

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

---

Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά  
προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων,  
με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών  
μοντέλων

---

*Παρουσίαση διδακτορικής διατριβής για κρίση*

Ανδρέας Ευστρατιάδης

Ιανουάριος 2008

# Ιστορικό της διατριβής – Αναγνωρίσεις

---

- Διάρκεια: Οκτώβριος 2002 – Νοέμβριος 2007
- Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:
  - Δ. Κουτσογιάννης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
  - Μ. Μιμίκου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
  - Ν. Μαμάσης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.
- Λοιπά μέλη εξεταστικής επιτροπής:
  - Δ. Τολίκας, Καθηγητής Α.Π.Θ.
  - Γ. Καρατζάς, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
  - Ι. Ναλμπάντης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
  - Μ. Καρλαύτης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Το αντικείμενο της διατριβής εντάχθηκε σε ερευνητικό πρόγραμμα του έργου «*Ηράκλειτος: Υποτροφίες Έρευνας με προτεραιότητα στη Βασική Έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*».
- Υποβλήθηκαν 4 ενδιάμεσες ετήσιες εκθέσεις προόδου και παρήχθησαν 12 διεθνείς δημοσιεύσεις (4 σε άρθρα περιοδικών, 1 σε κεφάλαιο βιβλίου, 7 σε πρακτικά συνεδρίων).

# Μέρος Α: Θεωρία βελτιστοποίησης και υπολογιστικά εργαλεία

---

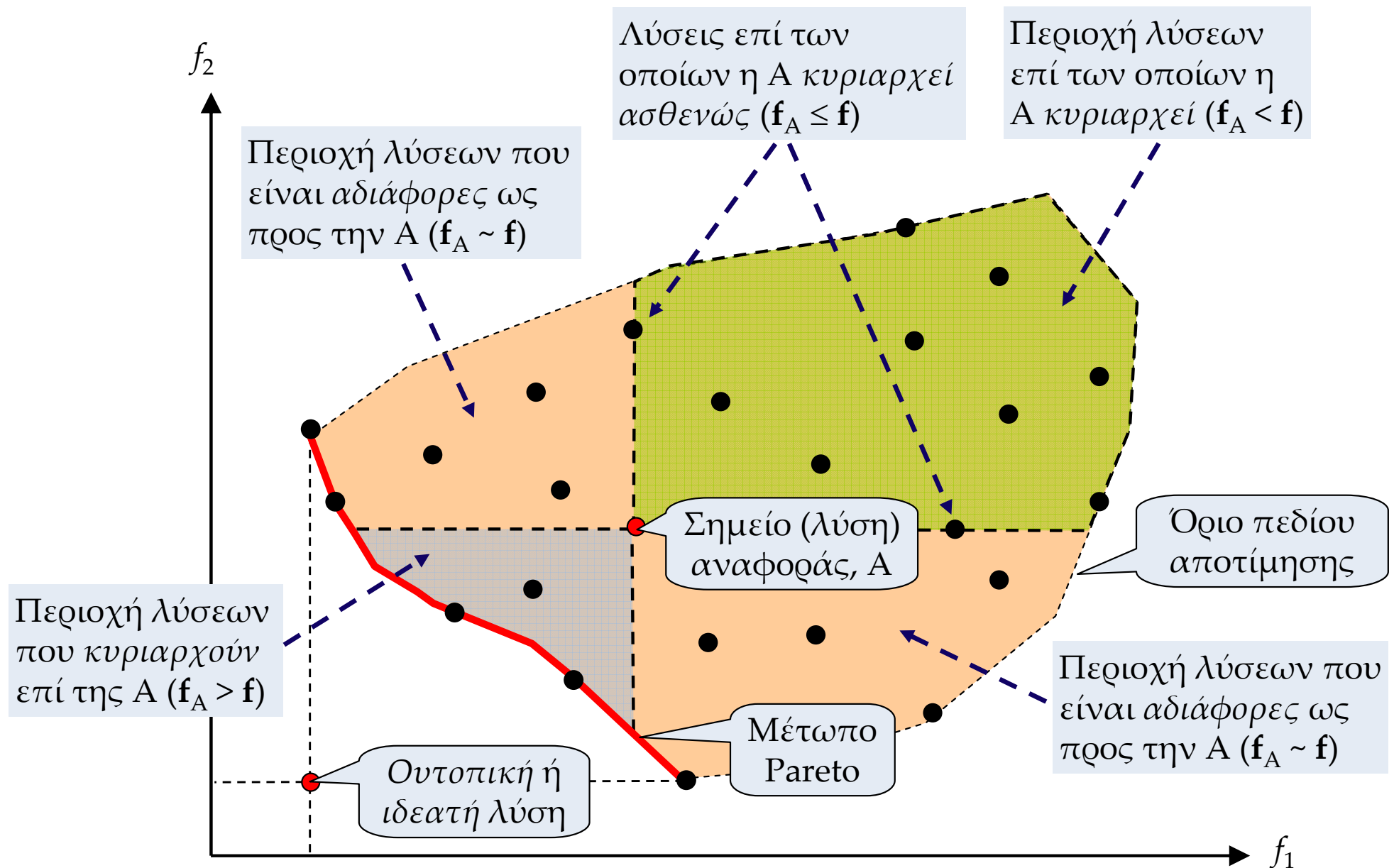
# Ορισμοί και παραδοχές

- ❑ **Στοχική (objective) συνάρτηση:** Μαθηματική έκφραση που αποτελεί το μέτρο της επίδοσης ενός συστήματος ως προς ένα ή περισσότερα κριτήρια ελέγχου· στη γενική περίπτωση, οι τιμές των κριτηρίων υπολογίζονται μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης του εν λόγω συστήματος, οπότε η στοχική συνάρτηση δεν έχει αναλυτική έκφραση και είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ελέγχου της.
- ❑ **Περιορισμοί:** Αφορούν στους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος, που είτε είναι ρητά ενταγμένοι στη στοχική συνάρτηση (ως μέτρα ποινής) ή ενσωματώνονται στο μοντέλο προσομοίωσης.
- ❑ **Βαθμωτή βελτιστοποίηση:** Συστηματική διαδικασία αναζήτησης ενός πεπερασμένου πλήθους σημείων και αποτίμησης αυτών στη βάση μιας βαθμωτής στοχικής συνάρτησης, με σκοπό τον εντοπισμό του σημείου εκείνου για το οποίο μεγιστοποιείται /ελαχιστοποιείται η τιμή της εν λόγω συνάρτησης.
- ❑ **Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση:** Η διαδικασία αναζήτησης των πλέον πρόσφορων ανταγωνισμών μεταξύ των συνιστωσών μιας διανυσματικής ή πολυστοχικής (multiobjective) συνάρτησης.

