

Πανεπιστημιακό Δίκτυο Εκπαίδευσης, Έρευνας και Τεχνολογίας «ΥΔΡΟΜΕΔΩΝ»

1^η Συνάντηση Υποψηφίων Διδασκτόρων

Πάτρα, 9 Ιουλίου 2005

Θεματική ενότητα: Επιφανειακά ύδατα

Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά
προβλήματα υδατικών πόρων

Ανδρέας Ευστρατιάδης

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων

Ιστορικό της διατριβής

- Ημερομηνία ανάθεσης: 15/10/2002
- Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:
 - Δ. Κουτσογιάννης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)
 - Μ. Μιμίκου, Καθηγήτρια ΕΜΠ
 - Λ. Βαμβακερίδου, Λέκτορας ΕΜΠ
- Μετά από υποβολή σχετικής πρότασης, το αντικείμενο της διατριβής εντάχθηκε σε ερευνητικό πρόγραμμα του έργου «Ηράκλειτος: Υποτροφίες Έρευνας με προτεραιότητα στη Βασική Έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου»

Κίνητρο της έρευνας: Βαθμονόμηση μοντέλων

- ❑ Στόχος της βαθμονόμησης είναι η αξιόπιστη αναπαραγωγή της «παρατηρημένης» συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος
- ❑ Η βαθμονόμηση μοντέλων με σχετικά μεγάλο αριθμό παραμέτρων (> 5-6), που παράγουν πολλαπλές μεταβλητές εξόδου, όταν βασίζεται σε ένα κριτήριο, οδηγεί σε σχήματα μειωμένης προγνωστικής ακρίβειας
- ❑ Η βαθμονόμηση με βάση διαφορετικά κριτήρια καλής προσαρμογής, που αναφέρονται σε διαφορετικές όψεις του ίδιου παρατηρημένου δείγματος ή σε διαφορετικά δείγματα παρατηρήσεων, οδηγεί σε διαφορετικές εκτιμήσεις παραμέτρων
- ❑ Αν τα, κατά κανόνα αντικρουόμενα, κριτήρια συναθροιστούν σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση (αντικειμενική συνάρτηση), προκύπτει μια «υποκειμενικά» βέλτιστη εκτίμηση παραμέτρων, και δεν γίνονται αντιληπτές οι τυχόν ανταγωνιστικές αλληλεπιδράσεις των κριτηρίων
- ❑ Οι αλληλεπιδράσεις αποτελούν ένδειξη των εγγενών αβεβαιοτήτων του μοντέλου, που οφείλονται σε δομικά σφάλματα καθώς και σφάλματα των δεδομένων εισόδου

Αντικείμενο και στόχοι της διατριβής

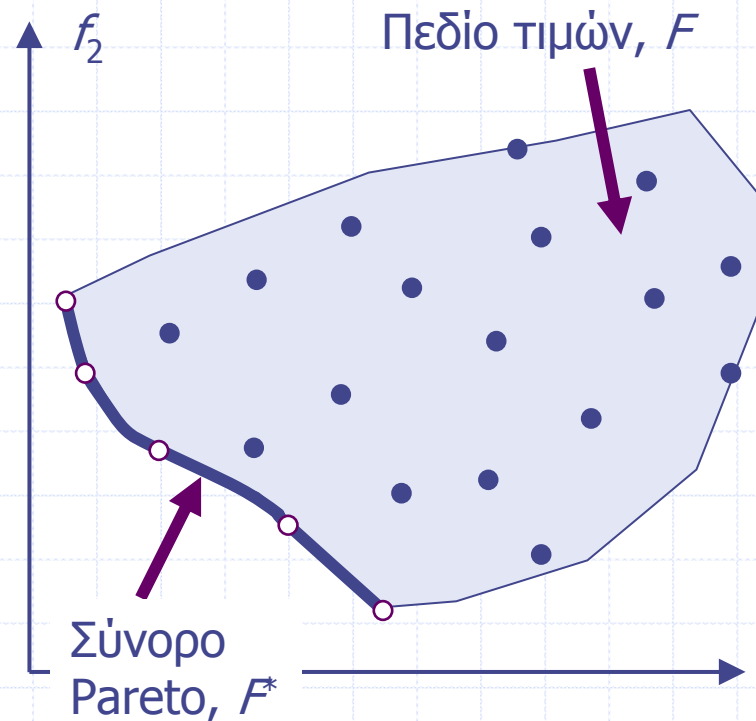
1. Η συστηματική επισκόπηση των μεθόδων επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων μη γραμμικής βελτιστοποίησης.
2. Η ανάπτυξη πρωτότυπων αλγοριθμικών σχημάτων, κατάλληλων για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων.
3. Η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων της πολυκριτηριακής έναντι της μονοκριτηριακής προσέγγισης, σε προβλήματα εκτίμησης παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων.
4. Η διατύπωση μιας στρατηγικής βαθμονόμησης πολύπλοκων υδρολογικών μοντέλων, που βασίζεται στη χρήση πολλαπλών κριτηρίων καλής προσαρμογής, με εφαρμογή των υπολογιστικών εργαλείων που αναπτύσσονται στα πλαίσια της διατριβής.

Υπολογιστικό
μέρος

Υδρολογικό
μέρος

Η έννοια της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

- Διατύπωση μιας διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης, μη γραμμικής ως προς τις μεταβλητές ελέγχου
- Αδυναμία σύγκρισης λύσεων, αν τα κριτήρια βελτιστοποίησης είναι αντικρουόμενα ή δεν μετρώνται σε κοινή βάση (π.χ. χρηματική αξία)
- Ένα σημείο \mathbf{x}^* είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει άλλο σημείο \mathbf{x} που να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο, χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο
- Ο παραπάνω ορισμός οδηγεί σε ένα σύνολο αποδεκτών λύσεων, που καλούνται Pareto βέλτιστες ή μη κατώτερες (non-inferior) ή μη κυριαρχούμενες (non-dominated)



Δυσχέρειες που πρέπει να αντιμετωπιστούν

- **Τυπικές δυσχέρειες**, που απαντώνται κατά τη διαδικασία αναζήτησης σε μη γραμμικούς, μη κυρτούς χώρους:
 - εγκλωβισμός σε τοπικά ακρότατα
 - πολύ αργή πρόοδος, στην περίπτωση μη ομαλής γεωμετρίας της επιφάνειας απόκρισης, που οφείλεται στην ύπαρξη αυχένων, μακρόστενων κοιλάδων, κλπ.
 - η «κατάρρα» των πολλών διαστάσεων, σε συνδυασμό με τον υπολογιστικό φόρτο που απαιτούν οι εφαρμογές της πράξης
- **Επιπλέον δυσχέρειες**, που οφείλονται στις ιδιαιτερότητες του πολυκριτηριακού χαρακτήρα του προβλήματος:
 - όχι σύγκλιση σε μία «ολικά» βέλτιστη λύση, αλλά ταυτόχρονη παραγωγή πολλαπλών, μη κατωτέρων λύσεων
 - το τελικό σύνολο λύσεων (διακριτό σύνολο) πρέπει να περιέχει αντιπροσωπευτικά σημεία του συνόρου Pareto (συνεχές σύνολο)

Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση: Επισκόπηση

□ Κλασικές προσεγγίσεις:

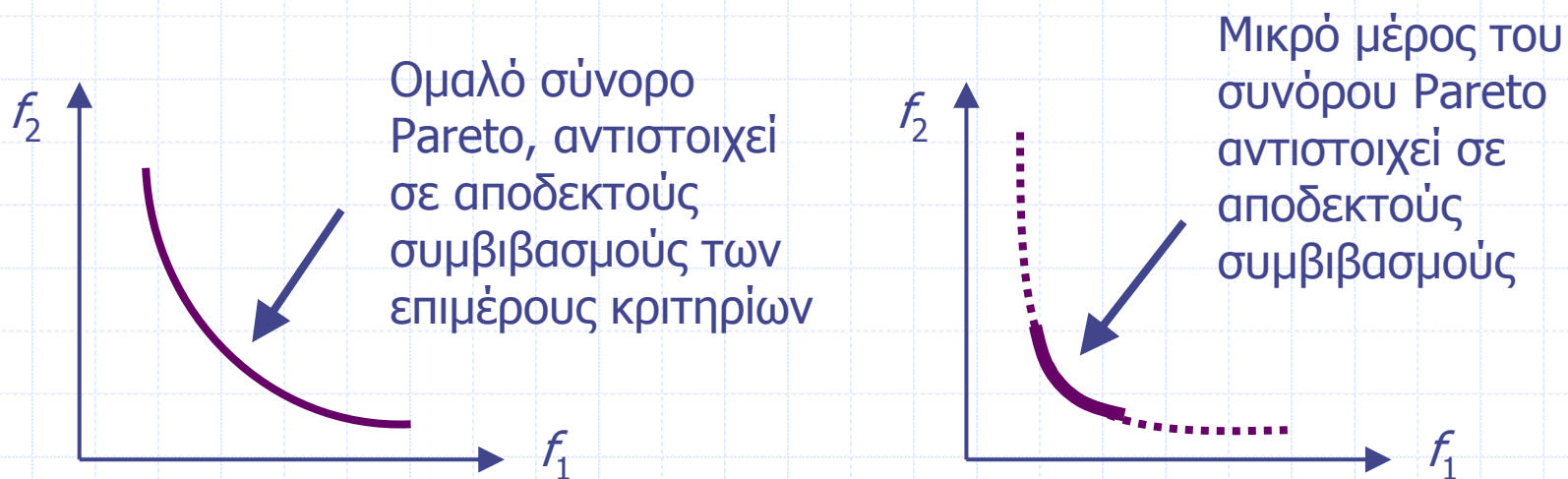
- Αναζήτηση μοναδικής λύσης, που θεωρείται η πλέον συμβιβαστική, με αναδιατύπωση του προβλήματος σε μονοκριτηριακό
- Τα χαρακτηριστικά της «ολικά» βέλτιστης λύσης εκφράζονται με υποκειμενικό τρόπο, υπό μορφή συντελεστών βάρους, τιμών-στόχων, σειράς προτεραιότητας των κριτηρίων, κλπ.

□ Σύγχρονες προσεγγίσεις (μετά το 1990):

- Προσαρμογή των εξελικτικών (γενετικών) αλγορίθμων, για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση ενός πληθυσμού σημείων
- Τροποποίηση του τελεστή επιλογής, ώστε να ευνοεί την επιβίωση μη κατωτέρων λύσεων, διατηρώντας παράλληλα έναν καλά κατανομημένο πληθυσμό
- Οι υπόλοιπες υπολογιστικές διαδικασίες (κωδικοποίηση, διασταύρωση, μετάλλαξη) διατηρούνται ως έχουν

Μειονεκτήματα υφιστάμενων προσεγγίσεων

- ❑ Εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία αναζήτησης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές με πολλές παραμέτρους και πολλά κριτήρια
- ❑ Μειωμένη εμπειρία σε προβλήματα περισσότερων των δύο κριτηρίων
- ❑ Στις υδρολογικές εφαρμογές, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό αν τα κριτήρια βελτιστοποίησης των παραμέτρων είναι αντικρουόμενα
- ❑ Εξαιτίας των εγγενών σφαλμάτων του μοντέλου, λύσεις που από μαθηματική σκοπιά είναι βέλτιστες, ενδέχεται να είναι μη αποδεκτές από υδρολογικής σκοπιάς



