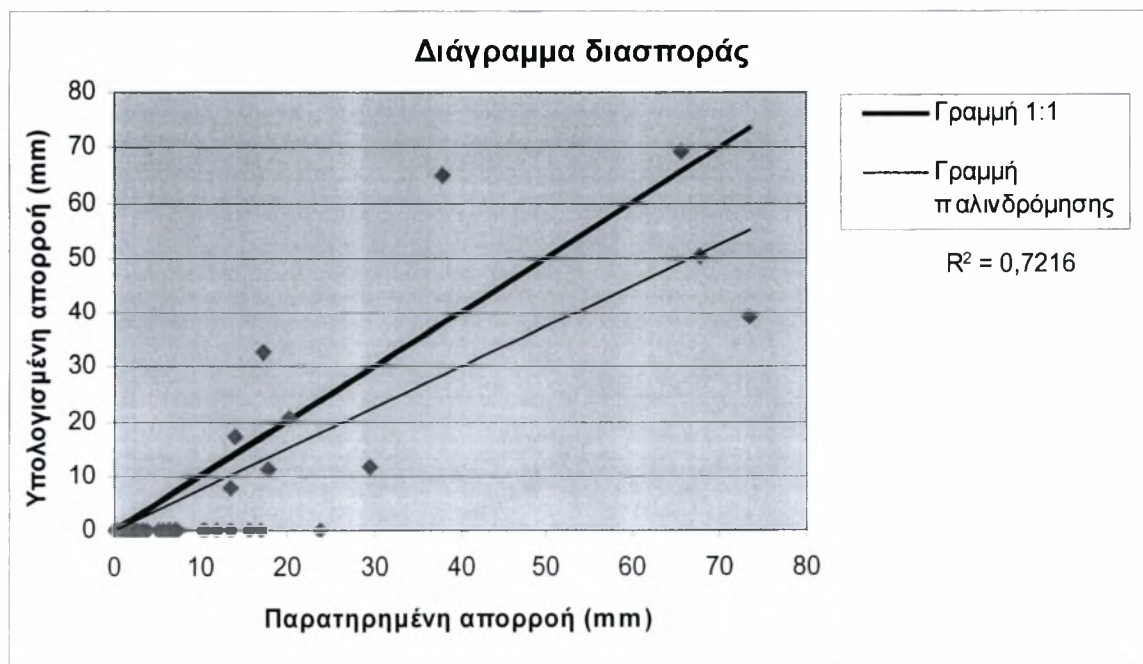


Σχήμα Γ.32

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

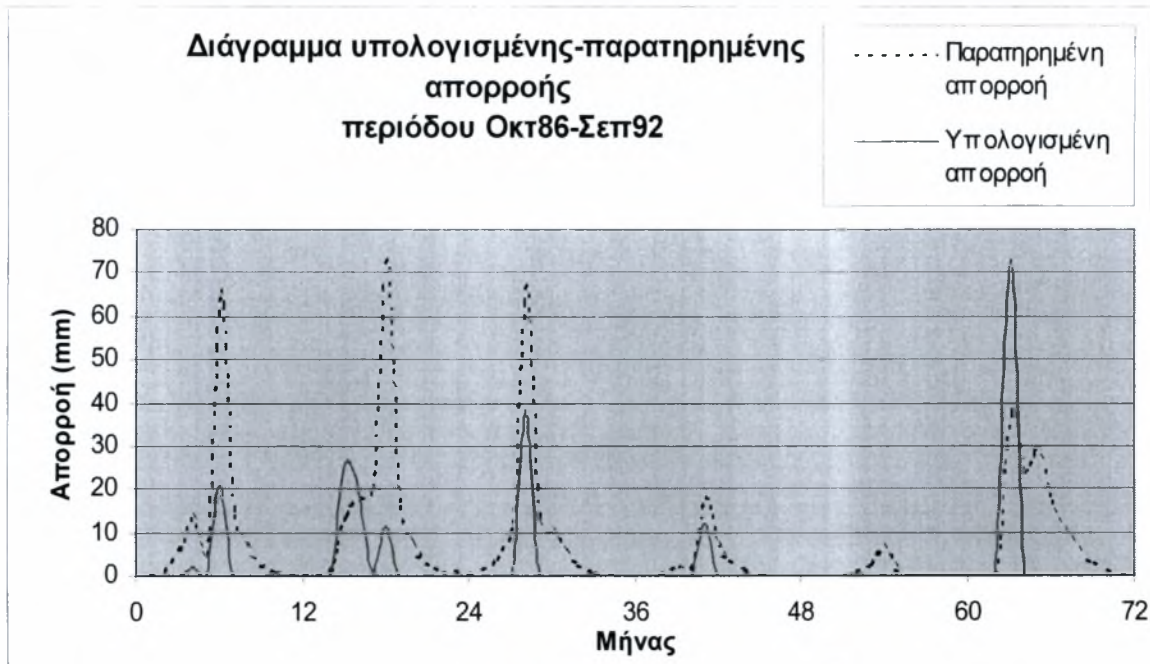


Σχήμα Γ.33

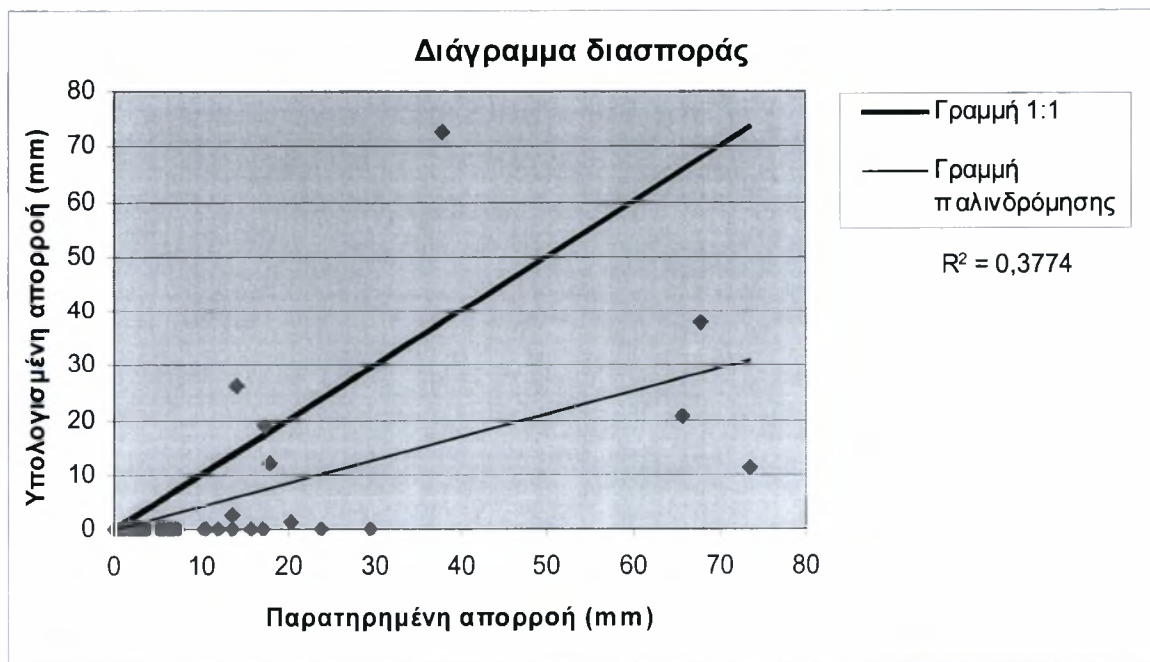


Σχήμα Γ.34

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

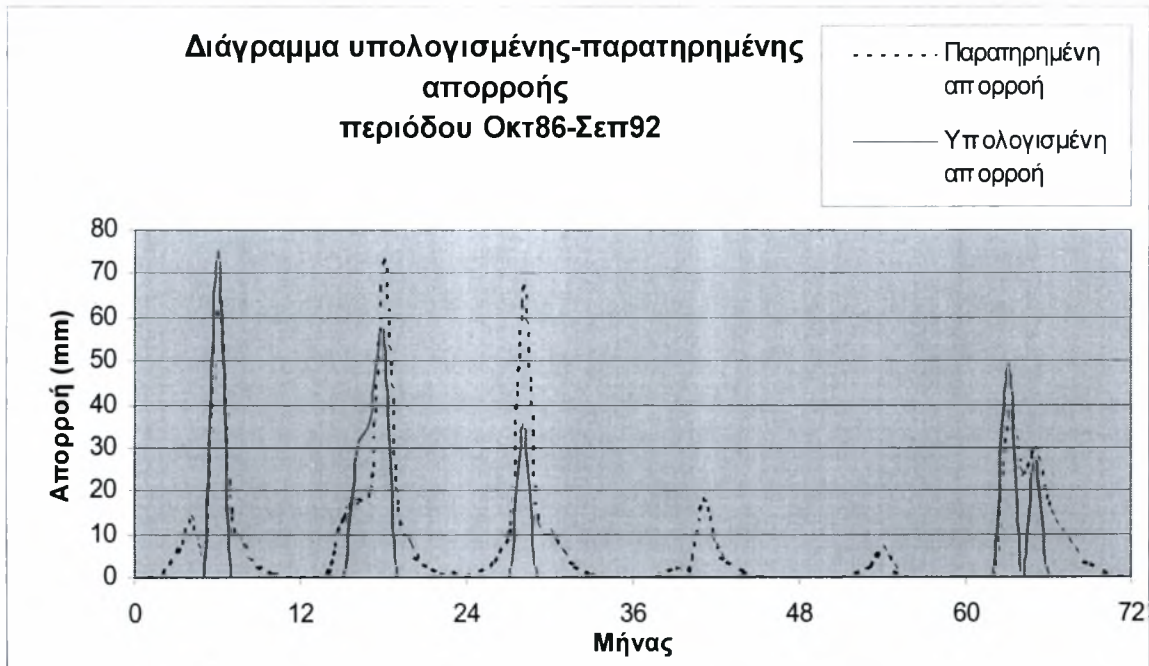


Σχήμα Γ.35

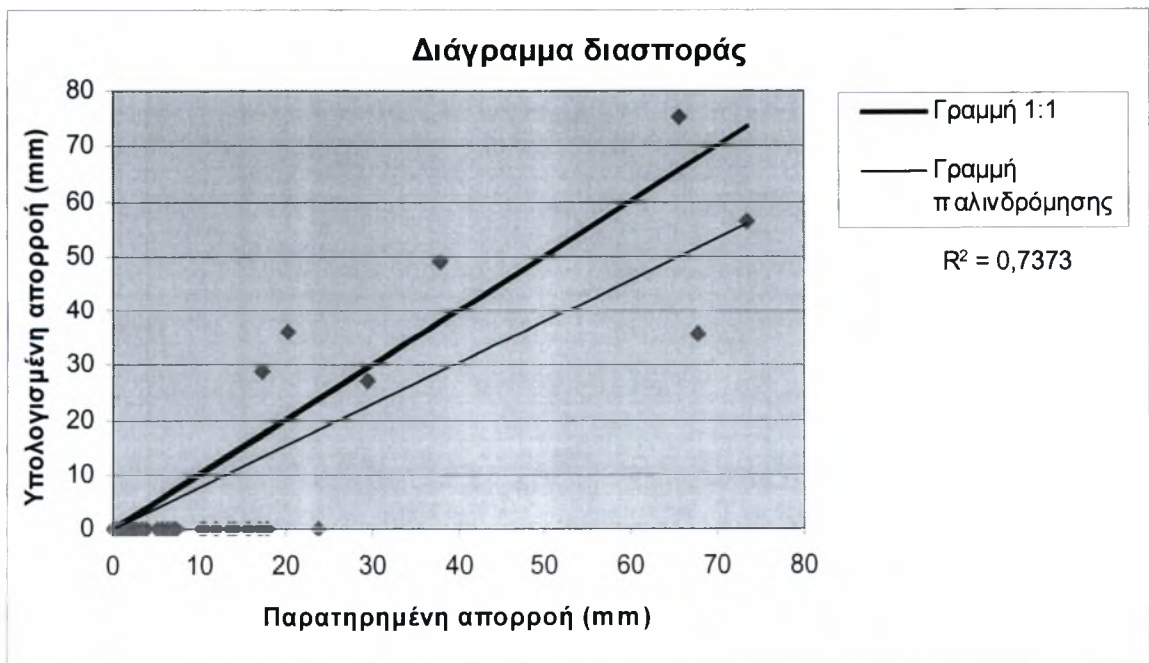


Σχήμα Γ.36

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

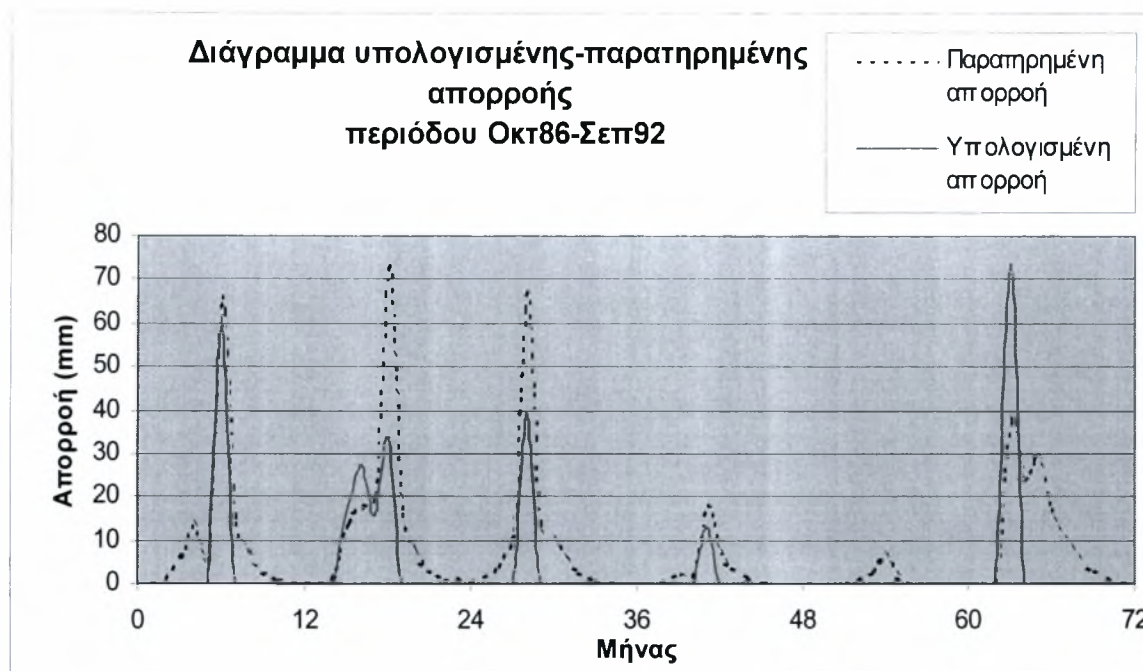


Σχήμα Γ.37

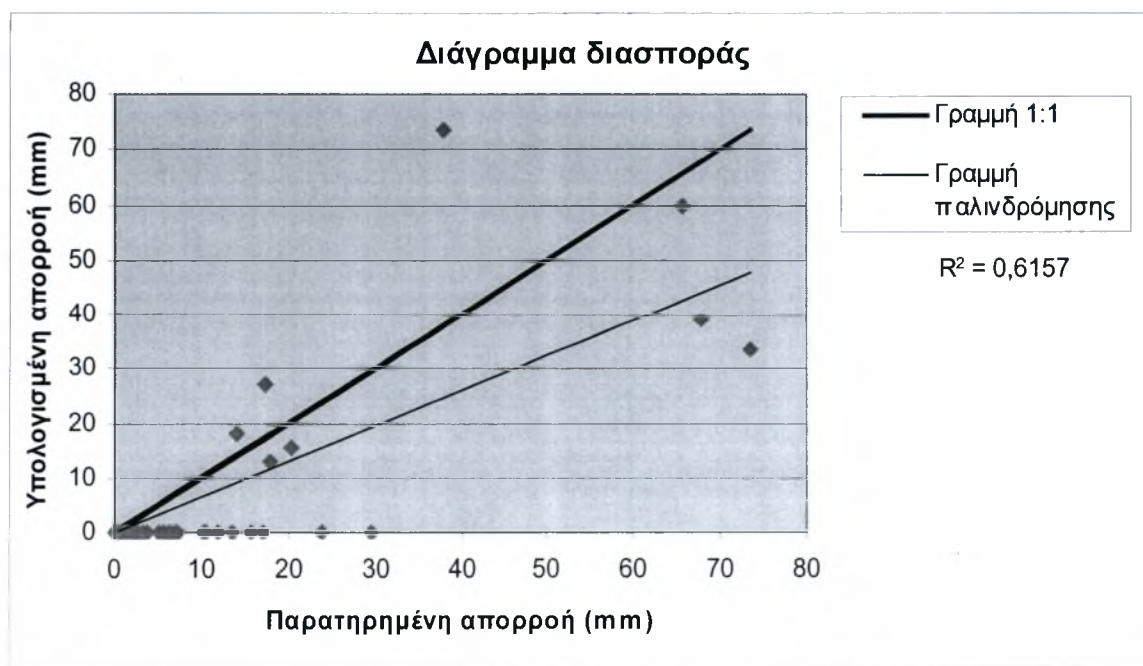


Σχήμα Γ.38

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

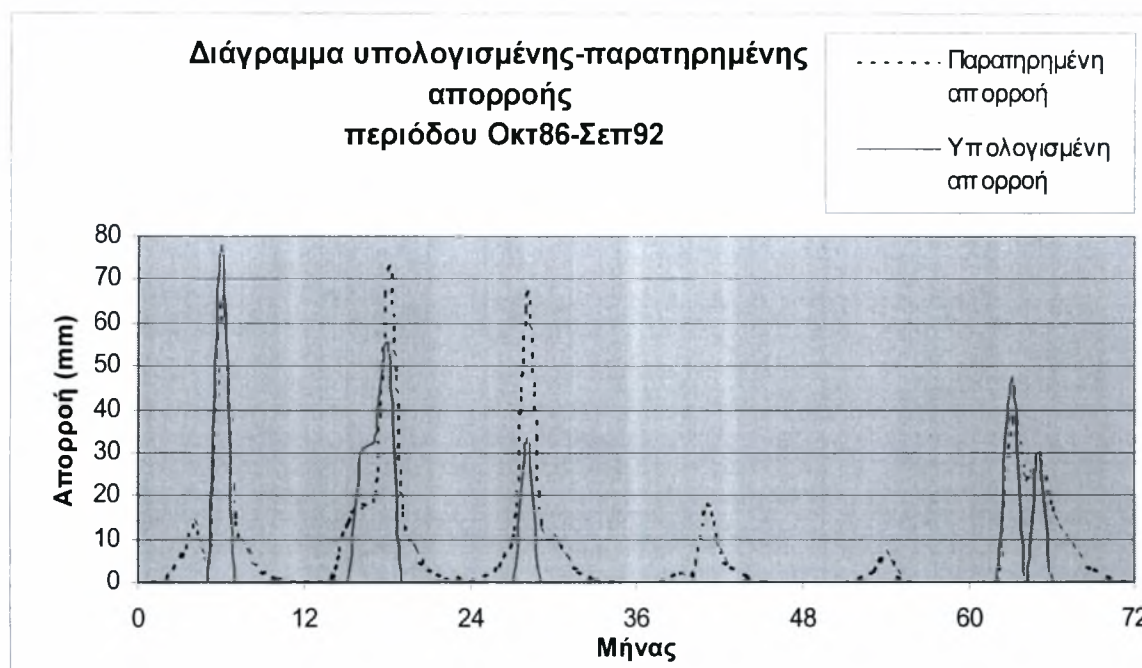


Σχήμα Γ.39

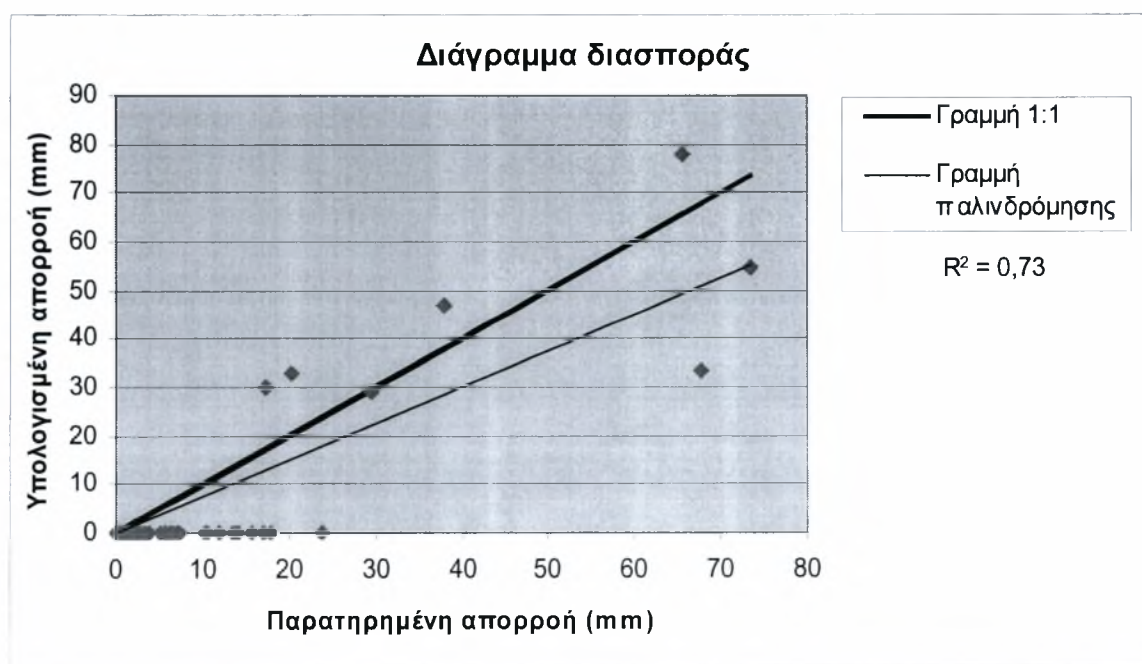


Σχήμα Γ.40

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Γ.41

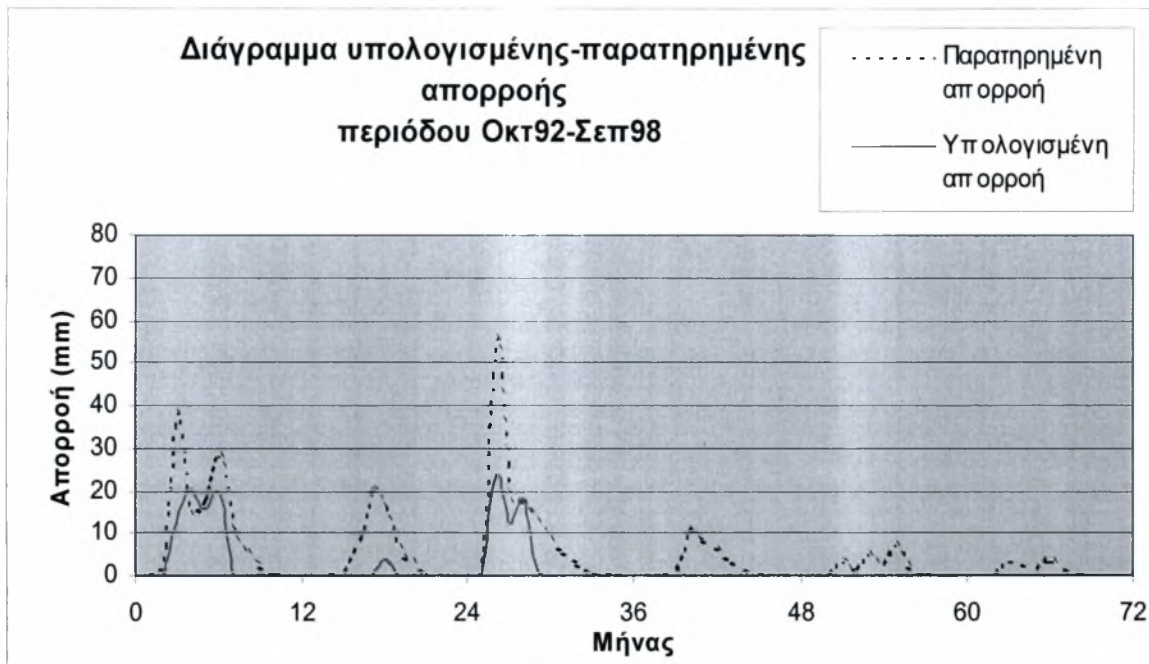


Σχήμα Γ.42

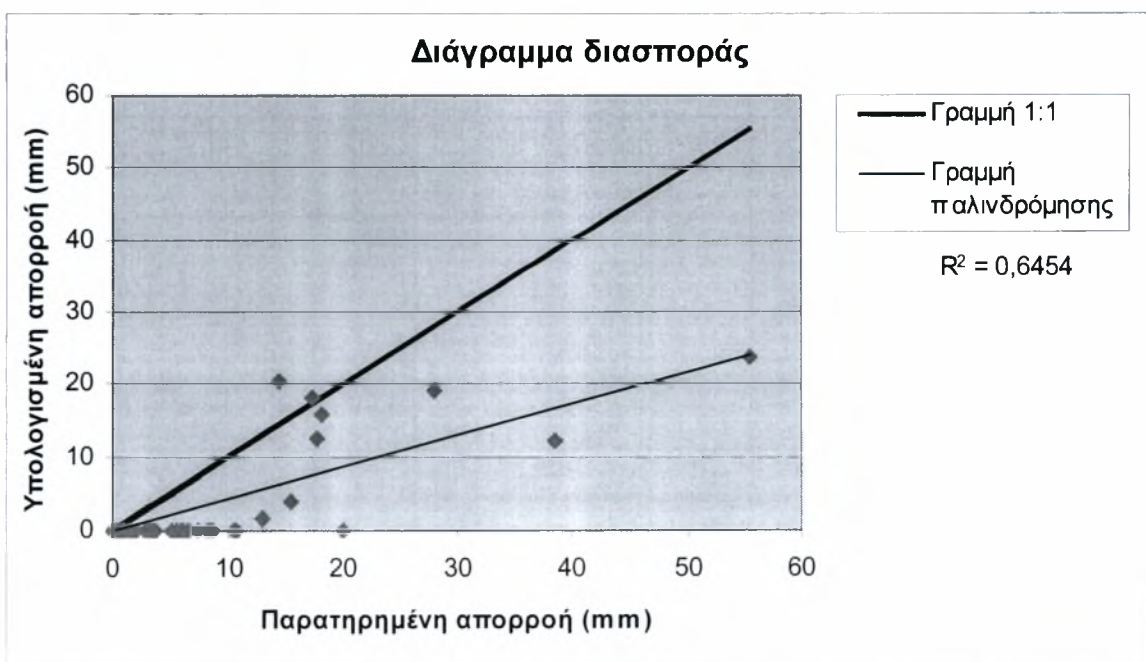
Γ.2 Πιστοποίηση μοντέλου Γιακουμάκης περιόδου Οκτ1992-Σεπ1998

Γ.2.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Thornthwaite

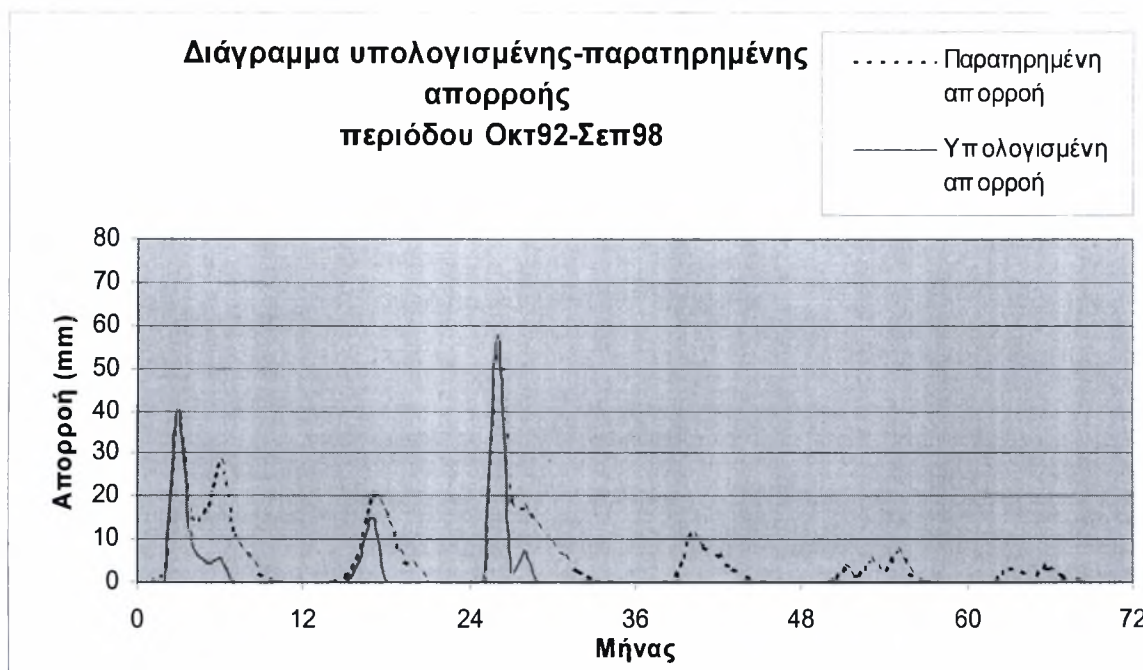


Σχήμα Γ.43

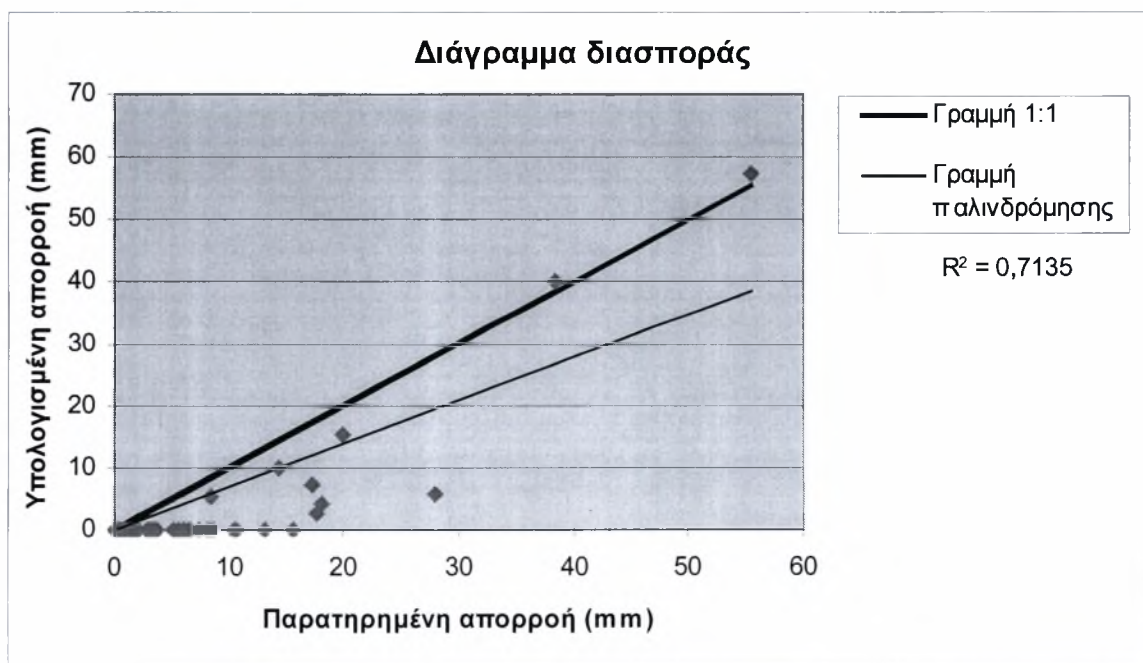


Σχήμα Γ.44

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

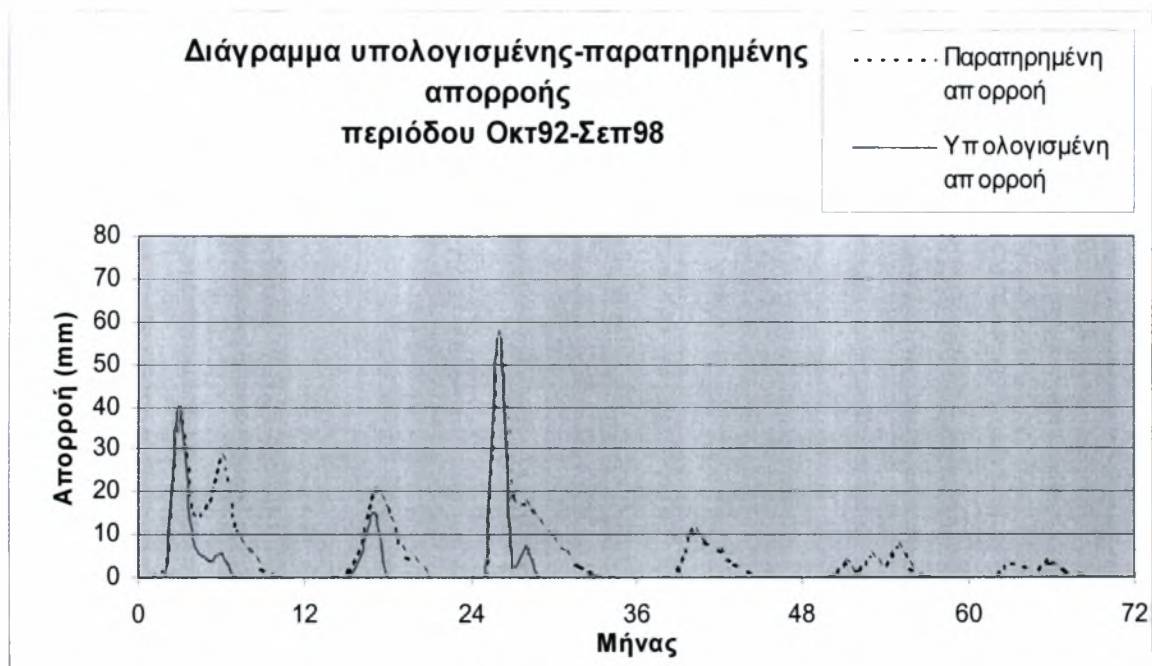


Σχήμα Γ.45

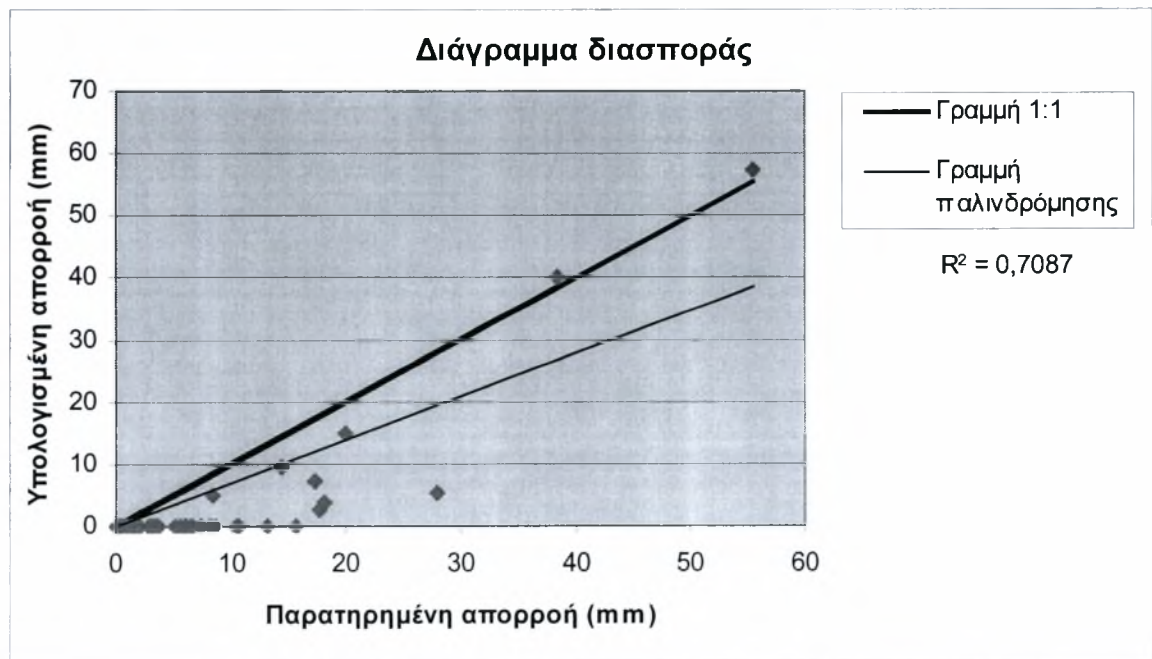


Σχήμα Γ.46

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

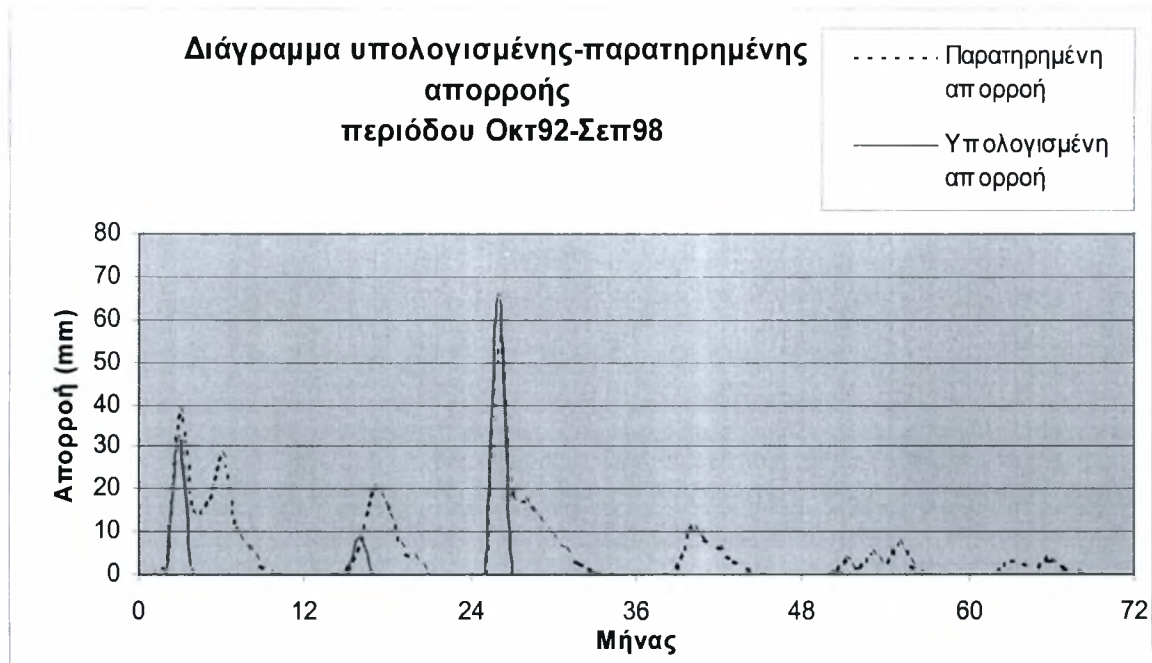


Σχήμα Γ.47

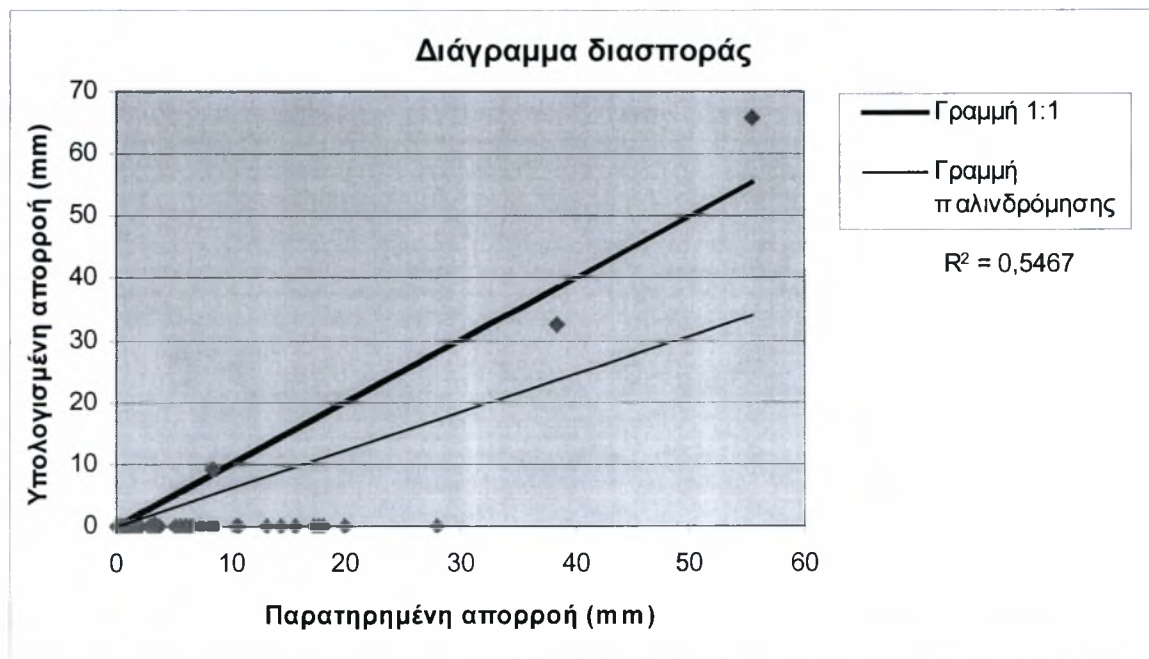


Σχήμα Γ.48

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

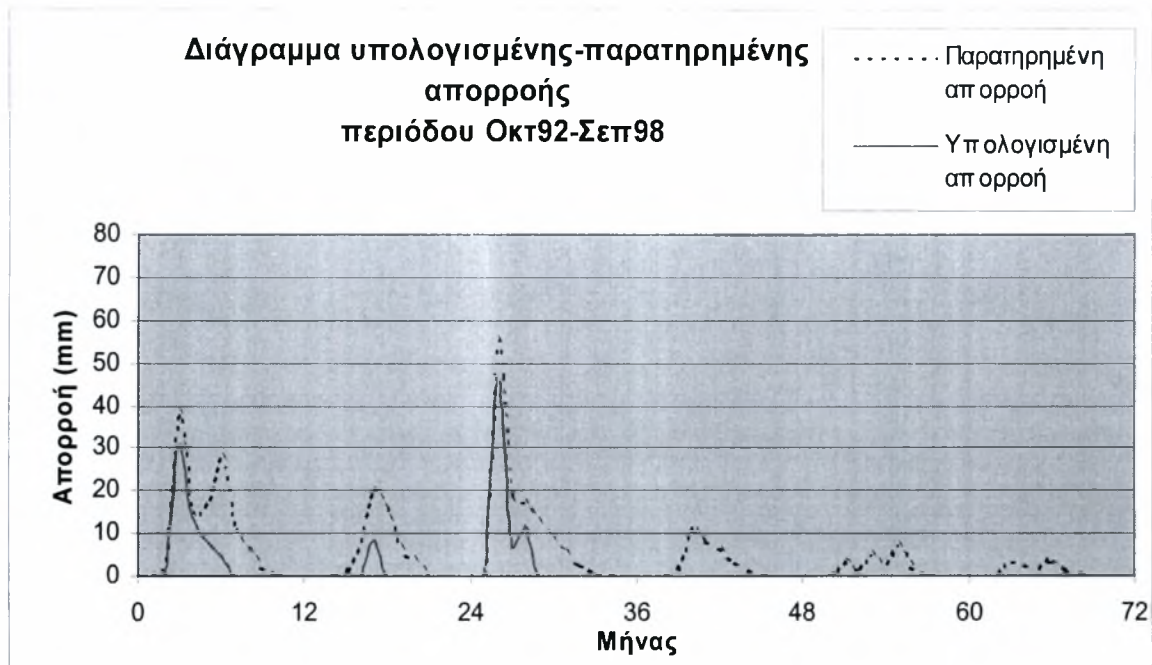


Σχήμα Γ.49

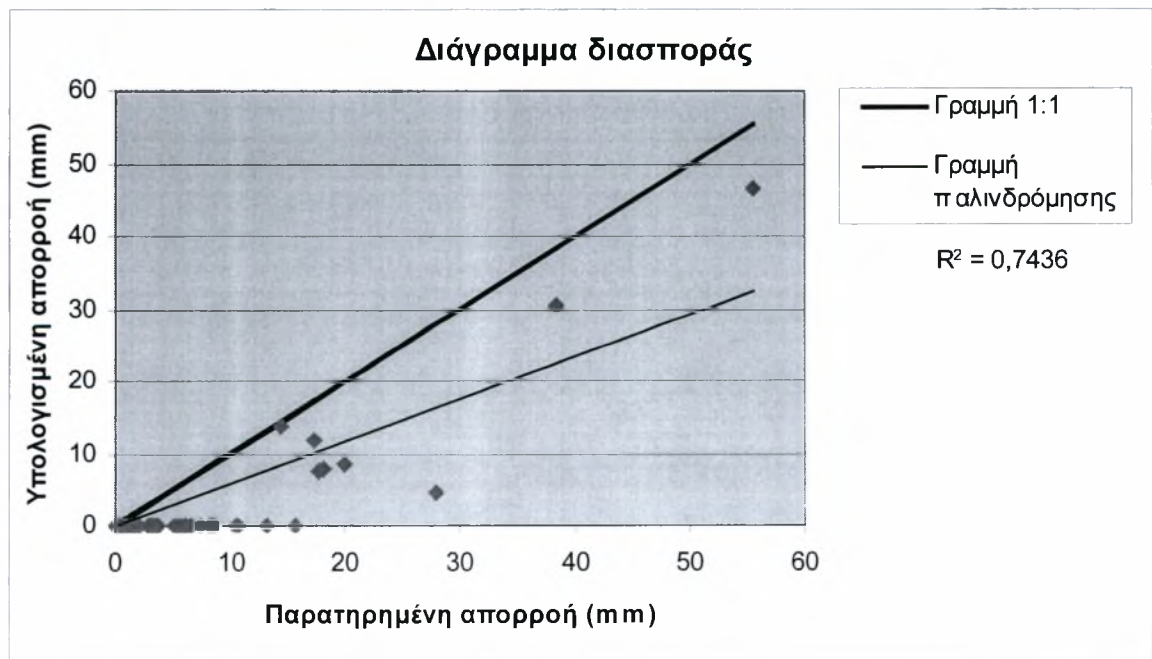


Σχήμα Γ.50

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

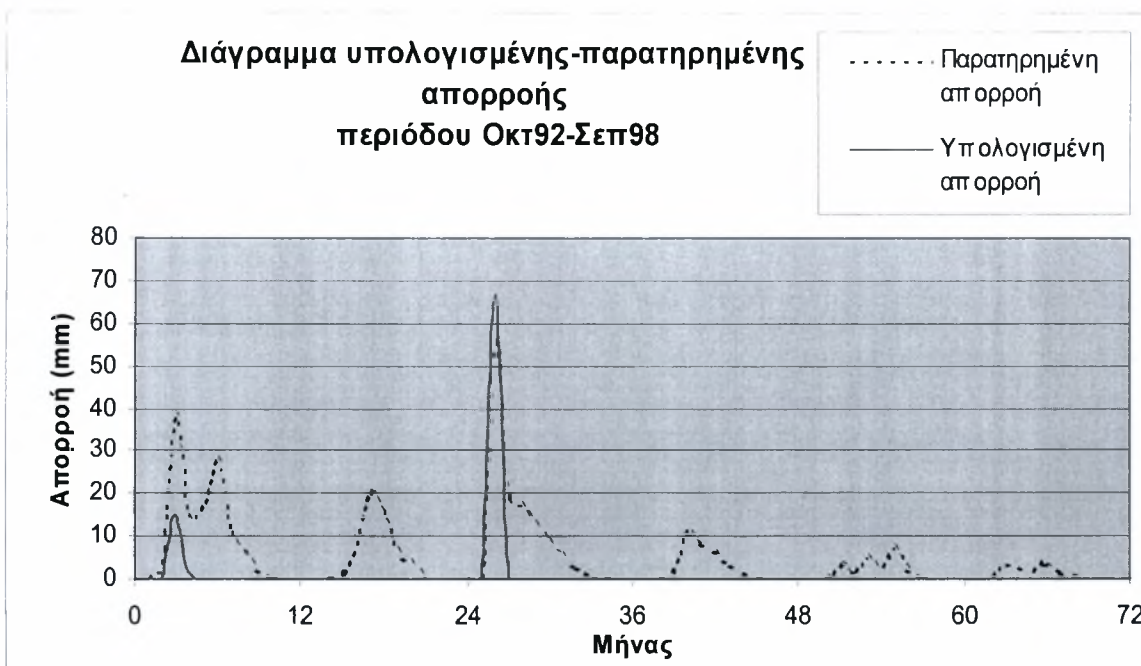


Σχήμα Γ.51

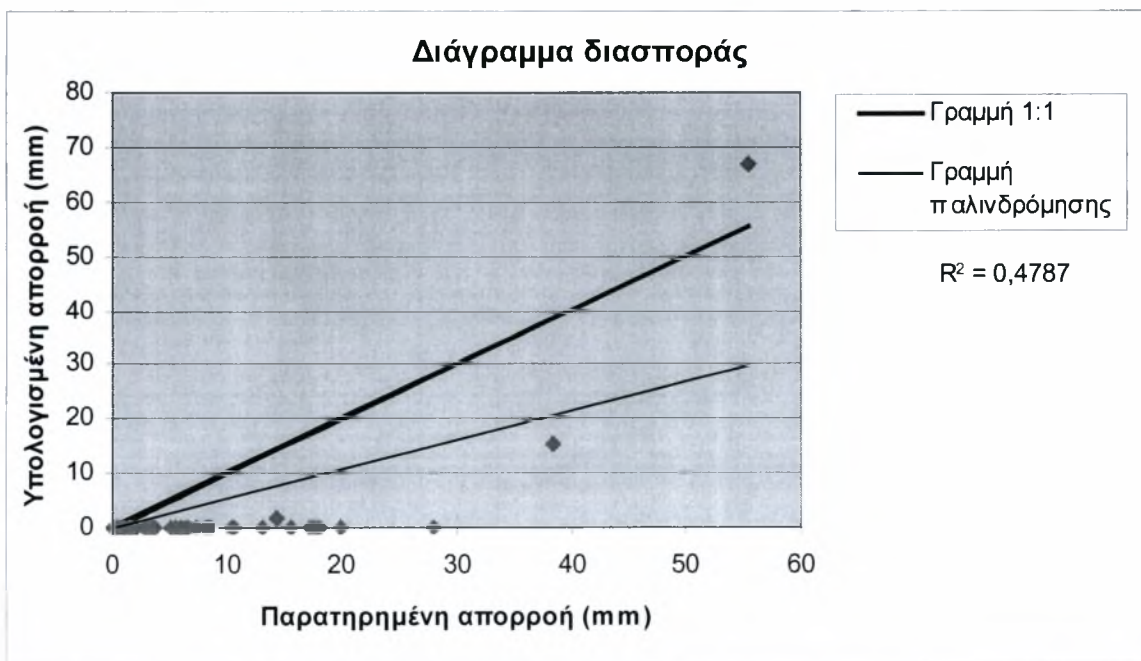


Σχήμα Γ.52

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

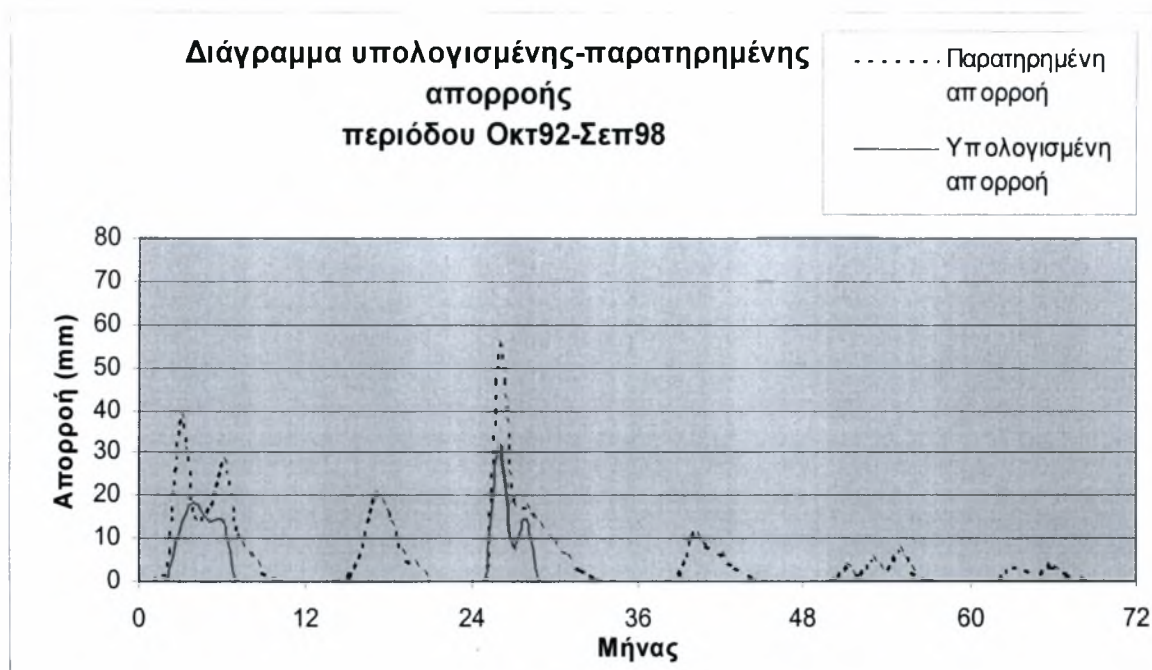


Σχήμα Γ.53

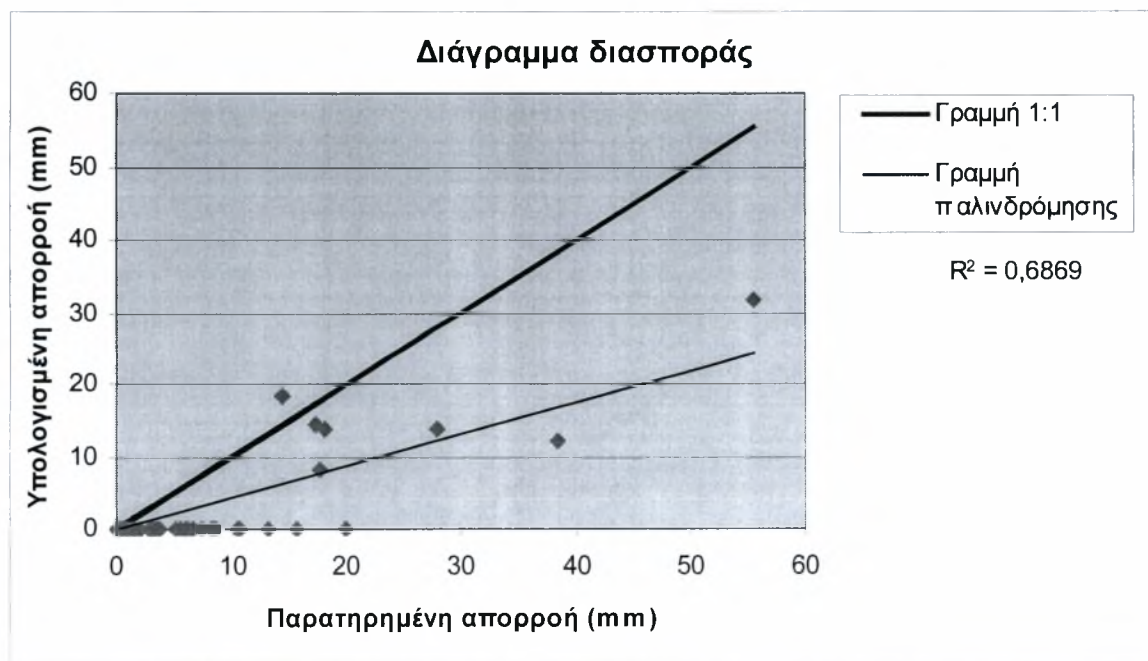


Σχήμα Γ.54

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



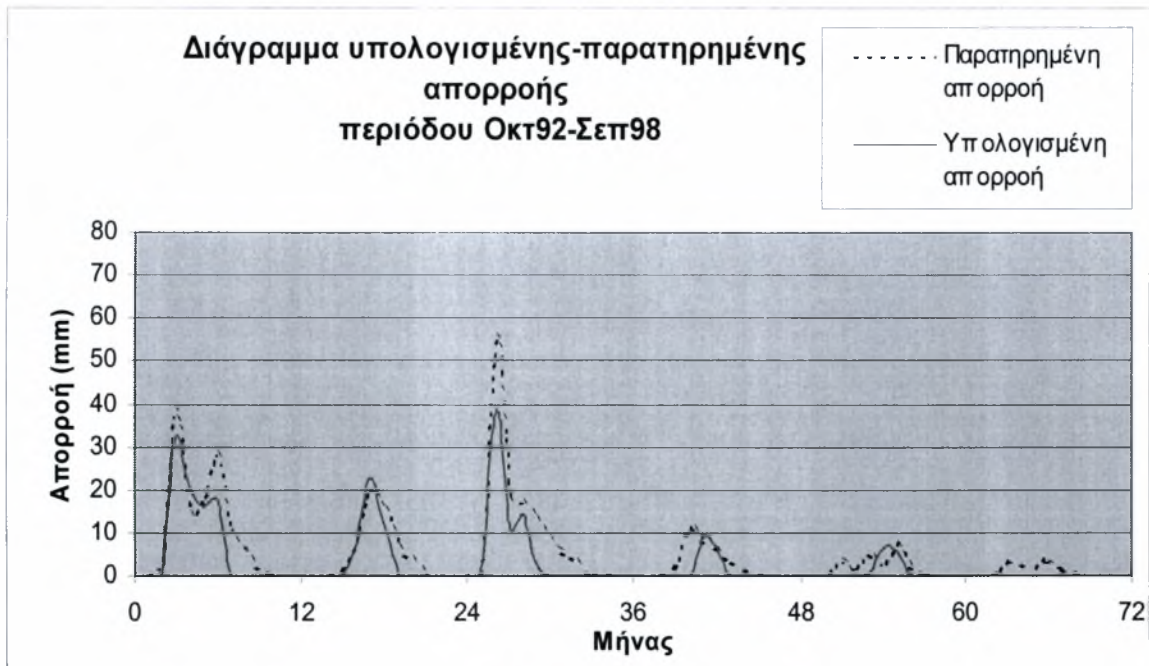
Σχήμα Γ.55



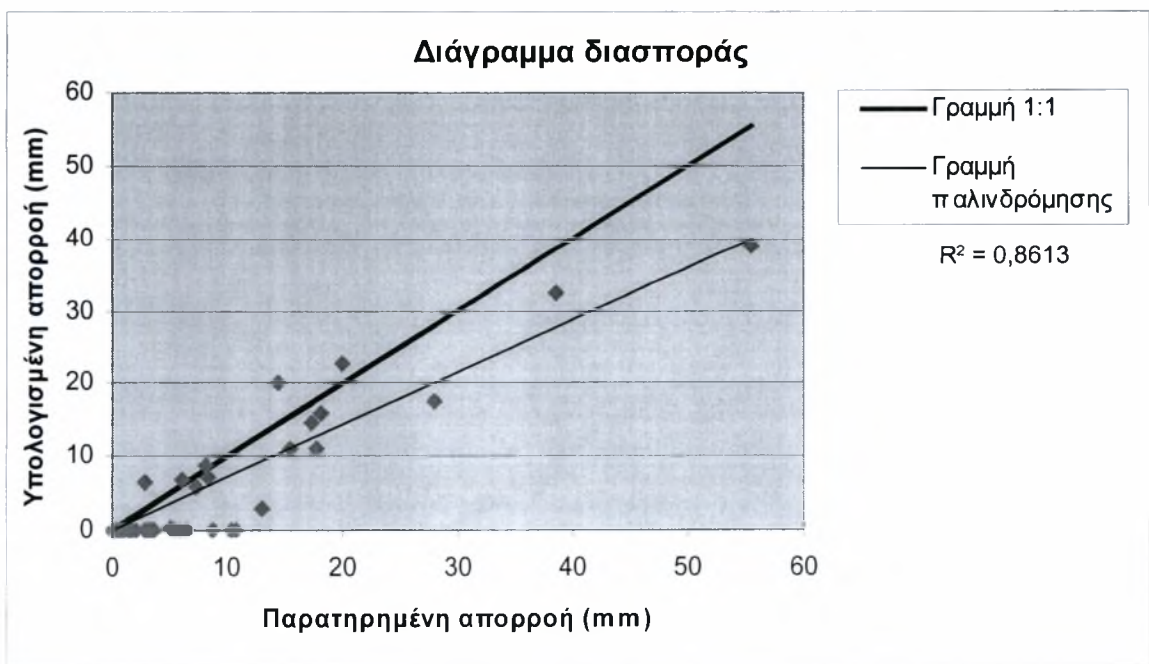
Σχήμα Γ.56

Γ.2.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

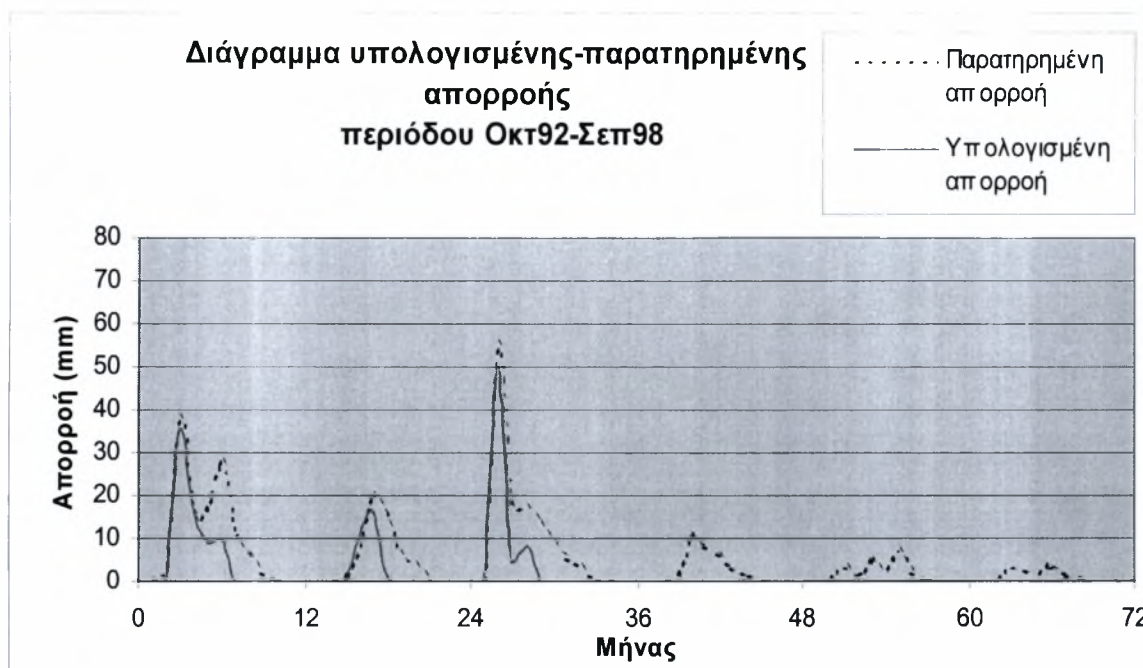


Σχήμα Γ.57

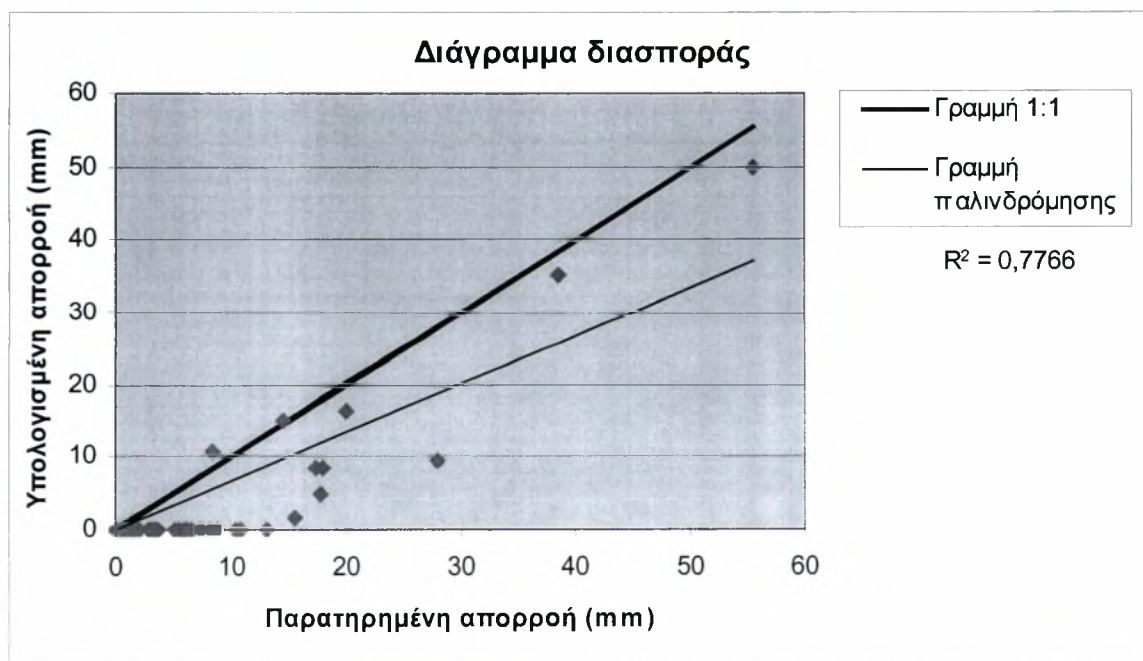


Σχήμα Γ.58

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

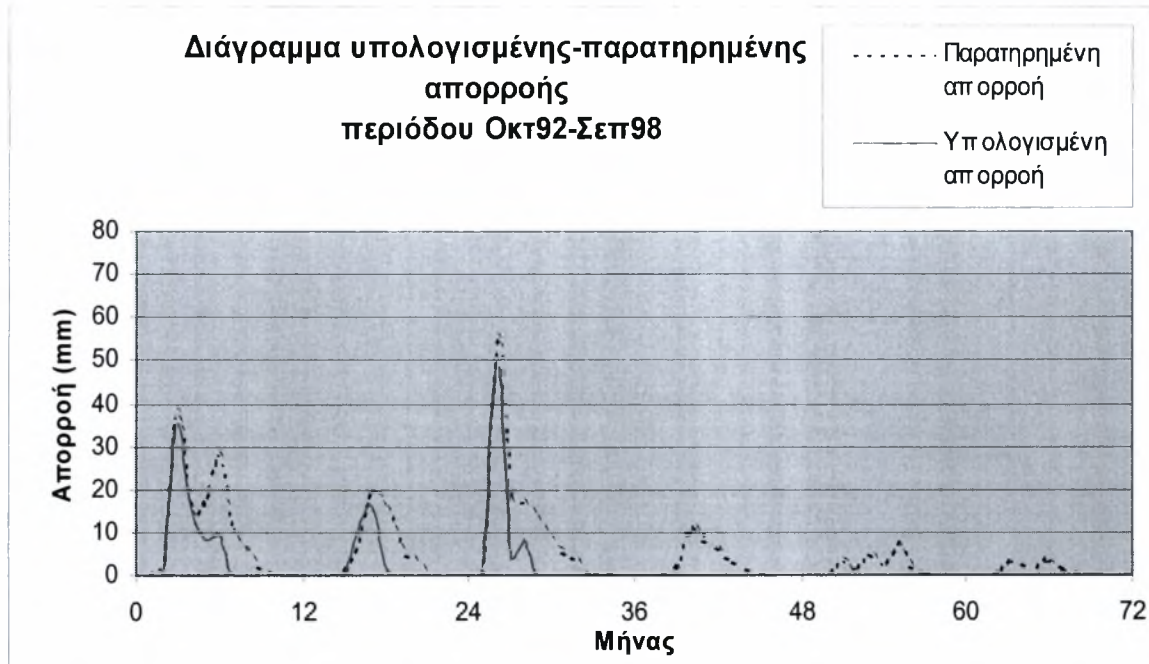


Σχήμα Γ.59

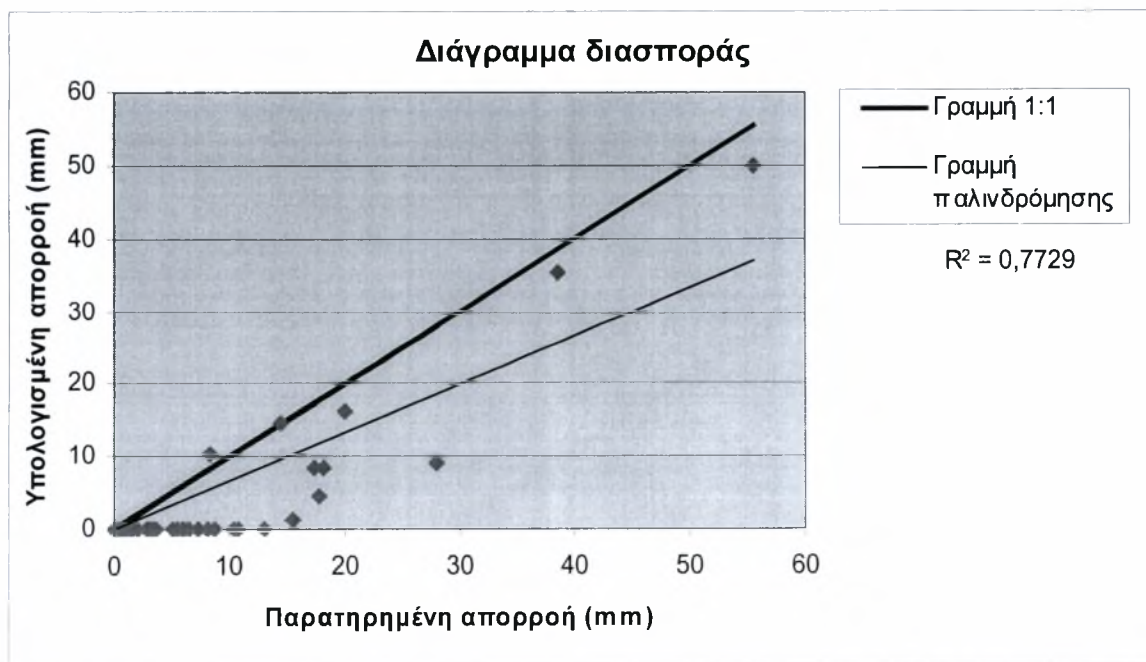


Σχήμα Γ.60

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

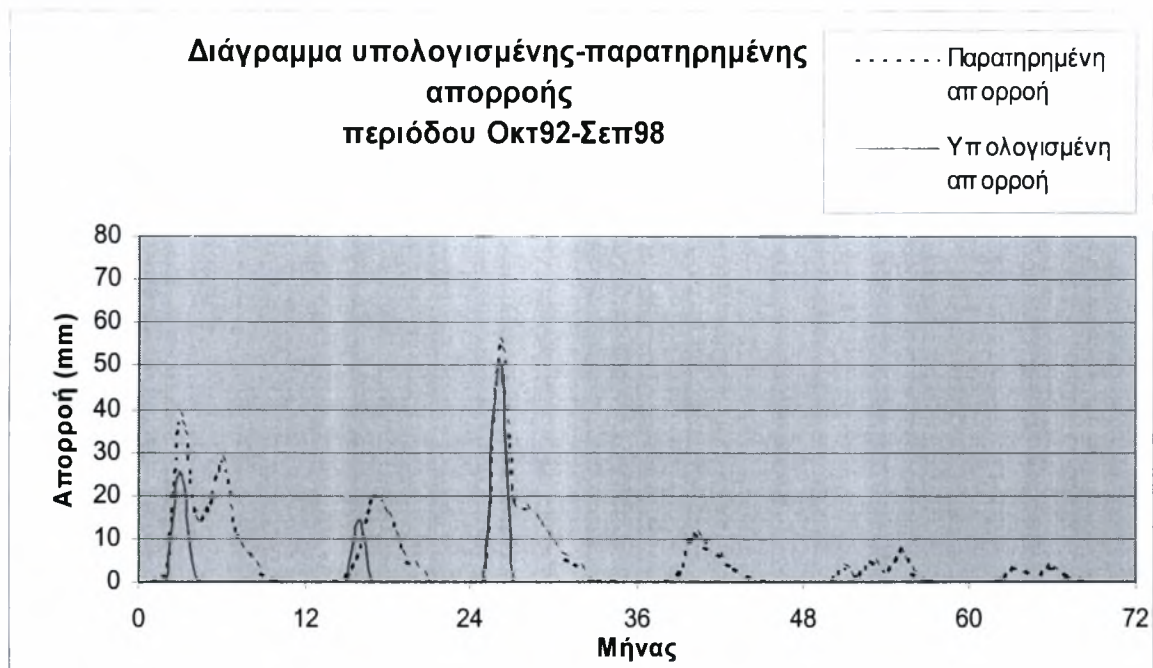


Σχήμα Γ.61

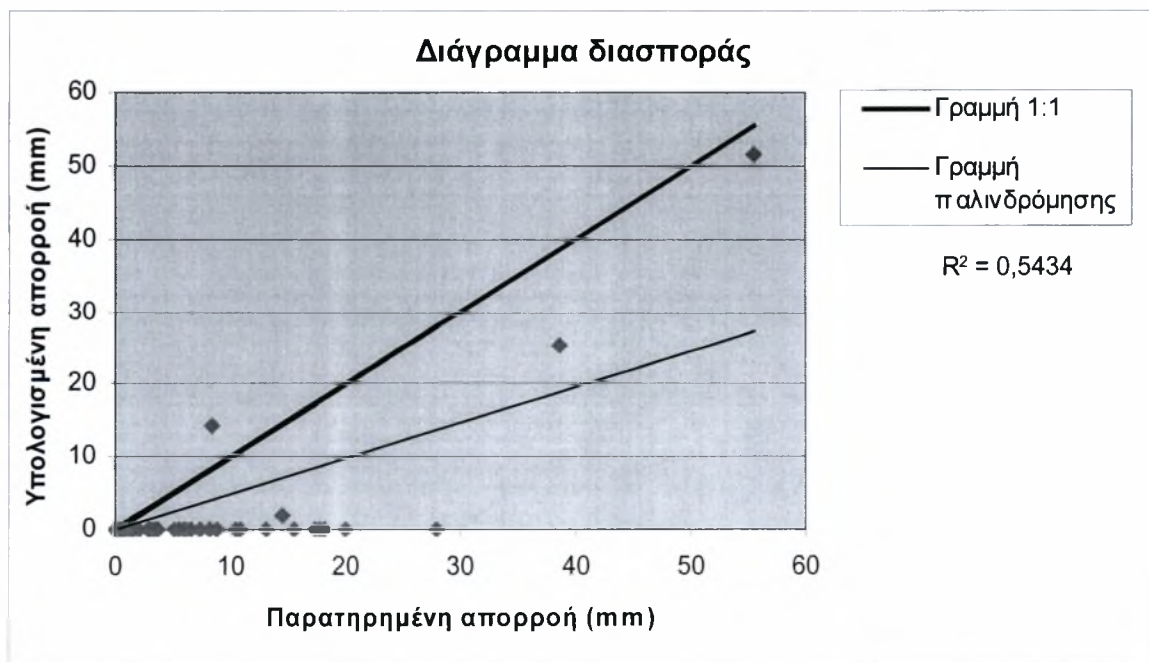


Σχήμα Γ.62

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

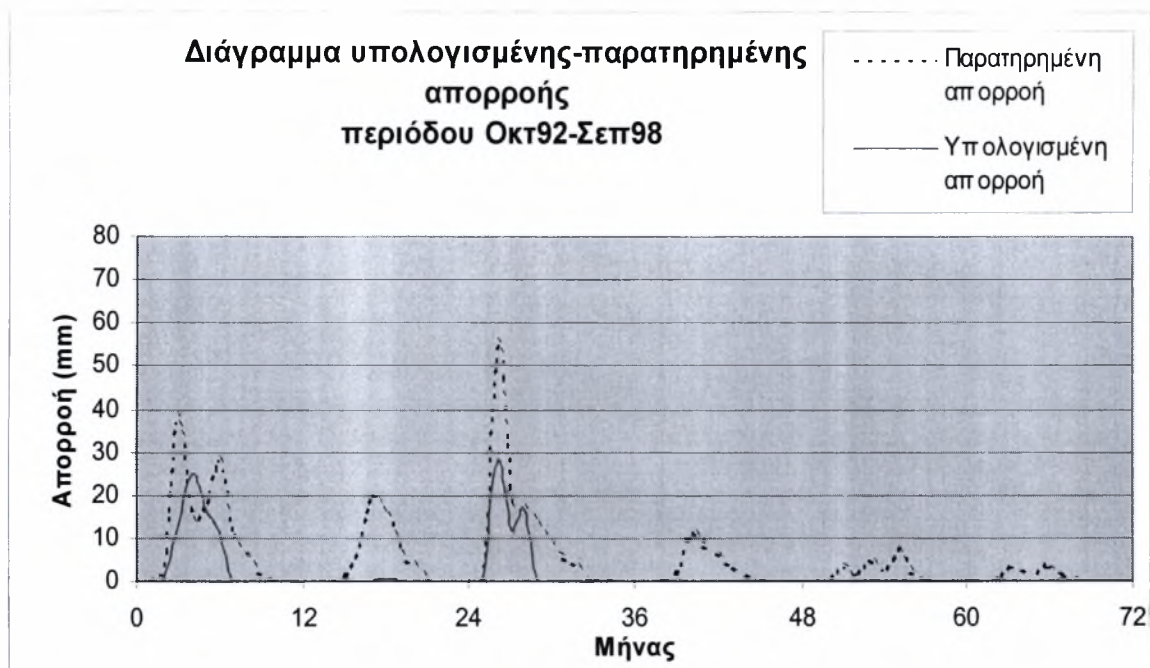


Σχήμα Γ.63

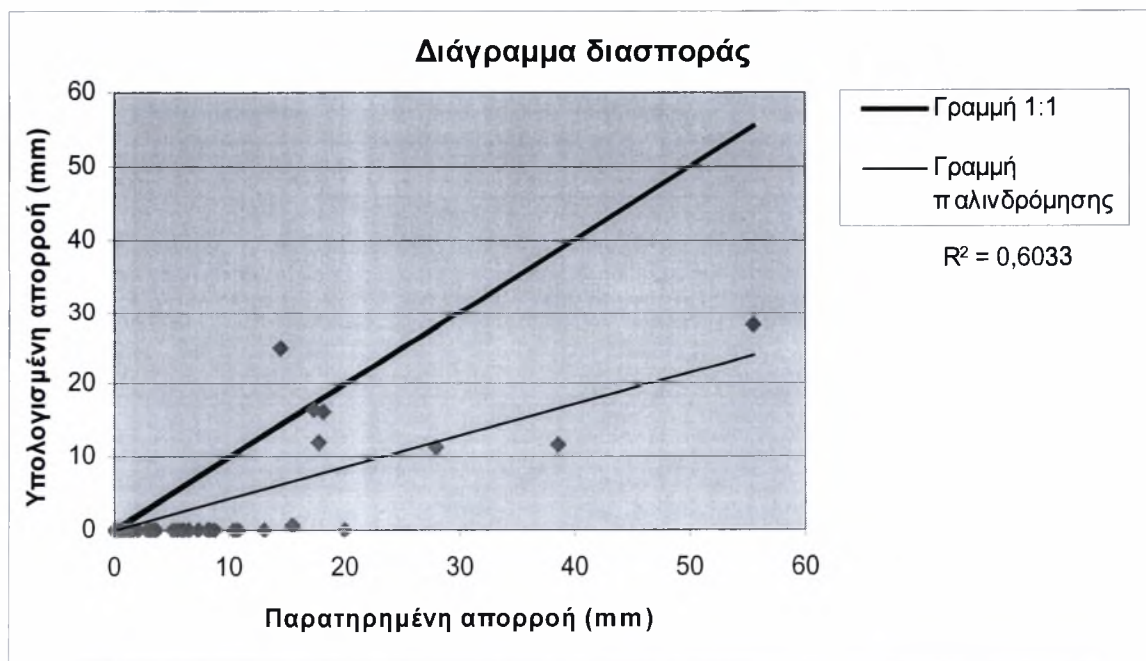


Σχήμα Γ.64

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

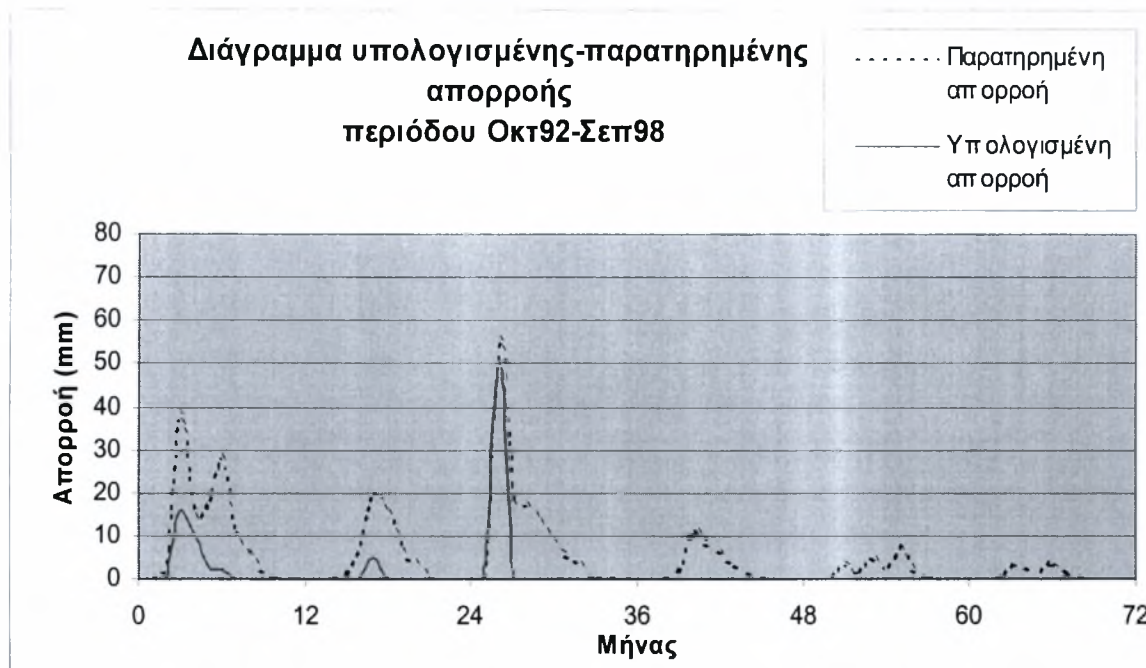


Σχήμα Γ.65

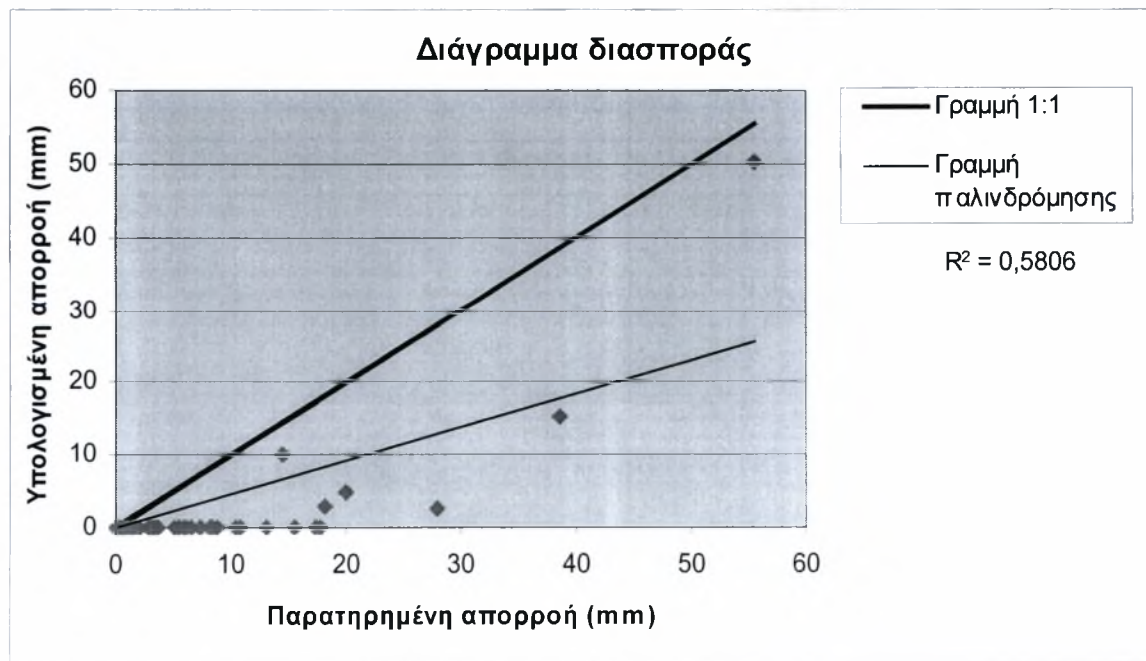


Σχήμα Γ.66

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

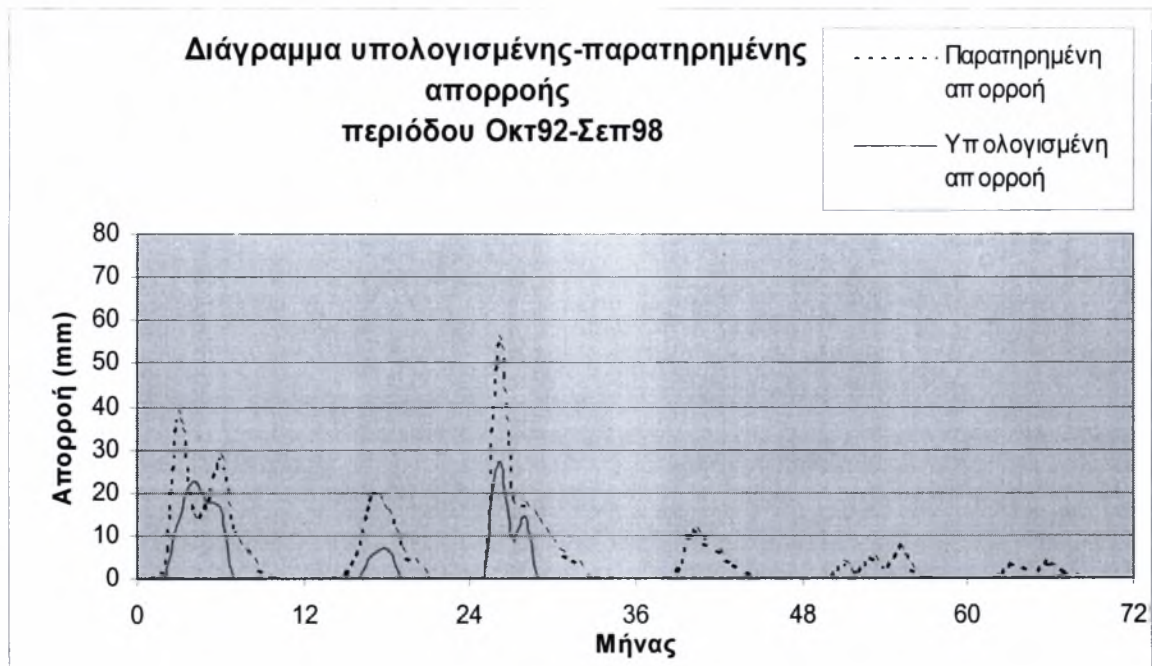


Σχήμα Γ.67

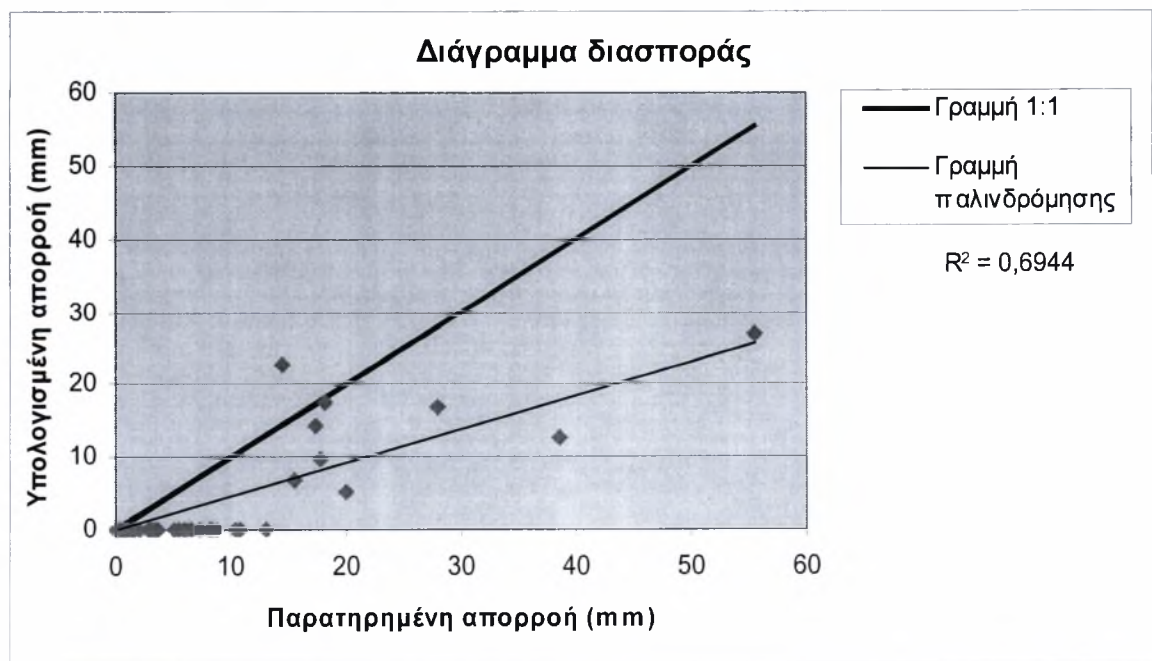


Σχήμα Γ.68

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



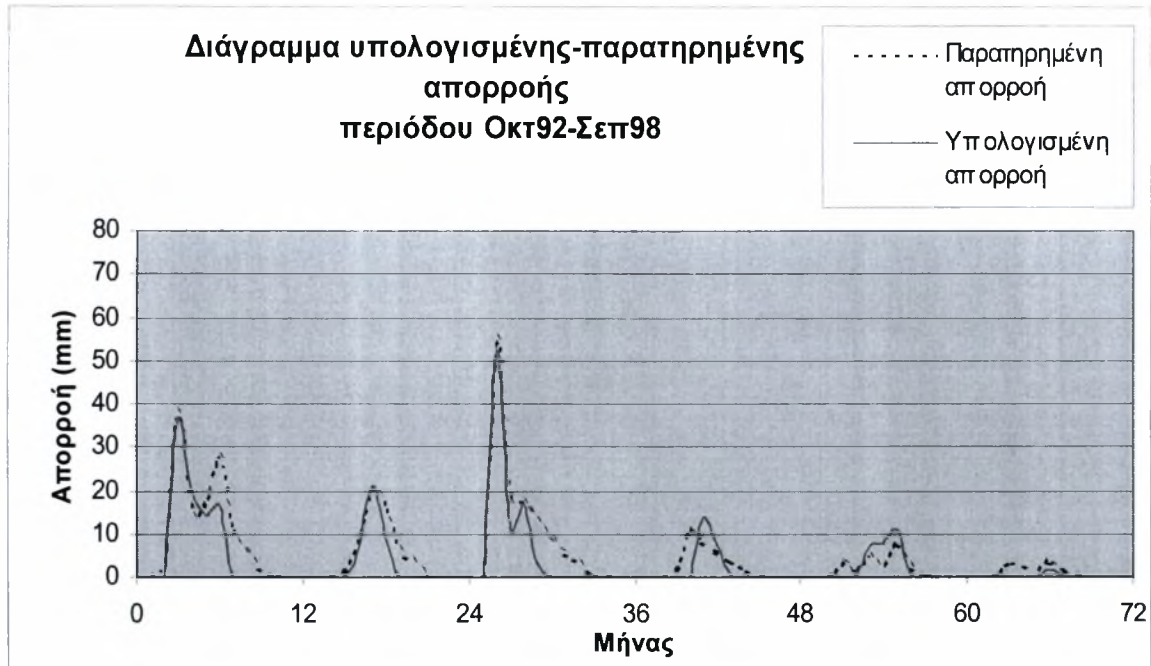
Σχήμα Γ.69



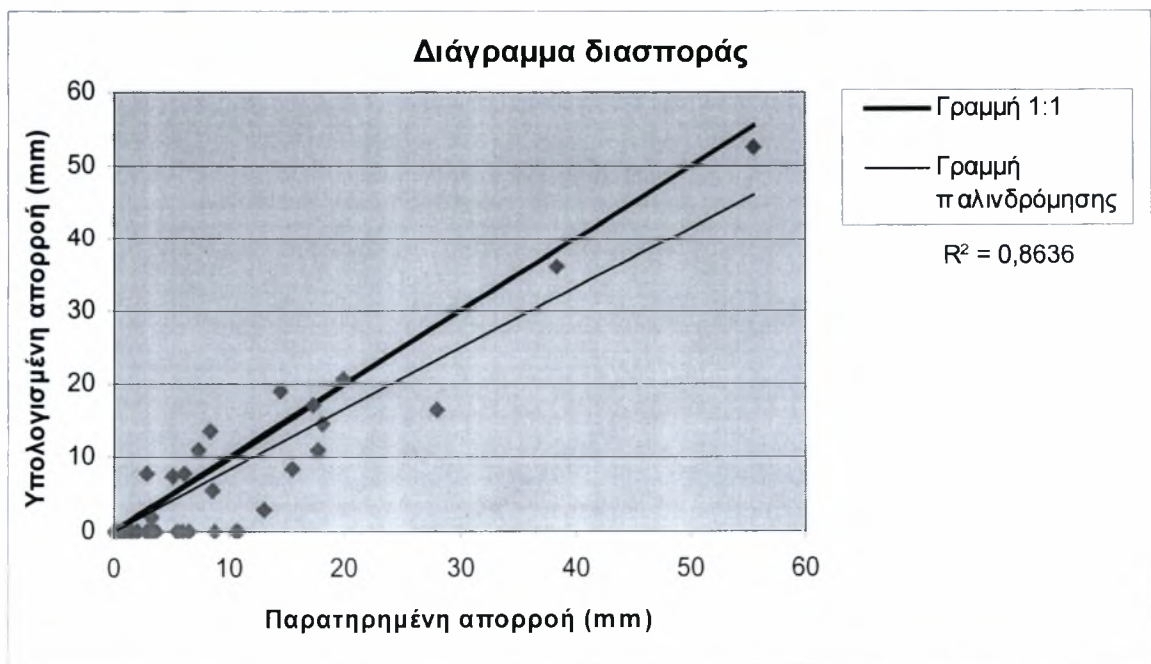
Σχήμα Γ.70

Γ.2.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

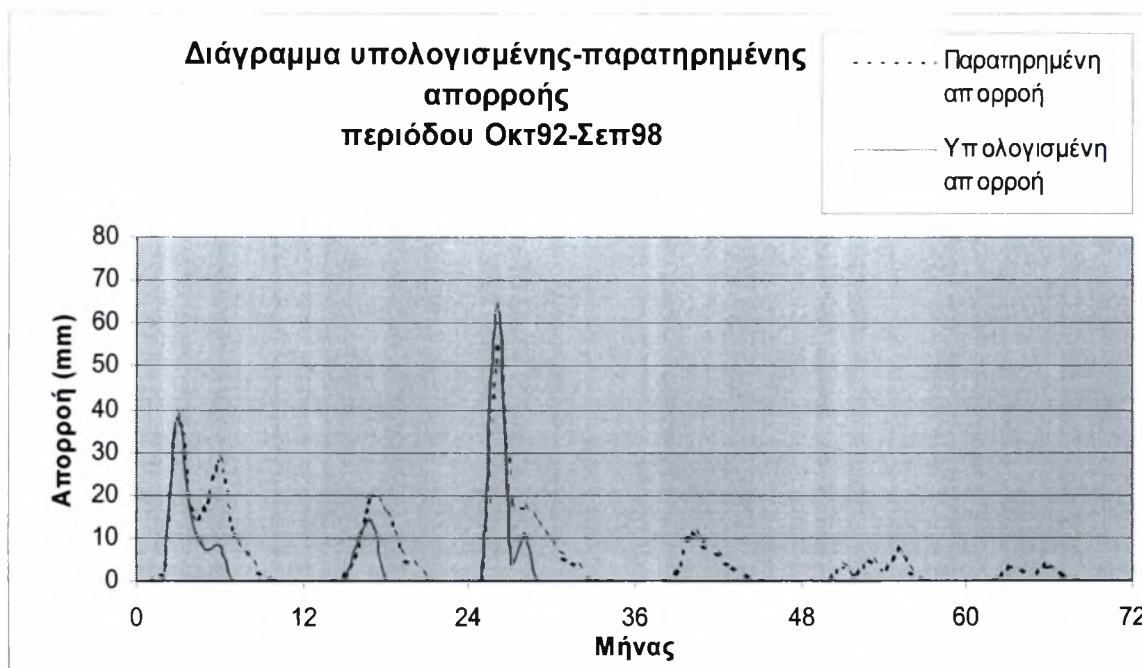


Σχήμα Γ.71

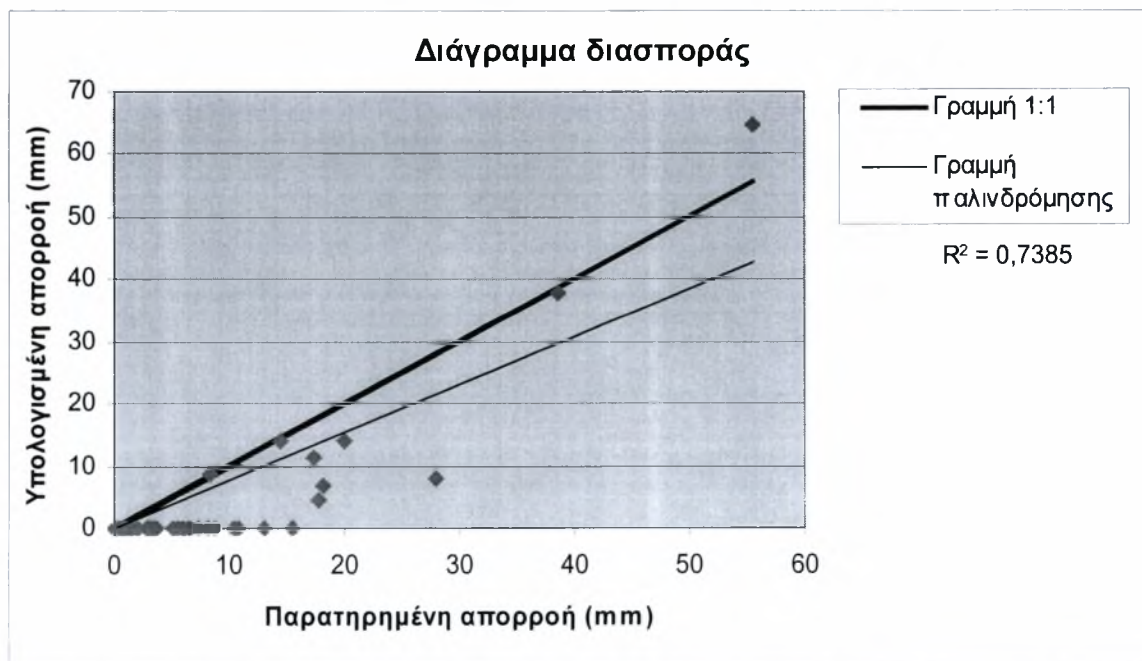


Σχήμα Γ.72

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

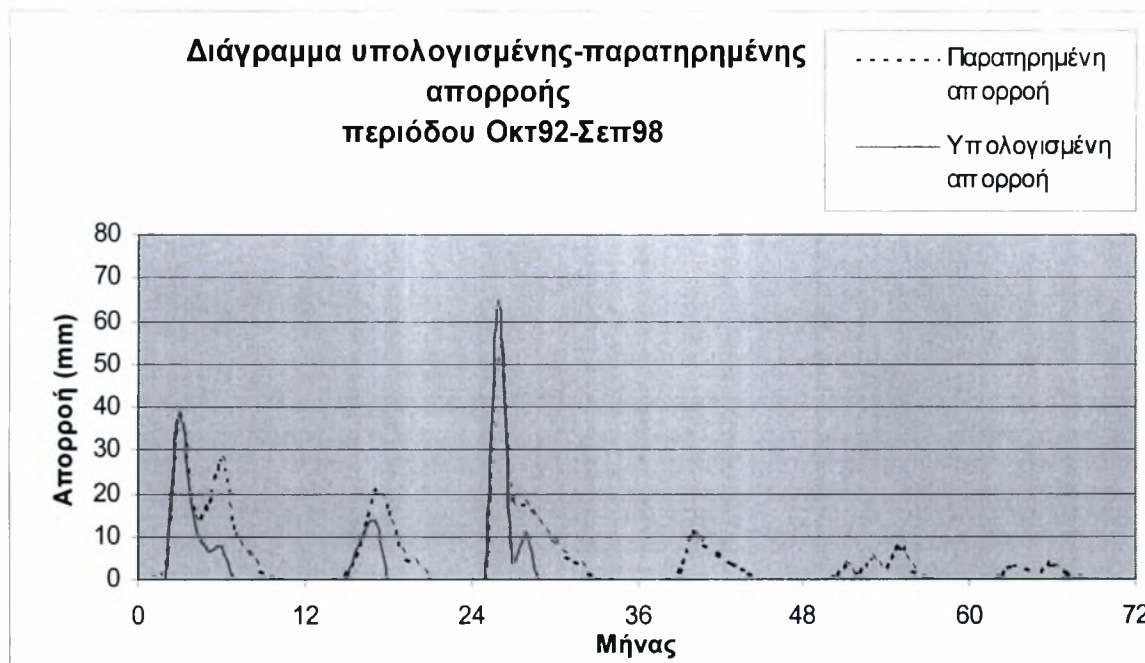


Σχήμα Γ.73

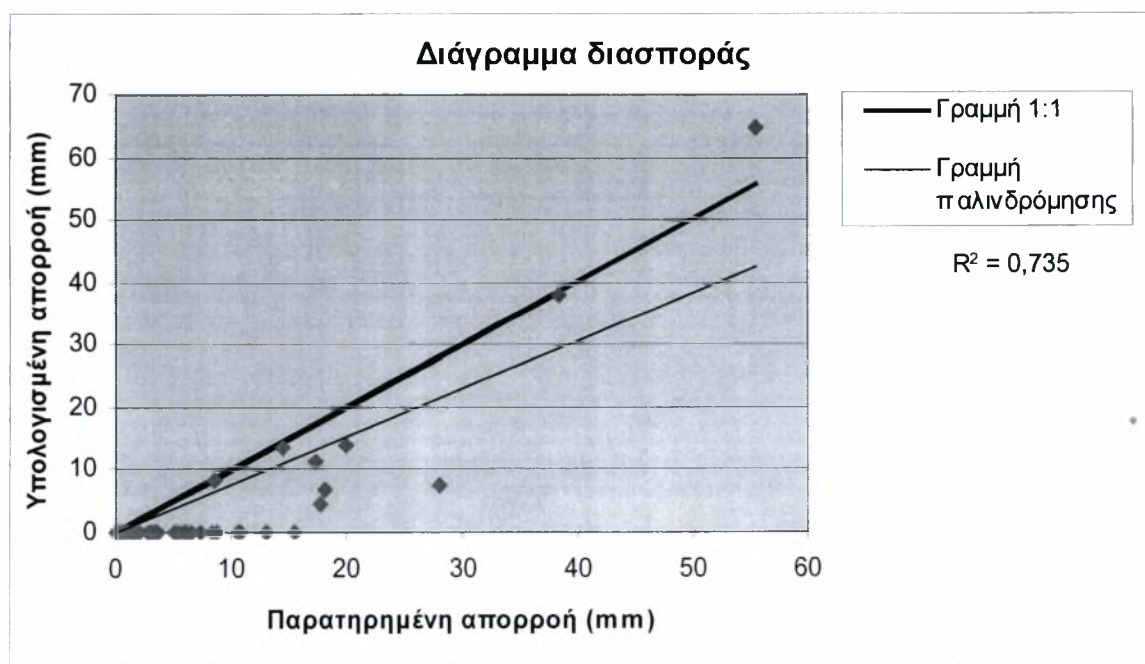


Σχήμα Γ.74

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

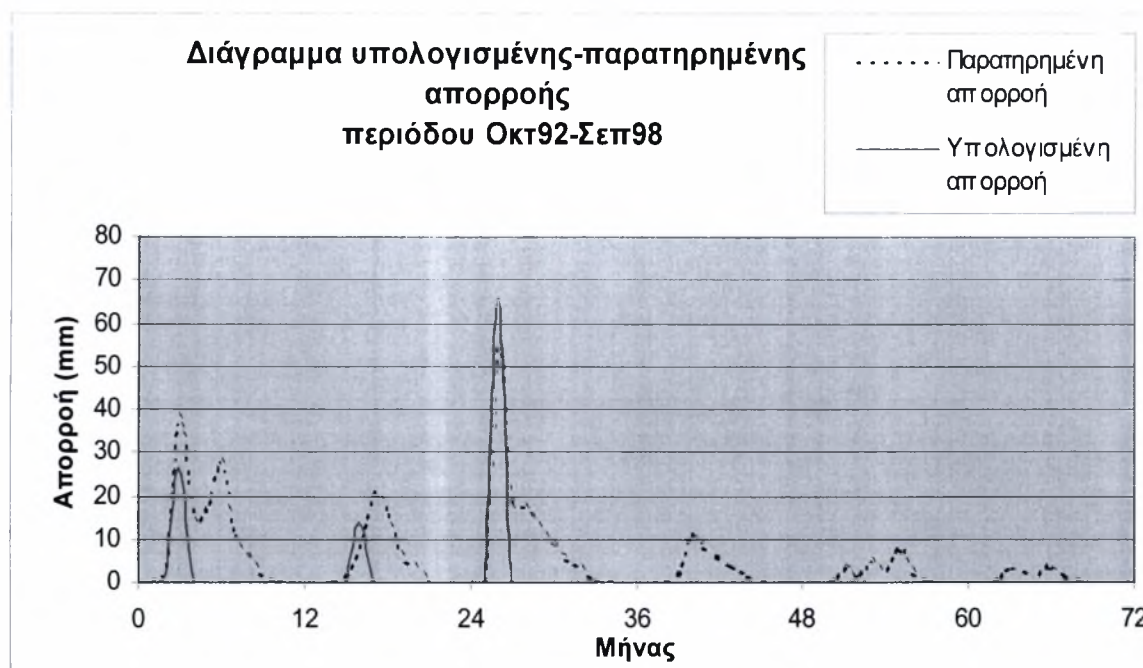


Σχήμα Γ.75

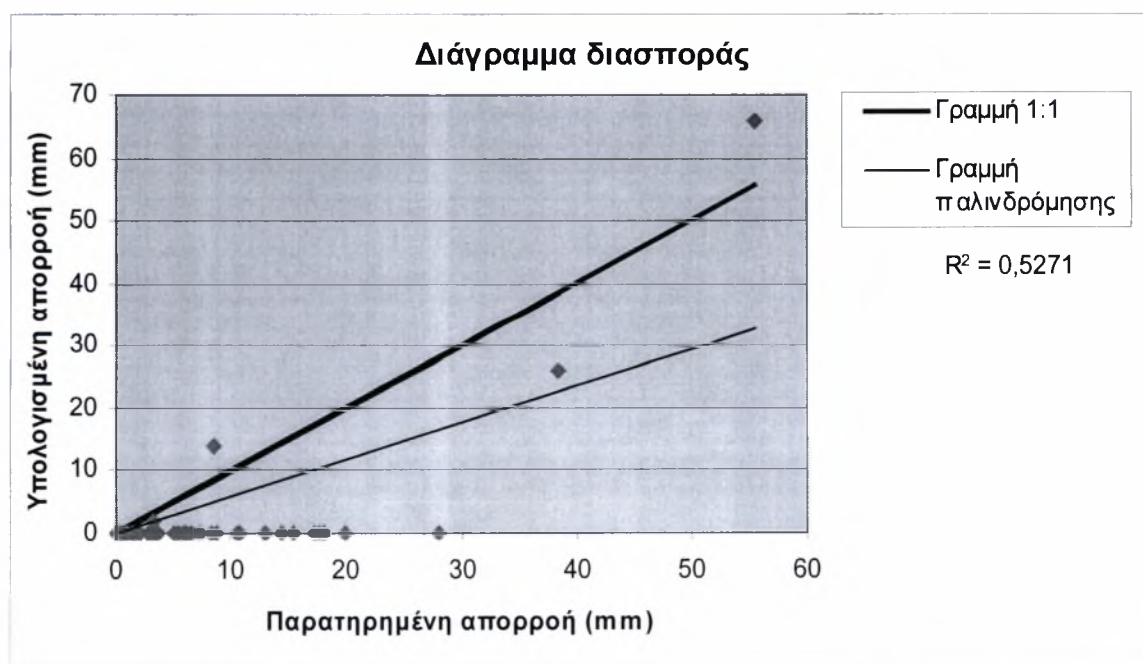


Σχήμα Γ.76

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

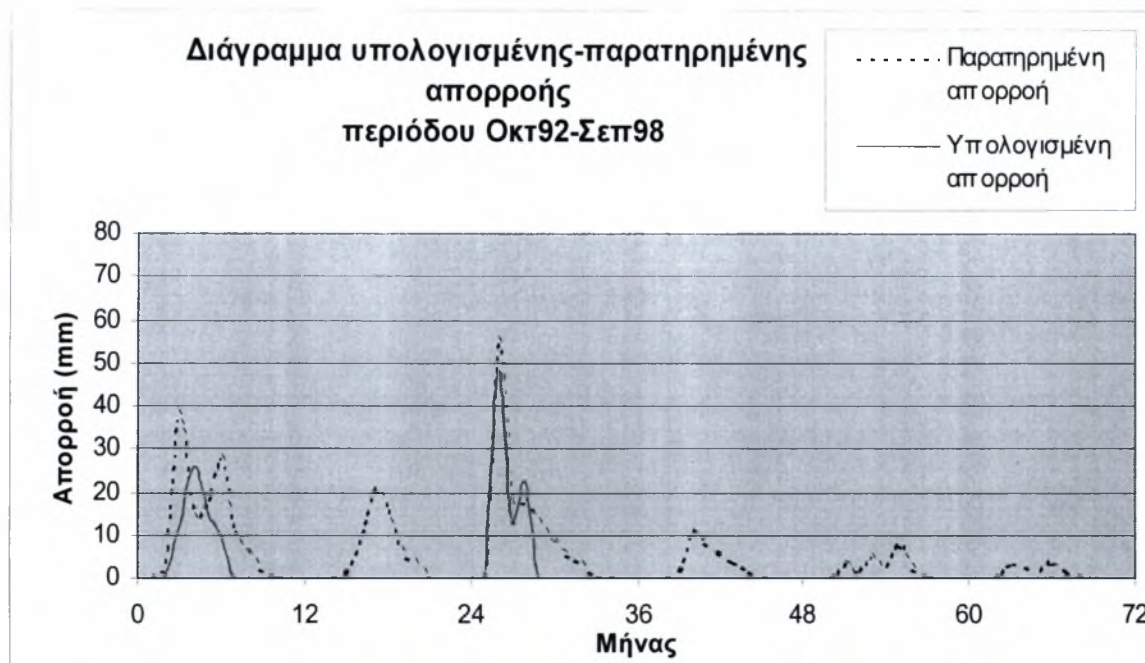


Σχήμα Γ.77

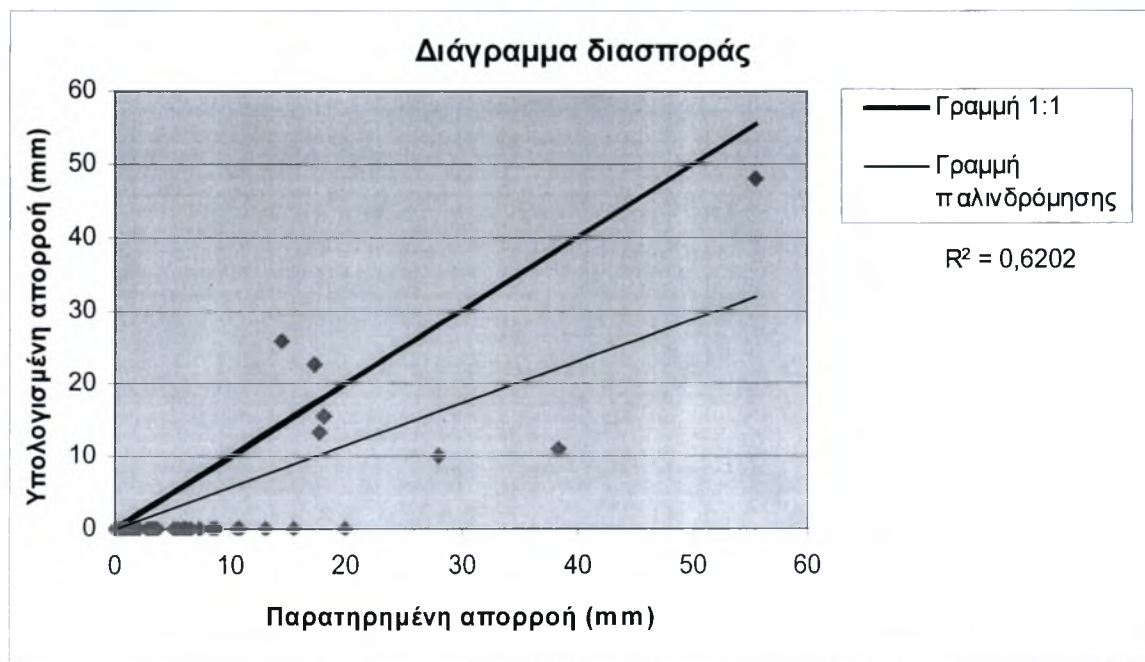


Σχήμα Γ.78

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

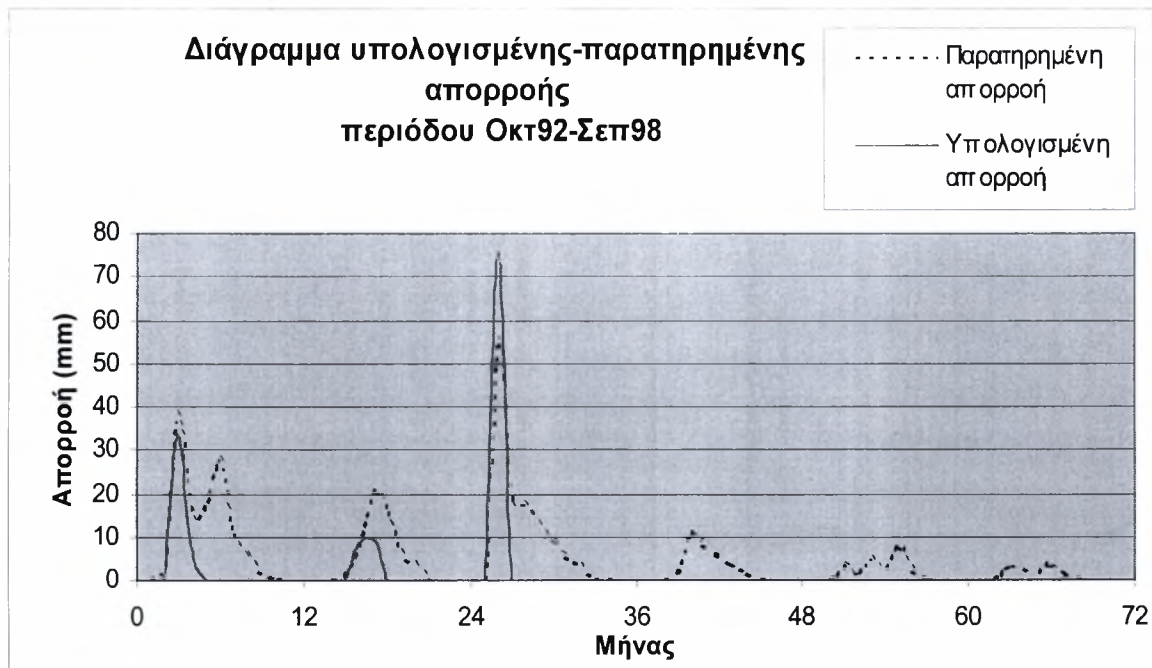


Σχήμα Γ.79

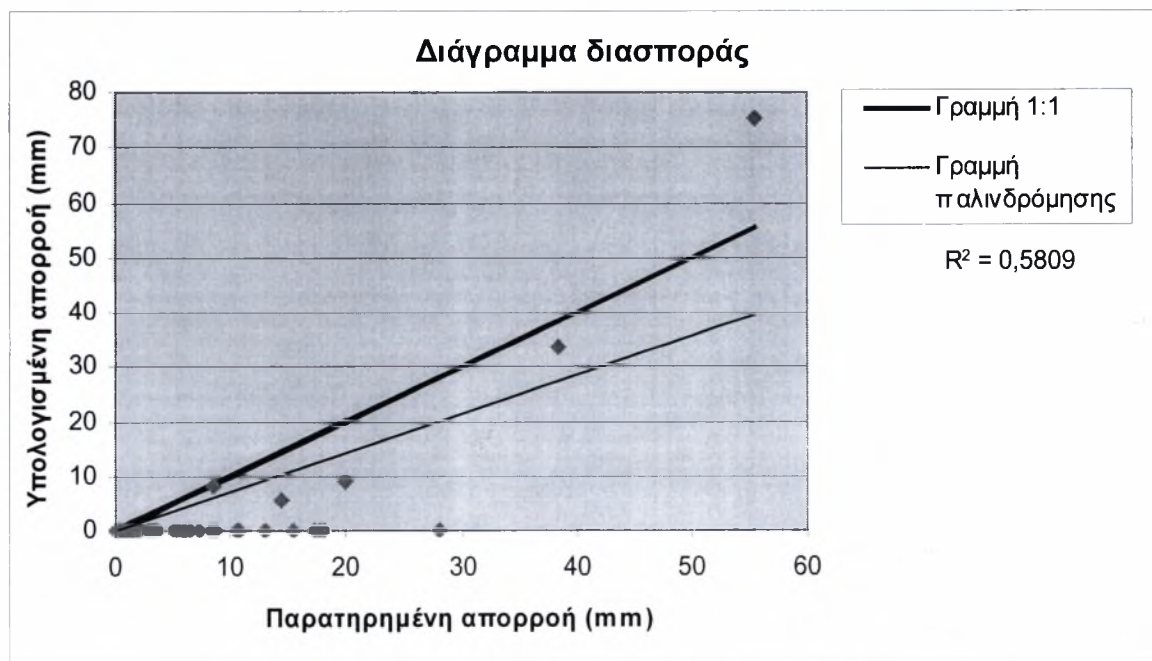


Σχήμα Γ.80

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

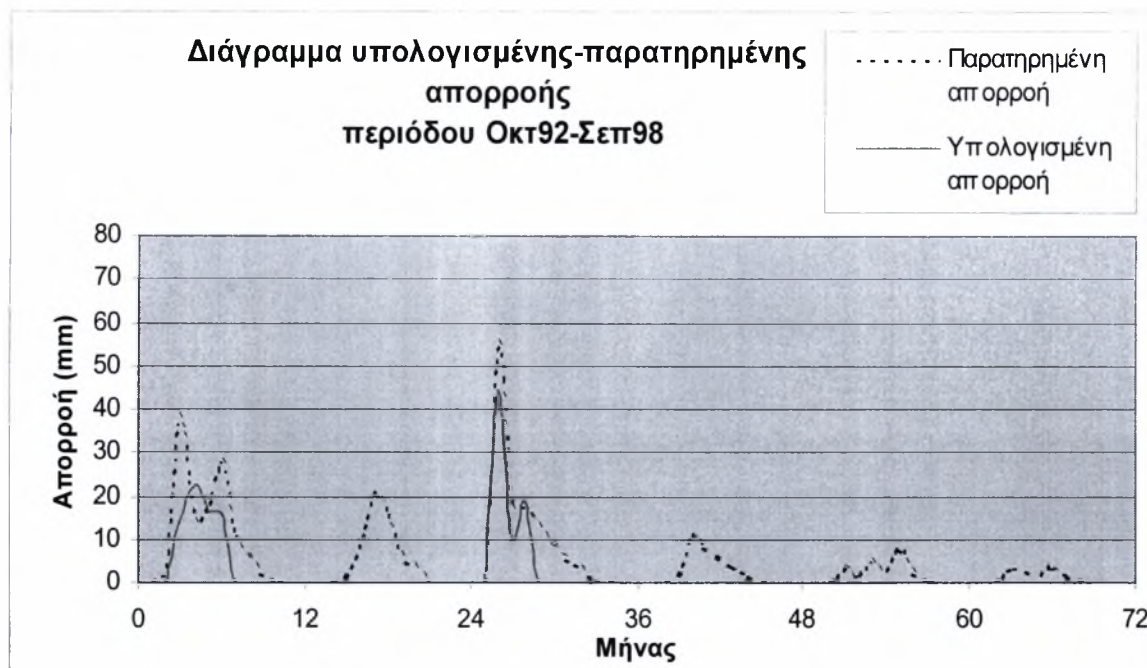


Σχήμα Γ.81

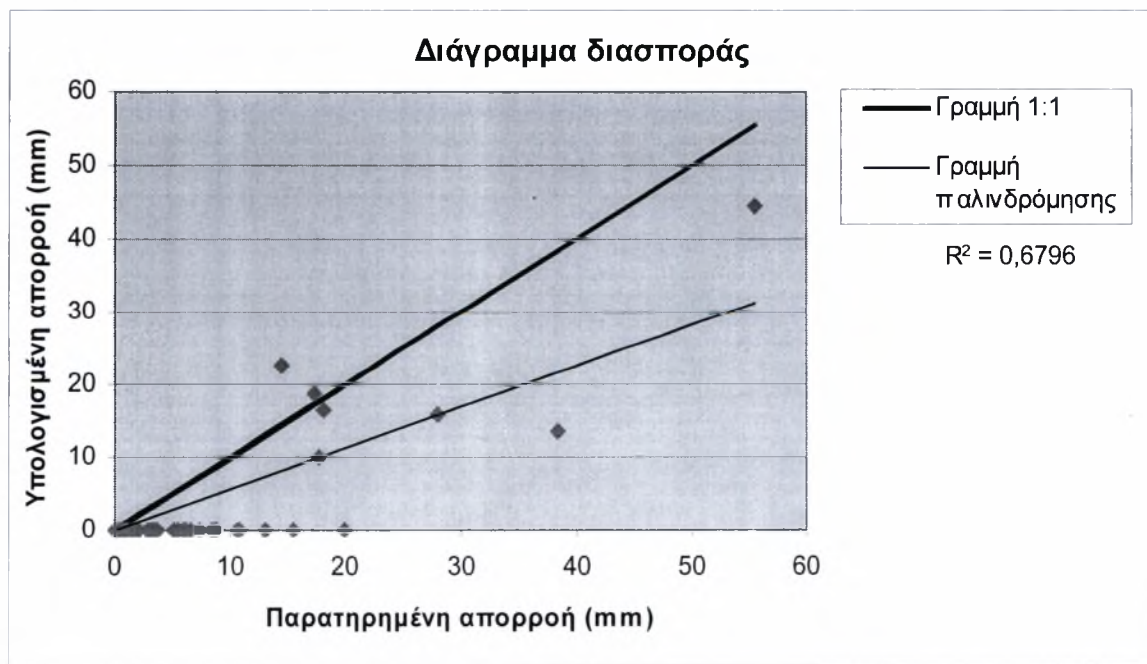


Σχήμα Γ.82

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Γ.83



Σχήμα Γ.84

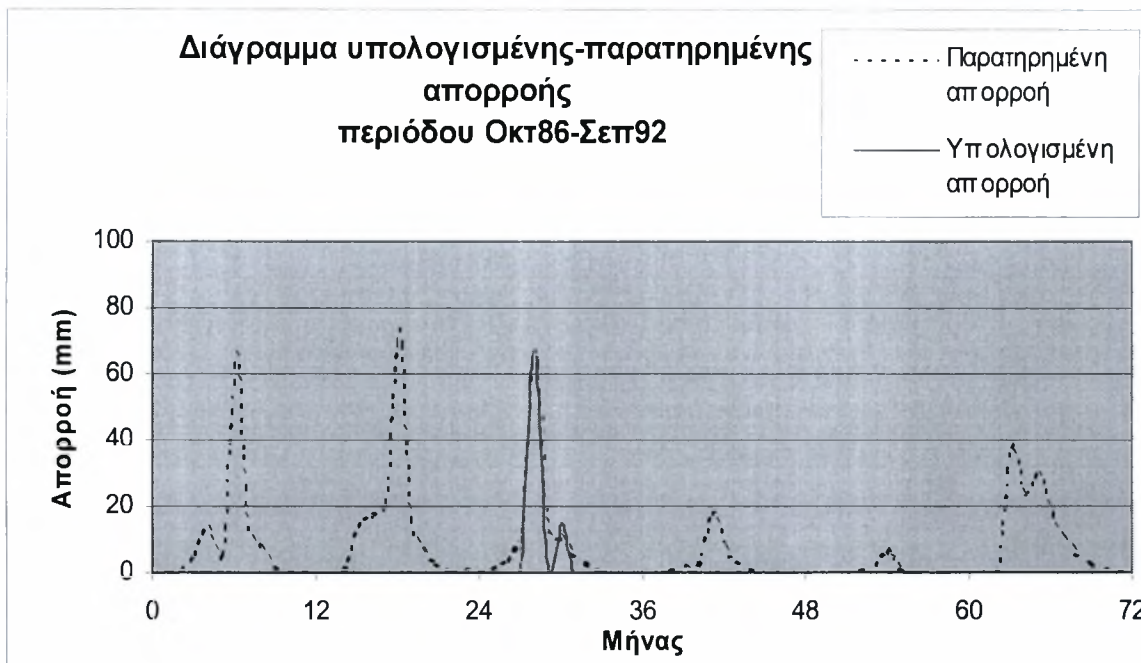
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ALLEY**

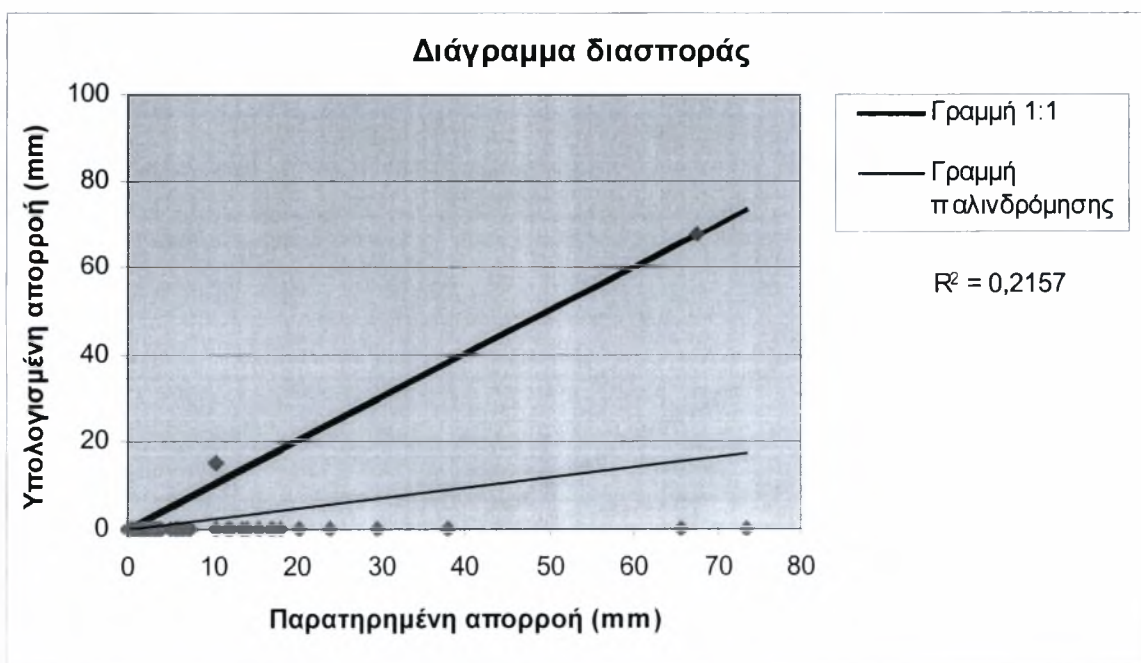
Δ.1 Βελτιστοποίηση μοντέλου Alley περιόδου Οκτ1986-Σεπ1992

Δ.1.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξαμισοδιαπνοής: Thornthwaite

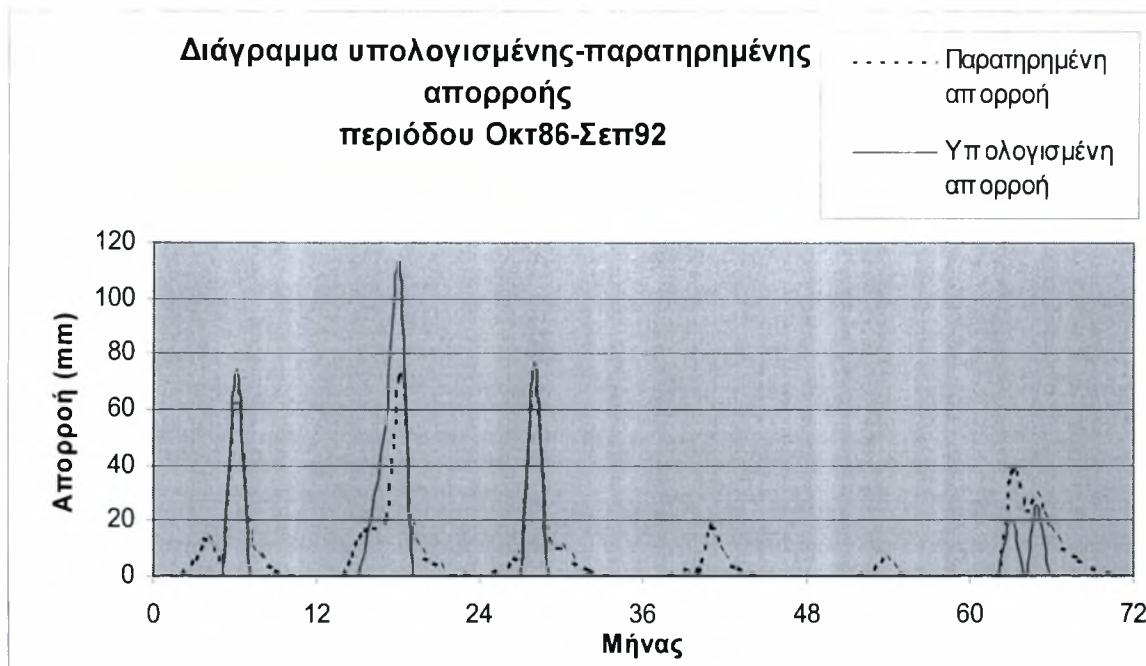


Σχήμα Δ.1

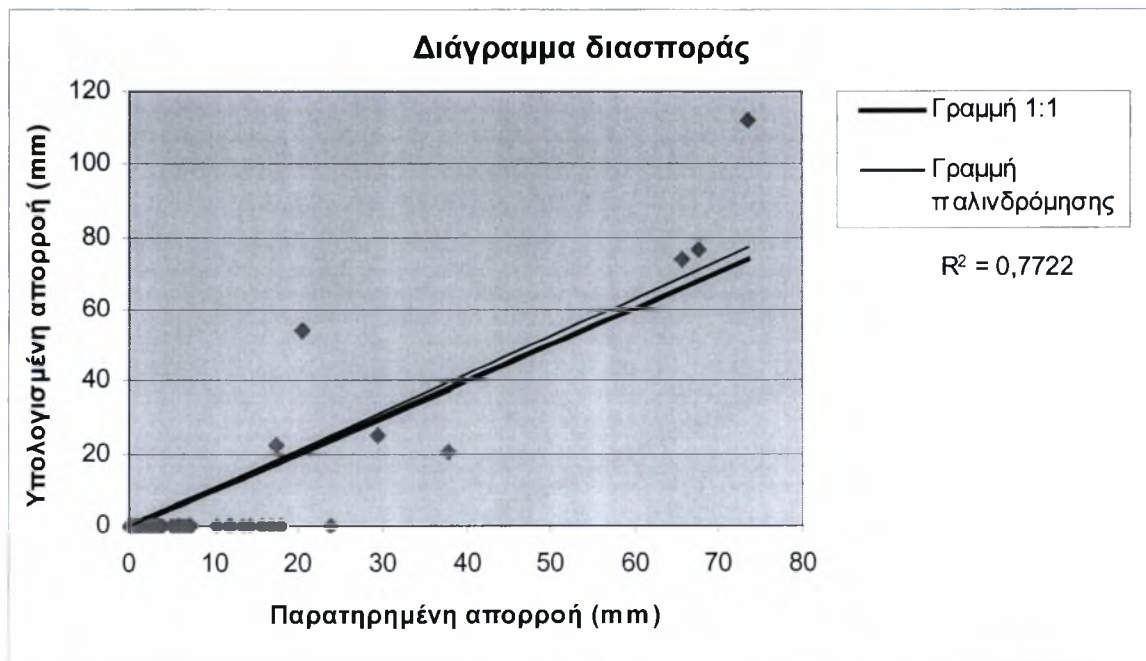


Σχήμα Δ.2

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Tunc* (μέσος όρος)

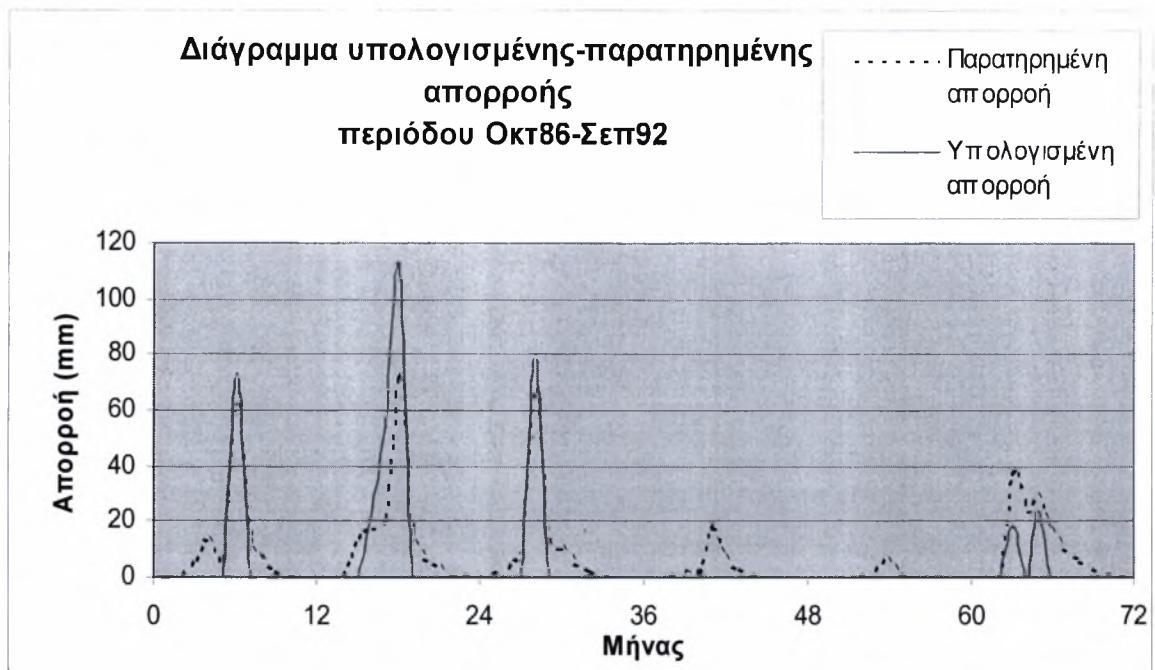


Σχήμα Δ.3

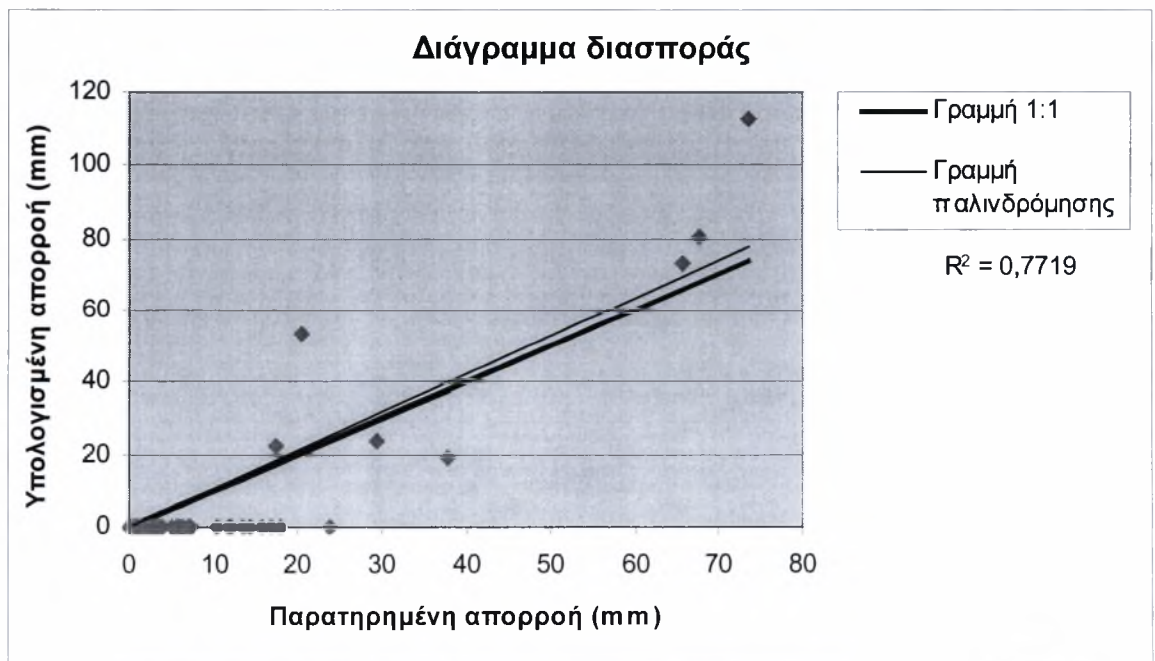


Σχήμα Δ.4

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

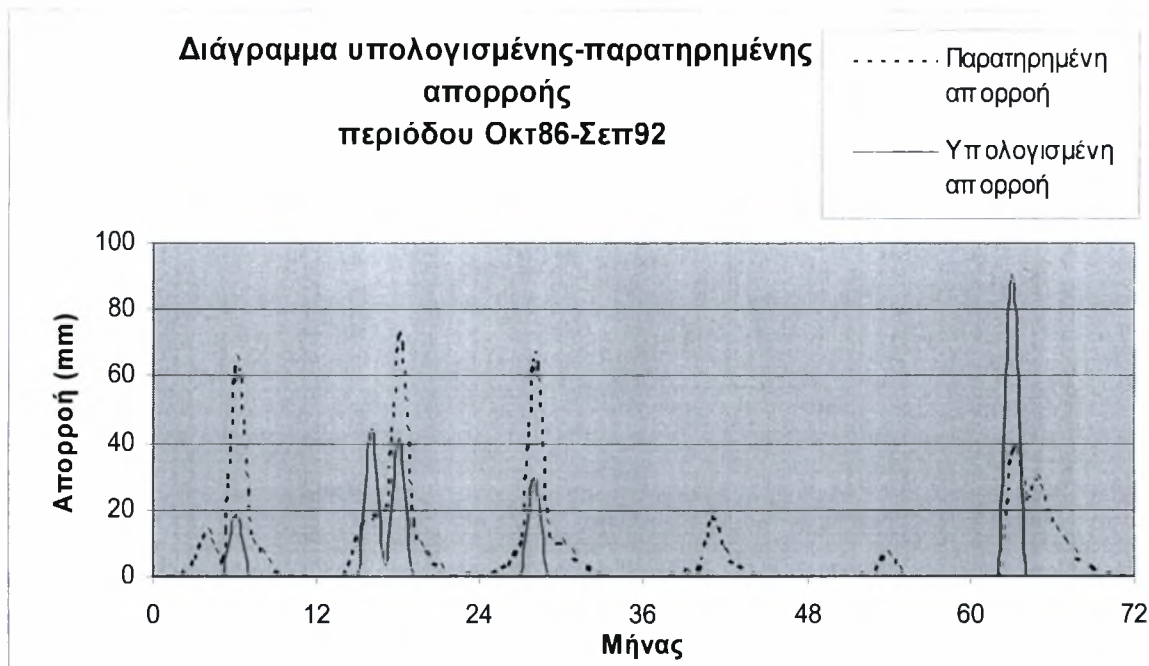


Σχήμα Δ.5

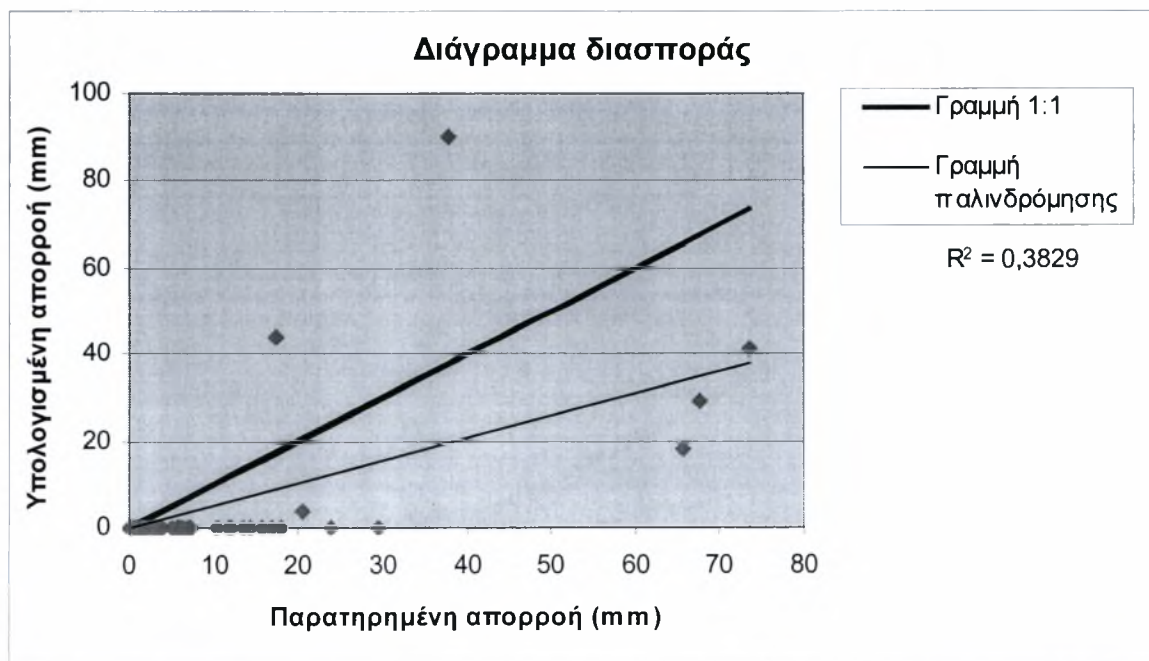


Σχήμα Δ.6

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

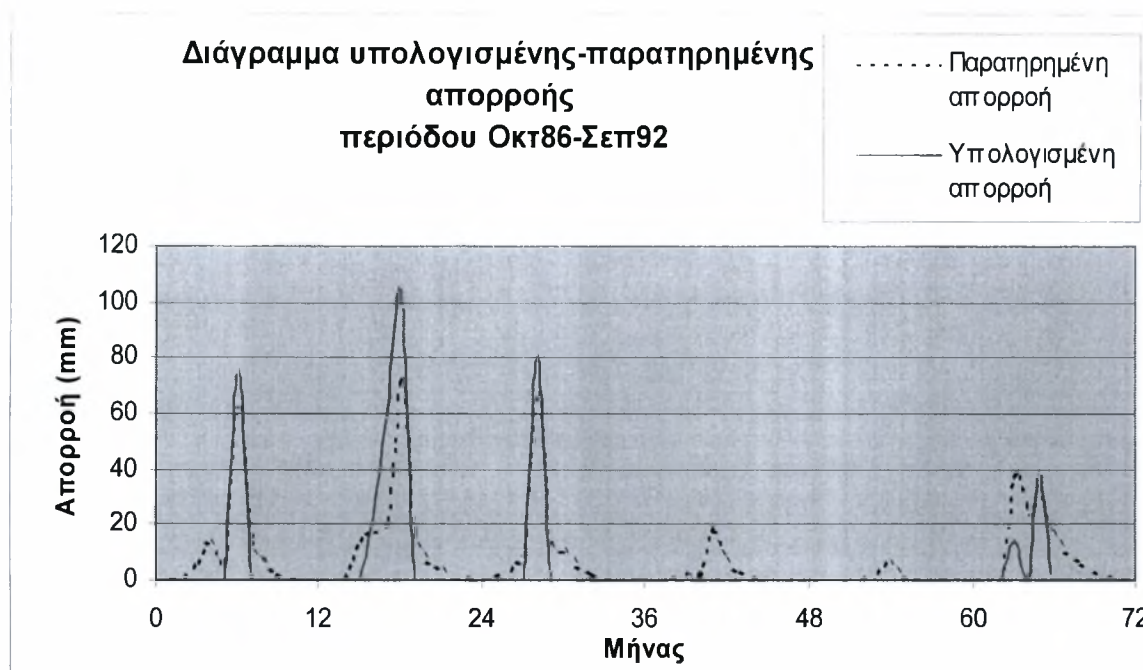


Σχήμα Δ.7

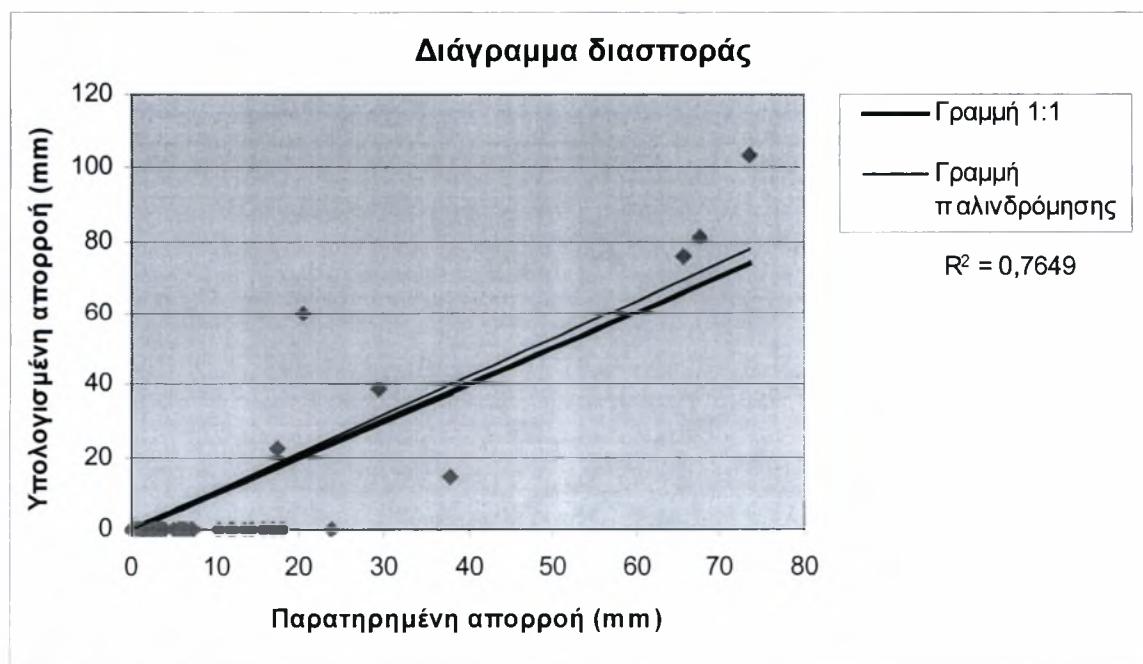


Σχήμα Δ.8

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

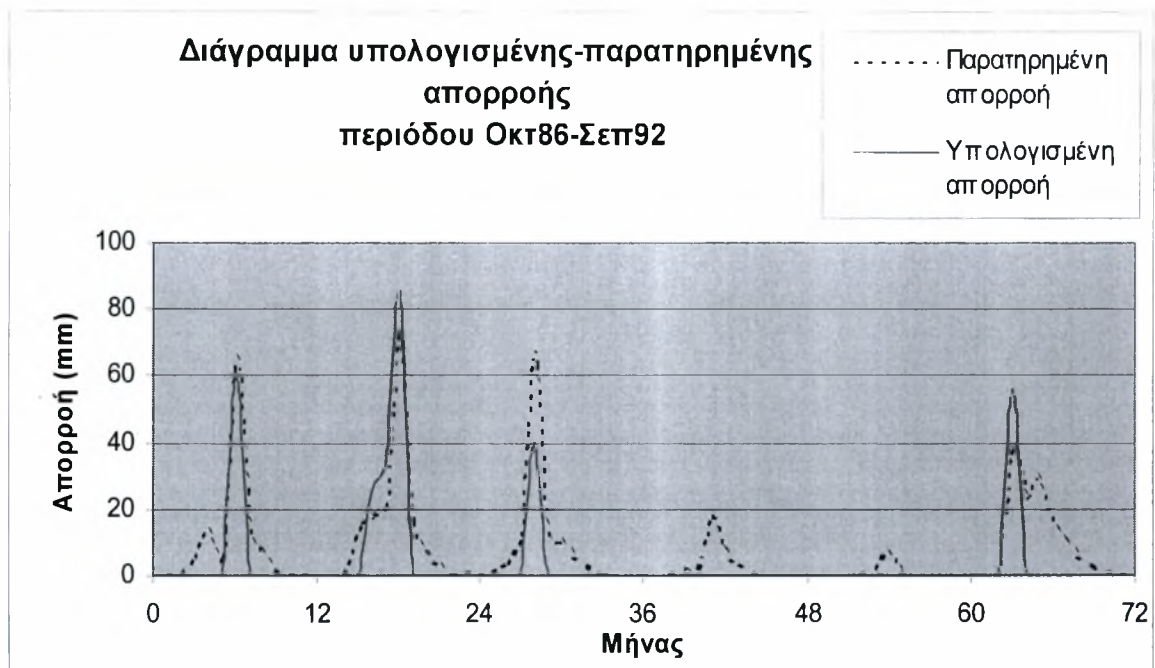


Σχήμα Δ.9

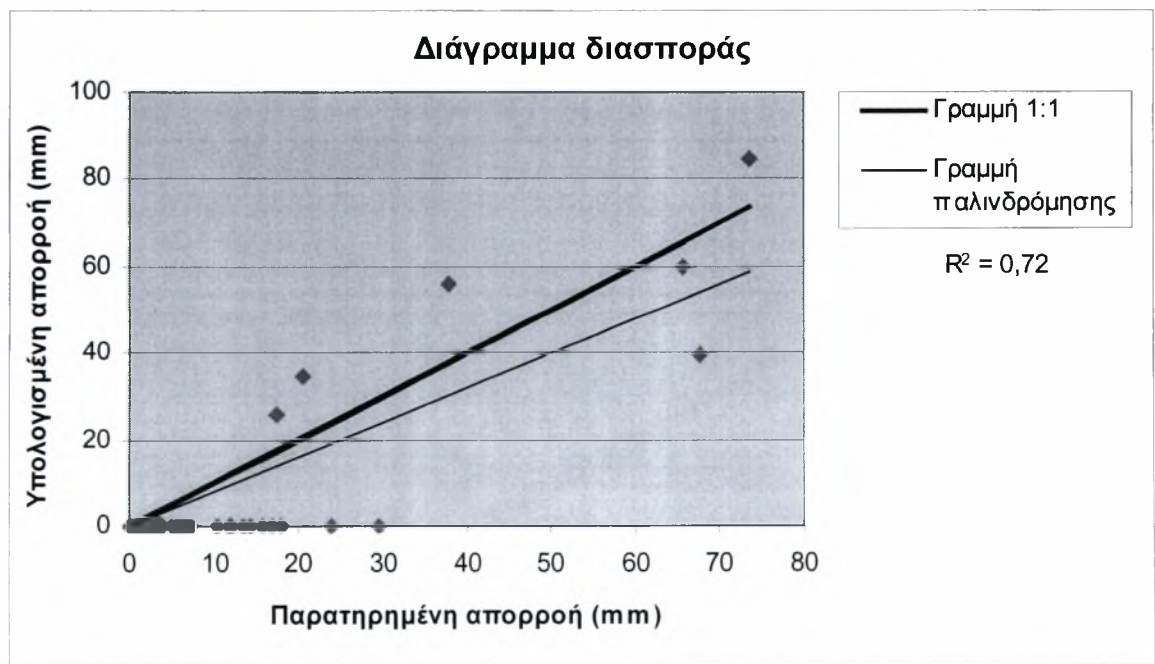


Σχήμα Δ.10

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

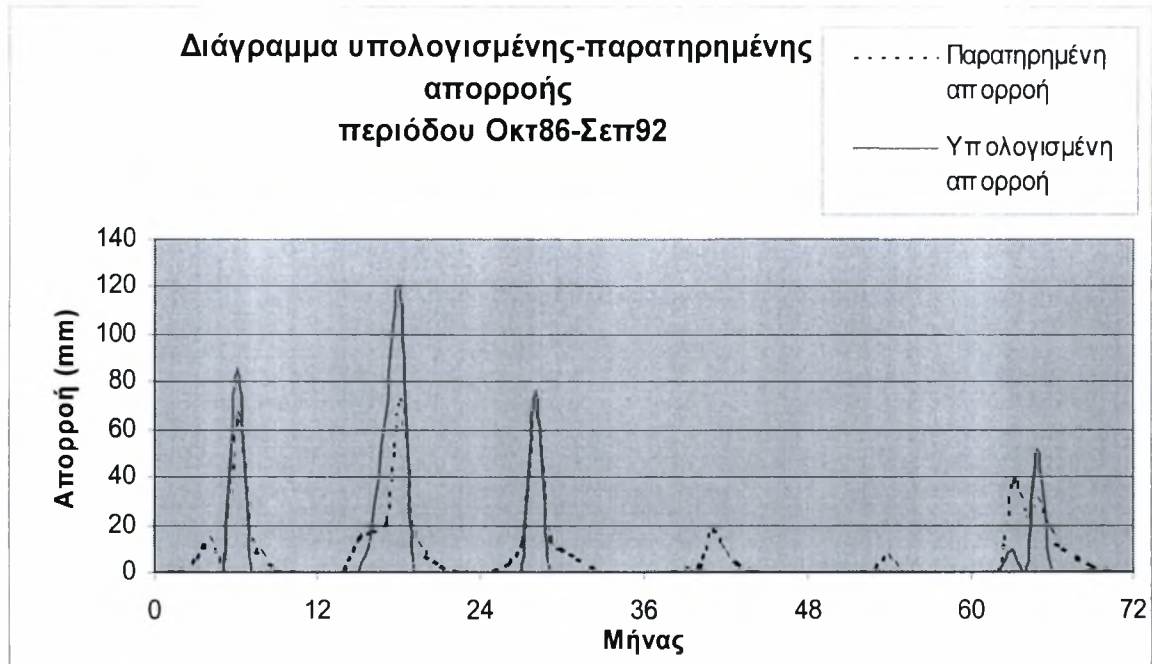


Σχήμα Δ.11

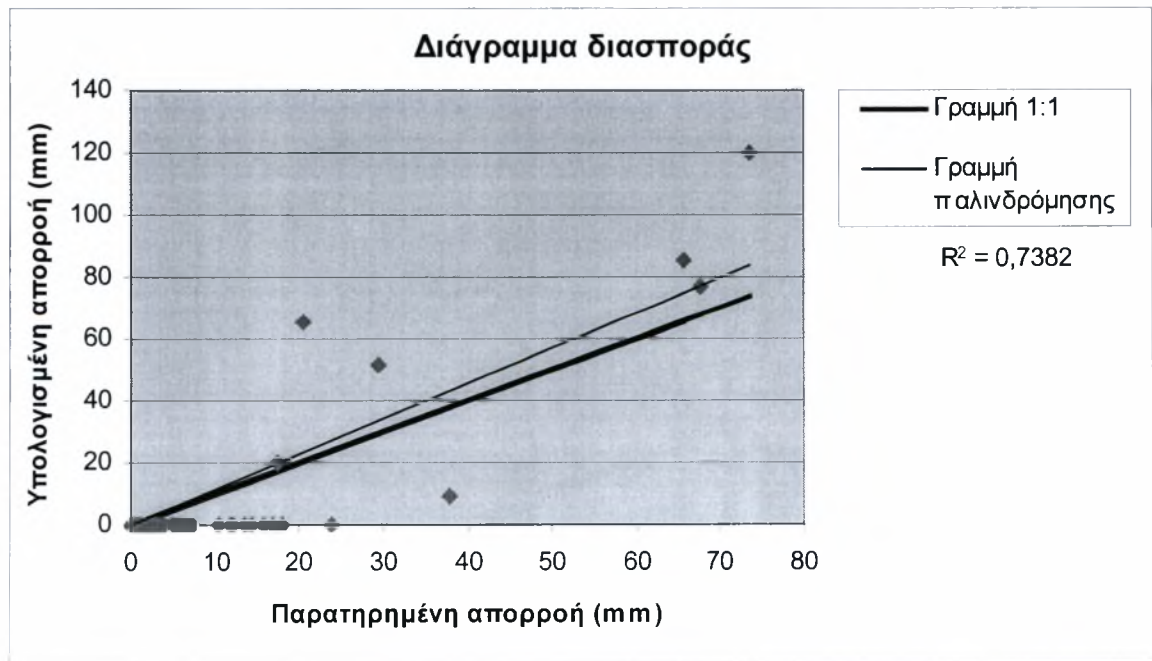


Σχήμα Δ.12

7. Μοντέλο εξαμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



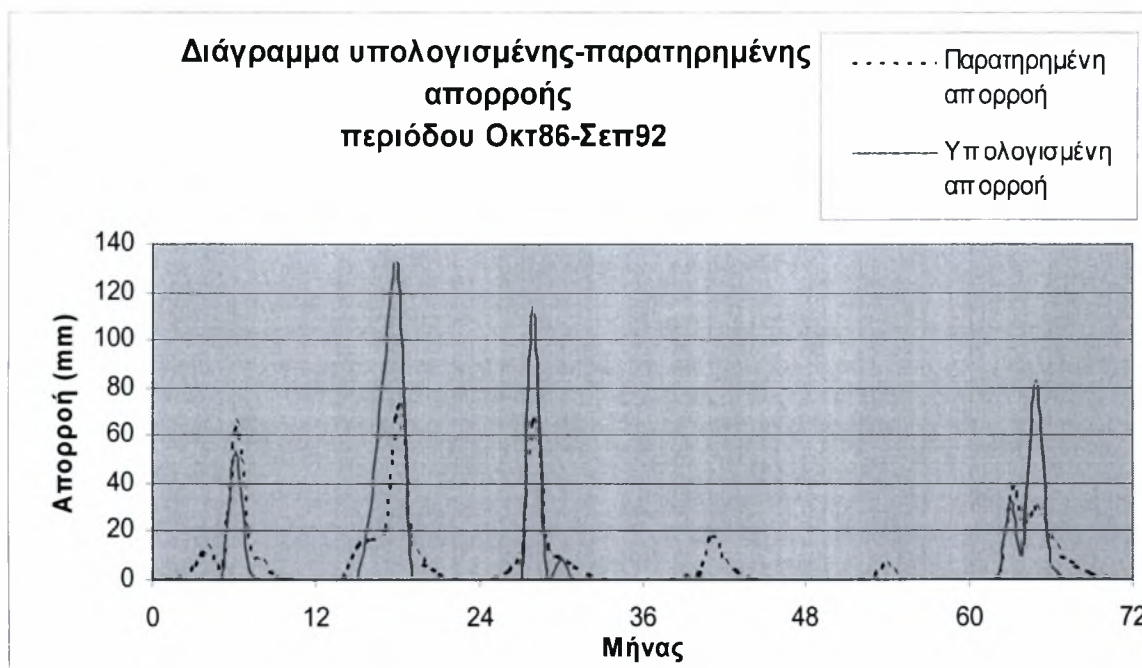
Σχήμα Δ.13



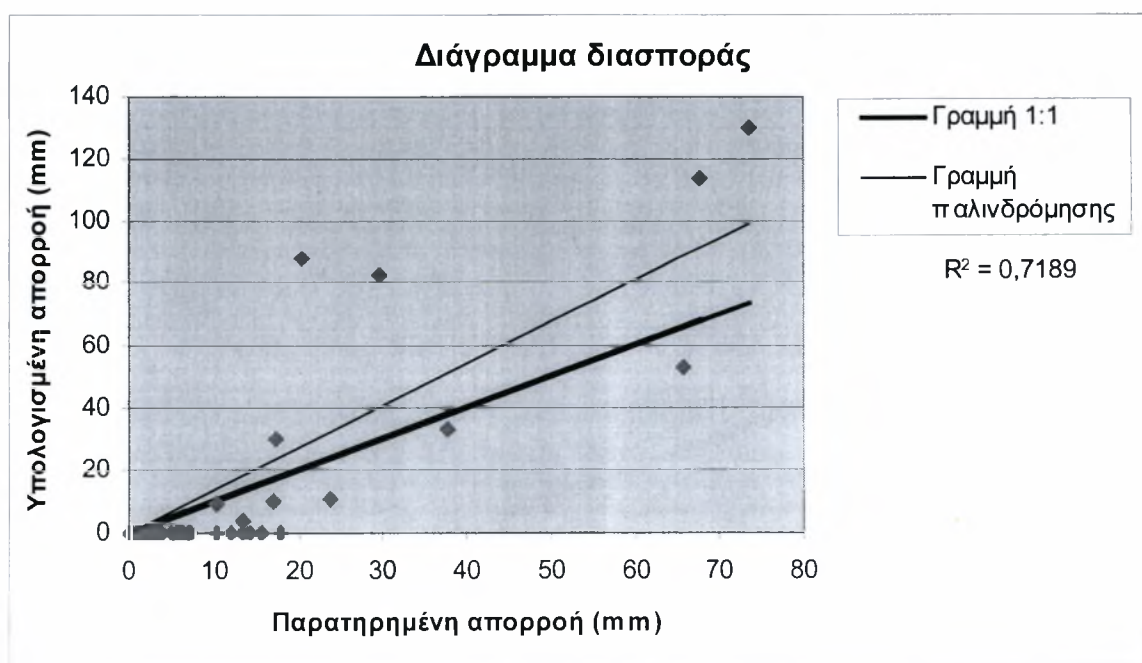
Σχήμα Δ.14

Δ.1.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

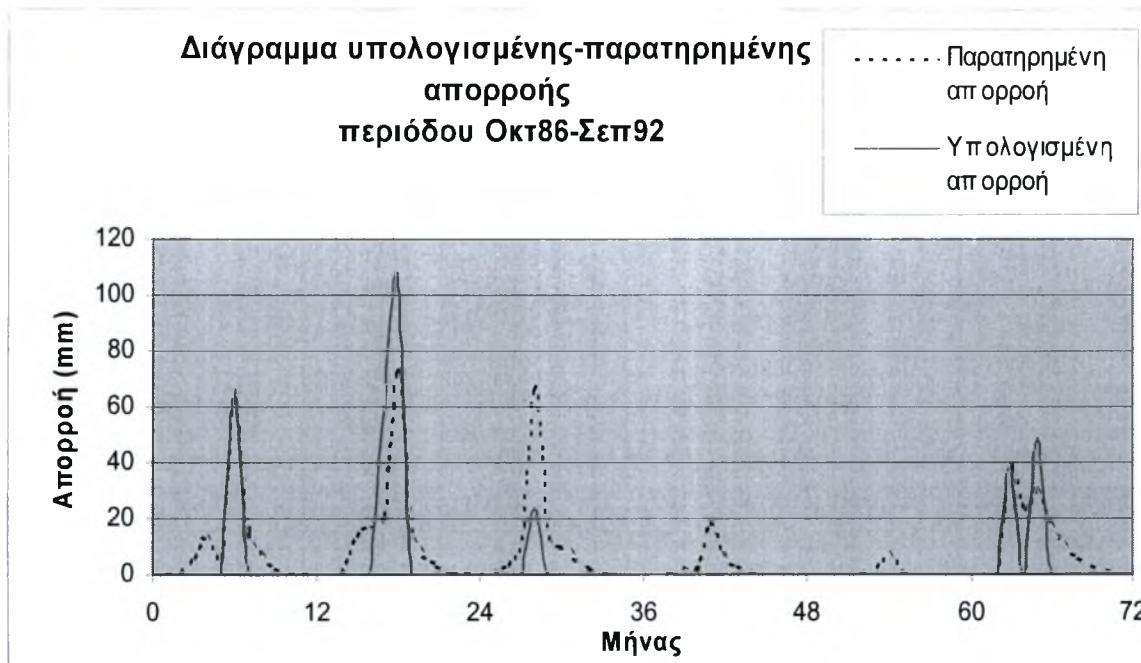


Σχήμα Δ.15

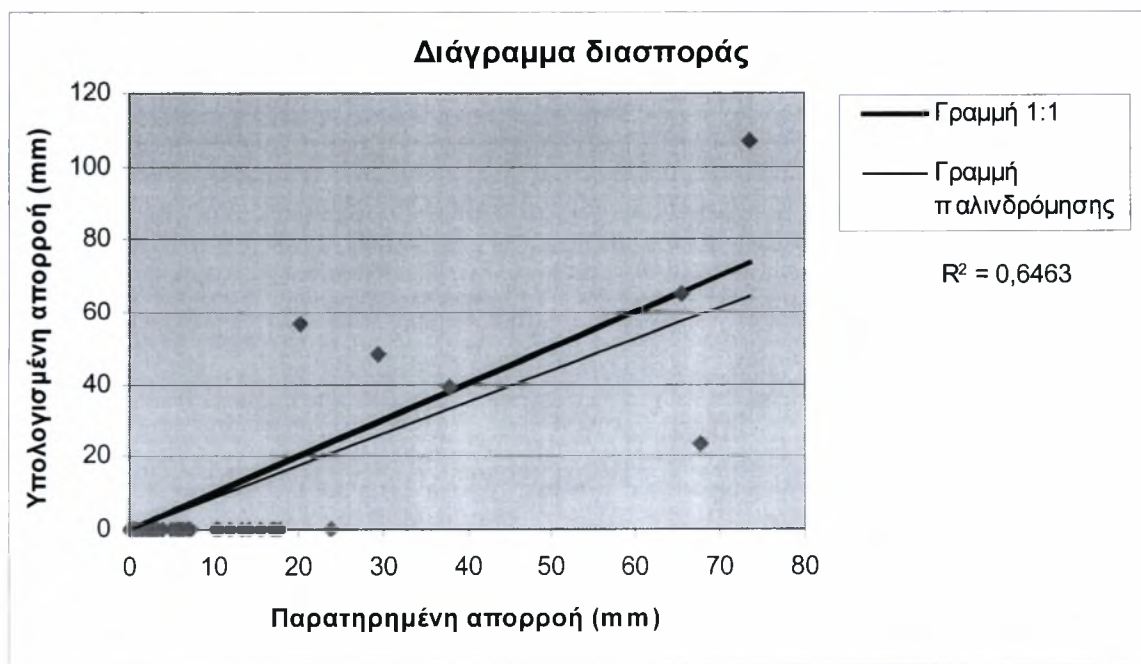


Σχήμα Δ.16

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

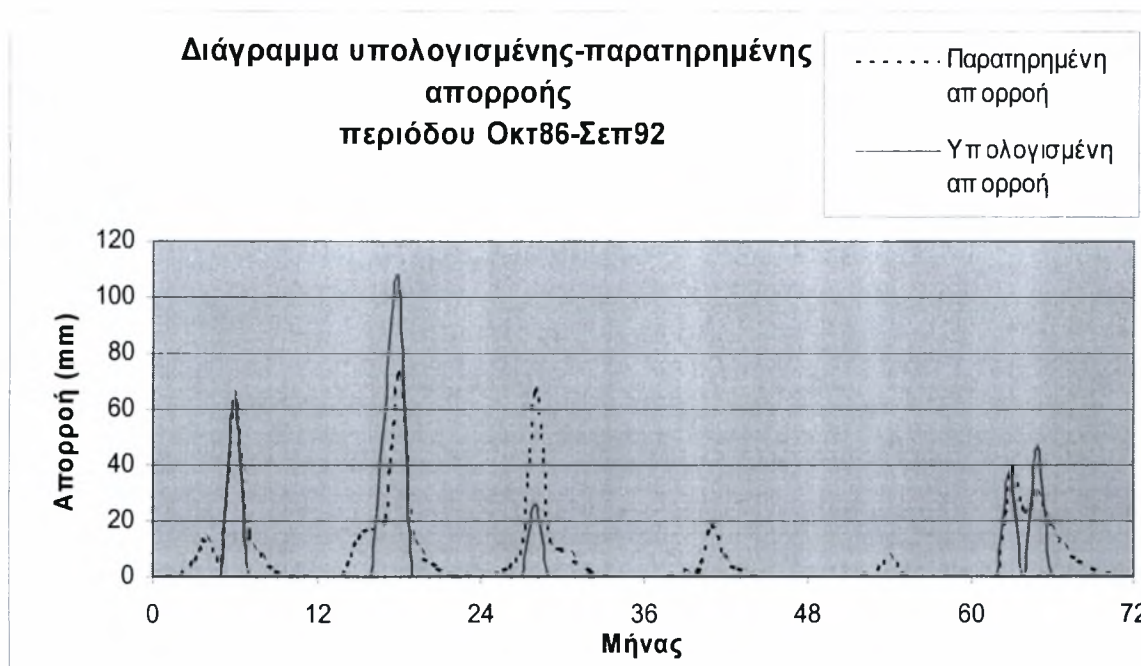


Σχήμα Δ.17

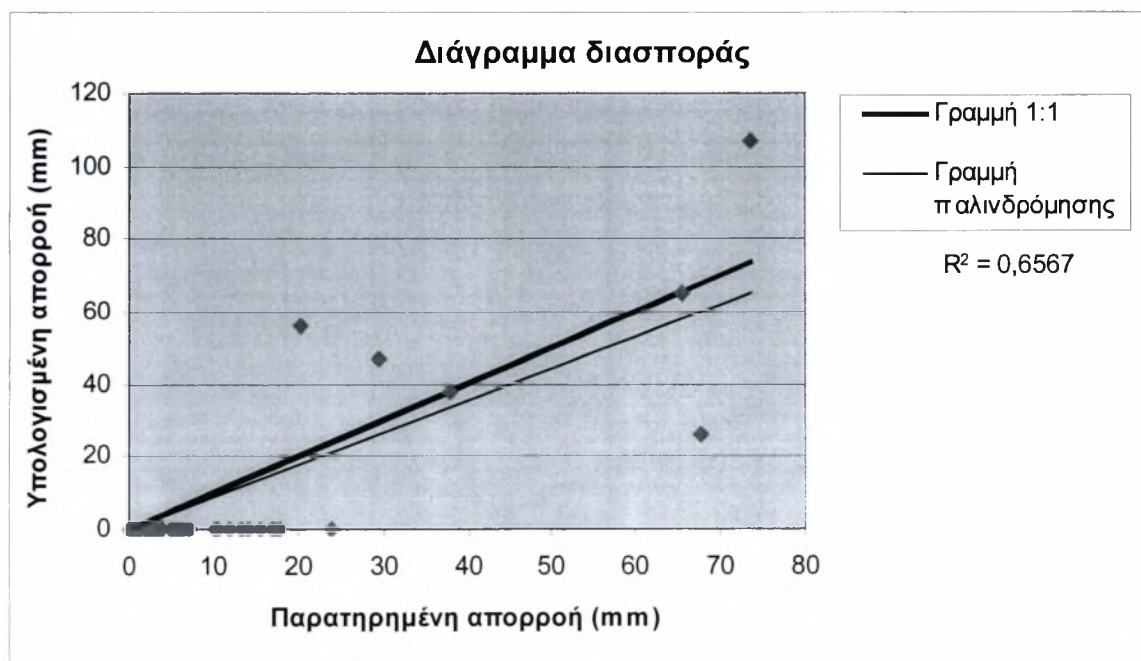


Σχήμα Δ.18

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

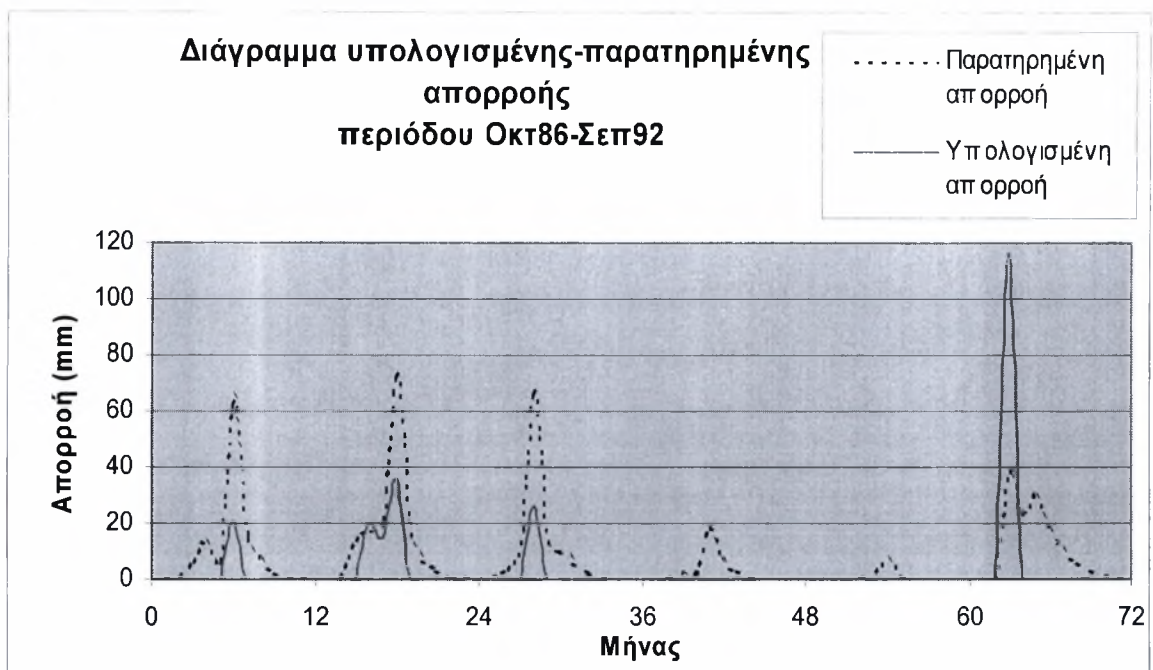


Σχήμα Δ.19

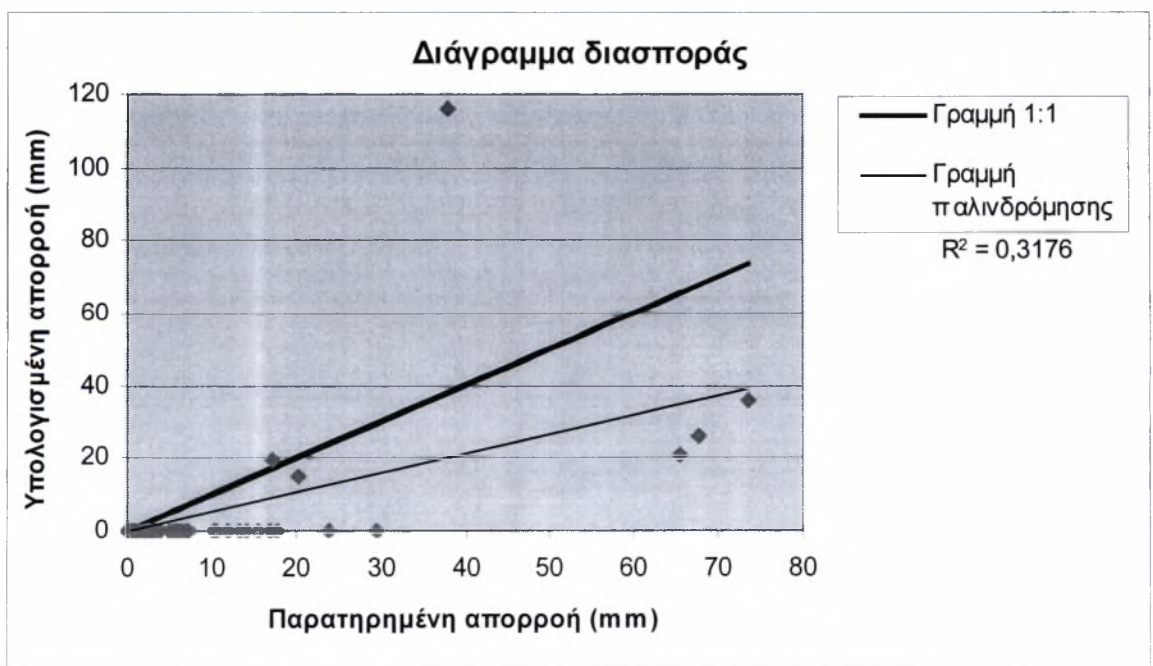


Σχήμα Δ.20

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

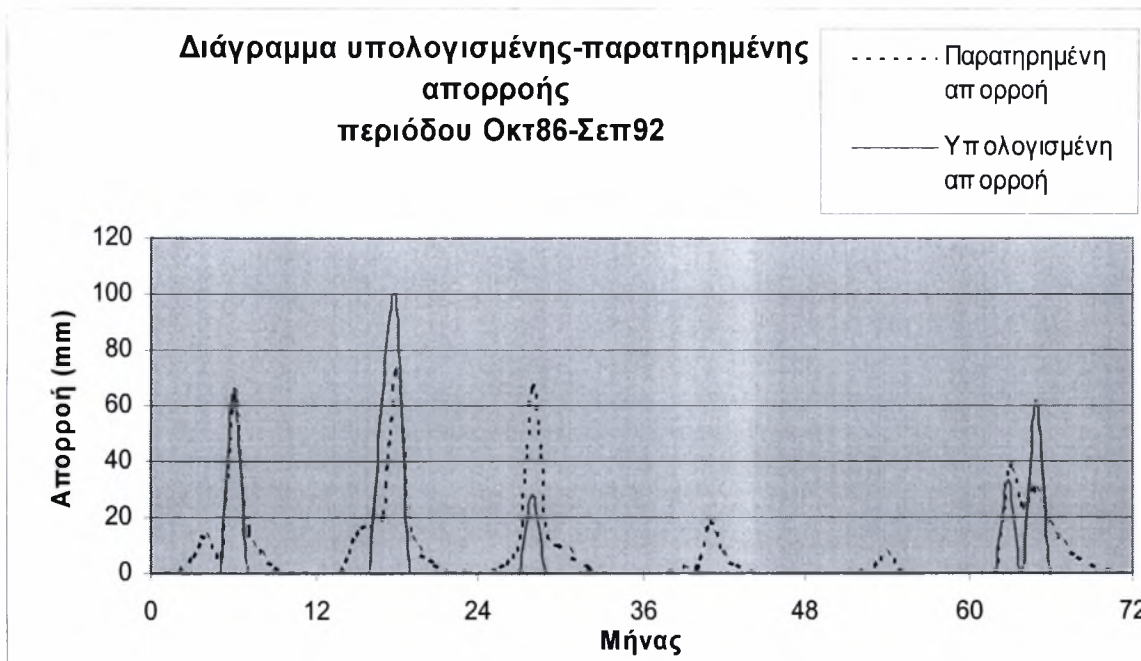


Σχήμα Δ.21

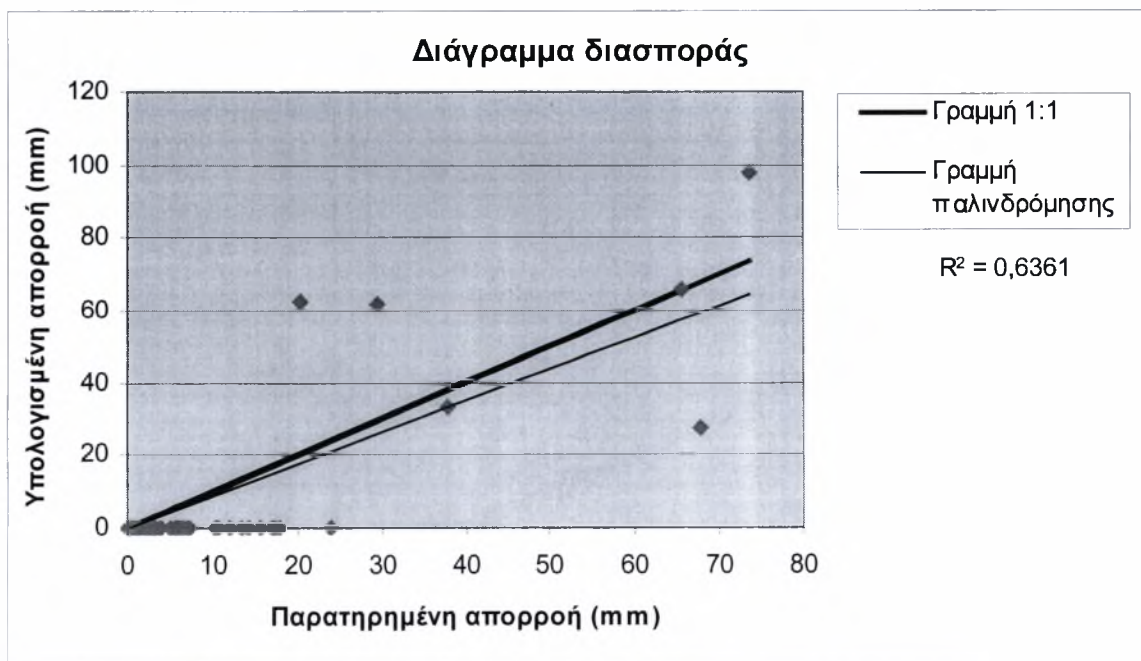


Σχήμα Δ.22

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

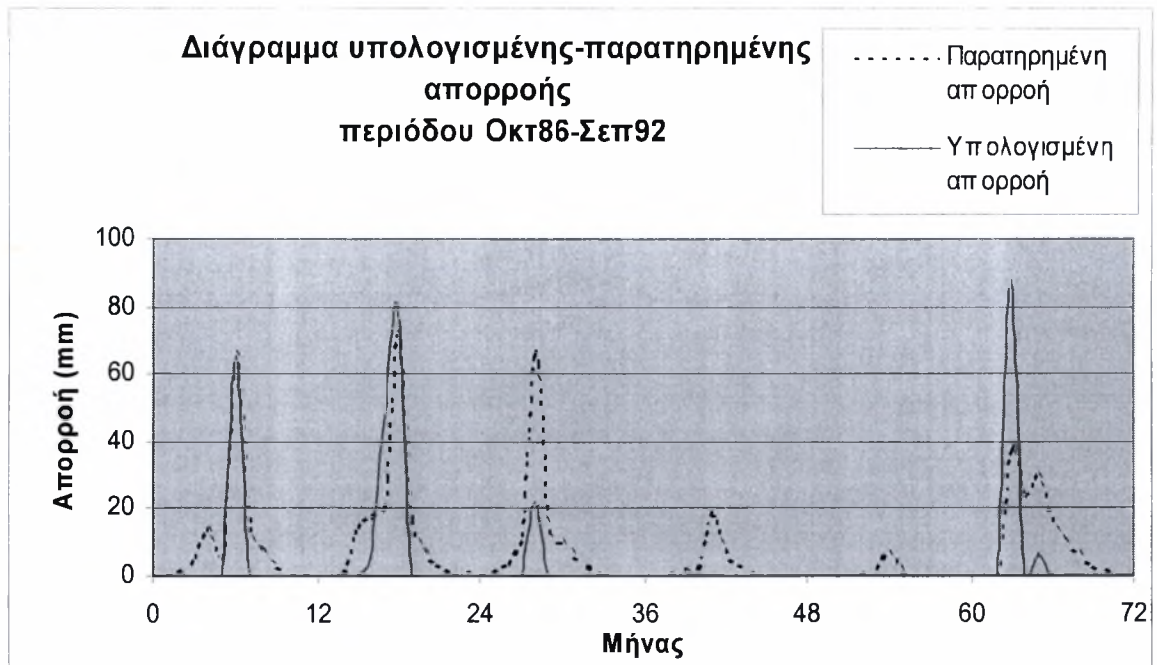


Σχήμα Δ.23

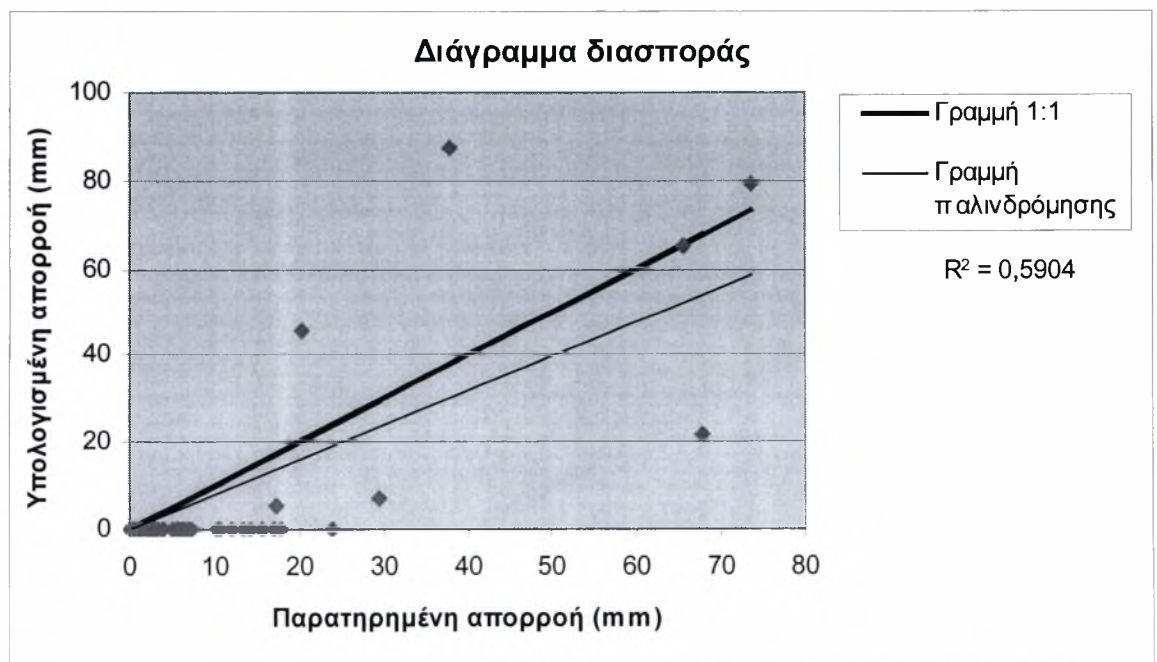


Σχήμα Δ.24

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

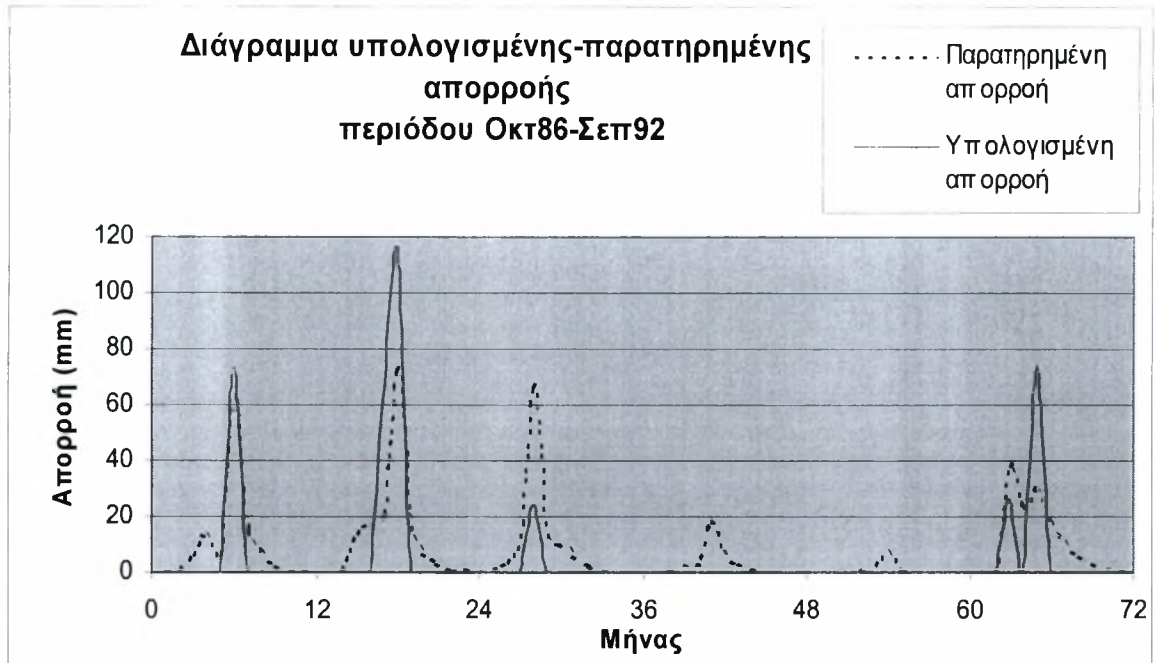


Σχήμα Δ.25

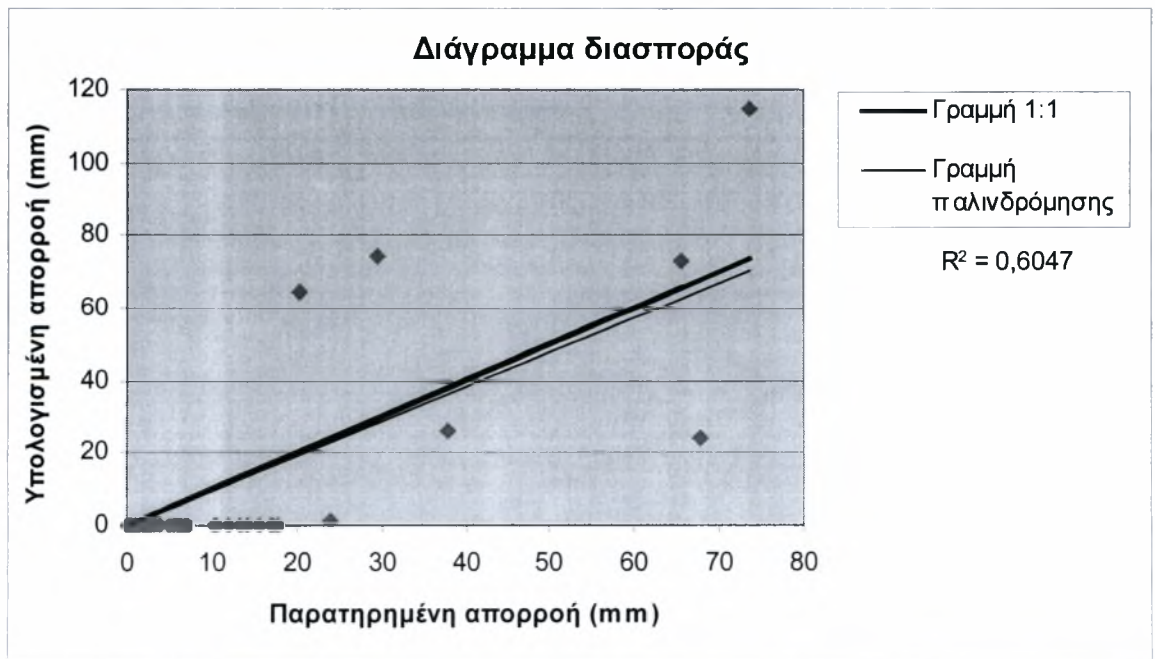


Σχήμα Δ.26

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



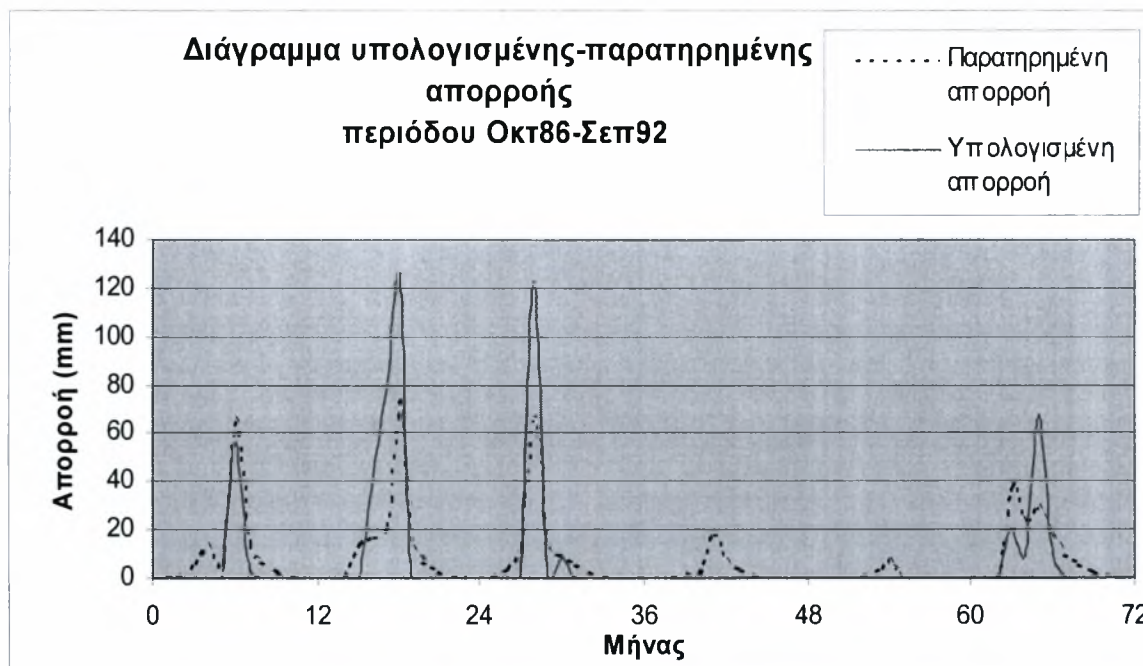
Σχήμα Δ.27



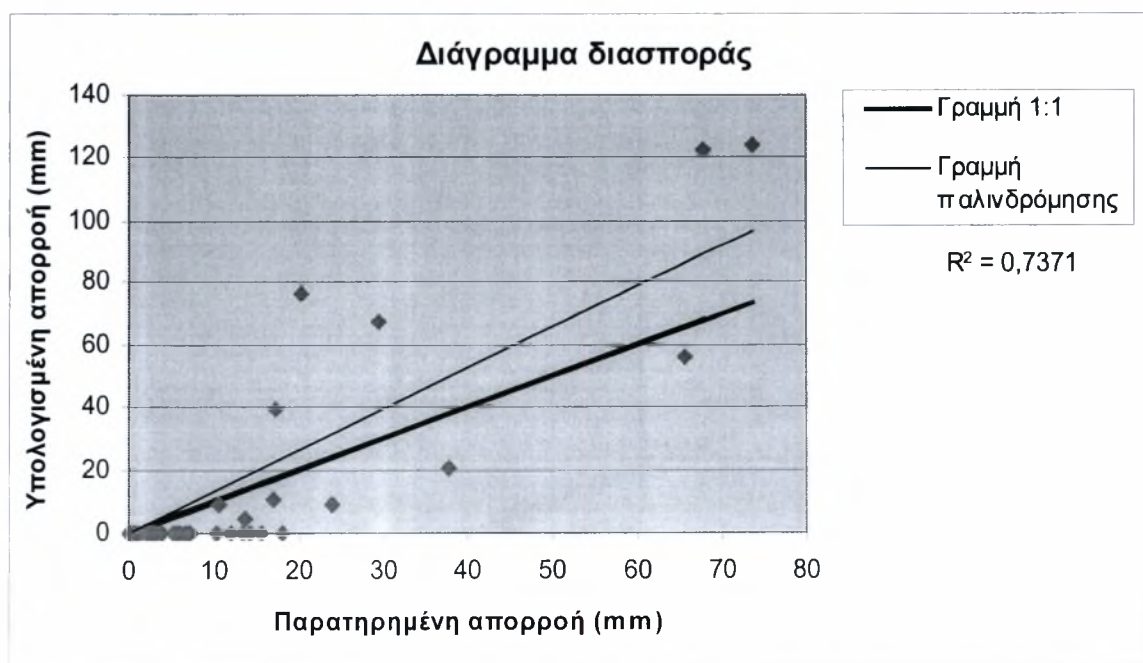
Σχήμα Δ.28

Δ.1.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

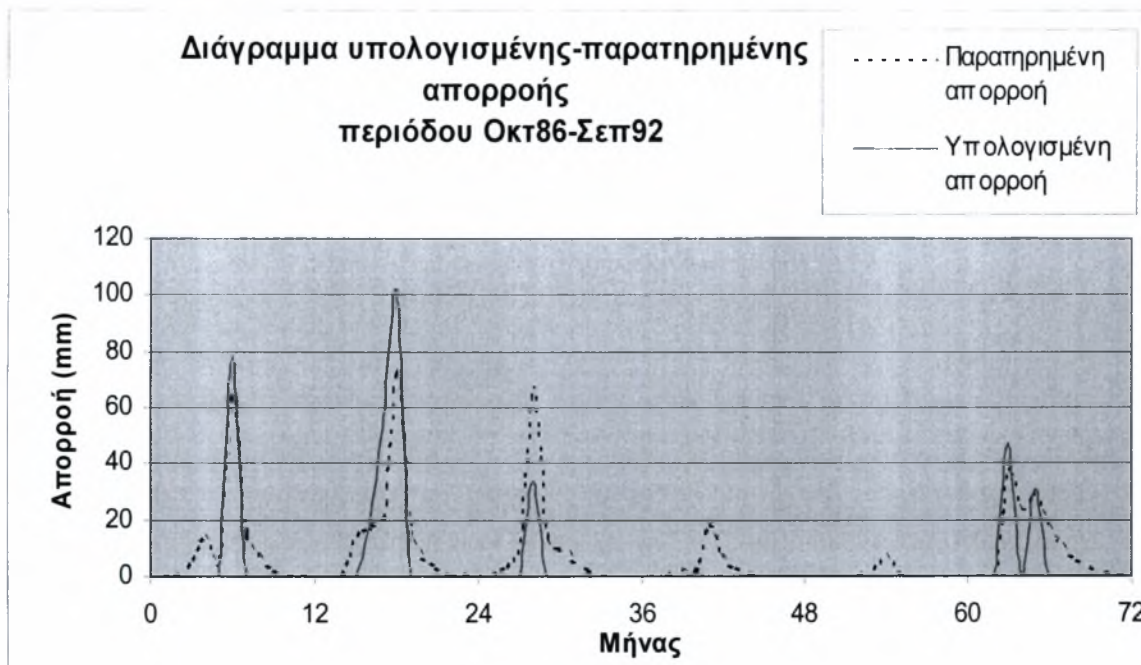


Σχήμα Δ.29

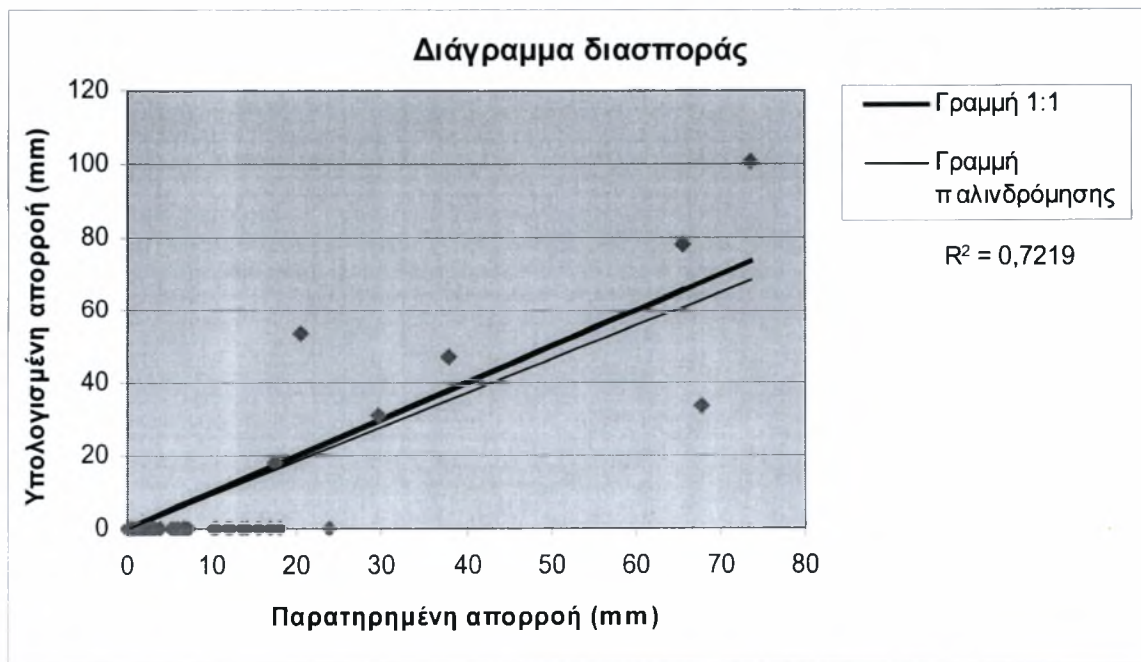


Σχήμα Δ.30

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

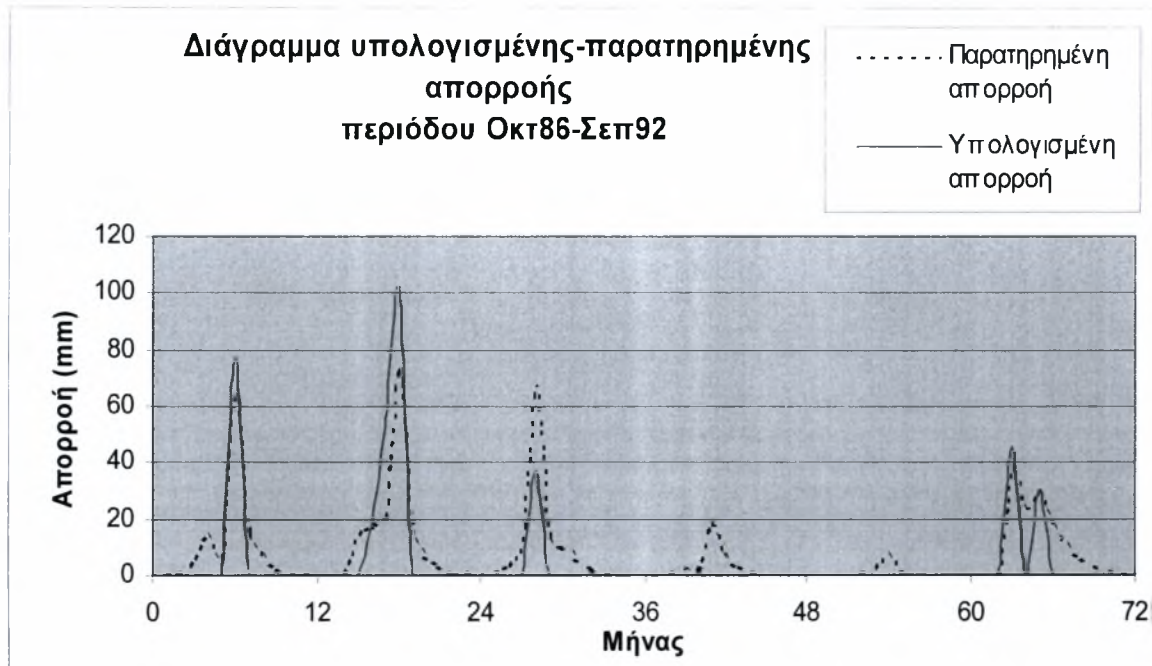


Σχήμα Δ.31

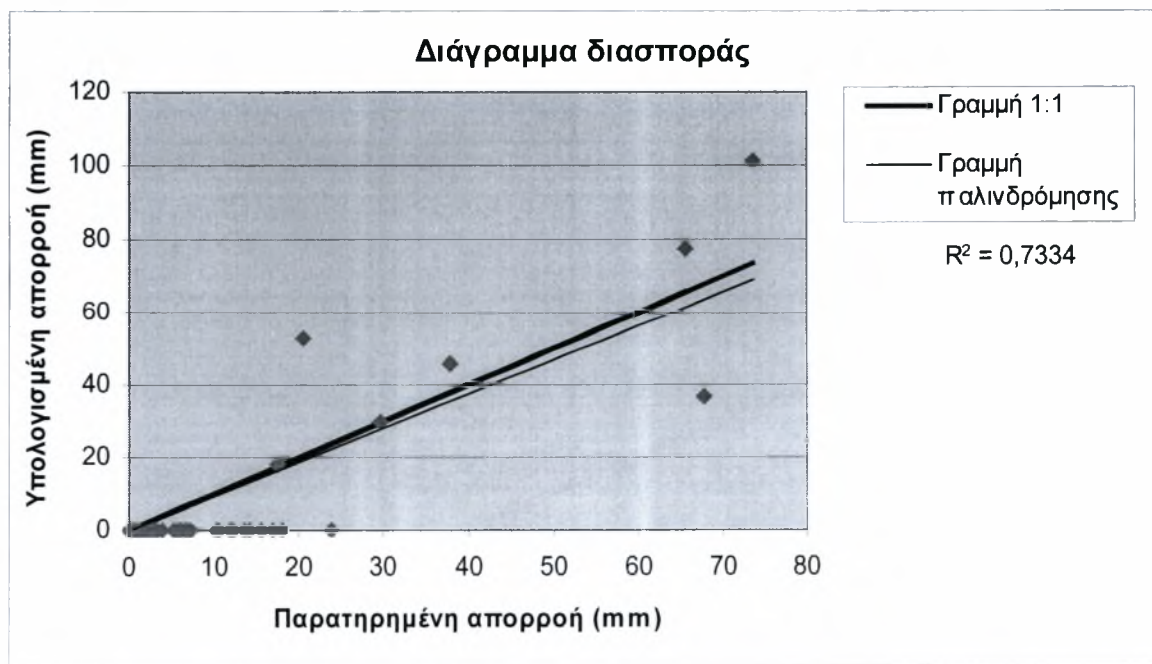


Σχήμα Δ.32

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

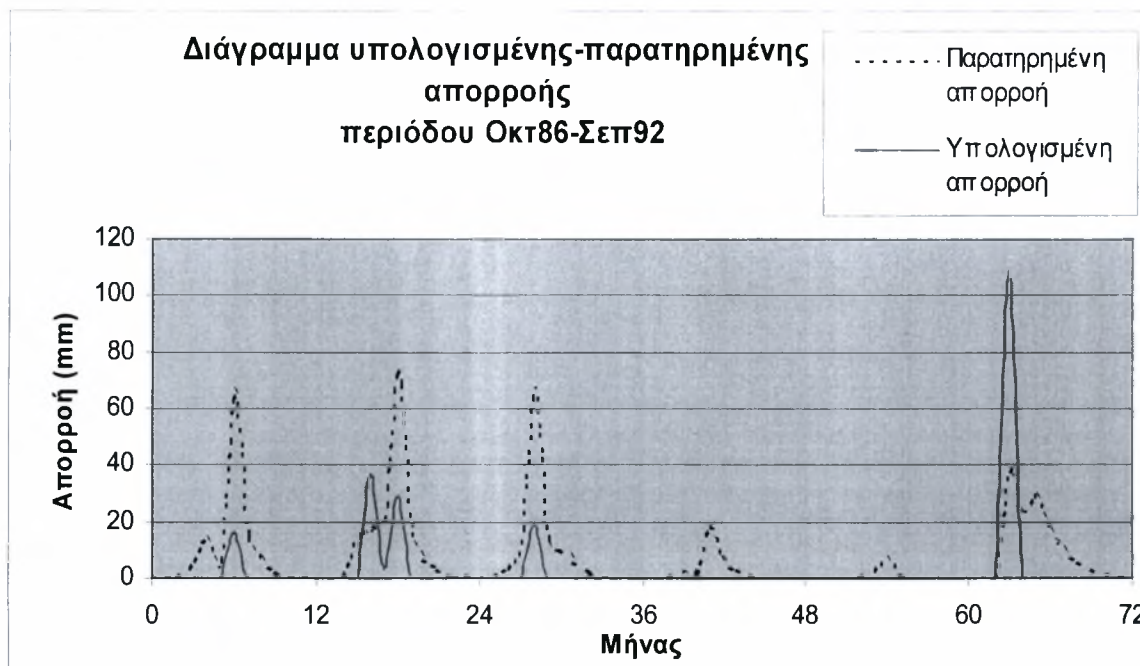


Σχήμα Δ.33

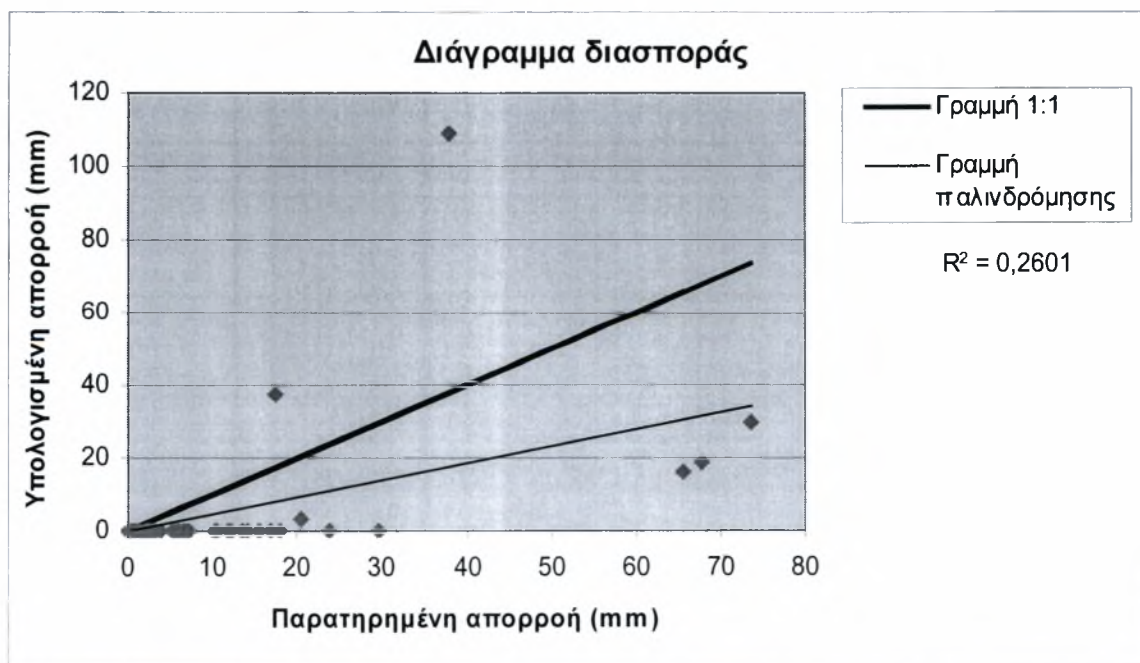


Σχήμα Δ.34

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

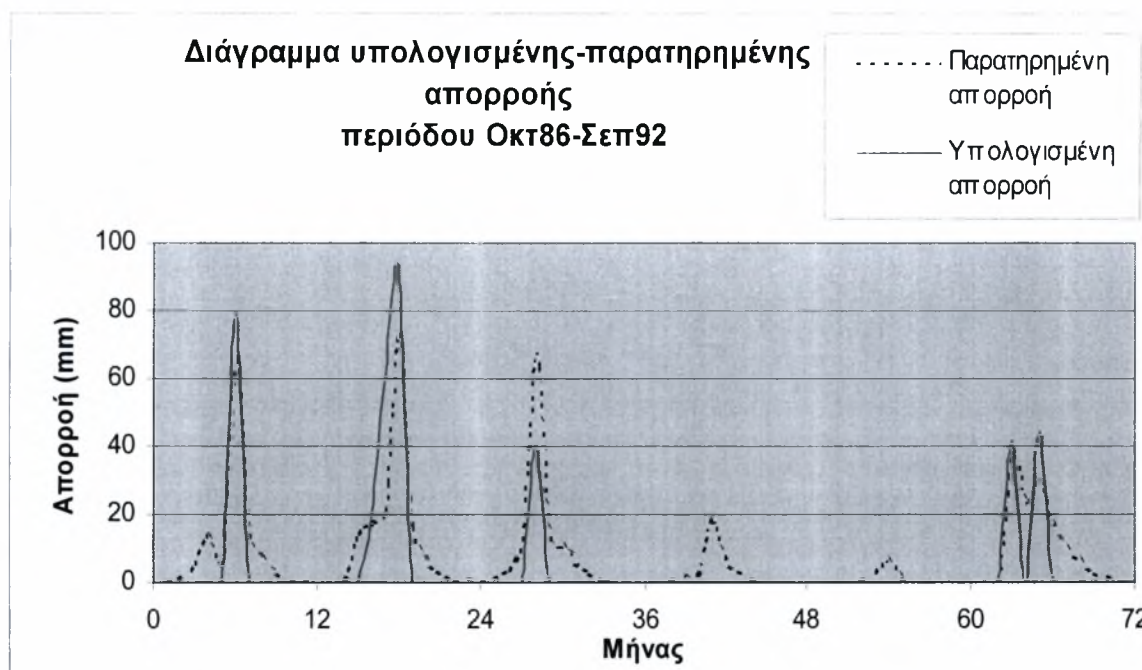


Σχήμα Δ.35

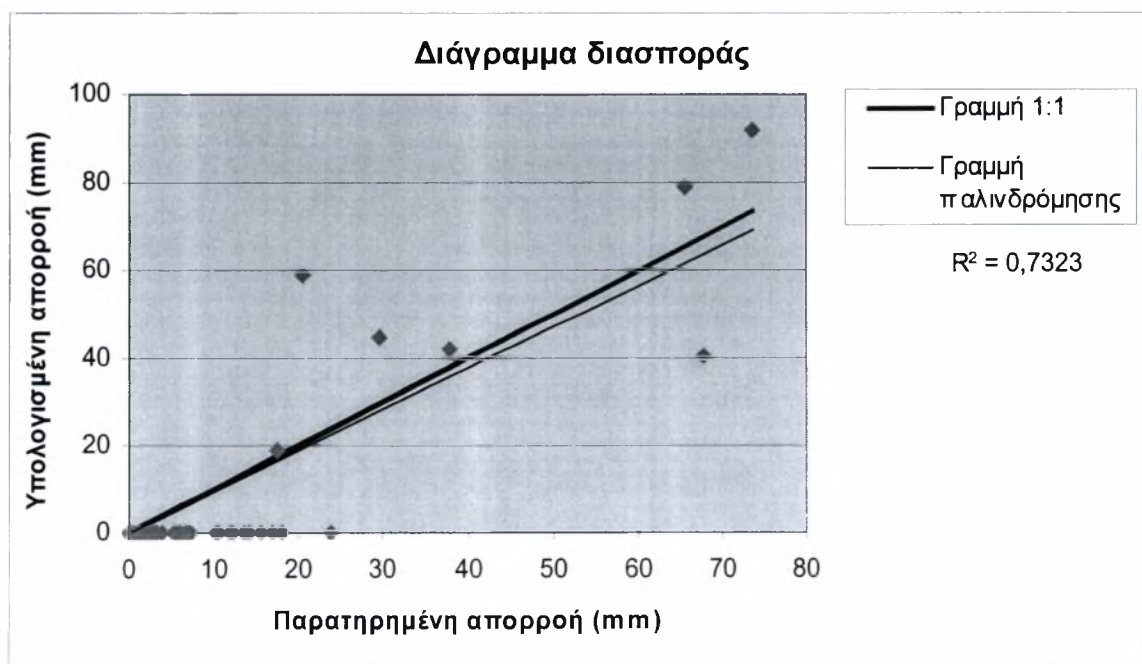


Σχήμα Δ.36

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

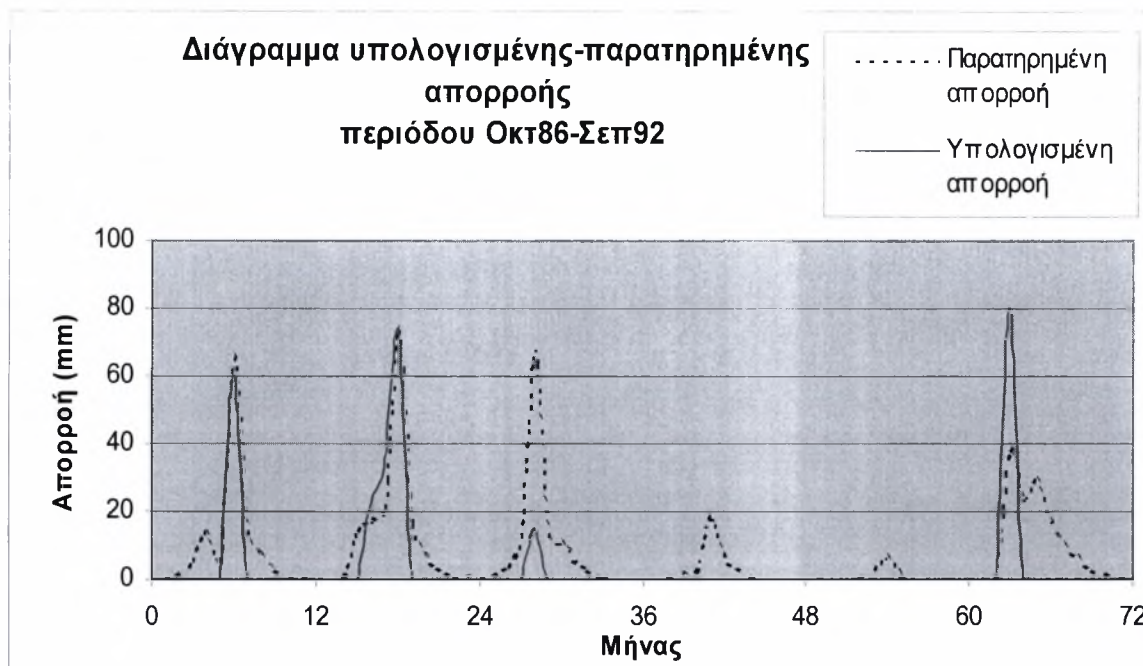


Σχήμα Δ.37

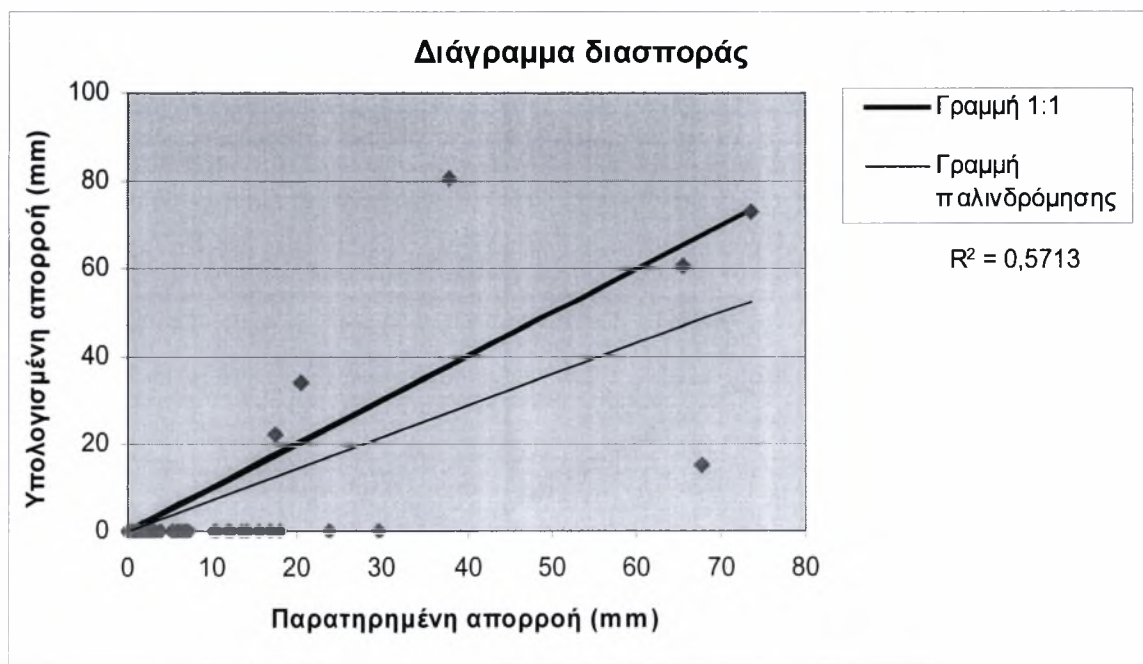


Σχήμα Δ.38

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

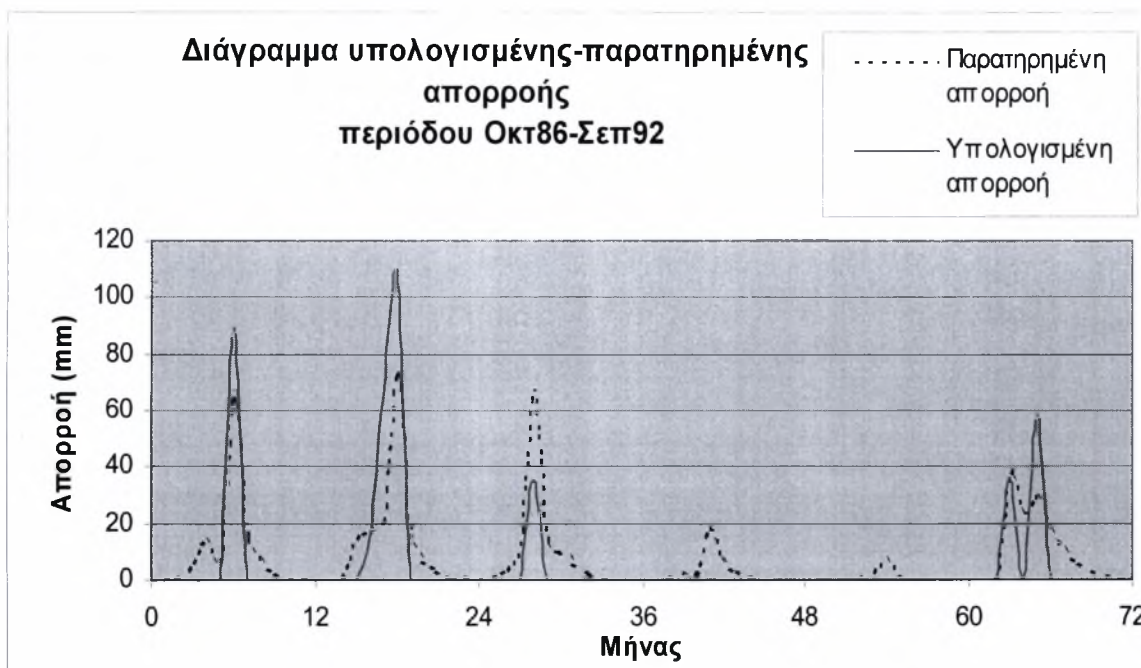


Σχήμα Δ.39

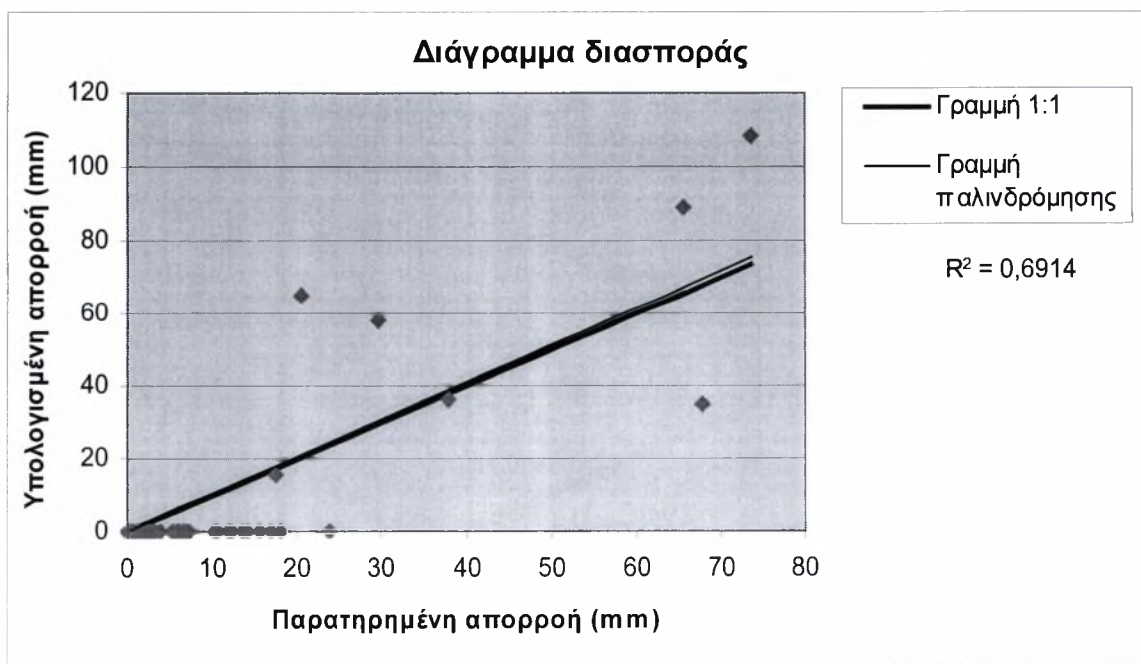


Σχήμα Δ.40

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Δ.41

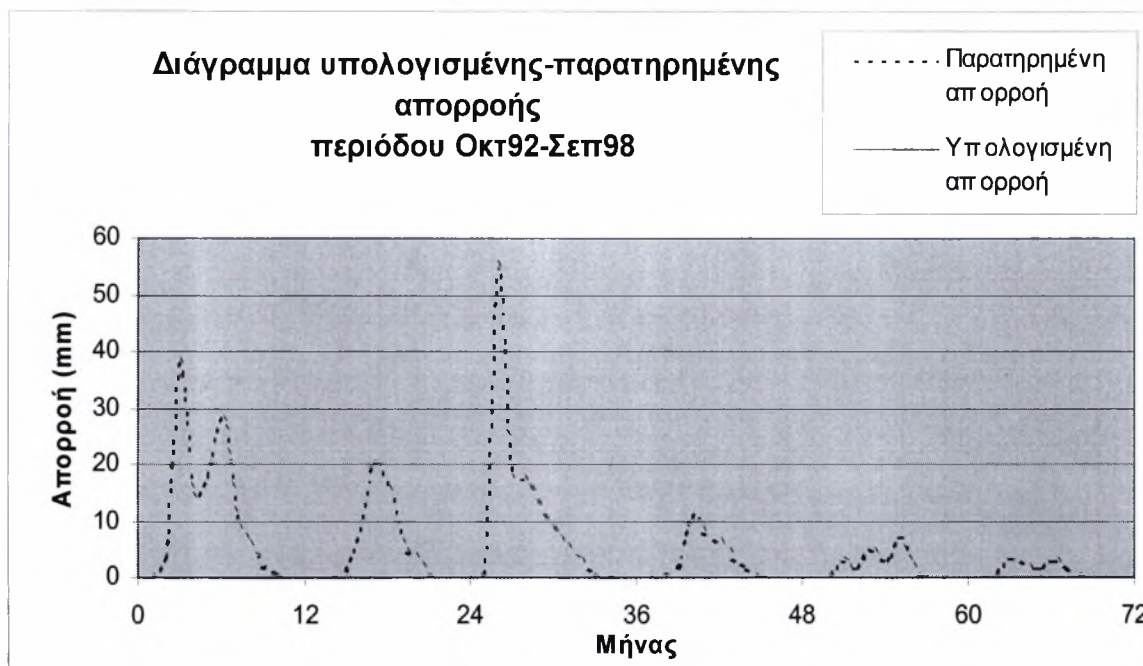


Σχήμα Δ.42

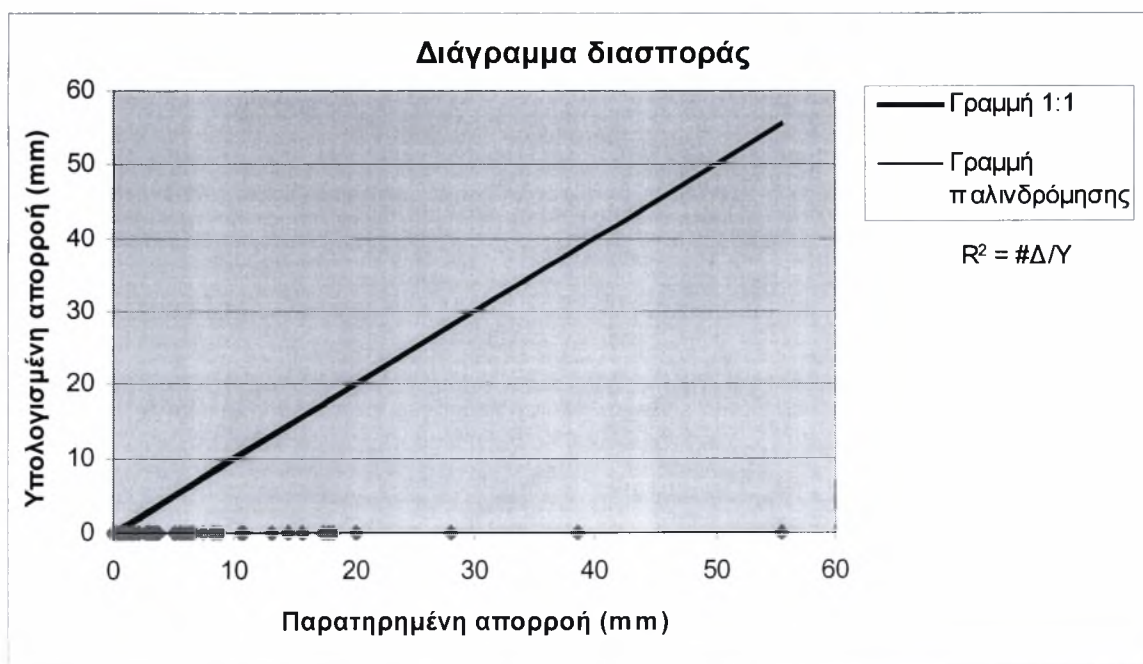
Δ.2 Πιστοποίηση μοντέλου Alley περιόδου Οκτ1992-Σεπ1998

Δ.2.1 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Βροχοβαθμίδα

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: Thornthwaite

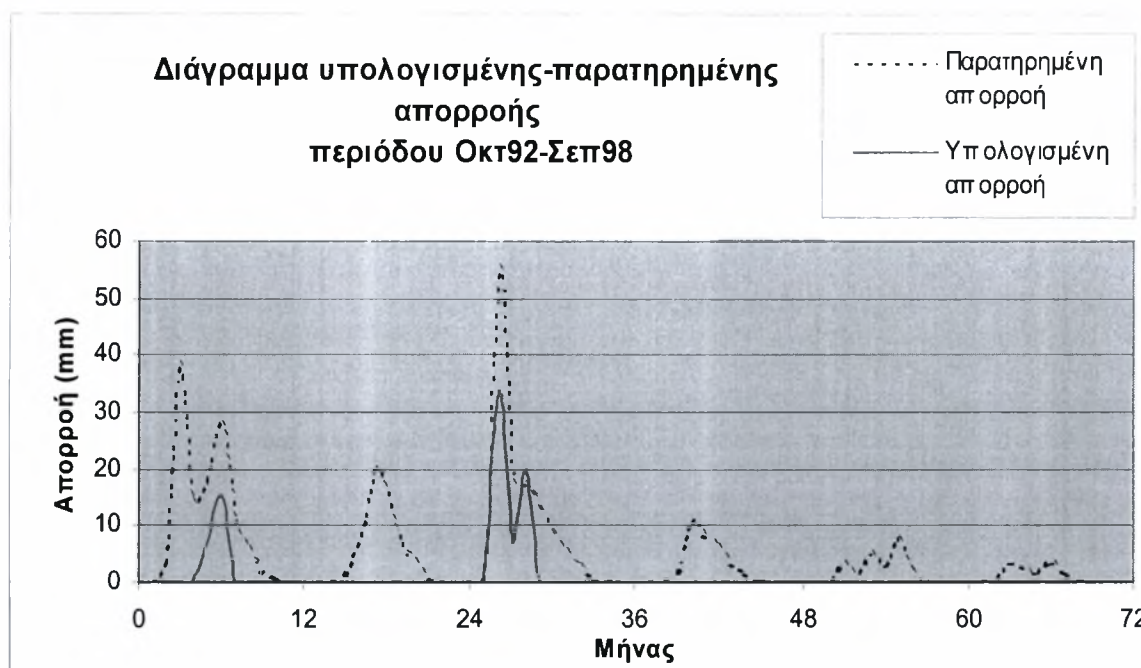


Σχήμα Δ.43

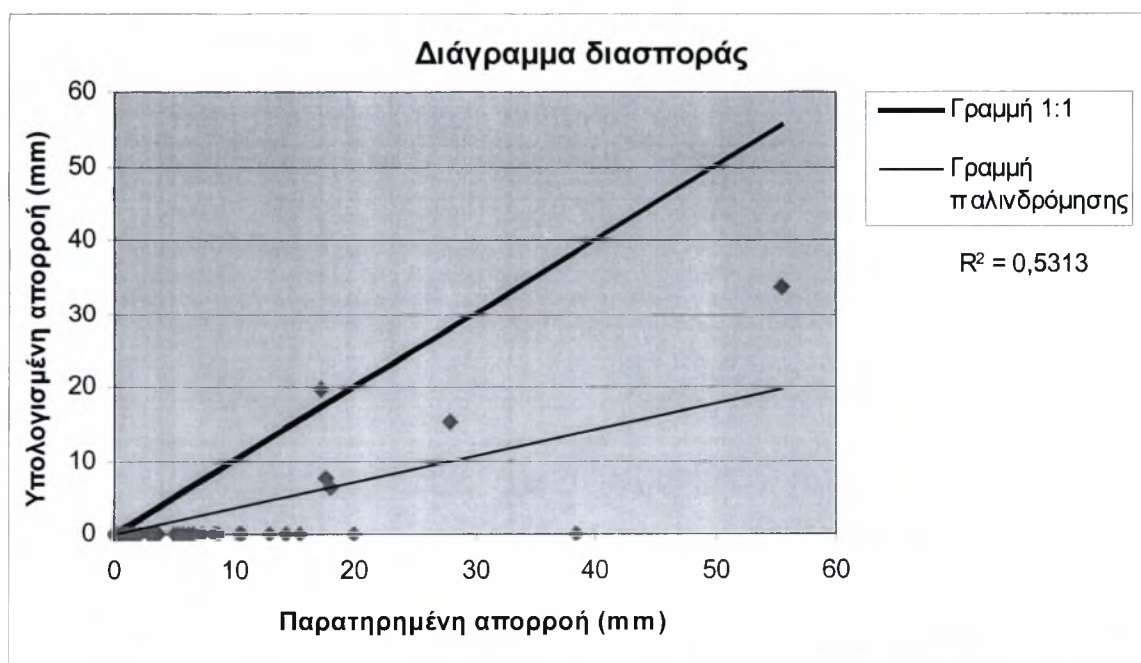


Σχήμα Δ.44

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

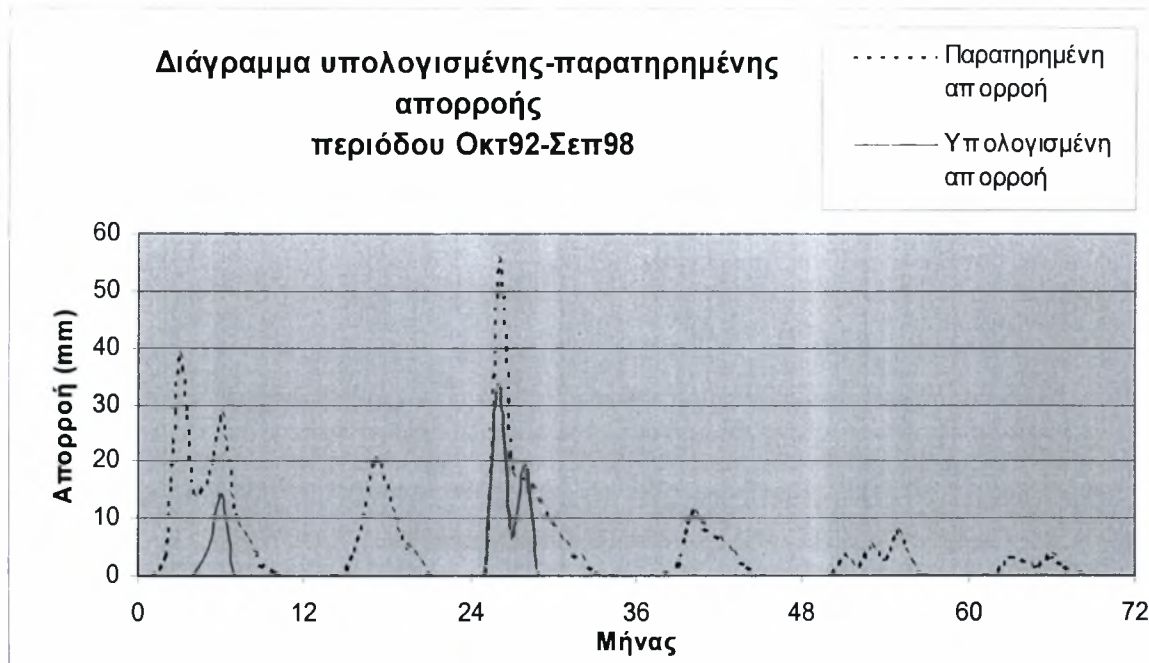


Σχήμα Δ.45

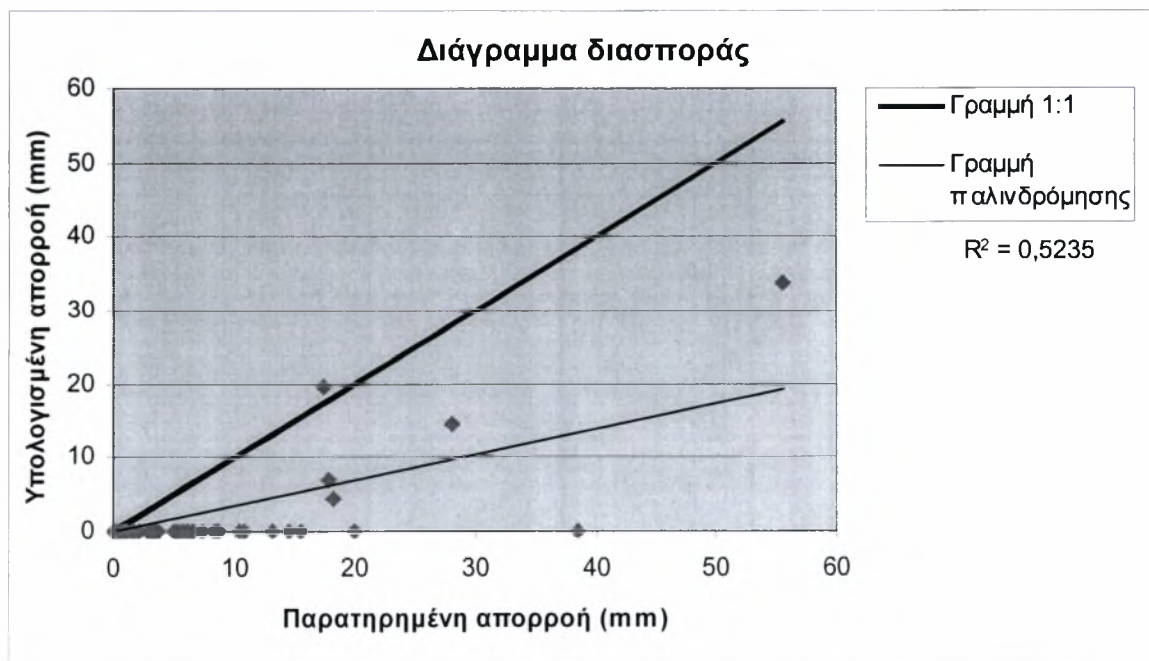


Σχήμα Δ.46

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

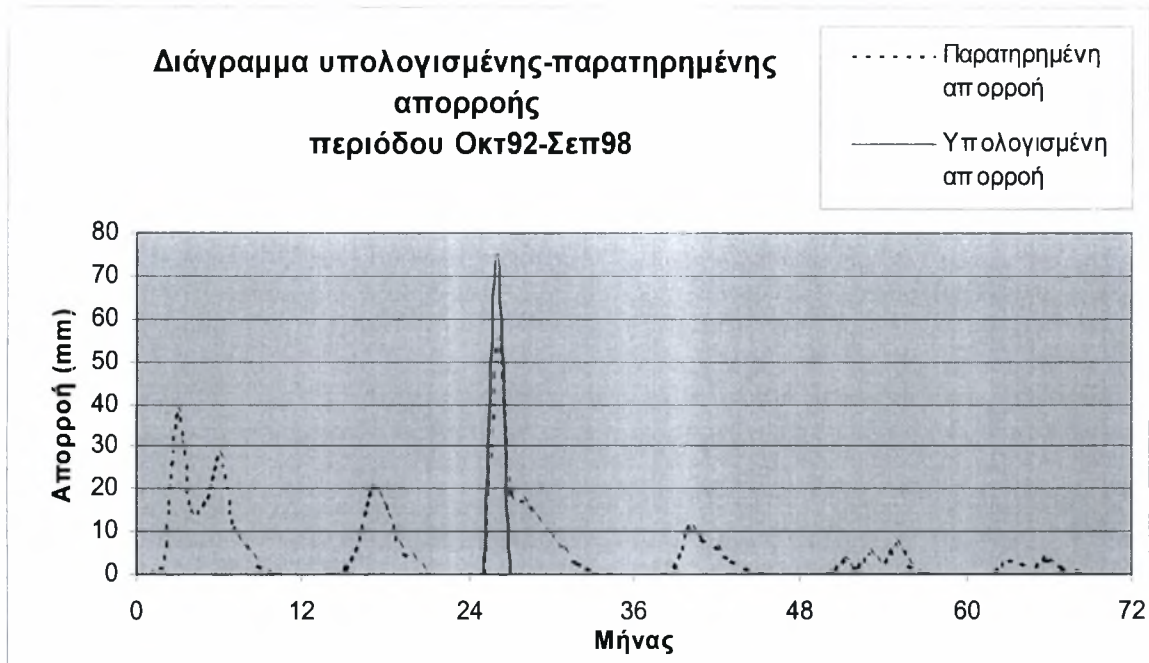


Σχήμα Δ.47

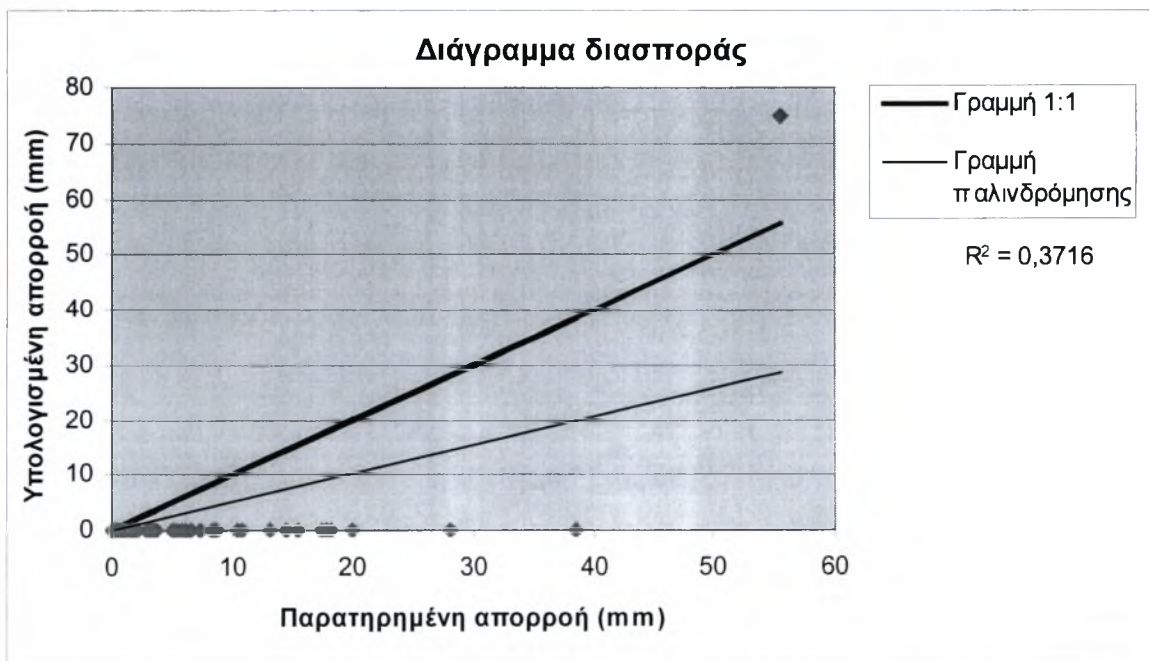


Σχήμα Δ.48

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

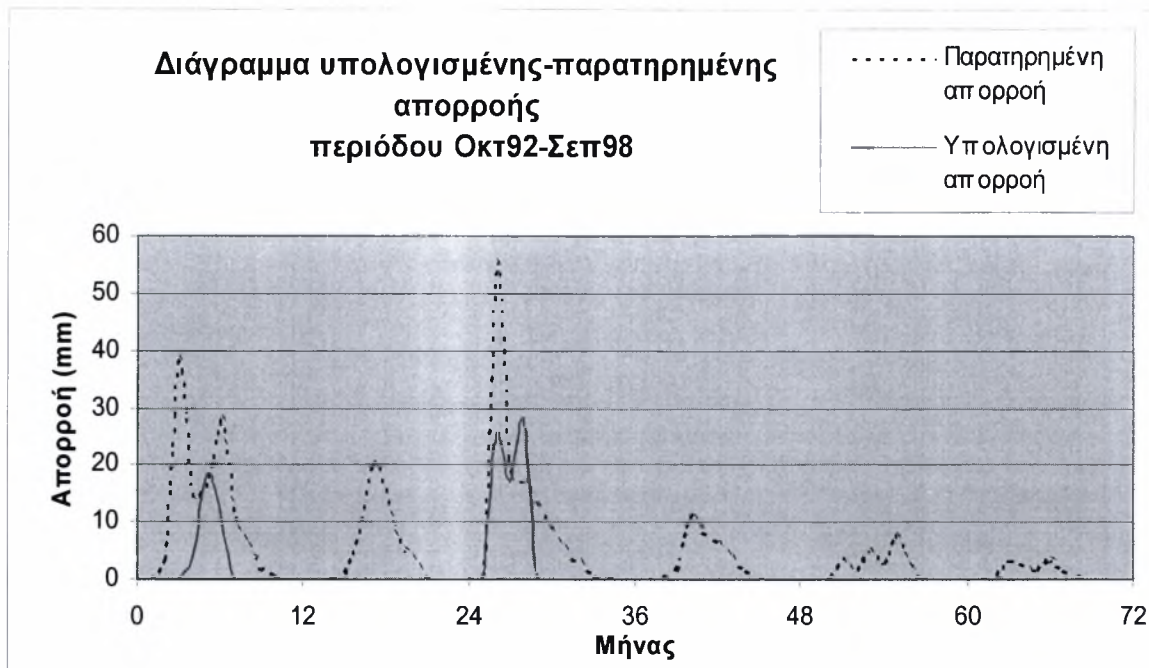


Σχήμα Δ.49

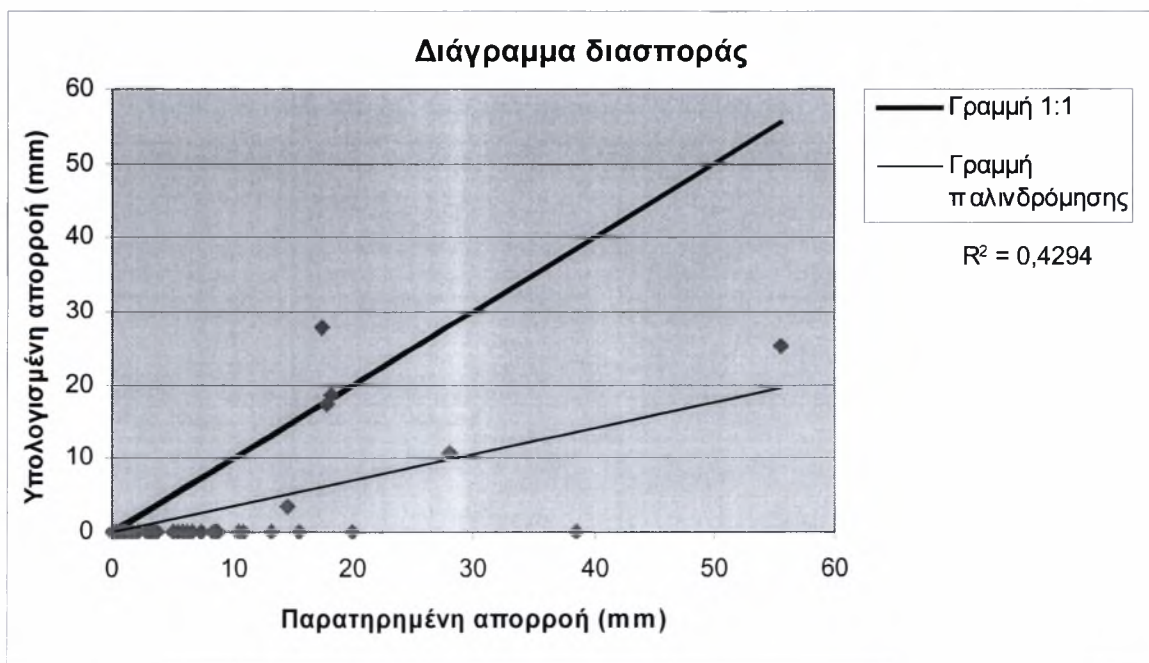


Σχήμα Δ.50

5. Μοντέλο εξαμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

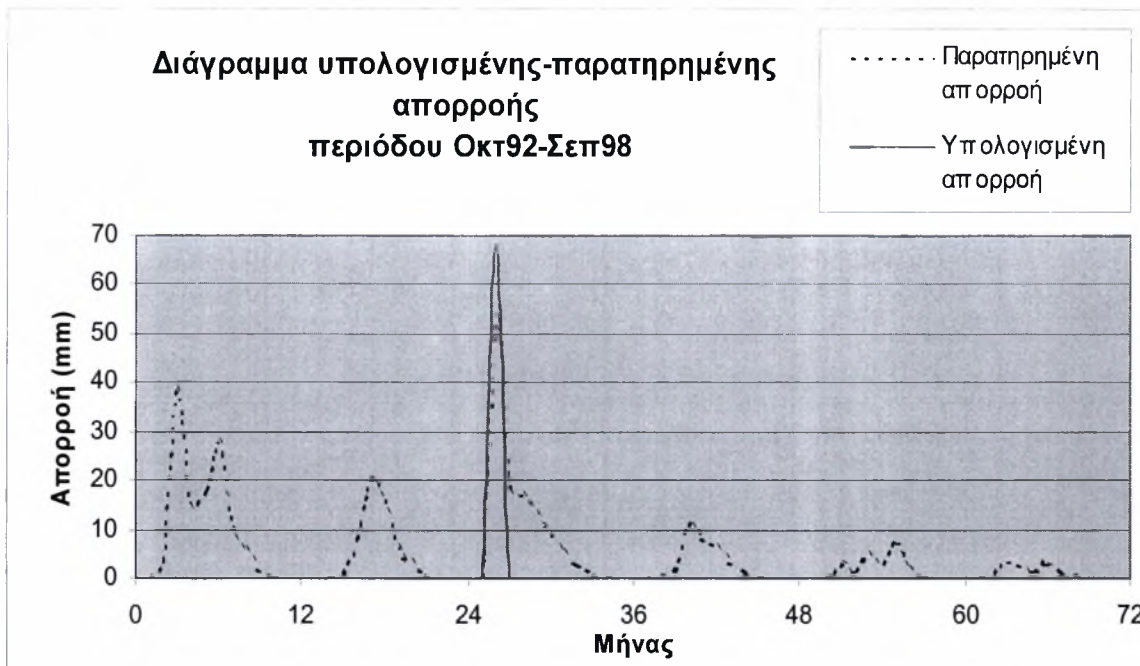


Σχήμα Δ.51

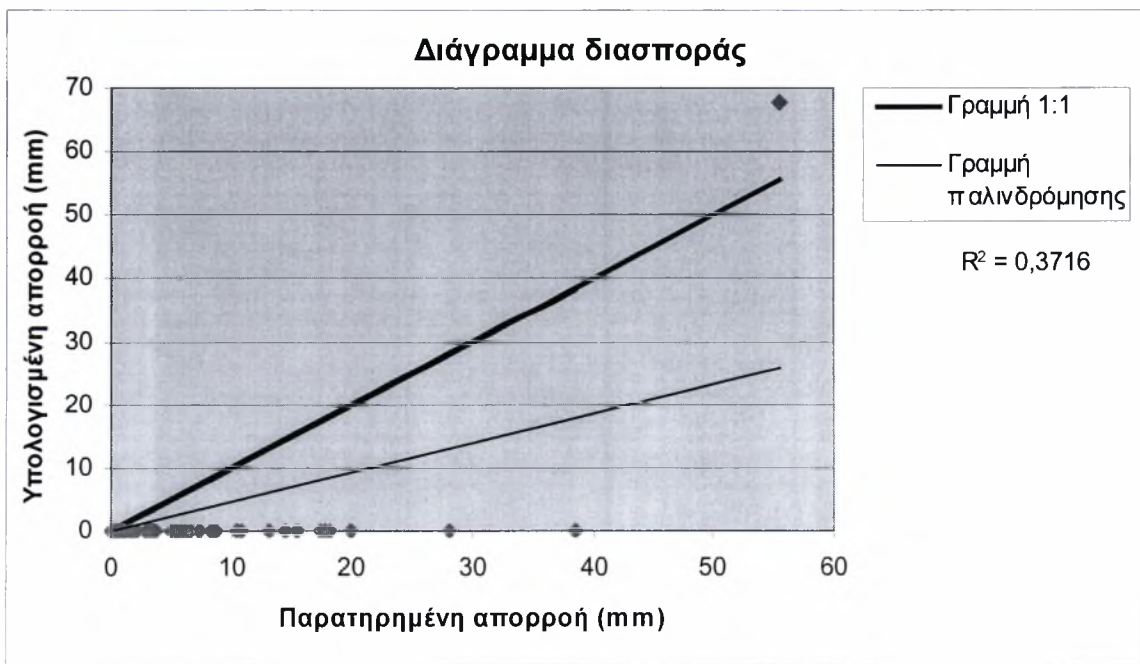


Σχήμα Δ.52

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

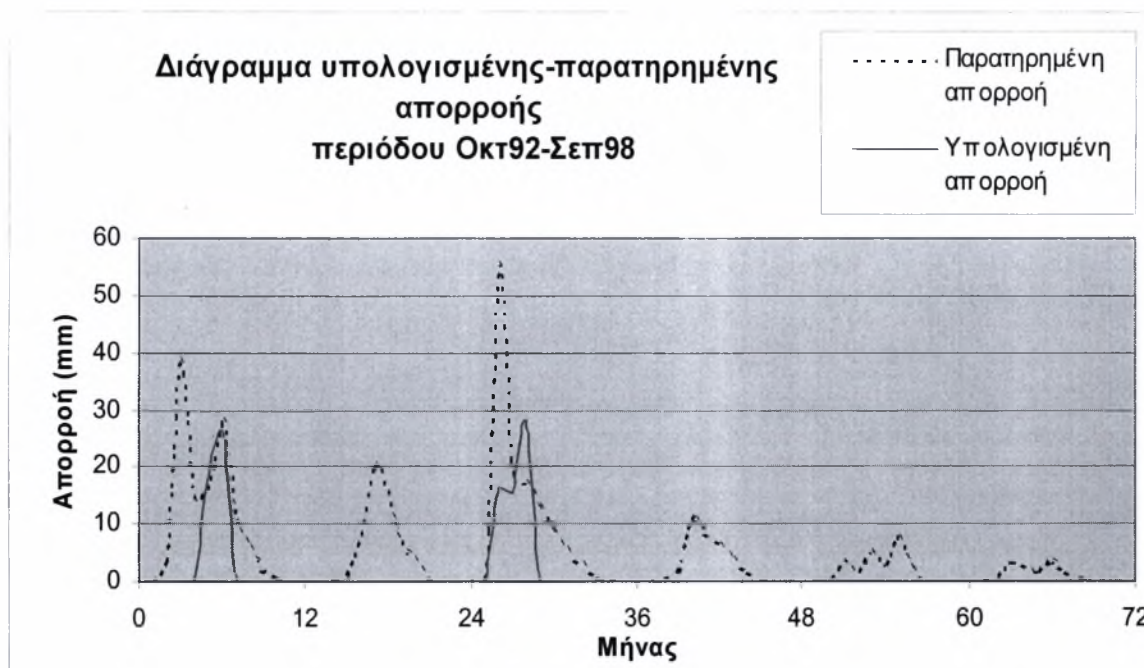


Σχήμα Δ.53

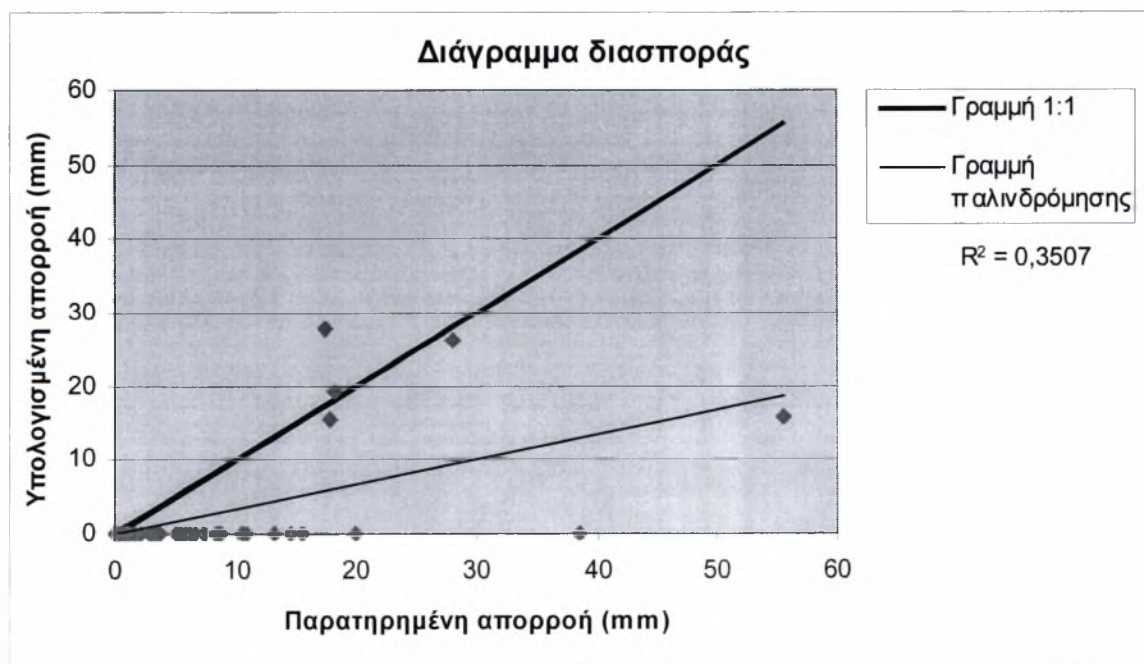


Σχήμα Δ.54

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



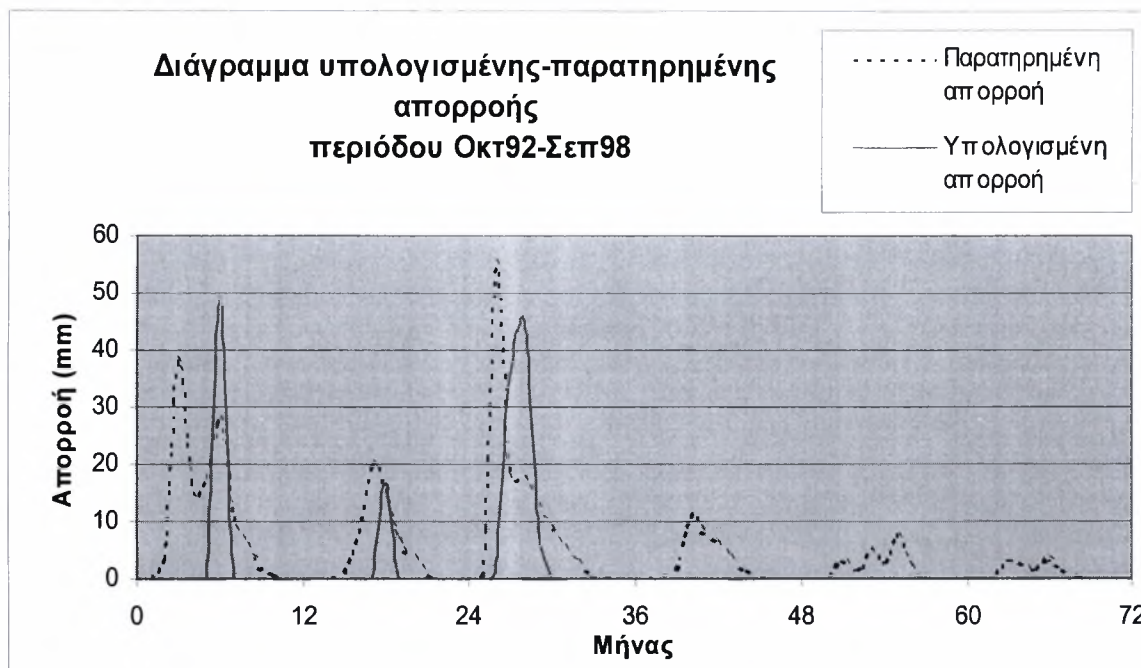
Σχήμα Δ.55



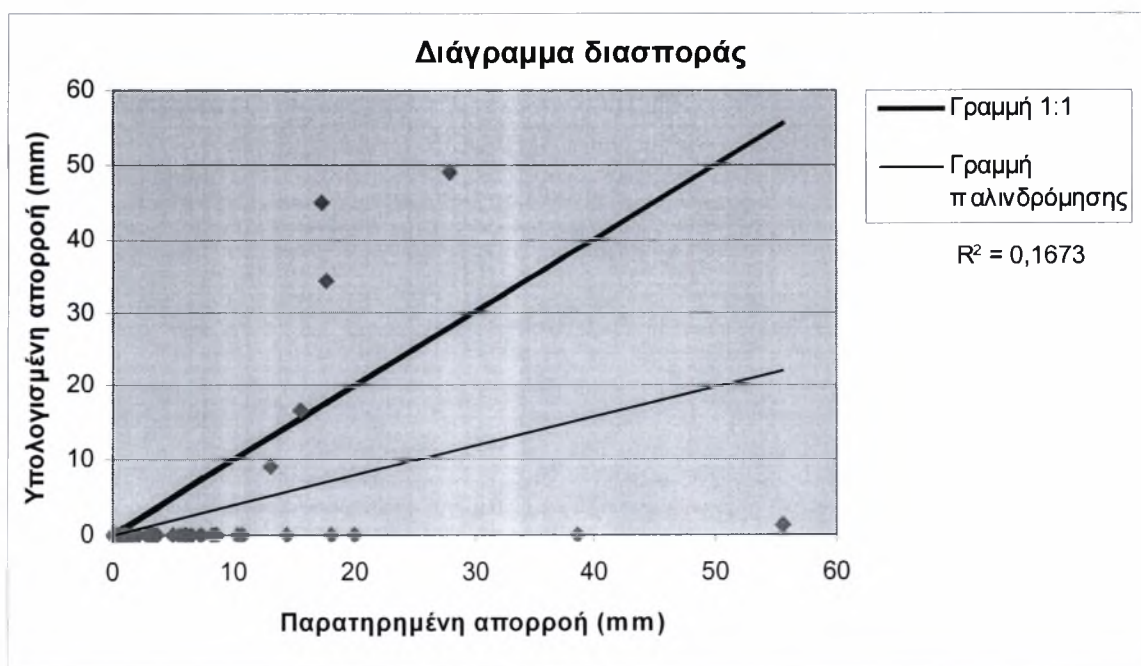
Σχήμα Δ.56

Δ.2.2 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Αριθμητικός μέσος όρος

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

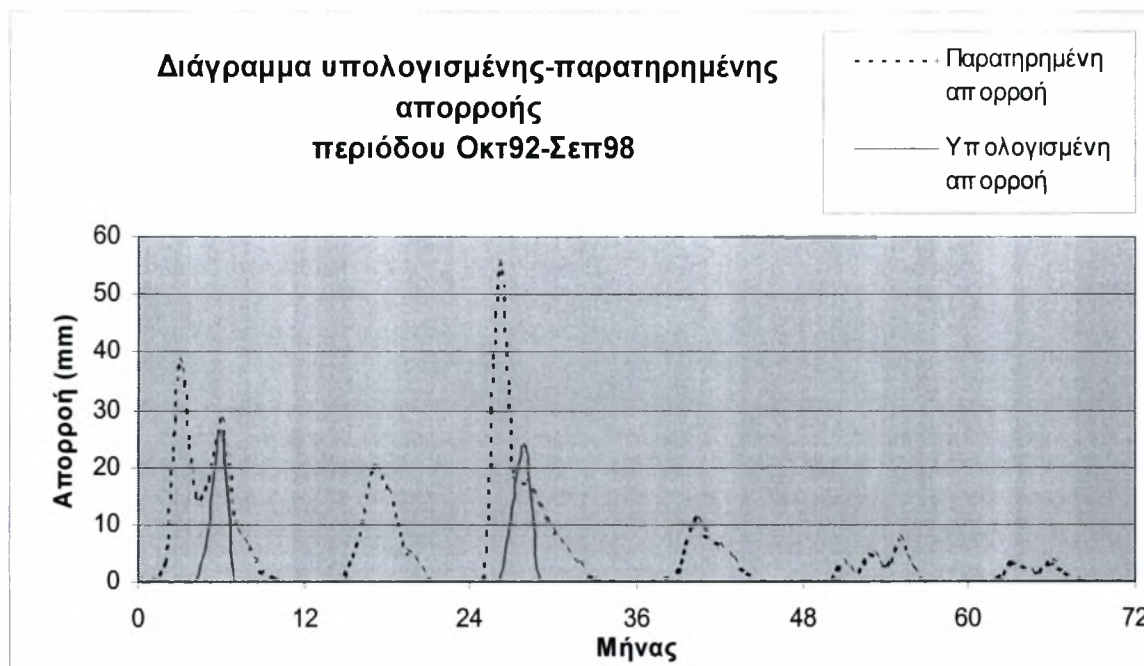


Σχήμα Δ.57

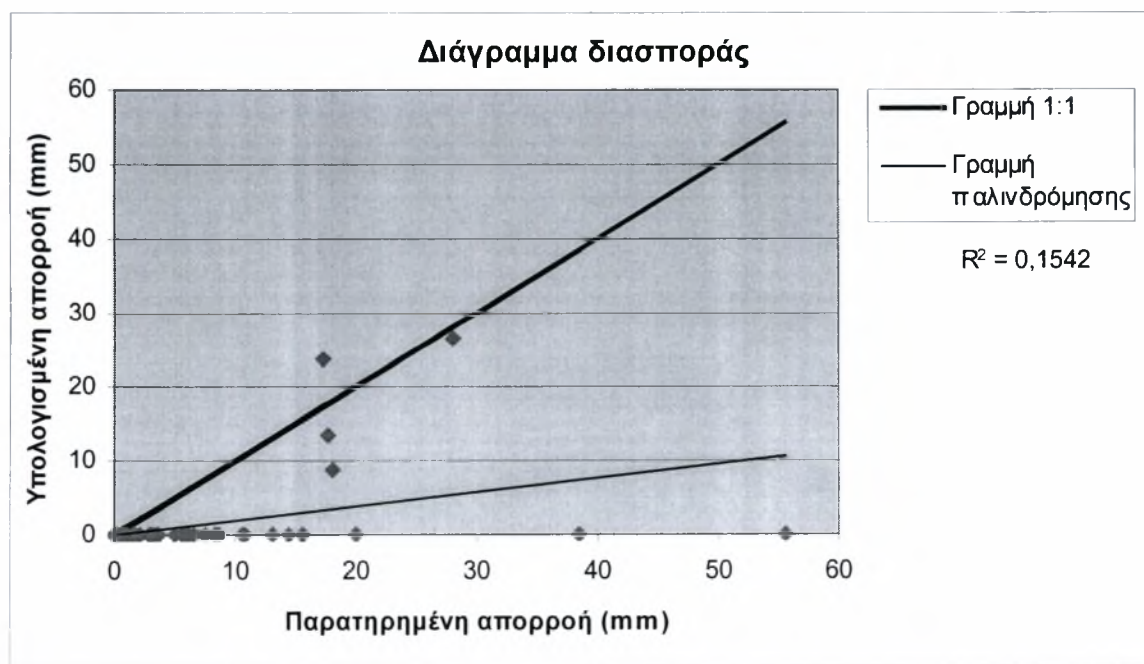


Σχήμα Δ.58

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

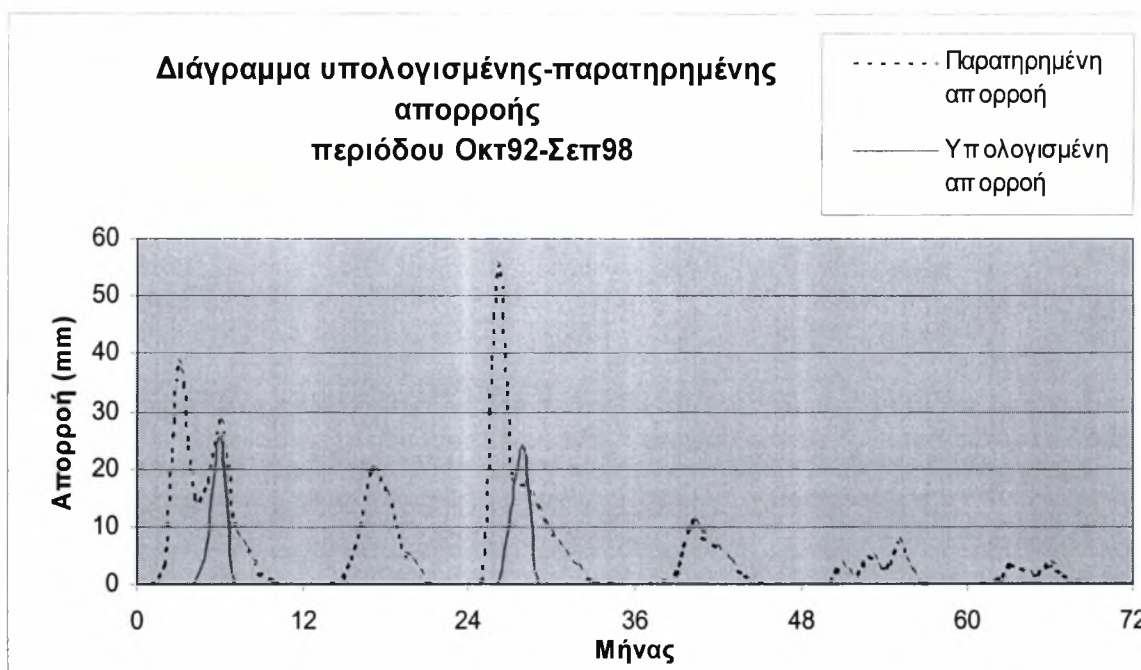


Σχήμα Δ.59

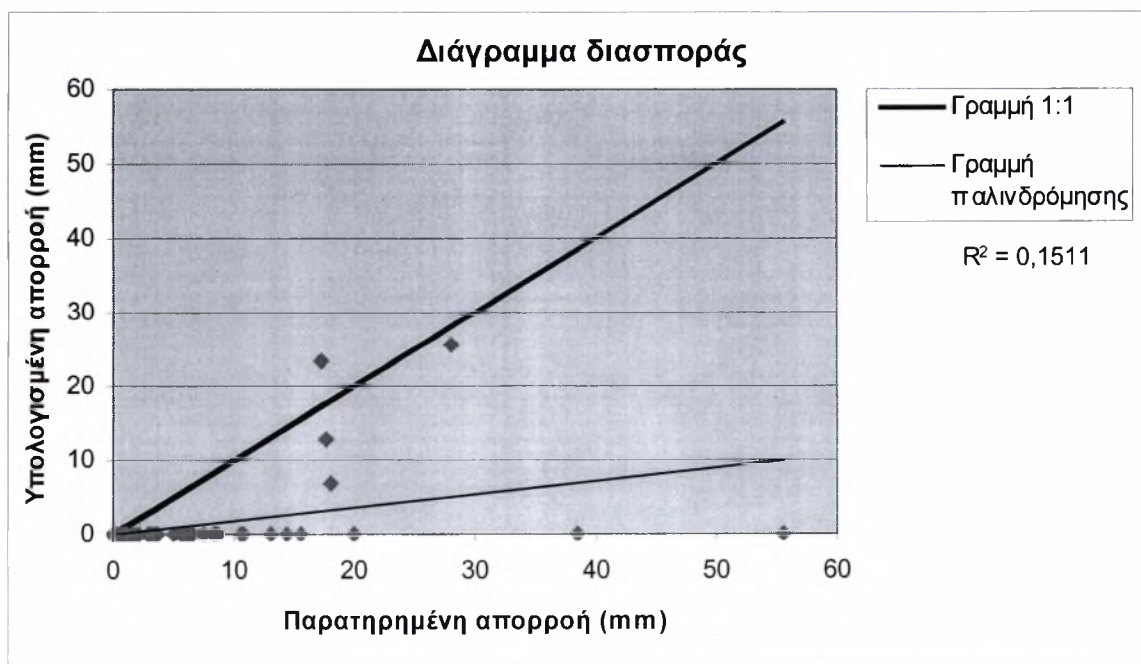


Σχήμα Δ.60

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

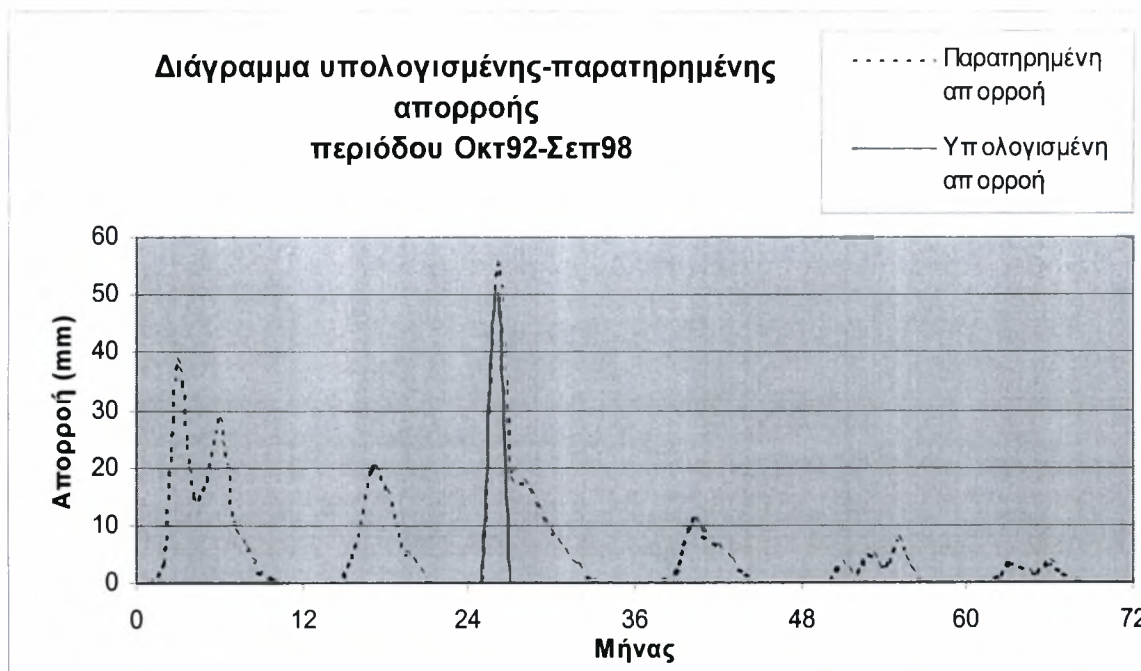


Σχήμα Δ.61

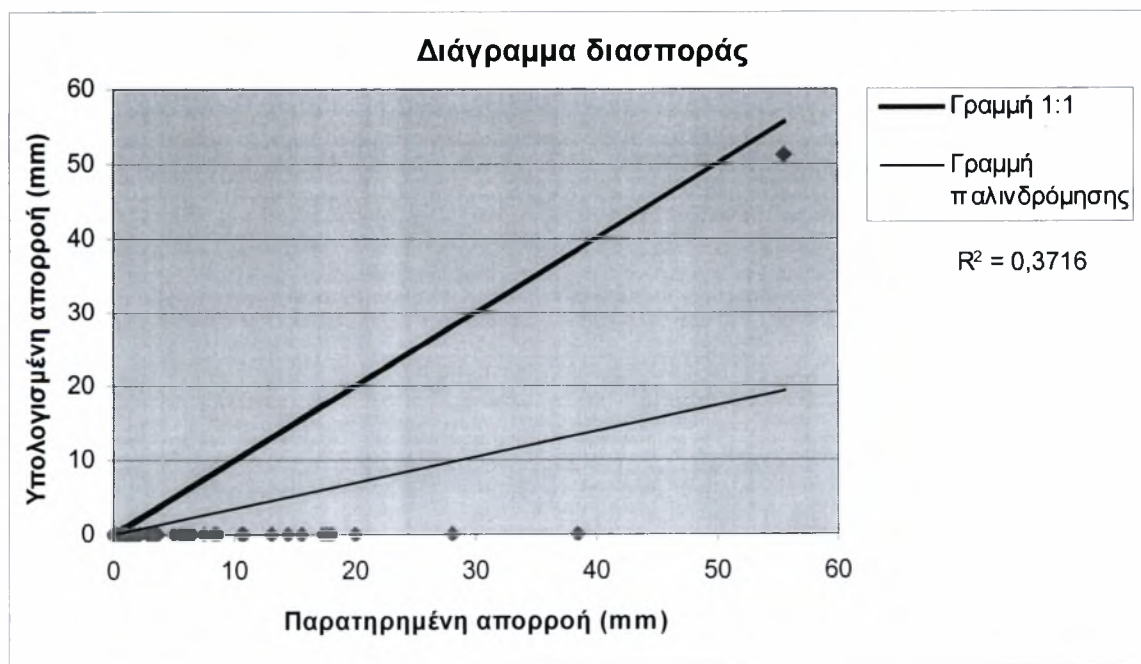


Σχήμα Δ.62

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

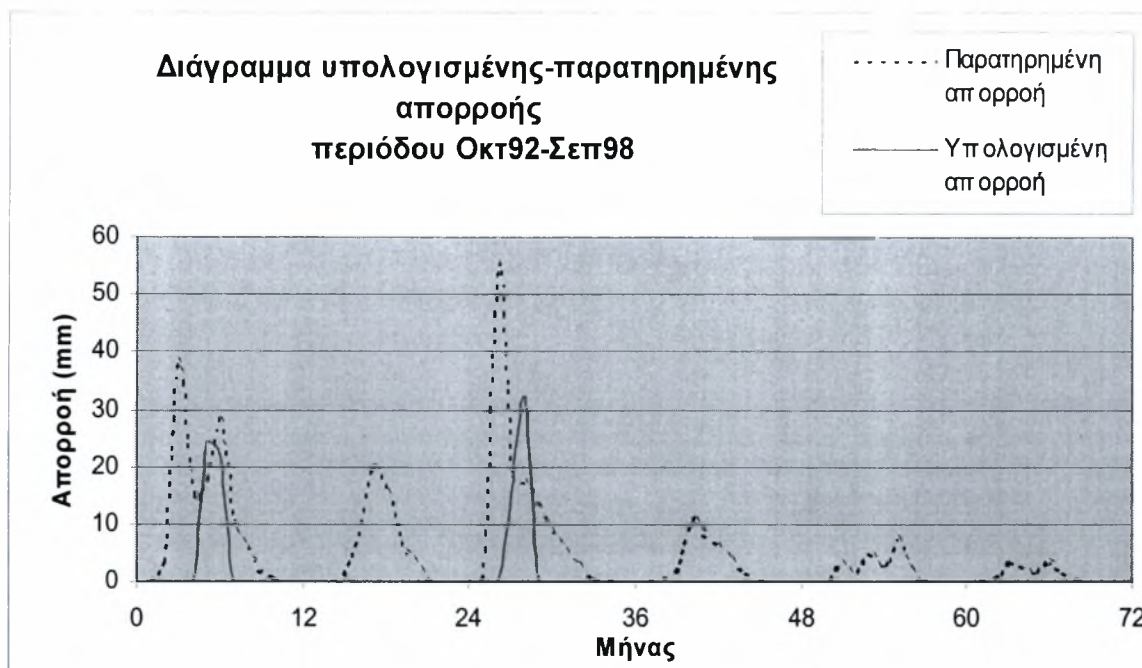


Σχήμα Δ.63

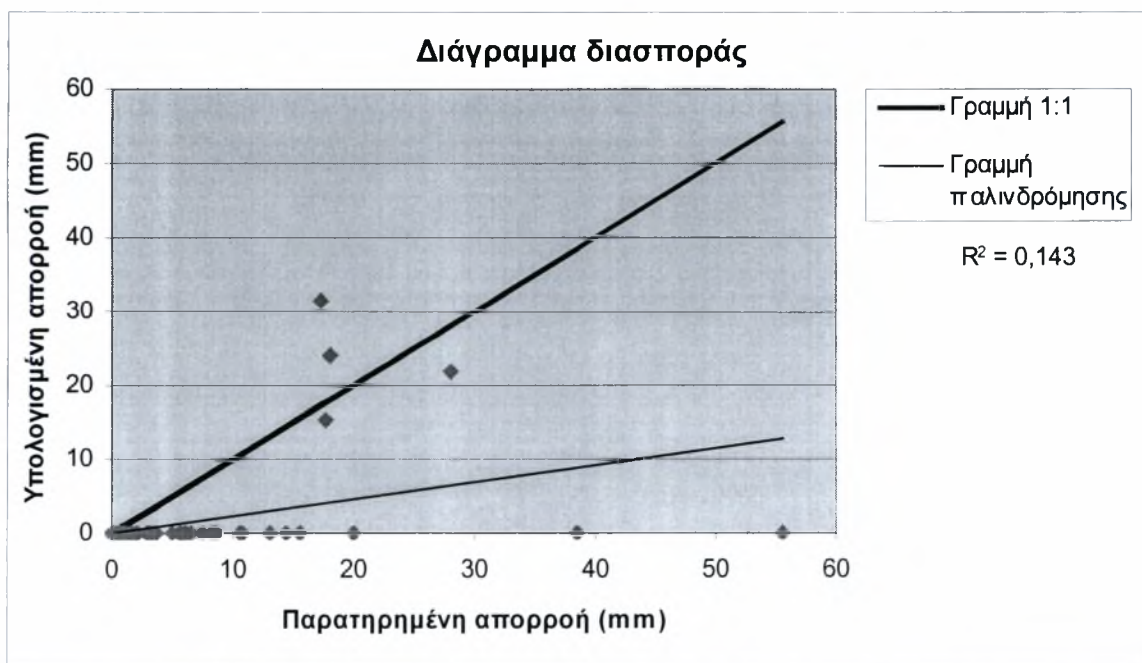


Σχήμα Δ.64

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

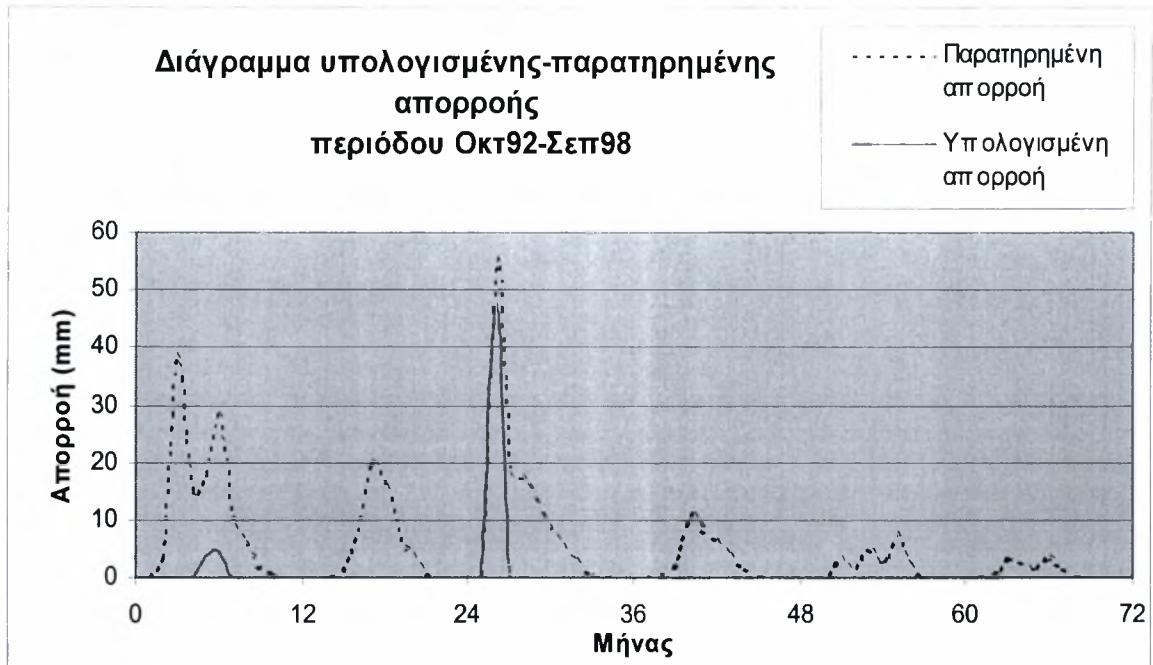


Σχήμα Δ.65

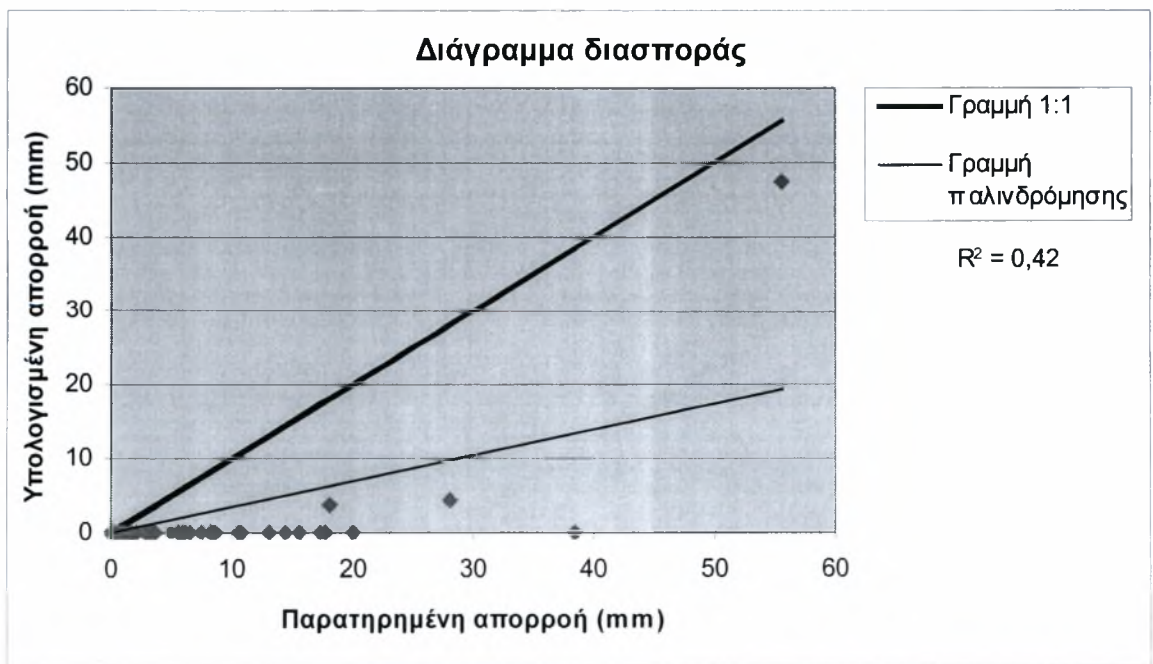


Σχήμα Δ.66

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

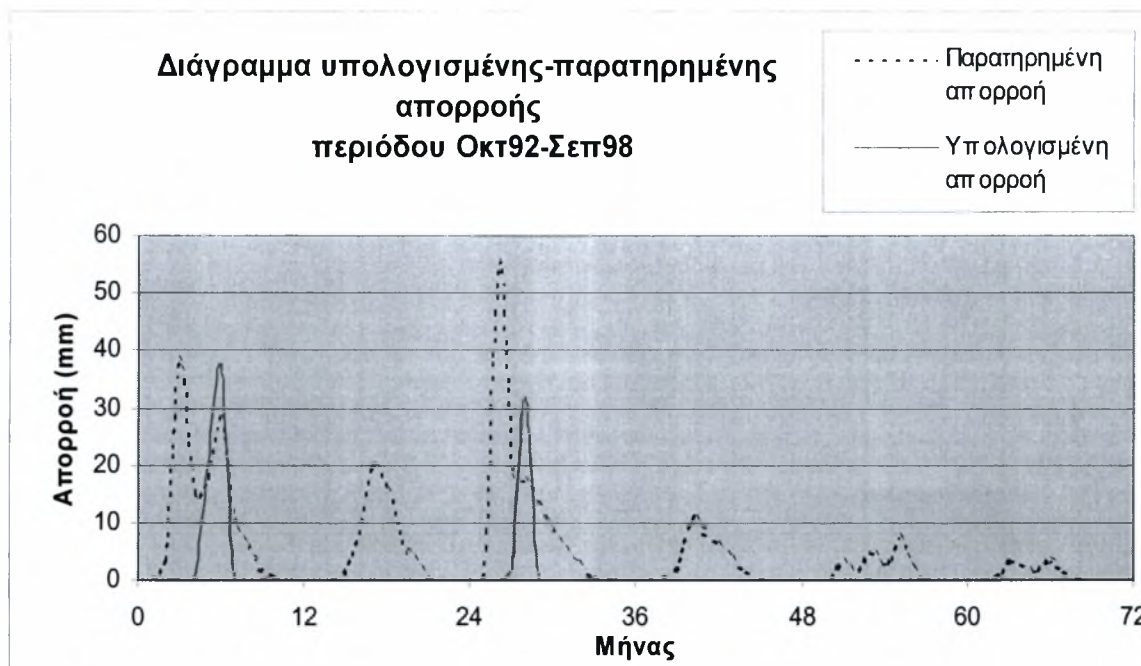


Σχήμα Δ.67

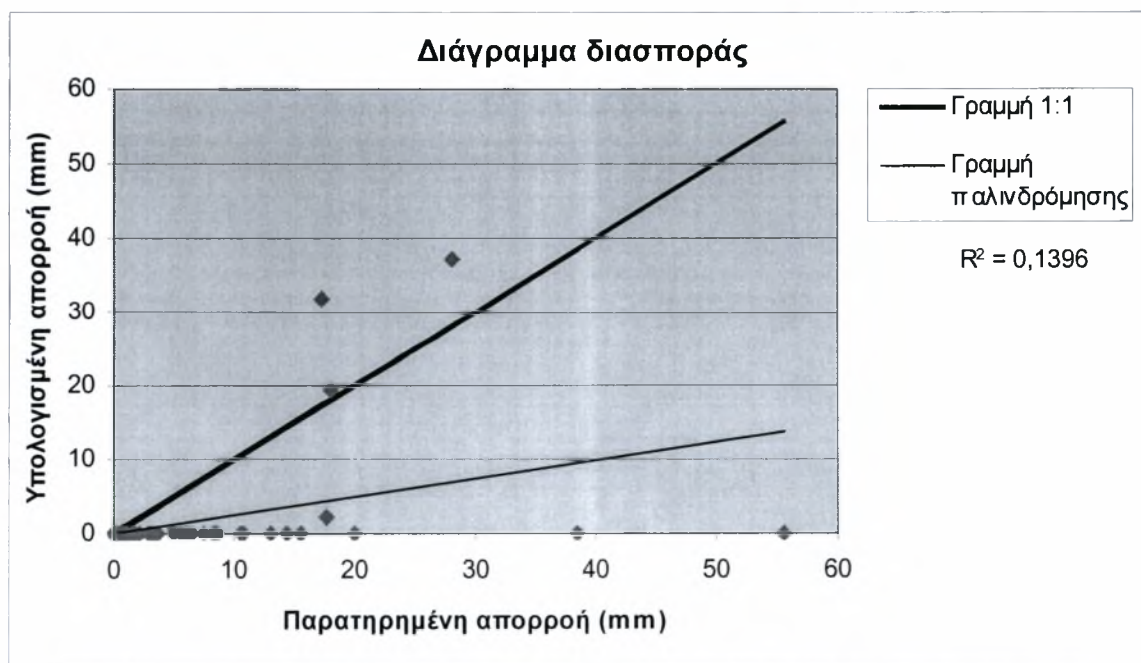


Σχήμα Δ.68

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



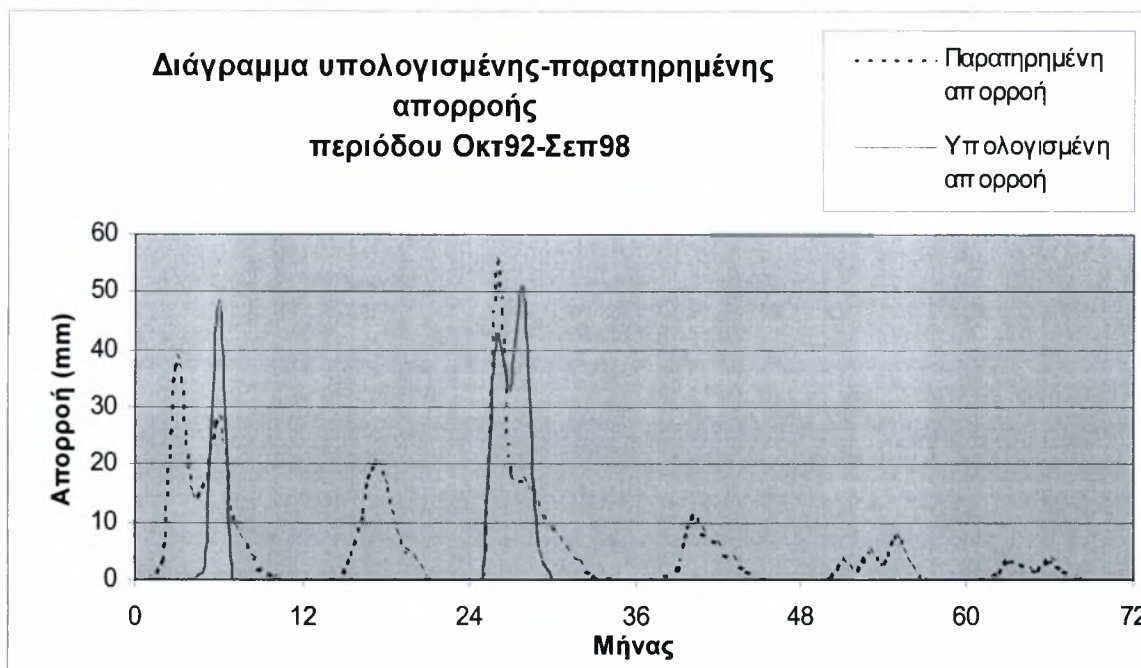
Σχήμα Δ.69



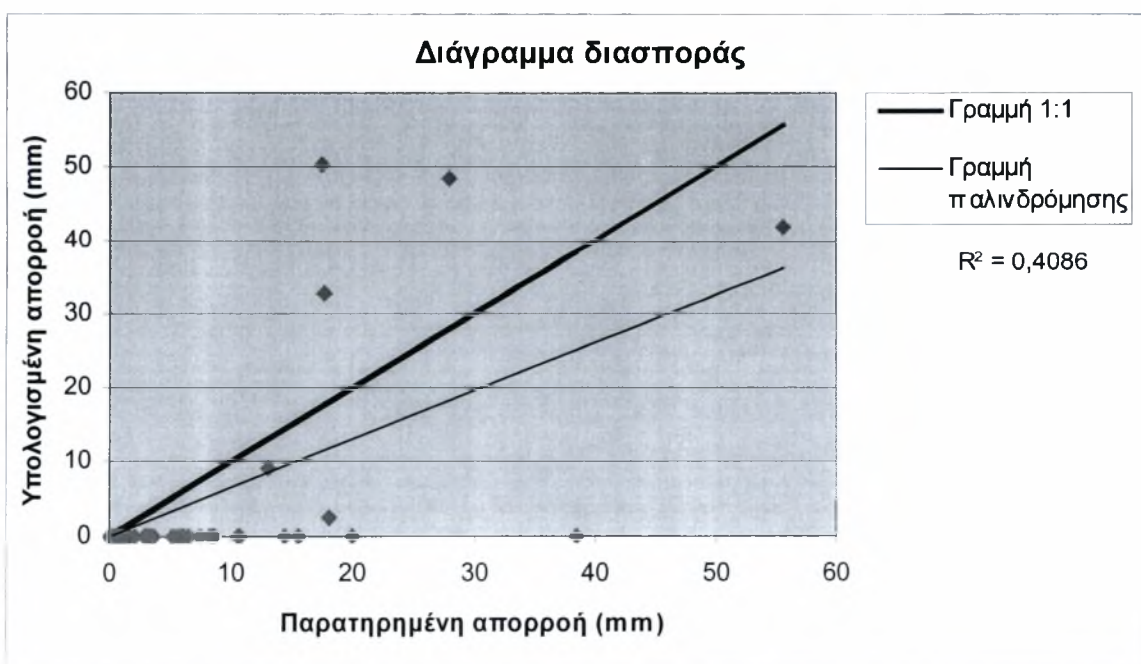
Σχήμα Δ.70

Δ.2.3 Μέθοδος μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης: Πολύγωνα Thiessen

1. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Thornthwaite*

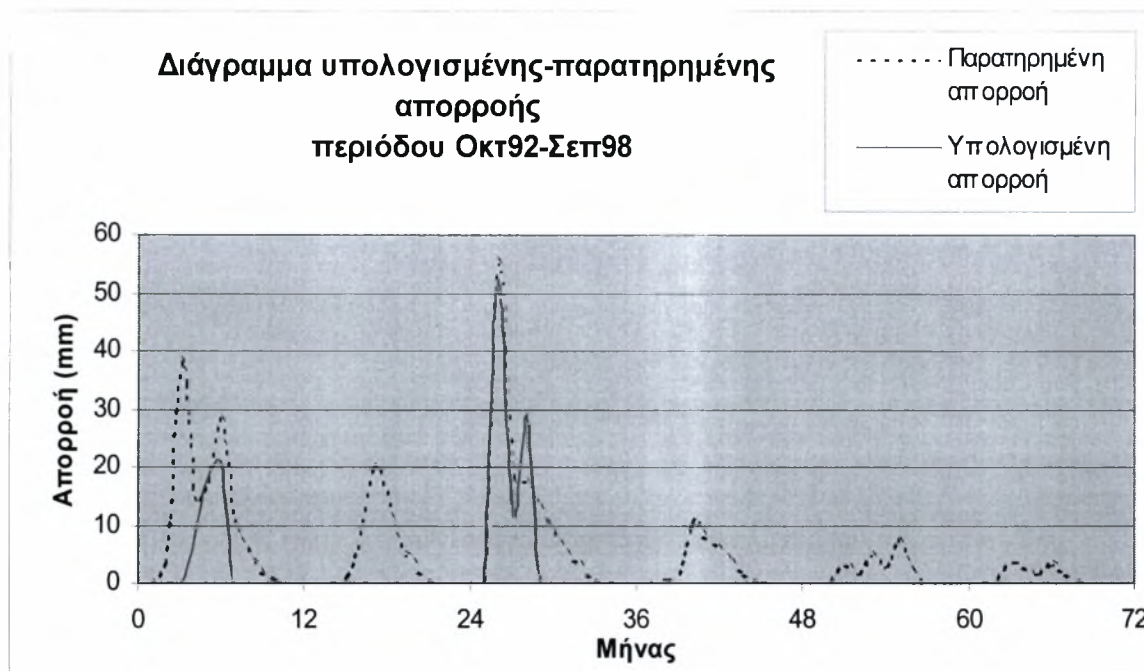


Σχήμα Δ.71

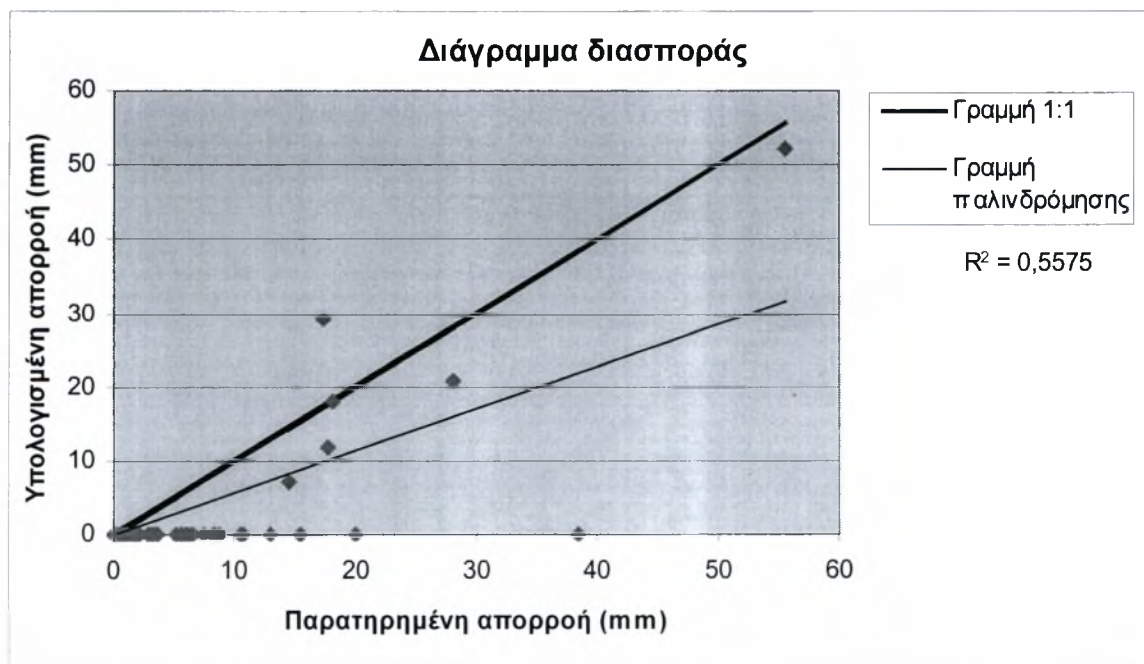


Σχήμα Δ.72

2. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (μέσος όρος)

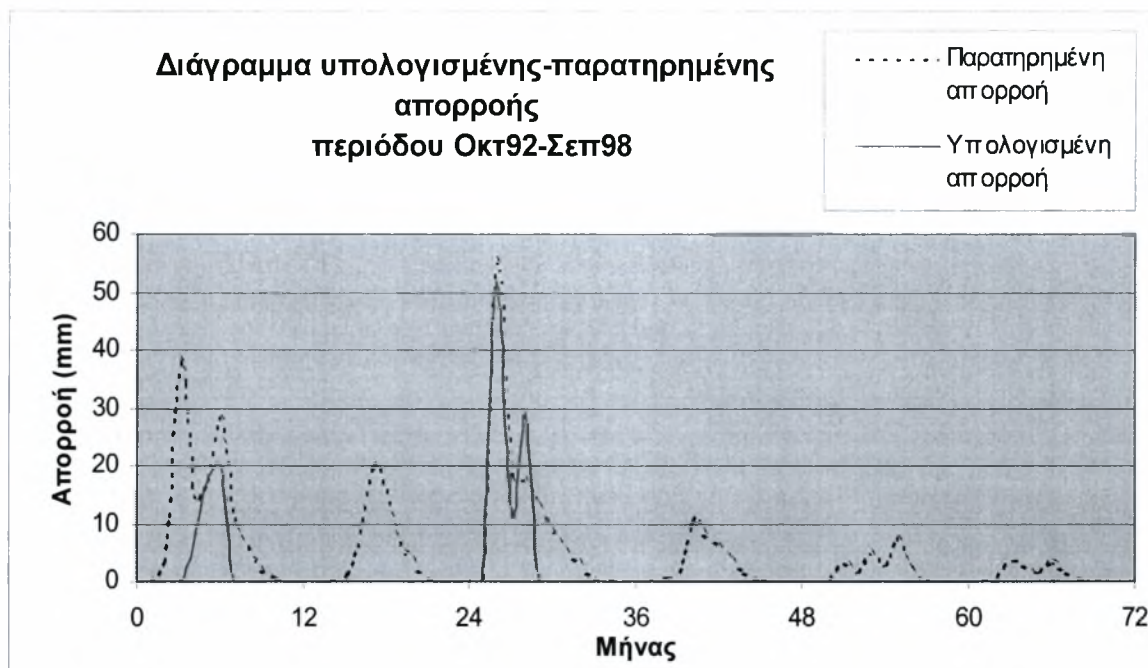


Σχήμα Δ.73

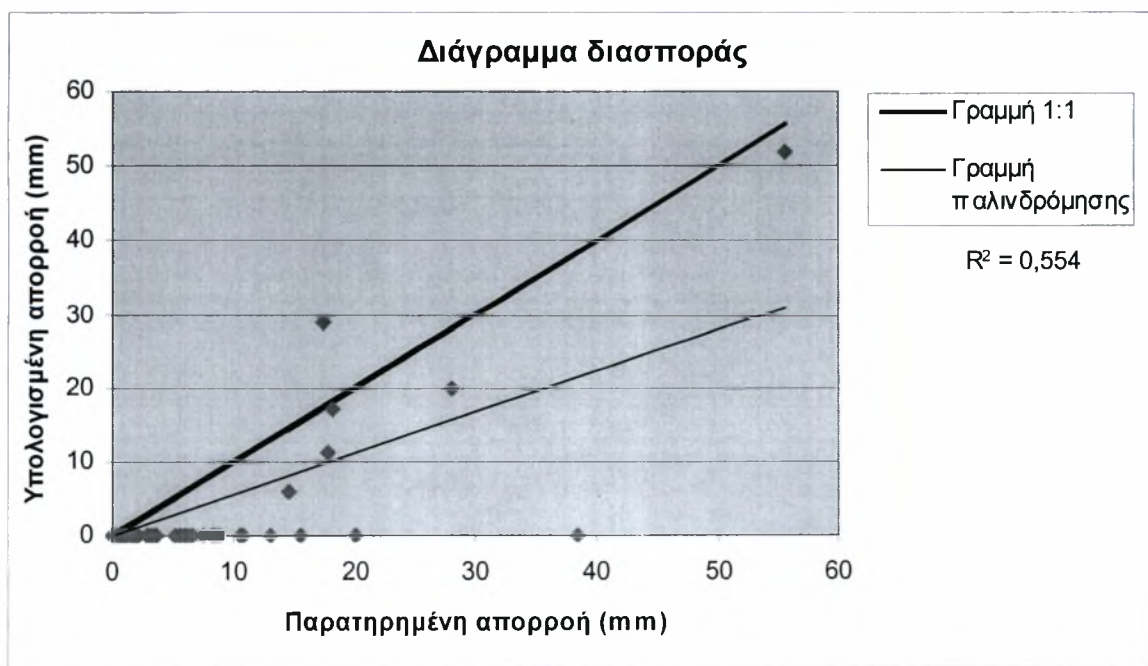


Σχήμα Δ.74

3. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Turc* (βροχοβαθμίδα)

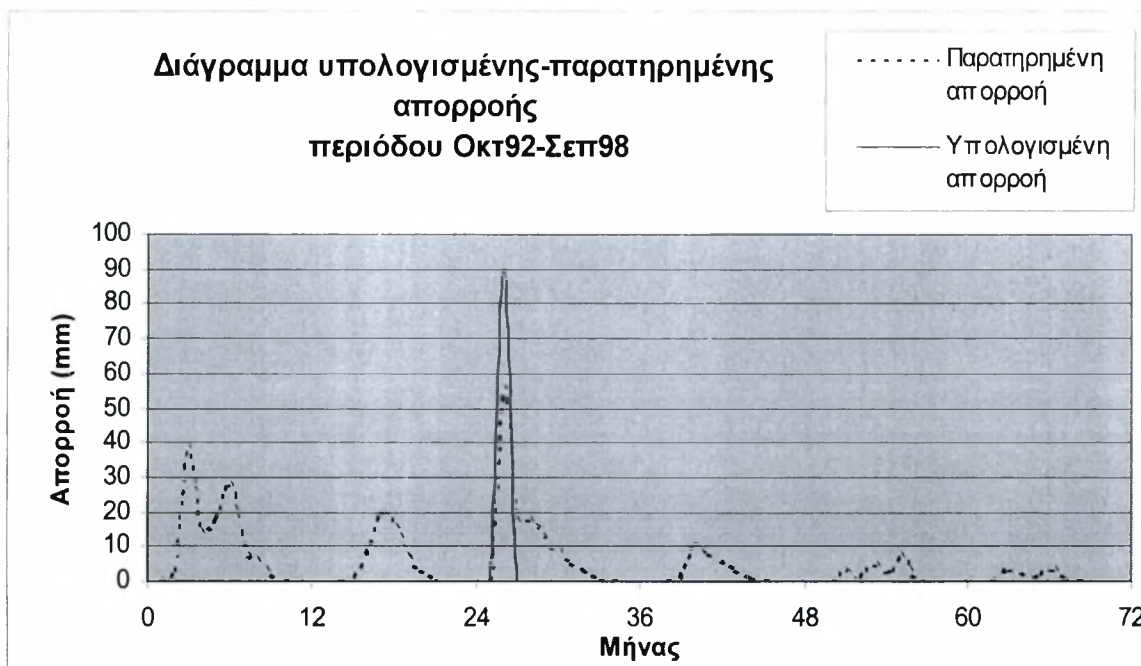


Σχήμα Δ.75

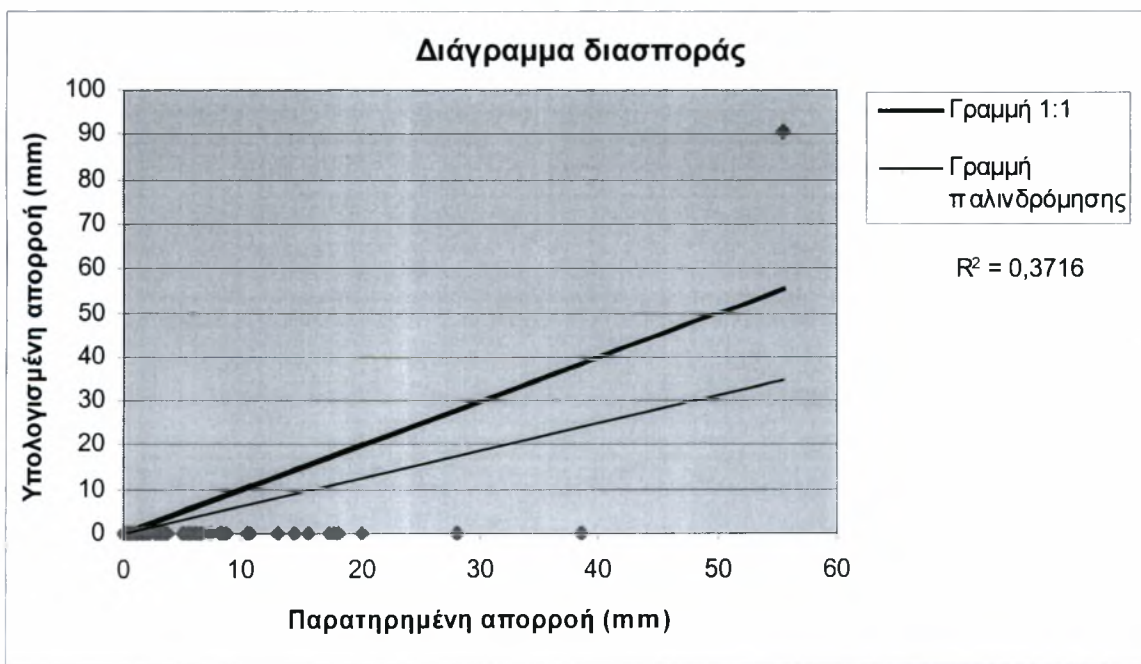


Σχήμα Δ.76

4. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Hargreaves*

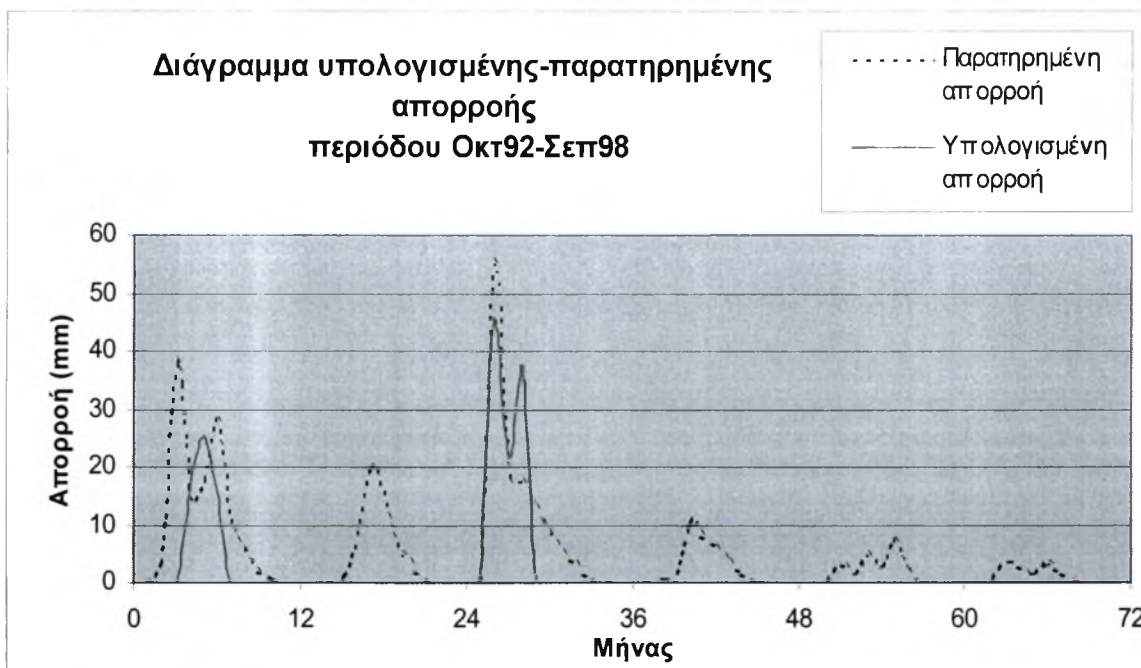


Σχήμα Δ.77

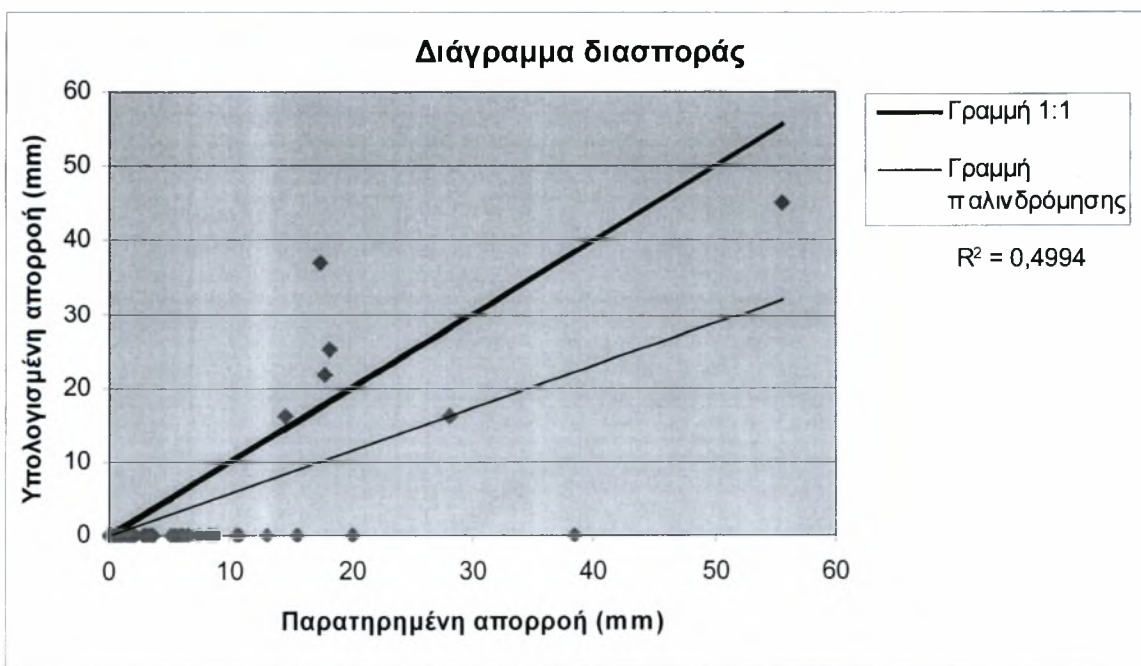


Σχήμα Δ.78

5. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Jensen-Haise*

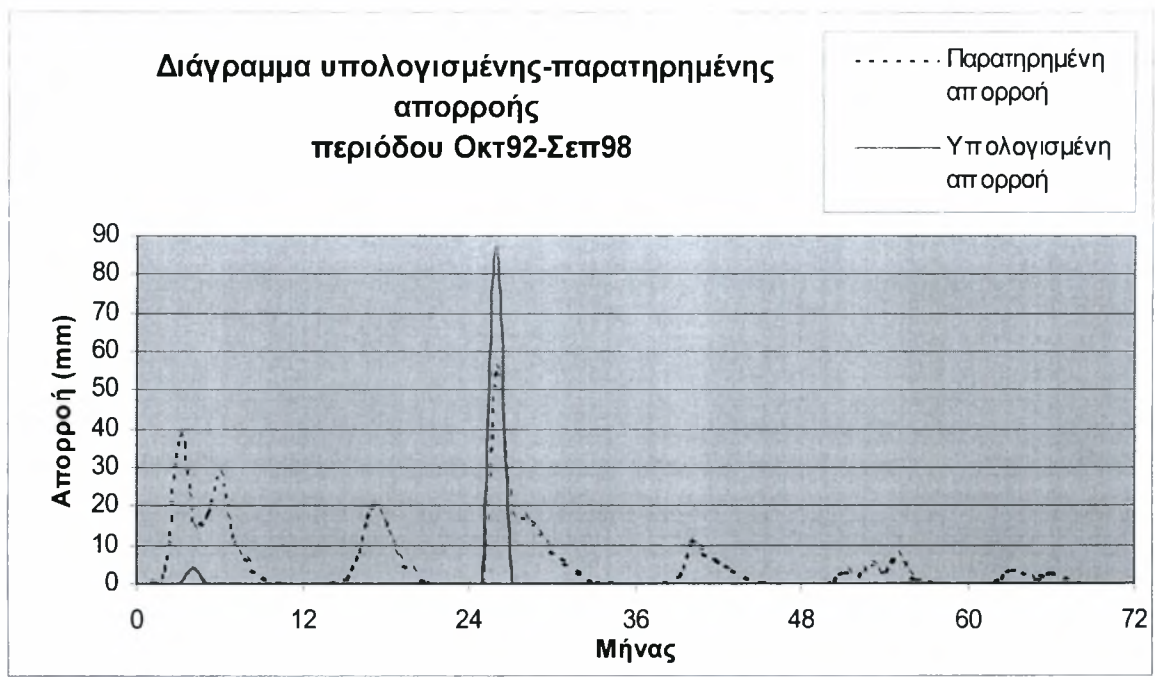


Σχήμα Δ.79

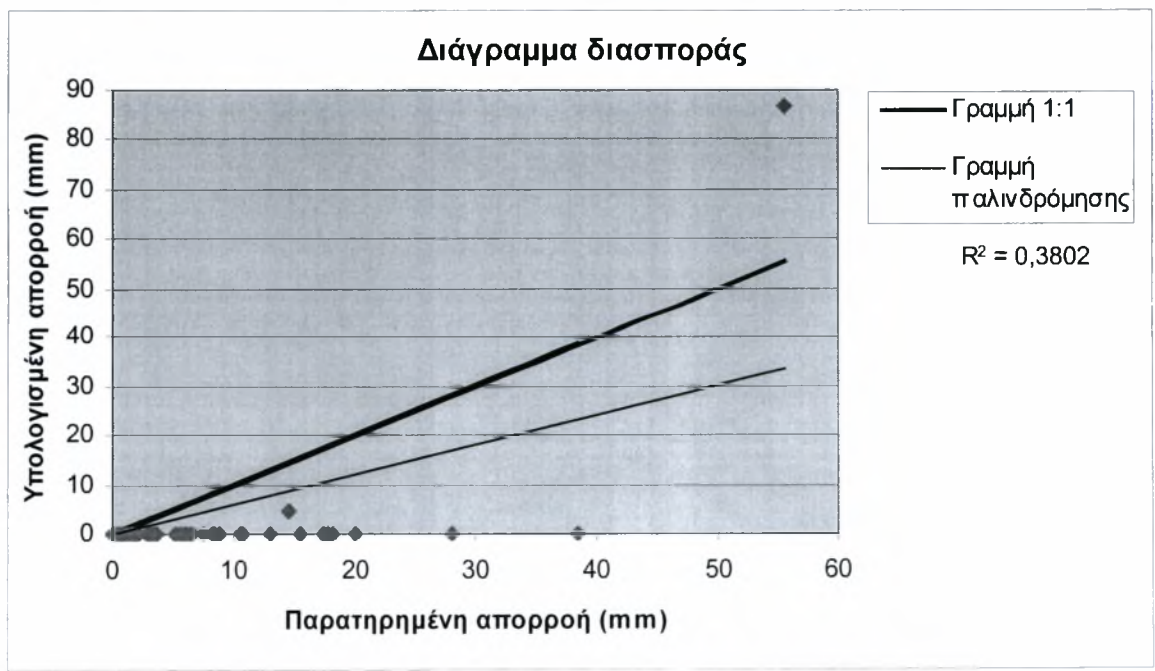


Σχήμα Δ.80

6. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Blaney-Criddle*

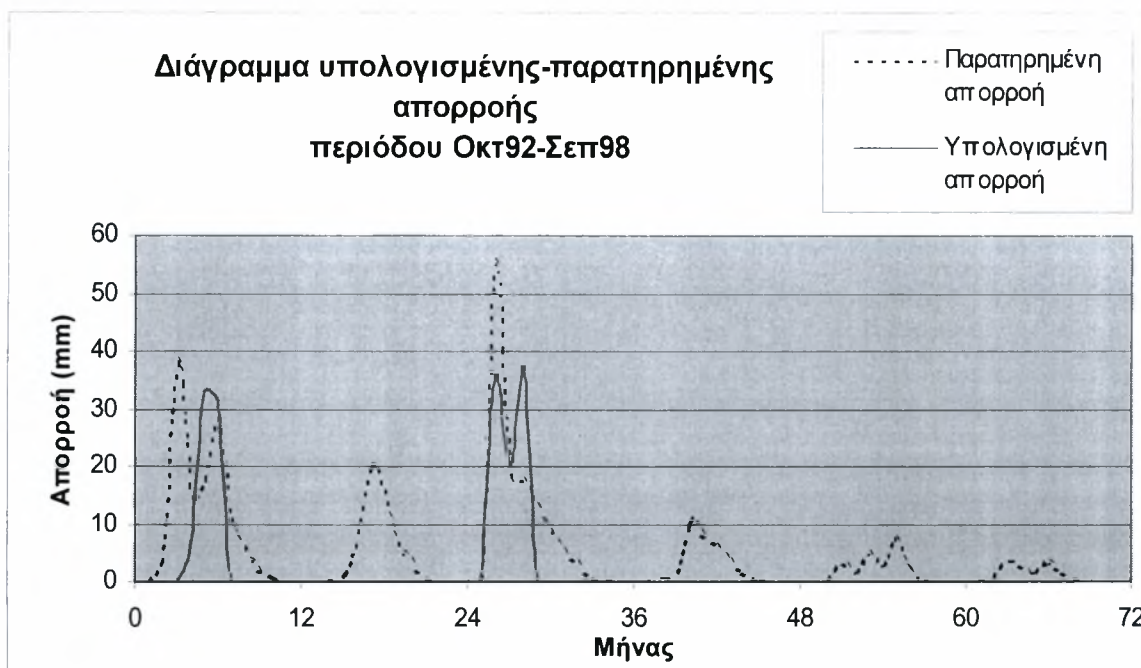


Σχήμα Δ.81

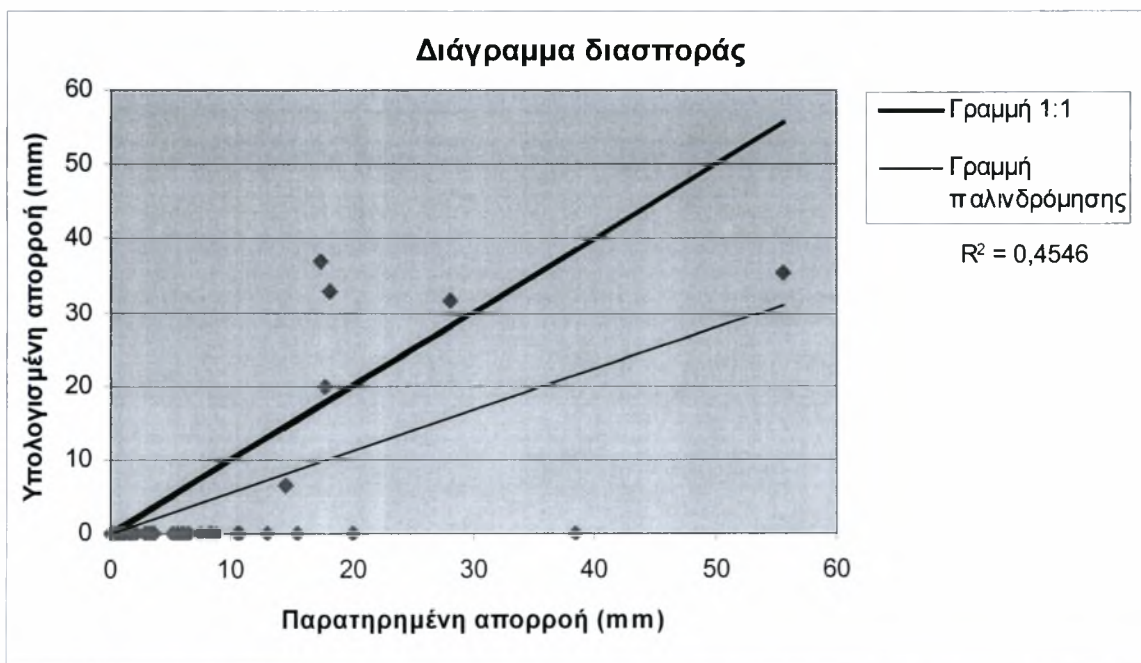


Σχήμα Δ.82

7. Μοντέλο εξατμισοδιαπνοής: *Kharrufa*



Σχήμα Δ.83



Σχήμα Δ.84

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

**ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (Γ.Π.Σ.) ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ**

E.1 Εισαγωγή

Για να μπορέσει να γίνει δυνατή η προσέγγιση των σχέσεων, των αλληλεξαρτήσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ μετρητικών και ποιοτικών στοιχείων και χαρακτηριστικών της φυσικής και της κοινωνικοοικονομικής πραγματικότητας μιας περιοχής αλλά και η εκτίμηση του μέτρου, των μεγεθών και των τάσεων μεταβολών τους οι ερευνητές είναι υποχρεωμένοι να συνεκτιμήσουν και / ή να συγκρίνουν πολλά και ποικίλα συνήθως ετερογενούς ακρίβειας και μεγάλες μεταξύ τους χρονικές αποκλίσεις στοιχεία όπως: τοπογραφικά διαγράμματα, θεματικούς χάρτες αεροφωτογραφίες και επίγειες φωτογραφίες, στατιστικές απογραφές, πληροφορίες από φωτοερμηνευτικές αναλύσεις και ψηφιακές επεξεργασίες τηλεπισκοπικών απεικονίσεων κλπ., καθώς και στοιχεία ειδικών βάσεων δεδομένων όπως μετεωρολογικά υδρολογικά κλπ.

Η ιδιαιτερότητα στις βάσεις δεδομένων σε έργα που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων οφείλεται στη γεωγραφική εξάρτησή τους. Παίζει δηλαδή σημαντικό ρόλο η χωρική διάσταση των πληροφοριών και η γεωγραφική τους κατανομή. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των Γ.Σ.Π. συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Δυνατότητα γεωγραφικής ανάλυσης των πληροφοριών
- Δυνατότητα ηλεκτρονικής χαρτογράφησης και παρουσίασης θεματικών χαρτών
- Δυνατότητα διεπιστημονικής εργασίας
- Δυνατότητα ένταξης μεθόδων μαθηματικής επεξεργασίας των πληροφοριών στα Γ.Σ.Π. καθώς και μοντέλα προσομοίωσης.

E.2 Δημιουργία βάσης δεδομένων σε Γ.Σ.Π.

Με τη βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) ArcView 3.2 εισήχθησαν χάρτες με κλίμακα 1:50000 και ισοϋψείς με ισοδιάσταση 20 μέτρων στον υπολογιστή για την ψηφιοποίηση της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας της Κύπρου.

Επίσης ψηφιοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- Ο υδροκρίτης της λεκάνης απορροής
- Οι υδροκρίτες των υπολεκανών
- Οι χείμαρροι της λεκάνης απορροής

- Οι σταθμοί μέτρησης της απορροής
- Οι υδρομετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής

Οι θέσεις των υδρομετεωρολογικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής της Γερμασόγειας φαίνονται στα Σχήματα Ε.6 και Ε.7 ενώ οι ισοϋψείς της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας στο Σχήμα Ε.2.

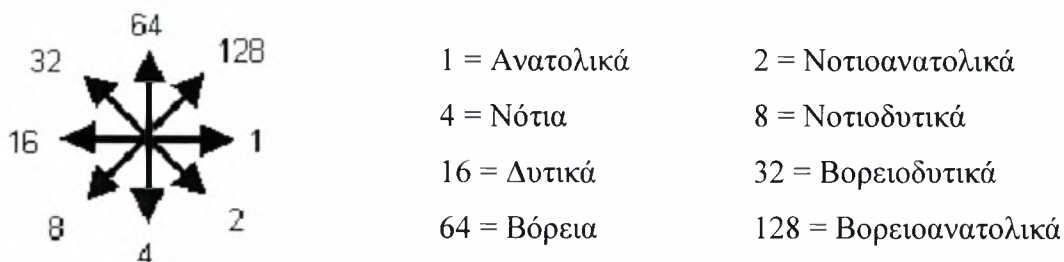
Ε.3 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Μετά τη δημιουργία της βάσης δεδομένων όλα τα δεδομένα ανήχθησαν σε ένα γεωγραφικό σύστημα αναφοράς που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ΕΓΣΑ 87 για να μπορέσουν όλα τα στοιχεία να τοποθετηθούν στον χάρτη έχοντας ένα κοινό σύστημα αναφοράς. Με τη χρήση των ψηφιοποιημένων ισοϋψών και του Προγράμματος ArcView-Spatial Analyst δημιουργήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας, το οποίο δίνει το γεωγραφικό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής. Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε τη λεκάνη απορροής χρησιμοποιήθηκε το Πρόγραμμα HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) που είναι πρόσθετο (extension ή add-in) στο ArcView. Σκοπός της χρήσης του HEC-GeoHMS (HEC, 2000) είναι η διόρθωση των πιθανών λαθών στο DTM, ο εντοπισμός των υπολεκανών της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας καθώς και η εξαγωγή των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους DTM και DEM φαίνονται στα Σχήματα Ε.1 και Ε.3 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας.

- *Διόρθωση λαθών του DTM (Fill Sinks or Depressions)*. Η ποιότητα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι πολύ σημαντική στην υδρολογική ανάλυση γιατί πρέπει το DTM να μην έχει κενά φατνία (grid cells) δηλαδή πρέπει να είναι συνεχόμενο για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου. Τα κενά φατνία (χωρίς υψόμετρο) που δημιουργήθηκαν από τον μετασχηματισμό των ισοϋψών συμπληρώθηκαν με βάση τις τιμές από τα διπλανά φατνία (με υψόμετρο) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο των γειτονικών φατνίων (8-point pour algorithm).
- *Υπολογισμός Διεύθυνσης Ροής (Flow Direction)*. Στο βήμα αυτό υπολογίστηκε η διεύθυνση ροής για το διορθωμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Hydrologically

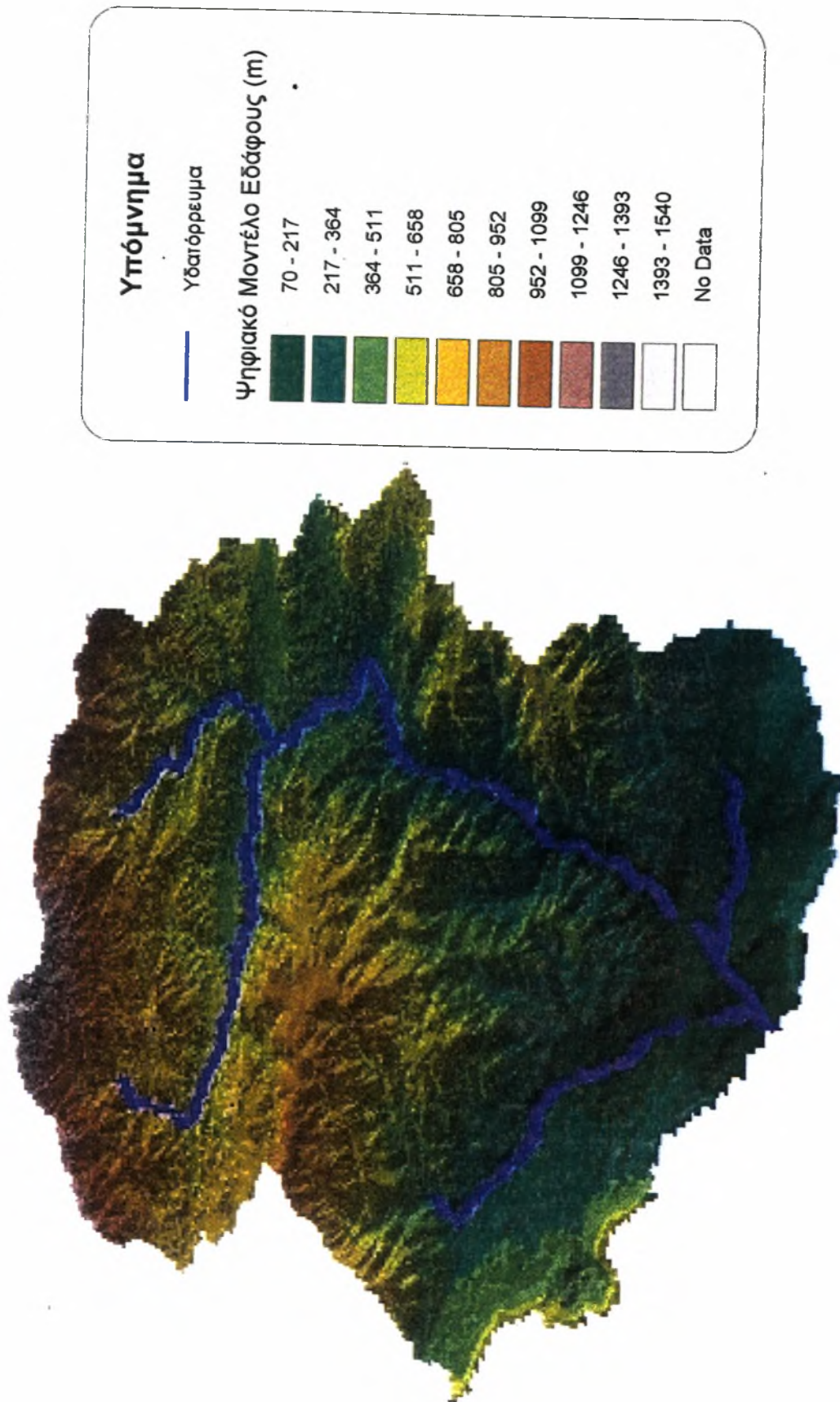
corrected DTM) και για κάθε φατνίο του DTM (Σχήμα Ε.4). Όμοια με μία πυξίδα ο αλγόριθμος των γειτονικών φατνίων (8-point pour algorithm) δίνει μία τιμή από τους ακόλουθες οκτώ διευθύνσεις:



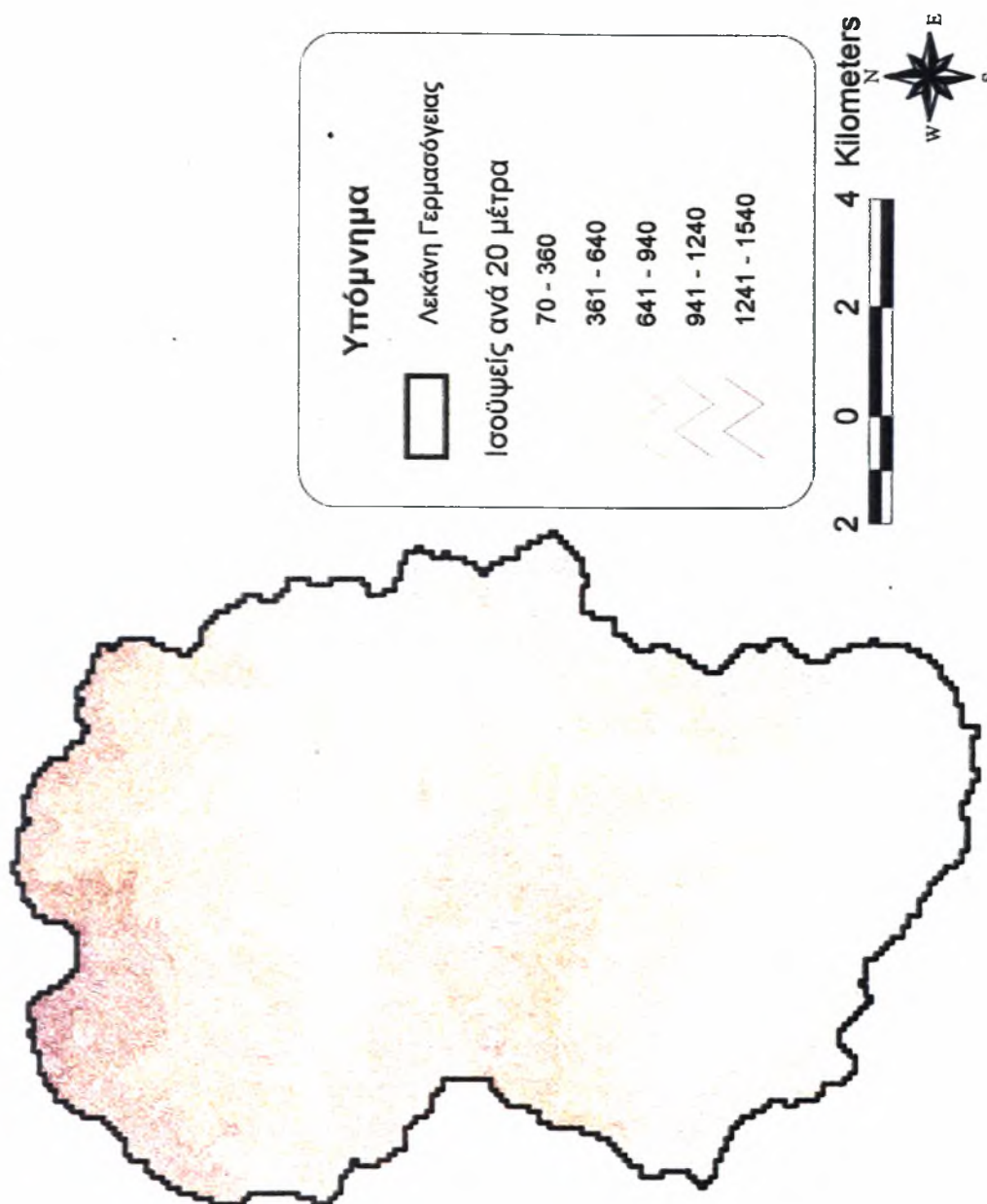
- *Υπολογισμός Συσσώρευσης Ροής (Flow Accumulation)*. Το βήμα αυτό υπολογίζει τον αριθμό των ανάντι κελιών που απορρέουν σε ένα δοσμένο φατνίο. Η περιοχή της λεκάνης απορροής για το δοσμένο αυτό φατνίο μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή της συσσωρευμένης ροής επί το εμβαδόν του φατνίου (cell area). Η Συσσώρευση της Ροής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας φαίνεται στο Σχήμα Ε.5.
- *Υπολογισμός Υδατορρευμάτων (Stream Definition)*. Το βήμα αυτό ταξινομεί όλα τα φατνία (grid cells) με ροή μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο και τα κάνει μέρος ενός συγκεκριμένου υδατορρεύματος. Η σύγκριση με το ψηφιοποιημένο δίκτυο των χειμάρρων (υδατορρευμάτων) της ευρύτερης περιοχής χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό του ορίου (κατώφλι) έτσι ώστε να γίνει πιστή αντιγραφή του υδρογραφικού δικτύου. Τυχόν ατέλειες στο υδρογραφικό δίκτυο διορθώθηκαν στα ψηφιακά δεδομένα. Το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας φαίνεται στο Σχήμα Ε.3.
- *Διακριτοποίηση Υδατορρευμάτων (Stream Segmentation)*. Το βήμα αυτό διαιρεί το υδατόρευμα σε τμήματα. Τμήματα υδατορρευμάτων είναι τα κομμάτια των ρεμάτων που ενώνουν δύο διαδοχικούς κλάδους, ένα κλάδο και μία έξοδο. Το Υδρογραφικό Δίκτυο της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε.6.
- *Υπολογισμός Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας*. Από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκαν τα παραπάνω πρέπει να οριστεί η λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας. Έχοντας στοιχεία απορροής ανάντι του φράγματος, όλη η ανάντι περιοχή θα αποτελεί πλέον τη λεκάνη απορροής. Ορίζοντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες της θέσης του φράγματος στο ΓΣΠ που αναπτύχθηκε δημιουργήθηκε η

λεκάνη απορροής με όλα τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν παραπάνω.

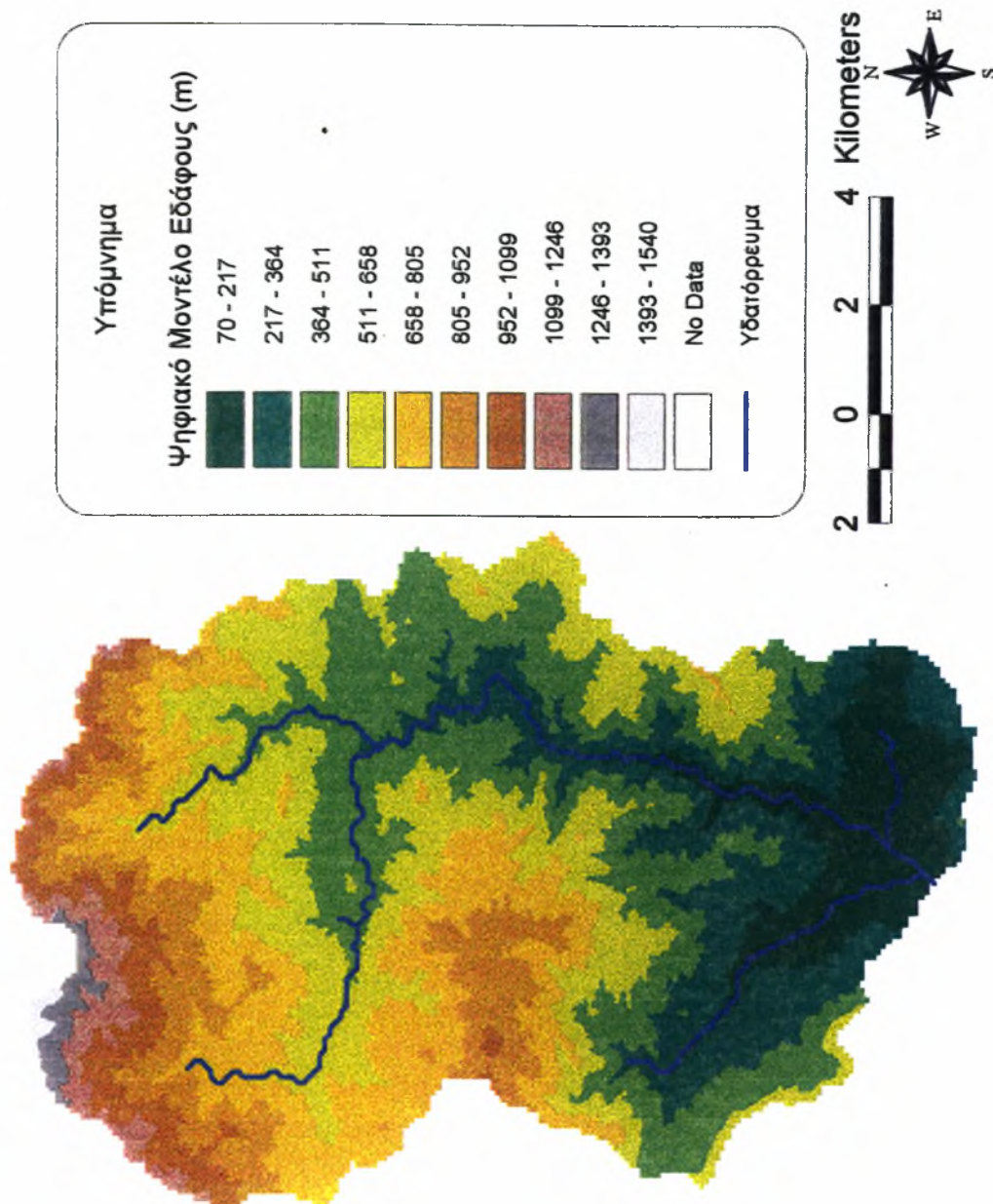
- *Εξαγωγή Γεωμορφολογικών και Υδρολογικών Χαρακτηριστικών.* Ο κύριος σκοπός της δημιουργίας του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας ήταν ο υπολογισμός και η εξαγωγή των παρακάτω χαρακτηριστικών:
 - Έκταση λεκάνης απορροής Γερμασόγειας (156,71 Km²).
 - Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής Γερμασόγειας (575,18 m).
- *Χάραξη Πολυγώνων Thiessen.* Με τη βοήθεια του Γ.Σ.Π. προσδιορίστηκαν τα πολύγωνα Thiessen με την χάραξη των μεσοκαθέτων χρησιμοποιώντας τους σταθμούς 400 και 429 (Σχήμα Ε.7).



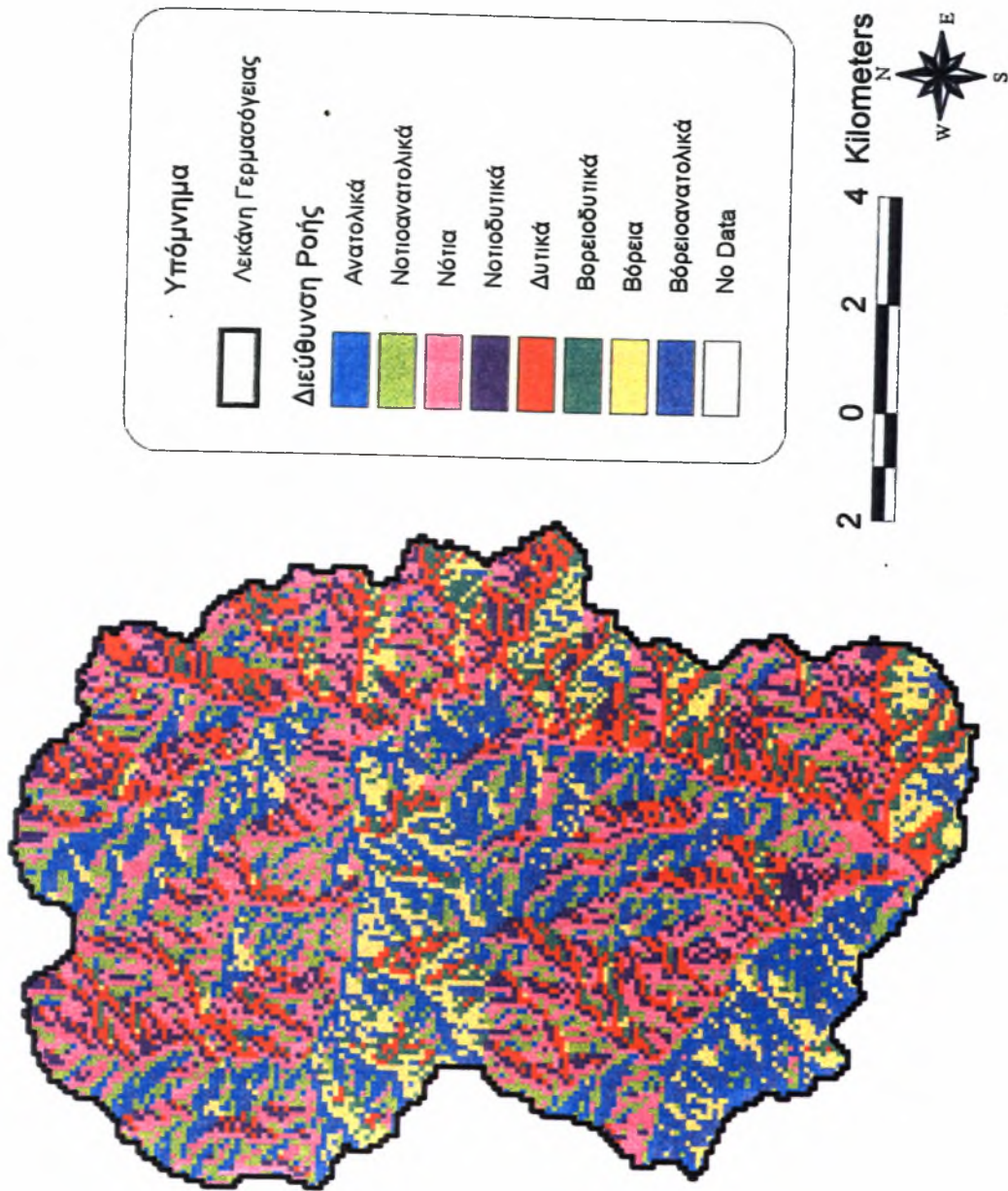
Σχήμα Ε.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D) ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) λεκάνης απορροής Γερμασόγειας Κύπρου



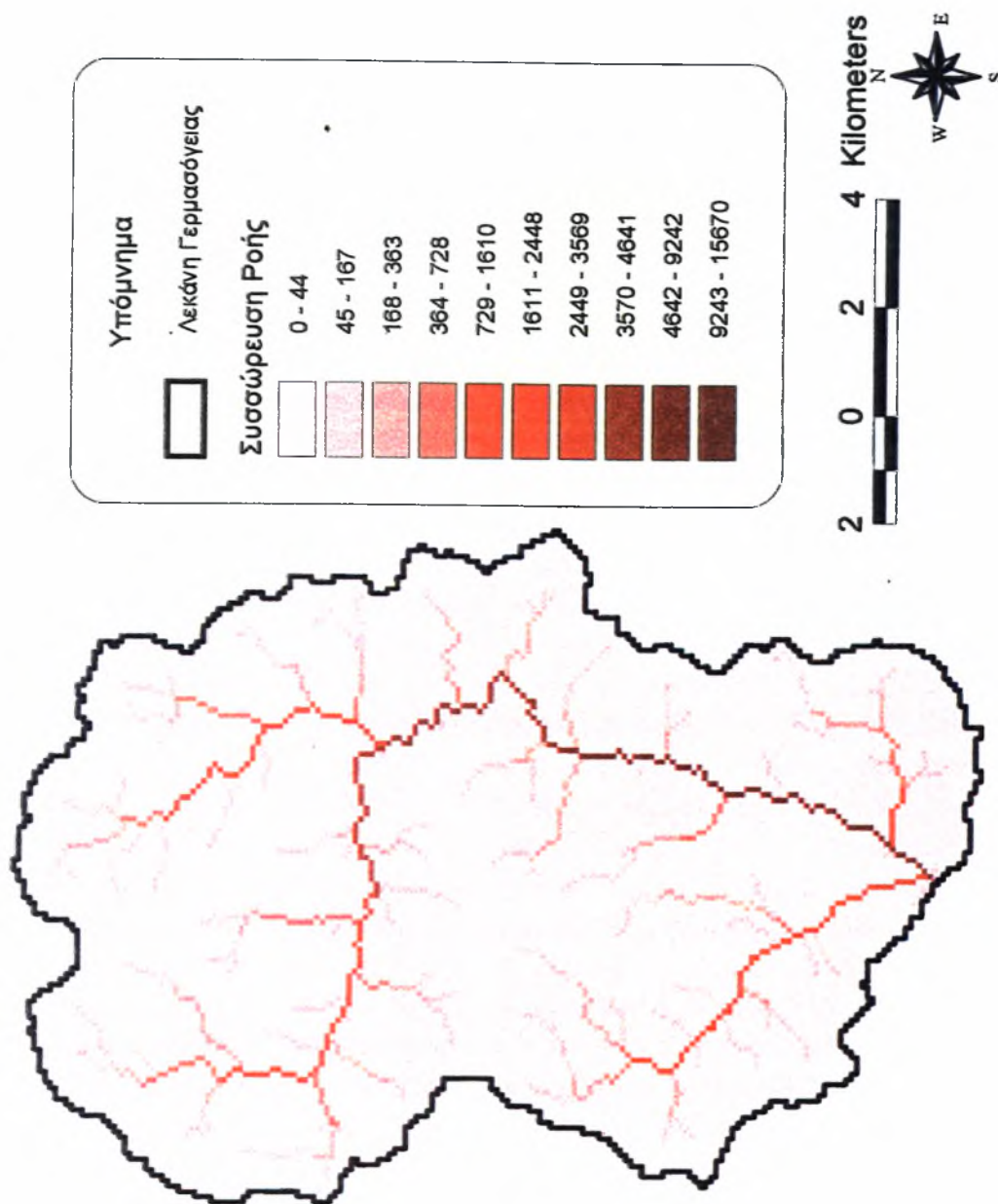
Σχήμα Ε.2: Ισοψείς
λεκάνης απορροής
Γερμασόγειας Κύπρου



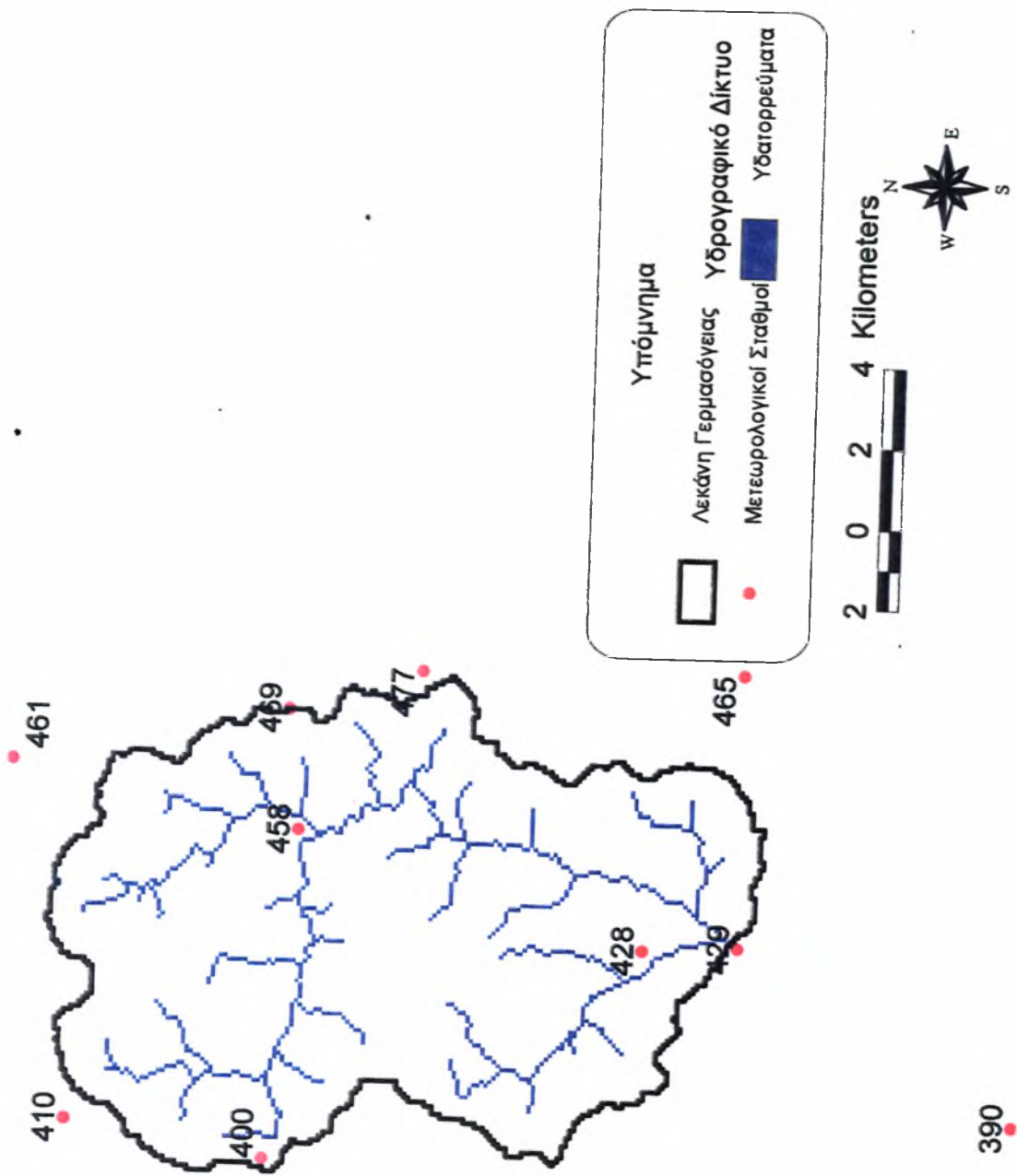
Σχήμα Ε.3: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και κύριο υδατόρρευμα λεκάνης απορροής Γερμασόγειας Κύπρου



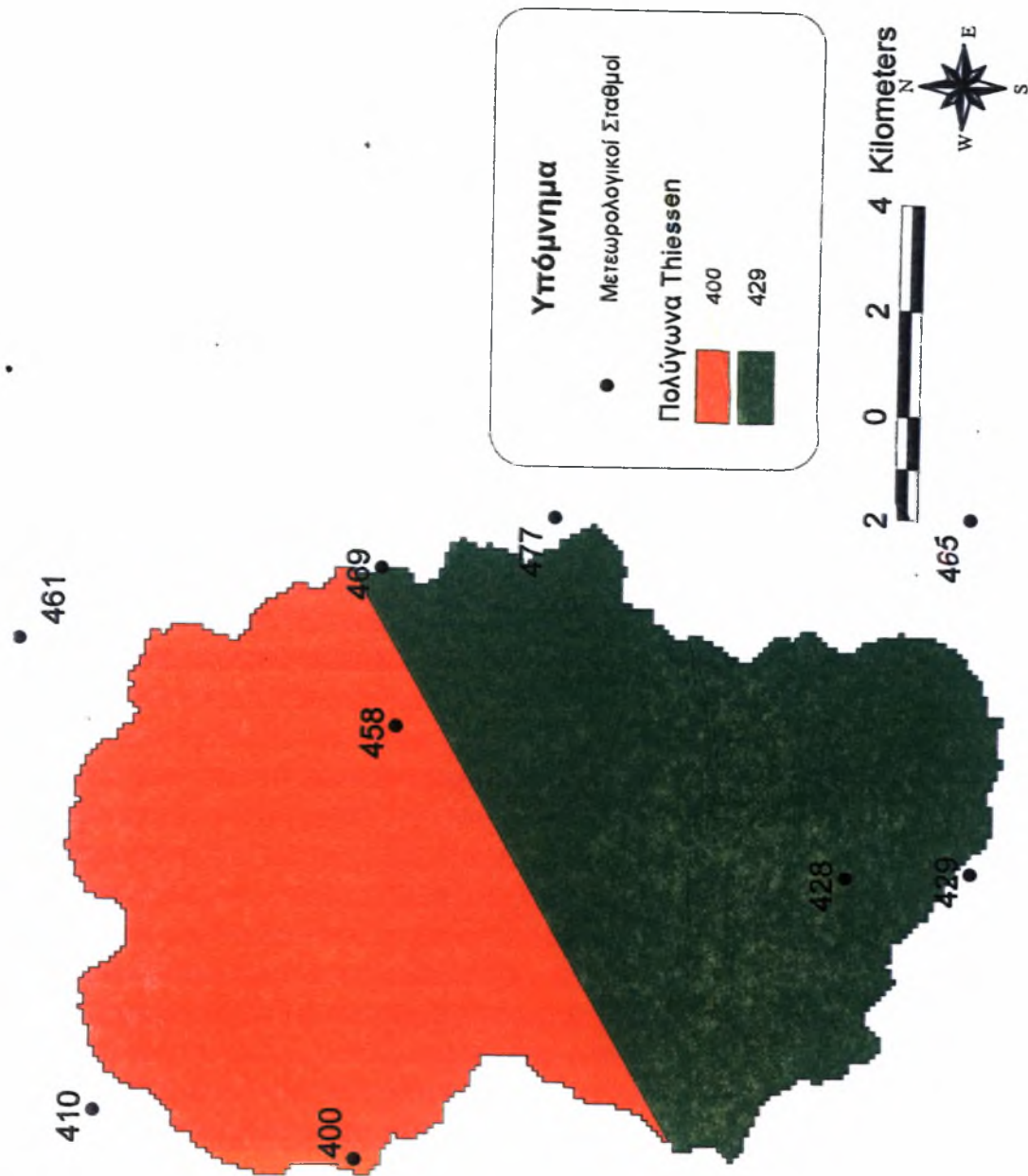
Σχήμα Ε.4: Διεύθυνση Ροής (Flow Direction) λεκάνης απορροής Γερμασόγειας Κύπρου



Σχήμα Ε.5:
Συσσώρευση Ροής
(Flow Accumulation)
λεκάνης απορροής
Γερμασόγειας Κύπρου



Σχήμα Ε.6:
Υδρογραφικό Δίκτυο
Λεκάνης απορροής
Γερμασόγειας Κύπρου
και θέση των
μετεωρολογικών
σταθμών στην ευρύτερη
περιοχή



Σχήμα Ε.7: Χάρταξη
Πολυγώνων Thiessen
στη λεκάνη απορροής
Γερμασόγειας Κύπρου