



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ  
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ  
75% ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ  
25% ΕΘΝΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

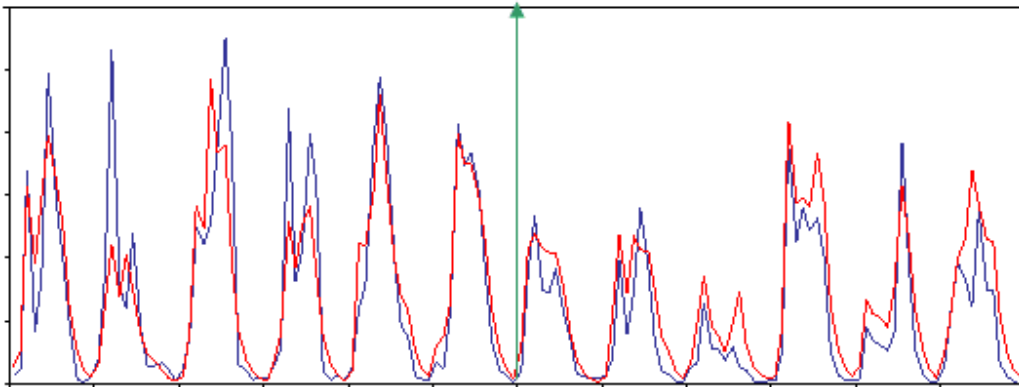


ΠΑΙΔΕΙΑ ΜΠΡΟΣΤΑ  
2<sup>ο</sup> Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Εκπαίδευσης και Αρχικής  
Επαγγελματικής Κατάρτισης

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

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Η χρήση της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων  
Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) στην υδρολογική προσομοίωση μικρών  
λεκανών απορροής**



**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΟΥΛΙΟΣ**

**ΒΟΛΟΣ 2007**

Η χρήση της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών  
(Γ.Σ.Π.) στην υδρολογική προσομοίωση μικρών λεκανών απορροής

**Μέλη εξεταστικής τριμελούς επιτροπής**

1. Γεώργιος Ε. Δήμου Αναπληρωτής Καθηγητής, Άλγεβρα – Διαφορικός και Ολοκληρωτικός Λογισμός – Αναλυτική, Παραστατική και Διαφορική Γεωμετρία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων.
2. Νικόλαος Ρ. Δαλέζιος, Καθηγητής, Αγρομετεωρολογία- Δορυφορική Μετεωρολογία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.
3. Μάριος Σαπουντζής, Λέκτορας, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μέλος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών με τίτλο «Αειφορική διαχείριση υδατικού περιβάλλοντος» στο τμήμα Γεωπονίας – Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας, μετά την επιτυχή παρακολούθηση του κύκλου των μεταπτυχιακών μαθημάτων, εκπονήθηκε και η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Η συγκεκριμένη εργασία δεν ήταν μόνο προϋπόθεση για την ολοκλήρωση αυτού του επιτυχούς κύκλου σπουδών αλλά εξελίχθηκε και σε μια πολύτιμη απόκτηση γνώσεων και εμπειριών σε ειδικά θέματα.

Πρωταρχικά θα ήθελα να πω ένα μεγάλο και θερμό ευχαριστώ στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Ε. Δήμου ο οποίος ήταν δίπλα μου, όχι μόνο σ' αυτή μου την προσπάθεια αλλά σε κάθε σταυροδρόμι της εκπαιδευτικής μου πορείας, παρόλο τις ιδιαίτερα αυξημένες επαγγελματικές του υποχρεώσεις και τον εξαιρετικά μεγάλο φόρτο εργασίας του.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Νικόλαο Ρ. Δαλέζιο για την εμπιστοσύνη που έδειξε άμεσα στο πρόσωπο μου, για το χρόνο του, τις γνώσεις του, την πολύτιμη εμπειρία του, τις συμβουλές του και την καθοδήγηση του σ' όλη την πορεία μου.

Έπειτα, ευχαριστώ το Λέκτορα κ. Μάριο Σαπουντζή του οποίου οι παρατηρήσεις του, η υποστήριξη του και οι γνώσεις του για την υπό μελέτη περιοχή, ήταν καίριες και σημαντικές.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους προϊσταμένους μου στα Δασαρχείο Καλαμπάκας κ. Στέφανο Αγγελάκα Δασολόγο με Α βαθμό, για την αρχική ιδέα

παρακολούθησης του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού, και τον κ. Γεώργιο Σωτηρίου Δασολόγο με Α βαθμό, ο οποίος με παρότρυνε για την ολοκλήρωση του.

Ευχαριστώ επίσης, τον Δασάρχη Μουζακίου κ. Βασίλειο Νίκου, τον τμηματάρχη Δασικών έργων του Δασαρχείου Μουζακίου Δασολόγο κ. Μπαλάσκα και όλο το υπαλληλικό προσωπικό του Δασαρχείου. Επιπλέον, τους κ.κ. Ισίδωρο Κωτσωρέ, Παντελή Τζούγκα και Παντελή Παντελόπουλο αρμοδίους Υπαλλήλους του αρμοδίου τμήματος του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων έργων για την εύρεση στοιχείων από τα αρχεία της Υπηρεσίας τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες και συνοδοιπόρους μου σ' αυτό τον αγώνα κ. Έφη Κανέλλου και κ. Ευανθία Χονδρονίκου, για την πολύτιμη και ανεκτίμητη βοήθειά τους και για την παροχή πληροφοριών υποστηρίζοντας με. Ακόμα τους κ. Άννα Μπλάντα, κ. Βασίλη Πολύμερο, κ. Ουρανία Ποδηματά και Στυλιανή Βαγιάνου, για την ψυχολογική υποστήριξη τους και για το ότι ήμασταν μαζί σ' αυτό τον αγώνα από την αρχή μέχρι το τέλος .

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μητέρα μου και στην αδερφή μου, που ήταν, είναι και θα είναι κοντά μου και με ανέχτηκαν σε κάθε δύσκολη στιγμή.

Γεώργιος Πούλιος

### Λίστα Πινάκων

- Πίνακας 2.1:** Ονομασία σταθμών και υψόμετρα
- Πίνακας 3.1:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων των τεσσάρων μοντέλων. Πρώτη προσέγγιση, με χρήση δεδομένων θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής Μουζάκι 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 Μουζάκι 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 Μουζάκι 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 Μουζάκι 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 Xiong- Guo με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

### Λίστα Εικόνων

- Εικόνα 2.1:** Γεωγραφικό διαμέρισμα και νομοί της Θεσσαλίας
- Εικόνα 2.2:** Υδρογραφικό δίκτυο υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας
- Εικόνα 2.3:** Μουζάκι και διοικητικά όρια του Δήμου
- Εικόνα 2.4:** Λεκάνες απορροής υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας
- Εικόνα 2.5:** Θέσεις των σταθμών υετόπτωσης και θερμοκρασίας
- Εικόνα 2.6:** Δορυφορική εικόνα θερμοκρασίας αέρα
- Εικόνα 2.7:** Δορυφορική εικόνα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney-Criddle
- Εικόνα 2.8:** Εικόνα θερμοκρασίας (α) και εξατμισοδιαπνοής (β) του Μουζακίου μέσω του προγράμματος Erdas Imagine 8.7
- Εικόνα 2.9:** Σχηματική παράσταση της προσομοιωμένης και παρατηρημένης απορροής σε σχέση με τη χρονοσειρά των δεδομένων, για το μοντέλο Loukas
- Εικόνα 2.10:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής, ολόκληρης της χρονοσειράς, του μοντέλου Loukas
- Εικόνα Α.1:** Απλοποιημένη απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου
- Εικόνα Α.2:** Σχηματική παράσταση των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου
- Εικόνα Α.3:** Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικού ισοζυγίου λεκάνης απορροής.
- Εικόνα Α.4:** Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου
- Εικόνα Α.5:** Τα κύματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος
- Εικόνα Α.6:** Οι διαδρομές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
- Εικόνα Α.7:** Ποσοστό ανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας
- Εικόνα Β.1:** Λογικό διάγραμμα των εισαγομένων και εξαγομένων μεταβλητών του μοντέλου Abulohom
- Εικόνα Β.2:** Απεικόνιση του μοντέλου Loukas
- Εικόνα Β.3:** Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου GR2M
- Εικόνα 3.1:** Διάγραμμα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής ολόκληρης χρονοσειράς για το μοντέλο Abulohom
- Εικόνα 3.2:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη τη χρονοσειρά των δεδομένων
- Εικόνα 3.3:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Loukas.
- Εικόνα 3.4:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Loukas για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων
- Εικόνα 3.5:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο GR2M
- Εικόνα 3.6:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο GR2M για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων
- Εικόνα 3.7:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Xiong-Guo ολόκληρης της χρονοσειράς
- Εικόνα 3.8:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Xiong-Guo για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Αειφορική Διαχείριση Υδατικού Περιβάλλοντος» και το αντικείμενο της είναι η εφαρμογή και σύγκριση μοντέλων υδατικού ισοζυγίου στη λεκάνη απορροής Μουζάκι, του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας.

Τα δεδομένα εισόδου ήταν επίγεια δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από τη μέθοδο Thornthwaite καθώς και μετρήσεις απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου NOAA/AVHRR θερμοκρασίας και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής της μεθόδου Blaney-Criddle. Επίσης, τα δορυφορικά και τα επίγεια δεδομένα συνδυάστηκαν ως δεδομένα εισαγωγής των μοντέλων προσομοίωσης με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους και την επιλογή του καλύτερου συνδυασμού για την περιοχή.

Για την παραπάνω εφαρμογή στη υπολεκάνη απορροής Μουζάκι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που αναφέρονται παρακάτω: Abulohom *et al* (2001), Loukas *et al* (2003), GR-2M (1993) , L. Xiong and S. Guo (1999).

Στη συνέχεια, ακολούθησε η βελτιστοποίηση (calibration) των παραμέτρων των μοντέλων για την περίοδο των μισών υδρολογικών ετών (Σεπτέμβριος 1983 έως Οκτώβριος 1987) καθώς και ο υπολογισμός των δεδομένων εξόδου (output) του κάθε μοντέλου και η εξαγωγή των στατιστικών παραμέτρων. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση (validation) των μοντέλων για την περίοδο των υπόλοιπων υδρολογικών



ετών (Οκτώβριος 1987 έως Σεπτέμβριος 1993) έτσι ώστε να ελεγχθεί αν τα μοντέλα προσομοιώνουν επαρκώς την απορροή για αυτή τη χρονική περίοδο.

Ο σκοπός της εργασίας είναι η υδρολογική προσομοίωση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής Μουζάκι και η εκλογή του μοντέλου που προσομοιώνει καλύτερα την απορροή στη συγκεκριμένη περιοχή, χρησιμοποιώντας δεδομένα από Τηλεπισκόπηση και να συγκριθούν με τις επίγειες μετρήσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα για τη δυνατότητα χρήσης της Τηλεπισκόπησης στη σύγχρονη υδρολογική έρευνα και της παροχής πληροφορίας μέσω των δορυφορικών εικόνων σε λεκάνες απορροής και περιοχές όπου δεν υπάρχουν δεδομένα ή δεν είναι εύκολη η πρόσβαση.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <b>1:</b> | <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>   | 12 |
| <b>2:</b> | <b>ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>  | 15 |
|           | 2.1. Περιοχή μελέτης  | 15 |
|           | 2.1.1. Γενικά   | 15 |
|           | 2.1.2. Γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής                                       | 16 |
|           | 2.1.3. Το πρόβλημα του νερού  | 17 |
|           | 2.1.4. Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές                                      | 18 |
|           | 2.1.5. Αναπτυξιακά δεδομένα   | 19 |
|           | 2.1.6. Μουζάκι  | 20 |
|           | 2.2. Βάση δεδομένων   | 22 |
|           | 2.2.1. Επίγεια δεδομένα   | 23 |
|           | 2.2.2. Δεδομένα δορυφορικών εικόνων   | 25 |
|           | 2.3. Μεθοδολογία  | 27 |
|           | 2.3.1. Καθορισμός ορίων υπολεκάνης απορροής Μουζακίου                           | 29 |
|           | 2.3.2. Εξαγωγή χρονοσειράς από τις δορυφορικές εικόνες                          | 29 |
|           | 2.3.3. Ανάπτυξη της προσομοίωσης των μοντέλων                                   | 30 |
|           | 2.3.4. Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων                                      | 32 |
|           | 2.3.5. Εξαγωγή διαγραμμάτων διασποράς και παρατηρημένης-προσομοιωμένης απορροής | 33 |
| <b>A:</b> | <b>ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ</b>  | 36 |
|           | A.1. Αρχές Υδρολογίας-Υδρολογικός κύκλος  | 36 |
|           | A.2. Απορροή υδρολογικής λεκάνης  | 38 |
|           | A.2.1. Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής  | 40 |
|           | A.2.2. Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου απλής υδρολογικής λεκάνης                     | 41 |
|           | A.2.3. Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου                         | 44 |
|           | A.3. Υδρολογία και χρήση της Τηλεπισκόπησης                                     | 46 |
|           | A.3.1. Γενικά   | 46 |
|           | A.3.2. Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας- ύλης   | 47 |
|           | A.3.3. Ανάκλαση βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας                         | 48 |
|           | A.3.4. Δορυφορικά συστήματα   | 50 |
|           | A.3.5. Στόχος της Τηλεπισκόπησης στην Υδρολογία                                 | 51 |
|           | A.3.6. Υδρολογικά μοντέλα και Τηλεπισκόπηση                                     | 52 |
|           | A.3.7. Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στην Υδρολογία                                  | 52 |
| <b>B:</b> | <b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ</b>  | 54 |
|           | B.1. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων  | 54 |
|           | B.2. Το πρόβλημα της βαθμονόμησης   | 56 |
|           | B.3. Περιγραφή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου                                      | 58 |
|           | B.3.1. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου ABULOHOM                                      | 58 |
|           | B.3.2. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου LOUKAS  | 61 |
|           | B.3.3. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου GR2M  | 64 |
|           | B.3.4. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου XIONG-GUO                                     | 66 |

|   |    |
|---|----|
| <b>3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>  | 67 |
| 3.1. Πρώτη προσέγγιση: Απορροές με δορυφορικά δεδομένα  | 67 |
| 3.2. Δεύτερη προσέγγιση: Απορροές με επίγεια δεδομένα<br>θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής από δορυφόρο                                       | 70 |
| 3.3. Τρίτη προσέγγιση: Απορροές με δορυφορικά δεδομένα<br>θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής επίγειων δεδομένων με<br>τη μέθοδο Thornthwaite   | 73 |
| 3.4. Τέταρτη προσέγγιση: Απορροές με επίγεια δεδομένα<br>θερμοκρασίας και επίγειας εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη<br>με τη μέθοδο Thornthwaite | 75 |
| 3.5. Αποτελέσματα παραμέτρων απορροής κάθε μοντέλου<br>εφαρμογής  | 78 |
| <b>4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>  | 81 |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>   | 84 |
| <b>ABSTRACT</b>   | 89 |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>  | 92 |

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η προσομοίωση της απορροής στην υπολεκάνη απορροής του Μουζακίου, η οποία βρίσκεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

Ο τελικός σκοπός κάθε επιστημονικής ή τεχνολογικής εφαρμογής είναι η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής σε μια λεκάνη απορροής θεωρείται σημαντικός παράγοντας της κατανόησης του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή, της διαθεσιμότητας των υδατικών της πόρων και κατά συνέπεια στην ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων νερού, με σκοπό την αποφυγή ακραίων φαινομένων, όπως π.χ. πλημμύρων, τα οποία θα είχαν αρνητικές επιπτώσεις στην περιοχή και στους κατοίκους της.

Για το σχεδιασμό ενός υδραυλικού έργου (π.χ. φράγμα, ταμιευτήρας) η τυχειότητα της διαδικασίας της επιφανειακής απορροής είναι η κυριότερη πληροφορία. Η γνώση της μέγιστης απορροής (παροχής σχεδιασμού) είναι βασική. Ο μηχανισμός της γένεσης της κατακρήμνισης είναι από τη φύση του ένας πολύπλοκος μηχανισμός που ακόμη και αν βρισκόταν τρόπος να γίνει πλήρως αντιληπτός, δεν θα ήταν εύκολο να περιγραφεί μαθηματικά η δίαυτα παροχής σε ένα ποτάμι χωρίς να συμπεριλάβει κανείς κάποιες συστηματικές και άγνωστες επιδράσεις. Ως τέτοιες επιδράσεις μπορούν να θεωρηθούν τα χωροχρονικά μεταβλητά φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, του ποταμού, οι μεταβαλλόμενες συνθήκες κατακράτησης, εξατμισοδιαπνοής, φυτοκάλυψης, χιονοκάλυψης κ.λ.π. που υπεισέρχονται που

διαταράζουν τυχαία τη συναρτησιακή σχέση κατακρήμνισης-απορροής (Μιμίκου, 1994).

Η πολυπλοκότητα τόσο στο μηχανισμό γένεσης όσο στην ποιοτική και στην ποσοτική εκτίμηση των εναλλαγών μεταξύ των υδρολογικών μεταβλητών είναι η βασική αιτία που έχουν γίνει πολλές προσπάθειες κατασκευής ομοιωμάτων (μοντέλων) για την καλύτερη προσομοίωση δηλαδή αναπαράσταση και αναπαραγωγή του φυσικού φαινομένου της απορροής.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προσομοίωσης της απορροής στην υπολεκάνη του Μουζακίου με τη βοήθεια τεσσάρων υδρολογικών μοντέλων (Makhlouf and Michel, 1994; Xiong and Guo 1999; Abulohom *et al.* 2001; Χονδρονίκου, 2004). Για την εφαρμογή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα των μετεωρολογικών, βροχομετρικών σταθμών και του σταθμού μέτρησης απορροής της περιοχής. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε κατά την εφαρμογή και δεύτερη προσέγγιση της προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου, μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής και θερμοκρασίας προερχόμενες από επεξεργασμένες δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου NOAA/ AVHRR. Ο σκοπός της καινοτομικής αυτής εφαρμογής ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης δορυφορικών δεδομένων καθώς και των τεχνικών της Τηλεπισκόπησης στην προσομοίωση της απορροής και γενικότερα στην Υδρολογία.

Η Τηλεπισκόπηση, μέσω των εφαρμογών που προσφέρει, είναι ένα ανεκτίμητο εργαλείο στη διάθεση των ερευνητών σε πολλές και διαφορετικές επιστήμες. Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση της Τηλεπισκόπησης, χαίρει ιδιαίτερης εκτίμησης στις υδρολογικές, και όχι μόνο, εφαρμογές, διότι παρέχει πληροφορίες και συνεχή στοιχεία των υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων, προσφέροντας χωρική και χρονική

κάλυψη σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν σταθμοί μέτρησης ή είναι πολύ δύσκολη η πρόσβαση. Θα πρέπει να αναφερθεί όμως, ότι η τα δορυφορικά δεδομένα θα πρέπει να συσχετίζονται πάντα με τις επίγειες μετρήσεις για την πιστοποίηση της ακρίβειάς τους, πριν από κάθε εφαρμογή.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στα κεφάλαια Α και Β παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Υδρολογίας και της υδρολογικής προσομοίωσης. Αναλύονται επίσης και οι εξισώσεις καθώς και η μεθοδολογία των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής. Τέλος, στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και παραθέτονται οι προτάσεις.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η υπολεκάνη απορροής στο Μουζάκι, η οποία αποτελεί μέρος της λεκάνης απορροής του Πηνειού, στην περιοχή της Θεσσαλίας.

#### 2.1.1: Γενικά

Η Θεσσαλία είναι γεωγραφικό διαμέρισμα, το οποίο ορίζεται βόρεια από τη Μακεδονία, δυτικά από την Ήπειρο, ανατολικά από το Αιγαίο πέλαγος, Παγασητικό και Θερμαϊκό κόλπο και νότια από τη Στερεά Ελλάδα, από τους νομούς Ευρυτανίας και Φθιώτιδας. Είναι μια μεγάλη πεδιάδα, η οποία κλείνεται γύρω της από τα βουνά Όλυμπος και Καμβούνια (βόρεια), Όθρυς, (νότια), Όσσα και Πήλιο (ανατολικά). Ανάμεσα στον Όλυμπο και τα Καμβούνια υπάρχει άνοιγμα που αποτελεί δίοδο προς τη Μακεδονία. Οι σειρές αυτές των βουνών, σχηματίστηκαν την περίοδο που η Θεσσαλία αποτελούσε εσωτερική θάλασσα (λίμνη). Τη θεσσαλική πεδιάδα διασχίζουν ο ποταμός Πηνειός με τους παραποτάμους του, καθώς και ανεξάρτητοι χείμαρροι, οι οποίοι πηγάζουν από τα βουνά (Πέππας, 2001).

Η Θεσσαλία έχει έκταση 13.488 km<sup>2</sup> περίπου και 788.000 κατοίκους περίπου, σύμφωνα με την απογραφή του 2001. Διοικητικά χωρίζεται σε τέσσερις νομούς: Λάρισας, Τρικάλων, Καρδίτσας, Μαγνησίας. Στο νομό Μαγνησίας υπάγονται και τα νησιά των Βορείων Σποράδων εκτός της Σκύρου. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας καθώς και οι τέσσερις νομοί.



**Εικόνα 2.1:** Γεωγραφικό διαμέρισμα και νομοί της Θεσσαλίας.

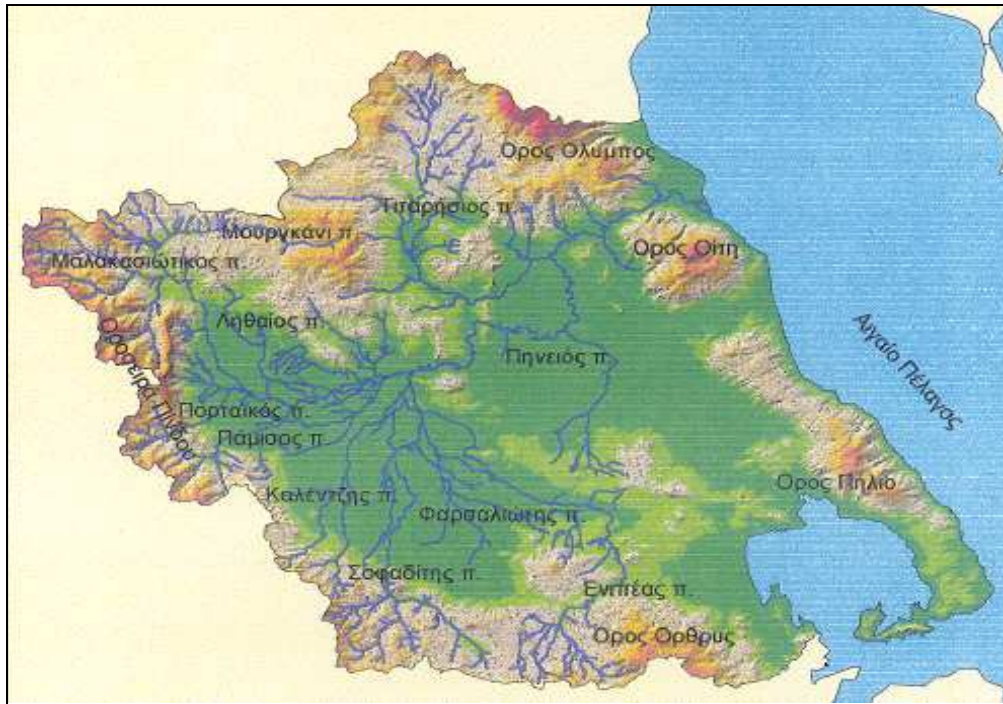
Το κλίμα της Θεσσαλικής πεδιάδας είναι ηπειρωτικό, δηλαδή ζεστό το καλοκαίρι και ψυχρό το χειμώνα, εξαιτίας των βουνών που την περικλείουν, τα οποία εμποδίζουν την άμεση επίδραση της θάλασσας. Στις παραθαλάσσιες περιοχές το κλίμα διαφοροποιείται και εμφανίζεται με πιο ήπιους χειμώνες που δροσερά καλοκαίρια.

### **2.1.2. Γεωγραφική τοποθέτηση περιοχής**

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής της περιοχής Μουζάκι, η οποία ανήκει στο δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας που ορίζεται γεωγραφικά ως εξής: ανατολικά από τα Χαλκοδόνια όρη, βορειανατολικά από το Ζάρκο, βόρεια από τα Χάσια και τα Αντιχάσια όρη, δυτικά από το Κερκότιον όρος (Κόζιακας) και νότια από το Ναθράκιο και τους πρόποδες του όρους Τυμφρηστός. Η Δυτική Θεσσαλία περιλαμβάνει δύο νομούς, των Τρικάλων και της Καρδίτσας, και ανήκει στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Η συνολική έκταση της δυτικής Θεσσαλίας είναι 6087,5 km<sup>2</sup>, το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι 2203 m, ενώ το ελάχιστο 46 m. Στα κεντρικά και ανατολικά της ευρύτερης περιοχής μελέτης αναπτύσσονται οι αρδευόμενες πεδινές εκτάσεις των Νομών Καρδίτσας και Τρικάλων. Εκτός από τον



Πηνειό, που είναι το κύριο υδατόρευμα της περιοχής, υπάρχουν και σημαντικοί παραπόταμοι που συμβάλλουν σε αυτόν, και συγκεκριμένα ο Καλέτζης, ο Πάμισος, ο Ληθαίος, ο Φαρσαλιώτης και ο Ενιπέας (Εικόνα 2.2).



**Εικόνα 2.2:** Υδρογραφικό δίκτυο υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας.

### **2.1.3. Το πρόβλημα του νερού**

Η αύξηση της αρδευτικής ζήτησης, η οποία σημειώθηκε μετά τη δεκαετία του 1970 σε ολόκληρη τη Θεσσαλία, προκαλεί συχνά σημαντικά ελλείμματα νερού κατά του θερινούς μήνες. Τα μεγέθη των ελλειμμάτων εξαρτώνται από τις υδρολογικές συνθήκες. Πάντως, όπως έχει καταγραφεί από πλήθος τεχνικών μελετών αναγνωρισμένων επιστημονικών φορέων, το πρόβλημα οφείλεται, κατά κύριο λόγο,

στην απουσία αρδευτικών φραγμάτων, τα οποία θα αποθηκεύουν τη χειμερινή απορροή νερού και θα τη διαθέτουν το καλοκαίρι, με σημαντική αξιοπιστία για το υδροσύστημα.

Η λειψυδρία δεν αφορά μόνο τη Δυτική Θεσσαλία, αλλά το σύνολο της. Το σοβαρότερο πρόβλημα έλλειψης νερού εμφανίζονται σε περιοχές της Λάρισας, όπου μειώνονται σημαντικά οι παροχές του Πηνειού ποταμού και υπάρχει μεγάλη ταπείνωση του υδροφορέα σε ξηρές περιόδους. Η έλλειψη του νερού στη Θεσσαλία μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με την κατασκευή έργων αποθήκευσης νερού και την κατασκευή των αναγκαίων εγχειοβελτιωτικών έργων, ενώ έχει προωθηθεί και η λύση εκτροπής του Αχελώου.

#### ***2.1.4. Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές***

Σήμερα, στη Θεσσαλία υπάρχουν δύο ταμιευτήρες που βρίσκονται στο νομό Καρδίτσας, του Πλαστήρα και του Σμοκόβου. Ο ταμιευτήρας Πλαστήρα, νοτιοδυτικά του νομού Καρδίτσας, είναι ένα τεχνητό έργο με έντονες και ανταγωνιστικές χρήσεις νερού (αρδευτική, υδρευτική, ενεργειακή, τουριστική). Κατά την αρδευτική περίοδο, τα νερά του διατίθενται σε πολλαπλάσια, σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά τις περιόδους χαμηλής υδροφορίας, να υπάρχει κίνδυνος υπερβολικής ταπείνωσης της στάθμης του ταμιευτήρα, με αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002).

Ο ταμιευτήρας Σμοκόβου βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του νόμου Καρδίτσας, η οριστική λειτουργία του έργου έγινε το καλοκαίρι του 2000, ενώ δεν έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του αρδευτικού δικτύου, το οποίο, σύμφωνα με τη μελέτη του έργου, θα αρδεύει 150000 στρέμματα των νομών Καρδίτσας, Φθιώτιδας και Λάρισας. Σήμερα, ικανοποιούνται οι αρδευτικές ανάγκες των περιοχών που βρίσκονται

κατάντη του φράγματος από την ενισχυμένη οικολογική παροχή του, ενώ σε μικρότερο βαθμό αρδεύονται περιοχές από τη σήραγγα του Λεονταρίου.

### **2.1.5. Αναπτυξιακά δεδομένα**

Η περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας κατοικείται από 250000 κατοίκους περίπου. Η κύρια παραγωγική δραστηριότητα είναι η αγροτική, η οποία αποτελεί τη βάση της τοπικής οικονομίας. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, οι πρωτεύουσες των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων έχουν 50000 και 35000 μόνιμους κατοίκους, αντίστοιχα. Επίσης, στους νομούς της Δυτικής Θεσσαλίας αναπτύσσονται μεγάλα ημιαστικά κέντρα, που συγκεντρώνουν σημαντική οικονομική δραστηριότητα (Παλαμάς, Σοφάδες, Φαρκαδόνα, Μουζάκι).

Το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της Θεσσαλίας είναι χαμηλό σε σχέση με το συνολικό της χώρας (84, με δείκτη χώρας το 100), ενώ η περιοχή έχει και χαμηλούς δείκτες ευημερίας. Ο τουρισμός δεν είναι αναπτυγμένος στο σύνολο της Δυτικής Θεσσαλίας, με εξαίρεση το Περούλι του νομού Τρικάλων και τη λίμνη Πλαστήρα του νομού Καρδίτσας. Εμφανίζεται μια σοβαρή ανισομέρεια στη κατανομή των οικονομικών πόρων στη Θεσσαλία, με τους νομούς Λάρισας και Βόλου να υπερισχύουν σημαντικά σε κρατικές και κοινοτικές ενισχύσεις έναντι των δύο άλλων νομών, με το νομό Καρδίτσας να βρίσκεται στη δυσμενέστερη θέση.

Οι άξονες ανάπτυξης, όπως καθορίζονται από τις κυβερνητικές πολιτικές που υπαγορεύονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, είναι η προώθηση της εντατικής αρδευόμενης γεωργίας και του τουρισμού. Κύριο περιεχόμενο των αναδιαρθρώσεων στην αγροτική οικονομία είναι η ανάπτυξη της ανταγωνιστικότητας των ελληνικών αγροτικών προϊόντων στη διεθνή αγορά. Αυτό απαιτεί μεταβολές στο είδος των καλλιεργειών και στροφή προς αγροτικά προϊόντα με μεγάλη εμπορική ζήτηση.

Σημαντικοί στρατηγικοί στόχοι είναι οι βελτίωση του οδικού δικτύου και των έργων υποδομής της αγροτικής οικονομίας, όπως αυτό αντικατοπτρίζεται στη σύνθεση των κοινοτικών κονδυλίων, που στην πλειονότητα τους (πάνω από 90%) διοχετεύονται προς αυτές τις κατευθύνσεις.

#### **2.1.6. Μουζάκι**

Η κωμόπολη του Μουζακίου είναι χτισμένη στις παρυφές του Ιτάμου (παρακλάδι του Κόζιακα), κοντά στο χείμαρρο Πάμισο που χύνεται στον Πηνειό. Σημαντικό εμπορικό, διοικητικό, γεωργικό κέντρο της ευρύτερης ορεινής κυρίως περιοχής και κόμβος επικοινωνίας για το νομό. Βρίσκεται ΒΔ της Καρδίτσας, από την οποία απέχει 30 km και 20 km απέχει από τα Τρίκαλα. Ο Δήμος βρίσκεται Βορειοδυτικά του νομού Καρδίτσας και συνορεύει Βόρεια με το νομό Τρικάλων. Τα Δημοτικά Διαμερίσματα Γελάνθης, Μαγουλίτσας, Λαζαρίνας είναι πεδινά, το Μουζάκι και το Μαυρομαμάτι ανήκουν στο ημιορεινό τμήμα της περιοχής (Εικόνα 2.3). Τα υπόλοιπα δημοτικά διαμερίσματα είναι ορεινά και βρίσκονται στην οροσειρά της Πίνδου.

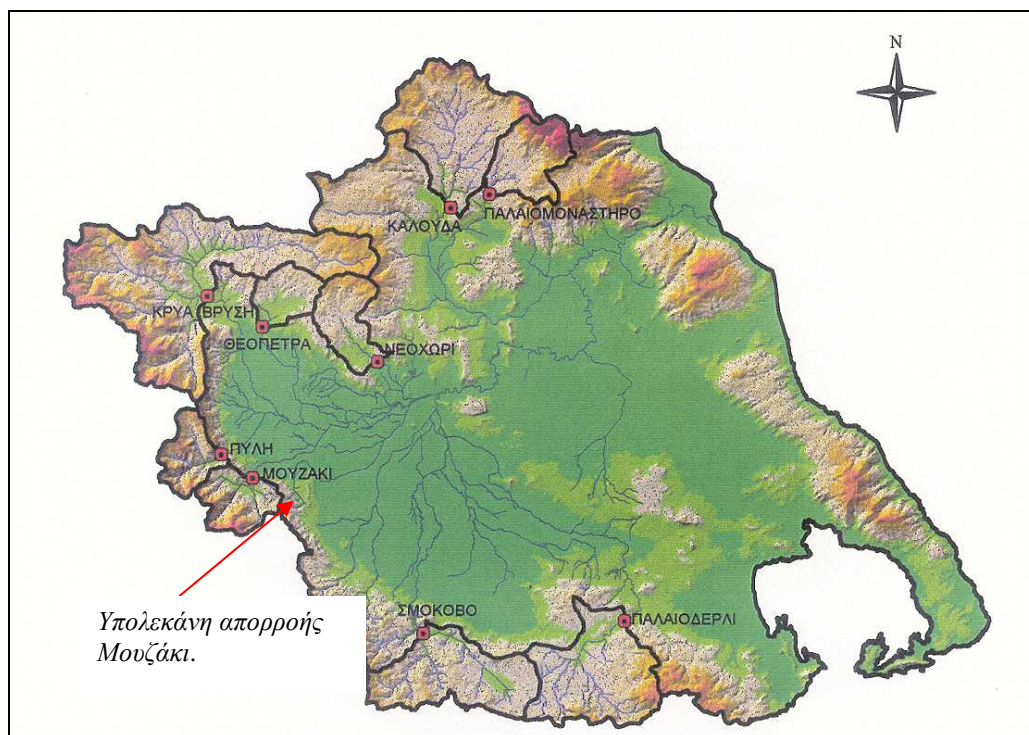
Οι μόνιμοι κάτοικοι της περιοχής, κατ' εκτίμηση, είναι 12.500 κάτοικοι. Κατά την περίοδο αιχμής του καλοκαιριού ο πληθυσμός ανέρχεται στους 13.500 κατοίκους. Οι κάτοικοι των ορεινών ασχολούνται κυρίως με την κτηνοτροφία ενώ των πεδινών με την γεωργία. Ο δευτερογενής τομέας αν και δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένος εντούτοις διαθέτει αρκετές βιοτεχνίες. Περισσότερο από 35% του ενεργού πληθυσμού απασχολείται στον τριτογενή τομέα, κυρίως στο Μουζάκι όπου συγκεντρώνονται όλες οι δημόσιες και ιδιωτικές υπηρεσίες. Το κύριο οδικό δίκτυο έχει συνολικό μήκος 101km, το δευτερεύον οδικό δίκτυο που συνδέει τους οικισμούς με τις κοινότητες

παρουσιάζει προβλήματα, κυρίως τους χειμερινούς μήνες, όπου στην περιοχή επικρατούν έντονα καιρικά φαινόμενα.



Εικόνα 2. 3: Μουζάκι και διοικητικά όρια του Δήμου.

Η υπολεκάνη απορροής στην περιοχή Μουζάκι, είναι τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής του Πηνειού και συγκεκριμένα αποτελεί το δυτικότερο τμήμα της (Εικόνα 2.4). Συνορεύει βορειότερα με την υπολεκάνη απορροής της Πύλης, με την οποία παρουσιάζει ομοιότητες όσον αφορά στα γεωμορφολογικά τους χαρακτηριστικά.



**Εικόνα 2.4:** Λεκάνες απορροής υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Με το βέλος σημειώνεται η υπολεκάνη απορροής στο Μουζάκι.

Ο πλέον σημαντικός ποταμός της περιοχής είναι ο Πάμισος, ο οποίος πηγάζει από το όρος Τύμπανος και καταλήγει στον Πηνειό. Η επιφανειακή έκταση του ποταμού είναι 179.521 στρέμματα, ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής στο Μουζάκι είναι 144,10 km<sup>2</sup>.

## 2.2. Βάση δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της προσομοίωσης διακρίνονται σε επίγεια και δορυφορικά.

### 2.2.1. Επίγεια δεδομένα

Τα επίγεια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της απορροής στην περιοχή αφορούσαν μετρήσεις μηνιαίας θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και απορροής. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας αέρα προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό της Ελάτης που βρίσκεται στην περιοχή. Οι μετρήσεις αυτές καθώς και οι μετρήσεις περιφερειακών μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής συνδυάστηκαν και έδωσαν την τελική χρονοσειρά των μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας για όλη την υπολεκάνη, σύμφωνα με τη μέθοδο της θερμοβαθίδας.

Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών Στουρναρέικα, Δρακότρυπα και Αργιθέα, τα οποία είχαν το ίδιο χρονικό βήμα (μέσες μηνιαίες τιμές νετού σε χιλιοστά βροχής). Οι τιμές της μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης προήλθε με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας.

Η εξατμισοδιαπνοή που χρησιμοποιήθηκε είχε υπολογισθεί με τη μέθοδο Thornthwaite, και αφορούσε μέσες μηνιαίες τιμές για τη συγκεκριμένη περιοχή. Η εξατμισοδιαπνοή που εξάγεται με τη μέθοδο αυτή αντιστοιχεί στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή της περιοχής και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της περιοχής και των ωρών ηλιοφάνειας που αντιστοιχούν για κάθε μήνα στο συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος (Παπαϊωάννου, 1995).

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). Οι σταθμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως και το υψόμετρο τους φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Στην Εικόνα 2.5 εμφανίζεται η θέση των σταθμών μέτρησης των παραμέτρων, που καλύπτουν την περιοχή του

Μουζακίου. Η χρονοσειρά όλων των επίγειων δεδομένων κάλυπτε το χρονικό διάστημα από το 1960 έως και 1993.

**Πίνακας 2.1 :** 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 | Μετεωρολογικός |



**Εικόνα 2.5:** Θέσεις των σταθμών υετόπτωσης και θερμοκρασίας.



### 2.2.2. Δεδομένα δορυφορικών εικόνων

Τα δορυφορικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη δεύτερη προσέγγιση της προσομοίωσης προέρχονται από το δορυφόρο NOAA/AVHRR με διακριτική χωρική ικανότητα 8×8 km και καλύπτουν το χρονικό διάστημα από το 1981 έως και το 2001.

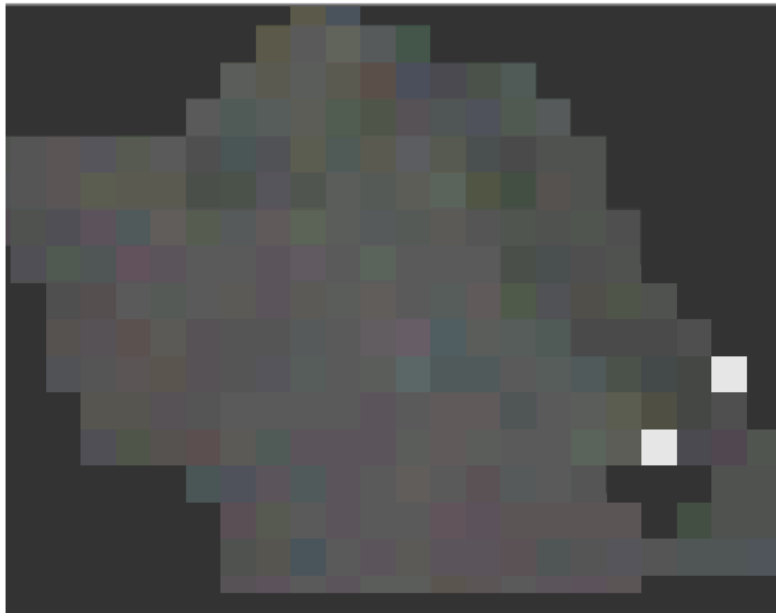
Αρχικά τα δεδομένα αυτά αφορούσαν μέσες τιμές δεκαήμερου θερμοκρασίας επιφανείας LST (Land Surface Temperature), οι οποίες είχαν προκύψει μετά το συνδυασμό δορυφορικών εικόνων των δύο θερμικών καναλιών του δορυφόρου (channel 4 και channel 5), για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

Στη συνέχεια η θερμοκρασία επιφανείας μετατράπηκε σε θερμοκρασία αέρα ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με τη θερμοκρασία του επίγειου μετεωρολογικού σταθμού. Η χρονοσειρά των δεδομένων κάλυπτε το χρονικό διάστημα από τον Οκτώβριο του 1981 έως και το Σεπτέμβριο του 1993 και για το ίδιο διάστημα χρησιμοποιήθηκαν και οι επίγειες χρονοσειρές. Το κάθε έτος καλυπτόταν κανονικά με τριάντα έξι δεκαήμερα τιμών, συνολικά δηλαδή 441 εικόνες θερμοκρασίας (Κανέλλου, 2006). Στην Εικόνα 2.6. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των δορυφορικών εικόνων θερμοκρασίας.

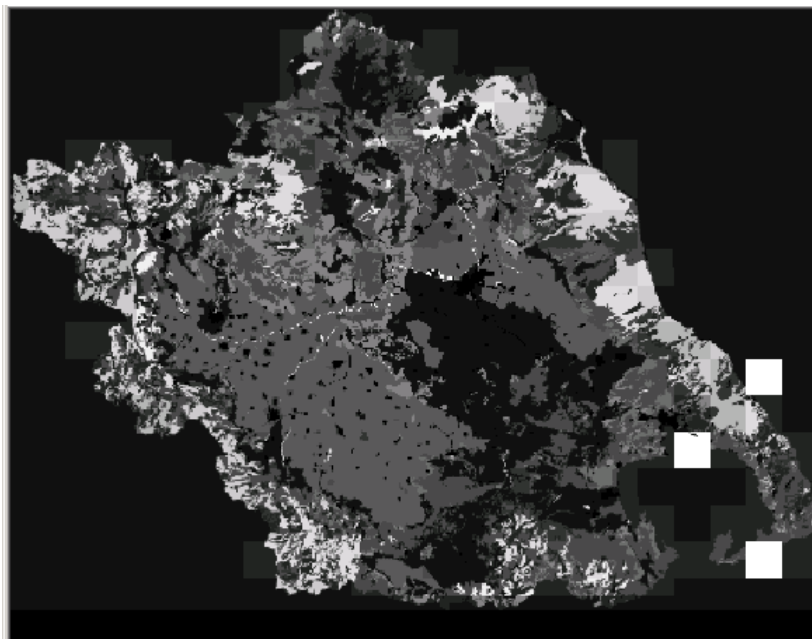
Από προηγούμενη εργασία (Κανέλλου, 2006; Kanellou *et al.*, 2006) χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, για τα αντίστοιχα έτη 1981-1993. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή στις εικόνες αυτές είχε υπολογιστεί με τη μέθοδο Blaney- Criddle (Blaney and Criddle, 1950; Φλόκας, 1997), για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, και για κάθε δεκαήμερο της χρονοσειράς, συνολικά 441 εικόνες επίσης. Η μέθοδος Blaney- Criddle υπολογίζει τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή συναρτήσει της θερμοκρασίας και του τύπου βλάστησης

που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, συνδυάζει τις μεταβλητές αυτές με τα ποσοστά ωρών ημέρας ανάλογα του Γ.Π. όπως γίνεται περίπου και στη μέθοδο Thornthwaite (Παπαζαφειρίου, 1984). Στην Εικόνα 2.7. εμφανίζεται ως παράδειγμα μια δορυφορική εικόνα δυνητικής εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με Blaney- Criddle για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

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.



**Εικόνα 2.6:** Δορυφορική εικόνα θερμοκρασίας αέρα.



**Εικόνα 2.7:** Δορυφορική εικόνα δυνητικής εξαμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney- Criddle.

### 2.3. Μεθοδολογία

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας στην παρούσα εργασία εστιάστηκε στην εφαρμογή των τεσσάρων υδρολογικών μοντέλων Abulohom (Abulohom *et al*, 2001), Loukas (Χονδρονίκου, 2004), GR2M (Makhlouf and Michel, 1994), και Xiong-Guo (Xiong and Guo, 1999), τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο Β). Ο σκοπός, όπως αναφέρθηκε, ήταν η προσομοίωση της απορροής στην υπολεκάνη του Μουζακίου με τη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων.

Για το λόγο αυτό σχηματίστηκαν τέσσερις διαφορετικές χρονοσειρές, συνδυάζοντας και χρησιμοποιώντας κάθε φορά με διαφορετικό τρόπο, τις επίγειες μετρήσεις και τις δορυφορικές εικόνες, ως δεδομένα εισόδου των μοντέλων. Συνολικά, δηλαδή, πραγματοποιήθηκαν δέκα έξι διαφορετικοί μέθοδοι προσομοίωσης στην ίδια περιοχή. Ο στόχος ήταν να συγκριθούν όλα τα αποτελέσματα και των δέκα έξι προσομοιώσεων και να βρεθεί εκείνο το μοντέλο, που με τα αντίστοιχα δεδομένα, προσομοιάζει καλύτερα την απορροή στην περιοχή.

Αρχικά, ως δεδομένα εισόδου, χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές της μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα, απορροής, εξατμισοδιαπνοής και βροχόπτωσης των επίγειων σταθμών. Έπειτα, η θερμοκρασία και η εξατμισοδιαπνοή των σταθμών αντικαταστάθηκε με δορυφορικά δεδομένα NOAA/ AVHRR χωρικής διακριτικής ικανότητας 8 x 8 Km. Η χρονική περίοδος για όλες τις χρονοσειρές, επιλέχθηκε σε κοινό διάστημα όπου ήταν διαθέσιμα και τα επίγεια και τα δορυφορικά δεδομένα, από τον Οκτώβριο του 1981 έως και το Σεπτέμβριο του 1993.

Κατά την εφαρμογή των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου, από το σύνολο της χρονοσειράς, επιλέχθηκε πρώτα το διάστημα από Οκτώβριο 1981 έως Σεπτέμβριο 1987, τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση. Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα των τιμών των παραμέτρων, από Οκτώβριο 1988 έως Σεπτέμβριο 1993, έλαβε μέρος στην πιστοποίηση των μοντέλων. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγινε με τη μέθοδο Simplex Downhill Algorithm (Χονδρονίκου, 2007) και χρησιμοποιήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση Model Efficiency (Eff) ή όπως αλλιώς αναφέρεται, η αποτελεσματικότητα του μοντέλου, που προτάθηκε από τους Nash and Sutcliffe (1970).

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας προσομοίωσης διακρίνεται στα εξής βήματα:

1. Καθορισμός και διακριτοποίηση των ορίων της υπολεκάνης απορροής του Μουζακίου.
2. Εξαγωγή των χρονοσειρών θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής των δορυφορικών δεδομένων, όπως προέκυψαν από τις δορυφορικές εικόνες της περιοχής.
3. Εφαρμογή και των τεσσάρων μοντέλων, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου κάθε φορά και διαφορετικό συνδυασμό επίγειων και δορυφορικών δεδομένων.

4. Αποτελέσματα επιλεγμένων στατιστικών παραμέτρων για όλα τα μοντέλα, τα οποία προέκυψαν από κάθε τρόπο εφαρμογής της μεθοδολογίας, και ήταν καθοριστικά για τη μεταξύ τους σύγκριση.
5. Εξαγωγή των διαγραμμάτων διασποράς και των διαγραμμάτων της πραγματικής- προσομοιωμένης απορροής.

### ***2.3.1. Καθορισμός ορίων υπολεκάνης απορροής Μουζακίου***

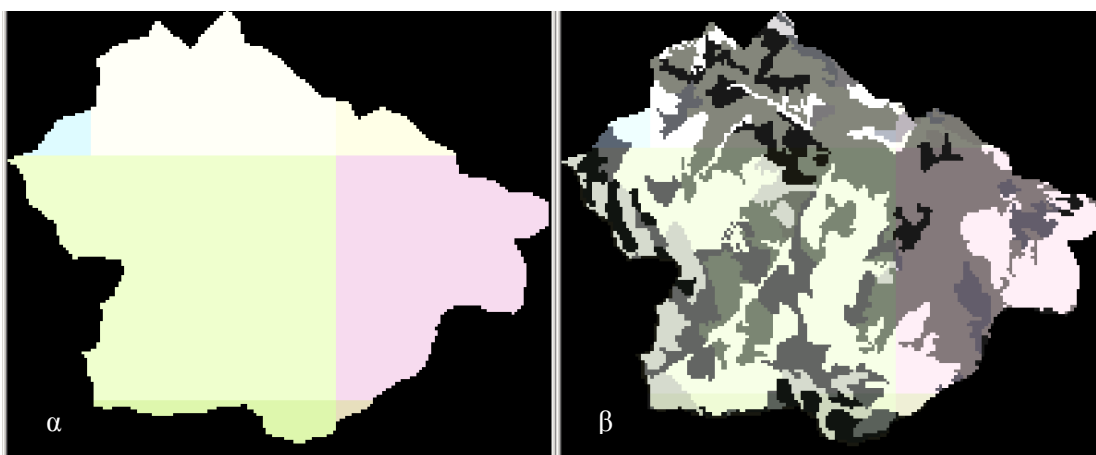
Με τη βοήθεια του προγράμματος ArcMap του ArcGis, 9.1. και βάσει παλαιότερων εργασιών (Τζαμπύρας, 2005; Μεθυμάκη κ.α., 2003), οριοθετήθηκε η υπολεκάνη του Μουζακίου, για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

### ***2.3.2. Εξαγωγή χρονοσειράς από τις δορυφορικές εικόνες***

Η χρονοσειρά των δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Erdas Imagine 8.7, χρησιμοποιώντας τα όρια της υπολεκάνης απορροής του Μουζακίου όπως φαίνεται στο Εικόνα 2.8.

Οι χάρτες θερμοκρασίας αέρα και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Blaney-Criddle που προέκυψαν ως αποτελέσματα σε προγενέστερη εργασία (Κανέλλου, 2006) έδιναν τιμές των παραμέτρων σε δεκαήμερα, για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Για το λόγο αυτό, μέσω των εργαλείων του Erdas Imagine 8.7, δημιουργήθηκε μοντέλο με το οποίο έγινε η εξαγωγή του μέσου όρου των τιμών για κάθε τρεις εικόνες δεκαημέρου. Οι νέες εικόνες που προέκυψαν έδιναν μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Στη συνέχεια, από τις εικόνες αυτές, «κόπηκε» η υπολεκάνη του Μουζακίου όπου περιείχε δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής μόνο της περιοχής μελέτης, για όλη τη χρονοσειρά (1981-1993). Από τις εικόνες αυτές που αφορούσαν το Μουζάκι, δημιουργήθηκαν δύο νέες χρονοσειρές για το σύνολο της χρονοσειράς (1981-1993) οι οποίες αφορούσαν τιμές μέσης μηνιαίας επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα και μέσης μηνιαίας επιφανειακής εξατμισοδιαπνοής Blaney- Criddle, όπως προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών των εικονοστοιχείων (pixel) των εικόνων. Παραδείγματα των εικόνων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.8 (α και β).



**Εικόνα 2.8:** Εικόνα θερμοκρασίας (α) και εξατμισοδιαπνοής (β) του Μουζακίου μέσω του προγράμματος Erdas Imagine 8.7.

### ***2.3.3. Ανάπτυξη της προσομοίωσης των μοντέλων***

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση των μοντέλων στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς εισαγόμενων δεδομένων. Έγιναν, δηλαδή, τέσσερις συνδυασμοί δεδομένων εισόδου για κάθε ένα από τα τέσσερα μοντέλα, και προέκυψαν δέκα έξι διαφορετικές προσομοιώσεις. Οι

συνδυασμοί των δεδομένων εισόδου μεταξύ επίγειων και δορυφορικών παρουσιάζονται παρακάτω:

A. Χρήση ως δεδομένων εισόδου, τις τιμές θερμοκρασίας αέρα, βροχόπτωσης, απορροής και υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite, από τους επίγειους μετεωρολογικούς και βροχομετρικούς σταθμούς.

B. Χρήση της χρονοσειράς των επίγειων τιμών θερμοκρασίας αέρα, βροχόπτωσης, απορροής και των δορυφορικών δεδομένων υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney- Criddle, στη διαδικασία της προσομοίωσης.

Γ. Ανάπτυξη των τεσσάρων μοντέλων με την εφαρμογή της χρονοσειράς των δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας αέρα και των επίγειων τιμών της απορροής, της βροχόπτωσης και της υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite.

Δ. Εισαγωγή κατά την προσομοίωση των μοντέλων των τιμών θερμοκρασίας αέρα προερχόμενες από δορυφορικές εικόνες, και των τιμών υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney- Criddle, προερχόμενη από τη χρήση δορυφορικών στοιχείων, σε αντικατάσταση των δεδομένων των αντίστοιχων επίγειων παραμέτρων (Hondronikou *et al.*, 2006). Οι τιμές βροχόπτωσης και απορροής παραμένουν εκείνες των επίγειων σταθμών.

Το μοντέλο Loukas, κατά τις διαδικασίες υπολογισμού της απορροής χρησιμοποιεί τον αριθμό καμπύλης CN (Curve Number) ο οποίος εξαρτάται από το είδος της βλάστησης, την υδατοπερατότητα του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής στην οποία γίνεται η προσομοίωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση

χρησιμοποιήθηκε η τιμή CN = 47, η οποία αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Μουζακίου (Λαχανάς, 2005).

Επιπλέον σε όλα τα μοντέλα εισήχθη μια ακόμη παράμετρος, το χιόνι, λόγω των ορεινών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.

#### 2.3.4. Αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τεσσάρων υδρολογικών μοντέλων, παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της προσαρμογής των μοντέλων στην προσομοίωση της απορροής είναι τα εξής: 1) Αποδοτικότητα ή αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency), 2) Συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ), 3) Μέσο σφάλμα ή Μεροληψία (BIAS). Οι παράμετροι αυτοί υπολογίστηκαν χωριστά για την περίοδο βελτιστοποίησης (1981-1987), πιστοποίησης (1988-1993) και όλης της χρονικής περιόδου (1981-1993), και αναλύονται ως εξής:

1. *Αποδοτικότητα ή Αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency)*: είναι η παράμετρος επίδρασης του μοντέλου η οποία είναι αδιάστατο μέγεθος. Το πεδίο τιμών της παραμέτρου είναι μεταξύ  $-\infty$  και 1, τιμή που παίρνει κατά την τέλεια προσαρμογή. Εκφράζει κατά πόσο η προσομοιωμένη απόκριση είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με την παρατηρημένη μέση τιμή (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

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.

Επιπλέον, ο έλεγχος της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε και με τις ακόλουθες στατιστικές παραμέτρους:

2. *Συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  (coefficient of determination)*: Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι το τετράγωνο του κανονικού συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των παρατηρημένων και προβλεπόμενων τιμών, δηλαδή μεταξύ της ανεξάρτητης και της εξαρτημένης μεταβλητής. Χρησιμοποιείται ως μέτρο καλής προσαρμογής μιας προσομοίωσης (Δήμος, 2005).

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

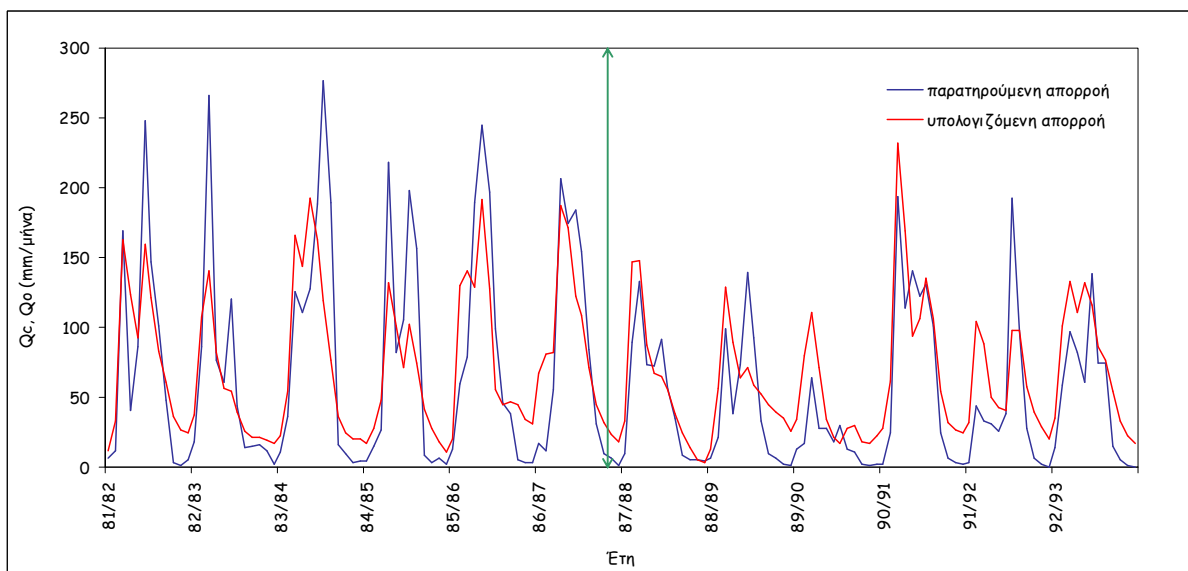
$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim}) \quad (2.2)$$

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

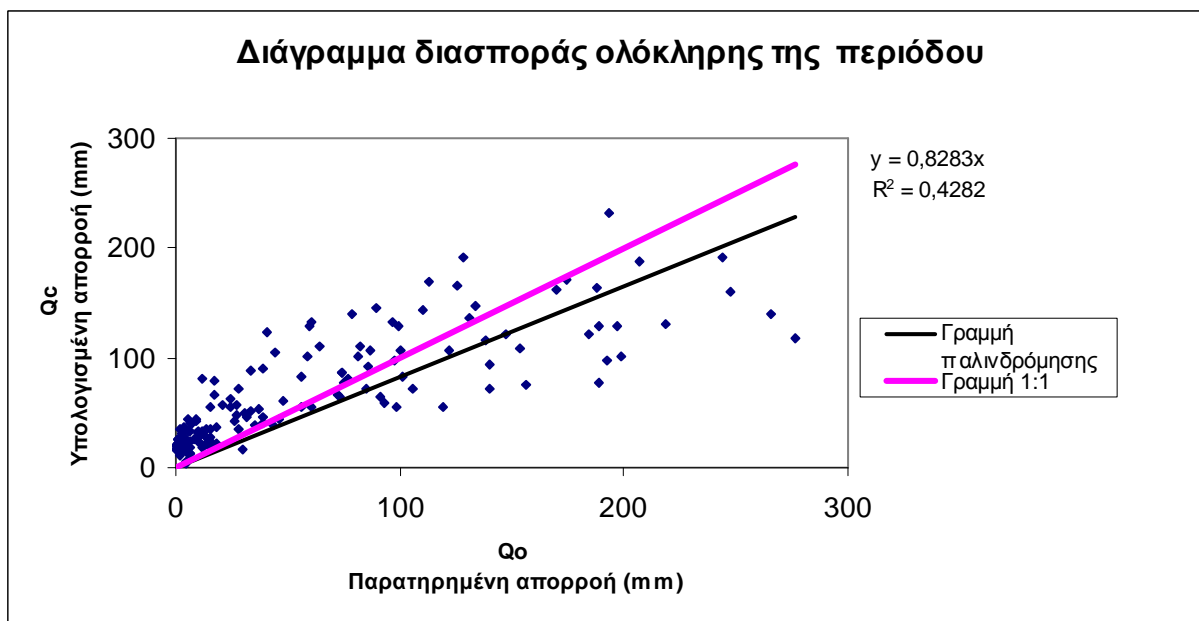
### **2.3.5. Εξαγωγή διαγραμμάτων διασποράς και παρατηρημένης-προσομοιωμένης απορροής**

Μετά τη διαδικασία της προσομοίωσης και την εξαγωγή των στατιστικών παραμέτρων, έγινε η εξαγωγή των διαγραμμάτων διασποράς των παρατηρημένων και προσομοιωμένων απορροών για τη μεταξύ τους σύγκριση. Επίσης, παρουσιάστηκε

σχηματικά και μορφή και η εξέλιξη της προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με την παρατηρημένη απορροή κατά τη διάρκεια του χρόνου των δεδομένων. Όλα τα διαγράμματα αυτά κατασκευάστηκαν όμοια για την περίοδο βελτιστοποίησης, πιστοποίησης και ολόκληρης της χρονοσειράς. Παραδείγματα των διαγραμμάτων παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.9 και 2.10, όπου φαίνεται η μορφή των δύο απορροών σε σχέση με την εξέλιξη της χρονοσειράς, και το διάγραμμα διασποράς παρατηρημένης-προσομοιωμένης απορροής αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.9:** Σχηματική παράσταση της προσομοιωμένης και παρατηρημένης απορροής σε σχέση με τη χρονοσειρά των δεδομένων, για το μοντέλο Loukas.



**Εικόνα 2.10:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής, ολόκληρης της χρονοσειράς, του μοντέλου Loukas.

## **A. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ**

### **A.1. Αρχές Υδρολογίας-Υδρολογικός κύκλος**

Υδρολογία είναι μια επιστήμη της γης και παρουσιάζει ενδιαφέρον από την άποψη της υδραυλικής και μηχανικής. Προσπαθεί να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο το νερό και οι διάφοροι ρύποι μεταφέρονται μέσα στο περιβάλλον και να λύσει πρακτικά συστήματα διαχείρισης του νερού. Επίσης μελετά τη ροή του νερού μέσα στον υδρολογικό κύκλο (Δαλέζιος, 2002).

Το επίπεδο μελέτης της υδρολογίας περιλαμβάνει την ατμόσφαιρα, μέχρι ύψους 15 περίπου km, την επιφάνεια και το εσωτερικό της λιθόσφαιρας, μέχρι βάθους 1 km, και την υδρόσφαιρα (ωκεανός).

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).

Η μελέτη της υδρολογίας περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία, υδρολογικές μεθόδους, υδρολογική ανάλυση και υδρολογικό σχεδιασμό. Ως εφαρμοσμένη επιστήμη, η Υδρολογία, ψάχνει να βρει λύσεις σε προβλήματα, όπως εξάλειψη του κινδύνου πλημμυρών, παροχή νερού, έλεγχος της ρύπανσης και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, για το όφελος της ανθρωπότητας.

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

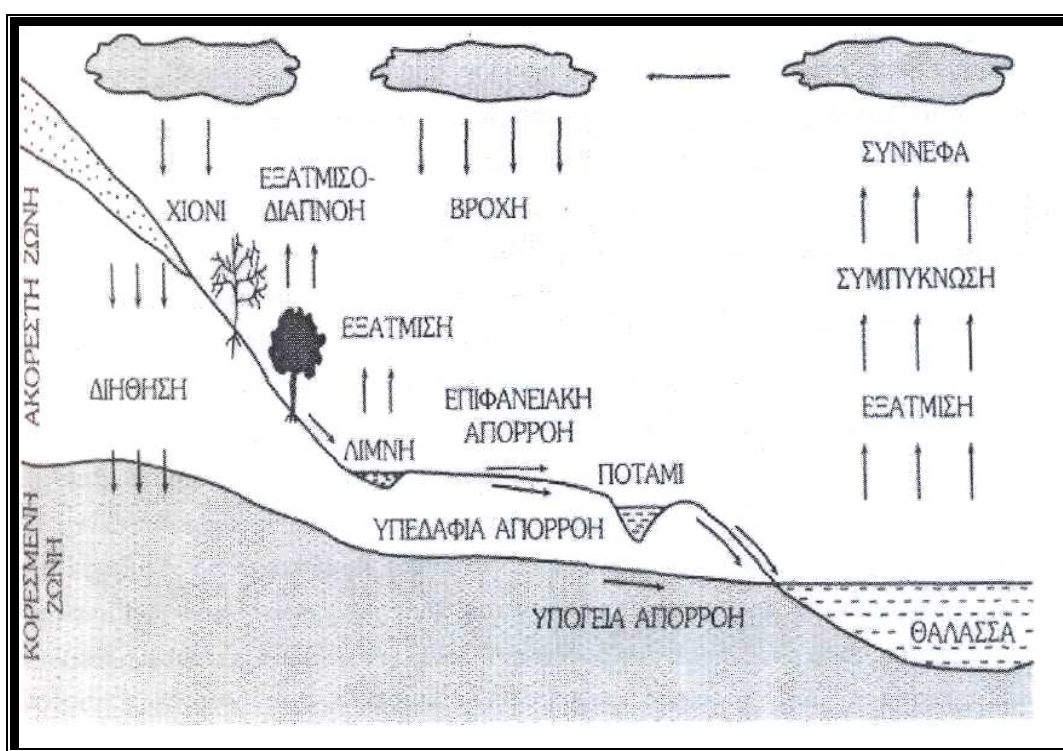
απορροή υπακούουν κατά μεγάλο μέρος στη λογική της αιτιότητας, αφού για δεδομένες συνθήκες λεκάνης απορροής και δεδομένη βροχόπτωση, το αποτέλεσμα, δηλαδή η απορροή, συνδέεται ουσιαστικώς μονοσήμαντα με το αίτιο, δηλαδή την κατακρήμνιση.

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» (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999; Ξανθόπουλος, 1990).

Ο υδρολογικός κύκλος σχετίζεται με τη βροχόπτωση στην επιφάνεια της γης, την εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα, τη ροή του νερού από τη γη στους ωκεανούς και τη ροή του νερού από το έδαφος υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Έτσι, η υδρολογία δεν περιορίζεται μόνο στη μελέτη της ποσότητας του νερού αλλά και με την ποιότητα του νερού καθώς και με περιβαλλοντικά ζητήματα (Δαλέζιος, 1999; Δαλέζιος, 2001; Δαλέζιος, 2002).

Ο υδρολογικός κύκλος είναι μια ροή του νερού εξαιτίας της βαρύτητας και της ηλιακής ενέργειας στο γήινο σύστημα. Ο κύκλος υπάρχει και πάνω από τους ωκεανούς και πάνω από την ξηρά. 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. Μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί μεταφορά νερού, προσωρινή αποθήκευση και μεταβολή της κατάστασης του νερού. Στην Εικόνα Α.1. παρουσιάζεται μια γενικευμένη αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου.



**Εικόνα Α.1:** Απλοποιημένη απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.

## **A.2. Απορροή υδρολογικής λεκάνης**

Η απορροή είναι σημαντική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου και αποτελεί τη βασική υδρολογική παράμετρο σε μια σειρά από έργα που γίνονται για τον έλεγχο, την αξιοποίηση ή την προστασία των υδατικών πόρων. Είναι ένα φυσικό μέγεθος που μεταβάλλεται διαρκώς με την πάροδο του χρόνου. Για το λόγο αυτό οι ακραίες τιμές

της αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των διαστάσεων των διαφόρων έργων και κατασκευών (Δαλέζιος, 2002).

Ως ακραίες τιμές απορροής χαρακτηρίζονται οι στιγμιαίες απορροές με μεγάλο μέγεθος (πλημμυρικές αιχμές) που κατά κανόνα εμφανίζονται μετά από μια ξαφνική βροχόπτωση.

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 χαρακτηριστικά τα οποία είναι :

- Μορφολογικά (μορφή, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο)
- Εδαφολογικά (μηχανικές ιδιότητες, χημική σύσταση, χρώμα)
- Φυτοκάλυψη (είδη γλωρίδας 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 (Χονδρονίκου, 2007).

### *A.2.1. 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:

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

Όπου  $\Delta S$  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 υδροφορέας, 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. Εξαίρεση αποτελεί κατ' αρχήν η μέθοδος Penman-Monteith (Penman, 1948), που θεωρητικά μπορεί να εκτιμήσει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή αν είναι γνωστή η πραγματική επιφανειακή φυτοκάλυψη (Χονδρονίκου, 2007).

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 μελέτης 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.2.2. 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 Α.2). Η μοναδική εισροή στο συγκεκριμένο όγκο αναφοράς είναι η βροχόπτωση  $P$ , ενώ η εκροή έχει δυο συνιστώσες: την πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $ET_{\alpha}$  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; Χονδρονίκου, 2007).

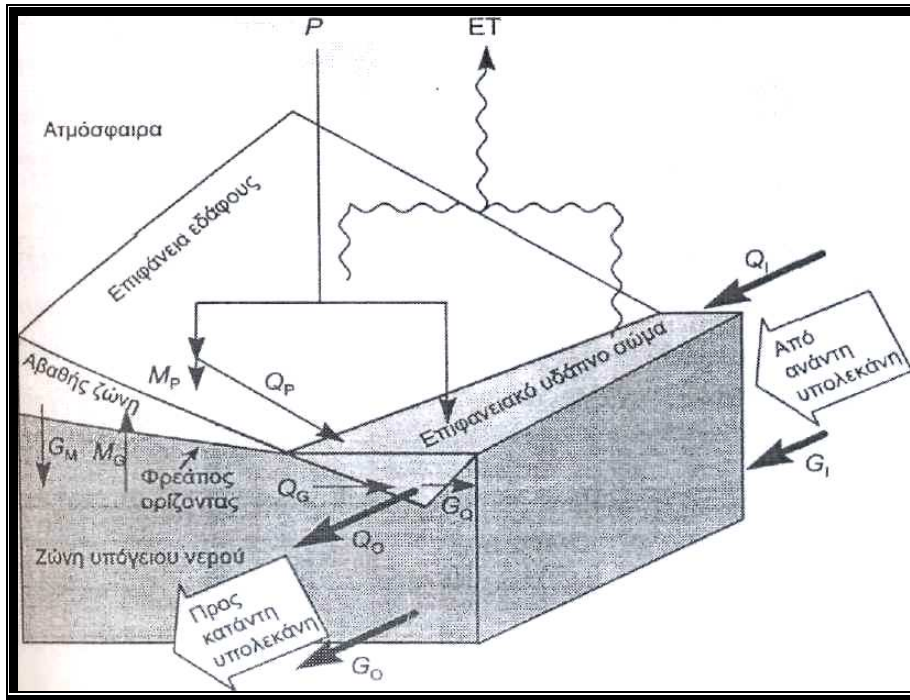
Σημειώνεται ότι η προσωρινή αποθήκευση νερού υπό μορφή εδαφικής υγρασίας έχει πάντα σημαντικό ρόλο τόσο από πλευράς υδρολογίας όσο και για τις ζωτικές λειτουργίες της χλωρίδας, και δεν μπορεί να αγνοηθεί στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου. Με αυτά τα δεδομένα, η εξίσωση ισοζυγίου για τον συγκεκριμένο όγκο αναφοράς γράφεται:

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

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:

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

Για μικρότερη χρονική περίοδο χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης των υδρολογικών φαινομένων (Μπαστρογιάννης, 2002). Στην Εικόνα Α.3 παρουσιάζεται σχηματικά το υδρολογικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής.



Εικόνα Α.2: Σχηματική παράσταση των όγκων αναφοράς και των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.



Εικόνα Α.3: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικού ισοζυγίου λεκάνης απορροής.

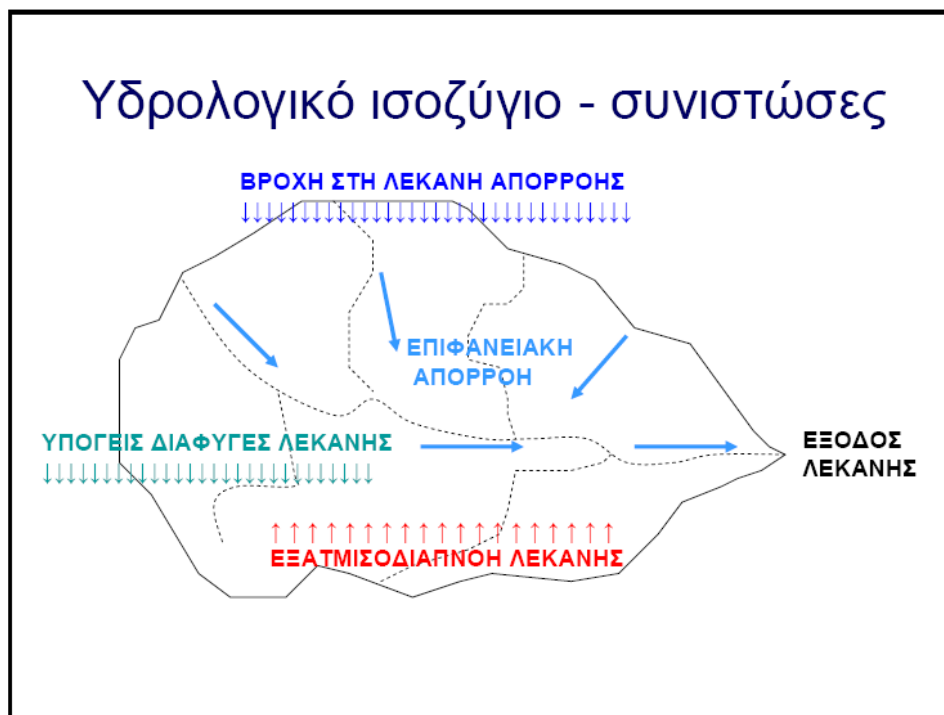
### ***A.2.3. Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου***

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 Α.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 κατόντη τμήμα της λεκάνης ή τον αποδέκτη της λεκάνης (Λέκκας, 2005; Χονδρονίκου, 2007).

**Φυσικές διαδικασίες:** Οι φυσικές είσοδοι 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).



**Εικόνα Α.4:** Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου.

**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  $\Delta S$  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.3. Υδρολογία και χρήση της Τηλεπισκόπησης**

#### **A.3.1. Γενικά**

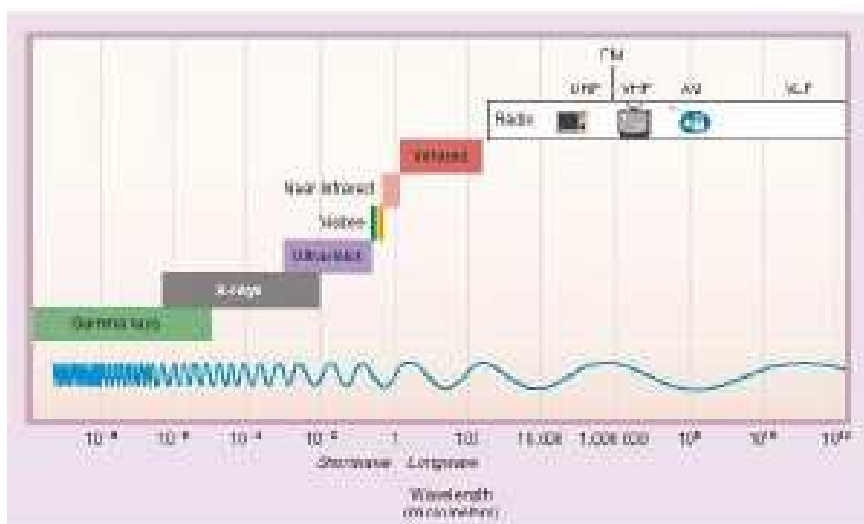
Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη λήψης πληροφοριών για ένα σώμα, μιας περιοχής ή παρατήρησης φαινομένων δια μέσου της ανάλυσης δεδομένων που λαμβάνονται από ένα μηχανισμό ο οποίος δε βρίσκεται σε επαφή με το αντικείμενο που μελετάται. Παρέχει μεγάλη χωρική κάλυψη, και μετρώντας ανακλώμενη και εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δίνει τη δυνατότητα της μελέτης παραμέτρων όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία, βροχόπτωση, υγρασία εδάφους, φαινολογία, ανάπτυξη και παραγωγή (Δαλέζιος, 2002; Χονδρονίκου, 2007).

Η βελτίωση της τεχνολογίας των τηλεπισκοπικών συστημάτων και ο αυξανόμενος αριθμός τους έχει σαν αποτέλεσμα τη συγκέντρωση σημαντικού αριθμού δεδομένων για το χρονικό διάστημα που καλύπτει τις τελευταίες δεκαετίες. Η Τηλεπισκόπηση είναι σημαντικό εργαλείο στην παρακολούθηση, λήψη αποφάσεων και παροχή στοιχείων σε πολλές επιστήμες του περιβάλλοντος και της Υδρολογίας ειδικότερα.

Η λήψη δορυφορικών δεδομένων είναι δυνατή σε πολλές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Εικόνα A.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 (Δαλέζιος, 2001; 2002).

Η χρήση της Τηλεπισκόπησης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως:

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



**Εικόνα A.5:** Τα κύματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

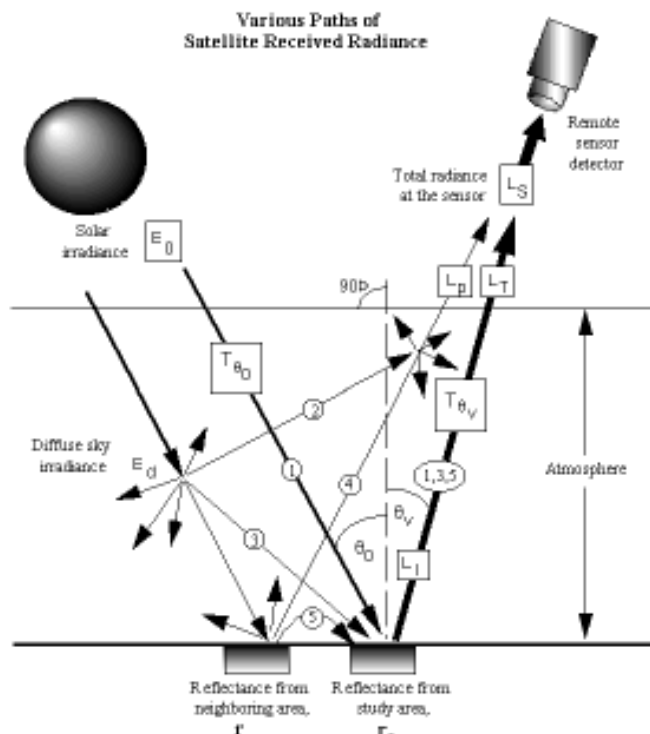
### **A.3.2. Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης**

Η Η/Μ ακτινοβολία που καταγράφεται από τα συστήματα τηλεπισκόπησης, πριν φθάσει στον αισθητήρα, συμμετέχει σε κάποιες διεργασίες, οι οποίες την μεταβάλλουν. Η κατανόηση των δεδομένων τηλεπισκόπησης, απαιτεί κατανόηση των διεργασιών αυτών.

Διαδρομή και αλληλεπιδράσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα A.6):

- Εκπέμπεται από τον Ήλιο

- Μεταδίδεται στο κενό
- Αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα
- Αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της Γης
- Αλληλεπιδρά εκ νέου με την ατμόσφαιρα
- Φθάνει στον αισθητήρα, όπου πριν καταγραφεί, αλληλεπιδρά με σειρά συστημάτων, όπως οπτικά συστήματα, ανιχνευτές κ.λ.π..



**Εικόνα Α.6:** Οι διαδρομές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

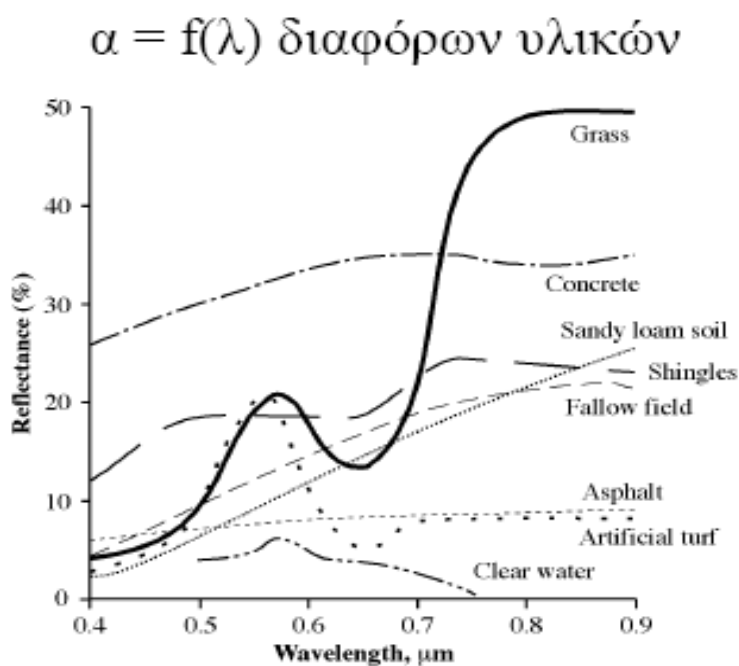
### ***A.3.3. Ανάκλαση βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας***

Η τηλεπισκόπηση σαν μέσο παρατήρησης του συστήματος ατμόσφαιρα Γης βασίζεται στην 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

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 A.7 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυρίων κατηγοριών στοιχείων (έδαφος, βλάστηση, νερό, άσφαλτος κλπ.), και διακρίνονται οι φασματικές υπογραφές κάθε αντικειμένου.



**Εικόνα A.7:** Ποσοστό ανάκλασης βασικών στοιχείων της γήινης επιφάνειας.

#### *A.3.4. Δορυφορικά συστήματα*

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση είναι οι δορυφόροι (γεωστατικοί και ηλιοσύγχρονοι), οι οποίοι φέρουν σύγχρονα καταγραφικά όργανα που λαμβάνουν ακτινοβολία σε 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, Χονδρονίκου, 2007). 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 (Χονδρονίκου, 2007).

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).

#### ***A.3.5. Στόχος της Τηλεπισκόπησης στην Υδρολογία***

Οι αντικειμενικοί στόχοι της τηλεπισκόπησης στην υδρολογία είναι η αξιολόγηση της κατάστασης για την χρήση υπάρχουσας και μελλοντικής πληροφορίας από την τηλεπισκόπηση για την υδρολογία. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την καλύτερη γνώση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της τηλεπισκόπησης με σκοπό τη χρήση τους στην υδρολογία, με τη μελέτη των δορυφορικών δεδομένων όσον αφορά τη συχνότητα, την ακρίβεια και της όσο δυνατόν καλύτερης ανάλυσης (Resolution). Και τέλος απαραίτητη είναι η ανασκόπηση της δομής και των γνωρισμάτων των υδρολογικών μοντέλων που υπάρχουν και δεν έχουν δοκιμαστεί ακόμα με δεδομένα που παίρνονται από την τηλεπισκόπηση.

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 απορρόφησης 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.

#### ***A.3.6. Υδρολογικά μοντέλα και Τηλεπισκόπηση***

Οι υδρολογικές διαδικασίες είναι φαινόμενα που μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο και απαιτούν πυκνό δίκτυο μετρήσεων, υπόθεση ομοιομορφίας και εκ των προτέρων γνώση της μεταβλητότητας του συστήματος στο χώρο και τον χρόνο. Για αυτό χρειάζεται ένα υδρολογικό μοντέλο με κατανεμημένες στο χώρο παρατηρήσεις.

Η τηλεπισκόπηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές:

- Στην απευθείας μέτρηση της απορροής.
- Στη μέτρηση μιας λεκάνης απορροής και στην παροχή τοπογραφικών πληροφοριών.
- Στη μελέτη της βροχόπτωσης, της υγρασίας του εδάφους, της εξατμισοδιαπνοής, της ηλιακής ακτινοβολίας, της χιονοκάλυψης, του πάχους χιονιού και της θερμοκρασίας του νερού κ.α.

#### ***A.3.7. Εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στην Υδρολογία***

Η υδρολογική έρευνα σε συνδυασμό με την τηλεπισκόπηση, δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης των αποθεμάτων, στηρίζει τη μελέτη ενός φαινομένου σε περισσότερο αξιόπιστα δεδομένα και μπορεί να προσφέρει λύσεις στην διαχείριση και στην ανάπτυξη εφαρμογών όπως:

- Έλεγχο των πλημμυρών και άλλων επικίνδυνων φαινομένων σε αστικές και αγροτικές περιοχές.

- Κάλυψη αναγκών ύδρευσης των πληθυσμών.
- Παρακολούθηση μετεωρολογικών και άλλων γεγονότων, ρύπανσης και ποιότητας νερού.
- Για την άρδευση συγκεκριμένων περιοχών ανάλογα με την τοπογραφία, ανάγλυφο, χρήσεις γης κ.α.
- Για την έρευνα, απογραφή, χαρτογράφηση παρακολούθηση και προστασία περιοχών οι οποίες υφίσταται διάβρωση και υποβάθμιση.
- Για την βελτιστοποίηση και οικονομικότερη χρήση του νερού για λόγους παραγωγικούς (υδραυλικά έργα, υδροηλεκτρικά εργοστάσια κ.λ.π.).

## **B. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

### **B.1. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων**

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης, εκτιμούν τη διαίτά της σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες.

Τα μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1975).

Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών αναγκών αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των διεργασιών.

Στην πρώτη περίπτωση, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, με σκοπό την εκτίμηση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης. Στην δεύτερη περίπτωση, προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας.

Ωστόσο, αν και η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών είναι λιγότερο συχνή, αυτή θεωρείται επιβεβλημένη όταν

υπάρχουν συνδυασμένες χρήσεις νερού και σημαντική συνεισφορά του υπόγειου δυναμικού στην συνολική απορροή της λεκάνης.

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική δομή τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη εντάσσονται τα *εννοιολογικά* (conceptual) μοντέλα (συγκεντρωτικά ή ημικατανεμημένα), τα οποία αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες είτε της συνολικής λεκάνης ή των υπολεκανών της, θεωρώντας μια προκαθορισμένη μαθηματική δομή που βασίζεται σε εμπειρικές υποθέσεις.

Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους, η οποία επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού σχετικά πλήθους παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν ακριβή φυσική σημασία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ορισμένων μέσω χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ότι η χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών της λεκάνης (τοπογραφικών, εδαφολογικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών, κλπ.) είναι γνωστή. Το πλεονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι η προσαρμογή σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις καθώς και η δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων αλλαγής των δεδομένων εισόδου, όπως σενάρια κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών επιβάλλει τη γνώση των εν λόγω χαρακτηριστικών σε εξαιρετικά λεπτομερή χωρική κλίμακα, κάτι που στην πράξη καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο.

Από την άλλη πλευρά, επειδή τα κατανεμημένα μοντέλα δύνανται να περιγράψουν πολύ καλύτερα τις φυσικές διεργασίες, αξιοποιώντας τη διαθέσιμη

γεωγραφική πληροφορία, βρίσκουν πλέον όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή, με τη θεώρηση των πλέον σημαντικών δεδομένων εισόδου ως παραμέτρων, και την εκτίμησή τους, σε αντιστοιχία με τα εννοιολογικά μοντέλα, μέσω βελτιστοποίησης (Refsgaard, 1997; Eckhardt and Arnold, 2001).

## **B.2 Το πρόβλημα της βαθμονόμησης**

Οι παράμετροι των υδρολογικών μοντέλων μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται *βαθμονόμηση* (calibration). Η βαθμονόμηση γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Η βαθμονόμηση αναφέρεται σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα (Καϊμάκης και Καββαδίας, 1995).

Η διαδικασία ακολουθείται από την λεγόμενη *επαλήθευση* (validation) του μοντέλου, βάσει την οποίας ελέγχεται η προγνωστική του ικανότητα για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη) χρονική περίοδο.

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία των εννοιολογικών μοντέλων εξαρτάται σε εξαιρετικά σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης. Αυτή χαρακτηρίζεται επιτυχής όταν ικανοποιεί τα ακόλουθα δύο κριτήρια: (α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, ή αλλιώς μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια, και (β) οι εκτιμημένες τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια.



Αν και τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων, το πρόβλημα εξακολουθεί να θεωρείται ένα από τα πλέον δύσκολα που συναντιούνται στην πράξη. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χώρος αναζήτησης είναι έντονα τραχύς και περιέχει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό τοπικών ακρότατων, σε διάφορες μάλιστα κλίμακες (Duan *et al.*, 1992).

Όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, τόσο η εύρεση της θεωρητικά βέλτιστης λύσης καθίσταται ανέφικτη. Μάλιστα, στην περίπτωση σύνθετων μοντέλων, το πλήθος των δοκιμών αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης. Συνεπώς, αυτό που επιζητείται είναι η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό πλήθος δοκιμών.

Μια επιπλέον δυσκολία έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών τιμών των παραμέτρων, που παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης, και οφείλεται, κατά κύριο λόγο:

(α) σε σφάλματα δομής του μοντέλου (απλουστευμένη αναπαράσταση εξαιρετικά σύνθετων διεργασιών, χρήση μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν τα δεδομένα των μετρήσεων, αλληλεπίδραση παραμέτρων), και

(β) σε σφάλματα δεδομένων (ανεπαρκείς ή και λανθασμένες μετρήσεις, σφάλματα χωρικής και χρονικής ολοκλήρωσης).

Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, άρα και η πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Όσον αφορά στο ζήτημα της βαθμονόμησης, η έρευνα έχει στραφεί προς την αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας, με την ενσωμάτωση πολλαπλών κριτηρίων καλής προσαρμογής (Gurta *et al.*, 1998) αλλά και την αξιοποίηση της εμπειρίας στη διαδικασία της βελτιστοποίησης καθώς και στην ανάπτυξη μεθοδολογιών ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας, με σκοπό τη βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου (Freer *et al.*, 1996).

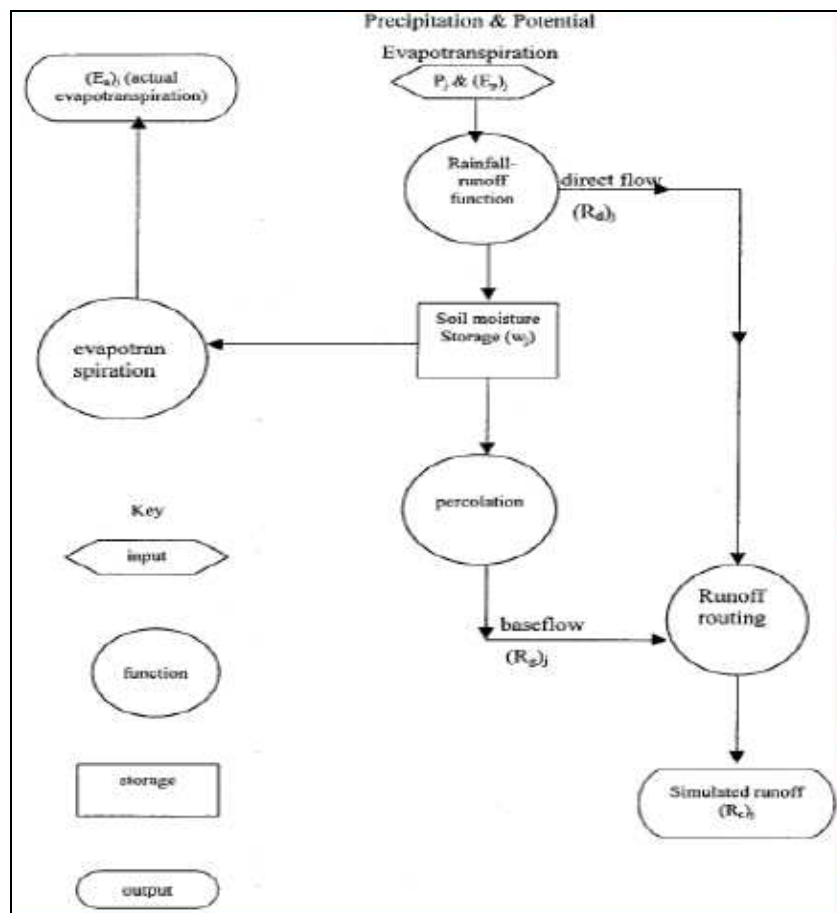
### **B.3. Περιγραφή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου**

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)
- L. Xiong and S. Guo (Xiong and Guo, 1999)

#### ***B.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,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , προσδιορίζονται με βελτιστοποίηση. Οι τιμές των άλλων δύο παραμέτρων,  $b_1$ ,  $b_2$ , παίρνουν διακριτές τιμές. Το λογικό διάγραμμα του μοντέλου περιγράφεται στην Εικόνα B.1 ενώ παρακάτω αναλύονται και οι εξισώσεις.



**Εικόνα Β.1:** Λογικό διάγραμμα των εισαγομένων και εξαγομένων μεταβλητών του μοντέλου Abulohom.

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:

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

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:

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

Στην εξίσωση (B.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:

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

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 (B.4)

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

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

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

Το αποτέλεσμα της σχέσης (B.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,  $(E_a)_j$ , δίνεται από την εξίσωση (B.6) και βασίζεται σε δύο ποσότητες: στη διαθέσιμη αποθηκευμένη υγρασία για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα  $j$  και στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή  $(E_p)_j$  του μήνα  $j$ .

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

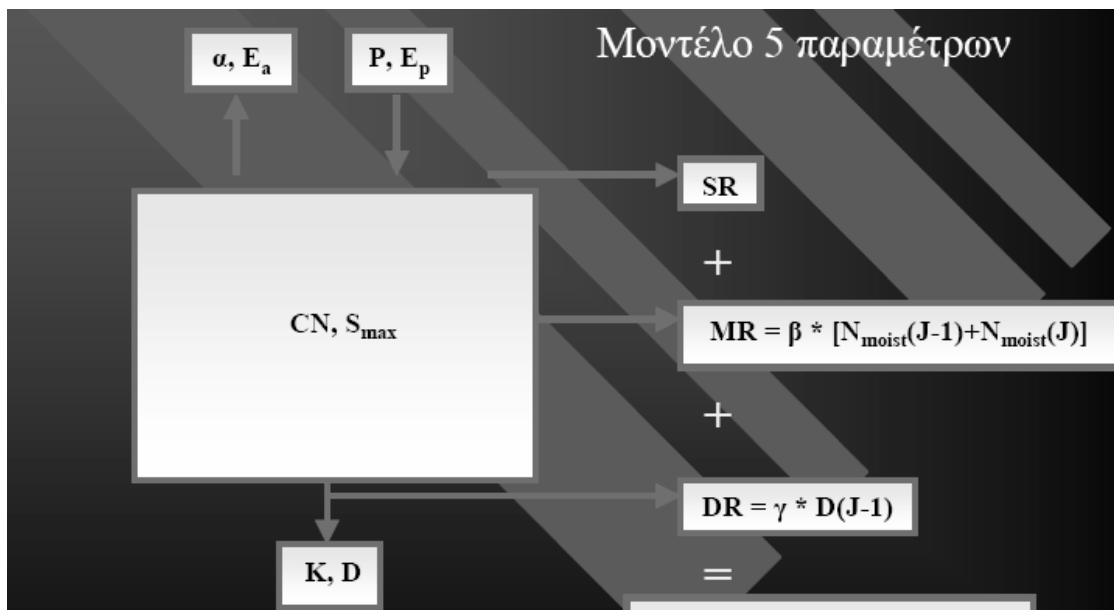
όπου,  $w_j$  η διαθέσιμη αποθηκευμένη υγρασία για εξατμισοδιαπνοή κατά το μήνα  $j$ , η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

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

και το  $\alpha_3$  είναι μία άγνωστη παράμετρος που εκτιμάται μέσω της βελτιστοποίησης του μοντέλου.

### B.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. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Loukas εμφανίζεται στην Εικόνα B.2.



Εικόνα B.2: Απεικόνιση του μοντέλου Loukas.

Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $E_a$  του μήνα  $j$  εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα, και τη μέση επιφανειακή δυναμική

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

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

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:

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

ή

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

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:

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

ή

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

$$Q_g(j) = \gamma * D(j-1) \quad (\text{B.17})$$

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

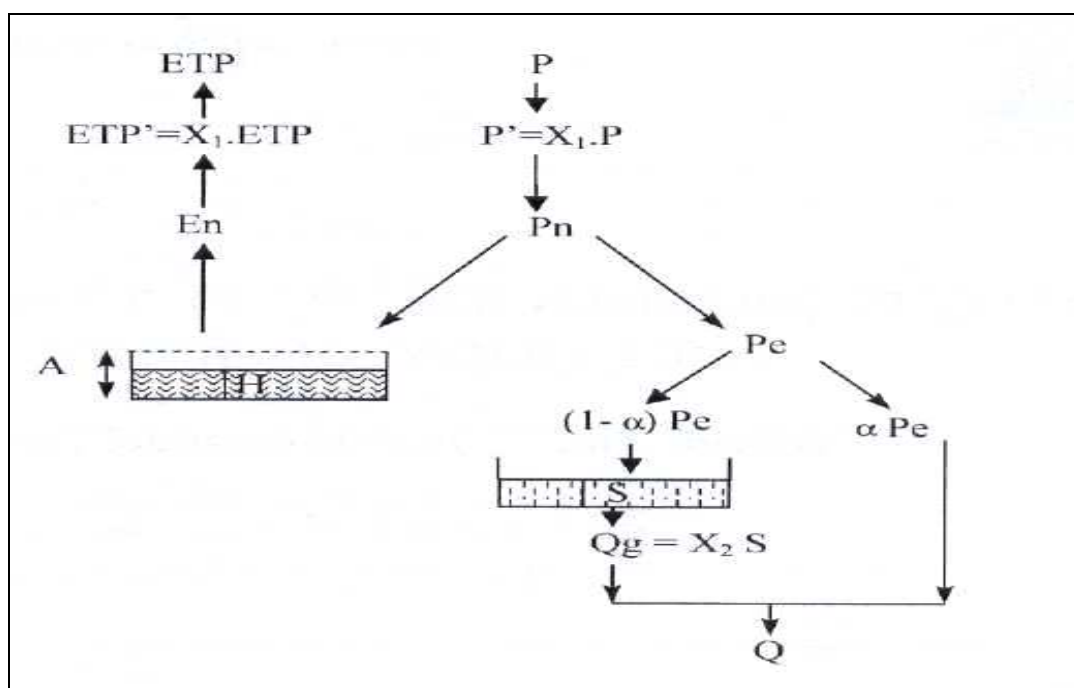
Τέλος, η συνολική απορροή,  $Q_c$ , υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, ενδιάμεσης απορροής και βασικής απορροής:

$$Q_c(j) = SR(j) + MR(j) + Q_g(j) \quad (\text{B.18})$$

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.

### B.3.3. 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. Απεικόνιση του μοντέλου GR2M παρουσιάζεται στην Εικόνα B.3. Οι εξισώσεις υπολογισμού της προσομοίωσης βάσει του μοντέλου GR2M εμφανίζονται παρακάτω.



Εικόνα B.3: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου GR2M.

$$R_n = R - [RE / (R^{1/2} + E^{1/2})^2] \quad (B.19)$$

$$E_n = E - [RE / (R^{1/2} + E^{1/2})^2] \quad (B.20)$$

$$R'_n = X_1 R_n \quad (B.21)$$

$$E'_n = X_1 E_n \quad (B.22)$$

$$H_1 = (H + AV) / [1 + (HV / A)] \quad (B.23)$$



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

$$R_e = R'_n = H - H_1 \quad (\text{B.24})$$

$$H_2 = H_1 (1 - W) / \{1 + W [1 - (H_1 / A)]\} \quad (\text{B.25})$$

$$\text{Με } W = \tanh(E'_n / A)$$

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

$$S_1 = S + (4/5 R_e) \quad (\text{B.26})$$

Και δίνει παροχή  $Q_s$

$$Q_s = X_2 S_1 \quad (\text{B.27})$$

$$S_2 = S_1 - Q_s \quad (\text{B.28})$$

Τελικά η μηνιαία συνολική απορροή είναι:

$$Q = Q_s + (R_e / 5) \quad (\text{B.29})$$

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.

### ***B.3.4. Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου XIONG - GUO***

Το τελευταίο από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι των Lihua Xiong, Shenglian Guo (1999). 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.

$$E(t) = EP(t) * \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (B.30)$$

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 :

$$E(t) / EP(t) = \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (B.31)$$

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

$$E(t) = c * EP(t) * \tanh [P(t) / EP(t)] \quad (B.32)$$

όπου  $c$  η πρώτη παράμετρος του μοντέλου.

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

$$Q(t) = S(t) * \tanh[ S(t) / SC] \quad (B.33)$$

$$S(t) = S(t-1) + P(t) - E(t) - Q(t) \quad (B.34)$$

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

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας της προσομοίωσης στην απορροή. Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε τέσσερις υποκατηγορίες, όσες δηλαδή και οι διαφορετικές περιπτώσεις εισαγόμενων δεδομένων, και για τα τέσσερα μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης. Οι στατιστικοί παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και για τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα είναι η αποτελεσματικότητα του μοντέλου (Model Efficiency), ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ , και το BIAS ή προκατάληψη. Τα συνοπτικά αποτελέσματα εμφανίζονται στους πίνακες των παρακάτω παραγράφων κάθε προσέγγισης, και αναλύονται σύμφωνα με τη σειρά εισαγωγής των δεδομένων, δορυφορικών και επίγειων καθώς και τους συνδυασμούς αυτών, για τις περιόδους της βελτιστοποίησης, πιστοποίησης και ολόκληρης της χρονοσειράς.

#### *3.1 Πρώτη προσέγγιση: Απορροές με δορυφορικά δεδομένα*

Στην προσέγγιση αυτή, η προσομοίωση της απορροής μέσω των τεσσάρων επιλεγμένων μοντέλων χρησιμοποιώντας μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης και παρατηρημένης απορροής από τους επιγείους σταθμούς μέτρησης, καθώς και θερμοκρασίας και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από δορυφορικές εικόνες. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ξεχωριστά για τις περιόδους βελτιστοποίησης (1981-87), πιστοποίησης (1987-93) και για ολόκληρη την χρονοσειρά από Οκτώβριο 1981 έως Σεπτέμβριο 1993, στη λεκάνη απορροής Μουζάκι της Θεσσαλίας.

Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων αναφέρεται για κάθε μοντέλο ξεχωριστά: 1) Το μοντέλο Abulohom παρουσιάζει σχετικά καλή προσομοίωση της απορροής στην

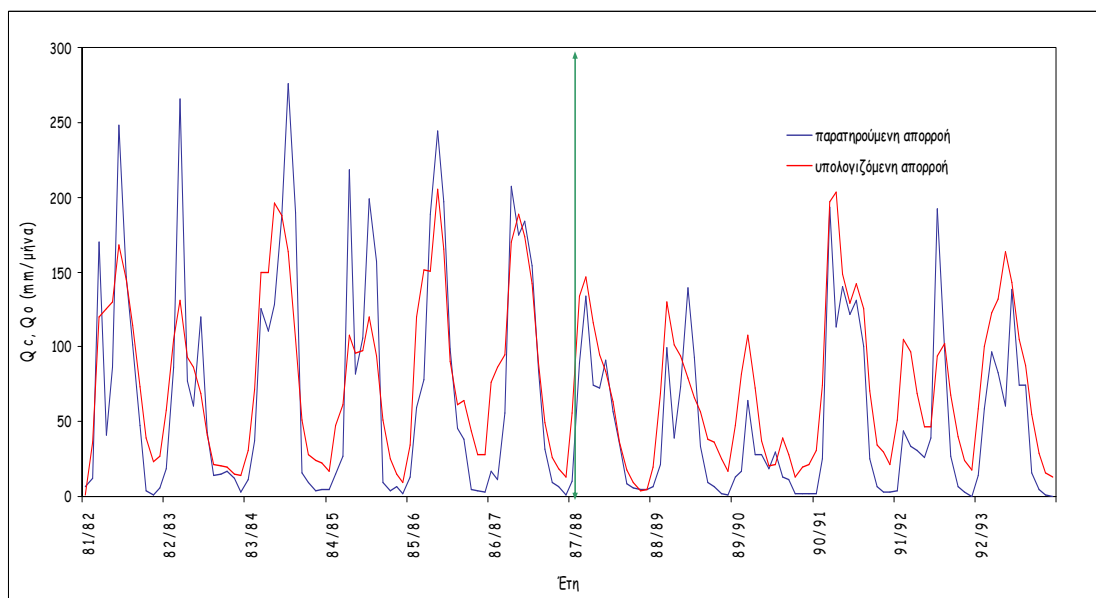
περιοχή, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς των στατιστικών (Model Efficiency = 0.65 για όλη την χρονοσειρά, όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.73$ ). Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff = 0.63 για όλη την χρονοσειρά, η οποία δείχνει επίσης καλή προσομοίωση της απορροής ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.65$  είναι αρκετά ικανοποιητικός. Το μοντέλο GR2M εμφάνισε απόδοση του μοντέλου M.Eff = 0.67 για όλη την χρονοσειρά και συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.71$  το οποίο είναι υψηλότερο σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff έδειξε 0.59 για όλη την χρονοσειρά, το οποίο δεν είναι καλή προσομοίωση. Επίσης, ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.63$  ήταν ο πιο χαμηλός. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, και που προέκυψαν από την πρώτη προσέγγιση, για όλα τα μοντέλα.

Επίσης υπολογίστηκαν τα 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. Στις Εικόνες 3.1. και 3.2 παρουσιάζονται παραδείγματα των διαγραμμάτων αυτών ενδεικτικά για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη τη χρονοσειρά, ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα όλων των μοντέλων και όλων των περιόδων εφαρμογής φαίνονται στο Παράρτημα 1.

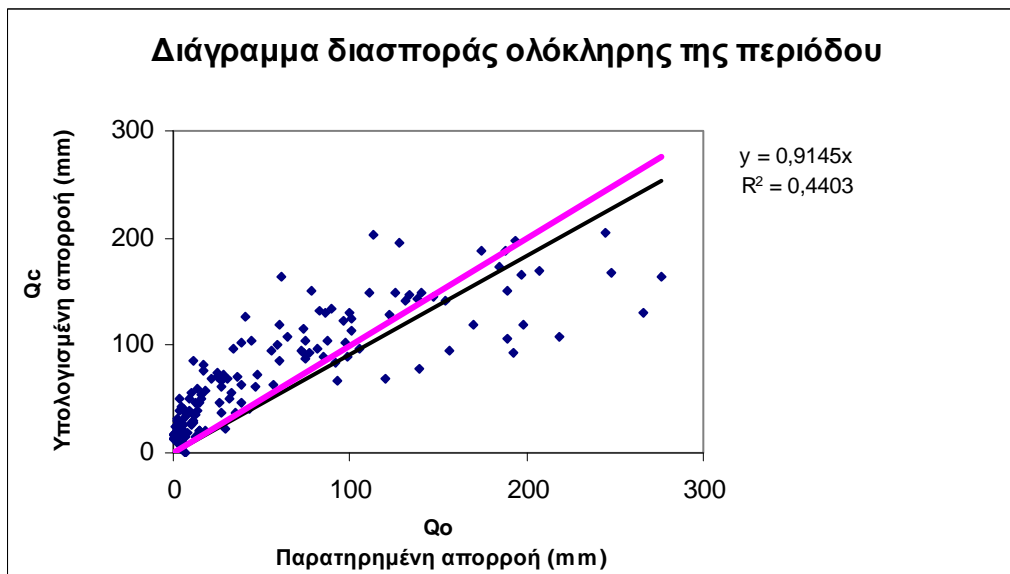
**Πίνακας 3.1:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικών παραμέτρων των τεσσάρων μοντέλων. Πρώτη προσέγγιση, με χρήση δεδομένων θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένης με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.

| Statistics           | Abulohom |       |        | Loukas |       |        | GR2M |       |        | Xiong-Guo |       |        |
|----------------------|----------|-------|--------|--------|-------|--------|------|-------|--------|-----------|-------|--------|
|                      | Cal      | Val.  | Period | Cal.   | Val.  | Period | Cal. | Val.  | Period | Cal.      | Val.  | Period |
| <b>Eff</b>           | 0.71     | 0.45  | 0.65   | 0.67   | 0.50  | 0.63   | 0.72 | 0.51  | 0.67   | 0.61      | 0.54  | 0.59   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0.73     | 0.67  | 0.70   | 0.69   | 0.61  | 0.65   | 0.74 | 0.72  | 0.71   | 0.65      | 0.64  | 0.63   |
| <b>BIAS</b>          | -7.3     | -25.3 | -14.7  | 1.4    | -18.8 | -6.9   | -6.8 | -25.3 | -14.4  | 1.4       | -19.1 | -7.1   |

- Cal: Calibration (χρονοσειρά Βαθμονόμησης από Οκτ.1981 έως Σεπτ. 1987), Val: Validation (χρονοσειρά Πιστοποίησης από Οκτ.1987 έως Σεπτ. 1993) και Period: Πλήρης χρονοσειρά (από Οκτ.1981 έως Σεπτ. 1993).



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



**Εικόνα 3.2:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Abulohom για ολόκληρη τη χρονοσειρά των δεδομένων.

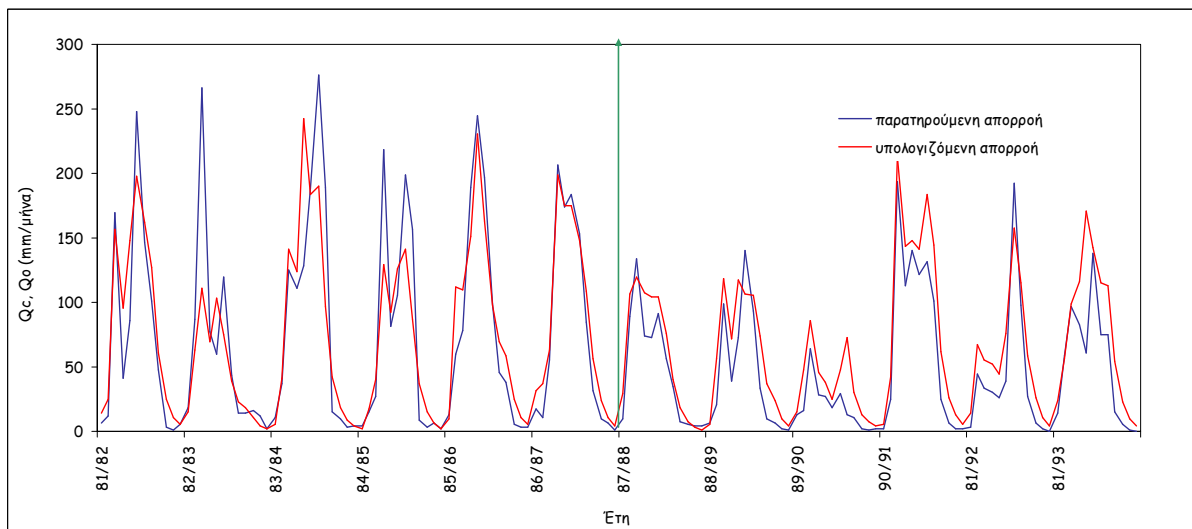
### ***3.2 Δεύτερη προσέγγιση: Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής από δορυφόρο.***

Ο Πίνακας 3.2 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων, που έγιναν με χρήση επίγειων δεδομένων θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης από δορυφόρο με τη μέθοδο Blanney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας. Οι υπόλοιποι παράμετροι των δεδομένων παρέμειναν οι ίδιοι.

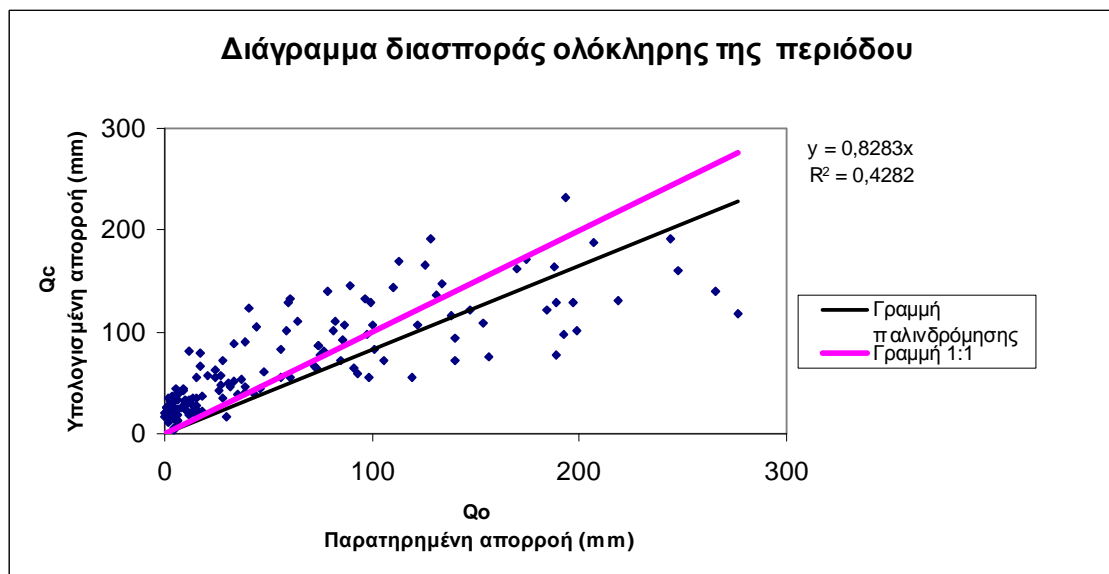
Το μοντέλο Abulohom παρουσιάζει σχετικά καλή προσομοίωση της απορροής στην περιοχή, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς των στατιστικών (Model Efficiency = 0.65 για όλη την χρονοσειρά, όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.71$ ). Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου  $M.Eff = 0.65$  για όλη την χρονοσειρά, η οποία δείχνει επίσης καλή προσομοίωση της απορροής ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.67$  είναι ικανοποιητικός. Το μοντέλο GR2M εμφάνισε απόδοση του μοντέλου  $M.Eff = 0.67$  για όλη την χρονοσειρά και συντελεστή

προσδιορισμού  $R^2 = 0.73$  το οποίο είναι υψηλότερο σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff έδειξε 0.62 για όλη την χρονοσειρά, το οποίο δεν είναι καλή προσομοίωση. Επίσης, ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.65$  ήταν ο πιο χαμηλός.

Επίσης υπολογίστηκαν και εδώ τα διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και τα διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από επίγειους σταθμούς και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες. Στις Εικόνες 3.3. και 3.4 παρουσιάζονται παραδείγματα των διαγραμμάτων αυτών ενδεικτικά για το μοντέλο Loukas για ολόκληρη τη χρονοσειρά, ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα όλων των μοντέλων και όλων των περιόδων εφαρμογής φαίνονται στο Παράρτημα 2.



**Εικόνα 3.3:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Loukas.



**Εικόνα 3.4:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Loukas για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

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

| Statistics           | Abulohom |       |        | Loukas |        |        | GR2M  |        |        | Xiong-Guo |        |        |
|----------------------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|                      | Cal      | Val.  | Period | Cal.   | Val.   | Period | Cal.  | Val.   | Period | Cal.      | Val.   | Period |
| <b>Eff</b>           | 0,70     | 0,50  | 0,65   | 0,67   | 0,57   | 0,65   | 0,72  | 0,55   | 0,67   | 0,63      | 0,56   | 0,62   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0,72     | 0,70  | 0,71   | 0,69   | 0,67   | 0,67   | 0,74  | 0,75   | 0,73   | 0,66      | 0,67   | 0,65   |
| <b>BIAS</b>          | -7,37    | -25,1 | -14,6  | 0,78   | -18,87 | -7,34  | -7,08 | -25,17 | -14,45 | 0,60      | -18,80 | -7,44  |



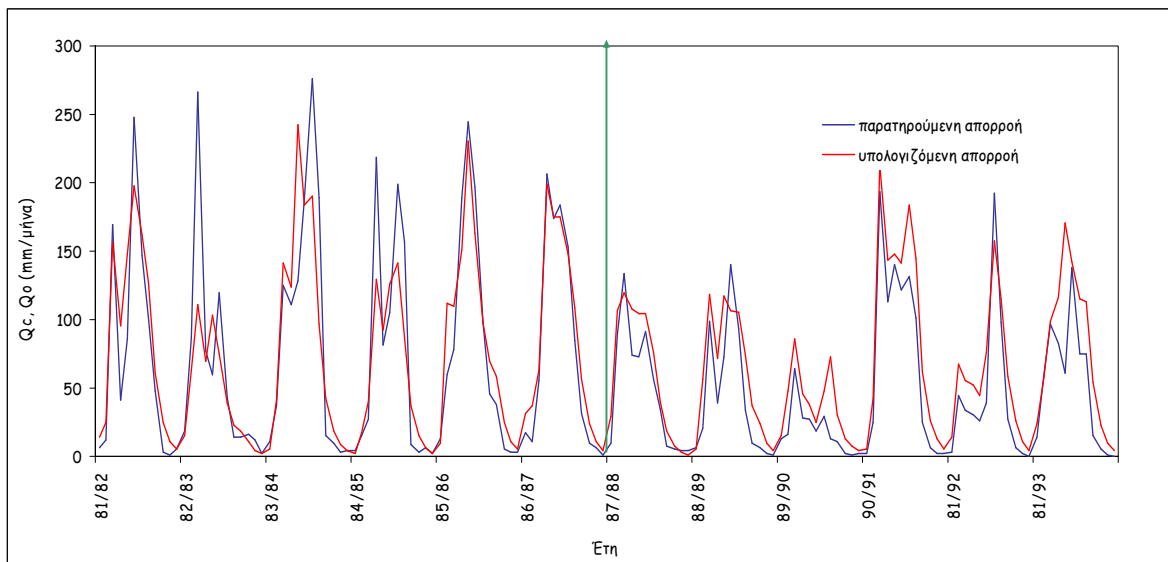
### **3.3 Τρίτη προσέγγιση: Απορροές με δορυφορικά δεδομένα θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής επίγειων δεδομένων με τη μέθοδο Thornthwaite**

Ο Πίνακας 3.3 περιέχει τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων όλων των μοντέλων, που έγιναν με χρήση δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας και επίγειας εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite (1948) για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1981 έως Σεπτέμβριο 1993 στη λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας. Οι παράμετροι βροχόπτωσης και απορροής παρέμειναν οι ίδιοι.

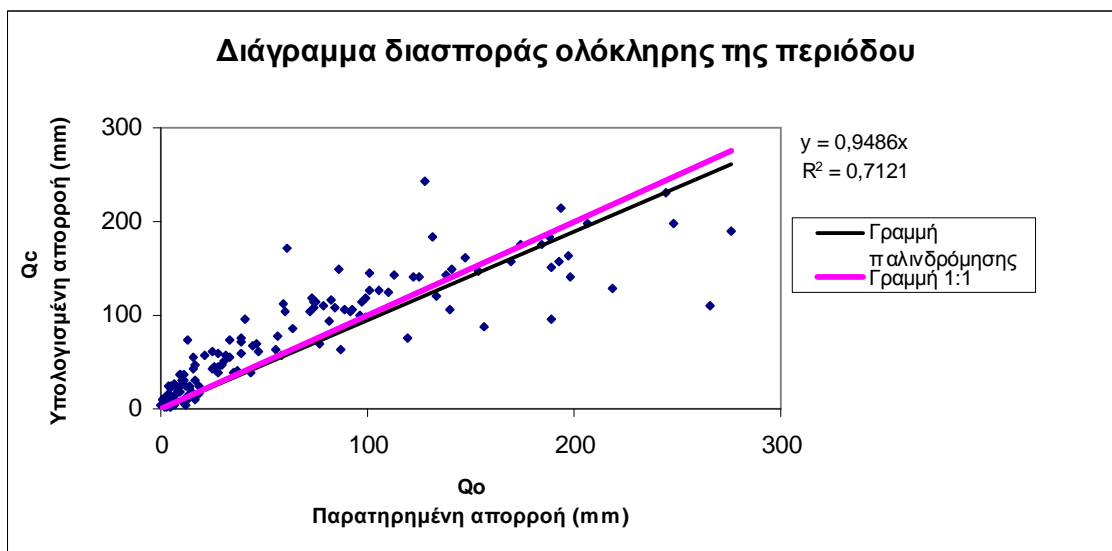
Το μοντέλο Abulohom παρουσιάζει σχετικά καλή προσομοίωση της απορροής στην περιοχή, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς των στατιστικών (Model Efficiency = 0.76 για όλη την χρονοσειρά, όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.76$ ). Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff = 0.75 για όλη την χρονοσειρά, η οποία δείχνει επίσης πολύ καλή προσομοίωση της απορροής ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.75$  είναι πολύ ικανοποιητικός. Το μοντέλο GR2M εμφάνισε απόδοση του μοντέλου M.Eff = 0.77 για όλη την χρονοσειρά και συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.78$  το οποίο είναι και εδώ πολύ υψηλότερο σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff έδειξε 0.71 για όλη την χρονοσειρά, το οποίο δείχνει καλή προσομοίωση. Επίσης, ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.71$  ήταν ο πιο χαμηλός σε σχέση με τα άλλα μοντέλα αλλά ο πιο υψηλότερος αυτού του μοντέλου όσον αφορά στις προηγούμενες προσεγγίσεις.

Τέλος, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και τα διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από τις δορυφορικές εικόνες και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα. Στις Εικόνες 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται

παραδείγματα των διαγραμμάτων αυτών ενδεικτικά για το μοντέλο GR2M για ολόκληρη τη χρονοσειρά, ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα όλων των μοντέλων και όλων των περιόδων εφαρμογής φαίνονται στο Παράρτημα 3.



**Εικόνα 3.5:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο GR2M .



**Εικόνα 3.6:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο GR2M για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

**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 Μουζάκι Θεσσαλίας.

| Statistics           | Abulohom |        |        | Loukas |        |        | GR2M  |        |        | Xiong-Guo |        |        |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|                      | Cal      | Val.   | Period | Cal.   | Val.   | Period | Cal.  | Val.   | Period | Cal.      | Val.   | Period |
| <b>Eff</b>           | 0,77     | 0,71   | 0,76   | 0,74   | 0,76   | 0,75   | 0,79  | 0,70   | 0,77   | 0,70      | 0,73   | 0,71   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0,76     | 0,78   | 0,76   | 0,76   | 0,80   | 0,75   | 0,79  | 0,85   | 0,78   | 0,71      | 0,75   | 0,71   |
| <b>BIAS</b>          | 3,08     | -14,05 | -4,09  | 8,85   | -10,25 | 0,75   | -1,61 | -19,72 | -9,10  | 6,49      | -10,54 | -0,58  |

### *3.4 Τέταρτη προσέγγιση: Απορροές με επίγεια δεδομένα θερμοκρασίας και επίγεια εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite*

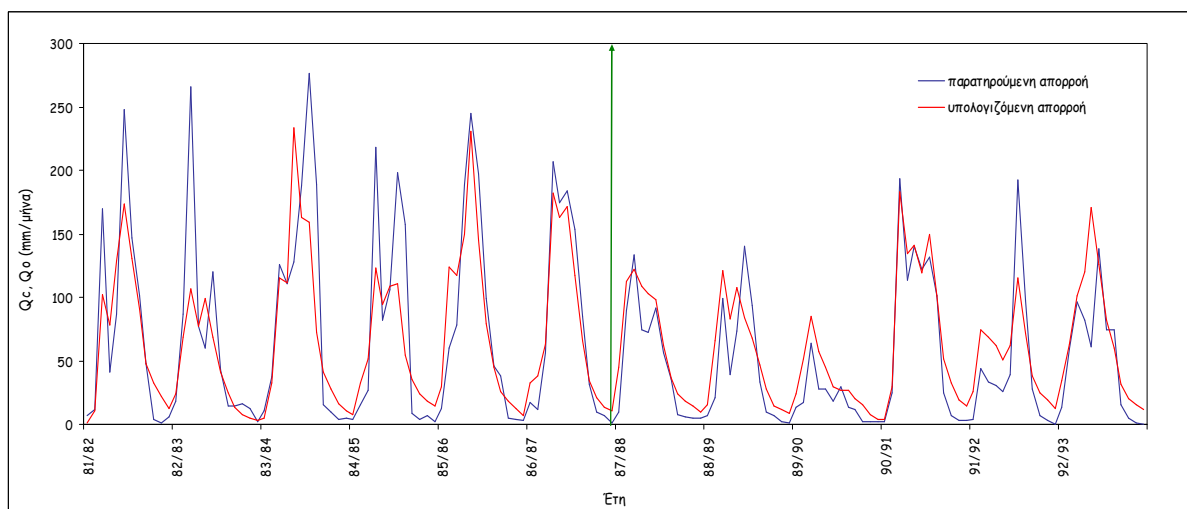
Στην προσέγγιση αυτή, το μοντέλο Abulohom παρουσιάζει καλή προσομοίωση της απορροής στην περιοχή, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς των στατιστικών (Model Efficiency = 0.76 για όλη την χρονοσειρά, όπως και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.77$ ). Για το μοντέλο Loukas η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff = 0.75 για όλη την χρονοσειρά, η οποία δείχνει επίσης καλή προσομοίωση της απορροής ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.75$  είναι αρκετά υψηλός. Το μοντέλο GR2M εμφάνισε απόδοση του μοντέλου M.Eff = 0.77 για όλη την χρονοσειρά και συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.78$  το οποίο είναι υψηλότερο σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, όπως και στις άλλες προσεγγίσεις. Για το μοντέλο Xiong-Guo η παράμετρος της επίδρασης του μοντέλου M.Eff έδειξε 0.72 για όλη την χρονοσειρά, το οποίο εμφανίζει πολύ καλή προσομοίωση. Επίσης, ο

συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.73$  ήταν ο πιο υψηλός για το μοντέλο αυτό από όλες τις προσεγγίσεις. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, και που προέκυψαν από την τετάρτη προσέγγιση, για όλα τα μοντέλα.

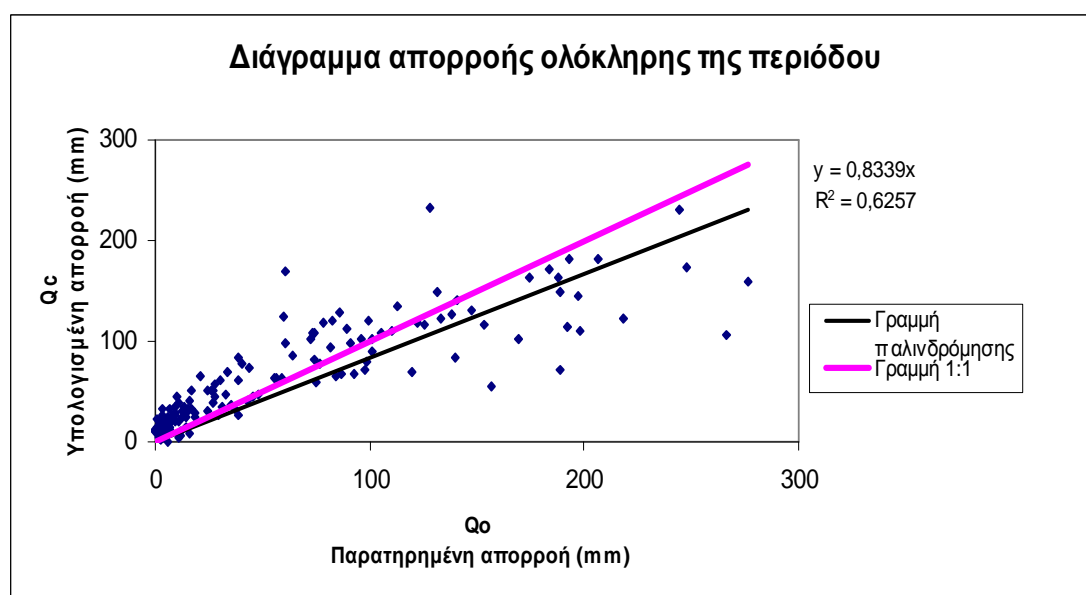
Επίσης υπολογίστηκαν τα διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, και διαγράμματα διασποράς στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί επίγεια θερμοκρασία αέρα και επίγεια εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite. Στις Εικόνες 3.7 και 3.8 παρουσιάζονται παραδείγματα των διαγραμμάτων αυτών ενδεικτικά για το μοντέλο Xiong-Guo για ολόκληρη τη χρονοσειρά, ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα όλων των μοντέλων και όλων των περιόδων εφαρμογής φαίνονται στο Παράρτημα 4.

**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 Μουζάκι Θεσσαλίας.

| Statistics           | Abulohom |       |        | Loukas |       |        | GR2M  |       |        | Xiong-Guo |       |        |
|----------------------|----------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-----------|-------|--------|
|                      | Cal      | Val.  | Period | Cal.   | Val.  | Period | Cal.  | Val.  | Period | Cal.      | Val.  | Period |
| <b>Eff</b>           | 0,78     | 0,70  | 0,76   | 0,74   | 0,76  | 0,75   | 0,79  | 0,70  | 0,77   | 0,72      | 0,73  | 0,72   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0,77     | 0,80  | 0,77   | 0,75   | 0,81  | 0,75   | 0,79  | 0,85  | 0,78   | 0,73      | 0,76  | 0,73   |
| <b>BIAS</b>          | 1,2      | -15,8 | -5,8   | 8,3    | -10,5 | 0,48   | -2,04 | -20,1 | -9,5   | 4,2       | -12,6 | -2,7   |



**Εικόνα 3.7:** Διάγραμμα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για το μοντέλο Xiong-Guo ολόκληρης της χρονοσειράς.



**Εικόνα 3.8:** Διάγραμμα διασποράς για το μοντέλο Xiong-Guo για ολόκληρη την χρονοσειρά των δεδομένων.

### 3.5 Αποτελέσματα παραμέτρων απορροής κάθε μοντέλου εφαρμογής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων που προέκυψαν από την εφαρμογή κάθε μοντέλου ξεχωριστά. Γίνεται επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε μοντέλο και για όλες τις επιμέρους προσεγγίσεις. Στους Πίνακες 3.5 έως και 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά προσέγγιση για τα μοντέλα Abulohom, Loukas, GR2M και Xiong-Guo αντίστοιχα.

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

| <b>Abulohom model</b> |   |       |        |  |       |        |   |       |        |   |       |        |
|-----------------------|---|-------|--------|--|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|
|                       | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |       |        | Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |       |        | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |       |        | Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |       |        |
| Statistic             | Cal.  | Val.  | Period | Cal.   | Val.  | Period | Cal.  | Val.  | Period | Cal.  | Val.  | Period |
| <b>Eff</b>            | 0.71  | 0.45  | 0.65   | 0.70   | 0.50  | 0.65   | 0.77  | 0.71  | 0.76   | 0.78  | 0.70  | 0.76   |
| <b>R<sup>2</sup></b>  | 0.73  | 0.67  | 0.70   | 0.72   | 0.70  | 0.71   | 0.76  | 0.78  | 0.76   | 0.77  | 0.80  | 0.77   |
| <b>BIAS</b>           | -7.3  | -25.3 | -14.7  | -7,4   | -25,1 | -14,6  | 3,08  | -14,1 | -4,1   | 1,15  | -15,8 | -5,88  |

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

| <b>Loukas model</b>  |   |       |        |  |       |        |   |       |        |   |       |        |
|----------------------|---|-------|--------|--|-------|--------|---|-------|--------|---|-------|--------|
|                      | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |       |        | Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |       |        | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |       |        | Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |       |        |
| Statistic            | Cal.  | Val.  | Period | Cal.   | Val.  | Period | Cal.  | Val.  | Period | Cal.  | Val.  | Period |
| <b>Eff</b>           | 0.67  | 0.50  | 0.63   | 0.67   | 0.57  | 0.65   | 0.74  | 0.76  | 0.75   | 0.74  | 0.76  | 0.75   |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0.69  | 0.61  | 0.65   | 0.69   | 0.67  | 0.67   | 0.76  | 0.80  | 0.75   | 0.75  | 0.81  | 0.75   |
| <b>BIAS</b>          | 1.5   | -18.8 | -6.9   | 0.78   | -18,8 | -7,3   | 8,85  | -10,3 | 0,75   | 8,3   | -10,5 | 0,48   |

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

| <b>GR2M model</b>    |   |             |               |  |             |               |   |             |               |   |             |               |
|----------------------|---|-------------|---------------|--|-------------|---------------|---|-------------|---------------|---|-------------|---------------|
|                      | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |             |               | Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |             |               | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |             |               | Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |             |               |
| <b>Statistic</b>     | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>  | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> |
| <b>Eff</b>           | 0.72  | 0.51        | 0.67          | 0.72   | 0.55        | 0.67          | 0.79  | 0.70        | 0.77          | 0.79  | 0.70        | 0.77          |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 0.74  | 0.72        | 0.71          | 0.74   | 0.75        | 0.73          | 0.79  | 0.85        | 0.78          | 0.79  | 0.85        | 0.78          |
| <b>BIAS</b>          | -6.8  | -25.3       | -14.4         | -7,08  | -25,2       | -14,5         | -1,6  | -19,7       | -9,1          | -2,04   | -20,1       | -9,5          |

**Πίνακας 3.8:** Στατιστικοί παράμετροι για το μοντέλο Xiong- Guo με συνδυασμούς διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

| <b>Xiong- Guo model</b> |   |             |               |  |             |               |   |             |               |   |             |               |
|-------------------------|---|-------------|---------------|--|-------------|---------------|---|-------------|---------------|---|-------------|---------------|
|                         | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |             |               | Επίγειες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοή Blaney-Criddle |             |               | Δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |             |               | Επίγειες τιμές θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite |             |               |
| <b>Statistic</b>        | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>  | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> | <b>Cal.</b>   | <b>Val.</b> | <b>Period</b> |
| <b>Eff</b>              | 0.61  | 0.54        | 0.59          | 0.63   | 0.56        | 0.62          | 0.70  | 0.73        | 0.71          | 0.72  | 0.73        | 0.72          |
| <b>R<sup>2</sup></b>    | 0.65  | 0.64        | 0.63          | 0.66   | 0.67        | 0.65          | 0.71  | 0.75        | 0.71          | 0.73  | 0.76        | 0.73          |
| <b>BIAS</b>             | 1.4   | -19.2       | -7.08         | 0.60   | -18,8       | -7,4          | 6,5   | -10,5       | -0,58         | 4,2   | -12,6       | -2,7          |

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο GR2M προσομοιώνει καλύτερα την απορροή στην περιοχή της υπολεκάνης του Μουζακίου, σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Το γεγονός αυτό τεκμηριώνεται από τα αποτελέσματα των στατιστικών παραμέτρων τα οποία στο συγκεκριμένο μοντέλο εμφάνισαν τις υψηλότερες τιμές.

Όσον αφορά στις διαφορετικές προσεγγίσεις, προκύπτουν τα εξής:

- Στο μοντέλο Abulohom, η χρήση δορυφορικής θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite καθώς και ο συνδυασμός επίγειας θερμοκρασίας αέρα και εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite έδωσαν την καλύτερη προσομοίωση στην περιοχή.
- Από τη χρήση των ίδιων δεδομένων με την προηγούμενη περίπτωση, της τρίτης και τέταρτης δηλαδή προσέγγισης, η προσομοίωση της απορροής για το μοντέλο Loukas ήταν πολύ καλύτερη.
- Στο μοντέλο GR2M, η προσομοίωση ήταν υψηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα, σε όλες τις προσεγγίσεις, με καλύτερη εκείνη της τρίτης προσέγγισης, δηλαδή, με χρήση δορυφορικής θερμοκρασίας και επίγειας εξατμισοδιαπνοής.
- Τέλος, το μοντέλο Xiong-Guo δεν παρουσίασε γενικώς τόσο καλή προσομοίωση της απορροής όσο τα προηγούμενα μοντέλα, αλλά έδωσε καλύτερα αποτελέσματα στην Τρίτη και τέταρτη επίσης προσέγγιση.



#### 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην συγκεκριμένη εργασία έχουν εφαρμοστεί τέσσερα αδρομερή μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτά τα μοντέλα, έχουν αναπτυχθεί κυρίως χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις των δεδομένων εισόδου, ενώ στην παρούσα έρευνα, το ζητούμενο ήταν η δυνατότητα χρήσης δορυφορικών δεδομένων για την προσομοίωση της απορροής στην περιοχή. Η δυνατότητα αυτή δίνει την προοπτική αξιοποίηση της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης στην προσομοίωση των υδρολογικών της παραμέτρων μιας περιοχής, στην παρακολούθηση του υδατικού δυναμικού σε μια περιοχή, και ιδιαίτερα αυτό είναι εργαλείο για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων ειδικά σε περιοχές που δεν υπάρχουν στοιχεία ή δεν είναι προσβάσιμες.

Η κύρια δυσκολία παρουσιάζεται στη βαθμονόμηση των μοντέλων ιδιαίτερα στη δυνατότητα εντοπισμού των παραμέτρων που ισχύουν για τη συγκεκριμένη περιοχή οπότε αυτό επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της προσομοίωσης και με επακόλουθο την ικανότητα των μοντέλων να δίνουν προσομοιωμένες απορροές κοντά στις μετρούμενες. Οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης οι συνθήκες εκκίνησης της προσομοίωσης, είναι μη μετρήσιμες και, συνεπώς, άγνωστες αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την ικανότητα προσομοίωσης, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη και εφαρμογή της μεθοδολογίας χωρίζονται σε εκείνα που αφορούν τα αποτελέσματα της

- σε εκείνα που προκύπτουν από τη χρήση των δεδομένων δορυφορικών εικόνων.
- προσομοίωσης των μοντέλων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης

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. Επίσης το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα εμφάνισε και η προσομοίωση της μορφής του υδρογραφήματος από το μοντέλο Loukas. Η προσομοίωση από το μοντέλο Xiong και Guo είναι γενικά καλή.

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

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ****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. Duan, Q., S. Sorooshian and V. Gupta (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resour. Res., 28(4): 1015-1031.
5. Eckhardt, K. and J. G. Arnold (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. Journal of Hydrology, 251(1/2): 103-109.
6. Freer, J., K.J. Beven and B. Ambroise (1996). Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. Water Resour. Res., 32: 2161-2173
7. Gupta, H.V., S. Sorooshian, and P.O. Yapo (1998). Toward improved calibration of hydrological models: Multiple and noncommensurable measures of information. Water Resour. Res., 34(4): 751-763.

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. 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.
10. Makhlof, Z. and C. Michel (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, Vol. 162: 299-318.
11. Nash, J.E. and J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrolol.* Vol. 10: 282-290.
12. Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, base soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London A193*: 120-146.
13. Refsgaard, J.C., (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, Vol. 198: 69-97.
14. SCS, (1972). (Soil Conservation Service). *National Engineering Handbook*, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
15. Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* No. 38:55-94.
16. 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.
17. 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**

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

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

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

**21.** Δήμος, Γ. (2005). Βιοστατιστική. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

**22.** 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.

**23.** Καϊμάκης, Σ. και Γ. Καββαδίας (1995). Μαθηματικά μοντέλα βροχής-απορροής. Στο: Υδατικοί Πόροι. Ι. Τεχνική Υδρολογία, κεφάλαιο 14<sup>ο</sup>, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα: 483-502.

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

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

**26.** 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.

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

**28.** 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.

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

**30.** Μπαστρογιάννης, Ν. (2002). Υδρολογική προσομοίωση Επιφανειακού Υδατικού Δυναμικού Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

**31.** Ξανθόπουλος, Θ. (1990). Εισαγωγή Στην Τεχνική Υδρολογία. Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

**32.** Παπαζαφειρίου, Ζ. (1984). Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη: 471.

**33.** Παπαϊωάννου, Γ. (1995). Εξάτμιση και Διαπνοή. Στο: Υδατικοί Πόροι. Ι. Τεχνική Υδρολογία, κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα: 167-210.

**34.** Πέππας, Α. (2001). Προσομοίωση υδατικών πόρων και χρήσεων νερού στη Θεσσαλία. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

**35.** 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.

**36.** Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί Πόροι. Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

**37.** 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/νση Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού, Τμήμα Νερών.

**38.** Φλόκας, Α.Α. (1997). Μαθήματα μετεωρολογίας και κλιματολογίας. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

**39.** 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.

**40.** Χονδρονίκου, Ε. (2007). Μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε μικρές λεκάνες απορροής με χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος: 133.



## ABSTRACT

The rainfall- runoff relationship is strongly dependent on soil, vegetation and topographic characteristics of the catchments. These characteristics vary within a given catchments in spatial domain. It is often necessary to derive distributed information about flow within different segments of the catchments, as the same is utilizable in studies for soil erosion sedimentation, chemical and nutrient transport and spatially distributed processes. Together tools of remote sensing and GIS have provided the means of identifying the physical factors that control the process of partitioning of rainfall into runoff and other components.

Hydrological models must be reliable and robust as these qualities influence all applications based on model output. The most basic modelling approach uses lumped models but they tend to over simplify the watershed heterogeneity. Therefore, hydrological models must take into account the spatial variability of land-atmosphere interactions, including the spatial variability of land use characteristics through watershed area subdivisions

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.

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 research was the application and intercomparison of four deterministic water balance models namely Abulohom, Loukas, GR2M 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 is the basin of Mouzaki, in Thessaly, central Greece. The Mouzaki basin drainage from Pamisos River which is a tributary of Pinios River located in Thessaly. It drains the western part of Thessaly basin, and specifically the north part of the district of Karditsa.

The simulation of runoff is carried out with the Abulohom, Loukas, GR2M and Xiong - Guo models. The methodology is divided into four different approaches, according to different input data in selected models. The inputs to the models, in the first approach, are monthly regional precipitation derived from the hydrological stations of the region, mean monthly satellite temperature and potential evapotranspiration based on NOAA/ AVHRR satellite data and observed runoff measured in the mouth of the Mouzaki watershed. In the second approach, the air temperature derived from meteorological stations of the region under study is used, replacing the satellite temperature of the first approach. The other parameters remain the same. In the third approach the satellite temperature and the Thornthwaite potential

evapotranspiration calculated from ground measures are used. Finally, in the last approach only ground measures are considered. 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 for the methodology procedure are Model Efficiency (Eff) index, which was developed by Nash and Sutcliffe, coefficient of determination  $R^2$  and BIAS.

In this research, the use of satellite data for calculating the simulated runoff in two from four approaches, provides innovative information and offers the possibility of remotely sensed techniques uses. The results which are extracted using the temperature and evapotranspiration satellite data show a high correlation with these which are resulted using earth measurements of temperature. This application provides that the use of Remote Sensing can be offer creditable data even if there are no ground measurements or meteorological stations.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1<sup>ο</sup>:** Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την πρώτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες).

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2<sup>ο</sup>:** Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για τη δεύτερη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση επίγειας θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες).

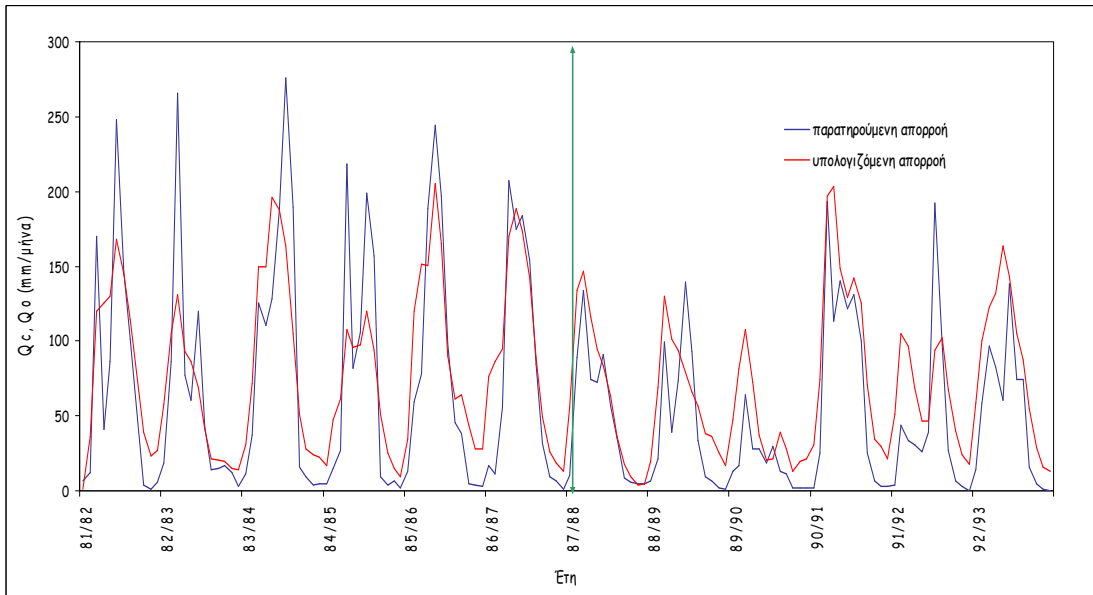
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3<sup>ο</sup>:** Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την τρίτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα).

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4<sup>ο</sup> :** Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την τέταρτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση επίγειας θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα).

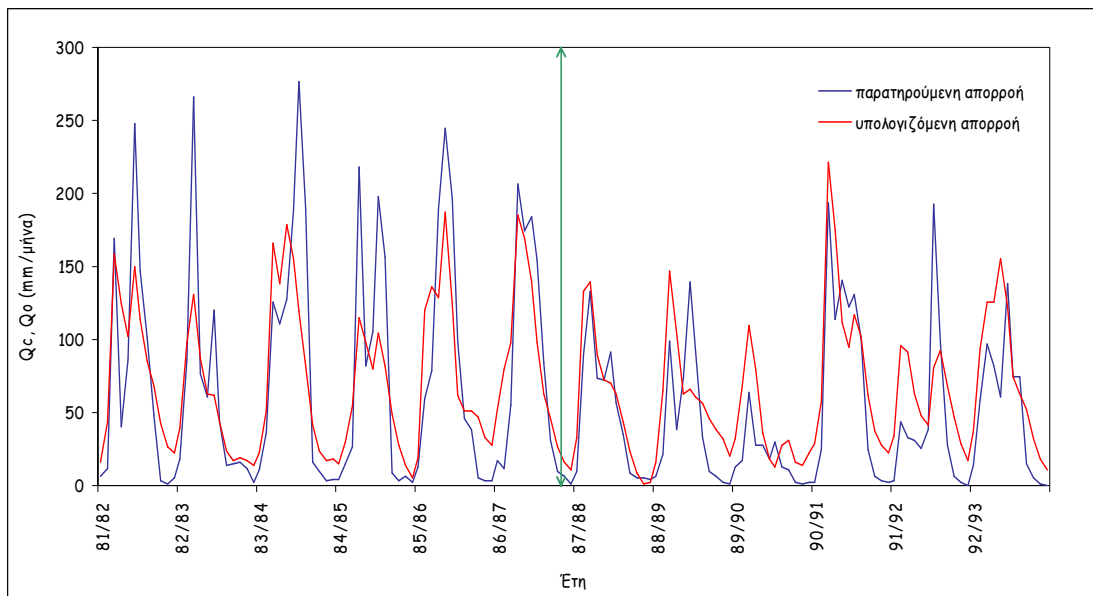
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1<sup>ο</sup>

Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την πρώτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες).

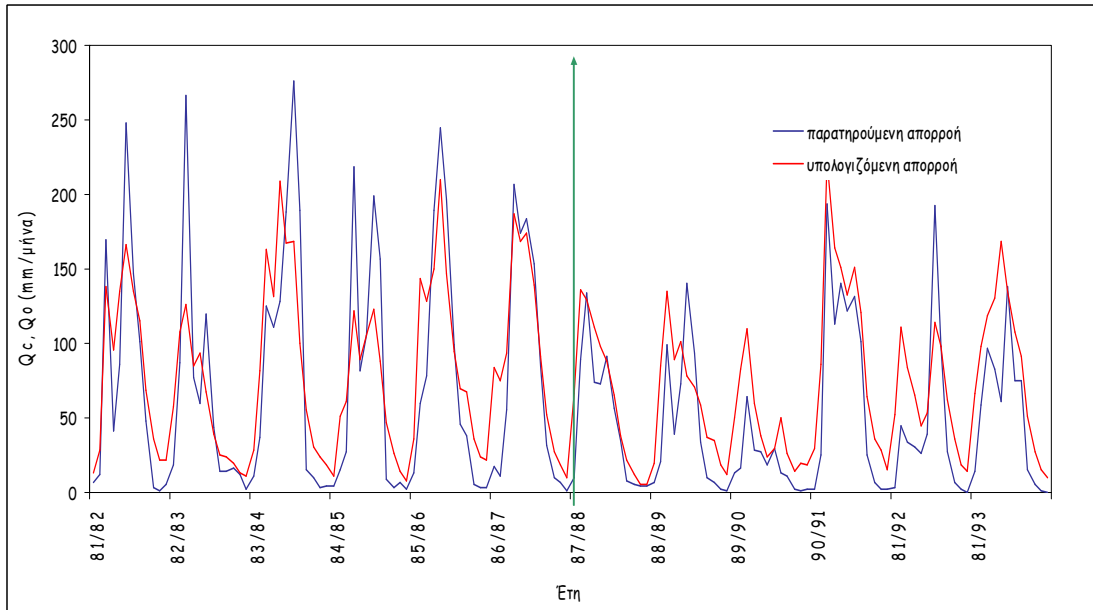
**1.Α** Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για όλα τα μοντέλα. Έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.



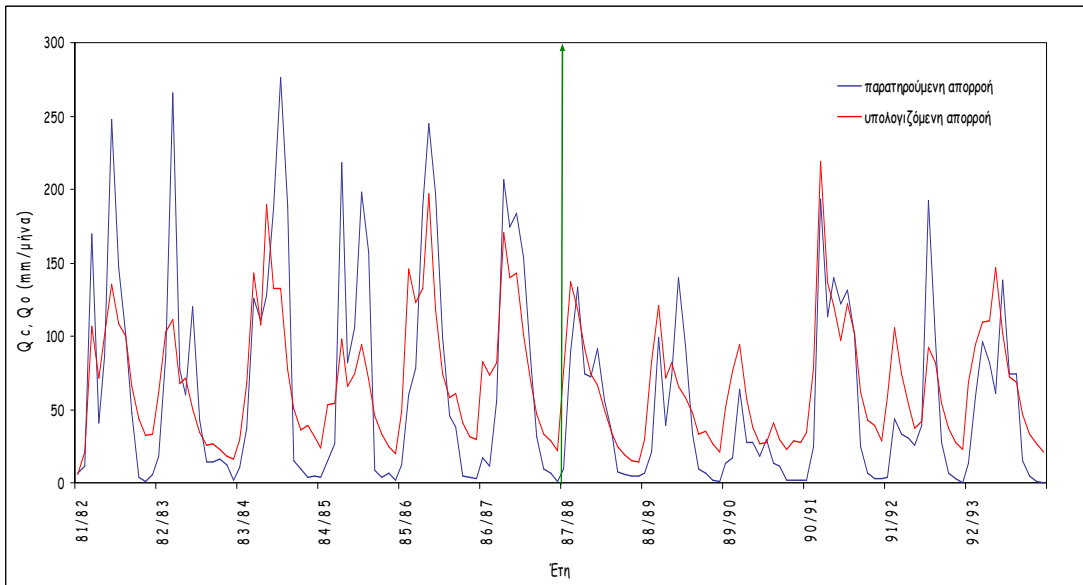
**1. Abulohom model**



**2. Loukas model**



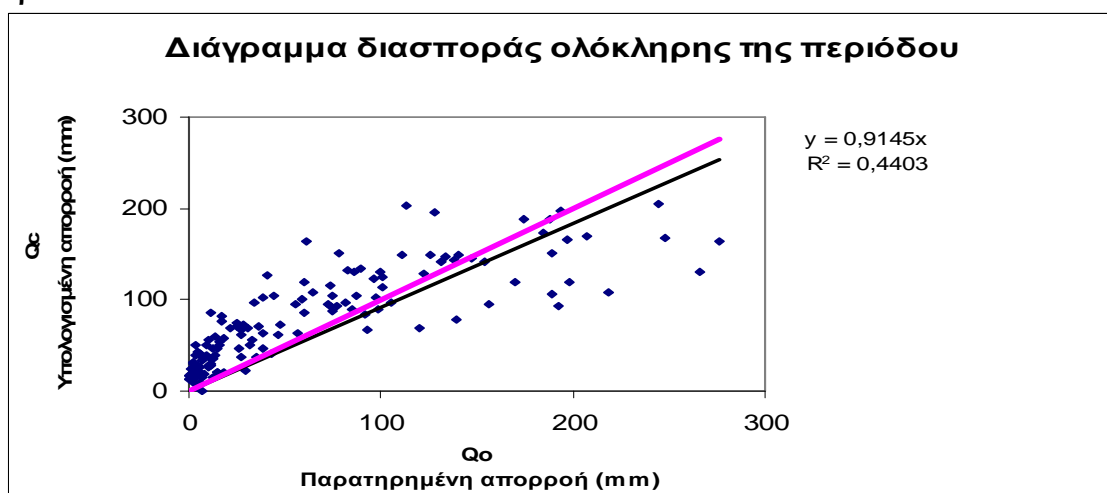
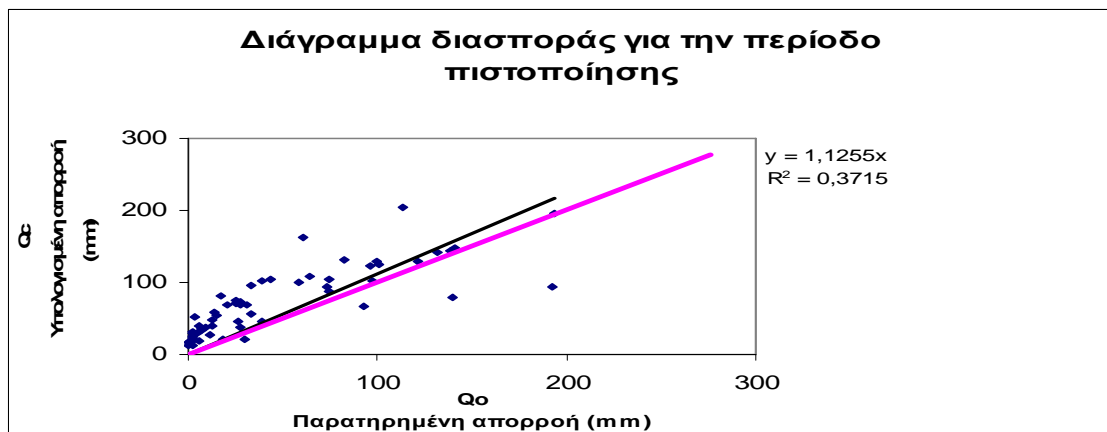
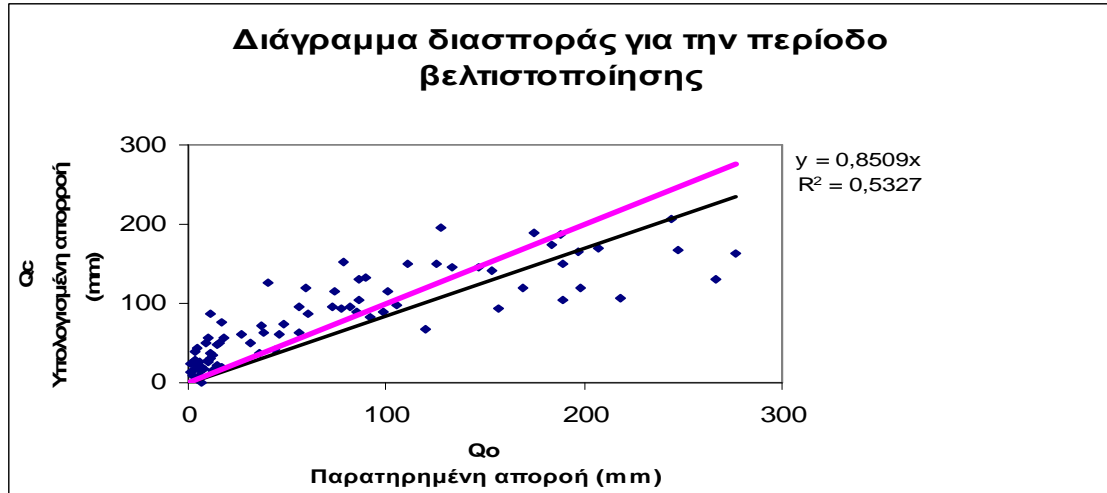
### 3. GR2M model



### 4. Xiong - Guo model

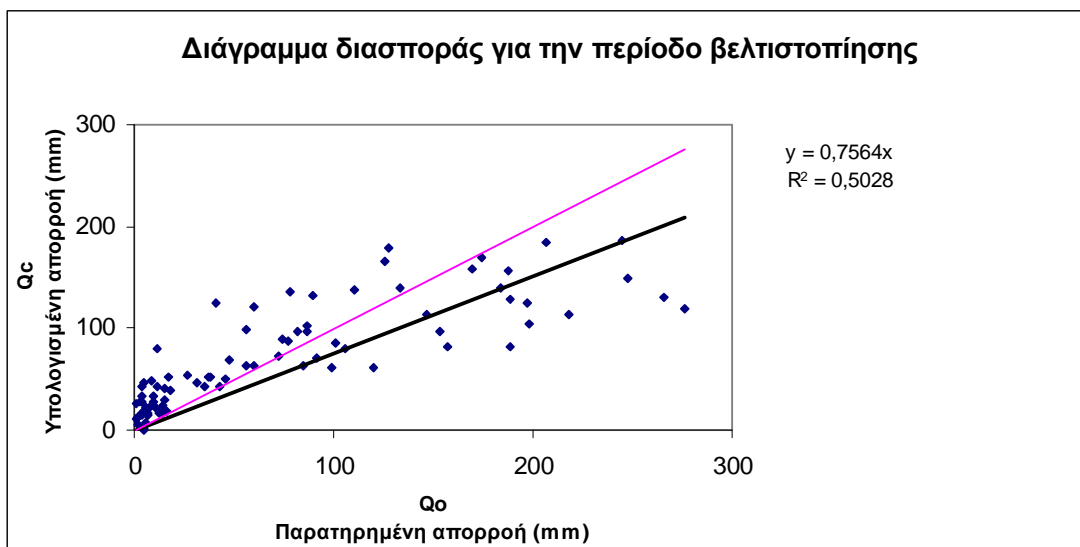
**1.B** Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα με χρήση θερμοκρασίας από δορυφόρο και δορυφορικής εξατμισοδιαπνοής με την μέθοδο Blaney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.

### 1 Abulohom model

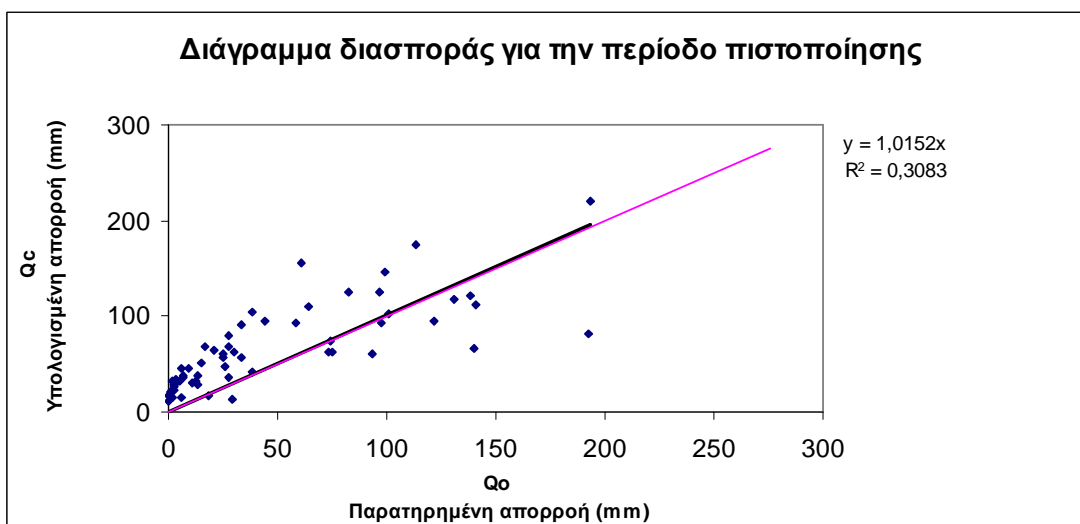




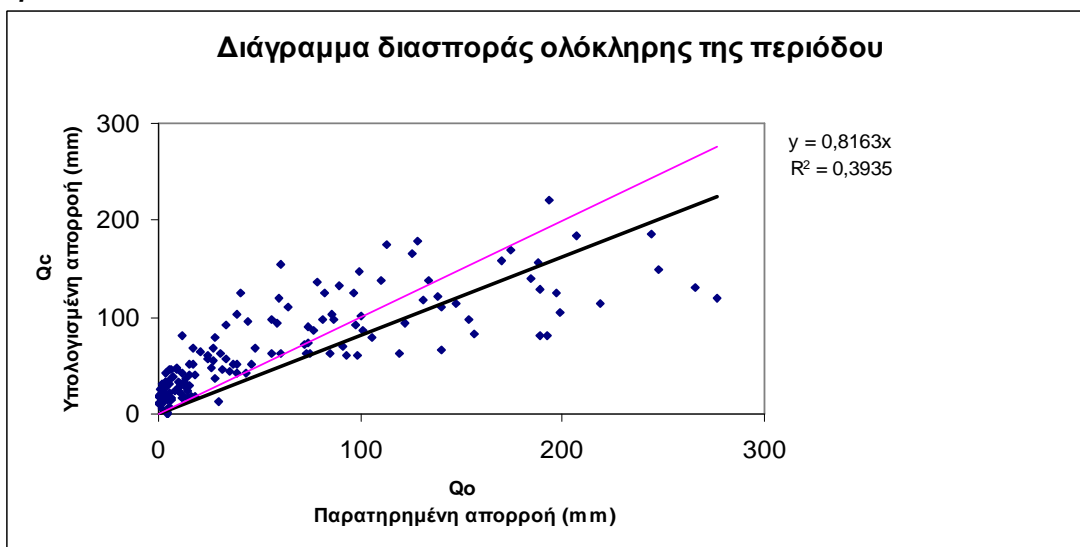
## 2.Loukas model



2.α

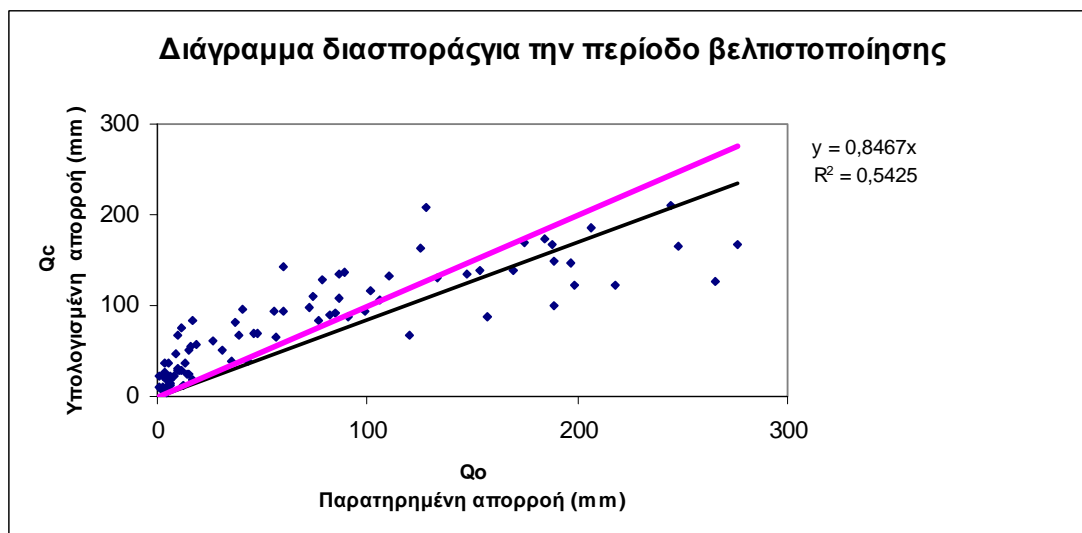


2.β

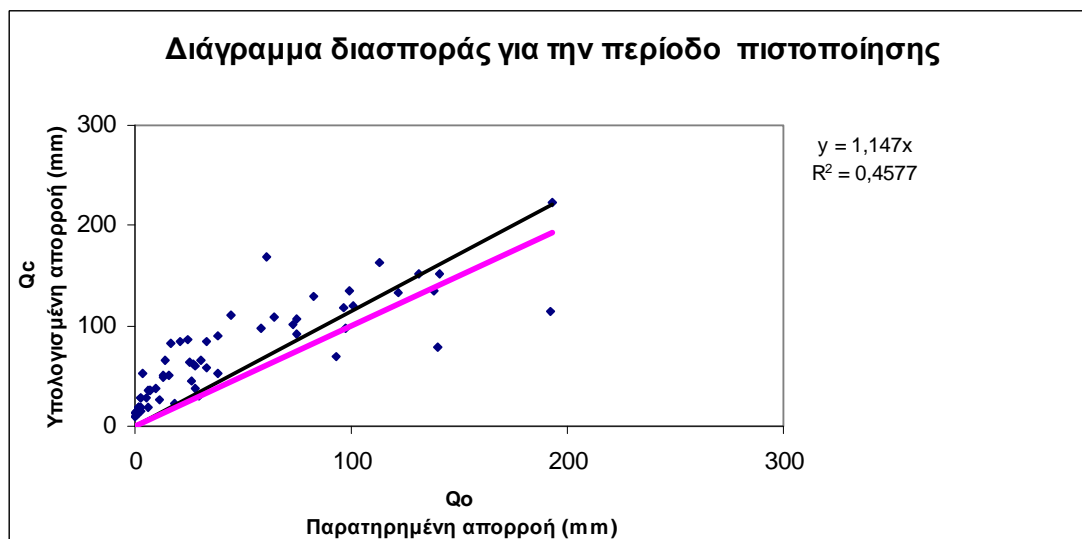


2.γ

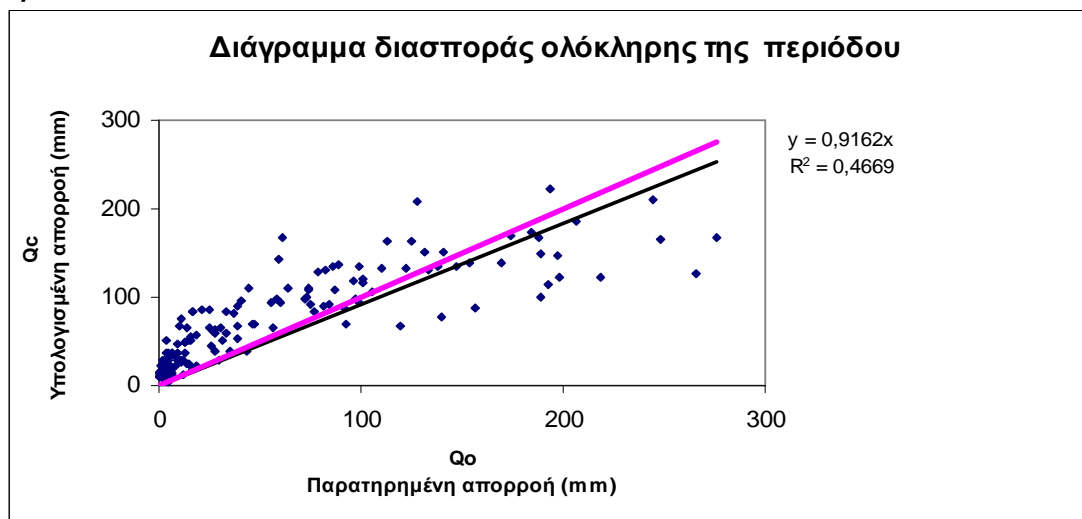
## 3. GR2M



3.α

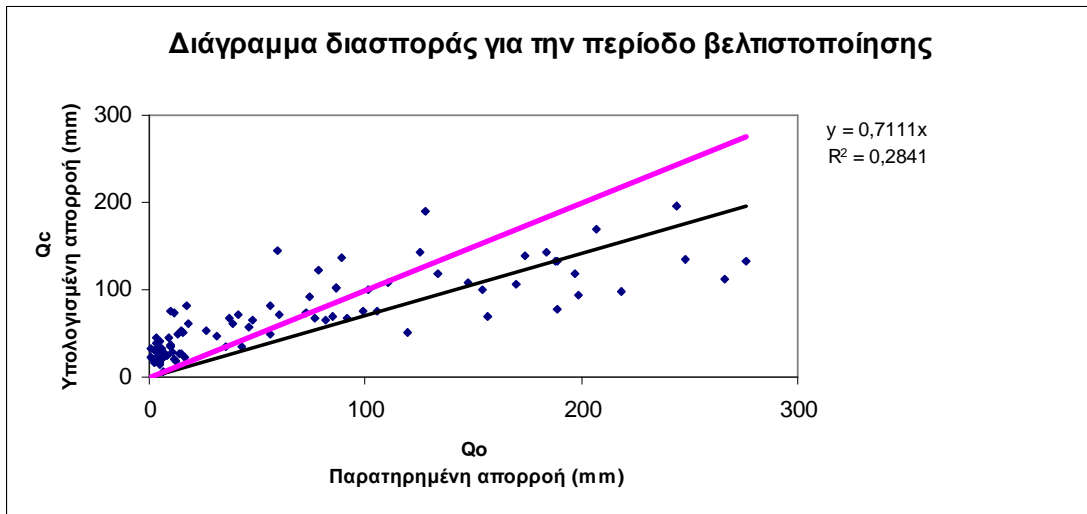


3.β

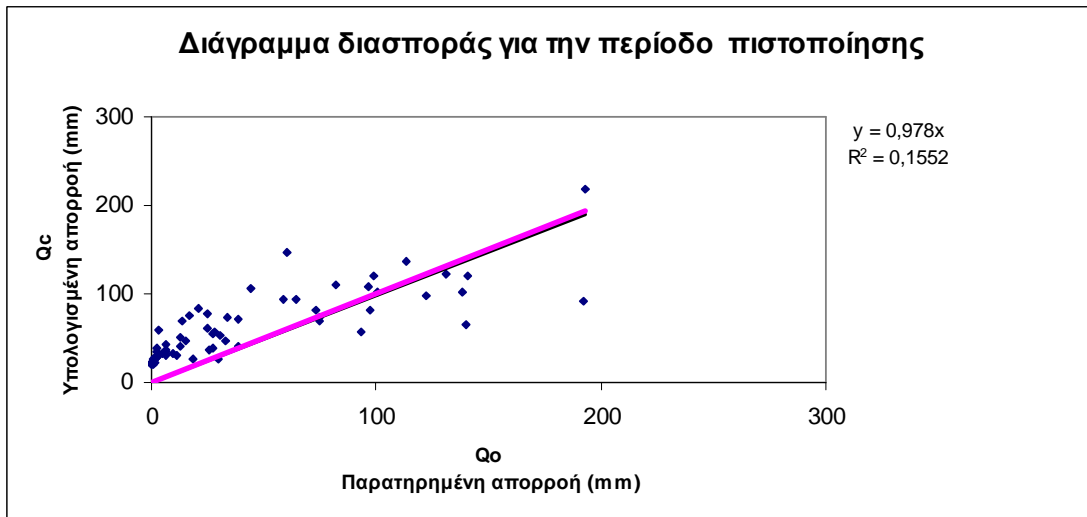


3.γ

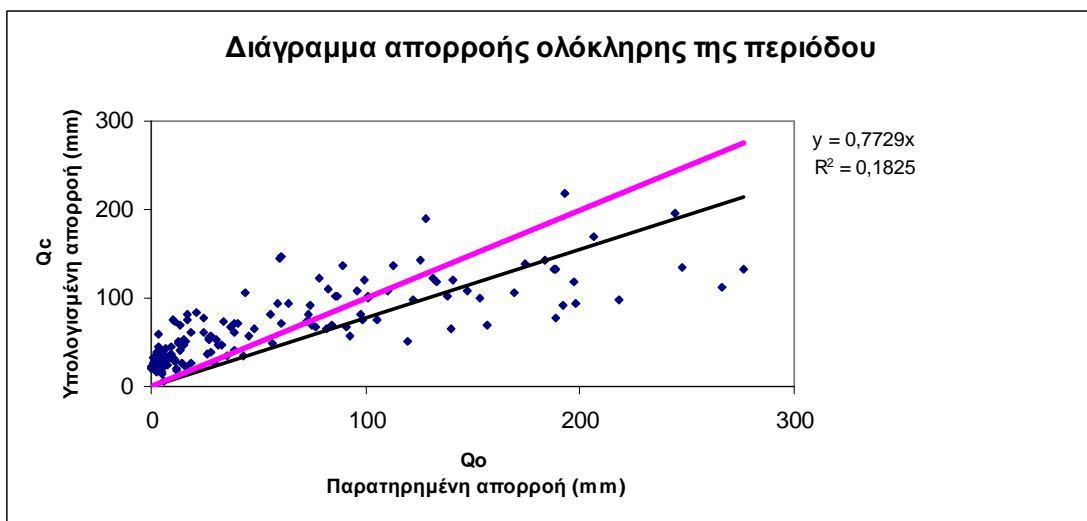
## 4. Xiong - Guo



4.α



4.β

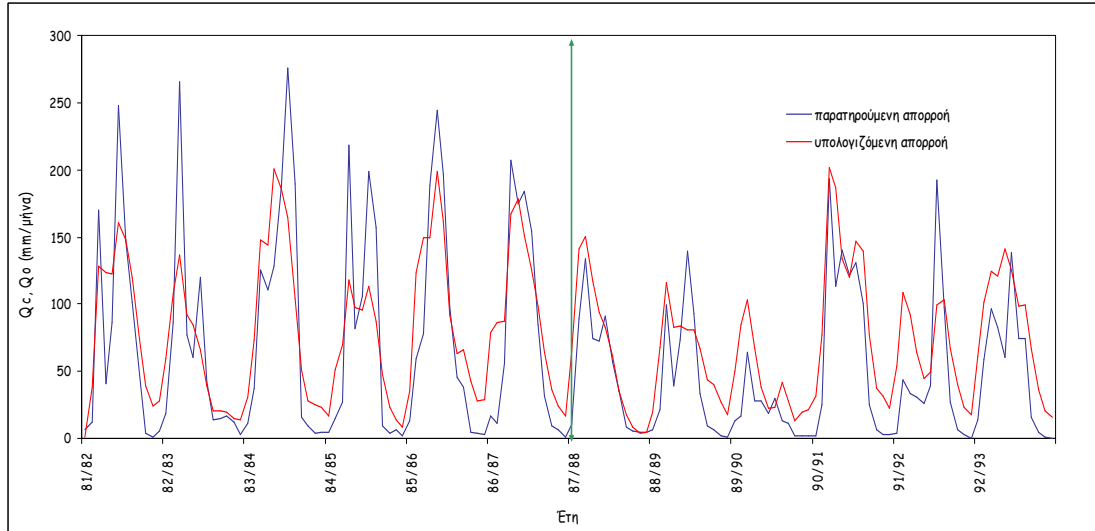


4.γ

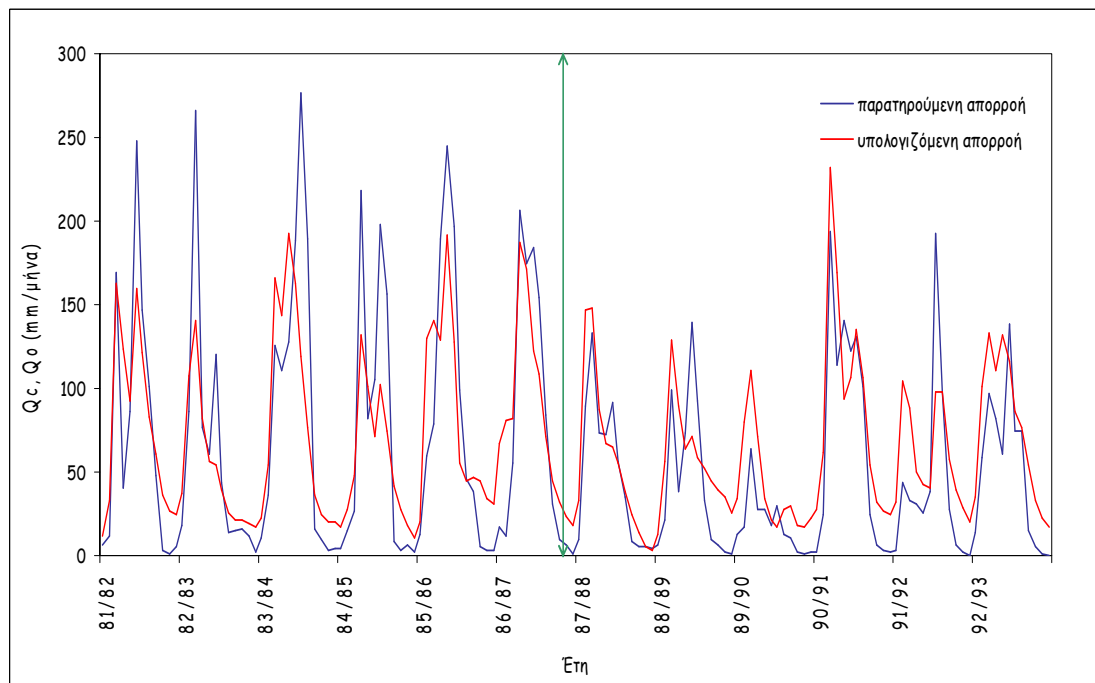
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2<sup>ο</sup>:**

Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για τη δεύτερη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση επίγειας θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες).

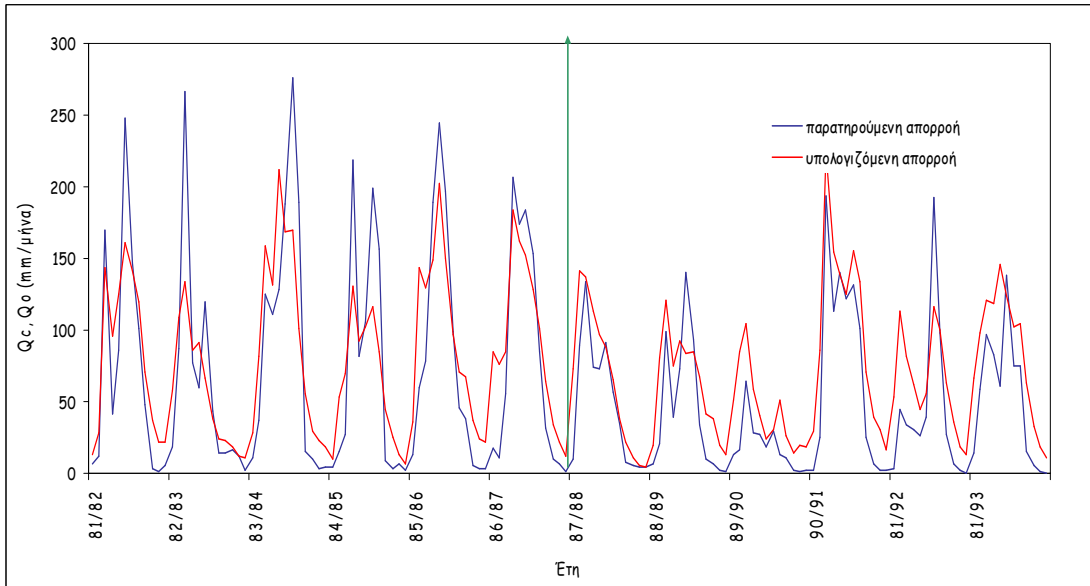
**2.A** Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για όλα τα μοντέλα. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίγεια θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Blaney – Criddle από δορυφορικές εικόνες, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.



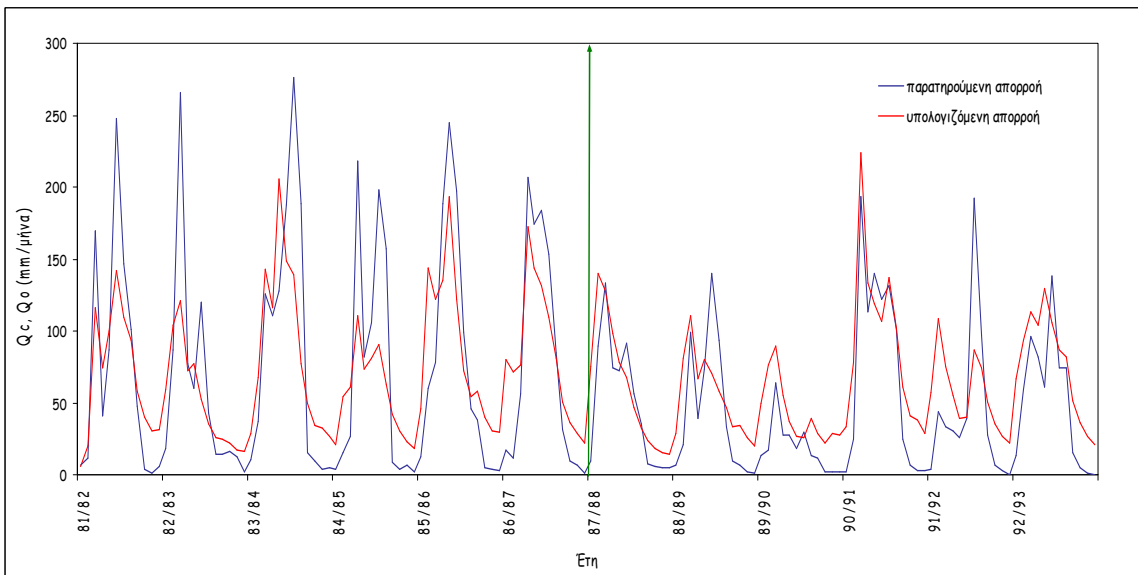
### 1. Abulohom model



### 2. Loukas model



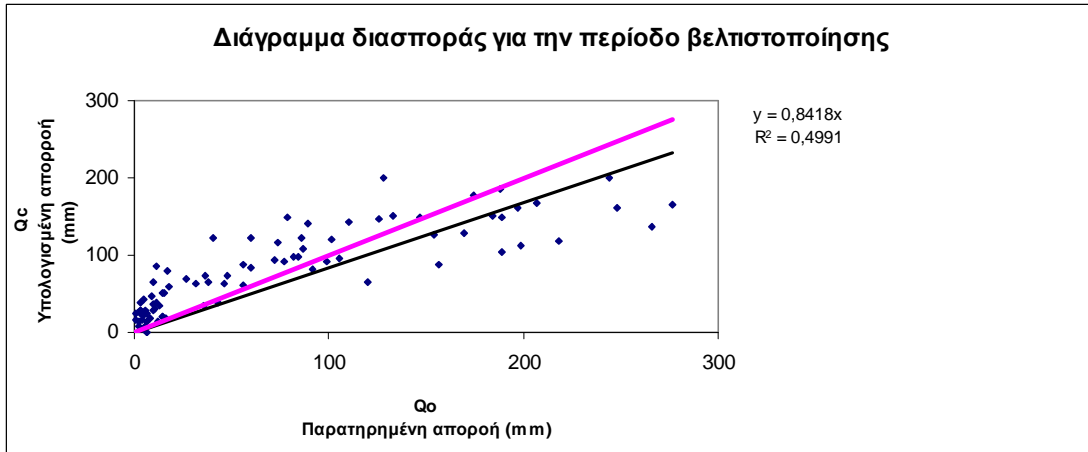
### 3.GR2M model



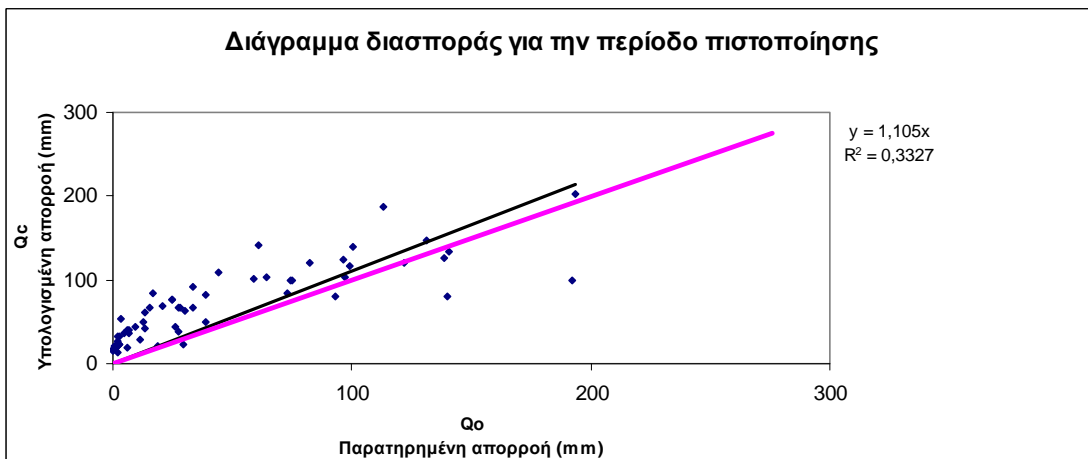
### 4. Xiong – Guo model

**2.B** Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα με χρήση επίγειας θερμοκρασίας και δορυφορικής εξατμισοδιαπνοής με την μέθοδο Blaney – Criddle για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.

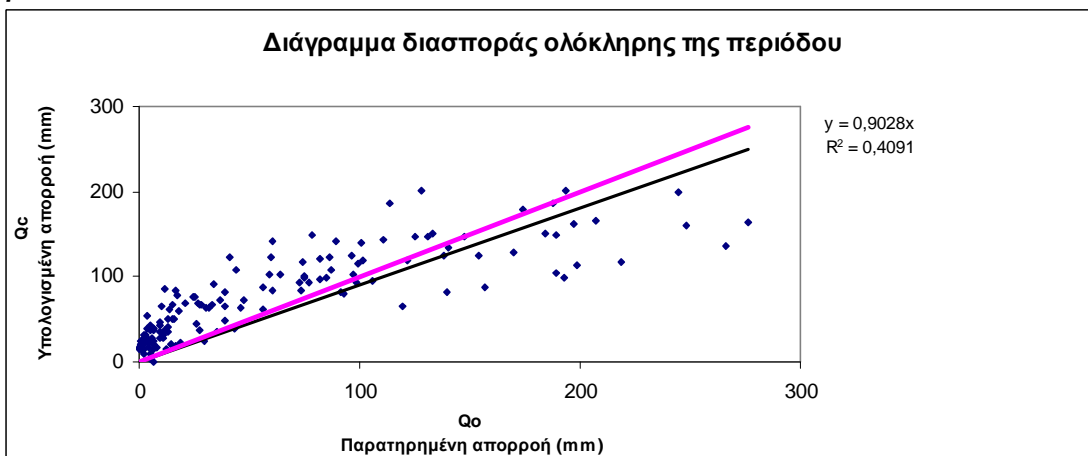
### 1. Abulohom model



1.α

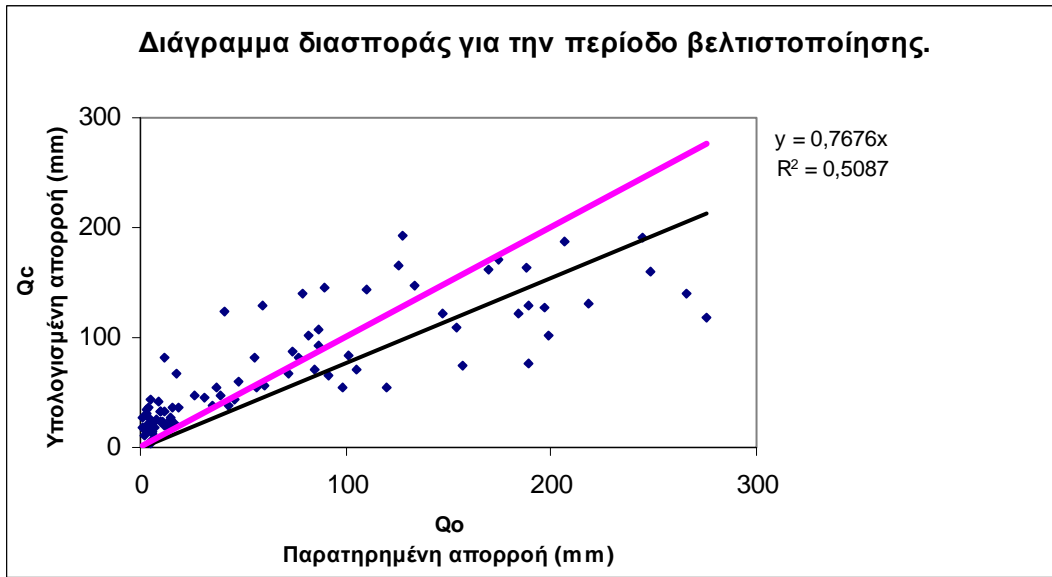


1.β

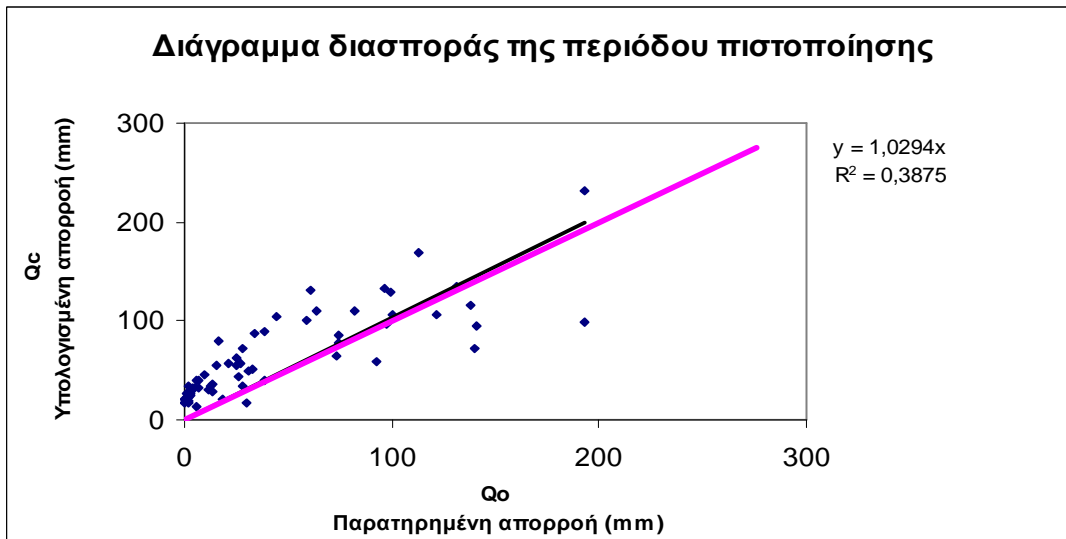


1.γ

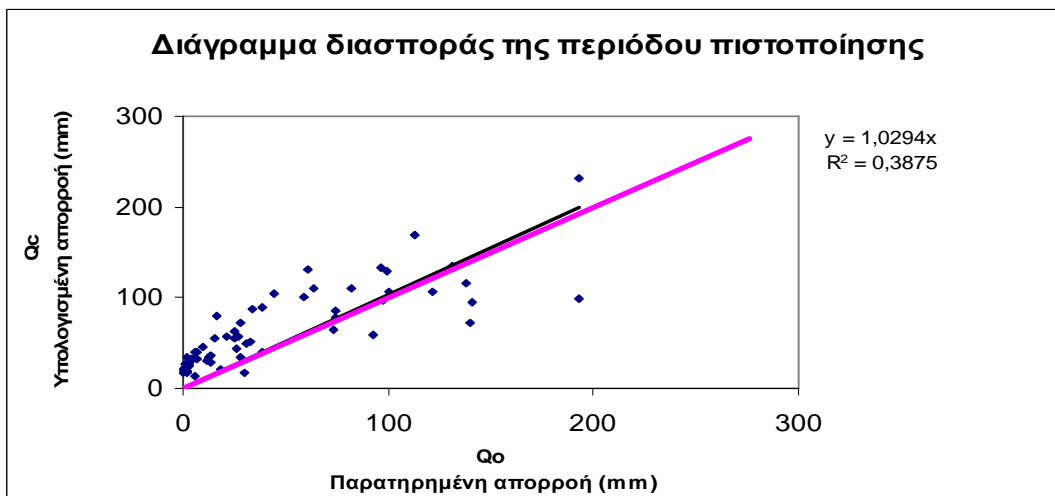
## 2. Loukas model



2.α



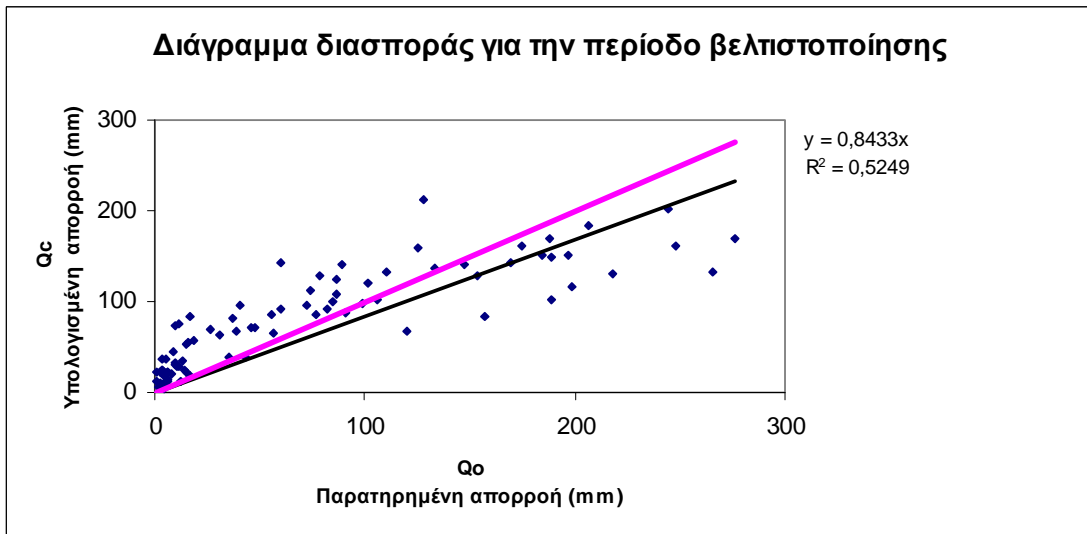
2.β



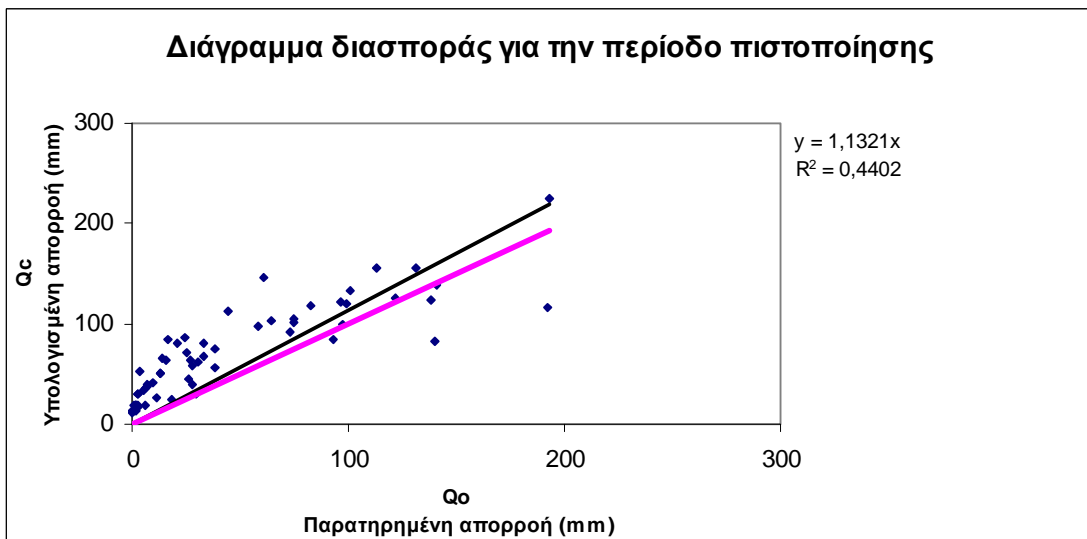
2.γ



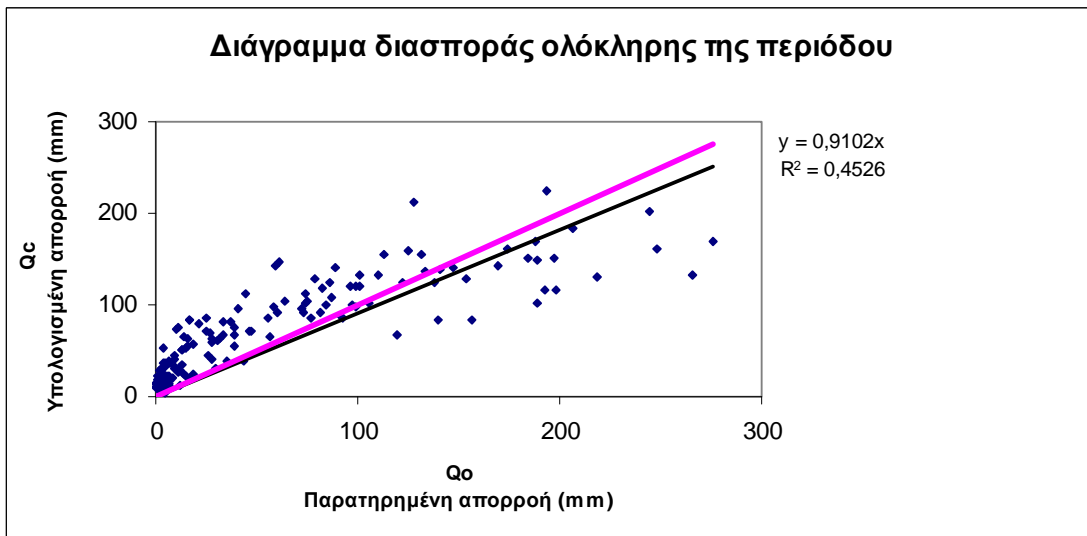
### 3. GR2M model



3.α

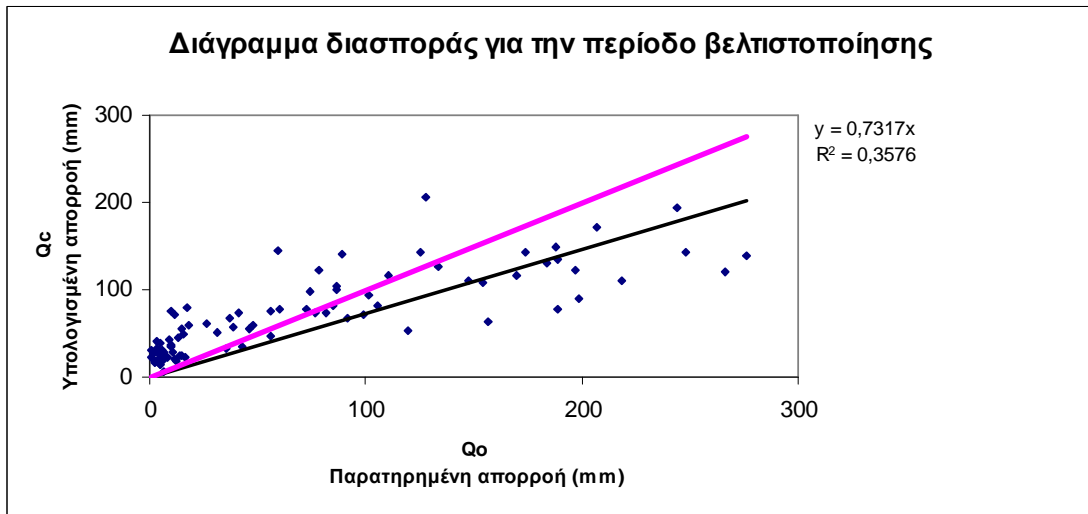


3.β

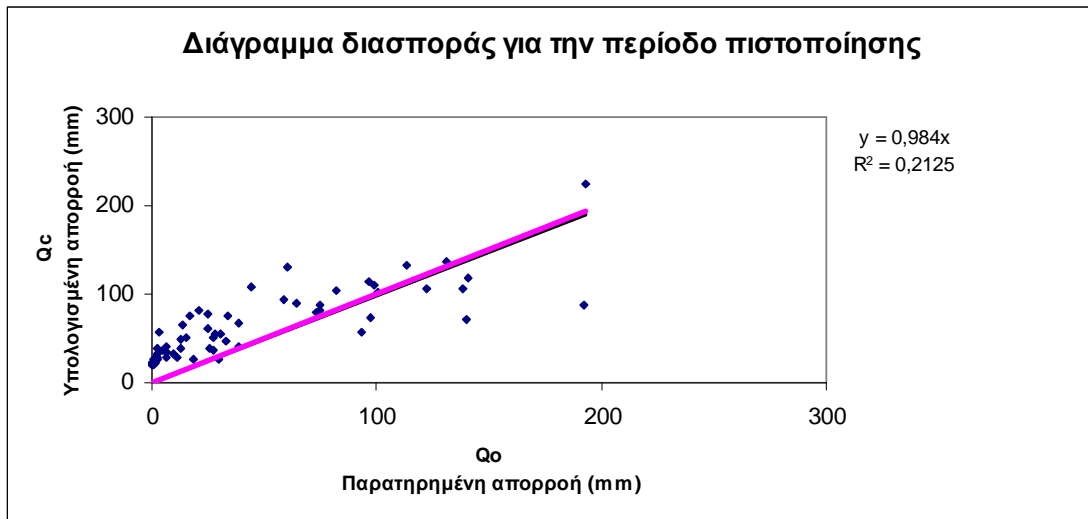


3.γ

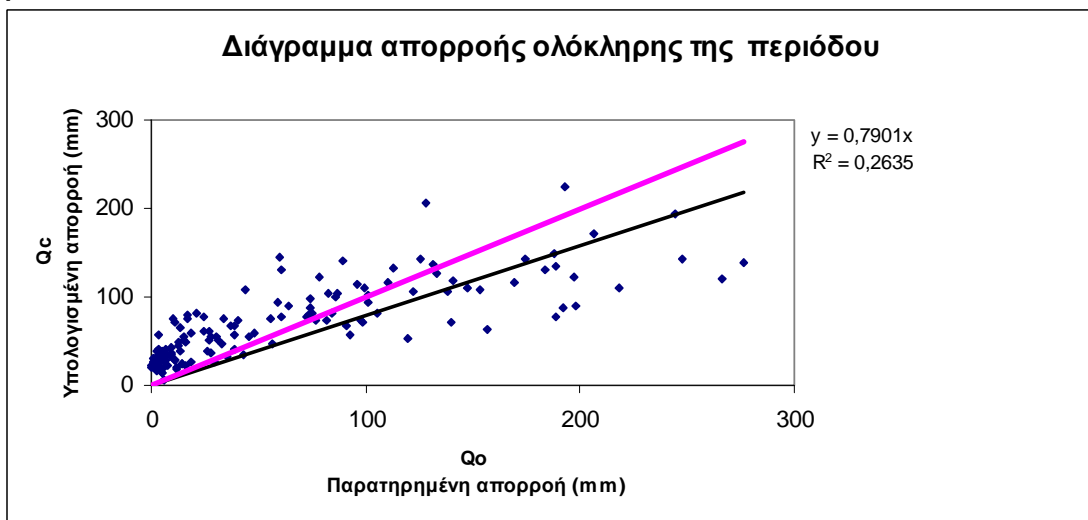
#### 4. Xiong – Guo model



4.α



4.β

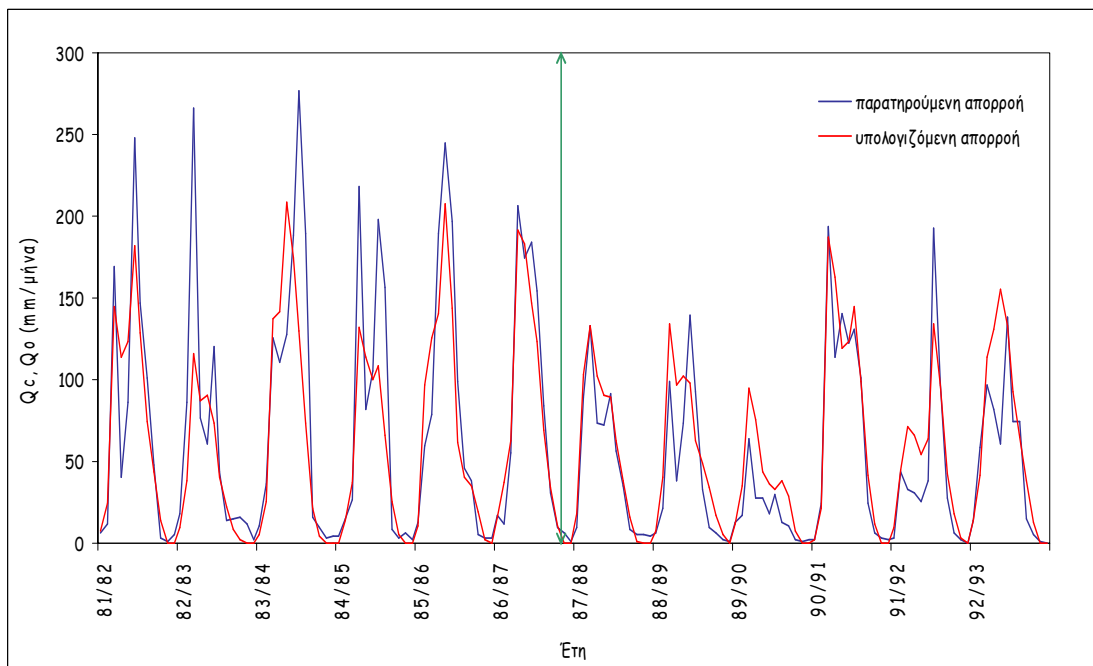
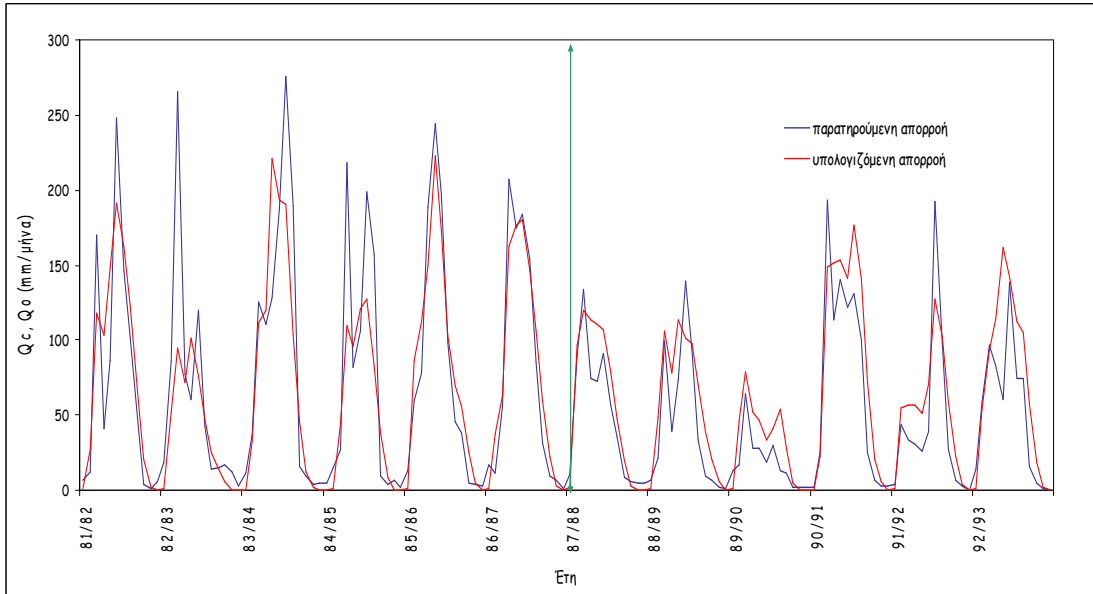


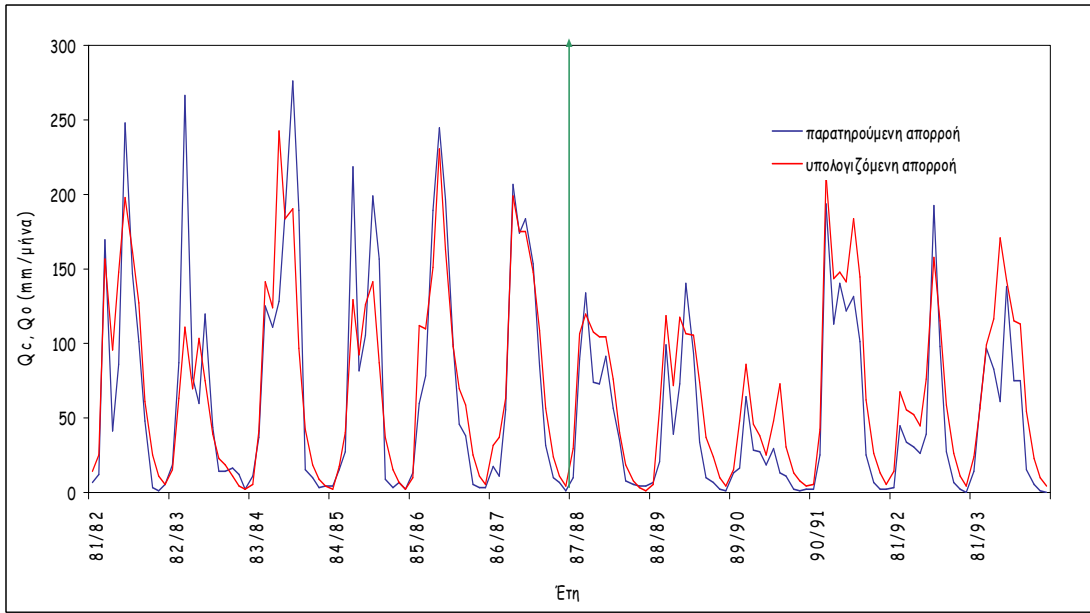
4.γ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3<sup>ο</sup>

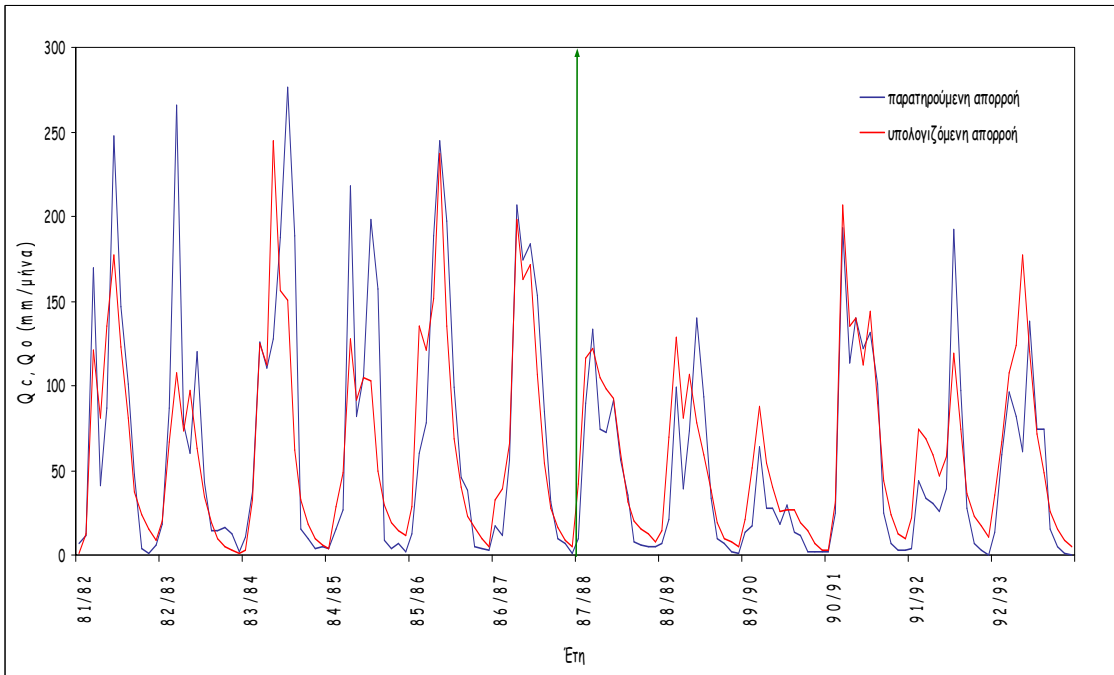
Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την τρίτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση θερμοκρασίας από δορυφόρο και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα).

**3.A** Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για όλα τα μοντέλα. Έχουν χρησιμοποιηθεί δορυφορική θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με την μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.





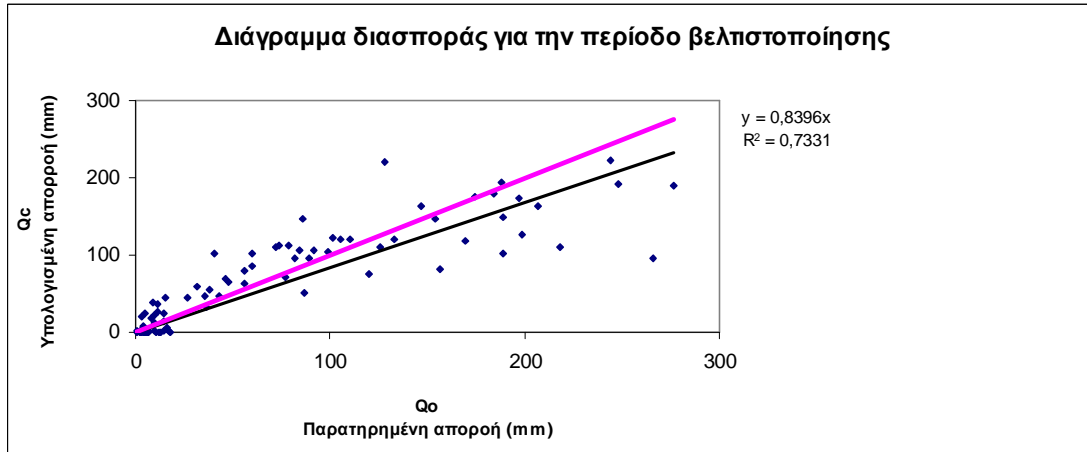
### 3. GR2M model



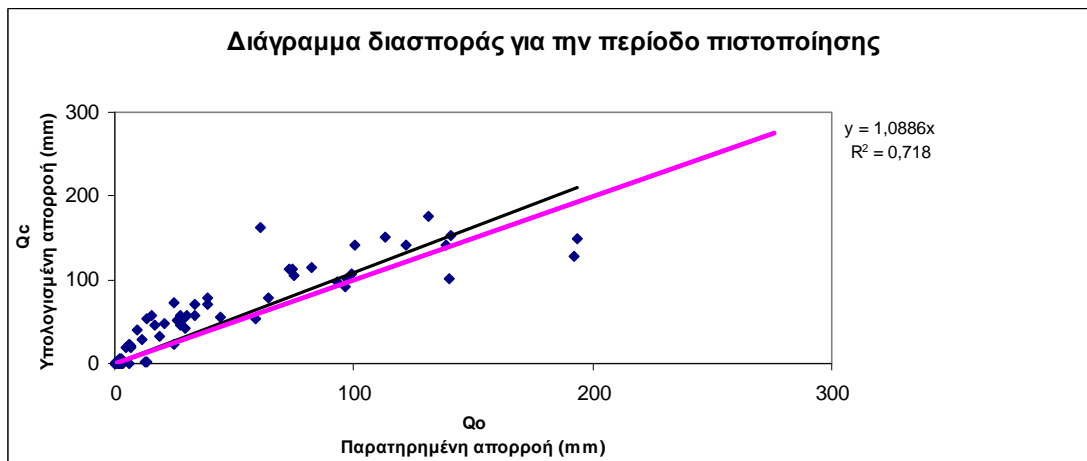
### 4. Xiong – Guo model

**3.B** Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα με χρήση δορυφορικής θερμοκρασίας και εξαμυσοδιαπνοής υπολογισμένης με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.

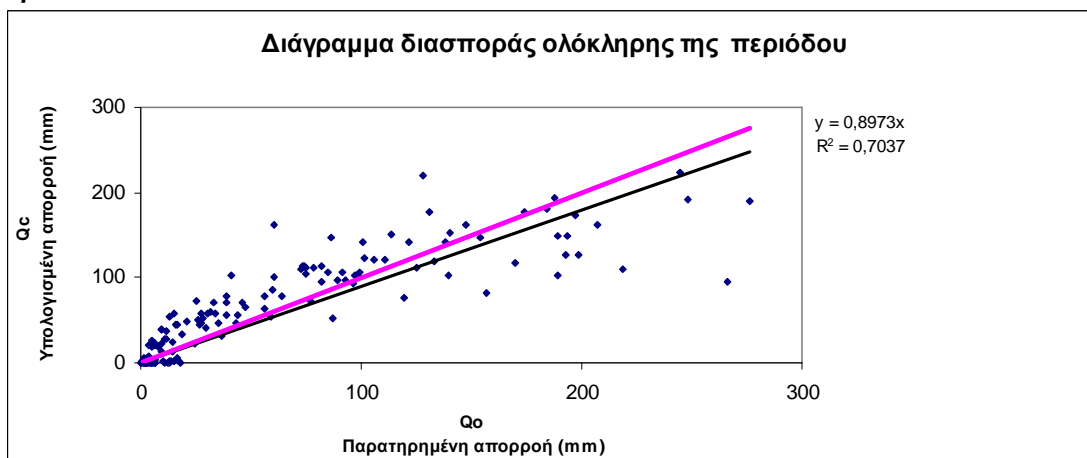
### 1. Abulohom model



1.α

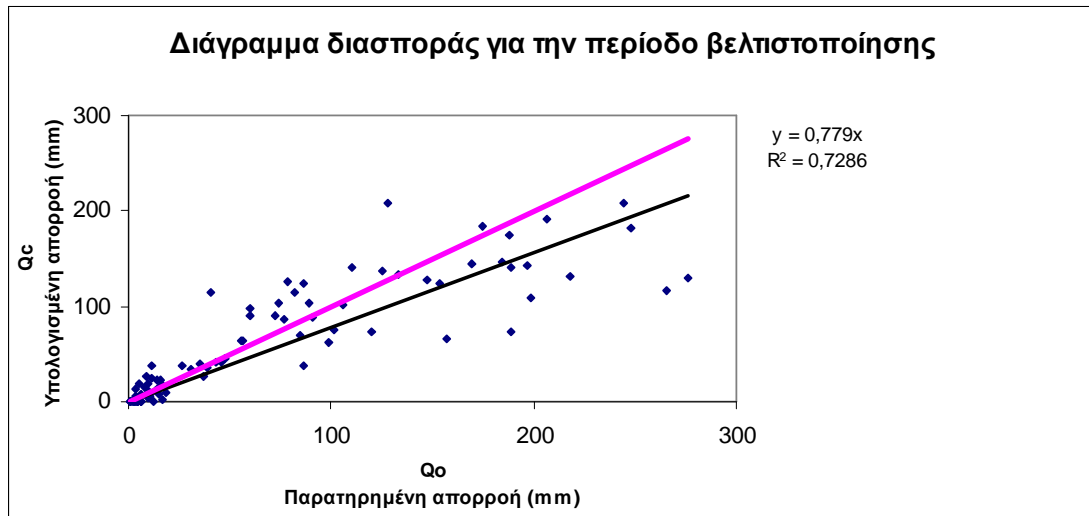


1.β

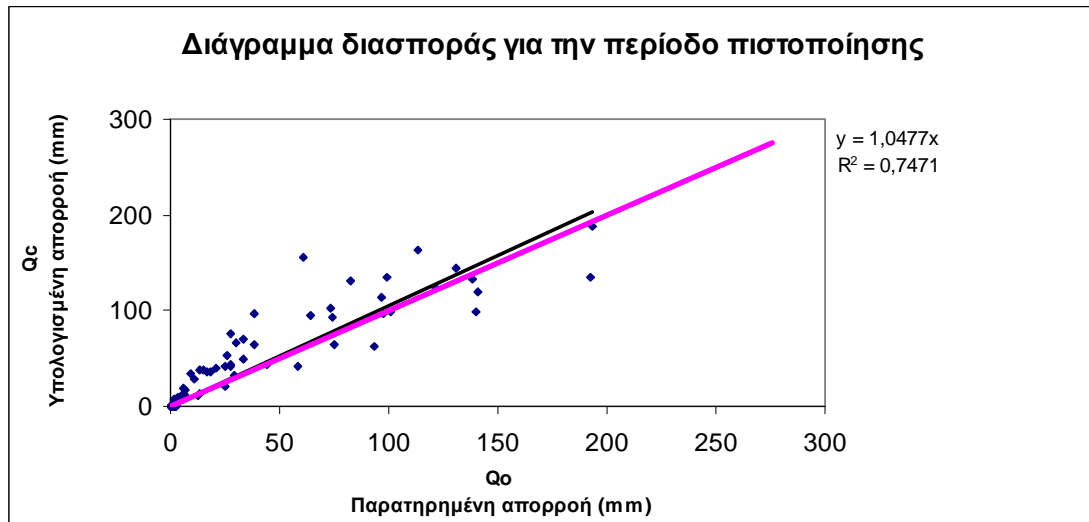


1.γ

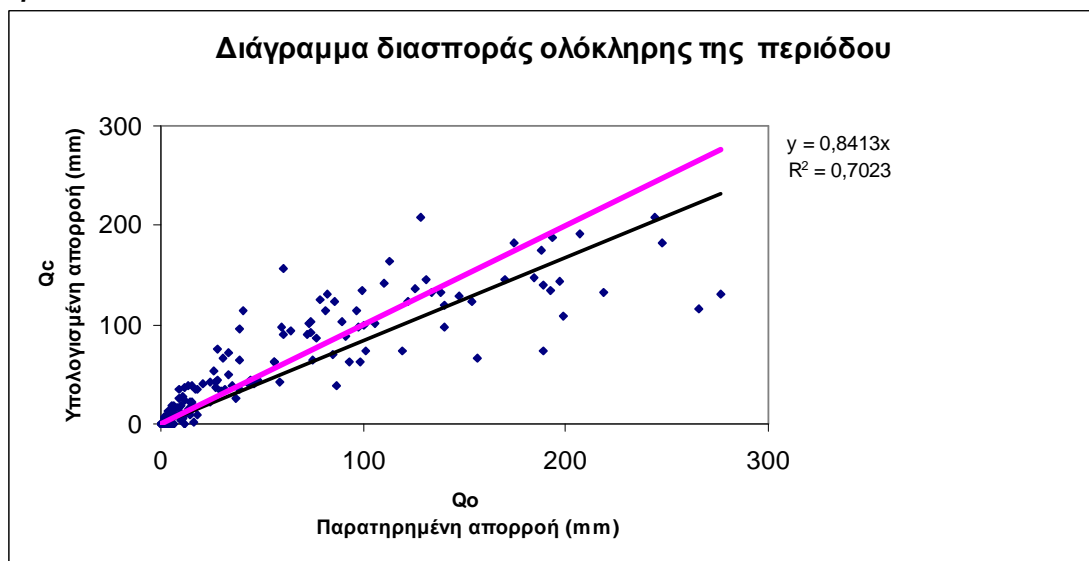
## 2. Loukas model



2.α

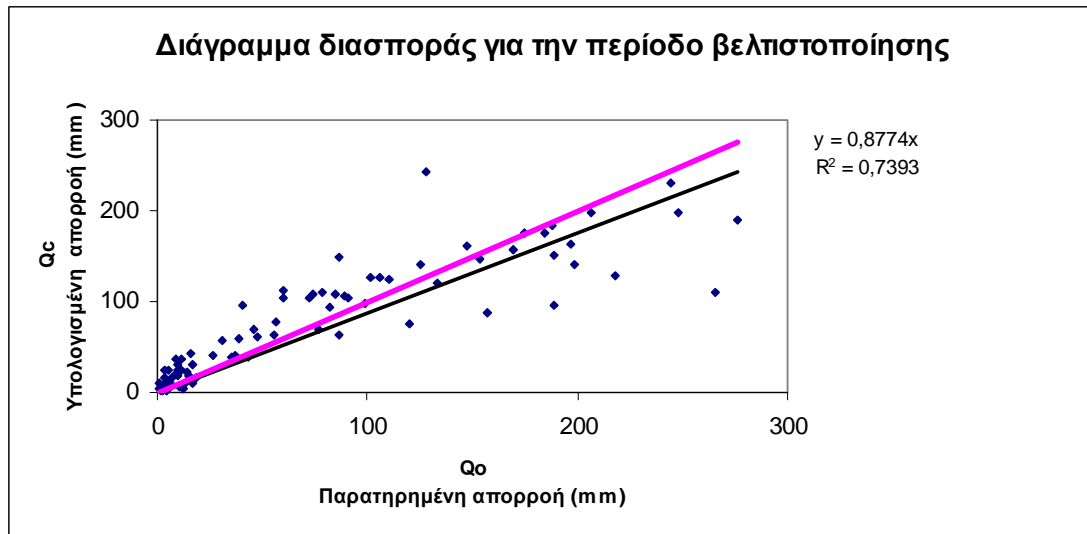


2.β

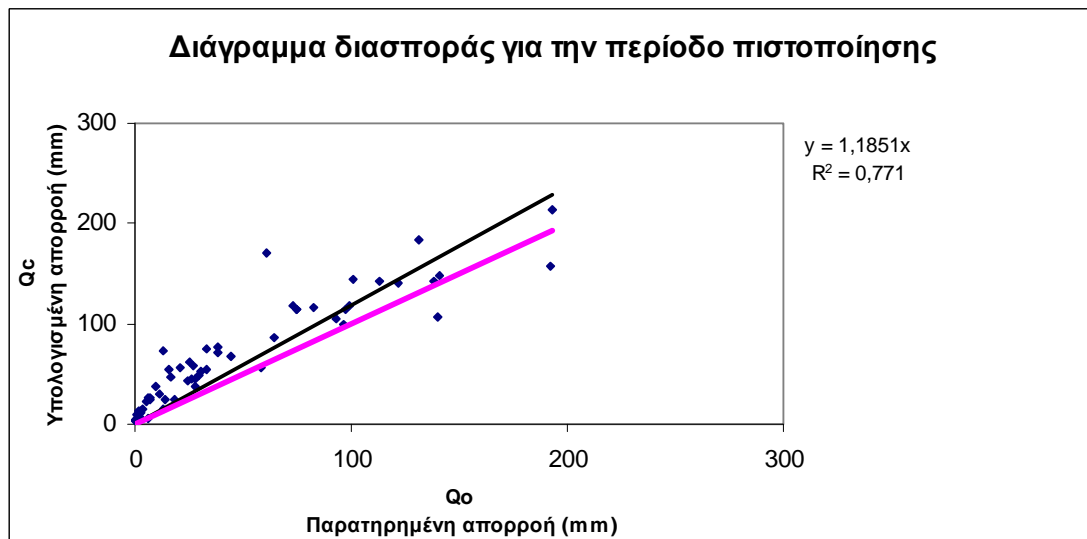


2.γ

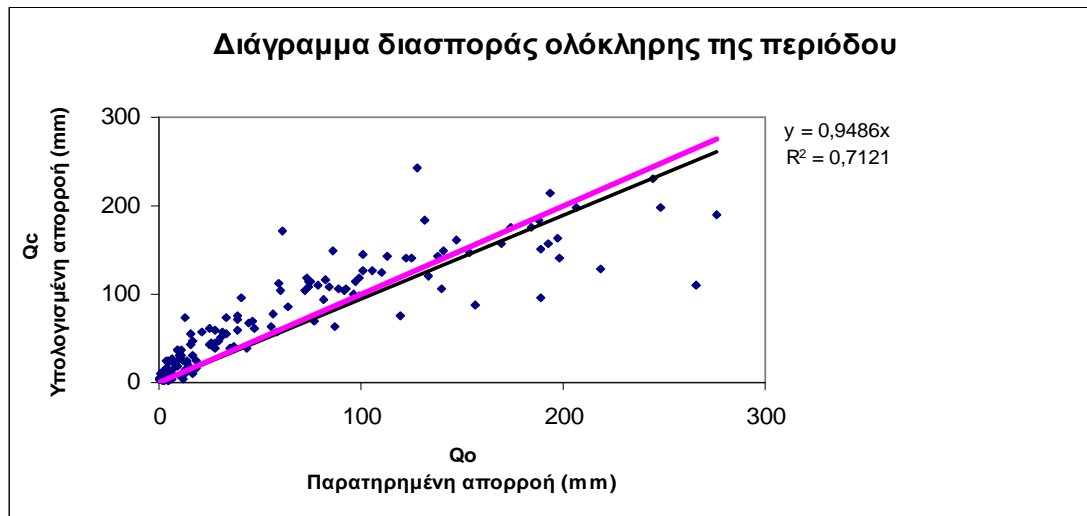
## 3. GR2M



## 3.α



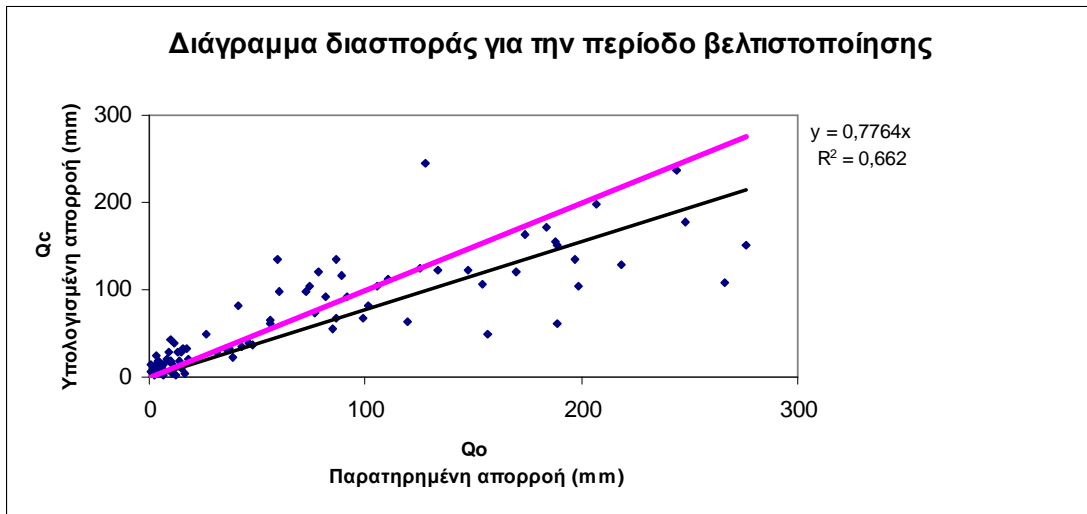
## 3.β



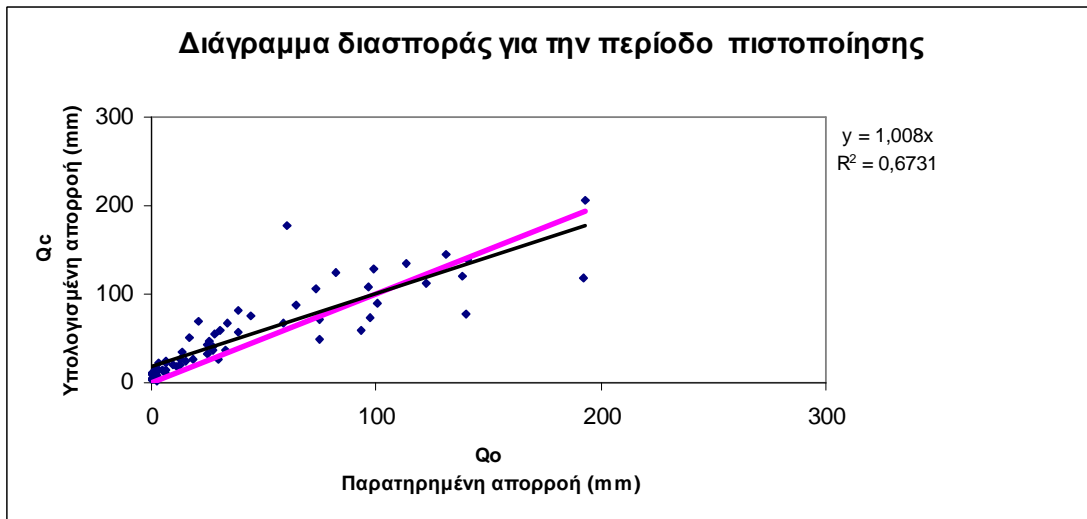
## 3.γ



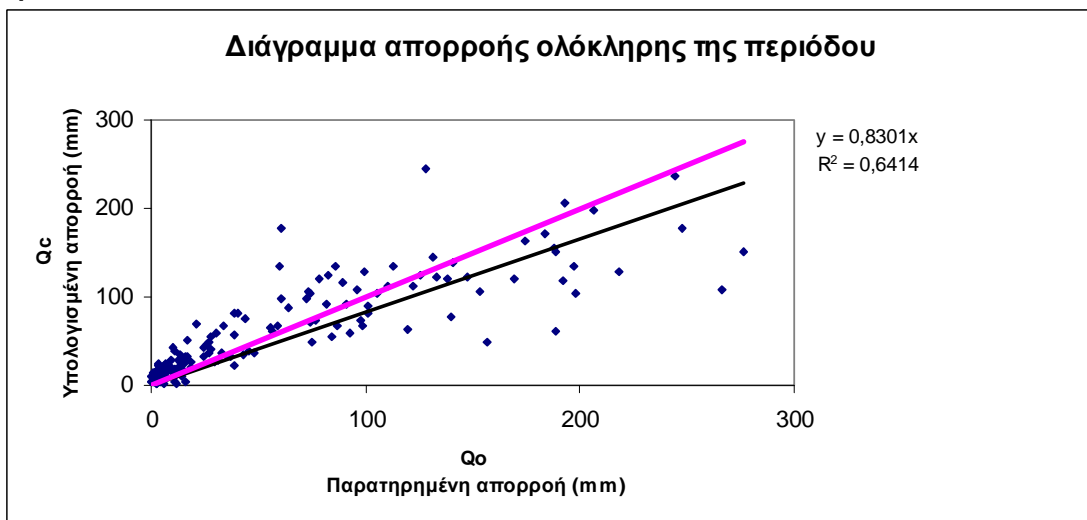
## 4. Xiong – Guo model



4.α



4.β

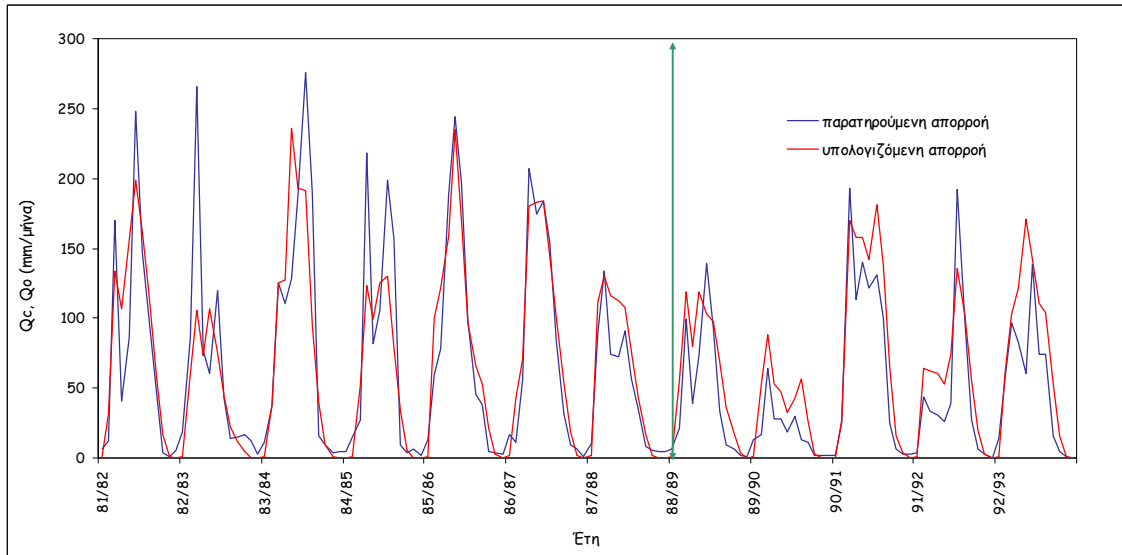


4.γ

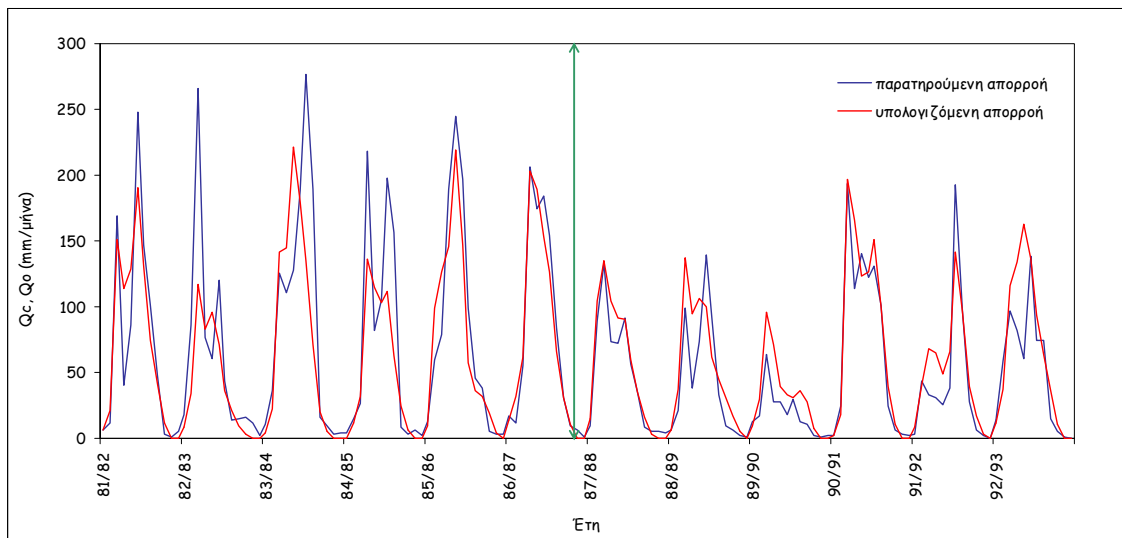
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4<sup>ο</sup>

Διαγράμματα σύγκρισης πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά, και διαγράμματα διασποράς πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής, για την τέταρτη προσέγγιση της μεθοδολογίας (Χρήση επίγειας θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα).

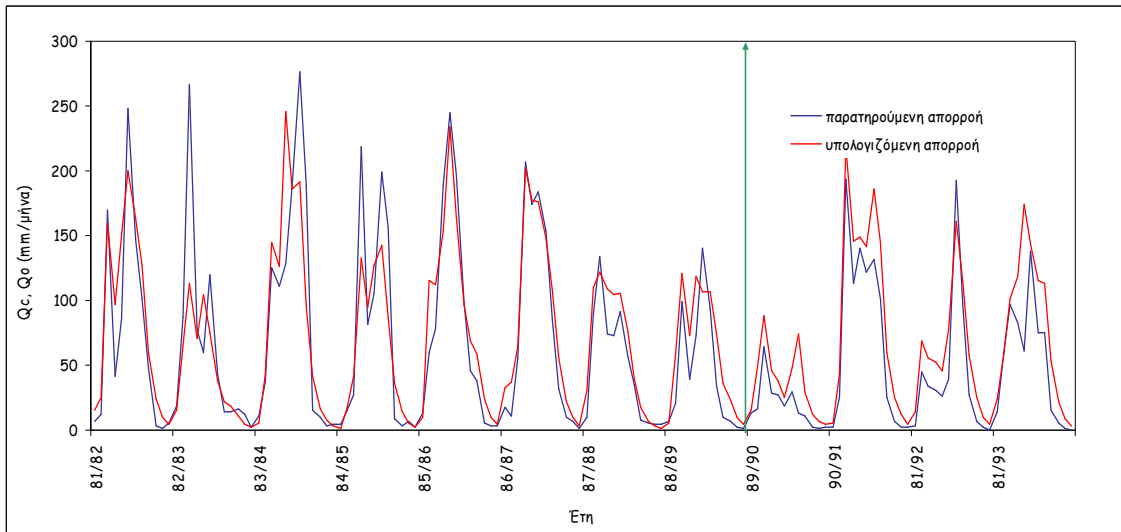
**4.A.** Διαγράμματα πραγματικής και προσομοιωμένης απορροής για όλα τα μοντέλα. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίγεια θερμοκρασία και εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.



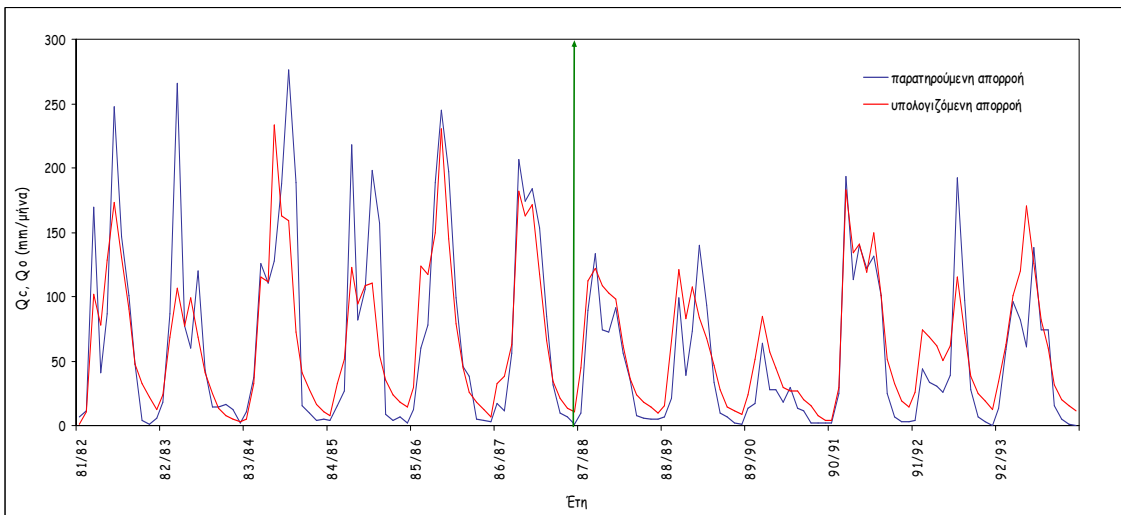
**1. Abulohom model**



**2. Loukas model**



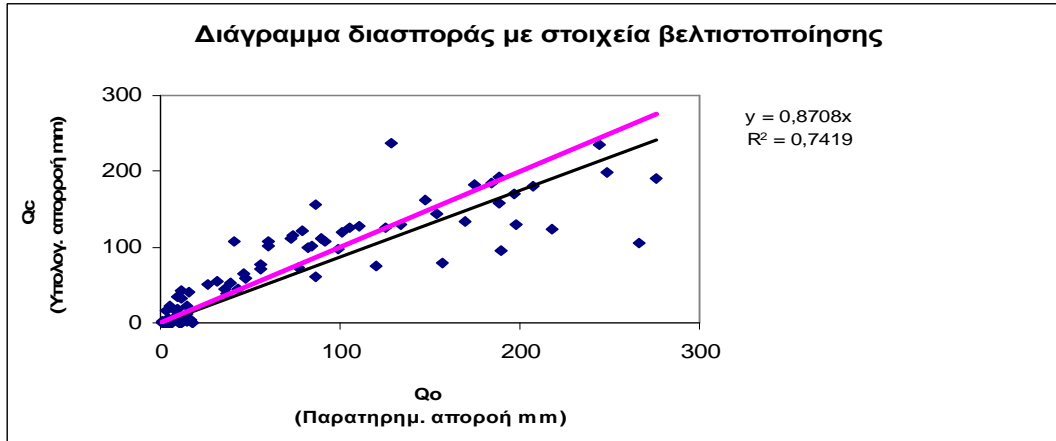
### 3. GR2M model



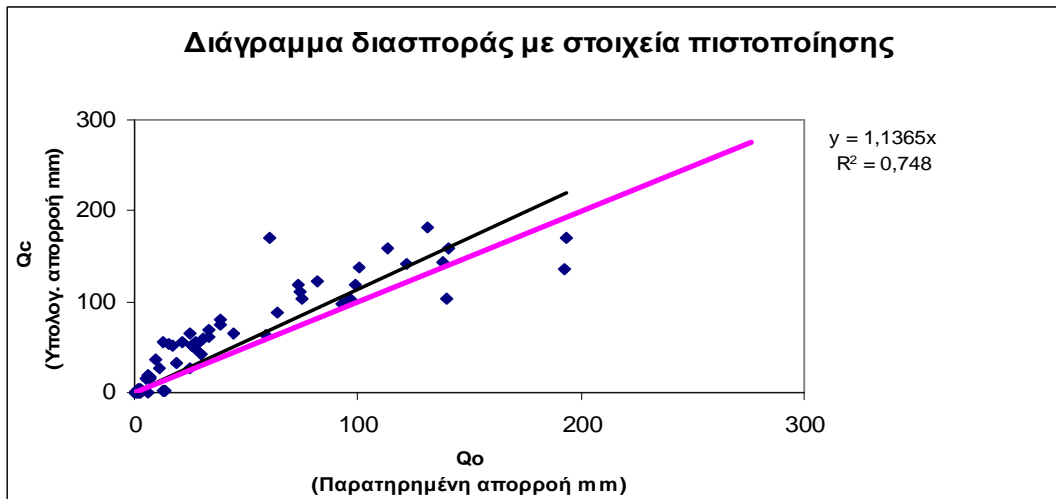
### 4. Xiong – Guo model

**4.B** Διαγράμματα διασποράς, για όλα τα μοντέλα με χρήση επίγειας θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής υπολογισμένη με τη μέθοδο Thornthwaite από επίγεια δεδομένα, για το χρονικό διάστημα Οκτ. 1981 έως το Σεπτ. 1993, για την λεκάνη απορροής Μουζάκι Θεσσαλίας.

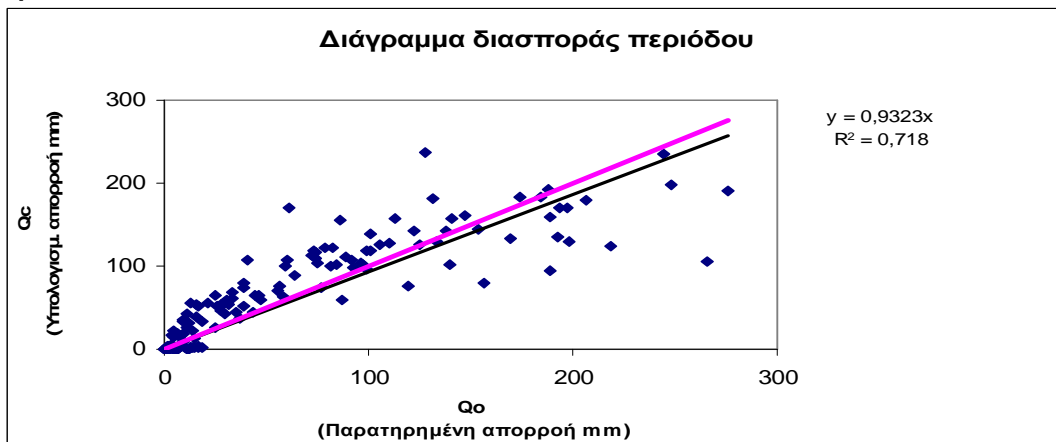
### 1. Abulohom model



1.α

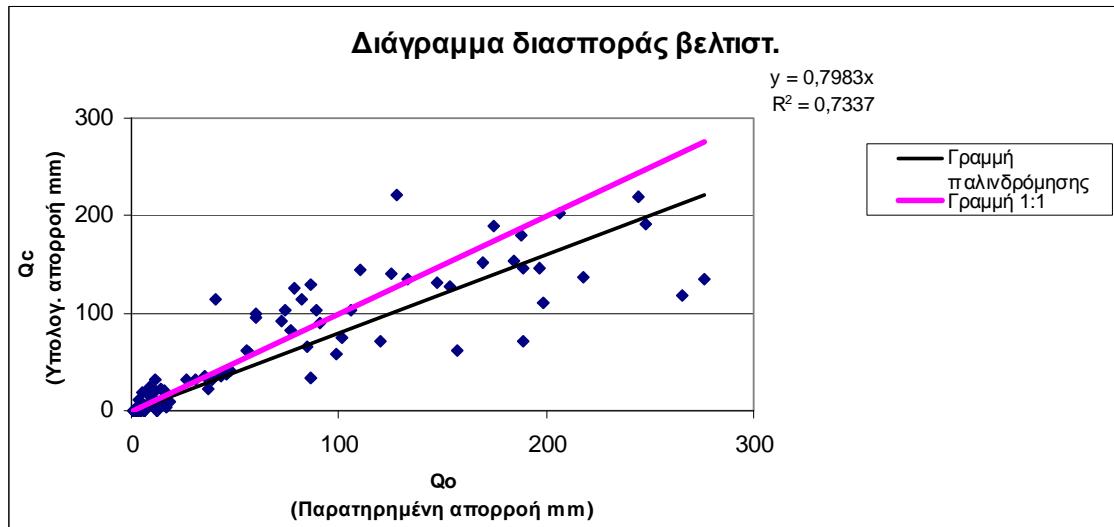


1.β

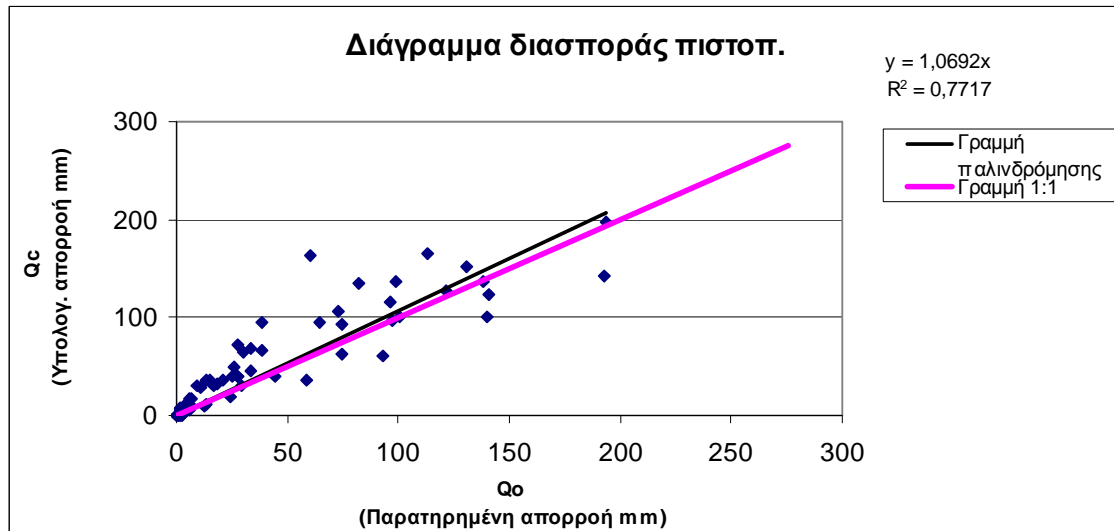


1.γ

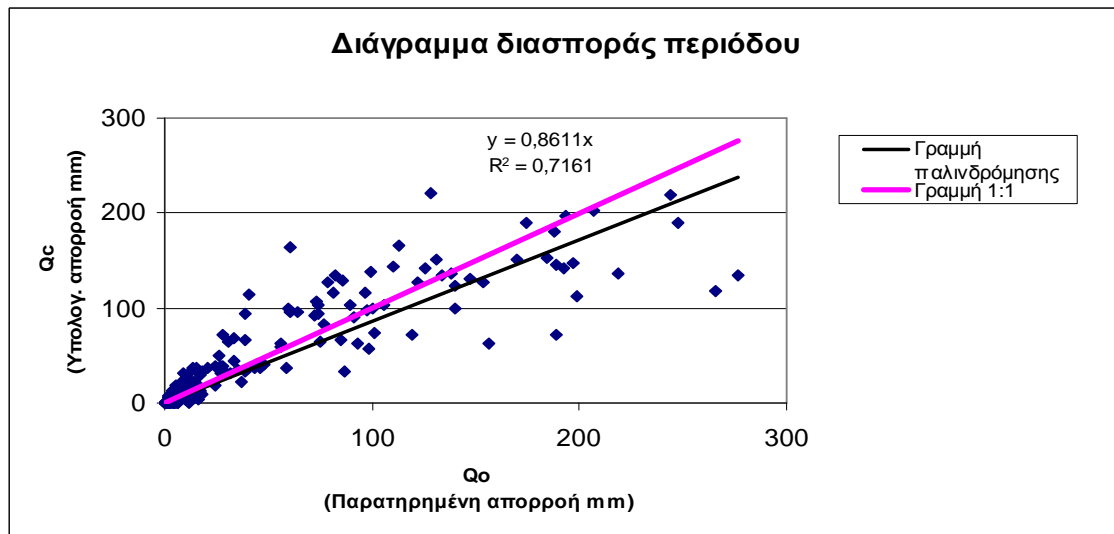
## 2. Loukas model



2.α

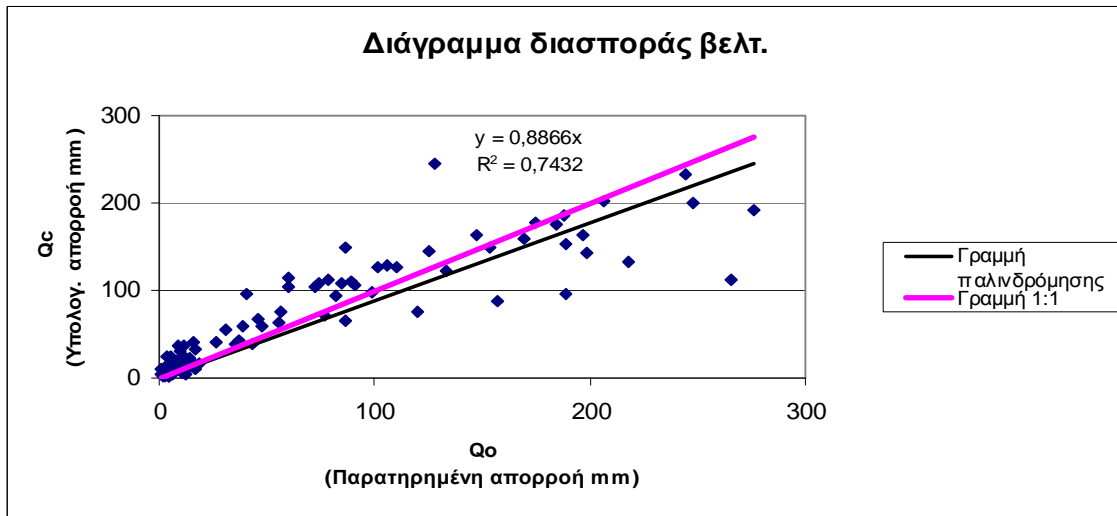


2.β

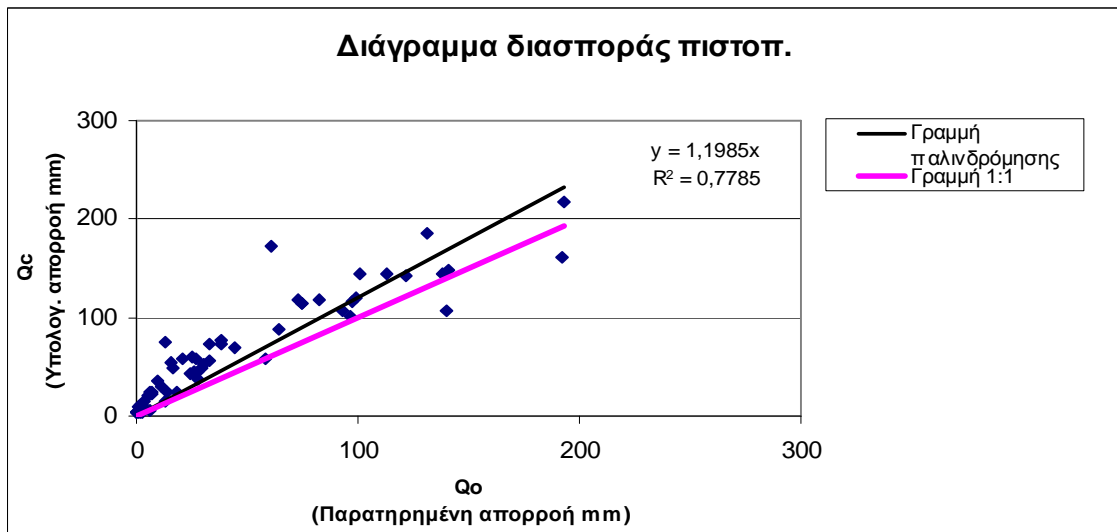


2.γ

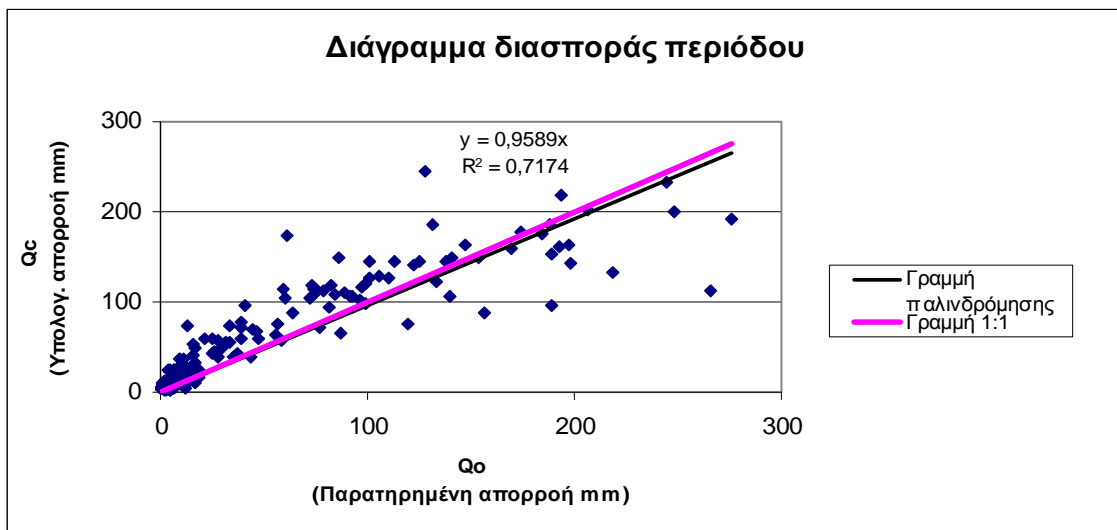
## 3. GR2M model



3.α

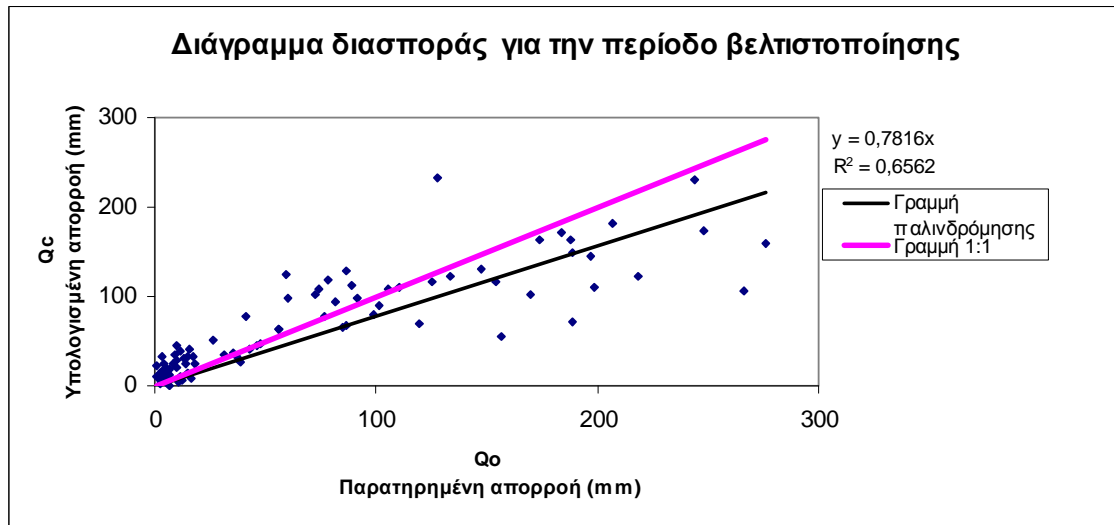


3.β

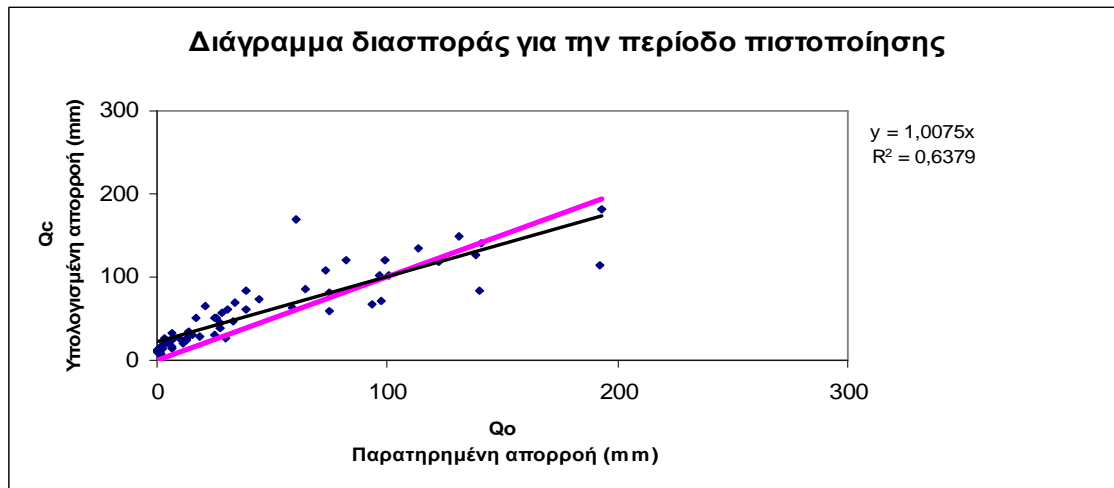


3.γ

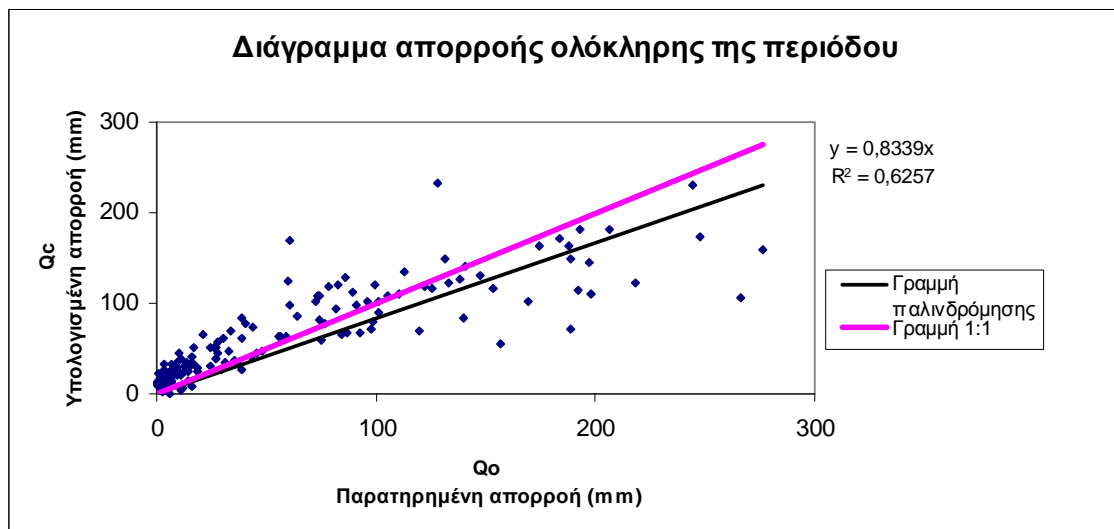
## 4. Xiong – Guo model



4.α



4.β



4.γ