Υπολογιστικές τεχνικές που αναπτύσσονται

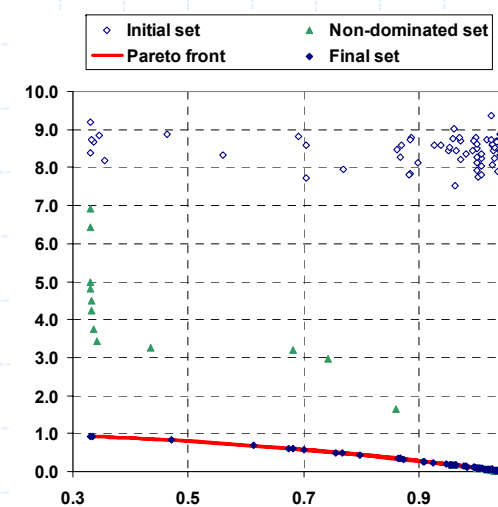
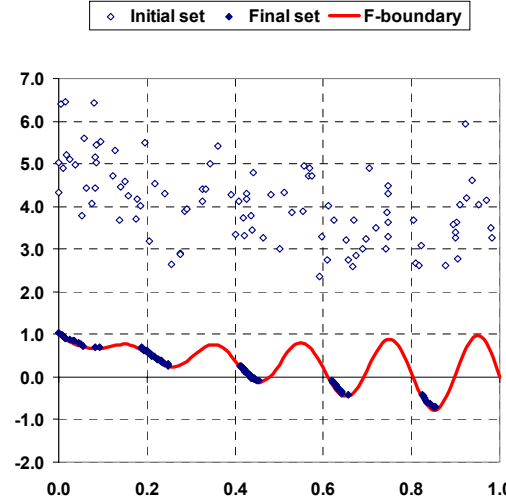
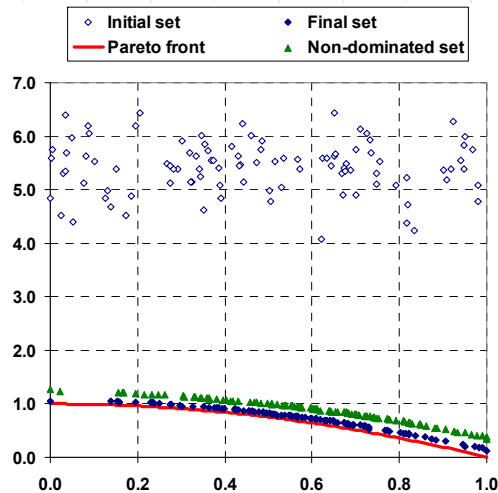
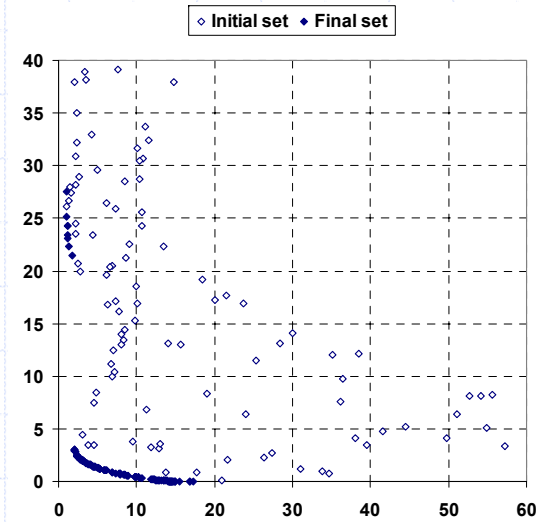
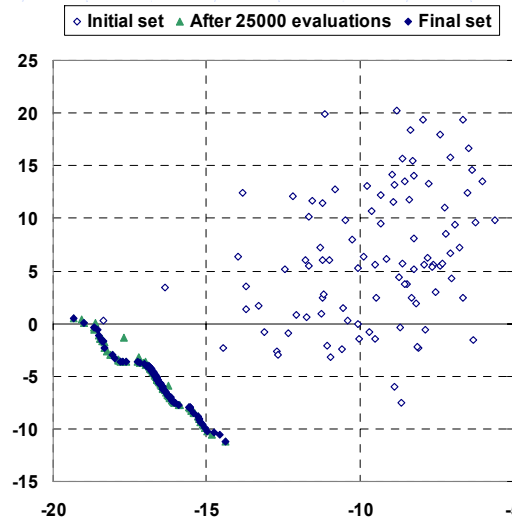
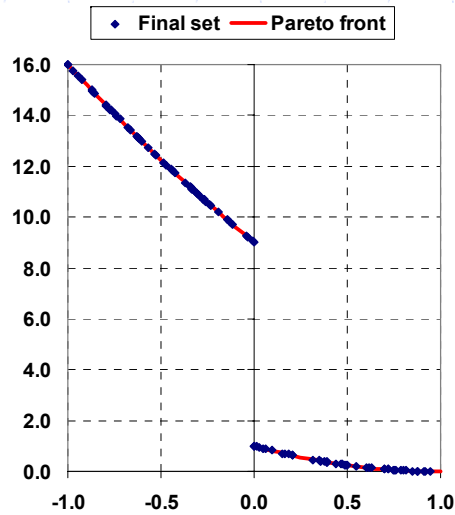
□ Διαδικασία αναζήτησης:

- Εφαρμόζεται ένα πλέγμα ντετερμινιστικών και στοχαστικών κανόνων εξέλιξης ενός πληθυσμού σημείων, με βάση ένα γενικευμένο σχήμα απλόκου (simplex), που είναι ευπροσάρμοστο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης
- Μέσω μιας στρατηγικής προσομοιωμένης ανόπτωσης, ελέγχεται ο βαθμός τυχαιότητας στο σχήμα γέννησης νέων λύσεων, που εξασφαλίζει διαφυγή από τοπικά ακρότατα

□ Διαδικασία αποτίμησης:

- Εισάγεται ένα μέτρο κυριαρχίας, που κατευθύνει την αναζήτηση προς το σύνορο Pareto
- Ορίζεται ένα μέτρο εφικτότητας, για την επιλογή συνδυασμών τιμών κριτηρίων που είναι αποδεκτοί, με βάση τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος (περιορισμός πεδίου τιμών)

Έλεγχος με βάση θεωρητικά προβλήματα

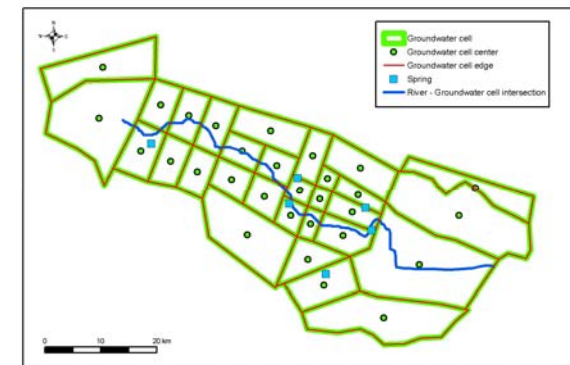
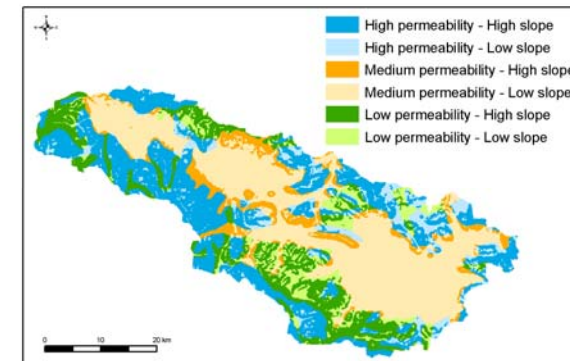


Εφαρμογή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού



Χαρακτηριστικά συστήματος – μοντελοποίηση

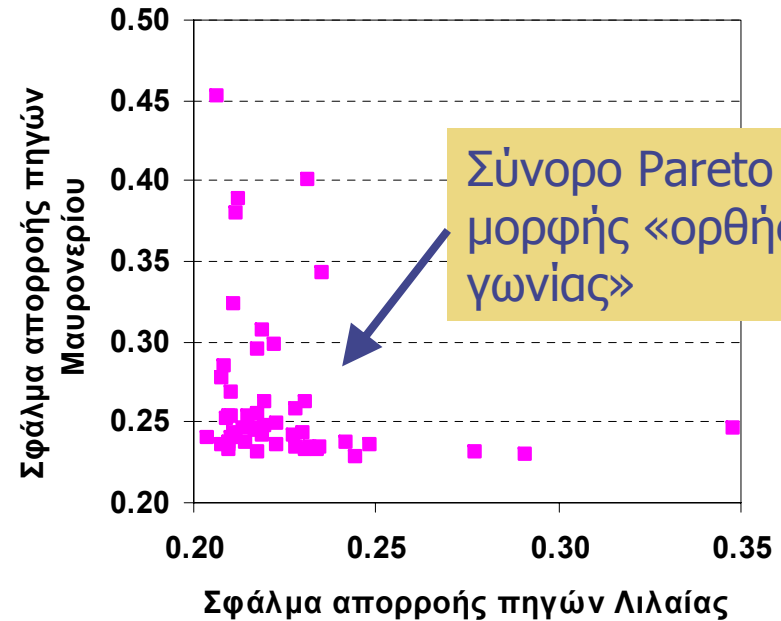
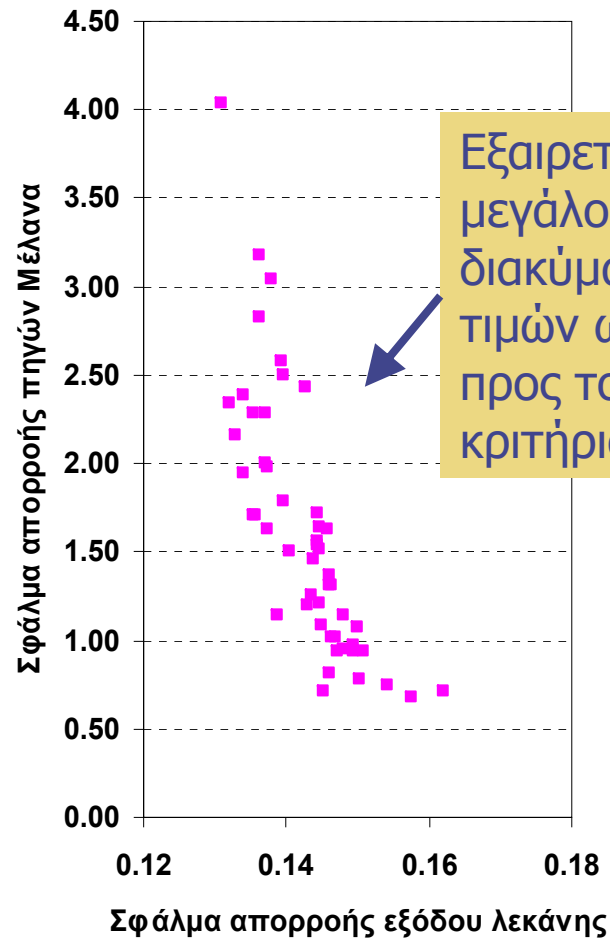
- ❑ Διαταραγμένο καρστικό σύστημα 2000 km², με σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών
- ❑ Χρήσεις νερού: ύδρευση Αθήνας, άρδευση
- ❑ Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης λεκάνης απορροής «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ»
- ❑ Υπολογιστικές συνιστώσες:
 - ημικατανεμημένο μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας (5 υπολεκάνες, 6 μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ΜΥΑ)
 - αριθμητικό σχήμα κίνησης υπόγειων νερών (διακριτοποίηση του υδροφορέα σε 35 κύτταρα-δεξαμενές)
 - μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων, για την εκτίμηση των απολήψεων



Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση μοντέλου

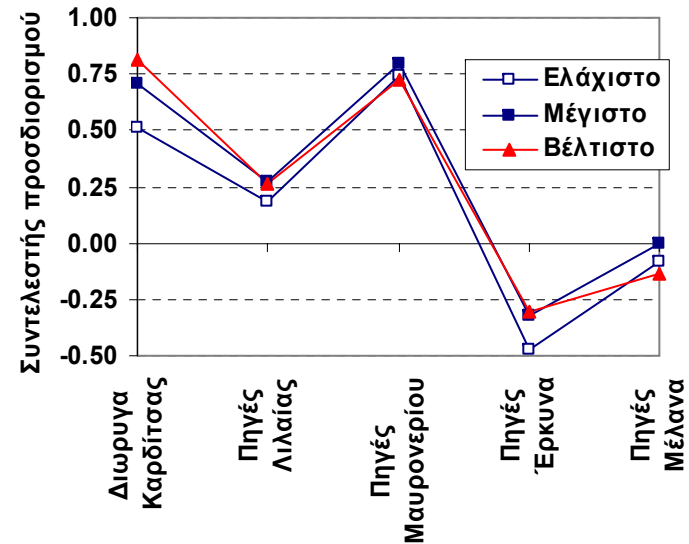
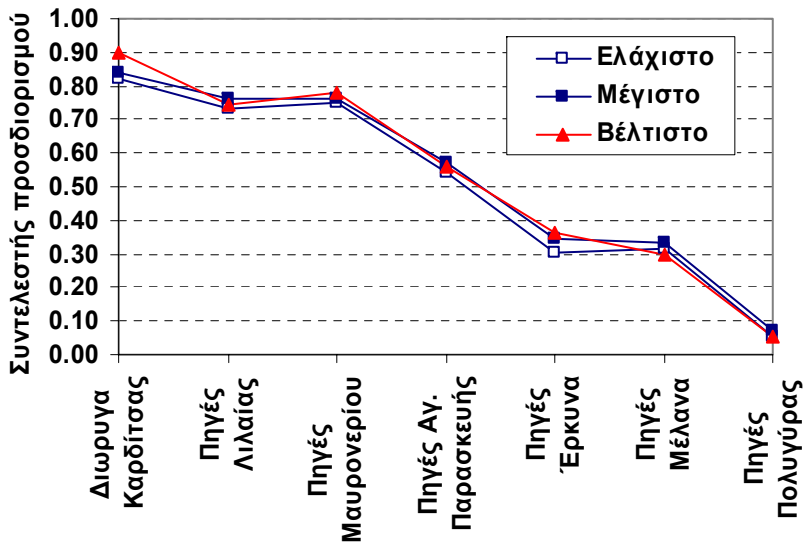
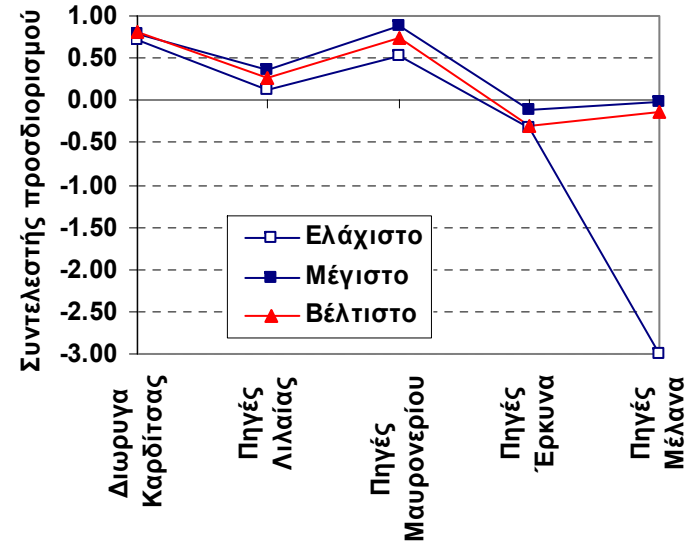
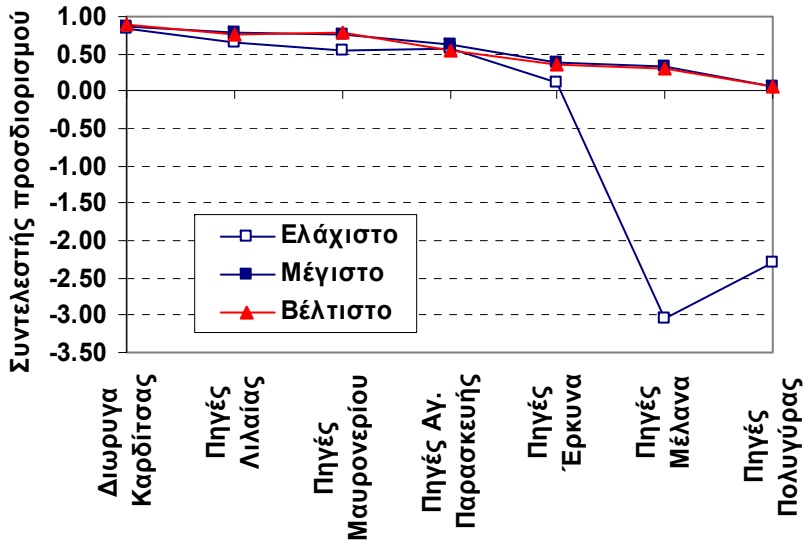
- ❑ **Παρατηρημένες χρονοσειρές:** μηνιαία απορροή στην έξοδο της λεκάνης (από ημερήσιο δείγμα σταθμημέτρου), μηνιαία απορροή κύριων καρστικών πηγών (από αραιό δείγμα υδρομετρήσεων)
- ❑ **Περίοδος ελέγχου:** Οκτώβριος 1984-Σεπτέμβριος 1990 (βαθμονόμηση), Οκτώβριος 1991-Σεπτέμβριος 1994 (επαλήθευση)
- ❑ **Κριτήρια βαθμονόμησης:** συντελεστές προσδιορισμού υδρογραφημάτων (**διάσταση πεδίου αποτίμησης = 7**)
- ❑ **Παράμετροι προς βελτιστοποίηση:** χωρητικότητα δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και συντελεστές κατείσδυσης (για κάθε ΜΥΑ), υδραυλική αγωγιμότητα κυττάρων που προσομοιώνουν τη δυναμική των πηγών (**διάσταση πεδίου αναζήτησης = 18**)
- ❑ **Λοιπές παράμετροι:** γνωστές από αρχικές διερευνήσεις, με χρήση σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης (περίπου 80 παράμετροι)
- ❑ **Χαρακτηριστικά αλγοριθμικά μεγέθη:** μέγεθος πληθυσμού = 50, αριθμός δοκιμών = 5000

Ανταγωνισμός κριτηρίων σφάλματος



Προκύπτουν μη αποδεκτοί «ανταγωνισμοί» των κριτηρίων σφάλματος στο πεδίο αποτίμησης 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

Περιορισμός του πεδίου τιμών



Συμπεράσματα – Πορεία ολοκλήρωσης

- ❑ Παρά την αλματώδη εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων, υπάρχει περιορισμένη εμπειρία σε υδρολογικές εφαρμογές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με επιχειρησιακό ενδιαφέρον
- ❑ Η πολυκριτηριακή προσέγγιση σε προβλήματα βαθμονόμησης σύνθετων υδρολογικών μοντέλων, και ειδικότερα η μέθοδος που αναπτύσσεται στα πλαίσια της διατριβής, μπορεί να συμβάλει:
 - στη διερεύνηση των αβεβαιοτήτων που προκύπτουν κατά τη διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων
 - στον εντοπισμό αποδεκτών ανταγωνισμών μεταξύ των κριτηρίων καλής προσαρμογής
 - στην κατεύθυνση της αναζήτησης προς προνομιακές περιοχές των πεδίων των παραμέτρων και των κριτηρίων
- ❑ Η **πορεία ολοκλήρωσης** περιλαμβάνει τη διατύπωση ενός γενικού μεθοδολογικού πλαισίου, που χρησιμοποιεί τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε ένα διαδραστικό περιβάλλον, για τον εντοπισμό της «πλέον συμβιβαστικής» βαθμονόμησης

Δημοσιεύσεις που έχουν γίνει

1. Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, The multiobjective evolutionary annealing-simplex method and its application in calibrating hydrological models, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, European Geosciences Union, 2005.
2. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
3. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, E. Rozos, and I. Nalbantis, Calibration of a conjunctive surface-groundwater simulation model using multiple responses, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, Nice, European Geophysical Society, 2003.
4. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, K. Hadjibiros, A. Andreadakis, A. Stamou, A. Katsiri, G.-F. Sargentis, and A. Christofides, A multicriteria approach for the sustainable management of the Plastiras reservoir, Greece, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, Nice, European Geophysical Society, 2003.
5. Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, European Geosciences Union, 2005.
6. 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.