



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

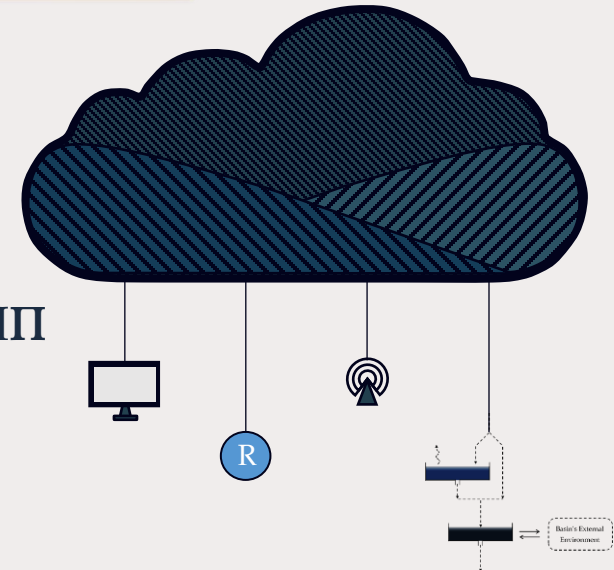
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ξεκαθαρίζοντας τις υποθέσεις εργασίας στον προσδιορισμό των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων: η έννοια της στοχαστικής βαθμονόμησης

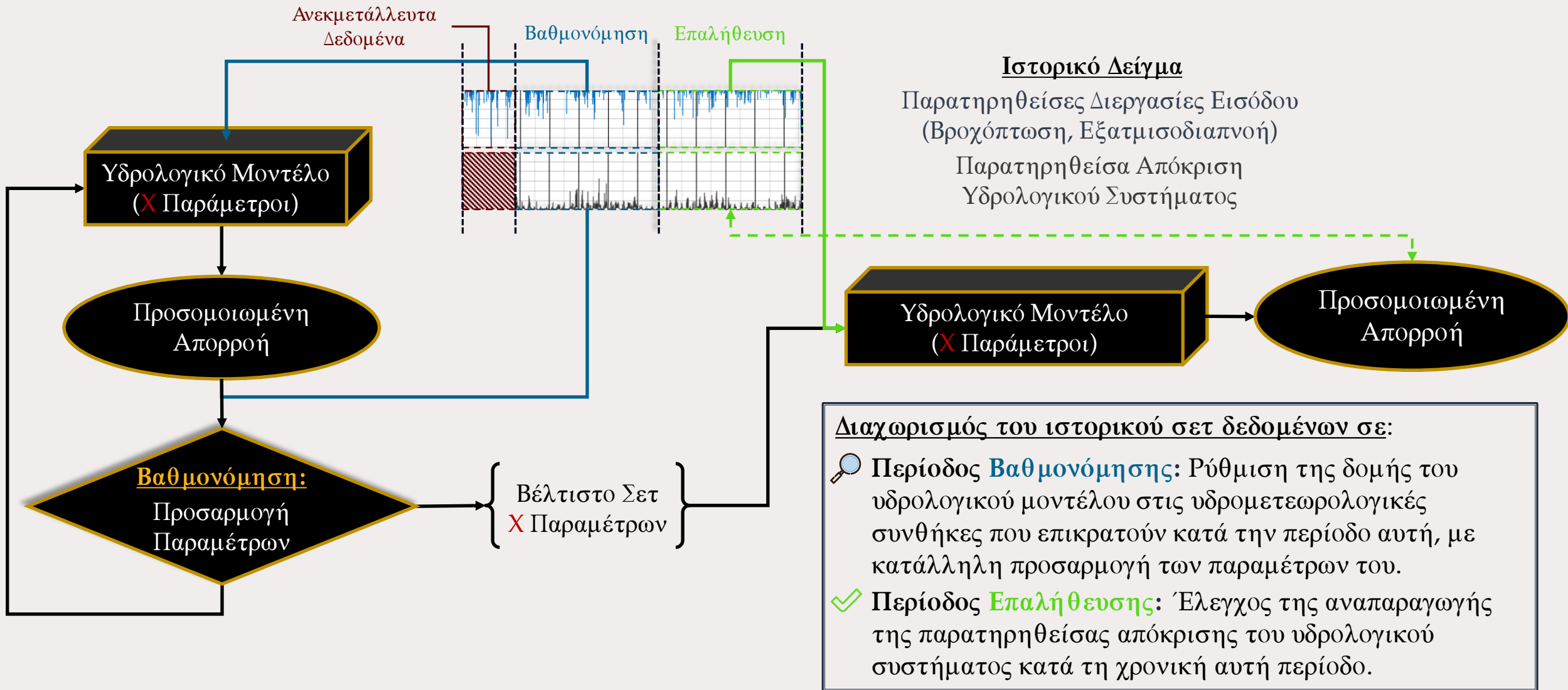
Βασίλειος Κουράκος

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2021



# Ντετερμινιστική Προσέγγιση Βαθμονόμησης Υδρολογικών Μοντέλων

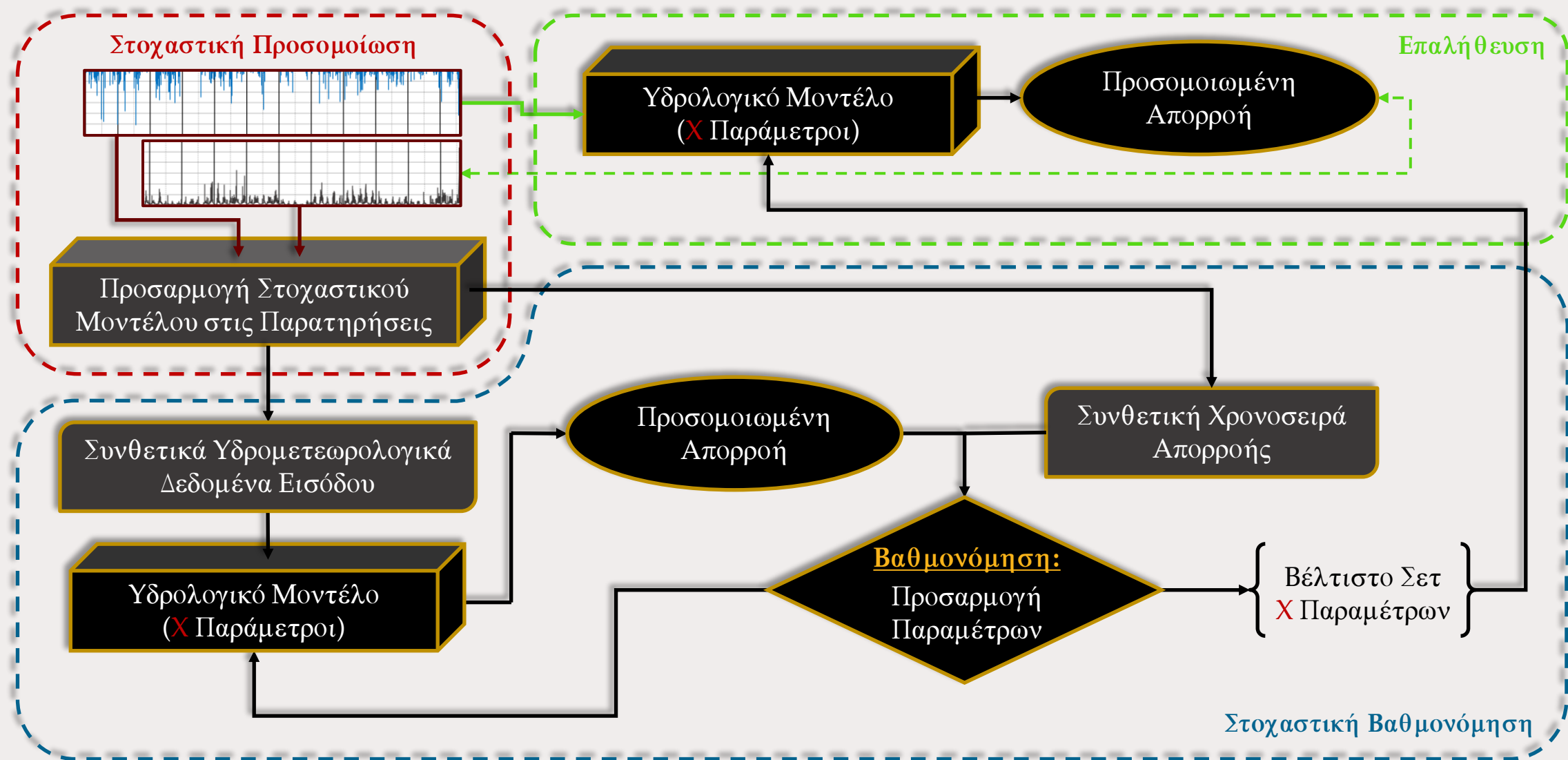


# Μειονεκτήματα της Συμβατικής Μεθόδου Βαθμονόμησης

- ① → Πιθανή ασυμφωνία μεταξύ της απόδοσης του ρυθμισμένου μοντέλου κατά την περίοδο βαθμονόμησης και επαλήθευσης, οδηγεί σε **ανάγκη για επιμήκυνση του χρονικού ορίζοντα της ρύθμισης**. Ωστόσο, τα ιστορικά δεδομένα δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικά του υδρολογικού καθεστώτος που κυριαρχεί στη περιοχή, ειδικά σε περιπτώσεις που το μήκος των παρατηρήσεων είναι μικρό.
- ② → Το δείγμα της επαλήθευσης εμπεριέχει **πολύτιμη υδρολογική πληροφορία**, η οποία πάντα **πρέπει να θυσιάζεται** για τους σκοπούς της επαλήθευσης του βαθμονομημένου μοντέλου.
- ③ → Απαίτηση για **δέσμευση του ίδιου μήκους παρατηρηθέντων χρονοσειρών** για τις υδρολογικές διεργασίες εισόδου και εξόδου στο μοντέλο. Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε περίοδος δεδομένων δεν ανήκει στο κοινό διάστημα μετρήσεων μεταξύ των μεγεθών εισόδου και εξόδου, θα πρέπει να αγνοηθεί.

Νέα τεχνική βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων: **Στοχαστική Βαθμονόμηση** [Efstratiadis *et al.*, 2021]

# Εννοιολογική Δομή Μεθοδολογίας Στοχαστικής Βαθμονόμησης



# Μεθοδολογία Στοχαστικής Βαθμονόμησης

Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί **συνθετικά** δεδομένα εισόδου και εξόδου, **μεγάλου μήκους** (εκατοντάδων ή χιλιάδων ετών) για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, ενώ το ρυθμισμένο μοντέλο επαληθεύεται για το **σύνολο** της περιόδου των **ιστορικών παρατηρήσεων**.


Κατά συνέπεια, τα μειονεκτήματα της μεθόδου διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος εξαλείφονται, εφόσον:


- ➔ Τα **σημαντικά μεγαλύτερου μήκους** συνθετικά δεδομένα που διατίθενται για τους σκοπούς της ρύθμισης, οδηγούν τελικά σε πιο «εύρωστα» σετ παραμέτρων και πιο σταθερή ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου.
- ➔ Η προσαρμοσμένη στην περιοχή μελέτης δομή του μοντέλου επαληθεύεται πια με χρήση **όλου του ιστορικού δείγματος**, με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται και η περίοδος επαλήθευσης.


Δεδομένων των συνθηκών αυτών, το **δίλλημα** σχετικά με το ποιο τμήμα των δεδομένων θα δεσμευτεί για τη διαδικασία της βαθμονόμησης και ποιο για την επαλήθευση, δεν υφίσταται πια.

# Στοχαστική Προσομοίωση – Προδιαγραφές Στοχαστικού Μοντέλου

Το στοχαστικό μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών θα πρέπει να εξασφαλίζει την **αναπαραγωγή όλης της στατιστικής πληροφορίας** που περιγράφει το πλήρες υδρολογικό καθεστώς που επικρατεί στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα:

 Περιεκτική αναπαράσταση και προσομοίωση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων εισόδου και εξόδου, **αναπαράγοντας όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών παρατηρήσεων**, με ανάθεση κατάλληλου μοντέλου ανάλογα με το είδος της διεργασίας προς προσομοίωση και της προς εξέταση χρονικής κλίμακας [Tsoukalas *et al.*, 2019, 2020].

 Αναπαράσταση των **αυτοσυσχετίσεων** (βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων) και των **ετερο-συσχετίσεων**, οι οποίες αποτελούν στατιστικά μέτρα για τις σχέσεις αίτιου και αιτιατού μεταξύ των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου.

 Στατιστική συνέπεια σε **πολλαπλές χρονικές κλίμακες**, ώστε να διασφαλισθεί η αναπαραγωγή της πιθανοτικής και στοχαστικής συμπεριφοράς των διεργασιών προς μοντελοποίηση όχι μόνο στην κλίμακα της υδρολογικής προσομοίωσης, αλλά και σε μεγαλύτερες χρονικά κλίμακες.

Οι **συνθετικές χρονοσειρές βροχής και απορροής** παράχθηκαν με χρήση του στοχαστικού μοντέλου *anySim* [Tsoukalas *et al.*, 2020], ενώ αυτές για τη **δυναμική εξατμισοδιαπνοή** εκτιμήθηκαν με βάση τις μέσες μηνιαίες και ημερήσιες τιμές που προέκυψαν από την αντίστοιχη ιστορική χρονοσειρά.

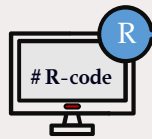


# Υδρολογικά Μοντέλα Διερεύνησης

Προκειμένου να εξεταστεί η λειτουργικότητα του προτεινόμενου πλαισίου βαθμονόμησης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με χρήση ενός αριθμού υδρολογικών μοντέλων μεταβλητής πολυπλοκότητας.

Καθένα από αυτά τα μοντέλα είναι ένα **αδιαμέριστο εννοιολογικό προσομοίωμα**, το οποίο κάνει χρήση ενός σετ μαθηματικών εξισώσεων για την περιγραφή των κύριων υδρολογικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα σε κλίμακα υδρολογικής λεκάνης απορροής. Ως δεδομένα εισόδου το κάθε μοντέλο δέχεται τη μέση βροχόπτωση (P) και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET), σε χρονική κλίμακα ημέρας ή μήνα, ανάλογα με το υδρολογικό μοντέλο.

Όλες οι υδρολογικές συνιστώσες του κάθε μοντέλου εκφράζονται σε μονάδες βάθους ανά μονάδα χρόνου (ήτοι mm/month ή mm/day), ενώ οι δεξαμενές αποθήκευσης σε όρους βάθους (ήτοι mm).

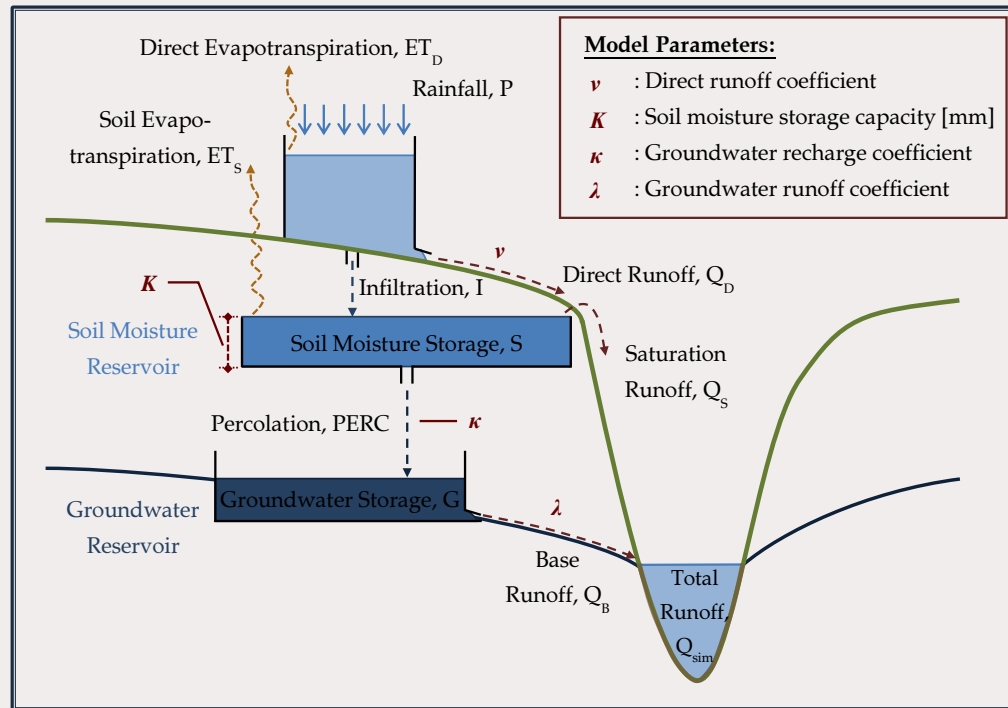


Τα μοντέλα αυτά είτε αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον της γλώσσα προγραμματισμού R για τους σκοπούς της εργασίας (μοντέλα Zygus), είτε είναι ήδη διαθέσιμα σε γλώσσα R (μοντέλα GR [Coron *et al.*, 2017a; Coron *et al.*, 2017b]).

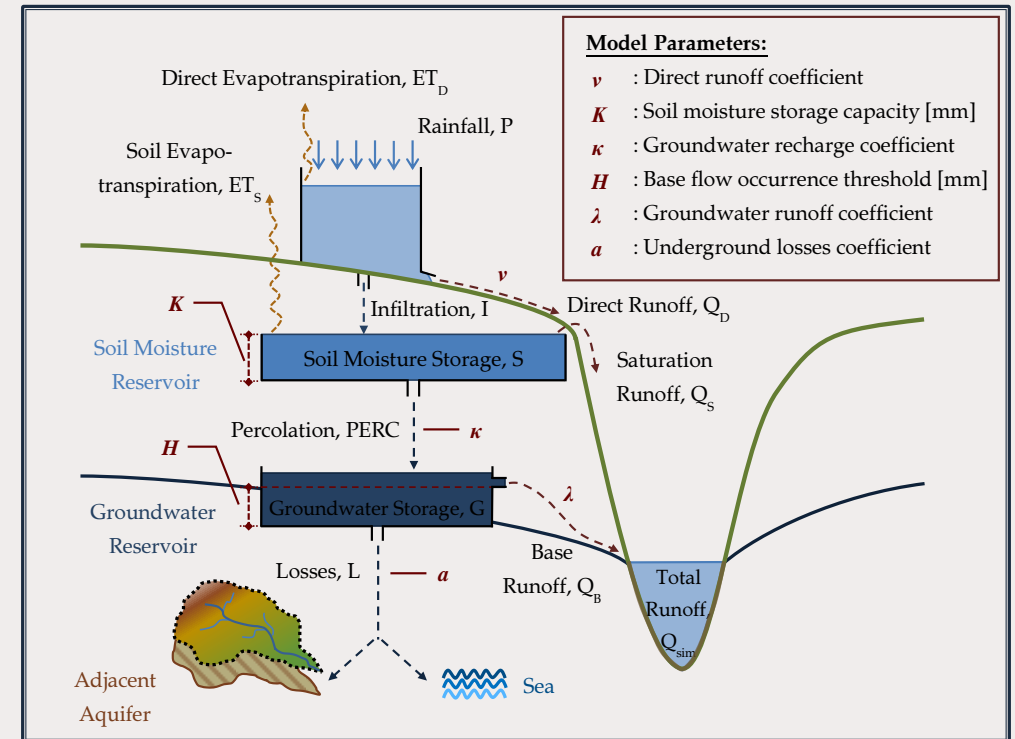
Παρακάτω παρουσιάζεται εν συντομία η εννοιολογική αναπαράσταση των πέντε υδρολογικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

# Υδρολογικά Μοντέλα Zygos

- 1 **Zygos4P:** μοντέλο υδατικού ισοζυγίου τεσσάρων παραμέτρων, βασισμένο σε μια απλοποιημένη εκδοχή του υδρολογικού μοντέλου «Ζυγός» [Kozanis and Efstratiadis, 2006].



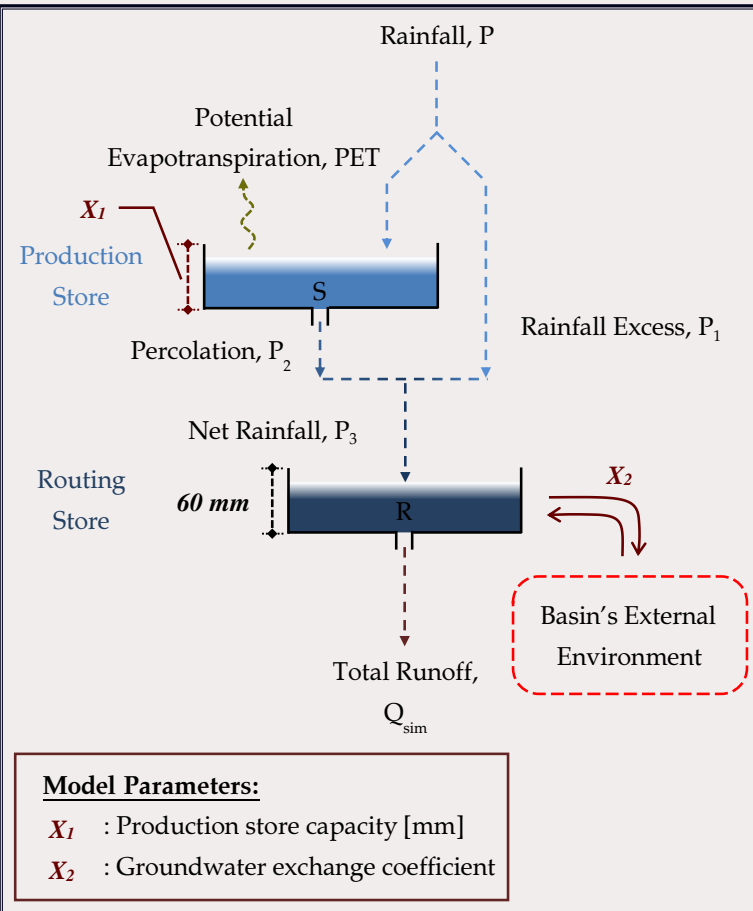
- 2 **Zygos6P:** μοντέλο έξι παραμέτρων, βασισμένο στη δομή του μοντέλου Zygos4P, εφαρμόζοντας μερικές τροποποιήσεις.



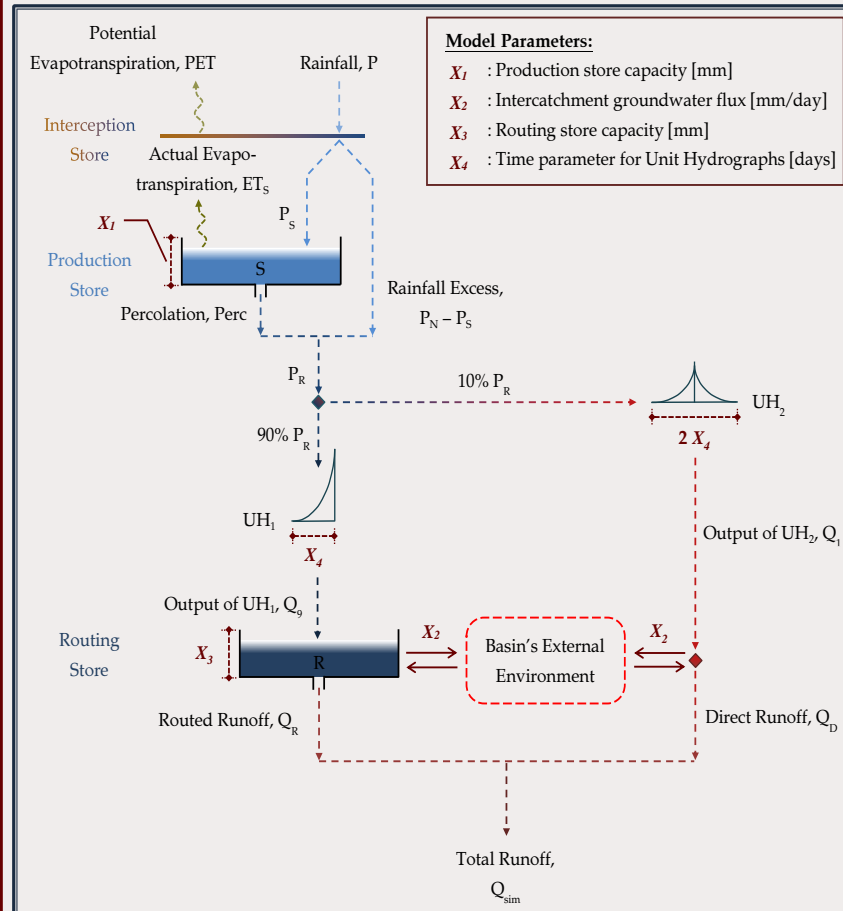


# Υδρολογικά Μοντέλα GR

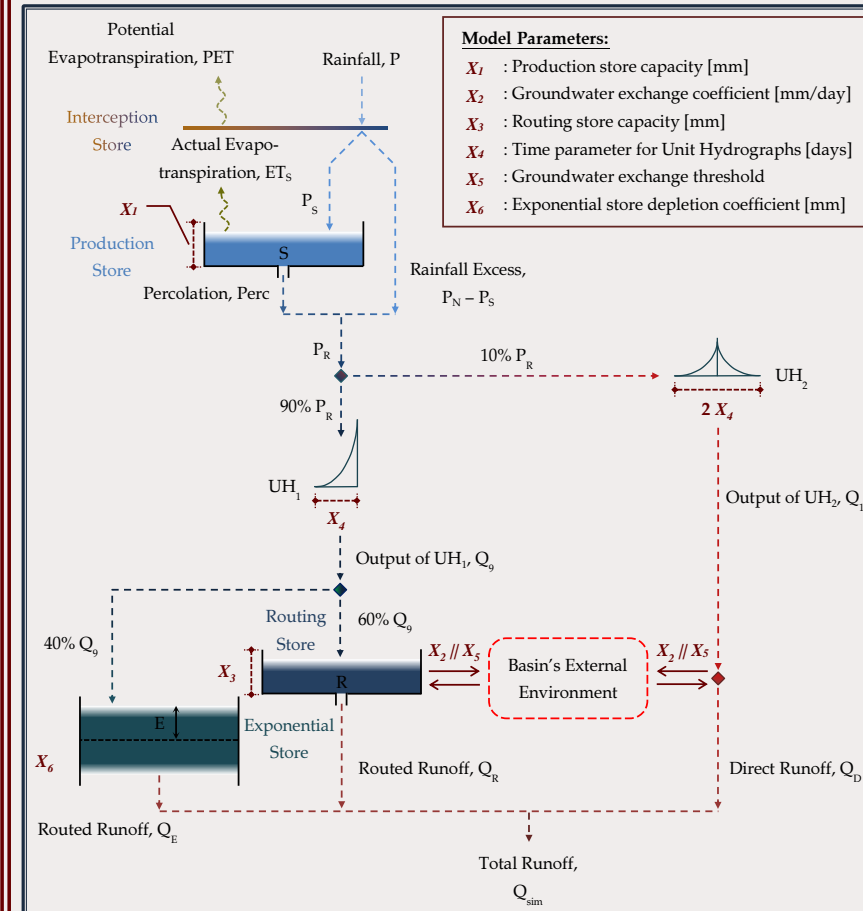
**1 GR2M:** μοντέλο δύο παραμέτρων και μηνιαίου βήματος προσομοίωσης [Mouelhi *et al.*, 2006].



**2 GR4J:** ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων [Perrin *et al.*, 2003].



**3 GR6J:** ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο έξι παραμέτρων, που προέκυψε μετά από διαρκείς τροποποιήσεις του GR4J [Le Moine, 2008; Pushpalatha *et al.*, 2011].



# Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης & Κριτήριο Επίδοσης Μοντέλων

- **Μοντέλα Zygos:** χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου (Evolutionary Annealing-Simplex - EAS) [Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002], ενός υβριδικού σχήματος που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μεθόδων τοπικής και ολικής αναζήτησης.
- **Μοντέλα GR:** χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης [Michel, 1991], ο οποίος συνδυάζει τοπική και ολική προσέγγιση αναζήτησης του βέλτιστου σετ παραμέτρων, και είναι ενσωματωμένος στον κώδικα των μοντέλων (*airGR* R-package [Coron et al., 2017a; Coron et al., 2017b]).

Ο διπλανός πίνακας συνοψίζει τα όρια μεταβολής των παραμέτρων των εξεταζόμενων μοντέλων βροχής-απορροής

Δείκτης Καλής Προσαρμογής:  
[Nash and Sutcliffe, 1970]

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2}$$

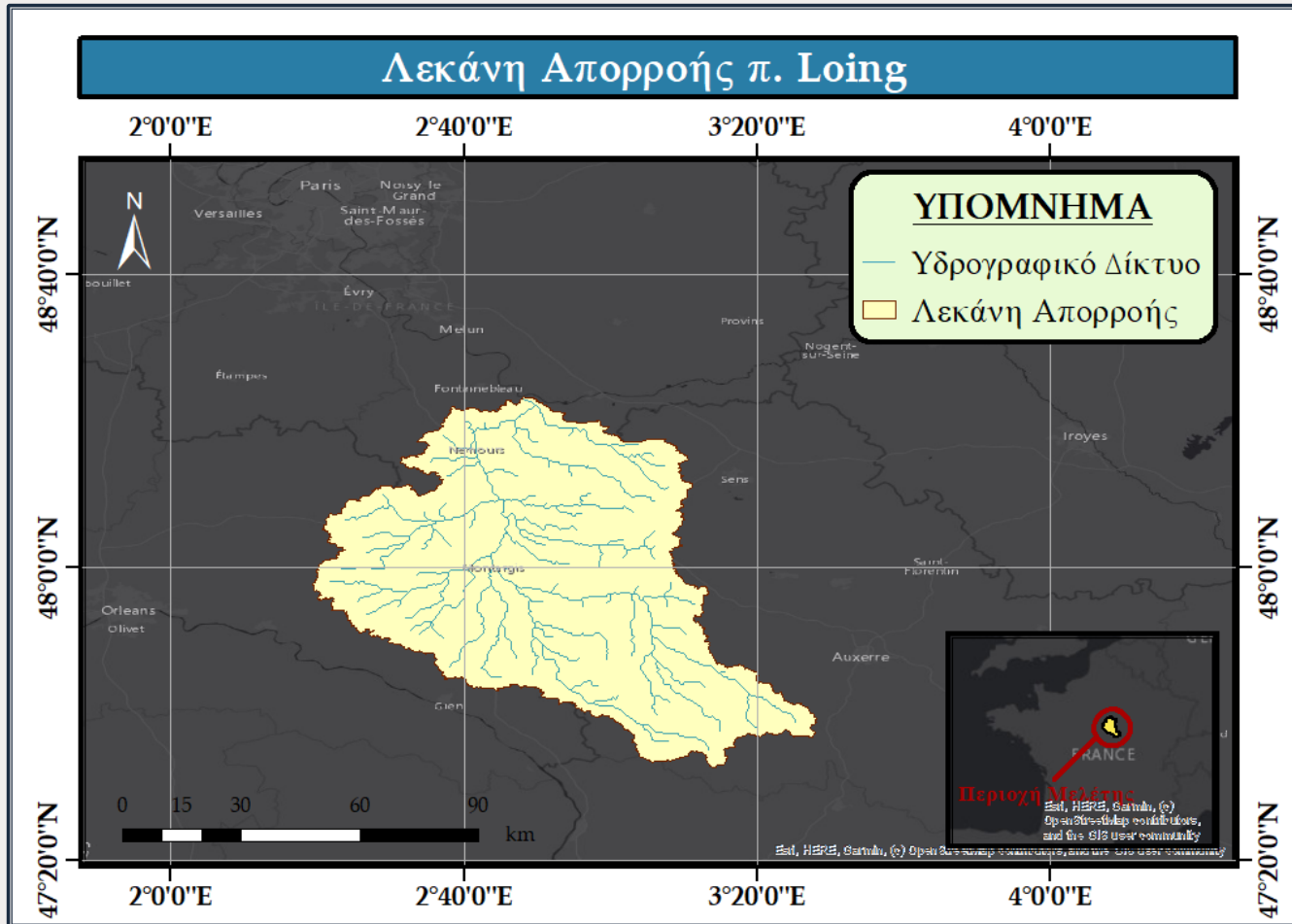
όπου  $Q_{obs}(t)$  οι παρατηρηθείσες τιμές απορροής,  
 $Q_{sim}(t)$  οι προσομοιωμένες τιμές απορροής,  
 $\overline{Q_{obs}}$  η μέση παρατηρηθείσα απορροή

| Model   | Parameter | Unit        | Range      | Reference                                |
|---------|-----------|-------------|------------|--|
| Zygos4P | $\nu$     | -           | [0, 1]     | Ranges deduced from numerous simulations |
|         | $K$       | mm          | [0, 1000]  |  |
|         | $\kappa$  | -           | [0, 1]     |  |
|         | $\lambda$ | -           | [0, 1]     |  |
| Zygos6P | $\nu$     | -           | [0.1, 2.5] |  |
|         | $H$       | mm          | [0, 300]   |  |
|         | $a$       | -           | [0, 1]     |  |
| GR2M    | $X_1$     | mm          | [0, 1500]  | Mouelhi et al., 2006                     |
|         | $X_2$     | - or mm/day | [-10, 10]  |  |
| GR4J    | $X_3$     | mm          | [1, 500]   | Perrin et al., 2003                      |
|         | $X_4$     | days        | [0.5, 8]   |  |
| GR6J    | $X_5$     | -           | [-4, 4]    | Le Moine, 2008                           |
|         | $X_6$     | mm          | [0.5, 20]  | Pushpalatha et al., 2011                 |

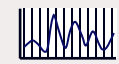
# Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Περιοχή Μελέτης



Περιοχή Μελέτης: Λεκάνη Απορροής π. Loing  
Έκταση 3900 km<sup>2</sup> και μέσο τοπογραφικό υψόμετρο 148 m

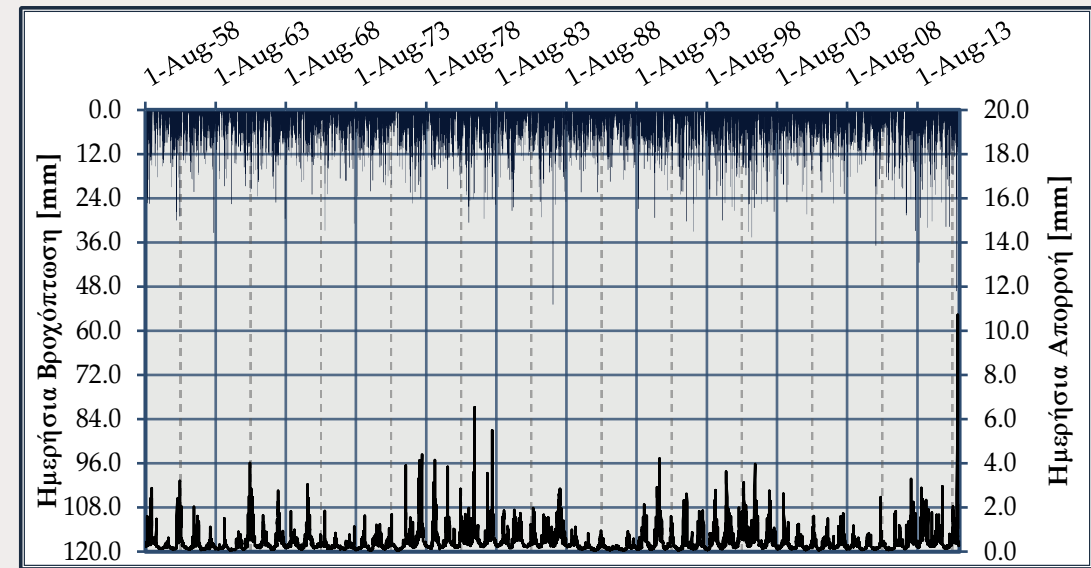


Σχήμα | Λεκάνη απορροής π. Loing και υδρογραφικό δίκτυο



Τα διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα (βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή, απορροή) αφορούν την περίοδο 1<sup>η</sup> Αυγούστου 1958 έως 31<sup>η</sup> Ιουλίου 2016 και διατίθενται σε ημερήσια κλίμακα.

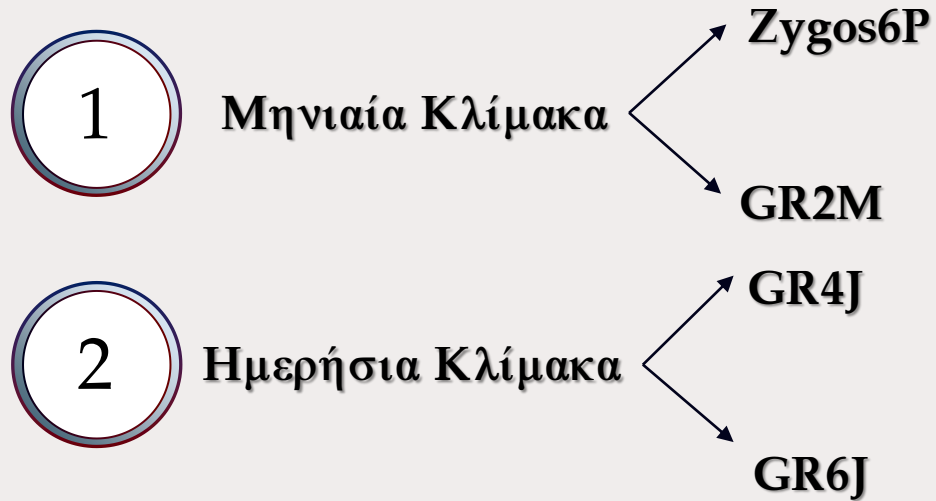
Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από προηγούμενη έρευνα που έχει διενεργηθεί στη ίδια λεκάνη απορροής [Rebolho *et al.*, 2018].



Σχήμα | Ιστορικές χρονοσειρές βροχής και απορροής σε ημερήσια κλίμακα (1<sup>η</sup> Αυγούστου 1958 έως 31<sup>η</sup> Ιουλίου 2016)

# Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Δομή Ανάλυσης

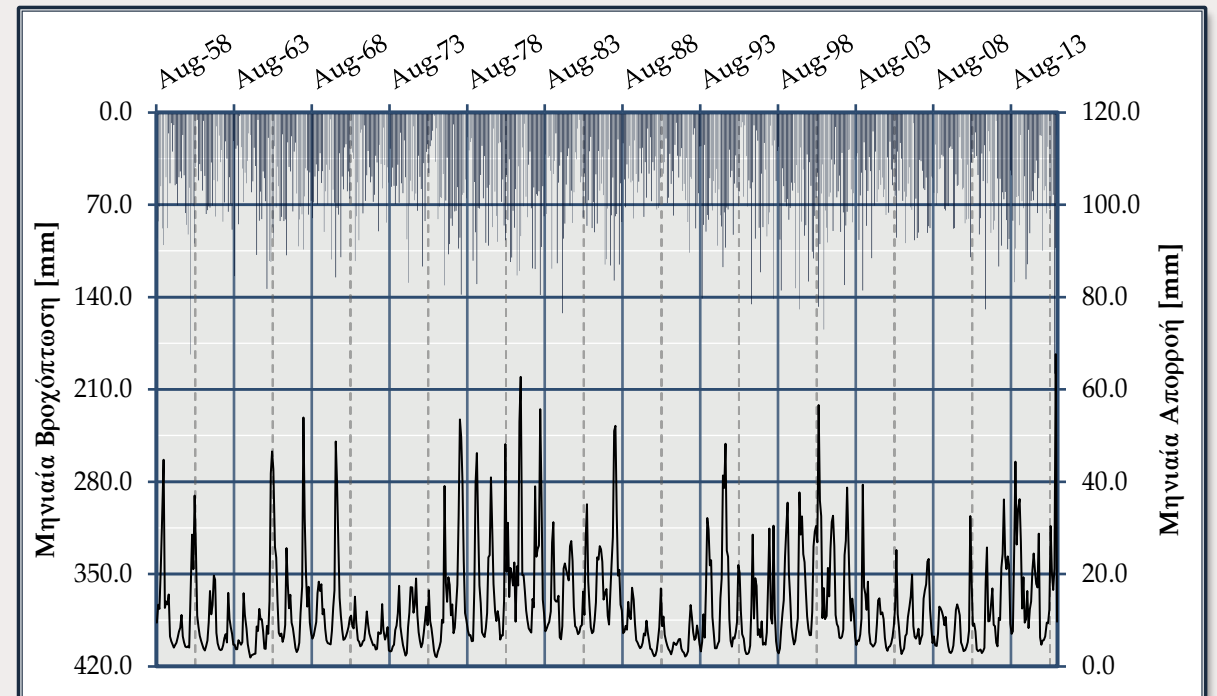
Η μεθοδολογία εξετάζεται για δύο σενάρια:



Προσαρμογή κάθε υδρολογικού μοντέλου αρχικά με χρήση της μεθοδολογίας διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος σε περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης, μήκους 29 ετών.

Έπειτα, στοχαστική βαθμονόμηση του κάθε υδρολογικού μοντέλου με χρήση συνθετικών χρονοσειρών μήκους 1000 ετών και επαλήθευση στο πλήρες ιστορικό δείγμα.

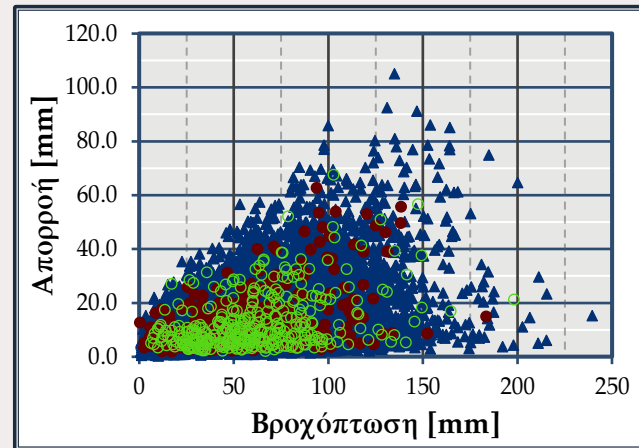
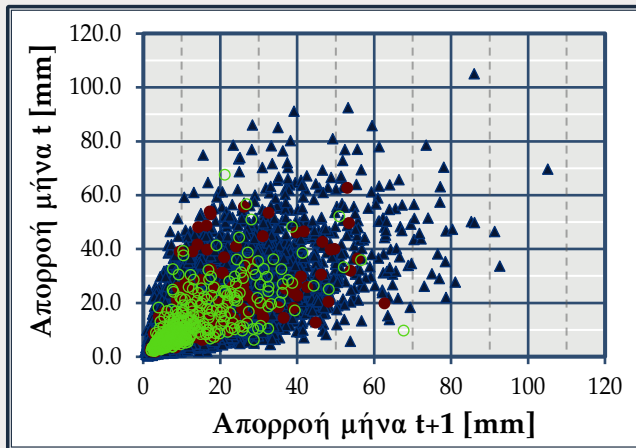
Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μηνιαία κλίμακα:  
συνάθροιση ημερησίων δεδομένων σε κλίμακα μήνα.



Σχήμα | Ιστορικές χρονοσειρές βροχής και απορροής σε μηνιαία κλίμακα (1<sup>η</sup> Αυγούστου 1958 έως 31<sup>η</sup> Ιουλίου 2016)

# Παραγωγή Συνθετικών Χρονοσειρών Βροχής & Απορροής

Το στοχαστικό μοντέλο εξασφάλισε την αναπαραγωγή των μοτίβων συσχέτισης τα οποία είναι περισσότερο εκτεταμένα σε σύγκριση με τα παρατηρηθέντα. Αυτό αναμένεται να αντιπροσωπεύουν το πλήρες υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης, πληροφορία δύσκολα ανιχνεύσιμη στην περίπτωση των παρατηρήσεων, ειδικά στην περίπτωση χρονοσειρών μικρού μήκους.



▲ Συνθετικό Δείγμα ● Παρατηρήσεις (Δείγμα Βαθμονόμησης) ○ Παρατηρήσεις (Δείγμα Επαλήθευσης)

Σχήμα | Μοτίβα αυτοσυσχέτισης μεταξύ δεδομένων απορροής ανάμεσα σε διαδοχικούς μήνες (αριστερά) και μοτίβα ετεροσυσχέτισης μεταξύ βροχής και απορροής (δεξιά), όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις (διαχωρισμός σε δύο περιόδους) και τα συνθετικά δεδομένα (12 000 τιμές)

Από το παρακάτω διάγραμμα είναι φανερό η ικανότητα του στοχαστικού μοντέλου να διατηρήσει την ετεροσυσχέτιση μηδενικής υστέρησης μεταξύ των δύο προσομοιωμένων διεργασιών (βροχόπτωση και απορροή).



Σχήμα | Σύγκριση μεταξύ ιστορικών και προσομοιωμένων ετεροσυσχετίσεων μηδενικής υστέρησης



# Ανάλυση σε Μηνιαία Κλίμακα – Μοντέλο Zygos6P

Πίνακας | Αξιολόγηση επίδοσης μοντέλου

| Μεθοδολογία | NSE <sub>Cal</sub> | NSE <sub>Val</sub> | NSE <sub>Tot</sub> |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Διαχωρισμού | 0.837              | 0.836              | 0.836              |
| Στοχαστική  | NSE                |                    |                    |
| Βαθμονόμηση | 0.836              |                    |                    |

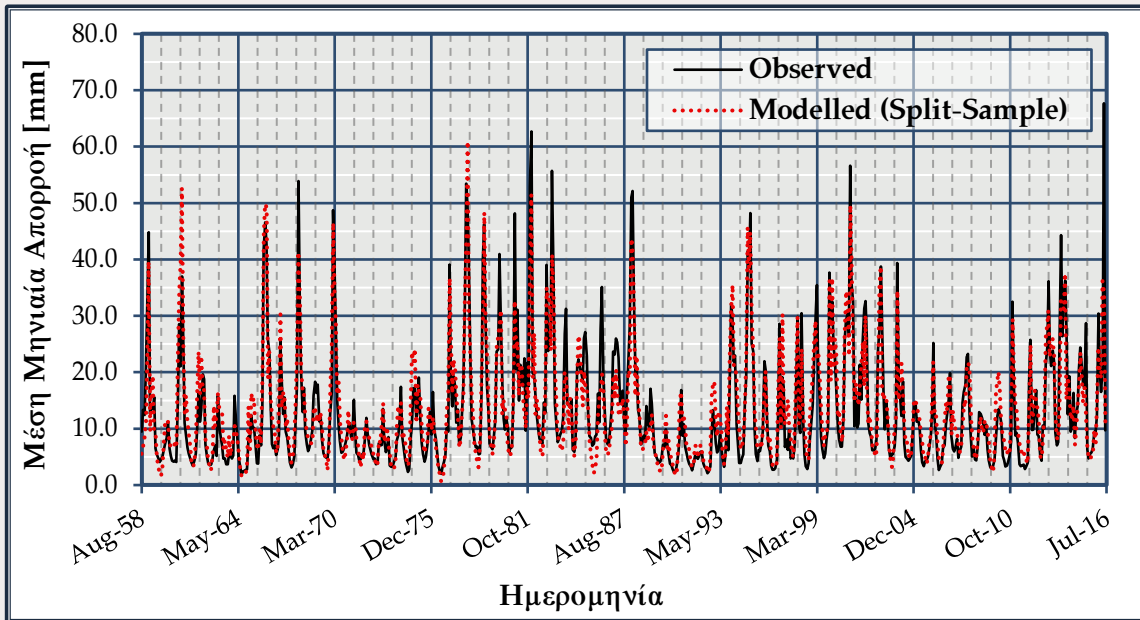
NSE<sub>Cal</sub> : NSE για Βαθμονόμηση

NSE<sub>Val</sub> : NSE για Επαλήθευση

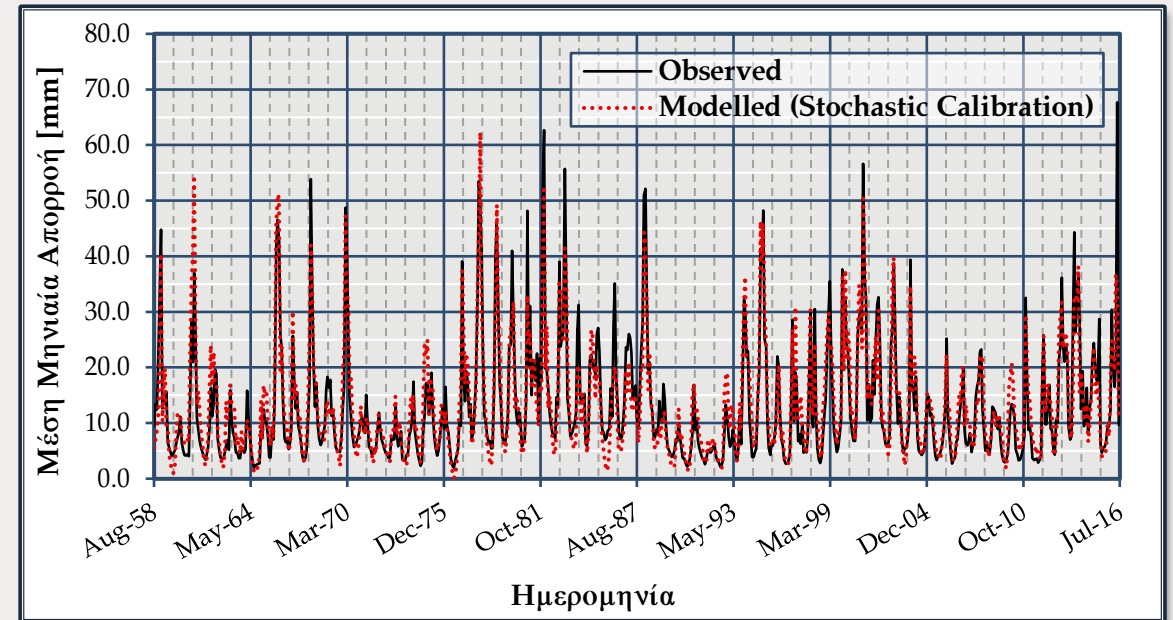
NSE<sub>Tot</sub> / NSE : Συνολικό NSE

Πίνακας | Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μοντέλου Zygos6P

| Μεθοδολογία | $\nu$ | $K$ [mm] | $\kappa$ | $H$ [mm] | $\alpha$ | $\lambda$ |
|-------------|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Διαχωρισμού | 1.763 | 235.0    | 0.184    | 60.8     | 0.120    | 0.142     |
| Στοχαστική  | $\nu$ | $K$ [mm] | $\kappa$ | $H$ [mm] | $\alpha$ | $\lambda$ |
| Βαθμονόμηση | 1.835 | 234.2    | 0.180    | 44.2     | 0.157    | 0.173     |



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της μεθοδολογίας διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της στοχαστικής βαθμονόμησης



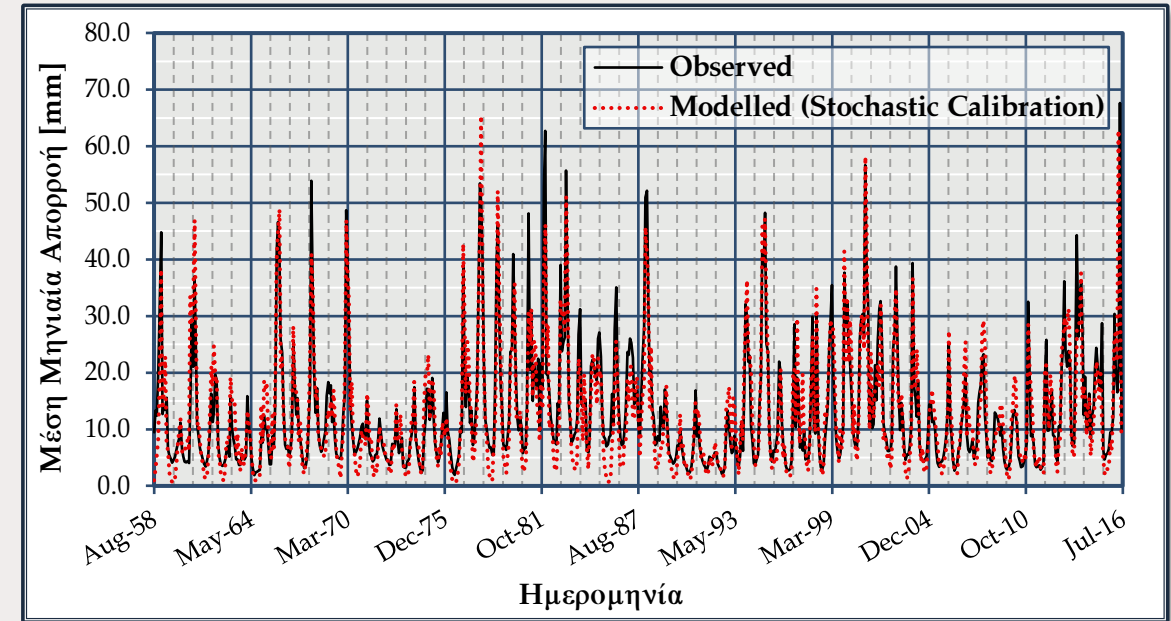
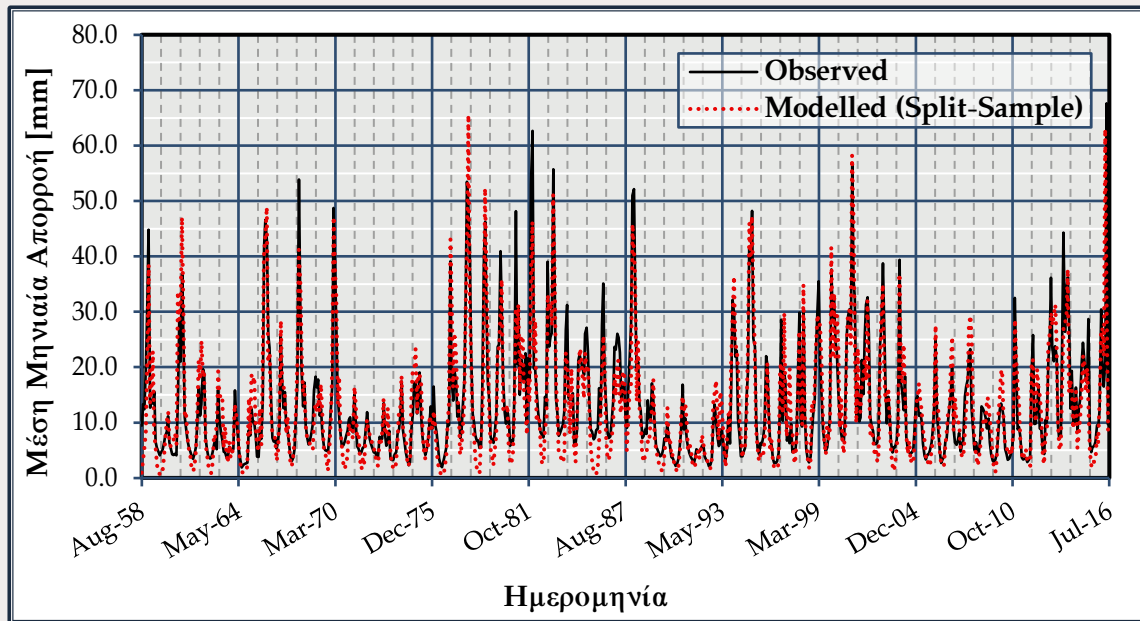
# Ανάλυση σε Μηνιαία Κλίμακα – Μοντέλο GR2M

Πίνακας | Αξιολόγηση επίδοσης μοντέλου

| Μεθοδολογία | NSE <sub>Cal</sub> | NSE <sub>Val</sub> | NSE <sub>Tot</sub> |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Διαχωρισμού | 0.817              | 0.776              | 0.798              |
| Στοχαστική  | NSE                |                    |                    |
| Βαθμονόμηση | 0.798              |                    |                    |

Πίνακας | Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μοντέλου GR2M

| Μεθοδολογία | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ |
|-------------|---------------|----------|
| Διαχωρισμού | 3954          | 0.77     |
| Στοχαστική  | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ |
| Βαθμονόμηση | 3994          | 0.77     |



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της μεθοδολογίας διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος

Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της στοχαστικής βαθμονόμησης

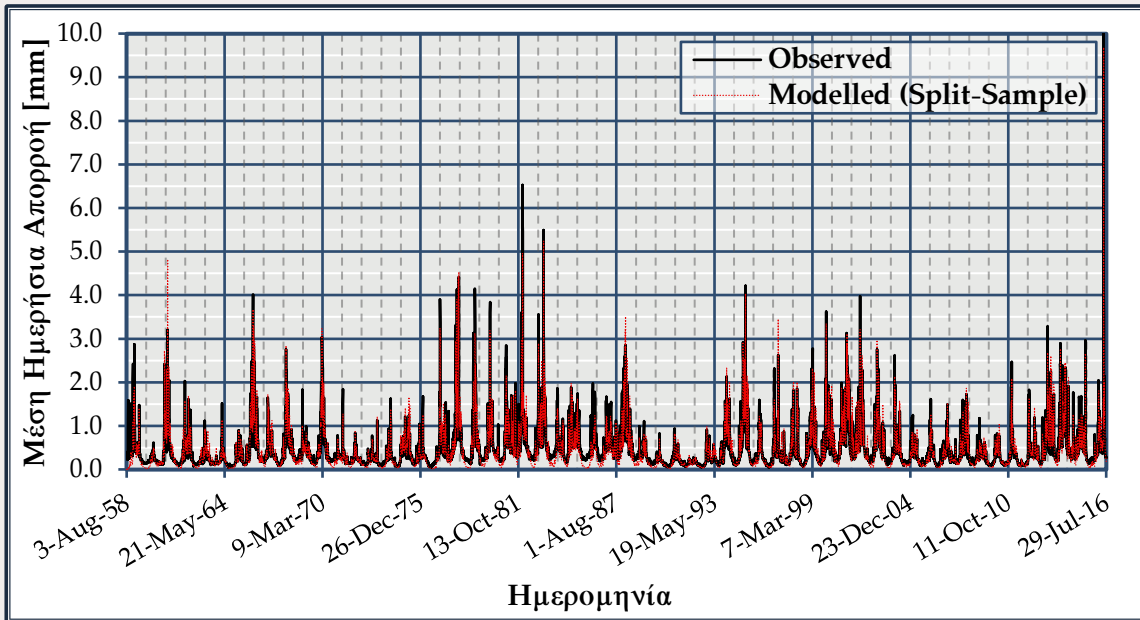
# Ανάλυση σε Ημερήσια Κλίμακα – Μοντέλο GR4J

Πίνακας | Αξιολόγηση επίδοσης μοντέλου

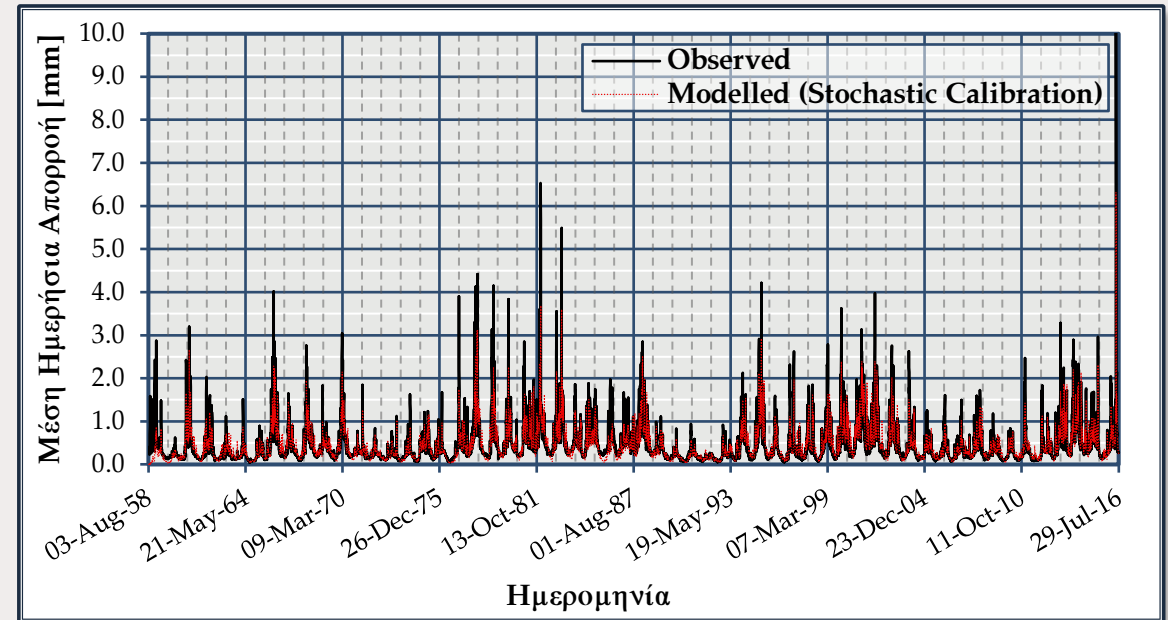
| Μεθοδολογία | NSE <sub>Cal</sub> | NSE <sub>Val</sub> | NSE <sub>Tot</sub> |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Διαχωρισμού | 0.848              | 0.895              | 0.871              |
| Στοχαστική  | NSE                |                    |                    |
| Βαθμονόμηση | 0.805              |                    |                    |

Πίνακας | Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μοντέλου GR4J

| Μεθοδολογία | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ [mm/d] | $\chi_3$ [mm] | $\chi_4$ [days] |
|-------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Διαχωρισμού | 520.1         | -0.70           | 35.9          | 4.20            |
| Στοχαστική  | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ [mm/d] | $\chi_3$ [mm] | $\chi_4$ [days] |
| Βαθμονόμηση | 1011.6        | -0.48           | 38.8          | 4.39            |



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της μεθοδολογίας διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της στοχαστικής βαθμονόμησης

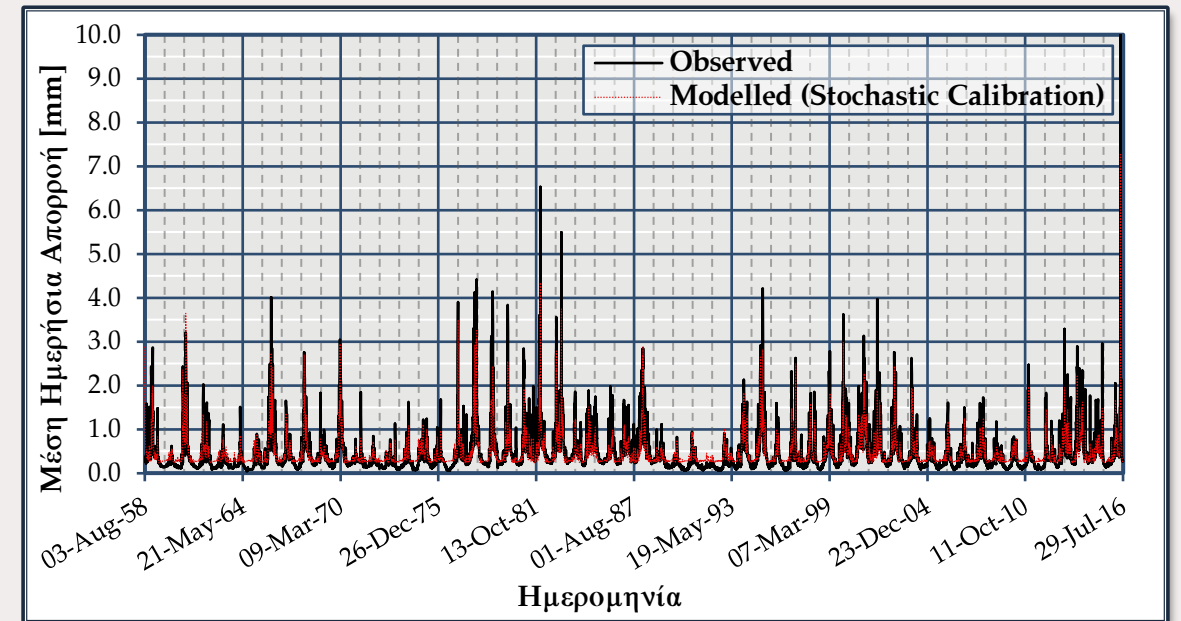
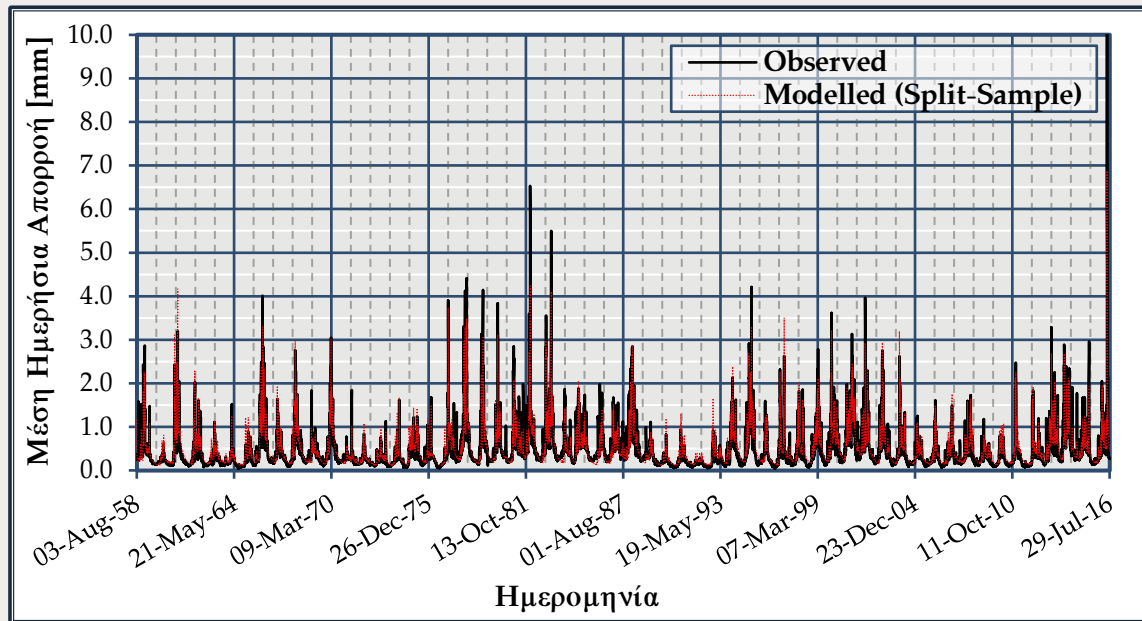
# Ανάλυση σε Ημερήσια Κλίμακα – Μοντέλο GR6J

Πίνακας | Αξιολόγηση επίδοσης μοντέλου

| Μεθοδολογία | NSE <sub>Cal</sub> | NSE <sub>Val</sub> | NSE <sub>Tot</sub> |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Διαχωρισμού | 0.849              | 0.802              | 0.858              |
| Στοχαστική  | NSE                |                    |                    |
| Βαθμονόμηση | 0.815              |                    |                    |

Πίνακας | Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μοντέλου GR6J

| Μεθοδολογία | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ [mm/d] | $\chi_3$ [mm] | $\chi_4$ [days] | $\chi_5$ [-] | $\chi_6$ [mm] |
|-------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| Διαχωρισμού | 242.1         | -1.63           | 885.4         | 4.40            | 0.22         | 1.49          |
| Στοχαστική  | $\chi_1$ [mm] | $\chi_2$ [mm/d] | $\chi_3$ [mm] | $\chi_4$ [days] | $\chi_5$ [-] | $\chi_6$ [mm] |
| Βαθμονόμηση | 296.6         | -2.38           | 52.1          | 4.38            | 0.41         | 3.04          |



Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της μεθοδολογίας διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος

Σχήμα | Οπτική επισκόπηση της συμφωνίας μεταξύ των παρατηρημένων (Observed) και μοντελοποιημένων (Modelled) τιμών απορροής με χρήση της στοχαστικής βαθμονόμησης

# Συμπερασματικές Παρατηρήσεις σχετικά με την Ανάλυση



## Ανάλυση σε μηνιαία κλίμακα:

- ▶ Η στοχαστική βαθμονόμηση λειτουργεί **εξίσου καλά** με το κλασσικό σχήμα βαθμονόμησης που απαιτεί τον διαχωρισμό των ιστορικών χρονοσειρών σε δεδομένα βαθμονόμησης και επαλήθευσης.
- ▶ Οι ρυθμισμένες τιμές των παραμέτρων των μοντέλων βρίσκονται **σε συμφωνία**.



## Ανάλυση σε ημερήσια κλίμακα:

- ▶ Το κλασσικό σχήμα αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από αυτό της στοχαστικής βαθμονόμησης, **ωστόσο** χωρίς η απόκλιση αυτή να ακυρώνει τις προοπτικές της μεθόδου και σε αυτή τη χρονική κλίμακα.
- ▶ **Αισθητή απόκλιση** μεταξύ των τιμών των παραμέτρων που προέκυψαν από κάθε μέθοδο ρύθμισης.



Τα αποτελέσματα αποτελούν μια πρώτη ένδειξη ότι η εφαρμογή της στοχαστικής βαθμονόμησης είναι ανεξάρτητη της πολυπλοκότητας της δομής του υδρολογικού μοντέλου.

# Ανάλυση Μεγάλης Κλίμακας

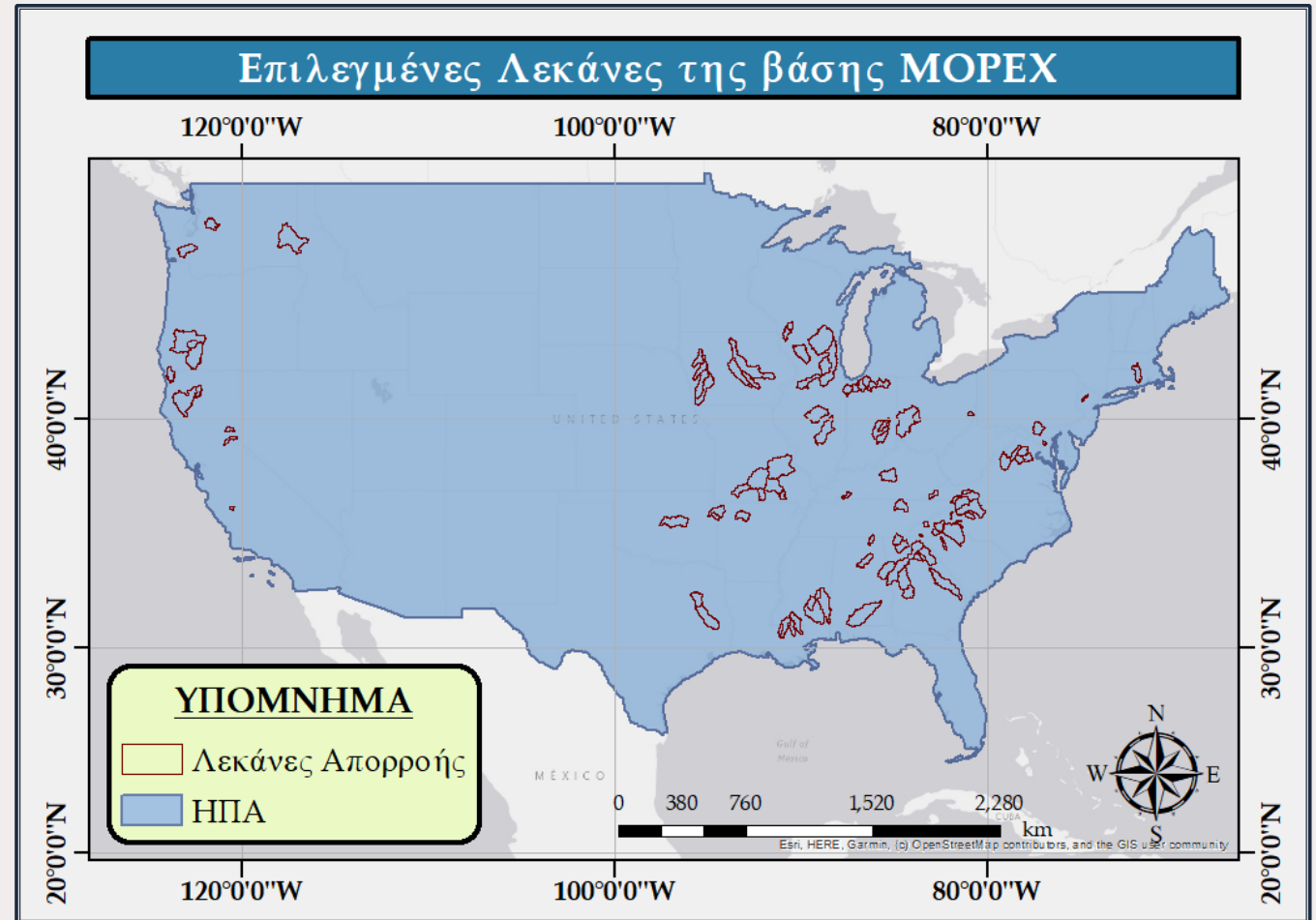
## Επόμενο στάδιο Διερεύνησης:

Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ένα μεγάλο σετ λεκανών απορροής, σε μηνιαία κλίμακα προσομοίωσης.

Επιλογή 100 λεκανών από τη βάση δεδομένων MOPEX (MModel Parameter Estimation Experiment) [Schaake *et al.*, 2006].

Ένας συνδυασμός κριτηρίων λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή του βέλτιστου σετ λεκανών απορροής από τις 438 που διαθέτει η βάση:

- Ποσοστό ελλειπουσών τιμών απορροής και
- Ετεροσχετίσεις μεταξύ βροχής και απορροής



Σχήμα | Γεωγραφική απεικόνιση των 100 επιλεγμένων λεκανών απορροής της βάσης δεδομένων MOPEX



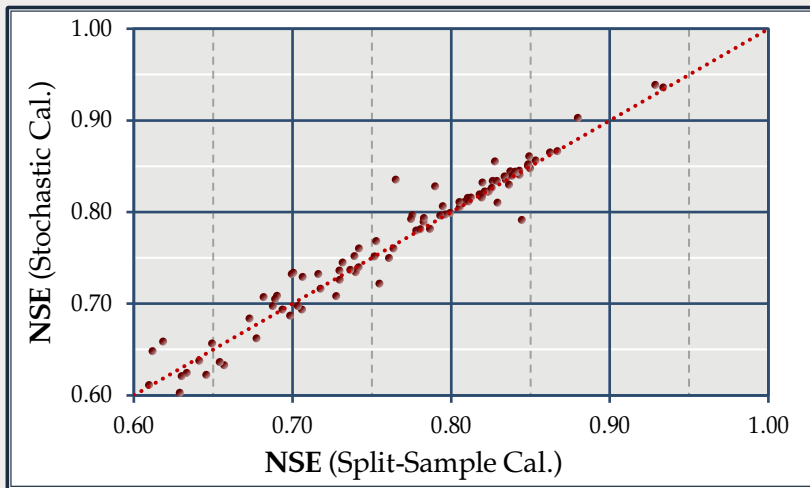
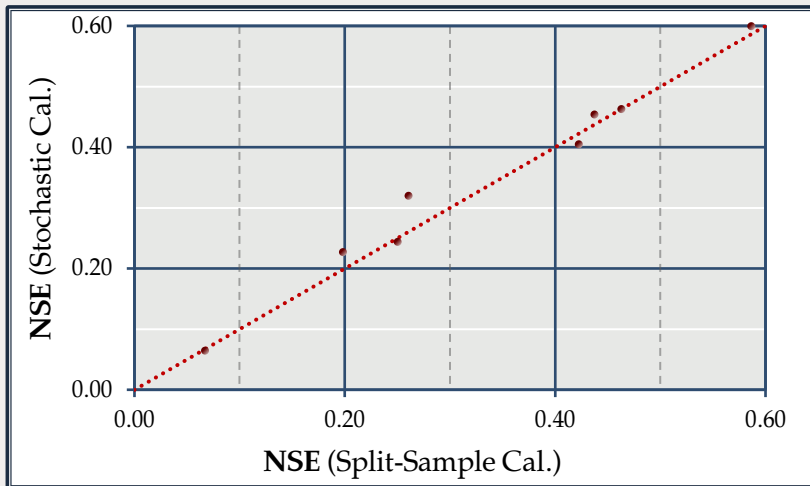
# Δομή και Παραδοχές Ανάλυσης

---

- **Συνάθροιση δεδομένων στην μηνιαία κλίμακα:** Τα διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα (μέση επιφανειακή βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή, απορροή) για τις 100 λεκάνες, αφορούν την ημερήσια κλίμακα.
- **Χρήση ενός αριθμού υδρολογικών μοντέλων:** περαιτέρω ενίσχυση της υπόθεσης ότι η βαθμονόμηση με συνθετικά δεδομένα είναι ανεξάρτητη της πολυπλοκότητας του μοντέλου βροχής-απορροής που επιλέγεται. Ειδικότερα: **GR2M, Zygos4P** και **Zygos6P**
- Περίπτωση ρύθμισης των μοντέλων με διαχωρισμό του ιστορικού δείγματος: δύο **ίσα σετ** (σετ βαθμονόμησης και επαλήθευσης).
- **Αποτελεσματικότερη** σύγκριση της επίδοσης (NSE) των υδρολογικών μοντέλων μεταξύ των εξεταζόμενων μεθόδων βαθμονόμησης: μέτρο σύγκρισης για στοχαστική βαθμονόμηση η **επίδοση για το διάστημα επαλήθευσης** του ιστορικού δείγματος.



# Ανάλυση Μεγάλης Κλίμακας – Μοντέλο GR2M

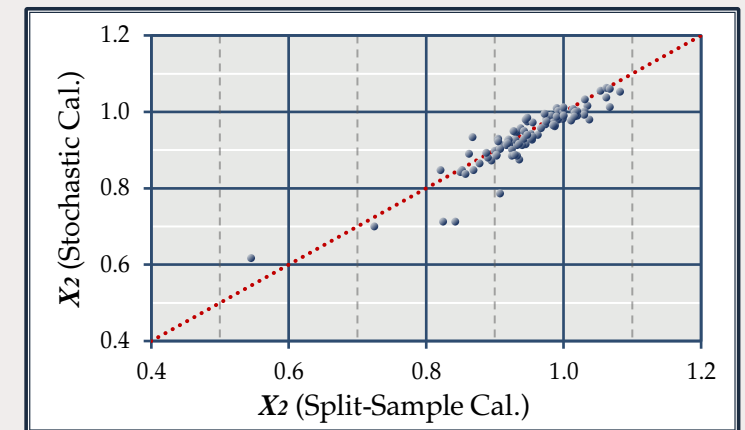
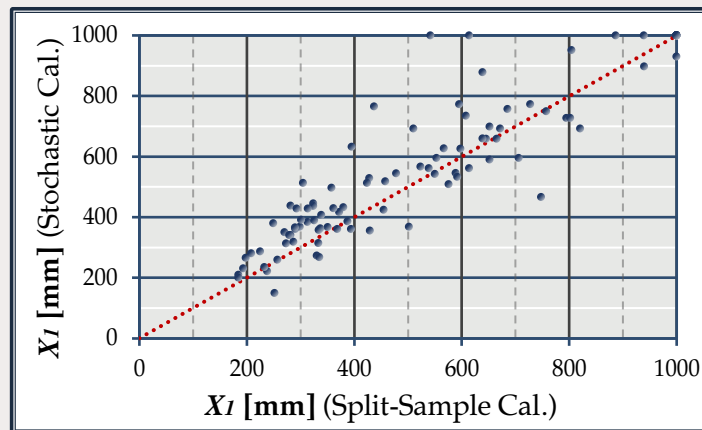


Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς χαμηλής (πάνω) και υψηλής (κάτω) επίδοσης (NSE) για το μοντέλο GR2M, με εφαρμογή της μεθοδολογίας ρύθμισης με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και της στοχαστικής βαθμονόμησης (Stochastic Cal.)

**Ιστ. Δείγμα Επαλήθευσης:**  $NSE(\text{Stoch Cal.}) > NSE(\text{Split-Sample Cal.})$  : **62/100** Λεκάνες

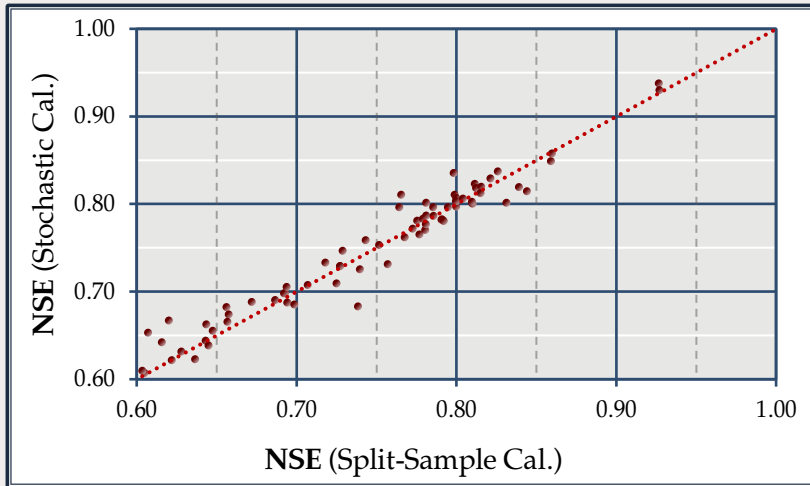
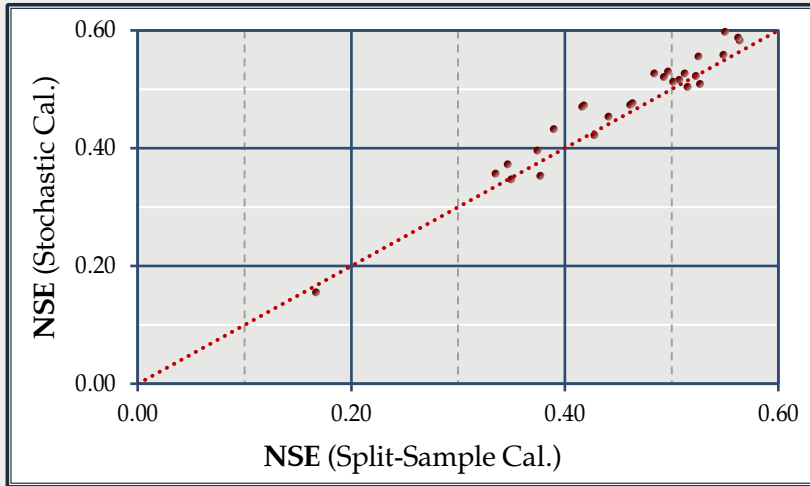
**Ιστ. Δείγμα Βαθμονόμησης:**  $NSE(\text{Stoch Cal.}) > NSE(\text{Split-Sample Cal.})$  : **1/100** Λεκάνες

**Συνολικό Ιστορικό Δείγμα:**  $NSE(\text{Stoch Cal.}) > NSE(\text{Split-Sample Cal.})$  : **42/100** Λεκάνες

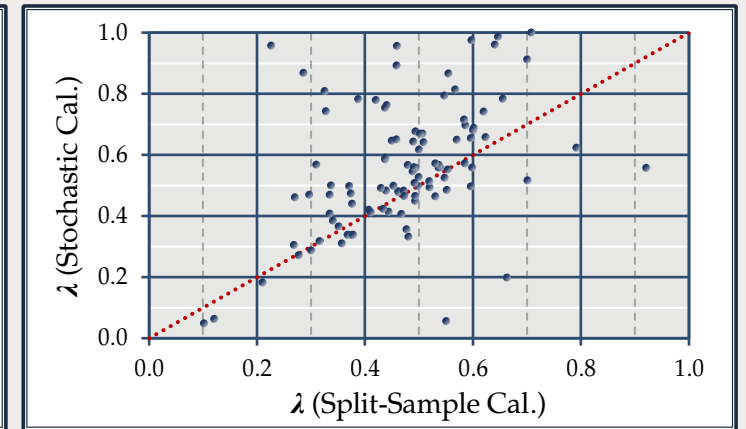
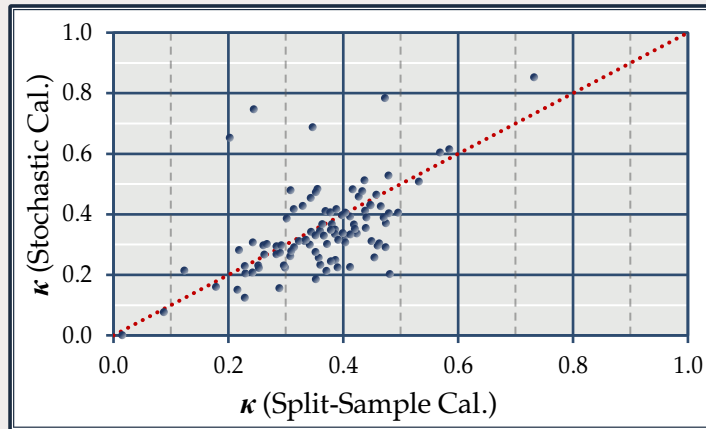
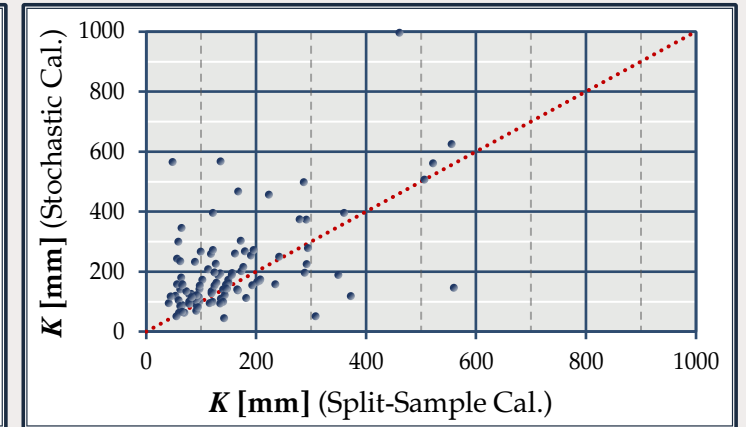
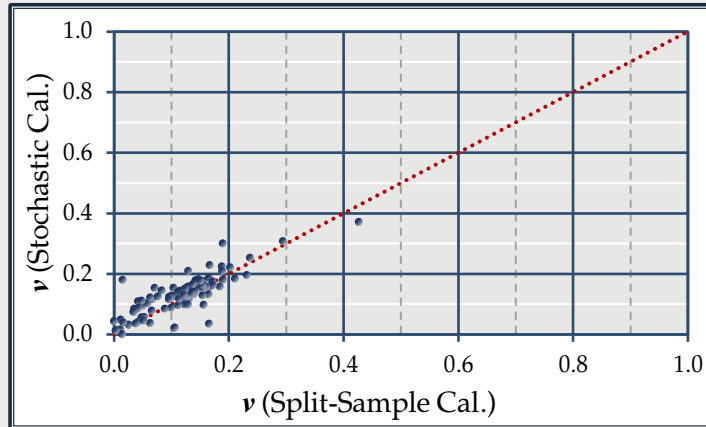


Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς για τις παραμέτρους του μοντέλου GR2M, όπως αυτές εκτιμήθηκαν με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και τη στοχαστική βαθμονόμηση (Stochastic Cal.)

# Ανάλυση Μεγάλης Κλίμακας – Μοντέλο Zygos4P



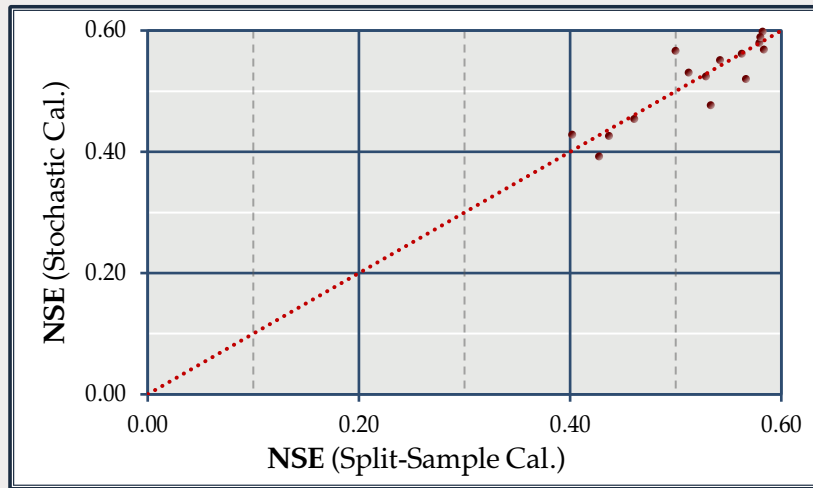
**Ιστ. Δείγμα Επαλήθευσης:  $NSE(\text{Stoch Cal.}) > NSE(\text{Split-Sample Cal.})$  : 67/100 Λεκάνες**



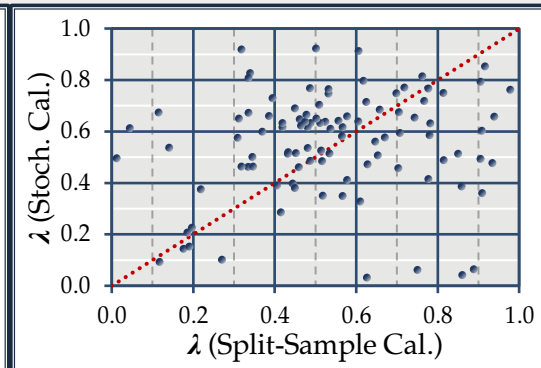
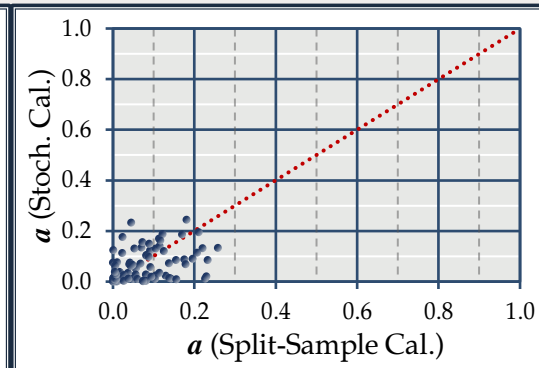
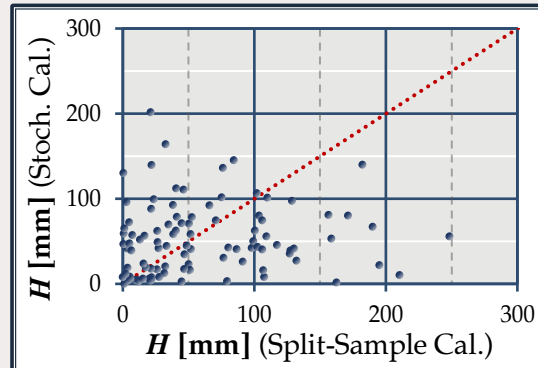
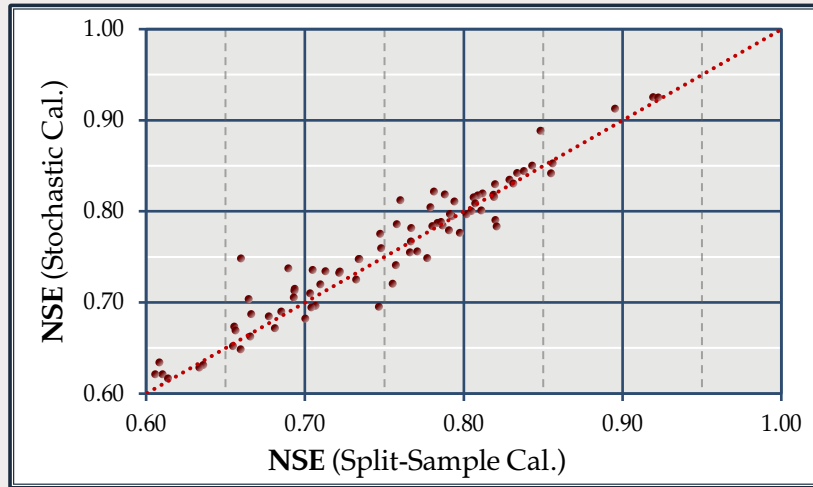
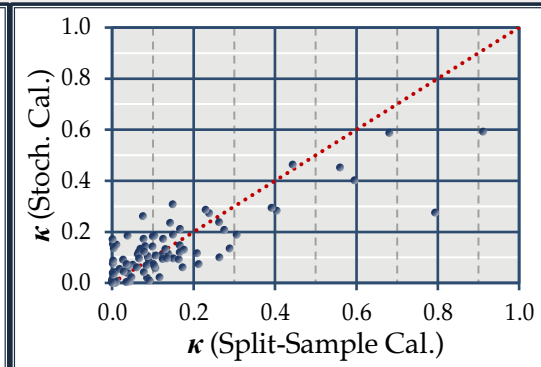
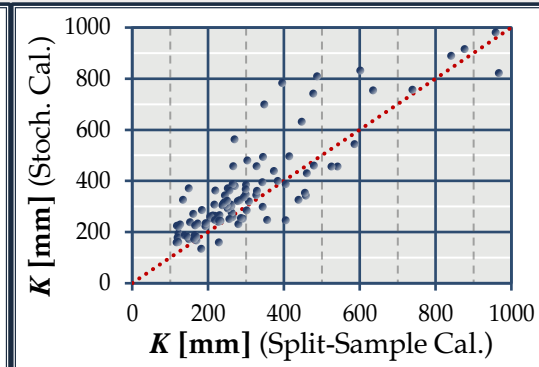
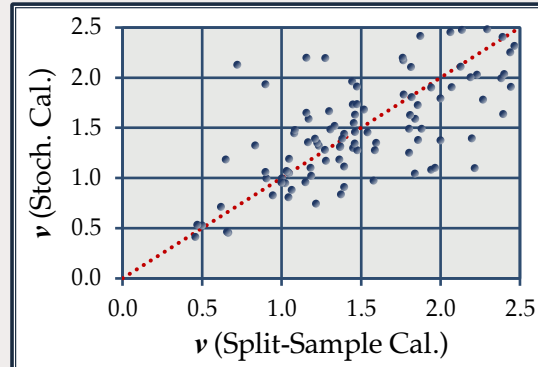
Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς χαμηλής (πάνω) και υψηλής (κάτω) επίδοσης (NSE) για το μοντέλο Zygos4P, με εφαρμογή της μεθοδολογίας ρύθμισης με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και της στοχαστικής βαθμονόμησης (Stochastic Cal.)

Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς για τις παραμέτρους του μοντέλου Zygos4P, όπως αυτές εκτιμήθηκαν με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και τη στοχαστική βαθμονόμηση (Stochastic Cal.)

# Ανάλυση Μεγάλης Κλίμακας – Μοντέλο Zygos6P



**Ιστ. Δείγμα Επαλήθευσης:  $NSE(\text{Stoch. Cal.}) > NSE(\text{Split-Sample Cal.})$  : 60/100 Λεκάνες**




Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς για τις παραμέτρους του μοντέλου Zygos6P, όπως αυτές εκτιμήθηκαν με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και τη στοχαστική βαθμονόμηση (Stoch. Cal.)


Σχήμα | Διαγράμματα διασποράς χαμηλής (πάνω) και υψηλής (κάτω) επίδοσης (NSE) για το μοντέλο Zygos6P, με εφαρμογή της μεθοδολογίας ρύθμισης με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Split-Sample Cal.) και της στοχαστικής βαθμονόμησης (Stochastic Cal.)

# Συμπερασματικές Παρατηρήσεις σχετικά με την Ανάλυση

---

 Για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων υδροσυστημάτων, η μέθοδος στοχαστικής βαθμονόμησης **αποδίδει καλύτερα** από αυτή της βαθμονόμησης με τα ιστορικά δεδομένα.

 Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει **ανεξάρτητα** από το επιλεγμένο υδρολογικό μοντέλο.

 Όσον αφορά την απόκλιση μεταξύ των εκτιμημένων τιμών των παραμέτρων από κάθε μια από τις δύο μεθοδολογίες βαθμονόμησης, αυτή **αποδείχθηκε ολοένα και πιο σημαντική**, όσο η δομή του εξεταζόμενου μοντέλου γινόταν πιο πολύπλοκη.

# Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

- ✓ Εφαρμογή της στοχαστικής βαθμονόμησης σε περιοχή μελέτης: Αποδείχθηκε εξίσου ικανή με το κλασικό σχήμα βαθμονόμησης για την ανάλυση σε μηνιαία κλίμακα, ενώ σε ημερήσια κλίμακα η μέθοδος επέδειξε ελαφρώς μικρότερη επίδοση.
- ✓ Ανάλυση μεγάλης κλίμακας: Για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων αποδείχθηκε ότι η στοχαστική βαθμονόμηση αποδίδει καλύτερα από τη μεθοδολογία διαχωρισμού του ιστορικού δείγματος.
- ✓ Βαθμονόμηση με συνθετικά δεδομένα: ανεξάρτητη της πολυπλοκότητα της δομής του υδρολογικού μοντέλου.

## Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση:

- Χρήση περισσότερων μέτρων επίδοσης για αξιολόγηση της ικανότητας πρόβλεψης του κάθε μοντέλου.
- Διερεύνηση των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας για χρήση υδρολογικών μοντέλων πιο περίπλοκης δομής.
- Περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας της μεθόδου στην ημερήσια κλίμακα, διεξάγοντας μια ακόμη ανάλυση μεγάλης κλίμακας.
- Για το θέμα του υπολογιστικού φόρτου που αποτέλεσε πρόκληση για τη μελέτη αυτή, ενδιαφέροντα αποτελέσματα θα μπορούσε να δώσει η χρήση σύγχρονων μεθόδων βελτιστοποίησης (π.χ., [Tsoukalas *et al.*, 2016]).

# Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., and 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., Dorchies, D., Perrin, C., and Michel, C. (2021). *airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling*. R package version 1.6.104, doi: 10.15454/EX11NA, <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.

Efstratiadis, A., and Koutsoyiannis, D. (2002). An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems. *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*. Cardiff, UK, 1423 – 1428, International Water Association.

Efstratiadis, A., Tsoukalas, I., and Kossieris, P. (2021). *Improving model identifiability by embedding stochastic simulation within hydrological calibration*. In: Solomatine, D., and Corzo, G. (editors), *Advances in Hydroinformatics: Artificial Intelligence and Optimization for Water Resources*. Edited volume of AGU Books / Wiley (in review).

Kozanis, S., and Efstratiadis, A. (2006). Zygus: A basin processes simulation model. *21st European Conference for ESRI Users*, Athens, Greece.

Le Moine, N. (2008). *Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performance et du réalisme des modèles pluie-débit?* Doctoral dissertation, Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282 – 290. doi:10.1016/ 0022-1694(70)90255-6.

Michel, C. (1991). Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux, *Hydrology Handbook* (in French), Cemagref, Antony, France.



# Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., and Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318 (1–4), 200 – 214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275 - 289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., and Andréassian, V. (2011). A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411 (1–2), 66 – 76. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.09.034.
- Rebolho, C., Andréassian, V., Tsoukalas, I., et Efstratiadis, A. (2018). La crue du Loing de Juin 2016 était-elle exceptionnelle? *De la prévision des crues à la gestion de crise*, Avignon, Société Hydrotechnique de France.
- Schaake, J., Cong, S., and Duan, Q. (2006). The US MOPEX data set. IAHS-AISH Publication. 9 – 28.
- Tsoukalas, I., Kossieris, P., Efstratiadis, A., & Makropoulos, C. (2016). Surrogate-enhanced evolutionary annealing simplex algorithm for effective and efficient optimization of water resources problems on a budget. *Environ. Model. Soft.*, 77, 122-142. doi:10.1016/j.envsoft.2015.12.008.
- Tsoukalas, I., Efstratiadis, A., and Makropoulos, C. (2019). Building a puzzle to solve a riddle: A multi-scale disaggregation approach for multivariate stochastic processes with any marginal distribution and correlation structure. *Journal of Hydrology*, 575, 354 – 380. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.017.
- Tsoukalas, I., Kossieris, P., and Makropoulos, C. (2020). Simulation of non-Gaussian correlated random variables, stochastic processes and random fields: Introducing the anySim R-package for environmental applications and beyond. *Water*, 12 (6), doi:1645. 10.3390/w12061645.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

