

ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων  
Παρουσίαση στα πλαίσια του μαθήματος:  
«Προχωρημένη Υδρολογία»

---

Υδρολογική και υδρογεωλογική προσομοίωση  
τροποποιημένων λεκανών απορροής –  
Το μοντέλο Υδρόγειος

---

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Απρίλιος 2010

# Διάρθρωση παρουσίασης

---

- Εισαγωγικές έννοιες
- Πώς ξεκίνησε η Υδρογείως;
- Θεωρητικό υπόβαθρο
- Γεωγραφικά δεδομένα
- Τύποι προβλημάτων
- Εφαρμογές

# Εισαγωγικές ερωτήσεις (με αφορμή τον τίτλο της παρουσίασης)

---

- ❑ Τι σημαίνει υδρολογική προσομοίωση;
- ❑ Τι σημαίνει υδρογεωλογική προσομοίωση;
- ❑ Γιατί αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα προβλήματα;
- ❑ Τι χαρακτηρίζει μια λεκάνη απορροής ως «τροποποιημένη»;
- ❑ Μπορούν τα συνήθη υδρολογικά μοντέλα να εφαρμοστούν σε τέτοιου είδους λεκάνες;
- ❑ Πως υλοποιείται η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων, επιφανειακών και υπόγειων, σε τροποποιημένες λεκάνες;

# Μοντέλα επιφανειακών και υπόγειων νερών

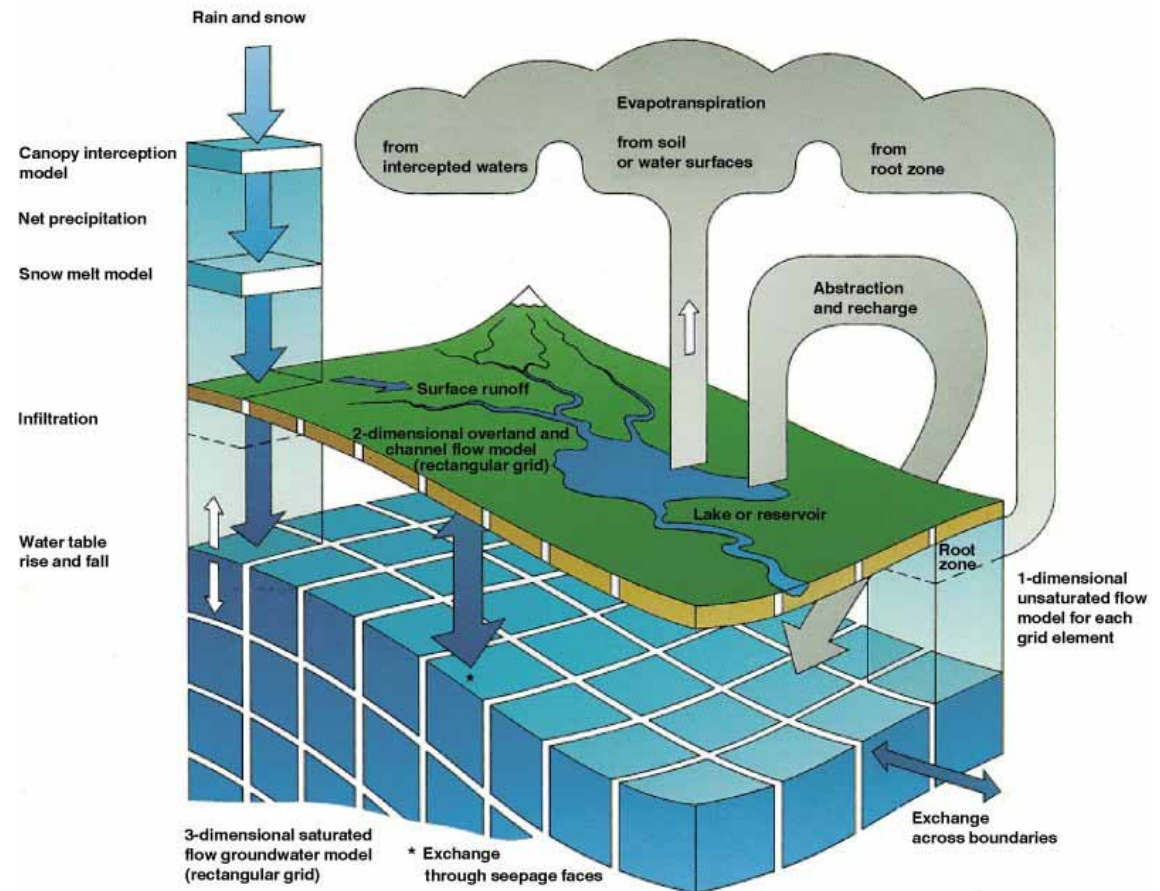
	Επιφανειακά μοντέλα	Μοντέλα υπόγειων νερών
<b>Επιφάνεια αναφοράς</b>	Λεκάνη απορροής (μέχρι την ακόρεστη ζώνη)	Υδροφορέας
<b>Χρονοσειρές εισόδου</b>	Βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή	Κατακόρυφη (κατείσδυση) και πλευρική φόρτιση, αντλήσεις
<b>Χρονοσειρές εξόδου</b>	Εξατμοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση	Στάθμες, εκφορτίσεις πηγών, υπόγειες διαφυγές
<b>Χωρική κλίμακα</b>	Αδιαμέριστη μέχρι κατανεμημένη	Κατανεμημένη (διακριτοποίηση πεδίου ροής σε κύτταρα)
<b>Μαθηματικό υπόβαθρο</b>	Από «μαύρου κουτιού» έως φυσικής βάσης	Σύστημα διαφορικών εξισώσεων υπόγειας ροής
<b>Παράμετροι</b>	Εννοιολογικά μεγέθη ή μη μετρήσιμες ιδιότητες	Υδραυλικά μεγέθη υδροφορέα (αγωγιμότητα, ειδική απόδοση)
<b>Βελτιστοποίηση</b>	Βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις παροχής σε ποτάμια	Βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων και παροχής πηγών

# Υδρολογικά και διαχειριστικά μοντέλα

	Υδρολογικά μοντέλα	Διαχειριστικά μοντέλα
<b>Επιφάνεια αναφοράς</b>	Λεκάνη απορροής ή υδροφορέας	Υδροσύστημα (υδραυλικά έργα και χρήσεις νερού)
<b>Χρονοσειρές εισόδου</b>	Βροχόπτωση	Προσφορά (υδρολογικές εισροές) και ζήτηση νερού
<b>Χρονοσειρές εξόδου</b>	Εξατμοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση	Ρυθμισμένες παροχές, απολήψεις, αντλήσεις
<b>Χωρική κλίμακα</b>	Αδιαμέριστη μέχρι κατανεμημένη	Σχηματοποίηση δικτυακής μορφής
<b>Μαθηματικό υπόβαθρο</b>	Από «μαύρου κουτιού» έως φυσικής βάσης	Συστημική προσέγγιση
<b>Παράμετροι</b>	Εννοιολογικά μεγέθη ή μη μετρήσιμες ιδιότητες	Σχετικές με τη διαχειριστική πολιτική και τη λειτουργία έργων
<b>Βελτιστοποίηση</b>	Προσαρμογή στις παρελθούσες μετρήσεις (βαθμονόμηση)	Εντοπισμός και αξιολόγηση μελλοντικών διαχειριστικών πολιτικών (στοχαστική πρόγνωση)

# Επιφανειακά νερά, υπόγεια νερά και υδραυλικά έργα: ένας αδιαίρετος κύκλος

- ❑ Κατείδυση μέσω της ακόρεστη ζώνης
- ❑ Απώλειες λόγω διήθησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου
- ❑ Βασική απορροή ποταμών λόγω της εκφόρτισης πηγών
- ❑ Απολήψεις από επιφανειακά νερά
- ❑ Αντλήσεις νερού
- ❑ Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων
- ❑ Επιστροφές νερού μέσω αποστραγγιστικών και αποχετευτικών δικτύων



Πηγή: <http://www.dhisoftware.com/mikeshe>

# Το κίνητρο: Ανάπτυξη μοντέλου διαχείρισης υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

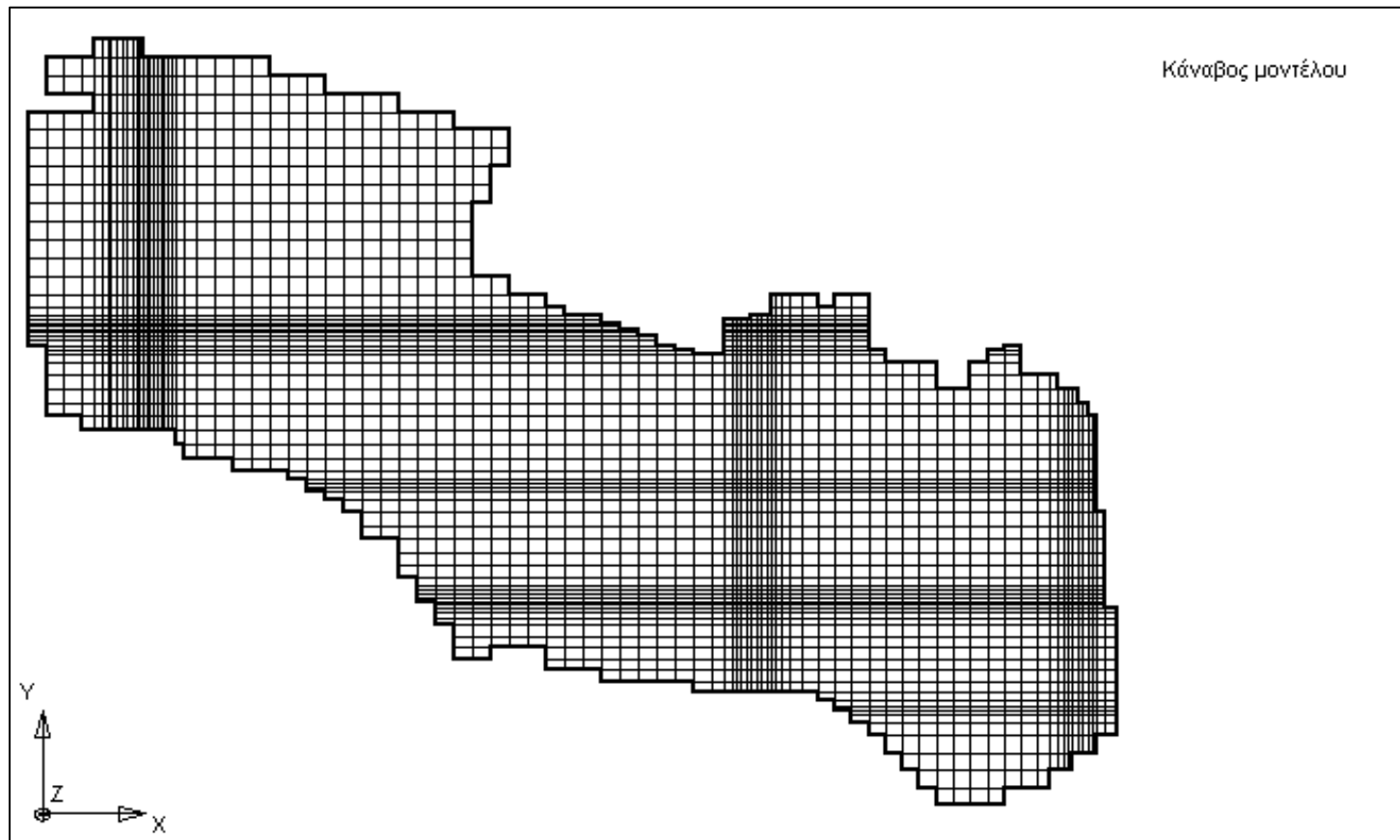


# Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού



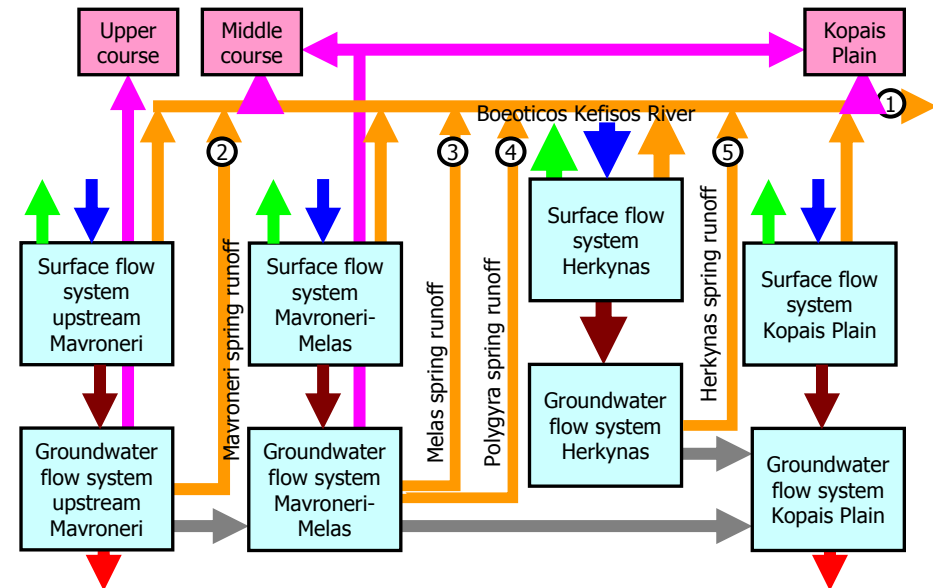
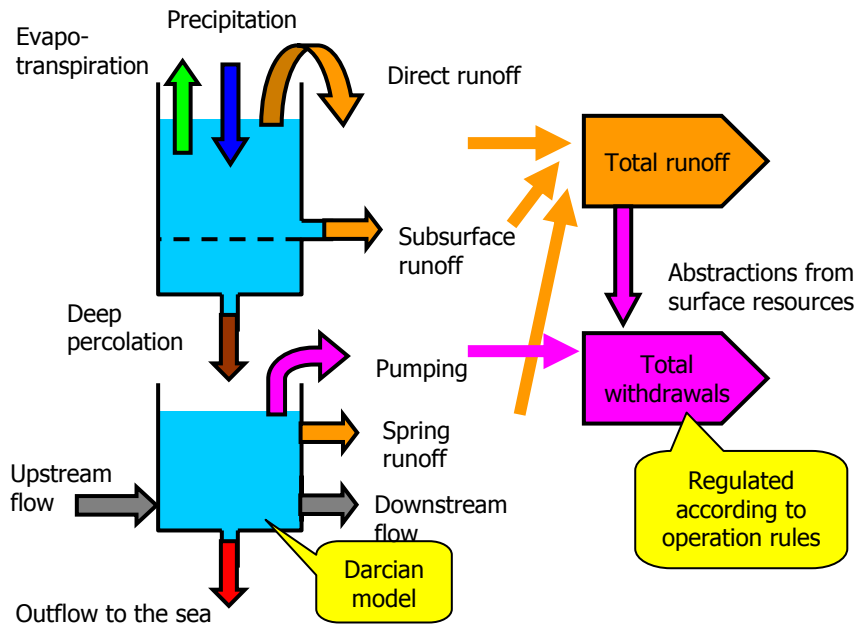
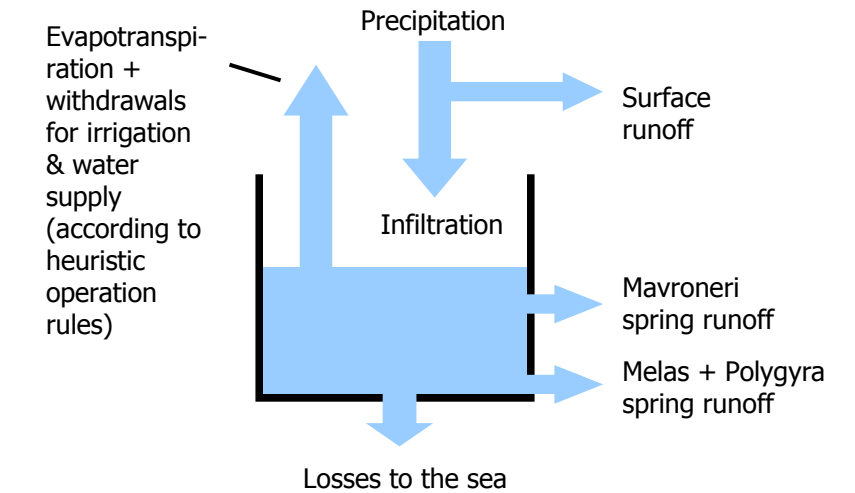


# Παλαιότερες προσεγγίσεις...



Προσομοίωση καρστικού υδροφορέα με το Modflow (Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000)

# Παλαιότερες προσεγγίσεις...

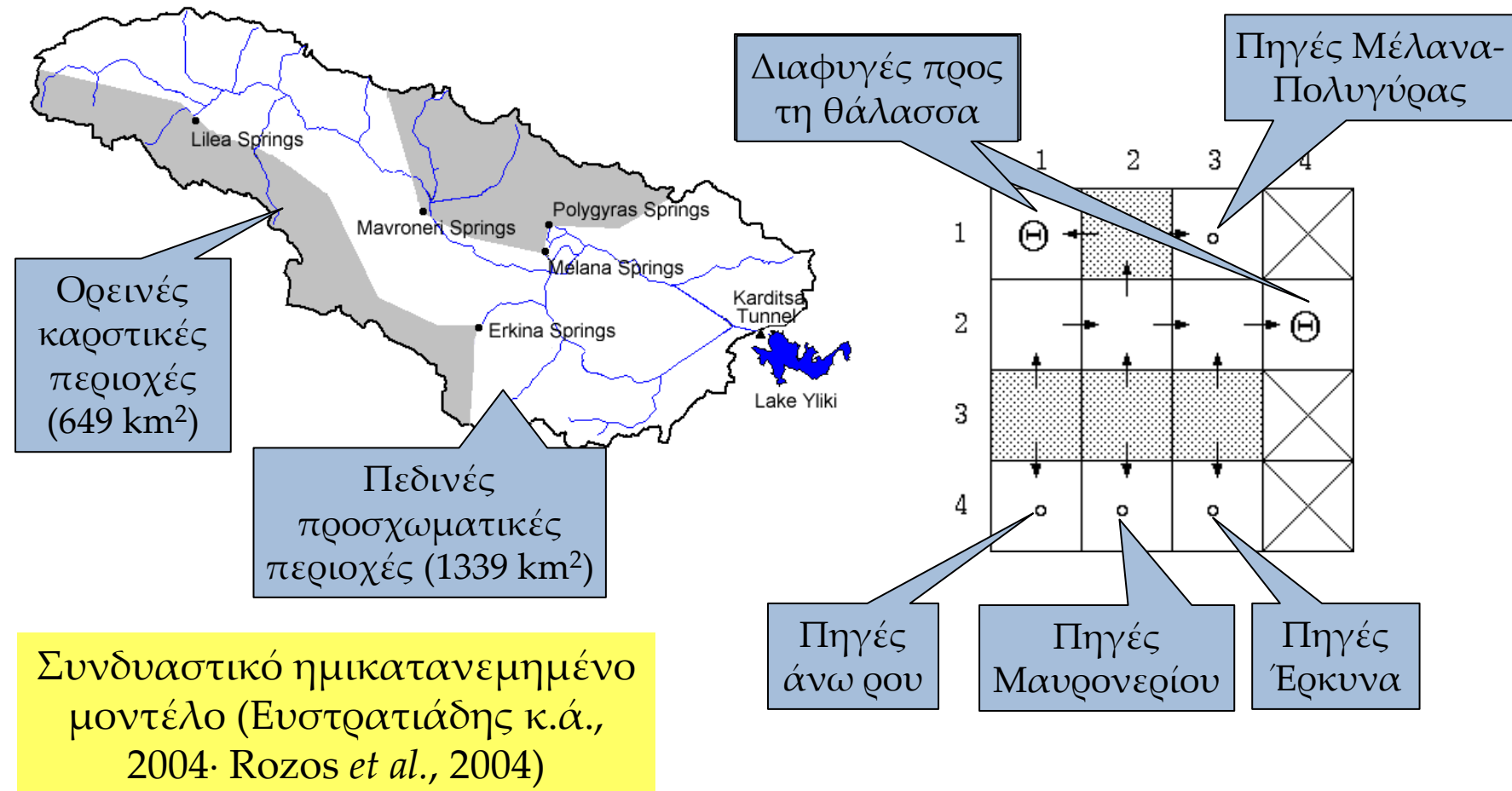


Προσεγγίσεις με αδιαμέριστα ή «ημικατανεμημένα» μοντέλα και στοιχειώδης περιγραφή του διαχειριστικού προβλήματος (Nalbantis *et al.*, 2002)

# Παλαιότερες προσεγγίσεις...

Επιφανειακό μοντέλο  
(9 παράμετροι)

Υπόγειο μοντέλο  
(13 παράμετροι)



# Ζητούμενα μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης

Χαρακτηριστικό υδροσυστήματος	Απαιτήσεις υδρολογικού μοντέλου
Πληθώρα καρστικών πηγών, σημαντική συνεισφορά βασικής ροής (~50%)	Συνδυασμένη αναπαράσταση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών
Εκτεταμένα μέτωπα διαφυγών προς την Υλίκη και την θάλασσα	Μοντελοποίηση απωλειών εκτός λεκάνης, χωρικές και ποσοτικές εκτιμήσεις
Σημαντικές απώλειες λόγω διήθησης, το καρστ ανατροφοδοτείται από ανάντη νερά	Μοντελοποίηση μηχανισμού διήθησης, ποσοτικές εκτιμήσεις, χωρική κατανομή
Ανταγωνιστικές χρήσεις νερού, συνδυασμένες απολήψεις επιφανειακών και υπόγειων νερών, άγνωστης κατανομής	Ποσοτικοποίηση των υδατικών αναγκών, περιγραφή των πρακτικών διαχείρισης, με βάση εύλογες υποθέσεις
Οι απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά επηρεάζουν δραστικά τη δίαιτα της λεκάνης και του υδροφορέα	Συνδυασμένη αναπαράσταση φυσικών υδρολογικών διεργασιών και ανθρωπογενών επεμβάσεων
Μέρος της αρδευτικής ζήτησης καλύπτεται από αντλούμενα νερά της Υλίκης	Αναπαράσταση «εξωτερικών» εισροών
Έντονη ετερογένεια ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (γεωλογία)	Διερεύνηση της επίδρασης των εν λόγω χαρακτηριστικών στις διεργασίες
Συστηματικές αλλά και σποραδικές μετρήσεις, σε διάφορες θέσεις της λεκάνης	Βέλτιστη προσαρμογή μοντέλου, με αξιοποίηση του συνόλου των μετρήσεων

# ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ: Θεμελιώδεις αρχές

---

- ❑ Καινοτόμο εργαλείο ολοκληρωμένης γεω-υδρολογικής προσομοίωσης πολύπλοκων λεκανών απορροής.
- ❑ Συνδυάζοντας μια δέσμη μοντέλων αναπαριστά:
  - τις φυσικές διεργασίες στο έδαφος, την ακόρεστη ζώνη και τον υδροφορέα
  - τις χρήσεις νερού και τη λειτουργία των κύριων υδραυλικών έργων
- ❑ Κατάλληλο για χρονικές κλίμακες από ημερήσια έως μηνιαία.
- ❑ Συνεργάζεται με το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow για την παραγωγή των χωρικών δεδομένων.
- ❑ Χρησιμοποιεί εξελιγμένες τεχνικές βαθμονόμησης και πολλαπλά κριτήρια προσαρμογής ώστε να εξασφαλίζεται συνέπεια με:
  - τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης
  - τις παρατηρημένες αποκρίσεις (παροχές ποταμών και πηγών, στάθμες)
- ❑ Εκτιμά, στη χωρική κλίμακα που ορίζει ο χρήστης:
  - το ισοζύγιο των υδατικών πόρων, επιφανειακών και υπόγειων
  - τις απολήψεις του υδροσυστήματος, σε διάφορες θέσεις ελέγχου
  - τη δίαιτα των ροών (διόδευση) κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου

# Θεματικά επίπεδα και διασυνδέσεις

- Δικτυακή σχηματοποίηση, με τη μορφή θεματικών επιπέδων:
  - **επιφανειακό σύστημα:** υδρογραφικό δίκτυο, υπολεκάνες, πηγές
  - **μονάδες υδρολογικής απόκρισης:** γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι οποίες αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών
  - **υπόγειο σύστημα (υδροφορέας):** δίκτυο διασυνδεόμενων δεξαμενών που εκφορτίζονται είτε επιφανειακά, μέσω των πηγών, ή υπόγεια, προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα
  - **σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων (υδροσύστημα):** σχηματική απεικόνιση θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, έργων αξιοποίησης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις) και χρήσεων νερού.
- Τα θεματικά επίπεδα συνδέονται μέσω:
  - των υδατορευμάτων (υδρογραφικό δίκτυο → υδροφορέας)
  - των πηγών (υδροφορέας → υδρογραφικό δίκτυο)
  - των γεωτρήσεων (υδροφορέας → υδροσύστημα)
  - των υδραγωγείων (υδρογραφικό δίκτυο → υδροσύστημα, και αντίστροφα).

# Συνιστώσες επιφανειακών διεργασιών

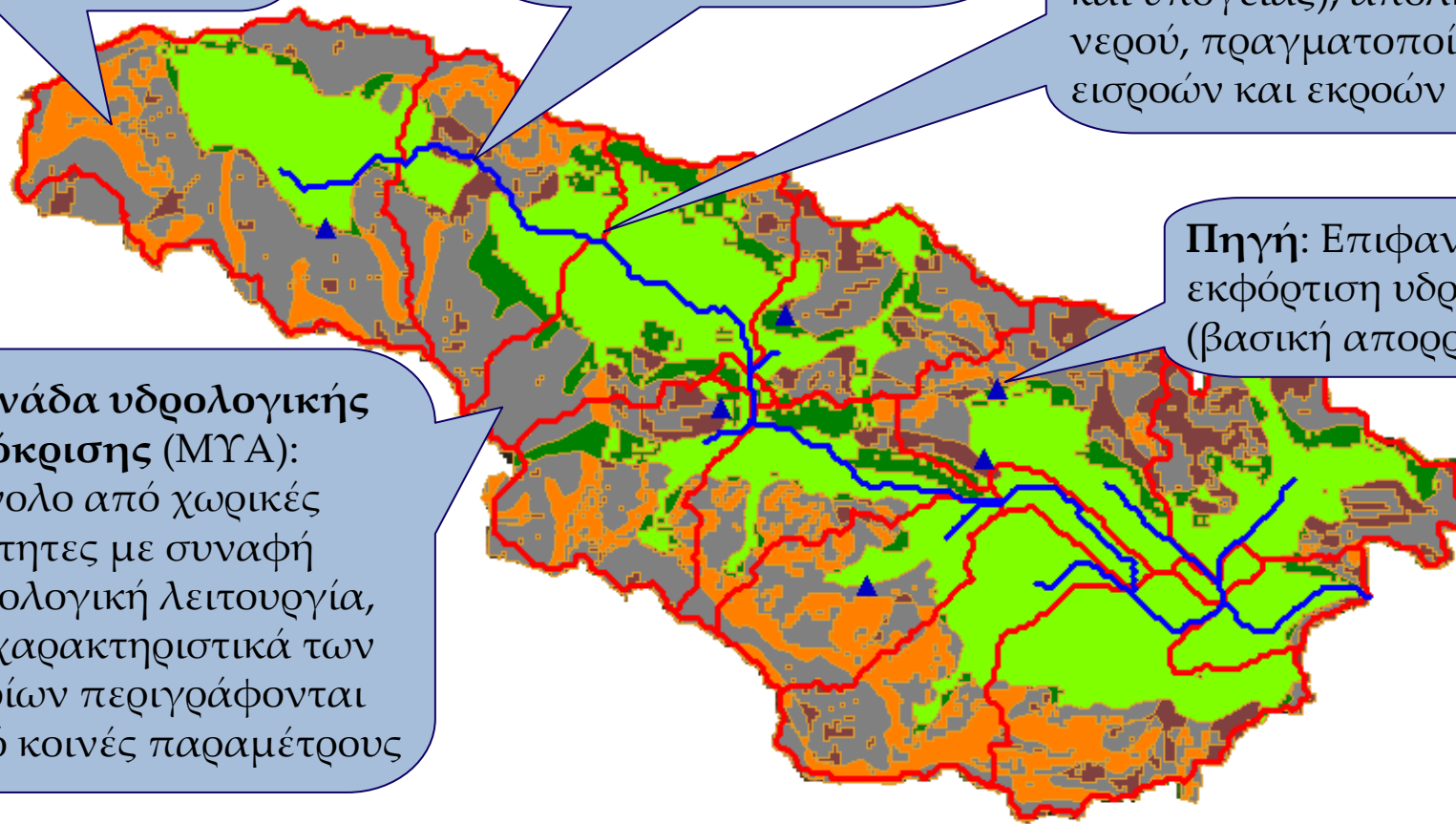
**Υπολεκάνη:**  
Πεδίο φορτίσεων  
(βροχόπτωση,  
δυναμική  
εξατμοδιαπνοή)

**Υδατόρευμα:** Ανάσχεση  
πλημμυρικών παροχών,  
τροφοδοσία υδροφορέα  
μέσω διηθήσεων

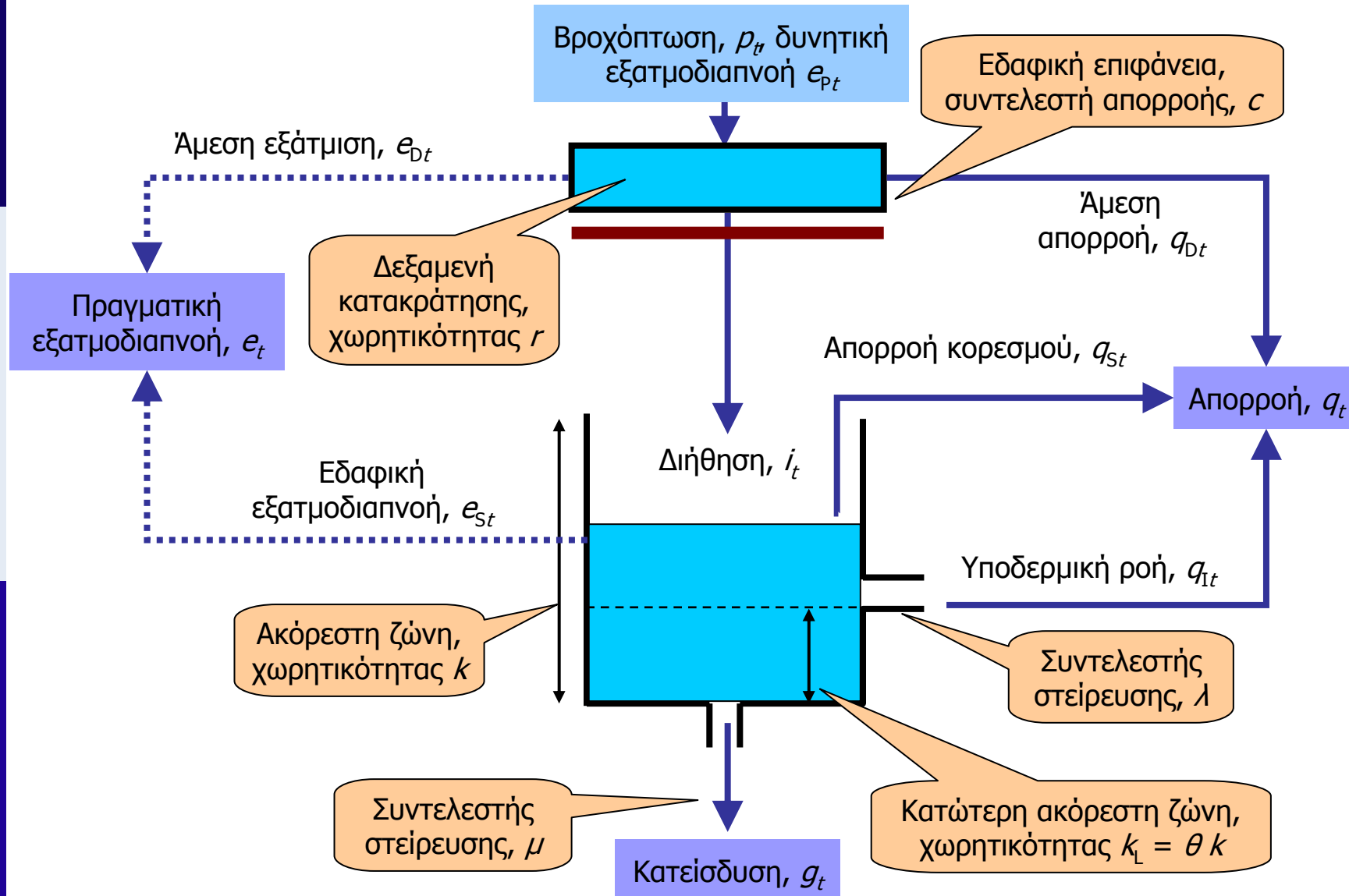
**Κόμβος:** Συγκέντρωση  
απορροής (επιφανειακής  
και υπόγειας), απόληψη  
νερού, πραγματοποίηση  
εισροών και εκροών

**Πηγή:** Επιφανειακή  
εκφόρτιση υδροφορέα  
(βασική απορροή)

**Μονάδα υδρολογικής  
απόκρισης (ΜΥΑ):**  
Σύνολο από χωρικές  
ενότητες με συναφή  
υδρολογική λειτουργία,  
τα χαρακτηριστικά των  
οποίων περιγράφονται  
από κοινές παραμέτρους



# Μοντελοποίηση επιφανειακών διεργασιών



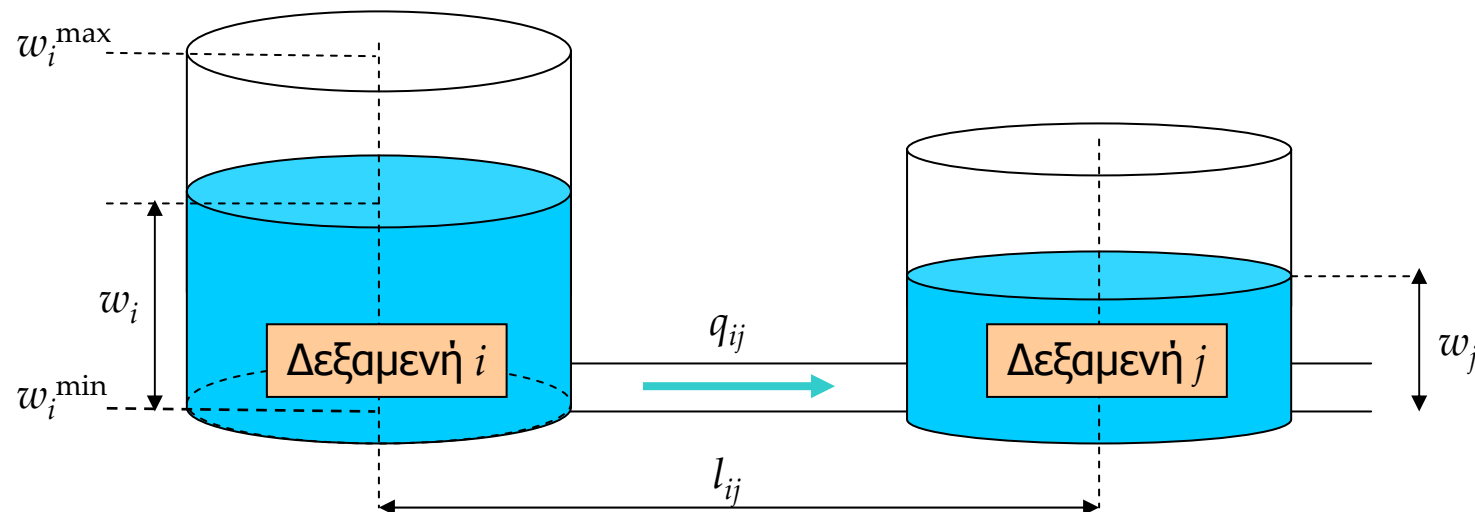


# Συνιστώσες υπόγειων διεργασιών

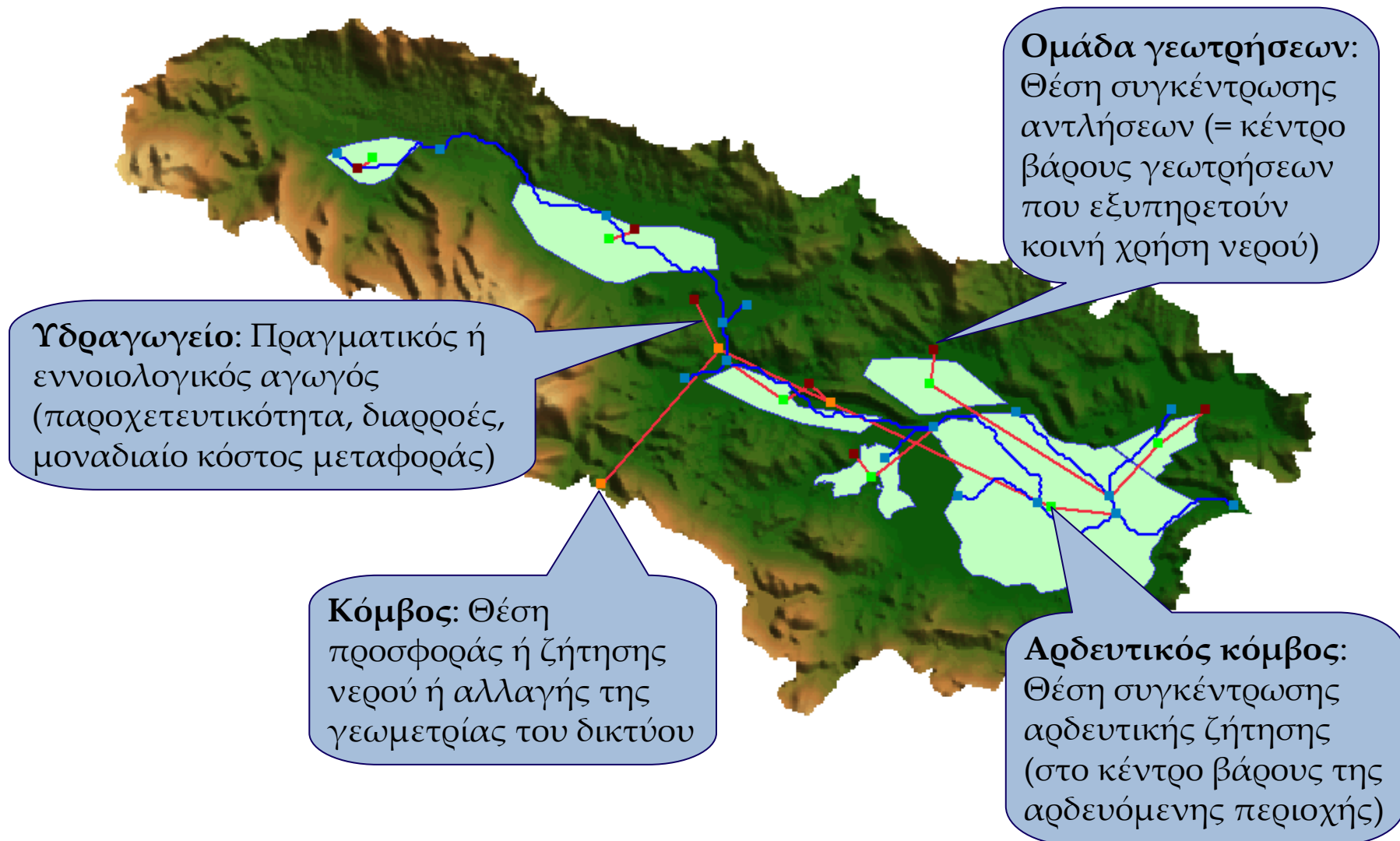


# Μοντελοποίηση υπόγειων διεργασιών

- ❑ Παράμετροι δεξαμενών: υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες
- ❑ Φορτίσεις: κατείδυση, διηθήσεις ποταμών, αντλήσεις γεωτρήσεων
- ❑ Στοιχεία μεταφοράς: εννοιολογικοί αγωγοί που συνδέουν τα κέντρα βάρους των δεξαμενών
- ❑ Εξίσωση ροής: η παροχή εξαρτάται από τη διαφορά στάθμης, την υδραυλική αγωγιμότητα και την κοινή επιφάνεια των δεξαμενών
- ❑ Για σύστημα δεξαμενών, δημιουργείται σύστημα εξισώσεων συνέχειας και ροής, που επιλύεται αριθμητικά.

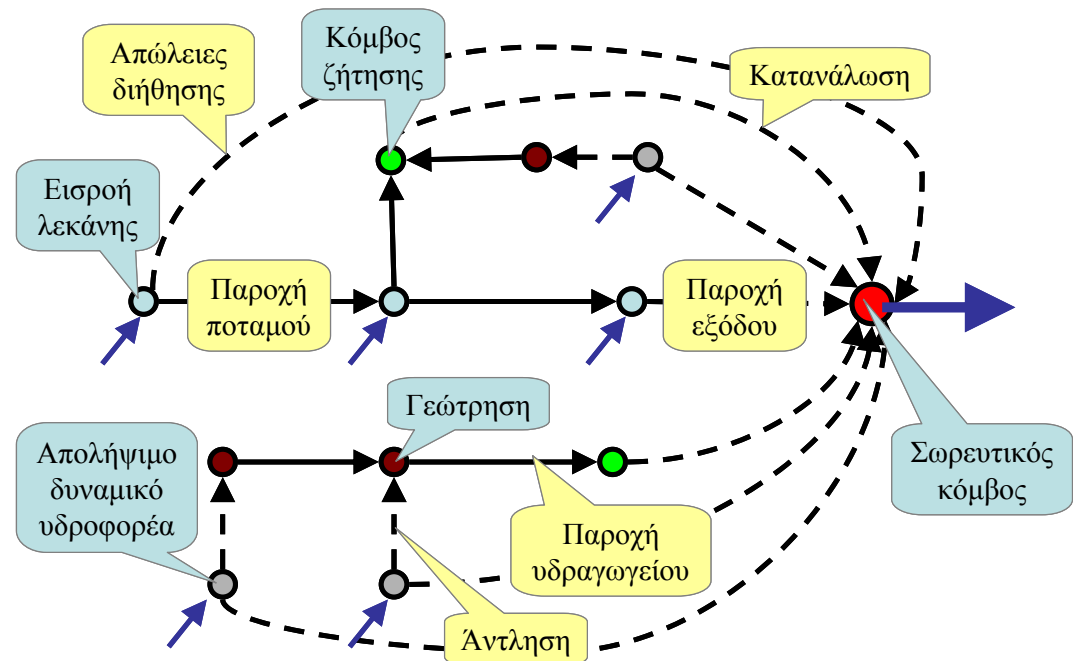
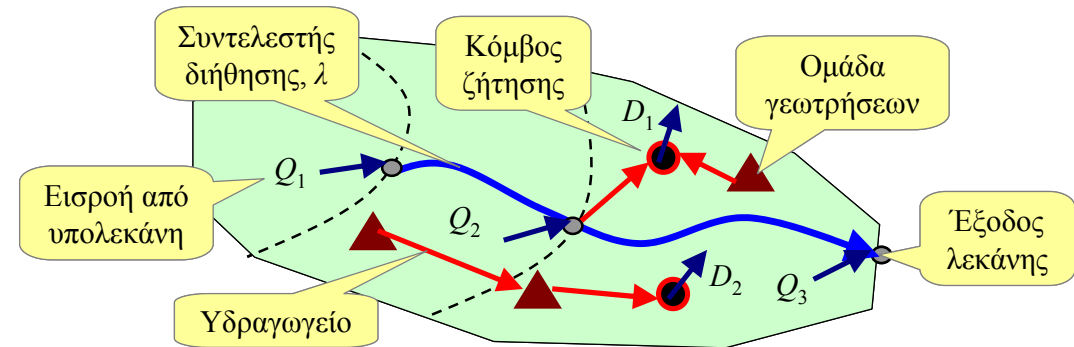


# Συνιστώσες συστήματος διαχείρισης υδατικών πόρων

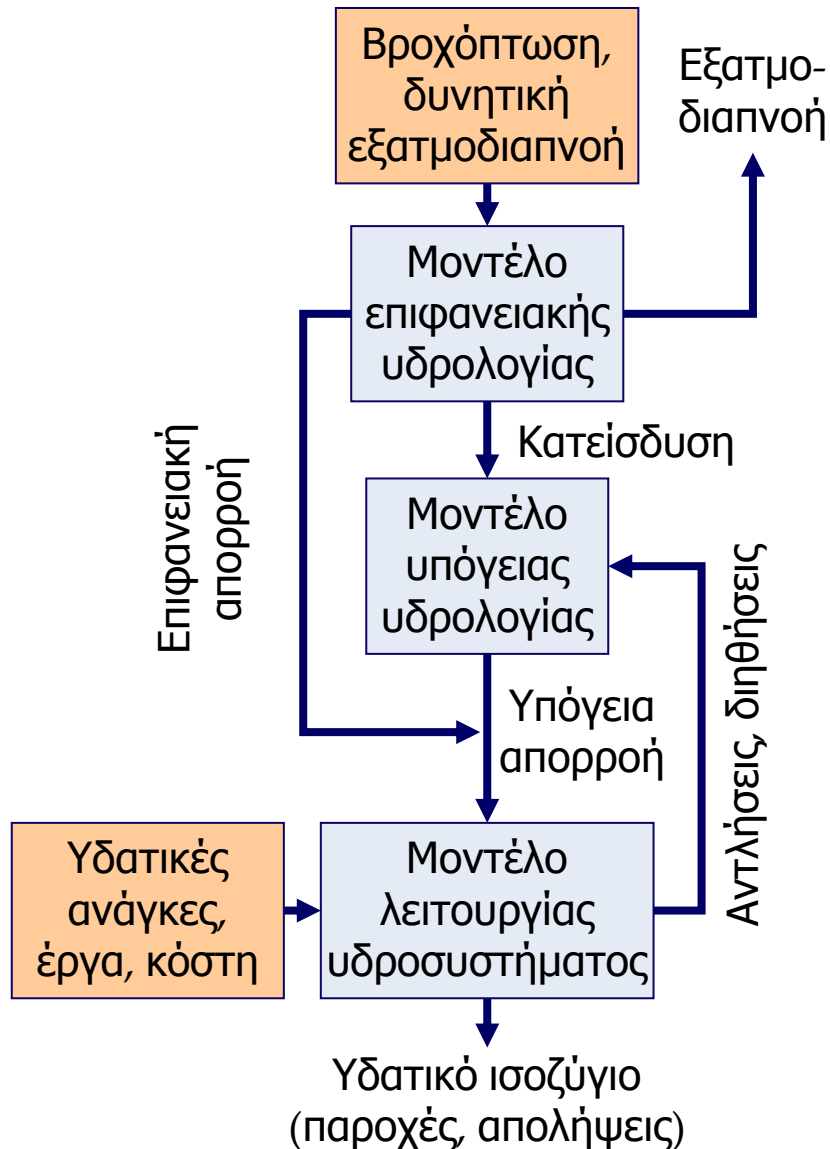


# Μοντελοποίηση λειτουργίας συστήματος

- Δίνεται το σύστημα των υδραυλικών έργων και τα χαρακτηριστικά μεγέθη.
- Ορίζονται οι στόχοι και περιορισμοί (κατά σειρά προτεραιότητας), και οι υδατικές ανάγκες.
- Ο εντοπισμός της πλέον πρόσφορης κατανομής των διαθέσιμων υδατικών πόρων διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης σε ένα μετασχηματισμένο δίκτυο (διγράφος).
- Οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί και η ιεραρχία των χρήσεων νερού τηρούνται με την εισαγωγή εικονικών τιμών κόστους.



# Συνδυαστική λειτουργία μοντέλων



**Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας**

Ημικατανεμημένη χωρική κλίμακα (υπολεκάνες), παραμετροποίηση ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ)

**Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας**

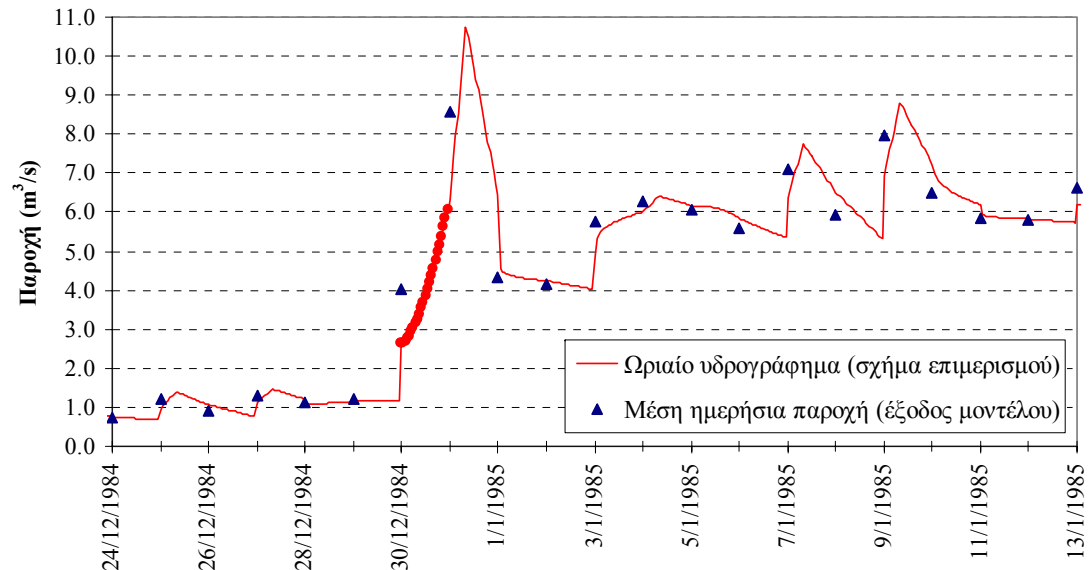
Πολυκυτταρικό σχήμα επίλυσης ισοδύναμο των πεπερασμένων όγκων, εξίσωση ροής γραμμική (Darcy) ή μη γραμμική

**Μοντέλο λειτουργίας υδросυστήματος**

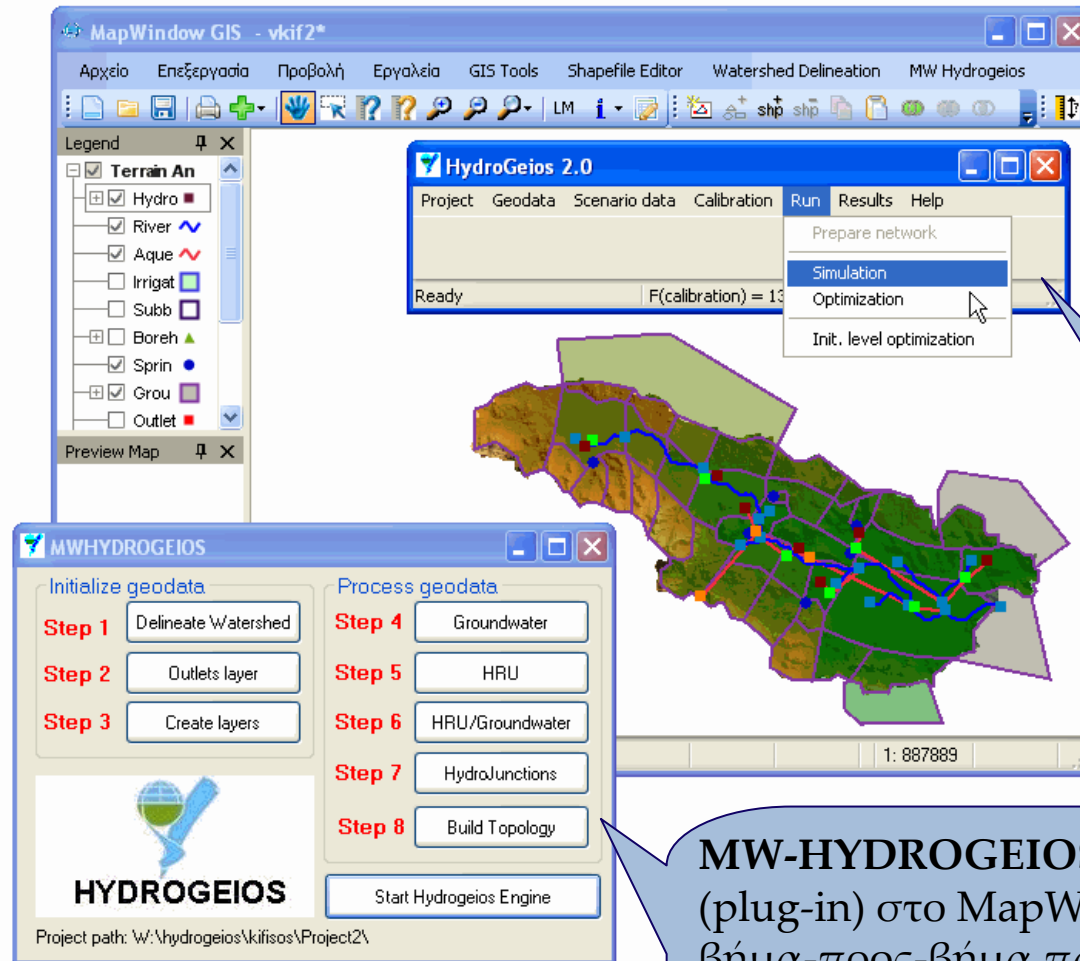
Αναπαράσταση χρήσεων νερού και λειτουργίας υδραυλικών έργων μέσω γραμμικής βελτιστοποίησης

# Διόδευση ροών στο υδρογραφικό δίκτυο

- Στην ημερήσια κλίμακα, η απορροή μεταφέρεται κατάντη με χρονική υστέρηση και οι αιχμές της εξομαλύνονται.
- Λόγω της έλλειψης λεπτής χρονικής κλίμακας δεδομένων βροχοπτώσης, εφαρμόζεται μια **τεχνική επιμερισμού**, με την οποία οι μέσες ημερήσιες χρονοσειρές παροχής των υπολεκανών αναλύονται σε ωριαία χρονικά βήματα, εφαρμόζοντας μια ρεαλιστική και μαθηματικά συνεπή (αν και υποθετική) χρονική κατανομή της απορροής εντός της ημέρας.
- Για τη διόδευση των υδρογραφημάτων εφαρμόζεται είτε η μέθοδος του γραμμικού κινηματικού κύματος (για σχετικά μεγάλες κλίσεις) είτε ένα σχήμα διάχυσης κύματος **Muskingum**, εισάγοντας μία ή δύο παραμέτρους ανά κλάδο, αντίστοιχα.
- Η επίλυση γίνεται από **ανάντη προς κατάντη**, με γνωστό το καθαρό (μετά τις απολήψεις) υδρογράφημα εισόδου κάθε κλάδου.



# Το υπολογιστικό σύστημα



**MapWindow:** Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για την επεξεργασία και οπτικοποίηση των χωρικών δεδομένων (ελεύθερο)

**HYDROGEIOS 2.0:** Κύρια εφαρμογή (διαχείριση σεναρίων και υδρολογικών δεδομένων έργου, προσομοίωση, βαθμονόμηση)

**MW-HYDROGEIOS:** Αρθρωμα (plug-in) στο MapWindow, για την βήμα-προς-βήμα παραγωγή των χωρικών δεδομένων ενός έργου, που αφορά στη μοντελοποίηση μιας λεκάνης απορροής

# Πρόβλημα 1: Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών σε κλίμακα υπολεκάνης

- Σε ορισμένες περιπτώσεις διατίθενται μετρήσεις παροχής σε διαφορετικές θέσεις της λεκάνης σε σχέση με τα σημεία ενδιαφέροντος (π.χ. θέσεις κατασκευής έργων, πραγματοποίησης απολήψεων, κτλ.).
- Η συνήθης «μεταφορά» της απορροής με απλές εμπειρικές σχέσεις (π.χ. λόγος εμβαδών υπολεκανών) έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επισφαλής, λόγω της έντονης ετερογένειας των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης και, συνακόλουθα, των υδρολογικών διεργασιών.
- Η Υδρογείος αναπαριστά τη διαίτα της απορροής στη ζητούμενη χωρική κλίμακα (ορίζοντας κόμβους ελέγχου κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου), ενώ η χωρική μεταβλητότητα των υδρολογικών μηχανισμών αποτυπώνεται μέσω παραμέτρων που αντιστοιχούν στις ΜΥΑ.

**Εφαρμογή:** Υδροσύστημα Σμοκόβου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2008)





## Πρόβλημα 2: Συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων νερών

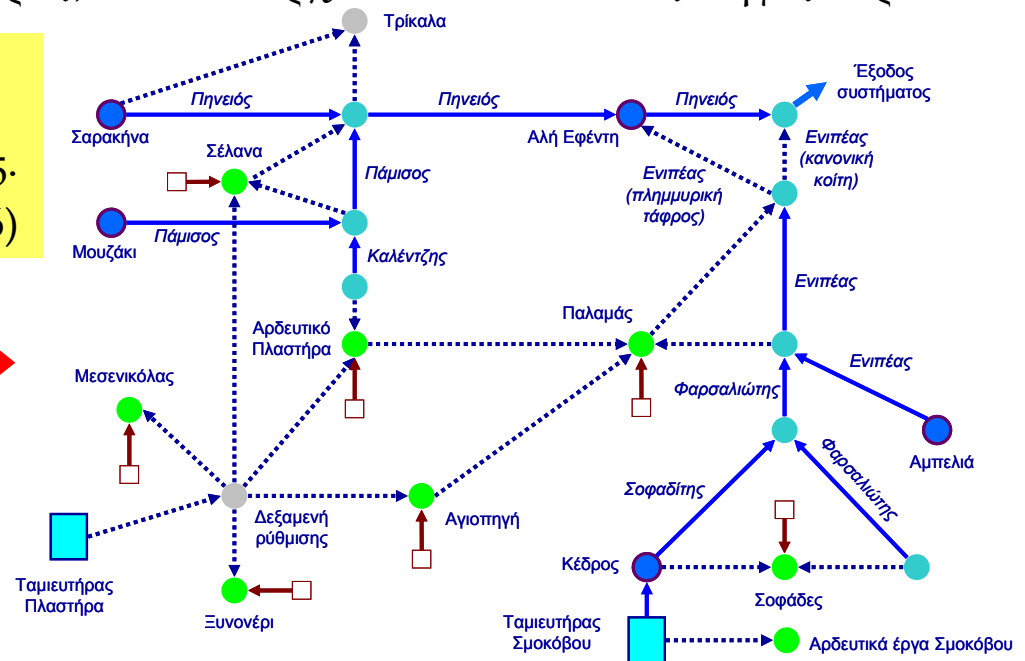
- Η συνδυασμένη αναπαράσταση των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων είναι αναγκαία όταν υπάρχουν:
  - σημαντική συνεισφορά της υπόγειας (βασικής) απορροής (πηγές) στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης (π.χ. καρστικά συστήματα)
  - σημαντικές απώλειες νερού από υπόγειες διαφυγές, λόγω υδραυλικής επικοινωνίας με γειτονικές λεκάνες ή τη θάλασσα
  - συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων
- Η Υδρογείος αναπαριστά:
  - την κατείδυση μέσω της ακόρεστης ζώνης
  - τις διηθήσεις νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου
  - τις αντλήσεις από τις γεωτρήσεις
  - την επιφανειακή (πηγές) και υπόγεια (διαφυγές) εκφόρτιση

**Εφαρμογή:** Υδροσύστημα Β. Κηφισού (Ευστρατιάδης, 2008· Efstratiadis *et al.*, 2008· Κοψιάυτη, 2009· Ρόζος, 2010)



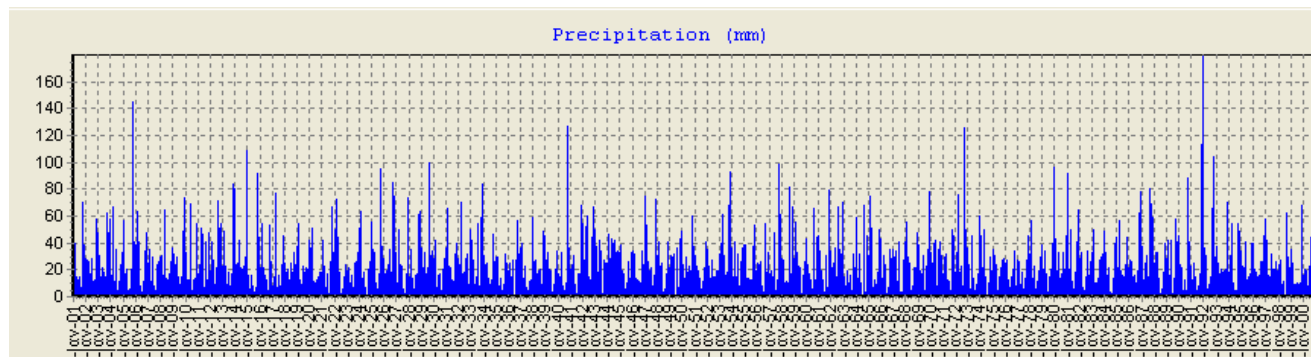
# Πρόβλημα 3: Διαχείριση υδατικών πόρων σε τροποποιημένες λεκάνες

- Η Υδρόγειος λειτουργεί και ως **διαχειριστικό εργαλείο**, αναπαριστώντας:
  - τα κύρια υδραυλικά έργα μιας λεκάνης (υδραγωγεία, εκτροπές επιφανειακών νερών, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και τα χαρακτηριστικά τους (μέγεθος)
  - τις χρήσεις νερού (ύδρευση, άρδευση) και τους διαχειριστικούς περιορισμούς (μέγιστη ή ελάχιστη παροχή, μέγιστη ή ελάχιστη άντληση) του συστήματος
  - την ιεραρχία των χρήσεων, όταν υπάρχει έλλειμμα προσφοράς νερού
  - τα κόστη απολήψεων και μεταφοράς, όταν υπάρχουν εναλλακτικές πηγές νερού



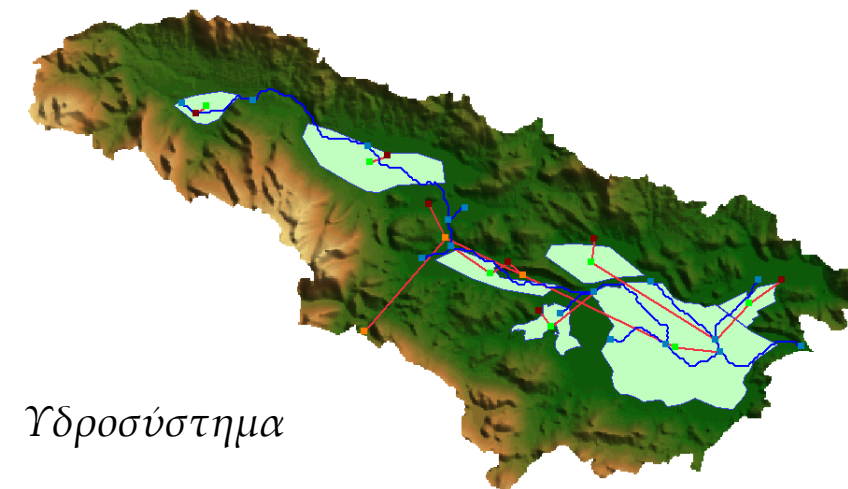
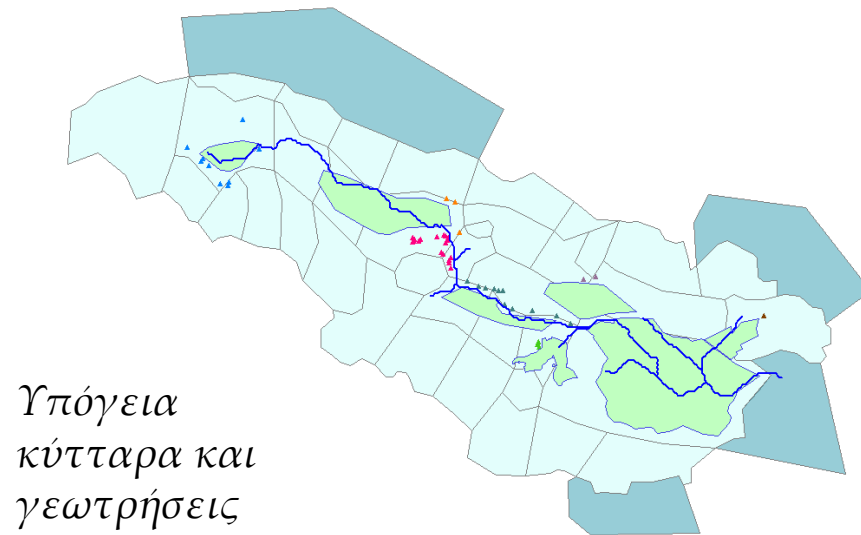
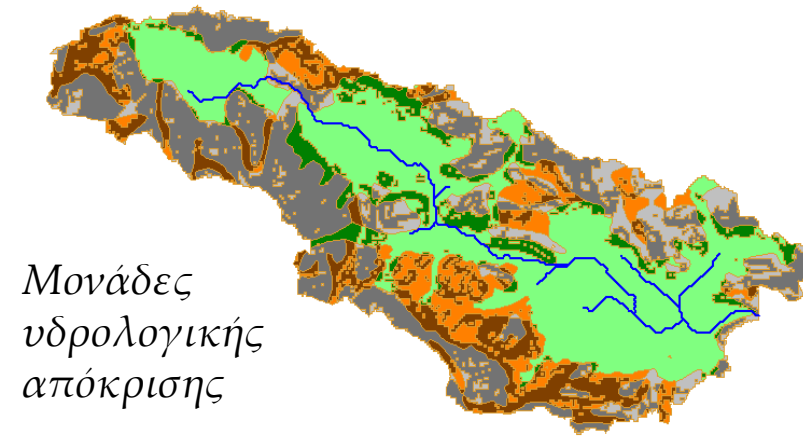
# Πρόβλημα 4: Προσομοίωση πλημμυρών σε λεκάνες μεγάλης κλίμακας

- Η Υδρογείος, στην ημερήσια εκδοχή της, προσφέρεται για την εκτίμηση της **πλημμυρικής επικινδυνότητας** μεγάλων ελληνικών λεκανών, καθώς:
  - δέχεται συνθετικά δεδομένα εισόδου (βροχοπτώσεις), τα οποία είναι αναγκαία για την εκτίμηση ακραίων πιθανοτικών μεγεθών
  - επιτρέπει την περιγραφή της χωρικής μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων, λόγω της σχηματοποίησης σε υπολεκάνες
  - αναπαριστά την πλήρη διαίτα όλων των μεταβλητών που σχετίζονται με την παραγωγή της πλημμυρικής απορροής (βροχόπτωση, εδαφική υγρασία, αλληλεπιδράσεις με υπόγεια νερά, κτλ.)
  - είναι εξαιρετικά φειδωλή σε δεδομένα εισόδου, καθώς χρησιμοποιεί μόνο ημερήσια ύψη βροχής και ένα περιορισμένο αριθμό παραμέτρων του υδρογραφικού δικτύου (μία έως δύο ανά κλάδο υδατορεύματος)



**Εφαρμογή:** Λεκάνη Β. Κηφισού (Efstratiadis *et al.*, 2009· Παπαλεξίου και Ευστρατιάδης, 2009· Efstratiadis and Papalexίου, 2010)

# Λεκάνη Β. Κηφισού – Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση



# Εκτίμηση παραμέτρων (βαθμονόμηση)

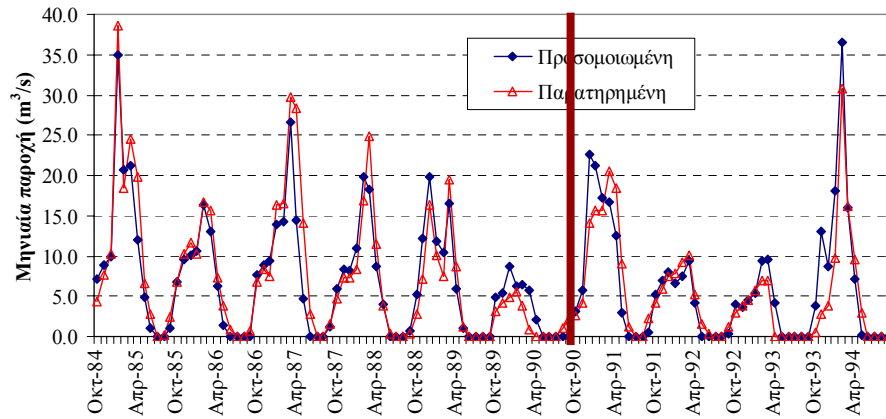
---

- Περίοδος ελέγχου (μηνιαία προσομοίωση)
  - Οκτ. 1984 - Σεπ. 1990 (βαθμονόμηση), Οκτ. 1990 - Σεπ. 1994 (επαλήθευση)
- Μεταβλητές ελέγχου
  - 60 παράμετροι προς βελτιστοποίηση, για την ερμηνεία των οποίων απαιτείται εύλογο πλήθος κριτηρίων
- Κριτήρια προσαρμογής (σταθμισμένα)
  - Αποτελεσματικότητα (efficiency) και μεροληψία μέσης τιμής μηνιαίων υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης και κατάντη των έξι πηγών.
  - Εμπειρικό μέτρο ελέγχου αναπαραγωγής περιόδων στείρευσης της παροχής.
  - Εμπειρικό μέτρο ελέγχου υπερετήσιας διακύμανσης της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού (έλεγχος τάσης, βασισμένος στη δοκιμή Mann-Kendall).
- Διαδικασία βαθμονόμησης
  - Ημιαυτόματη στρατηγική τριών σταδίων: (α) Γενική εικόνα εφικτού χώρου, εκτίμηση βέλτιστων τιμών ανά κριτήριο. (β) Αδρομερής βελτιστοποίηση συνόλου κριτηρίων. (γ) Βήμα-προς-βήμα βελτίωση επιμέρους πτυχών βέλτιστης λύσης.
  - Βελτιστοποίηση ομάδων παραμέτρων, με εξελικτική μέθοδο ανόπτησης-απλόκου.
  - Αναπροσαρμογή συντελεστών βάρους και ορίων εφικτού χώρου, ώστε να «κατευθυνθεί» η διαδικασία προς ένα αποδεκτό συμβιβασμό των κριτηρίων.
  - Έλεγχος προσαρμογής στην επαλήθευση, εμπειρική αξιολόγηση αληθοφάνειας παραμέτρων και μη μετρούμενων αποκρίσεων (εξατμοδιαπνοή, διαφυγές).

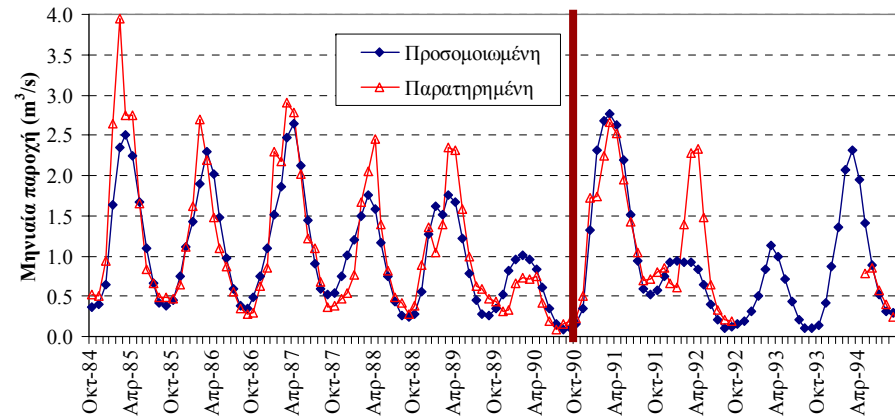
## Σύνοψη αποτελεσμάτων

Μηνιαία απορροή	Περίοδος βαθμονόμησης		Περίοδος επαλήθευσης	
	Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής	Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής
Έξοδος λεκάνης	0.870	-0.054	0.756	0.107
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.806	-0.068	0.607	-0.108
Πηγές Μαυρονερίου	0.693	-0.106	0.601	-0.315
Πηγές Αγίας Παρασκευής	0.724	-0.063	-	-
Πηγές Έρκυνα	0.431	0.039	0.458	0.068
Πηγές Μέλανα	0.265	-0.008	0.095	-0.112
Πηγές Πολυγύρας	0.372	0.006	-	-

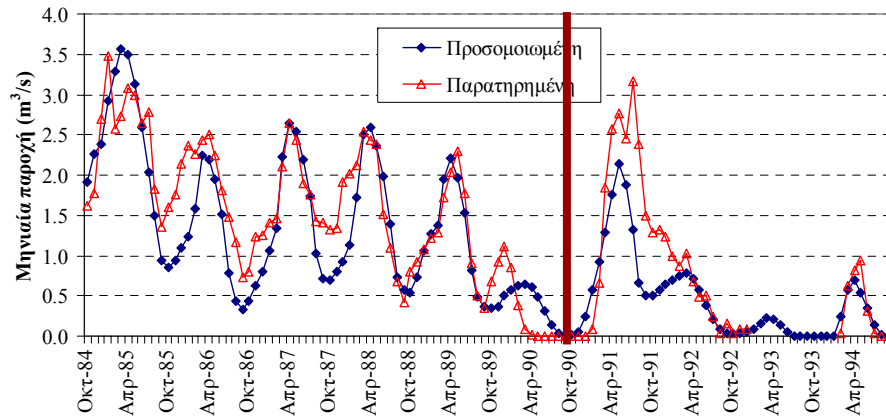
# Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα



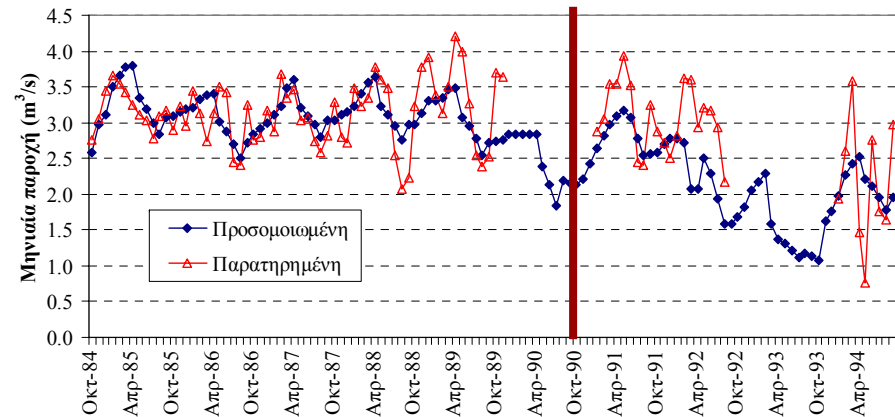
Έξοδος Λεκάνης  
( $e_{cal} = 87.0\%$ ,  $e_{val} = 75.6\%$ )



Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου  
( $e_{cal} = 80.6\%$ ,  $e_{val} = 60.7\%$ )



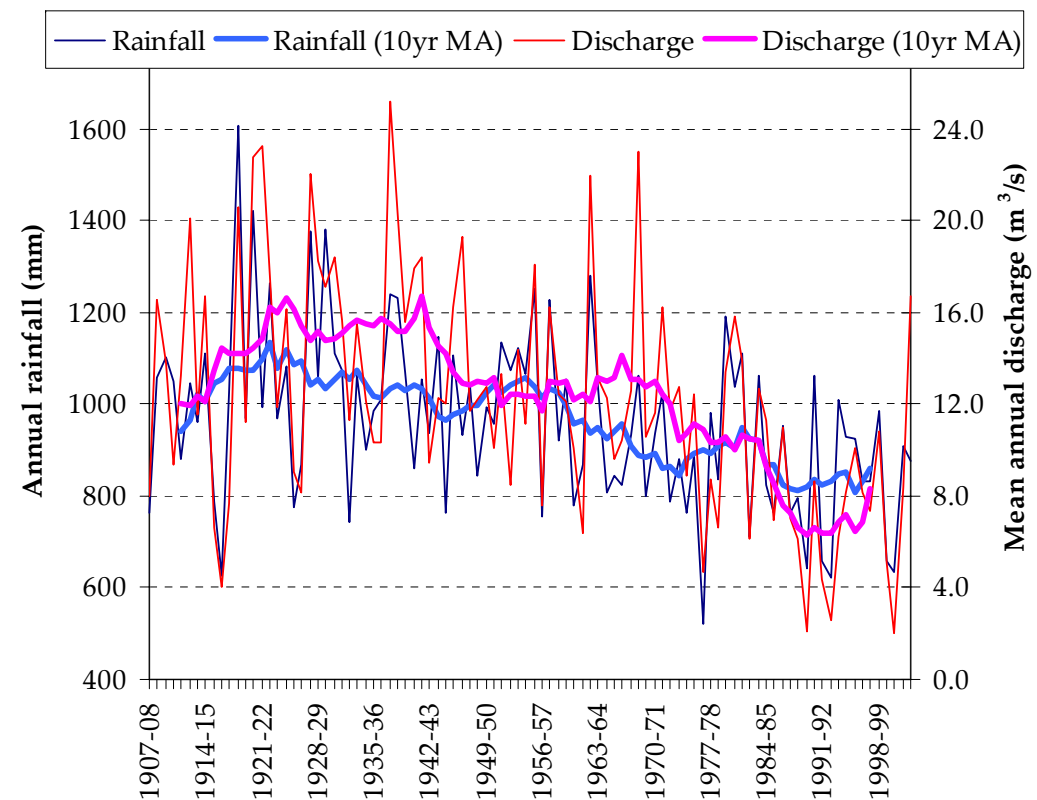
Πηγές Μαυρονερίου  
( $e_{cal} = 69.3\%$ ,  $e_{val} = 60.1\%$ )



Πηγές Μέλανα  
( $e_{cal} = 26.5\%$ ,  $e_{val} = 9.5\%$ )

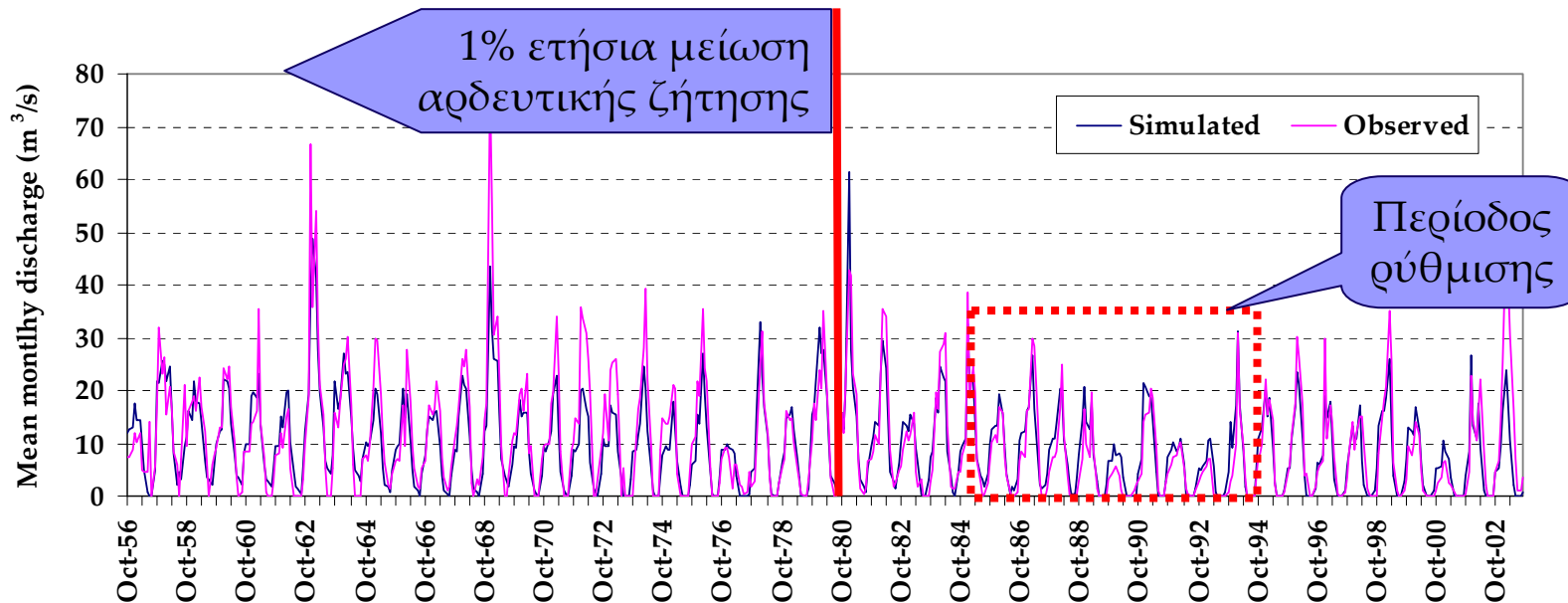
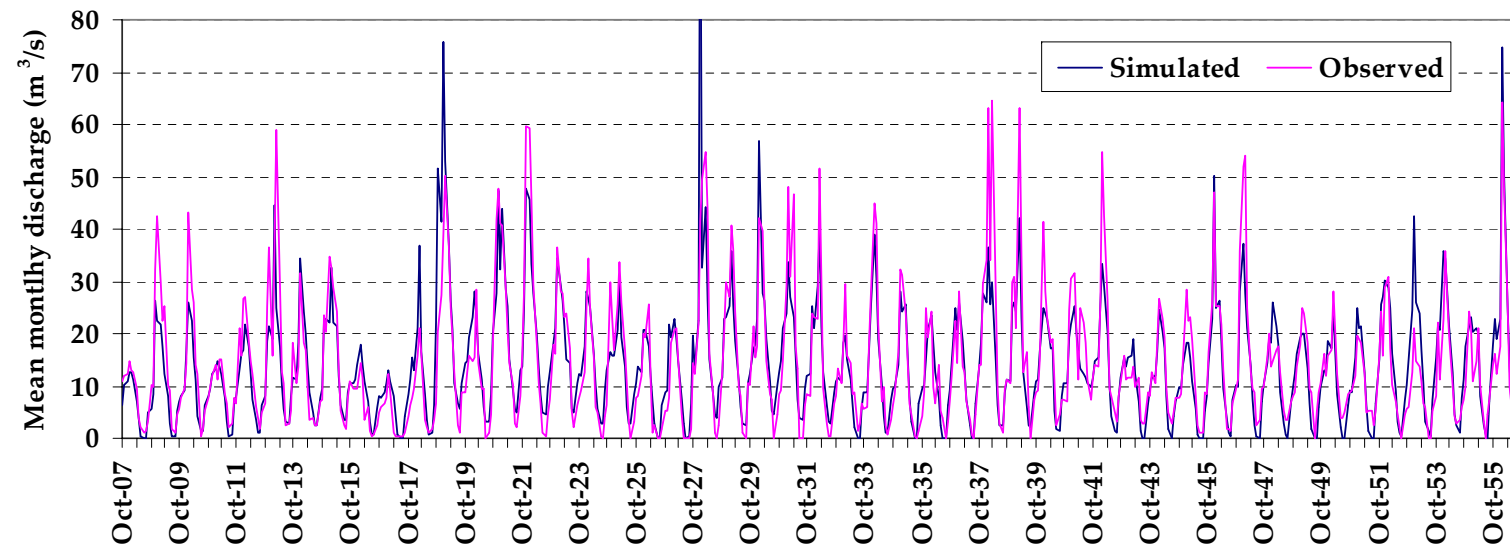
# Ερώτημα 1: Μπορούμε να αναπαράξουμε τη μεταβλητότητα της απορροής του 20<sup>ου</sup> αιώνα?

- Η παρατηρημένη απορροή στην έξοδο της λεκάνης (1907-2003) παρουσιάζει εντυπωσιακή μεταβλητότητα, η οποία δεν εξηγείται πλήρως από την μεταβλητότητα της βροχής (οφειλόμενη στο φαινόμενο Hurst-Kolmogorov).
- Προφανώς, η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης επηρεάζεται τόσο από τις φυσικές διεργασίες όσο και από τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις (απολήψεις).
- Ελλείψει στοιχείων, θεωρήθηκαν σταθερές αρδευτικές ανάγκες από τη δεκαετία του 1980 και πέρα, και μείωσή τους κατά 1% ετησίως, ώστε να αποτυπωθεί χονδρικά η ανάπτυξη της περιοχής κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.





# Προσομοίωση ιστορικής απορροής



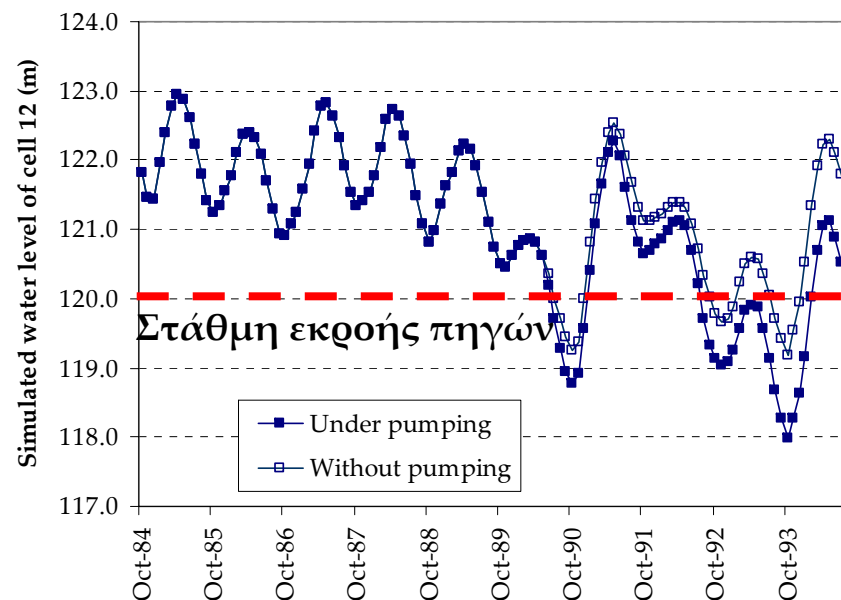
## Ερώτημα 2: Ποιες είναι οι επιπτώσεις από τη λειτουργία των γεωτρήσεων μέσου ρου;

- Οι γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου διανοιχθήκαν στο 1990, στα πλαίσια του επείγοντος, ώστε να προμηθεύσουν με υδρευτικό νερό την Αθήνα εν μέσω μιας περιόδου έντονης ξηρασίας, που διήρκησε από το 1989 ως το 1994, εξαντλώντας σχεδόν τα επιφανειακά αποθέματα νερού.
- Ο συνδυασμός μειωμένων βροχοπτώσεων και εντατικών αντλήσεων είχε ως συνέπεια τη στείρευση των πηγών Μαυρονερίου (οι δεύτερες σε παροχή καρστικές πηγές της λεκάνης), προκαλώντας έτσι σοβαρά κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα.

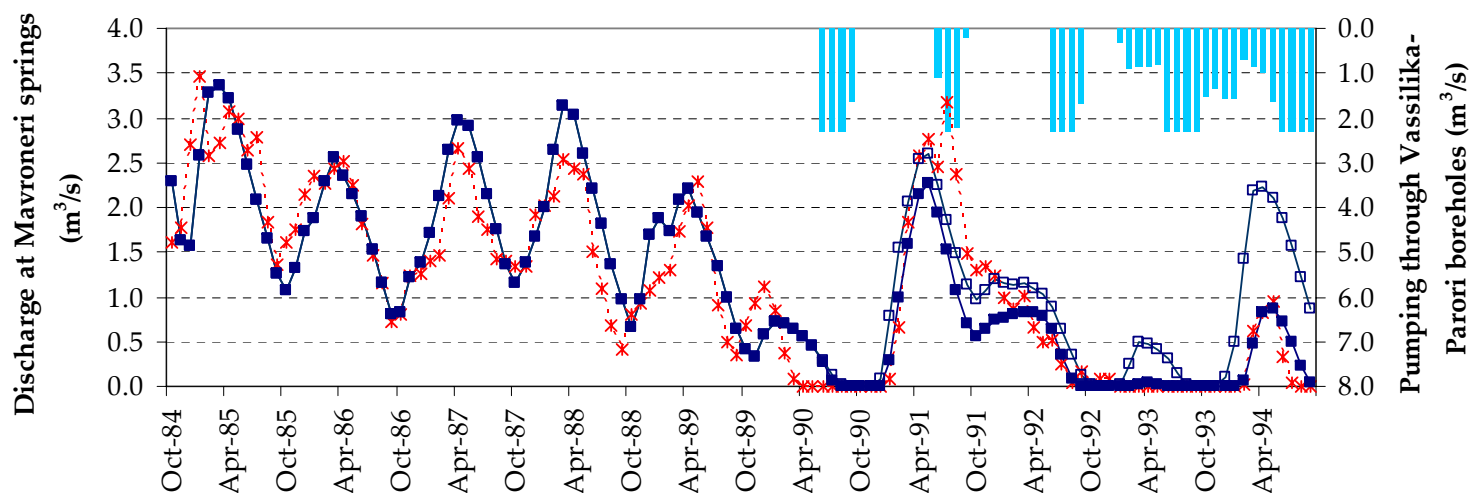


# Ερμηνεία της στείρευσης των πηγών

- Εξετάζονται δύο σενάρια αντλήσεων από τις γεωτρήσεις μέσου ρου, θεωρώντας τις πραγματικές υδρευτικές απολήψεις και υποθέτοντας μηδενικές αντλήσεις.
- Το μοντέλο καταδεικνύει ότι η πρώτη (1990) διακοπή της ροής των πηγών Μαυρονερίου θα ήταν αναπόφευκτη, ενώ η δεύτερη (1992-1994) θα μπορούσε να έχει περιοριστεί, με μια πιο βιώσιμη πολιτική αντλήσεων.

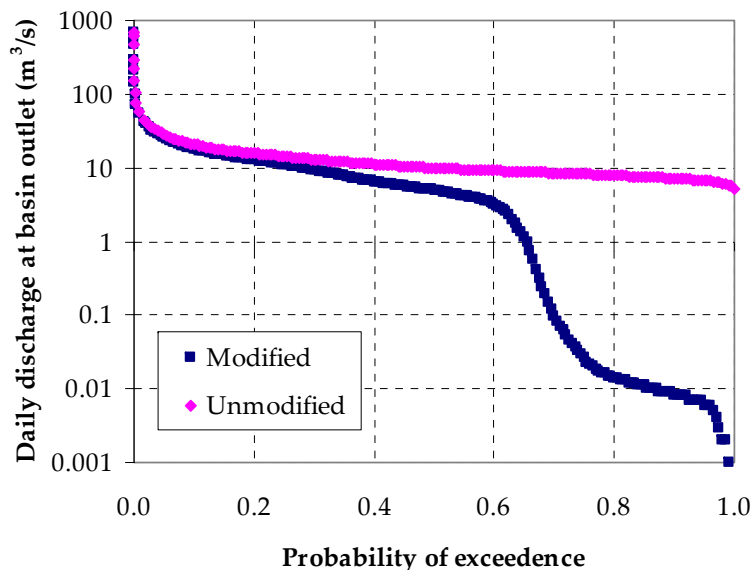


---\*--- Obs. discharge (under pumping)    —■— Sim. discharge (under pumping)    —□— Sim. discharge (no pumping)

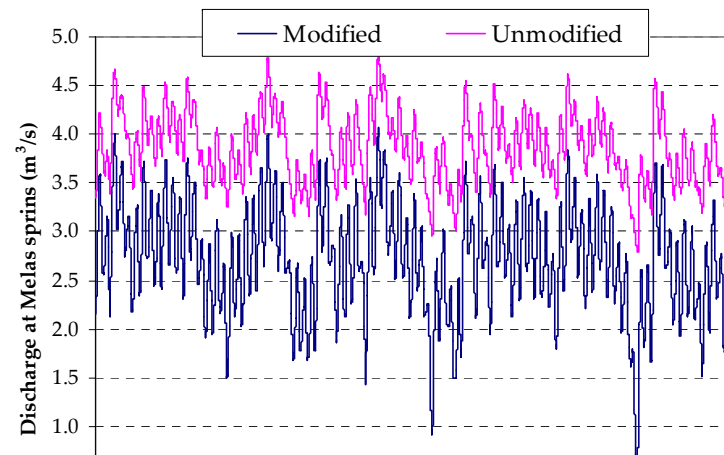
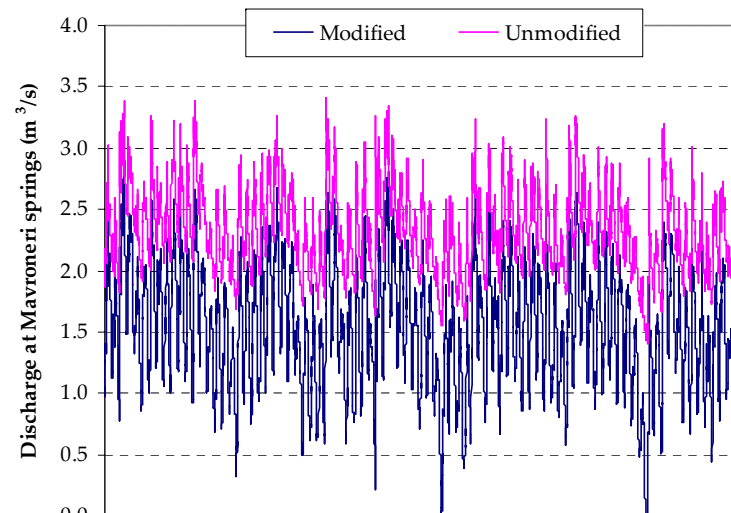


# Ερώτημα 3: Πώς θα συμπεριφερόταν η λεκάνη σε «αδιατάρακτες» συνθήκες;

- Ημερήσια στοχαστική προσομοίωση με συνθετικές βροχοπτώσεις 1000 ετών.
- Υπόθεση υφιστάμενων και μηδενικών αρδευτικών αναγκών.
- Προκύπτει σημαντική αλλαγή στα στατιστικά χαρακτηριστικά της απορροής, 10-40% μείωση του πραγματικού δυναμικού των πηγών λόγω των αντλήσεων.



Καμπύλες διάρκειας για την ημερήσια παροχή εξόδου



Ημερήσια υδρογραφήματα πηγών Μαυρονερίου και Μέλανα

# Τελικές επισημάνσεις

---

## □ Πλεονεκτήματα:

- ολοκληρωμένη προσέγγιση (με σύζευξη πολλαπλών μοντέλων)
- ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση
- φειδωλή παραμετροποίηση (εξαρτώμενη από τη διαθέσιμη πληροφορία)
- φυσική συνέπεια παραμέτρων
- αξιοποίηση όλης της διαθέσιμης πληροφορίας (γεωγραφικής και υδρολογικής, με χρήση ακόμη και σποραδικών μετρήσεων)
- αυτοματοποίηση βαθμονόμησης

## □ Πεδία εφαρμογής:

- κατανόηση υδρολογικών μηχανισμών, συναρτήσει των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης
- εκτίμηση υδατικού δυναμικού σε πολλαπλές θέσεις ενδιαφέροντος, με βάση μετρήσεις σε άλλες θέσεις της λεκάνης
- συνδυασμένη αξιοποίηση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- διαχείριση υδατικών πόρων σε διαταραγμένες λεκάνες
- εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας σε λεκάνες μεγάλης κλίμακας
- στοχαστική πρόγνωση, για διάφορα διαχειριστικά σενάρια

## Αναφορές και δημοσιεύσεις (1)

- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Τεύχος 4a, ΤΥΠΥΘΕ-ΕΜΠ, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών έργων, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 3, ΕΜΠ-ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, Ιούλιος 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Τέγος, Γ. Καραβοκυρός, Ι. Κυριαζοπούλου, και Ι. Βαζίμας, Σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων περιοχής Καρδίτσας, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Τεύχος 16, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, *Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης - Θεωρητική τεκμηρίωση*, ΤΥΠΠΕΡ-ΕΜΠ, 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ε. Ρόζος, Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, ΤΥΠΥΘΕ-ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- Κοψιαύτη, Μ., *Διερεύνηση στρατηγικών παραμετροποίησης υδρογεωλογικού υπομοντέλου του λογισμικού Υδρόγειος - Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ε. Ρόζος, Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 10, 72 σελίδες, ΤΥΠΥΘΕ-ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.
- Παπαλεξίου, Σ.Μ., και Α. Ευστρατιάδης, Τελική έκθεση, Εκτίμηση και πρόγνωση του πλημμυρικού κινδύνου με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων και πιθανοτικών μεθόδων, ΤΥΠΠΕΡ- ΕΜΠ, 2009.
- Ρόζος, Ε., *Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας*, Διδακτορική διατριβή, ΤΥΠΠΕΡ-ΕΜΠ, 2010.

## Αναφορές και δημοσιεύσεις (2)

- Τέγος, Α., *Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2005.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 58–78, 2010.
- Efstratiadis, A., and S.M. Papalexiou, The quest for consistent representation of rainfall and realistic simulation of process interactions in flood risk assessment, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12*, Vienna, 11101, European Geosciences Union, 2010.
- Efstratiadis, A., A. Mazi, A. D. Koussis, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 4157, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, 2008.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall-runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, Perugia, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007.
- Nalbantis, I., E. Rozos, G. M. T. Tentes, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Integrating groundwater models within a decision support system, *Proc. 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"*, 279-286, European Water Resources Association, Athens, 2002.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842, 2004.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325 (1-4), 340–355, 2006.

Η παρουσίαση είναι διαθέσιμη στη διεύθυνση:  
<http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/974/>

Το λογισμικό είναι διαθέσιμο στη διεύθυνση:  
<http://www.hydroscope.gr/software/hydrogeios.html>

Επικοινωνία:  
[andreas@itia.ntua.gr](mailto:andreas@itia.ntua.gr)