

Ερευνητικό έργο:

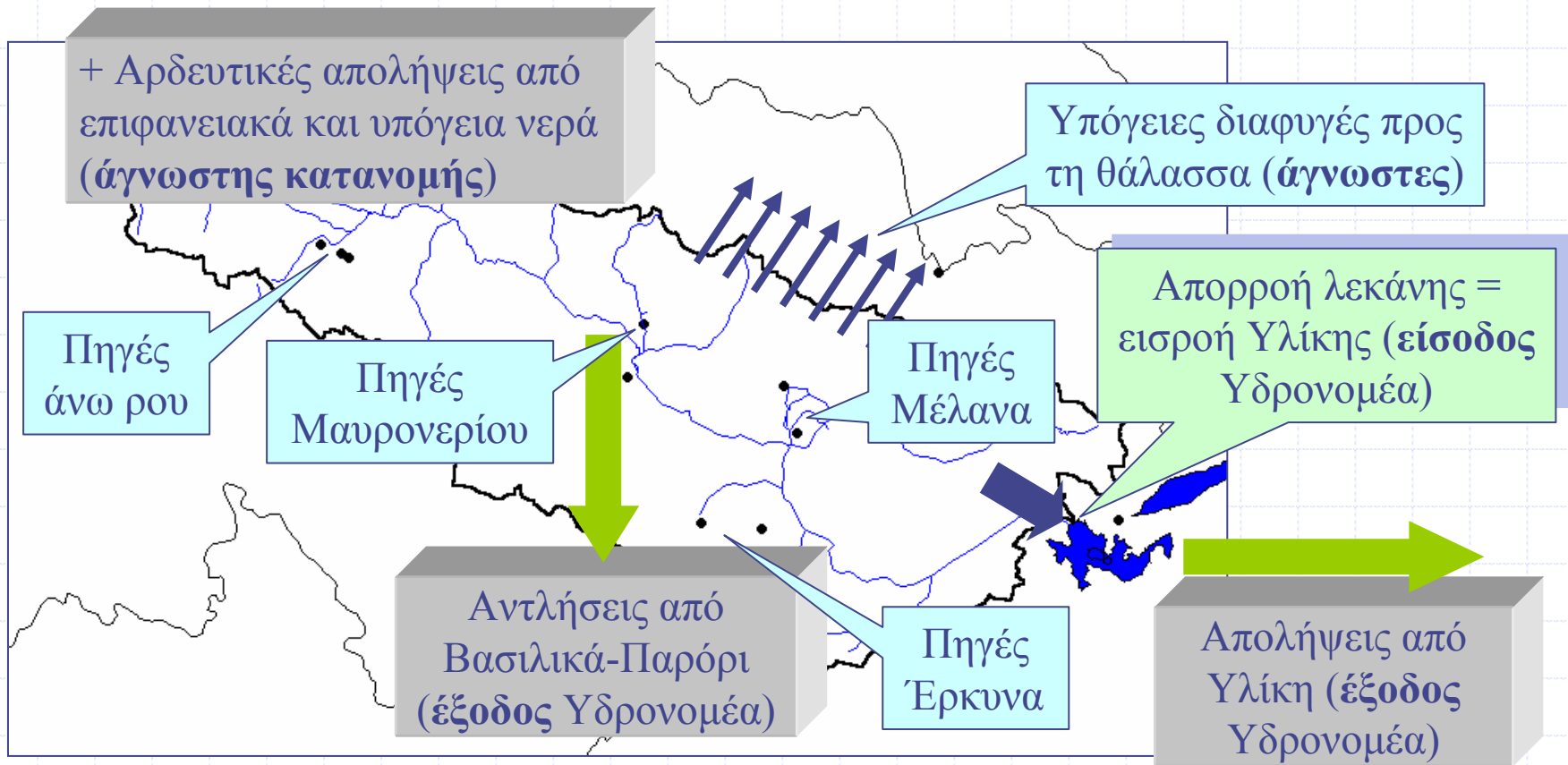
*Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του  
συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*

## **Σύστημα προσομοίωσης υδρολογικού κύκλου λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης**

**Α. Ευστρατιάδης, Ι. Ναλμπάντης και Ε. Ρόζος**

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

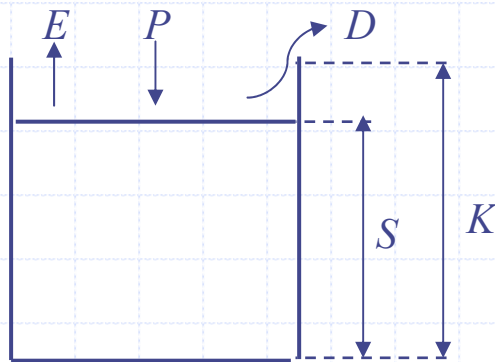
# Τοποθέτηση του προβλήματος



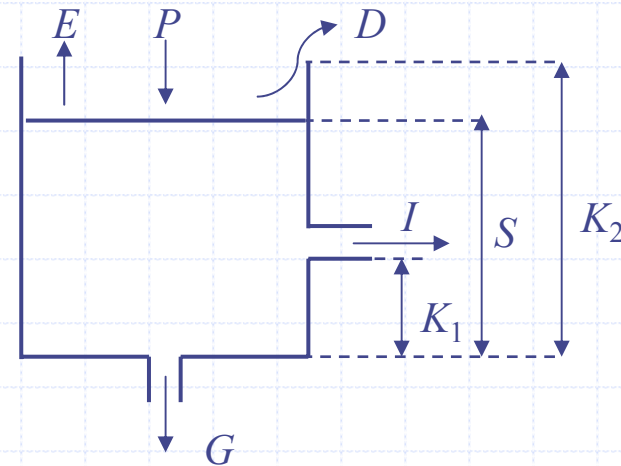
**Σκοπός:** Διαμόρφωση ενός μοντέλου εκτίμησης των εισροών στην Υλίκη (πλημμυρική + πηγαία απορροή λεκάνης), για συγκεκριμένες αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες, που ικανοποιούνται από επιφανειακά και υπόγεια νερά

# Μοντέλο διεργασιών επιφανειακής υδρολογίας

- ◆ Χρονοσειρές εισόδου: βροχόπτωση ( $P$ ), δυναμική εξατμοδιαπνοή (PE)
- ◆ Χρονοσειρές εξόδου: πραγματική εξάτμιση ( $E$ ), άμεση (πλημμυρική) απορροή ( $D$ ), υποδερμική ροή ( $I$ ), κατείσδυση ( $G$ ), αποθήκευση εδαφικής υγρασίας ( $S$ )
- ◆ Αρχική συνθήκη: αρχική αποθήκευση εδαφικής υγρασίας
- ◆ Παράμετροι μοντέλου: όριο πραγματοποίησης άμεσης εξάτμισης ( $\varepsilon$ ), κατώφλι πραγματοποίησης υποδερμικής ροής ( $K_1$ ), χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας ( $K_2$ ), συντελεστής στείρευσης υποδερμικής ροής ( $\lambda$ ), συντελεστής στείρευσης κατείσδυσης ( $\mu$ )



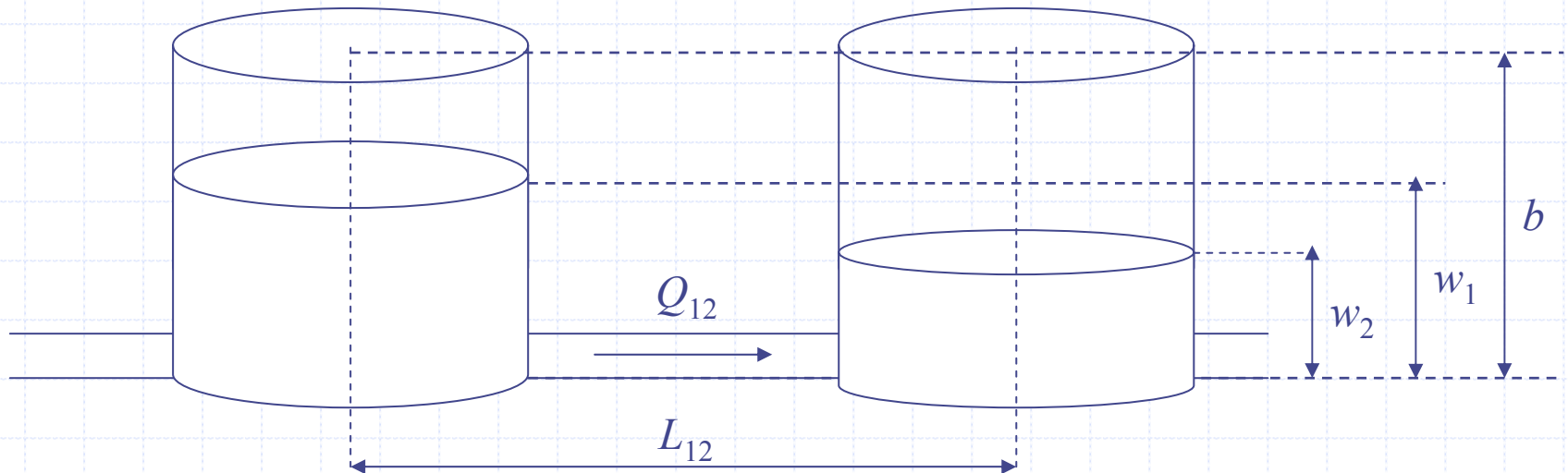
Αρχικό μοντέλο



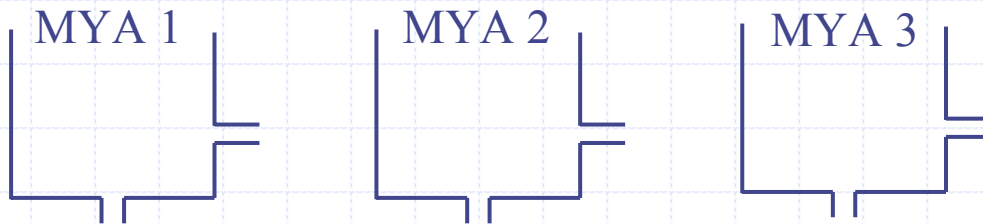
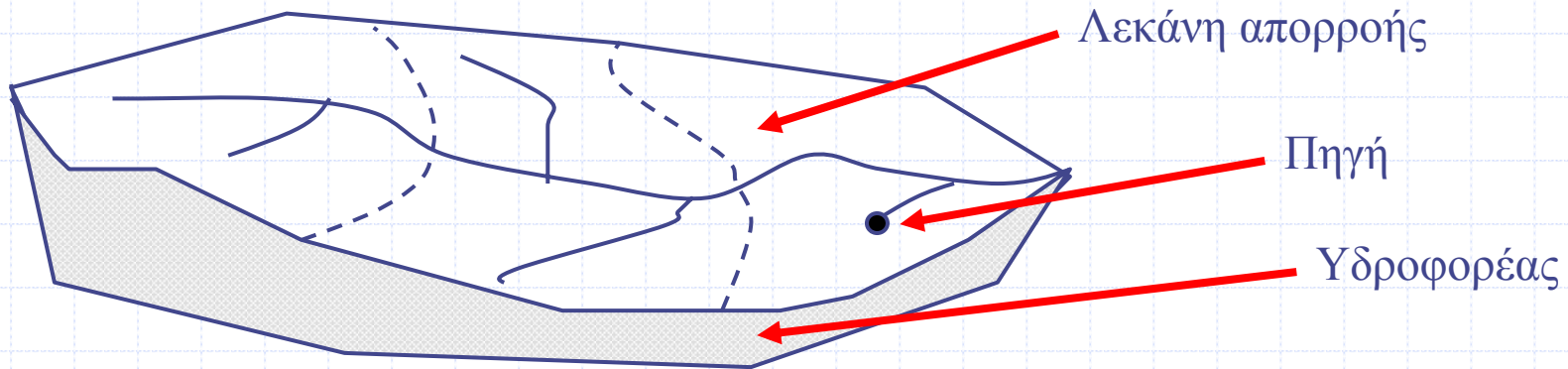
Τροποποιημένο μοντέλο

# Μοντέλο διεργασιών υπόγειας υδρολογίας

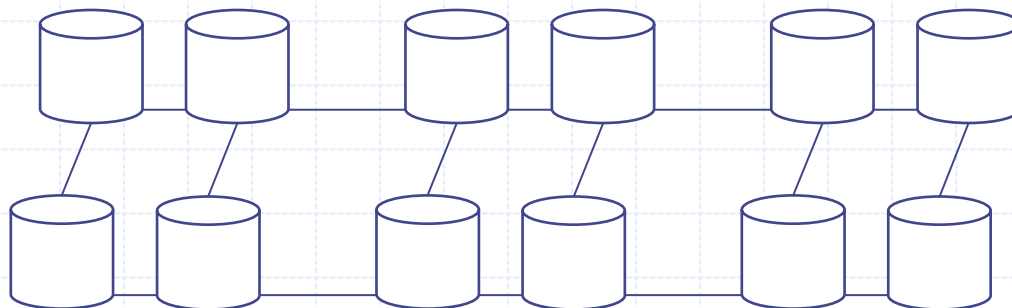
- ◆ **Γενικά:** Πολυκυτταρικό αριθμητικό σχήμα, αποτελούμενο από δεξαμενές και αγωγούς μεταφοράς νερού. Η κίνηση του νερού μεταξύ των δεξαμενών περιγράφεται από το νόμο του Darcy. Ειδική μοντελοποίηση επιτυγχάνει την προσομοίωση πηγών.
- ◆ **Χρονοσειρές εισόδου:** κατείσδυση, άντληση
- ◆ **Χρονοσειρές εξόδου:** υπόγεια αποθήκευση, απορροή πηγών, εκροή προς θάλασσα
- ◆ **Αρχική συνθήκη:** αρχικές στάθμες υπόγειων δεξαμενών
- ◆ **Παράμετροι μοντέλου:** όροι υδραυλικής αγωγιμότητας ( $c_{ij}$ ), που εκφράζουν την ταχύτητα κίνησης του νερού μεταξύ των κελιών  $i$  και  $j$ , πορώδες εδάφους ( $p$ )



# Σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών



Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών (απαιτεί χωρισμό της λεκάνης σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης)



Μοντέλο προσομοίωσης υπόγειων διεργασιών (απαιτεί διακριτοποίηση του υδροφόρα σε κελιά)

# Βροχομετρικά δεδομένα

Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων 13 σταθμών (σε ημερήσια και μηνιαία κλίμακα), ενώ εξετάστηκαν και οι χρονοσειρές αρκετών ακόμη σταθμών, που λειτούργησαν παλαιότερα στη λεκάνη.



**Αποτέλεσμα αναλύσεων:** Χρονοσειρές μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης στις πεδινές και ορεινές περιοχές της λεκάνης

# Υδρομετρικά δεδομένα

Εκτός της ημερήσιας χρονοσειράς απορροής στη Διώρυγα Καρδίτσας, έγινε εκτεταμένη διερεύνηση των συστηματικών υδρομετρήσεων σε χαρακτηριστικές θέσεις της λεκάνης, τις οποίες πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ κατά την περίοδο 1980-1994.

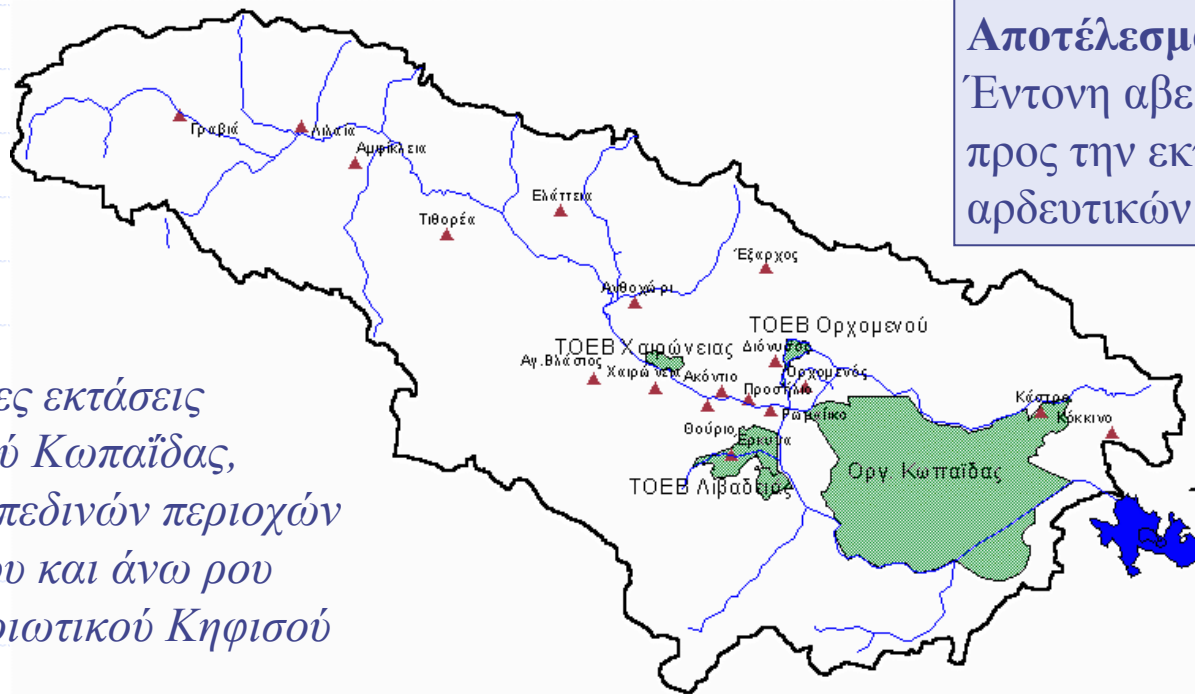


**Αποτέλεσμα αναλύσεων:** Χρονοσειρές απορροής στην έξοδο της λεκάνης και στις θέσεις των κύριων καρστικών πηγών

## Λοιπά δεδομένα

- ◆ **Υπόγεια υδρολογία:** μη συστηματικές χρονοσειρές στάθμης σε 42 γεωτρήσεις
- ◆ **Χιόνι:** χρονοσειρά χιονόπτωσης σταθμού Πυράς (προκύπτει σχετικά σημαντική συνεισφορά του χιονιού σε σχέση με τη βροχόπτωση τα ξηρά έτη)
- ◆ **Αρδευτικές ανάγκες:** εκτίμηση με βάση τις θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό και τις αρδευόμενες εκτάσεις ανά τύπο καλλιέργειας
- ◆ **Απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας:** εκτεταμένες αντλήσεις από Βασιλικά-Παρόρι και από γεωτρήσεις Ακοντίου, τα έτη 1993 και 1994

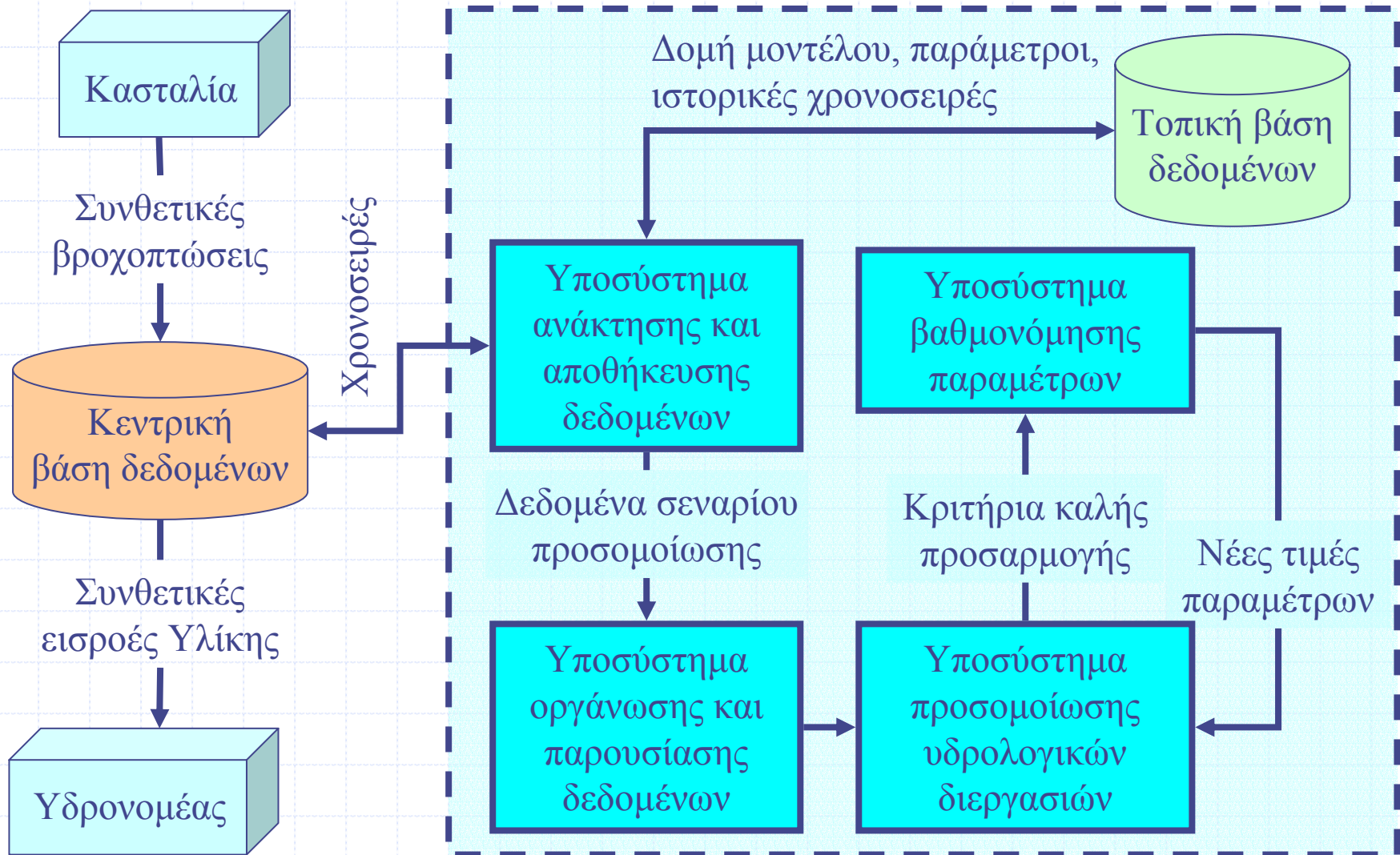
*Αρδευόμενες εκτάσεις  
Οργανισμού Κωπαΐδας,  
ΤΟΕΒ και πεδινών περιοχών  
κάτω, μέσου και άνω ρου  
λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*



**Αποτέλεσμα αναλύσεων:**  
Έντονη αβεβαιότητα ως  
προς την εκτίμηση των  
αρδευτικών αναγκών



# Αρχιτεκτονική δομή και συνιστώσες υπολογιστικού συστήματος



# Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής, υδροφορέα και υδροσυστήματος

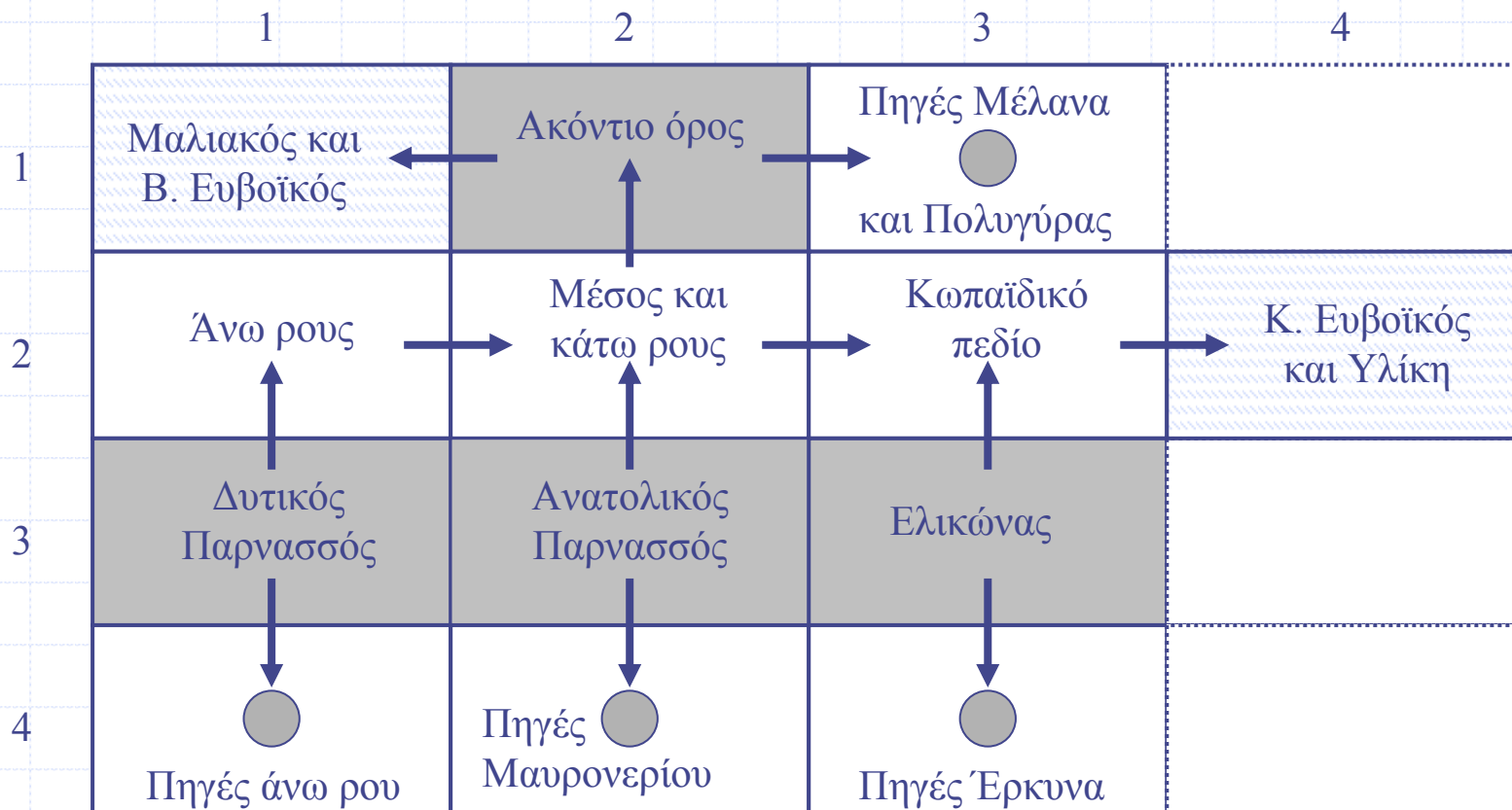
9 παράμετροι, 2 αρχικές συνθήκες (αρχικές στάθμες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας)

ΜΥΑ 1: Ορεινές, καρστικές περιοχές λεκάνης, υψηλής περατότητας, έντονων βροχοπτώσεων, έκτασης 651.9 km<sup>2</sup>



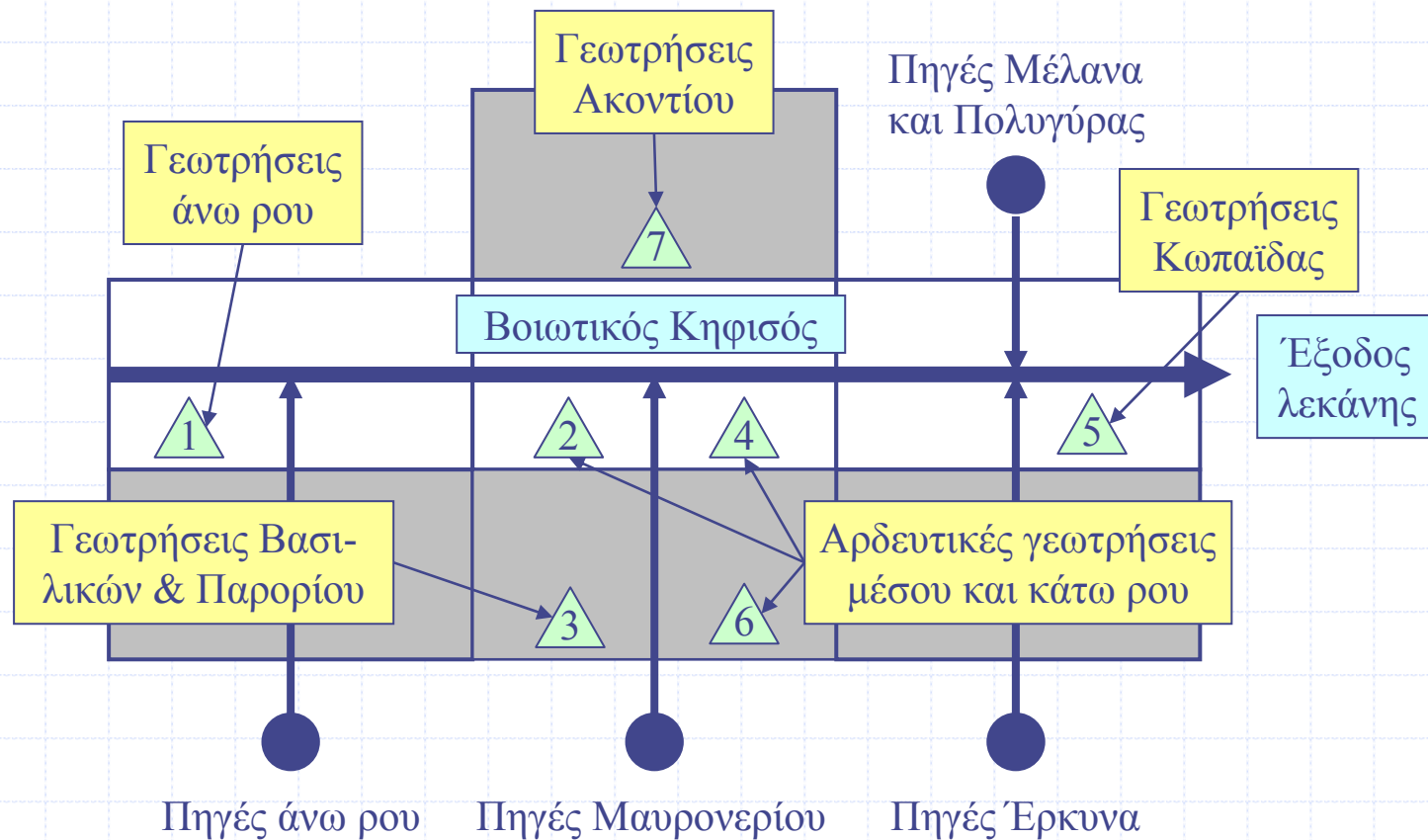
ΜΥΑ 2: Πεδινές, προσχωματικές περιοχές λεκάνης, χαμηλής περατότητας, έκτασης 1390.9 km<sup>2</sup>

# Διακριτοποίηση του υδροφορέα σε κελιά



13 παράμετροι (12 όροι υδραυλικής αγωγιμότητας + πορώδες, ενιαίο για όλο τον υδροφορέα), 4 αρχικές συνθήκες (αρχικές στάθμες δεξαμενών τροφοδοσίας πηγών)

# Σχηματική απεικόνιση υδροσυστήματος



Για τον υπολογισμό της κατανομής των απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια νερά, το μοντέλο εφαρμόζει μια επαναληπτική διαδικασία, καθώς οι αντλήσεις επηρεάζουν τη διαίτα των πηγών, και συνεπώς μειώνουν την απορροή του ποταμού.

# Περιοχές ζήτησης νερού υδροσυστήματος περιοχής μελέτης και τρόποι υδροδότησης

α/α	Ονομασία	Τρόποι υδροδότησης
1	Γραβιά-Λιλαία-Αμφίκλεια	Αντλήσεις από γεωτρήσεις άνω ρου
2	Ελάτεια-Τιθορέα-Έξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από προσχωματικές γεωτρήσεις μέσου ρου
3	Ελάτεια-Τιθορέα-Έξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από καρστικές γεωτρήσεις μέσου ρου
4	Άγιος Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	Απολήψεις από Μαυρονέρι Αντλήσεις από γεωτρήσεις κάτω ρου
5	Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	Μεταφορά νερού από Υλίκη Απολήψεις από επιφανειακά νερά Αντλήσεις από γεωτρήσεις Κωπαΐδας
6	Αθήνα (μέσω υδραγωγείου Διστόμου)	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου
7	Υδραγωγείο Κωπαΐδας	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Ακοντίου

Η ικανοποίηση των διαφόρων χρήσεων νερού στη λεκάνη γίνεται με βάση τις παραπάνω προτεραιότητες, θεωρώντας γνωστές τις αντίστοιχες υδατικές ανάγκες.

# Χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις

- ◆ **Χρονοσειρές εισόδου:** επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή στις δύο ΜΥΑ, υδατικές ανάγκες ανά περιοχή ζήτησης νερού.
- ◆ **Χρονοσειρές ελέγχου:** χρονοσειρές απόκρισης που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου, και συγκεκριμένα:
  - *Απορροή Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης:* Εκτιμάται βάσει ημερήσιων παρατηρήσεων στάθμης και αναγωγή της τελευταίας σε παροχή.
  - *Απορροή πηγών άνω ρου:* Κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στις κύριες πηγές της υπολεκάνης (Λιλαία, Ανατολικό Κεφαλόβρυσο, Δυτικό Κεφαλόβρυσο).
  - *Απορροή των πηγών Μαυρονερίου:* Κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στην ομώνυμη τάφρο που τροφοδοτείται από τις εν λόγω πηγές.
  - *Απορροής πηγών Μέλανα και Πολυγύρας:* Κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στις αντίστοιχες θέσεις.
  - *Απορροής πηγών Έρκυνα:* Κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στον ποταμό που τροφοδοτείται από τις εν λόγω πηγές.

# Κριτήρια καλής προσαρμογής μοντέλου

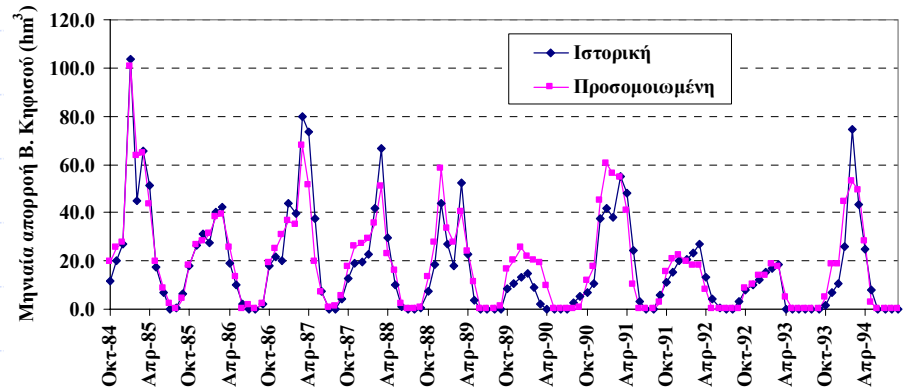
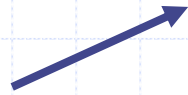
- ◆ Συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ της μετρημένης και προσομοιωμένης απορροής στην έξοδο της λεκάνης (υψηλός συντελεστής βάρους, καθώς αποτελεί τη βασική απόκριση της λεκάνης, της οποίας ζητείται η αναπαραγωγή με υψηλή ακρίβεια).
- ◆ Συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ της μετρημένης και προσομοιωμένης απορροής των τεσσάρων ομάδων πηγών (μεγαλύτερος συντελεστής βάρους για τις πηγές Μαυρονερίου, η δίαιτα των οποίων επηρεάζεται σημαντικά από τις ανλήσεις στην περιοχή του μέσου ρου για την ύδρευση της Αθήνας).
- ◆ Αναπαραγωγή του φαινομένου στείρευσης της παροχής του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών (σφάλμα μηδενικών τιμών).
- ◆ Προσθήκη όρου σφάλματος, ώστε να αποφευχθεί η έντονη υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, εξασφαλίζοντας έτσι τη διατήρηση ομαλής δίαιτας των υδροφορέων (η υπόθεση αυτή είναι συμβατή με τις παρατηρήσεις στάθμης του υδροφορέα του άνω και κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού και της Κωπαΐδας, κατά την περίοδο ελέγχου).

Περίοδος βαθμονόμησης μοντέλου: Οκτώβριος 1984 – Σεπτέμβριος 1990

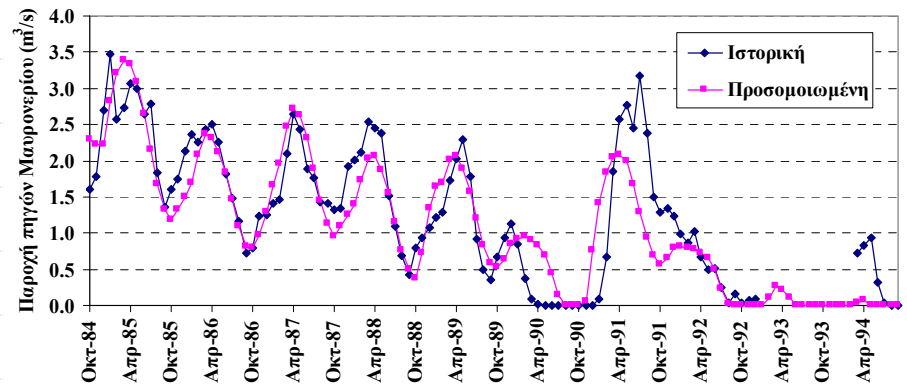
Περίοδος επαλήθευσης μοντέλου: Οκτώβριος 1990 – Σεπτέμβριος 1994

# Προσαρμογή μοντέλου

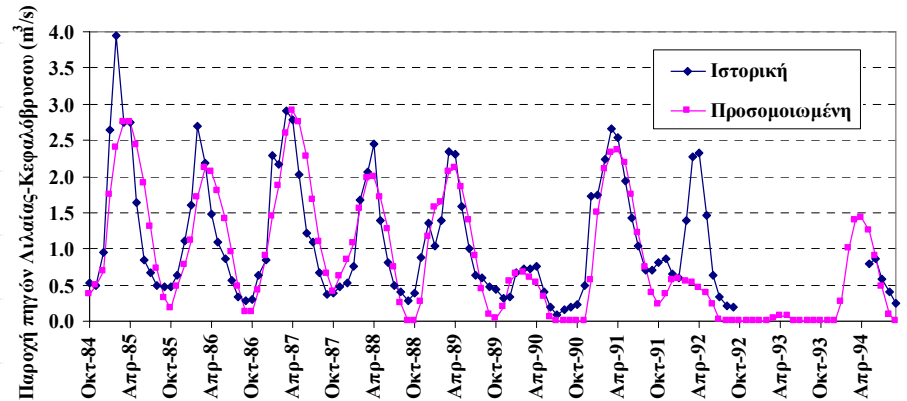
Μηνιαία απορροή  
Βοιωτικού Κηφισού στη  
Διώρυγα Καρδίτσας



Μηνιαία απορροή  
πηγών Μαυρονερίου

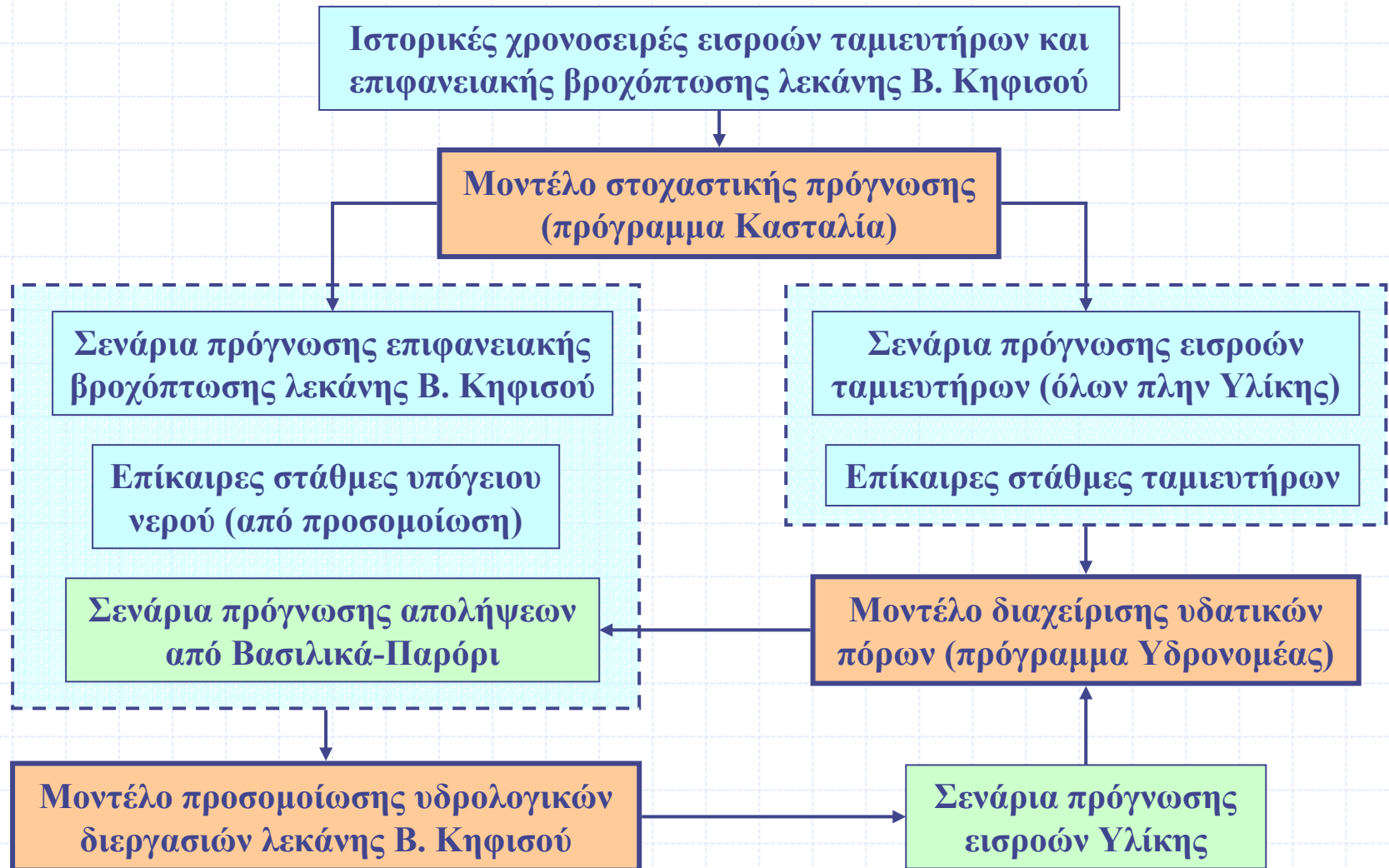


Μηνιαία απορροή  
πηγών άνω ρου





# Λογικό διάγραμμα διαδικασίας επιχειρησιακής εφαρμογής του συστήματος

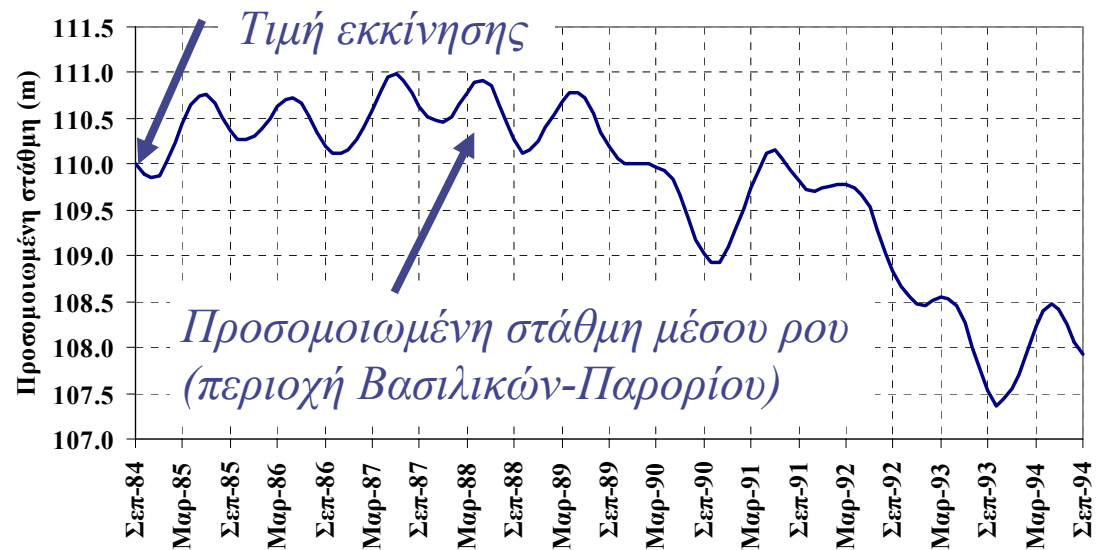


# Βήματα υπολογισμών

- ◆ **Βήμα 1:** Στοχαστική πρόγνωση μελλοντικών βροχοπτώσεων (περιλαμβάνονται και οι επιφανειακές βροχοπτώσεις στις δύο ΜΥΑ της λεκάνης) και εισροών λόγω απορροής των ταμιευτήρων (εξαρτώνται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, καθώς και από την ακολουθία των πρόσφατων τιμών).
- ◆ **Βήμα 2:** Αρχικοποίηση μοντέλων (αρχικές στάθμες ταμιευτήρων, αρχικές στάθμες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και υπόγειου νερού).
- ◆ **Βήμα 3:** Καθορισμός ζήτησης νερού (για ύδρευση Αθήνας και άρδευση λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού).
- ◆ **Βήμα 4:** Τρέξιμο Υδρονομέα, αρχικά με συνθετικές εισροές στην Υλίκη που έχουν παραχθεί από την Κασταλία (σε επόμενους κύκλους, εφόσον χρειαστούν, με προσομοιωμένες απορροές από το εν λόγω σύστημα).
- ◆ **Βήμα 5:** Αν σε ορίζοντα τριών ετών προκύπτει ανάγκη χρήσης των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου, σε ποσοστημόριο άνω του 50% και με ετήσια τιμή άνω των 10 hm<sup>3</sup>, απαιτείται επανεκτίμηση των μελλοντικών εισροών στην Υλίκη.
- ◆ **Βήμα 6:** Οι μέσες απολήψεις από τα υπόγεια νερά για κάθε μήνα εισάγονται στο σύστημα, το οποίο παράγει τροποποιημένες εισροές στην Υλίκη.
- ◆ **Βήμα 7:** Η διαδικασία (βήματα 4-6) επαναλαμβάνεται, για την επανεκτίμηση των κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος.

# Εκτίμηση αρχικών συνθηκών

- ◆ Η χρήση του μοντέλου ως εργαλείου πρόγνωσης προϋποθέτει τη γνώση των αρχικών συνθηκών, ώστε να προκύψουν ρεαλιστικά αποτελέσματα (όπως ο Υδρονομέας απαιτεί γνώση της αρχικής στάθμης των ταμιευτήρων).
- ◆ Ως αρχικές συνθήκες νοούνται: (α) οι στάθμες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, που μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές στην αρχή του υδρολογικού έτους, και (β) οι στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού. Το μοντέλο είναι **ευαίσθητο** έναντι αυτών.
- ◆ Οι στάθμες των δεξαμενών είναι εννοιολογικά μεγέθη, μη μετρήσιμα, που απαιτούν τρέξιμο του μοντέλου, μέχρι το χρονικό σημείο εκκίνησης της πρόγνωσης.
- ◆ Η επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου απαιτεί την επικαιροποίηση των χρονοσειρών εισόδου, και κυρίως της βροχόπτωσης στις δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ενώ για καλύτερο έλεγχο, απαιτείται η γνώση και της επίκαιρης διάιτας της απορροής των πηγών (αντιπροσωπευτική της στάθμης των δεξαμενών).



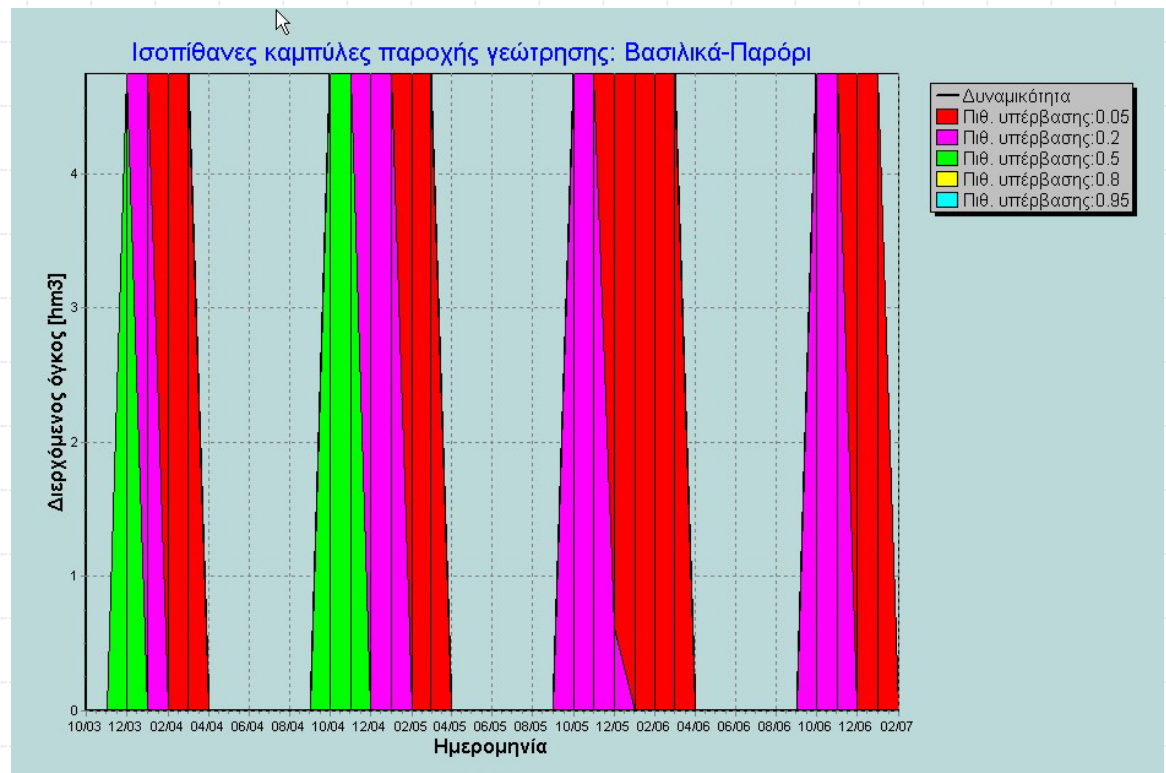
# Περιπτώσεις χρήσης του υπολογιστικού συστήματος

1. Έμμομη ξηρασία, σε συνδυασμό με **χαμηλά αποθέματα στους ταμιευτήρες**, και συνακόλουθη ανάγκη απόληψης από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου (στην περίπτωση αυτή, οι αρχικές συνθήκες στον Υδρονομέα θα επιβάλλουν την εισαγωγή σημαντικών ποσοτήτων υπόγειου νερού στο σύστημα, με συνέπεια τη μείωση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης).
2. Διερεύνηση επιπτώσεων σεναρίων **κλιματικής αλλαγής** (μεταβολή της δίαιτας της βροόπτωσης και της θερμοκρασίας, που επηρεάζουν τα παράγωγα υδρολογικά μεγέθη της λεκάνης, π.χ. απορροή και δυνητική εξατμοδιαπνοή).
3. Εξέταση επιπτώσεων σεναρίων **αλλαγής της μεθόδου άρδευσης** στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού (ισοδύναμη είναι η περίπτωση αλλαγής των καλλιεργειών, οπότε προκύπτουν μικρότερες υδατικές ανάγκες).
4. Εξέταση επιπτώσεων σεναρίων **αύξησης των αναγκών αρδευτικού νερού** στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού.

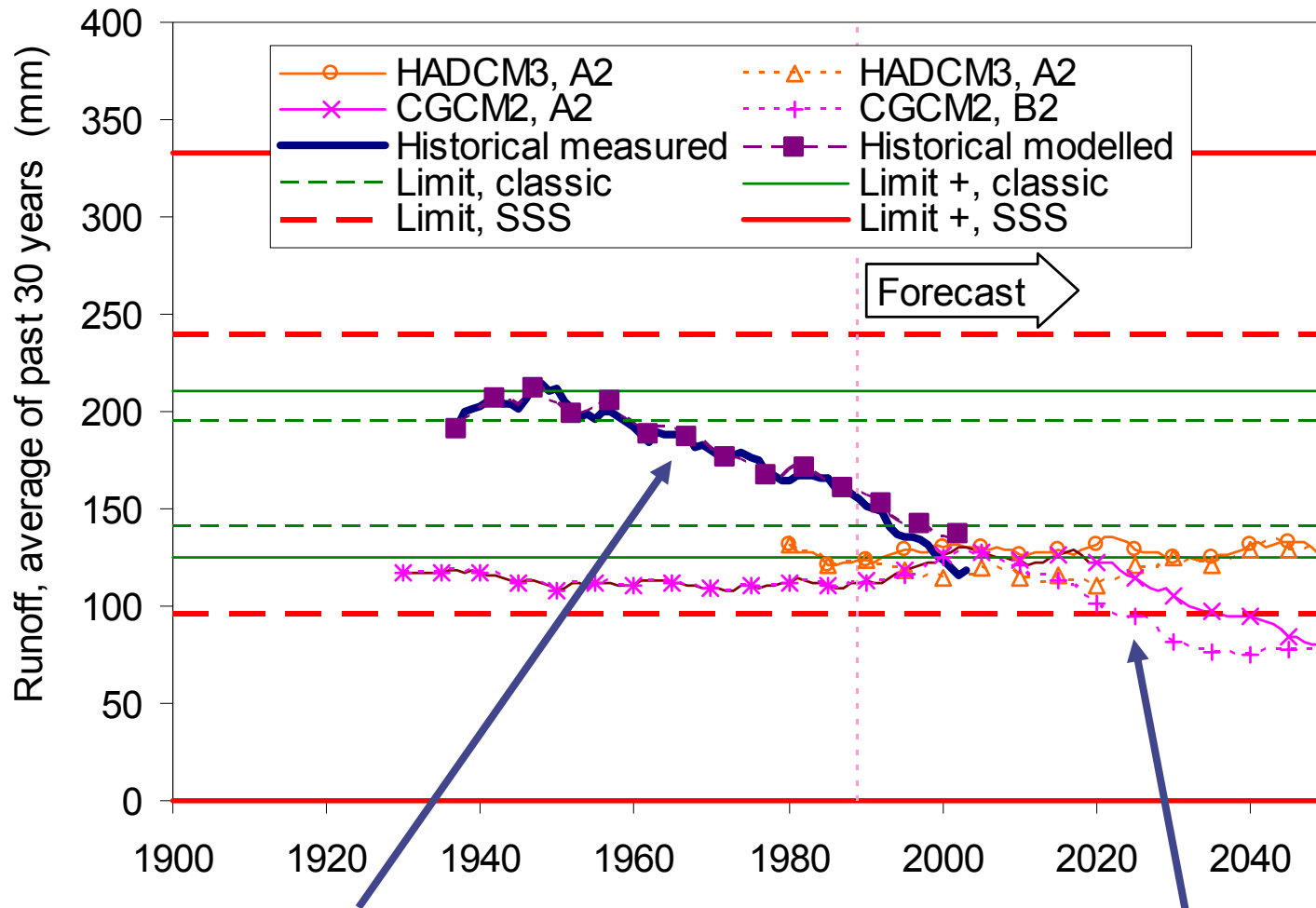
Στις περιπτώσεις 2, 3, και 4 μεταβάλλεται ουσιαστικά η δίαιτα της απορροής του ποταμού, και συνεπώς τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικά. Ως εκ τούτου, η παραγωγή των συνθετικών εισροών της Υλίκης μέσω της Κασταλίας οδηγεί σε μεροληπτικές εκτιμήσεις.

# Περίπτωση συνήθους υδρολογικής δίαιτας

- ◆ Μετά από εκτέλεση της προσομοίωσης με συνθετικές εισροές που έχουν παραχθεί εξ ολοκλήρου μέσω της Κασταλίας, υπολογίζονται τα ποσοστημόρια απόληψης από τα υπόγεια νερά για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης.
- ◆ Στην περίπτωση του σχήματος, προκύπτει υψηλή πιθανότητα άμεσης ενεργοποίησης των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου, για μεγάλο διάστημα και με υψηλές παροχές.
- ◆ Η εντατική χρήση των γεωτρήσεων αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την απορροή των πηγών Μαυρονερίου, άρα και τις εισροές της Υλίκης.
- ◆ Συνεπώς, οι συνθετικές εισροές πρόγνωσης που παρήχθησαν μέσω της Κασταλίας, με βάση τα πρόσφατα ιστορικά δείγματα, δεν θεωρούνται στατιστικά συνεπείς με τις μελλοντικές.



# Περίπτωση σεναρίων κλιματικής αλλαγής

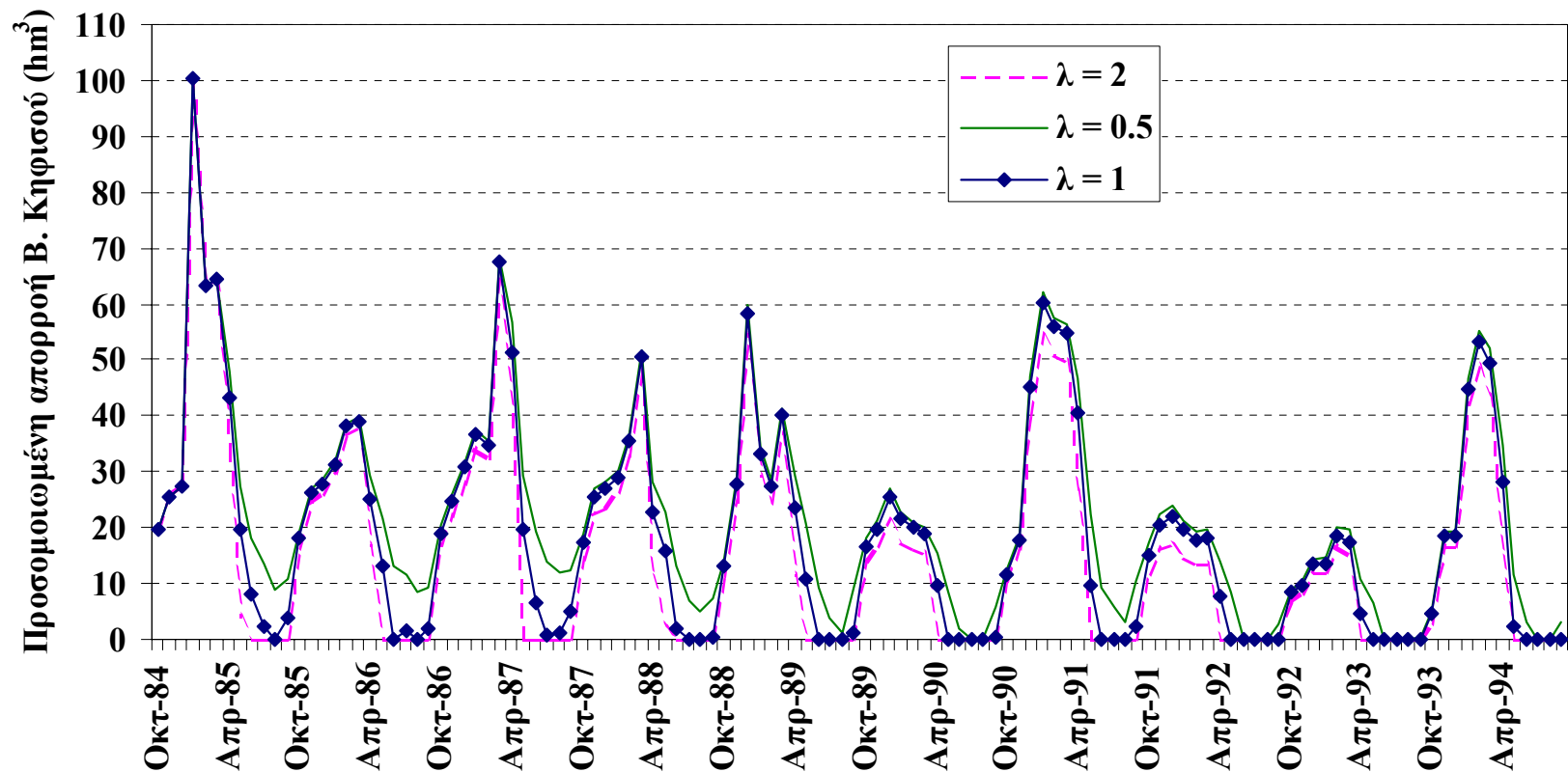


Προσαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου στα ιστορικά υδρολογικά δεδομένα 100 ετών

Σενάρια κλιματικής αλλαγής

# Περίπτωση σεναρίων αλλαγής ζήτησης αρδευτικού νερού

- ◆ Η διερεύνηση γίνεται μεταβάλλοντας τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή ζήτησης,  $\lambda$ , για κάθε περιοχή ζήτησης αρδευτικού νερού.
- ◆ Το φυσικό σύστημα φαίνεται να παρουσιάζει μέτρια ευαισθησία ως προς τη μεταβολή των συνθηκών άρδευσης κατά τη χειμερινή περίοδο.



## Πότε απαιτείται επαναβαθμονόμηση του μοντέλου

- ◆ Όταν πραγματοποιηθούν σημαντικά υδροληπτικά έργα στην περιοχή, οπότε μεταβάλλεται η φυσική διαίτα της απορροής της λεκάνης.
- ◆ Όταν υπάρξουν ενδείξεις συστηματικής αλλαγής της διαίτας των κύριων πηγών της λεκάνης.
- ◆ Όταν υπάρξει σοβαρή αναδιάρθρωση καλλεργειών, οπότε διαφοροποιούνται οι υδατικές ανάγκες, και συνακόλουθα οι απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, άρα και η διαίτα της απορροής του ποταμού και των πηγών.
- ◆ Εφόσον υπάρξει ακριβέστερη γνώση σχετικά με τις υδατικές ανάγκες και τον τρόπο προαρμοποίησης των αρδευτικών απολήψεων.
- ◆ Εφόσον αυξηθεί σημαντικά το μήκος της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της αρχικής βαθμονόμησης του μοντέλου.
- ◆ Εφόσον αυξηθεί ουσιαστικά η ποσότητα καθώς και η ποιότητα της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας (π.χ. χιονόπτωση, απορροή λοιπών πηγών, απορροή Β. Κηφισού σε ενδιάμεσες θέσεις της λεκάνης).
- ◆ Εφόσον τα ιστορικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν (π.χ. χρονοσειρά απορροής στη Διώρυγα Καρδίτσας) κριθούν αναξιόπιστα, με συνέπεια την αναθεώρησή τους σε ποσοστό που ξεπερνά το 5-10%.



# Βαθμονόμηση του μοντέλου

1. **Προετοιμασία δεδομένων:** μηνιαίες ιστορικές χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής (απαιτείται η συγκέντρωση των σχετικών μηνιαίων υδρομετεωρολογικών δειγμάτων από τους βροχομετρικούς και μετεωρολογικούς σταθμούς της λεκάνης), και υδατικών αναγκών (για απλούστευση μπορούν να θεωρηθούν σταθερές ανά έτος)
2. **Επιλογή περιόδων βαθμονόμησης και επαλήθευσης:** η περίοδος βαθμονόμησης πρέπει να περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικές καταστάσεις υδροφορίας της λεκάνης
3. **Επιλογή παραμέτρων ρύθμισης του μοντέλου:** για επιτάχυνση της διαδικασίας βαθμονόμησης, συστήνεται, σε πρώτη προσέγγιση, η επιλογή μόνο των πλέον κρίσιμων παραμέτρων (συνήθως οι παράμετροι του επιφανειακού μοντέλου και το πορώδες του υδροφορέα)
4. **Επεξεργασία αποτελεσμάτων και επαναβαθμονόμηση:** η διαδικασία αναζήτησης επαναλαμβάνεται, εφόσον οι τιμές των παραμέτρων κριθούν μη αντιπροσωπευτικές των χαρακτηριστικών της λεκάνης ή τα μεγέθη του μέσου υδατικού ισοζυγίου κριθούν μη ρεαλιστικά
5. **Επιλογή τελικών παραμέτρων:** η τελική εκτίμηση προκύπτει μετά από διαδοχικές βελτιστοποιήσεις, και με χρήση διαφορετικών συντελεστών βάρους στους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης