

Κύκλος παρουσιάσεων ερευνητικών δραστηριοτήτων ΤΥΠΥΘΕ

Αθήνα, 22 Μαρτίου 2006

Στρατηγικές και αλγόριθμοι
πολυκριτηριακής βαθμονόμησης
σύνθετων υδρολογικών μοντέλων

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Υποψήφιος Δρ.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων

Λίγα λόγια για την διατριβή

- ❑ Τίτλος: Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων
- ❑ Ημερομηνία ανάθεσης: 15/10/2002
- ❑ Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:
 - Δ. Κουτσογιάννης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)
 - Μ. Μιμίκου, Καθηγήτρια ΕΜΠ
 - Ν. Μαμάσης, Λέκτορας ΕΜΠ
- ❑ Το αντικείμενο της διατριβής έχει ενταχθεί σε ερευνητικό πρόγραμμα του έργου «Ηράκλειτος: Υποτροφίες Έρευνας με προτεραιότητα στη Βασική Έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου»
- ❑ Κύριοι ερευνητικοί στόχοι:
 - ανάπτυξη αλγορίθμων μη γραμμικής βελτιστοποίησης, για βαθμωτά και διανυσματικά (πολυκριτηριακά) προβλήματα
 - ανάπτυξη στρατηγικών εκτίμησης παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων, με χρήση πολλαπλών κριτηρίων καλής προσαρμογής.

Διάρθρωση παρουσίασης

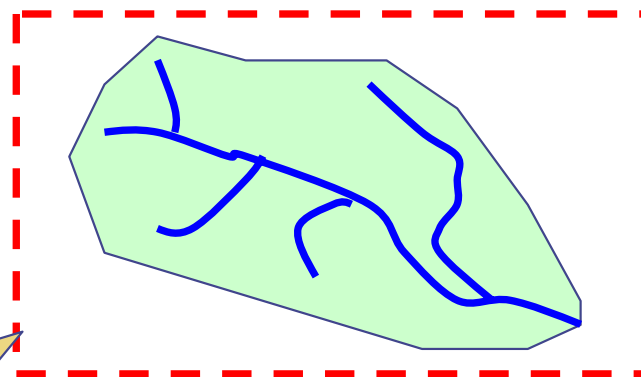
- ❑ **Περί υδρολογικών μοντέλων**
- ❑ **Χαρακτηριστικά του προβλήματος βαθμονόμησης**
- ❑ **Εργαλεία βελτιστοποίησης**
- ❑ **Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού**
- ❑ **Συζήτηση**

Τα υδρολογικά μοντέλα ως εργαλεία μηχανικού

- Η βιβλιογραφία αναφέρει πάνω από 70 καταξιωμένα υδρολογικά μοντέλα (*)
- Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται:
 - από τον σκοπό της μελέτης
 - από τα διαθέσιμα δεδομένα (= περιοριστικός παράγοντας).
- Κάθε μοντέλο οφείλει να εξασφαλίζει:
 - προγνωστική ικανότητα, δηλαδή δυνατότητα αναπαραγωγής όλου του φάσματος των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης
 - συνέπεια ως προς τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

«Φορτίσεις», \mathbf{x} :
βροχή, δυνητική
εξατμοδιαπνοή,
απολήψεις κλπ.

Μαθηματική
αναπαράσταση:
 $\mathbf{y} = H(\mathbf{x}, \theta)$

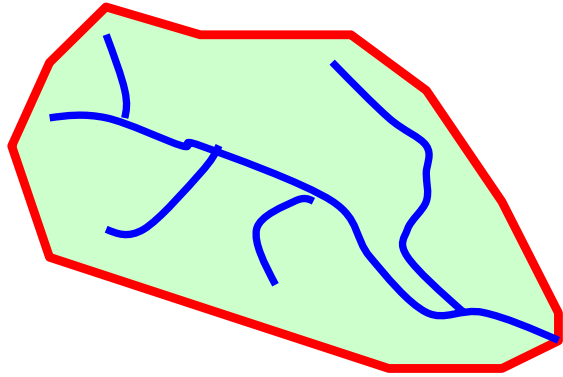


Γνωστές ιδιότητες
ή παράμετροι

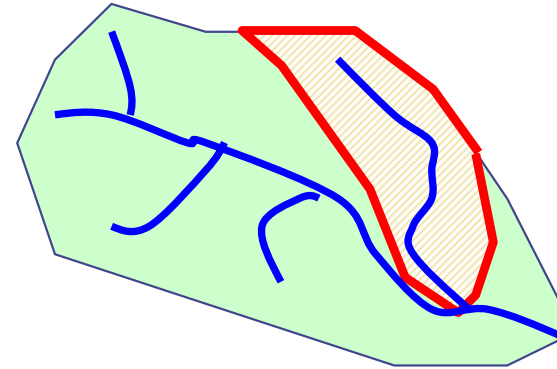
«Αποκρίσεις», \mathbf{y} :
απορροή, πραγματική
εξατμοδιαπνοή,
εκφόρτιση υπόγειων
νερών κλπ.

(*) Singh, V. G., and D. A. Woolhiser, Mathematical modeling of watershed hydrology, *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, 7(4), 2002.

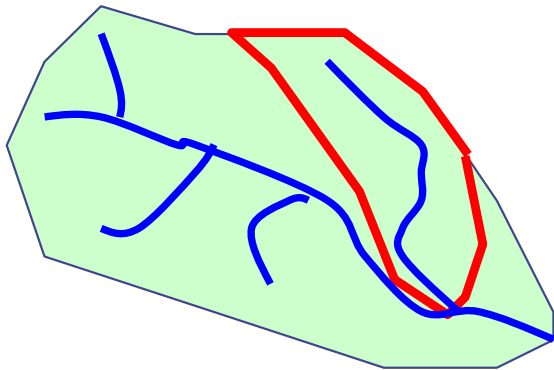
Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων: (α) Με βάση την χωρική κλίμακα



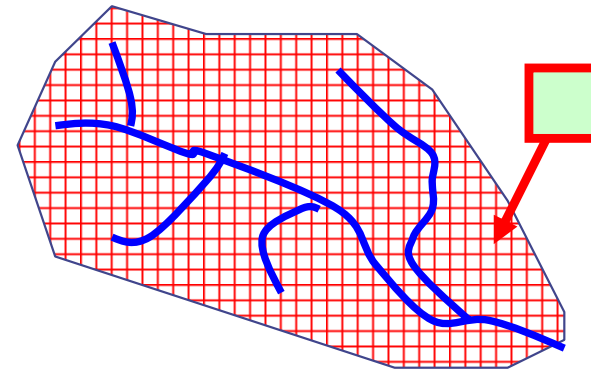
Αδιαμέριστα (lumped)



Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed)



Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped)



Κατανεμημένα (distributed)

Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων:

(β) Με βάση την μαθηματική δομή

	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
Μοντέλα φυσικής βάσης	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή (απειροστή;) χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά μοντέλα	Παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης
Στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα	Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
Μοντέλα «μαύρου κουτιού»	Διαδοχικοί μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος	Απολύτως καμία

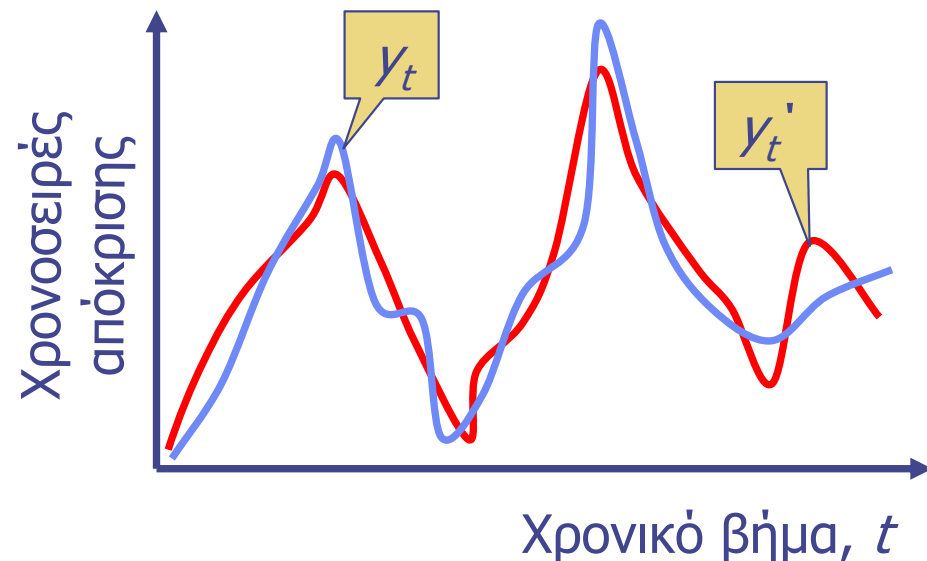
Υδρολογικά μοντέλα: Σύγχρονες τάσεις

- ❑ Λεπτομερής χωρική και χρονική κλίμακα προσομοίωσης
- ❑ Φυσική προσέγγιση (εφαρμογή σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις;)
- ❑ Αξιοποίηση κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας
- ❑ Συνδυασμένη αναπαράσταση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών
- ❑ Σύζευξη με κλιματικά, διαχειριστικά και υδροδυναμικά μοντέλα
- ❑ Προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού
- ❑ Παραγωγή πολλαπλών αποκρίσεων, σε πολλαπλές θέσεις
- ❑ Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο (πρόγνωση)

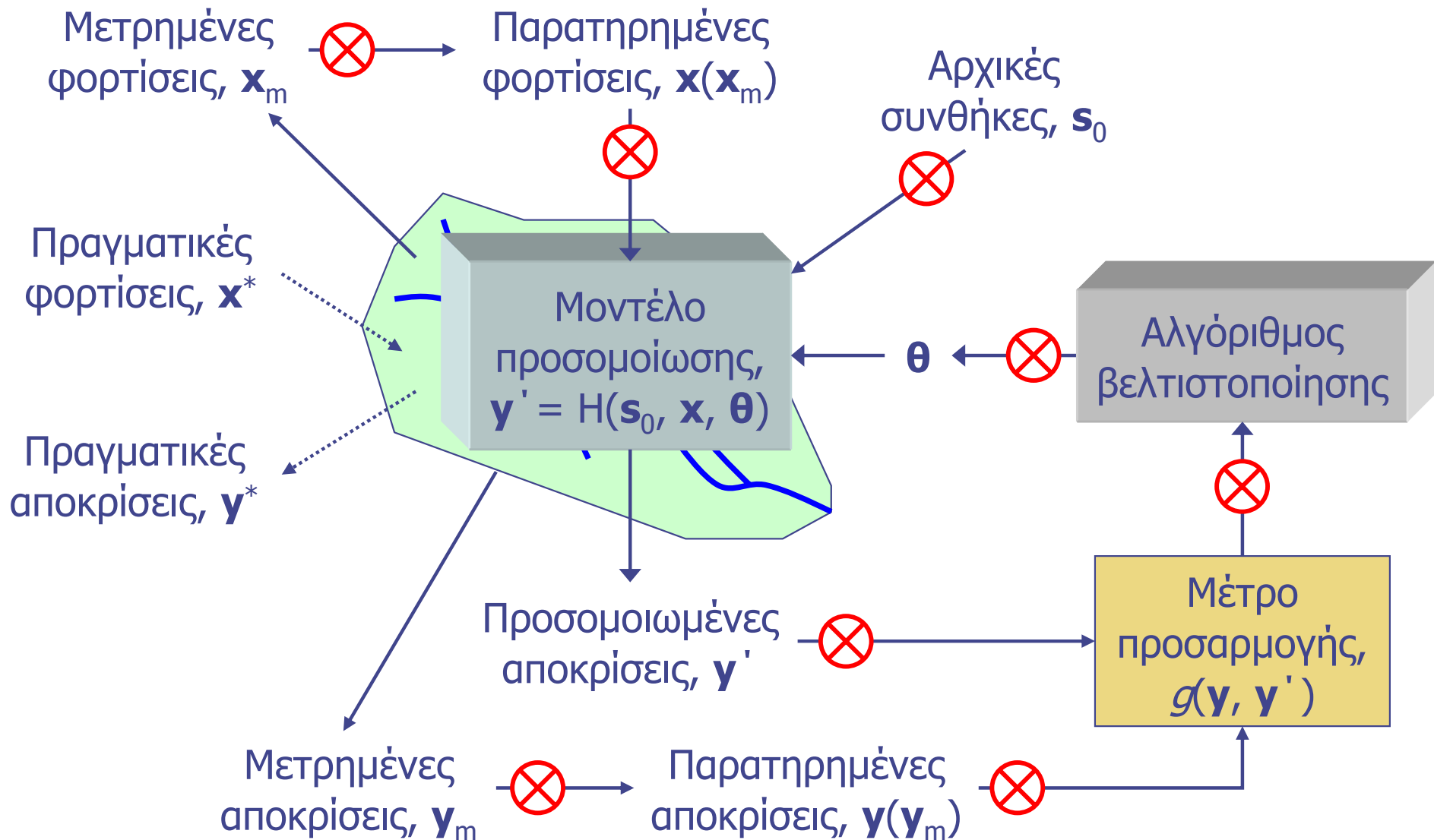


Εκτίμηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων: Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης

1. Επιλέγονται οι **παραμέτροι** (= μεταβλητές ελέγχου) του μοντέλου, θ .
2. Επιλέγεται ένα **δείγμα παρατηρήσεων** ως προς τις αποκρίσεις \mathbf{y} , που πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης.
3. Διαμορφώνεται ένα βαθμωτό **μέτρο προσαρμογής** g μεταξύ των προσομοιωμένων (\mathbf{y}') και των παρατηρημένων (\mathbf{y}) χρονοσειρών απόκρισης.
4. Ορίζεται το **πεδίο αναζήτησης** Θ των παραμέτρων, που κατά κανόνα δίνεται με τη μορφή άνω και κάτω ορίων.
5. Διατυπώνεται το πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης:
$$\min g(\theta), \theta \in \Theta$$
6. Με εφαρμογή του κατάλληλου **αλγορίθμου βελτιστοποίησης**, εντοπίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, $\theta^* \in \Theta$.



Εκτίμηση παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων: Ένα μαθηματικό παιχνίδι;



Ανάλυση αβεβαιοτήτων:

(α) Δομικά σφάλματα μοντέλου

□ **Υπο-παραμετροποίηση:**

- Υπερβολικά αδρή αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών, έως και απόκρυψη σημαντικών πτυχών του υδρολογικού κύκλου.
- Χρήση χαμηλότερης χρονικής κλίμακας σε σχέση με αυτήν που υποστηρίζει το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου.

□ **Υπερ-παραμετροποίηση:**

- Χρήση περισσότερων παραμέτρων από όσες μπορούν να υποστηρίξουν η πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών, σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα

Αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης (principle of parsimony): Ένα μαθηματικό μοντέλο που βαθμονομείται με στατιστικές μεθόδους προσαρμογής οφείλει να έχει την απλούστερη δυνατή παραμετροποίηση.

Εμπειρικός υδρολογικός κανόνας: Κάθε μεμονωμένο μέτρο προσαρμογής είναι επαρκές για την βαθμονόμηση 4 έως 6 παραμέτρων του μοντέλου.

Ανάλυση αβεβαιοτήτων:

(β) Σφάλματα δεδομένων εισόδου

- Τα υδρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως **στοιχεία εισόδου** ή **ελέγχου** του μοντέλου διέπονται από πλήθος αβεβαιοτήτων λόγω:
 - συστηματικών και τυχαίων σφάλματα μετρήσεων·
 - σφαλμάτων χρονικής μεταβλητότητας (υδρολογικές μεταβλητές σε συνεχή χρόνο, που εκτιμώνται από μετρήσεις σε διακριτό χρόνο)·
 - σφαλμάτων χωρικής μεταβλητότητας (ετερογενείς επιφανειακές διεργασίες, που περιγράφονται από σημειακές μετρήσεις)·
 - σφαλμάτων αναγωγής της δευτερογενούς πληροφορίας σε πρωτογενή (π.χ. στάθμη → παροχή, θερμοκρασία → εξατμηση, κλπ.).
- Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι η ευαισθησία των μοντέλων επηρεάζεται σημαντικά από την **χωρική μεταβλητότητα** της βροχόπτωσης.
- Σημαντική συνιστώσα αβεβαιότητας αποτελεί η εκτίμηση της συνεισφοράς της **χιονόπτωσης** στο υδατικό δυναμικό ορεινών λεκανών.
- Η επάρκεια των δεδομένων εξαρτάται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από την **αντιπροσωπευτικότητα** παρά το μήκος της υδρολογικής πληροφορίας.

Ανάλυση αβεβαιοτήτων:

(γ) Ακαταλληλότητα μέτρων προσαρμογής

- ❑ Το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση πρέπει να είναι συμβατό με την **στατιστική δομή των υπολοίπων**, $e_t = y_t - \hat{y}_t$.
- ❑ Το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα**, που συχνά (και αβίαστα) υιοθετείται ως τυπικό στατιστικό μέτρο βαθμονόμησης, υποθέτει ότι τα υπόλοιπα:
 - ακολουθούν κανονική κατανομή, με μηδενική μέση τιμή·
 - είναι ομοσκεδαστικά, δηλαδή διατηρούν σταθερή διασπορά·
 - είναι ασυσχέτιστα στον χώρο και τον χρόνο.
- ❑ Κατά κανόνα, καμία από τις παραπάνω υποθέσεις δεν ικανοποιείται, ενώ η υπόθεση της **ομοσκεδαστικότητας** παραβιάζεται εξ ορισμού, λόγω της διαδικασίας κατασκευής των σχέσεων στάθμης-παροχής.
- ❑ Αν ζητείται η προσαρμογή του μοντέλου σε πολλαπλές μετρημένες αποκρίσεις ή/και σε πολλαπλά χαρακτηριστικά κάθε απόκρισης, τότε συνηθίζεται η διατύπωση ενός «**καθολικού**» **μέτρου επίδοσης**, με συνάθροιση των επιμέρους μέτρων σε μια αυθαίρετη αριθμητική έκφραση, που αποκρύπτει σημαντικές πτυχές του προβλήματος.

Ανάλυση αβεβαιοτήτων:

(δ) Αδυναμίες αλγορίθμων βελτιστοποίησης

- Δημιουργείται ένα εξαιρετικά απαιτητικό πρόβλημα αναζήτησης σε **μη κυρτές επιφάνειες απόκρισης**, με κύρια χαρακτηριστικά:
 - την ύπαρξη πληθώρας τοπικών ακροτάτων, σε διάφορες κλίμακες·
 - τη μη διαφορισιμότητα και την δημιουργία ασυνεχειών, που οφείλονται στην διατύπωση περιορισμών τύπου κατωφλίου στο μοντέλο·
 - το έντονα τραχύ ανάγλυφο, με κυριαρχία μακρόστενων κοιλάδων και αυχένων, που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των παραμέτρων και την χαμηλή ευαισθησία του μοντέλου ως προς κάποιες παραμέτρους.
- Η δυσχέρεια του προβλήματος αυξάνει «εκθετικά» με τον αριθμό των παραμέτρων (φαινόμενο γνωστό ως «**κατάρρα της διαστατικότητας**»).
- Ο **υπολογιστικός φόρτος** του μοντέλου επιβάλλει την πραγματοποίηση πολύ μικρού αριθμού δοκιμών σε σχέση με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Πρακτικό ζητούμενο: Ο εντοπισμός μιας «εύλογα» καλής λύσης ως προς το κριτήριο προσαρμογής (όχι της ολικά βέλτιστης), με «εύλογο» αριθμό δοκιμών.

Η θεμελιώδης έννοια της ισοδυναμίας

- Διατυπώνοντας ένα πρόβλημα βαθμονόμησης με:
 - διαφορετική σχηματοποίηση/παραμετροποίηση του μοντέλου
 - διαφορετικά δεδομένα ελέγχου
 - διαφορετικά μέτρα προσαρμογής (ή διαφορετικούς συνδυασμούς τους)προκύπτουν «βέλτιστες» λύσεις που ενδεχομένως διαφέρουν σημαντικά, χαρακτηριστικό γνωστό ως **αρχή της ισοδυναμίας** (equifinality).
- Η διεθνής εμπειρία αποδέχεται (πλέον) ότι δεν υπάρχει μια «ολικά βέλτιστη» δομή μοντέλου ούτε ένας «ολικά βέλτιστος» συνδυασμός παραμέτρων, που να αναπαράγουν αντικειμενικά καλύτερα τις διεργασίες μιας λεκάνης, οπότε:
 - η αβεβαιότητα στη βαθμονόμηση είναι αναπόφευκτη·
 - η βελτιστοποίηση (ως μηχανική διαδικασία) δεν λύνει το πρόβλημα.
- Προκύπτουν έτσι δύο ζητούμενα:
 - η **ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας**·
 - η διατύπωση μιας «**συμβιβαστικής**» **βαθμονόμησης**, για την επιχειρησιακή λειτουργία του μοντέλου.

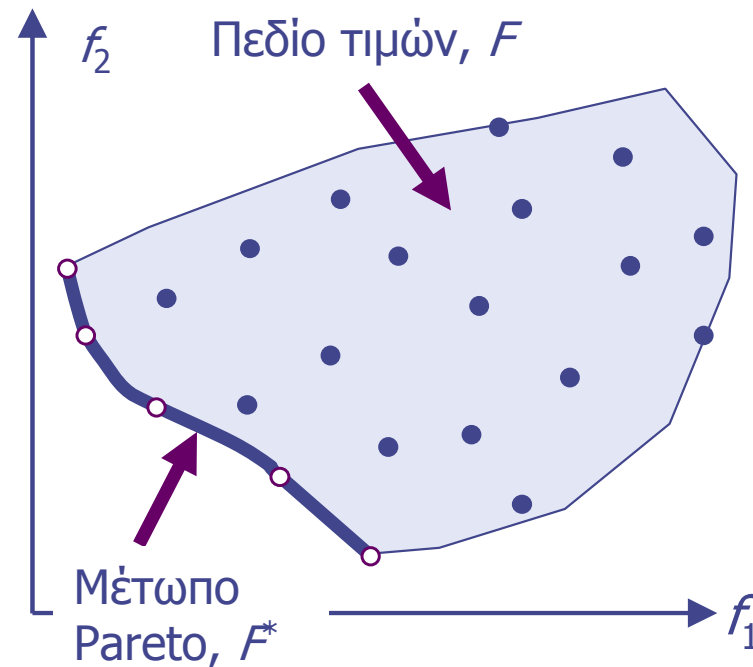
Η ανάγκη μιας πολυκριτηριακής προσέγγισης

Δεδομένο	Ζητούμενο
Η διαμόρφωση όλο και πιο σύνθετων μοντέλων, που επιβάλλει την χρήση μεγάλου αριθμού παραμέτρων	Η διατύπωση ικανού αριθμού μέτρων προσαρμογής , συμβατού με την παραμετροποίηση του μοντέλου
Η περιγραφή πολλαπλών διεργασιών , σε πολλαπλές θέσεις , από τα κατανεμημένα μοντέλα	Η ταυτόχρονη αναπαραγωγή όλων των μετρημένων αποκρίσεων, που εγγυάται την ευρωστία του μοντέλου
Η υποκειμενικότητα της διατύπωσης πολλαπλών μέτρων προσαρμογής, σταθμισμένων σε μια ενιαία έκφραση	Ο διακριτός χειρισμός των επιμέρους μέτρων, που καθίσταται αναγκαίος όταν αυτά είναι αντικρουόμενα
Οι πάσης φύσεως αβεβαιότητες επηρεάζουν κατά τρόπο χαοτικό την διαδικασία βαθμονόμησης	Η ανίχνευση των σφαλμάτων και η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων τους
Οι δυσχέρειες της διαδικασίας βελτιστοποίησης , σε μη κυρτούς χώρους μεγάλων διαστάσεων	Ο εντοπισμός υποσχόμενων περιοχών , με περιορισμό των ορίων αναζήτησης των παραμέτρων

Εργαλεία βελτιστοποίησης

Τι σημαίνει πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση;

- ❑ Προϋποθέτει την διατύπωση μιας διανυσματικής στοχικής συνάρτησης.
- ❑ Αδυναμία σύγκρισης λύσεων, εφόσον τα κριτήρια βελτιστοποίησης είναι αντικρουόμενα ή δεν αποτιμώνται σε κοινή βάση (π.χ. χρηματική αξία).
- ❑ Ένα σημείο είναι βέλτιστο αν δεν υπάρχει άλλο σημείο που να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο, χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο.
- ❑ Προκύπτει ένα σύνολο ισοδύναμων λύσεων, που καλούνται Pareto βέλτιστες ή μη κατώτερες (non-inferior) ή μη κυριαρχούμενες (non-dominated).
- ❑ Η τελική λύση που επιλέγεται βάσει «εξωτερικών» κριτηρίων καλείται πλέον συμβιβαστική (best-compromise).



Φιλοσοφικό υπόβαθρο: Οικονομικές και κοινωνικές θεωρίες περί ευμάρειας

Εργαλεία βελτιστοποίησης

Αναζήτηση μη κατωτέρων λύσεων

□ Παραγωγή μεμονωμένων λύσεων:

- Αναγωγή σε πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης μεμονωμένου κριτηρίου, με την διαμόρφωση μιας ενιαίας αριθμητικής έκφρασης, στην οποία σταθμίζονται τα επιμέρους κριτήρια.
- Τα χαρακτηριστικά της πλέον συμβιβαστικής λύσης προδιαγράφονται με υποκειμενικό τρόπο, π.χ. μέσω συντελεστών βάρους.

□ Παραγωγή πολλαπλών λύσεων:

- Προσαρμογή εξελικτικών αλγορίθμων, για την ταυτόχρονη παραγωγή πολλαπλών σημείων (αφού στόχος είναι η περιγραφή της γεωμετρίας του μετώπου Pareto, και όχι η σύγκλιση σε μεμονωμένο σημείο).
- Εισαγωγή μέτρων αποτίμησης της καταλληλότητας των λύσεων, που βασίζονται στην θεμελιώδη αρχή της κυριαρχίας.
- Τροποποίηση των διαδικασιών αναζήτησης, ώστε να ευνοούν την γέννηση μη κατωτέρων λύσεων και να εξασφαλίζουν την διατήρηση ενός καλά κατανεμημένου πληθυσμού.

Εργαλεία βελτιστοποίησης

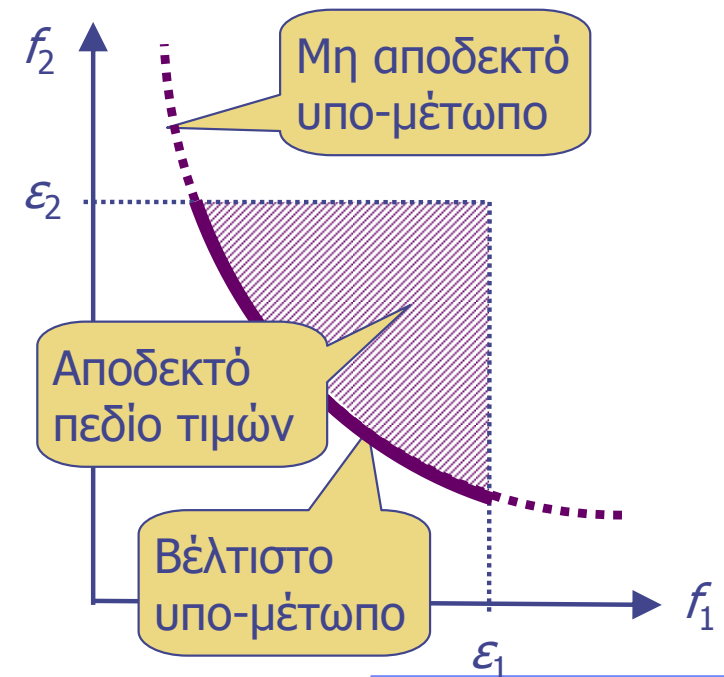
Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου

- Ευρετική μέθοδος ολικής βελτιστοποίησης, που υλοποιεί:
 - μια διαδικασία **εξελικτικής αναζήτησης**, για ταυτόχρονη διερεύνηση του εφικτού χώρου μέσω ενός πληθυσμού σημείων·
 - ένα εύρος κανόνων αναπαραγωγής νέων σημείων, που βασίζονται σε μια γενικευμένη τεχνική **κατερχόμενου απλόκου** (downhill simplex) και σε **μεταλλάξεις** που εγγυώνται αύξηση της διασποράς του πληθυσμού·
 - μια στρατηγική **προσομοιωμένης ανόπτωσης** (simulated annealing), που εμποδίζει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ακρότατα, επιτρέποντας κινήσεις αντίθετα στην πορεία βελτίωσης της τιμής της συνάρτησης·
 - μια διαδικασία **αυτόματης ρύθμισης του βαθμού τυχαιότητας**.
- Η ενσωμάτωση στρατηγικών τοπικής και ολικής αναζήτησης σε ένα ενιαίο αλγοριθμικό σχήμα εξασφαλίζει:
 - ευελιξία κινήσεων, για τον χειρισμό των γεωμετρικών ιδιομορφιών των μη κυρτών επιφανειών απόκρισης·
 - ταχεία διερεύνηση των κυρτών περιοχών των εν λόγω επιφανειών.

Εργαλεία βελτιστοποίησης

Πολυκριτηριακή διατύπωση του αλγορίθμου

- Διαμορφώνεται ένα **σύνθετο μέτρο αποτίμησης**, με συνιστώσες:
 - ένα μέτρο κυριαρχίας, που λαμβάνει υπόψη τη σχετική θέση κάθε σημείου σε σχέση με τον πληθυσμό και ως προς κάθε κριτήριο, που ευνοεί την επιβίωση των μη κατωτέρων λύσεων·
 - ένα μέτρο «εφικτότητας», για την επιλογή συνδυασμών τιμών κριτηρίων που είναι αποδεκτοί, από πρακτική σκοπιά.
- Η **διαδικασία αναζήτησης** βασίζεται στο σχήμα ανόπτησης-απλόκου, στο οποίο:
 - εμποδίζονται κινήσεις «σύγκλισης» (π.χ. συρρίκνωση απλόκου), ώστε να μεγιστοποιείται η διασπορά του πληθυσμού·
 - εμπλουτίζονται οι διαδικασίες μετάλλαξης, που επιδιώκουν την παραγωγή τόσο «κοντινών» όσο και «μακρινών» λύσεων.



Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Χάρτης της περιοχής μελέτης



Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

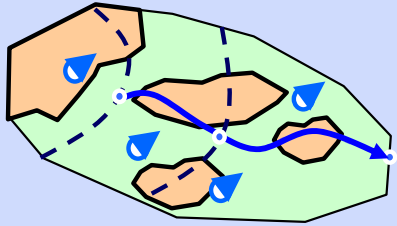
Ιδιαιτερότητες του συστήματος

- ❑ Η γεωλογία της λεκάνης χαρακτηρίζεται από το έντονα καρστικό υπόβαθρο, που δημιουργεί εκτεταμένα μέτωπα διαφυγών προς την Υλίκη και την θάλασσα (**αδύνατη η εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών**).
- ❑ Ο υδροφορέας εκφορτίζεται επιφανειακά μέσω πληθώρας καρστικών πηγών, που χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα πλούσιο υδατικό δυναμικό (**ασυνήθιστα υψηλή συνεισφορά της βασικής ροής**).
- ❑ Λόγω των διηθήσεων κατά μήκος του ποταμού, το καρστ ανατροφοδοτείται από ανάντη πηγαία νερά (**αδύνατη η κατάρτιση υδατικού ισοζυγίου**).
- ❑ Ανταγωνιστικές χρήσεις νερού (άρδευση, ύδρευση Αθήνας μέσω Υλίκης και γεωτρήσεων μέσου ρου), με συνδυασμένες απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά (**άγνωστη κατανομή των απολήψεων**).
- ❑ Οι αντλήσεις επηρεάζουν δραστικά την υδραυλική λειτουργία των πηγών, ενώ η θερινή παροχή του Β. Κηφισού στην έξοδο μηδενίζεται εξαιτίας των ανάντη αρδευτικών εκτροπών (**έντονα διαταραγμένο φυσικό σύστημα**).
- ❑ Οι εισροές της Υλίκης είναι εξαρτώμενες από τις ανάντη επιφανειακές αλλά και υπόγειες απολήψεις (**σύνθετο διαχειριστικό πρόβλημα**).

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

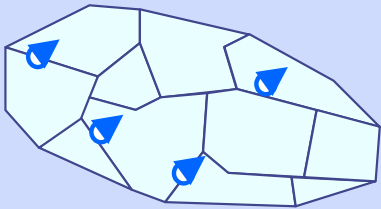
Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας



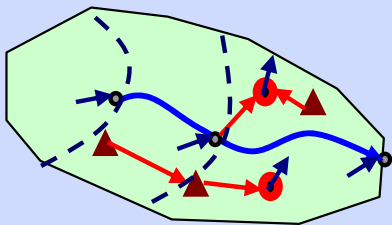
Εννοιολογικές δεξαμενές εδαφικής υγρασίας, ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης

Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας

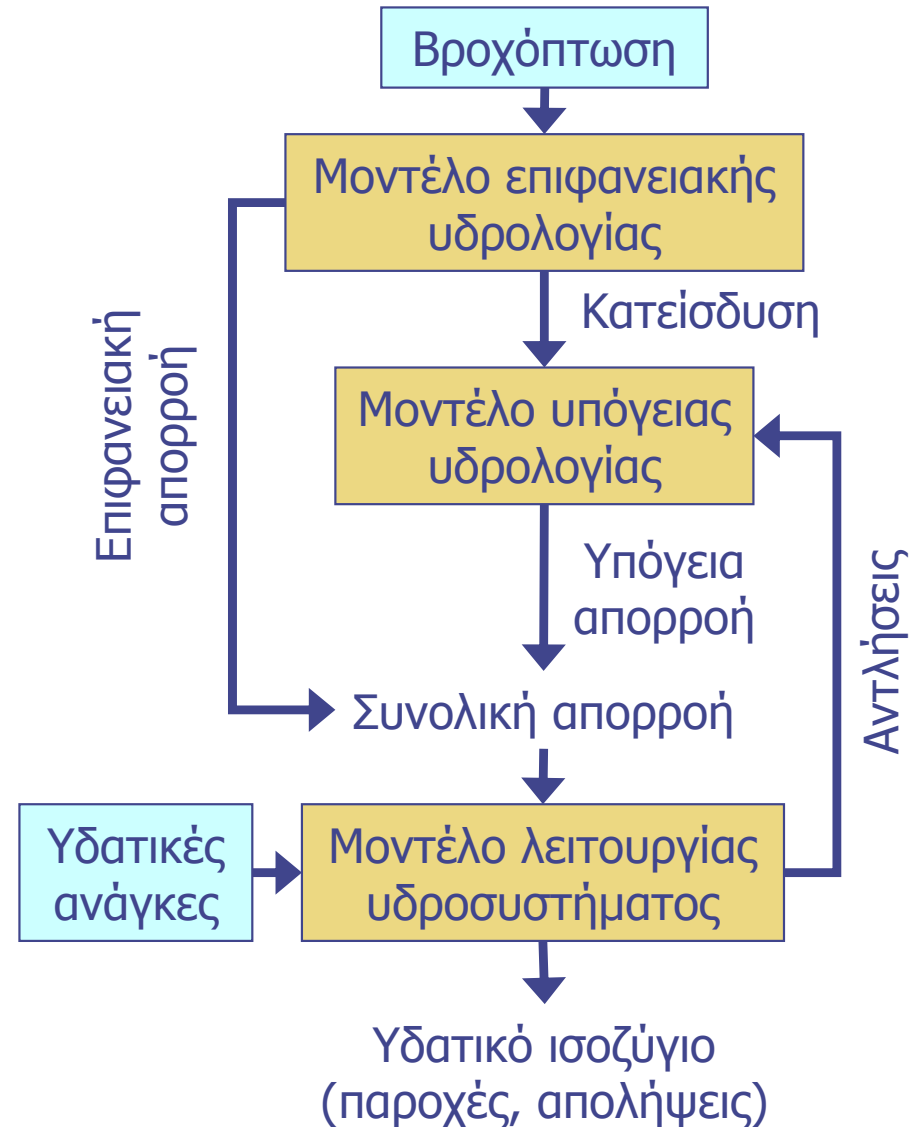


Πολυκυτταρικό σχήμα επίλυσης ισοδύναμο των πεπερασμένων όγκων, πεδίο ροής τύπου Darcy

Μοντέλο λειτουργίας υδροσυστήματος

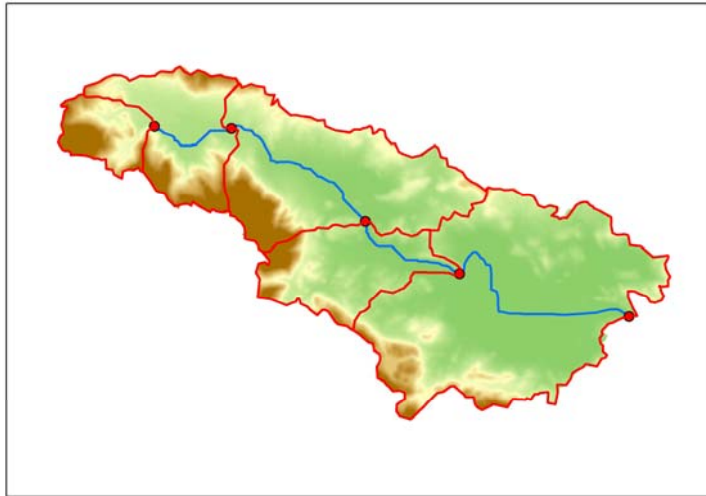


Αναπαράσταση υδροσυστήματος ως μοντέλο δικτυακού προγραμματισμού

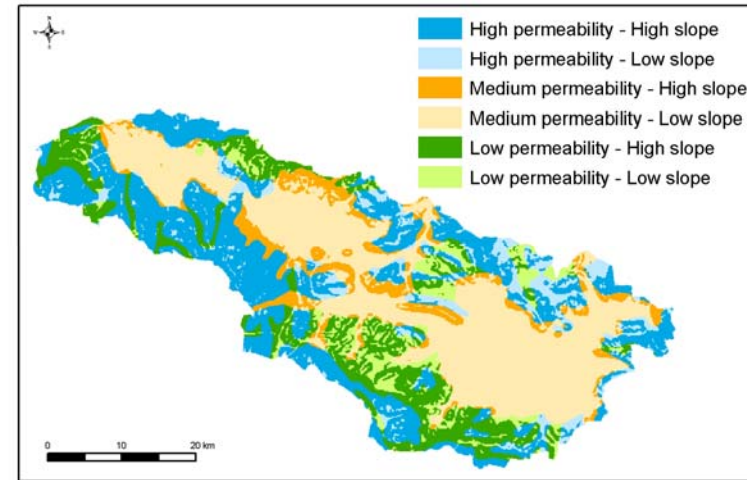


Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

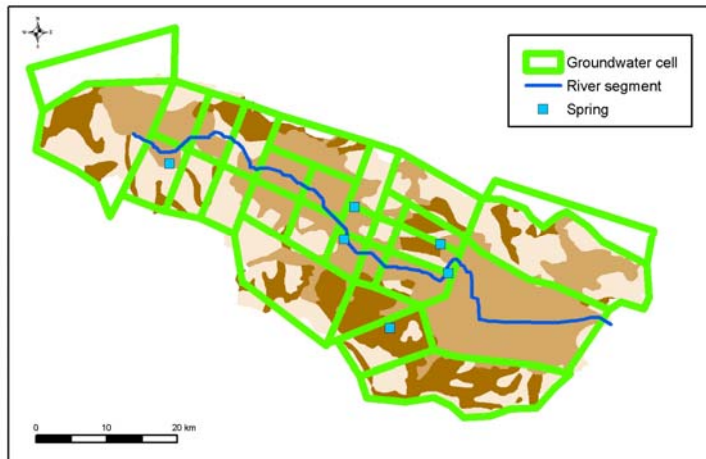
Σχηματοποίηση φυσικού συστήματος



Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες



Μονάδες υδρολογικής απόκρισης



Κύτταρα υδροφορέα

Παραμετροποίηση υδρολογικών διεργασιών

- ❑ 4 τμήματα υδατορευμάτων, μία παράμετρος (συντελεστής διήθησης) ανά υδατόρευμα
- ❑ 6 μονάδες υδρολογικής απόκρισης, 6 παράμετροι ανά δεξαμενή εδαφικής υγρασίας
- ❑ 30 κύτταρα, δύο παράμετροι ανά κύτταρο
- ❑ 6 πηγές, μία παράμετρος ανά πηγή

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Σχηματοποίηση μοντέλου διαχείρισης



Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Υδρολογικά δεδομένα

Υδρομετρικά δεδομένα

- Ημερήσιες παρατηρήσεις στάθμης στη διώρυγα Καρδίτσας (1907-σήμερα)
- Πρόγραμμα υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ (1980-1994)



Βροχομετρικά δεδομένα

- Μηνιαία ύψη βροχής σε 13 σταθμούς (1969-2003)
- Επιφανειακή ολοκλήρωση με τη μέθοδο Thiessen

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Μέτρα καλής προσαρμογής

- ❑ **Συντελεστές προσδιορισμού και μεροληψία υδρογραφημάτων:**
 - στην έξοδο της λεκάνης (σχετικά ακριβής χρονοσειρά μηνιαίας παροχής, από ημερήσιες παρατηρήσεις στάθμης στη διώρυγα Καρδίτσας)·
 - κατάντη των έξι καρστικών πηγών (προσεγγιστική χρονοσειρά μηνιαίας παροχής, με χρονική ολοκλήρωση 1-3 υδρομετρήσεων ανά μήνα).
- ❑ **Μέτρα αναπαραγωγής μηδενικών παροχών:**
 - μηδενισμός θερινής ροής Β. Κηφισού λόγω ανάντη εκτροπών·
 - στείρευση πηγών λόγω κλιματικών συνθηκών και υπεράντλησης.
- ❑ **Μέτρα τάσης στάθμης, για διατήρηση ομαλής διαίτας υδροφορέα:**
 - κατά τη βαθμονόμηση, τα συνδυαστικά μοντέλα δημιουργούν συνθήκες μη ρεαλιστικής αναδιανομής του αποθηκεμένου υπόγειου νερού·
 - μέσω του δείκτη Kendall, ελέγχθηκε η υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, ώστε να είναι συμβατή με τις πιεζομετρικές παρατηρήσεις στη λεκάνη.

Ζητούμενο: Η εκμετάλλευση όλης της διαθέσιμης γνώσης (μετρήσεις + εμπειρία)

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Αναζήτηση πλέον συμβιβαστικής βαθμονόμησης

- **Διαμόρφωση καθολικού μέτρου επίδοσης:**
 - σταθμισμένο άθροισμα επιμέρους μέτρων·
 - μεγαλύτερη βαρύτητα στην αναπαραγωγή της απορροής στην έξοδο και κατάντη των πηγών Μαυρονερίου (περιοχή γεωτρήσεων ΕΥΔΑΠ).
- **Υβριδική «πολυκριτηριακή» στρατηγική εκτίμησης παραμέτρων:**
 - Διαδοχικές ολικές βελτιστοποιήσεις μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου, με σταδιακή συρρίκνωση του χώρου αναζήτησης·
 - Αρχικά ξεχωριστή βελτιστοποίηση παραμέτρων επιφανειακών και υπόγειων νερών (παραμέτροι διαφορετικής κλίμακας)·
 - Κατεύθυνση της αναζήτησης προς περιοχές που εξασφαλίζουν: (α) τιμές παραμέτρων συμβατές με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, (β) ικανοποιητική επίδοση όλων των μέτρων προσαρμογής, (γ) ρεαλιστική υδρολογική συμπεριφορά των μη μετρούμενων αποκρίσεων (π.χ. εξάτμιση), και (δ) ικανοποιητική επίδοση στην επαλήθευση.

Ζητούμενο: Η «ενσωμάτωση» της υδρολογικής εμπειρίας στην βελτιστοποίηση

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Συντελεστές προσδιορισμού βέλτιστης λύσης

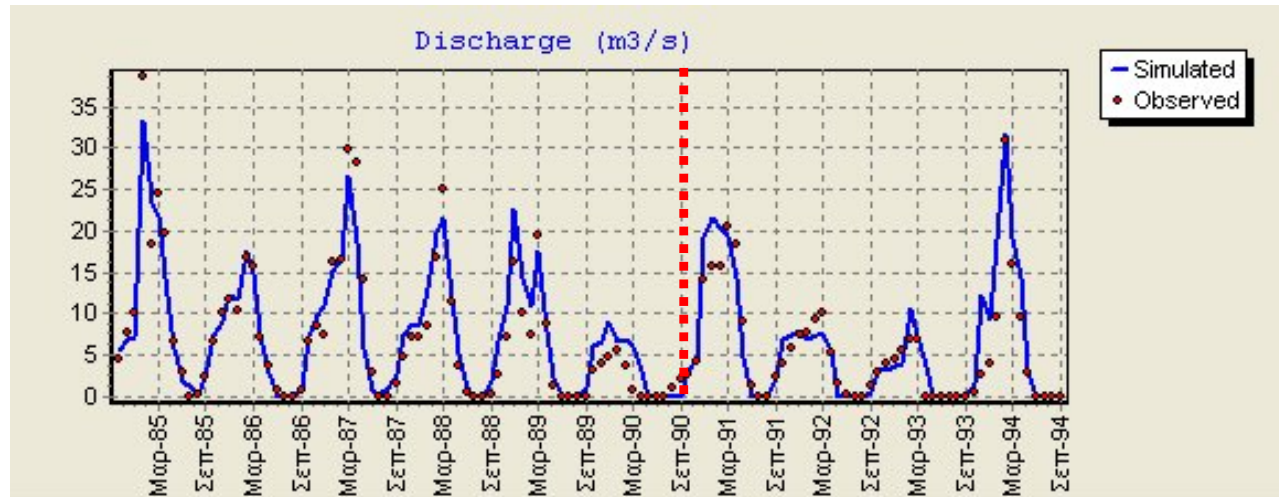
Θέση ελέγχου	Βαθμονόμηση (10/1984-9/1990)	Επαλήθευση (10/1990-9/1994)
Σήραγγα Καρδίτσας (έξοδος λεκάνης)	0.900	0.810
Πηγές άνω ρου (Λιλαία-Κεφαλόβρυσο)	0.746	0.264
Πηγές Αγ. Παρασκευής	0.557	-
Πηγές Μαυρονερίου	0.777	0.729
Πηγές Έρκυνα	0.363	-0.304
Πηγές Μέλανα	0.279	-0.133
Πηγές Πολυγύρας	0.055	-

Χαρακτηριστικά του προβλήματος ολικής βελτιστοποίησης

- ❑ Κυμαινόμενος αριθμός μεταβλητών ελέγχου (έως και 105, για πλήρη βαθμονόμηση)
- ❑ Αριθμός δοκιμών από 1000 έως 10000 (ανάλογα με το πλήθος των μεταβλητών)
- ❑ Χρόνος προσομοίωσης (για 72 χρονικά βήματα) περίπου 0.3 sec (Pentium 4, 2.80 GHz)

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

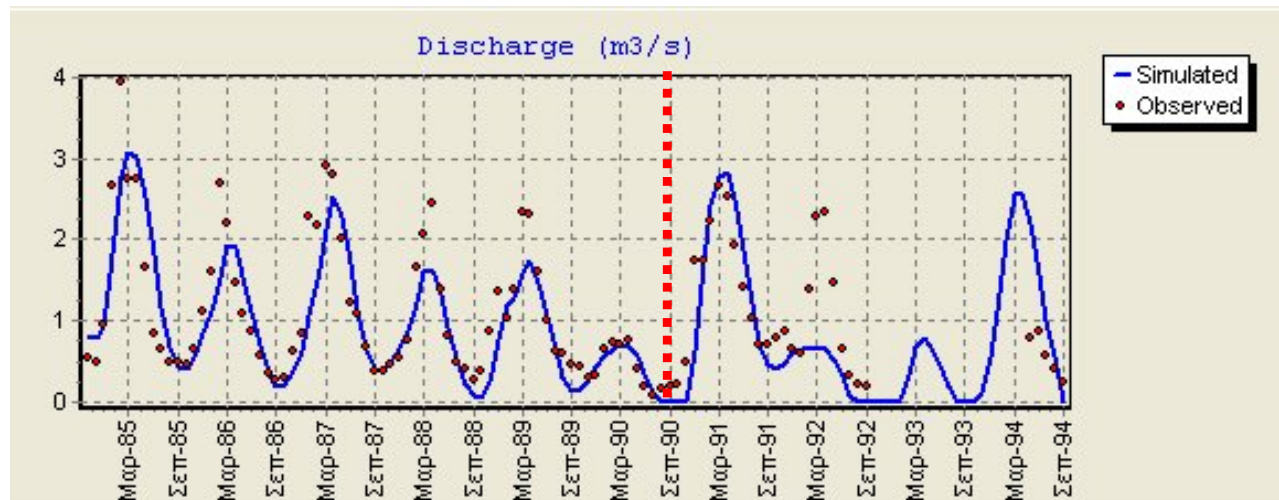
Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα (1)



Σήραγγα Καρδίτσας

$r^2 = 0.900$ (βαθμονόμηση)

$r^2 = 0.810$ (επαλήθευση)



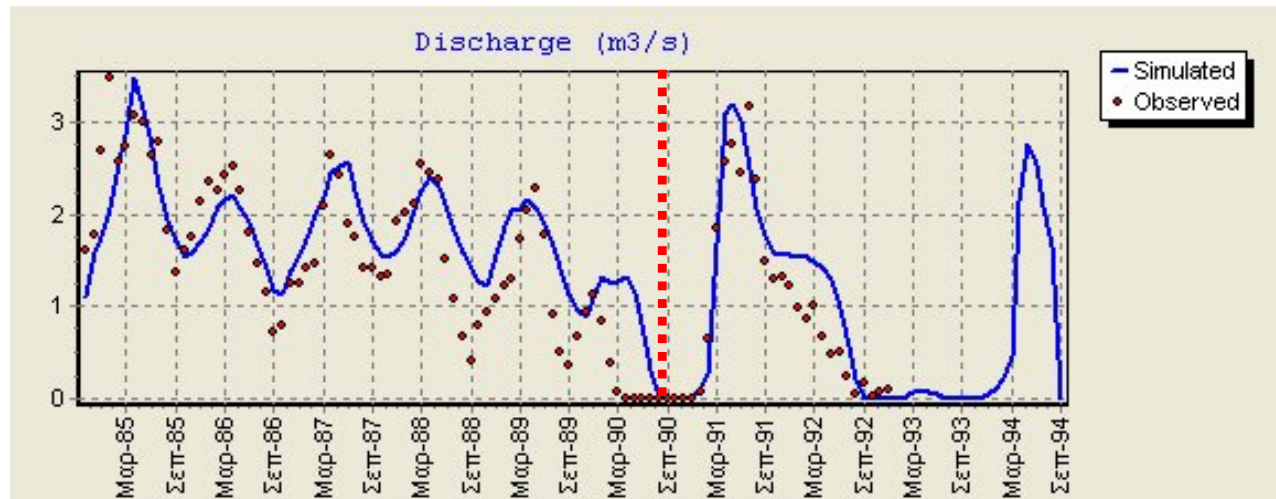
Πηγές άνω ρου

$r^2 = 0.746$ (βαθμονόμηση)

$r^2 = 0.240$ (επαλήθευση)

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

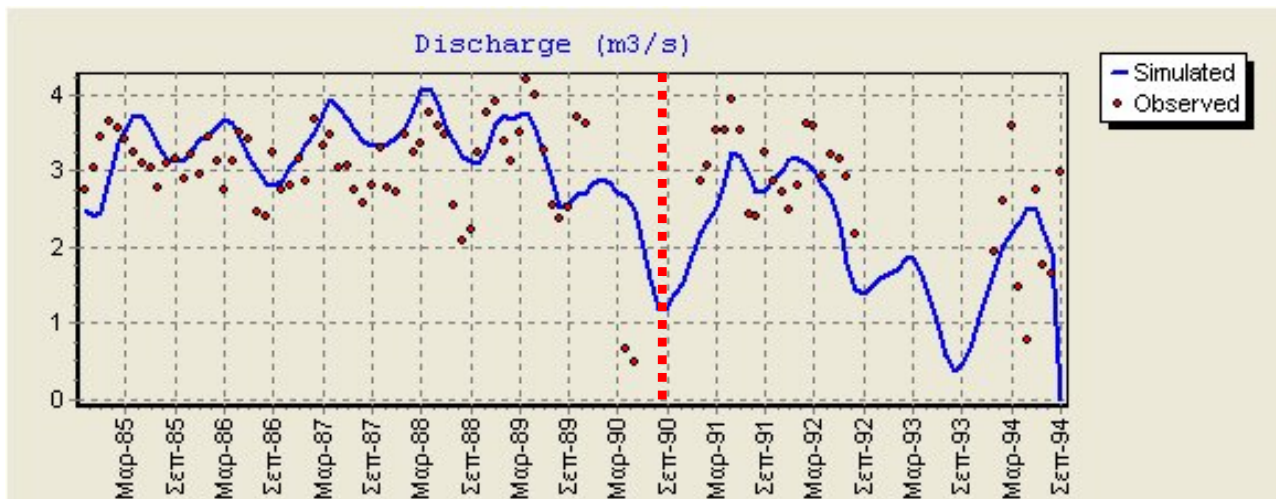
Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα (2)



Πηγές Μαυρονερίου

$r^2 = 0.777$ (βαθμονόμηση)

$r^2 = 0.729$ (επαλήθευση)



Πηγές Μέλανα

$r^2 = 0.279$ (βαθμονόμηση)

$r^2 = -0.133$ (επαλήθευση)

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

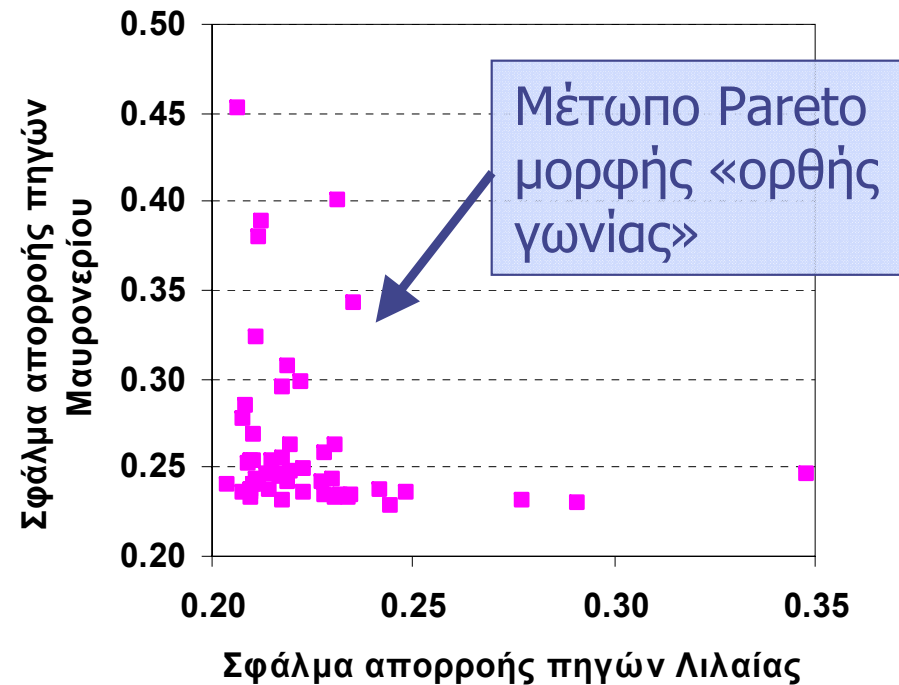
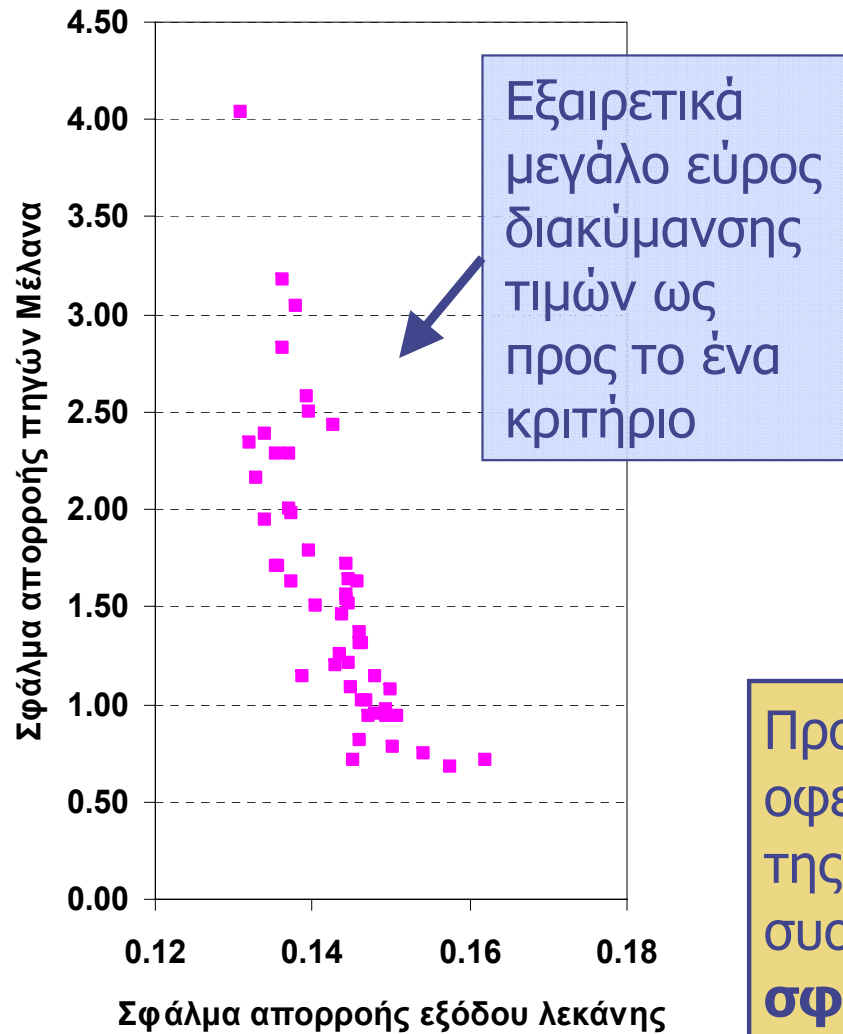
Εμβάθυνση μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης

- Διατύπωση ενός εξαιρετικά απαιτητικού προβλήματος διανυσματικής βελτιστοποίησης **7 συναρτήσεων** και **18 μεταβλητών ελέγχου**, με συνιστώσες τους συντελεστές προσδιορισμού των επτά υδρογραφημάτων.
- Επιλογή των **πλέον κρίσιμων παραμέτρων** ως μεταβλητών ελέγχου:
 - χωρητικότητες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και συντελεστές κατείσδυσης (για τις έξι μονάδες υδρολογικής απόκρισης)·
 - υδραυλική αγωγιμότητα κυττάρων που αναπαριστούν την λειτουργία των έξι καρστικών πηγών.
- Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων (περίπου 80) θεωρούνται γνωστές από την αρχική βαθμονόμηση.
- Για την περιγραφή της γεωμετρίας του μετώπου Pareto (= υπερεπιφάνεια στον 7-διάστατο χώρο), επιδιώκεται η παραγωγή 50 μη κατωτέρων λύσεων, με 10000 δοκιμές (ελάχιστες για τις απαιτήσεις του προβλήματος).

Ζητούμενο: Η μαθηματική περιγραφή (κατά Pareto) της ανταγωνιστικότητας των επιμέρους μέτρων καλής προσαρμογής και η ερμηνεία των αβεβαιοτήτων

Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

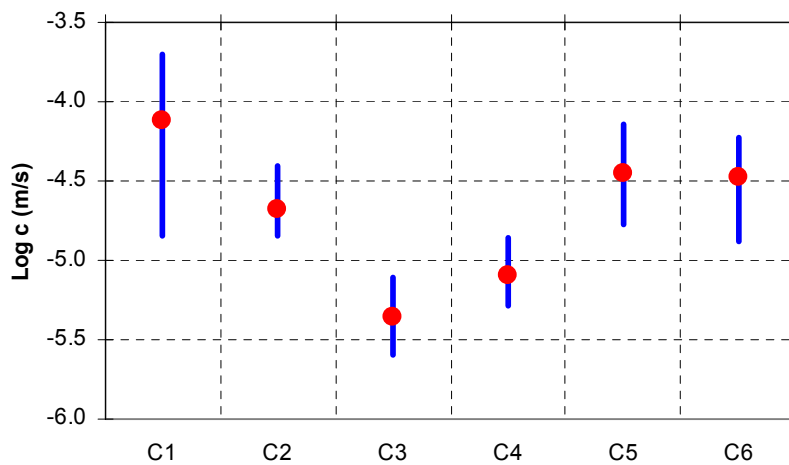
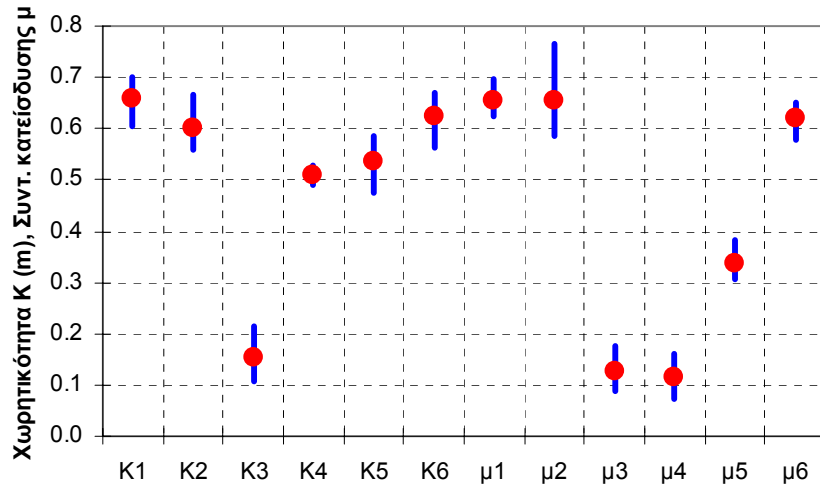
Ανταγωνιστικότητα μέτρων προσαρμογής



Προκύπτουν μη αποδεκτοί «ανταγωνισμοί» που οφείλονται: (α) σε **δομικά σφάλματα**, λόγω της πολυπλοκότητας των διεργασιών (αρνητική συσχέτιση βροχής-παροχής πηγών), (β) σε **σφάλματα δεδομένων**, λόγω της κατασκευής δειγμάτων ελέγχου με βάση αραιές μετρήσεις

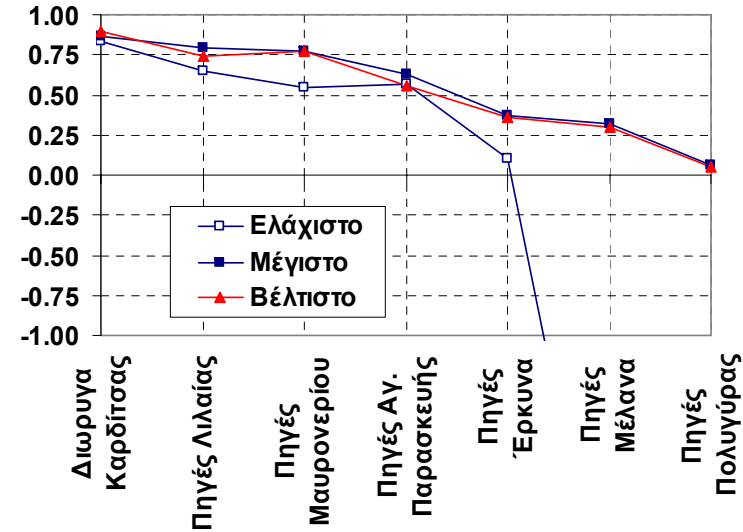
Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Εύρος συνόλου και μετώπου Pareto



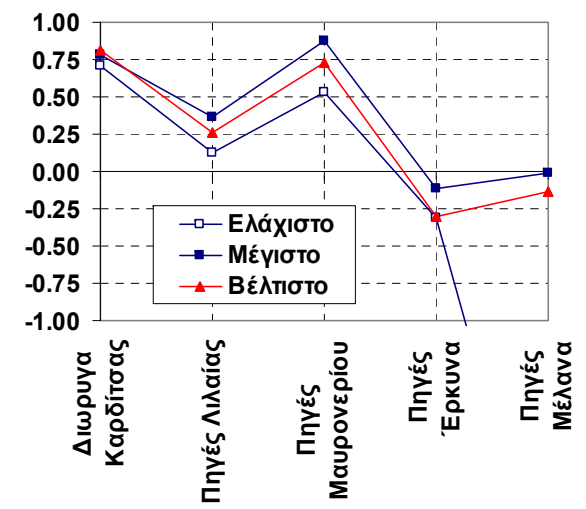
Εύρος συνόλου Pareto

Συντελεστής προσδιορισμού (περίοδος βαθμονόμησης)



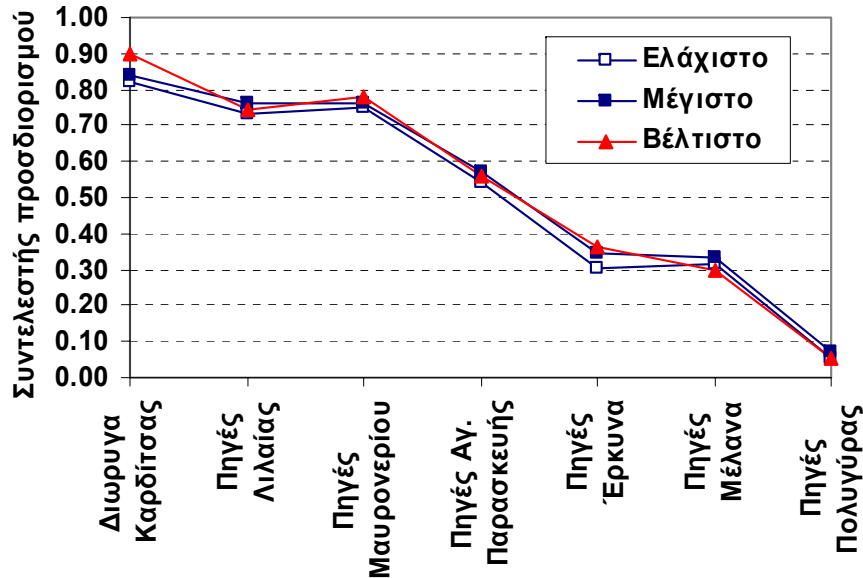
Εύρος μετώπου Pareto

Συντελεστής προσδιορισμού (περίοδος επαλήθευσης)

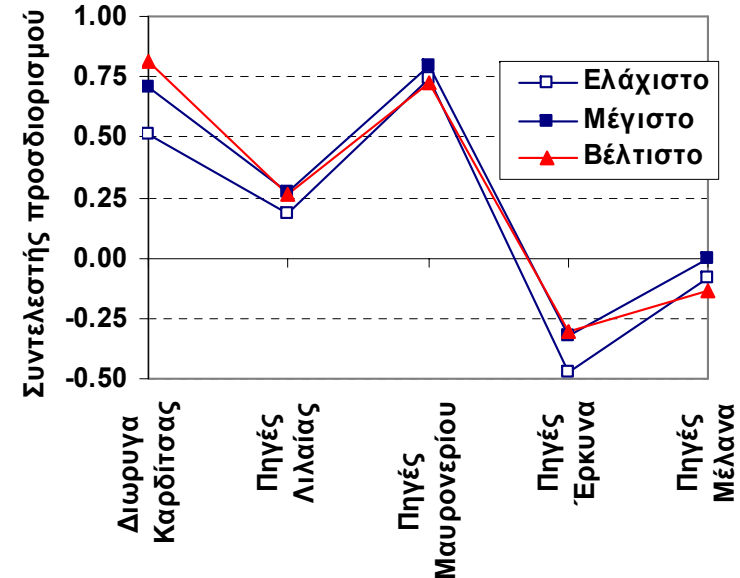


Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού «Παγίδευση» της πλέον συμβιβαστικής λύσης

- Με κατάλληλη ρύθμιση του πολυκριτηριακού αλγορίθμου, απορρίπτονται ως μη εφικτοί όλοι οι συνδυασμοί παραμέτρων με αρνητικό συντελεστή προσδιορισμού, έστω και για ένα από τα επτά κριτήρια.
- Με ελάχιστο αριθμό δοκιμών (σε σχέση με όσες χρειάστηκαν στην υβριδική βαθμονόμηση) επιτυγχάνεται μια ικανοποιητική περιγραφή του επιθυμητού υπο-μετώπου Pareto, όπου βρίσκεται η πλέον συμβιβαστική λύση.



Αποτελέσματα βαθμονόμησης



Αποτελέσματα επαλήθευσης

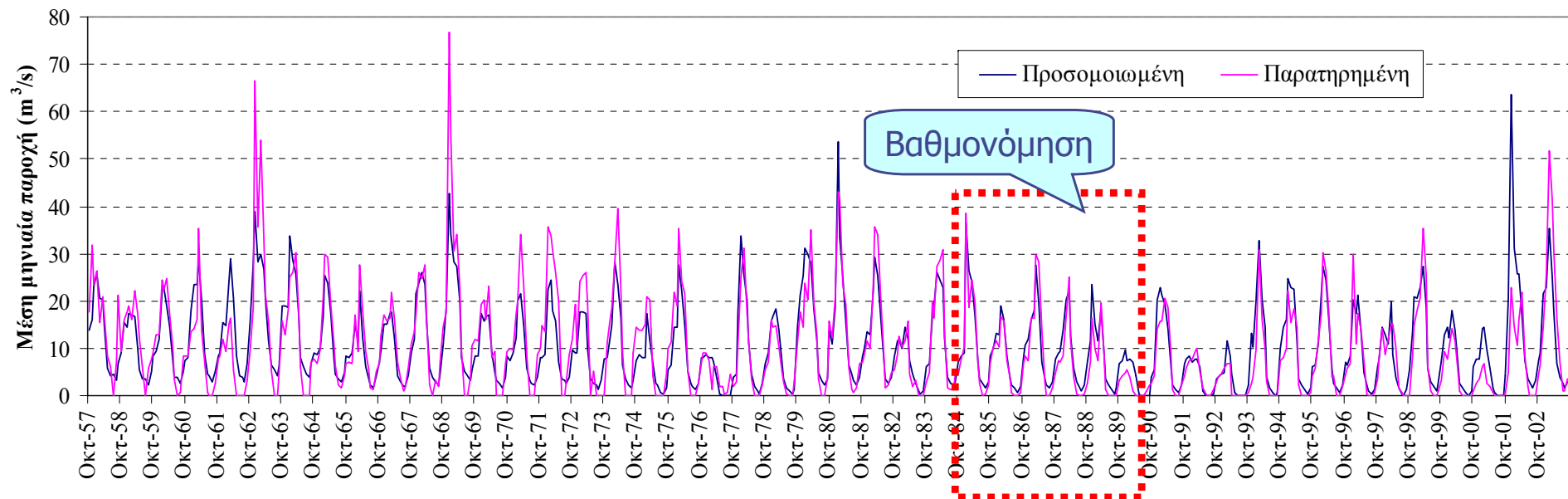
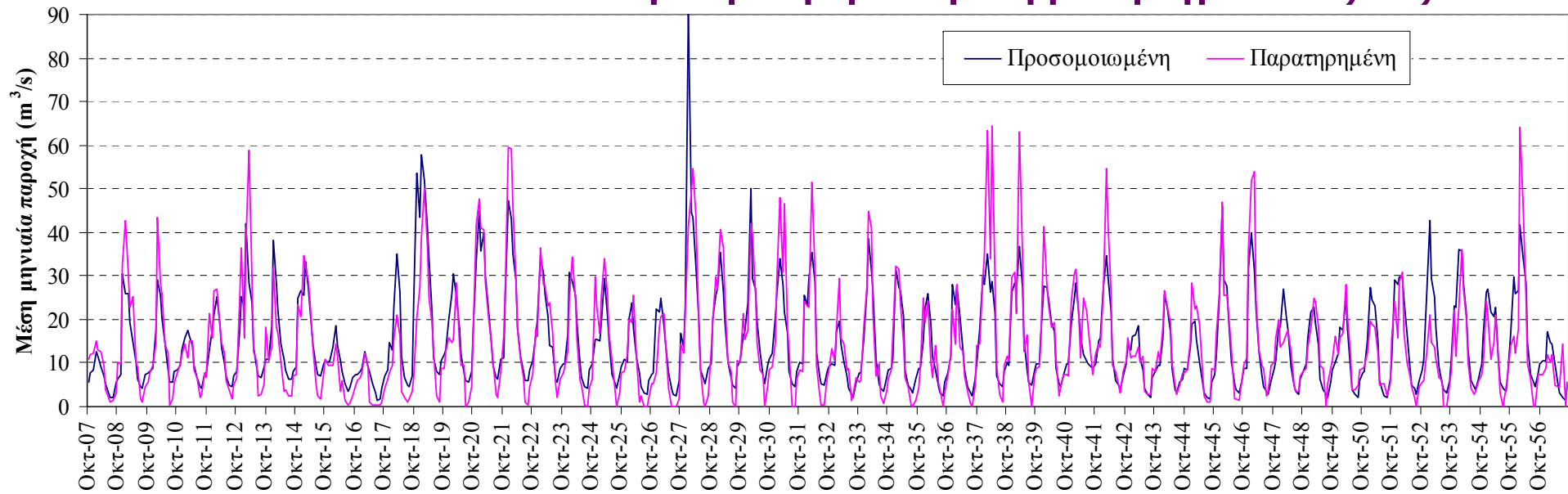
Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Μια απόπειρα μακράς επαλήθευσης: 1907-2003

- Κατασκευή επιφανειακών βροχοπτώσεων:
 - 1969-2003: Μέθοδος Thiessen, για τις 5 υπολεκάνες
 - 1907-1968: Οργανική συσχέτιση με τη μηνιαία βροχή στην Αλίαρτο
- Κατασκευή δυνητικής εξατμοδιαπνοής:
 - 1984-1994: Μέθοδος Penman
 - Λοιπά έτη: Προσαρμογή ημιεμπειρικού μοντέλου στο δείγμα Penman και επέκταση με είσοδο την μέση μηνιαία θερμοκρασία στην Αλίαρτο
- Εκτίμηση αρδευτικών αναγκών:
 - 1980-2003: Σταθερές, με βάση τις καλλιεργούμενες εκτάσεις στη λεκάνη
 - 1907-1979: Θεώρηση ρυθμού ετήσιας μείωσης 1%
- Χρονοσειρές ελέγχου:
 - 1907-2003: Πλήρες δείγμα μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης
 - Πρόσφατες υδρομετρήσεις ΙΓΜΕ (1980-2000)
 - Παλαιές υδρομετρήσεις ΥΠΔΕ, Οργανισμού Κωπαΐδας και άλλων φορέων

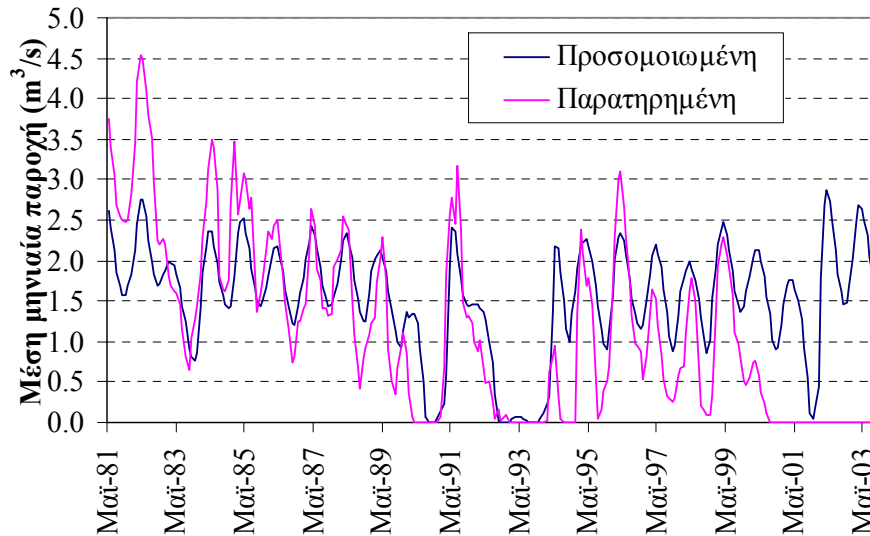
Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού

Αναπαραγωγή υδρογραφήματος εξόδου

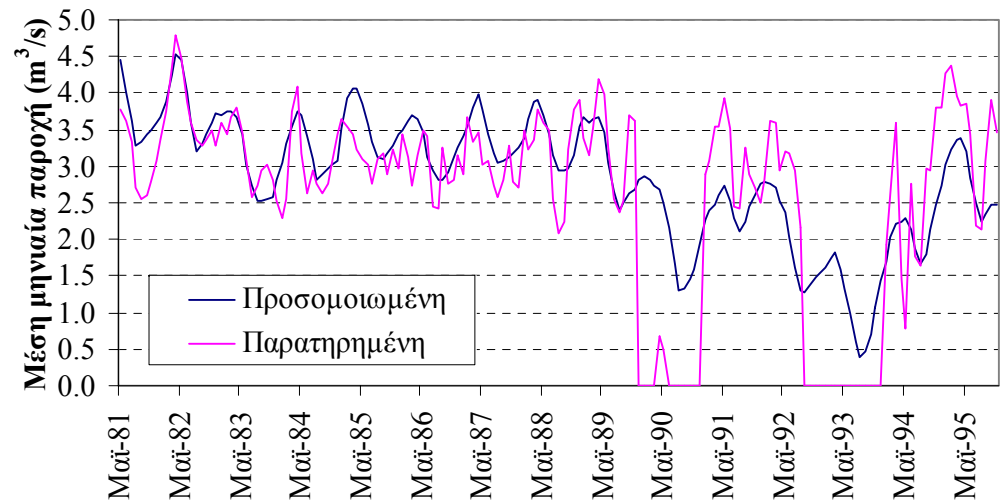


Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού Αναπαραγωγή υδρογραφημάτων πηγών

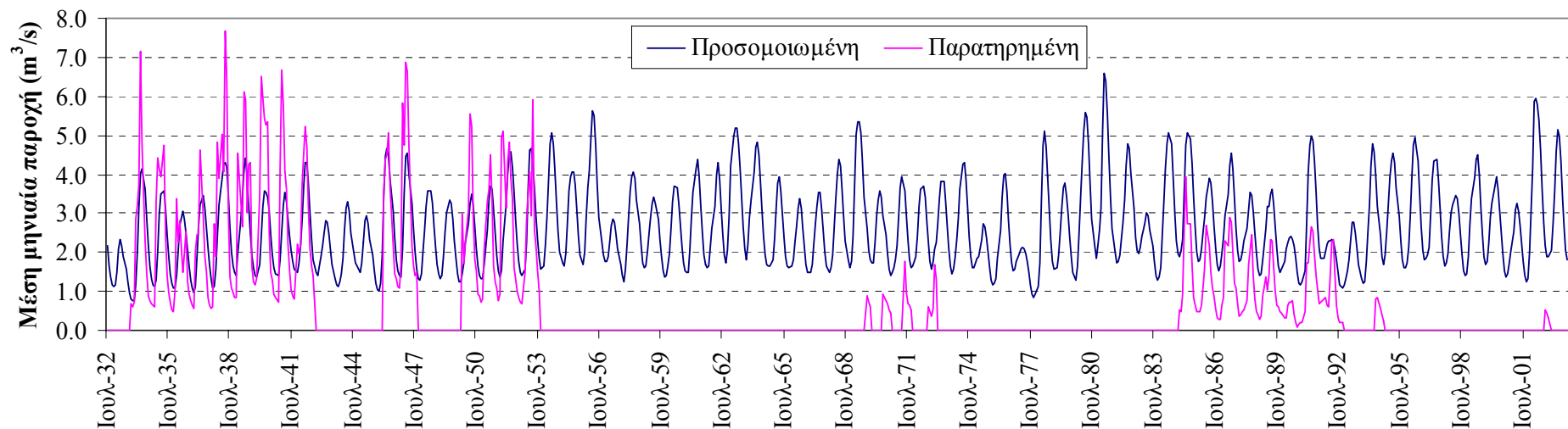
ΠΗΓΕΣ ΜΑΥΡΟΝΕΡΙΟΥ



ΠΗΓΕΣ ΜΕΛΑΝΑ



ΠΗΓΕΣ ΛΙΛΑΙΑΣ-ΚΕΦΑΛΟΒΡΥΣΟΥ



Συμπεράσματα

- ❑ Τα σύγχρονα υδρολογικά μοντέλα επιδιώκουν μια **ολιστική προσέγγιση**, που καθιστά ωστόσο την διαδικασία βαθμονόμησης όλο και πιο δυσχερή.
- ❑ Παρά την συνεχή βελτίωση της ακρίβειας και ταχύτητας των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, το πρόβλημα βαθμονόμησης δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί στα πλαίσια μιας πλήρως **αυτοματοποιημένης** υπολογιστικής διαδικασίας.
- ❑ Η επιτυχής βαθμονόμηση προϋποθέτει την εξονυχιστική ανάλυση κάθε τύπου **πληροφορίας** και την αξιοποίηση της **υδρολογικής εμπειρίας**.
- ❑ Σημείο-κλειδί στη διαμόρφωση ευσταθών μοντέλων αποτελεί η διατύπωση της **απλούστερης δυνατής παραμετροποίησης**, που αντικατοπτρίζει την διαθέσιμη γνώση για το υπό μελέτη υδροσύστημα.
- ❑ Ο **αριθμός των παραμέτρων** ενός μοντέλου πρέπει να είναι συμβατός με τον αριθμό των κριτηρίων προσαρμογής στη βαθμονόμηση.
- ❑ Η **πολυκριτηριακή ανάλυση** μπορεί να αποτελέσει ένα επιπλέον εργαλείο στην κατεύθυνση μιας επιτυχούς και ρεαλιστικής βαθμονόμησης, καθώς «φωτίζει» σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς ενός μοντέλου.