



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ | ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ R-PROJECT: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ  
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΡΤΑΙΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ**

**ΜΑΣΤΡΑΦΤΣΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**Επιβλέπων:**

**Επικ. Καθηγητής Λάμπρος Βασιλειάδης**

**ΒΟΛΟΣ**

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023**

© 2022 Ιωάννης Μαστραφτσής

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING | DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF HYDRAULIC AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**DIPLOMA THESIS**

**MONTHLY HYDROLOGICAL MODELLING USING THE R-PROJECT  
PROGRAMMING LANGUAGE: APPLICATION TO PORTAIKOS RIVER  
BASIN**

**Ioannis Mastrafsis**

**Supervisor:**

**Assistant Professor Lampros Vasiliades**



## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Λάμπρο Βασιλειάδη τόσο για την ακούραστη αφοσίωση και αγάπη για το αντικείμενο του υδραυλικού πολιτικού μηχανικού όσο και για το γεγονός ότι κάθε στιγμή της πορείας μου στη διπλωματική εργασία ήταν δίπλα μου να λύσει και τον παραμικρό ενδοιασμό και απορία. Με ευγενή καρδιά και διάθεση, αποτέλεσε πηγή έμπνευσης και αφύπνισης της ανάγκης για επιπλέον μάθηση.

Ακόμη, σημαντικό ρόλο στην πορεία των προπτυχιακών μου σπουδών, έπαιξαν και αυτοί με τη σειρά τους, οι καθηγητές Δρα. Βασιλική Κατσαρδή και Δρ. Νικήτας Μυλόπουλος, οι οποίοι αποτελούν και μέλη της εξεταστικής επιτροπής. Υπήρξαν αρωγοί στην εξέλιξη του επιστημονικού ενδιαφέροντος και της αγάπης για το αντικείμενο αυτό του υδραυλικού μηχανικού.

Τέλος, από καρδιάς θα ήθελα να εκφράσω το σεβασμό και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, τον αδερφό μου καθώς και τους φίλους μου για την καθημερινή στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ιωάννης Μαστραφτής

# ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ R-PROJECT: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΡΤΑΙΚΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

Ιωάννης Μαστραφτσής

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής: Λάμπρος Βασιλειάδης

## Περίληψη

Η ακριβής υδρολογική προσομοίωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην έρευνα υδρολογικών προβλημάτων. Ωστόσο, οι μορφές αβεβαιότητας έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια του μοντέλου. Οι ανακρίβειες των δεδομένων εισόδου και οι ανακρίβειες των δεδομένων βαθμονόμησης, μαζί με τις παραμέτρους του μοντέλου και τα σφάλματα στη δομή του μαθηματικού μοντέλου, είναι οι κύριες αιτίες της επιστημικής αβεβαιότητας. Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται όλα αυτά τα είδη αβεβαιότητας. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων της ροής των υδατορευμάτων, χρησιμοποιώντας δύο μηνιαία υδρολογικά μοντέλα (UTHBAL model (Loukas et al., 2007) και το GR2M (Mouelhi et al., 2006)) στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πύλης ή Πορταϊκού, με τη βοήθεια της γλώσσας στατιστικού υπολογιστικού περιβάλλοντος R. Η βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων του μοντέλου και η επικύρωση της προσομοίωσης πραγματοποιούνται σύμφωνα με τη μέθοδο δοκιμής με διαχωρισμένο δείγμα. Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρήση δύο μεθόδων βελτιστοποίησης, με ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο σμήνους σωματιδίων (PSO), ενώ τα μοντέλα αξιολογούνται επίσης με τη χρήση τεσσάρων αντικειμενικών συναρτήσεων. Στη διατριβή ενσωματώνονται επίσης η ανάλυση ευαισθησίας και τα φιλικά προς το χρήστη διαγράμματα αξιολόγησης που παρέχονται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να καταστεί δυνατή η αυτοματοποίηση της εργασίας σε οποιαδήποτε υδρολογική λεκάνη με επαρκή υδρολογικά δεδομένα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Υδρολογική προσομοίωση, τύποι αβεβαιότητας, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, αντικειμενικές συναρτήσεις, βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.

# MONTHLY HYDROLOGICAL MODELLING USING THE R-PROJECT PROGRAMMING LANGUAGE: APPLICATION TO PORTAIKOS RIVER BASIN

Ioannis Mastrafsis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering

## Abstract

Accurate hydrological simulation plays an important role in hydrological problem research. However, forms of uncertainty have a significant impact on the accuracy of the model. Input data inaccuracies and calibration data inaccuracies, along with model parameters and mathematical model structure errors, are the main causes of epistemic uncertainty. In this thesis, all these types of uncertainty are examined. This study aims to evaluate uncertainties in streamflow, using two monthly hydrological models (UTHBAL model (Loukas et al., 2007) and the GR2M (Mouelhi et al., 2006)) in the catchment area of the river Pili or Portaikos, with the help of the R statistical computing environment language. The calibration of all model parameters and validation of the simulation is performed according to the split sample test method. The model calibration is performed using two optimization methods, with particular emphasis on the particle swarm method (PSO), while the models are also evaluated using four objective functions. Sensitivity analysis and user-friendly evaluation plots provided for interpretation of results are also incorporated in the thesis. The aim of this study is to enable automation of the work in any watershed with sufficient hydrological data.

**Keywords:** *Hydrological simulation, types of uncertainty, calibration algorithms, objective functions, particle swarm optimization.*

## Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενικά .....	1
1.2	Ανάλυση αβεβαιότητας .....	1
1.2.1	Αβεβαιότητα παραμέτρων (Parameter uncertainty).....	2
1.2.2	Δομική αβεβαιότητα (Structural Uncertainty).....	3
1.2.3	Αβεβαιότητα δεδομένων εισόδου (Input Uncertainty).....	4
1.2.4	Αβεβαιότητα πρόβλεψης (Predictive uncertainty).....	5
1.3	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων (Sensitivity analysis) .....	6
1.3.1	Προσδιορισμός των πιο σημαντικών αβέβαιων παραμέτρων .....	7
1.3.2	Απλούστευση του μοντέλου και προσδιορισμός των μη επιδραστικών παραμέτρων..	7
1.3.3	Ταξινόμηση των μεθόδων δειγματοληψίας, προσεγγίσεις SA.....	7
1.4	Μεθοδολογία .....	9
2	Περιοχή μελέτης και Γεωγραφικές Βάσεις Δεδομένων.....	11
2.1	Γενικά χαρακτηριστικά.....	11
2.2	Γεωλογικός – Υδρολιθολογικός Χάρτης κατά Corine 2018.....	11
2.3	Χάρτης Χρήσεων – Καλύψεων Γης κατά Corine 2018 .....	12
2.4	Χάρτης κλίσεων .....	14
2.5	Χαρακτηριστικά Υδρολογικής λεκάνης.....	14
2.6	Διαθέσιμα δεδομένα και τελική επεξεργασία.....	15
2.6.1	Μετεωρολογικοί Σταθμοί .....	15
2.6.2	Δεδομένα Εισόδου .....	17
2.7	Γραφική απεικόνιση δεδομένων εισόδου .....	22
3	Υδρολογική Προσομοίωση.....	25
3.1	Γενικά .....	25
3.2	Βαθμονόμηση μοντέλων.....	26
3.3	Περιγραφή μοντέλου GR2M.....	26
3.4	Περιγραφή μοντέλου UTHBAL.....	30
4	Προετοιμασία και βελτιστοποίηση Μοντέλων.....	35
4.1	Εισαγωγή.....	35
4.2	Ρύθμιση Μοντέλου GR2M .....	36
4.3	Ρύθμιση Μοντέλου UTHBAL .....	36
4.4	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....	37
4.5	Βαθμονόμηση Μοντέλων (Calibration process) .....	38



4.5.1	Θεωρία .....	38
4.5.2	Διαδικασία ροής.....	39
4.5.3	Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης Michel.....	40
4.5.4	Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης με Σμήνος σωματιδίων .....	41
4.6	Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	50
5	Αξιολόγηση απόδοσης.....	53
5.1	Επικύρωση (Validation).....	53
5.2	Στατιστικά Μεγέθη.....	53
6	Αποτελέσματα.....	59
6.1	Εκτίμηση δεδομένων εισόδου .....	59
6.2	Διαδικασία .....	62
6.3	Βασική Ανάλυση των αποτελεσμάτων .....	63
6.4	Απεικόνιση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης .....	66
6.5	Ανάλυση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης .....	75
6.5.1	Σταθμισμένα όρια αβεβαιότητας των τιμών των παραμέτρων .....	76
6.5.2	P-factor and R-factor .....	76
6.5.3	95% Αβεβαιότητα Πρόβλεψης.....	77
6.5.4	Αβεβαιότητα στην καμπύλη διάρκειας ροής.....	77
6.6	Ανάλυση επαλήθευσης.....	79
6.7	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας εισόδου.....	80
6.8	Αποτελέσματα ανάλυσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης .....	82
7	Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι.....	87
7.1	Συμπεράσματα.....	87
7.2	Μελλοντικές Προτάσεις.....	88
8	Βιβλιογραφία .....	89

## Περιεχόμενα Εικόνων

<b>Εικόνα 1.1</b> Διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας υδρολογικών μοντέλων.....	3
<b>Εικόνα 2.1</b> Γεωλογικός Χάρτης κατά Corine 2018.....	11
<b>Εικόνα 2.2</b> Υδρολιθολογικός Χάρτης κατά Corine 2018.....	12
<b>Εικόνα 2.3</b> Χάρτης χρήσεων-καλύψεων γης κατά Corine 2018 .....	13
<b>Εικόνα 2.4</b> Χάρτης κλίσεων.....	14
<b>Εικόνα 2.5</b> Λεκάνη απορροής Πορταϊκού .....	15
<b>Εικόνα 2.6</b> Μετεωρολογικοί σταθμοί και Βροχομετρικοί Σταθμοί ευρύτερης περιοχής μελέτης ....	16
<b>Εικόνα 2.7</b> Πολύγωνα Thiessen .....	18
<b>Εικόνα 2.8</b> Υπολογισμός βροχοβαθμίδας.....	19
<b>Εικόνα 2.9</b> Υπολογισμός Θερμοβαθμίδας.....	20
<b>Εικόνα 2.10</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα βροχόπτωσης για τη περίοδο 1960-1993.....	22
<b>Εικόνα 2.11</b> Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για τη περίοδο 1960-1993 .....	22
<b>Εικόνα 2.12</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα θερμοκρασίας για τη περίοδο 1960-1993.....	23
<b>Εικόνα 2.13</b> Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας για τη περίοδο 1960-1993 .....	23
<b>Εικόνα 2.14</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα εξατμισοδιαπνοής για τη περίοδο 1960-1993 .....	23
<b>Εικόνα 2.15</b> Μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής για τη περίοδο 1960-1993 .....	24
<b>Εικόνα 2.16</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα παρατηρημένης απορροής για τη περίοδο 1960-1993 .....	24
<b>Εικόνα 2.17</b> Μηνιαίες τιμές παρατηρημένης απορροής για τη περίοδο 1960-1993 .....	24
<b>Εικόνα 3.1</b> Υδρολογικές διεργασίες σε ένα μοντέλο.....	25
<b>Εικόνα 3.2</b> Διεργασίες Μοντέλου GR2M.....	27
<b>Εικόνα 3.3</b> Διεργασίες μοντέλου UTHBAL.....	30
<b>Εικόνα 4.1</b> Προετοιμασία των εντολών των μοντέλων .....	35
<b>Εικόνα 4.2</b> Γεωμετρική ερμηνεία των αλγορίθμων Canonical και Standard PSO μέχρι το 2007.....	42
<b>Εικόνα 4.3</b> Διαγράμματα τοπολογιών α) αστέρα, β) δακτυλίου, γ) Von Neumann.....	46
<b>Εικόνα 4.4</b> Γεωμετρική ερμηνεία του αλγορίθμου Standard PSO 2011 (SPSO-2011) .....	46
<b>Εικόνα 4.5</b> Διάγραμμα ροής αλγορίθμου SPSO-2011 .....	49
<b>Εικόνα 4.6</b> Διάγραμμα ροής μοντέλου – hydroPSO .....	50
<b>Εικόνα 6.1</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα βροχόπτωσης. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993.....	59
<b>Εικόνα 6.2</b> Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	59
<b>Εικόνα 6.3</b> Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993.....	59
<b>Εικόνα 6.4</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα εξατμισοδιαπνοής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	60
<b>Εικόνα 6.5</b> Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	60
<b>Εικόνα 6.6</b> Μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	60
<b>Εικόνα 6.7</b> Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα παρατηρημένης αποροής α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	61
<b>Εικόνα 6.8</b> Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	61
<b>Εικόνα 6.9</b> Μηνιαίες τιμές παρατηρημένης απορροής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993 .....	61

<b>Εικόνα 6.10</b> Μηνιαίες και ετήσιες προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2.....	64
<b>Εικόνα 6.11</b> Εποχιακές προσομοιωμένες και παρατηρημένες τιμές α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2 .....	65
<b>Εικόνα 6.12</b> Μηνιαίες και ετήσιες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα των καταλοίπων α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2.....	66
<b>Εικόνα 6.13</b> Τιμές παραμέτρων ανά εκτέλεση στη βαθμονόμηση του μοντέλου. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	67
<b>Εικόνα 6.14</b> Ιστογράμματα που δείχνουν τις συχνότητες των τιμών των παραμέτρων. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	68
<b>Εικόνα 6.15</b> ECDF των τιμών των παραμέτρων. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	69
<b>Εικόνα 6.16</b> Boxplots. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	70
<b>Εικόνα 6.17</b> Τιμές των παραμέτρων έναντι της αντίστοιχης τιμής καλής προσαρμογής (KGE2) που λαμβάνεται κατά τη βελτιστοποίηση α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	71
<b>Εικόνα 6.18</b> Τριδιάστατα διαγράμματα dotty. α) Αριστερά-GR2M β) Δεξιά UTHBAL .....	72
<b>Εικόνα 6.19</b> Διασταυρούμενη συσχέτιση, ιστογράμματα και στατιστική σημαντικότητα της συσχέτισης για τις (ευαίσθητες) παραμέτρους α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	73
<b>Εικόνα 6.20</b> Εξέλιξη του παγκόσμιου βέλτιστου και της κανονικοποιημένης ακτίνας σμήνους (NSR) σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων για τη βαθμονόμηση α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL .....	74
<b>Εικόνα 6.21</b> Όρια αβεβαιότητας α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL .....	77
<b>Εικόνα 6.22</b> Καμπύλες διάρκειας ροής α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	78
<b>Εικόνα 6.23</b> Καμπύλες διάρκειας ροής για τη περίοδο βαθμονόμησης 1960-1977 α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL.....	80
<b>Εικόνα 6.24</b> Αναπαράσταση υδρολογικής προσομοίωσης με μοντέλα GR2M, UTHBAL.....	82
<b>Εικόνα 6.25</b> Taylor Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1961-1977 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1977-1993 .....	84
<b>Εικόνα 6.26</b> Taylor Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1977-1993 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1961-1977 .....	84
<b>Εικόνα 6.27</b> Target Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1961-1977 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1977-1993 .....	85
<b>Εικόνα 6.28</b> Target Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1977-1993 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1961-1977 .....	85

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ταξινόμηση των μεθόδων ΑΕ και των στρατηγικών δειγματοληψίας .....	8
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής .....	15
Πίνακας 2.2 Στοιχεία μετεωρολογιακών σταθμών .....	19
Πίνακας 4.1 Όρια παραμέτρων μοντέλου GR2M.....	36
Πίνακας 4.2 Όρια παραμέτρων UTHBAL .....	36
Πίνακας 4.3 Ανάλυση ευαισθησίας κατά LHOAT .....	38
Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου GR2M με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2 .....	63
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2.....	63
Πίνακας 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση διαφορετικών τιμών κατώτατου όριου αντικειμενικής συνάρτησης .....	75
Πίνακας 6.4 Σταθμισμένα κβάντα των τιμών των παραμέτρων .....	76
Πίνακας 6.5 Τιμές δεικτών P-factor και R-factor.....	76
Πίνακας 6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων από τη περίοδο βαθμονόμησης και τη περίοδο επαλήθευσης .....	79
Πίνακας 6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων με και χωρίς προσαύξηση εξατμισοδιαπνοής .....	81
Πίνακας 6.8 Τιμές των παραμέτρων και δείκτες καλής προσαρμογής για κάθε αλγόριθμο βελτιστοποίησης (KGE2, KGE, NSE, RMSE) .....	83
Πίνακας 6.9 Στατιστικοί δείκτες για κάθε αλγόριθμο βελτιστοποίησης (KGE2, KGE, NSE, RMSE).....	83



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Καθώς οι υδάτινοι πόροι καταπονούνται περαιτέρω λόγω των αυξανόμενων επιπέδων κοινωνικής ζήτησης, η κατανόηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα διάφορα στοιχεία του κύκλου του νερού είναι στρατηγικής σημασίας για τη διαχείριση αυτού του βασικού πόρου. Για τον μακροπρόθεσμο στρατηγικό σχεδιασμό των υδάτινων πόρων μιας χώρας ενόψει των εξελισσόμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, είναι σημαντικό οι επιπτώσεις αυτές να ποσοτικοποιούνται με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Η υδρολογική μοντελοποίηση είναι μια μαθηματική αναπαράσταση αυτών των υδρολογικών διεργασιών που επηρεάζουν κυρίως το ενεργειακό και υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής. Γενικά, τα μοντέλα προσπαθούν να αναπαραστήσουν τις πολύπλοκες χωρικά κατανεμημένες αλληλεπιδράσεις του νερού, της ενέργειας και της βλάστησης μέσω μαθηματικών εξισώσεων. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο τύποι μοντέλων: τα εννοιολογικά και τα υδρολογικά μοντέλα (ΥΜ) που βασίζονται στη φυσική. Ανεξάρτητα από την προσέγγιση μοντελοποίησης, αναπόφευκτα, όλα τα μοντέλα είναι ατελείς αναπαραστάσεις της πραγματικότητας, με το καθένα να παρέχει διαφορετικές προοπτικές του συστήματος και να προσεγγίζει διάφορες φυσικές διεργασίες με κάποιες σταθερές και παραμέτρους.

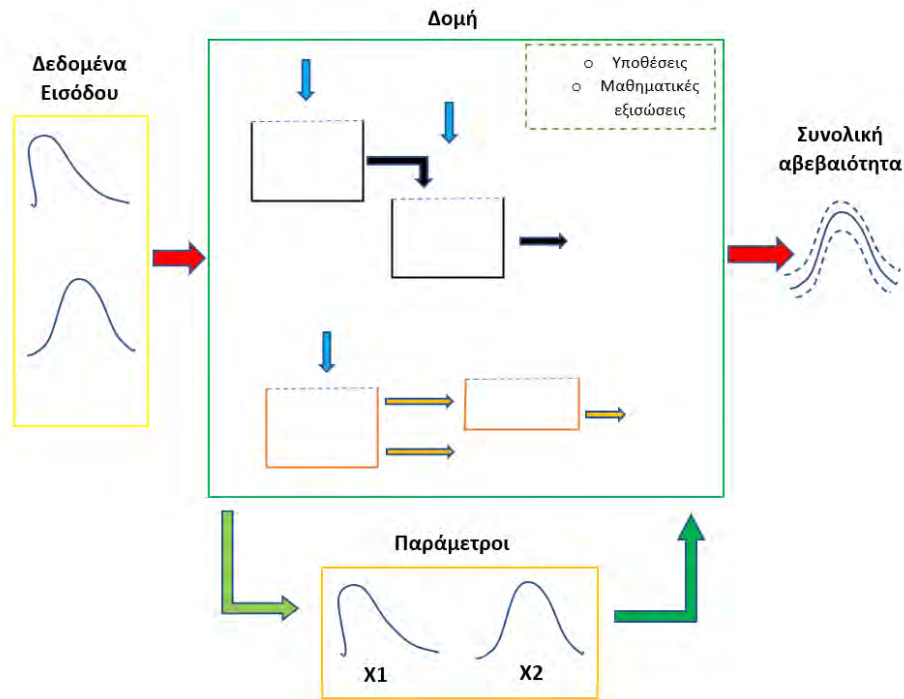
## 1.2 Ανάλυση αβεβαιότητας

Παρά την πρόοδο στην αναπαράσταση των διαφόρων διεργασιών, τα υδρολογικά μοντέλα παραμένουν αβέβαια. Η αβεβαιότητά τους προέρχεται από τα δεδομένα εισόδου και βαθμονόμησης, τη δομή του μοντέλου και τις παραμέτρους. Για τον χαρακτηρισμό αυτών των πηγών, εξετάζονται τα αίτια, οι αλληλεπιδράσεις τους και οι διάφορες μέθοδοι ανάλυσης αβεβαιότητας (UA). Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι (Uncertainty Analysis-UA) κατηγοριοποιούνται σε έξι μεγάλες κατηγορίες: (i) ανάλυση Monte Carlo, (ii) στατιστική κατά Bayes, (iii) ανάλυση πολλαπλών στόχων, (iv) αντίστροφη μοντελοποίηση με βάση τα ελάχιστα τετράγωνα, (v) τεχνικές με βάση την επιφάνεια απόκρισης και (vi) ανάλυση πολλαπλών μοντέλων. Ωστόσο για συνοπτικούς λόγους δε θα προβούμε σε περαιτέρω ανάλυση των μεθόδων παρά μόνο σε κάποια βασικά στοιχεία.

### 1.2.1 Αβεβαιότητα παραμέτρων (Parameter uncertainty)

Οι αβεβαιότητες των υδρολογικών μοντέλων προέρχονται από τις παραμέτρους, τη δομή του μοντέλου, τη βαθμονόμηση (παρατήρηση) και τα δεδομένα εισόδου (Εικόνα 1.1). Εκτός από αυτές τις πηγές, οι αβεβαιότητες μπορεί να προέρχονται από τις αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου. Τα υδρολογικά μοντέλα συχνά περιέχουν παραμετροποιήσεις που είναι αποτέλεσμα εννοιολογικών απλουστεύσεων, γνωστές ως αποτελεσματικές παράμετροι (Beven, 1989). Η αβεβαιότητα των παραμέτρων μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αδυναμίας εκτίμησης ή μέτρησης αυτών των αποτελεσματικών παραμέτρων που ενσωματώνουν και εννοιολογούν τις διεργασίες (Wagener & Gupta, 2005). Επιπλέον, η **αβεβαιότητα των παραμέτρων** μπορεί να είναι αποτέλεσμα της φυσικής μεταβλητότητας της διαδικασίας και των σφαλμάτων παρατήρησης. Παρόλο που ορισμένες παράμετροι του μοντέλου, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, είναι μετρήσιμες στην κλίμακα του σημείου, οι τιμές τους στην κλίμακα της λεκάνης απορροής διαφέρουν σημαντικά. Ως εκ τούτου, η πρακτική δυσκολία στη μέτρηση αυτής της μεταβλητότητας μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αβεβαιότητα των παραμέτρων. Αυτή η αβεβαιότητα εκδηλώνεται συχνά στη βαθμονόμηση του μοντέλου μέσω της έλλειψης ενός ενιαίου βέλτιστου συνόλου παραμέτρων (Beven, 2006).

Μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους UA παραμέτρων είναι η γενικευμένη εκτίμηση αβεβαιότητας πιθανότητας (GLUE) (Beven & Binley, 1992), η οποία λαμβάνει υπόψη την υπόθεση της ισοδυναμίας (Beven, 2006). Η υπόθεση της ισοδυναμίας υπογραμμίζει την ύπαρξη πολλαπλών συνόλων παραμέτρων που περιγράφουν υδρολογικές διεργασίες αδιακρίτως ή παράγουν το ίδιο τελικό αποτέλεσμα. Η προσέγγιση ενισχύει τις προσομοιώσεις Monte Carlo με ένα μέτρο κατωφλίου συμπεριφοράς που διακρίνει τις υδρολογικά βιώσιμες και μη βιώσιμες παραμέτρους (και δομές). Παρόλο που η απλή εννοιολόγηση και εφαρμογή της GLUE της επιτρέπουν να επιτύχει ευρεία χρήση, η GLUE έχει επικριθεί για την υποκειμενικότητά της στην επιλογή ενός κατώτατου ορίου συμπεριφοράς και την έλλειψη επίσημης στατιστικής βάσης (Beven et al., 2007, 2008; Mantovan & Todini, 2006).



**Εικόνα 1.1** Διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας υδρολογικών μοντέλων. Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της αλληλεπίδρασης των πηγών αβεβαιότητας. Το κεντρικό ορθογώνιο δείχνει διάφορες δομές, υποθέσεις και εξισώσεις ως παραδείγματα δομικής αβεβαιότητας. Το αριστερό ορθογώνιο δείχνουν τις κατανομές των δεδομένων εισόδου ως πηγές αβεβαιότητας των δεδομένων εισόδου και των δεδομένων βαθμονόμησης. Το κάτω ορθογώνιο δείχνει την αβεβαιότητα των παραμέτρων χρησιμοποιώντας κατανομές παραμέτρων. Το σκίτσο στη δεξιά πλευρά δείχνει την προκύπτουσα αβεβαιότητα πρόβλεψης σε ένα υδρογράφημα ως ανώτερη και κατώτερη ζώνη πρόβλεψης.

### 1.2.2 Δομική αβεβαιότητα (Structural Uncertainty)

Η ακριβής αναπαράσταση ενός υδρολογικού συστήματος αποτελεί πρόκληση λόγω της απουσίας ενοποιητικής θεωρίας, της περιορισμένης γνώσης και των αριθμητικών απλουστεύσεων και απλουστεύσεων των διεργασιών. Οι περιορισμοί αυτοί συνιστούν **δομική αβεβαιότητα** του μοντέλου. Η απόδοση του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις δομές του μοντέλου (Butts et al., 2004). Ως εκ τούτου, η δομική αβεβαιότητα είναι κρίσιμη, καθώς μπορεί να καταστήσει το μοντέλο και την ποσοτικοποίηση άλλων αβεβαιοτήτων άχρηστα (Butts et al., 2004; Doherty & Welter, 2010; Refsgaard et al., 2006). Συγκρίνοντας τη δομική αβεβαιότητα και την αβεβαιότητα των παραμέτρων, οι (Højberg & Refsgaard, 2005) έδειξαν ότι η δομική αβεβαιότητα είναι κυρίαρχη, ιδίως όταν το μοντέλο χρησιμοποιείται πέραν της σφαίρας βαθμονόμησης του. Επιπλέον, οι (Rojas et al., 2008) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η δομική αβεβαιότητα μπορεί να συμβάλει έως και στο 30% της αβεβαιότητας πρόβλεψης.



Για την ποσοτικοποίηση και τη μείωση της δομικής αβεβαιότητας έχουν εφαρμοστεί τεχνικές υπολογισμού του μέσου όρου πολλαπλών μοντέλων και τεχνικές συνόλου, οι οποίες συγκεντρώνουν εναλλακτικές δομές μοντέλων. Ένας από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους σταθμισμένους μέσους όρους πολλαπλών μοντέλων είναι ο Μπεϋζιανός μέσος όρος μοντέλων (BMA) (Hoeting et al., 1999; Raftery et al., 1997, 2005). Η BMA και παρόμοιες τεχνικές μέσου όρου που βασίζονται στον Μπέιζ είναι πλεονεκτικές, καθώς τα βάρη τους είναι ερμηνεύσιμα και προέρχονται από την εκ των υστέρων απόδοση του μοντέλου που συνδυάζει την ικανότητα του μοντέλου να προσαρμόζει τις παρατηρήσεις και την εκ των προτέρων γνώση των ειδικών.

### 1.2.3 Αβεβαιότητα δεδομένων εισόδου (Input Uncertainty)

Τα δεδομένα εισόδου στα υδρολογικά μοντέλα περιλαμβάνουν διάφορα υδρομετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα της λεκάνης απορροής και δεδομένα του υπεδάφους. Παρόλο που έχουν υπάρξει βελτιώσεις στην απόκτηση και την επεξεργασία δεδομένων, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του μοντέλου είναι αραιά και υπόκεινται σε κενά, ανακρίβειες και αβεβαιότητες (H. K. McMillan et al., 2018). Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνουν παρεμβολές, κλιμάκωση και εξαγωγή συμπερασμάτων από άλλες μετρήσεις που οδηγούν σε ένα εύρος αβεβαιότητας 10-40% (H. K. McMillan et al., 2018). Αυτές οι ανακρίβειες στα δεδομένα εισόδου συνιστούν αβεβαιότητα εισόδου. Η μη συνεκτίμηση της αβεβαιότητας των εισροών μπορεί να οδηγήσει σε μεροληπτική εκτίμηση των παραμέτρων (Duan et al., 2003; Renard et al., 2010) και να παραπλανήσει τους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου (Engeland et al., 2016). Συνεπώς, η **αβεβαιότητα δεδομένων εισόδου** μπορεί να επηρεάσει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας πρόβλεψης. Συγκρίνοντας την αβεβαιότητα των εισροών και των παραμέτρων του μοντέλου, ιδιαίτερα σε μια περιοχή με λίγα δεδομένα, οι (Bárdossy et al., 2020) έδειξαν τη σοβαρότητα της αβεβαιότητας των εισροών έναντι της αβεβαιότητας των παραμέτρων και πρότειναν την ταυτόχρονη ανάλυση και των δύο αβεβαιοτήτων για να έχουμε ένα ουσιαστικό αποτέλεσμα.

Παρατηρήσεις όπως οι μεταβλητές παροχής υπόκεινται σε παρόμοιες αβεβαιότητες μέτρησης όπως και τα δεδομένα εισόδου. Για παράδειγμα, οι παρατηρήσεις της ροής του ποταμού προέρχονται από καμπύλες αξιολόγησης που μεταφράζουν τις μετρήσεις της στάθμης του ποταμού σε εκτιμήσεις παροχής. Η μετάφραση αυτή δεν μεταδίδει μόνο τα τυχαία και συστηματικά σφάλματα μέτρησης του σταδίου, αλλά και τις δομικές (εξίσωση

καμπύλης αξιολόγησης) και παραμετρικές αβεβαιότητες που εμπλέκονται στη βαθμονόμηση της καμπύλης αξιολόγησης. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις της εκροής υποφέρουν από σφάλματα παρεμβολής και παρέκτασης της καμπύλης αξιολόγησης, υστέρηση, αλλαγή των συνθηκών της περιοχής (π. χ. μετακίνηση της κοίτης) και εποχιακές διακυμάνσεις στις συνθήκες μέτρησης και ροής (Kiang et al., 2009, 2018; H. McMillan et al., 2012; Sikorska et al., 2013). Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα οφείλεται στην παρέκταση (Domeneghetti et al., 2012).

Τα υδρολογικά μοντέλα απαιτούν διαφορετικά υδροκλιματικά δεδομένα εισόδου. Για την παρούσα ανασκόπηση, επικεντρωθήκαμε στην εξατμισοδιαπνοή και την αβεβαιότητά της. Παραδοσιακά, η αβεβαιότητα εισόδου αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός συντελεστή που πολλαπλασιάζει την τιμή εισόδου για να διορθώσει την αβεβαιότητα. Η προσέγγιση αυτή είναι σχετικά γρήγορη και εύκολη, καθώς ο συντελεστής πολλαπλασιασμού βασίζεται στην κρίση των εμπειρογνομόνων ή εκτιμάται με τις παραμέτρους του μοντέλου.

#### **1.2.4 Αβεβαιότητα πρόβλεψης (Predictive uncertainty)**

Η **αβεβαιότητα πρόβλεψης** είναι το αποτέλεσμα των παραπάνω αβεβαιοτήτων που εμφανίζονται στην έξοδο του μοντέλου. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να είναι προκατειλημμένη ή να κυριαρχεί η διακύμανση, ανάλογα με το επίπεδο πολυπλοκότητας του μοντέλου και το πληροφοριακό περιεχόμενο των δεδομένων, με την προκατειλημμένη ανάλυση να κυριαρχεί στα απλά μοντέλα και τη διακύμανση να κυριαρχεί στα πολύπλοκα μοντέλα. Η αβεβαιότητα πρόβλεψης είναι συνήθως ετεροσκεδαστική, με το μέγεθος της αβεβαιότητας να μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος της εξόδου του μοντέλου (μη γκαουσιανά κατάλοιπα). Στη μοντελοποίηση της ροής των υδατορευμάτων, αυτό οφείλεται εν μέρει στον περιορισμένο αριθμό παρατηρήσεων υψηλής ροής (γεγονότα χαμηλής συχνότητας) που περιορίζουν τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Για την αντιμετώπιση της ετεροσκεδαστικότητας χρησιμοποιούνται διάφορα σχήματα μετασχηματισμού δεδομένων, όπως ο μετασχηματισμός Box-Cox και ο απλός λογαριθμικός μετασχηματισμός (Evin et al., 2013; Martinez & Gupta, 2011).

Η προκύπτουσα εκτίμηση αβεβαιότητας της εξόδου ενός μοντέλου είναι η αβεβαιότητα πρόβλεψης. Η αβεβαιότητα πρόβλεψης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη διάδοση των αβεβαιοτήτων των παραμέτρων, της δομής και των εισροών στην έξοδο του μοντέλου. Αυτή η διάδοση πραγματοποιείται κυρίως με προσομοίωση Monte Carlo των αβεβαιοτήτων παραμέτρων, δομών και εισροών. Η αβεβαιότητα πρόβλεψης μπορεί να μειωθεί

χρησιμοποιώντας διάφορα συστήματα μηχανικής μάθησης (Demissie et al., 2009; Xu & Valocchi, 2015). Αν και ο ρεαλισμός των φυσικών διεργασιών τους χρειάζεται επικύρωση, τα συστήματα αυτά μειώνουν την αβεβαιότητα πρόβλεψης, καθώς μπορούν να μάθουν και να εντοπίσουν πρότυπα στα κατάλοιπα του μοντέλου. Εξάλλου, για να μειωθεί η αβεβαιότητα πρόβλεψης, είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε και να κατανοήσουμε τη διάδοση των διαφόρων πηγών αβεβαιότητας.

### **1.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων (Sensitivity analysis)**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αβεβαιότητα στις παραμέτρους εισόδου ενισχύει τον παράγοντα αβεβαιότητας στις αποκρίσεις του μοντέλου, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει σημαντικά τον χειρισμό των αποτελεσμάτων του μοντέλου από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων όσον αφορά τις μελέτες ευαισθησίας. Οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας (AE) βοηθούν στον εντοπισμό των παραμέτρων που έχουν ισχυρό αντίκτυπο στις εξόδους του μοντέλου και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν την απόκριση του μοντέλου. Επιπλέον, η AE βοηθά στην ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων, του προτιμώμενου εύρους και της χωρικής μεταβλητότητάς τους, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Η κριτική εξέταση των σχέσεων μεταξύ των εισροών και των εκροών του μοντέλου είναι απαραίτητη, η οποία μπορεί: i) να βοηθήσει στον εντοπισμό πιθανών ελλείψεων στη δομή και τη διατύπωση του μοντέλου, ii) να παράσχει καθοδήγηση για τη μείωση της τάξης του μοντέλου και την παραμετροποίηση και iii) να αναλύσει το πληροφοριακό περιεχόμενο των διαθέσιμων παρατηρήσεων (Castaings et al., 2007). Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι AE βοηθούν στον εντοπισμό των παραμέτρων που έχουν ισχυρό αντίκτυπο στα αποτελέσματα του μοντέλου, επηρεάζοντας έτσι την αποτελεσματικότητα κάθε μοντέλου. Οι (Dawdy & O'Donnell, 1965) δήλωσαν ότι "γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία της απόκρισης του μοντέλου σε μια παράμετρο, τόσο πιο κοντά και πιο γρήγορα θα βελτιστοποιηθεί η παράμετρος αυτή" και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μη ευαίσθητες παράμετροι συχνά δεν πλησίαζαν την πραγματική τιμή.

Δεν έχει επιχειρηθεί από καμία μελέτη μέχρι σήμερα μια ανασκόπηση των τεχνικών ΑΣ και δειγματοληψίας με βάση την εφαρμογή τους σε διάφορα μέρη του κόσμου (περιφερειακά χαρακτηριστικά). Παρόλλα αυτά έχει διαπιστωθεί μια ισχυρή συγγένεια μεταξύ των

τεχνικών ΑΕ που αναπτύχθηκαν και των περιοχών που μοντελοποιήθηκαν (C. A. Spruill et al., 2000; Tucker & Whipple, 2002). Η αποκάλυψη αυτή θα παρέχει στον μοντελοποιητή μια πλατφόρμα για την υιοθέτηση της κατάλληλης μεθόδου ΑΕ ανάλογα με την περιοχή μελέτης που μοντελοποιείται. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι στόχοι, οι παραδοχές και η μεθοδολογία που πρέπει να υιοθετηθούν για μια κατάλληλη τεχνική ΑΕ επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τα υδρολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής που πρόκειται να μοντελοποιηθεί.

### **1.3.1 Προσδιορισμός των πιο σημαντικών αβέβαιων παραμέτρων**

Η κατάταξη των παραμέτρων με επιρροή κατά σειρά της σχετικής συμβολής τους στη μεταβλητότητα των αποκρίσεων του μοντέλου, η οποία ονομάζεται ιεράρχηση των παραγόντων, είναι ένας από τους κύριους στόχους της ΑΕ. Ο προσδιορισμός και η κατάταξη των παραμέτρων εισόδου είναι σημαντικές για την προσέγγιση των προσομοιώσεων του μοντέλου με την πραγματική τιμή. Η ορθή κατανόηση της επίδρασης ακόμη και μικρών μεταβολών των παραγόντων εισόδου στις αποκρίσεις του μοντέλου και οι ανατροφοδοτικές επιδράσεις του στις διεργασίες του μοντέλου βοηθούν στην ελαχιστοποίηση της συνολικής αβεβαιότητας (Crosetto et al., 2000; Kuczera & Parent, 1998; Razavi & Gupta, 2015; Song et al., 2015).

### **1.3.2 Απλούστευση του μοντέλου και προσδιορισμός των μη επιδραστικών παραμέτρων**

Ένας άλλος στόχος της ΣΑ είναι η αποτελεσματική και βέλτιστη χρήση του μοντέλου με την αφαίρεση των περιττών παραμέτρων, μειώνοντας έτσι το χρόνο υπολογισμού και τα σφάλματα. Η έννοια της υπερβολικής παραμετροποίησης, η οποία συνήθως παραμελείται σε πολλές ασκήσεις μοντελοποίησης, αντιμετωπίζεται κριτικά από λίγες μελέτες (Beven, 1989; Spear, 1980; van Griensven et al., 2006). Οι μελέτες αυτές υπογράμμισαν τη σημασία της αφαίρεσης πολλών παραμέτρων χωρίς επιρροή στο μοντέλο, ενώ η παραμετροποίηση/βαθμονόμηση βελτίωσε την αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

### **1.3.3 Ταξινόμηση των μεθόδων δειγματοληψίας, προσεγγίσεις SA**

Οι προσεγγίσεις που υιοθετούνται για τη ΑΕ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των ΥΜ. Τα μοντέλα ΗΜ μπορούν να ταξινομηθούν σε μοναδιαία, ημι-κατανεμημένα και κατανεμημένα, με το κατανεμημένο μοντέλο να επιτρέπει μεγαλύτερη μεταβλητότητα των παραμέτρων σε ολόκληρο τον εφικτό χώρο. Τα συγκεντρωτικά μοντέλα είναι προσεγγιστικές αναπαραστάσεις του συστήματος και είναι ως επί το πλείστον

αναποτελεσματικά στην ακριβή αναπαραγωγή του πραγματικού συστήματος, δεδομένου ότι οι εμπλεκόμενες παράμετροι είναι συγκεντρωτικές, δηλαδή σταθμισμένοι κατά περιοχή μέσοι όροι και δεν αντιπροσωπεύουν τα ακριβή φυσικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών διεργασιών (Arnaud et al., 2011; Beven, 1989; Hughes & Beater, 1989). Παρόλο που η κατανεμημένη μοντελοποίηση παρέχει μια πλατφόρμα που επιτρέπει τη μεταβλητότητα όλων των παραμέτρων, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω της σχετικής αβεβαιότητας στον προσδιορισμό των παραμέτρων.

Η ΑΕ θα συμβάλει στη μείωση της πολυπλοκότητας και της αβεβαιότητας και θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της συμφωνίας μεταξύ της εξόδου και των εισροών σε κάθε μελέτη υδρολογικής μοντελοποίησης. Οι προσεγγίσεις που υιοθετούνται συνήθως για την εκτέλεση της ΑΕ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: τοπικές και παγκόσμιες. Ωστόσο, η ταξινόμηση αυτή είναι χονδροειδής και ασαφής. Η απόφαση σχετικά με τον τύπο της προσέγγισης, δηλαδή αν είναι παγκόσμια ή τοπική, και η απαίτηση των μεθόδων δειγματοληψίας για τον έλεγχο του αριθμού των προσομοιώσεων εξαρτάται κυρίως από το εύρος του χώρου των παραμέτρων. Η ταξινόμηση των μεθόδων ΑΕ αποτελεί από μόνη της ένα δύσκολο έργο, κυρίως λόγω της αντιφατικής φύσης των εγγενών παραδοχών στις πρακτικές εφαρμογές. Οι γενικές ταξινομήσεις με παραδείγματα παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1.1** Ταξινόμηση των μεθόδων ΑΕ και των στρατηγικών δειγματοληψίας

NO	Υποκατηγορία	Μέθοδος	Συνήθεις τεχνικές
1	1.1	Εξαρτάται από τη κλίμακα	Μέθοδος ΕΕ. Δειγματοληψία OAT
	1.2	Δεν εξαρτάται από τη κλίμακα	Μέθοδος που βασίζεται στη διακύμανση. Δειγματοληψία Monte Carlo
2	2.1	Εξαρτάται από τη λειτουργία	Δειγματοληψία OAT. Δειγματοληψία FF
	2.2	Δεν εξαρτάται από τη λειτουργία	Μέθοδος που βασίζεται στη διακύμανση. Μέθοδος ΕΕ
3	3.1	Εξαρτάται από το παράγωγο	Όλες τοπικές προσεγγίσεις. Δειγματοληψία Monte Carlo, OAT
	3.2	Δεν εξαρτάται από το παράγωγο	Όλες παγκόσμιες προσεγγίσεις: Μέθοδος LH
4	4.1	Ενιαία παράμετρος	Τυχαίες τιμές. Στρωματοποιημένη δειγματοληψία. Εκτιμήσεις μέσου όρου και διακύμανσης
	4.2	Πολλαπλή παράμετρος	Δειγματοληψία OAT. Πολυμεταβλητή στρωματοποιημένη δειγματοληψία

## 1.4 Μεθοδολογία

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με 2 αδρομερή (lumped) υδρολογικά μοντέλα, το GR2M (Mouelhi et al., 2006) και το UTHBAL (Loukas et al., 2007). Και στα δύο μοντέλα η λεκάνη θεωρείται ως μια μονάδα που μπορεί να περιγραφεί από μερικές παραμέτρους και μεταβλητές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η χωρική μεταβλητότητα στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Ουσιαστικά υπάρχουν εννιαίες τιμές των παραμέτρων.

Η καταγραφή δεδομένων από την εξεταζόμενη λεκάνη χωρίστηκε σε δύο περιόδους σχεδόν ίσης διάρκειας. Κάθε μοντέλο αξιολογήθηκε σε λειτουργία προσομοίωσης για κάθε περίοδο χρησιμοποιώντας τιμές παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν για την άλλη περίοδο, σύμφωνα με την τεχνική split-sample (Klemeš, 1986). Η λειτουργία αυτή επαναλήφθηκε μετά την εναλλαγή των δύο περιόδων. Στην αρχή κάθε περιόδου δοκιμής, το πρώτο έτος προσομοιωμένης εκροής δεν χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των κριτηρίων αξιολόγησης, δηλαδή χρησιμοποιήθηκε ως περίοδος προθέρμανσης.

Γενικά, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη βαθμονόμησης και επικύρωσης των μοντέλων μας στην υπό μελέτη λεκάνη μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη: 1) συλλογή υδροκλιματικών δεδομένων, τα οποία προέρχονται από οχτώ υδρολογικούς σταθμούς κατά την περίοδο 1960-1993, 2) επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν από τους διάφορους σταθμούς, με βάση μαθηματικούς τύπους και 3) υδρολογική μοντελοποίηση της περιοχής μας με τη χρήση του μοντέλου μας.

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα και η απόδοση κάθε μοντέλου με βάση διαφορετικές στρατηγικές βαθμονόμησης για την εκτίμηση των παραμέτρων. Η δειγματοληψία των παραμέτρων βασίστηκε σε αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης και μη γραμμικής βελτιστοποίησης με χρήση ενός αλγορίθμου τοπικής αλλά και συνολικής αναζήτησης (local and global search algorithm), **Calibration\_Michel** και **HydroPSO** (Particle Swarm Optimisation). Ωστόσο, μετά την παρατήρηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε καλύτερο για το σκοπό της διπλωματικής να επεκταθούμε περισσότερο στο **HydroPSO**, αφού με το **Calibration\_Michel** δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές.

Και οι 2 αλγόριθμοι προσπαθούσαν να βελτιστοποιήσουν τέσσερις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή: την κλασική **NSE** (Nash-Sutcliffe Efficiency), **KGE** (Kling

- Gupta 2009), **KGE** (Kling - Gupta 2012) και **RMSE** (Root Mean Square Error). Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα στατιστικά στοιχεία προσαρμογής για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου και στις δύο περιόδους βαθμονόμησης-επαλήθευσης. Ενδεικτικά, αυτά περιλαμβάνουν: τη σχετική μεροληψία, το **NSE** ως στατιστικό προσαρμογής, το **mse** (Mean Squared Error), το **R<sup>2</sup>** (Coefficient of Determination) και άλλα. Τα στατιστικά στοιχεία προσαρμογής υποδεικνύουν το μέγεθος της αβεβαιότητας που εξακολουθεί να υπάρχει μετά τη βαθμονόμηση.

Το πακέτο `airGR` είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την εύκολη εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων μας. Αρχικά είχε σχεδιαστεί για την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων GR που αναπτύχθηκαν στην *Irstea* εντός της πλατφόρμας R. Το πακέτο περιλαμβάνει μια σειρά λειτουργιών για την προετοιμασία των δεδομένων, την προσομοίωση του μοντέλου, τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων και την προεπισκόπηση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το πακέτο είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να περιλαμβάνει άλλα μοντέλα, αλγόριθμους βαθμονόμησης ή κριτήρια απόδοσης που χρειάζονται οι χρήστες. Αυτό καθιστά το πακέτο ένα κατάλληλο εργαλείο για τη διεξαγωγή υδρολογικής μοντελοποίησης σε απλές μελέτες περίπτωσης (π. χ. για εκπαιδευτικούς σκοπούς), καθώς και για την εκτεταμένη δοκιμή συστημάτων μοντελοποίησης (π. χ. εκτέλεση μεγάλων δειγμάτων λεκάνης απορροής για υδρολογικά ερευνητικά προγράμματα).

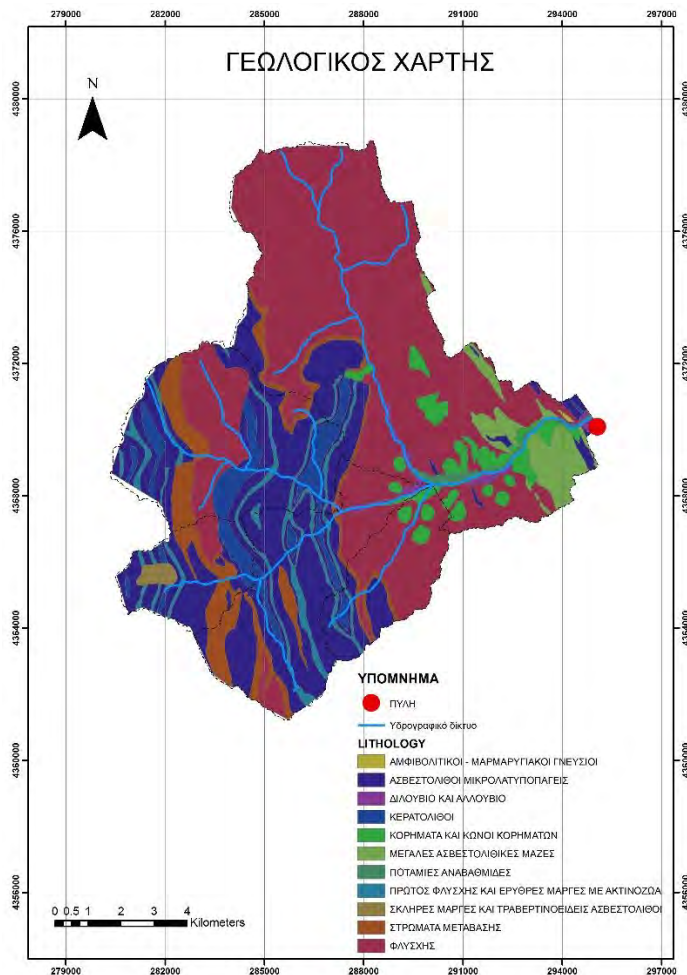
## 2 Περιοχή μελέτης και Γεωγραφικές Βάσεις Δεδομένων

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής με την οποία θα ασχοληθούμε στη συγκεκριμένη εργασία είναι η Πύλη Τρικάλων. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Πύλης ή Πορταϊκού αποτελεί υπολεκάνη της λεκάνης απορροής του Αλή Εφέντη και βρίσκεται στο νομό Τρικάλων. Έχει έκταση 132 km<sup>2</sup> και στις εκβολές του ποταμού υπάρχει ο παροχομετρικός σταθμός.

### 2.2 Γεωλογικός – Υδρολιθολογικός Χάρτης κατά Corine 2018

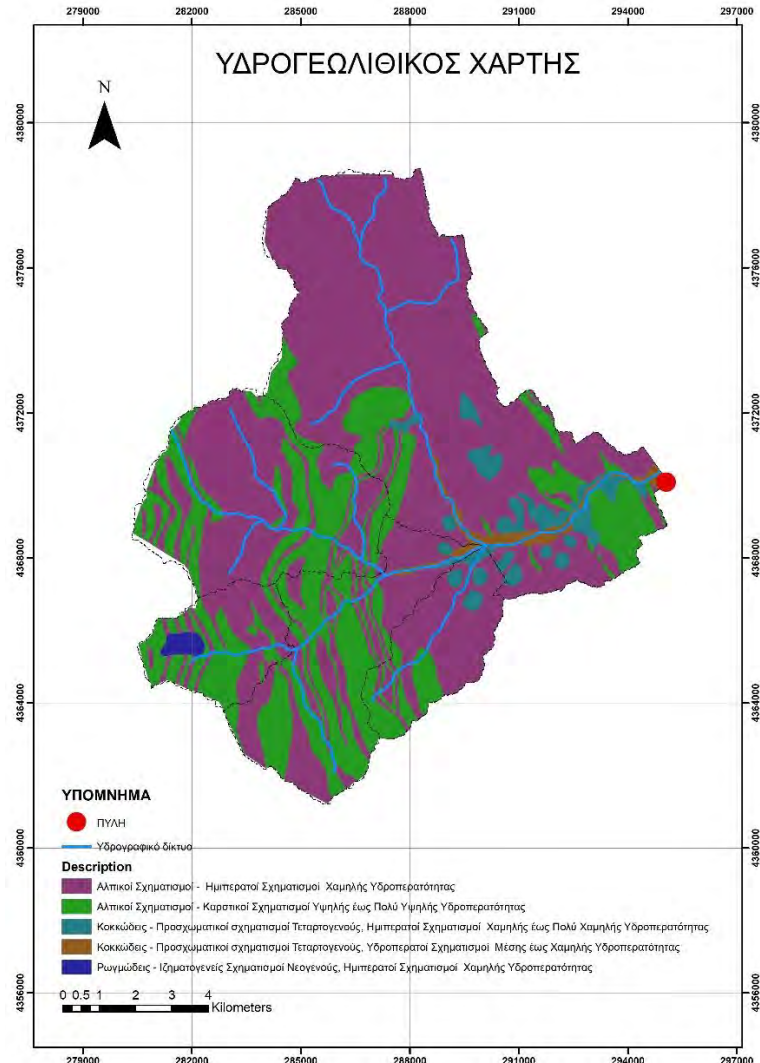
Το μεγαλύτερο κομμάτι της λεκάνης αποτελείται από σκληρούς ασβεστόλιθους. Οι ασβεστόλιθοι, είναι ανθρακικά πετρώματα του αλπικού υποβάθρου που ενδυνάμυνουν την έντονη λατομική δραστηριότητα στη περιοχή μελέτης. Αντίθετα, οι σχιστόλιθοι είναι μεταμορφωμένα πετρώματα του αλπικού υποβάθρου της Πελαγονικής ζώνης.



Εικόνα 2.1 Γεωλογικός Χάρτης κατά Corine 2018



Όσον αφορά τη υδρολιθολογία, έχουμε έντονη υδροφορία τόσο υπογείως όσο και επιφανειακά. Αυτό οφείλεται κυρίως στον μεγάλο βαθμό καρστικοποίησης των πετρωμάτων αλλά και στον μεγάλο βαθμό περατότητας που έχει εμφανιστεί στο θεσσαλικό κάμπο.

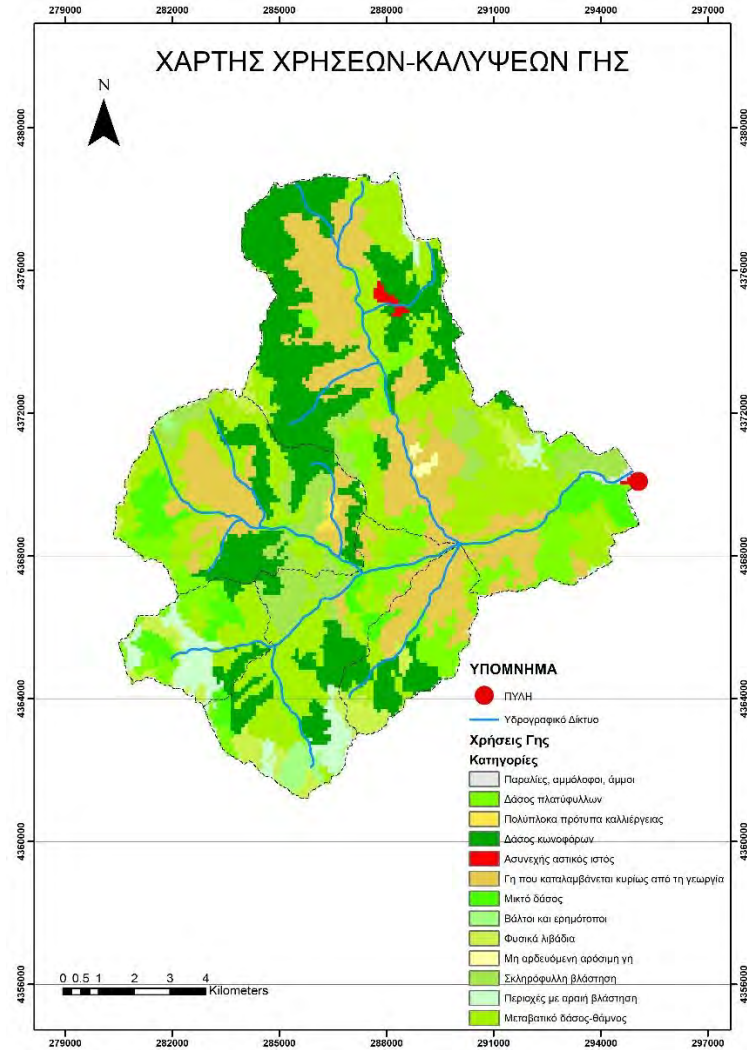


Εικόνα 2.2 Υδρολιθολογικός Χάρτης κατά Corine 2018

### 2.3 Χάρτης Χρήσεων – Καλύψεων Γης κατά Corine 2018

Η απορροή μιας λεκάνης απορροής επηρεάζεται σημαντικά από τις χρήσεις γης, μετά από μια βροχόπτωση. Όμως η βλάστηση είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει ο άνθρωπος. Οι τεχνητές φυτεύσεις ή αλλιώς αναδασώσεις, τα φυτοκομικά έργα καθώς και τα έργα διευθέτησης χειμάρρων μπορούν να φέρουν θετικές αλλαγές στη βλάστηση. Από την άλλη μεριά, εκχερσώσεις, αλλά και πυρκαγιές μπορούν να αποβούν καταστροφικές. Οποιαδήποτε μετατροπή στη βλάστηση μιας περιοχής, συνεπάγεται τη χρήση γης, η οποία

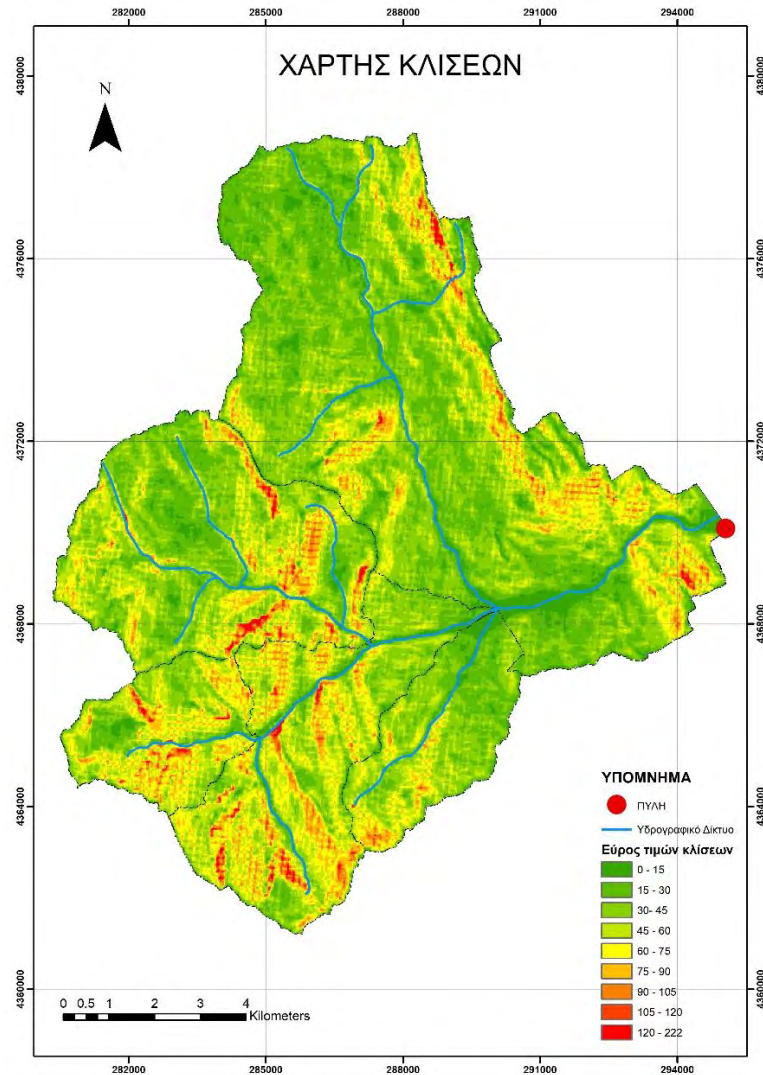
με τη σειρά της μπορεί να επηρεάσει την απορροή των υδάτων και γενικότερα την υδρολογία των λεκανών απορροής.



Εικόνα 2.3 Χάρτης χρήσεων-καλύψεων γης κατά Corine 2018

## 2.4 Χάρτης κλίσεων

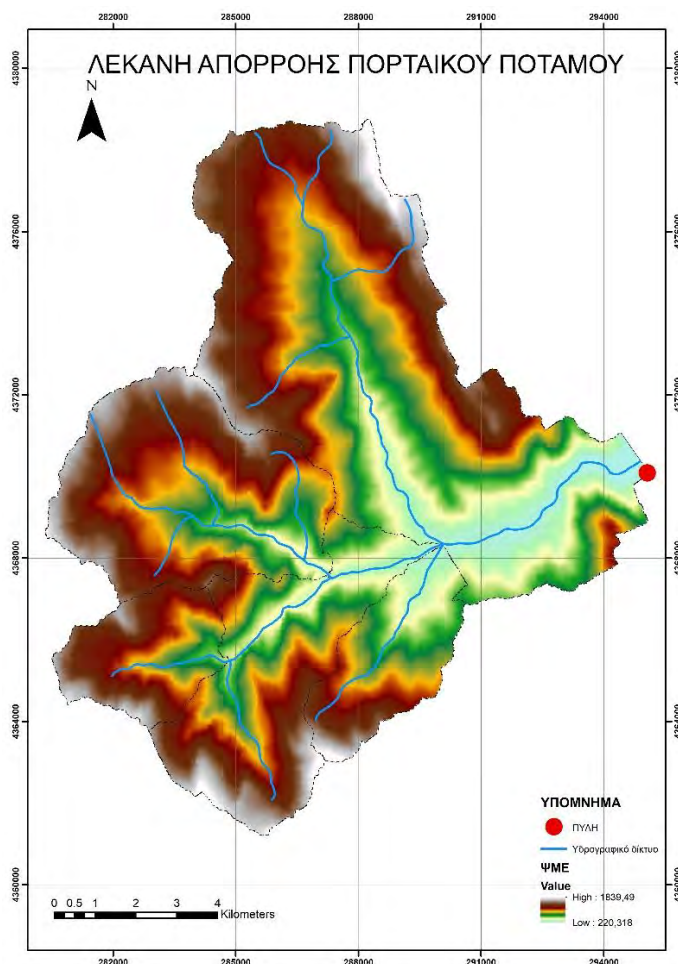
Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 2.4 η περιοχή μελέτης που εξετάζουμε χαρακτηρίζεται στο μεγαλύτερο κομμάτι της από χαμηλές τιμές κλίσεων.



Εικόνα 2.4 Χάρτης κλίσεων

## 2.5 Χαρακτηριστικά Υδρολογικής λεκάνης

Η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού οριοθετείται ανατολικά από τη πεδιάδα της Θεσσαλίας ενώ δυτικά από την οροσειρά της νότιας Πίνδου. Το συνολικό μήκος της κύριας κοίτης του Πορταϊκού ποταμού είναι 31.9 km. Περισσότερα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.1.



Εικόνα 2.5 Λεκάνη απορροής Πορταϊκού

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Υψόμετρο λεκάνης			Κλίση λεκάνης			Συνολική έκταση (km <sup>2</sup> )	Συνολική περίμετρος (km)	Μέγιστο μήκος υδατορεύματος
min	max	mean	min	max	mean			
220	1839	938	0.05	222	43	132	160	21

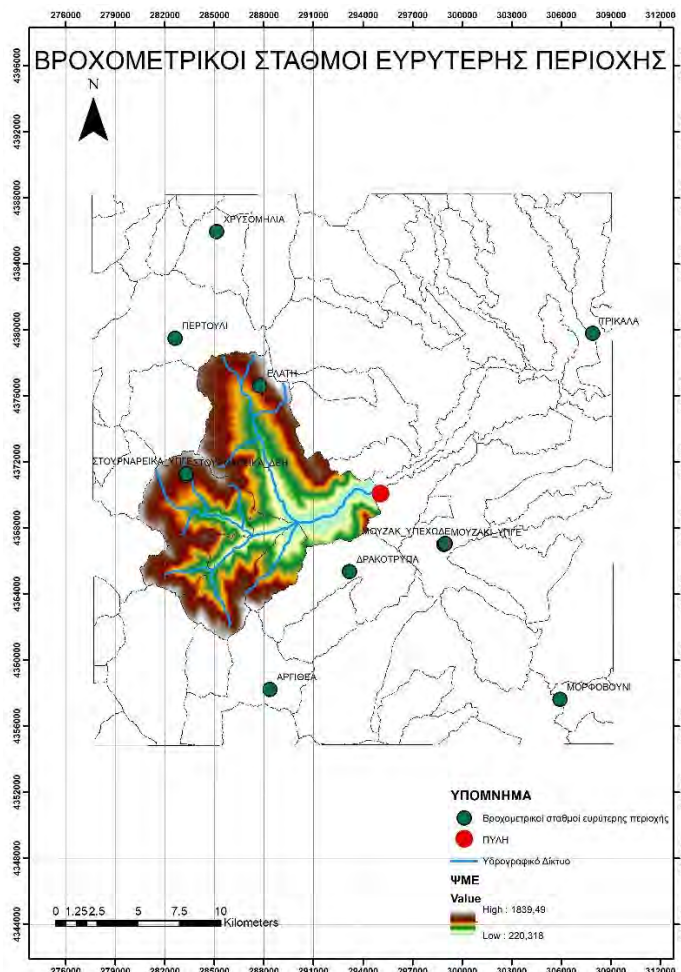
## 2.6 Διαθέσιμα δεδομένα και τελική επεξεργασία

### 2.6.1 Μετεωρολογικοί Σταθμοί

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μηνιαίας υετόπτωσης (σε mm) και μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας (σε °C) που έχουν καταμετρηθεί από έναν αριθμό μετεωρολογικών σταθμών καθώς και τα δεδομένα μηνιαίων παροχών (σε mm) από ένα παροχομετρικό σταθμό μιας λεκάνης απορροής της Θεσσαλίας. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 2.6, υπάρχουν αρκετοί μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή, πολλοί από αυτούς είχαν ελλιπή δεδομένα ή ήταν αναξιόπιστα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να

χρησιμοποιηθούν μόνο συγκεκριμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, έχοντας ως σταθμό αναφοράς αυτόν της ΔΕΗ. Η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων σταθμών έγινε μετά τον έλεγχο ομοιογένειας με χρήση του λογισμικού «Υδρογνώμων».

Ο έλεγχος ομοιογένειας (ή έλεγχος συνέπειας κατά τους (Demetris Koutsoyiannis & Th. Xanthopoulos, 1999)) έχει ως στόχο τον εντοπισμό τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, οι οποίες έχουν αντίκτυπο στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Η μεθοδολογία της διπλής αθροιστικής καμπύλης (double mass curve) η οποία παρουσιάζεται μέσα από τον «Υδρογνώμων» ελέγχει τη «χωρική συνέπεια» ανάμεσα στις μετρήσεις βροχόπτωσης γειτονικών σταθμών. Η μέθοδος αυτή είναι ημιεμπειρική όπου συνδιάζονται η γραφική απεικόνιση βροχομετρικών δεδομένων με κάποιες στατιστικές υποθέσεις και την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σταθμούς όπου έχουμε ισχυρή συσχέτιση λόγω κοντινής γεωγραφικής τους θέσης, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6 Μετεωρολογικοί σταθμοί και Βροχομετρικοί Σταθμοί ευρύτερης περιοχής μελέτης



### 2.6.2 Δεδομένα Εισόδου

Τα διαθέσιμα δεδομένα αποτελούνται από 32 έτη μηνιαίων μετρήσεων βροχόπτωσης, εξατμισοδιαπνοής και παροχής. Η επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από σταθμούς με την μέθοδο της τροποποιημένης μεθόδου Thiessen. Η εξατμισοδιαπνοή εκτιμήθηκε με την προσέγγιση Thornthwaite.

#### Μέση επιφανειακή υετόπτωση

Χρησιμοποιώντας τους σταθμούς όπου έχουμε ελέγξει την ομοιογένεια ως προς τον αξιόπιστο σταθμό, βρίσκουμε την μέση επιφανειακή υετόπτωση ή αλλιώς τη χωρική ολοκλήρωση σημειακών βροχοπτώσεων της λεκάνης μελέτης με τη μέθοδο της τροποποιημένης μεθόδου Thiessen, διορθωμένη για το μέσο υψόμετρο της λεκάνης με την μέθοδο της βροχοβαθμίδας. Η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται κυρίως από το πόσο πυκνή είναι η σημειακή πληροφορία αφού όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών τόσο πιο επιτυχής θα είναι η ολοκλήρωση.

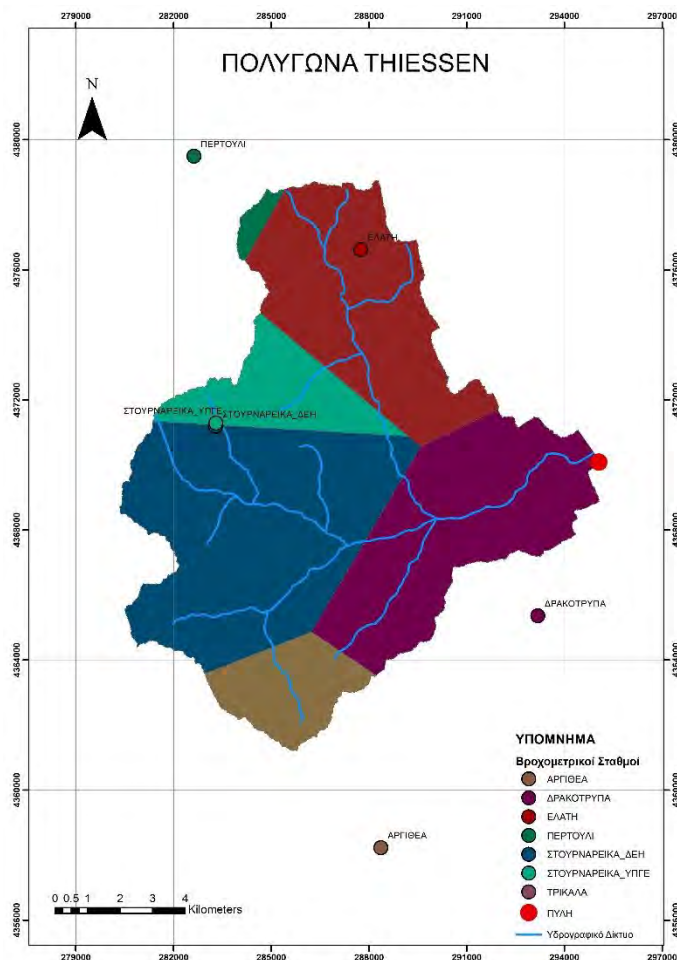
Με δεδομένα τα πολύγωνα Thiessen της υδρολογικής λεκάνης Πύλης (Πίνακας 2.2) και τη προϋπόθεση ότι η συνολική επιφάνεια  $S$  μοιράζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής  $S_i$ , μία για κάθε σταθμό, υπολογίζεται αρχικά:

$$\sum_{i=1}^k S_i = S \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής βάρους, που λαμβάνεται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του κάθε σταθμού, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$W_i = \frac{S_i}{S} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού να απέχει από τη θέση του σταθμού  $i$  λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή ουσιαστικά βασίζεται στις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.7. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο δημοφιλής αφού συνδέει απλότητα στην εφαρμογή με αξιόπιστες εκτιμήσεις. Τέλος όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών και όσο πιο ευρής είναι η χρονική κλίμακα που μελετείται, τόσο καλύτερες οι εκτιμήσεις, φαινόμενα που συμβαίνουν στην παρούσα εργασία, αφού έχουμε τουλάχιστον έξι σταθμούς και υπερετήσια κλίμακα.



Εικόνα 2.7 Πολύγωνα Thiessen

Τέλος εκτιμάται η επιφανειακή υετόπτωση της λεκάνης ως γραμμικός συνδυασμός των σημειακών βροχοπτώσεων επί το αντίστοιχο βάρος σε ένα πλήθος  $k$  σταθμών που βρίσκονται στη λεκάνη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i h_i$$

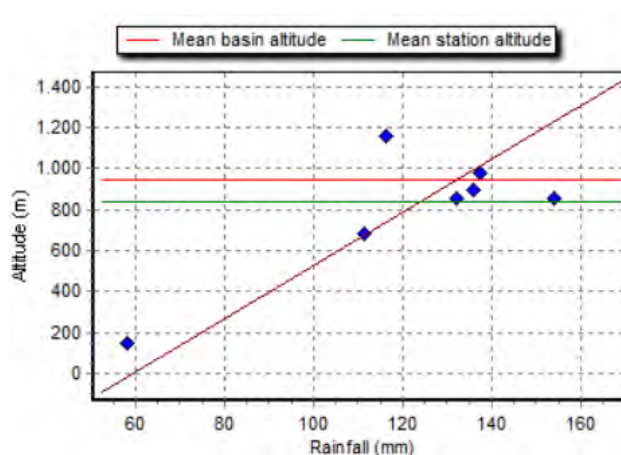
Εξίσωση 2.3

Όπου  $w_i$ : ο συντελεστής βάρους για κάθε έναν από τους  $k$  σταθμούς και  $h_i$ : τα σημειακά ύψη υετόπτωσης σε μια λεκάνη απορροής σε  $k$  πλήθος σταθμών.

Με τη χρήση των δεδομένων, βρέθηκε η σχέση μεταβολής της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο, σύμφωνα με την Εικόνα 2.8 και υπολογίζεται η μέση επιφανειακή βροχόπτωση ανηγμένη στο μέσο υψόμετρο.

Πίνακας 2.2 Στοιχεία μετεωρολογικών σταθμών

ΠΟΛΥΓΩΝΑ THIESSEN	Περιοχή (m <sup>2</sup> )	Βάρος	Υψόμετρο	Συντεταγμένη Χ	Συντεταγμένη Υ
ΑΡΓΙΘΕΑ	10625715.65	0.08	980	288367.56	4358234.5
ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ	29751402.95	0.23	680	293185	4365363
ΕΛΑΤΗ	30880936.86	0.23	900	287748	4376618
ΠΕΡΤΟΥΛΙ	1209908.87	0.01	1160	282626.5	4379493
ΣΤΟΥΡΝΑΡΕΙΚΑ_ΔΕΗ	47248317.85	0.36	860	283294	4371187
ΣΤΟΥΡΝΑΡΕΙΚΑ_ΥΠΓΕ	12500906.81	0.09	860	283300	4371287
ΤΡΙΚΑΛΑ	307901	0	149	307901	4379795
Total	132217189				



Εικόνα 2.8 Υπολογισμός βροχοβαθμίδας

### Μέση επιφανειακή θερμοκρασία

Χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους σταθμούς, βρίσκουμε την μέση επιφανειακή θερμοκρασία με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9. Όπως πριν με τη βροχόπτωση, έτσι και τώρα για την μέση επιφανειακή θερμοκρασία,



βρίσκουμε το άθροισμα των γινομένων του ποσοστού επιρροής που έχει κάθε σταθμός επί την αντίστοιχη τιμή της σημειακής θερμοκρασίας για τον εκάστοτε μήνα.

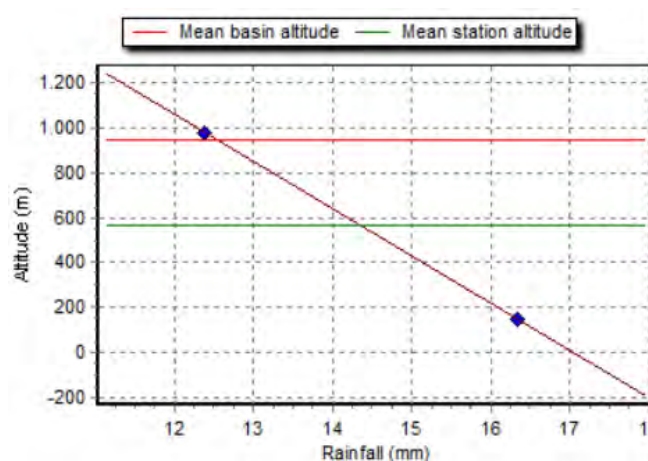
Στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση της θερμοβαθμίδας, με στόχο την αναγωγή της θερμοκρασίας στο μέσο υψόμετρο λεκάνης. Με τη θεώρηση της σχέσης, της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας για κάθε σταθμό και το αντίστοιχο υψόμετρο κάθε σταθμού, ως γραμμική, τοποθετούνται σε κοινό διάγραμμα. Τελικά η ανηγμένη επιφανειακή θερμοκρασία δίνεται από μία σχέση της μορφής:

$$T_s = T_\sigma - \alpha(z_s - z_a)$$

Εξίσωση 2.4

όπου  $T_\sigma$  η επιφανειακή θερμοκρασία κατά Thiessen,  $\alpha$  η βροχοβαθμίδα ( $^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$ ) και  $z_s - z_a$  η διαφορά του μέσου σταθμισμένου υψομέτρου από την μέθοδο Thiessen από το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης μας.

Η μέθοδος της θερμοβαθμίδας στηρίζεται στην παρατήρηση ότι η αύξηση του υψομέτρου επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας και χρησιμοποιεί την ετήσια θερμοβαθμίδα που περιγράφει την μείωση της ετήσιας θερμοκρασίας ανά 100 m αύξηση του υψομέτρου.



Εικόνα 2.9 Υπολογισμός Θερμοβαθμίδας

### Μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Potential Evapotranspiration)

Χρησιμοποιώντας την μέση επιφανειακή θερμοκρασία που έχουμε ήδη υπολογίσει, βρίσκουμε την μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή με την μέθοδο Thornthwaite, σε μηνιαία βάση. Μέσα από αυτή τη σχέση περιγράφεται η βιολογική και φυσική σημασία

που έχει η εξατμισοδιαπνοή στην κλιματική ταξινόμηση. Ως προς τη διαδικασία υπολογιστικής ισχύος είναι πολύ απλή και έχει ευρύτατη εφαρμογή. Για κάθε μήνα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$PET = 16L_D \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (mm) \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Όπου **PET** η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/μήνα, **T** η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής σε °C και **I** ο δείκτης θερμότητας που προκύπτει από τη σχέση:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \frac{T_n^{1.514}}{5} \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Όπου **T<sub>n</sub>** η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα, **L<sub>d</sub>** ένας διορθωτικός συντελεστής σύμφωνα με μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους και **a** ένας συντελεστής που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.000077 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239 \quad \text{Εξίσωση 2.7}$$

### Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (Reference evapotranspiration)

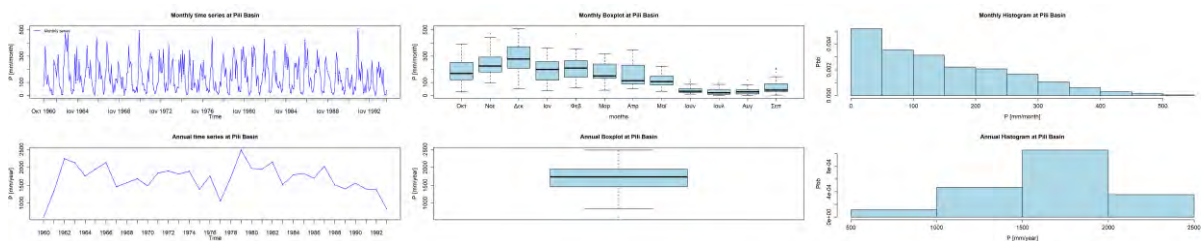
Σύμφωνα με τη σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω υποεκτιμάται η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ξηρά κλίματα. Για να ισοσταθμίσουμε αυτό το λάθος της υποεκτίμησης, πραγματοποιήθηκε προσαύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χονδρικά κατά 30%. Τα δεδομένα εισόδου αποτελούν άμεση είσοδο στα μοντέλα και επηρεάζουν την απόδοσή ενός μοντέλου για αυτό και είναι σημαντική η διερευνητική ανάλυση τους. Παρόλο που το αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι να διερευνηθεί περισσότερο τη δομή των μοντέλων και την απόδοσή τους υπό διαφορετικές μεθόδους βελτιστοποίησης, θα εξετάσουμε και τις δύο περιπτώσεις όπου θα γίνει σύγκριση και διερεύνηση των

αποτελεσμάτων που προκύπτουν λόγω της αβεβαιότητας δεδομένων εισόδου (Input Uncertainty).

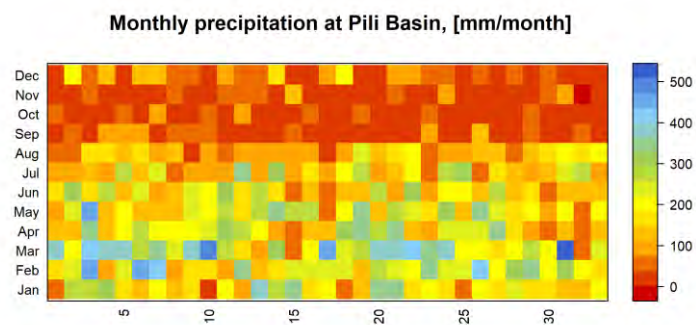
## 2.7 Γραφική απεικόνιση δεδομένων εισόδου

Ο πρώτος έλεγχος που πρέπει να κάνει κανείς είναι μια απλή οπτικοποίηση του διαθέσιμου συνόλου δεδομένων. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό λανθασμένων δεδομένων, ασυνεχειών στις χρονοσειρές, μεταξύ άλλων, τα οποία αποτελούν πιθανές πηγές αβεβαιότητας στην αξιολόγηση του μοντέλου. Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας γίνεται η γραφική απεικόνιση των δεδομένων χρονοσειρών για όλη τη χρονική περίοδο 1960-1993 (Βροχόπτωσης, Θερμοκρασίας, Εξατμισοδιαπνοής, Παρατηρημένης Απορροής) όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 2.10-2.17 .

### Βροχόπτωση

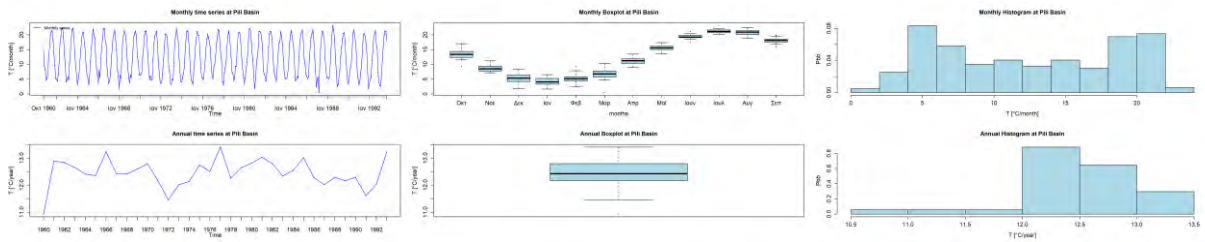


**Εικόνα 2.10** Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα βροχόπτωσης για τη περίοδο 1960-1993



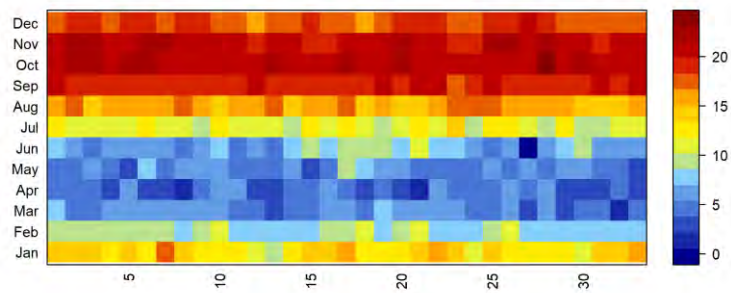
**Εικόνα 2.11** Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης για τη περίοδο 1960-1993

### Θερμοκρασία



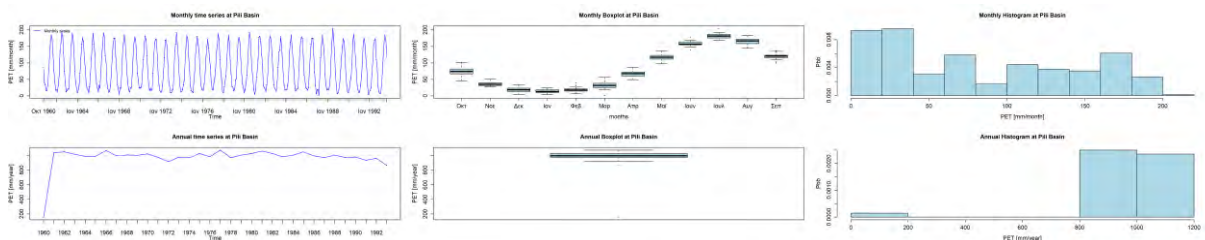
Εικόνα 2.12 Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα θερμοκρασίας για τη περίοδο 1960-1993

### Monthly Temperature at Pili Basin, [°C/month]

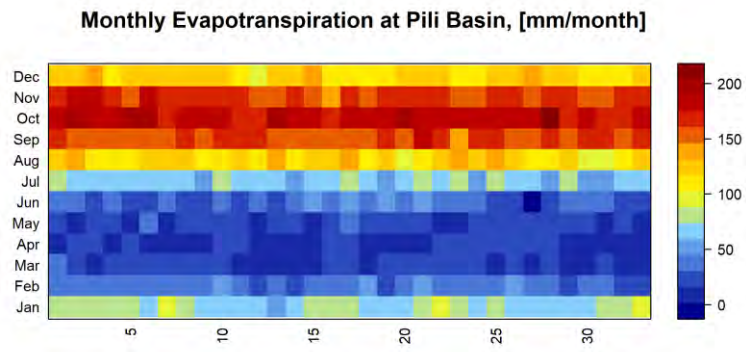


Εικόνα 2.13 Μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας για τη περίοδο 1960-1993

### Εξατμισοδιαπνοή

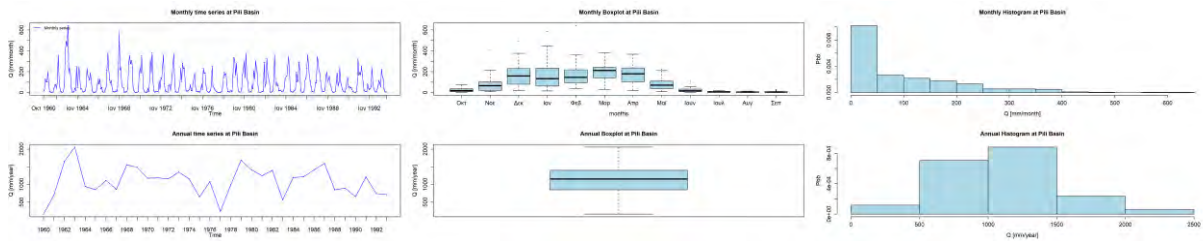


Εικόνα 2.14 Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα εξατμισοδιαπνοής για τη περίοδο 1960-1993

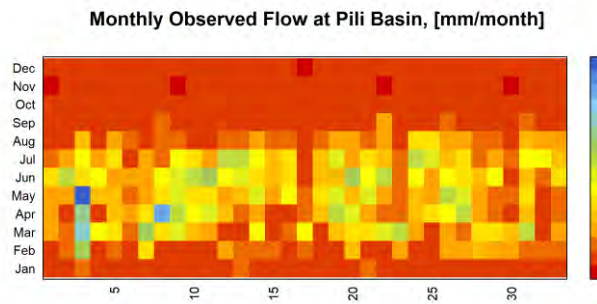


Εικόνα 2.15 Μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής για τη περίοδο 1960-1993

**Παρατηρημένη απορροή**



Εικόνα 2.16 Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα παρατηρημένης απορροής για τη περίοδο 1960-1993



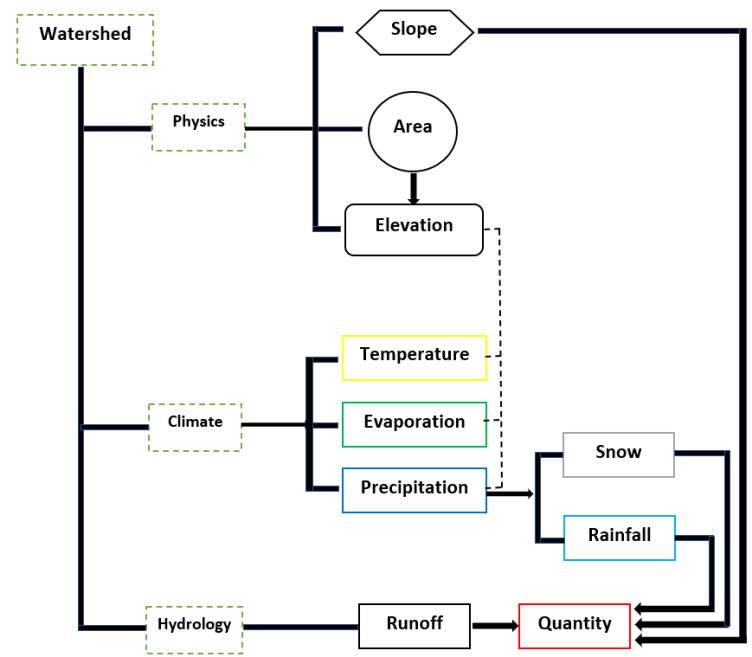
Εικόνα 2.17 Μηνιαίες τιμές παρατηρημένης απορροής για τη περίοδο 1960-1993

### 3 Υδρολογική Προσομοίωση

#### 3.1 Γενικά

Η προσομοίωση της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής στη λεκάνη απορροής είναι ιδιαίτερα σημαντική για την καλύτερη κατανόηση υδρολογικών θεμάτων, τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, τη μηχανική των ποταμών, τις αντιπλημμυρικές κατασκευές και την αποθήκευση πλημμυρών. Η προσομοίωση της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και των λεκανών απορροής απαιτεί τη χρήση εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη της απόκρισης σε σενάρια διαχείρισης σε διάφορες κλιματικές περιοχές.

Τα εννοιολογικά μοντέλα που συνήθως ονομάζονται και gray-box models είναι μοντέλα βροχής-απορροής που βασίζονται σε παρατηρούμενες ή υποτιθέμενες εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα σε διάφορες υδρολογικές μεταβλητές. Είναι μοντέλα που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες σε μία λεκάνη ή υπολεκάνη, διαδικασία που φαίνεται και στην εικόνα 3.1. Χαρακτηριστικό πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η απλότητά τους, αφού με τη χρήση ενός μικρού αριθμού παραμέτρων μπορούμε να προσομοιώσουμε πολύπλοκες φυσικές διεργασίες όπου παρουσιάζεται έντονη φυσική ανομοιογένεια.



Εικόνα 3.1 Υδρολογικές διεργασίες σε ένα μοντέλο

### **3.2 Βαθμονόμηση μοντέλων**

Η μακρά παράδοση της εμπειρογνομosύνης στη μοντελοποίηση στις περιβαλλοντικές επιστήμες και η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς είχαν ως αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να είναι διαθέσιμη μια μεγάλη σειρά υπολογιστικών μοντέλων. Εκτός από τις κρίσιμες απαιτήσεις, όπως η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των δεδομένων, κάθε μοντέλο πρέπει να είναι σε θέση να αναπαράγει με λογικό τρόπο τις παρατηρήσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Αυτό, προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα ελάχιστο επίπεδο εμπιστοσύνης στην προβλεπτική ικανότητα των εργαλείων αυτών, το οποίο είναι απαραίτητο για τους τελικούς χρήστες των προβλέψεων των μοντέλων.

Η διαδικασία περιορισμού των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε μετρούμενα εύρη παρατηρούμενων μεταβλητών ονομάζεται βαθμονόμηση του μοντέλου. Με τον όρο βαθμονόμηση μοντέλου εννοούμε μια διαδικασία με την οποία οι βασικές παράμετροι ενός μοντέλου προσαρμόζονται εντός φυσικών εφικτών ορίων και έχει ως στόχο την καλύτερη δυνατή προσαρμογή μεταξύ των παρατηρούμενων μεταβλητών και των αντίστοιχων προσομοιωμένων τους. Στην εξειδικευμένη βιβλιογραφία, η βαθμονόμηση των μοντέλων είναι επίσης αναφέρεται ως "βελτιστοποίηση/ εκτίμηση παραμέτρων".

Συνήθως όμως τέτοια μοντέλα υποφέρουν από υπερβολική παραμετροποίηση, δηλαδή υπάρχουν κάποιες περιττές παραμέτροι που δεν είναι πλήρως αναγνωρίσιμες (Beven, 2006). Επομένως, είναι απαραίτητη μια διαδικασία όπου καθορίζεται ο αριθμός των παραμέτρων που συμμετέχουν στη βαθμονόμηση του μοντέλου. Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων τεχνικών (π. χ. αναλύσεις με βάση τις ιδιοτιμές, τους παράγοντες και τις κύριες συνιστώσες), η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τον εντοπισμό των σχετικών παραμέτρων του μοντέλου και για τη βελτίωση της σταθερότητας της βαθμονόμησης του μοντέλου (βλ. π. χ. Hill and Tiedeman, 2007). Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί αναλυτικότερη περιγραφή και παρουσίαση παραδειγμάτων.

### **3.3 Περιγραφή μοντέλου GR2M**

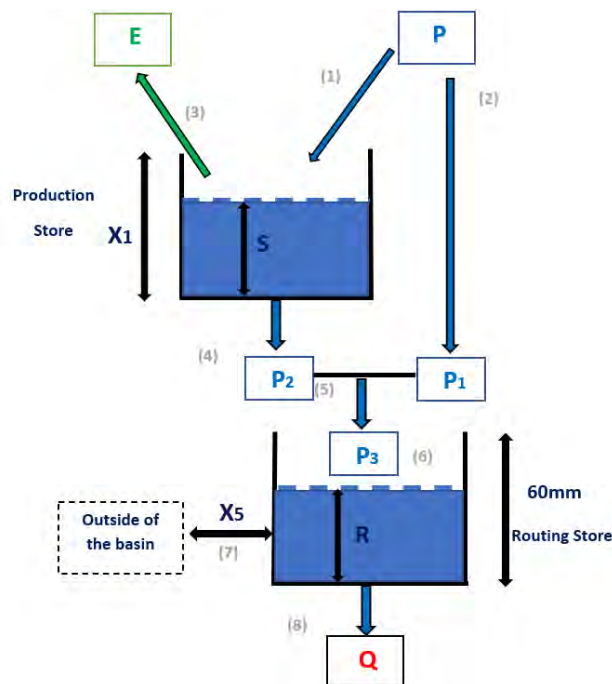
Το μοντέλο **GR2M** είναι ένα παγκόσμιο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο (Εικόνα 3.2) που λειτουργεί σε μηνιαία κλίμακα και χρησιμοποιεί τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή ως εισροές (Mouelhi et al., 2006). Οι εκφορτίσεις χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό παραμέτρων και αξιολόγησης της απόδοσης. Έχει δύο παραμέτρους  $X_1$  και



$X_2$  που μπορούν να βελτιστοποιηθούν: η πρώτη εξελίσσεται στη συνάρτηση παραγωγής και η δεύτερη στη συνάρτηση μεταφοράς. Η συνάρτηση παραγωγής οργανώνεται γύρω από μια εδαφική δεξαμενή "S" που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη χωρητικότητά της. Αυτή η δεξαμενή ρυθμίζει την ποσοτική πτυχή της μοντελοποίησης. Η συνάρτηση μεταφοράς χρησιμοποιείται για τη μετάφραση του τρόπου με τον οποίο η βροχόπτωση φτάνει στην έξοδο της λεκάνης, καθορίζοντας τη χρονική πορεία. Πρόκειται για το κλάσμα της καθαρής βροχής που δεν χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση της εδαφικής δεξαμενής.

Αν και αρχικά το μοντέλο είχε ξεκινήσει με τέσσερις παραμέτρους, προκειμένου να προσδιοριστούν ποια στοιχεία είναι σημαντικά σε ένα μηνιαίο μοντέλο βροχόπτωσης-ροής, υιοθετήθηκε μια μητρική δομή μοντέλου (PMS), η οποία αργότερα τροποποιήθηκε με διάφορους τρόπους και κατέλειξε σε δύο παραμέτρους. Επιβεβαιώθηκε ότι, από τη στιγμή που το μοντέλο έχει δύο ελεύθερες παραμέτρους, πολύ λίγα μπορούν να κερδηθούν με την προσθήκη μεγαλύτερης ευελιξίας.

Το **GR2M** λειτουργεί με δύο αποθήκες (Εικόνα 3.2): μια αποθήκη παραγωγής της οποίας η χωρητικότητα είναι η παράμετρος  $X_1$  και το πραγματικό περιεχόμενο είναι  $S$  και μια αποθήκη δρομολόγησης της οποίας η χωρητικότητα ορίζεται στα **60 mm** και το πραγματικό περιεχόμενο είναι  $R$ . Οι εισοδοί του μοντέλου είναι η μηνιαία βροχόπτωση ( $P$ ) και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή ( $E$ ) για ένα δεδομένο μήνα και η έξοδος είναι η μηνιαία απορροή στην έξοδο της λεκάνης  $Q$ .



Εικόνα 3.2 Διεργασίες Μοντέλου GR2M



**Μαθηματική δομή**

Η συνάρτηση απώλειας (υπεύθυνη για τον προσδιορισμό της πραγματικής βροχόπτωσης) στο μοντέλο GR2M βασίζεται σε μια αποθήκη εδαφικής υγρασίας. Λόγω της βροχόπτωσης  $P$ , η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας,  $S$ , γίνεται  $S_1$  που λαμβάνεται από τη σχέση:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Όπου,

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Και η παράμετρος  $X_1$ , η μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης, είναι θετική και εκφράζεται σε χιλιοστά. Το πλεονάζον τμήμα  $P_1$  που υπολογίζεται στην παρακάτω εξίσωση κατευθύνεται στην αποθήκη δρομολόγησης.

$$P_1 = P + S - S_1 \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Λόγω της εξατμισοδιαπνοής (ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εξαρτάται από τη δυνητική τιμή  $E$ ) και το  $S_1$  γίνεται  $S_2$ :

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi\left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Όπου,

$$\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Στη συνέχεια, η αποθήκη εδαφικής υγρασίας απελευθερώνει το νερό  $P_2$  και παίρνει τη νέα της τιμή,  $S$ , έτοιμη για τον επόμενο μήνα:

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{1/3}} \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Και

$$P_2 = S_2 - S$$

Εξίσωση 2.7

Το άθροισμα των **P1** και **P2** είναι η καθαρή βροχόπτωση, **P3**, που εισέρχεται στο τμήμα δρομολόγησης του μοντέλου.

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Εξίσωση 2.8

Επίσης, δεν υπάρχει άμεση εκφόρτιση με παράκαμψη της δεξαμενής δρομολόγησης, με συνέπεια να μην υπάρχει και εξωτερική παροχή. Η καθαρή βροχόπτωση **P3** δρομολογείται σε μια τετραγωνική δεξαμενή, με αποθηκευτικό χώρο **R**. Η χωρητικότητα της αποθήκης δρομολόγησης είναι ένας θετικός αριθμός εκφρασμένος σε χιλιοστά, όπου έχει βρεθεί ότι παίρνει βέλτιστη τιμή τα 60mm.

$$R_1 = R + P_3$$

Εξίσωση 2.9

Αφού έχει προστεθεί η είσοδος **P3** στη δεξαμενή δρομολόγησης για να ληφθεί το επίπεδο **R1**, υπολογίζεται ένας όρος εξωτερικής ανταλλαγής ως εξής:

$$F - (X_5 - X_1)R_1$$

Εξίσωση 2.10

Όπου, **X5** η παράμετρος της εξωτερικής ανταλλαγής και έχει θετική τιμή. Εάν το **X5** είναι μεγαλύτερο από 1, το **F** αντιπροσωπεύει κέρδος νερού για τη λεκάνη και απώλεια σε αντίθετη περίπτωση. Τότε, η στάθμη της δεξαμενής γίνεται:

$$R_2 = X_5 R_1$$

Εξίσωση 2.11

Τέλος, η παροχή του ταμιευτήρα υπολογίζεται με:

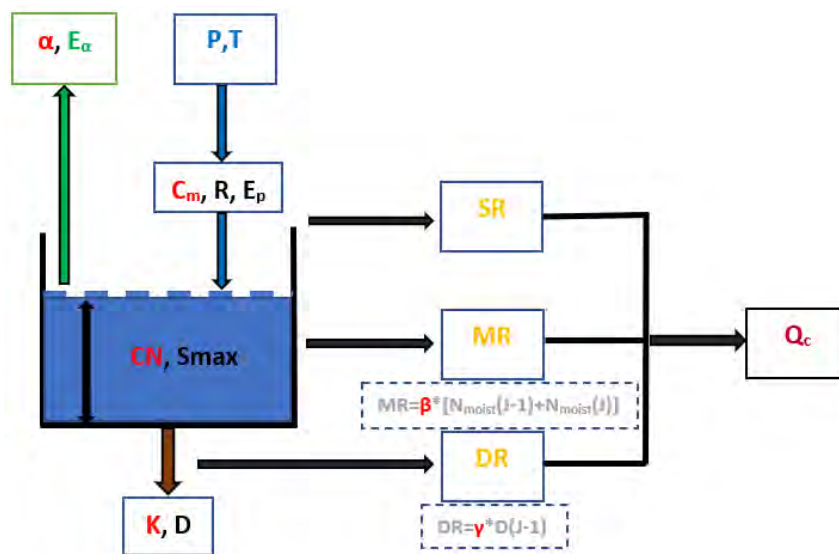
$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

Εξίσωση 2.12

Συνοπτικά, το μοντέλο **GR2M**, αποτελείται από δύο παραμέτρους (**X1**, η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας και **X5**, η παράμετρος της εξωτερικής ανταλλαγής) οι οποίες και παραμένουν ελεύθερες για να βελτιστοποιηθούν. Όσο για τις υπόλοιπες παραμέτρους με τις οποίες είχε ξεκινήσει το μοντέλο, έχει αποδειχθεί ότι πολύ λίγα μπορούν να κερδηθούν με την προσθήκη μεγαλύτερης ευελιξίας σε αυτές και για αυτό έχουν πάρει κάποια σταθερή τιμή.

### 3.4 Περιγραφή μοντέλου UTHBAL

Σε πολλά υδρολογικά μοντέλα, η απορροή που προκύπτει από τη τήξη του χιονιού σε ορεινές περιοχές, έχει αποδειχθεί πολύ σημαντική. Το μοντέλο **UTHBAL** (Εικόνα 3.3) αποτελεί μια υπορουτίνα υπολογισμού με στόχο τη διάκριση της υετόπτωσης σε βροχή και χιόνι όπως επίσης τη συγκέντρωση αλλά και την τήξη του χιονιού. Είναι ένα μοντέλο που αποτελείται από 6 παραμέτρους εκ τις οποίες οι δύο, το **CN** και ο συντελεστής κατείσδυσης **K**, μπορούν να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες, αλλά και χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας σημαντικά τους βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου, οπότε και τις παραμέτρους που θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν.



Εικόνα 3.3 Διεργασίες μοντέλου UTHBAL

#### Μαθηματική δομή

Με βάση κυρίως της θερμοκρασία περιβάλλοντος διαχωρίζεται η υετόπτωση σε βροχή και χιόνι. Για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $12.22^{\circ}\text{C}$  θεωρήθηκε ότι όλο το ποσοστό της υετόπτωσης είναι βροχή, ενώ για μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μικρότερες από  $-10^{\circ}\text{C}$ , όλο το ποσοστό της συνολικής υετόπτωσης είναι χιόνι. Για τιμές θερμοκρασίας ανάμεσα στα παραπάνω όρια, το χιόνι υπολογίζεται ως ποσοστό της υετόπτωσης που παρατηρήθηκε. Μετά από δικομές παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό της υετόπτωσης **S** που είναι χιόνι υπολογίζεται καλύτερα μέσα από τη λογιστική σχέση που εκφράζεται παρακάτω:

$$\%S = 0 \quad \text{για} \quad T \geq 12.22^{\circ}\text{C}$$

Εξίσωση 2.13

$$\%S = \frac{100}{1.35^T * 1.61 + 1} \quad \text{για} \quad -10^\circ\text{C} \leq T \leq 12.22^\circ\text{C} \quad \text{Εξίσωση 2.14}$$

$$\%S = 100 \quad \text{για} \quad T \leq -10^\circ\text{C} \quad \text{Εξίσωση 2.15}$$

Όπου,  $T$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία

Λαμβάνοντας υπόψιν τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα από τους γνωστούς σταθμούς, δηλαδή τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και τη μηνιαία υετόπτωση, υπολογίζεται η μηνιαία χιονόπτωση.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η δυνητική μηνιαία τήξη χιονιού εκφρασμένη σε mm/μήνα. Έχοντας ως δεδομένο την ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπολογίζεται η τήξη χιονιού από τη σχέση (degree-day method) (Semádeni-Davies, 1997):

$$M = C_m * T_{\text{μηνιαία}} \quad \text{Εξίσωση 2.16}$$

Όπου,  $C_m$  είναι παράμετρος με μονάδες mm/°C/μήνα και  $T$  η μηνιαία θερμοκρασία. Η παράμετρος  $C_m$  αλλάζει ανάλογα με τη φυτοκάλυψη, τη μορφολογία και κλιματολογία της περιοχής (πεδινή, ορεινή).

Έχοντας ως δεδομένα την εδαφική υγρασία και την μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή  $E_p$  του μήνα  $J$ , υπολογίζεται η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $E_a$ , σύμφωνα με τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win (Vandewiele & Ni-Lar-Win, 1998):

$$E_a(J) = \min \left\{ E_p(J) * \left( 1 - a \frac{S_{\text{moist}}(J)}{E_p(J)} \right), S_{\text{moist}}(J) \right\} \quad \text{Εξίσωση 2.17}$$

Όπου,  $S_{\text{moist}}(J)$  η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα  $J$  για γέμιση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και  $a$  ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.

Αφού έχει ικανοποιηθεί η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα  $J$   $AS_{\text{moist}}$ , από τη σχέση:

$$ASmoist(J) = Smoist(J) - E_a(J)$$

Εξίσωση 2.18

Η επιφανειακή απορροή, **SR**, του μήνα J υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SR(J) = (1 - K) * (ASmoist(J) - S_{max})$$

Εξίσωση 2.19

$$\text{για } ASmoist(J) > S_{max}$$

$$SR(J) = 0 \quad \text{για } ASmoist(J) \leq S_{max}$$

Εξίσωση 2.20

Όπου,  $S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$  η μέγιστη εδαφική υγρασία, **CN** το Curve Number της Soil Conservation Method (SCS, 1972) και **K** ο συντελεστής κατείσδυσης.

Η διήθηση προς τον υπόγειο υδροφόρα, **D**, του μήνα J υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(J) = K * (ASmoist(J) - S_{max})$$

Εξίσωση 2.21

$$\text{για } ASmoist(J) > S_{max}$$

$$D(J) = 0 \quad \text{για } ASmoist(J) \leq S_{max}$$

Εξίσωση 2.22

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J, **N<sub>moist</sub>**, υπολογίζεται αφαιρώντας από την υπολειπόμενη εδαφική υγρασία την επιφανειακή απορροή και τη διήθηση προς τον υπόγειο υδροφόρα:

$$Nmoist(J) = ASmoist(J) - SR(J) - D(J)$$

Εξίσωση 2.23

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία, **MR**, του μήνα J υπολογίζεται ως το γινόμενο ενός συντελεστή ενδιάμεσης απορροής, **β**, επί το άθροισμα της διαθέσιμης εδαφικής εργασίας του του μήνα J με εκείνη του προηγούμενου μήνα :

$$MR(J) = \beta * [Nmoist(J - 1) + Nmoist(J)]$$

Εξίσωση 2.24

Η υπολειπόμενη υγρασία στο τέλος του μήνα  $J$ ,  $NS_{moist}$ , υπολογίζεται ως η αφαίρεση της διαθέσιμης εδαφικής εργασίας του μήνα  $J$  και της ενδιάμεσης απορροής από την εδαφική υγρασία:

$$NS_{moist}(J) = N_{moist}(J) - MR(J) \quad \text{Εξίσωση 2.25}$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα  $J+1$ ,  $S_{moist}(J+1)$ , προκύπτει ως το άθροισμα της υπολειπόμενης υγρασίας στο τέλος του μήνα  $J$  και της βροχόπτωσης του επόμενου μήνα  $J+1$ :

$$S_{moist}(J + 1) = P(J + 1) + NS_{moist}(J) \quad \text{Εξίσωση 2.26}$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα,  $Q_g$ , του μήνα  $J$  υπολογίζεται ως το γινόμενο ενός συντελεστή βασικής απορροής ή συντελεστή εκροής του υδροφορέα,  $\gamma$ , επί τη διήθηση,  $D$ , του προηγούμενου μήνα  $J-1$ :

$$Q_g(J) = \gamma * D(J - 1) \quad \text{Εξίσωση 2.27}$$

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

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad \text{Εξίσωση 2.28}$$

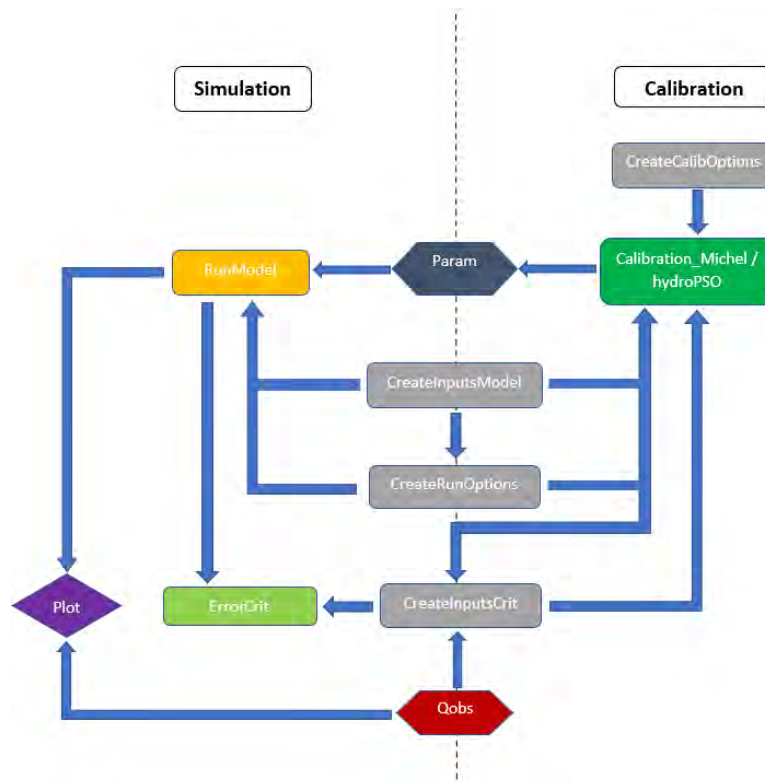


## 4 Προετοιμασία και βελτιστοποίηση Μοντέλων

### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή τη διπλωματική, το ίδιο σύνολο δεδομένων για την κατακρήμνιση, την εξατμισοδιαπνοή και την παρατηρούμενη απορροή, για τη λεκάνη απορροής της Πύλης Τρικάλων, χρησιμοποιήθηκε και στα 2 μοντέλα. Όλες οι εισροές ήταν σε mm. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κάθε μοντέλο αξιολογήθηκε σε λειτουργία προσομοίωσης για κάθε περίοδο χρησιμοποιώντας τιμές παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν για την άλλη περίοδο, σύμφωνα με την τεχνική split-sample. Η περίοδος προθέρμανσης των δεδομένων, είναι 1 χρόνος.

Όσο για τη προετοιμασία των λειτουργιών-εντολών που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον της R, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι και για τα δύο μοντέλα ακολουθήθηκε η ίδια λογική. Μια τέτοια διαδικασία, για τη λειτουργία των μοντέλων, απαιτεί εισαγωγή και προετοιμασία των δεδομένων, επιλογή επιθυμητών ορίων των παραμέτρων, επιλογή μεθόδου βαθμονόμησης και εισαγωγή κριτηρίων.



Εικόνα 4.1 Προετοιμασία των εντολών των μοντέλων



## 4.2 Ρύθμιση Μοντέλου GR2M

Όπως σε κάθε υδρολογικό μοντέλο η προετοιμασία των δεδομένων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη προσομοίωση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο GR2M, αλλά και σε όλα τα υπόλοιπα του airGR, παίρνουμε ως παραδοχή ότι τα επίπεδα αποθήκευσης παραγωγής και δρομολόγησης αποθηκευτικού επιπέδου έχουν ρυθμιστεί αντίστοιχα στο 30 % και στο 50 % της χωρητικότητάς τους. Επίσης επιλέγεται η περίοδος στην οποία θέλουμε να τρέξει το μοντέλο μας με την ίδια λογική της μεθόδου του χωριστού δείγματος (split sample test). Δηλαδή, η περίοδος για τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται σε διαφορετική περίοδο από αυτήν της επαλήθευσης. Το μήκος της χρονοσειράς δεδομένων για την ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου είναι το (50)% της συνολικής χρονοσειράς παρατηρημένης απορροής και το υπόλοιπο (50)% χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της προσομοίωσης. Τέλος για κάθε περίοδο πραγματικής εκτέλεσης του μοντέλου, επιλέγεται ο αρχικός χρόνος ως περίοδος προθέρμανσης.

Πίνακας 4.1 Όρια παραμέτρων μοντέλου GR2M

GR2M				
Σύμβολο	Λειτουργία	Αναφορά	Όρια	
			LOWER	UPPER
X1	μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης	Mouelhi et al, 2006	1	2000
X2	παράμετρος εξωτερικής ανταλλαγής		0.001	2

## 4.3 Ρύθμιση Μοντέλου UTHBAL

Πίνακας 4.2 Όρια παραμέτρων UTHBAL

UTHBAL				
Σύμβολο	Λειτουργία	Αναφορά	Όρια	
			LOWER	UPPER
Cm	παράμετρος φυτοκάλυψης	Loukas et al, 2007	1	10
CN	Curve Number (SCS)		30	100
$\alpha$	συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής		0	1
$\kappa$	συντελεστής κατεΐσδυσης		0	1
$\beta$	συντελεστής ενδιάμεσης απορροής		0	1
$\gamma$	συντελεστής βασικής απορροής		0	1

#### **4.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων**

Τα μοντέλα υποφέρουν γενικά από υπερβολική παραμετροποίηση, δηλαδή από υπερβολικό αριθμό (περιπτώσεων) παραμέτρων που δεν είναι πλήρως αναγνωρίσιμες (βλ. π. χ. Beven, 2006). Επομένως, στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται μια διαδικασία για τον επίσημο περιορισμό του αριθμού των παραμέτρων που εμπλέκονται στη βαθμονόμηση του μοντέλου. Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων τεχνικών (π. χ. αναλύσεις με βάση τις ιδιοτιμές, τους παράγοντες και τις κύριες συνιστώσες), η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τον εντοπισμό των σχετικών παραμέτρων του μοντέλου και για τη βελτίωση της σταθερότητας της βαθμονόμησης του μοντέλου (βλ. π. χ. Hill and Tiedeman, 2007).

Όπως αναφέρθηκε, η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων σε ένα υδρολογικό μοντέλο με πολλές παραμέτρους μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την διεξαγωγή αποφάσεων σχετικά με το μοντέλο και την ανάδειξη των “ευαίσθητων” παραμέτρων. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε ανάλυση ευαισθησίας με τη διαδικασία Latin-Hypercube One-factor-At-a-Time που αναπτύχθηκε από τους (van Griensven et al., 2006).

Μέσα από αυτή τη διαδικασία παράγεται μια κατάταξη, με την παράμετρο που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση να λαμβάνει την κατάταξη 1 και την ή τις παραμέτρους με τη μικρότερη επίδραση να λαμβάνουν κατάταξη ίση με το συνολικό αριθμό παραμέτρων (D). Η LH-OAT λειτουργεί με τη λήψη M LH σημείων δειγματοληψίας (M στρώματα για κάθε παράμετρο) και στη συνέχεια με μεταβολή, κατά ένα κλάσμα s, κάθε LH σημείου δειγματοληψίας D φορές, όπου D είναι ο αριθμός των παραμέτρων. Για κάθε σημείο δειγματοληψίας LH υπολογίζεται μια μερική επίπτωση για κάθε παράμετρο και στη συνέχεια, λαμβάνεται μια τελική επίπτωση (στην απόδοση/πρόβλεψη του μοντέλου) με τον μέσο όρο αυτών των μερικών επιπτώσεων. Η μέθοδος είναι πολύ αποδοτική και απαιτεί συνολικά μόνο  $M(D + 1)$  εκτελέσεις.

Η ανάλυση ευαισθησίας κατά Lhoat πραγματοποιήθηκε μόνο για το μοντέλο UTHBAL αφού στο μοντέλο GR2M και οι δύο παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του μοντέλου. Οι λεπτομέρειες της ανάλυσης ευαισθησίας που εφαρμόστηκε για το μοντέλο UTHBAL έχουν ως εξής:

- ✚ Η τροποποιημένη αποδοτικότητα Kling-Gurta (KGE2) χρησιμοποιείται ως μέτρο καλής προσαρμογής.
- ✚ Η περίοδος της ανάλυσης αντιστοιχεί στο διάστημα 1960-1993 με μηνιαίο χρονικό βήμα.
- ✚ Ο αριθμός των στρωμάτων για τη δειγματοληψία LH ορίστηκε ως  $M = 5000$ , ενώ το κλάσμα διακύμανσης ήταν 10%, δηλαδή  $s = 0,1$ .

## Αποτελέσματα

Η κατάταξη που προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας περιλαμβάνεται στη πρώτη στήλη του Πίνακα 4.3. Από αυτόν τον πίνακα βλέπουμε ότι από τις έξι παραμέτρους που εξετάζονται ως προς την ευαισθησία στο μοντέλο χρησιμοποιώντας ένα **KGE2** ως μέτρο καλής προσαρμογής για τις προσομοιώσεις μηνιαίας εκροής, η **Cm**, είναι σχετικά μη ευαίσθητη. Ωστόσο, δεν την έχουμε αποκλείσει από τη μετέπειτα ανάλυση και αυτό το σύνολο παραμέτρων αποτελεί τη βάση για την κλιμάκωση του μοντέλου **UTHBAL**.

*Πίνακας 4.3 Ανάλυση ευαισθησίας κατά LHOAT*

Ranking Number	Parameter	Relative importance	Relative importance Norm
1	CONGROUND	12513.973	0.20021716
2	CONMR	12289.805	0.19663059
3	aAET	11691.592	0.18705948
4	K	10729.301	0.17166332
5	CN	9048.466	0.14477082
6	Cm	6228.864	0.09965864

## 4.5 Βαθμονόμηση Μοντέλων (Calibration process)

### 4.5.1 Θεωρία

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τους γραμμικούς (π.χ. μέθοδος Simplex) και μη γραμμικούς όπου αυτοί μπορούν να υπόδιαιρθούν σε δύο ακόμα κατηγορίες, τους κλασικούς και τους εξελικτικούς. Στην οικογένεια των κλασικών μη γραμμικών αλγορίθμων ανήκει η μέθοδος των συζυγών

κλίσεων (conjugate gradient), ενώ στους εξελικτικούς περιλαμβάνονται τρεις μεγάλες κατηγορίες. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms), οι διαφορικοί (differential evolution) και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης με χρήση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι στηρίζονται στη βιολογική συμπεριφορά που παρατηρείται στη πραγματική ζωή, δηλαδή φυσικά γνωρίσματα που ορίζουν την εξέλιξη και την αλληλεπίδραση σε ένα πληθυσμό. Ένας τέτοιος ρεαλιστικός μηχανισμός μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά ένα πρόβλημα και να βοηθήσει εξαιρετικά στην βελτιστοποίηση του.

Στους εξελικτικούς αλγόριθμους αρχικά ορίζεται ένας αρχικός πλυσμός ατόμων-λύσεων. Στόχος είναι με κάθε επανάληψη του αλγορίθμου να υπάρχει μια συνεχής εξέλιξη των τιμών των λύσεων. Κάθε σημείο του πληθυσμού αποτελεί μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα, ενώ ταυτόχρονα αντιστοιχίζεται με ένα μέτρο ποιότητας του περιβάλλοντος του προβλήματος μέσω μια αντικειμενικής συνάρτησης.

Μια εξαιρετική ιδιότητα των εξελικτικών αλγορίθμων είναι ότι επιταγχάνεται η ταυτόχρονη εξερεύνηση των διαφορετικών περιοχών ενός χώρου. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ταυτόχρονη αξιοποίηση όλων των πληροφοριών της κάθε λύσης ξεχωριστά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μετά την τυχαία αρχικοποίηση των τιμών, το κάθε άτομο μεταβαίνει σε μια καλύτερη θέση ενημερώνοντας το περιβάλλον του και έτσι η διαδικασία επιλογής ευνοεί τα άτομα με την καλύτερη ποιότητα.

#### **4.5.2 Διαδικασία ροής**

Η βαθμονόμηση των μοντέλων σε κλίμακα λεκάνης απορροής είναι ένα δύσκολο έργο, λόγω των πιθανών αβεβαιοτήτων που μπορεί να υπάρχουν με τη μορφή απλοποίησης των διεργασιών, διεργασιών που δεν λαμβάνονται υπόψη από το μοντέλο και διεργασιών στη λεκάνη απορροής που είναι άγνωστες στον μοντελιστή.

Για τη βαθμονόμηση και την επικύρωση χρησιμοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η τεχνική split-sample. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την περίοδο 1960-1977 και για την επικύρωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 1977-1993 και αντίστροφα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούμε 1 χρόνο για προθέρμανση των δεδομένων.

Όσο για τους αλγόριθμους βαθμονόμησης, οι αλγόριθμοι γενικά απεικονίζουν τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσεως των παραμέτρων του μοντέλου που αντιστοιχούν στην επιφάνεια απόκρισης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται δύο κύριες κατηγορίες αλγορίθμων βελτιστοποίησης: οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης (LSA, εύρεση της χαμηλότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στην κοντινή περιοχή) και οι αλγόριθμοι παγκόσμιας αναζήτησης (GSA, εύρεση της χαμηλότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε ολόκληρη την περιοχή απόκρισης).

Η απόδοση και των δύο μοντέλων έπρεπε να αξιολογηθεί τόσο μεμονωμένα όσο και σε σύγκριση μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές τεχνικές βελτιστοποίησης, οι οποίες προσπαθούσαν να βελτιστοποιήσουν την τιμή τεσσάρων διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων (KGE, NSE, RMSE).

#### 4.5.3 Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης Michel

Ο αλγόριθμος του Michel συνδυάζει μια global και μια τοπική προσέγγιση. Αρχικά πραγματοποιείται διαλογή είτε με βάση ένα πρόχειρο προκαθορισμένο πλέγμα (λαμβάνοντας υπόψη διάφορες αρχικές τιμές για κάθε παράμετρο) είτε από έναν κατάλογο αρχικών συνόλων παραμέτρων. Το καλύτερο σύνολο που εντοπίζεται σε αυτόν τον έλεγχο χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως σημείο εκκίνησης για τον αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης με την απότομη κάθοδο.

Για την αναζήτηση αυτή, δεδομένου ότι τα εύρη των τιμών των παραμέτρων μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά, εφαρμόζονται απλοί μαθηματικοί μετασχηματισμοί στις παραμέτρους ώστε να μεταβάλλονται σε παρόμοιο εύρος και να έχουν παρόμοια ευαισθησία σε ένα προκαθορισμένο βήμα αναζήτησης. Αυτό γίνεται με τη χρήση των συναρτήσεων TransfoParam.

Κατά τη διάρκεια της μεθόδου απότομης καθόδου, σε κάθε επανάληψη, ξεκινάμε από ένα σύνολο παραμέτρων με Nparam τιμές (NParam είναι ο αριθμός των ελεύθερων παραμέτρων του επιλεγμένου υδρολογικού μοντέλου) και προσδιορίζουμε τις  $2 * NParam - 1$  νέες υποψήφια παραμέτρους αλλάζοντας μία προς μία τις διάφορες παραμέτρους (+/- βήμα αναζήτησης). Όλοι αυτοί οι υποψήφιοι δοκιμάζονται και ο καλύτερος διατηρείται ως σημείο εκκίνησης για την επόμενη επανάληψη. Στο τέλος κάθε επανάληψης, το βήμα αναζήτησης είτε αυξάνεται είτε μειώνεται για να προσαρμοστεί η ταχύτητα εξέλιξης. Επίσης μπορεί να γίνει ένα σύνθετο βήμα. Ο αλγόριθμος βαθμονόμησης σταματά όταν το βήμα αναζήτησης γίνει μικρότερο από ένα προκαθορισμένο όριο.

Σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, για παράδειγμα εάν η περίοδος βαθμονόμησης είναι πολύ σύντομη και κατά συνέπεια μη αντιπροσωπευτική της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής, ένας αλγόριθμος τοπικής βαθμονόμησης μπορεί να δώσει φτωχά αποτελέσματα.

#### 4.5.4 Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης με Σμήνος σωματιδίων

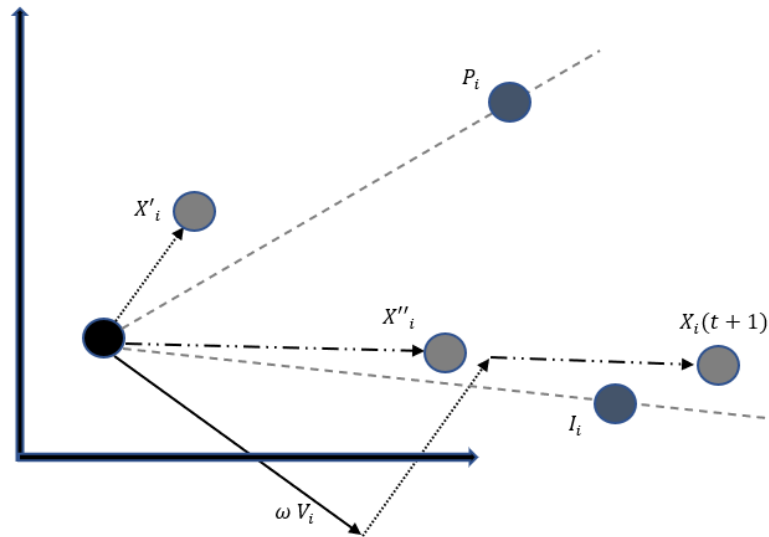
##### 4.5.4.1 Σμήνος σωματιδίων

Η Βελτιστοποίηση με χρήση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) αποτελεί μια πληθυσμιακή στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από την κοινωνική συμπεριφορά που έχουν τα σμήνη πουλιών. Αναπτύχθηκε από τους Dr. Eberhart και Dr. Kennedy το 1995 (Kennedy & Eberhart, 1995) ως μία εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση πολυδιάστατων προβλημάτων όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης. Η τεχνική αυτή είναι εμπνευσμένη από την αλληλεπίδραση και τη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών η ψαριών σε ένα περιβάλλον. Παρόλο που ένα τέτοιο σύνολο δε χαρακτηρίζεται από κάποια σαφή αρχή, εκμεταλεύεται τη λογική και την ομοιογένεια που διέπει μια τέτοια νοήμονα δράση.

Αναλόγως το πρόβλημα, σωματίδια κινούμενα στο χώρο δημιουργούν ένα σμήνος. Κάθε σωματίδιο αποτελεί μια λύση και ορίζεται από δύο διανύσματα, ένα της θέσης και ένα της ταχύτητας του. Με την κάθε επανάληψη του αλγορίθμου η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψιν τρεις παράγοντες.

- ❖ Τη προηγούμενη ταχύτητα του
- ❖ Την καλύτερη θέση του
- ❖ Την καλύτερη θέση του καλύτερου σωματιδίου

Ταυτόχρονα, σε κάθε επανάληψη κάθε σωματίδιο υπολογίζει το «προσωπικό» του βέλτιστο (το καλύτερο αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι στιγμής), ενώ ανάμεσα στα σωματίδια υπολογίζεται το ολικό βέλτιστο (το βέλτιστο όλων των προσωπικών βέλτιστων μέχρι στιγμής). Η κατεύθυνση και η απόσταση που χρειάζεται να διανύσει το σωματίδιο καθορίζεται από τη ταχύτητα, διαδικασία που φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Γεωμετρική ερμηνεία των αλγορίθμων Canonical και Standard PSO μέχρι το 2007

Κατά τη πρώτη επανάληψη ξεκινά μια τυχαία αρχικοποίηση της θέσης και της ταχύτητας κάθε σωματιδίου στο χώρο των παραμέτρων. Εξετάζοντας ένα χώρο αναζήτησης D-διαστάσεων, η θέση και η ταχύτητα για το i-οστό σωματίδιο αντιπροσωπεύονται από  $\vec{X}_i$  και  $\vec{V}_i$  αντίστοιχα. Η απόδοση κάθε σωματιδίου αξιολογείται μέσω ενός ειδικού για το πρόβλημα μέτρου απόδοσης, το οποίο αποτελεί τη βάση για την ενημέρωση του  $\vec{X}_i$ . Η καλύτερη γνωστή θέση του i-οστού σωματιδίου (προσωπική/προηγούμενη καλύτερη θέση) αντιπροσωπεύεται από τη σχέση  $\vec{P}_i$ , ενώ η καλύτερη γνωστή θέση στη γειτονιά του σωματιδίου (τοπική καλύτερη), αντιπροσωπεύεται από  $\vec{L}$ . Η ταχύτητα και η θέση του i-οστού σωματιδίου ενημερώνονται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\vec{V}_i^{t+1} = \omega \vec{V}_i^t + c_1 \vec{U}_1^t (\vec{P}_i^t - \vec{X}_i^t) + c_2 \vec{U}_2^t (\vec{L}^t - \vec{X}_i^t) \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

$$\vec{X}_i^{t+1} = \vec{X}_i^t + \vec{V}_i^{t+1} \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

όπου  $i = 1, 2, \dots, N$ , με N ίσο με το μέγεθος του σμήνους, και  $t = 1, 2, \dots, T$ , με T ίσο με τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Ο συντελεστής  $\omega$  είναι το βάρος αδράνειας,  $c_1$  και  $c_2$

είναι οι συντελεστές γνωστικής και κοινωνικής επιτάχυνσης, και  $\vec{V}_1$  και  $\vec{V}_2$  είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα τυχαία διανύσματα εντός του εύρους  $[0, 1]$ .

Όπως παρατηρείται, η συνάρτηση της ταχύτητας λαμβάνει υπόψη τα προσωπικά και ολικά βέλτιστα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η θέση του σωματιδίου στην επόμενη επανάληψη και να «έλκεται» από το προσωπικό και το ολικό βέλτιστο σε διαφορετικό βαθμό.

Η γνωστική συνιστώσα του σωματιδίου που εκφράζεται μέσα από το συντελεστή  $c_1$  υποδηλώνει τη μνήμη του σωματιδίου σχετικά με την ατομική βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί και την επιστροφή σε αυτήν, σαν μια ευχάριστη ανάμνηση του παρελθόντος. Μεγάλες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν μεγάλη τάση για επιστροφή σε θέση που είχε ικανοποιηθεί στο παρελθόν.

Η κοινωνική συνιστώσα από την άλλη, που εκφράζεται μέσα από το συντελεστή  $c_2$  υποδηλώνει τη πίεση που παρέχει το κοινωνικό σύνολο προς το σωματίδιο, προκειμένου να αφομοιώσει μια κοινή συνολική συμπεριφορά. Αλλιώς θα μπορούσε να ερμηνεύσει την επιθυμία των ατόμων να υιοθετήσουν μια κοινή κοινωνική νοοτροπία, με αποτέλεσμα οι θέσεις τοπικού/ολικού βέλτιστου να αποτελούν πόλους έλξης. Μεγάλες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν μεγάλη τάση για μετακίνηση του σωματιδίου προς τη περισσότερο αποδεκτή θέση του σμήνους.

Τέλος, με την εισαγωγή του βάρους αδράνειας ( $\omega$ ), επιτυγχάνεται η αποφυγή της έκρηξης του σμήνους, δηλαδή της ανεξέλεγκτης αύξησης της ταχύτητας των σωματιδίων.

#### 4.5.4.2 Βασικές παράμετροι Σμήνους Σωματιδίων

Το μέγεθος του σμήνους, η μέγιστη ταχύτητα, ο αριθμός των επαναλήψεων, οι συντελεστές της επιτάχυνσης και ο συντελεστής της αδράνειας είναι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τη τεχνική του σμήνους των σωματιδίων. Όπως είναι φυσικό, σε κάθε ρεαλιστικό πρόβλημα οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων αυτών διαφέρουν και για αυτό το λόγο είναι επιτακτική η ανάγκη για τη ρύθμιση τους και κατά συνέπεια τη βέλτιστη επίδοση και λειτουργία της μεθόδου.

##### ❖ Μέγεθος σμήνους

Το μέγεθος του σμήνους συνεπάγεται το πλήθος των σωματιδίων που ανήκουν σε αυτό. Λαμβάνοντας υπόψιν μια ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο, όσο πιο μεγάλο το πλήθος το



μεγαλύτερη η διασπορά. Ωστόσο, ένα μεγάλο σμήνος παρά την αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα που επιφέρει, δε βελτιώνει απαραίτητα την μέθοδο.

#### ❖ Μέγιστη ταχύτητα

Με στόχο την αποφυγή της κίνησης των σωματιδίων εκτός του πεδίου αναζήτησης, καθορίζεται η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει ένα σωματίδιο σε μία επανάληψη. Συνήθως περιορίζεται από τα επιτρεπτά όρια του χώρου αναζήτησης της θέσης.

#### ❖ Αριθμός επαναλήψεων

Όσο λιγότερες είναι οι επαναλήψεις τόσο πιθανότερο είναι να τερματιστεί η αναζήτηση χωρίς να έχει βρεθεί κάποια ικανοποιητική λύση. Αντιθέτως, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός επαναλήψεων τόσο πιο υπολογιστικά περίπλοκο θα γίνει το πρόβλημα. Συνεπώς, αναλόγως το κάθε πρόβλημα ορίζεται και ο αντίστοιχος αριθμός επαναλήψεων.

#### ❖ Συντελεστές επιτάχυνσης

Όπως αναφέραμε παραπάνω η γνωστική συνιστώσα του σωματιδίου που εκφράζεται μέσα από το συντελεστή  $c_1$ , θα μπορούσε να συμβολίσει την εμπιστοσύνη του σωματιδίου στον εαυτό του, ενώ η κοινωνική συνιστώσα  $c_2$ , την εμπιστοσύνη στο περιβάλλον σμήνος. Εάν  $c_2 = 0$  και  $c_1 > 0$ , τότε χάνεται η κοινωνική αλληλεπίδραση και το καθένα σωματίδιο λειτουργεί αυτόνομα και τοπικά. Αντιθέτως, εάν  $c_1 = 0$  και  $c_2 > 0$ , συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή το σμήνος λειτουργεί συγκεντρωτικά και έλκεται εννιαία από το βέλτιστο. Κατάλληλη ισορροπία ανάμεσα στην κοινωνικότητα και ατομικότητα μπορεί να επιτευχθεί όταν  $c_1 \approx c_2$ . Ωστόσο, με χαμηλές τιμές και των δύο συντελεστών επιτυγχάνεται καλύτερη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης αφού τα σωματίδια μπορούν να πετούν σε ομαλές τροχιές χωρίς να συγκλίνουν σε περιοχές τοπικών/ολικού βέλτιστου. Πάλι, αναλόγως τη φύση του προβλήματος ορίζονται και οι αντίστοιχες τιμές.

#### ❖ Συντελεστής αδράνειας

Με τη μνήμη που διατηρούν τα σωματίδια και το σμήνος, αποφεύγονται τα τοπικά ακρότατα. Ωστόσο τυχαίνει το σμήνος μερικές φορές να αλληλοεπηρεάζεται σε τέτοιο βαθμό που να προσπεράσει την λύση και τα όρια της αντικειμενικής συνάρτησης. Ουσιαστικά ο συντελεστής αυτός ελέγχει την ορμή των σωματιδίων, το πως η νέα ταχύτητα μπορεί να επηρεαστεί από τη μνήμη της προηγούμενης πορείας του σωματιδίου. Γενικά

μικρές τιμές του  $\omega$ , καθώς και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας συνεπάγονται μείωση της ικανότητας των σωματιδίων να εξερευνήσουν το χώρο αναζήτησης.

#### 4.5.4.3 Τοπολογίες

Τα σωματίδια μέσα στο σμήνος αλληλεπιδρούν σύμφωνα με ένα κοινό σύνολο συνδέσμων, το οποίο ελέγχει την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα σωματίδια, γνωστό ως τοπολογία σμήνους. Το σύνολο των σωματιδίων που "ενημερώνουν" το  $i$ -οστό σωματίδιο ορίζεται ως η γειτονιά του σωματιδίου, μέλος της οποίας αποτελεί και το ίδιο το σωματίδιο. Με αυτή τη γειτονιά ορίζεται και η κοινωνική αλληλεπίδραση ανάμεσα στα σωματίδια.

Παραδοσιακές τοπολογίες για τη συγκεκριμένη τεχνική βελτιστοποίησης αφορούν κυρίως δύο γειτονιές σμήνους, τις τοπικά και ολικά βέλτιστες ( $lbest$ ,  $gbest$  αντίστοιχα). Η γειτονιά  $gbest$  ουσιαστικά είναι ένα πλήρως συνδεδεμένο κοινωνικό δίκτυο, μέσα στο οποίο κάθε άτομο συγκρίνει τις επιδόσεις του με τα υπόλοιπα, μιμούμενο το καλύτερο, καθώς προσελκύεται στην καλύτερη λύση του σμήνους. Αντίστοιχα, στη γειτονιά  $lbest$  οι άμεσοι γείτονες είναι αυτοί που επηρεάζουν την καλύτερη απόδοση του κάθε ατόμου.

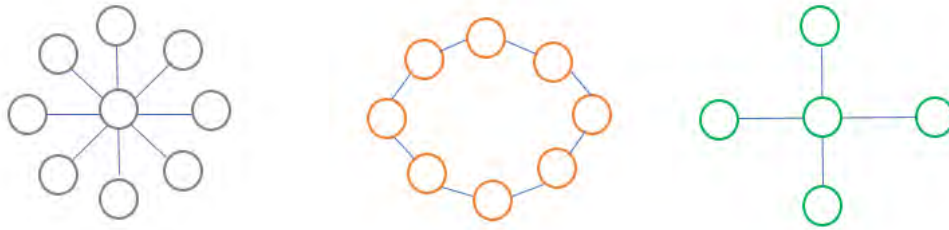
Κάποιες από τις βασικές τοπολογίες γειτονιάς είναι η τοπολογία αστέρα ( $gbest$ ), η κυκλική τοπολογία ( $lbest$ ), η τοπολογία Von Neumann ( $lbest$ ) και η προσαρμοστική τυχαία τοπολογία.

Στη τοπολογία αστέρα υπάρχει ένα κεντρικό σωματίδιο που λειτουργεί ως σημείο ανταλλαγής πληροφορίας. Αναλόγως την καλύτερη θέση των γειτόνων του, προσαρμόζει τη θέση του και αν η καινούρια του θέση βελτιώνει τη συνάρτηση καταλληλότητας, τότε η πληροφορία μεταδίδεται στη γειτονιά του. Να σημειωθεί ότι με χρήση αυτής της τοπολογίας επιβραδύνεται η ενημέρωση των ικανοποιητικών θέσεων στο σμήνος.

Στην κυκλική τοπολογία τα σωματίδια παίρνουν κυκλικό σχήμα. Ωστόσο, λόγω της γεωμετρίας, παρόλο που το κάθε σωματίδιο έχει μόνο 2 γείτονες, το καθένα από αυτά επικαλύπτεται από κάποιο άλλο, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η σύγκλιση σε μία και μόνο λύση. Ο χρόνος μετάδοσης της πληροφορίας καθώς και της σύγκλισης μπορεί να είναι μεγάλος, αλλά δίνεται η δυνατότητα έτσι για καλύτερη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης.

Στη τοπολογία Von Neumann, το κάθε σωματίδιο έχει άμεση επαφή με τέσσερα άλλα, αναπαριστώντας ένα σταυρό δύο διαστάσεων. Αντίθετα στην προσαρμοστική τυχαία

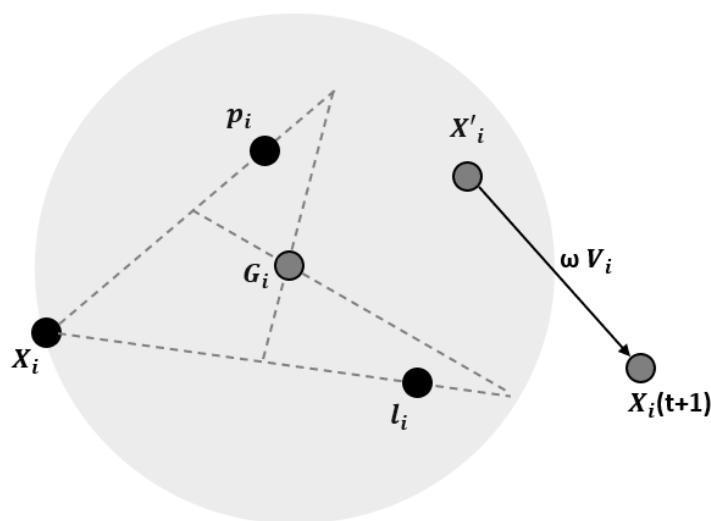
τοπολογία, κάθε σωματίδιο ενημερώνει τυχαία  $K$  σωματίδια μαζί με τον εαυτό του. Όταν δεν υπάρχει κάποια βελτίωση στο ολικό βέλτιστο, γίνεται τυχαία συνδεσμολογία ανάμεσα στα σωματίδια. Στην Εικόνα 4.3 φαίνονται οι τοπολογίες που αναφέρθηκαν.



**Εικόνα 4.3** Διαγράμματα τοπολογιών α) αστέρα, β) δακτυλίου, γ) Von Neumann

#### 4.5.4.4 Standard PSO 2011

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τροποποιήσεις της μεθόδου βελτιστοποίησης με χρήση σμήνους σωματιδίων, οι οποίες έχουν στόχο τη βελτίωση κάποιου χαρακτηριστικού του μοντέλου αναλόγως τις ανάγκες του κάθε προβλήματος. Ο αλγόριθμος όπου μελετείται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι ο Standard PSO 2011. Σύμφωνα με τους άλλους αλγόριθμους, η ενημέρωση της ταχύτητας γινόταν διάσταση προς διάσταση (εξίσωση 3.1) και το σύστημα συντεταγμένων έπαιξε σημαντικό ρόλο στην απόδοση του αλγορίθμου. Στην εικόνα 4.2 είναι εμφανές κάτι τέτοιο και δείχνει ότι για κάθε σωματίδιο και σε κάθε χρονικό βήμα, η κατανομή όλων των επόμενων δυνατών θέσεων (DNPP) είναι ένας συνδυασμός δύο ορθογωνίων  $D$  με πλευρές παράλληλες στους άξονες, με ομοιόμορφη κατανομή πιθανότητας μέσα σε κάθε ορθογώνιο.



**Εικόνα 4.4** Γεωμετρική ερμηνεία του αλγορίθμου Standard PSO 2011 (SPSO-2011)

Σε αντίθεση με αυτούς, ο Standard PSO 2011 εκμεταλλεύεται την ιδέα του αναλλοίωτου της περιστροφής (Εικόνα 4.4). Για κάθε σωματίδιο και σε κάθε χρονικό βήμα, ορίζεται ένα κέντρο βάρους ( $\vec{G}_i$ ) γύρω από τρία σημεία: την τρέχουσα θέση ( $\vec{X}_i^t$ ), ένα σημείο λίγο "πέρα" από τη προηγούμενη καλύτερη προσωπική θέση ( $\vec{p}_i^t$ ) και ένα σημείο λίγο "πέρα" από την προηγούμενη καλύτερη θέση στη γειτονιά ( $\vec{l}_i^t$ ), ως εξής:

$$\vec{p}_i^t = \vec{X}_i^t + c_1 \vec{U}_1^t (\vec{P}_i^t - \vec{X}_i^t) \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

$$\vec{l}_i^t = \vec{X}_i^t + c_2 \vec{U}_2^t (\vec{L}^t - \vec{X}_i^t) \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

$$\vec{G}_i^t = \frac{(\vec{X}_i^t + \vec{p}_i^t + \vec{l}_i^t)}{3} \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

Στη συνέχεια, ένα τυχαίο σημείο  $\chi'$  ορίζεται τότε στην υπερσφαίρα

$H_i(\vec{G}_i^t, \|\vec{G}_i^t - \vec{X}_i^t\|)$ . Η εικόνα 4.4 δείχνει ότι η υποσφαιρίδα του DNPP που λαμβάνεται σε αυτή την περίπτωση είναι μια σφαίρα διάστασης  $D$ , η οποία είναι αναλλοίωτη από την περιστροφή γύρω από το κέντρο της. Ο χώρος αναζήτησης μοιάζει με ένα παράθυρο διάστασης  $D$  που μας επιτρέπει να "δούμε" μέρος της επιφανειακής απόκρισης της συνάρτησης. Όταν αυτή η επιφάνεια περιστρέφεται, ορισμένα σημεία εγκαταλείπουν το αρχικό παράθυρο ενώ άλλα εμφανίζονται σε αυτό, τροποποιώντας έτσι το πρόβλημα προς επίλυση (Clerc, 2010). Στον Standard PSO 2011 ενώ η θέση του σωματιδίου ακολουθεί πάλι την εξίσωση 3.2, η ταχύτητα ενημερώνεται ως εξής:

$$\vec{V}_i^{t+1} = \omega \vec{V}_i^t + H_i(\vec{G}_i^t, \|\vec{G}_i^t - \vec{X}_i^t\|) - \vec{X}_i^t \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

Επιπλέον, στο SPSO-2011 το μέγεθος του σμήνους καθορίζεται από τον χρήστη ενώ ο αλγόριθμος ξεκινά με τη σύνδεση όλων των σωματιδίων χρησιμοποιώντας μια τυχαία τοπολογία ( $K = 3$ ), ενώ τα άλλα στοιχεία αρχικοποιούνται ως εξής:

$$X_i^0 = U(\min_d, \max_d)$$

Εξίσωση 3.7

$$V_i^0 = \frac{U(\min_d, \max_d) - X_i^0}{2}$$

Εξίσωση 3.8

$$p_i^0 = X_i^0$$

Εξίσωση 3.9

$$l_i^0 = \min(f(p_i^0))$$

Εξίσωση 3.10

όπου ο δείκτης  $\mathbf{0}$  αναφέρεται στις αρχικές συνθήκες και  $U(\min_d, \max_d)$  είναι ένας τυχαίος αριθμός στο  $[\min_d, \max_d]$  που αντλείται σύμφωνα με ομοιόμορφη κατανομή. Όταν ένα σωματίδιο "πετάει" έξω από το εύρος  $[\min_d, \max_d]$ , κάθε όριο του χώρου αναζήτησης λειτουργεί ως τοίχος απορρόφησης, τροποποιώντας τη θέση του σωματιδίου που έχει συμπέσει με τη τιμή του ορίου και μηδενίζοντας την ταχύτητα του σωματιδίου.

Τέλος, πέρα από τους περιορισμούς που ήδη αναφέραμε, οι συντελεστές επιτάχυνσης  $c_1$  και  $c_2$  παίρνουν τη τιμή  $0.5 + \ln(2)$ , το βάρος αδράνειας τη τιμή  $\omega = 1/(2 * \ln(2))$ , ενώ το εύρος της ταχύτητας των σωματιδίων είναι ανάμεσα στα όρια  $[-\bar{X}^{max}, \bar{X}^{max}]$ .

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την εκτέλεση του αλγορίθμου θα αναφερθούν αναλυτικά σε παρακάτω κεφάλαιο.

Ο αλγόριθμος **SPSO-2011** συνοψιστεί ως εξής:

```

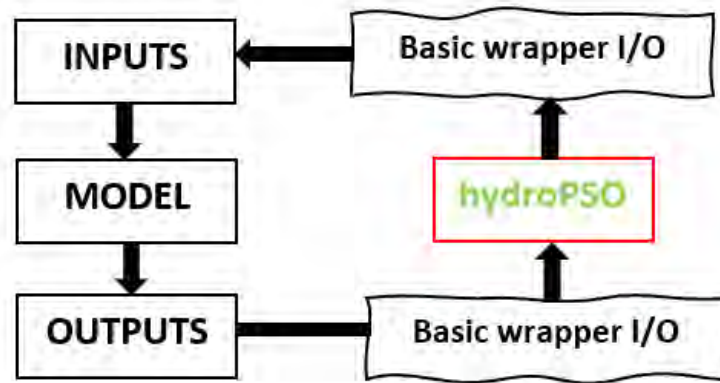
1: for i = 1 to N do { Για κάθε σωματίδιο του σμήνους }
2: Αρχικοποίηση των θέσεων ( $\vec{X}_i$ ) και των ταχυτήτων ( $\vec{V}_i$ ) των σωματιδίων
3: Αρχικοποίηση του προσωπικού/προηγούμενου καλύτερου,  $\vec{P}_i$ , και του τοπικού
   καλύτερου,  $\vec{G}$ 
4: end for
5: repeat
6:   for i = 1 to N do
7:     Ενημέρωση της ταχύτητας του σωματιδίου χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.6
8:     Ενημέρωση της θέσης του σωματιδίου με την εξίσωση 3.2
9:     if  $f(\vec{X}_i) < f(\vec{P}_i)$  then { ελαχιστοποίηση της f }
10:      Ενημέρωση της καλύτερης γνωστής θέσης του σωματιδίου  $\vec{P}_i = \vec{X}_i$ 
11:      if  $f(\vec{P}_i) < f(\vec{L})$  then { ελαχιστοποίηση της f }
12:        Ενημέρωση της καλύτερης γνωστής θέσης της γειτονιάς  $\vec{L} = \vec{P}_i$ 
13:      end if
14:    end if
15:  end for
16: until [αριθμός επαναλήψεων (T) ή επιτευχθεί το σφάλμα ανοχής]

```

*Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου SPSO-2011*

#### 4.5.4.5 Προδιαγραφές της μεθόδου

Το hydroPSO δεν περιορίζεται σε έναν περιορισμένο αριθμό υδρολογικών μοντέλων, μπορεί να διασυνδεθεί με οποιοδήποτε μοντέλο με σχετικά μικρή προσπάθεια προγραμματισμού και επιτρέπει τον παραλληλισμό. Κατ' αρχήν, το hydroPSO χρειάζεται μόνο να γνωρίζει ποιες παράμετροι του μοντέλου πρέπει να βαθμονομηθούν, πού πρέπει να εγγραφούν και από πού και πώς να διαβαστεί η κύρια έξοδος του μοντέλου. Ένα τέτοιο διάγραμμα ροής της εφαρμογής/αλληλεπίδρασης μεταξύ του hydroPSO και του κώδικα του μοντέλου που πρόκειται να βαθμονομηθεί φαίνεται στην εικόνα 4.6. Ο μηχανισμός βαθμονόμησης του hydroPSO επικοινωνεί με οποιοδήποτε μοντέλο μέσω απλών αρχείων ASCII ή/και συναρτήσεων περιτύλιξης R, για την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους βαθμονόμησης. Στη συνέχεια, βελτιστοποιεί ένα μέτρο καλής προσαρμογής που ορίζει ο χρήστης μέχρι να ικανοποιηθεί ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ή ένα κριτήριο σύγκλισης. Τέλος, οι προηγμένες λειτουργίες γραφικής παράστασης διευκολύνουν την ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης. Η μέθοδος αυτή έχει υψηλό ποσοστό σύγκλισης και κατάλληλο υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα ροής μοντέλου – hydroPSO

Η ταχύτητα και η θέση των σωματιδίων εξελίσσονται σύμφωνα με τη διαμόρφωση PSO που έχει ορίσει ο χρήστης, μέχρι να πληρούνται κάποια κριτήρια τερματισμού όπως αναφέρθηκαν παραπάνω (π. χ. μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maxiter) ή οι σχετικές (reltol) ή απόλυτες (abstol) ανοχές είναι μικρότερες από ένα όριο που έχει οριστεί όπως φαίνεται παρακάτω.

- ❖ Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maxiter): 50
- ❖ Αριθμός σωματιδίων στο σμήνος: 40
- ❖ Σχετικές (reltol) ανοχές είναι μικρότερες από:  $1E-10$
- ❖ Δεν γίνεται παραλληλισμός

Τέλος, επιστρέφεται το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων, όλες οι δειγματοληπτικές παραμέτροι και η αντίστοιχη καλή προσαρμογή τους, οι έξοδοι του μοντέλου, οι ταχύτητες των σωματιδίων και τα μέτρα σύγκλισης.

#### 4.6 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούν ένα μέτρο για το πόσο διαφέρει το παράγωγο ενός μοντέλου και το παρατηρούμεν αντίστοιχο (προσομοιωμένες-παρατηρημένες τιμές απορροής). Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης προσαρμόζουν τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου επαναληπτικά μέχρι να συγκλίνουν (δηλαδή μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις στη διαδικασία βαθμονόμησης.

Οι μέθοδοι βαθμονόμησης, βασίζονται στη μεγιστοποίηση του κριτηρίου NSE, KGE, σε αντίθεση με το κριτήριο RMSE όπου στοχεύεται η ελαχιστοποίηση.

### Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)

Ο δείκτης αυτός μας δίνει την αποδοτικότητα κατά Nash-Sutcliffe ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές, με ανάλογη διαχείριση των τιμών που λείπουν. Είναι ένας αρκετά ικανοποιητικός στατιστικός δείκτης που καθορίζει το σχετικό μέγεθος της υπολειμματικής διακύμανσης ("θόρυβος") σε σύγκριση με τη μετρούμενη διακύμανση των δεδομένων (Nash & Sutcliffe, 1970). Για την εξαγωγή του δείκτη δεν λαμβάνονται υπόψιν οι ελλείπουσες τιμές ούτε των παρατηρημένων ούτε των προσομοιωμένων τιμών.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (Oi - \bar{O})^2} \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

Με τη χρήση αυτού του δείκτη μπορούμε να δούμε πόσο καλά κάθονται γραφικά οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές σε γραμμή 1:1. Τα όρια του δείκτη κυμαίνονται από πλην άπειρο έως την μονάδα. Το μηδέν υποδεικνύει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου έχουν τέτοια ακρίβεια όσο ο μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων, ενώ η μονάδα υποδεικνύει τέλεια ταύτιση. Τέλος για τις τιμές ανάμεσα στο πλην άπειρο και το μηδέν, ο δείκτης υποδεικνύει ότι οι η παρατηρημένη μέση τιμή είναι καλύτερη πρόβλεψη από αυτή του μοντέλου.

### Kling-Gupta efficiency (KGE)

Η συγκεκριμένη συνάρτηση υπολογίζει ένα κριτήριο σφάλματος με βάση το τύπο KGE που προτείνεται από τους (Gupta et al., 2009).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Όπου,  $r$  ένας συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στις προσομοιωμένες και παρατηρημένες τιμές και

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}, \quad \beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$



**Modified Kling-Gupta efficiency (KGE2)**

Η συγκεκριμένη συνάρτηση υπολογίζει ένα κριτήριο σφάλματος με βάση το τύπο KGE' που προτείνεται από τους (Kling et al., 2012).

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\gamma - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

Όπου  $r$  όπως και πριν ένας συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στις προσομοιωμένες και παρατηρημένες τιμές και

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}, \quad \gamma = \frac{CV_{sim}}{CV_{obs}} \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

Όπου, **CV** ο συντελεστής μεταβλητότητας.

**Root Mean Square Error (RMSE)**

Αυτός ο δείκτης είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές. Μας δίνει τη τυπική απόκλιση του σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου, με μικρές τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη απόδοση.

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Si - Oi)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.16}$$

## 5 Αξιολόγηση απόδοσης

### 5.1 Επικύρωση (Validation)

Η επικύρωση ή επαλήθευση του μοντέλου αποτελεί το επόμενο βήμα στην αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου. Διατηρώντας τις ίδιες εκτιμήσεις παραμέτρων που προέκυψαν από τις περιόδους βαθμονόμησης τα μοντέλα μας δοκιμάστηκαν και για τις περιόδους επικύρωσης. Αυτό προϋποθέτει τη στασιμότητα των μεταβλητών κατάστασης σε ολόκληρη τη χρονοσειρά. Η επικύρωση ενός μοντέλου συνίσταται στον έλεγχο της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων με βάση τις βαθμονομημένες παραμέτρους. Χρησιμοποιείται ένα νέο σύνολο δεδομένων διαφορετικό από εκείνο στη φάση της βαθμονόμησης, όπου προέκυψε από την προσέγγιση της δοκιμής μας με διαχωρισμένο δείγμα (Split sample test). Η αξιολόγηση των επιδόσεων των μοντέλων εκτός της περιόδου βαθμονόμησης, όπως συμβαίνει στην παρούσα μελέτη και σε περιόδους με διαφορετικά κλιματικά πρότυπα, μπορεί να δείξει πόσο ανθεκτικά ή όχι είναι τα μοντέλα.

### 5.2 Στατιστικά Μεγέθη

Για τις περιόδους επικύρωσης υπολογίστηκαν διάφορα μέτρα "καλής προσαρμογής" και στατιστικά στοιχεία προσαρμογής (όπως και στην περίοδο βαθμονόμησης). Μέσα από αυτά τα κριτήρια καθορίζεται το μέγεθος της αβεβαιότητας που παραμένει στα μοντέλα μετά τη βαθμονόμησή τους. Κάποια από αυτά περιλαμβάνουν τα εξής:

**Mean Error (me):** Το γνωστό μέσο σφάλμα ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

$$me = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

**Mean Absolute Error (mae):** Το μέσο απόλυτο σφάλμα ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

$$mae = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i| \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

Mean Squared Error (**mse**): Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Normalized Root Mean Square Error (**nrmse**) : Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές και δίνεται σε ποσοστό.

$$nrmse = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}}{nval} \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

Όπου,

$$nval = \begin{cases} sd(O_i), \text{norm} = "sd" \\ O_{max} - O_{min}, \text{norm} = "maxmin" \end{cases} \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

Όπου, **norm**: Είναι χαρακτήρας που δείχνει την ιδιότητα που θα χρησιμοποιηθεί για το δείκτη με αποδεκτές τιμές το **sd**: Η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων και **maxmin**: Η διαφορά ανάμεσα στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των παρατηρήσεων.

Coefficient of Determination (**R<sup>2</sup>**): Το ποσοστό της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που μπορεί να εξηγηθεί από την ανεξάρτητη μεταβλητή.

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (S_i - \bar{O})^2}{\sum_i^N (O_i - S_i)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Ratio of Standard Deviations (**rSD**): Ο λόγος των τυπικών αποκλίσεων ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Ratio of RMSE to the standard deviation of the observations (**RSR**): Ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές προς τη τυπική απόκλιση των παρατηρημένων τιμών.

Modified NashSutcliffe efficiency (**mNSE**): Η τροποποιημένη αποδοτικότητα Nash-Sutcliffe ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

$$mNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|^j}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|^j} \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

Όπου j: αριθμητικός δείκτης, με συνήθης τιμή την μονάδα.

Root Mean Square Error (**rmse**): Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές. Μας δίνει τη τυπική απόκλιση του σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου, με μικρές τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη απόδοση.

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

Relative Nash-Sutcliffe efficiency (**rNSE**): Ο σχετικός δείκτης αποδοτικότητας κατά Nash-Sutcliffe, ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

$$rNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i - O_i}{O_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\bar{O}}\right)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

Index of Agreement (**d**): Ένας δείκτης συμφωνίας που αναπτύχθηκε από τον Willmott (1981) ως τυποποιημένο μέτρο του βαθμού σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου. Τα όρια του είναι ανάμεσα στο μηδέν που υποδηλώνει καθόλου συμφωνία και στο ένα που υποδηλώνει τέλεια ταύτιση (Willmott, 1981). Ο δείκτης αυτός παρόλο που μπορεί να προσδιορίσει προσθετικές και αναλογικές διαφορές ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές των μέσων όρων και διακυμάνσεων, στην ύπαρξη ακραίων τιμών δεν δίνει

ικανοποιητικά αποτελέσματα και αυτό λόγω των τετραγωνικών διαφορών (Legates & McCabe, 1999).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Εξίσωση 3.16

Modified Index of Agreement (**md**): Ο δείκτης αυτός είναι ο τροποποιημένος δείκτης συμφωνίας ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές. Αναπτύχθηκε από τον Willmott (1981) ως τυποποιημένο μέτρο του βαθμού σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου και κυμαίνεται ανάμεσα στο μηδέν που υποδηλώνει καθόλου συμφωνία και το ένα που υποδηλώνει τέλεια ταύτιση (Willmott, 1981). Όπως και ο δείκτης συμφωνίας  $d$ , μπορεί να προσδιορίσει προσθετικές και αναλογικές διαφορές ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές των μέσων όρων και διακυμάνσεων, αλλά στην ύπαρξη ακραίων τιμών δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και αυτό λόγω των τετραγωνικών διαφορών (Legates & McCabe, 1999).

$$md = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - S_i|^j}{\sum_{i=1}^N |S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|^j}$$

Εξίσωση 3.17

Όπου  $j$ : αριθμητικός δείκτης, με συνήθης τιμή την μονάδα.

Relative Index of Agreement (**rd**): Σχετικός δείκτης συμφωνίας ( $d$ ) ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές. Τα όρια τιμών που μπορεί να πάρει είναι το μηδέν που υποδεικνύει καθόλου ταύτιση, έως την μονάδα που υποδεικνύει τέλεια ταύτιση.

$$rd = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - S_i}{O_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|}{\bar{O}}\right)^2}$$

Εξίσωση 3.18

Coefficient of Persistence (**cp**): Συντελεστής συνέπειας ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές. Ο συγκεκριμένος συντελεστής (Corradini et al., 1986; Kitanidis &

Bras, 1980) χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της απόδοσης του μοντέλου με ένα απλό μοντέλο που χρησιμοποιεί την παρατηρούμενη τιμή της προηγούμενης ημέρας ως πρόβλεψη για την τρέχουσα ημέρα. Μία τέτοια πρόβλεψη συγκρίνεται με προβλέψεις που προκύπτουν από την υπόθεση ότι η διακύμανση αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο, οπότε η τελευταία μέτρηση μας δίνει και την καλύτερη μελλοντική εκτίμηση (Kitanidis & Bras, 1980). Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι η μονάδα, όπου είναι και η βέλτιστη, ενώ η ελάχιστη είναι το μηδέν.

$$cp = 1 - \frac{\sum_{i=2}^N (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^{N-1} (Oi+1 - Oi)^2} \quad \text{Εξίσωση 3.19}$$

Percent Bias (**pbias**): Ποσοστό μεροληψίας ανάμεσα στις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές. Αυτός ο ποσοστιαίος δείκτης μετρά αν η μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τις παρατηρημένες. Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το μηδέν, ενώ οι χαμηλές τιμές υποδεικνύουν μεγάλη ακρίβεια προσομοίωσης. Οι θετικές τιμές υποδεικνύουν μεροληψία υπερεκτίμησης, ενώ οι αρνητικές τιμές μεροληψία υποεκτίμησης του μοντέλου.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^N Oi} \quad \text{Εξίσωση 3.20}$$

**bR2**: Ένας συντελεστής προσδιορισμού που έχει πολλαπλασιαστεί με την κλίση της γραμμικής παλινδρόμησης ανάμεσα στα προσομοιωμένα και παρατηρημένα. Ένα μοντέλο που συστηματικά υπερπροβλέπει ή υποπροβλέπει συνεχώς θα εξακολουθεί να οδηγεί σε "καλό"  $r^2$  (κοντά στο 1), ακόμη και αν όλες οι προβλέψεις ήταν λανθασμένες (Krause et al., 2005).

$$br2 = |b|R2, \quad b \leq 1; \quad br2 = \frac{R2}{|b|}, \quad b > 1 \quad \text{Εξίσωση 3.21}$$

Όπου, **b** η κλίση και **R2** συντελεστής προσδιορισμού

Volumetric efficiency (**VE**): Ογκομετρική απόδοση ανάμεσα στις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές, με ανάλογη διαχείριση των τιμών που λείπουν. Αρχικά είχε προταθεί για να παρακαμφθούν κάποια προβλήματα που σχετίζονται με την αποδοτικότητα κατά Nash-Sutcliffe. Τα όρια του είναι από μηδέν έως την μονάδα και αντιπροσωπεύει το κλάσμα του νερού που παραδίδεται στον κατάλληλο χρόνο (Criss & Winston, 2008).

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N (O_i)}$$

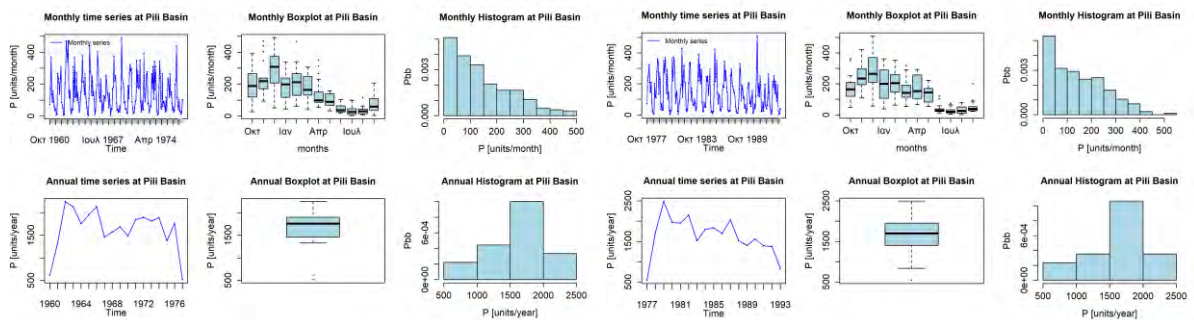
*Εξίσωση 3.22*

## 6 Αποτελέσματα

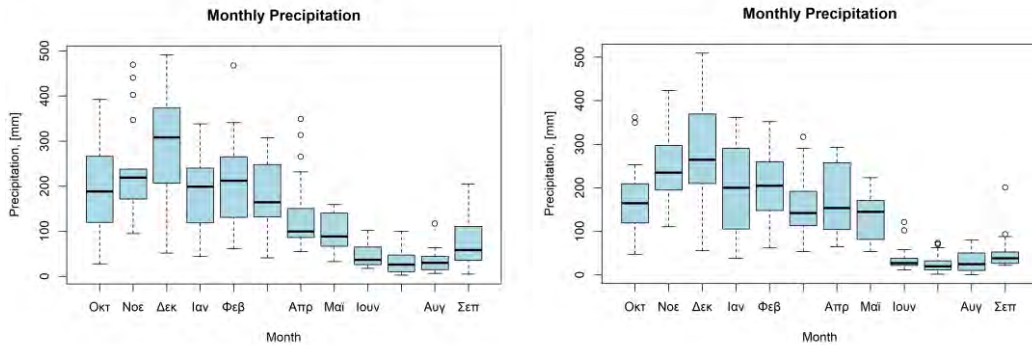
### 6.1 Εκτίμηση δεδομένων εισόδου

Εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που έχει αναφερθεί παραπάνω, παρουσιάζονται τα δεδομένα της βροχόπτωσης, της εξατμισοδιαπνοής και της παρατηρημένης απορροής σε διάφορες σχηματικές μορφές. α)Αριστερά: Περίοδος 1960-1977, β)Δεξιά: Περίοδος 1977-1993

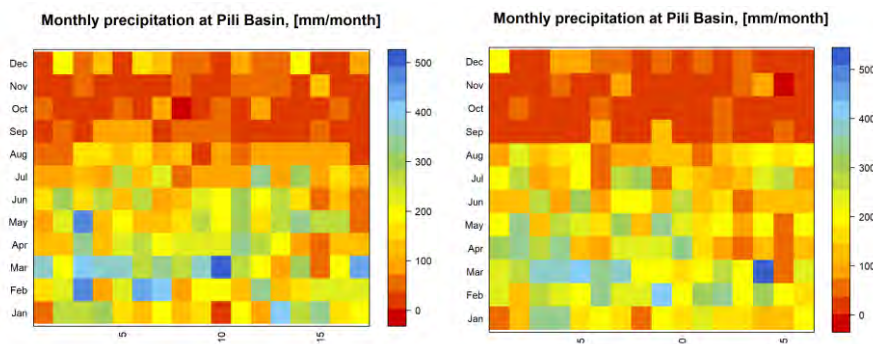
#### Βροχόπτωση



*Εικόνα 6.1* Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα βροχόπτωσης. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993



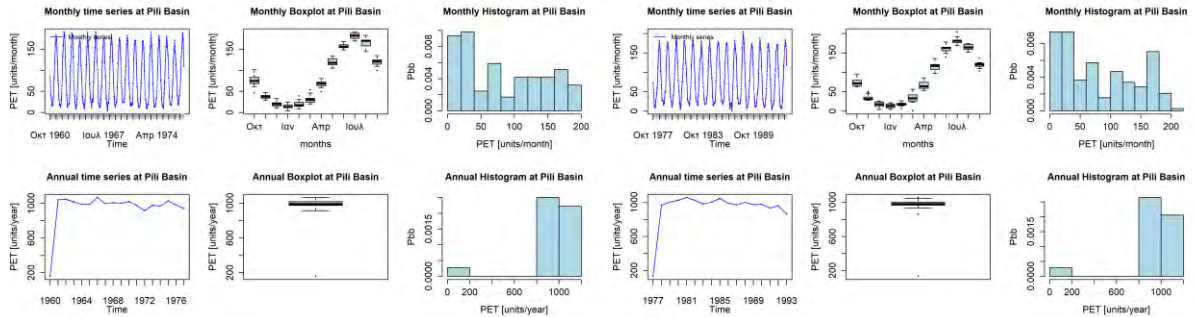
*Εικόνα 6.2* Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993



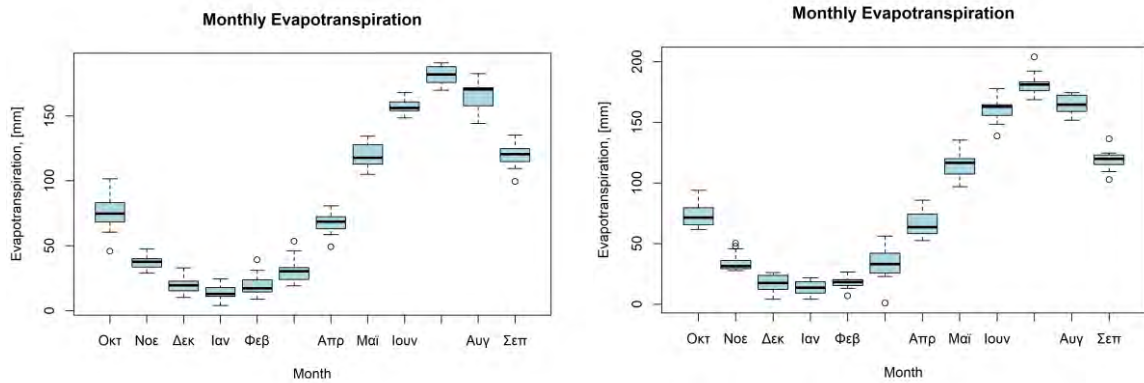
*Εικόνα 6.3* Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993



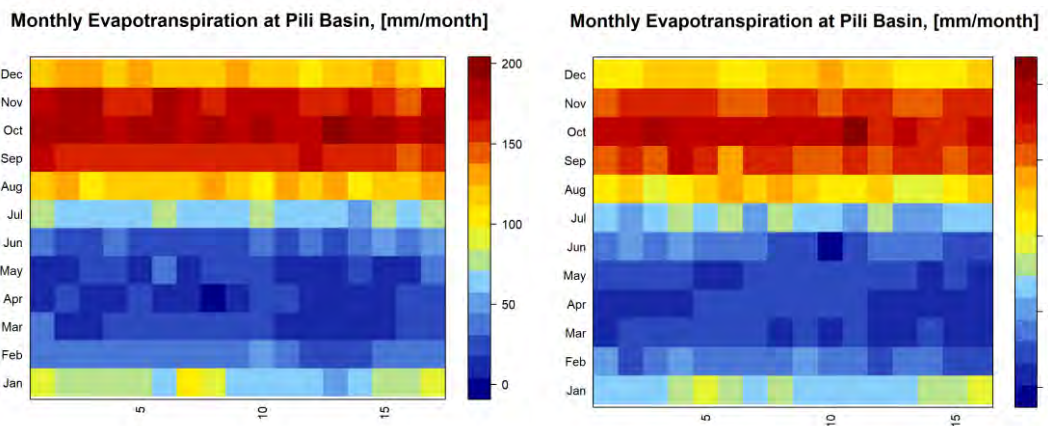
**Εξατμισοδιαπνοή**



**Εικόνα 6.4** Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα εξατμισοδιαπνοής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993

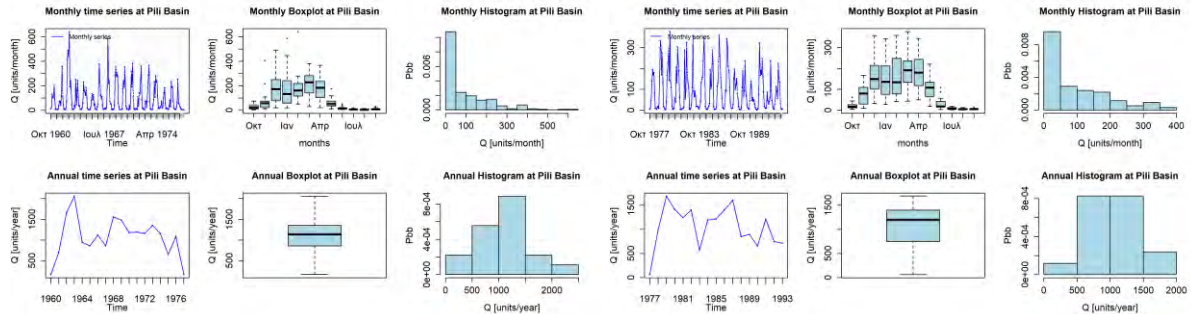


**Εικόνα 6.5** Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993

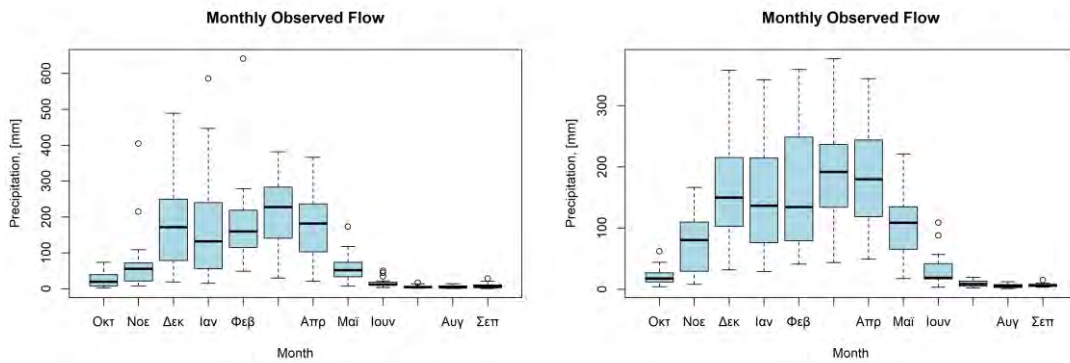


**Εικόνα 6.6** Μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993

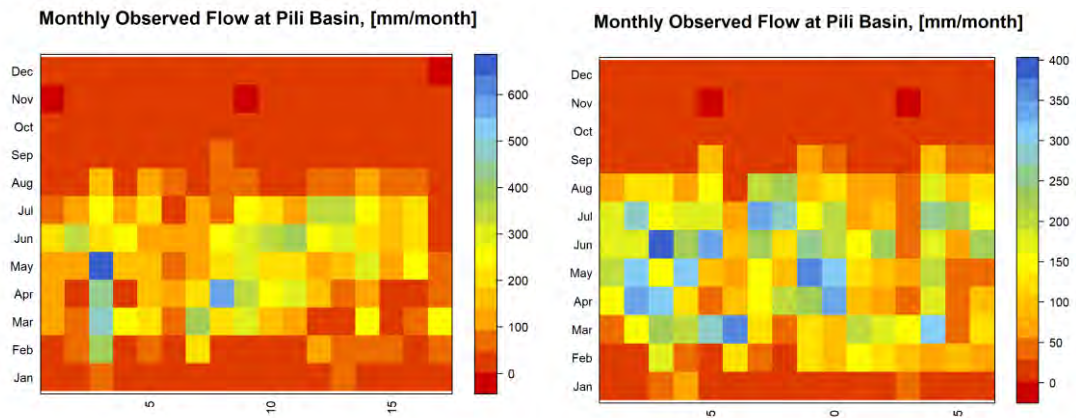
**Παρατηρημένη Απορροή**



*Εικόνα 6.7* Μηνιαίες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα παρατηρημένης αποροής α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993



*Εικόνα 6.8* Μηνιαία boxplots. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993



*Εικόνα 6.9* Μηνιαίες τιμές παρατηρημένης αποροής. α)Αριστερά:περίοδος 1960-1977 β)Δεξιά:περίοδος 1977-1993

## 6.2 Διαδικασία

Για την αξιολόγηση της επίδοσης και των δύο μοντέλων ακολουθήθηκε μια τυπική διαδικασία. Αυτό περιλαμβάνει:

[A] Ο διαχωρισμός της περιόδου δοκιμής σε δύο μέρη, για βαθμονόμηση-επιβεβαίωση:

- ❖ 1960-1977
- ❖ 1977-1993

[B] Ο έλεγχος των επιδόσεων των μοντέλων λαμβάνοντας υπόψιν τέσσερις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις:

- ❖ KGE
- ❖ KGE2
- ❖ NSE
- ❖ RMSE

Για κάθε προσομοίωση με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια, εξετάστηκαν οι ακόλουθες πτυχές:

- ❖ Απόδοση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- ❖ Απόδοση του μοντέλου και αβεβαιότητα που προκαλείται από τη δομή του μοντέλου
- ❖ Τιμές παραμέτρων, εύρος και σταθερότητα
- ❖ Αξιολόγηση αντικειμενικής συνάρτησης με βάση στατιστικά στοιχεία προσαρμογής

Η απόδοση των αλγορίθμων αξιολογήθηκε σύμφωνα με διαγράμματα καθώς και σε στατιστικούς δείκτες και πίνακες που δείχνουν την ευστάθεια των παραμέτρων.

Τα ακόλουθα αποτελέσματα, σχήματα και συμπεράσματα αναφέρονται στην πιο αντιπροσωπευτική περιπτώση που αποδείχθηκε ότι είναι ο έλεγχος των επιδόσεων των μοντέλων στην αντικειμενική συνάρτηση **KGE2**. Επίσης, να αναφερθεί ότι ενώ το μοντέλο **GR2M** υποβλήθηκε στη τεχνική βελτιστοποίησης κατά **Michel** και κατά **hydroPSO**, το μοντέλο **UTHBAL** υποβλήθηκε μόνο στη τεχνική από το **hydroPSO**. Ωστόσο έχει καταβληθεί προσπάθεια να συμπεριληφθεί η διαφορετική συμπεριφορά και των μοντέλων που

δοκιμάστηκαν υπό διαφορετικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης και αντικειμενικές συναρτήσεις στο τέλος μέσα από τα παραρτήματα.

### 6.3 Βασική Ανάλυση των αποτελεσμάτων

#### Παράμετροι και gof

Εξετάζοντας το καλύτερο σύνολο παραμέτρων που προέκυψε κατά τη βαθμονόμηση και την αντίστοιχη τιμή καλής προσαρμογής παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στους Πίνακες 6.1 και Πίνακα 6.2, καθώς παρακάτω πραγματοποιείται παρεταίρω σχολιασμός:

*Πίνακας 6.1* Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου GR2M με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2

GR2M	Michel	hydroPSO
	1960-1977	
X1	395.440	395.300
X2	0.990	0.991
gof	0.754	0.754
1977-1993		
X1	578.246	580.655
X2	1.008	1.008
gof	0.857	0.857

*Πίνακας 6.2* Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2

UTHBAL	hydroPSO	
	1960-1977	1977-1993
Cm	6.660	2.149
CN	45.435	46.546
K	0.000	0.299
aAET	0.002	0.261
CONMR	0.120	0.091
CONGROUND	0.943	0.998
gof	0.788	0.868

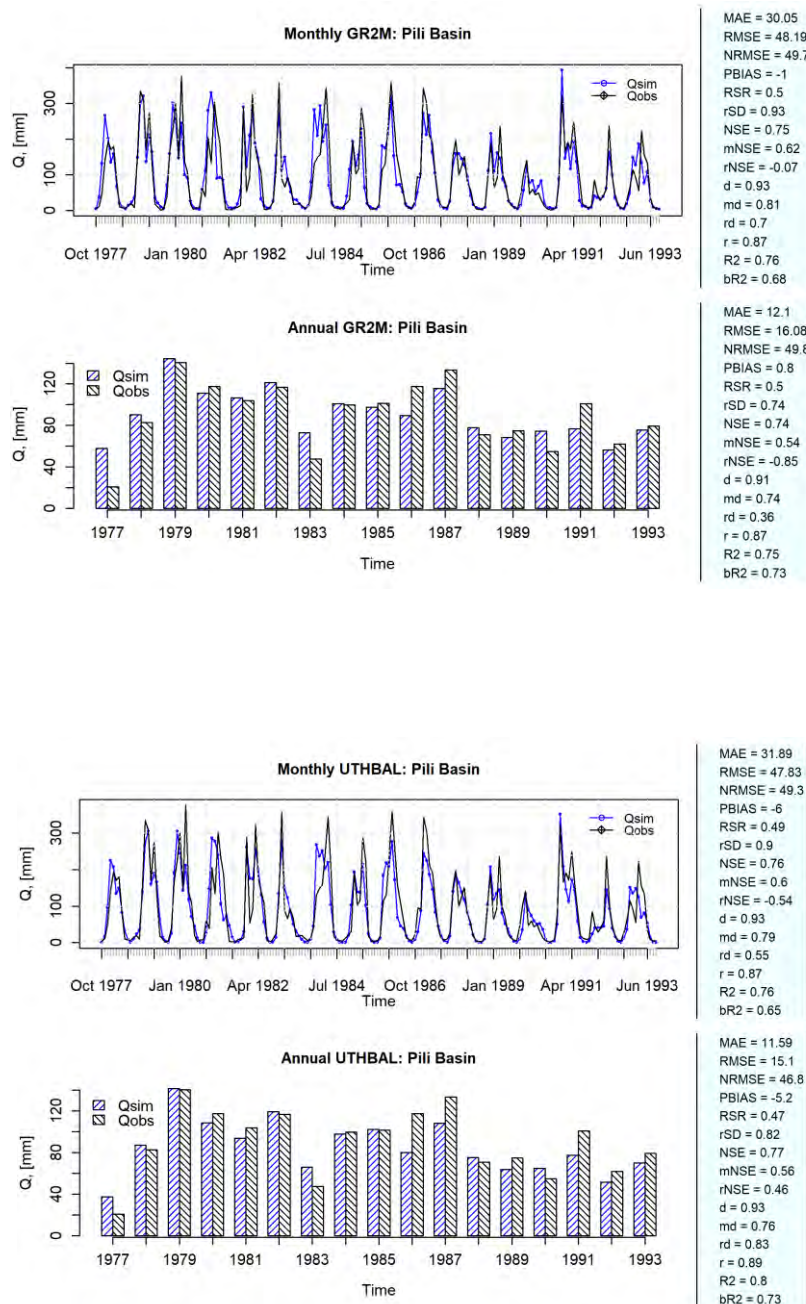
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το μοντέλο GR2M, έχοντας υποβληθεί και στις δύο τεχνικές βελτιστοποίησης, το αποτέλεσμα παραμένει σχεδόν το ίδιο. Οι τιμές των παραμέτρων μπορεί να διαφέρουν κατά λίγο αλλά η τιμή καλής προσαρμογής είναι σχεδόν ίδια, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι οι παράμετροι του μοντέλου είναι μόλις



δύο. Ωστόσο και στα δύο μοντέλα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τιμή καλής προσαρμογής είναι καλύτερη στην περίοδο 1977-1993.

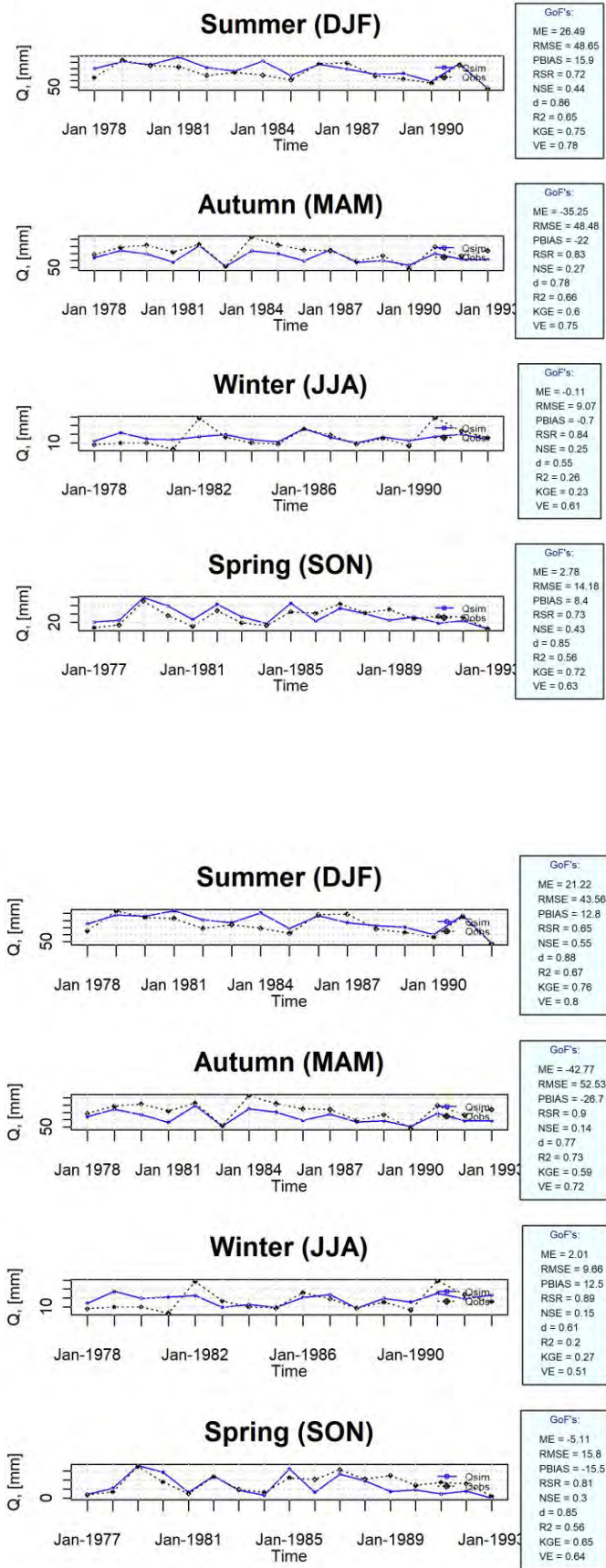
Επιλέγοντας λοιπόν ως αντιπροσωπευτική περίοδο **1977-1993** καθώς και την τεχνική βελτιστοποίησης κατά **hydroPSO**, προχωράμε στην γραφική απεικόνιση 3 ειδών γραφημάτων.

**Μηνιαίες και ετήσιες προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές για την περίοδο βαθμονόμησης**



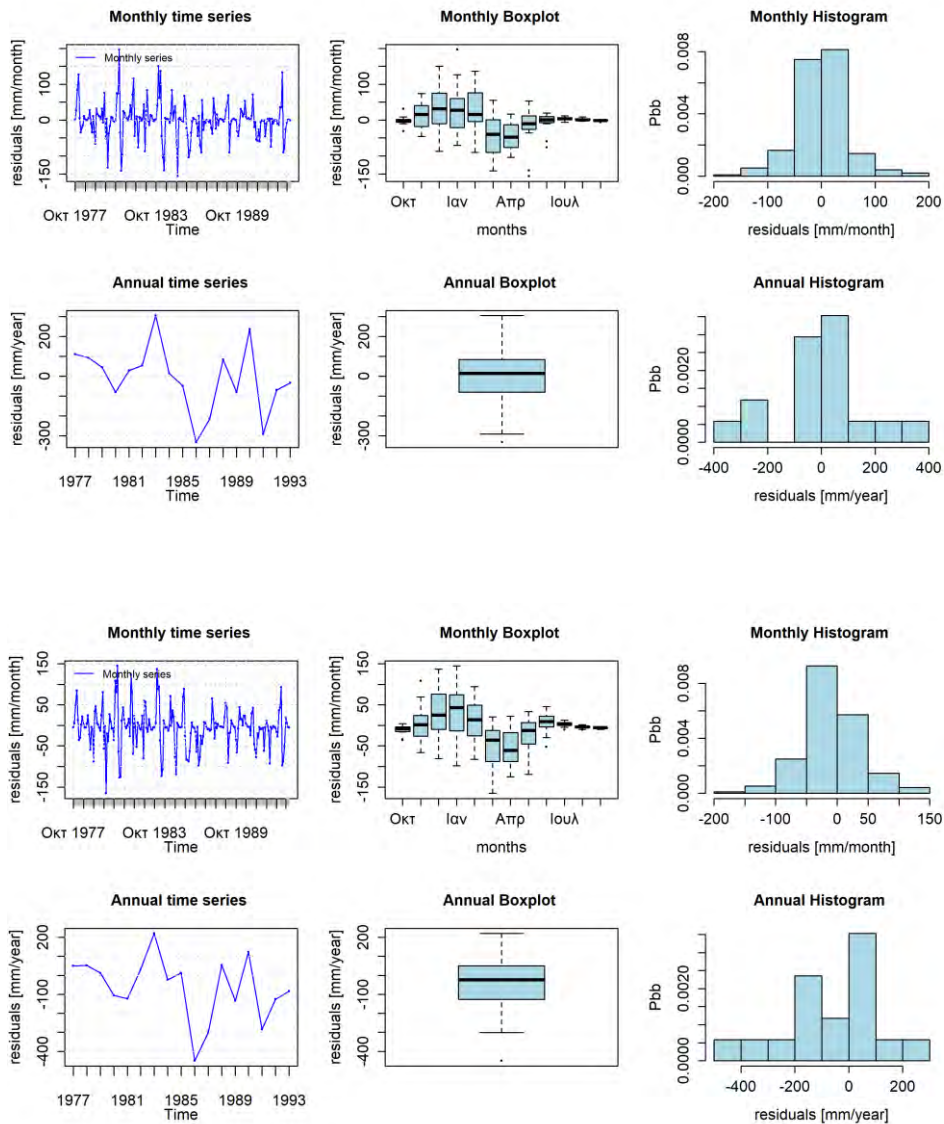
*Εικόνα 6.10 Μηνιαίες και ετήσιες προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2*

Γραφική σύγκριση των εποχιακών προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών



Εικόνα 6.11 Εποχιακές προσομοιωμένες και παρατηρημένες τιμές α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2

## Μηνιαίες και ετήσιες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα των καταλοίπων



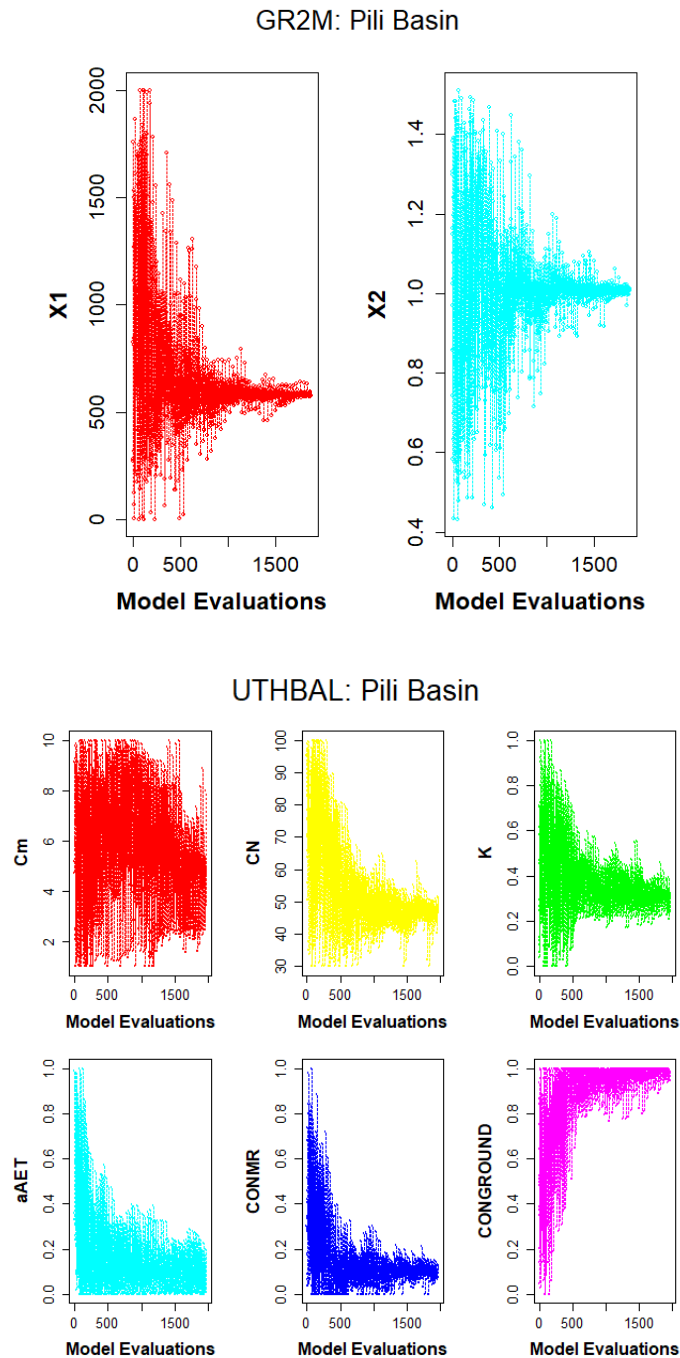
*Εικόνα 6.12 Μηνιαίες και ετήσιες χρονοσειρές, boxplots και ιστογράμματα των καταλοίπων α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης KGE2*

#### 6.4 Απεικόνιση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Παρακάτω ακολουθεί η γραφική απεικόνιση διάφορων σχημάτων που θα βοηθούν να αξιολογήσουμε πόσο καλά είναι τα αποτελέσματα της διαδικασίας βαθμονόμησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα αφορούν τη περίοδο **1977-1993**, που προέκυψαν με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης **KGE2**.

Ο προσδιορισμός των ευαίσθητων παραμέτρων είναι σημαντικές για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου στη βαθμονόμηση των μοντέλων. Αυτό επιτεύχθηκε

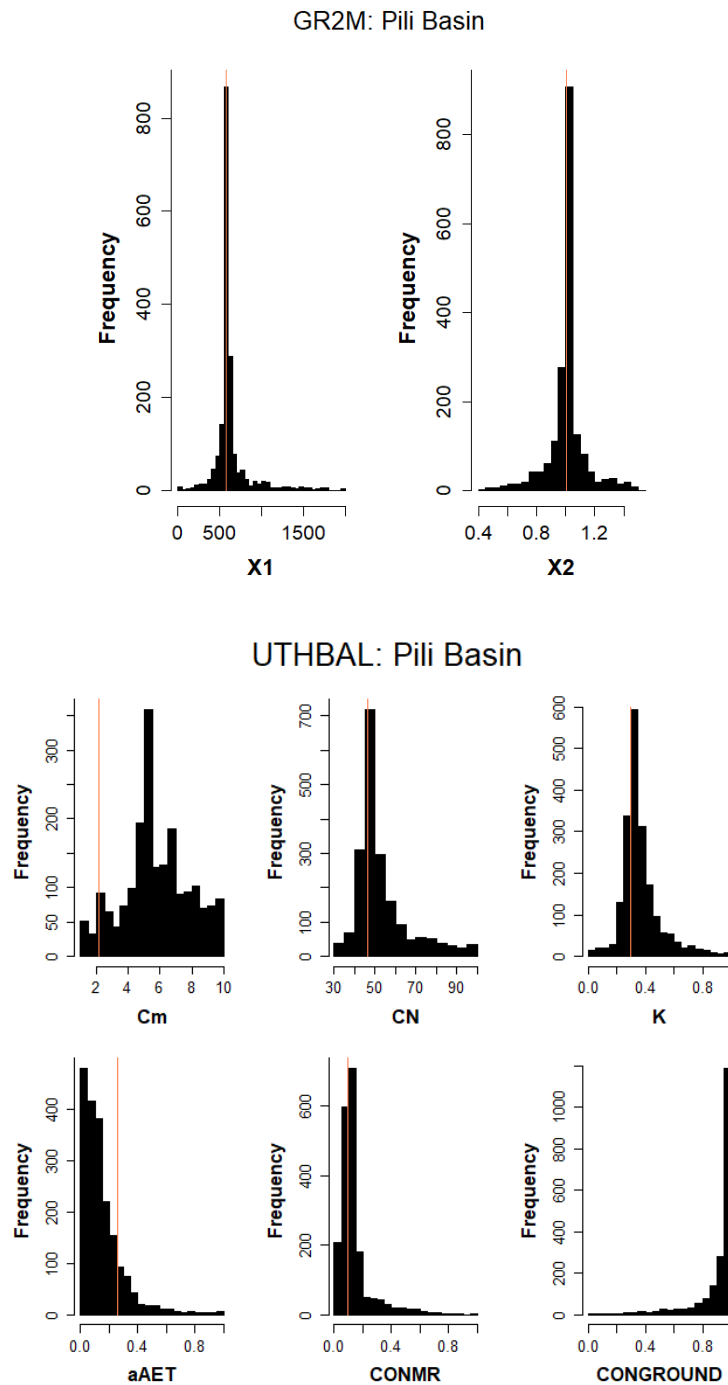
με την παρακολούθηση της εξέλιξης και της σύγκλισης των τιμών των παραμέτρων, του παγκόσμιου βέλτιστου και της κανονικοποιημένης ακτίνας σμήνους (NSR). Η εικόνα 6.13 δείχνει την εξέλιξη των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση των μοντέλων μας. Στο μοντέλο **GR2M** μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι και οι δύο παράμετροι είναι εξίσου αποτελεσματικοί στη βαθμονόμηση, ενώ στο **UTHBAL** λιγότερο αποτελεσματική είναι το **Cm** καθώς το εύρος των τιμών πριν στη σύγκλιση είναι αρκετά μεγάλο.



*Εικόνα 6.13 Τιμές παραμέτρων ανά εκτέλεση στη βαθμονόμηση του μοντέλου. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL*



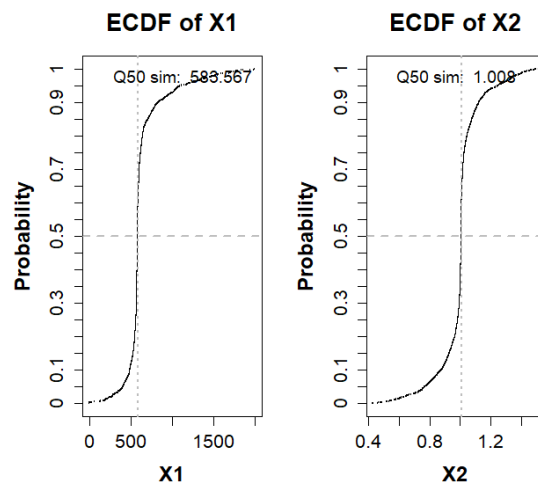
Τα ιστογράμματα συχνότητας των τιμών των παραμέτρων παρουσιάζονται στην εικόνα 6.14. Τα ακανόνιστα και επίπεδα σχήματα των ιστογραμμάτων υποδηλώνουν την αβεβαιότητα σχετικά με τις πιθανότερες βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Στην παρούσα εργασία, οι παράμετροι είναι καλά καθορισμένες και για τα δύο μοντέλα, καθώς η κορυφή της εκ των υστέρων κατανομής είναι έντονη γύρω από την καλύτερη τιμή σε όλες τις παραμέτρους. Εξαίρεση αποτελεί πάλι η παράμετρος **Cm** και **aAET**.



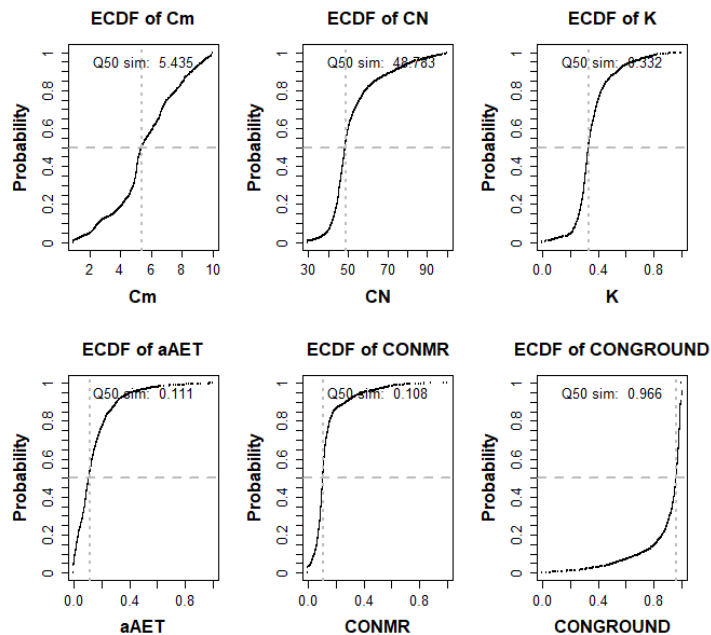
**Εικόνα 6.14** Ιστογράμματα που δείχνουν τις συχνότητες των τιμών των παραμέτρων. Η κατακόρυφη κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη βέλτιστη τιμή που βρέθηκε για κάθε παράμετρο. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

Επιπλέον, οι εμπειρικές αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής (ECDF) στην εικόνα 6.15 χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της πραγματικής υποκείμενης αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF) των δειγματοληπτικών σημείων. Και οι δύο εικόνες (Εικόνα 6.14 και Εικόνα 6.15) επιβεβαιώνουν ότι οι παράμετροι **X1**, **X2**, **CN** και **K** ακολουθούν κανονικές ή σχεδόν κανονικές κατανομές, ενώ οι **aAET**, **CONMR** παρουσιάζουν δειγματοληπτική κατανομή με μεγάλη στρέβλωση προς το κατώτερο όριο και η παράμετρος **CONGROUND** προς το ανώτερο όριο που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση.

GR2M: Pili Basin



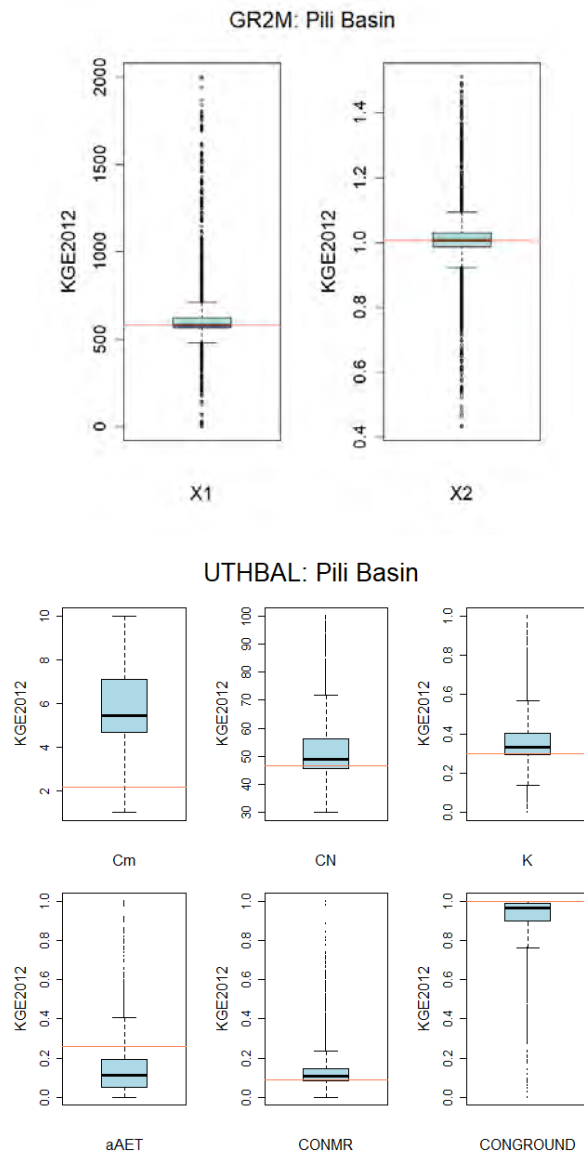
UTHBAL: Pili Basin



**Εικόνα 6.15** ECDF των τιμών των παραμέτρων. Οι οριζόντιες γκριζες διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν αθροιστική πιθανότητα ίση με 0,5 (διάμεσος της κατανομής). Οι κατακόρυφες γκριζες διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν αθροιστική πιθανότητα 0,5 (η τιμή της εμφανίζεται στο άνω μέρος κάθε σχήματος). α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

Οι εκ των υστέρων κατανομές ορισμένων παραμέτρων, όπως οι **CONGROUND** και **CONMR** φαίνεται να έχουν πιο έντονη κορυφή από άλλες παραμέτρους, γεγονός που δημιουργεί λιγότερη αβεβαιότητα στην υδρολογική μοντελοποίηση. Ωστόσο, η παράμετρος **Cm** δεν άλλαξε σημαντικά από τη προηγούμενη ομοιόμορφη κατανομή της. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αντιπροσωπεύει δύο τύπους σφαλμάτων, τα οποία είναι είτε τα συστηματικά σφάλματα των δεδομένων εισόδου (εξαναγκασμού) είτε η αντιστάθμιση δομικών ελλείψεων του μοντέλου.

Τα Βoxplots στην εικόνα 6.16 είναι χρήσιμα μη παραμετρικά διαγράμματα για τη σύνοψη της στατιστικής κατανομής των δειγματοληπτικών τιμών. Το πάνω και το κάτω μέρος του πλαισίου δείχνουν το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο, αντίστοιχα, ενώ η οριζόντια γραμμή μέσα στο πλαίσιο αντιπροσωπεύει το δεύτερο τεταρτημόριο (τη διάμεσο).

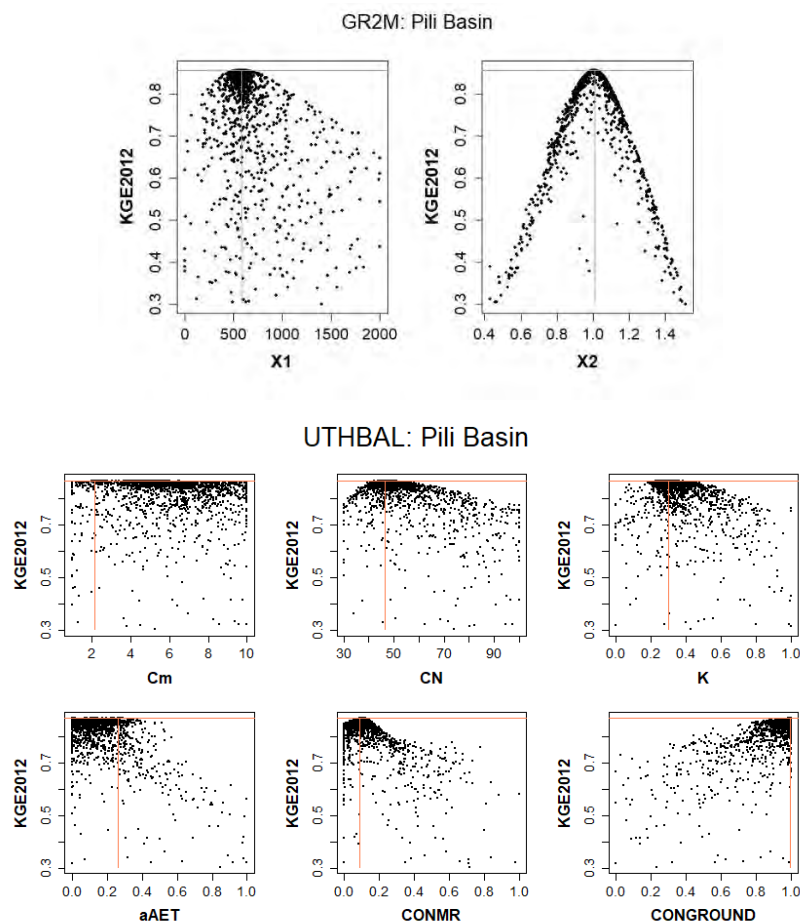


Εικόνα 6.16 Βoxplots. α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

Η οπτική επιθεώρηση της εικόνας 6.16 δείχνει ότι για τις παραμέτρους του μοντέλου **GR2M** (**X1** και **X2**) και η **CONMR** αντίστοιχα, η βέλτιστη τιμή που βρέθηκε κατά τη βελτιστοποίηση συμπίπτει με τη διάμεσο όλων των δειγματοληπτικών τιμών, επιβεβαιώνοντας ότι τα περισσότερα σωματίδια συγκλίνουν σε μια μικρή περιοχή του χώρου λύσεων. Για τα **CN** και **K**, οι τιμές του δείγματος τοποθετήθηκαν εντός του πρώτου τεταρτημορίου.

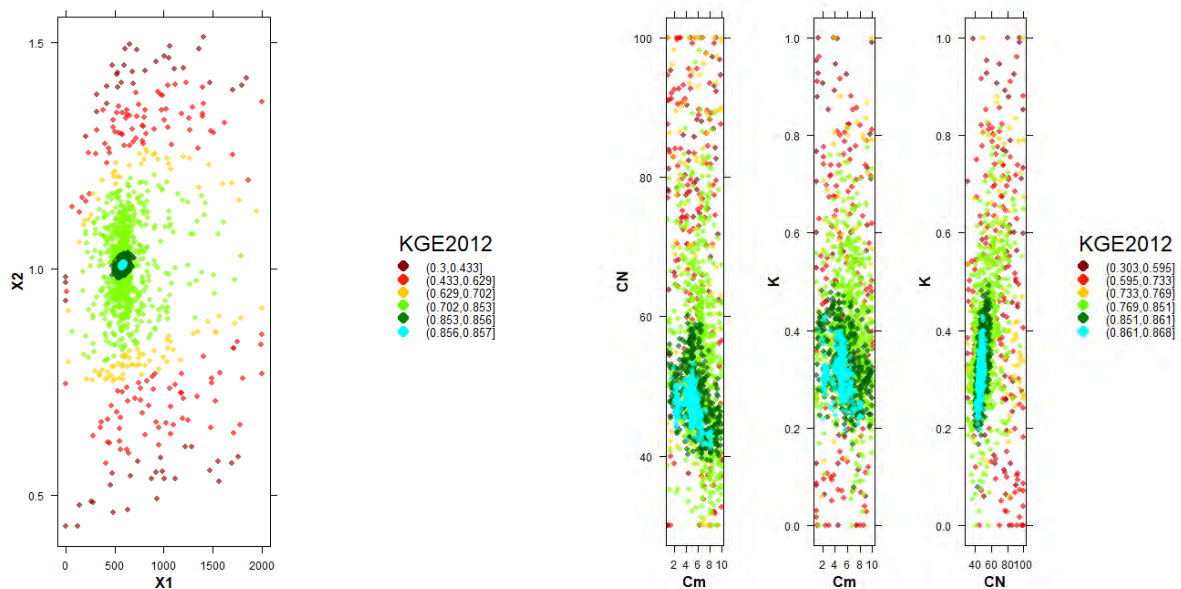
Τα διακεκομμένα διαγράμματα στην εικόνα 6.17 δείχνουν τις τιμές των παραμέτρων σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή καλής προσαρμογής (**KGE2**) που προέκυψε κατά τη βελτιστοποίηση. Είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό των περιοχών παραμέτρων που παράγουν την καλύτερη απόδοση του μοντέλου ή με περίπου την ίδια απόδοση του μοντέλου.

Η εικόνα 6.17 δείχνει ότι οι βέλτιστες τιμές που βρέθηκαν για τις παραμέτρους **X1** για το μοντέλο **GR2M** και **CONGROUND**, **CONMR** και **aAET** αντίστοιχα, είναι σχετικά καλά καθορισμένες, ενώ άλλες παράμετροι παρουσιάζουν μια ευρύτερη περιοχή γύρω από τη βέλτιστη τιμή τους.



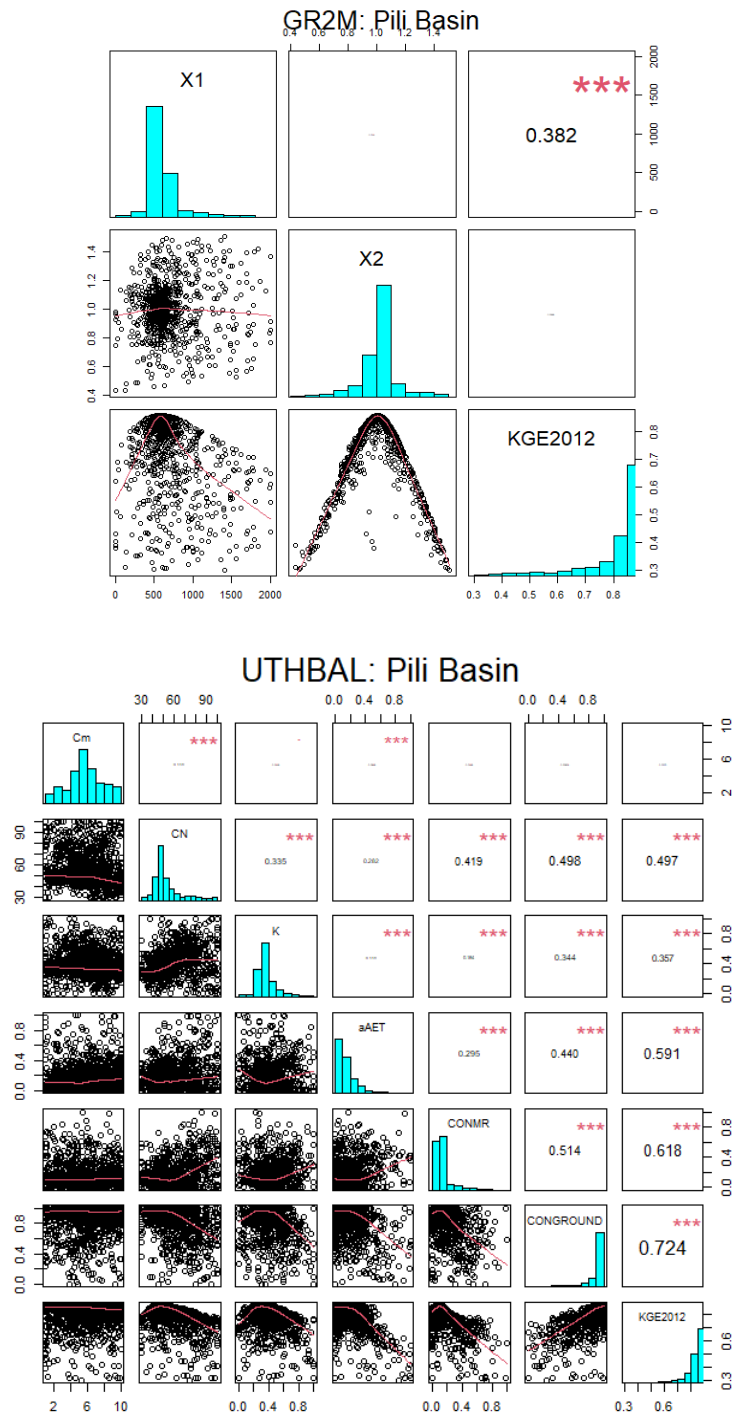
**Εικόνα 6.17** Τιμές των παραμέτρων έναντι της αντίστοιχης τιμής καλής προσαρμογής (**KGE2**) που λαμβάνεται κατά τη βελτιστοποίηση α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

Στην εικόνα 6.18 παρουσιάζονται (σχεδόν) τριδιάστατα διαγράμματα *dotty*, τα οποία συνοψίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων προβάλλοντας την επιφάνεια απόκρισης του **KGE2** στο χώρο των παραμέτρων (για διαφορετικά ζεύγη παραμέτρων). Σε αυτή την εικόνα η χαμηλή απόδοση του μοντέλου αναπαρίσταται με σκούρο κόκκινο χρώμα, ενώ η υψηλή απόδοση του μοντέλου με γαλάζιο χρώμα. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα σωματίδια κατανέμονται σε όλο το χώρο των παραμέτρων, υποδεικνύοντας μια καλή διερευνητική ικανότητα του PSO. Ωστόσο, οι περιοχές με κακή απόδοση του μοντέλου έχουν χαμηλή πυκνότητα σημείων, ενώ οι περιοχές με καλύτερη απόδοση του μοντέλου έχουν πιο πυκνή δειγματοληψία, επιβεβαιώνοντας την καλή ικανότητα εκμετάλλευσης του PSO. Αυτή η εικόνα δείχνει ότι οι βέλτιστες τιμές που βρέθηκαν για τα **X1** και **X2** ορίζουν ένα στενό εύρος του χώρου των παραμέτρων με υψηλή απόδοση του μοντέλου. Από την άλλη πλευρά, η απόδοση του μοντέλου επηρεάζεται περισσότερο από την αλληλεπίδραση των παραμέτρων **Cm** και **CN**. Η παράμετρος **K** παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος των βελτιστοποιημένων επιπέδων. Η καλή απόδοση του μοντέλου για ένα ευρύ φάσμα τιμών άλλων παραμέτρων επιβεβαιώνει ότι οι παράμετροι αυτές δεν έχουν προσδιοριστεί καλά.



Εικόνα 6.18 Τριδιάστατα διαγράμματα *dotty*. α) Αριστερά-GR2M β) Δεξιά UTHBAL

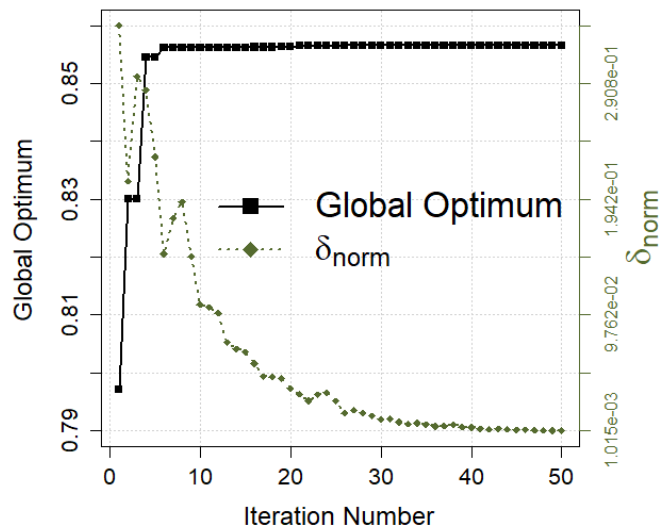
Η εικόνα 6.19, με τη σειρά του, συνοψίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ όλων των (ευαίσθητων) παραμέτρων που παρατίθενται στον Πίνακα 4.3. Εδώ παρατηρείται σαφής συσχέτιση μεταξύ του **KGE2** και των **CONGROUND**, **CONMR** και **aAET**, ενώ παρατηρείται στατιστικά σημαντική διασταυρούμενη συσχέτιση μεταξύ των **CONGROUND**, **CONMR** και **CN**.



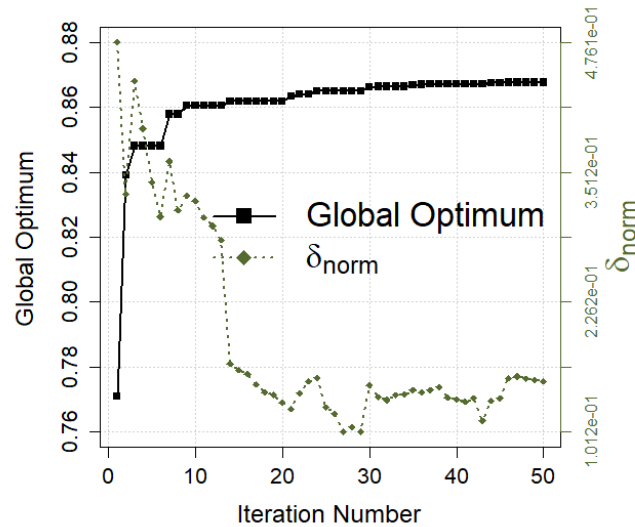
Εικόνα 6.19 Διασταυρούμενη συσχέτιση, ιστογράμματα και στατιστική σημαντικότητα της συσχέτισης για τις (ευαίσθητες) παραμέτρους α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

Η εικόνα 6.20 δείχνει την εξέλιξη του **KGE2** ως συνάρτηση του αριθμού επανάληψης. Βλέπουμε μια αρχική φάση εξερεύνησης (μέχρι περίπου iter=50) που ενώ για το μοντέλο **GR2M** σταθεροποιείται μετά την επανάληψη 10 γύρω από μια τιμή  $KGE2=0,856$ , στο μοντέλο **UTHBAL** σταθεροποιείται μετά την επανάληψη 30. Ταυτόχρονα, η κανονικοποιημένη ακτίνα σμήνους στο μοντέλο **GR2M** δείχνει μια σαφή σύγκλιση προς τη ζώνη έλξης γύρω από αυτό το βέλτιστο, ενώ στο μοντέλο **UTHBAL** όχι.

Optimum & Normalized Swarm Radius vs Iteration



Optimum & Normalized Swarm Radius vs Iteration



**Εικόνα 6.20** Εξέλιξη του παγκόσμιου βέλτιστου και της κανονικοποιημένης ακτίνας σμήνους (NSR) σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων για τη βαθμονόμηση α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

## 6.5 Ανάλυση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Σε αντίθεση με τα δεδομένα εισόδου και απόκρισης, η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων απαιτεί τόσο το μοντέλο όσο και τα δεδομένα. Επίσης, ενώ τα δεδομένα εισόδου και απόκρισης μπορεί να είναι μη αναγώγιμα, οι παράμετροι του μοντέλου συνήθως αντιμετωπίζονται ως καθαρά αναγώγιμες (δηλαδή ως σταθερές για μια δεδομένη τοποθεσία και των οποίων οι τιμές είναι αβέβαιες). Η συστηματική μεταβλητότητα ή μη σταθερότητα των παραμέτρων, για παράδειγμα, είναι ένας σημαντικός δείκτης του σφάλματος του μοντέλου που συχνά δεν αντιμετωπίζεται ρητά από τους μοντελιστές [Beck, 1987- Kuczera et al. , 2006- Wagener et al. , 2003].

Για να προχωρήσουμε με την ανάλυση αβεβαιότητας, διαβάζονται όλα τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων που παράγονται από το hydroPSO κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Ωστόσο, στη παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε μόνο για σύνολα παραμέτρων συμπεριφοράς, όπως ορίζονται από μια αυθαίρετη και καθορισμένη από τον χρήστη τιμή καλής προσαρμογής (δηλαδή μια τιμή KGE2). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, εξετάζουμε behavioural threshold ένα εύρος τιμών από 0.2 – 0.8 και βήμα 0.1. Η ρύθμιση των τιμών αυτών και η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, θα θεωρήσει ως συμπεριφορικά όλα εκείνα τα σύνολα παραμέτρων με τιμές προσαρμογής υψηλότερες από το κατώφλι που έχουμε ορίσει.

*Πίνακας 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση διαφορετικών τιμών κατώτατου όριου αντικειμενικής συνάρτησης*

Behavioural Threshold	GR2M			UTHBAL		
	P factor	R factor	Nmbr Count	P factor	R factor	Nmbr Count
<b>0.2</b>	0.724	0.771	1909	0.604	0.676	1974
<b>0.3</b>	0.714	0.734	1876	0.604	0.673	1968
<b>0.4</b>	0.693	0.691	1838	0.604	0.662	1955
<b>0.5</b>	0.667	0.616	1785	0.583	0.651	1942
<b>0.6</b>	0.615	0.523	1715	0.542	0.622	1906
<b>0.7</b>	0.490	0.393	1595	0.490	0.560	1822
<b>0.8</b>	0.318	0.233	1377	0.396	0.393	1548

Όπως παρατηρείται στην εικόνα , τρεις σημαντικές παράγοντες έπαιξαν ρόλο στην επιλογή του κατώτατου όριου συμπεριφοράς για τα μοντέλα μας. Με τους δύο στατιστικούς δείκτες pfactor και rfactor σε σύγκριση με τον αριθμό συνόλων παραμέτρων συμπεριφοράς κρίθηκε καταλληλότερη η τιμή του **beh.thr** ίση με **0.3** καθώς προσφέρει μια κατάλληλη ισορροπία ανάμεσα στα κριτήρια που αναφέραμε.



### 6.5.1 Σταθμισμένα όρια αβεβαιότητας των τιμών των παραμέτρων

Ο υπολογισμός των σταθμισμένων κβαντικών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου μας παρέχει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας σε κάθε παράμετρο του μοντέλου, με βάση τα σύνολα παραμέτρων συμπεριφοράς που λαμβάνονται κατά τη βαθμονόμηση και τις τιμές καλής προσαρμογής που λαμβάνονται για κάθε μία από αυτές. Τα σταθμισμένα κβάντιλα που καθορίζονται από τον χρήστη για κάθε παράμετρο του μοντέλου λαμβάνονται πολλαπλασιάζοντας το τυπικό κβάντιλο που προκύπτει για κάθε παράμετρο του μοντέλου με βάση όλα τα σύνολα παραμέτρων συμπεριφοράς με την αντίστοιχη τιμή καλής προσαρμογής που προκύπτει από το σύνολο παραμέτρων (gofs). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, υπολογίζονται τα σταθμισμένα κβάντα 2,5, 50 και 97,5 για κάθε παράμετρο του μοντέλου.

*Πίνακας 6.4 Σταθμισμένα κβάντα των τιμών των παραμέτρων*

	W.quantiles	2.50%	50%	BEST	97.50%
GR2M	X1	341.84	583.21	580.66	1323.12
	X2	0.76	1.01	1.01	1.28
UTHBAL	Cm	1.56	5.42	2.15	9.77
	CN	36.72	48.66	46.55	89.67
	K	0.16	0.33	0.3	0.72
	Aaet	0	0.11	0.26	0.49
	CONMR	0	0.11	0.09	0.5
	CONGROUND	0.43	0.97	1	1

### 6.5.2 P-factor and R-factor

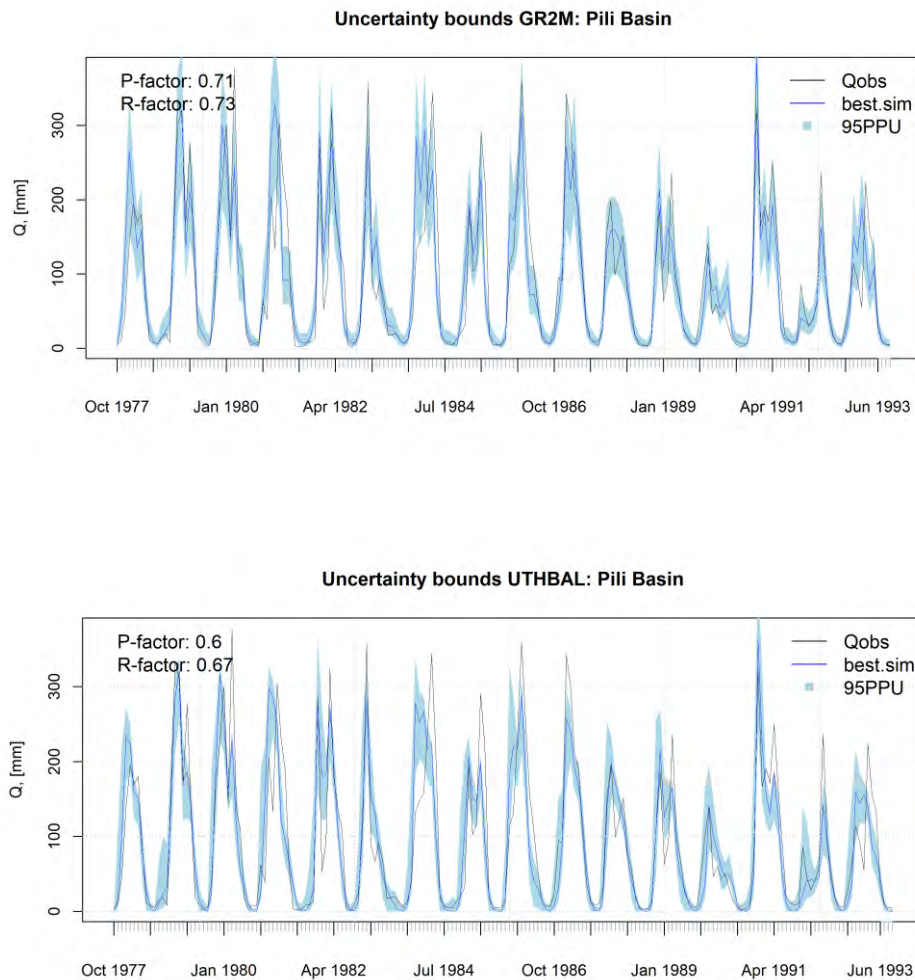
Δύο δείκτες χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της καλής απόδοσης βαθμονόμησης/αβεβαιότητας, ο παράγοντας P, ο οποίος είναι το ποσοστό των δεδομένων που περικλείονται από τη ζώνη 95PPU (μέγιστη τιμή 100%), και ο παράγοντας R, ο οποίος είναι το μέσο πλάτος της ζώνης διαιρεμένο με την τυπική απόκλιση της αντίστοιχης μετρούμενης μεταβλητής.

*Πίνακας 6.5 Τιμές δεικτών P-factor και R-factor*

	GR2M	UTHBAL
P factor	0.7135417	0.6041667
R factor	0.734292	0.6725804

### 6.5.3 95% Αβεβαιότητα Πρόβλεψης

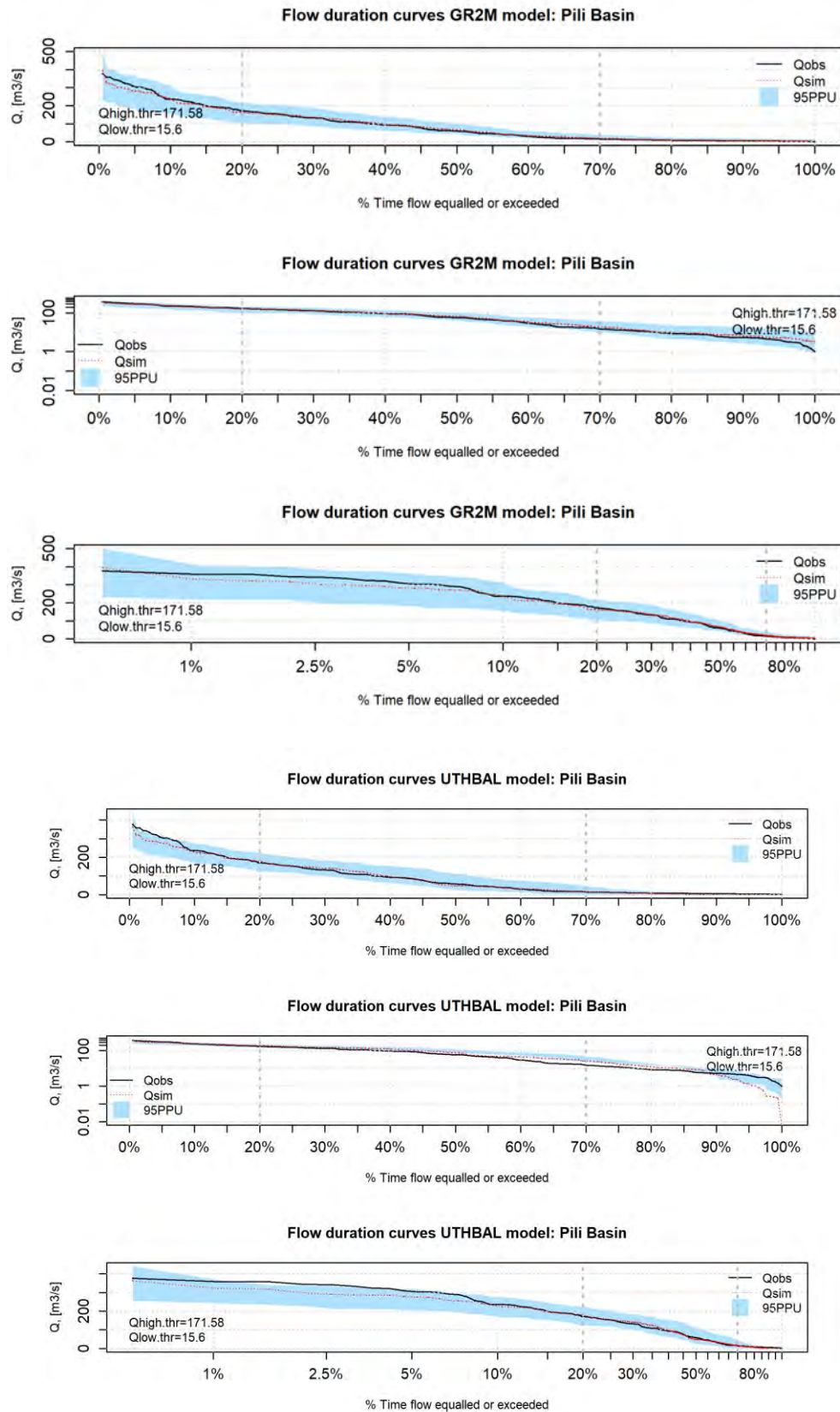
Τα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης της αβεβαιότητας του μοντέλου λόγω της αβεβαιότητας των παραμέτρων μαζί με τις καλύτερες προσομοιωμένες τιμές παροχής συγκρίνονται στην Εικόνα 6.21.



*Εικόνα 6.21 Όρια αβεβαιότητας α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL*

### 6.5.4 Αβεβαιότητα στην καμπύλη διάρκειας ροής

Στην εικόνα 6.22 παρουσιάζεται η παρατηρούμενη καμπύλη διάρκειας ροής (FDC), η μία από τις καλύτερες προσομοιωμένες ροές και τις καμπύλες διάρκειας ροής για τα σταθμισμένα όρια αβεβαιότητας 2,5 και 97,5 των προσομοιώσεων του μοντέλου που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο βαθμονόμησης



Εικόνα 6.22 Καμπύλες διάρκειας ροής α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

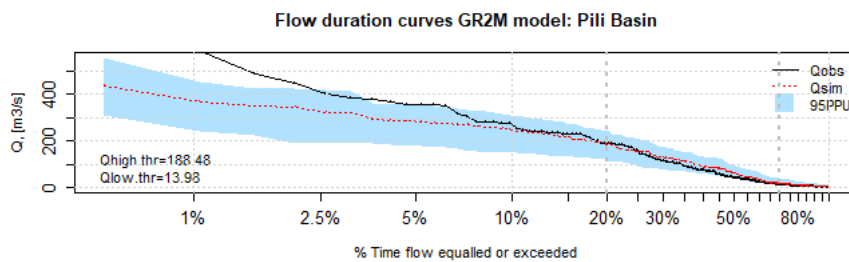
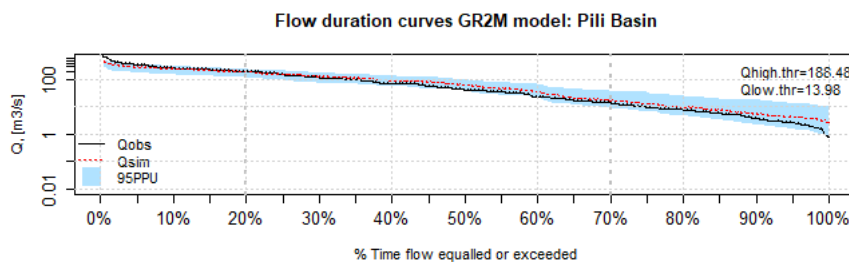
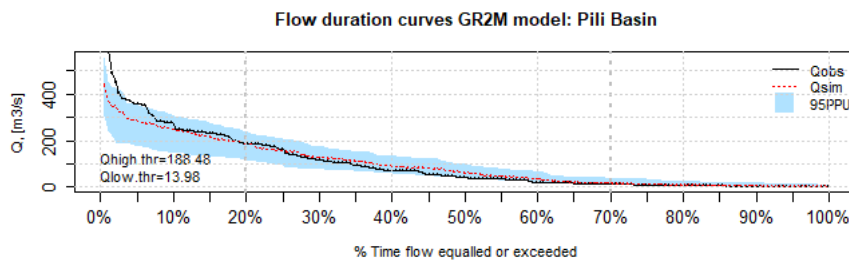
### 6.6 Ανάλυση επαλήθευσης

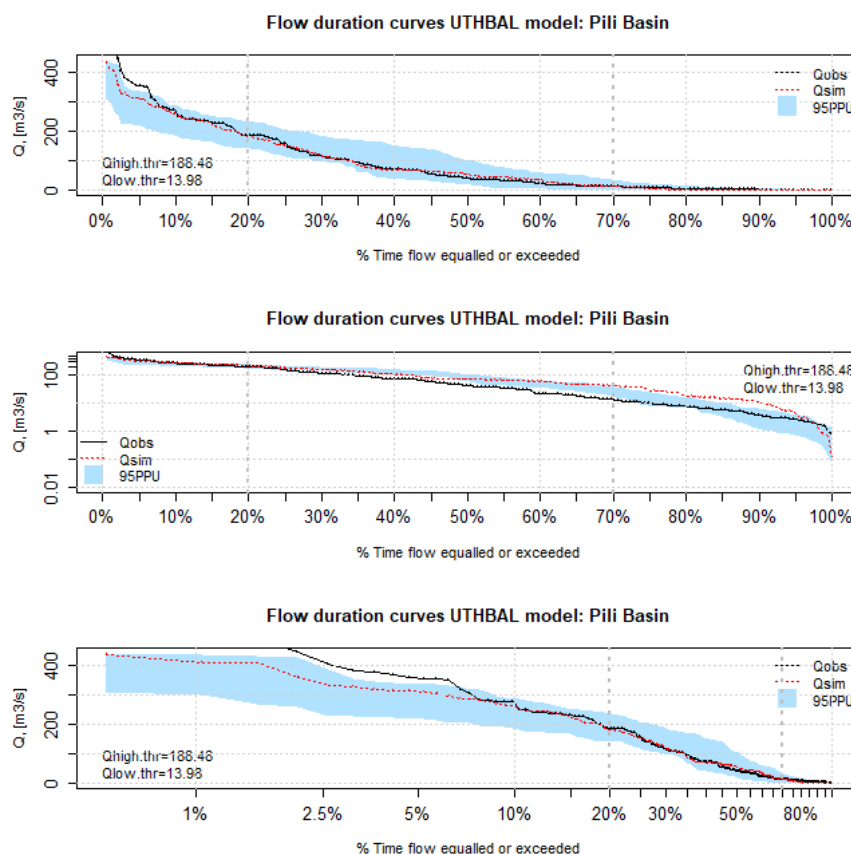
Παίρνοντας τις τιμές των παραμέτρων από τη περίοδο βαθμονόμησης, γίνεται η αντίστοιχη διαδικασία αλλά για τη περίοδο επαλήθευσης **1960-1977**. Παρακάτω παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προεκύψαν από τις δύο περιόδους. Αρχικά παρουσιάζονται οι παράμετροι και η τιμή της καλής προσαρμογής και στη συνέχεια οι στατιστικοί δείκτες Rfactor και Rfactor μαζί με τις καμπύλες διάρκειας ροής.

*Πίνακας 6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων από τη περίοδο βαθμονόμησης και τη περίοδο επαλήθευσης*

GR2M		
	1960-1977	1977-1993
<b>X1</b>	395.300	580.655
<b>X2</b>	0.991	1.008
<b>gof</b>	0.754	0.857
Uncertainty		
<b>pf</b>	0.563	0.714
<b>rf</b>	0.611	0.734

UTHBAL		
	1960-1977	1977-1993
<b>Cm</b>	6.660	2.149
<b>CN</b>	45.435	46.546
<b>K</b>	0.000	0.299
<b>aAET</b>	0.002	0.261
<b>CONMR</b>	0.120	0.091
<b>CONGROUND</b>	0.943	0.998
<b>gof</b>	0.788	0.868
Uncertainty		
<b>pf</b>	0.604	0.604
<b>rf</b>	0.558	0.673





*Εικόνα 6.23* Καμπύλες διάρκειας ροής για τη περίοδο βαθμονόμησης 1960-1977 α) Πάνω-GR2M β) Κάτω UTHBAL

## 6.7 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας εισόδου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα υδρολογικά μοντέλα επηρεάζονται σημαντικά από διαφορετικά υδροκλιματικά δεδομένα εισόδου τα οποία μπορεί να επιφέρουν αβεβαιότητες. Στην παρούσα ανασκόπηση, επικεντρωθήκαμε στην εξατμισοδιαπνοή και την αβεβαιότητά της, όπου αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός συντελεστή (30%) που πολλαπλασιάζει την τιμή εισόδου για να διορθώσει την αβεβαιότητα. Η προσέγγιση αυτή είναι σχετικά γρήγορη και εύκολη, καθώς ο συντελεστής πολλαπλασιασμού βασίζεται στην κρίση των εμπειρογνομόνων ή εκτιμάται με τις παραμέτρους του μοντέλου. Στον Πίνακα 6.7 συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εισαγωγή των δεδομένων με και χωρίς τη προσαύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά 30%, χρησιμοποιώντας την μέθοδο βελτιστοποίησης χρήσης σμήνους σωματιδίων (**hydroPSO**) και την αντικειμενική συνάρτηση **KGE2**.

Πίνακας 6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων με και χωρίς προσαύξηση εξατμισοδιαπνοής

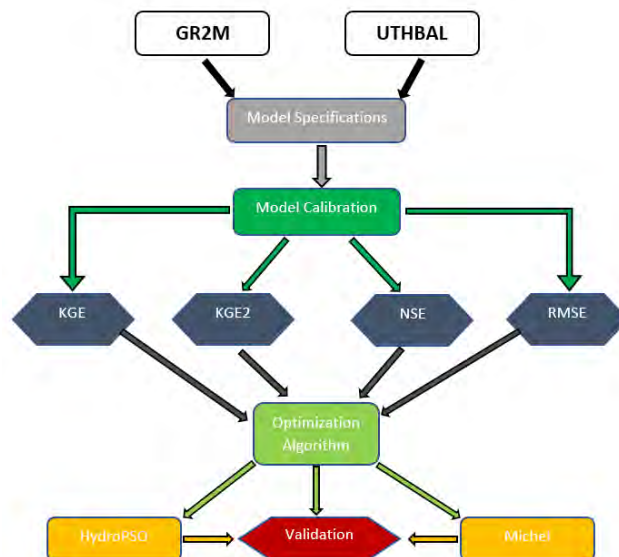
GR2M				
	1960-1977		1977-1993	
	30%	-	30%	-
<b>X1</b>	395.300	337.875	580.655	473.806
<b>X2</b>	0.991	0.922	1.008	0.923
<b>gof</b>	0.754	0.722	0.857	0.828
Uncertainty				
<b>pf</b>	0.563	0.573	0.714	0.573
<b>rf</b>	0.611	0.637	0.734	0.637

UTHBAL				
	1960-1977		1977-1993	
	30%	-	30%	-
<b>Cm</b>	6.660	6.505	2.149	4.980
<b>CN</b>	45.435	46.302	46.546	41.993
<b>K</b>	0.000	0.188	0.299	0.212
<b>aAET</b>	0.002	0.194	0.261	0.109
<b>CONMR</b>	0.120	0.006	0.091	0.056
<b>CONGROUND</b>	0.943	1.000	0.998	0.990
<b>gof</b>	0.788	0.805	0.868	0.881
Uncertainty				
<b>pf</b>	0.604	0.682	0.604	0.667
<b>rf</b>	0.558	0.611	0.673	0.738

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο μοντέλο **GR2M** η προσαύξηση της εξατμισοδιαπνοής επέφερε κάποια βελτίωση, ενώ βλέπουμε να συμβαίνει το αντίθετο στο μοντέλο **UTHBAL**. Ωστόσο, και στα δύο μοντέλα επιβεβαιώνεται η επιλογή κατάλληλης περιόδου 1977-1993 όπως επίσης επισημαίνεται ότι με το μοντέλο **UTHBAL** επιτυγχάνεται καλύτερη τιμή του gof, καθώς και των δεικτών pfactor και rfactor.

## 6.8 Αποτελέσματα ανάλυσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η αβεβαιότητα παραμέτρων παίζει σημαντικό ρόλο σε ένα υδρολογικό μοντέλο. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση με τους άλλους τρεις αλγορίθμους βελτιστοποίησης (**NSE**, **KGE**, **RMSE**) με την ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε παραπάνω, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 6.24. Στόχος αποτελεί η ανάδειξη της αβεβαιότητας παραμέτρων, χρησιμοποιώντας τους δείκτες καλής προσαρμογής, τις τιμές των παραμέτρων καθώς και άλλους στατιστικούς δείκτες. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω (Πίνακας 6.8 και Πίνακας 6.9) και στα συγκριτικά διαγράμματα Taylor και Target (Εικόνα 6.25-Εικόνα 6.28).



Εικόνα 6.24 Αναπαράσταση υδρολογικής προσομοίωσης με μοντέλα GR2M, UTHBAL



Πίνακας 6.8 Τιμές των παραμέτρων και δείκτες καλής προσαρμογής για κάθε αλγόριθμο βελτιστοποίησης (KGE2, KGE, NSE, RMSE)

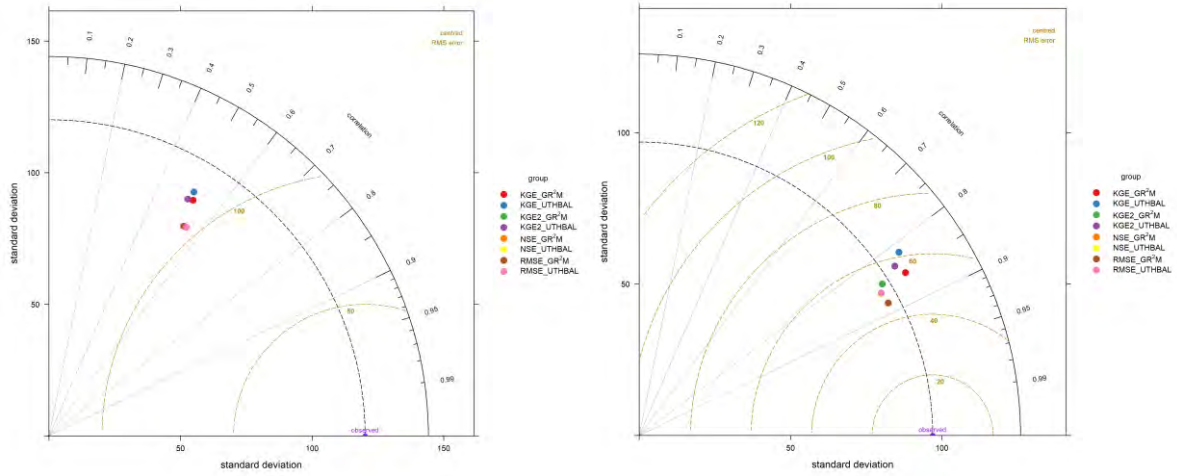
MODEL	PARAMETER	OBJECTIVE FUNCTIONS							
		KGE(2012)		KGE(2009)		NSE		RMSE	
		1960-1977	1977-1993	1960-1977	1977-1993	1960-1977	1977-1993	1960-1977	1977-1993
GR2M	X1	395.300	580.655	426.811	632.723	818.108	1227.404	817.984	1228.219
	X2	0.991	1.008	1.079	1.046	1.108	1.085	1.108	1.085
	gof	0.754	0.857	0.774	0.862	0.729	0.793	62.604	44.035
UTHBAL	Cm	6.660	2.149	10.000	2.673	10.000	4.509	9.979	2.474
	CN	45.435	46.546	46.642	40.729	40.070	36.601	39.653	36.709
	K	0.000	0.299	0.001	0.098	0.162	0.209	0.147	0.206
	aAET	0.002	0.261	0.012	0.038	0.257	0.289	0.280	0.296
	CONMR	0.120	0.091	0.212	0.162	0.149	0.148	0.153	0.149
	CONGROUND	0.943	0.998	0.972	0.983	0.970	0.750	0.999	0.771
	gof	0.788	0.868	0.783	0.866	0.697	0.773	66.186	46.093

Πίνακας 6.9 Στατιστικοί δείκτες για κάθε αλγόριθμο βελτιστοποίησης (KGE2, KGE, NSE, RMSE)

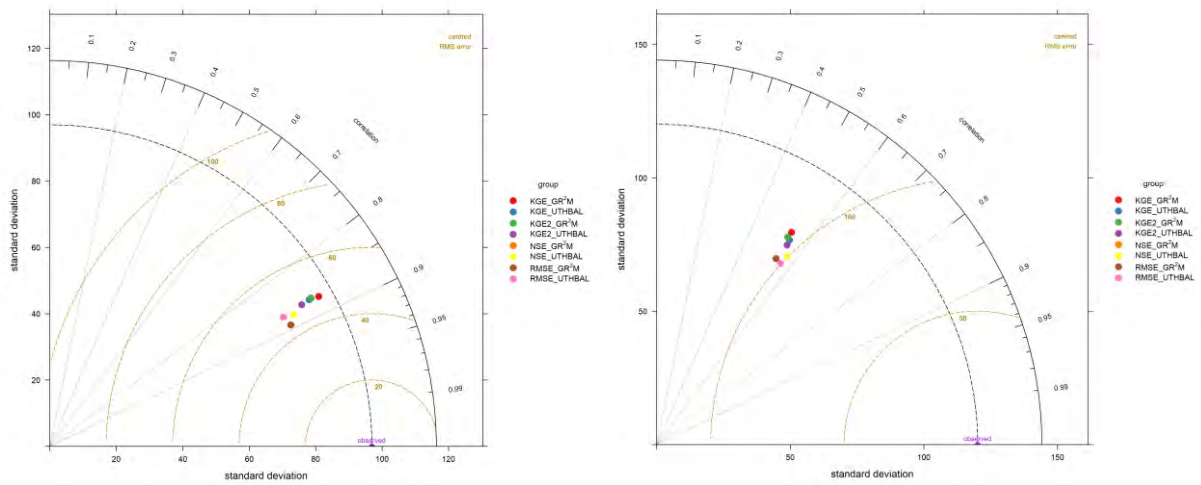
STATISTICS	GR2M															
	KGE2				KGE				NSE				RMSE			
	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.
ME	-2.5	-3.22	-0.89	0.16	8.27	7.41	3.11	4.28	6.02	4.55	3.52	5.21	6.02	4.56	3.53	5.23
MAE	39.48	60.78	30.05	55.68	40.88	62.49	29.89	56.14	39.38	61.26	30.62	54.74	39.38	61.26	30.62	54.74
MSE	4464.46	10120.24	2322.13	7228.07	4444.15	10546.49	2294.12	7301.34	3919.29	9611.61	1939.09	6216.9	3919.29	9611.94	1939.09	6216.51
RMSE	66.82	100.6	48.19	85.02	66.66	102.7	47.9	85.45	62.6	98.04	44.04	78.85	62.6	98.04	44.04	78.84
NRMSE %	55.4	83.4	49.7	87.7	55.3	85.2	49.4	88.2	51.9	81.3	45.4	81.3	51.9	81.3	45.4	81.3
PBIAS %	-2.6	-3.3	-1	0.2	8.5	7.6	3.3	4.6	6.2	4.7	3.8	5.6	6.2	4.7	3.8	5.6
RSR	0.55	0.83	0.5	0.88	0.55	0.85	0.49	0.88	0.52	0.81	0.45	0.81	0.52	0.81	0.45	0.81
rSD	0.8	0.78	0.93	0.95	0.87	0.85	0.96	0.97	0.79	0.77	0.84	0.85	0.79	0.77	0.84	0.85
NSE	0.69	0.3	0.75	0.23	0.69	0.27	0.75	0.22	0.73	0.34	0.79	0.33	0.73	0.34	0.79	0.33
mNSE	0.58	0.35	0.62	0.3	0.56	0.33	0.62	0.29	0.58	0.34	0.61	0.31	0.58	0.34	0.61	0.31
rNSE	-0.02	-5.96	-0.07	-10.16	-0.67	-7.74	-0.41	-11.03	-1.94	-6.95	-3.35	-12.79	-1.94	-6.95	-3.36	-12.8
d	0.9	0.75	0.93	0.77	0.91	0.76	0.93	0.77	0.94	0.76	0.94	0.78	0.91	0.76	0.94	0.78
md	0.77	0.65	0.81	0.64	0.77	0.65	0.81	0.64	0.77	0.64	0.79	0.63	0.77	0.64	0.79	0.63
rd	0.66	-1.51	0.7	-2.34	0.49	-1.92	0.61	-2.52	0.02	-1.9	-0.35	-3.54	0.02	-1.9	-0.35	-3.55
cp	0.6	0.09	0.7	0.07	0.6	0.06	0.7	0.06	0.65	0.14	0.75	0.2	0.65	0.14	0.75	0.2
r	0.83	0.58	0.87	0.59	0.84	0.59	0.87	0.6	0.86	0.6	0.89	0.62	0.86	0.6	0.89	0.62
R2	0.69	0.34	0.76	0.35	0.7	0.35	0.76	0.36	0.74	0.37	0.8	0.39	0.74	0.37	0.8	0.39
br2	0.55	0.23	0.68	0.27	0.61	0.25	0.71	0.29	0.61	0.25	0.71	0.31	0.61	0.25	0.71	0.31
KGE	0.74	0.53	0.85	0.59	0.77	0.56	0.86	0.6	0.74	0.54	0.8	0.59	0.74	0.54	0.8	0.59
VE	0.59	0.37	0.68	0.4	0.58	0.36	0.68	0.4	0.59	0.37	0.67	0.41	0.59	0.37	0.67	0.41

STATISTICS	UTHBAL															
	KGE2				KGE				NSE				RMSE			
	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.	60-77 Cal.	77-93 Val.	77-93 Cal.	60-77 Val.
ME	-5.82	-5.98	-5.62	-5.6	1.9	1.99	-0.37	-0.35	-2.68	-3.33	-1.26	-0.68	-1.88	-2.56	-2.26	-1.7
MAE	41.78	62.68	31.89	55.71	42.39	64.9	32.48	52.76	39.17	62.3	31.92	50.25	39.25	62.53	32.93	50.23
MSE	4954.15	10941.77	2288.05	6771.61	5014.89	11562.91	2299.41	6347.48	4389.08	10026.76	2117.55	5551.93	4380.64	10062.97	2222.15	5509.99
RMSE	70.39	104.6	47.83	82.29	70.82	107.53	47.95	79.67	66.25	100.13	46.02	74.51	66.19	100.31	47.14	74.23
NRMSE %	58.4	86.7	49.3	84.9	58.7	89.2	49.5	82.2	54.9	83	47.5	76.9	54.9	83.2	48.6	76.6
PBIAS %	-6	-6.2	-6	-6	2	2.1	-0.4	-0.4	-2.8	-3.4	-1.4	-0.7	-1.9	-2.6	-2.4	-1.8
RSR	0.58	0.87	0.49	0.85	0.59	0.89	0.49	0.82	0.55	0.83	0.47	0.77	0.55	0.83	0.49	0.77
rSD	0.86	0.84	0.9	0.92	0.89	0.87	0.93	0.94	0.79	0.77	0.86	0.88	0.79	0.77	0.83	0.85
NSE	0.66	0.24	0.76	0.28	0.65	0.2	0.75	0.32	0.7	0.31	0.77	0.41	0.7	0.3	0.76	0.41
mNSE	0.55	0.33	0.6	0.3	0.54	0.3	0.59	0.33	0.58	0.33	0.6	0.37	0.58	0.33	0.58	0.37
rNSE	0.05	-6.78	-0.54	-9.16	-0.28	-8.81	-0.85	-11.23	-0.31	-5.7	-1.33	-8.82	-0.38	-5.88	-1.93	-10.28
d	0.89	0.74	0.93	0.78	0.9	0.73	0.93	0.8	0.9	0.74	0.93	0.81	0.9	0.74	0.92	0.81
md	0.77	0.65	0.79	0.64	0.76	0.63	0.79	0.66	0.77	0.63	0.79	0.67	0.77	0.63	0.77	0.66
rd	0.71	-1.66	0.55	-2.1	0.61	-2.3	0.47	-2.68	0.56	-1.48	0.29	-2.11	0.54	-1.54	0.07	-2.72
cp	0.56	0.02	0.7	0.12	0.55	-0.03	0.7	0.18	0.61	0.1	0.73	0.28	0.61	0.1	0.71	0.29
r	0.81	0.57	0.87	0.61	0.81	0.55	0.87	0.64	0.84	0.58	0.88	0.67	0.84	0.58	0.87	0.67
R2	0.66	0.32	0.76	0.37	0.66	0.3	0.76	0.41	0.7	0.34	0.77	0.45	0.7	0.34	0.76	0.44
br2	0.53	0.21	0.65	0.28	0.56	0.21	0.68	0.33	0.55	0.22	0.67	0.35	0.55	0.22	0.65	0.34
KGE	0.76	0.53	0.82	0.6	0.78	0.53	0.85	0.64	0.73	0.52	0.82	0.65	0.73	0.52	0.79	0.63
VE	0.57	0.36	0.66	0.4	0.56	0.33	0.65	0.43	0.6	0.36	0.66	0.46	0.6	0.36	0.65	0.46

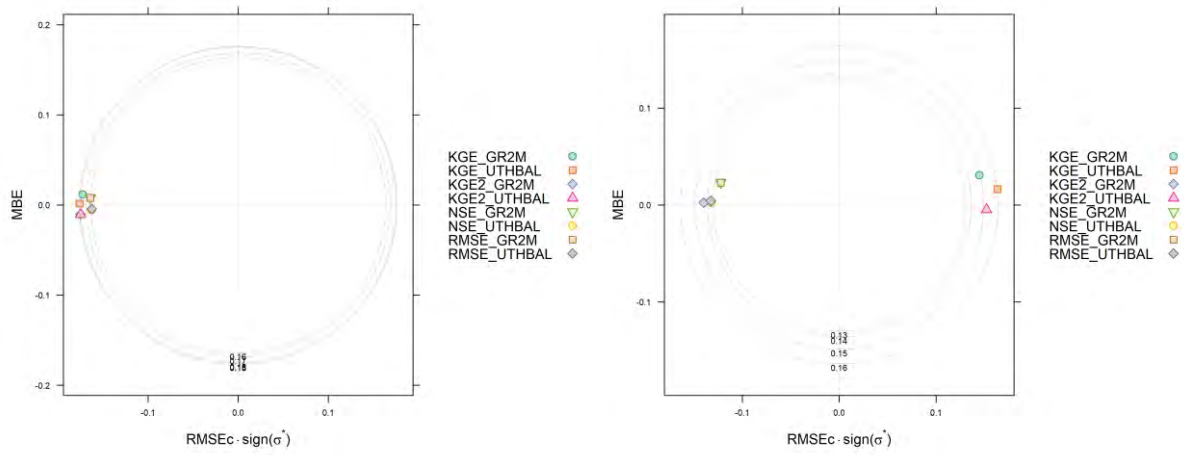




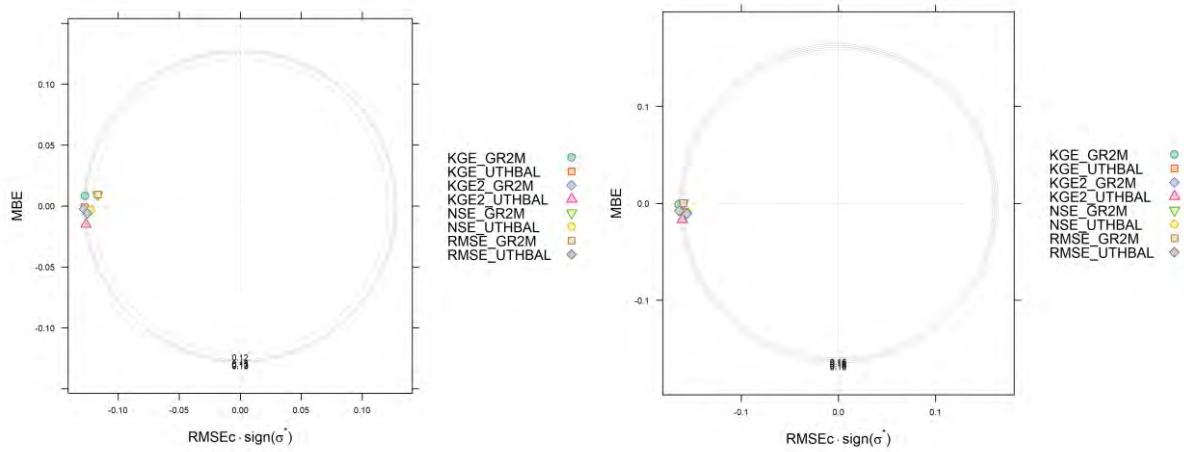
Εικόνα 6.25 Taylor Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1961-1977 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1977-1993



Εικόνα 6.26 Taylor Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1977-1993 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1961-1977



Εικόνα 6.27 Target Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1961-1977 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1977-1993



Εικόνα 6.28 Target Diagrams α)Αριστερά περίοδος βαθμονόμησης 1977-1993 β)Δεξιά περίοδος επαλήθευσης 1961-1977



## 7 Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι

### 7.1 Συμπεράσματα

Κατά την τελευταία δεκαετία, η γλώσσα προγραμματισμού ανοικτού κώδικα R έχει αποκτήσει κεντρικό ρόλο στην υδρολογική έρευνα καθώς και στην επιχειρησιακή πρακτική της υδρολογίας. Τόσο η ευέλικτη φύση της γλώσσας όσο και το ευρύ φάσμα υπολογιστικών, οπτικοποιητικών και μοντελοποιητικών εργαλείων (φυσικής βάσης και στατιστικών) διευκολύνουν τη δοκιμή υδρολογικών θεωριών. Η άνοδος της υπολογιστικής υδρολογίας διαδραματίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της αναπαραγωγιμότητας της επιστήμης και της υπολογιστικής παιδείας.

Η παρούσα διπλωματική με χρήση αυτού του εργαλείου, αξιολόγησε την υδρολογική απόδοση δύο μηνιαίων μοντέλων υδατικού ισοζυγίου στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού, ακολουθώντας ένα διάγραμμα ροής όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.24. Τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται παρακάτω:

A] Κατά τη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων αντιμετωπίζεται η πρόκληση της πολυπλοκότητας μιας λεκάνης απορροής και του μεγάλου αριθμού αλληλεπιδραστικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Δημιουργείται μια αβεβαιότητα προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου που αναπαράγουν εύλογα τη συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής, ιδίως σε ένα κατανεμημένο μοντέλο όπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων.

Με την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων που πραγματοποιήθηκε σε συνδιασμό με την ανάλυση αβεβαιότητας, όσον αφορά το μοντέλο **UTHBAL**, η παράμετρος **cm** είναι η λιγότερο αποτελεσματική στο μοντέλο ενώ η **CONGROUND** φαίνεται να επιφέρει λιγότερη αβεβαιότητα στην υδρολογική μοντελοποίηση. Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης αναδεικνύουν τη σημασία της επιλογής ενός κατάλληλου μέτρου καλής προσαρμογής για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων, καθώς και την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του hydroPSO για την εξεύρεση βέλτιστων λύσεων. Οι υπόλοιπες παράμετροι αποδείχθηκαν ότι είναι σχετικά καλά καθορισμένες και σε συνδιασμό με τη τροποποιημένη αποδοτικότητα Kling-Gurta (**KGE2**) που χρησιμοποιείται ως μέτρο καλής προσαρμογής, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος, παρατηρώντας τους στατιστικούς δείκτες και διαστήματα εμπιστοσύνης παρατηρείται ότι η διακύμανση των δύο μοντέλων δεν διαφέρει πολύ το μοντέλο, αλλά το μοντέλο **GR2M** έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με το **UTHBAL**.

B] Σε μια βαθμονόμηση όπου λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας, η επικύρωση διαδραματίζει τον ευαίσθητο ρόλο της αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του υδρολογικού μοντέλου καθώς και της ακρίβειας και της εγκυρότητας των παραδοχών του μοντέλου σφάλματος. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, συμπεραίνουμε ότι παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στη προσομοίωση όσο και στην επίδραση τους στις παραμέτρους των μοντέλων.

Καταληκτικά, η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ροής των υδατορευμάτων θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη και να αξιολογείται στα επιχειρησιακά έργα διαχείρισης των υδατικών πόρων.

## 7.2 Μελλοντικές Προτάσεις

Η ανάπτυξη μοντέλων είναι μια ατέρμονη διαδικασία. Είναι πιθανό να βρεθεί στο μέλλον ένα μοντέλο πιο πιστό στα δεδομένα, ενδεχομένως με νέες γνώσεις όσον αφορά τις φυσικές διεργασίες. Για την αντιμετώπιση των ζητημάτων αναπαραγωγιμότητας, τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν μπορούν να διερευνηθούν και σε άλλες λεκάνες απορροής, με στόχο την περαιτέρω εξερεύνηση της αβεβαιότητας και τον έλεγχο τρωτότητας των μοντέλων σε διαφορετικό περιβάλλον του υδρολογικού κύκλου.

## 8 Βιβλιογραφία

- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran: IMPACT OF CLIMATE CHANGE IN IRAN. *Water Resources Research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>
- Arnaud, P., Lavabre, J., Fouchier, C., Diss, S., & Javelle, P. (2011). Sensitivity of hydrological models to uncertainty in rainfall input. *Hydrological Sciences Journal*, 56(3), 397–410. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.563742>
- Bárdossy, A., Anwar, F., & Seidel, J. (2020). Hydrological Modelling in Data Sparse Environment: Inverse Modelling of a Historical Flood Event. *Water*, 12(11), 3242. <https://doi.org/10.3390/w12113242>
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105(1–2), 157–172. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90101-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7)
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 18–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- Beven, K., Smith, P., & Freer, J. (2007). Comment on “Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology” by Pietro Mantovan and Ezio Todini. *Journal of Hydrology*, 338(3–4), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.023>
- Beven, K., Smith, P. J., & Freer, J. E. (2008). So just why would a modeller choose to be incoherent? *Journal of Hydrology*, 354(1–4), 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.007>
- Butts, M. B., Payne, J. T., Kristensen, M., & Madsen, H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 298(1–4), 242–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.042>
- C. A. Spruill, S. R. Workman, & J. L. Taraba. (2000). SIMULATION OF DAILY AND MONTHLY STREAM DISCHARGE FROM SMALL WATERSHEDS USING THE SWAT MODEL. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1431–1439. <https://doi.org/10.13031/2013.3041>
- Castaigns, W., Dartus, D., Le Dimet, F.-X., & Saulnier, G.-M. (2007). *Sensitivity analysis and parameter estimation for the distributed modeling of infiltration excess overland flow* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/hessd-4-363-2007>
- Clerc, M. (2010). Beyond Standard Particle Swarm Optimisation: *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 1(4), 46–61. <https://doi.org/10.4018/jsir.2010100103>
- Corradini, C., Melone, F., Ubertini, L., & Singh, V. P. (1986). Geomorphologic Approach to Synthesis of Direct Runoff Hydrograph from the Upper Tiber River Basin, Italy. In V. K. Gupta, I. Rodríguez-

- Iturbe, & E. F. Wood (Eds.), *Scale Problems in Hydrology* (Vol. 6, pp. 57–79). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-4678-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4678-1_4)
- Coron L, Thirel G, Delaigue O, Perrin C, Andréassian V (2017). “The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package.” *Environmental Modelling and Software*, 94, 166-171. doi:10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Coron L, Delaigue O, Thirel G, Dorchie D, Perrin C, Michel C (2022). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. doi:10.15454/EX11NA, R package version 1.7.0, <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- Criss, R. E., & Winston, W. E. (2008). Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22(14), 2723–2725. <https://doi.org/10.1002/hyp.7072>
- Crosetto, M., Tarantola, S., & Saltelli, A. (2000). Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1), 71–79. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00169-9)
- Dawdy, D. R., & O’Donnell, T. (1965). Mathematical Models of Catchment Behavior. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 123–137. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001271>
- Demetris Koutsoyiannis, & Th. Xanthopoulos. (1999). *Τεχνική Υδρολογία (Engineering Hydrology)*. kallipos.gr. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4856.0888>
- Demissie, Y. K., Valocchi, A. J., Minsker, B. S., & Bailey, B. A. (2009). Integrating a calibrated groundwater flow model with error-correcting data-driven models to improve predictions. *Journal of Hydrology*, 364(3–4), 257–271. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.007>
- Doherty, J., & Welter, D. (2010). A short exploration of structural noise: A SHORT EXPLORATION OF STRUCTURAL NOISE. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR008377>
- Domeneghetti, A., Castellarin, A., & Brath, A. (2012). Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1191–1202. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1191-2012>
- Duan, Q., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Rousseau, A. N., & Turcotte, R. (Eds.). (2003). *Calibration of Watershed Models* (Vol. 6). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/WS006>
- Engeland, K., Steinsland, I., Johansen, S. S., Petersen-Øverleir, A., & Kolberg, S. (2016). Effects of uncertainties in hydrological modelling. A case study of a mountainous catchment in Southern Norway. *Journal of Hydrology*, 536, 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.036>
- Evin, G., Kavetski, D., Thyer, M., & Kuczera, G. (2013). Pitfalls and improvements in the joint inference of heteroscedasticity and autocorrelation in hydrological model calibration: Technical note. *Water Resources Research*, 49(7), 4518–4524. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20284>

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., & Volinsky, C. T. (1999). Bayesian model averaging: A tutorial (with comments by M. Clyde, David Draper and E. I. George, and a rejoinder by the authors. *Statistical Science*, 14(4). <https://doi.org/10.1214/ss/1009212519>
- Højberg, A. L., & Refsgaard, J. C. (2005). Model uncertainty – parameter uncertainty versus conceptual models. *Water Science and Technology*, 52(6), 177–186. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0166>
- Hughes, D. A., & Beater, A. B. (1989). The applicability of two single event models to catchments with different physical characteristics. *Hydrological Sciences Journal*, 34(1), 63–78. <https://doi.org/10.1080/02626668909491309>
- Jin, X., Xu, C.-Y., Zhang, Q., & Singh, V. P. (2010). Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 383(3–4), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.028>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Kiang, J. E., Cohn, T. A., & Mason, Jr., R. R. (2009). Quantifying Uncertainty in Discharge Measurements: A New Approach. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*, 1–8. [https://doi.org/10.1061/41036\(342\)599](https://doi.org/10.1061/41036(342)599)
- Kiang, J. E., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K., Belleville, A., Sevrez, D., Sikorska, A. E., Petersen-Øverleir, A., Reitan, T., Freer, J., Renard, B., Mansanarez, V., & Mason, R. (2018). A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. *Water Resources Research*, 54(10), 7149–7176. <https://doi.org/10.1029/2018WR022708>
- Kitanidis, P. K., & Bras, R. L. (1980). Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 1. Analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, 16(6), 1025–1033. <https://doi.org/10.1029/WR016i006p01025>
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>



- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Kuczera, G., & Parent, E. (1998). Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1–4), 69–85. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00198-X)
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Loukas, A., Mylopoulos, N., & Vasiliades, L. (2007). A Modeling System for the Evaluation of Water Resources Management Strategies in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, 21(10), 1673–1702. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9120-5>
- Mantovan, P., & Todini, E. (2006). Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 330(1–2), 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.046>
- Martinez, G. F., & Gupta, H. V. (2011). Hydrologic consistency as a basis for assessing complexity of monthly water balance models for the continental United States: HYDROLOGIC CONSISTENCY AND MODEL COMPLEXITY. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR011229>
- Matott, L. S., Babendreier, J. E., & Purucker, S. T. (2009). Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools: EVALUATING ENVIRONMENTAL MODELS. *Water Resources Research*, 45(6). <https://doi.org/10.1029/2008WR007301>
- McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. *WIREs Water*, 5(6). <https://doi.org/10.1002/wat2.1319>
- McMillan, H., Krueger, T., & Freer, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality: BENCHMARKING OBSERVATIONAL UNCERTAINTIES FOR HYDROLOGY. *Hydrological Processes*, 26(26), 4078–4111. <https://doi.org/10.1002/hyp.9384>
- Moges, E., Demissie, Y., Larsen, L., & Yassin, F. (2020). Review: Sources of Hydrological Model Uncertainties and Advances in Their Analysis. *Water*, 13(1), 28. <https://doi.org/10.3390/w13010028>
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Mvoundou, C. N., Tathy, C., Obami-Ondon, H., Moukoko, G. B. M., & Niere, R. R. (2022). Calibration and Validation of the GR2M Hydrologic Model in the Kouilou-Niari Basin in Southwestern Congo-

Brazzaville. *Open Journal of Modern Hydrology*, 12(03), 109–124.

<https://doi.org/10.4236/ojmh.2022.123007>

- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005). Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155–1174. <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
- Raftery, A. E., Madigan, D., & Hoeting, J. A. (1997). Bayesian Model Averaging for Linear Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 92(437), 179–191. <https://doi.org/10.1080/01621459.1997.10473615>
- Razavi, S., & Gupta, H. V. (2015). What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models: A Critical Look at Sensitivity Analysis. *Water Resources Research*, 51(5), 3070–3092. <https://doi.org/10.1002/2014WR016527>
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Brown, J., & van der Keur, P. (2006). A framework for dealing with uncertainty due to model structure error. *Advances in Water Resources*, 29(11), 1586–1597. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.11.013>
- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors: IDENTIFIABILITY OF INPUT AND STRUCTURAL ERRORS. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR008328>
- Rojas, R., Feyen, L., & Dassargues, A. (2008). Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging: EVALUATING CONCEPTUAL MODEL. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2008WR006908>
- Semádeni-Davies, A. (1997). Monthly snowmelt modelling for large-scale climate change studies using the degree day approach. *Ecological Modelling*, 101(2–3), 303–323. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00054-9)
- Sikorska, A. E., Scheidegger, A., Banasik, K., & Rieckermann, J. (2013). Considering rating curve uncertainty in water level predictions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4415–4427. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4415-2013>
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and

- applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739–757.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>
- Spear, R. (1980). Eutrophication in peel inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. *Water Research*, 14(1), 43–49. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90040-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90040-8)
- Traore, V. B. (2014). Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. *American Journal of Environmental Protection*, 3(1), 36.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15>
- Tucker, G. E., & Whipple, K. X. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodel comparison: TOPOGRAPHIC PREDICTIONS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9), ETG 1-1-ETG 1-16.  
<https://doi.org/10.1029/2001JB000162>
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>
- Vandewiele, G. L., & Ni-Lar-Win. (1998). Monthly water balance models for 55 basins in 10 countries. *Hydrological Sciences Journal*, 43(5), 687–699. <https://doi.org/10.1080/02626669809492166>
- Wagener, T., & Gupta, H. V. (2005). Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 378–387.  
<https://doi.org/10.1007/s00477-005-0006-5>
- Willmott, C. J. (1981). ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography*, 2(2), 184–194.  
<https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Xu, T., & Valocchi, A. J. (2015). A Bayesian approach to improved calibration and prediction of groundwater models with structural error. *Water Resources Research*, 51(11), 9290–9311.  
<https://doi.org/10.1002/2015WR017912>
- Zambrano-Bigiarini, M. (2017). Hzambran/Hydrotsm V0.5-1. Zenodo.  
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.839864>
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020a). hzambran/hydroGOF: V0.4-0 (Version v0.4-0) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.839854>
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020b). hzambran/hydroPSO: V0.5-1 (Version v0.5-1) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1287350>
- Zambrano-Bigiarini, M., Clerc, M., & Rojas, R. (2013). Standard Particle Swarm Optimisation 2011 at CEC-2013: A baseline for future PSO improvements. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2337–2344. <https://doi.org/10.1109/CEC.2013.6557848>

Zambrano-Bigiarini, M., & Rojas, R. (2013). A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling & Software*, 43, 5–25.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.004>

Zambrano-Bigiarini, Mauricio. (2020). Tutorial for using hydroPSO to calibrate the GR4J model.

<https://doi.org/10.5281/ZENODO.3774533>

Παπαγιάννη, Χ., & Παπαγιάννη, C. (2009). Αποδοτικοί αλγόριθμοι σχεδίασης δικτύων επικοινωνιών με έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών]. <https://doi.org/10.12681/eadd/18613>

ΤΑΠΟΓΛΟΥ, Ε. (2011). Χρήση Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την Εκπαίδευση Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Εφαρμογή σε Υπόγεια Ύδατα. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ.