



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ

ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
75% ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
25% ΕΘΝΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

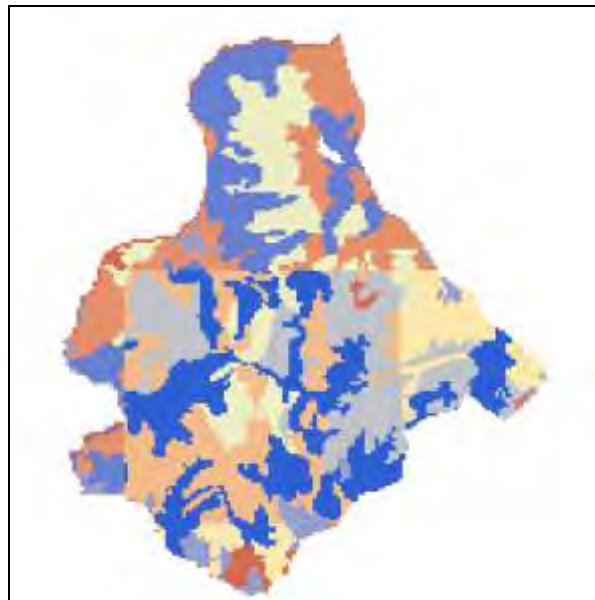


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε μικρές λεκάνες απορροής με χρήση
Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών**



ΧΟΝΔΡΟΝΙΚΟΥ ΕΥΑΝΘΙΑ

ΒΟΛΟΣ 2006

Μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε μικρές λεκάνες απορροής με χρήση Τηλεπισκόπησης
και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών

Μέλη εξεταστικής τριμελούς επιτροπής

1. Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία- Δορυφορική Μετεωρολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων.
2. Άρης Ψιλοβίκος, Λέκτορας, Διαχείριση Ποιότητας Υδάτων με χρήση Προσομοίωσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
3. Μάριος Σαπουντζής, Λέκτορας, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών μου σπουδών με τίτλο «Αειφορική διαχείριση υδατικού περιβάλλοντος», στο Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η μεταπτυχιακή εργασία υπήρξε απαραίτητη για την απόκτηση γνώσεων, εμπειριών αλλά και προϋπόθεση για την ολοκλήρωση των σπουδών.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Καθηγητή Νικόλαο Ρ. Δαλέζιο, ο οποίος ήταν δίπλα μου σε όλη την προσπάθειά μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και μου πρόσφερε πολύτιμη βοήθεια. Οι συμβουλές του, η καθοδήγησή του και η διδακτική του ικανότητα προκάλεσε το ενδιαφέρον μου. Επιπλέον, η εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή, συντέλεσε τα μέγιστα στην αποπεράτωση της εργασίας αυτής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά μου το Δρ. Χρήστο Δομενικιώτη, για το χρόνο που διέθεσε και τις γνώσεις του, που αποτέλεσαν πολύτιμη βοήθεια. Ευχαριστώ τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής μου, τους Λέκτορες κύριο Μάριο Σαπουντζή και κύριο Άρη Ψιλιβίκο, για τις παρατηρήσεις τους και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες και συναδέλφους μου Ε. Γαλάκου, Α. Μπλάντα και Έ. Καννέλου για την παροχή πληροφοριών και τη βοήθειά τους. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους που ήταν κοντά μου αυτά τα χρόνια με στήριξαν και με ανέχτηκαν σε κάθε δύσκολη στιγμή. Κυρίως γιατί είναι πάντα δίπλα μου.

Ευανθία Χονδρονίκου

Λίστα Πινάκων

- Πίνακας 2.1:** Χαρακτηριστικά της περιοχής Πύλης.
- Πίνακας 2.2:** Ονομασία σταθμών και υψόμετρα.
- Πίνακας 2.3:** Χρονοσειρές διαθέσιμων επίγειων και δορυφορικών δεδομένων.
- Πίνακας 3.1:** Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.
- Πίνακας 3.2:** Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.
- Πίνακας 3.3:** Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.
- Πίνακας 3.4:** Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.
- Πίνακας 3.5:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Abulohom με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.
- Πίνακας 3.6:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Loukas με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.
- Πίνακας 3.7:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο GR2M με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.
- Πίνακας 3.8:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Giakoumakis με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.
- Πίνακας 3.9:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Xiong- Guo με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

Λίστα Εικόνων

- Εικόνα 2.1:** Ευρύτερη περιοχή μελέτης. Γεωγραφικό διαμέρισμα Θεσσαλίας.
- Εικόνα 2.2:** Περιοχή Πύλης Τρικάλων.
- Εικόνα 2.3:** Υπολεκάνη απορροής περιοχής Πύλης.
- Εικόνα 2.4:** Θέσεις των σταθμών υετόπτωσης και θερμοκρασίας.
- Εικόνα 2.5:** Δορυφορική εικόνα θερμοκρασίας δεκαημέρου για το έτος 1981.
- Εικόνα 2.6:** Δορυφορική εικόνα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δεκαημέρου του έτους 1981.
- Εικόνα 2.7:** Λεκάνη απορροής της Πύλης μετά τον προσδιορισμό των ορίων της μέσω των δορυφορικών εικόνων.
- Εικόνα 2.8:** Διάγραμμα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής ολόκληρης της χρονοσειράς, για το μοντέλο Loukas.
- Εικόνα 2.9:** Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής περιόδου βελτιστοποίησης, μοντέλου Loukas.
- Εικόνα 2.10:** Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής περιόδου πιστοποίησης, μοντέλου Loukas.
- Εικόνα 2.11:** Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής ολόκληρης της περιόδου, μοντέλου Loukas.
- Εικόνα Α.1:** Απλοποιημένη απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.
- Εικόνα Α.2:** Ποιοτική παρουσίαση του υδρολογικού κύκλου σύμφωνα με τον Horton.
- Εικόνα Α.3:** Σχηματική παράσταση των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.
- Εικόνα Α.4:** Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου.
- Εικόνα Α.5:** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.
- Εικόνα Α.6:** Ποσοστό ανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας.
- Εικόνα Α.7:** Δορυφόρος NOAA σε τροχιά γύρω από τη γη.
- Εικόνα Β.1:** Τύποι βροχομέτρων.
- Εικόνα Β.2:** Τυπική διάταξη μετεωρολογικού σταθμού με βροχόμετρο.
- Εικόνα Γ.1:** Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας ενός μοντέλου.
- Εικόνα 3.1** Διάγραμμα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.
- Εικόνα 3.2** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.
- Εικόνα 3.3** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.
- Εικόνα 3.4** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη τη χρονοσειρά των δεδομένων.
- Εικόνα 3.5** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.
- Εικόνα 3.6** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.

- Εικόνα 3.7** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.
- Εικόνα 3.8** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.
- Εικόνα 3.9** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.
- Εικόνα 3.10** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.
- Εικόνα 3.11** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.
- Εικόνα 3.12** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.
- Εικόνα 3.13** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.
- Εικόνα 3.14** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.
- Εικόνα 3.15** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.
- Εικόνα 3.16** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η εφαρμογή και σύγκριση μοντέλων υδατικού ισοζυγίου που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία με τη χρήση επίγειων δεδομένων και αντίστοιχων δεδομένων Τηλεπισκόπησης (θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων).

Τα μοντέλα προσδιορισμού του υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκαν, είναι τα εξής: Abulohom (2001), Giakoumakis (1991), Loukas (Χονδρονίκου, 2004), GR-2M (Makhlouf and Michel, 1994), και L. Xiong, S. Guo (1999). Η εφαρμογή των μοντέλων που επιλέχθηκαν έγινε σε υπολεκάνες του Πορταϊκού ποταμού, του 8^{ου} υδατικού διαμερίσματος της Ελλάδας (Θεσσαλία).

Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν τα μετεωρολογικά στοιχεία (βροχή, θερμοκρασία) των σταθμών της περιοχής έρευνας, τα οποία αξιολογήθηκαν και επεξεργάστηκαν. Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση, από επίγειες μετρήσεις, η θερμοκρασία και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου των μοντέλων. Σε ότι αφορά την εξατμισοδιαπνοή, έχει υπολογισθεί με τις μεθόδους Thornthwaite και Blaney- Criddle και χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισαγωγής στα μοντέλα που εφαρμόστηκαν.

Αφού συντάχθηκαν τα πέντε μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, ακολούθησε η ρύθμιση- βελτιστοποίηση (calibration- optimization) των παραμέτρων των μοντέλων και ο υπολογισμός των δεδομένων εξόδου (output) του καθενός για την περίοδο των μισών υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριο 1981 έως Οκτώβριο 1987) που είχαμε στην

προς μελέτη χρονοσειρά της περιοχής. Η πλήρης χρονοσειρά των δεδομένων αφορούσε το διάστημα από το Σεπτέμβριο του 1981 έως και τον Οκτώβριο του 1993.

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση (validation) των μοντέλων για την περίοδο των υπόλοιπων υδρολογικών ετών (Οκτώβριο 1988 έως Σεπτέμβριο 1993), 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 χρήσης της υδρολογικής προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής ήταν να επιλεγεί το καταλληλότερο από τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, χρησιμοποιώντας δεδομένα από Τηλεπισκόπηση και να συγκριθούν με επίγειες μετρήσεις. Επιπλέον στόχος ήταν να βρεθεί ποιο από τα μοντέλα είχε πιο γενική μορφή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε γειτονικές λεκάνες απορροής με τα ίδια χαρακτηριστικά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	16
2.1. Περιοχή μελέτης	16
2.1.1. Γενικά για την Θεσσαλία	16
2.1.2. Μετεωρολογικά - Κλιματολογικά στοιχεία	18
2.1.3. Λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού	21
2.1.4. Περιοχή Πύλης	22
2.2. Δεδομένα	25
2.2.1. Επίγεια δεδομένα	25
2.2.2. Δεδομένα δορυφορικών εικόνων	27
2.2.3. Βάση δεδομένων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS)	29
2.3. Μεθοδολογία	30
2.3.1. Προσδιορισμός ορίων περιοχής μελέτης	32
2.3.2. Δημιουργία χρονοσειράς δορυφορικών δεδομένων	33
2.3.3. Εφαρμογή της χρονοσειράς δεδομένων	34
2.3.4. Εξαγωγή στατιστικών παραμέτρων	35
2.3.5. Εξαγωγή διαγραμμάτων	38
A: ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	41
A.1. Γενικά	41
A.2. Αντικείμενο της υδρολογίας	41
A.3. Υδρολογικός κύκλος	43
A.4. Υδρολογική πληροφορία	45
A.4.1. Μέτρηση της υδρολογικής πληροφορίας	47
A.4.2. Επεξεργασία της πληροφορίας	48
A.5. Μελέτες υδραυλικών έργων	49

A.6. Αναπτυξιακά έργα	50
A.7. Απορροή	51
<i>A.7.1. Υδατικό Ισοζύγιο λεκάνης απορροής</i>	52
<i>A.7.2. Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου απλής υδρολογικής λεκάνης</i>	54
<i>A.7.3. Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου</i>	56
A.8. Τηλεπισκόπηση και υδρολογία	58
<i>A.8.1. Τηλεπισκόπηση</i>	58
<i>A.8.2. Ανάκλαση βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνεια</i>	61
<i>A.8.3. Δορυφορικά συστήματα</i>	63
<i>A.8.4. Αντικειμενικοί στόχοι της τηλεπισκόπησης στην υδρολογία</i>	65
B: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	66
B.1. Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα	66
<i>B.1.1. Μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων</i>	66
<i>B.1.2. Βροχομετρικοί σταθμοί - Βροχομετρικά δίκτυα</i>	68
B.2. Επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης απορροής	70
B.3. Μέθοδοι εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης	70
B.4. Ανάλυση βροχομετρικών παρατηρήσεων	72
B.5. Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής	73
<i>B.5.1. Εξάτμιση και Διαπνοή</i>	73
<i>B.5.2. Μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής</i>	75
B.6. Προσομοίωση της εξατμισοδιαπνοής	77
Γ: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	80
Γ.1. Γενικές αρχές προσομοίωσης	80
Γ.2. Μέθοδοι προσομοίωσης	83
Γ.3. Περιγραφή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου	86
<i>Γ.3.1. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom</i>	86
<i>Γ.3.2. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Loukas</i>	88
<i>Γ.3.3. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Giakoumakis</i>	91

<i>Γ.3.4. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου GR2M</i>	92
<i>Γ.3.5. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου L. Xiong - S. Guo</i>	94
3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	96
3.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων στατιστικών παραμέτρων απορροής δια μέσου της εφαρμογής των μοντέλων	96
3.1.1. Απορροές με δορυφορικά δεδομένα	96
3.1.2. Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή από δορυφόρο	101
3.1.3. Απορροές με δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite	107
3.1.4. Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite	113
3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων παραμέτρων απορροής σε κάθε μοντέλο εφαρμογής με διαφορετικά δεδομένα εισόδου	118
4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ	122
5: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125
6: ABSTRACT	131
7: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	134

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι αγαθό ζωτικής σημασίας για την ανθρωπότητα. Αν και τα τρία τέταρτα του πλανήτη αποτελούνται από νερό που βρίσκονται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας και στις τρεις φάσεις του, τα αποθέματα είναι ανομοιόμορφα κατανομημένα, όπως επίσης και οι βροχοπτώσεις. Επιπλέον το μισό από το πόσιμο νερό είναι υπόγειο με όλα τα προβλήματα που συνεπάγεται αυτό.

Τα προβλήματα της διαχείρισης του νερού πρέπει να διέπονται από την αρχή της Αειφορίας η οποία επιδιώκει τη βέλτιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων χωρίς να υπονομεύει των μέλλον των επόμενων γενεών. Το έντονο ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει οδηγήσει στην ανάγκη για καταγραφή και διαχείριση κρίσιμων καταστάσεων (πλημμύρες, ξηρασίες), οι οποίες απαιτούν ανάπτυξη ειδικών μοντέλων πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο. Φαινόμενα όπως π.χ. η ρύπανση μελετούνται με δυναμικά μοντέλα φυσικής βάσης τα οποία προσομοιώνουν και αναπαριστούν τις διεργασίες που τα διέπουν.

Η γνώση των φυσικών μηχανισμών της ανανέωσης των υδατικών αποθεμάτων στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου και η προσομοίωση της λειτουργίας των υδατικών συστημάτων, βοηθά στο σαφή προσδιορισμό του υπάρχοντος υδατικού ισοζυγίου σε μια περιοχή και στην πρόγνωση της συμπεριφοράς τους με σκοπό τη μελέτη διαφόρων πιθανών σεναρίων μετεωρολογικών και υδρολογικών συνθηκών. Η ανάπτυξη ρεαλιστικών σεναρίων στηρίζεται στην εφαρμογή αλγορίθμων προσομοίωσης της σημερινής λειτουργίας και πρόγνωσης της μελλοντικής συμπεριφοράς των υδατικών συστημάτων.

Η σύγχρονη εποχή προσφέρει νέες δυνατότητες στην υδρολογία με τη χρήση τηλεπισκοπικών εφαρμογών στις υδρομετεωρολογικές παραμέτρους. Παραδείγματα των εφαρμογών της τηλεπισκόπησης στην υδρολογία συναντώνται κατά τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, της εδαφικής υγρασίας, των βροχοπτώσεων, του ύδατος επιφάνειας, του χιονιού και του πάγου, ιζήματων και ποιότητας νερού.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει πληθώρα ψηφιακών χαρτών και δορυφορικών εικόνων καθώς και πληροφορίες από τράπεζες δεδομένων στις οποίες περιλαμβάνονται πολλές φυσικές και μετεωρολογικές παράμετροι. Επίσης η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνει τη δυνατότητα επίλυσης πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων προσφέροντας αξιόπιστες εφαρμογές κατανεμημένων μοντέλων φυσικής βάσης. Οι ολοκληρώσεις φαινομένων στο χώρο και στο χρόνο (Beven, 1975) προσφέρουν μοντέλα αδρομερή (συνεχή) που μπορούν άνετα να χρησιμοποιηθούν σε επίπεδο υπολεκάνης και μπορούν με ελάχιστο κόστος να χρησιμοποιηθούν για διαχείριση συστημάτων πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο.

Το κάθε υδατικό διαμέρισμα αποτελεί μια ανεξάρτητη ενότητα που διαθέτει σημαντικό όγκο πληροφοριών (υδρολογικών, μετεωρολογικών) και ένα εκτεταμένο δίκτυο χρήσεων νερού (ύδρευση, άρδευση). Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των υδατικών συστημάτων είναι η έλλειψη πρωτογενών στοιχείων και η ανεπάρκεια των συμβατικών μεθόδων της προσδιοριστικής υδρολογικής ανάλυσης να δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις, τόσο για τον πραγματικό μηχανισμό γένεσης των υδρολογικών μεταβλητών, όσο και για την δυναμική μέσα στο χωροχρόνο της εξέλιξης των υδρολογικών διαδικασιών και τον ορθολογικό σχεδιασμό και λειτουργία των υδατικών συστημάτων (Μιμίκου, 1994).

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος συνήθως εφαρμόζονται μια από τις ακόλουθες τεχνικές: α) συλλογή περισσότερων και αξιόπιστων δεδομένων και β) εφαρμογή πολυπλοκότερων μαθηματικών τεχνικών με δυνατότητα εξαγωγής περισσότερων πληροφοριών από τα διαθέσιμα στοιχεία. Η τεχνική αυτή δεν είναι όμως σε θέση να ανακαλύψει τον τύπο ανεπάρκειας στοιχείων έτσι ώστε να μπορεί να διορθωθεί (Μιμίκου, 1994).

Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης προσφέρουν τα εξής: α) περιοχικές μετρήσεις έναντι σημειακών, β) όλες οι πληροφορίες συλλέγονται και αποθηκεύονται σε μια θέση, γ) υπάρχει καλή χρονική κάλυψη, τα στοιχεία είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή, δ) τα όργανα συλλογής των στοιχείων (αισθητήρες) δεν παρεμποδίζουν τη διαδικασία που παρατηρείται, στ) οι πληροφορίες μπορούν να ληφθούν και για τις πιο απομακρυσμένες περιοχές στη γη όπου ειδάλλως καμία μέτρηση δε θα λαμβανόταν, ζ) με τη χρήση των δορυφόρων οι παρατηρήσεις των υδρολογικών μεταβλητών μπορούν να αποκτηθούν με μικρότερο κόστος (Δαλέζιος, 2002).

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους πέντε μοντέλα υδατικού ισοζυγίου τα οποία συναντώνται στην διεθνή βιβλιογραφία (Makhlouf and Michel, 1994; Xiong and Guo 1999; Abulohom *et al.* 2001; Giakoumakis *et al.*, 1991, Χονδρονίκου, 2004). Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στη λεκάνη απορροής της Πύλης, η οποία αποτελεί υπολεκάνη της λεκάνης απορροής του Πορταϊκού παραπόταμου του Πηνειού ποταμού, στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Τα διαθέσιμα δεδομένα επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcGis 9.1) και λογισμικού επεξεργασίας εικόνων (Erdas Imagine 8.7).

Ο στόχος της εφαρμογής είναι η διερεύνηση της χρήσης δορυφορικών δεδομένων, στη μελέτη των υδρολογικών μοντέλων που εξετάζονται και των δυνατοτήτων που προσφέρουν στην υδρολογική μελέτη και στην παρακολούθηση της υδρολογικής κατάστασης της περιοχής.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσιάζει την καινοτομία χρήσης δεδομένων που έχουν αντληθεί από την τηλεπισκόπηση. Τα δεδομένα αρχικά αφορούν επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, απορροής και βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, καθώς και εξατμισοδιαπνοής που υπολογίστηκε με την μέθοδο Thornthwaite. Τα δεδομένα αυτά συνδυαστήκαν με πληροφορίες από δορυφορικές εικόνες θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη βάσει της μεθόδου Blaney Criddle.

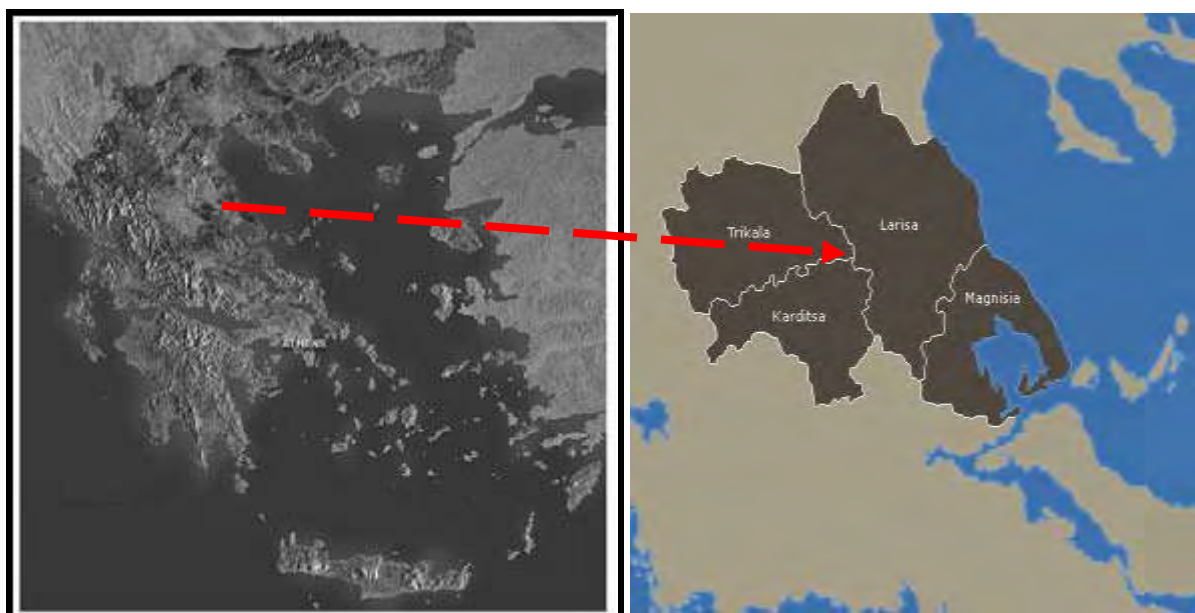
Η χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων κατά την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων αποσκοπεί στην σύγκριση αυτών. Η μέθοδος Thornthwaite είναι περισσότερο διαδεδομένη στις υδρολογικές εφαρμογές, αλλά η μέθοδος Blaney Criddle η οποία ανήκει στις εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, έχει αναπτυχθεί στην Δυτική Αμερική και σε περιοχές με περίπου ίδια κλιματικά χαρακτηριστικά με τις Μεσογειακές περιοχές (Παπαζαφειρίου, 1984).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Περιοχή μελέτης

2.1.1. Γενικά για την Θεσσαλία

Η Θεσσαλία βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της κεντρικής Ελλάδας. Ανατολικά βρέχεται από το Αιγαίο Πέλαγος. Από τη δυτική και την κεντρική Μακεδονία χωρίζεται από τους ορεινούς όγκους του άνω Ολύμπου και του Τιτάρου. Από την Ήπειρο, η Θεσσαλία χωρίζεται από τα δυτικότερα όρη της Ν. Πίνδου. Νοτιότερα, τα διοικητικά της όρια με τη Στερεά Ελλάδα ταυτίζονται με μικρό τμήμα του Αχελώου. Η ορεινή Θεσσαλία έχει έκταση 9550 km² με ποσοστό επί του συνόλου, 66,5%, ενώ η πεδινή (με υψόμετρο κάτω των 200m) έχει έκταση 4520 km² με ποσοστό επί του συνόλου 33,5%. Το γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Ευρύτερη περιοχή μελέτης. Γεωγραφικό διαμέρισμα Θεσσαλίας.

Η θεσσαλική πεδιάδα αποτελεί τη μεγαλύτερη ενιαία πεδινή έκταση της χώρας

και το κέντρο βάρους της αγροτικής ανάπτυξης της Ελλάδας. Μετά την εκμετάλλευση των μεγάλων αντιπλημμυρικών και αποστραγγιστικών έργων προέκυψε, όπως ήταν αναμενόμενο, αναδιάρθρωση τόσο της γεωργίας όσο και ανάπτυξη της κτηνοτροφίας. Η γεωργία οδηγήθηκε στην εντατική καλλιέργεια, από την εκτατική μορφή καλλιέργειας που είχε στο παρελθόν, η οποία στηρίζεται στην εντατική χρήση του νερού.

Η αγροτική ανάπτυξη στη Θεσσαλία αρχικά στηρίχθηκε κυρίως στην εκμετάλλευση των υπόγειων νερών και έπειτα των επιφανειακών. Σήμερα η ζήτηση του νερού για άρδευση, είναι αρκετά μεγάλη. Με τη βελτίωση της εκμηχάνισης της γεωργίας σε συνδυασμό με τις μεγάλες εισροές από Κοινοτικά κονδύλια υπό μορφή επιδοτήσεων, οι αρδευόμενες εκτάσεις απ' το 1995 και μετέπειτα αυξήθηκαν κατά πολύ. Από ένα μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων και πολλών παρανόμων, η τελική ποσότητα του νερού που αντλείται, για την ικανοποίηση των γεωργικών αναγκών, είναι τελικά πολύ μεγαλύτερη απ' τα ανανεώσιμα αποθέματα. Ήδη η ποσοτική ανεπάρκεια των υπόγειων νερών έγινε ανησυχητική, και σε λίγο όχι μόνο δε θα επαρκούν τα υπόγεια νερά για αρδεύσεις των σημερινών εκτάσεων, αλλά ούτε και για λιγότερες εκτάσεις.

Μαζί με την ποσοτική αυτή ανεπάρκεια έχει επέλθει και η ποιοτική ανεπάρκεια. Επίσης, λόγω της υπεράντλησης, ο υπόγειος υδατικός ορίζοντας έχει υποβιβασθεί αισθητά, σε ορισμένες περιοχές της θεσσαλικής πεδιάδας, με αποτέλεσμα να έχουν μειωθεί ή και μηδενιστεί οι παροχές των γεωτρήσεων και οι καλλιέργειες να μην αρδεύονται επαρκώς.

Σύμφωνα με το Ν.1739 / 87 για λόγους οργανωτικούς και διοικητικούς έχει θεσμοθετηθεί η διαίρεση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα τα οποία έχουν κατά

το δυνατόν όμοιες υδρολογικές και κλιματικές συνθήκες, οι οποίες αποτελούν το περιφερειακό επίπεδο στον τομέα διαχείρισης των υδατικών πόρων. Σύμφωνα με αυτή τη διαίρεση, το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι το 8^ο, και δεν ταυτίζεται ακριβώς με τη Διοικητική Περιφέρεια της Θεσσαλίας γιατί ορισμένα τμήματα της ανήκουν σε γειτονικά υδατικά διαμερίσματα. Η συνολική έκταση του είναι 13161 km² και διαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες απορροής.

Η κυριότερη λεκάνη απορροής της Θεσσαλίας, είναι αυτή του ποταμού Πηνειού και των παραποτάμων του με έκταση 9500 km² (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002). Σε αυτήν ανήκουν και οι δυο μεγάλες λεκάνες της πεδινής Θεσσαλίας (ανατολική και δυτική πεδιάδα) που ο άξονας τους έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Οι δευτερεύοντες κλάδοι του Πηνειού κατέρχονται από ολόκληρη την περιφέρεια της λεκάνης απορροής της δυτικής πεδιάδας εντός αυτής. Στην ανατολική λεκάνη, ο μόνος σημαντικός δευτερεύων κλάδος ο οποίος υφίσταται είναι ο χείμαρρος Τιταρήσιος.

2.1.2. Μετεωρολογικά - Κλιματολογικά στοιχεία

Τα μετεωρολογικά στοιχεία που προσδιορίζουν το κλίμα ενός τόπου είναι η ποσότητα και η κατανομή των βροχοπτώσεων, η διακύμανση της θερμοκρασίας, η ηλιοφάνεια, η υγρασία, η εξάτμιση καθώς και οι άνεμοι.

Κλίμα: Το γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας διαιρείται με βάση τον τύπο κλίματος σε τρεις περιοχές:

1. Την ανατολική παράκτια και ορεινή με μεσογειακό κλίμα.
2. Την κεντρική πεδινή με ηπειρωτικό κλίμα
3. Τη δυτική ορεινή με ορεινό κλίμα (δριμείς χειμώνες και δροσερά

καλοκαίρια) (Φλόκας, 1997).

Σε γενικές γραμμές το κλίμα στην πεδιάδα της Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται ως εύκρατο με ηπειρωτικές περιόδους και διαφορετικές θερμομετρικές διακυμάνσεις ως προς το εύρος κατά την διάρκεια του έτους. Παρατηρείται ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ήπιος και βροχερός χειμώνας. Τον Οκτώβριο ξεκινούν συνθήκες ύφεσης οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη υγρασία, βροχόπτωση και παρουσία ομίχλης και διαρκούν μέχρι τον Απρίλιο.

Θερμοκρασία: Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C ως 17°C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου – Απριλίου (Τζαμπύρας, 2005).

Βροχοπτώσεις: Η βροχή αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες μετεωρολογικές παραμέτρους. Η μελέτη της παρουσιάζει όχι μόνο θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον και αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η ποσότητα νερού που πέφτει σε μια επιφάνεια. Σε κάθε περιοχή οι μηνιαίες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν την ιδιότητα να μεταβάλλονται σταθερά προς ορισμένες κατευθύνσεις. Αυτό οφείλεται σε διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες απόσταση από την θάλασσα, επικράτηση ανέμων, κίνηση των υφέσεων και είναι ιδιαίτερα έντονο κατά τους υγρούς μήνες, όταν το ύψος των βροχοπτώσεων είναι μεγάλο.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο διαμέρισμα είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε ολόκληρη την περιοχή της

Θεσσαλίας είναι περίπου 700 mm και κατανέμεται ανομοιόμορφα τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ποικίλει από περίπου 400mm στο κεντρικό τμήμα, έως και περισσότερο από 1850 mm στις δυτικές ορεινές περιοχές. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ πιο ξηροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος.

Χιονοπτώσεις: Οι ορεινές περιοχές δέχονται σημαντικές ποσότητες χιονιού κατά την διάρκεια του χειμώνα οι οποίες και αποτελούν σημαντικά υδατικά αποθέματα. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά του διαμερίσματος και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Στα δυτικά και ορεινά τμήματα του διαμερίσματος αρχίζουν τον Σεπτέμβριο και φτάνουν μέχρι και τις αρχές Ιουλίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών χιονιού στη Λάρισα είναι 4,0 και στα Τρίκαλα 6,2. Οι χαλαζοπτώσεις είναι επίσης συχνές, κυρίως κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στα βόρεια του διαμερίσματος και κατά τους μήνες Φεβρουάριο ως Απρίλιο στο νότιο ανατολικό τμήμα.

Νέφωση – Ηλιοφάνεια: Η νέφωση είναι το ποσοστό της έκτασης του ουρανού που καλύπτεται με νέφη, παρουσιάζει τόσο ημερήσια όσο και ετήσια πορεία. Η ημερήσια πορεία είναι πολύπλοκη διαφέρει από τόπο σε τόπο και βρίσκεται σε στενή σχέση με την ηλιοφάνεια. Η μέση ετήσια νέφωση κυμαίνεται από 4 ως 5 βαθμίδες, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά και τις χαμηλότερες στα ανατολικά.

Υγρασία: Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% μέχρι 72% και παρουσιάζει μεταβολές τόσο στη διάρκεια του 24ώρου όσο και του έτους.

Άνεμοι: Η κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε συνδυασμό με το ανάγλυφο και με την κατανομή ξηράς - θάλασσας, αποτελούν βασικό αίτιο της δημιουργίας των

ανέμων. Οι άνεμοι μπορεί να οφείλονται σε γενικότερα αίτια κατανομής της πίεσης στο βόρειο ημισφαίριο ή συνδέονται συχνά με «τύπους καιρού» του Ελληνικού χώρου. Η συχνότητα της διεύθυνσης των ανέμων σύμφωνα με σταθμούς παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή στη βόρεια συνιστώσα και ακολουθεί η νότια. Η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων εξαρτάται τόσο από την εποχή όσο και τον μήνα ώστε οι άνεμοι να διακρίνονται σε ανατολικούς οι οποίοι επικρατούν την περίοδο άνοιξης - καλοκαιριού, ανατολικοί - βορειοανατολικοί κατά την διάρκεια του φθινοπώρου και τέλος βορειοανατολικοί οι οποίοι πνέουν κατά την διάρκεια του χειμώνα. Ετησίως η συχνότητα των ανέμων χαρακτηρίζεται έντονη κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος) και ελαχιστοποιείται μέσα καλοκαιριού (Ιούλιος). Οι ταχύτητες των παραπάνω ανέμων είναι της τάξης των 1-3 Bf με μέγιστη ταχύτητα τα 8 Bf. Η επικρατούσα φορά των ανέμων στο διαμέρισμα ποικίλει, με ανατολικούς στη Λάρισα και δυτικούς στα Τρίκαλα (Κανέλλου, 2006; Πέππας, 2001).

2.1.3. Λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού

Ο Πορταϊκός ποταμός είναι παραπόταμος του Πηνειού ποταμού. Αποστραγγίζει το δυτικό τμήμα της λεκάνης της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα το νότιο τμήμα του νομού Τρικάλων, στο όριο σχεδόν με τον νομό Καρδίτσας. Η υδρολογική του λεκάνη έχει έκταση 294 km² και αποτελεί το 2,8 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής του Πηνειού. Η γενική διεύθυνση της υδρολογικής του λεκάνης είναι ΝΔ – ΒΑ. Η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας και πιο συγκεκριμένα στο νότιο τμήμα του νομού Τρικάλων στο

όριο σχεδόν του νομού αυτού με τον νομό Καρδίτσας, λίγα χιλιόμετρα ΔΝΔ της ομώνυμης πόλης των Τρικάλων.

Ο κύριος κλάδος του ποταμού ξεκινάει από την οροσειρά της νότιας Πίνδου (περιοχή Στουρναρέικα) από υψόμετρο 1500-1600 m περίπου. Στην συνέχεια τέμνει εγκάρσια την απότομη οροσειρά του Κόζιακα στην περιοχή της Πύλης και αφού ενωθεί με πλήθος άλλων παραποτάμων και ρεμάτων καταλήγει στη θεσσαλική πεδιάδα όπου και συμβάλλει στον Πηνειό ποταμό (Βρουχάκης κ.α., 2004).

Η κύρια κοίτη του Πορταϊκού έχει συνολικό μήκος 31,9 km, ενώ χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το μεγαλύτερο τμήμα αυτής βρίσκεται δίπλα στον υδροκρίτη της υδρολογικής λεκάνης με αποτέλεσμα το υδρογραφικό δίκτυο να παρουσιάζει μια εντελώς ασύμμετρη ανάπτυξη εκατέρωθεν του κυρίου κλάδου (Βρουχάκης κ.α., 2004).

2.1.4. Περιοχή Πύλης

Στους πρόποδες της Πίνδου, στην είσοδο ενός μεγαλοπρεπούς φαραγγιού, το οποίο χωρίζει τα βουνά Ίταμος και Κόζιακας, αλλά και ενώνει τη Θεσσαλία με την Ήπειρο, 18 χλμ. δυτικά από τα Τρίκαλα βρίσκεται η κωμόπολη της Πύλης, έδρα του ομώνυμου δήμου. Την Πύλη χωρίζει από τον συνοικισμό της Πόρτας Παναγιάς, ο Πορταϊκός ποταμός. Στην εικόνα 2.2. εμφανίζεται η γεωγραφική θέση της Πύλης και στον πίνακα 2.1 τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Το τμήμα της υπολεκάνης απορροής της Πύλης εμφανίζεται στην εικόνα 2.3, όπου σημειώνεται και ο υδρομετρικός σταθμός της περιοχής (Κουκουβίνος και Μάμασης, 1997).



Εικόνα 2.2: Περιοχή Πύλης Τρικάλων.



Εικόνα 2.3: Υπολεκάνη απορροής περιοχής Πύλης.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά της περιοχής Πύλης.

<i>Χρήσεις γης περιοχής</i>	
Δομημένη επιφάνεια:	2.14%
Καλλιεργήσιμη επιφάνεια:	5.46%
Δάση:	29.37%
Μόνιμα λιβάδια:	61.26%
Υδάτινη επιφάνεια:	1.77%
<i>Γεωμορφολογικά – Υδρολογικά χαρακτηριστικά</i>	
Εμβαδόν επιφάνειας:	132.0 km ²
Μέσο ύψος:	943.72 m
Μέγιστο ύψος:	1683.26 m
Μικρότερο ύψος:	301.94m
Μήκος ποταμού:	12 km
Μορφολογία εδάφους:	Ορεινό
Τελικός προορισμός υδάτων:	Πηνεϊός ποταμός
Γεωλογικό υπόβαθρο	Φλύσχης, βραχώδεις σχηματισμοί και αποθέσεις ποταμού
Κύρια δραστηριότητα της περιοχής	Γεωργική

Η Πύλη έχει 4.496 κατοίκους (απογραφή του 2001). Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον επισκέπτη, γιατί βρίσκεται στο κέντρο βυζαντινών και μεταβυζαντινών μνημείων, αλλά και αποτελεί πέρασμα για τα γραφικά χωριά του Ασπροποτάμου και της Άρτας. Στην θέση του συνοικισμού Πόρτα Παναγιά βρισκόταν η βυζαντινή πόλη Μεγάλοι Πύλοι ή Μεγάλη Πόρτα. Ο καινούργιος οικισμός της Πόρτας, ο οποίος είχε ήδη αναπτυχθεί στη δεξιά όχθη του Πορταϊκού αναφέρεται ως Κάτω Πόρτα ή Πόρτα Νικόλα από περιηγητές αρχές του 18^{ου} αιώνα.

Τα δύο ονόματα (Πύλη και Πόρτα) έχουν σχέση με τη γεωγραφική θέση της κωμόπολης. Υπάρχουν πολλά μνημεία στην περιοχή όπως οι γέφυρες επί του Πορταϊκού ποταμού, στο ύψος της Πύλης, υπάρχουν, κοντά η μία στην άλλη, τέσσερις γέφυρες διαφορετικών εποχών (1514 έως 1981) και διαφορετικής τεχνικής (πέτρινη τοξωτή, δύο από μπετόν, κρεμαστή).

2.2. Δεδομένα

Για την εφαρμογή των μοντέλων στην παρούσα εργασία τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας.
- Επίγειες μετρήσεις βροχόπτωσης.
- Υπολογισμένη δυνητική εξατμισοδιαπνοή.
- Μετρήσεις απορροής στην έξοδο της λεκάνης.
- Δορυφορικές εικόνες θερμοκρασίας από τα θερμικά κανάλια του δορυφόρου NOAA.
- Δορυφορικές εικόνες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.
- Χρήση της βάσης δεδομένων του προγράμματος Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) Arc-Map (9.1), για τον καθορισμό της λεκάνης απορροής της Πύλης.

2.2.1. Επίγεια δεδομένα

Τα επίγεια δεδομένα αφορούσαν μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα προερχόμενες από τους μετεωρολογικούς σταθμούς Παχτούρι, Βακάρι και Πολυνέρι

στην περιοχή της Πύλης. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών της Ελάτης, Στουρναρέικα, Δρακότρυπα και Αργιθέα, τα οποία είχαν το ίδιο χρονικό βήμα (μέσες μηνιαίες τιμές υετού σε χιλιοστά βροχής). Η χρονοσειρά των δεδομένων κάλυπτε το χρονικό διάστημα από το 1981 έως και 1993. Οι θέσεις των σταθμών φαίνονται στην εικόνα 2.4.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή που χρησιμοποιήθηκε είχε υπολογισθεί με τη μέθοδο Thornthwaite, και αφορούσε μέσες μηνιαίες τιμές για τη συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις απορροής από το σταθμό στην έξοδο της λεκάνης. Οι τιμές της παροχής ήταν αρχικά σε m^3/sec , και εν συνεχεία μετατράπηκαν σε χιλιοστά νερού (mm) κατανεμημένα σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης (Χονδρονίκου, 2004; Μεθυμάκη κ.α., 2003). Τα δεδομένα των σταθμών που έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως και το υψόμετρο τους φαίνεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 : Ονομασία σταθμών και υψόμετρα.

A/A	Σταθμός	Υψόμετρο	Φορέας	Είδος
1	Αργιθέα	980	ΥΠΓΕ	Βροχομετρικός
2	Βάκαρι	1150	ΔΕΗ	Μετεωρολογικός
3	Δρακότρυπα	680	ΥΠΓΕ	Βροχομετρικός
4	Παχτούρι	950	ΔΕΗ	Μετεωρολογικός
5	Πολυνέρι	730	ΕΜΥ	Μετεωρολογικός
6	Στουρναρέικα	860	ΥΠΓΕ	Βροχομετρικός
7	Ελάτη	900	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βροχομετρικός



Εικόνα 2.4: Θέσεις των σταθμών υετόπτωσης και θερμοκρασίας.

2.2.2. Δεδομένα δορυφορικών εικόνων

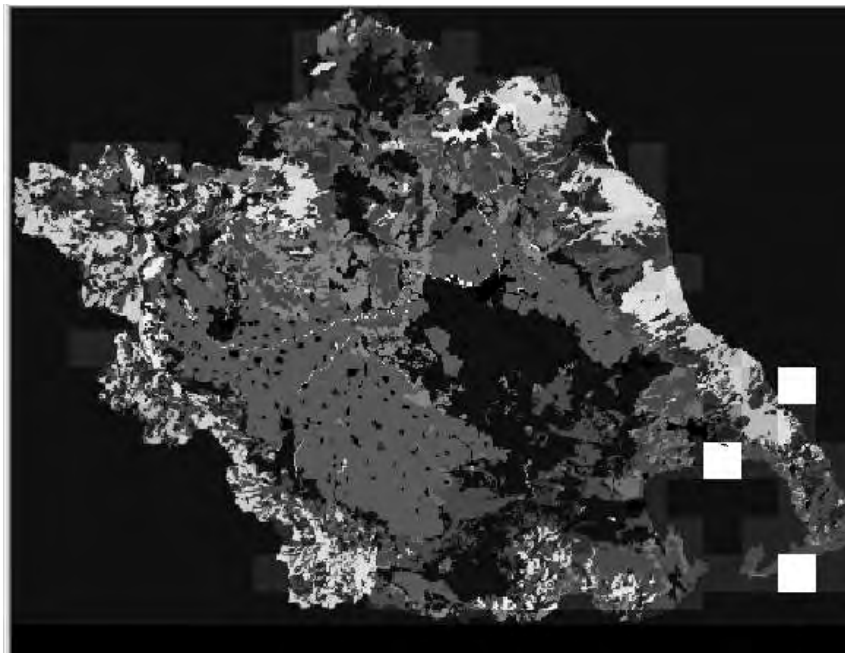
Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εφαρμογή προέρχονταν από το δορυφόρο NOAA/AVHRR με διακριτική χωρική ικανότητα 8×8Km.

Τα δορυφορικά δεδομένα αφορούσαν μέσες τιμές δεκαήμερου θερμοκρασίας επιφανείας LST (Land Surface Temperature), προερχόμενες από τα δύο θερμικά κανάλια 4 και 5 του δορυφόρου, για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Η χρονοσειρά των δεδομένων ήταν διαθέσιμη για το χρονικό διάστημα από τον Οκτώβριο του 1981 έως και το Σεπτέμβριο του 1993. Το κάθε έτος καλυπτόταν κανονικά με τριάντα έξι δεκαήμερα τιμών, συνολικά δηλαδή 441 εικόνες θερμοκρασίας (Κανέλλου, 2006). Στην εικόνα 2.5. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των δορυφορικών εικόνων θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα και δορυφορικές εικόνες δυναμικής εξατμισοδιαπνοής, για τα αντίστοιχα έτη 1981-1993, προερχόμενες μετά από επεξεργασία σε παλαιότερη εργασία (Κανέλλου, 2006). Η εξατμισοδιαπνοή στις εικόνες αυτές είχε υπολογιστεί με τη μέθοδο Blaney- Criddle, για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, και για κάθε δεκαήμερο της χρονοσειράς, συνολικά 441 εικόνες επίσης. Στην εικόνα 2.6. εμφανίζεται ως παράδειγμα αυτών που χρησιμοποιήθηκαν, δορυφορική εικόνα εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με Blaney-Criddle.



Εικόνα 2.5: Δορυφορική εικόνα θερμοκρασίας δεκαημέρου για το έτος 1981.



Εικόνα 2.6: Δορυφορική εικόνα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δεκαημέρου του έτους 1981.

Οι δορυφορικές εικόνες της θερμοκρασίας και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ήδη γεωμετρικά διορθωμένες και είχαν τοποθετηθεί σε αυτές οι γεωγραφικές συντεταγμένες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς EGSA' 87.

Οι χρονοσειρές των διαθέσιμων επίγειων και δορυφορικών δεδομένων παρουσιάζονται επιγραμματικά στον πίνακα 2.3.

2.2.3. Βάση δεδομένων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS)

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες της βάσης δεδομένων του προγράμματος Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) Arc-Map 9.1, για τον καθορισμό της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης της Πύλης, στο υδατικό διαμέρισμα της

Θεσσαλίας. Τα όρια της λεκάνης απορροής της Πύλης δίνονταν από προηγούμενες έρευνες στην περιοχή (Τζαμπύρας, 2005; Κανέλλου, 2006).

Πίνακας 2.3: Χρονοσειρές διαθέσιμων επίγειων και δορυφορικών δεδομένων.

Διαθέσιμα επίγεια και δορυφορικά δεδομένα	
Οκτώβριος 1981- Σεπτέμβριος 1982	Οκτώβριος 1987- Σεπτέμβριος 1988
Οκτώβριος 1982- Σεπτέμβριος 1983	Οκτώβριος 1988- Σεπτέμβριος 1989
Οκτώβριος 1983- Σεπτέμβριος 1984	Οκτώβριος 1989- Σεπτέμβριος 1990
Οκτώβριος 1984- Σεπτέμβριος 1985	Οκτώβριος 1990- Σεπτέμβριος 1991
Οκτώβριος 1985- Σεπτέμβριος 1986	Οκτώβριος 1991- Σεπτέμβριος 1992
Οκτώβριος 1986- Σεπτέμβριος 1987	Οκτώβριος 1992- Σεπτέμβριος 1993

2.3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία εκτίμησης απορροής στην περιοχή της Πύλης στην Θεσσαλία, στην παρούσα εργασία, έγινε με την χρήση πέντε μοντέλων υδατικού ισοζυγίου με διαφορετικό αριθμό εκτιμώμενων παραμέτρων. Τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα παρακάτω: Abulohom (Abulohom *et al*, 2001), Loukas (Χονδρονίκου, 2004), GR2M (Makhlouf and Michel, 1994), Giakoumakis (Giakoumakis *et al*, 1991), και L. Xiong and S. Guo (Xiong and Guo, 1999). Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, πραγματοποιήθηκε με σκοπό την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης, συνδυάζοντας πέντε μοντέλα με χρήση 4 διαφορετικών χρονοσειρών δεδομένων. Συνολικά, δηλαδή,

πραγματοποιήθηκαν είκοσι διαφορετικοί μέθοδοι προσομοίωσης στην ίδια περιοχή. Ο απώτερος στόχος ήταν η σύγκριση των προσομοιώσεων όλων των χρονοσειρών σε κάθε μοντέλο και η εύρεση του βέλτιστου μοντέλου για την περιοχή.

Τα δεδομένα αρχικά αφορούσαν επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, απορροής και βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, καθώς και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο Thornthwaite. Έπειτα, τα δεδομένα εμπλουτίστηκαν με χρονοσειρές τιμών θερμοκρασίας αέρα, και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με την μέθοδο Blaney-Criddle, προερχόμενες από δορυφορικές εικόνες NOAA/ AVHRR χωρικής διακριτικής ικανότητας 8 x 8 Km. Η χρονική περίοδο για όλες τις χρονοσειρές αφορούσε το διάστημα από τον Οκτώβριο του 1981 έως και το Σεπτέμβριο του 1993.

Στην εφαρμογή των μοντέλων του υδατικού ισοζυγίου πρώτα έγινε η βελτιστοποίηση για τα πρώτα έτη, από Οκτώβριο 1981 έως Σεπτέμβριο 1987. Μετά έγινε πιστοποίηση των μοντέλων για τα υπόλοιπα έτη, από Οκτώβριο 1988 έως Σεπτέμβριο 1993. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγινε με την Simplex Downhill Algorithm (Ψιλοβίκος, 1999; Psilonikos and Tzimopoulos, 2004) και χρησιμοποιήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση Model Efficiency (Eff) ή αποτελεσματικότητα του μοντέλου, που προτάθηκε από τους Nash and Sutcliffe (1970).

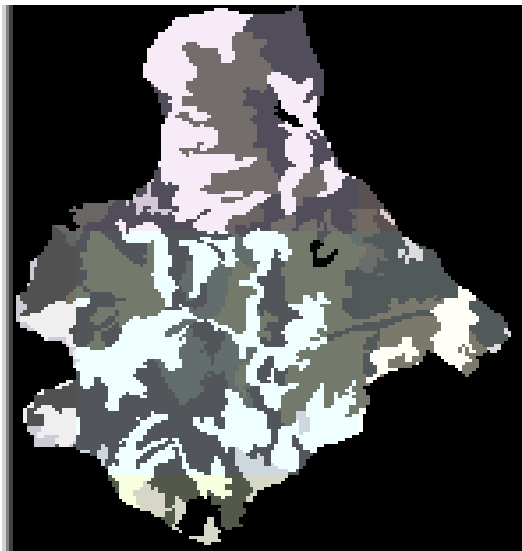
Τα βήματα της μεθοδολογίας αναφέρονται επιγραμματικά και αναλύονται παρακάτω:

- Προσδιορισμός των ορίων της λεκάνης απορροής της Πύλης.
- Δημιουργία των χρονοσειρών των δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής βάσει των δορυφορικών εικόνων της περιοχής.

- Ανάπτυξη των πέντε μοντέλων που προαναφέρθηκαν με την εφαρμογή της χρονοσειράς των επίγειων τιμών θερμοκρασίας αέρα και των τιμών υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite, χρησιμοποιώντας επίγεια στοιχεία.
- Ανάπτυξη των μοντέλων με την εφαρμογή της χρονοσειράς των επίγειων τιμών θερμοκρασίας αέρα και των τιμών υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney- Criddle, με τη χρήση δορυφορικών στοιχείων.
- Ανάπτυξη των μοντέλων με την εφαρμογή της χρονοσειράς των τιμών θερμοκρασίας αέρα προερχόμενες από δορυφορικές εικόνες, και των τιμών υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite.
- Ανάπτυξη των μοντέλων με την εφαρμογή της χρονοσειράς των τιμών θερμοκρασίας αέρα προερχόμενες από δορυφορικές εικόνες, και των τιμών υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney- Criddle, προερχόμενη από τη χρήση δορυφορικών στοιχείων.
- Εξαγωγή των στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων, για κάθε τρόπο εφαρμογής της μεθοδολογίας.
- Εξαγωγή των διαγραμμάτων διασποράς και των διαγραμμάτων της πραγματικής- προσομοιωμένης απορροής.

2.3.1. Προσδιορισμός ορίων περιοχής μελέτης

Τα όρια της περιοχής μελέτης καθορίστηκαν βάσει παλαιότερων ερευνών (Τζαμπύρας, 2005; Μεθυμάκη κ.α., 2003), μέσω του λογισμικού του προγράμματος ArcGis, 9.1. Η οριοθετημένη λεκάνη απορροής της Πύλης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Λεκάνη απορροής της Πύλης μετά τον προσδιορισμό των ορίων της μέσω των δορυφορικών εικόνων.

2.3.2. Δημιουργία χρονοσειράς δορυφορικών δεδομένων

Με τη χρήση των ορίων της λεκάνης απορροής που φαίνονται στην εικόνα 2.7, δημιουργήθηκε μια χρονοσειρά δεδομένων δορυφορικών εικόνων. Η εικόνα 2.7. εφαρμόστηκε σε μια σειρά από δορυφορικές εικόνες θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney-Criddle, οι οποίες προέκυψαν σε προγενέστερη εργασία (Κανέλλου, 2006; Kanellou *et al.*, 2006). Με τον τρόπο αυτό έγινε διάκριση στις εικόνες αυτών των περιοχών, που εμφάνιζαν μόνο την περιοχή της λεκάνης απορροής της Πύλης και δημιουργήθηκε χρονοσειρά δορυφορικών δεδομένων για τη συγκεκριμένη περιοχή, τιμών θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής με Blaney-Criddle.

Εν συνεχεία, από τις δορυφορικές εικόνες που αφορούσαν την Πύλη, μέσω του μενού του προγράμματος Erdas Imagine 8.7, ελήφθησαν πληροφορίες για το μέσο όρο των τιμών των μεταβλητών θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής, για τα έτη 1981 έως

1993. Έτσι, δημιουργήθηκαν δύο νέες χρονοσειρές για το σύνολο των προαναφερόμενων ετών, που αφορούσαν τιμές μέσης μηνιαίας επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα και μέσης μηνιαίας επιφανειακής εξατμισοδιαπνοής Blaney-Criddle.

2.3.3. Εφαρμογή της χρονοσειράς δεδομένων

Στο παρόν στάδιο της μεθοδολογίας έγινε η εφαρμογή των διαφορετικών ζευγών δεδομένων και στα πέντε μοντέλα της μελέτης. Τα ζεύγη των δεδομένων που διαφοροποιούνται σε κάθε εφαρμογή παρουσιάζονται παρακάτω, σύμφωνα με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν:

A. Δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blaney- Criddle, από δορυφορικές εικόνες (Hondronikou *et al.*, 2006).

B. Επίγεια χρονοσειρά θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Blaney-Criddle, από τις δορυφορικές εικόνες.

Γ. Δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite.

Δ. Εφαρμογή της επίγεια χρονοσειράς θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite.

Τα δεδομένα τα οποία που δε διαφοροποιήθηκαν σε κάθε εφαρμογή ήταν η χρονοσειρά της μέσης μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης και μέσης μηνιαίας επιφανειακής απορροής. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια και στις τέσσερις παραπάνω περιπτώσεις. Επιπλέον, στα μοντέλα Loukas και Giakoumakis, τα

οποία κατά τις διαδικασίες υπολογισμού της απορροής χρησιμοποιούν το CN (Curve Number), χρησιμοποιήθηκε η τιμή $CN = 37$, το οποίο αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής της Πύλης (Λαχανάς, 2005).

2.3.4. Εξαγωγή στατιστικών παραμέτρων

Μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των μοντέλων στα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής στην περιοχή, μέσω των εξισώσεων των στατιστικών παραμέτρων. Οι στατιστικές παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι έξι και αναλυτικά εμφανίζονται παρακάτω. Οι παράμετροι αυτοί υπολογίστηκαν χωριστά για την περίοδο βελτιστοποίησης (1981-1987), πιστοποίησης (1988-1993) και όλης της χρονικής περιόδου (1981-1993).

A. Η Αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency), παράμετρος επίδρασης του μοντέλου είναι αδιάστατο μέτρο, και λαμβάνει τιμές από $-\infty$ μέχρι 1 (= τέλεια προσαρμογή), και εκφράζει κατά πόσο η προσομοιωμένη απόκριση είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με την παρατηρημένη μέση τιμή (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

Οι παράμετροι των μοντέλων μεταβλήθηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η στατιστική παράμετρος Αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency). Η μαθηματική εξίσωση της παραμέτρου είναι:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2.1)$$

Όπου Q_{obsi} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{simi} η υπολογισμένη απορροή του μήνα i , $\overline{Q_{obs}}$ ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

Η βελτιστοποίηση (calibration) έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου SIMPLEX και σαν στατιστική παράμετρος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η Αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency) 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 L. Lasdon του Πανεπιστημίου του Texas, στο Austin, και ο Al. Waren του Πανεπιστημίου του Cleveland (Μπαστρογιάννης, 2002).

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

Β. Αριθμητικός μέσος όρος των τιμών της πραγματικής απορροής για τα αντίστοιχα χρόνια που κάνουμε την βελτιστοποίηση, την πιστοποίηση αλλά και για ολόκληρη την χρονοσειρά.

$$\overline{Q_{obs}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obsi}}{N} \quad (2.2)$$

Όπου, Q_{obsi} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , N ο αριθμός των περιπτώσεων, $\overline{Q_{obs}}$ ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

Γ. Αριθμητικός μέσος όρος των τιμών της υπολογιζόμενης απορροής για τα αντίστοιχα χρόνια που κάνουμε την βελτιστοποίηση, την πιστοποίηση αλλά και για ολόκληρη την χρονοσειρά.

$$\bar{Q}_{sim} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{simi}}{N} \quad (2.3)$$

Όπου Q_{simi} η υπολογισμένη απορροή του μήνα i , N ο αριθμός των περιπτώσεων, \bar{Q}_{sim} ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας υπολογισμένης απορροής.

Δ. Συντελεστής προσδιορισμού R^2 (coefficient of determination).

Ε. Ποσοστιαία μεταβολή του όγκου ΔV που μας δείχνει κατά πόσο το μοντέλο εκτιμάει τον συνολικό όγκο απορροής.

$$\Delta V = \left[\frac{\sum_{i=1}^n Q_{simi} - \sum_{i=1}^n Q_{obsi}}{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_{obs}} \right] * 100 \quad (2.4)$$

Όπου Q_{obsi} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{simi} η υπολογισμένη απορροή του μήνα i , N ο αριθμός των περιπτώσεων.

ΣΤ. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE: Αν, αντί του τετραγώνου, το σφάλμα υψωθεί σε μεγαλύτερη δύναμη, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην αναπαράσταση των αιχμών της απόκρισης της λεκάνης (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (Q_{obsi} - \bar{Q}_{obsi})^2}{K}} \quad (2.5)$$

Όπου Q_{obsi} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , \bar{Q}_{obsi} η μέση τιμή της παρατηρημένης απορροής της περιόδου που γίνεται η βελτιστοποίηση ή η πιστοποίηση, K ο αριθμός των περιπτώσεων.

Z. Μέσο Σφάλμα ή Μεροληψία (BIAS): Εκφράζει τη διαφορά της μέσης προσομοιωμένης από τη μέση παρατηρημένη χρονοσειρά απόκρισης (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim}) \quad (2.6)$$

Όπου Q_{obs} η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , Q_{sim} η υπολογισμένη απορροή του μήνα i , και N ο αριθμός των περιπτώσεων.

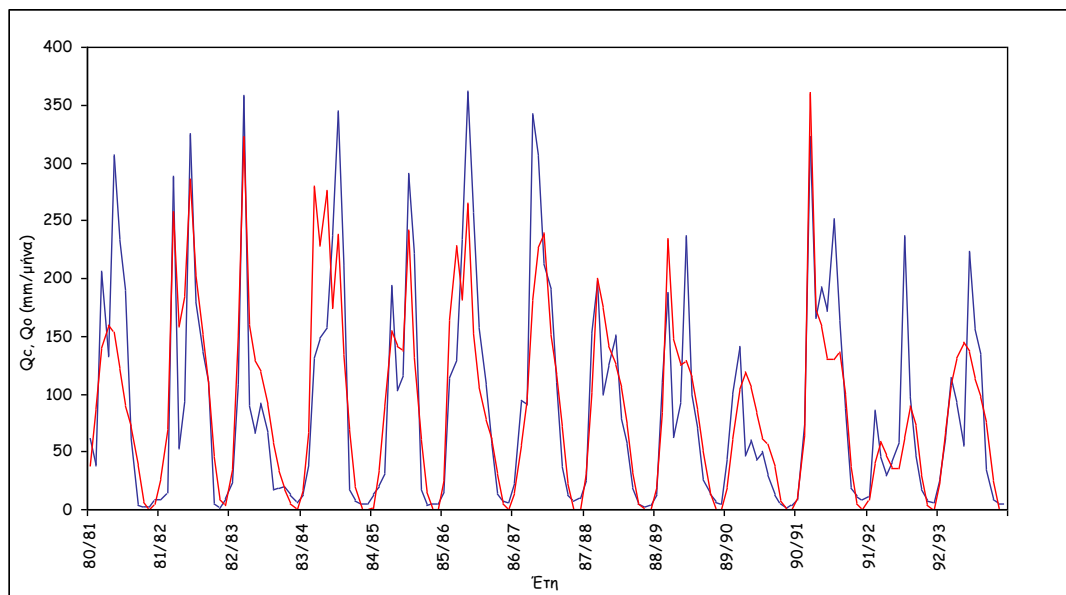
Με την συνεχή ρύθμιση των παραμέτρων προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές με τις οποίες το κάθε μοντέλο προσομοιώνει καλύτερα την φυσική διαδικασία υετόπτωσης απορροής. Σε όλα τα μοντέλα έγινε βελτιστοποίηση μιας ακόμη παραμέτρου για το χιόνι, λόγω του ότι η περιοχή είναι ορεινή και το χιόνι αποτελεί παράγοντα που συμμετέχει ενεργά σε όλη την διαδικασία του υδρολογικού κύκλου.

2.3.5. Εξαγωγή διαγραμμάτων

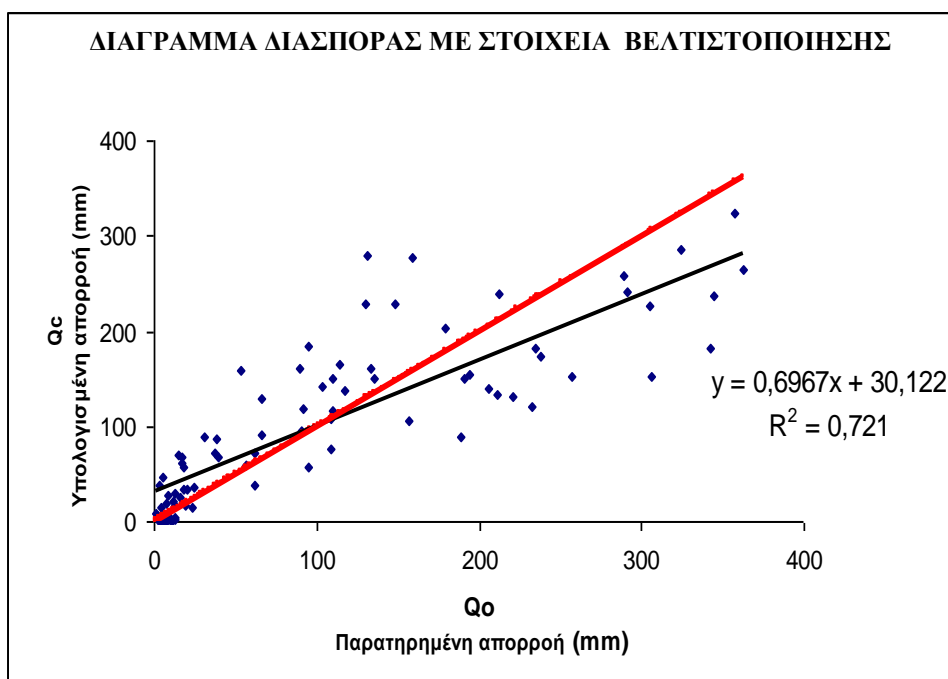
Αφού υπολογίστηκε η μέση μηνιαία απορροή της λεκάνης μέσω της προσομοίωσης, κατασκευάστηκαν διαγράμματα μηνιαίας παρατηρημένης-προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής για την περίοδο από Οκτώβριο 1983 έως και Σεπτέμβριο 1993.

Επίσης, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα διασποράς των απορροών (παρατηρημένης-προσομοιωμένης) και προσαρμόστηκε σε αυτά η ευθεία 1:1 με σκοπό τη σύγκρισή τους. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν όμοια για την περίοδο βελτιστοποίησης, πιστοποίησης και ολόκληρης της χρονοσειράς. Παραδείγματα των διαγραμμάτων παρουσιάζονται στα εικόνες 2.8, 2.9, 2.10 και 2.11, ενώ το σύνολο των

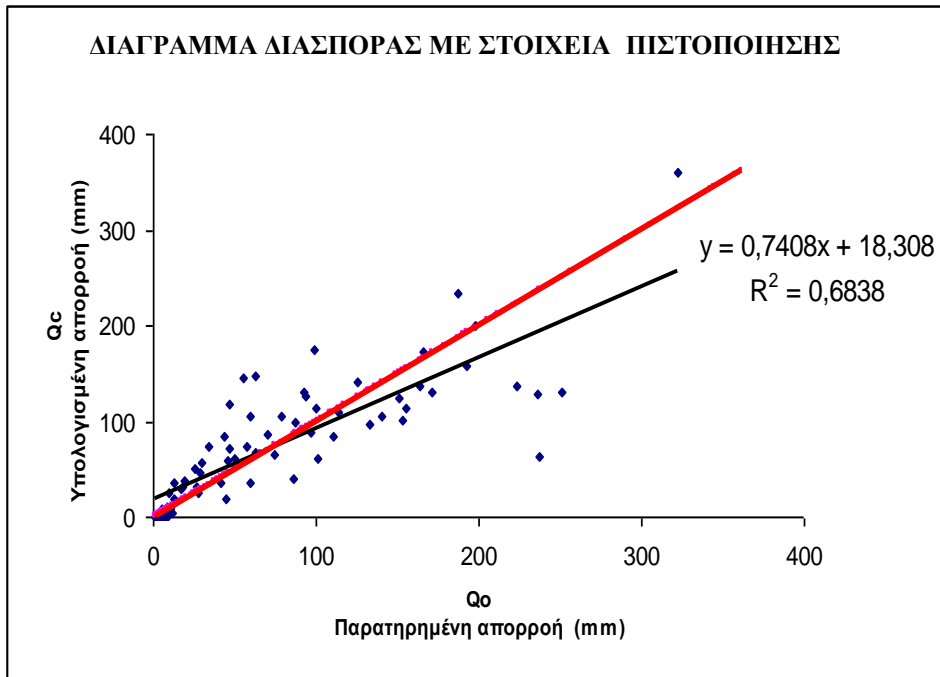
διαγραμμάτων όλων των περιπτώσεων και όλων των μοντέλων φαίνονται στο παράρτημα.



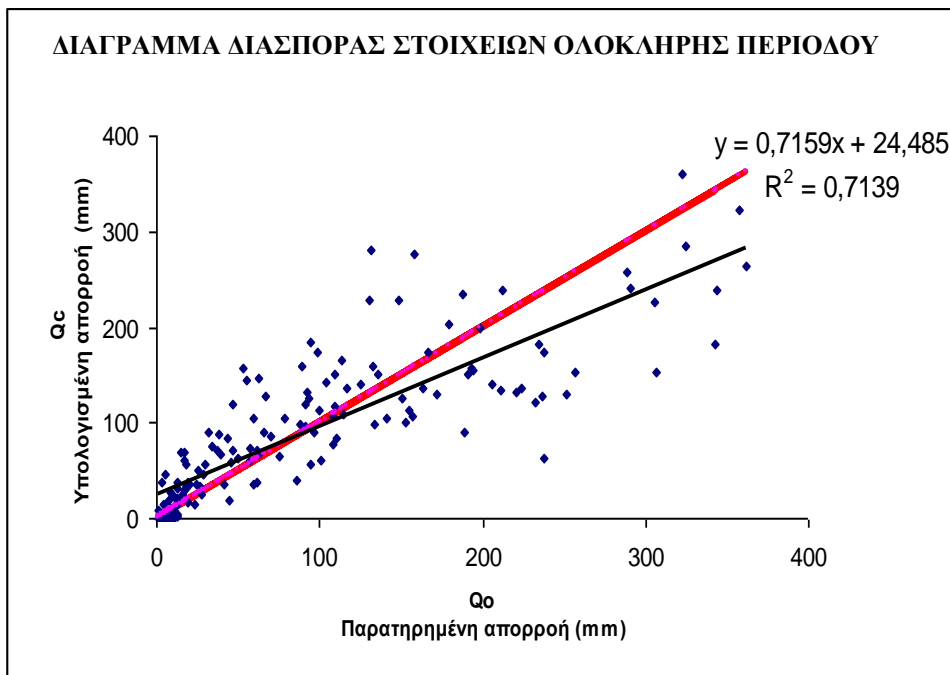
Εικόνα 2.8: Διάγραμμα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής ολόκληρης της χρονοσειράς, για το μοντέλο Loukas.



Εικόνα 2.9: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής περιόδου βελτιστοποίησης, μοντέλου Loukas.



Εικόνα 2.10: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής περιόδου πιστοποίησης, μοντέλου Loukas.



Εικόνα 2.11: Διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης και προσομοιωμένης (υπολογισμένης) απορροής ολόκληρης της περιόδου, μοντέλου Loukas.

A. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

A.1. Γενικά

Υδρολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με την παρουσία, κυκλοφορία και διανομή των υδάτων στον πλανήτη μας, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες τους και τις αλληλεπιδράσεις τους με το φυσικό και βιολογικό περιβάλλον στο οποίο περιλαμβάνονται και οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Η υδρολογία καλύπτει εννοιολογικά ολόκληρη την διαδικασία του υδρολογικού κύκλου (Τσακίρης, 1995).

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 την λειτουργία των υδραυλικών έργων, των τεχνικών έργων δηλαδή που κατασκευάζονται για τον έλεγχο, τη διατήρηση και την αξιοποίηση του νερού (Τσακίρης, 1995).

A.2. Αντικείμενο της υδρολογίας

Η τεχνική υδρολογία, ασχολείται τόσο με τις φυσικές διαδικασίες της απορροής χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την επίλυση εξισώσεων, όσο και με την εφαρμογή νέων μεθόδων μετρήσεως και συλλογής υδρολογικών δεδομένων (Τσακίρης, 1995).

Οι πρόοδοι στη διάδοση της πληροφορίας βοήθησαν εξάλλου να γίνει ουσιαστική διεπιστημονική συνεργασία στα σύνθετα προβλήματα εκτιμήσεως, αξιοποιήσεως και διαχειρίσεως των υδατικών πόρων. Μερικά μόνο από τα επιτεύγματα είναι:

- Επίλυση παλαιότερων μαθηματικών ομοιωμάτων, κατάστρωση και επίλυση νέων θεωρητικών προσεγγίσεων με προσδιοριστική και στατιστική, δηλαδή μικτή δομή για την περιγραφή των φαινομένων της απορροής.
- Τεχνικοοικονομική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας συνθέτων υδρολογικών συστημάτων με τη μεθοδολογία της επιχειρησιακής ερευνάς.
- Αυτόματη καταγραφή, μετάδοση και αποθήκευση υδρολογικών δεδομένων.
- Ποσοτική πρόγνωση κατακρημνίσεων και πλημμύρων με τη βοήθεια μετεωρολογικών δορυφόρων, ραντάρ, κλπ..

Η ποσοτική εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων έργων περιβάλλοντος, φυσικού και κοινωνικοοικονομικού, δίνει μερικές πρώτες ενθαρρυντικές απαντήσεις που πράγματι, αποσκοπούν στη συστηματοποίηση και διάδοση προχωρημένων βασικών γνώσεων, τόσο στην οργάνωση και συλλογή των δεδομένων όσο και στη μεθοδολογία αξιοποίησής τους (Μιμίκου, 1994).

Οι σύγχρονες τεχνικές για την προσέγγιση των φαινομένων της τεχνικής υδρολογίας ακολουθούν δυο γενικές μεθόδους:

Η πρώτη προσδιοριστική μέθοδος (ντετερμινισμός), αναζητά την αιτιότητα, μιας αμφιμονοσήμαντης προσδιοριστικής σχέσης μεταξύ αιτίου-αποτελέσματος και καταστρώνεται ένα μαθηματικό ή φυσικό ομοίωμα μεταξύ των φυσικών μεταβλητών του φαινομένου, το ρυθμίζει υπολογίζοντας μονοσήμαντα τις παραμέτρους του από εμπειρικές διαδικασίες, δέχεται την πιθανολογική δομή των φαινομένων, θεωρεί ότι κάθε μία πραγματοποίηση ενός φαινομένου είναι ανεξάρτητη από κάθε άλλη

πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου ή και άλλων φαινομένων, γεγονός που μπορεί να ισχύει απόλυτα ή μόνο κατά προσέγγιση.

Η δεύτερη, η οποία είναι πληρέστερη, δέχεται τη στοχαστική δομή των φαινομένων και προσεγγίζει τα μεγέθη προσθέτοντας ένα προσδιοριστικό και ένα στατιστικό τμήμα που ακολουθεί ορισμένους νόμους της "τύχης" και συνεπώς, πρέπει να ερευνηθεί με ανάλογες διαδικασίες (Τσακίρης, 1995).

Οι βροχοπτώσεις και γενικότερα οι πάσης φύσεως ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις που προκαλούν την απορροή, είναι φαινόμενα που κυριαρχούνται κατά μεγάλο ποσοστό από την τύχη. Αντίθετα, τόσο η επιφανειακή όσο και η υπόγεια απορροή υπακούουν κατά μεγάλο μέρος στη λογική της αιτιότητας, αφού για δεδομένες συνθήκες λεκάνης απορροής και δεδομένη βροχοπτώση, το αποτέλεσμα, δηλαδή η απορροή, συνδέεται ουσιαστικώς μονοσήμαντα με το αίτιο, δηλαδή την κατακρήμνιση.

Κατά συνέπεια, η δομή των φαινομένων της απορροής είναι μικτή, αφού το γενεσιουργό τους αίτιο, οι κατακρημνίσεις, κυριαρχούνται από την τύχη, ενώ η φυσική τους εξέλιξη, δηλαδή η κυρίως απορροή, κυριαρχείται από την αιτιότητα οπότε ένα ολοκληρωμένο ομοίωμα (μαθηματικό ή φυσικό) των βασικών φαινομένων της απορροής θα πρέπει να περιέχει όχι μόνο προσδιοριστικές αλλά και στοχαστικές συνιστώσες, ώστε να καλύπτει το δίπτυχο «αιτιότητα-τύχη» (Ξανθόπουλος, 1992).

A.3. Υδρολογικός κύκλος

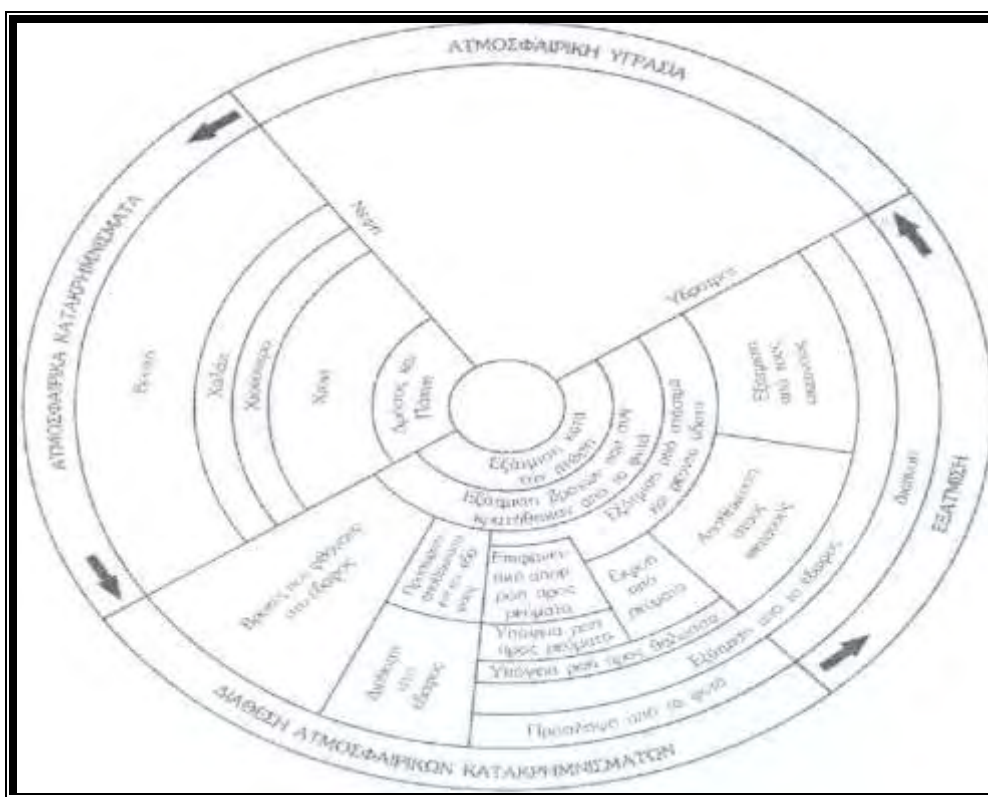
Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί την περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στην φύση (Εικόνα Α.1). Σ' αυτήν την αλυσίδα το νερό εμφανίζεται σε όλες τις φυσικές του καταστάσεις υγρό, αέριο, στερεό. Η σειρά των

εμφανίσεων δεν έχει αρχή ούτε τέλος. Όμως μπορούμε να θεωρήσουμε την αρχή στην ατμόσφαιρα που συγκεντρώνεται σε μορφή υδρατμών που μεταφέρονται με τις αέριες μάζες και κάτω από κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται και επανεμφανίζονται στην επιφάνεια της γης. Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από την βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται στο έδαφος και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά προς τα ποτάμια και τους χείμαρρους που καταλήγουν σε λίμνες ή στην θάλασσα. Κατά την πορεία του αυτή ένα μέρος του νερού χάνεται λόγω της εξάτμισης 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 στην συνέχεια καταλήγει επιφανειακά ή υπόγεια (Τσακίρης, 1995).

Το νερό της θάλασσας επίσης με την εξάτμιση επανέρχεται στην ατμόσφαιρα και με τον τρόπο αυτό κλείνει ο υδρολογικός κύκλος. Στην Εικόνα Α.2 παρουσιάζεται ποιοτικά ο υδρολογικός κύκλος σύμφωνα με τον Horton (Τσακίρης, 1995). Μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί μεταφορά νερού, προσωρινή αποθήκευση και μεταβολή της κατάστασης του νερού.



Εικόνα Α.1: Απλοποιημένη απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.



Εικόνα Α.2: Ποιοτική παρουσίαση του υδρολογικού κύκλου σύμφωνα με τον Horton.

Α.4. Υδρολογική πληροφορία

Πολλές είναι οι υδρολογικές μεταβλητές που με τις αντίστοιχες μετρήσεις ή παρατηρήσεις των μεγεθών τους, πληροφορούν για την εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου. Η τεχνική υδρολογία ενδιαφέρεται τόσο για τις υδρολογικές πληροφορίες που χρησιμοποιεί, άμεσα ή έμμεσα που ορίζονται με την απαιτούμενη επιστημονική πληρότητα και ακρίβεια, όσο και για τη φύση των χρησιμοποιούμενων πληροφοριών και τη διαδικασία συλλογής και ένταξης τους στο υπολογιστικό σύστημα που θα τις αξιοποιήσει (Ξανθόπουλος, 1992).

Κατά γενικό κανόνα, η πρωτογενής υδρολογική πληροφορία είναι "σημειακή", αφού προκύπτει από όργανα ή διατάξεις που μετρούν το υδρολογικό μέγεθος στο

συγκεκριμένο σημείο της εγκαταστάσεως τους, π.χ. μέτρηση ύψους βροχής στο δοχείο του βροχόμετρου, στάθμης ύδατος στο στέλεχος του σταθμημέτρου, κλπ..

Η διακύμανση των υδρολογικών μεγεθών στο χρόνο επιβάλλει την παρακολούθηση τους για κάποιο μικρό η μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, η υδρολογική πληροφορία πρέπει να καλύπτει μια ορισμένη χρονική περίοδο, με συνεχή ή κατά ορισμένα διαστήματα καταγραφή του μεταβαλλόμενου υδρολογικού μεγέθους.

Κύρια η πρωτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι "παροχές", δηλαδή το διερχόμενο στη μονάδα του χρόνου νερό από τα σημεία εκείνα που ενδιαφέρουν την αντίστοιχη υδρολογική μελέτη (Ξανθόπουλος, 1992).

Αν υπήρχαν μεγάλα μήκη ιστορικών χρονολογικών σειρών των παροχών, οι υπόλοιπες υδρολογικές πληροφορίες, π.χ. βροχές, θερμοκρασίες, κλπ., θα ήταν πρακτικά άχρηστες για τα περισσότερα προβλήματα της επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας. Θα απλουστεύονταν εξάλλου πολύ και οι μαθηματικές τεχνικές επεξεργασίας της πληροφορίας αφού η απάντηση σε ορισμένα κρίσιμα ερωτήματα, θα προέκυπτε απευθείας από την ιστορική σειρά των παροχών. Δυστυχώς για τις υδρολογικές μελέτες, η πληροφορία "παροχές" είναι συνήθως ελλιπής ή ανύπαρκτη .

Δευτερεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, δηλαδή οι βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Συγκρινόμενα με τις παροχές, τα κατακρημνίσματα έχουν πολύ πυκνότερο δίκτυο σημειακών μετρήσεων και πολύ μεγαλύτερες ιστορικές χρονοσειρές, για τον απλό λόγο ότι η καταγραφή τους ήταν και είναι πολύ ευκολότερη και φθηνότερη. Η λογικά προφανής σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ κατακρημνισμάτων και απορροών οδηγεί στην κατά

προτεραιότητα χρησιμοποίηση της δευτερεύουσας αυτής πληροφορίας για τη βελτίωση της εκτιμήσεως των παροχών (Ξανθόπουλος, 1992).

Τριτεύουσες πληροφορίες της τεχνικής υδρολογίας είναι όλες οι κατά περίπτωση χρησιμοποιούμενες για τη βελτίωση ή και την απευθείας εκτίμηση της κύριας ή της δευτερεύουσας πληροφορίας, π.χ. οι θερμοκρασίες, υγρασίες αέρα, ηλιοφάνεια, άνεμοι, κλπ, κλιματικοί παράγοντες μιας περιοχής.

Η Τεχνική Υδρολογία ερευνά τη φυσική δομή των βασικών υδρολογικών της μεταβλητών γιατί μόνο αν την προσεγγίσει μπορεί να βελτιώσει την υδρολογική πληροφορία που ήδη υπάρχει. Μια ιδιαίτερα χρήσιμη απεικόνιση αυτής της δομής δίνεται από τη μαθηματική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών της πληροφορίας που περιγράφει τις υδρολογικές μεταβλητές (παροχές, βροχές, θερμοκρασίες, κλπ.).

Στη γενική περίπτωση οι έρευνες έδειξαν ότι η χρονοσειρά της πληροφορίας αποτελείται από ένα προσδιοριστικό και ένα στοχαστικό μέρος, που αναλύονται σε επί μέρους συνιστώσες περιοδικότητας, εμμονής, τάσης (Χονδρονίκου, 2004).

A.4.1. Μέτρηση της υδρολογικής πληροφορίας

Μια μέτρια μέτρηση αξίζει πολύ περισσότερο από έναν καλό υπολογισμό. Η πυκνότητα, η ποιότητα και η χρονική διάρκεια λειτουργίας ενός εγκατεστημένου δικτύου μετρήσεων της υδρολογικής πληροφορίας, χαρακτηρίζουν το μέγεθος και την ποιότητα της υπάρχουσας στην περιοχή υποδομής για σύνταξη μελετών και κατασκευή έργων αξιοποιήσεως των υδατικών πόρων της.

Αντίστροφα, η έλλειψη αξιόπιστης υδρολογικής πληροφορίας συμβαδίζει με γενικότερη έλλειψη τεχνολογικής υποδομής. Όσο καλό και αν είναι ένα δίκτυο

υδρολογικών μετρήσεων, παρουσιάζει, όπως και κάθε μετρητικό σύστημα, τυχαία ή συστηματικά σφάλματα. Ο ακριβής εντοπισμός και η εξάλειψη τους είναι συνάρτηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ της καταγραφής της πληροφορίας (μετρήσεως) και της πρώτης επεξεργασίας της (Χονδρονίκου, 2004).

Πράγματι, όταν η πρώτη επεξεργασία γίνεται σχεδόν αμέσως μετά την καταγραφή, εντοπίζονται με ακρίβεια όλα τα παράδοξα της καταγραφής, που τις περισσότερες φορές είναι ασήμαντα μεν αλλά καθοριστικά για την ποιότητα της πληροφορίας, αφού τα υδρολογικά γεγονότα είναι πρόσφατα και λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα για τη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου. Η σημασία αυτής της ανάγκης για άμεση (σε ελάχιστο χρόνο) πρώτη επεξεργασία της πληροφορίας, γίνεται τόσο μεγαλύτερη όσο χειρίστη είναι η ποιότητα των εγκαταστάσεων του δικτύου και των υπηρεσιών συντηρήσεως και λειτουργίας του (Χονδρονίκου, 2004).

A.4.2. Επεξεργασία της πληροφορίας

Η τεχνική υδρολογία, αποτελεί το ιδεώδες πεδίο εφαρμογής των μεθόδων της σύγχρονης επαγωγικής στατιστικής γιατί καλείται να εκτιμήσει και να προβλέψει τη χωροχρονική διανομή των υδατικών πόρων στηριζόμενη συνήθως σε μικρές ή και ανύπαρκτες ιστορικές χρονοσειρές της κύριας υδρολογικής πληροφορίας (παροχές).

Ανεξάρτητα από την τεχνική που θα ακολουθηθεί, για να βελτιώσει την αξιοπιστία της εκτιμήσεως των υδρολογικών μεγεθών σχεδιασμού του υδραυλικού έργου, πρέπει να επεξεργαστεί ένα "δείγμα" και να γνωματεύσει για τη συμπεριφορά όλου του "πληθυσμού", το οποίο παρέχεται από το φυσικό περιβάλλον. Θεωρείται δε ότι τα υδρολογικά γεγονότα δεν είναι τελείως τυχαία γεγονότα (όπως θα ήθελε η

θεωρία πιθανοτήτων) και ότι η επιθυμητή ομογένεια των δεδομένων ενός δείγματος είναι και δύσκολη και ευαίσθητη (Ξανθόπουλος, 1992).

Τα φαινόμενα της υδρολογίας επηρεάζονται, τόσο από την αιτιότητα, (λεκάνη απορροής), όσο και από την τύχη (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα). Η πρώτη προσέγγιση τους με τις στατιστικές τεχνικές είναι, συνήθως, πιθανολογική, δηλαδή κατατάσσει, τα γεγονότα σύμφωνα με το μέγεθος τους, αγνοώντας τη χρονική τους ακολουθία (ανάλυση συχνοτήτων), είτε γιατί πράγματι, οι πραγματοποιήσεις του φυσικού φαινομένου έχουν μεταξύ τους στατιστική ανεξαρτησία, είτε για την ευκολία της υπολογιστικής διαδικασίας. Σε πολλές όμως περιπτώσεις είναι αναγκαία η πληρέστερη στοχαστική προσέγγιση που σέβεται τη δομή της φυσικής χρονοσειράς, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική ακολουθία και μελετώντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των όρων της σειράς.

A.5. Μελέτες υδραυλικών έργων

Υδρολογική μελέτη είναι η εφαρμογή της τεχνικής υδρολογίας σε συγκεκριμένα έργα της επιστήμης. Αξιοποιώντας τις διαθέσιμες υδρολογικές πληροφορίες, π.χ. μετρήσεις παροχών, βροχοπτώσεων, θερμοκρασιών, κλπ., ο μελετητής καθορίζει πρώτα τις βασικές υδρολογικές παραμέτρους σχεδιασμού των έργων επιφανειακής ή υπόγειας υδρολογίας και στη συνέχεια συντάσσει ένα πρόγραμμα λειτουργίας και διαχείρισεως τους. Επισημαίνεται βέβαια ότι τόσο ο σχεδιασμός των έργων όσο και η διαχείριση τους εξαρτάται και από πλήθος άλλων μη υδρολογικών παραμέτρων, όπως τοπογραφικών, εδαφοτεχνικών, κλπ. Η κατάταξη των υδρολογικών μελετών ακολουθεί την αντίστοιχη των υδραυλικών έργων και στηρίζεται στην εφαρμοζόμενη από όλες τις

οργανωμένες ανθρώπινες κοινωνίες κοινή πρακτική: Αναζήτηση των υδατικών υποθεμάτων και βέλτιστη χωροχρονική διανομή στους καταναλωτές. Πρόκειται επομένως για υδρολογικές μελέτες αναπτυξιακών υδραυλικών έργων, που αξιοποιούν το υδατικό δυναμικό (Ξανθόπουλος, 1992). Η επεξεργασία και η υδρολογική μελέτη των δεδομένων έχει τελικό στόχο την καταγραφή της υδρολογικής κατάστασης και στην αντιμετώπιση συνηθισμένων επιπτώσεων από την επιφανειακή απορροή και εκτάκτων υδρολογικών περιστατικών, όπως πλημμύρες και ξηρασίες. Κατά συνέπεια, πρόκειται για μελέτες προστασίας τόσο του ανθρωπογενούς, όσο και του φυσικού περιβάλλοντος από ανεξέλεγκτα φαινόμενα επιφανειακής ή υπόγειας υδρολογίας.

A.6. Αναπτυξιακά έργα

Το τυπικό υδρολογικό μέρος της όλης μελέτης των αναπτυξιακών υδραυλικών έργων περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα:

α) Εκτίμηση των άμεσα διαθέσιμων υδατικών πόρων, δηλαδή του υδατικού δυναμικού που μπορεί να αξιοποιηθεί χωρίς σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική του διαίτα. Στην πρακτική, υπολογίζονται με αντικειμενική αξιοπιστία οι μέσες τιμές των εισερχομένων ή εξερχόμενων παροχών σε ορισμένες θέσεις και στις κατάλληλες χρονικές κλίμακες (π.χ. ετήσια, μηνιαία, ημερήσια). Καθορίζεται έτσι το χρονοδιάγραμμα της απολήψιμης παροχής, που αποτελεί και τη βασική υδρολογική παράμετρο σχεδιασμού των αντιστοίχων αναπτυξιακών έργων π.χ. σύλληψη και μεταφορά υδάτων από πηγές, εκτροπή και μεταφορά υδάτων από φυσικά υδατορεύματα, υδροληψία και μεταφορά υδάτων από φυσικές λίμνες, υδροληψίες υπογείων υδάτων (φρέατα και γεωτρήσεις), κλπ.

β) Εκτίμηση των ολικών διαθέσιμων υδατικών πόρων, δηλαδή του συνολικά εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού, μετά από σημαντικές επεμβάσεις στη φυσική του δίαιτα, (κατασκευή μεγάλων υδραυλικών έργων).

Υπολογίζοντας πάλι τις απαραίτητες μέσες τιμές των παροχών σε διαφορετικές θέσεις και χρονικές κλίμακες, καθορίζεται μια σειρά παραμέτρων σχεδιασμού των αντιστοίχων δυνατών αναπτυξιακών έργων. Τα κριτήρια για την επιλογή της τελικής λύσεως είναι τεχνικοοικονομικά και τα αντίστοιχα αναπτυξιακά έργα είναι συνήθως τα ακόλουθα

- Φράγματα, για τη συγκέντρωση των επιφανειακών υδάτων και ρύθμιση της δίαιτας τους σε υπερετήσια, ετήσια εποχιακή κλίμακα.
- Έργα εκτροπής υδατικού δυναμικού από μια περιοχή σε άλλη.
- Έργα εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων με πλεονάζοντα χειμερινά ύδατα, κ.α..

Τέλος γίνεται βελτιστοποίηση της χωροχρονικής διανομής και διαχείρισεως των διαθέσιμων υδατικών πόρων στους διάφορους καταναλωτές, δηλαδή αναζήτηση των οικονομικά βέλτιστων λύσεων διανομής των διαθέσιμων ποσοτήτων ύδατος για την κάλυψη των αναγκών της καταναλώσεως, μεταξύ όλων των τεχνικά δυνατών λύσεων (Ξανθόπουλος, 1992).

A.7. Απορροή

Απορροή είναι η ροή ύδατος στην έξοδο μιας υδρολογικής λεκάνης, συνέπεια της εισόδου του ατμοσφαιρικού κατακρημνίσματος. Λεκάνη απορροής είναι η επιφάνεια της υδρολογικής λεκάνης, της οποίας η απορροή καταλήγει σε ένα ορισμένο

σημείο του υδατορεύματος. Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα με όλα τα φυσικά της χαρακτηριστικά, σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού ορισμένο στο χώρο. Τα φυσικά γνωρίσματα που επηρεάζουν την διαδικασία του μετασχηματισμού ονομάζονται υδρολογικά χαρακτηρίστηκα τα οποία είναι :

- Μορφολογικά (μορφή, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο)
- Εδαφολογικά (μηχανικές ιδιότητες, χημική σύσταση, χρώμα)
- Φυτοκάλυψη (είδη χλωρίδας και χωρική διάταξη)

Μορφές απορροής είναι η υπόγεια, που δημιουργείται όταν το γεωλογικό υπόβαθρο δεν είναι στεγανό, η υποδερμική, οι οποίες είναι η πρώτη στοιβάδα της επιφανειακής απορροής, και η επιφανειακή απορροή που είναι η απορροή στην επιφάνεια του εδάφους και χωρίζεται σε βασική ροή και πλημμυρική.

A.7.1. Υδατικό Ισοζύγιο λεκάνης απορροής

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

$$\Delta S = I - O \quad (A.1)$$

Όπου ΔS η διάφορα της αποθήκευσης νερού στον όγκο αναφοράς στην συγκεκριμένη περίοδο, και I και O οι συνολικές εισροές και εκροές για την ίδια χρονική στιγμή. Οι τρεις όροι αναλύονται σε διάφορες συνιστώσες, αλλά η ανάλυση εξαρτάται πάντα από

το συγκεκριμένο όγκο αναφοράς (π.χ. λεκάνη απορροής, τμήμα λεκάνης, υπόγειος υδροφόρας, λίμνη, κτλ.) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

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. Εξάιρεση αποτελεί κατ' αρχήν η μέθοδος Penman-Monteith, που θεωρητικά μπορεί να εκτιμήσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή αν είναι γνωστή η πραγματική επιφανειακή φυτοκάλυψη.

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 παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο. Όταν αυτή η προϋπόθεση δεν εκπληρώνεται για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής επιστρατεύονται διάφορα μαθηματικά μοντέλα του υδρολογικού κύκλου, απλούστερα ή συνθετότερα, ή χρησιμοποιούν απλές εμπειρικές σχέσεις που έχουν εξαχθεί από λεκάνες με επάρκεια δεδομένων και υδροκλιματικές συνθήκες κατά το δυνατόν όμοιες με αυτές της υπό μελέτη λεκάνης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

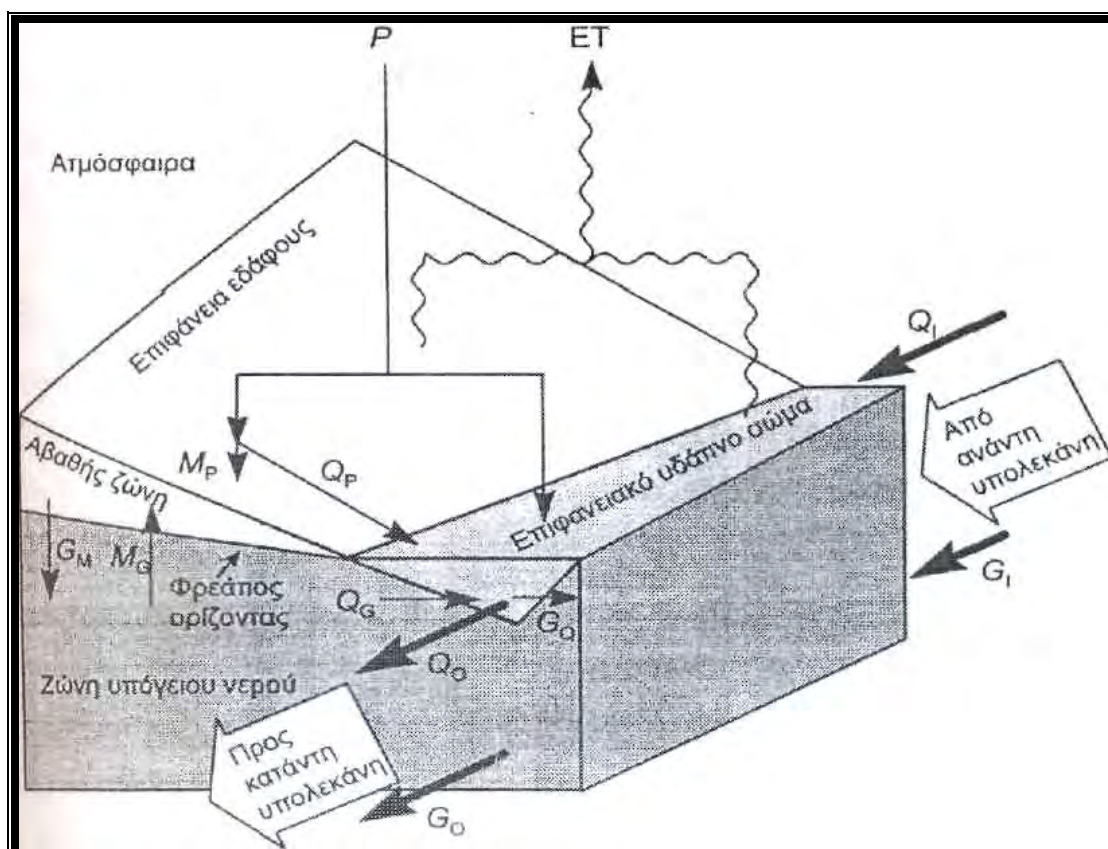
Οι μεθοδολογίες εκτίμησης διασαφηνίζονται παρακάτω, με την παράθεση των απλούστερων και εύκολα κατανοητών τεχνικών της βασικής υδρολογικής βιβλιογραφίας. Τονίζεται ότι σήμερα διατίθενται και χρησιμοποιούνται στην πράξη πολύ συνθετότερα και ακριβέστερα υδρολογικά μοντέλα.

A.7.2. Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου απλής υδρολογικής λεκάνης

Για λόγους εύκολης κατανόησης θεωρούμε μια "απλή" υδρολογική λεκάνη. Ο χαρακτηρισμός "απλή" αναφέρεται στη μορφολογία και στην υδρολογική δίαιτα της λεκάνης, και υποδηλώνει την έννοια ότι η λεκάνη έχει σχετικά μικρή έκταση και παρουσιάζει σχετική ομοιομορφία τόσο ως προς την τοπογραφία και γεωλογία. Όσον αφορά στις υδροκλιματικές συνθήκες, το σύστημα της λεκάνης απορροής βρίσκεται σε φυσική κατάσταση, χωρίς αξιόλογα έργα αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού της που να επηρεάζουν την υδρολογική δίαιτα, δεν έχει αξιόλογους υπόγειους υδροφορείς ούτε παρουσιάζει υπόγειες εισροές ή εκροές σε σχέση με τις γειτονικές λεκάνες και δεν παρουσιάζει αξιόλογες χιονοπτώσεις κατά την διάρκεια του χειμώνα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Θεωρείται ότι ο όγκος αναφοράς ορίζεται στην 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 (Εικόνα A.3). Η μοναδική εισροή στο συγκεκριμένο όγκο αναφοράς είναι η βροχόπτωση P , ενώ η εκροή έχει δυο συνιστώσες: την πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_T 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 (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).



Εικόνα Α.3: Σχηματική παράσταση των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.

Σημειώνεται 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.

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

$$\Delta S = P - ET_{\alpha} - Q \quad (\text{A.2})$$

Από αυτούς τους όρους ο όρος P μπορεί να μετρηθεί πιο εύκολα συγκριτικά με τον όρο Q. Οπότε στην εξίσωση (A.2) περιέχονται δύο άγνωστοι όροι και δεν είναι δυνατή η λύση της. Αν τα έτη που ενδιαφέρουν είναι παραπάνω από ένα, επειδή οι διακυμάνσεις του S έχουν εποχιακό χαρακτήρα, γίνεται η υπόθεση ότι $\Delta S = 0$ οπότε η σχέση γίνεται:

$$ET_{\alpha} = P - Q \quad (\text{A.3})$$

Για μικρότερη χρονική περίοδο χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης των υδρολογικών φαινομένων (Μπαστρογιάννης, 2002).

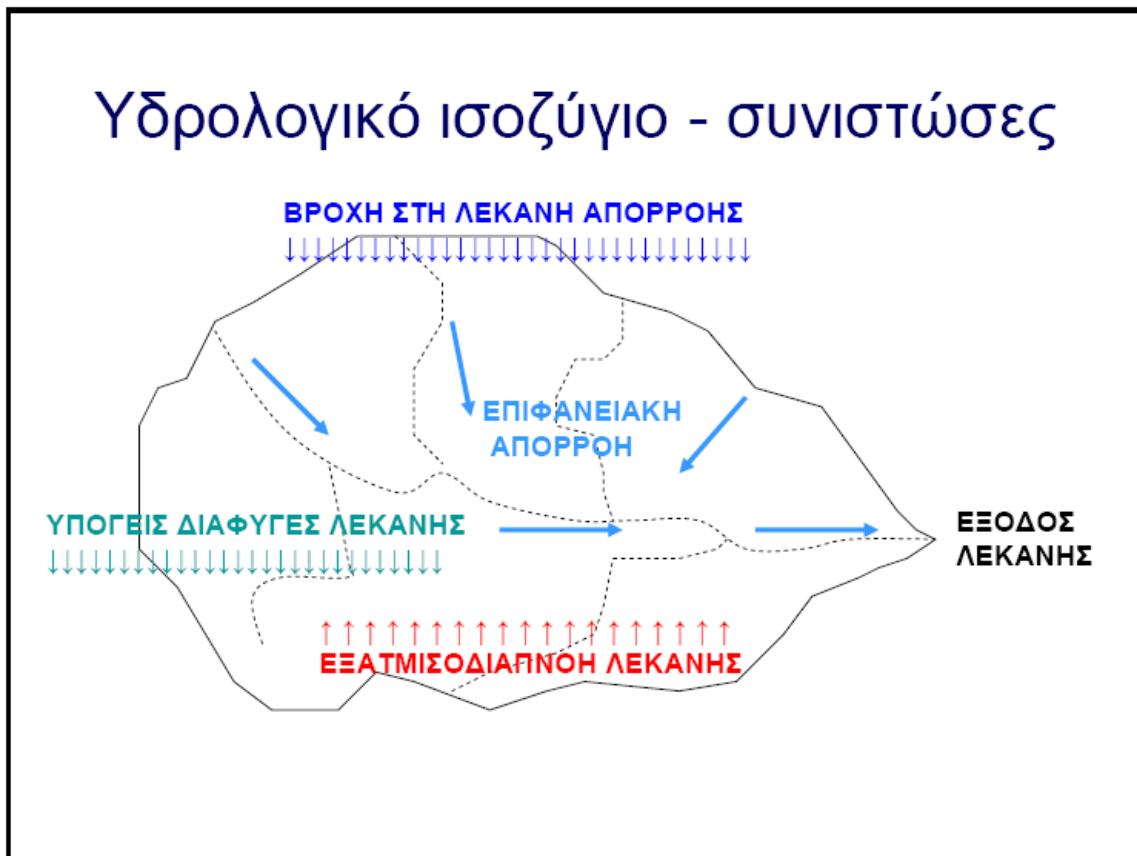
A.7.3. Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου

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. Οι συνιστώσες γενικά του υδατικού ισοζυγίου εμφανίζονται στην Εικόνα A.4.

Για να γραφεί μια εξίσωση ισοζυγίου θα πρέπει προηγουμένως να καθοριστούν με ακρίβεια, ο όγκος αναφοράς, η χρονική κλίμακα (ή το χρονικό βήμα) μελέτης, οι φυσικές διαδικασίες (είσοδοι και έξοδοι) στον όγκο αναφοράς, οι τεχνητές απολήψεις από τον όγκο αναφοράς και οι επιστροφές σ' αυτόν, και τα μεγέθη της μεταβλητής αποθήκευσης στον όγκο.

Όγκοι αναφοράς: Κατά μήκος ενός υδατορεύματος, θεωρούνται δύο διαδοχικές διατομές οι οποίες ορίζουν τις αντίστοιχες λεκάνες. Η προσοχή επικεντρώνεται στο

ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ των δύο υπολεκανών. Ο συνολικός όγκος αναφοράς, ο οποίος περιλαμβάνει τρεις επί μέρους όγκους (τα επιφανειακά υδάτινα σώματα, την αβαθή ζώνη και τη ζώνη υπόγειου νερού), αποτελεί ένα ανοικτό σύστημα, το οποίο επικοινωνεί με γειτονικά συστήματα και συγκεκριμένα με την ατμόσφαιρα, με το ανάντη τμήμα της λεκάνης και με το κατάντη τμήμα της λεκάνης ή τον αποδέκτη της λεκάνης (Λέκκας, 2005).



Εικόνα Α.4: Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου.

Φυσικές διαδικασίες: Οι φυσικές εισοδοι και έξοδοι σε όλους τους επί μέρους όγκους αναφοράς του συστήματος που εξετάζεται (διακινήσεις νερού από μια ζώνη σε άλλη) συμβολίζουν ποσότητες νερού που εισρέουν στα επιφανειακά υδάτινα σώματα,

την αβαθή ζώνη και τη ζώνη υπόγειου νερού, αντίστοιχα. Στις εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου οι διακινήσεις αυτές εκφράζονται σαν ισοδύναμα ύψη νερού ή ως όγκοι (Λέκκας, 2005).

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). 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 (Λέκκας, 2005).

A.8. Τηλεπισκόπηση και υδρολογία

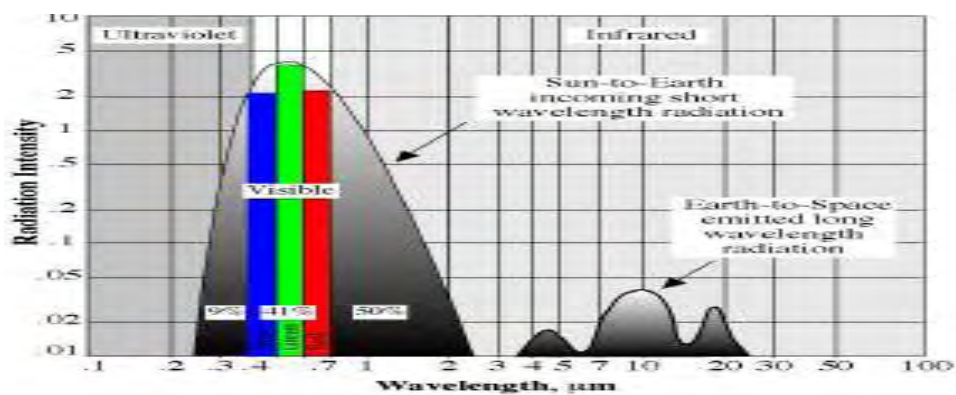
A.8.1. Τηλεπισκόπηση

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη λήψης πληροφοριών για ένα σώμα, μιας περιοχής ή παρατήρησης φαινομένων δια μέσου της ανάλυσης δεδομένων που λαμβάνονται από ένα μηχανισμό ο οποίος δε βρίσκεται σε επαφή με το αντικείμενο που μελετάται. Παρέχει μεγάλη χωρική κάλυψη, και μετρώντας ανακλώμενη και

εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δίνει τη δυνατότητα της μελέτης παραμέτρων όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία, βροχόπτωση, υγρασία εδάφους, φαινολογία, ανάπτυξη και παραγωγή.

Ο κύριος στόχος των μεθόδων τηλεπισκόπησης είναι η εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών για το περιβάλλον και των φυσικών διεργασιών που συσχετίζονται με τη γη. Η βασική αρχή των μεθόδων τηλεπισκόπησης είναι η δυνατότητα καταγραφής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που ανακλάται από διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις και να το αποθηκεύουν σε ψηφιακή μορφή (δορυφορικές εικόνες) (Δαλέζιος, 2002).

Η λήψη δορυφορικών δεδομένων είναι δυνατή σε πολλές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Εικόνα Α.5.), όπως υπεριώδες (UV), ορατό (VIS), κοντινό υπέρυθρο (NIR), μικρού μήκους κύματος (SWIR), μέσο υπέρυθρο (MIR), θερμικό υπέρυθρο (TIR), και μικροκύματα (MV). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να εισαχθούν σε μετεωρολογικά ή υδρολογικά μοντέλα ή να συνδυαστούν με άλλες περιγραφικές πληροφορίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα Α.5: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια στο χώρο της τηλεπισκόπησης τόσο λόγω της εκτόξευσης νέων δορυφόρων στο διάστημα, των οποίων η χωρική διακριτική ανάλυση ξεπερνάει το 1 m, όσο και η αύξηση της ταχύτητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έδωσε τεράστια ώθηση στις γεωεπιστήμες, στη μελέτη του περιβάλλοντος και στην αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Συγκεκριμένα, οι τομείς εφαρμογής αφορούν τη μελέτη της ατμόσφαιρας, της λιθόσφαιρας (γεωλογία, γεωμορφομετρία, υδρολογία), της βιόσφαιρας (βλάστηση, καλλιέργειες, εδάφη), της υδρόσφαιρας καθώς και τη χαρτογράφηση των χρήσεων γης και κάλυψης γης (Δαλέζιος, 2002).

Οι εφαρμογές της τηλεπισκόπησης είναι πάρα πολλές. Επιγραμματικά αναφέρονται οι ακόλουθες:

- Χαρτογράφηση κάλυψης γης και χρήσεων γης.
- Προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας, προσδιορισμός δεικτών συνθηκών βλάστησης, προσδιορισμός υδατικού ισοζυγίου.
- Ταξινομήσεις καλλιεργειών, εκτίμηση παραγωγής.
- Παρακολούθηση, εκτίμηση και αντιμετώπιση καταστροφών (φωτιές, πλημμύρες, ξηρασία, κλπ).
- Χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, γεωμορφολογική - μορφομετρική ανάλυση αναγλύφου.
- Προσδιορισμός μικρομετακινήσεων (mm) και ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM) με μετρήσεις radar και DTMs μεγάλων περιοχών.
- Εντοπισμός αρχαιολογικών χώρων - κτισμάτων.
- Παρακολούθηση θαλάσσιας ρύπανσης.

Πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της τηλεπισκόπησης είναι τα εξής:

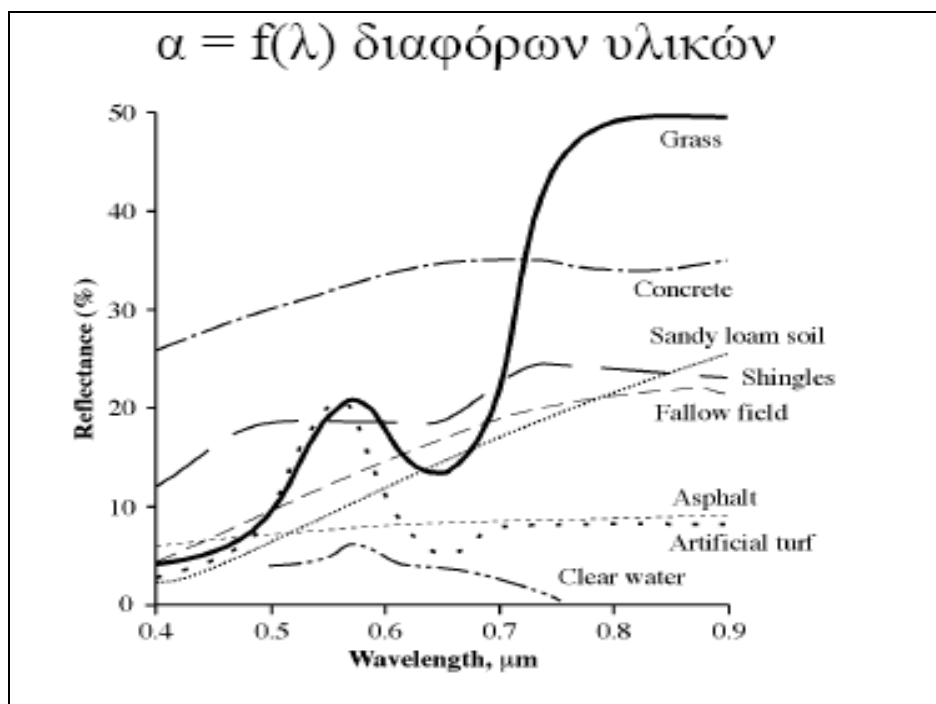
- Επιτρέπει μεγάλη έως και πλανητική χωρική κάλυψη.
- Επιτρέπει τη μέτρηση – παρατήρηση σε περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες για διάφορους λόγους. Ενδεικτικά αναφέρονται περιπτώσεις στις οποίες η απόσταση ή οι συνθήκες (ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, ραδιενέργεια κ.λ.π.) καθιστούν την πρόσβαση απαγορευτική.
- Επιτρέπει τη μείωση του κόστους των μετρήσεων, ελαττώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης κάποιων παρατηρήσεων ή μετρήσεων.
- Τέλος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί όταν δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική μέθοδος.

A.8.2. Ανάκλαση βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας

Η τηλεπισκόπηση σαν μέσο παρατήρησης του συστήματος ατμόσφαιρα - Γης βασίζεται στη μέτρηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπονται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. Η μετρούμενη από τον δορυφόρο ακτινοβολία είναι η μικρού μήκους κύματος σκεδαζόμενη ή ανακλώμενη ακτινοβολία και επίσης η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Δαλέζιος, 2002).

Ως ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας ορίζεται το ποσοστό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που ανακλάται σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (Δαλέζιος, 2002).

Κάθε υλικό έχει τη δική του φασματική υπογραφή, δηλαδή η καταγραφή της φασματικής απόκρισης του υλικού για κάθε μήκος κύματος είναι μοναδική. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την διακριτοποίηση των αντικειμένων αυτών στον χώρο μετά από επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων. Στην Εικόνα Α.6 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυρίων κατηγοριών στοιχείων (έδαφος, βλάστηση, νερό, ασφαλτος κλπ.), και διακρίνονται οι φασματικές υπογραφές κάθε αντικειμένου.



Εικόνα Α.6: Ποσοστό ανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας.

Α.8.3. Δορυφορικά συστήματα

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπιση είναι οι δορυφόροι (γεωστατικοί και ηλιοσύγχρονοι), οι οποίοι φέρουν σύγχρονα καταγραφικά όργανα που δειγματοληπτούν διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Η ταξινόμηση των δορυφορικών συστημάτων γίνεται με βάσει διάφορα κριτήρια, όπως το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ή τη διάκρισή τους σε παθητικά ή ενεργητικά, και αναλόγως τη χωρική διακριτική ικανότητά τους.

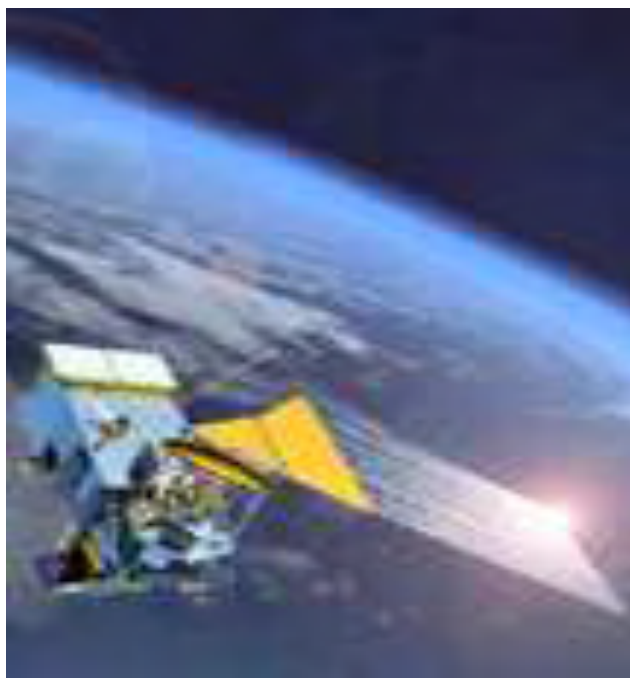
Τα παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης εξαρτώνται από το ηλιακό φως για την καταγραφή της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (δορυφόροι). Επηρεάζονται όμως από την παρουσία νεφών, ομίχλης, καπνού και σκότους (Δαλέζιος, 2002). Τα ενεργητικά συστήματα περιλαμβάνουν τηλεπισκοπικά συστήματα απεικόνισης που εκπέμπουν ενέργεια και καταγράφουν την ανακλώμενη (μετεωρολογικά και δορυφορικά Radar, περιβαλλοντικός δορυφόρος Radarsat). Η ακτινοβολία που καταγράφουν είναι μεταξύ 1cm και 1m στη φασματική περιοχή, και είναι σε θέση να διαπεράσει τα σύννεφα, την ισχυρή βροχόπτωση και την ομίχλη.

Οι κυριότεροι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι μετεωρολογικοί και περιβαλλοντικοί. Στους μετεωρολογικούς δορυφόρους ανήκουν οι γεωστάσιμοι δορυφόροι METEOSAT και οι πολικής τροχιάς NOAA. Από τους πιο γνωστούς περιβαλλοντικούς δορυφόρους είναι οι LANDSAT, SPOT και IKONOS.

Οι δορυφόροι της σειράς NOAA προήλθαν από τη μετονομασία των δορυφόρων TIROS. Η τροχιά των δορυφόρων αυτών βρίσκεται σε απόσταση 850 Km από την επιφάνεια της γης, είναι σχεδόν πολικής τροχιάς και περίοδο περιστροφής γύρω από τη γη 102 λεπτά (Δαλέζιος, 2002). Ένα από τα βασικότερα συστήματα που

μεταφέρονται στους δορυφόρους αυτούς είναι το προηγμένο ραδιόμετρο πολύ υψηλής ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας που ονομάζεται AVHRR.

Ο ανιχνευτής AVHRR έχει χωρική διακριτική ικανότητα 1,1 Km στο ναδίρ και μπορεί να σαρώσει ταυτόχρονα περιοχή 2400 Km. Η χρονική διακριτική του ικανότητα είναι 6 ώρες. Ο συγκεκριμένος δέκτης καταγράφει την ακτινοβολία που φτάνει σ' αυτόν σε πέντε φασματικές περιοχές (κανάλια): α) κανάλι 1 (0,58 - 0,68 μm, ορατό), β) κανάλι 2 (0,72 - 1,10 μm, πολύ κοντινό υπέρυθρο), γ) κανάλι 3 (3,55 - 3,93 μm, μέσο υπέρυθρο), δ) κανάλι 4 (10,5 - 11,3 μm, θερμικό υπέρυθρο), ε) κανάλι 5 (11,5 - 12,5 μm, θερμικό υπέρυθρο). Η εικόνα A.7 εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του δορυφόρου NOAA.



Εικόνα A.7: Δορυφόρος NOAA σε τροχιά γύρω από τη γη.

A.8.4. Αντικειμενικοί στόχοι της τηλεπισκόπησης στην υδρολογία

Οι αντικειμενικοί στόχοι της τηλεπισκόπησης όσον αφορά στην επιστήμη της υδρολογίας συνιστώνται στην αξιολόγηση της υδρολογικής κατάστασης μιας περιοχής χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα καθώς και στη χρήση της υπάρχουσας και μελλοντικής πληροφορίας σε υδρολογικές εφαρμογές. Επίσης μέσω της ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων δίνεται η δυνατότητα της εξαγωγής παραμέτρων και πληροφοριών χρήσιμες σε υδρολόγους και υδραυλικά έργα, προσφέροντας αμεσότητα, συχνότητα, ακρίβεια και όσο δυνατόν καλύτερη ανάλυση (Resolution). Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να συμβάλλουν στην αναγνώριση και χαρτογράφηση υδρολογικών κινδύνων σε μια λεκάνη απορροής ή σε ευρύτερη περιοχή, στον υπολογισμό της βροχόπτωσης, της μέσης κλίσης μιας λεκάνης ή της ικανότητας απορρόφησής της κλπ.

Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με χωρική και διαχρονική κάλυψη συνεισφέρουν σημαντικά σε βάσεις δεδομένων που κάνουν δυνατές τις προσομοιώσεις διαφόρων υδρολογικών φαινομένων. Τέλος, οι πληροφορίες μέσω της τηλεπισκόπησης μπορούν να αποτελέσουν δεδομένα εισαγωγής σε υδρολογικά μοντέλα συντελώντας στην ανασκόπηση της δομής και των γνωρισμάτων των υδρολογικών μοντέλων που υπάρχουν και δεν έχουν δοκιμαστεί ακόμα με δεδομένα που παίρνονται από την τηλεπισκόπηση.

B. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

B.1. Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα

Η ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε ένα τόπο μετριέται με το κατακόρυφο ύψος που θα έφτανε το νερό αν δεν συνέβαιναν απώλειες απορροής, διήθησης και εξάτμισης.

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.

B.1.1. Μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

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

- Απλή παρατήρηση (π.χ. βροχόμετρο)
- Μηχανική αυτόματη καταγραφή (π.χ. βροχογράφος)
- Ηλεκτρονική καταχώρηση
- Σύγχρονη καταχώρηση και τηλεμετάδοση

Τα κύρια όργανα μέτρησης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι:

- Βροχόμετρα
- Βροχογράφοι

- Ραντάρ
- 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. 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.

Τα βροχόμετρα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες χώρες (Εικόνα Β.1) έχουν συνήθως διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. 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. Για τη μείωση του σφάλματος που αναφέρθηκε λαμβάνονται διάφορα μέτρα και μεταξύ αυτών η χρήση βροχόμετρων 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.

Τα βροχόμετρα και οι βροχογράφοι μετρούν το ύψος των κατακρημνισμάτων, 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 κατακρημνισμάτων από ένα μόνο όργανο με τη χρήση ραντάρ ή ακόμα και με τη βοήθεια δορυφόρων.

B.1.2. Βροχομετρικοί σταθμοί - Βροχομετρικά δίκτυα

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.

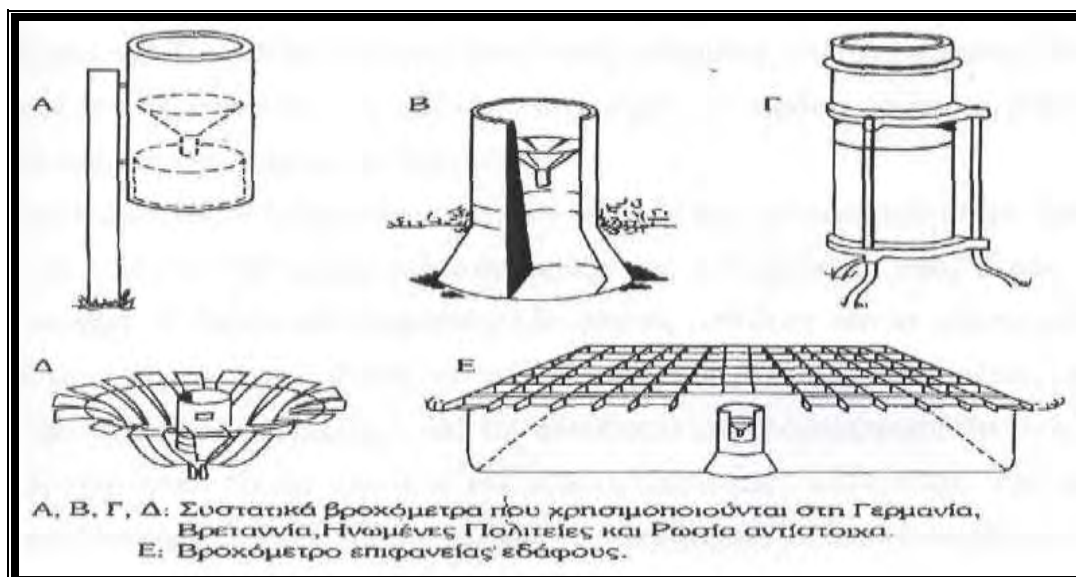
Για το λόγο αυτό τα όργανα μέτρησης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις ειδικά διαμορφωμένες και περιφραγμένες που ονομάζονται βροχομετρικοί σταθμοί.

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 (Εικόνα Β.2).

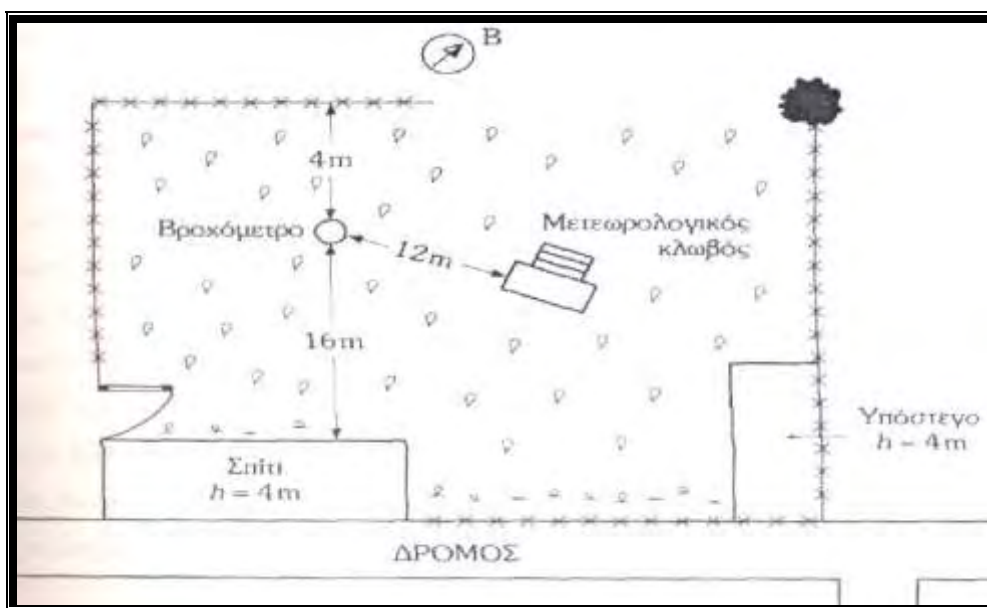
Είναι φανερό ότι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μιας περιοχής επηρεάζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και τη θέση της περιοχής σε σχέση με τη διεύθυνση των κυκλωνικών συστημάτων. Για την καταγραφή και

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.



Εικόνα Β.1 : Τύποι βροχομέτρων.



Εικόνα Β.2: Τυπική διάταξη μετεωρολογικού σταθμού με βροχόμετρο.

Β.2. Επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης απορροής

Η μέτρηση βροχής που κάνει ένα βροχόμετρο αφορά το σημείο που είναι εγκατεστημένο. Τις περισσότερες περιπτώσεις όμως 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 είναι δυνατόν με μια από τις παρακάτω μεθόδους.

Β.3. Μέθοδοι εκτίμησης επιφανειακής βροχόπτωσης

Α) 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. Ο τρόπος αυτός δίνει ένα μέσο ύψος βροχής της περιοχής και καθόλου την

κατανομή της. 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.

B) Η μέθοδος των πολύγωνων Thiessen

Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί του αριθμητικού μέσου όρου στο ότι το ύψος βροχής που παρατηρείται σε κάθε σταθμό σταθμίζεται με μια αντιπροσωπευτική έκταση. Η διαδικασία που ακολουθείται βασίζεται στο διαχωρισμό περιοχών επιρροής κάθε σταθμού στο σύνολο της λεκάνης απορροής. Οι βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής τοποθετούνται πάνω στο χάρτη και ενώνονται μεταξύ τους με ευθείες γραμμές και με τη βοήθεια των μεσοκαθέτων τμημάτων σχηματίζονται 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 της περιοχής, πολλαπλασιάζεται το ύψος βροχής κάθε σταθμού με το εμβαδόν του πολύγωνου που τον περιβάλλει, τα γινόμενα αθροίζονται και το άθροισμα διαιρείται με το συνολικό εμβαδόν της έκτασης.

Γ) 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 περιοχής, τα χαρακτηριστικά της βροχής και αλλά στοιχεία που βοηθούν στην σωστή εκτίμηση. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: σε ένα χάρτη 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.

Δ) 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.

B.4. Ανάλυση βροχομετρικών παρατηρήσεων

Αντίθετα με πολλά άλλα υδρολογικά μεγέθη η βροχόπτωση είναι μέγεθος ιδιαίτερα μεταβλητό που δύσκολα μπορεί να αποτυπωθεί και να αναλυθεί. Η βροχόπτωση επίσης έχει πολλά χαρακτηριστικά η ανάλυση των οποίων γίνεται για διαφορετικούς κάθε φορά σκοπούς.

Από ένα γεγονός βροχής που καταγράφεται σε ένα βροχομετρικό σταθμό μπορεί να ενδιαφέρει το συνολικό ύψος της βροχής, η διάρκεια της, η μέση έντασή της, η μέγιστη ένταση της και η αντίστοιχη διάρκεια, η ομοιομορφία κατανομής στο χρόνο κ.ά. Είναι γεγονός ότι όταν ως όργανα μέτρησης χρησιμοποιούνται τα απλά βροχόμετρα τότε η μόνη πληροφορία που παίρνεται άμεσα είναι το ύψος βροχής στο 24ωρο. Αν από το συνολικό ύψος βροχής του 24ώρου υπολογισθούν άλλες ενδιαφέρουσες παράμετροι θα προκύψουν σημαντικά σφάλματα και θα δώσει εσφαλμένη εικόνα της διάρκειας της βροχής.

Η αντιπροσωπευτική καταγραφή της βροχής γίνεται με τη χρήση του βροχογράφου που παράγει μια αθροιστική καμπύλη . Από την αθροιστική αυτή καμπύλη παράγεται πίνακας τιμών έντασης και ύψους βροχής για κάθε βήμα χρόνου που επιλέγουμε.

B.5. Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής

B.5.1. Εξάτμιση και Διαπνοή

Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται από τις υδάτινες μάζες, όπως οι ωκεανοί, οι λίμνες και τα ποτάμια, από τα έλη, το έδαφος και τις καλλιέργειες. Στις φυτοκαλυμμένες επιφάνειες ένα ποσοστό του εξατμιζόμενου νερού είναι νερό που περνά μέσα από το φυτό και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα, κυρίως μέσω των στομάτων. Η εξάτμιση του νερού δια μέσου του φυτού καλείται διαπνοή (Παπαϊωάννου, 1995). Ο ενιαίος λοιπόν τρόπος μελέτης, τόσο της εξάτμισης όσο και της διαπνοής οδηγεί στην υιοθέτηση και ενός ενιαίου ονόματος της εξατμισοδιαπνοής. Άρα, με τον όρο

εξατμισοδιαπνοή περιγράφεται η συνολική διεργασία μεταφοράς ύδατος στην ατμόσφαιρα από φυτοκαλυμμένες επιφάνειες.

Η μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μεταφέρεται από μια περιοχή στην ατμόσφαιρα κάτω από τις ειδικές μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής, ονομάζεται δυνητική εξατμισοδιαπνοή (potential evapotranspiration) και παριστάνεται με E_p . Στον υπολογισμό αυτό γίνεται η παραδοχή ότι η υπάρχουσα ποσότητα νερού επαρκεί για να καλύψει τις ατμοσφαιρικές απαιτήσεις (Παπαϊωάννου, 1995).

Δημιουργείται επίσης, η ανάγκη να εισαχθεί ακόμα ένας όρος, ο όρος της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (actual evapotranspiration) E_a 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 (Κανέλλου, 2006).

Διαφορετικοί όροι έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τον ορισμό της εξατμισοδιαπνοής σε περιοχές με χαμηλή βλάστηση. Αναφέρεται ως παράδειγμα ο όρος της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, η οποία ορίζεται ως η εξατμισοδιαπνοή από μια εκτεταμένη επιφάνεια, καλυμμένη με γρασίδι ομοιόμορφου ύψους 8-15 cm, που σκεπάζει εξολοκλήρου το έδαφος και έχει επάρκεια νερού (Doorenbos and Pruitt, 1977). Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) περιγράφει τη γενική ιδέα της εξατμισοδιαπνοής πάνω από καλά αρδευόμενη επιφάνεια και επιτρέπει την ανεξαρτησία από κάθε ιδιαίτερη μέθοδο υπολογισμού του φαινομένου (Παπαϊωάννου, 1995).

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, που χρησιμοποιείται ως ένα από τα δεδομένα εισόδου στα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου. 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 των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου της παρούσας εργασίας. Τέλος, ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

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 δυναμική 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 άντληση των φυσικών λιμνών που απαιτούνται για την οικιακή και βιομηχανική παροχή, την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, τις μονάδες ψύξης των υδροηλεκτρικών σταθμών, της ναυτιλίας κλπ. (Κανέλλου, 2006).

B.5.2. Μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για την άμεση και έμμεση μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να διακριθούν σε δύο

γενικές κατηγορίες, στις μεθόδους Υδατικού Ισοζυγίου και στις Μικρομετεωρολογικές μεθόδους.

A) Μέθοδοι Υδατικού Ισοζυγίου

Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσω της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου και διακρίνονται σε άμεση και έμμεση μέτρηση του φαινομένου.

- Έμμεση Μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής: Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί σαν υπολειπόμενος όρος της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου, ενώ οι άλλες συνιστώσες είτε μετρώνται είτε υπολογίζονται. Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια της μέτρησης των παραμέτρων της εξίσωσης. Τα σφάλματα στην μέτρηση αυτή των παραμέτρων είναι μερικές φορές πολύ σημαντικά (Παπαϊωάννου, 1995).

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.

Τα σφάλματα που συνδέονται με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου την κάνουν μη επαρκή σε ημερήσια βάση. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεγάλες εκτάσεις, το κύριο πρόβλημα δεν είναι αυτή καθ' αυτή η μέθοδος, αλλά 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: Μια χρησιμοποιούμενη και δυνητικά ίσως η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης εξατμισοδιαπνοής είναι η μέτρηση της με τα ζυγιζόμενα λυσίμετρα, όπου κάθε συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου μετριέται ακριβώς, και η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύεται άμεσα σαν απώλεια βάρους (Παπαϊωάννου, 1995).

B) 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.

B.6. 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.

Τα μοντέλα προσομοίωσης της εξατμισοδιαπνοής ποικίλουν, από αυτά που έχουν φυσικό υπόβαθρο και αναφέρονται στις φυσικές διεργασίες που διέπουν την εξατμισοδιαπνοή, ως τα πλέον απλά που βασίζονται σε συσχετίσεις της εξατμισοδιαπνοής με μια άλλη παράμετρο. Τα διάφορα μοντέλα για τη δυνητική και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, ταξινομούνται σε εκείνα που βασίζονται σε συσχετίσεις και σε εκείνα που βασίζονται στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής (Παπαϊωάννου, 1995).

A) 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 και οι μέθοδοι απλές. 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. Τα μοντέλα της συγκεκριμένης κατηγορίας κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις τύπους ανάλογα την παράμετρο στην οποία βασίζονται.

- Μοντέλα βασισμένα στην ηλιακή ακτινοβολία (Jensen-Haise, 1963; Μέθοδοι παλινδρόμησης και Μέθοδος Makkink, 1957).
- Μοντέλα βασισμένα στη θερμοκρασία (Thorthwaite, 1948; Blaney-Criddle, 1950; Hargreaves, 1974; Linacre, 1977).
- Μοντέλα βασισμένα στην υγρασία (Rohwer, 1931; Penman, 1948; Harbeck, 1962).
- Μοντέλα βασισμένα σε μετρήσεις εξατμισίμετρων (Μέθοδος εξατμισιμέτρου λεκάνης, Μέθοδος ατμομέτρου).

B) Μοντέλα βασισμένα στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής

Τα πιο γνωστά από αυτά τα μοντέλα είναι:

- Μέθοδοι Συνδυασμού (Combination methods).
- Μέθοδος Εξατμισοδιαπνοής Ισορροπία
- Μέθοδος των Priestley-Taylor.

Γ. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Γ.1. Γενικές αρχές προσομοίωσης

Η θεωρητική τεκμηρίωση του φυσικού φαινομένου, καθώς και το σύνολο των αναλυτικών εξισώσεων που αποτελούν μοντέλο με το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί το φυσικό αυτό φαινόμενο, θα πρέπει να στηρίζεται σε σαφείς και παραδεκτές μαθηματικές μεθοδολογίες και παραδοχές και να διατυπώνονται ρητά οι απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις καθώς και η συγκεκριμένη ακολουθία τους (Δαλέζιος, 1999).

Λογική ανάλυση του ομοιώματος. Η διαδικασία αυτή καταλήγει τελικά στη διατύπωση ορισμένων και σαφών βημάτων που πρέπει να γίνουν διαδοχικά ή συγχρόνως για να λυθεί το συγκεκριμένο μοντέλο και να προσομοιωθεί έτσι το φυσικό φαινόμενο.

Επίλυση του ομοιώματος. Το σύνολο των οδηγιών που θα δώσουμε στον Η/Υ αποτελεί έναν αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυαζόμενος με τους υπάρχοντες στον υπολογιστή νόμους λειτουργίας του θα δώσει ένα αιτιοκρατικά (deterministic) προκαθορισμένο αποτέλεσμα.

Σχεδίαση του ομοιώματος σε πηγαία μορφή. Το επόμενο βήμα στην δημιουργία του ομοιώματος είναι η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού και τη σύνταξη του κώδικα. Με το τέλος του γραψίματος ο τύπος του προγράμματος που έχουμε δημιουργήσει λέγεται πηγαίος κώδικας.

Μετατροπή του πηγαίου σε εκτελέσιμο κώδικα. Η μετατροπή του πηγαίου κώδικα σε εκτελέσιμο κώδικα γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο μέρος γίνεται μετάφραση του κώδικα από την γλώσσα προγραμματισμού στη γλώσσα μηχανής με τον μεταγλωττιστή

(compiler) που είναι γνωστός σαν αντικειμενικός κώδικας. Το δεύτερο στάδιο είναι η σύνδεση των λειτουργικών μονάδων του αντικειμενικού κώδικα.

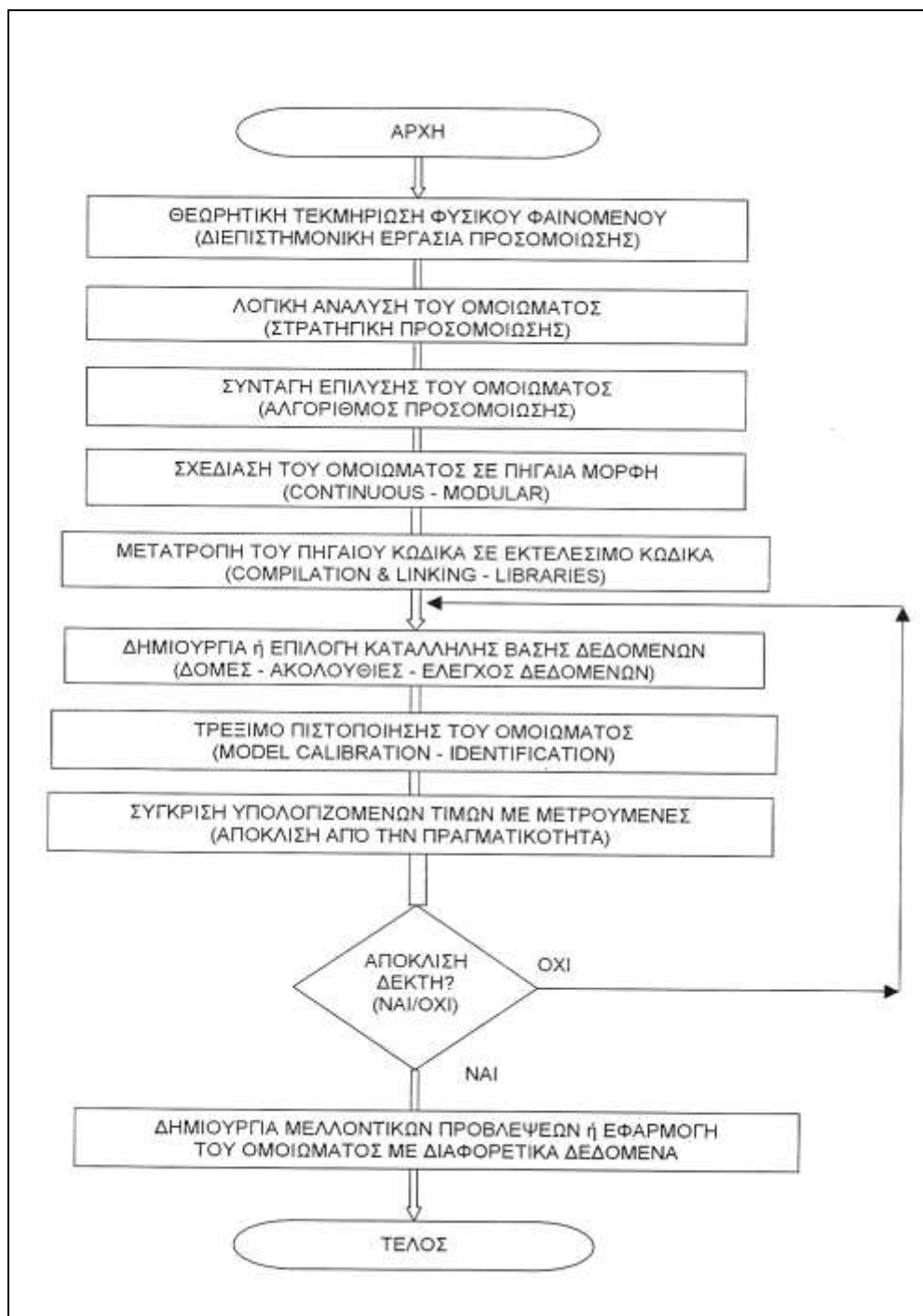
Δημιουργία ή επιλογή κατάλληλης βάσης δεδομένων. Για την εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων καθώς και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

"Τρέξιμο" πιστοποίηση του ομοιώματος. Ο κύριος στόχος της πιστοποίησης είναι να διορθωθούν λάθη εκτέλεσης (Run Time Errors) και να ληφθούν υπ' όψη οι διάφορες προειδοποιήσεις του συστήματος που αφορούν τις δηλώσεις μεταβλητών αλλά και των διαφόρων υπορουτίνων.

Σύγκριση υπολογιζόμενων τιμών με μετρούμενες. Μετά το "τρέξιμο" του ομοιώματος τα εξαγόμενα του, που προκύπτουν από τη χρησιμοποιούμενη σειρά δεδομένων συγκρίνονται με τη σειρά μετρήσεων, με διαγραμμάτων ή με την εύρεση της κατανομής των διαφόρων υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών και την εύρεση της κατανομής των διαφόρων σφαλμάτων και τέλος με την στατιστική επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις παρατηρήσεις.

Οι γενικές αρχές προσομοίωσης που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται σχηματικά στο Εικόνα Γ.1 (Δαλέζιος, 2001).

Όποιος όμως και να είναι ο τρόπος ελέγχου των αποτελεσμάτων του ομοιώματος, επιπρόσθετα θα πρέπει να ελεγχθούν και τα παρακάτω χαρακτηριστικά του ομοιώματος (Δαλέζιος, 1999).



Εικόνα Γ.1: Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας ενός μοντέλου.

- ✓ *Η ευαισθησία του ομοιώματος (Mondel Sensitivity)*

Αναφέρεται στον βαθμό ευαισθησίας του ομοιώματος όταν αλλάζουμε κάποια από τις αρχικά παραδεκτές συνθήκες ή παραμέτρους τηρουμένων των άλλων σταθερών.

- ✓ *Η σταθερότητα του ομοιώματος (Model Stability)* Αναφέρεται στο εύρος των δυνατών χρησιμοποιούμενων πακέτων δεδομένων και αρχικών και οριακών συνθηκών τα οποία το ομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιήσει, μέσα στα όρια της ευαισθησίας του, για την προσομοίωση του φυσικού φαινομένου.

- ✓ *Η ταχύτητα σύγκλισης του ομοιώματος (Model Convergence)* Σε όλα τα ομοιώματα που χρησιμοποιούν κάποιους εμπειρικούς, κυρίως συντελεστές (ιδιαίτερα σε ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων) ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι η ταχύτητα σύγκλισης τους (Convergence Speed).

- ✓ *Δημιουργία Μελλοντικών Προβλέψεων.* Αφού το μοντέλο πιστοποιηθεί με τη χρησιμοποιούμενη σειρά των δεδομένων και καταδειχθεί σαφώς η δυνατότητα του στο να προσομοιάζει το φυσικό φαινόμενο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σειράς προβλέψεων για τη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος στο μέλλον. Η αρχή που ακολουθείται είναι η δημιουργία χρονολογικών σειρών προβλέψεων διάρκειας όχι μεγαλύτερης εκείνης της χρονικής σειράς των δεδομένων χρησιμοποιούμενων για την ταυτοποίηση του ομοιώματος (Δαλέζιος, 1999).

Γ.2. Μέθοδοι προσομοίωσης

Το υδρολογικό μοντέλο ορίζεται σαν ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή

(Καϊμάκης και Καββαδίας, 1995). Τα εισαγωγικά δεδομένα ενός υδρολογικού μοντέλου είναι οι μετεωρολογικές μεταβλητές (κατακρημνίσεις, θερμοκρασία, άνεμος, κλπ.). Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Τα μοντέλα ενός μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος, που περιλαμβάνουν ως εισαγωγικά δεδομένα ένα μεμονωμένο γεγονός βροχής και το εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι ένα υδρογράφημα πλημμύρας.
- Τα συνεχή μοντέλα που περιλαμβάνουν ως εισαγωγικά δεδομένα μια ή περισσότερες σειρές παρατηρήσεων στο χρόνο (χρονοσειρές) μίας ή περισσότερων μετεωρολογικών μεταβλητών.
- Τα ενιαία ή αδρομερή μοντέλα που βασίζονται στην υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής των μεγεθών εισόδου (βροχή, κλπ.) και εξόδου (απορροής).
- Τα κατανεμημένα μοντέλα, σε αντίθεση με τα ενιαία, βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής κατανομής των μεγεθών εισόδου και εξόδου στη λεκάνη απορροής. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν το διαχωρισμό της λεκάνης σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά.

Τα συνεχή μοντέλα βροχής-απορροής μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δύο κριτήρια (Καϊμάκης και Καββαδίας, 1995):

- ✓ Το κριτήριο είδους εξισώσεων. Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε φυσικά ή φυσικής βάσης, παραμετρικά ή εννοιολογικά και μοντέλα μάρου κουτιού.

✓ Το κριτήριο που βασίζεται στο αν λαμβάνεται υπ' όψιν η τυχαιότητα των φαινομένων. Με βάση το κριτήριο αυτό τα μοντέλα ταξινομούνται σε προσδιοριστικά και στοχαστικά.

α. Τα προσδιοριστικά φυσικά μοντέλα βασίζονται στις εξισώσεις της φυσικής δηλαδή στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν ένα σύνολο περίπλοκων μαθηματικών εξισώσεων και συνήθως περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Επίσης τα μοντέλα αυτά απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Τέτοια μοντέλα έχουν εφαρμοσθεί μόνο σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, για τις οποίες υπάρχουν τα δεδομένα εισόδου.

β. Τα προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα προσομοιώνουν τη σχέση βροχής-απορροής βασιζόμενα σε ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά είναι πολύ διαδεδομένα και περιλαμβάνουν παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται από τη διαδικασία "ρύθμισης" του μοντέλου. Η διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου, είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος συνίσταται στην αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, έτσι ώστε οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων παροχών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες .

γ. Τα προσδιοριστικά μοντέλα "μαύρου κουτιού" βασίζονται σε απλές μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες προσομοιώνουν ικανοποιητικά το υδρογράφημα της μετρημένης παροχής. Ένα παράδειγμα τέτοιου μοντέλου είναι το μοναδιαίο υδρογράφημα.

δ. Τα στοχαστικά μοντέλα "μαύρου κουτιού" είναι μοντέλα τα οποία υπολογίζουν τη μεταβλητή εξόδου (απορροή) λαμβάνοντας υπ' όψιν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής εισόδου (βροχή), υπό τον όρο να διατηρούνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετρημένης παροχής (π.χ. μέσος, διασπορά, αυτοσυσχέτιση, διασταυρούμενη συσχέτιση κλπ) (π.χ. μοντέλο ARIMA).

ε. Τα στοχαστικά παραμετρικά και φυσικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εισόδου και συγχρόνως περιλαμβάνουν εξισώσεις που απεικονίζουν τις βασικές διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή.

Γ.3. Περιγραφή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου

Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφονται τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτά τα μοντέλα είναι:

- Abulohom (Abulohom *et al*, 2001)
- Loukas (Χονδρονίκου, 2004)
- GR2M (Makhlouf and Michel, 1994)
- Giakoumakis (Giakoumakis *et al*, 1991)
- L. Xiong and S. Guo (Xiong and Guo, 1999)

Γ.3.1. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Abulohom

Το μοντέλο Abulohom έχει προταθεί πρόσφατα (Abulohom *et al*, 2001) και είναι ένα μοντέλο πέντε παραμέτρων. Στο μοντέλο οι τιμές τριών παραμέτρων, α_1 , α_2 ,

a_3 , προσδιορίζονται με βελτιστοποίηση. Οι τιμές των άλλων δύο παραμέτρων, b_1 , b_2 , παίρνουν διακριτές τιμές.

Το μοντέλο Abulohom διακρίνει τη συνολική απορροή σε δύο συνιστώσες: την άμεση απορροή και την βασική απορροή.

Η εξίσωση με την οποία υπολογίζεται η άμεση απορροή είναι:

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

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:

$$(P_a)_j = P_j - (E_a)_j \{ 1 - \exp [-P_j / (E_a)_j] \} \quad (\Gamma.2)$$

Στην εξίσωση (Γ.2) P_j είναι η βροχόπτωση του μήνα j και $(E_a)_j$ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή του μήνα j .

Η εξίσωση με την οποία υπολογίζεται η βασική απορροή είναι:

$$(R_g)_j = a_2 (m_{j-1})^{b_2} \quad (\Gamma.3)$$

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

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα ζεύγη των τιμών (a_1, b_1) και (a_2, b_2) είναι υψηλά συσχετισμένα μεταξύ τους. Τα b_1, b_2 παίρνουν συγκεκριμένες διακριτές τιμές: $b_1 = (0, 0.5, 1, 2)$ και $b_2 = (0.5, 1, 2)$. Φυσικά για κάθε λεκάνη απορροής χρησιμοποιείται μια μόνο τιμή για κάθε παράμετρο.

Η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στο m_j , στο τέλος του μήνα j δίδεται από την εξίσωση (Γ.4)

$$m_j = m_{(j-1)} + P_j - (E_a)_j - (R_c)_j \quad (\Gamma.4)$$

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

$$(R_c)_j = (R_d)_j + (R_g)_j \quad (\Gamma.5)$$

Το αποτέλεσμα της σχέσης (Γ.4) είναι η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στο τέλος του τρέχοντα μήνα και ταυτόχρονα η αποθηκευμένη εδαφική υγρασία στην αρχή του επόμενου μήνα.

Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή, $(E_a)_j$, βασίζεται σε δύο ποσότητες: στη διαθέσιμη αποθηκευμένη υγρασία για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα j και στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή $(E_p)_j$ του μήνα j . Δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$(E_a)_j = \min [(E_p)_j (1 - a_3^{w_j/(E_p)_j}), w_j] \quad (\Gamma.6)$$

όπου, w_j η διαθέσιμη αποθηκευμένη υγρασία για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα j , η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$w_j = P_j + m_{j-1} \quad (\Gamma.7)$$

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

Γ.3.2. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Loukas

Το μοντέλο αυτό διακρίνει τη συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και τη βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Σύμφωνα με το μοντέλο πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_a του μήνα j εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα, και τη μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p του

μήνα. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win (Vandewiele and Win, 1998):

$$E_a(j) = \min\{E_p(j) * (1 - a^{S_{moist}(j)/E_p(j)}), S_{moist}(j)\} \quad (\Gamma.8)$$

όπου $S_{moist}(j)$ η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα j για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, a ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ($0 < a < 1$), και $E_p(j)$ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα. Η επιφανειακή απορροή, SR , του μήνα j υπολογίζεται ως:

$$SR(j) = (1 - K) * (AS_{moist}(j) - S_{max}) \text{ εάν } AS_{moist}(j) > S_{max} \quad (\Gamma.9)$$

ή

$$SR(j) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(j) < S_{max} \quad (\Gamma.10)$$

όπου, $AS_{moist}(j) = S_{moist}(j) - E_a(j)$, η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα μετά την ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, $S_{max} = (25400/CN) - 254$ η μέγιστη εδαφική υγρασία, CN το Curve Number της Soil Conservation Method (SCS, 1972) ($0 < CN < 100$), και K ο συντελεστής κατείδυσης ($0 < K < 1$).

Η διήθηση προς τον υπόγειο υδροφόρο, D , του μήνα j υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(j) = K * (AS_{moist}(j) - S_{max}) \text{ εάν } AS_{moist}(j) > S_{max} \quad (\Gamma.11)$$

ή

$$D(j) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(j) < S_{max} \quad (\Gamma.12)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα j , N_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{moist}(j) = AS_{moist}(j) - SR(j) - D(j) \quad (\Gamma.13)$$

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία, MR , τον μήνα j υπολογίζεται ως:

$$MR(j) = \beta * [N_{moist}(j-1) + N_{moist}(j)] \quad (\Gamma.14)$$

όπου, β ο συντελεστής ενδιάμεσης απορροής ($0 < \beta < 1$).

Η υπολειπόμενη υγρασία στο τέλος του μήνα j , NS_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NS_{moist}(j) = N_{moist}(j) - MR(j) \quad (\Gamma.15)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα $j+1$ είναι:

$$S_{moist}(j+1) = P(j+1) + NS_{moist}(j) \quad (\Gamma.16)$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα, Q_g , του μήνα j υπολογίζεται από τη διήθηση, D , του προηγούμενου μήνα $j-1$, από τη σχέση:

$$Q_g(j) = \gamma * D(j-1) \quad (\Gamma.17)$$

όπου γ ο συντελεστής βασικής απορροής ή συντελεστής εκροής του υδροφορέα ($0 < \gamma < 1$).

Τέλος, η συνολική απορροή, Q_c , υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, ενδιάμεσης απορροής και βασικής απορροής:

$$Q_c(j) = SR(j) + MR(j) + Q_g(j) \quad (\Gamma.18)$$

Το μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου Loukas *et al*, είναι ένα μοντέλο πέντε παραμέτρων. Είναι όμως δυνατόν δύο από τους παραμέτρους του μοντέλου, το CN και ο συντελεστής κατεΐσδυσης, K , να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς αναλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες, και χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας

έτσι σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να προσδιορισθούν με τη βοήθεια μεθόδων βελτιστοποίησης.

Γ.3.3. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Giakoumakis

Σύμφωνα με το μοντέλο Giakoumakis (Giakoumakis *et al*, 1991; Τσακίρης, 1995; Ψιλοβίκος και Ζαρκάδας, 2006) το υδατικό ισοζύγιο λειτουργεί στην ανώτερα επιφανειακή ζώνη του εδάφους. Η εδαφική αυτή ζώνη του ριζοστρώματος, θεωρείται ως δεξαμενή αποθήκευσης μέγιστης χωρητικότητας S_{max} , στην οποία η ποσότητα S_j παριστάνει τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία κατά το μήνα j . Επομένως η διάφορα ($S_{max} - S_j$) 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_j και μειώνεται τόσο από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_{pj} , όσο και από την βαθιά διήθηση D_j .

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι η εξής:

$$S'_j = S_{j-1} + P_j - E_{pj} \quad (\Gamma.19)$$

όπου, S_j η διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα j , $0 < S < S_{max}$, P_j το ύψος της μηνιαίας βροχόπτωσης, και E_{pj} η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής S_j , το αντίστοιχο ύψος επιφανειακής απορροής του μήνα j , h_{oj} , εκτιμάται ως ακολούθως :

$$\text{Εάν } S'_j < 0 \text{ τότε: } S_j = 0, h_{oj} = 0, D_j = 0 \quad (\Gamma.20)$$

όπου, D_j το ύψος βαθιάς διήθησης το μήνα j

$$\text{Εάν } 0 < S'_j < S_{max} \text{ τότε: } S_j = S'_j, h_{oj} = 0, D_j = 0 \quad (\Gamma.21)$$

$$\text{Εάν } S'_j > S_{max} \text{ τότε:}$$

$$S_j = S_{\max}, h_{oj} = K' (S'_j - S_{\max}), D_j = K (S'_j - S_{\max}) \quad (\Gamma.22)$$

όπου $K' = 1 - K$.

Στο μοντέλο περιέχονται δυο παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν: η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία, S_{\max} , της επιφανειακής εδαφικής ζώνης 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, ο συντελεστής βαθιάς διήθησης, K , και η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία, S_{\max} , μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εξίσωση της Soil Conservation Service (Soil Conservation Service, 1972):

$$S_{\max} = 25.4 [(1000/CN) - 10] \quad (\Gamma.23)$$

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

Γ.3.4. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου GR2M

Σύμφωνα με το μοντέλο GR2M (Makhouf and Michel, 1994) αποτελείται από δύο δεξαμενές, οι οποίες αποθηκεύουν νερό και συμβολίζονται ως H και S . Για κάθε μήνα έχουμε σαν εισαγόμενα στοιχεία την βροχόπτωση R και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, E .

$$R_n = R - [RE / (R^{1/2} + E^{1/2})^2] \quad (\Gamma.24)$$

$$E_n = E - [RE / (R^{1/2} + E^{1/2})^2] \quad (\Gamma.25)$$

$$R'_n = X_1 R_n \quad (\Gamma.26)$$

$$E'_n = X_1 E_n \quad (\Gamma.27)$$

$$H_1 = (H + AV) / [1 + (HV/A)] \quad (\Gamma.28)$$

όπου $A = 200 \text{ mm}$ και $V = \tanh(R'_n / A)$

$$R_e = R'_n = H - H_1 \quad (\Gamma.29)$$

$$H_2 = H_1 (1 - W) / \{1 + W [1 - (H_1/A)]\} \quad (\Gamma.30)$$

$$\text{Με } W = \tanh(E'_n / A)$$

Η δεύτερη αποθήκη που αρχικά είναι στο επίπεδο S , δέχεται $(4/5 R_e)$ και τελικά γίνεται:

$$S_1 = S + (4/5 R_e) \quad (\Gamma.31)$$

Και δίνει παροχή Q_s

$$Q_s = X_2 S_1 \quad (\Gamma.32)$$

$$S_2 = S_1 - Q_s \quad (\Gamma.33)$$

Τελικά η μηνιαία συνολική απορροή είναι:

$$Q = Q_s + (R_e / 5) \quad (\Gamma.34)$$

Τα H_2 και S_2 είναι έτοιμα να χρησιμοποιηθούν στον επόμενο μήνα.

Το μοντέλο GR2M έχει δύο ελεύθερες παραμέτρους X_1 και X_2 και άλλες δύο που μπορούν να πάρουν ορισμένες τιμές. Επειδή το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί σε 91 λεκάνες απορροής στην Γαλλία, έχει υπολογισθεί ότι για την συγκεκριμένη περιοχή η ελάχιστη χωρητικότητα είναι $A = 200 \text{ mm}$ και η άλλη παράμετρος, που είναι η υπόγεια απορροή, είναι ίση με το 20% της συνολικής εισροής.

Αυτές οι τιμές των A και a μπορούν βέβαια να αλλάζουν ανάλογα την περιοχή, λόγω της τοπογραφίας, των γεωλογικού υπόβαθρου και του κλίματος. Μόνο οι παράμετροι X_1 και X_2 βελτιστοποιούνται αν δοθούν οι κατάλληλες τιμές για τις άλλες παραμέτρους.

Γ.3.5. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου L. Xiong - S. Guo

Το τελευταίο από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι των Lihua Xiong, Shenglian Guo, 1998. Είναι ένα μοντέλο δύο παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της απορροής σε εβδομήντα λεκάνες απορροής στην Νότιο Κίνα. Το μοντέλο είναι σχετικά απλό σε σχέση με άλλα μοντέλα περισσότερων παραμέτρων. Σε σχέση με άλλα μοντέλα μια ακόμη διαφορά είναι ότι χρησιμοποιείται η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (actual evapotranspiration). Οι περιοχές που μπορεί αυτό το μοντέλο να δώσει καλά αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τους Xiong- Guo υγρές και ημι-υγρές λεκάνες απορροής.

$$E(t) = EP(t) * \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (\Gamma.35)$$

όπου $E(t)$ η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή, $EP(t)$ η πραγματική ετήσια εξάτμιση, $P(t)$ η πραγματική ετήσια βροχόπτωση

Από την σχέση (Γ.35) συνεπάγεται ότι :

$$E(t) / EP(t) = \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (\Gamma.36)$$

Επειδή χρειάζεται η πραγματική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή η εξίσωση μετά από πολλές δοκιμές γίνεται:

$$E(t) = c * EP(t) * \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (\Gamma.37)$$

όπου c η πρώτη παράμετρος του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό της μηνιαίας απορροής ο τύπος είναι ο παρακάτω:

$$Q(t) = S(t) * \tanh[S(t) / SC] \quad (\Gamma.38)$$

$$S(t) = S(t-1) + P(t) - E(t) - Q(t) \quad (\Gamma.39)$$

όπου $Q(t)$ η μηνιαία απορροή, $S(t)$ η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, SC είναι ο συμβολισμός της χωρητικότητας της περιοχής. Αυτή είναι η δεύτερη παράμετρος του μοντέλου και η μονάδα είναι σε χιλιοστά.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Σύγκριση στατιστικών αποτελεσμάτων παραμέτρων απορροής διαμέσου της εφαρμογής των μοντέλων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων και για τα πέντε διαφορετικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης, όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας δορυφορικά και επίγεια δεδομένα καθώς και τους συνδυασμούς αυτών, για τις περιόδους της βελτιστοποίησης, πιστοποίησης και ολόκληρης της χρονοσειράς δεδομένων.

3.1.1 Απορροές με δορυφορικά δεδομένα

Από τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρήχθησαν οι πίνακες με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί, για ολόκληρη την χρονοσειρά από Οκτώβριο 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Οι πίνακες έχουν αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων για τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους .

Ο Πίνακας 3.1 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Η χρονοσειρά βαθμονόμησης (Calibration) ορίζεται από τον Οκτώβριο 1981 έως τον Σεπτέμβριο 1987, και η χρονοσειρά πιστοποίησης (Validation) από Οκτώβριο 1987 έως και τον Σεπτέμβριο 1993.

Για το μοντέλο Abulohom η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.75$ στην πιστοποίηση και $Eff = 0.71$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.76$. Επίσης γίνεται υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -8.38$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 50.58$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι σχετικά μεγάλο $BIAS = 7.57$. Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.71$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.71$. Γίνεται πιο ελαφριά υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -1.21$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 49.97$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = 1.07$.

Για το μοντέλο GR2M η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.78$ για όλη την χρονοσειρά που είναι πολύ καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.72$. Γίνεται ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 3.36$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 50.30$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = -3.04$.

Για το μοντέλο Giakoumakis η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.47$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.57$. Γίνεται υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -26.67$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 67.62$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = 24.16$.

Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.65$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.67$. Γίνεται υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου

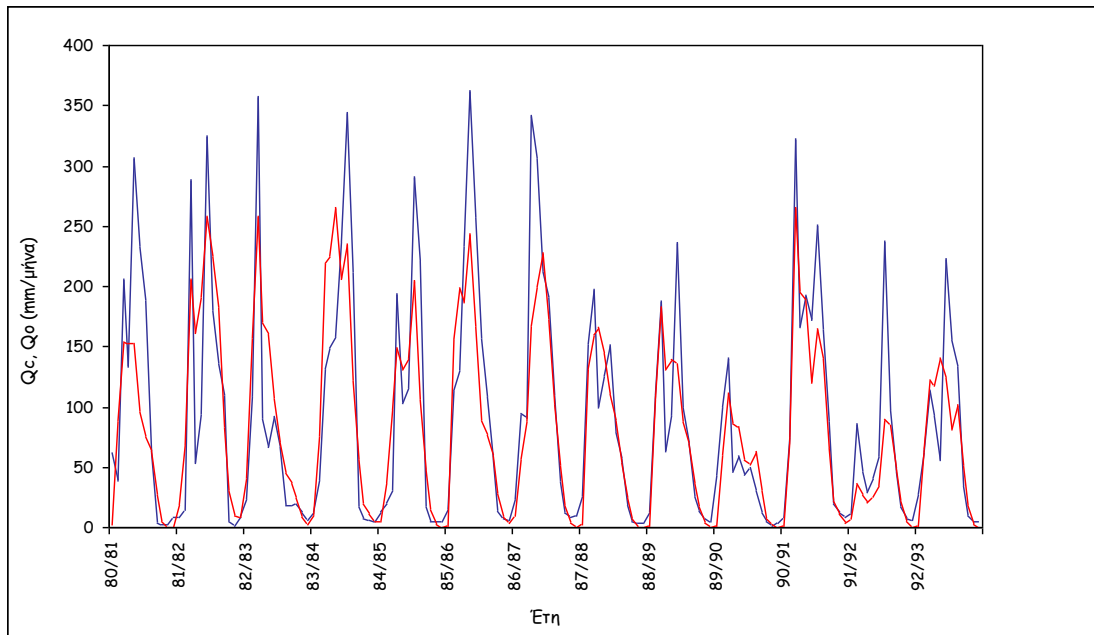
$\Delta V = 9.03$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 54.93$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = -8.18$.

Τα αποτελέσματα όλων των στατιστικών φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1. Επίσης τα διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες φαίνονται στο Παράρτημα 1 για όλα τα μοντέλα, και ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες 3.1,3.2,3.3,3.4, τα διαγράμματα για το μοντέλο Abulohom.

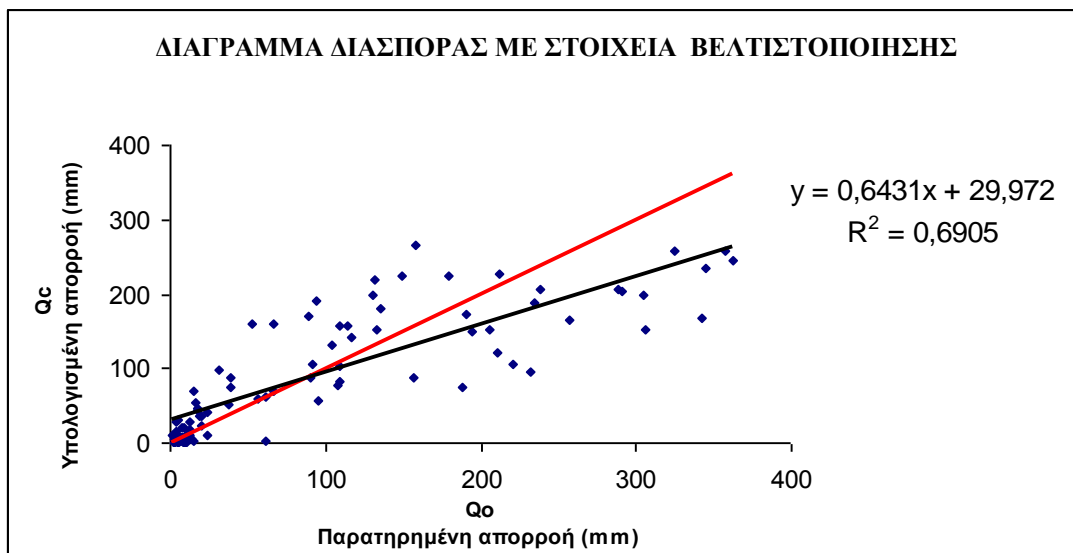
Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Statistics	Abulohom			Loukas			GR2M			Giakoumakis			Xiong-Guo		
	Cal	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.69	0.75	0.71	0.72	0.69	0.71	0.71	0.78	0.78	0.43	0.58	0.47	0.63	0.72	0.65
R²	0.69	0.76	0.72	0.72	0.68	0.71	0.69	0.77	0.72	0.51	0.69	0.57	0.72	0.64	0.67
Qmsim	95.7	67.02	82.46	101.34	74.43	88.92	106.92	76.83	93.03	77.40	52.70	77.47	110.30	83.94	98.14
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-6.37	-11.54	-8.38	-0.86	-11.51	-1.21	4.60	1.40	3.36	-24.27	-30.45	-26.67	7.91	10.80	9.03
RMSE	59.68	37.43	50.58	56.13	41.75	49.97	68.74	35.39	50.30	80.82	48.42	67.62	65.19	39.97	54.93
BIAS	6.58	8.74	7.59	0.89	1.33	1.07	-4.75	-1.06	-3.04	25.11	23.06	24.16	-8.18	-8.29	-8.18

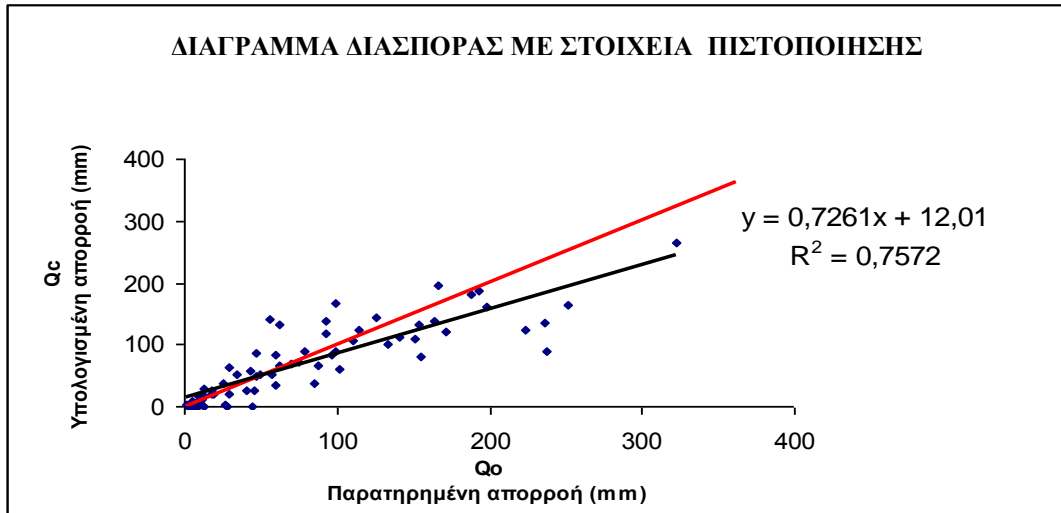
* Cal: Calibration (χρονοσειρά Βαθμονόμησης) (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1987)
 Val: Validation (χρονοσειρά Πιστοποίησης) (Οκτ.1987 – Σεπτ. 1993)
 Period: Πλήρης χρονοσειρά (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1993)



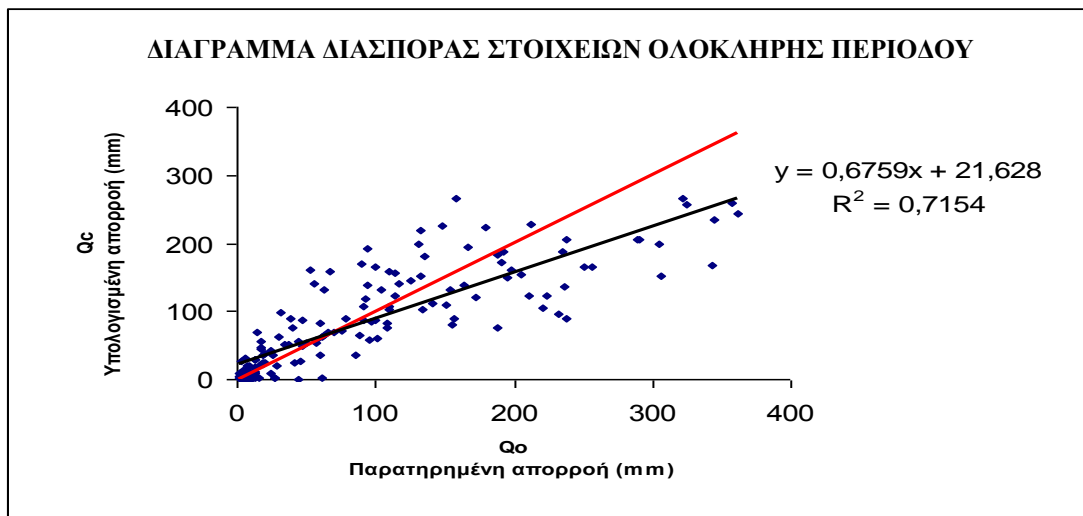
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο AbuIshom της χρονοσειράς πιστοποίησης.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο AbuIshom για ολόκληρη τη χρονοσειρά των δεδομένων.

3.1.2 Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή από δορυφόρο

Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων

δεδομένων θερμοκρασίας και εξαμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Από την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρήχθησαν οι πίνακες με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί, για ολόκληρη την χρονοσειρά από Οκτώβριο 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Ο Πίνακας 3.2 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξαμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Η χρονοσειρά βαθμονόμησης (Calibration) ορίζεται από τον Οκτώβριο 1981 έως τον Σεπτέμβριο 1987, και η χρονοσειρά πιστοποίησης (Validation) από Οκτώβριο 1987 έως και τον Σεπτέμβριο 1993.

Για το μοντέλο Abulohom η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.79$ στην πιστοποίηση και $Eff = 0.72$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.72$. Επίσης γίνεται ελαφριά υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -1,23$ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 49.15$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι σχετικά μεγάλο $BIAS = 7.57$.

Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.73$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.73$. Γίνεται πιο ελαφριά υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου

$\Delta V = -2.33$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 48,44$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = 2.11$.

Για το μοντέλο GR2M η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.79$ για όλη την χρονοσειρά που είναι πολύ καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.72$. Γίνεται ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 3.19$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 49.55$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = -2.89$.

Για το μοντέλο Giakoumakis η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.51$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.60$. Γίνεται υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -26.01$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 65.30$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = 23.56$.

Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.67$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.69$. Γίνεται υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 8.61$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 53.56$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = -7.80$.

Τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εφαρμογής φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Επίσης διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και διαγράμματα διασποράς, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες φαίνονται στο Παράρτημα 2 για όλα τα μοντέλα, και ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες 3.5,3.6,3.7,3.8, τα διαγράμματα για το μοντέλο Abulohom.

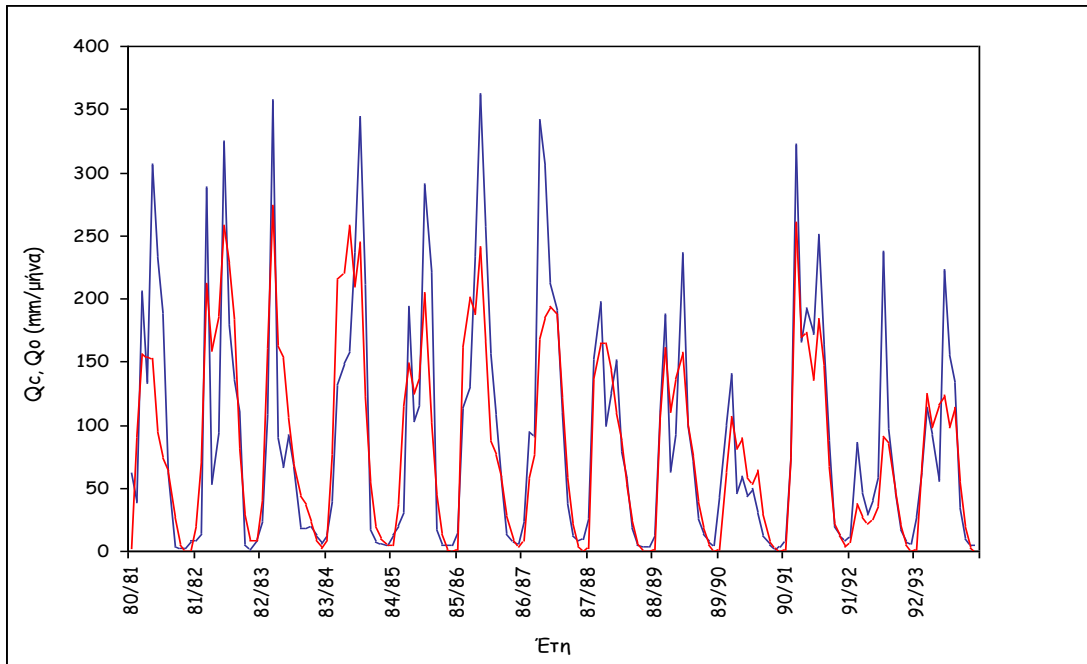
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Statistics	Abulohom			Loukas			GR2M			Giakoumakis			Xiong-Guo		
	Cal	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.69	0.79	0.72	0.73	0.74	0.73	0.72	0.82	0.79	0.44	0.67	0.51	0.64	0.76	0.67
R²	0.70	0.81	0.72	0.72	0.74	0.73	0.70	0.80	0.72	0.52	0.76	0.60	0.64	0.78	0.69
Qmsim	98.04	66.91	82.48	100.95	72.68	87.90	106.72	76.73	92.88	78.10	53.17	78.17	109.92	83.56	97.76
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-6.36	-11.51	-8.36	-1.23	-4.06	-2.33	4.41	1.28	3.19	-23.59	-29.82	-26.01	7.54	10.30	8.61
RMSE	59.27	33.93	49.15	55.49	38.75	48.44	60.10	33.49	49.55	79.72	43.07	65.30	63.56	36.75	53.56
BIAS	6.58	8.72	7.57	1.39	3.08	2.11	-4.6	-1.0	-2.89	24.40	22.59	23.56	-7.80	-7.80	-7.80

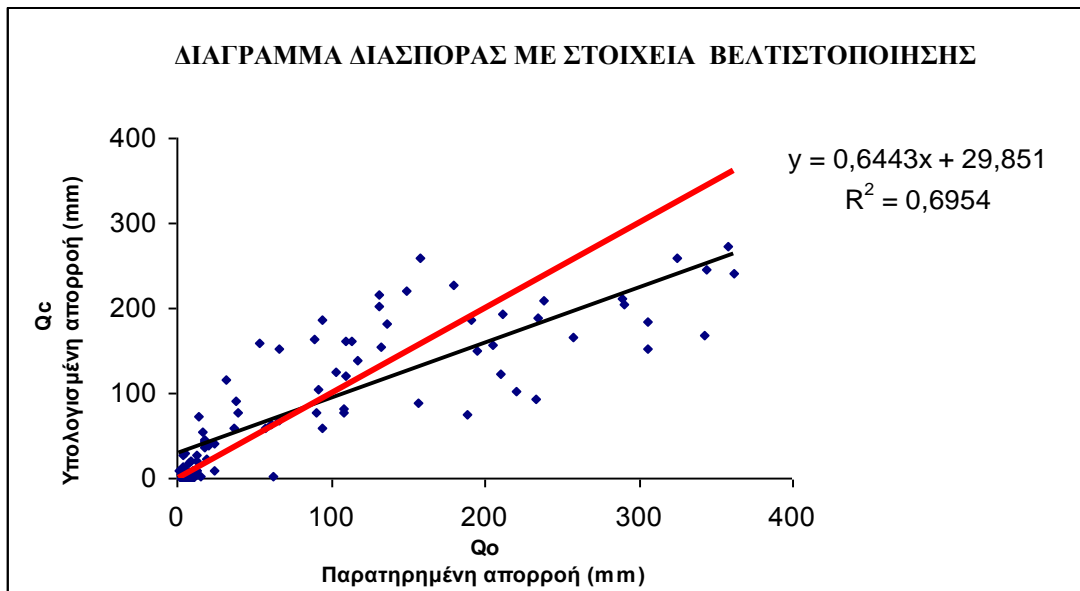
* Cal: Calibration (χρονοσειρά Βαθμονόμησης) (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1987)

Val: Validation (χρονοσειρά Πιστοποίησης) (Οκτ.1987 – Σεπτ. 1993)

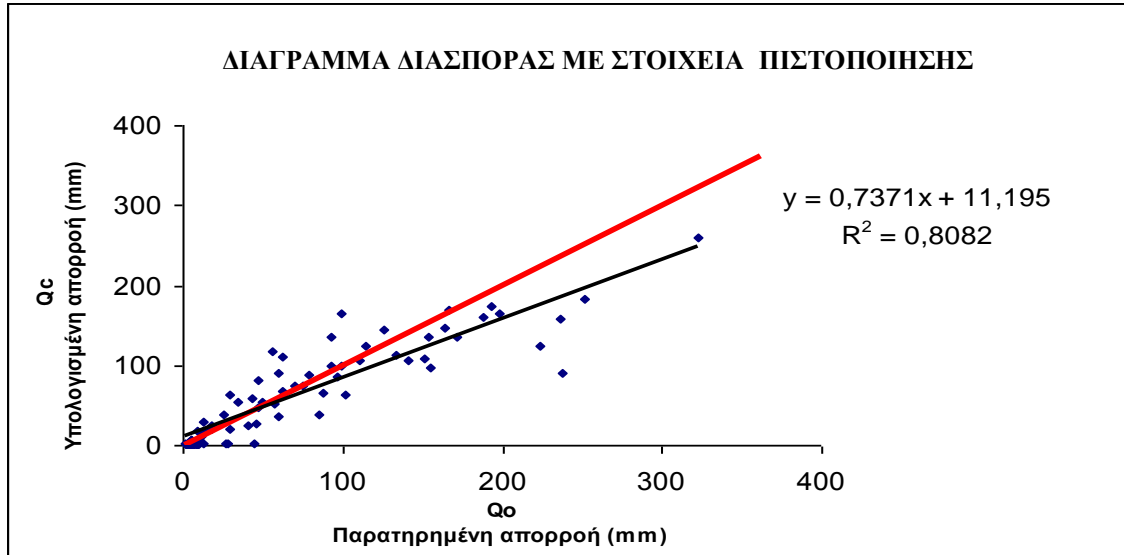
Period: Πλήρης χρονοσειρά (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1993)



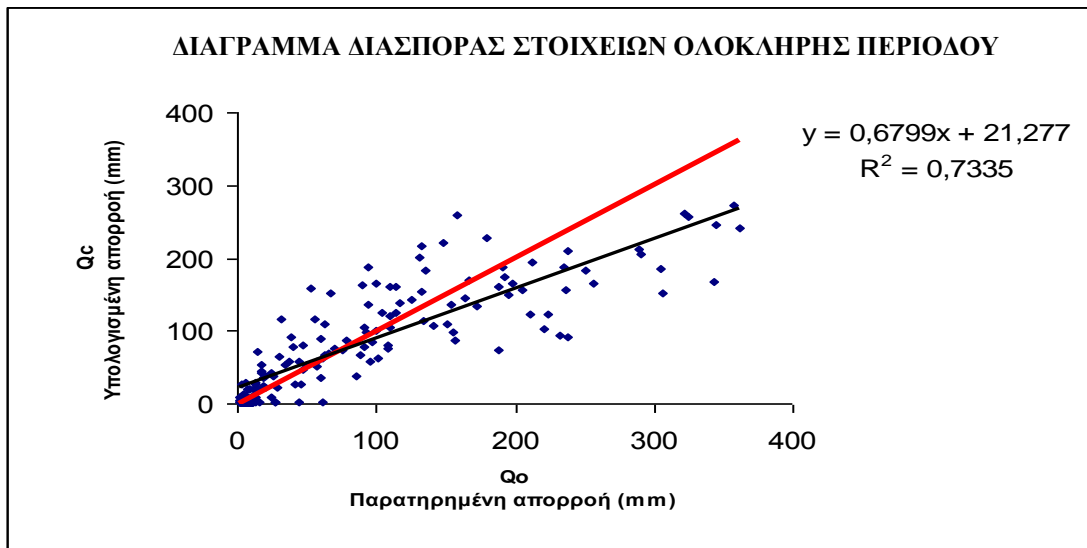
Εικόνα 3.5: Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

3.1.3 Απορροές με δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite

Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Ο Πίνακας 3.3 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Η χρονοσειρά βαθμονόμησης (Calibration) ορίζεται από τον Οκτώβριο 1981 έως τον Σεπτέμβριο 1987, και η χρονοσειρά πιστοποίησης (Validation) από Οκτώβριο 1987 έως και τον Σεπτέμβριο 1993.

Για το μοντέλο Abulohom η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.77$ στην πιστοποίηση και $Eff = 0.73$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.70$. Επίσης γίνεται ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 2.62$ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 48.38$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι σχετικά μεγάλο $BIAS = -2.37$.

Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.70$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.70$. Γίνεται πιο ελαφριά υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου

$\Delta V = -2.81$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 50.55$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = 0.58$.

Για το μοντέλο GR2M η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.80$ για όλη την χρονοσειρά που είναι πολύ καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.74$. Γίνεται ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 3.19$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 48.06$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = -3.47$.

Για το μοντέλο Giakoumakis η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.56$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.62$. Γίνεται υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -21.13$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 62.16$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = 19.14$.

Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της αποτελεσματικότητας του μοντέλου $M.Eff = 0.71$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.72$. Γίνεται υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -0.45$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 50.27$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = 0.40$.

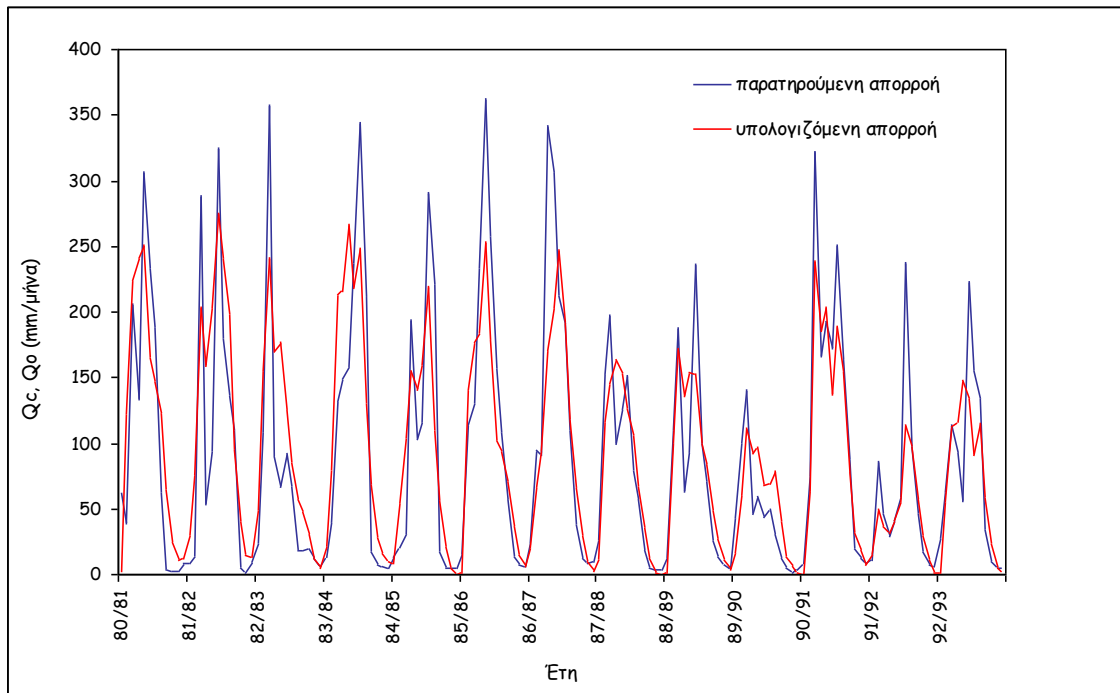
Τα συμπεράσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3. Επίσης διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και διαγράμματα διασποράς, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite φαίνονται στο Παράρτημα 3 για όλα τα

μοντέλα, και ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες 3.9,3.10,3.11,3.12, τα διαγράμματα για το μοντέλο Abulohom .

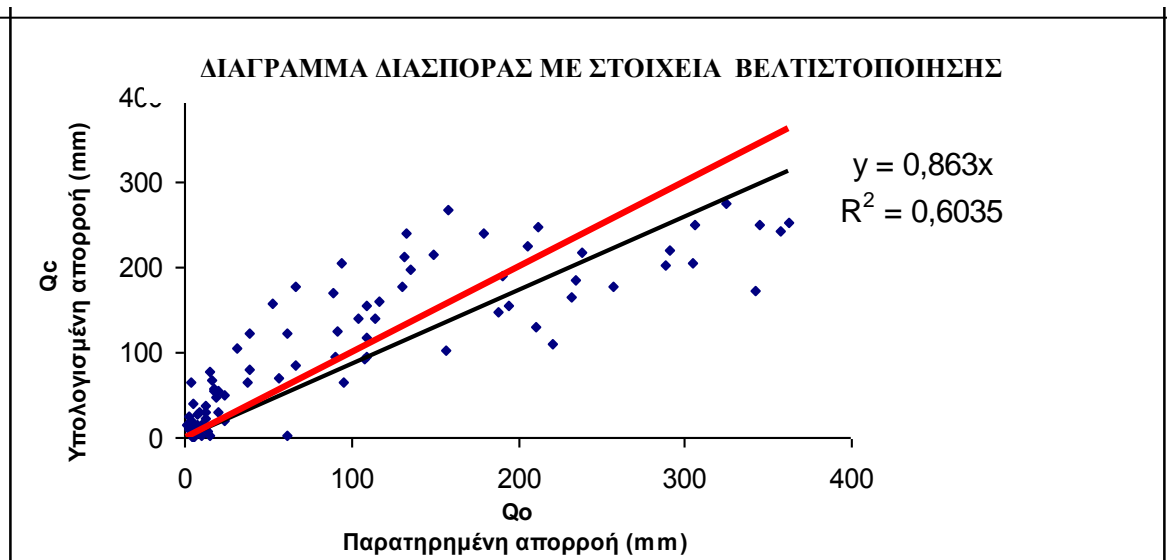
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Statistics	Abulohom			Loukas			GR2M			Giakoumakis			Xiong-Guo		
	Cal	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.72	0.77	0.73	0.73	0.65	0.70	0.74	0.81	0.80	0.52	0.63	0.56	0.71	0.72	0.71
R²	0.72	0.68	0.70	0.73	0.64	0.70	0.72	0.78	0.74	0.58	0.70	0.62	0.72	0.71	0.72
Qmsim	108.55	73.49	92.37	102.20	75.8	90.0	107.79	76.73	93.46	83.28	56.63	83.17	103.05	73.90	89.60
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	6.19	-3.00	2.62	0.21	-43.57	-2.81	5.45	1.28	157.76	-18.52	-25.24	-21.13	0.82	-2.45	-0.45
RMSE	57.05	35.89	48.38	55.21	44.58	50.55	65.67	34.55	48.06	73.59	45.56	62.16	57.94	39.62	50.27
BIAS	-6.40	2.27	-2.37	-0.22	5.73	0.58	-5.64	-0.97	-3.47	19.15	19.12	19.14	-0.85	1.85	0.40

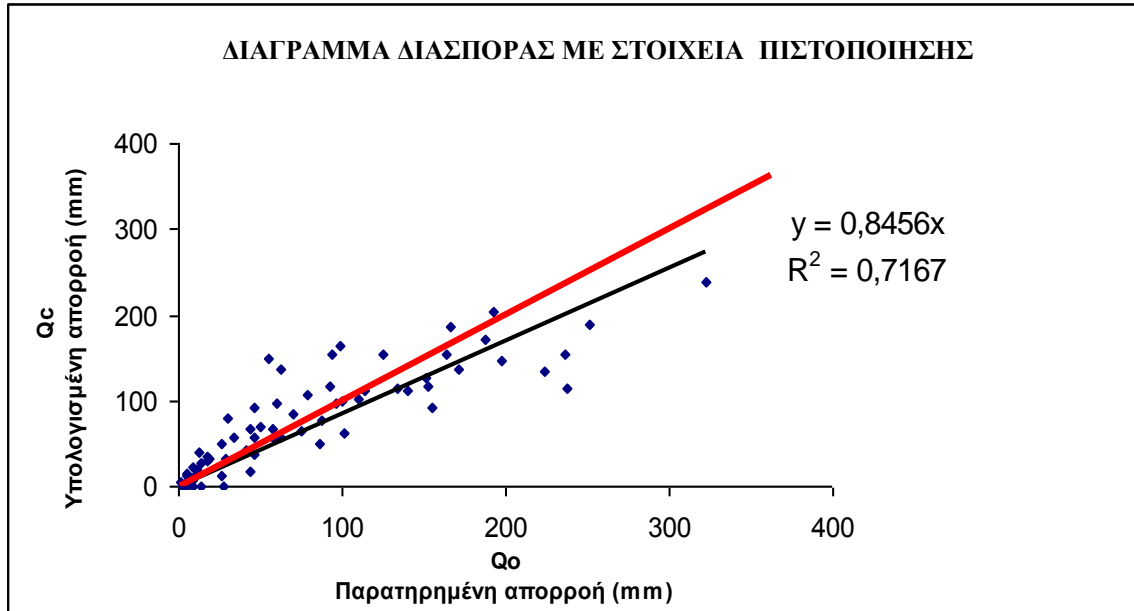
* Cal: Calibration (χρονοσειρά Βαθμονόμησης) (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1987)
 Val: Validation (χρονοσειρά Πιστοποίησης) (Οκτ.1987 – Σεπτ. 1993)
 Period: Πλήρης χρονοσειρά (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1993)



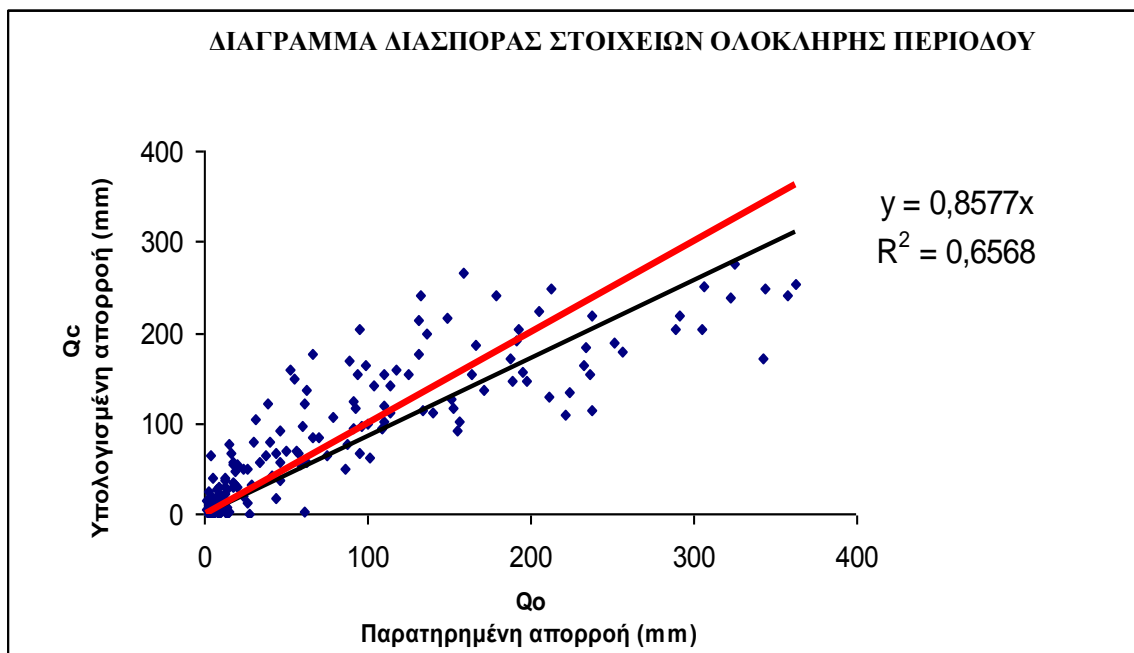
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς πιστοποίησης.



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

3.1.4 Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite

Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας

Ο Πίνακας 3.4 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών όλων των μοντέλων με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας. Η χρονοσειρά βαθμονόμησης (Calibration) ορίζεται από τον Οκτώβριο 1981 έως τον Σεπτέμβριο 1987, και η χρονοσειρά πιστοποίησης (Validation) από Οκτώβριο 1987 έως και τον Σεπτέμβριο 1993.

Για το μοντέλο Abulohom η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.81$ στην πιστοποίηση και $Eff = 0.70$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.70$. Επίσης γίνεται ελαφριά υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -0.47$ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 48.50$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι σχετικά μικρό $BIAS = 0.42$.

Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.73$ για όλη την χρονοσειρά που είναι καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.73$. Γίνεται πιο ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου

$\Delta V = 3.30$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 48.83$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = -3.0$.

Για το μοντέλο GR2M η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.79$ για όλη την χρονοσειρά που είναι πολύ καλή προσομοίωση όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.73$. Γίνεται ελαφριά υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου

$\Delta V = 2.91$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 49.45$ σχετικά μικρό όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης σχετικά μικρό $BIAS = -2.64$.

Για το μοντέλο Giakoumakis η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.54$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.61$. Γίνεται υποεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = -21.90$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 62.85$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = 19.84$.

Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου $M.Eff = 0.66$ για όλη την χρονοσειρά που δεν είναι καλή προσομοίωση όμοια και ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.68$. Γίνεται υπερεκτίμηση στη μεταβολή του όγκου $\Delta V = 15.18$, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $RMSE = 80.10$ είναι μεγάλο όπως και το μεροληπτικό σφάλμα είναι επίσης αρκετά μεγάλο $BIAS = -13.74$.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων των στατιστικών φαίνονται στον Πίνακα 3.4. Επίσης διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και διαγράμματα διασποράς, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite φαίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα 4 για όλα τα μοντέλα, και ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, τα διαγράμματα για το μοντέλο Abulohom.

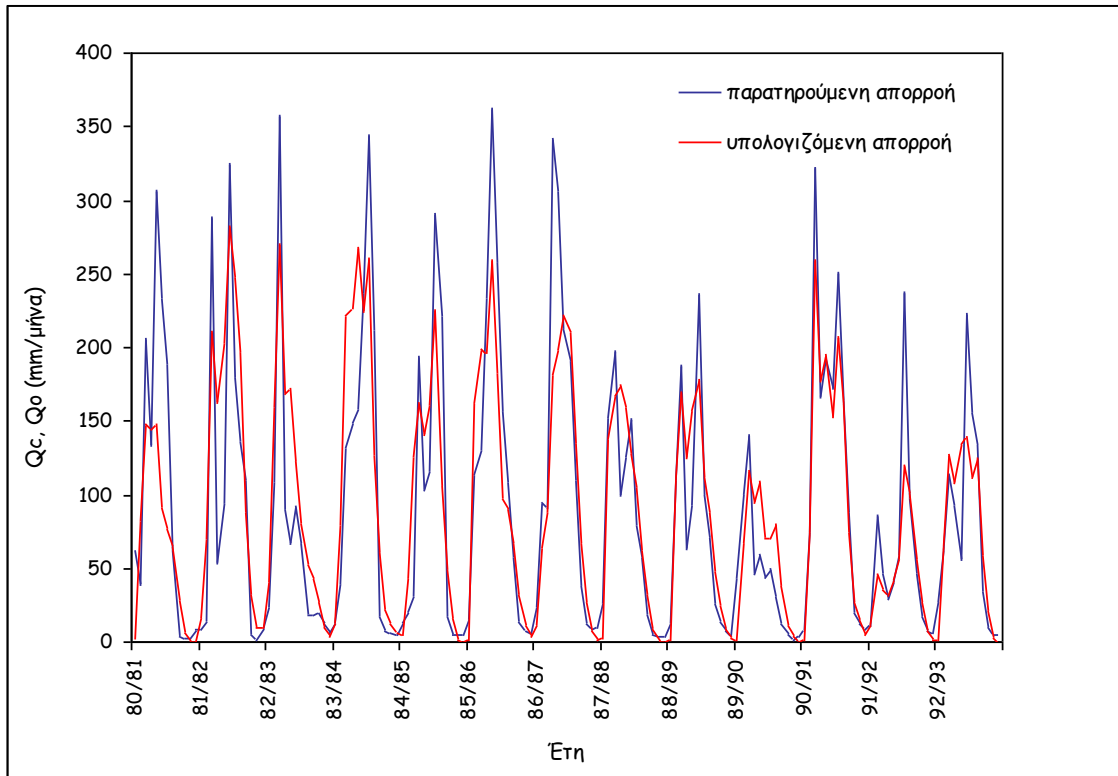
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριος 1993 στη λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

Statistics	Abulohom			Loukas			GR2M			Giakoumakis			Xiong-Guo		
	Cal	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.69	0.81	0.70	0.73	0.72	0.73	0.73	0.82	0.79	0.48	0.71	0.54	0.62	0.76	0.66
R²	0.69	0.80	0.70	0.72	0.72	0.73	0.68	0.80	0.73	0.54	0.76	0.61	0.80	0.63	0.68
Qmsim	102.21	103.75	97.93	104.62	79.39	92.98	104.39	78.91	92.63	79.99	58.98	80.03	113.93	91.68	103.66
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-0.56	-0.32	-0.47	2.36	-17.20	3.30	2.12	4.15	2.91	-21.74	-22.15	-21.90	11.47	21.01	15.18
RMSE	59.04	32.33	48.50	55.74	39.40	48.83	67.30	32.80	49.25	77.36	40.06	62.85	66.10	54.59	80.10
BIAS	0.55	0.25	0.42	-2.44	-6.44	-3.0	-2.2	-3.14	-2.64	22.48	16.78	19.84	-11.86	-15.92	-13.74

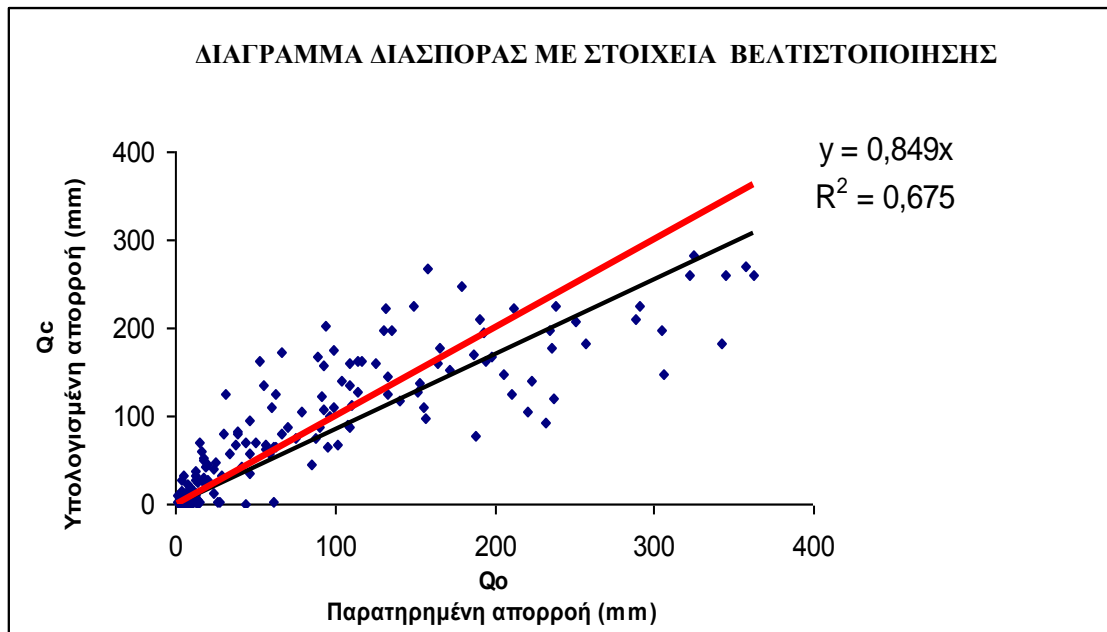
* Cal: Calibration (χρονοσειρά Βαθμονόμησης) (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1987)

Val: Validation (χρονοσειρά Πιστοποίησης) (Οκτ.1987 – Σεπτ. 1993).

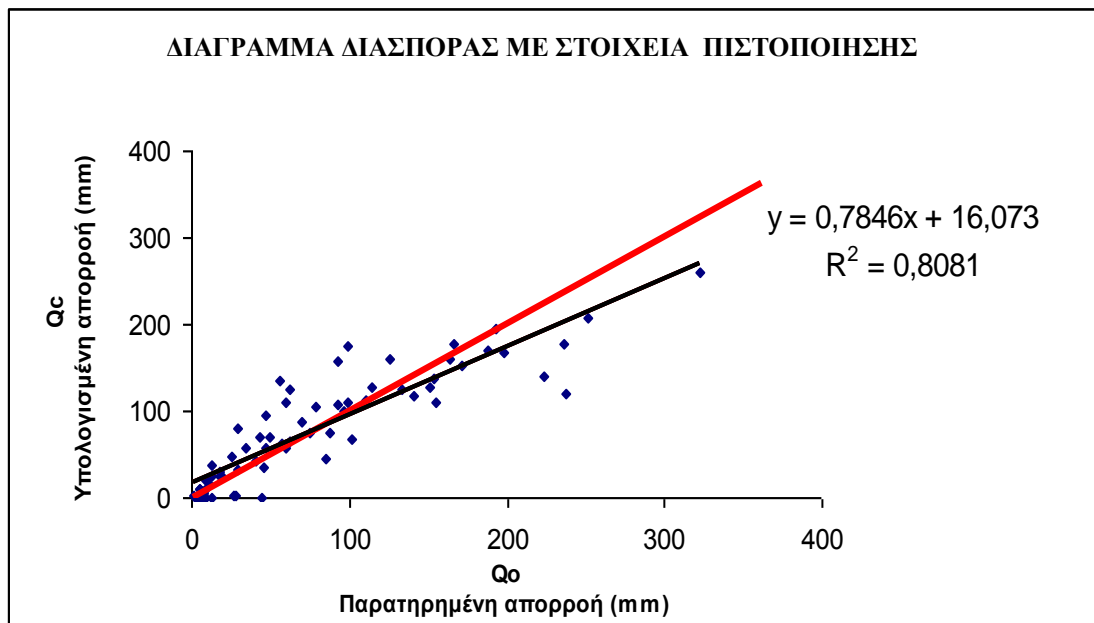
Period: Πλήρης χρονοσειρά (Οκτ.1981 – Σεπτ. 1993).



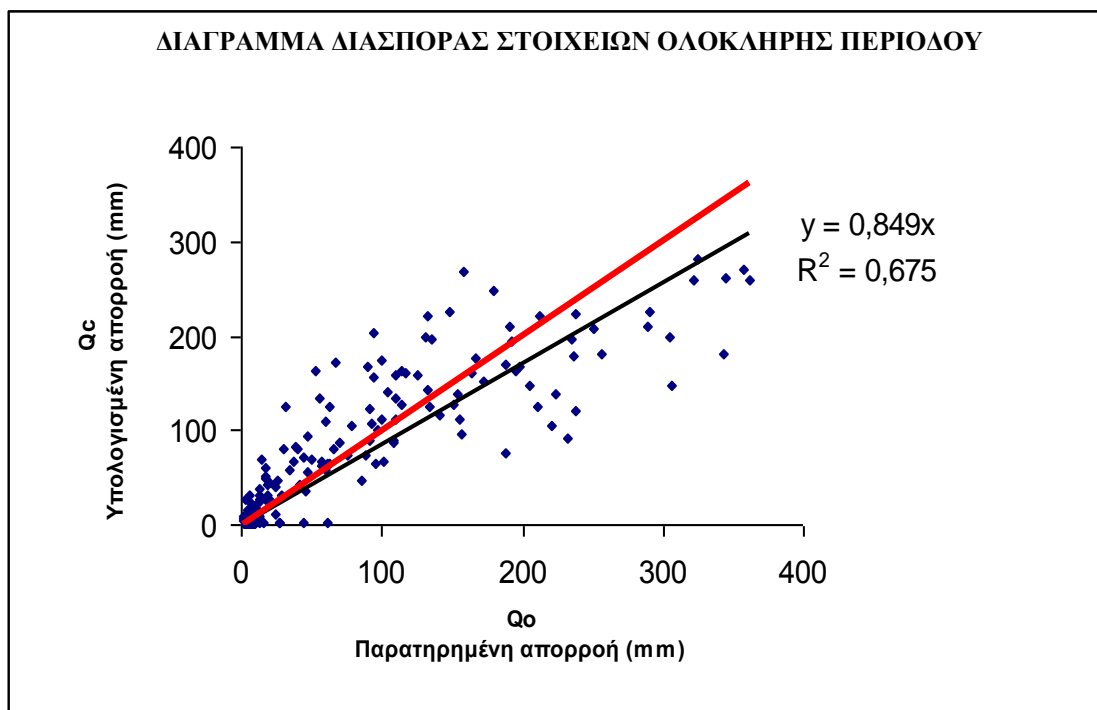
Εικόνα 3.13: Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Abulohom.



Εικόνα 3.14: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom της χρονοσειράς βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο AbuIshom της χρονοσειράς πιστοποίησης.



Εικόνα 3.16: Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο AbuIshom για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων παραμέτρων απορροής σε κάθε μοντέλο εφαρμογής με διαφορετικά δεδομένα εισόδου

Στη συγκεκριμένη παράγραφο του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων, ξεχωριστά για κάθε μοντέλο της εφαρμογής και εμφανίζονται οι τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιώντας συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου. Ο τρόπος αυτής της παρουσίασης δίνει τη δυνατότητα της απευθείας σύγκρισης των διαφορών σε κάθε ένα εκ των πέντε μοντέλων που εφαρμόστηκαν και εμφανίζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από τη χρήση των συγκεκριμένων δεδομένων.

Πίνακας 3.5: Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Abulohom με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

ABULOHOM MODEL												
	Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite			Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite		
Statistics	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.69	0.75	0.71	0.69	0.79	0.72	0.72	0.77	0.73	0.69	0.81	0.70
RSQ	0.69	0.76	0.72	0.70	0.81	0.72	0.72	0.68	0.70	0.69	0.80	0.70
Qmsim	95.7	67.02	82.46	98.04	66.91	82.48	108.55	73.49	92.37	102.21	103.75	97.93
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-6.37	-11.54	-8.38	-6.36	-11.51	-8.36	6.19	-3.00	2.62	-0.56	-0.32	-0.47
RMSE	59.68	37.43	50.58	59.27	33.93	49.15	57.05	35.89	48.38	59.04	32.33	48.50
BIAS	6.58	8.74	7.59	6.58	8.72	7.57	-6.40	2.27	-2.37	0.55	0.25	0.42

Πίνακας 3.6: Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Loukas με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

LOUKAS MODEL												
	Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite			Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite		
Statistics	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.72	0.69	0.71	0.73	0.74	0.73	0.73	0.65	0.70	0.73	0.72	0.73
RSQ	0.72	0.68	0.71	0.72	0.74	0.73	0.73	0.64	0.70	0.72	0.72	0.73
Qmsim	101.34	74.43	88.92	100.95	72.68	87.90	102.20	75.8	90.0	104.62	79.39	92.98
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-0.86	-11.51	-1.21	-1.23	-4.06	-2.33	0.21	-43.57	-2.81	2.36	-17.20	3.30
RMSE	56.13	41.75	49.97	55.49	38.75	48.44	55.21	44.58	50.55	55.74	39.40	48.83
BIAS	0.89	1.33	1.07	1.39	3.08	2.11	-0.22	5.73	0.58	-2.44	-6.44	-3.0

Πίνακας 3.7: Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο GR2M με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

GR2M MODEL												
	Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite			Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite		
Statistics	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.71	0.78	0.78	0.72	0.82	0.79	0.74	0.81	0.80	0.73	0.82	0.79
RSQ	0.69	0.77	0.72	0.70	0.80	0.72	0.72	0.78	0.74	0.68	0.80	0.73
Qmsim	106.92	76.83	93.03	106.72	76.73	92.88	107.79	76.73	93.46	104.39	78.91	92.63
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	4.60	1.40	3.36	4.41	1.28	3.19	5.45	1.28	157.76	2.12	4.15	2.91
RMSE	68.74	35.39	50.30	60.10	33.49	49.55	65.67	34.55	48.06	67.30	32.80	49.25
BIAS	-4.75	-1.06	-3.04	-4.6	-1.0	-2.89	-5.64	-0.97	-3.47	-2.2	-3.14	-2.64

Πίνακας 3.8: Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Giakoumakis με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΙΣ MODEL												
	Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite			Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite		
Statistics	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.43	0.58	0.47	0.44	0.67	0.51	0.52	0.63	0.56	0.48	0.71	0.54
RSQ	0.51	0.69	0.57	0.52	0.76	0.60	0.58	0.70	0.62	0.54	0.76	0.61
Qmsim	77.40	52.70	77.47	78.10	53.17	78.17	83.28	56.63	83.17	79.99	58.98	80.03
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	-24.27	-30.45	-26.67	-23.59	-29.82	-26.01	-18.52	-25.24	-21.13	-21.74	-22.15	-21.90
RMSE	80.82	48.42	67.62	79.72	43.07	65.30	73.59	45.56	62.16	77.36	40.06	62.85
BIAS	25.11	23.06	24.16	24.40	22.59	23.56	19.15	19.12	19.14	22.48	16.78	19.84

Πίνακας 3.9: Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Xiong- Guo με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

XIONG -GUO MODEL												
	Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle			Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite			Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite		
Statistics	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period	Cal.	Val.	Period
Eff	0.63	0.72	0.65	0.64	0.76	0.67	0.71	0.72	0.71	0.62	0.76	0.66
RSQ	0.72	0.64	0.67	0.64	0.78	0.69	0.72	0.71	0.72	0.80	0.63	0.68
Qmsim	110.30	83.94	98.14	109.92	83.56	97.76	103.05	73.90	89.60	113.93	91.68	103.66
Qmobs	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0	102.2	75.8	90.0
DV%	7.91	10.80	9.03	7.54	10.30	8.61	0.82	-2.45	-0.45	11.47	21.01	15.18
RMSE	65.19	39.97	54.93	63.56	36.75	53.56	57.94	39.62	50.27	66.10	54.59	80.10
BIAS	-8.18	-8.29	-8.18	-7.80	-7.80	-7.80	-0.85	1.85	0.40	-11.86	-15.92	-13.74

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των συγκεντρωτικών στατιστικών πινάκων (πίνακες 3.5 έως και 3.9) σε κάθε μοντέλο ξεχωριστά, η γενική εντύπωση είναι ότι η πλειονότητα των μοντέλων παρουσιάζει καλή προσομοίωση της απορροής στην περιοχή. Το μοντέλο GR2M εμφανίζει μικρό προβάδισμα σε σχέση με τα υπόλοιπα τέσσερα μοντέλα, ενώ το μοντέλο Giakoumakis δεν παρουσιάζει τόσο καλή προσομοίωση.

Σε κάθε μοντέλο, τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων είναι περίπου όμοια για κάθε περίπτωση εφαρμογής της προσομοίωσης. Γενικώς, όμως παρατηρήθηκαν κάποιες μικρές διαφορές, όπως:

- Στο μοντέλο Abulohom καλύτερη προσομοίωση παρουσιάστηκε κατά την εφαρμογή, με τη χρήση δορυφορικών τιμών θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite.

- Καλύτερη προσομοίωση για το μοντέλο Loukas εμφανίστηκε με τη χρήση επίγειων τιμών θερμοκρασίας, από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, και εξατμισοδιαπνοής Blaney – Criddle.

- Για το μοντέλο GR2M, ο συνδυασμός επίγειων τιμών θερμοκρασίας, από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite, έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης.

- Το μοντέλο Giakoumakis προσομοίωσε καλύτερα την απορροή χρησιμοποιώντας επίγειων τιμών θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite. Στην περίπτωση όμως αυτή, η προσομοίωση δε θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητική συγκρινόμενη με τα άλλα μοντέλα.

- Τέλος, η χρήση δορυφορικών τιμών θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite, έδωσε καλύτερη προσομοίωση στο μοντέλο Xiong - Guo.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη και εφαρμογή της μεθοδολογίας χωρίζονται σε εκείνα που αφορούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των μοντέλων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, και στα αποτελέσματα εκείνα που προκύπτουν από τη χρήση των επίγειων και δορυφορικών δεδομένων.

Η βέλτιστη προσομοίωση για την περιοχή μελέτης, έγινε από το μοντέλο GR2M όπως φαίνεται από τους στατιστικούς πίνακες και επιπλέον από την καλή προσομοίωση της μορφής του υδρογραφήματος που φαίνεται στα διαγράμματα προσομοιωμένης και πραγματικής απορροής. Το μοντέλο Abulohom παρουσίασε πολύ καλή προσομοίωση της μορφής του υδρογραφήματος αλλά με σημαντική απόκλιση στην εκτίμηση του όγκου απορροής. Το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα εμφάνισε και η προσομοίωση της μορφής του υδρογραφήματος από το μοντέλο Loukas. Δεν έδωσε τόσο καλά αποτελέσματα η προσομοίωση που προήλθε από το μοντέλο Giakoumakis, το οποίο, επιπλέον, παρουσίασε μηδενική εκτίμηση των χαμηλών απορροών σε ξηρά έτη και καλοκαιρινές απορροές, με αποτέλεσμα τη σημαντική υποεκτίμηση του όγκου απορροής. Η προσομοίωση από το μοντέλο Xiong και Guo είναι γενικά καλή, για μοντέλο με λίγους παραμέτρους.

Τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, έχουν αναπτυχθεί κυρίως χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις των μεταβλητών εισόδου. Στην παρούσα έρευνα, το ζητούμενο ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης δορυφορικών δεδομένων για την προσομοίωση της απορροής στην περιοχή.

Από τα στάδια της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε προέκυψε ότι η χρήση των δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής, στην εφαρμογή και των

πέντε μοντέλων, παρουσίασε καλή προσαρμογή, δίνοντας ικανοποιητικές τιμές στατιστικών παραμέτρων της προσομοίωσης, με υψηλότερη τιμή στο μοντέλο GR2M.

Οι διαφορές στα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεταξύ επίγειων μετρήσεων και δορυφορικών εικόνων, ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα, καθώς και οι συνδυασμοί αυτών, δεν εμφάνισαν ιδιαίτερες διαφορές στις τιμές των στατιστικών παραμέτρων. Το γεγονός αυτό κρίνεται ως ιδιαίτερα ελπιδοφόρο, διότι παρουσιάζει τη δυνατότητα χρήσης εξ ολοκλήρου δορυφορικών δεδομένων και πληροφοριών στην προσομοίωση της απορροής στην περιοχή.

Η δυνατότητα αυτή προσφέρει την προοπτική περαιτέρω αξιοποίησης των δορυφορικών εικόνων και γενικότερα της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης, στην παρακολούθηση του υδατικού δυναμικού σε μια περιοχή, στην προσομοίωση των υδρολογικών της παραμέτρων και κατά συνέπεια στην ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων σε περιοχές που δεν είναι δυνατή η πρόσβαση από του εδάφους.

Στην συγκεκριμένη εργασία έχουν εφαρμοστεί τα προαναφερόμενα αδρομερή μοντέλα υδατικού ισοζυγίου. Για περαιτέρω καλύτερη προσομοίωση, οι χρονοσειρές φόρτισης που χρησιμοποιούνται ως είσοδος των μοντέλων και οι χρονοσειρές απόκρισης που χρησιμοποιούνται για την έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου, πρέπει να είναι πλήρης και να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έκταση δεδομένων. Τα δεδομένα που προέρχονται από την επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων να ελέγχονται αν υπόκειται σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα.

Η κύρια δυσκολία παρουσιάζεται στη βαθμονόμηση των μοντέλων και έγκειται στην δυνατότητα εντοπισμού πολλών συνδυασμών παραμέτρων, που παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την ικανότητα προσομοίωσης, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των

παραμέτρων, οπότε η χρήση μοντέλων που έχουν όσο το δυνατόν λίγους παραμέτρους κρίνεται ότι είναι καλύτερο .

Επίσης η ικανότητα της προσομοίωσης των μοντέλων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης. Αυτή χαρακτηρίζεται επιτυχής όταν το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει το φάσμα των αποκρίσεων της λεκάνης και οι τιμές των παραμέτρων πρέπει να είναι συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος όποτε πρέπει να είναι γνωστά όλα τα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκεκριμένη περιοχή που γίνεται η έρευνα. Οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης οι συνθήκες εκκίνησης της προσομοίωσης, είναι μη μετρήσιμες και, συνεπώς, άγνωστες.

Η καινοτομία της χρήσης δεδομένων που έχουν αντληθεί από δορυφορικές εικόνες μας δίνει την δυνατότητα, τα διάφορα μοντέλα να δοκιμαστούν και να αναπτυχθούν σε περιοχές που δεν υπάρχει δίκτυο επίγειων σταθμών μέτρησης. Επίσης μέσω των πληροφοριών της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης μπορεί να παραχθούν μακριές χρονοσειρές καθώς και δεδομένα με διαφορετικό χρονικό βήμα, έτσι ώστε να εξάγονται πληρέστερα αποτελέσματα και να αναπτύσσονται μοντέλα προσομοίωσης με μεγαλύτερη ακρίβεια στις πραγματικές μετρούμενες μεταβλητές. Τέλος, προτείνεται η χρήση δορυφορικών εικόνων μεγαλύτερης χωρικής διακριτικής ικανότητας (π.χ. 1 x 1 Km), για περισσότερη ακρίβεια των χρονοσειρών εισόδου των μοντέλων. Η χρήση εικόνων με μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel) θα έδινε τη δυνατότητα εκτίμησης των μεταβολών των παραμέτρων σε μικρότερη περιοχική κλίμακα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abulohom, M.S., S.M.S. Shah and A.R. Ghumman (2001)..Development of a Rainfall- Runoff Model, its Calibration and Validation. Water Resources Management, Vol. 15: 149-163.
2. Beven, K. (1975). Distributed models In: M.G. Anderson and T.P. Burt (editors), “Hydrological Forecasting”. Wiley, New York.
3. Blaney, H.F. and W.D. Criddle (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service Tech. Paper No. 96: 48.
4. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt (1977). Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, No 24: 144.
5. Giakoumakis, S., G. Tsakiris and D. Efremides (1991). On the rainfall- runoff modeling in Mediterranean islands environment. In: Tsakiris (ed.) “Advances in water recourses technology”, Balkema, Rotterdam: 137-148.
6. Harbeck, G.E.Jr (1962). A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 272-E: 101-105.
7. Hargreaves, G.H. (1974). Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE 17: 701-704.
8. Hondronikou, E., C. Domenikiotis and N.R. Dalezios (2006). Water balance modeling based on NOAA/AVHRR satellite data. Haicta2006, 21-23 September, Volos, Greece, in press.

- 9.** Jensen, M.E. and H.R. Haise (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrigation Drainage Div. ASCE* 89: 15-41.
- 10.** Kanellou, E., C. Domenikiotis and N.R. Dalezios (2006). Spatially distributed potential evapotranspiration based on NOAA/AVHRR satellite data and GIS. Haicta2006, 21-23 September, Volos, Greece, in press.
- 11.** Linacre, E.T. (1977). A simple formula for estimating evapotranspiration rate in various climate, using temperature data alone. *Agric. Meteorol.* Vol. 18: 409-424.
- 12.** Makhlouf, Z. and C. Michel (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* Vol. 162: 299-318.
- 13.** Makkink, G.F (1957). Ekzameno de la formulo de Penman. *Netherl. J. Agric. Sci.* Vol. 5:290-305.
- 14.** Nash, J.E. and J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrolol.* Vol. 10: 282-290.
- 15.** Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, base soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London A193:* 120-146.
- 16.** Psilovikos, Ar. and C. Tzimopoulos (2004). Comparison of Quadratic and Non- Linear programming (QP and NLP) optimization models (QP and NLP) in groundwater management. *Journal of Hydroinformatics* , Vol. 6, No 3, pp. 175-185.
- 17.** Rohwer, C. (1931). Evaporation from free water surface. *USDA Tech. Bull.* No 217: 1-96.
- 18.** SCS, (1972). (Soil Conservation Service). *National Engineering Handbook*, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- 19.** Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* No. 38:55-94.

20. Vandewiele, G. L. and N.L. Win (1998). Monthly water balance models for 55 basins in 10 Countries. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 43(5): 687–699.

21. Xiong, L. and S. Guo (1999). A two-parameter monthly water balance model and its application» Department of Hydrology and Water Environment. Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, *Journal of Hydrology* Vol. 216: 111-123.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

22. Βρουχάκης, Ι. Κ. Βουβαλίδης, Α. Σφέικος και Σ. Μαργώνη (2004). Η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου του Πορταϊκού ποταμού της Θεσσαλίας. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, 2004.

23. Δαλέζιος, Ν.Ρ. (1999). Περιβαλλοντική εκπαίδευση. Πρόγραμμα επιμόρφωσης εκπαιδευτικών της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

24. Δαλέζιος, Ν.Ρ. (2001). Σημειώσεις Φυσικών Περιβαλλοντικών Κινδύνων, Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

25. Δαλέζιος, Ν. (2002). Περιβαλλοντική Τηλεπισκόπηση, Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος: 127.

26. Ευστρατιάδης, Α. και Δ. Κουτσογιάννης (2004). Μη γραμμικές μέθοδοι βελτιστοποίησης –Εξελικτικοί και γενετικοί αλγόριθμοι. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος: Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

27. Καϊμάκης, Σ. και Γ. Καββαδίας (1995). Μαθηματικά μοντέλα βροχής-απορροής. Στο: Υδατικοί Πόροι. I. Τεχνική Υδρολογία, κεφάλαιο 14^ο, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα: 483-502.

28. Κανέλλου, Ε. (2006). Εκτίμηση περιοχικής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή διατριβή, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος: 122.

29. Κουκουβίνος, Α., Ν. Μάμασης (1997). Ερευνητικό Έργο, Αναβάθμιση και Επικαιροποίηση της Υδρολογικής Πληροφορίας της Θεσσαλίας, Τεύχος 3: Επεξεργασία Γεωγραφικής Πληροφορίας, Αθήνα.

30. Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος (1999). Τεχνική Υδρολογία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, Γ' Έκδοση, Αθήνα.

31. Λαχανάς, Γ. (2005). Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο υδρολογικό ισοζύγιο στις λεκάνες απορροής του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Διαχείρισης Αγροτικού Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

32. Λέκκας, Δ. (2005). Υδρολογία. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.

33. Μεθυμάκη, Ι., Ε. Χατζηευαγγέλου και Β. Ψοχιού (2003). Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης επιφανειακού δυναμικού της νότιας και δυτικής λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

34. Μιμίκου, Μ. (1994). Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, εκδόσεις Παπασωτηρίου, β' έκδοση, Αθήνα.

- 35.** Μπαστρογιάννης, Ν. (2002). Υδρολογική προσομοίωση Επιφανειακού Υδατικού Δυναμικού Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- 36.** Ξανθόπουλος, Θ. (1990). Εισαγωγή Στην Τεχνική Υδρολογία. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- 37.** Παπαζαφειρίου, Ζ. (1984). Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη: 471.
- 38.** Παπαϊωάννου, Γ. (1995). Εξάτμιση και Διαπνοή. Στο: Υδατικοί Πόροι. Ι. Τεχνική Υδρολογία, κεφάλαιο 6^ο, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα: 167-210.
- 39.** Πέππας, Α. (2001). Προσομοίωση υδατικών πόρων και χρήσεων νερού στη Θεσσαλία. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- 40.** Τζαμπύρας, Ι. (2005). Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ένταση ξηρασίας στις λεκάνες απορροής του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Διαχείρισης Αγροτικού Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- 41.** Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί Πόροι. Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- 42.** Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., (2002). Πιλοτική Μελέτη στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Πηνειού Θεσσαλίας, Εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ για τα νερά, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Δ/ση Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού, Τμήμα Νερών.
- 43.** Φλόκας, Α.Α. (1997). Μαθήματα μετεωρολογίας και κλιματολογίας. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

44. Χονδρονίκου, Ε. (2004). Εφαρμογή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου σε περιοχές της Θεσσαλίας και της Κρήτης. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Διαχείρισης Αγροτικού Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος: 106.

45. Ψιλοβίκος, Αρ. (1999). Βέλτιστη Διαχείριση Υπόγειων Υδροφορέων. Συγκριτική αξιολόγηση με τις μεθόδους Γραμμικού και μη Γραμμικού Προγραμματισμού. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη: 253.

46. Ψιλοβίκος, Αρ. και Π. Ζαρκάδας (2006). Διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς. Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Ξάνθη.

ABSTRACT

Deterministic water balance models have been developed, for different timescales (eg. hourly, daily, monthly and yearly) and different degrees of complexity. Simple deterministic water balance models, parametric or empirical, which unify the heterogeneous characteristics of the watersheds and simulate the rainfall- runoff process, are, in general, easy to be used and require a small or large number of inputs. Although this approach leads to a generalization of the characteristics of the watersheds, such models are simple and efficient in their use, as it has been reported in international literature, and are useful tools for engineers and scientists who are involved in the management of water resources. Since then deterministic models have been developed and applied in a large spectrum of hydrological problems.

In recent years, such models have been applied in order to find out the consequences of climate change, and the long-term runoff forecasting. Although, in these applications hourly or daily hydrological models are used, these models require significant data and use many more parameters as compared to the equivalent monthly models. In many hydrological problems a remarkable effort has been made for the development of new models and techniques, using monthly data. Such models focus on their complexity of the algorithms and the number of their parameters. Although a long experience has been acquired through many models, there is always a need for verification of these models for their applicability in other regions.

The object of present postgraduate work was the application and intercomparison of five deterministic water balance models in a small rural watershed.

The five models which are applied in this watershed are namely Abulohom, Loukas, GRZM, Giakoumakis and Xiong - Guo.

The aim of this work is an objective assessment of the performance of the models using common evaluation criteria leading to hydrological regionalization. The selected watershed the study area is the basin of Pili, in Thessaly, central Greece. The Pili basin drainage from Portaikos river is a tributary of Pinios River located in Thessaly. It drains the southern part of Thessaly basin, and specifically the south part of the district of Trikala. This region is located at the boundary with the district of Karditsa. This basin is mainly mountainous with a large percentage of woodlands and grasslands. In the morphological and technical characteristics of the basin are presented.

The water simulation of the surface water potential, carried out with the Abulohom, Loukas, GR2M, Giakoumakis and Xiong - Guo models. Each of these models is applied in two ways using different data. The inputs to the models, in the first approach, are monthly regional precipitation and mean monthly air temperature derived from the meteorological stations of the region, and potential evapotranspiration based on NOAA/ AVHRR satellite data. The model outputs are total runoff and actual evapotranspiration. In the second approach, the air temperature derived from land surface temperature (LST) satellite images, from NOAA/ AVHRR satellite. Time series of the above parameters for 13 years (1981 - 1993) are employed, a part being used for model calibration (1981 - 1988) and the remaining data (1989 - 1993) for validation.

The statistical parameters that have been used are the followings The calibration was achieved with the SIMPLEX method and the Efficiency (Eff) index, which was developed by Nash and Sutcliffe, coefficient of determination R^2 , average of the

numbers of the simulation runoff, mean of the numbers of the actual runoff, percentage volume declination, root mean square error (RMSE) and BIAS.

The runoff simulation through the application of models in Pili watershed depends on the number of model parameters, the type of runoff (direct, intermediate or basic), the characteristics of the hydrological basin, the reliability and the time series of data, and the climate of the area.

The results have shown that the main differences between the models which come up of the the computed evapotranspiration, soil moisture, ground water recharge and runoff routing, leading to different number of required, parameters for each model. In those models, the application has better results when time series is long, full and with big values of runoff.

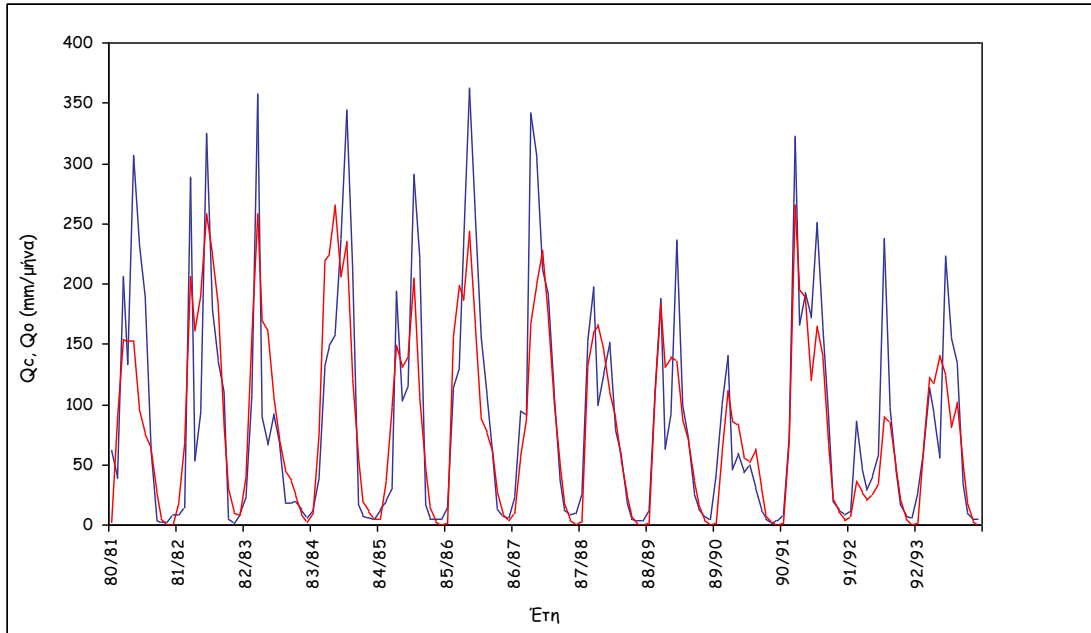
One innovation in this research is the use of satellite data for calculating the simulated runoff, in the second way of the methodology. The satellite data needed were extracted from NOAA / AVHRR images. The results using these satellite data of temperature and evapotranspiration, is high correlated with these which resulted using earth measurements of temperature. This application shows that the Remote Sensing data offer credible data and information in areas which have no measurements or meteorological stations.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

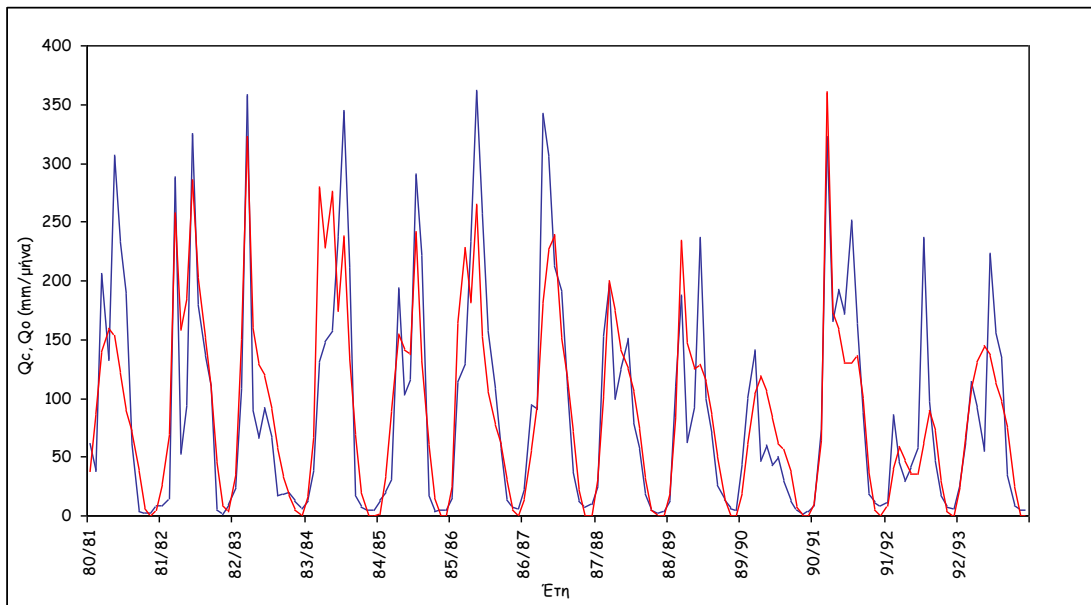
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο

Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και
διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία
από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο
Blaney – Criddle, από δορυφορικές εικόνες.

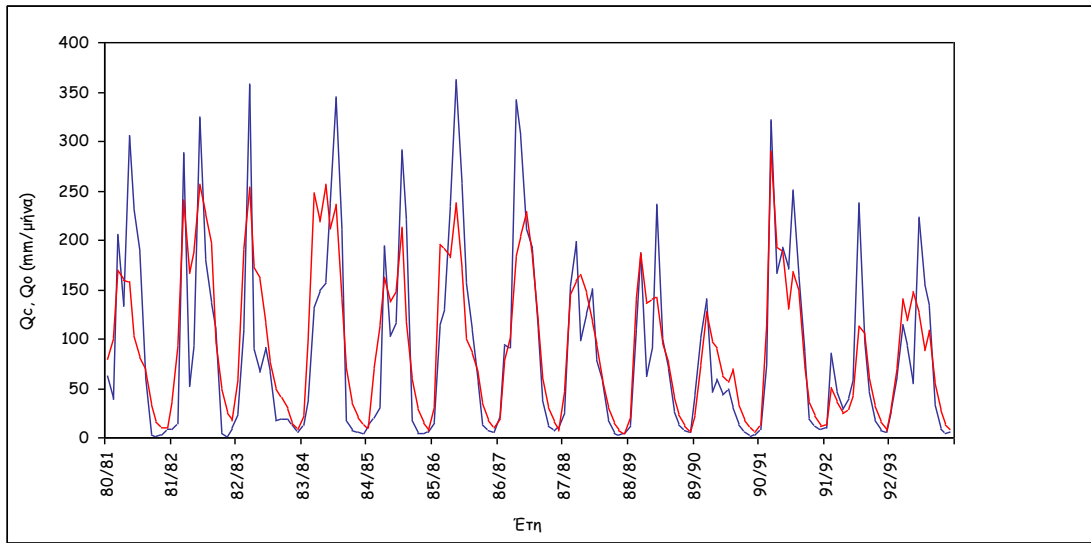
1.A Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για όλα τα μοντέλα στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.



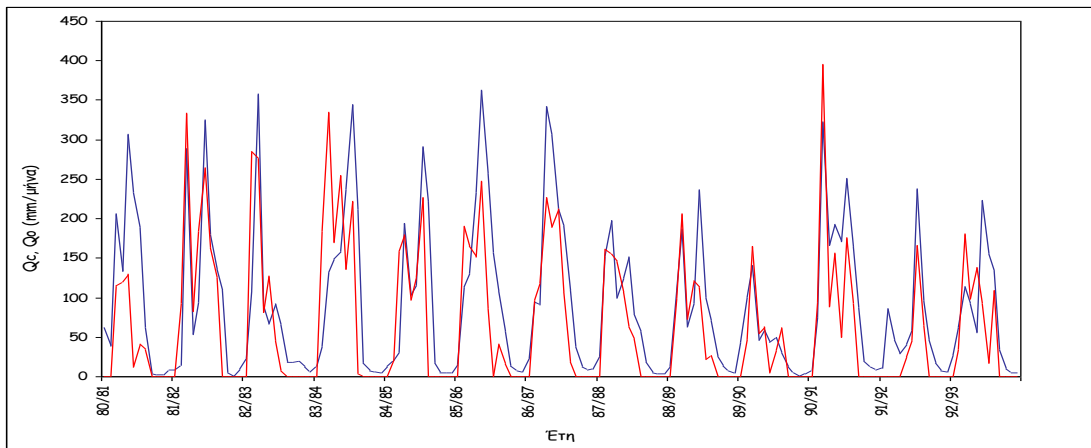
1. Abulohom model



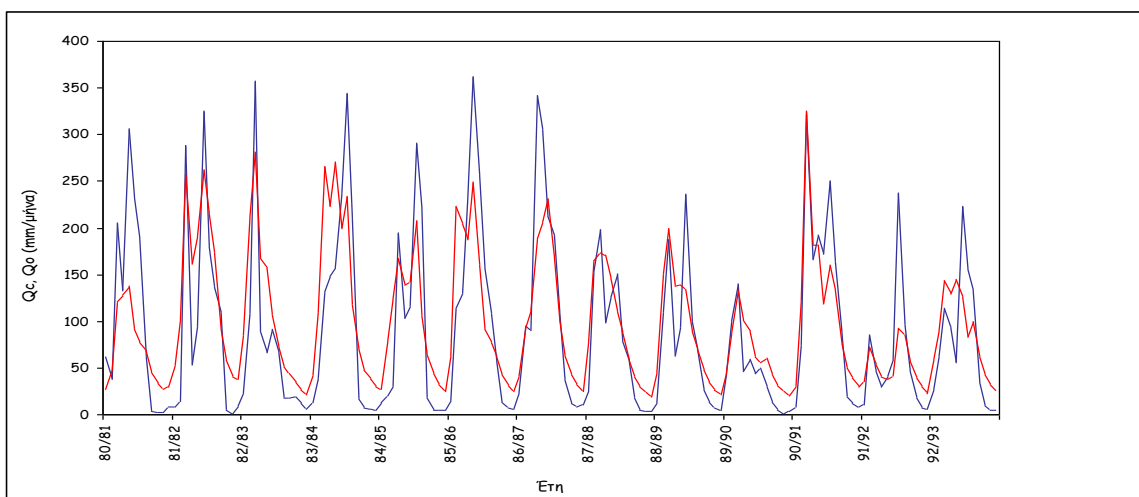
2.Loukas model



3. GR2M model



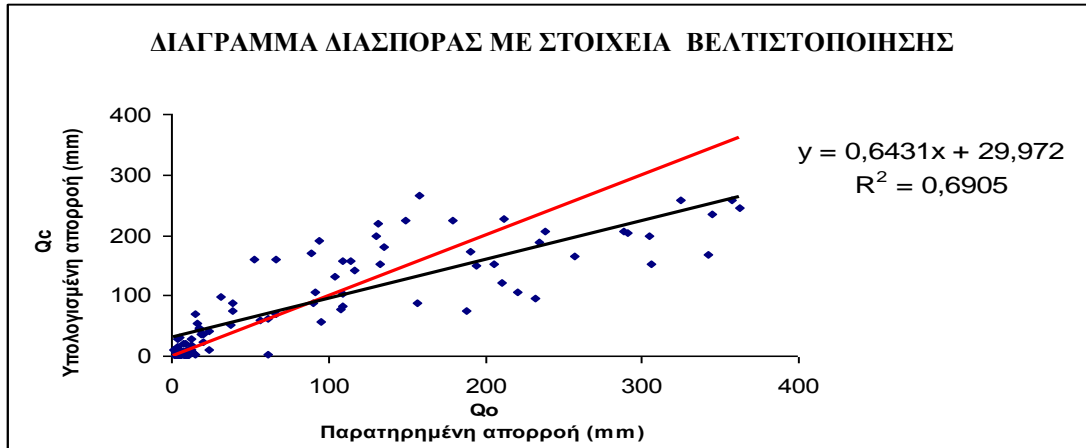
4. Giakoumakis model



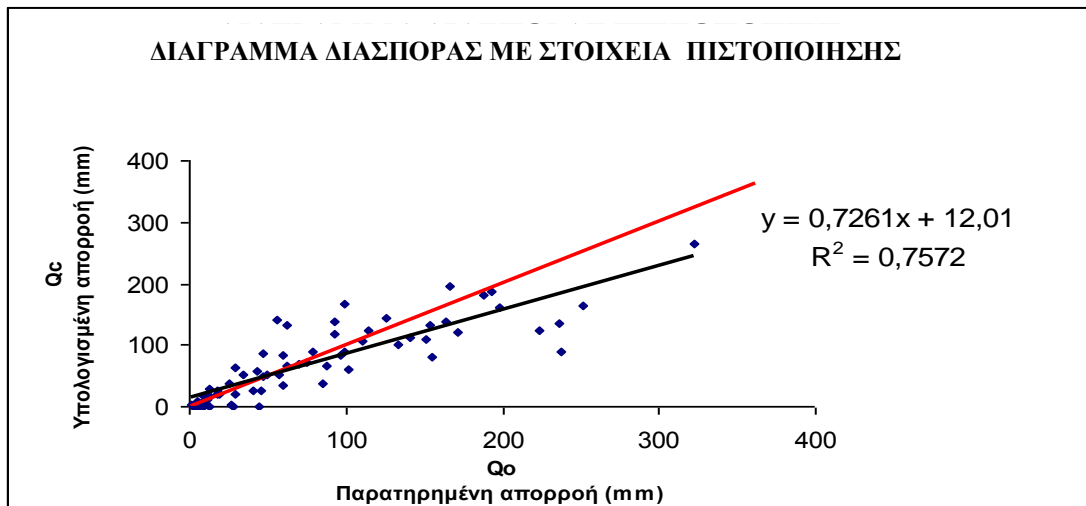
5. Xiong – Guo model

1.B Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

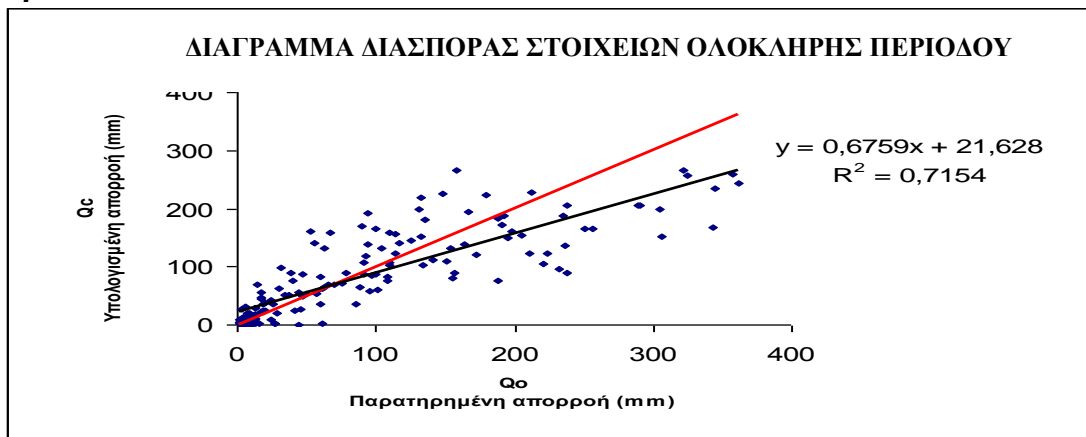
1 Abulohom model



1.α

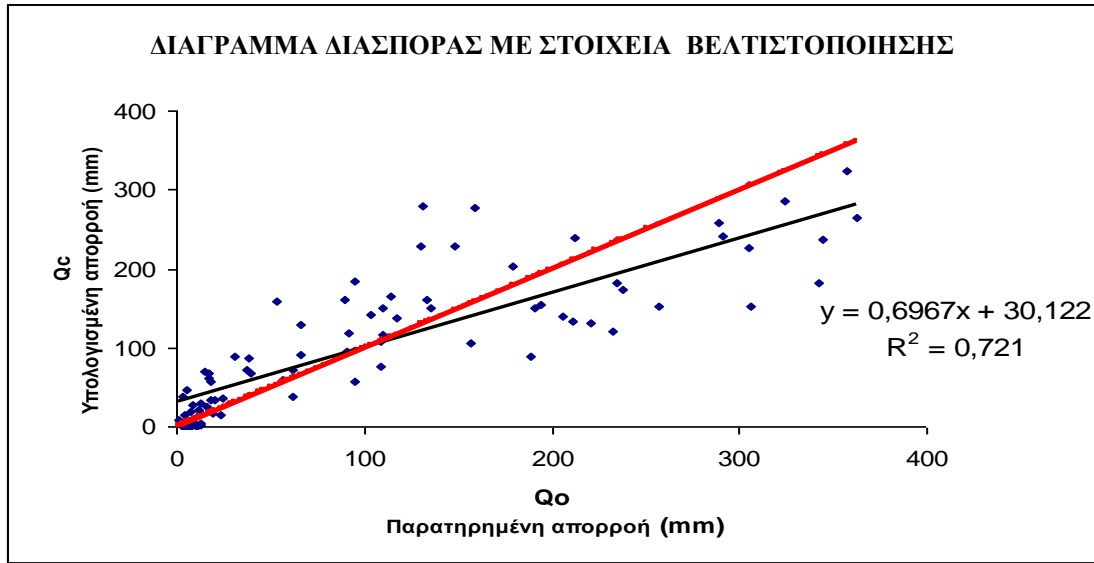


1.β

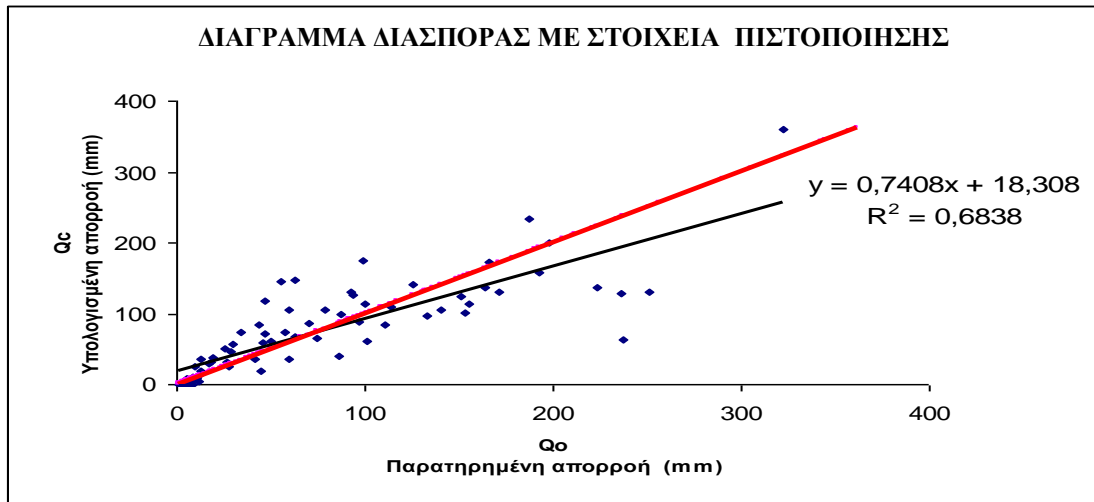


1.γ

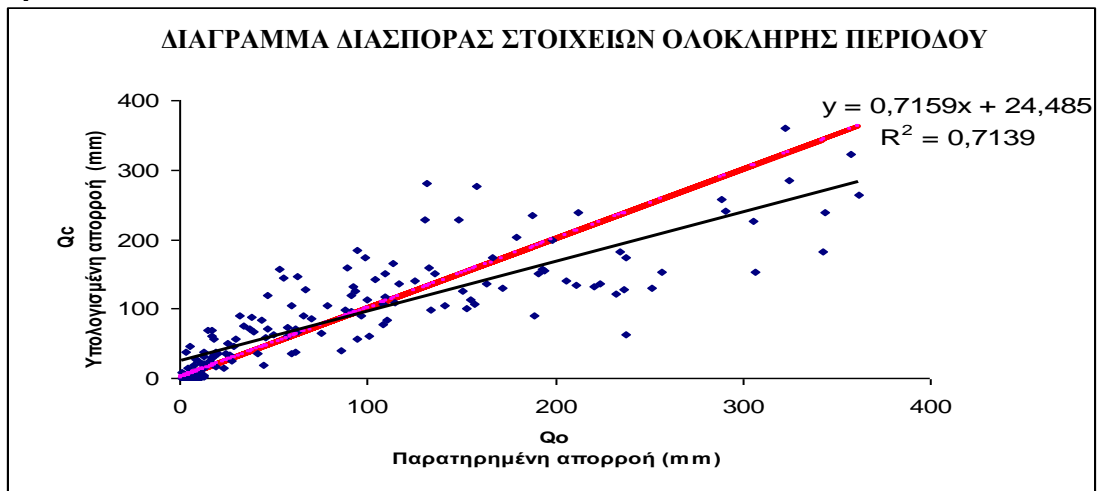
2.Loukas model



2.α

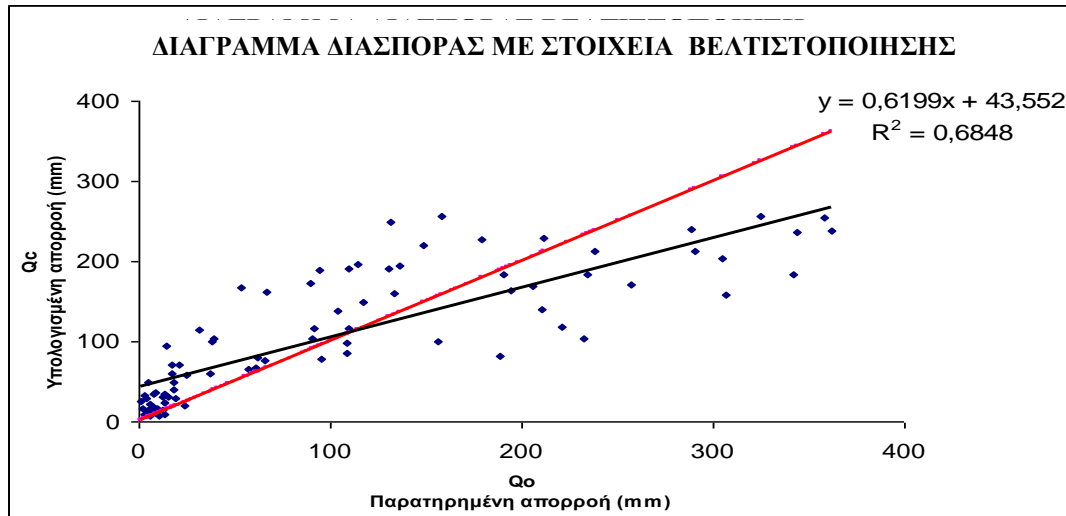


3.β

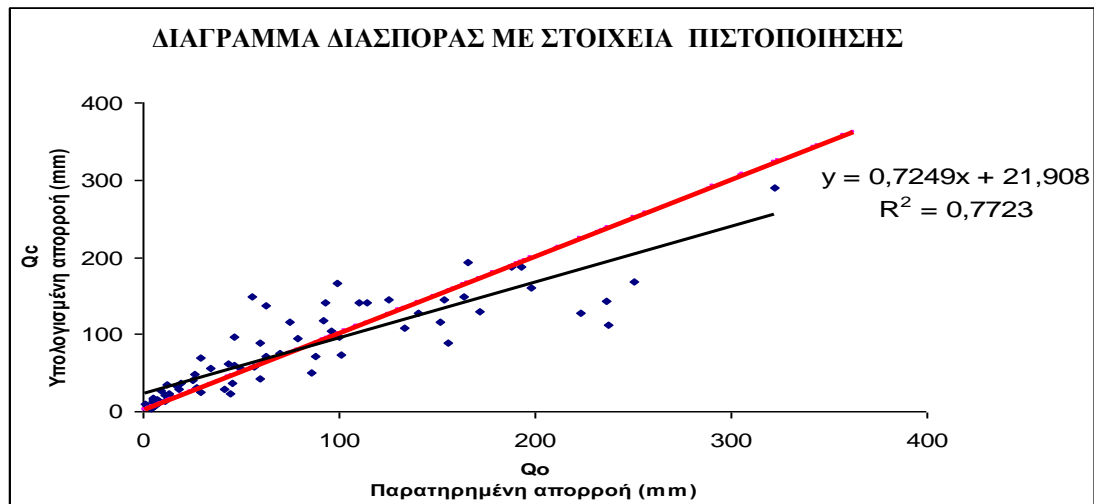


2.γ

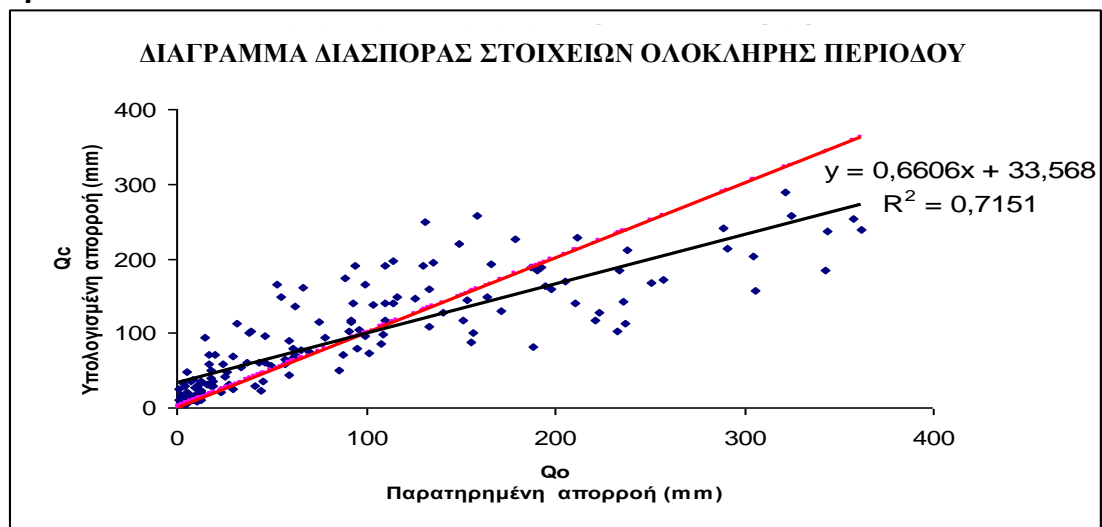
3. GR2M



3.α

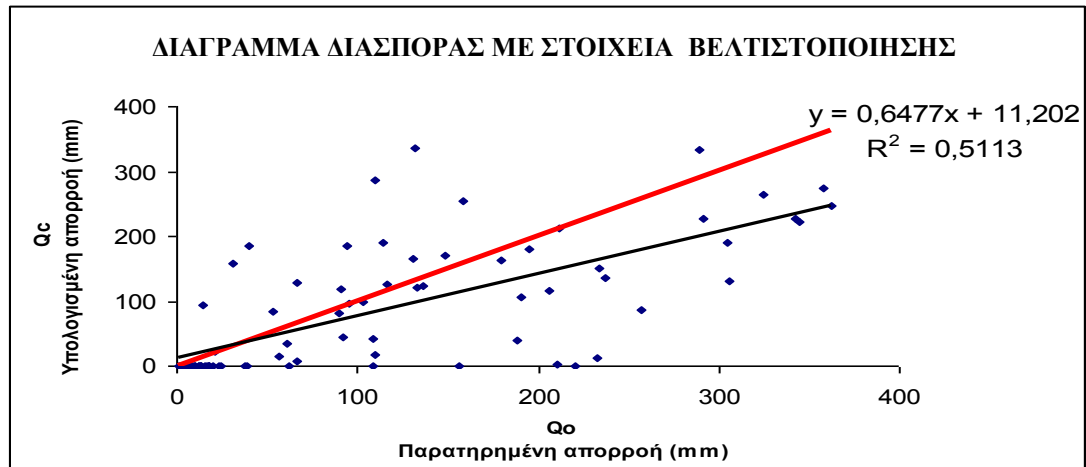


3.β

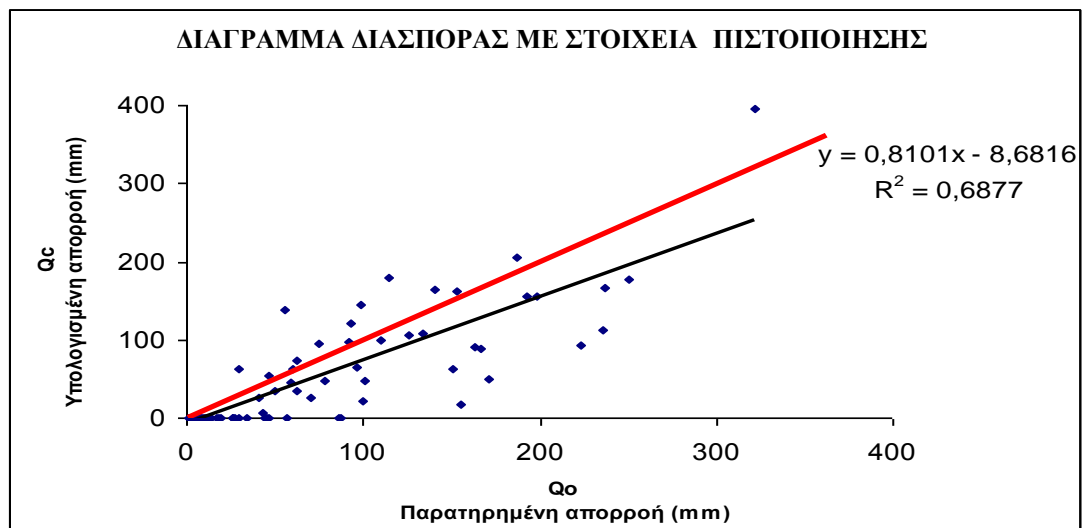


3.γ

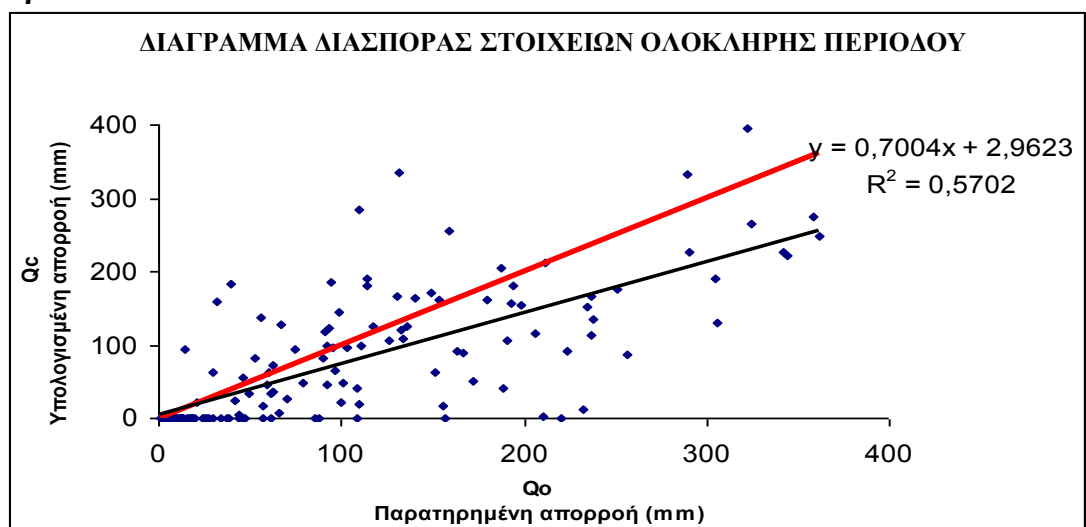
4. Giakoumakis model



4.α

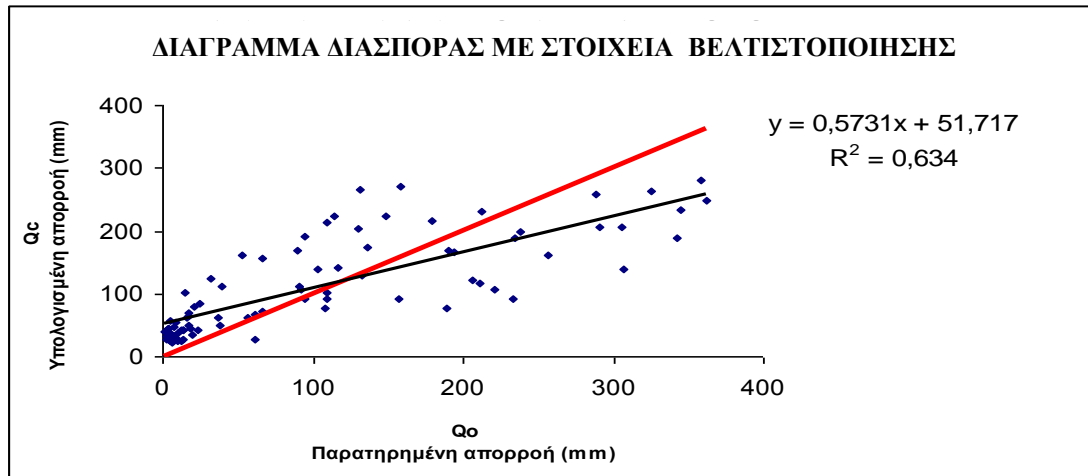


4.β

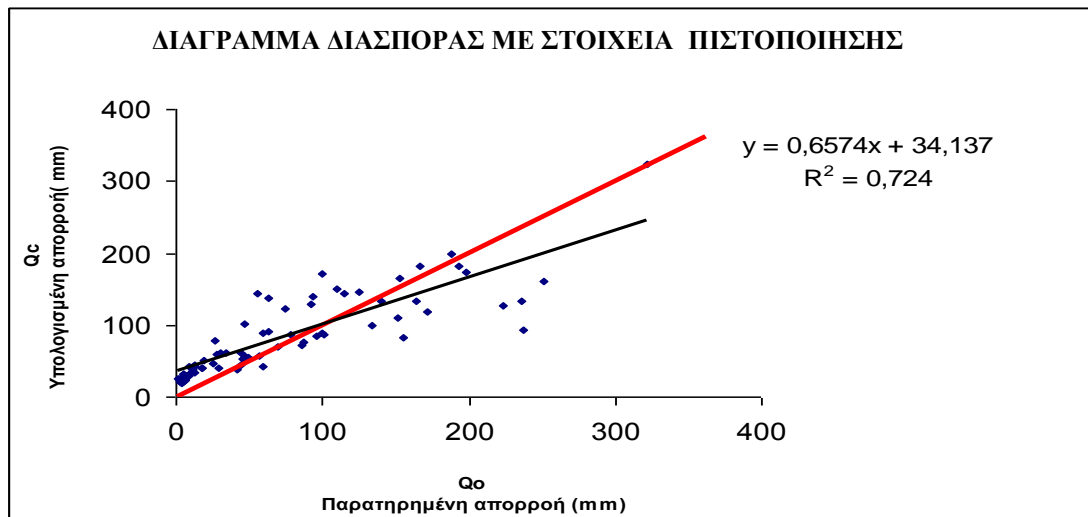


4.γ

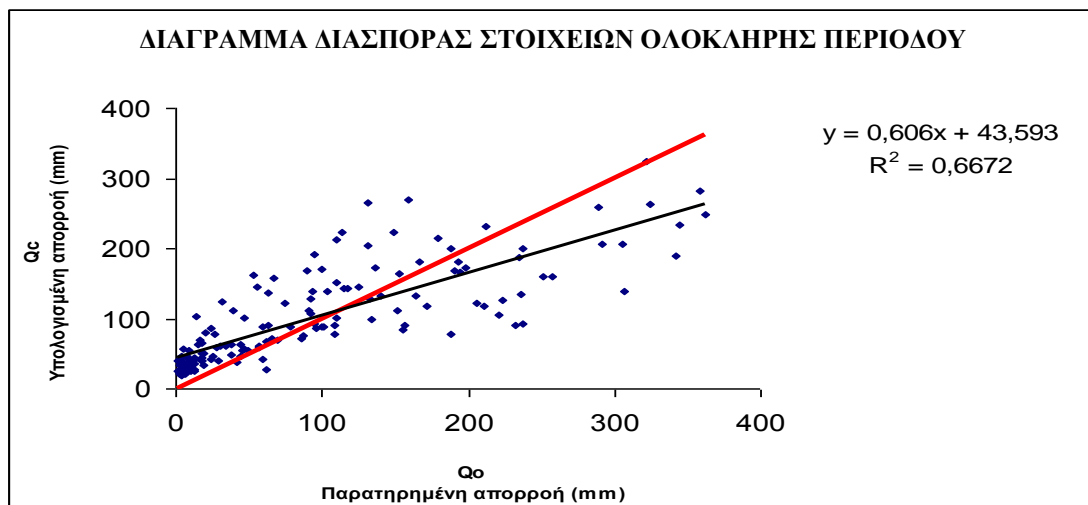
5. Xiong - Guo



5.α



5.β

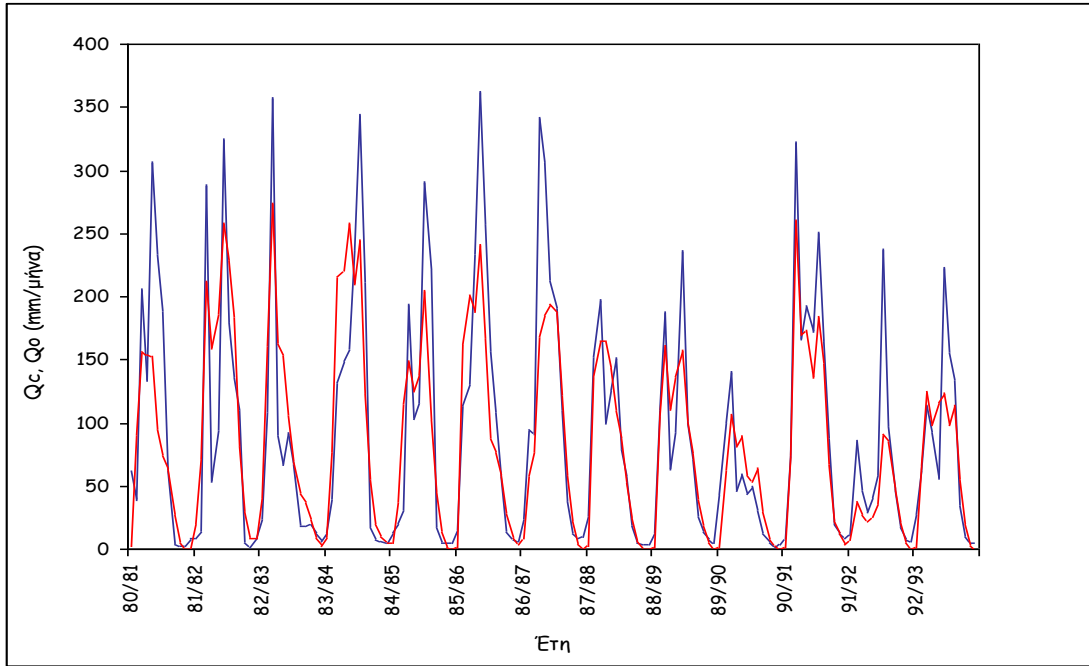


5.γ

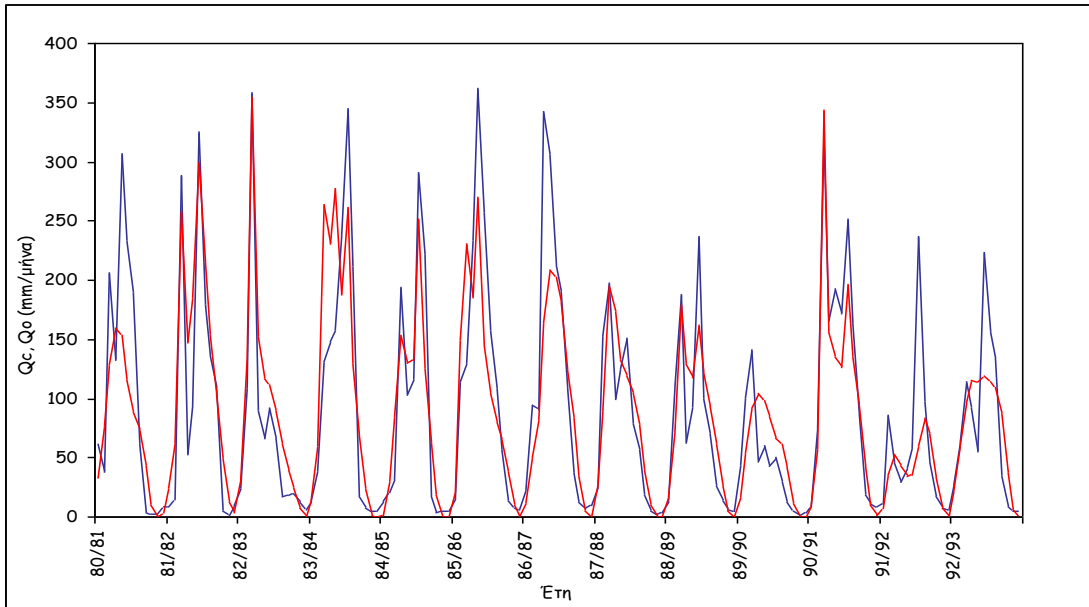
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2^ο

Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και
διαγράμματα διασποράς, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες
μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με τη μέθοδο
Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες.

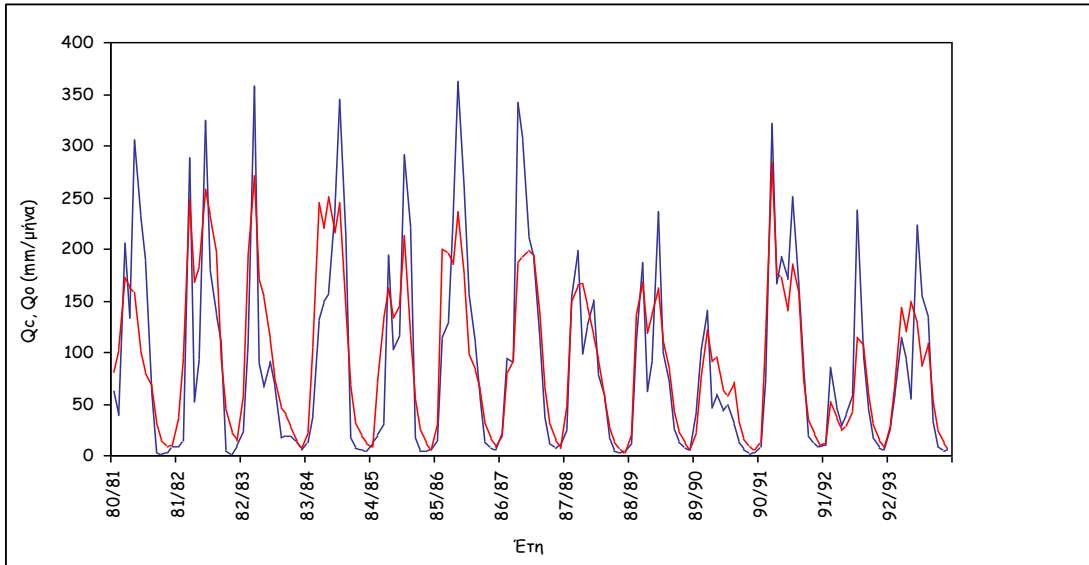
2.Α Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για όλα τα μοντέλα στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.



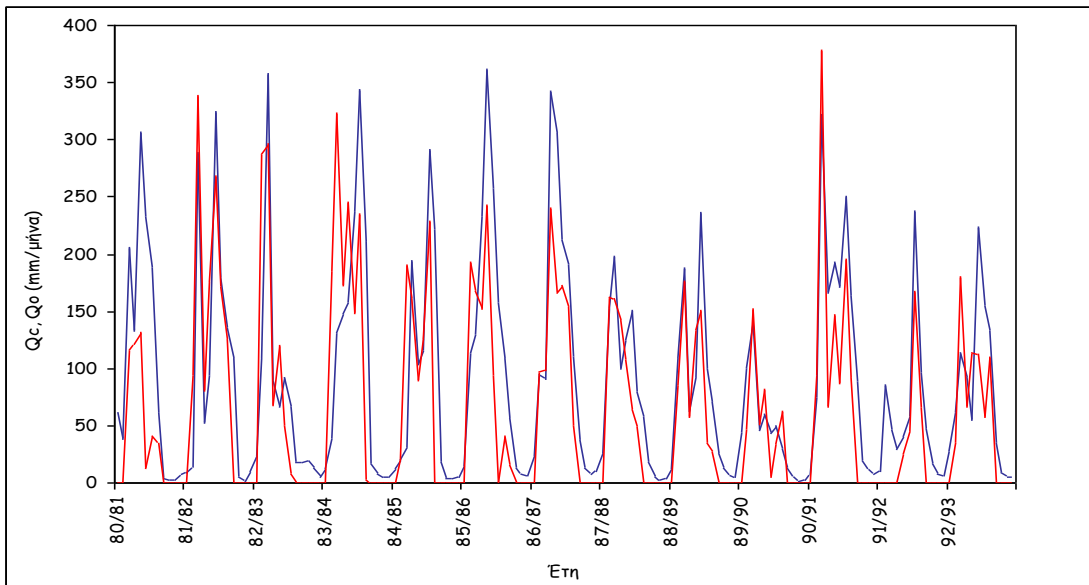
1. Abulohom model



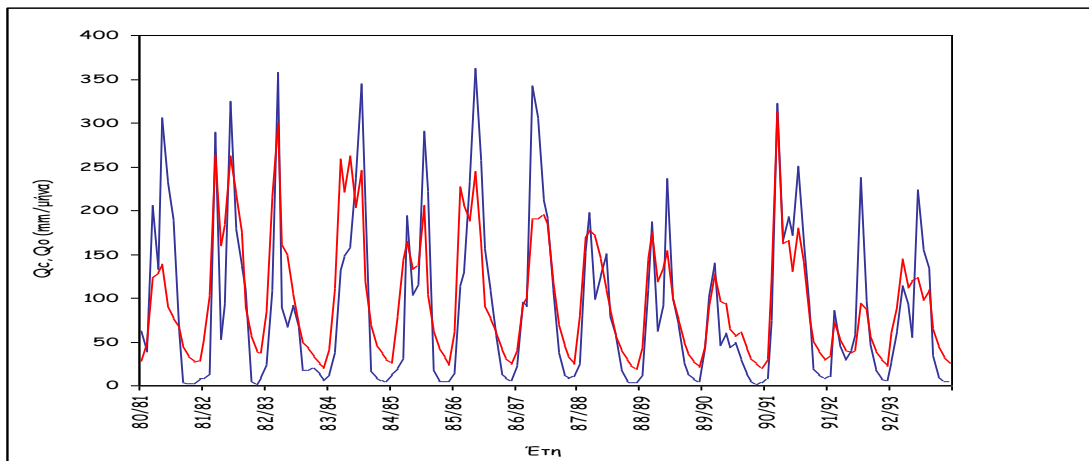
2. Loukas model



3. GR2M model



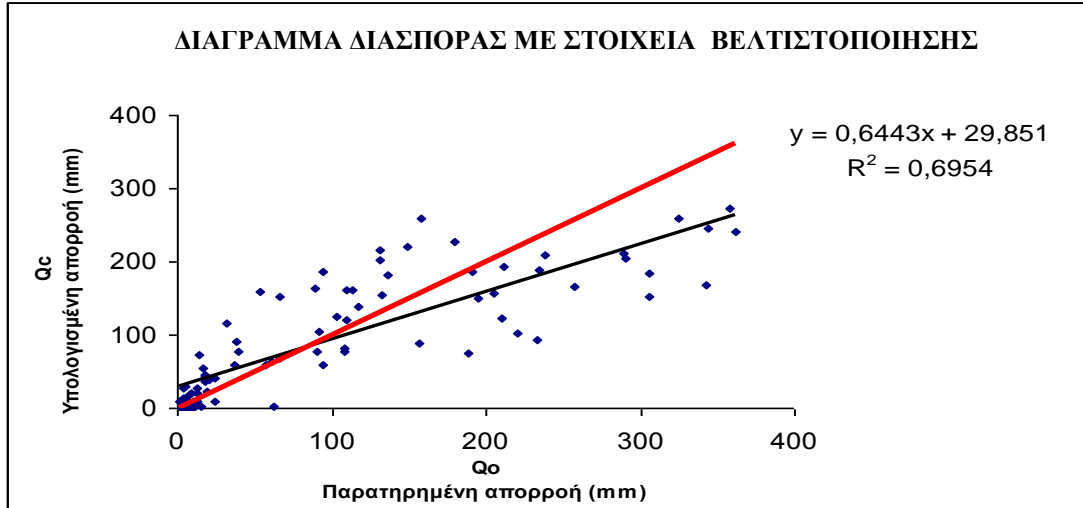
4. Giakoumakis model



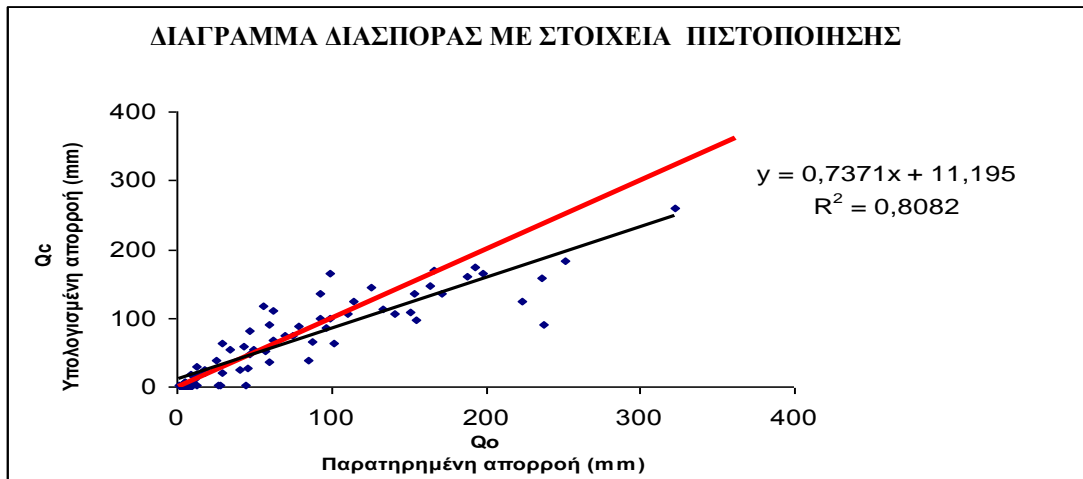
5. Xiong – Guo model

2.B Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blanney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

1. Abulohom model



1.α

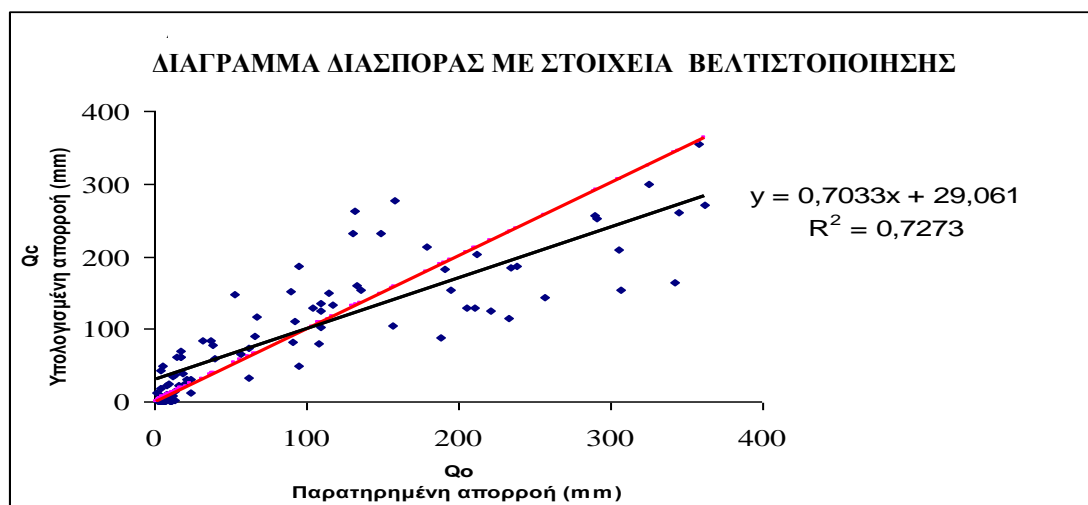


1.β

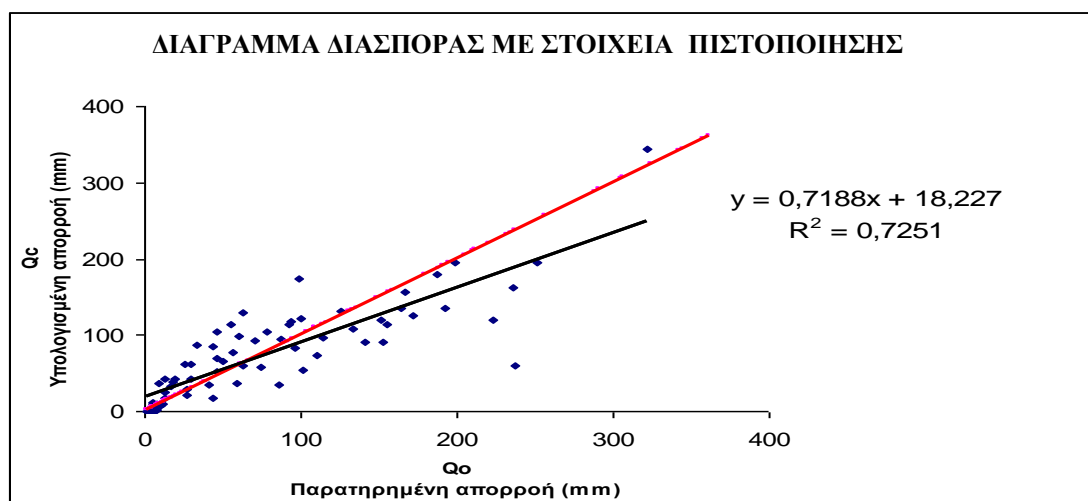


1.γ

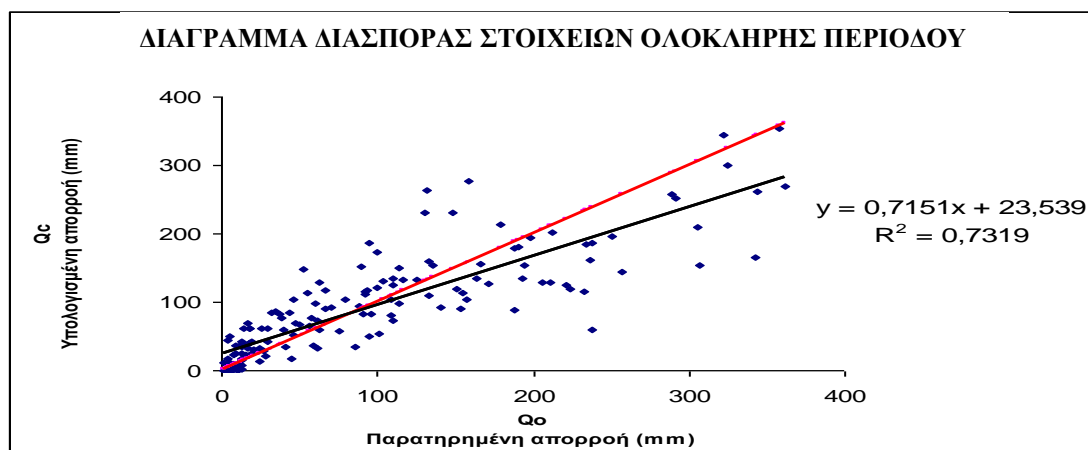
2. Loukas model



2.α

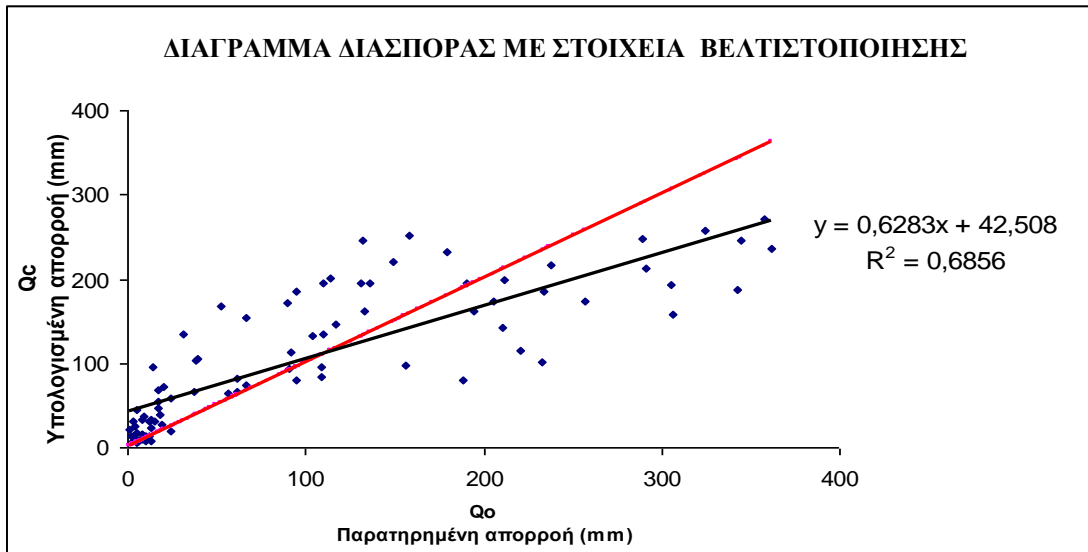


2.β

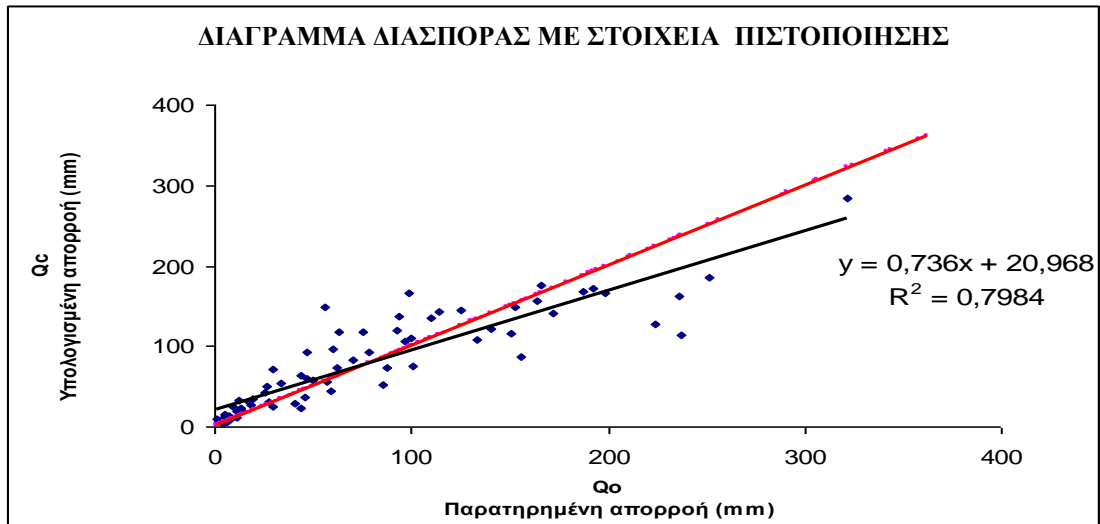


2.γ

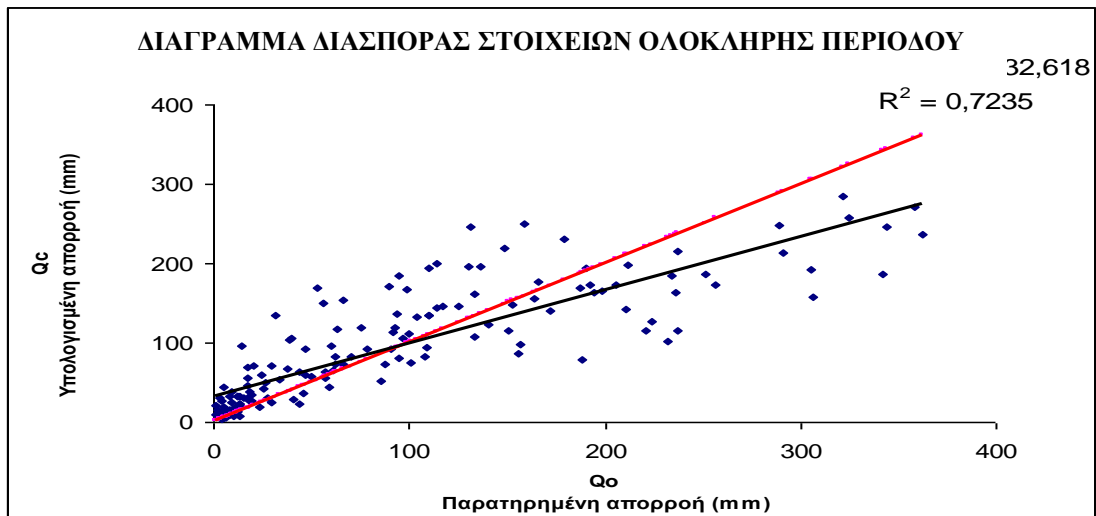
3. GR2M model



3.α

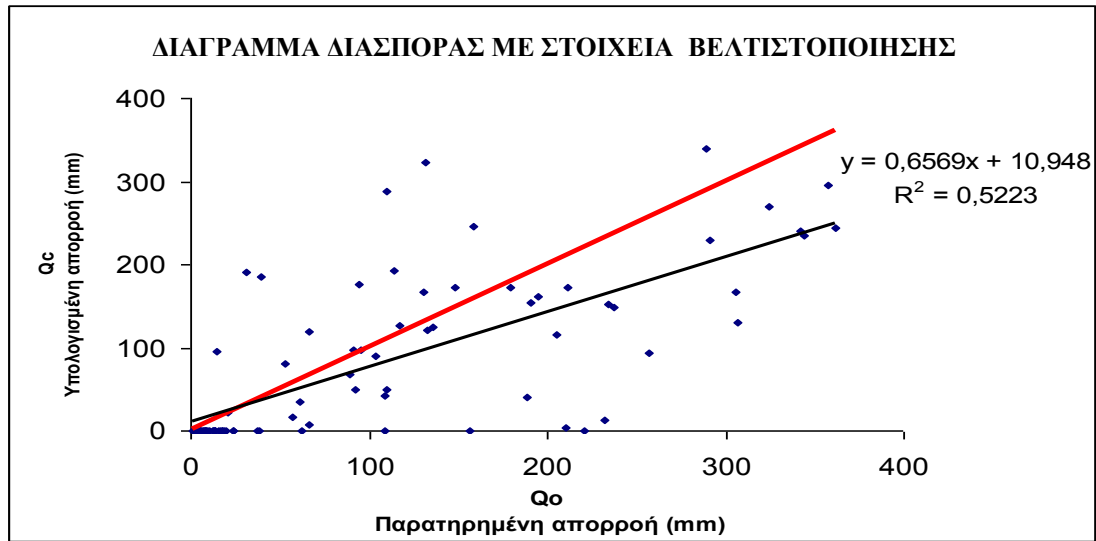


3.β

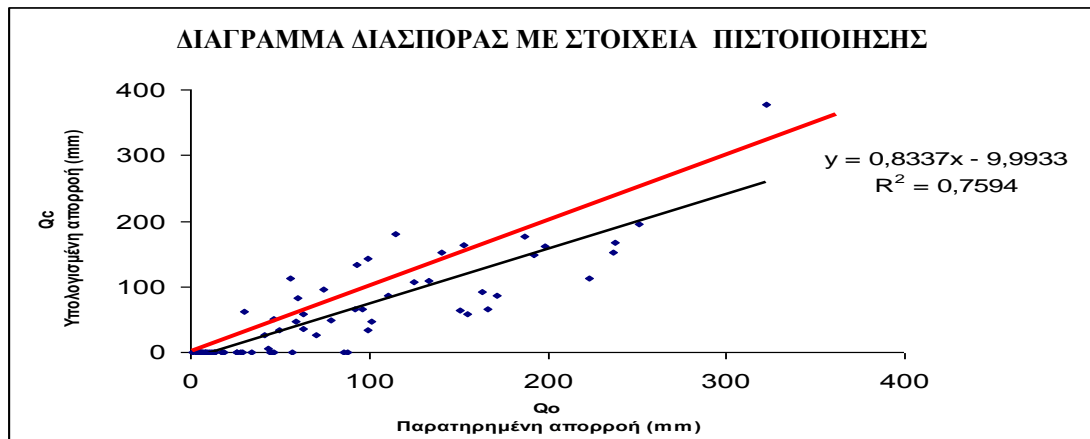


3.γ

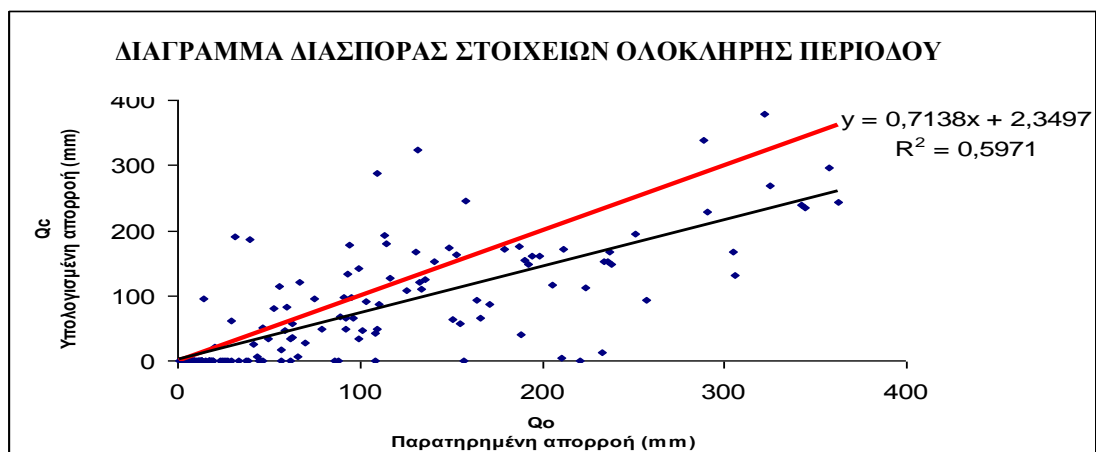
4. Giakoumakis model



4.α

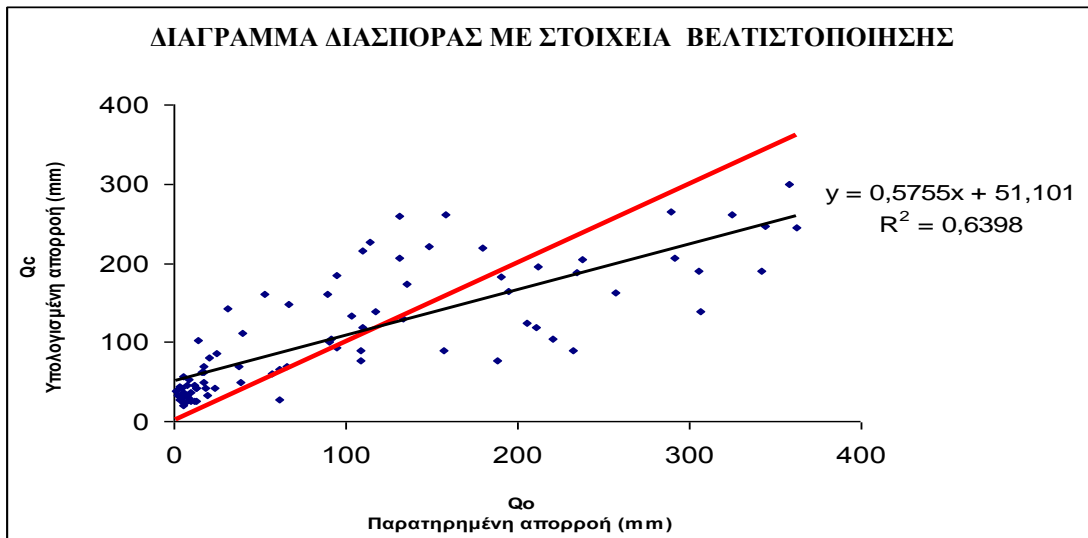


4.β

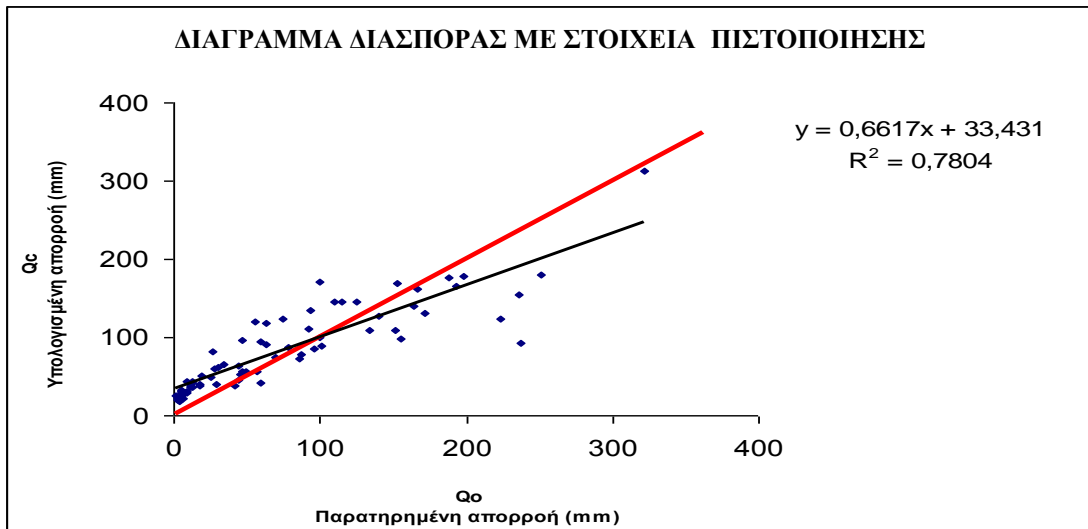


4.γ

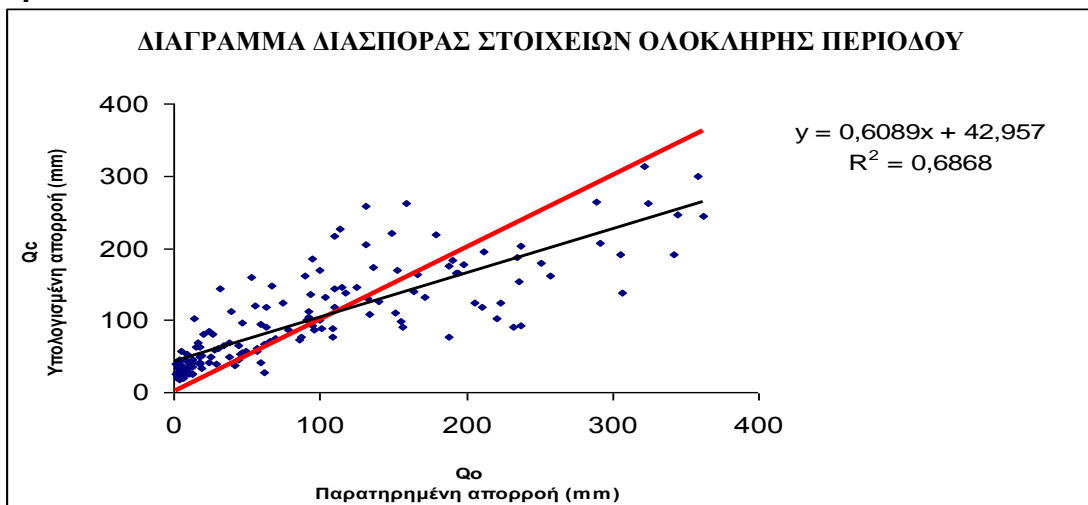
5. Xiong – Guo model



5.α



5.β

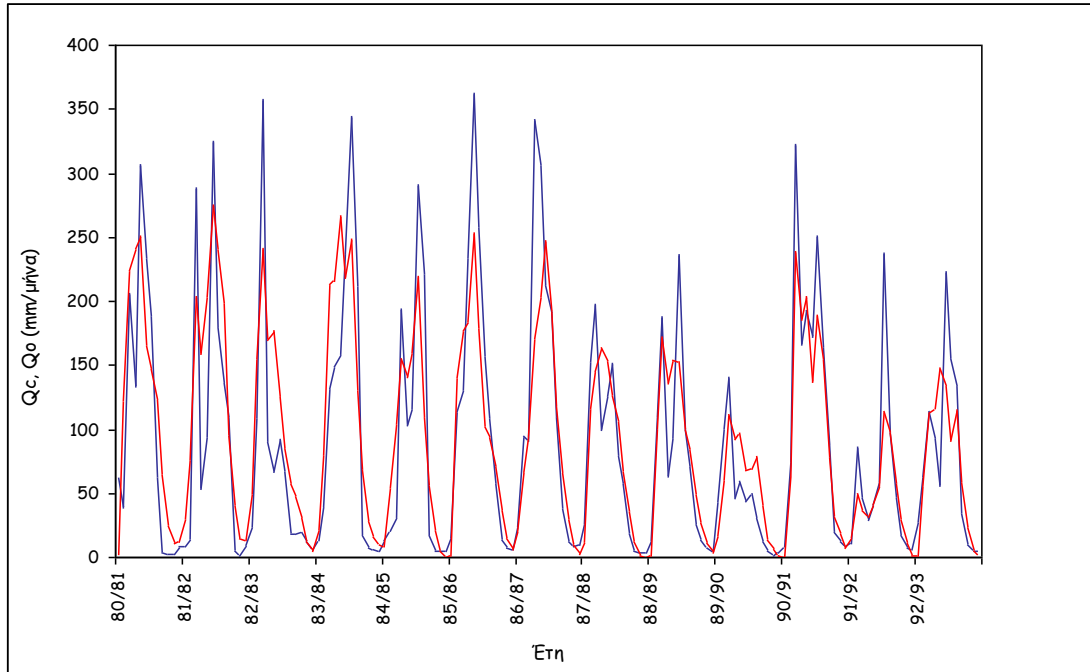


5.γ

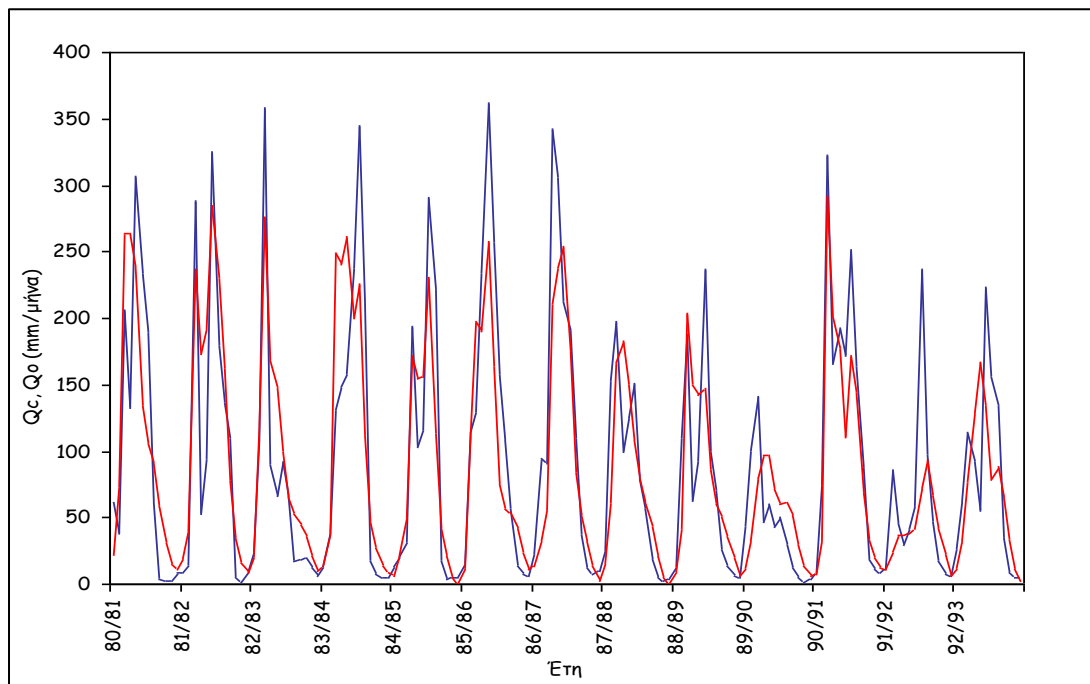
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3^ο

Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και
διαγράμματα διασποράς στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από
δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite.

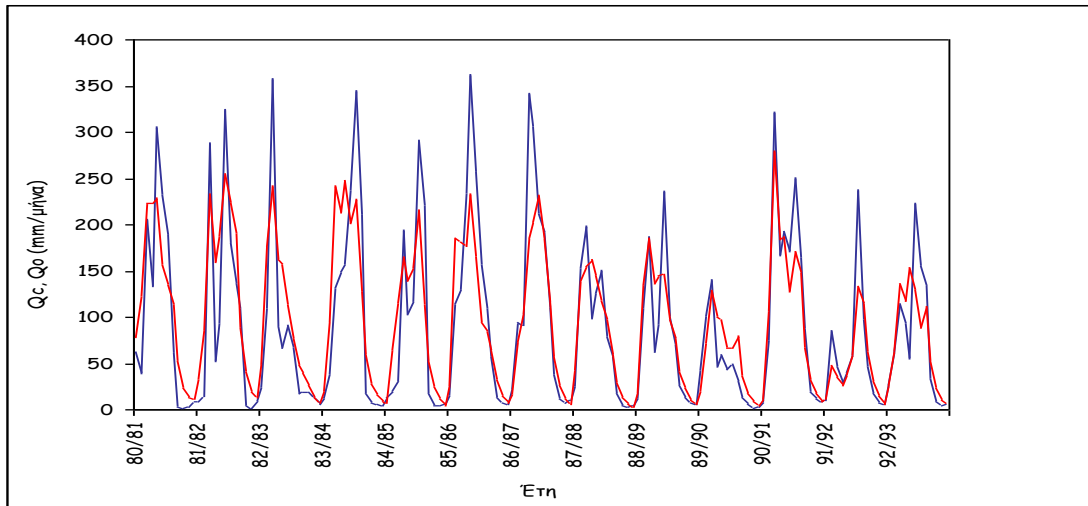
3.A Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.



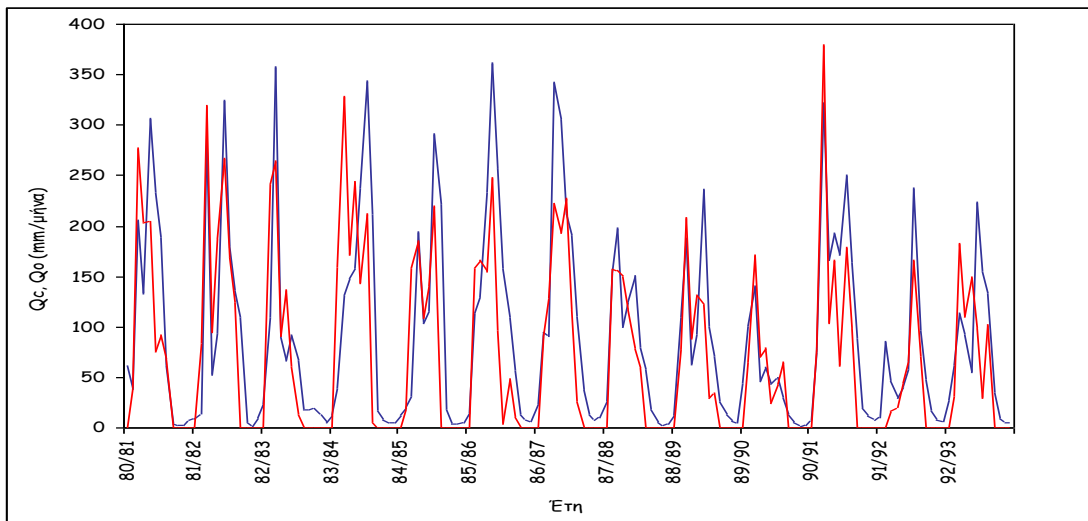
1. Abulohom model



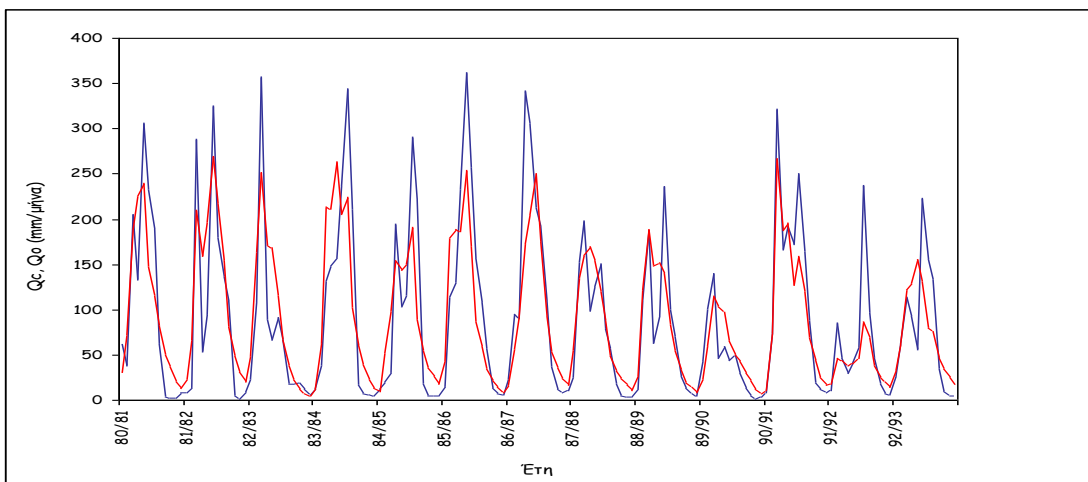
2. Loukas model



3. GR2M model



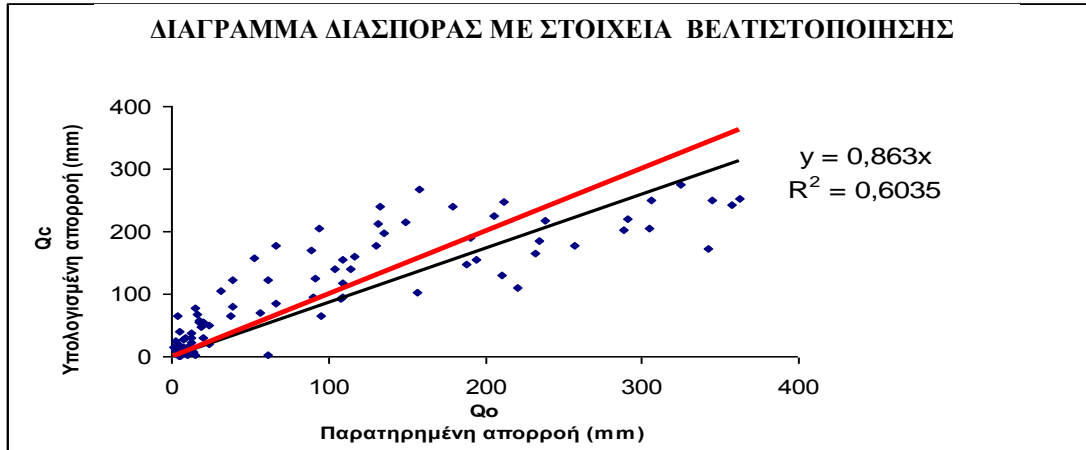
4. Giakoumakis model



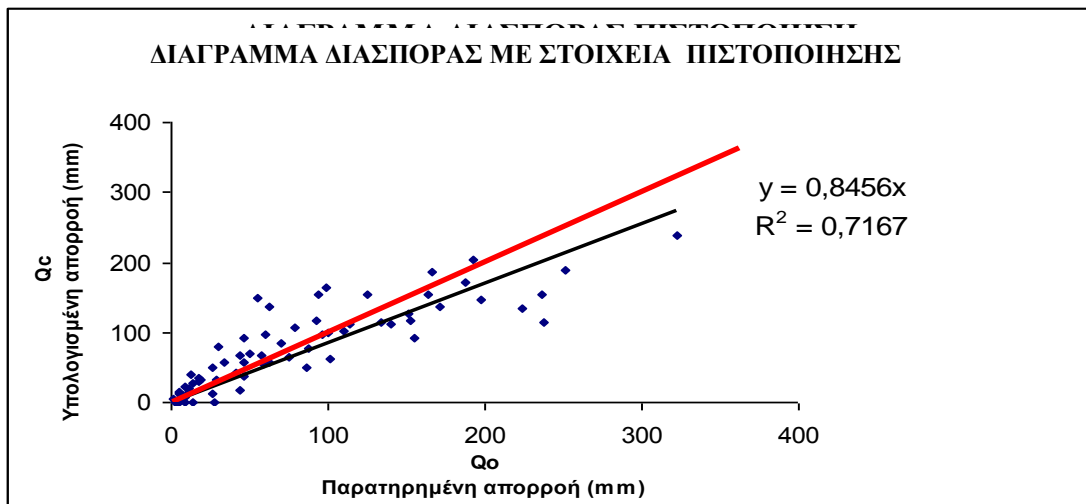
5. Xiong – Guo model

3.B Διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

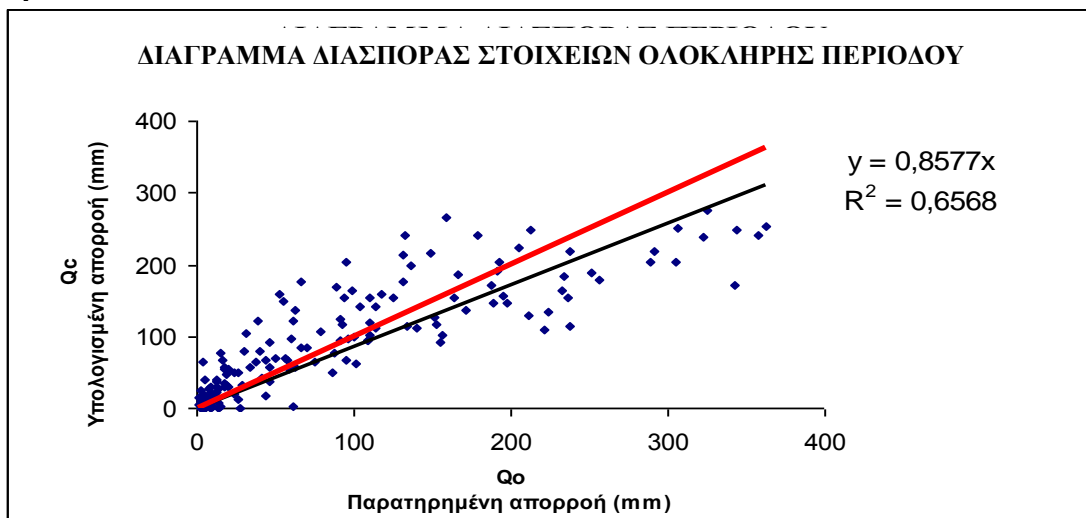
1. Abulohom model



1.α

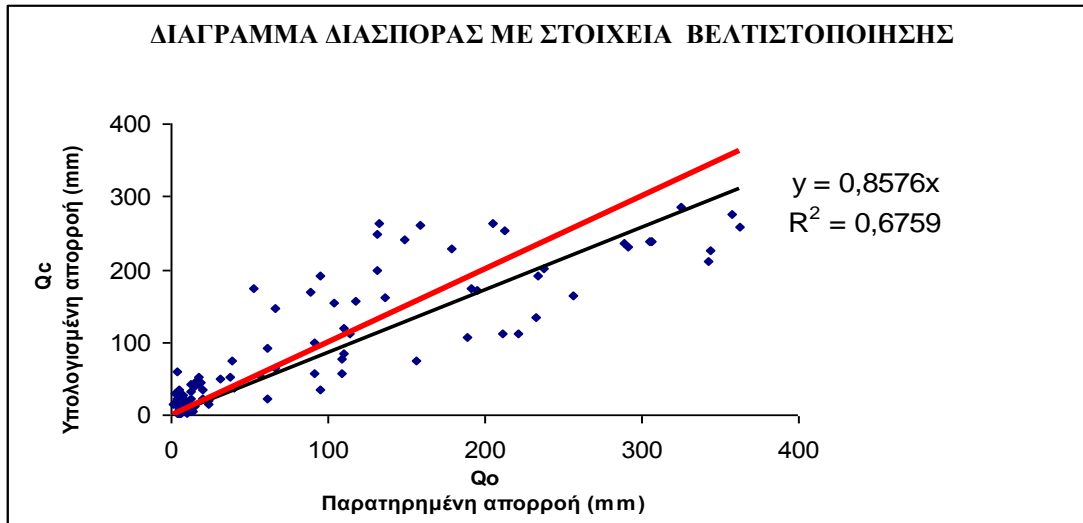


1.β

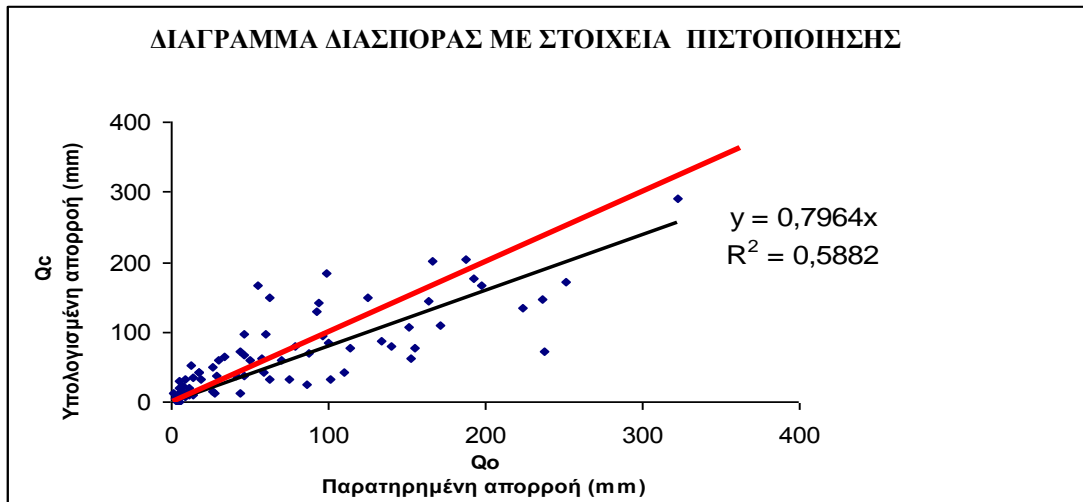


1.γ

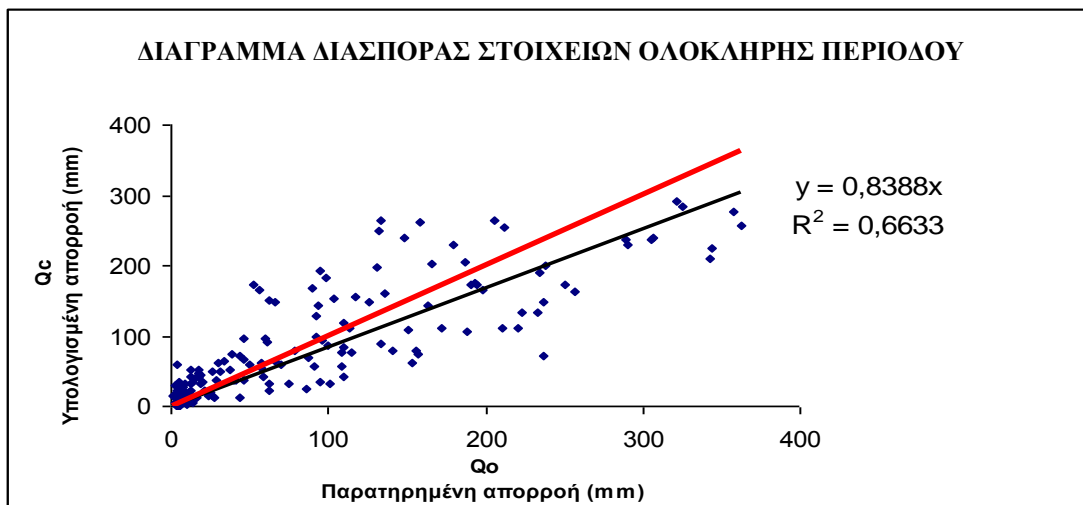
2. Loukas model



2.α

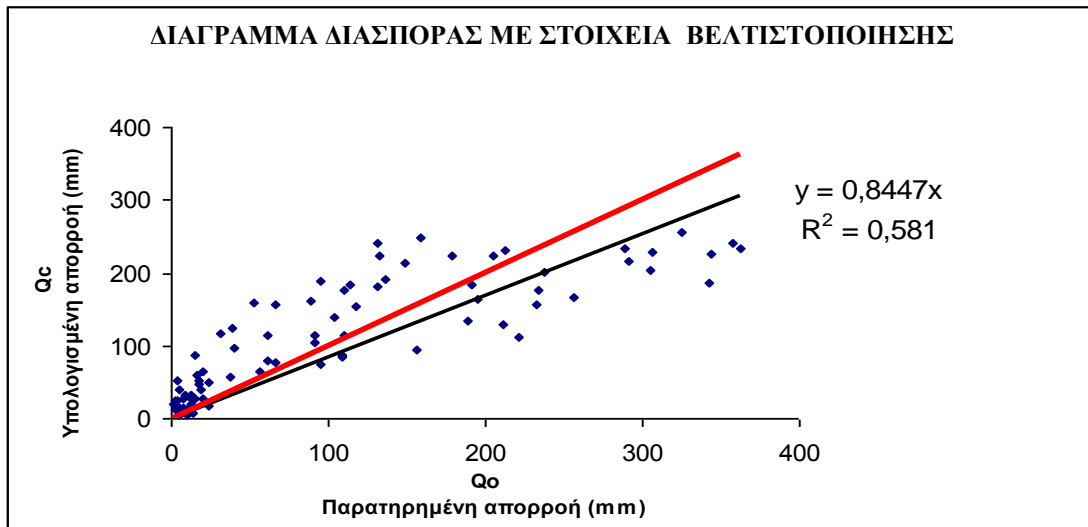


2.β

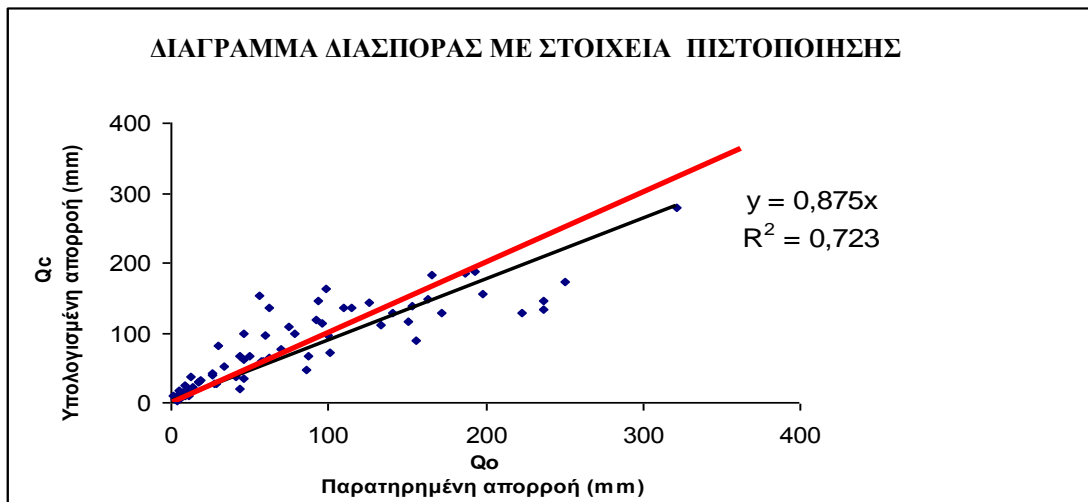


2.γ

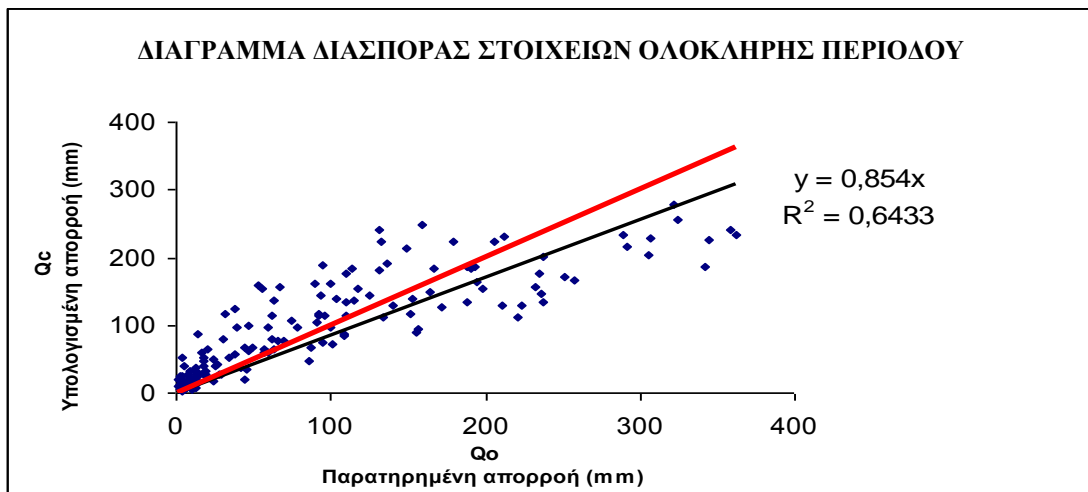
3. GR2M



3.α

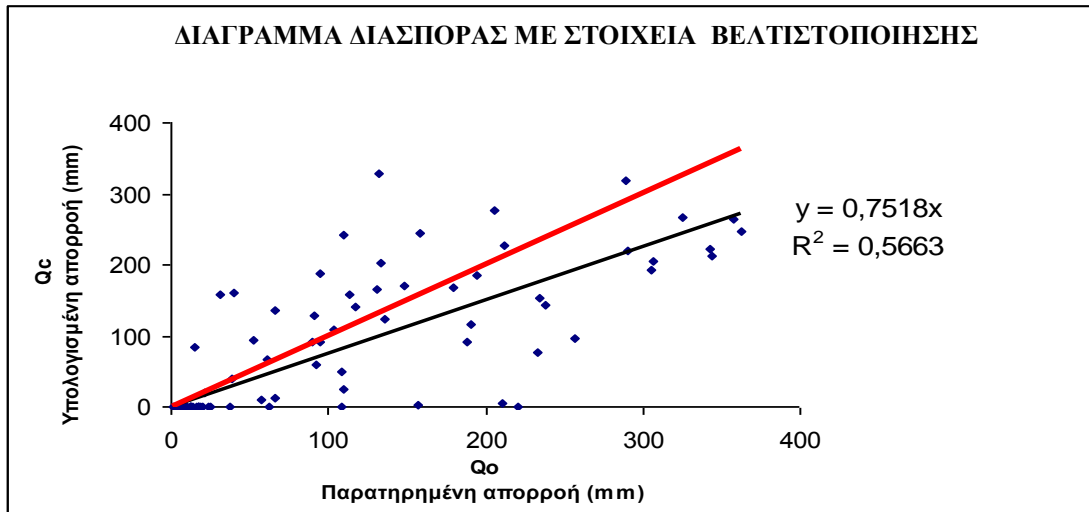


3.β

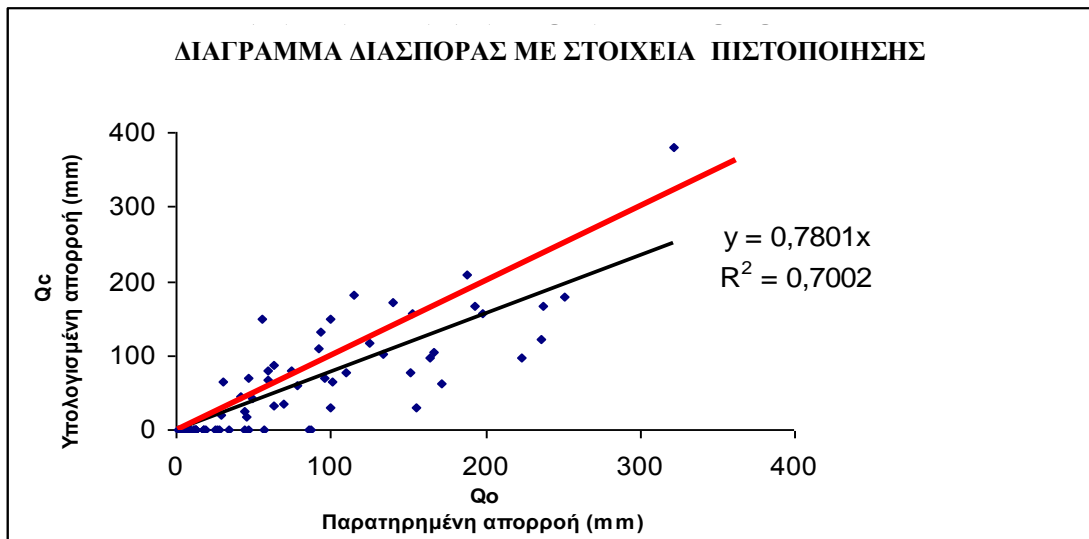


3.γ

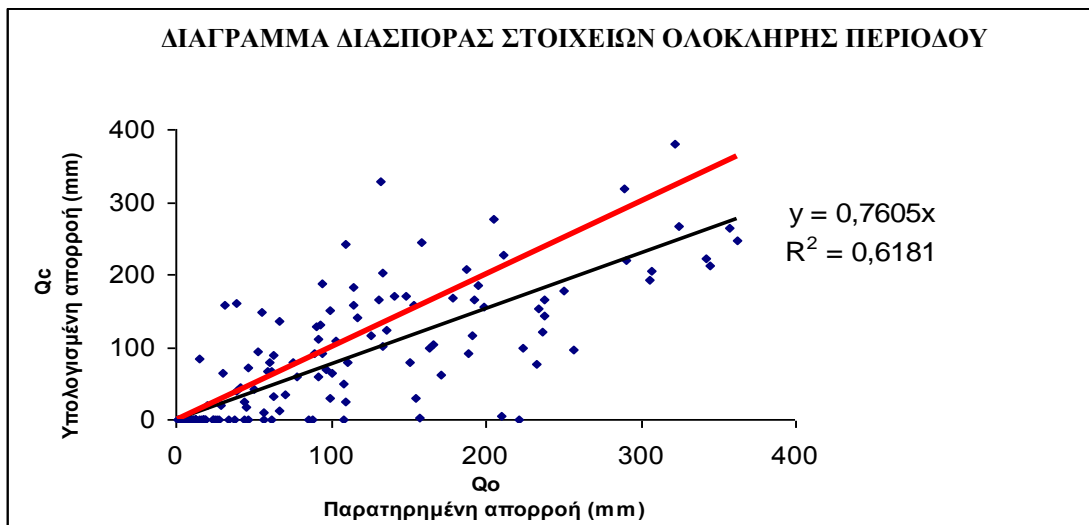
4. Giakoumakis model



4.α

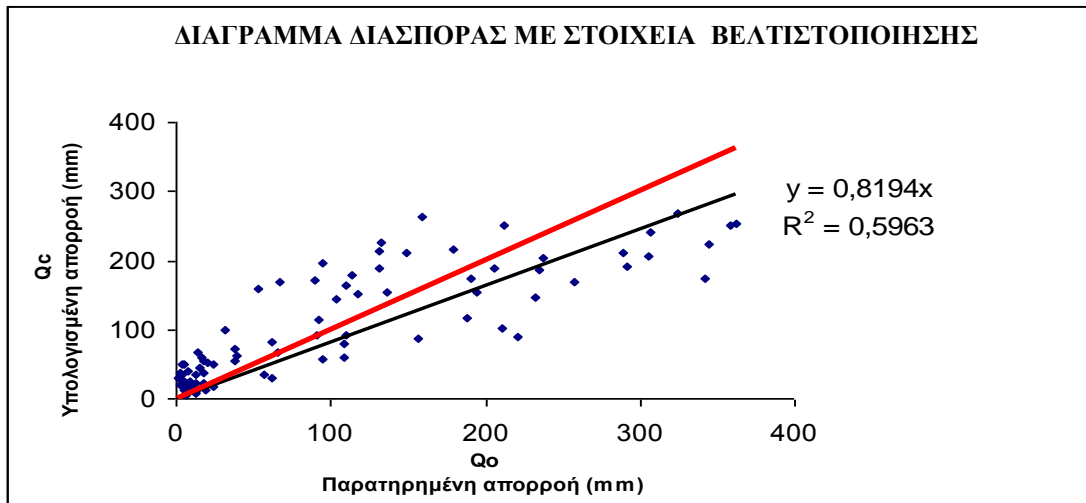


4.β

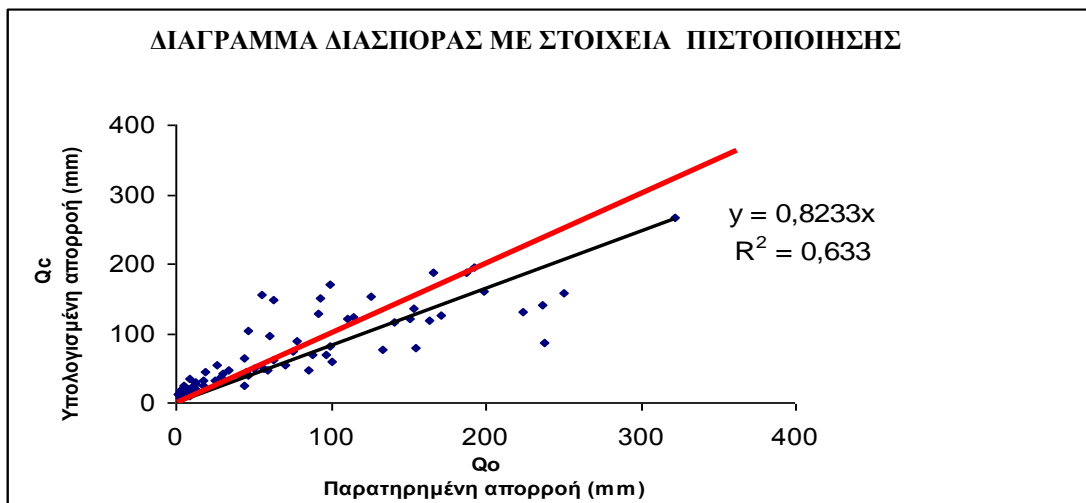


4.γ

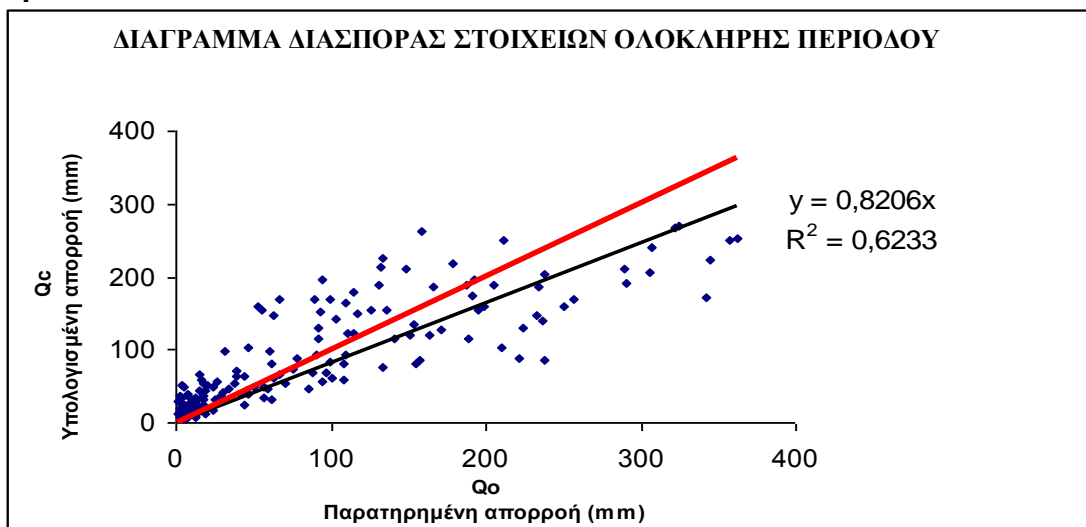
5. Xiong – Guo model



5.α



5.β

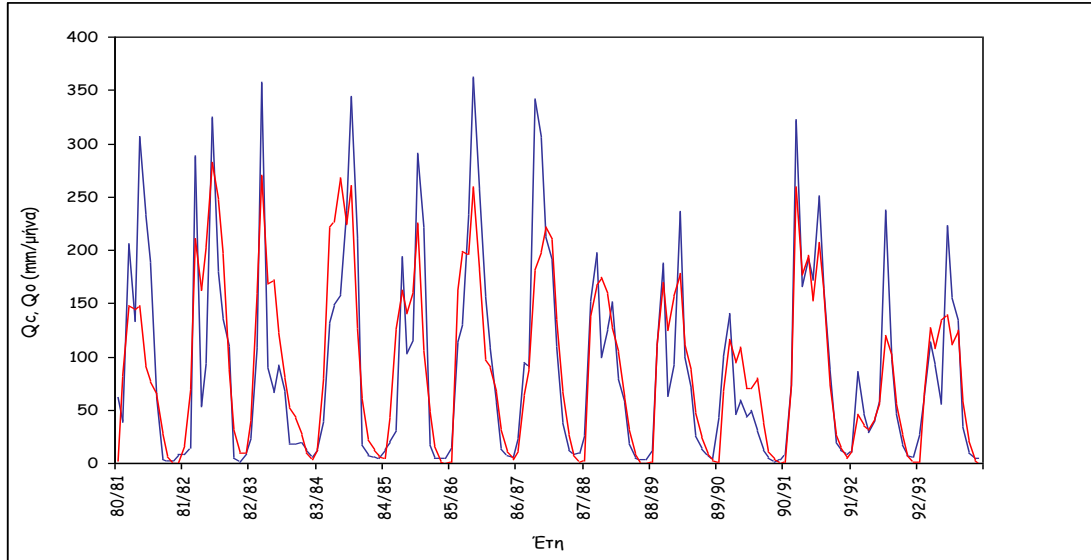


5.γ

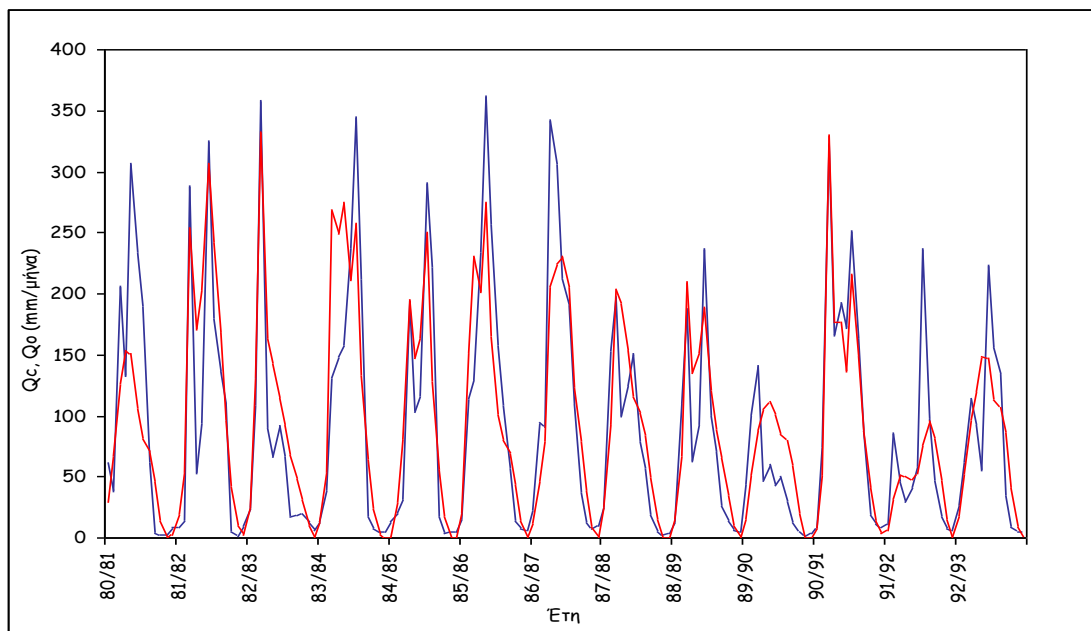
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4^ο

Διαγράμματα πραγματικής - προσομοιωμένης απορροής και διαγράμματα διασποράς για όλα τα μοντέλα χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite.

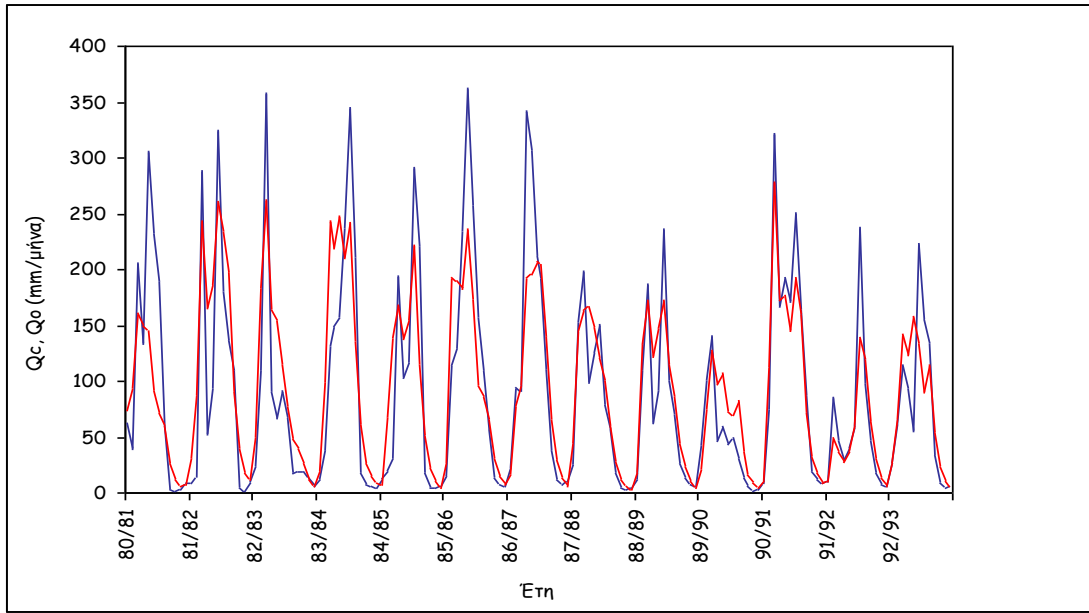
4.A Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για όλα τα μοντέλα χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.



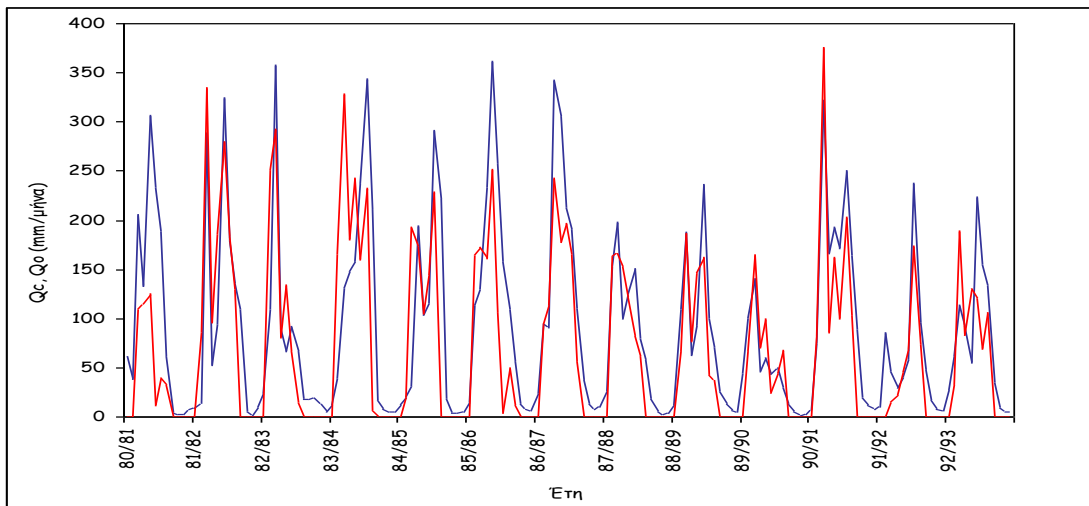
1. Abulohom model



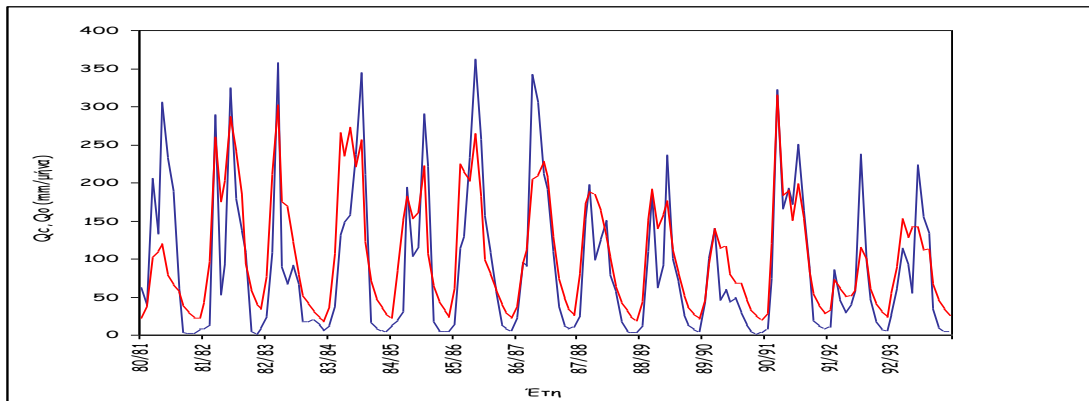
2. Loukas model



3. GR2M model



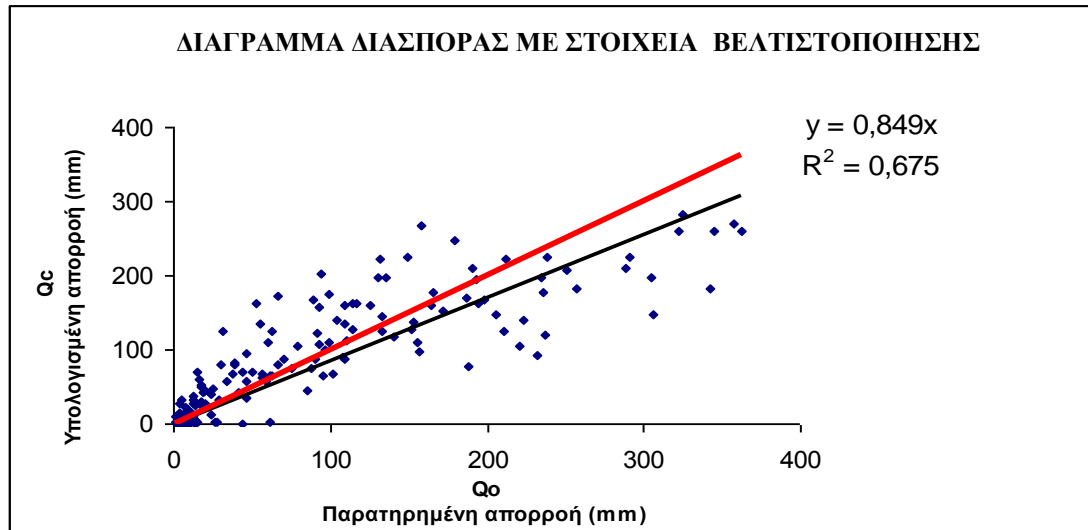
4. Giakoumakis model



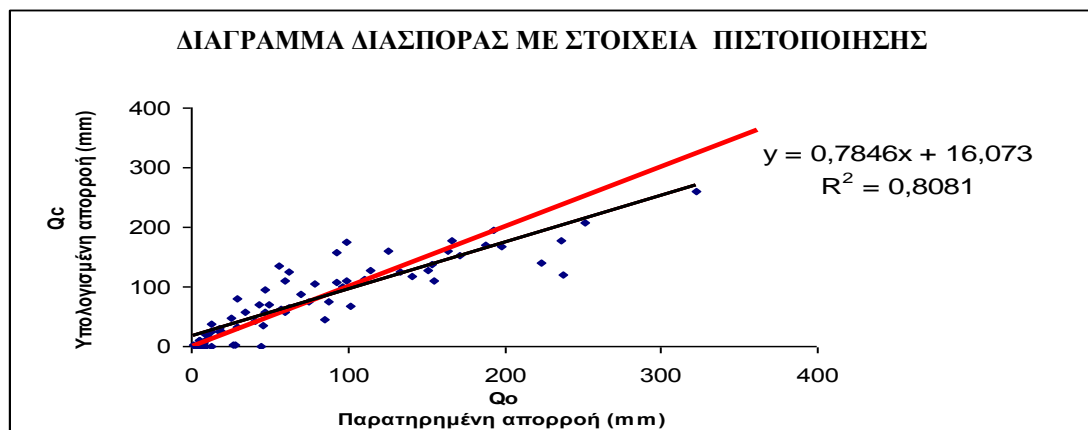
5. Xiong – Guo model

4.B Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής της Πύλης Θεσσαλίας.

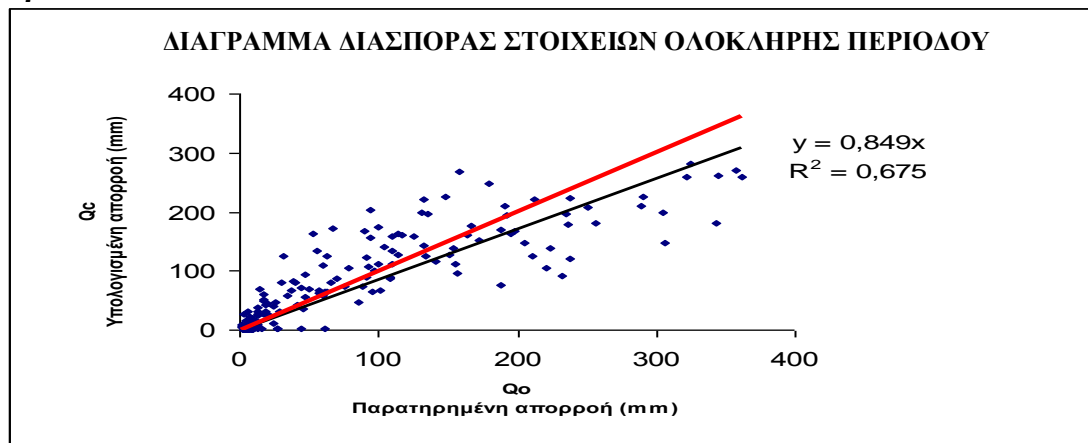
1. Abulohom model



1.α

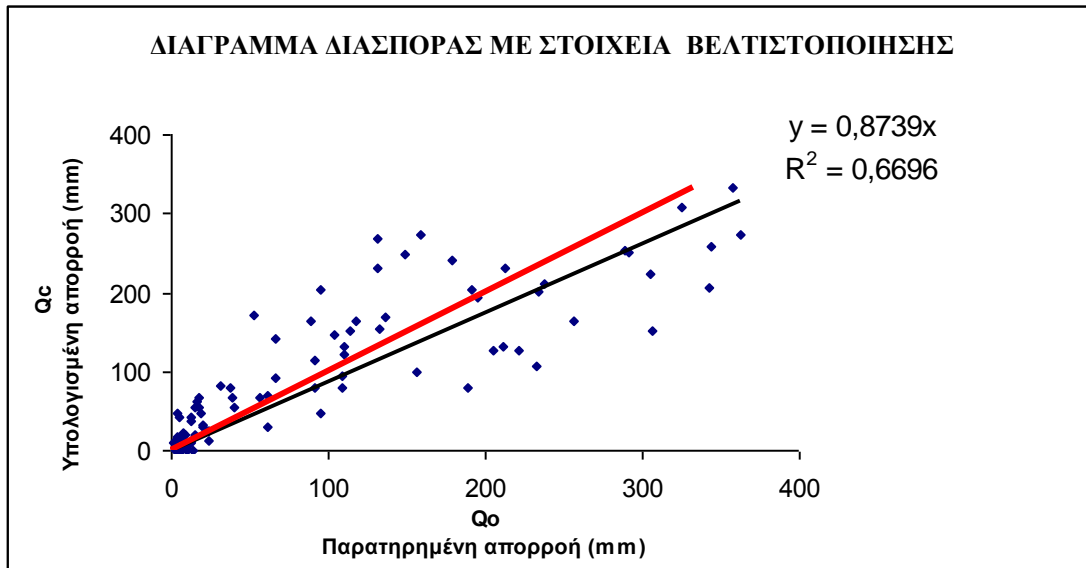


1.β

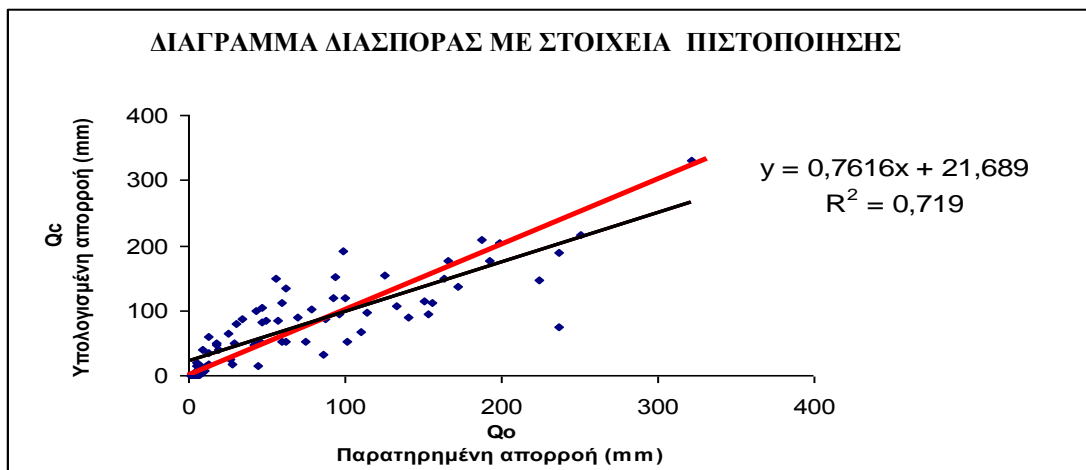


1.γ

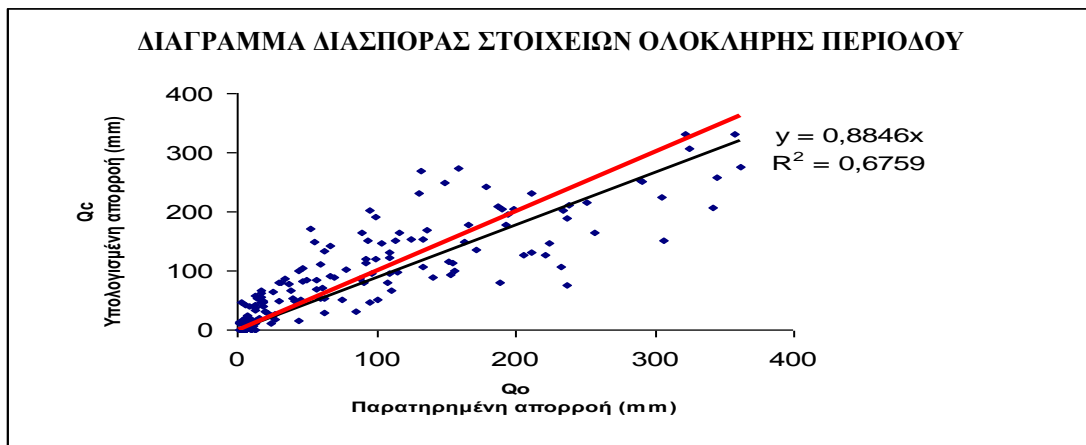
2. Loukas model



2.α

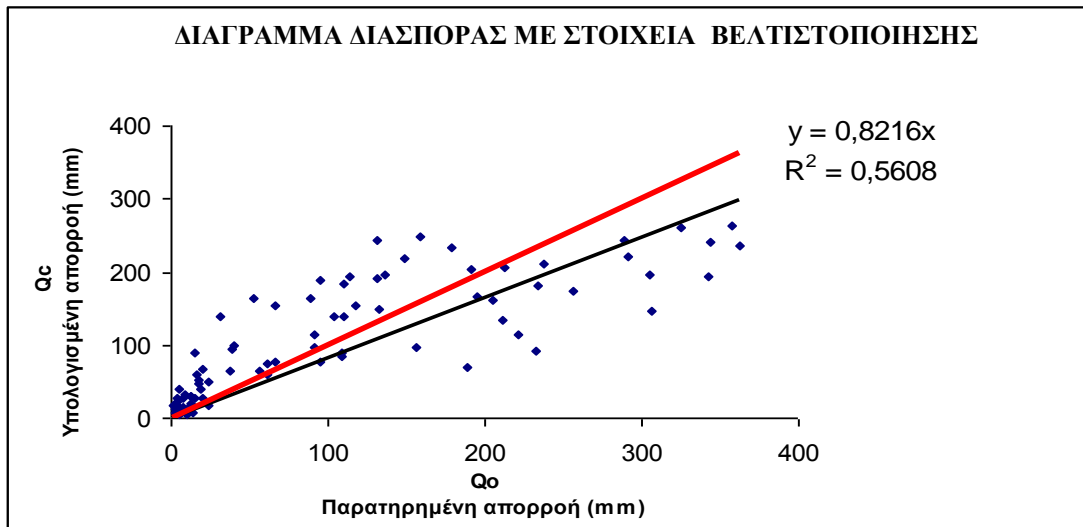


2.β

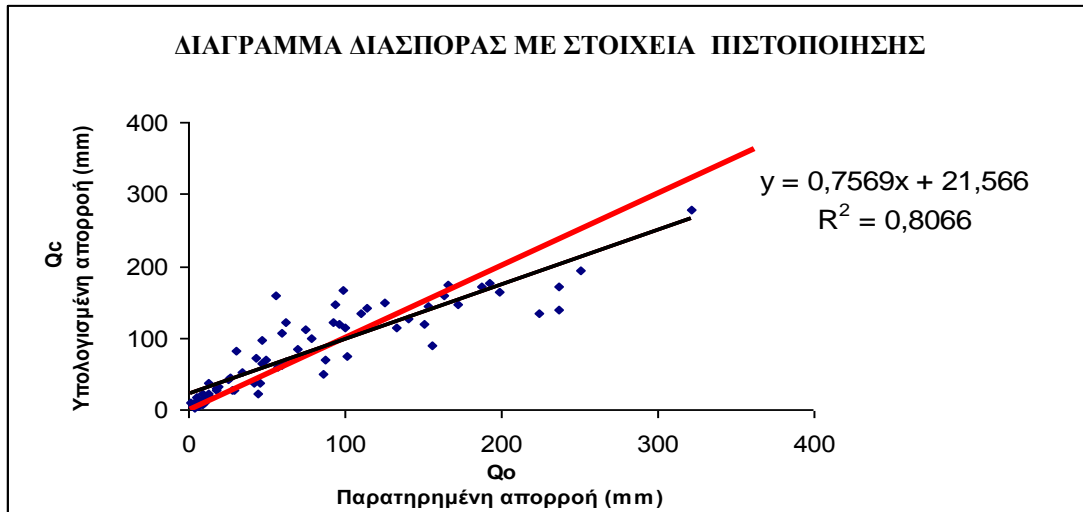


2.γ

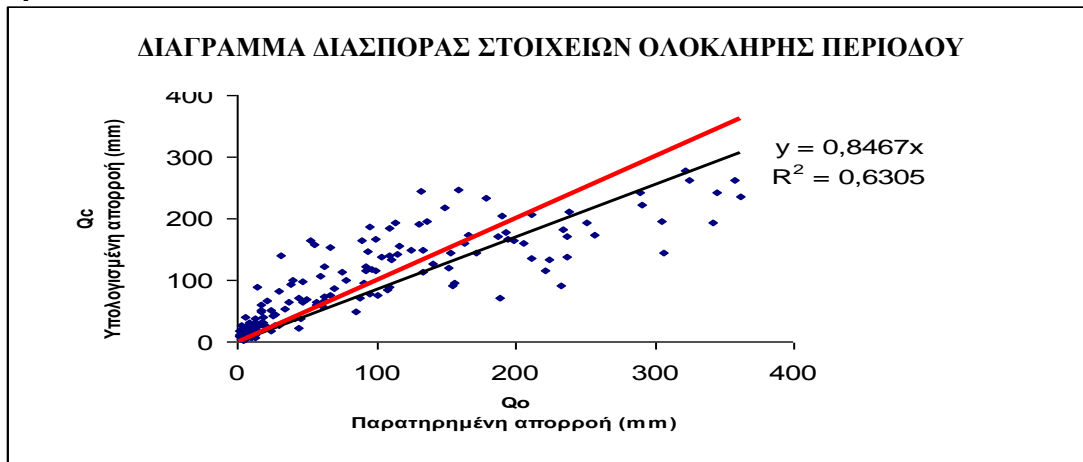
3. GR2M model



3.α

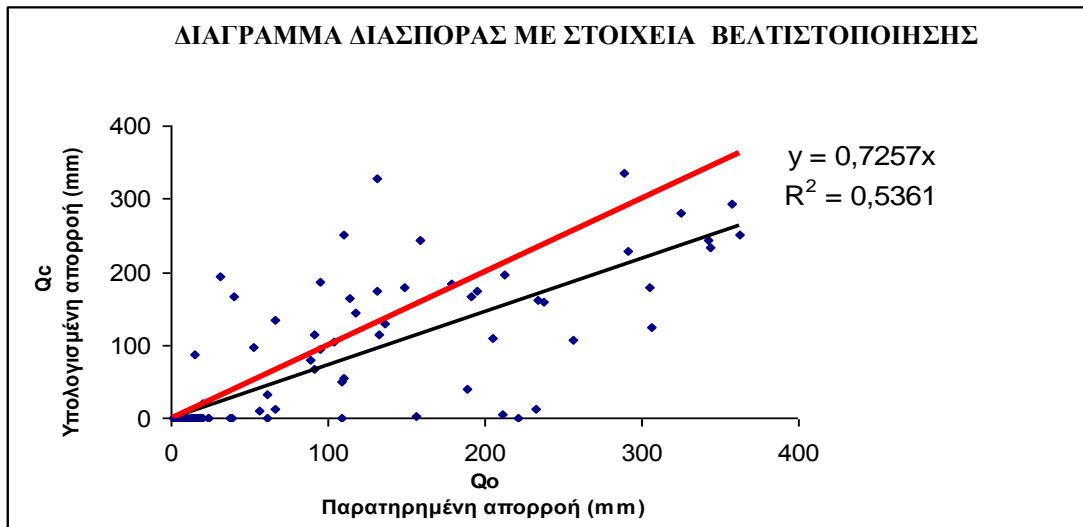


3.β

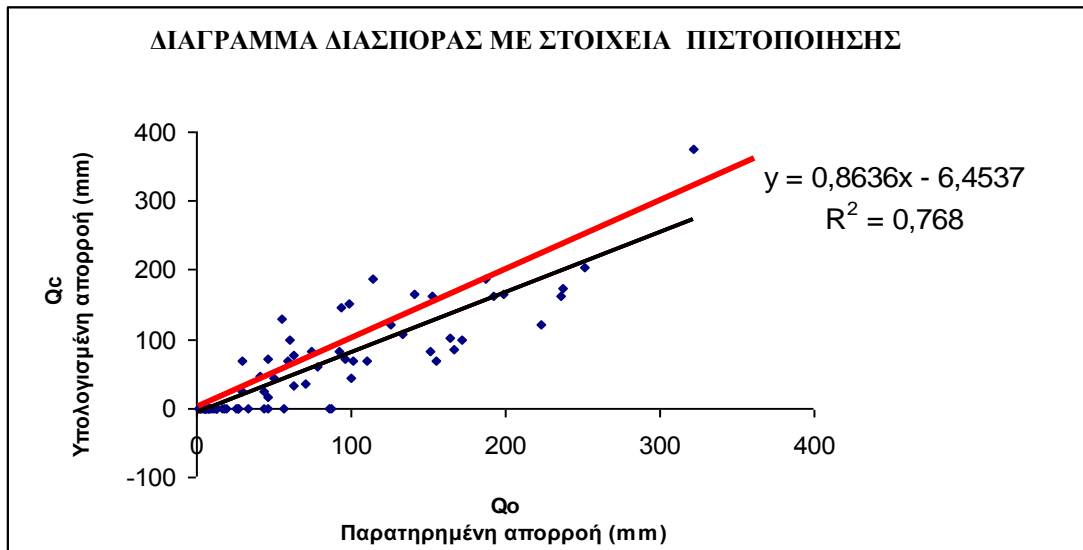


3.γ

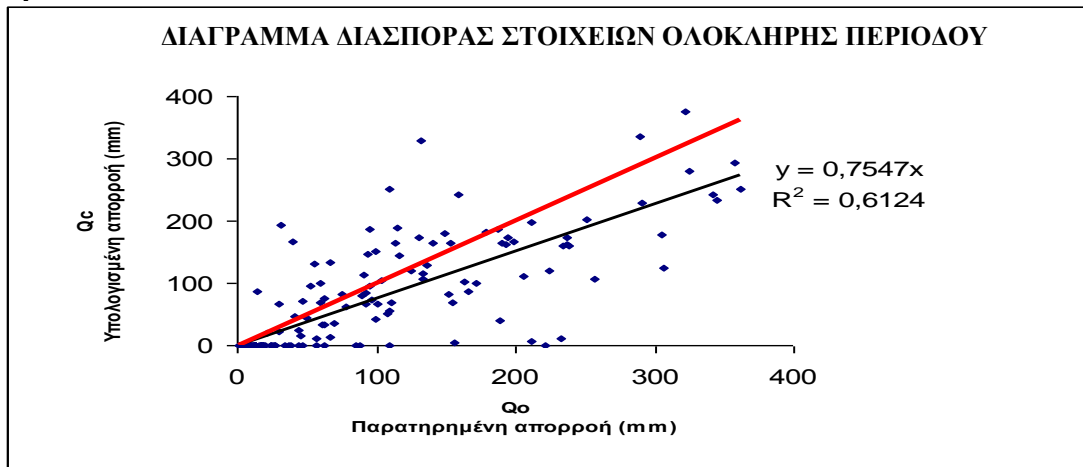
4. Giakoumakis model



4.α

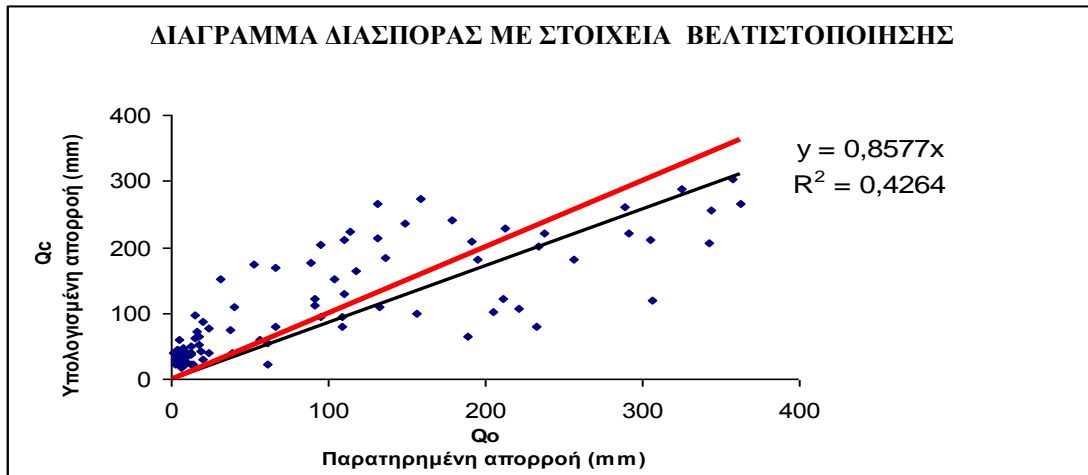


4.β

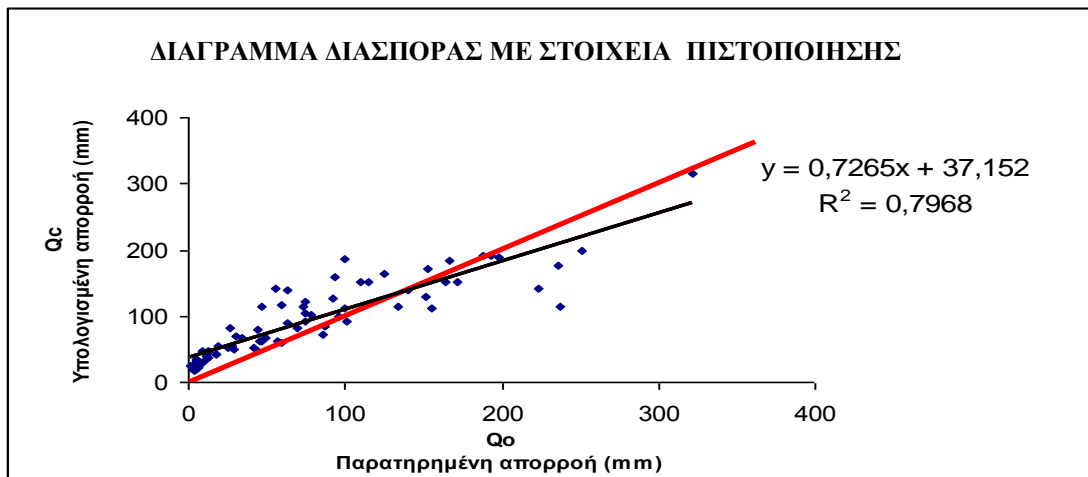


4.γ

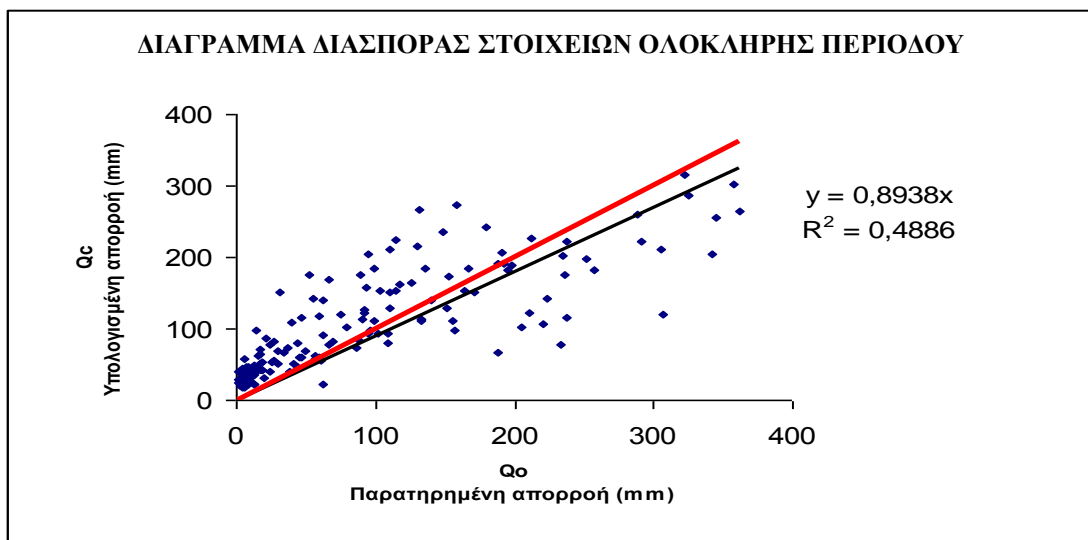
5. Xiong – Guo model



5.α



5.β



5.γ