# Βελτιστοποίηση βαθμωτών και διανυσματικών στοχικών συναρτήσεων

	Βαθμωτή βελτιστοποίηση	Διανυσματική βελτιστοποίηση
Μεταβλητές ελέγχου	$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$	$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$
Στοχική συνάρτηση	$f(\mathbf{x})$	$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]$
Πεδίο ορισμού	$\mathcal{X} \subseteq \mathcal{R}^n$	$\mathcal{X} \subseteq \mathcal{R}^n$
Πεδίο τιμών	$\mathcal{F} \subseteq \mathcal{R}$	$\mathcal{F} \subseteq \mathcal{R}^m$
Σύγκριση λύσεων (θεωρείται πρόβλημα ελαχιστοποίησης)	Η λύση $\mathbf{x}_1$ υπερτερεί της $\mathbf{x}_2$ αν $f(\mathbf{x}_1) < f(\mathbf{x}_2)$	Η λύση $\mathbf{x}_1$ υπερτερεί της $\mathbf{x}_2$ αν $f_j(\mathbf{x}_1) < f_j(\mathbf{x}_2)$ για κάθε συνιστώσα $j = 1, \dots, m$
Εφικτότητα απόλυτα βέλτιστης λύσης	Η λύση $\mathbf{x}^*$ είναι ολικά βέλτιστη αν $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$ για κάθε $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$	Εφόσον τα κριτήρια είναι αντικρουόμενα, δεν υπάρχει εφικτό σημείο $\mathbf{x}^*$ τέτοιο ώστε $f_j(\mathbf{x}^*) \leq f_j(\mathbf{x})$ για κάθε $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ και για κάθε $j = 1, \dots, m$

# Η έννοια της κυριαρχίας – Το μέτωπο Pareto



# Η έννοια του βέλτιστου Pareto

- Ορισμοί βελτίστου διανυσματικών συναρτήσεων (θεωρείται πρόβλημα ελαχιστοποίησης των κριτηρίων):
  - Ένα εφικτό διάνυσμα  $\mathbf{x}^* \in \mathcal{X}$  είναι βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει άλλο εφικτό διάνυσμα  $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$  τέτοιο ώστε  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$ .
  - Ένα εφικτό διάνυσμα  $\mathbf{x}^* \in \mathcal{X}$  είναι βέλτιστο αν δεν υπάρχει άλλο διάνυσμα  $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$  που να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο  $f_i$  χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο  $f_j$ .
- Οι παραπάνω ορισμοί οδηγούν σε ένα σύνολο εφικτών λύσεων  $\mathbf{x}^*$  που καλούνται βέλτιστες Pareto ή μη κατώτερες (non-inferior) ή μη κυριαρχούμενες (non-dominated), συμβολίζεται με  $\mathcal{X}^*$  και καλείται σύνολο Pareto (Pareto set). Η απεικόνισή του  $\mathcal{F}^*$  ορίζει ένα υποσύνολο του πεδίου αποτίμησης  $\mathcal{F}$ , που καλείται μέτωπο Pareto (Pareto front).
- Τα βέλτιστα Pareto σημεία μιας διανυσματικής συνάρτησης είναι μαθηματικά ισοδύναμα· στην πράξη, εφόσον απαιτείται η επιλογή μιας μοναδικής λύσης, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού του καλύτερα συμβιβαστικού (best-compromise) εξ αυτών, είτε κατά την κρίση του αναλυτή ή βάσει ενός βαθμωτού μέτρου συνάθροισης των κριτηρίων, που καλείται συνάρτηση χρησιμότητας (utility function).

# Κλασικές τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης

- Επιδιώκεται η εύρεση μιας μεμονωμένης λύσης, βελτιστοποιώντας τη στοχική συνάρτηση ενός μονοκριτηριακού προβλήματος, που θεωρείται ότι ταυτίζεται με τη συνάρτηση χρησιμότητας του αρχικού.
- Τα χαρακτηριστικά της εν λόγω λύσης εκφράζονται με τη μορφή βαρών, τιμών-στόχων ή προτεραιοτήτων, που προσδιορίζονται εκ των προτέρων (πριν τη βελτιστοποίηση), με τρόπο υποκειμενικό/εμπειρικό.
- Διαφοροποιώντας τη διατύπωση του μετασχηματισμένου προβλήματος και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αναζήτησης, είναι δυνατός ο εντοπισμός εναλλακτικών μη κατώτερων λύσεων.
- Τα μειονεκτήματα της παραπάνω προσέγγισης είναι:
  - Αυθαίρετη διατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας, που δεν αποκλείει την «καθοδήγηση» της διαδικασίας σε μια προαποφασισμένη επιλογή·
  - Βήμα-προς-βήμα προσέγγιση του μετώπου Pareto – υπολογιστικός φόρτος·
  - Αριθμητικές δυσχέρειες (ευαισθησία στο σχήμα του μετώπου Pareto, αδυναμία εντοπισμού μη κυρτών περιοχών του, προβλήματα κλίμακας εξαιτίας της συνάθροισης μη συμμετρούμενων κριτηρίων, εισαγωγή περιορισμών)·
  - Αδυναμία αναγνώρισης των ανταγωνισμών των κριτηρίων.



# Σύγχρονες πολυκριτηριακές προσεγγίσεις

- Επιδιώκεται ο ταυτόχρονος εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος μη κατωτέρων λύσεων, με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.
- Διατηρούνται οι τυπικές παραγωγικές διαδικασίες (διασταύρωση, μετάλλαξη), ενώ η διαδικασία επιλογής γίνεται με βάση:
  - ένα μέτρο κυριαρχίας, με το οποίο κάθε άτομο κατατάσσεται/ταξινομείται με βάση τη σχετική του θέση στο πεδίο αποτίμησης, εξασφαλίζοντας σύγκλιση του πληθυσμού προς το μέτωπο Pareto.
  - ένα μέτρο διασποράς, που ευνοεί την επιλογή ατόμων που έχουν λιγότερα άλλα μέλη του πληθυσμού στη γειτονιά τους, εξασφαλίζοντας μια ομοιόμορφη κατανομή του τελικού δείγματος στο μέτωπο Pareto.
- Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει ένα μέτρο καταλληλότητας, βάσει του οποίου διαμορφώνεται μια τεχνητή επιφάνεια απόκρισης που αναπροσαρμόζεται σε κάθε γενιά· η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιείται πάνω στην εν λόγω επιφάνεια, όντας αντίστοιχη της αναζήτησης ακροτάτων μιας μη γραμμικής βαθμωτής συνάρτησης.
- Οι σύγχρονες προσεγγίσεις προσβλέπουν, επιπλέον, σε προστασία των καλών λύσεων, με την εφαρμογή σχημάτων εκλεκτισμού (elitism).

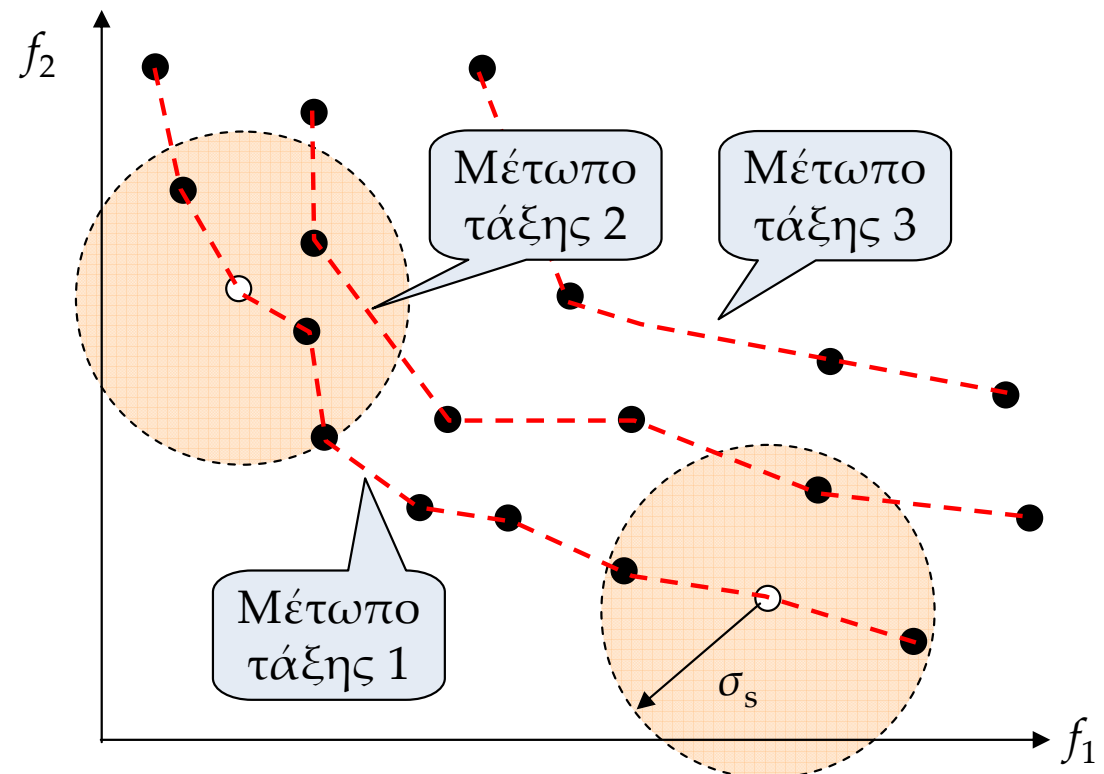
# Παράδειγμα 1: Η μέθοδος NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm· Srinivas & Deb, 1993)

- Ο πληθυσμός ομαδοποιείται σε μέτωπα (fronts), όπου το πρώτο περιλαμβάνει τις μη κατώτερες λύσεις του συνόλου του πληθυσμού, το δεύτερο τις μη κατώτερες λύσεις όλου του πληθυσμού πλην των μελών του πρώτου, κοκ. Σε κάθε μέτωπο αντιστοιχεί ένας κοινός δείκτης κατάταξης ή αλλιώς τάξη (rank).

- Η τάξη διαιρείται με ένα μέτρο πυκνότητας, που ορίζεται με βάση μια συνάρτηση συσσώρευσης (sharing function) της μορφής:

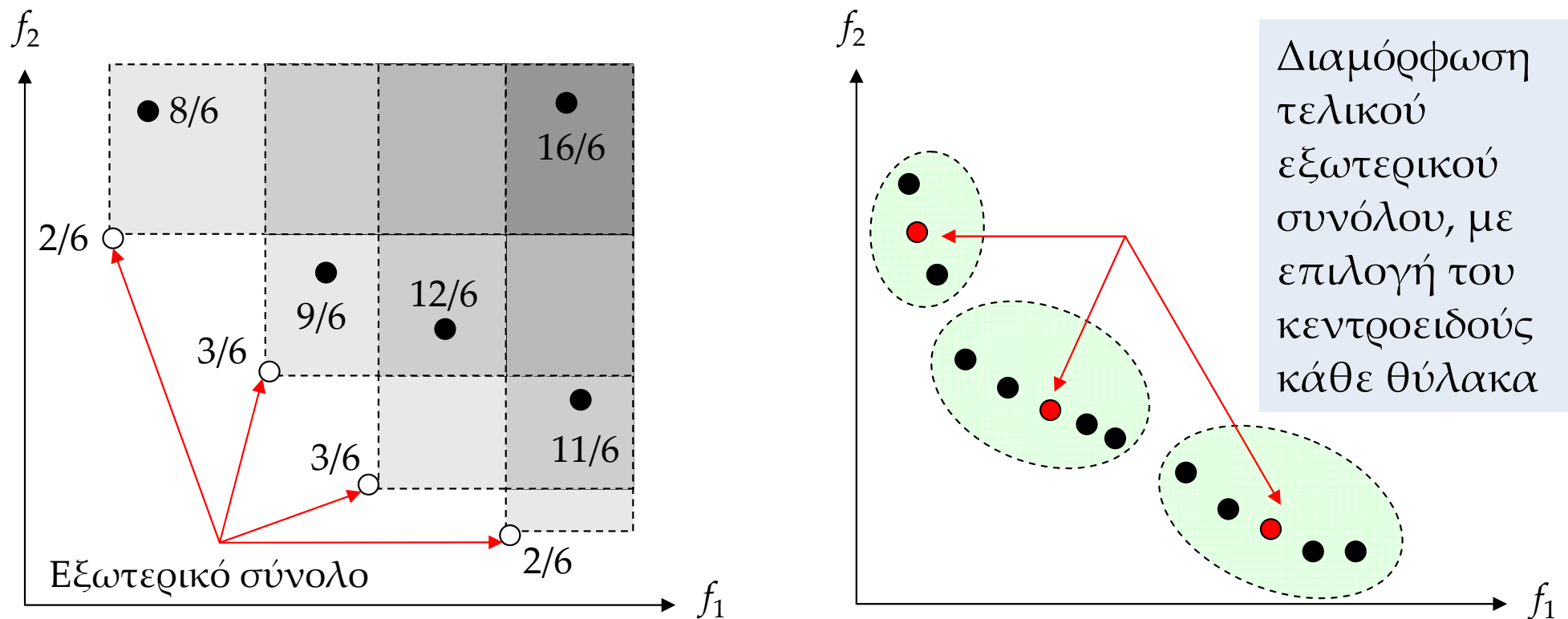
$$s(d_{ij}) = 1 - (d_{ij} / \sigma_s)^2, \text{ αν } d_{ij} < \sigma_s$$

όπου  $d_{ij}$  η ευκλείδεια απόσταση κάθε ζεύγους σημείων  $i, j$  και  $\sigma_s$  παράμετρος γνωστή ως ακτίνα θύλακα.



# Παράδειγμα 2: Η μέθοδος SPEA (Strength-Pareto Evolutionary Algorithm· Zitzler *et al.*, 2001)

- ❑ Οι μη κατώτερες λύσεις διατηρούνται σε ένα εξωτερικό σύνολο δεδομένης χωρητικότητας, κάθε μέλος του οποίου αποτιμάται με βάση το πλήθος των ατόμων επί των οποίων κυριαρχεί (ισχύς, strength).
- ❑ Τα λοιπά μέλη του πληθυσμού αποτιμώνται με βάση την ισχύ των μελών του εξωτερικού συνόλου που κυριαρχούν επ' αυτών.



# Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου

- Ευρετική μέθοδος ολικής βελτιστοποίησης που υλοποιεί:
  - μια διαδικασία εξελικτικής αναζήτησης, για την παράλληλη διερεύνηση του εφικτού χώρου από ένα δείγμα (πληθυσμό) σημείων.
  - ένα πλέγμα κανόνων εξέλιξης, που βασίζονται σε ένα τροποποιημένο σχήμα κατερχόμενου απλόκου (downhill simplex) και σε διαδικασίες μετάλλαξης που εγγυώνται αύξηση της διασποράς του πληθυσμού.
  - μια στρατηγική προσομοιωμένης ανόπτωσης (simulated annealing), με ένα αυτορρυθμιζόμενο χρονοδιάγραμμα, για έλεγχο της τυχαιότητας κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας των μελών του πληθυσμού.
- Εισάγονται ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό εύρος των μεταβλητών ελέγχου, το πρώτο (χαλαρό) για τη γέννηση του αρχικού πληθυσμού και το δεύτερο (δεσμευτικό) για την οριοθέτηση του εφικτού χώρου.
- 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.

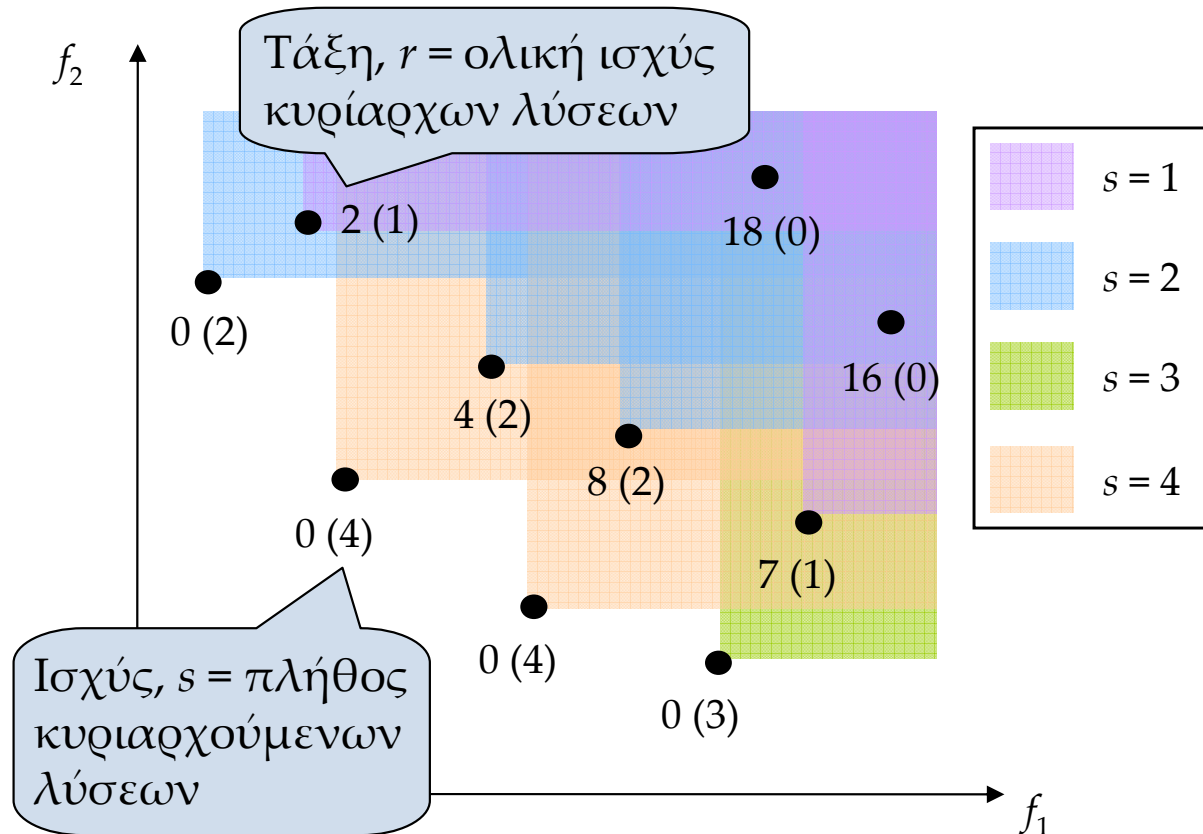
# Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (MEAS)

---

- Διαμορφώνεται ένα σύνθετο μέτρο ποινής, με συνιστώσες:
  - έναν ακέραιο βαθμό τάξης, που αποτιμά τη σχετική επίδοση κάθε σημείου με βάση τον αριθμό των ατόμων επί των οποίων κυριαρχεί και τον αριθμό των ατόμων ως προς τα οποία κυριαρχείται.
  - έναν βαθμό τάξης που επιτρέπει τη σύγκριση ενός σημείου σε σχέση με αδιάφορες, ως προς αυτό, λύσεις (για προβλήματα 3 κριτηρίων και άνω).
  - έναν όρο που εξαρτάται από την πυκνότητα του πληθυσμού στη γειτονιά κάθε σημείου, ήτοι το ποσοστό λύσεων που ανήκουν σε κοινούς θύλακες.
  - έναν όρο εφικτότητας, που εισάγει ποινή αν κάποια λύση βρίσκεται εκτός ενός επιθυμητού εύρους διακύμανσης των τιμών των κριτηρίων.
- Η αναζήτηση βασίζεται στο σχήμα ανόπτησης-απλόκου, στο οποίο:
  - εμποδίζονται κινήσεις «σύγκλισης» (π.χ. συρρίκνωση απλόκου), ώστε να μεγιστοποιείται η διασπορά του πληθυσμού.
  - διαμορφώνεται ένα μικτό σχήμα μετάλλαξης, για παραγωγή τόσο «κοντινών» όσο και «μακρινών» λύσεων.
  - εισάγεται η έννοια της «επανανόπτησης» (re-annealing).

# Ορισμός βαθμού τάξης

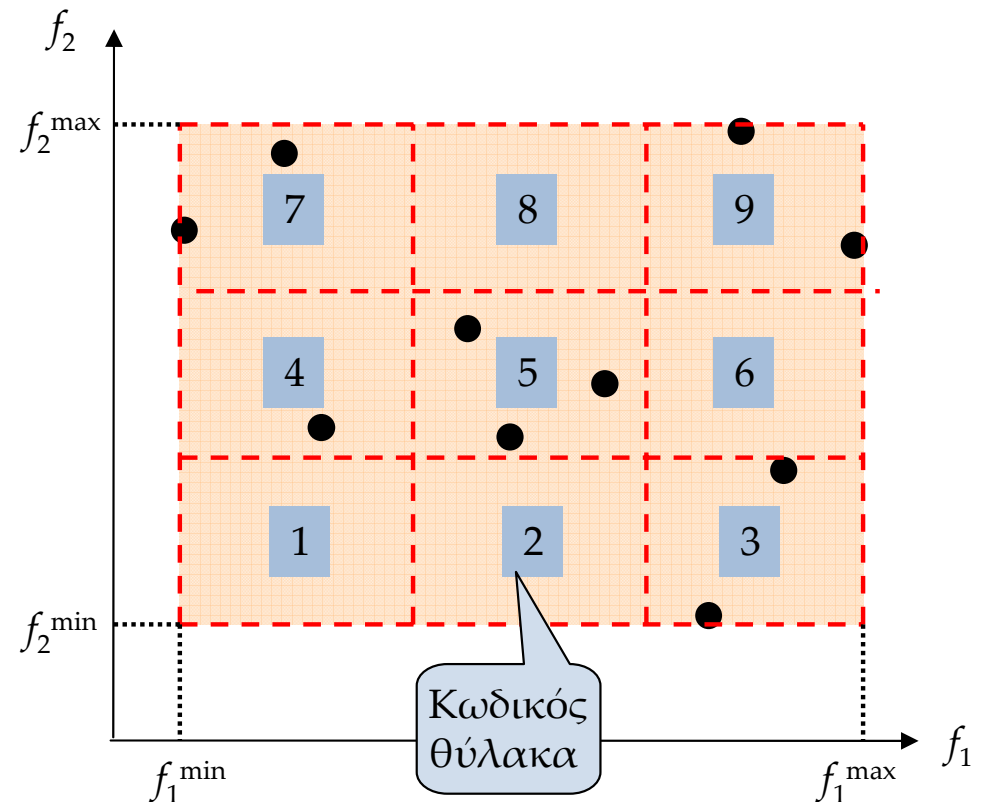
- Η αρχική ιδέα προέρχεται από τις μεθόδους SPEA και SPEA-II.
- Εισάγεται η έννοια του μητρώου κυριαρχίας, που υπολογίζεται σε κάθε γενιά (μόνο τα στοιχεία πάνω από τη διαγώνιο).
- Το σχήμα αποτίμησης εξασφαλίζει εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία τιμών, σε σύγκριση με άλλες γνωστές μεθόδους της βιβλιογραφίας.



Η έννοια της κυριαρχίας γενικεύεται για προβλήματα 3 κριτηρίων και άνω, προσθέτοντας έναν δεκαδικό όρο, που εκφράζει το μέσο ποσοστό κριτηρίων έναντι των οποίων υπολείπεται κάθε άτομο, σε σχέση με τις αδιάφορες ως προς αυτό λύσεις (εξ ορισμού 0.5, σε προβλήματα 2 κριτηρίων).

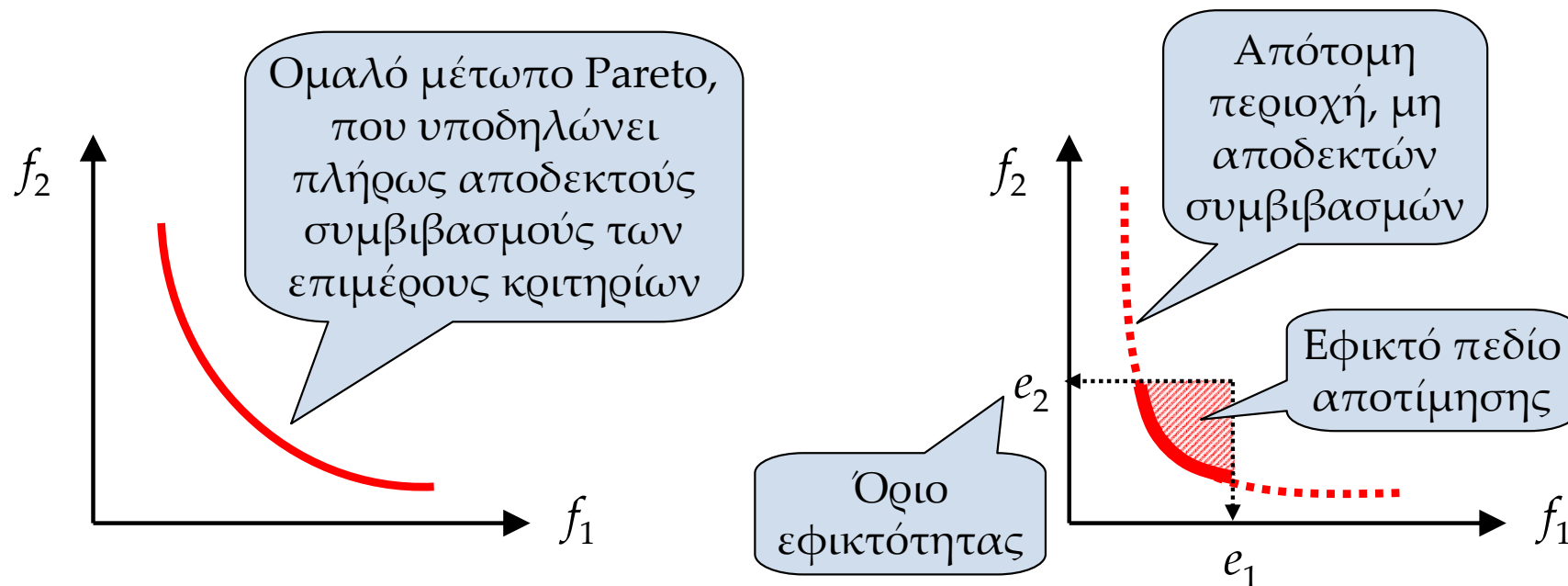
# Έλεγχος πυκνότητας πληθυσμού

- Διαμορφώνεται ένα πλέγμα προκαθορισμένης πυκνότητας, με βάση το εύρος διακύμανσης του τρέχοντος πληθυσμού, και σε κάθε «υπερ-κιβώτιο» (θύλακα) αποδίδεται ένας μοναδικός κωδικός.
- Με βάση τον εν λόγω κωδικό, μπορεί εύκολα να εντοπιστεί το πλήθος ατόμων που μοιράζονται το ίδιο θύλακα, συναρτήσει του οποίου ορίζεται ένα μέτρο πυκνότητας.
- Το εν λόγω μέτρο, που εκφράζει το ποσοστό των γειτόνων κάθε ατόμου, εξασφαλίζει προστασία των απομονωμένων λύσεων, που βρίσκονται σε ακραίους θύλακες, και στα τελικά στάδια της εξελικτικής διαδικασίας κινδυνεύουν με αφανισμό, αν ληφθεί υπόψη αποκλειστικά η σχέση κυριαρχίας του με τον υπόλοιπο πληθυσμό.



# Οι έννοιες της εφικτότητας στα πεδία αναζήτησης και αποτίμησης

- **Εφικτότητα πεδίου αναζήτησης:** Θεσπίζεται ένα διπλό εύρος μεταβολής των μεταβλητών ελέγχου, που αντιπροσωπεύουν τα φυσικά και επιθυμητά τους όρια, αντίστοιχα· ο αρχικός πληθυσμός γεννάται στα εσωτερικά όρια, αλλά μπορεί να εξελιχθεί μέχρι τα εξωτερικά.
- **Εφικτότητα πεδίου αποτίμησης:** Ορίζονται άνω όρια τιμών των (προς ελαχιστοποίηση) κριτηρίων, εξασφαλίζοντας την παραγωγή πρόσφορων, στην πράξη, βέλτιστων Pareto λύσεων.





# Επιλογή μέσω προσομοιωμένης ανόπτωσης

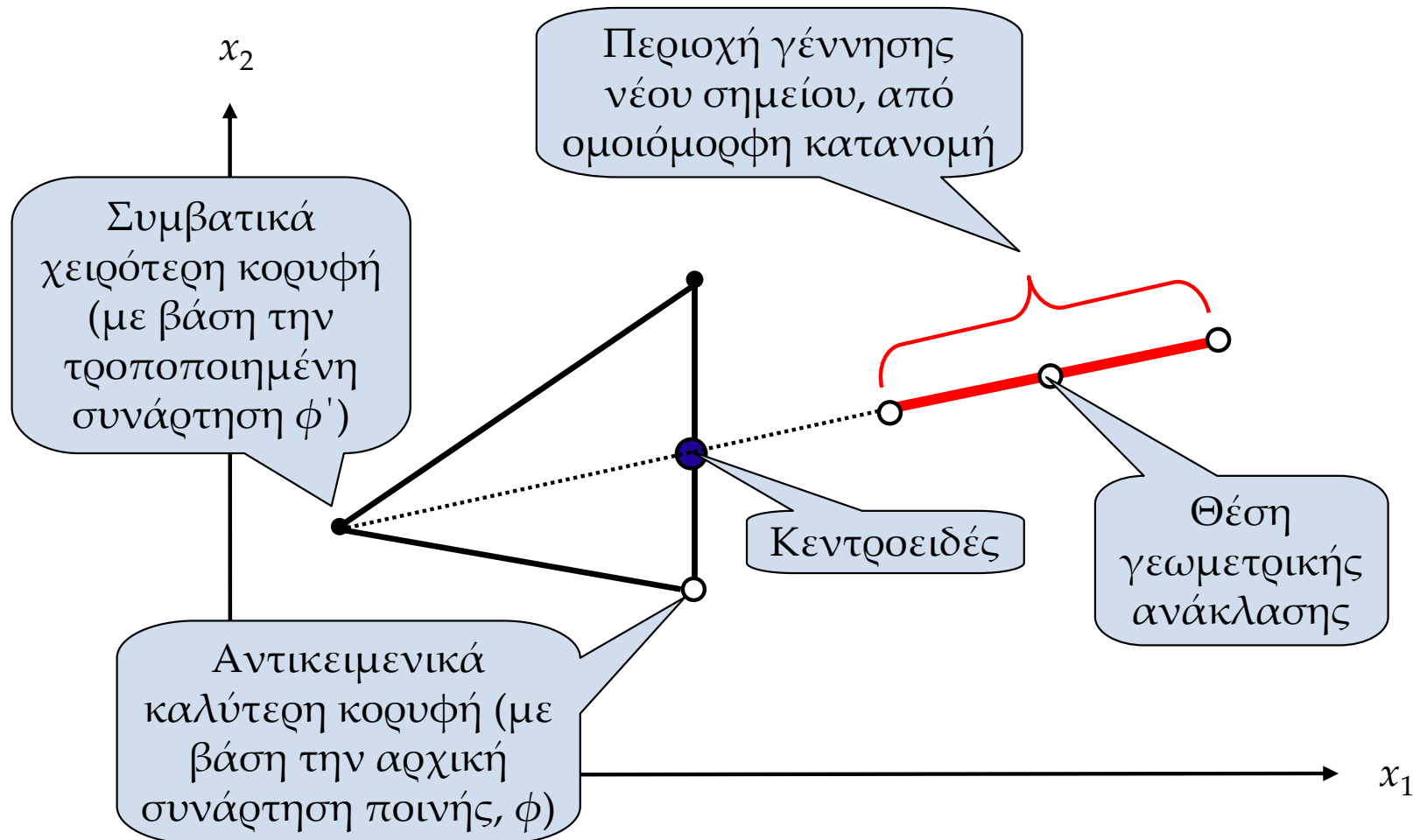
- Σε κάθε γενιά παράγεται ένας και μόνο απόγονος, αντικαθιστώντας το μέλος του πληθυσμού στο οποίο αποδίδεται η μικρότερη πιθανότητα επιβίωσης, με βάση το στοχαστικό κριτήριο:

$$\phi'(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}) + r T$$

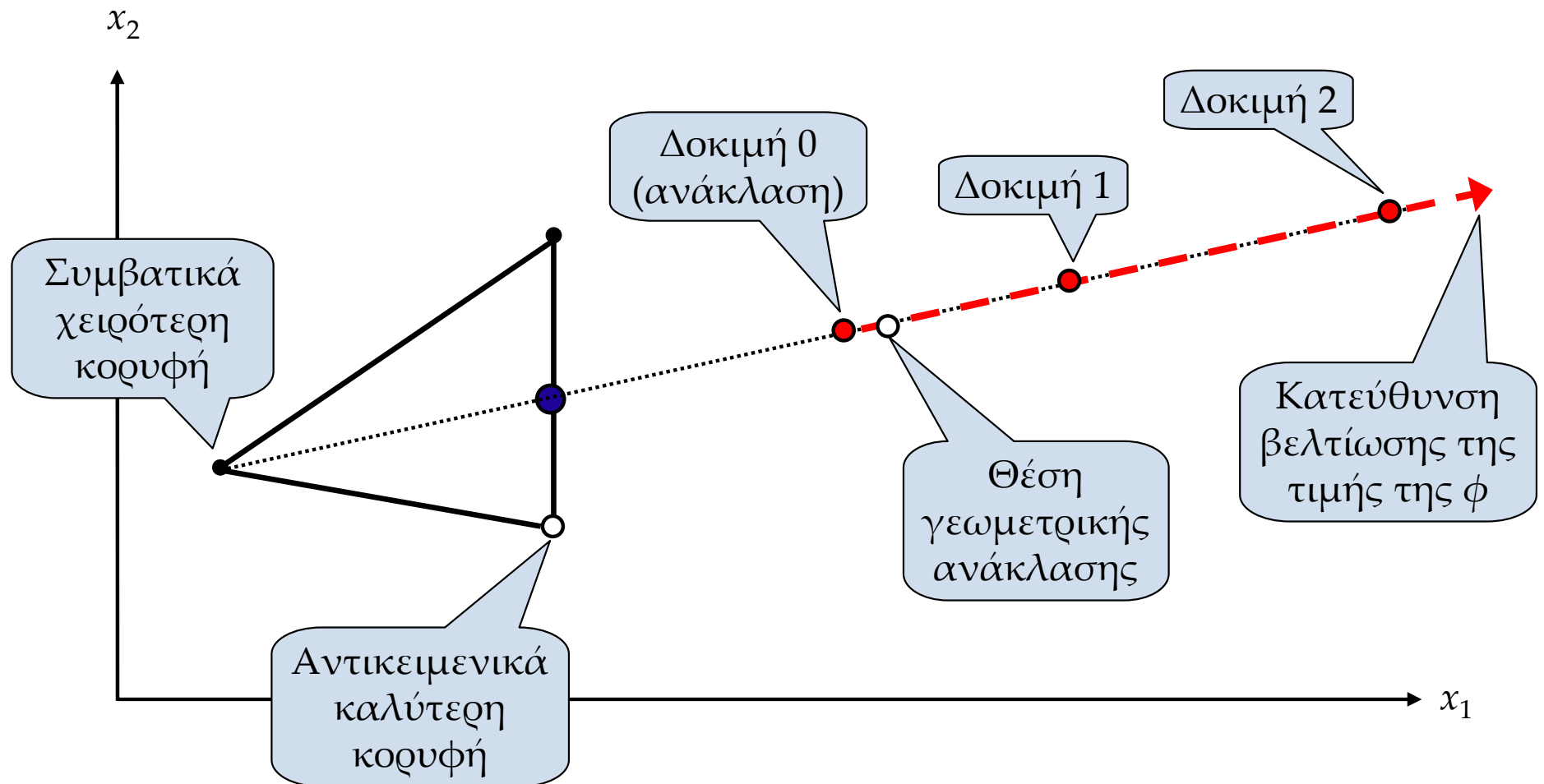
όπου  $\phi(\mathbf{x})$  η συνάρτηση ποινής,  $T$  η τρέχουσα «θερμοκρασία» και  $r$  τυχαίος αριθμός που παράγεται από ομοιόμορφη κατανομή  $[0, 1]$ .

- Η  $\phi'(\mathbf{x})$  αποτελεί την προς ελαχιστοποίηση στοχική συνάρτηση ενός μετασχηματισμένου προβλήματος ολικής βελτιστοποίησης.
- Η «θερμοκρασία» του συστήματος:
  - τίθεται αρχικά ίση με τη μέγιστη διαφορά τιμών της συνάρτησης ποινής στον αρχικό πληθυσμό.
  - μειώνεται κατά έναν παράγοντα  $\lambda$  κάθε φορά που εντοπίζεται μια βελτιωμένη λύση (τυπικό εύρος  $\lambda = 0.95 - 0.99$ ).
  - δεν επιτρέπεται να υπερβεί ένα πολλαπλάσιο  $\beta$  της μέγιστης διαφοράς της συνάρτησης ποινής στον πληθυσμό (τυπικό εύρος  $\beta = 1 - 2$ ).
  - κάθε φορά που φτάνει σε μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή  $T_{\min}$  αυξάνει μέχρι την τιμή 1 (τυπική τιμή  $T_{\min} = 0.1$ ).

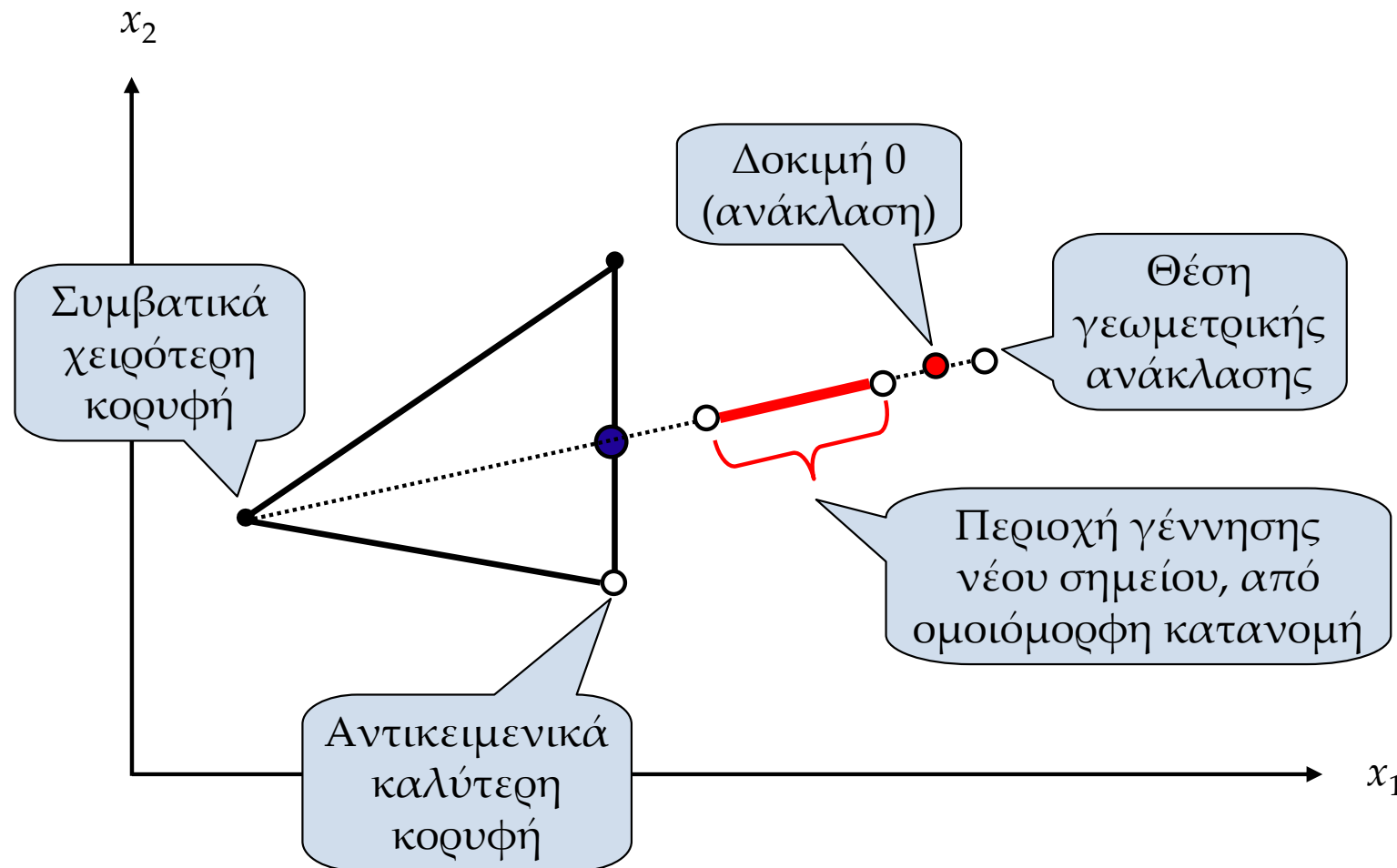
# Εξέλιξη μέσω ενός γενικευμένου σχήματος κατερχόμενου απλόκου: Ανάκλαση



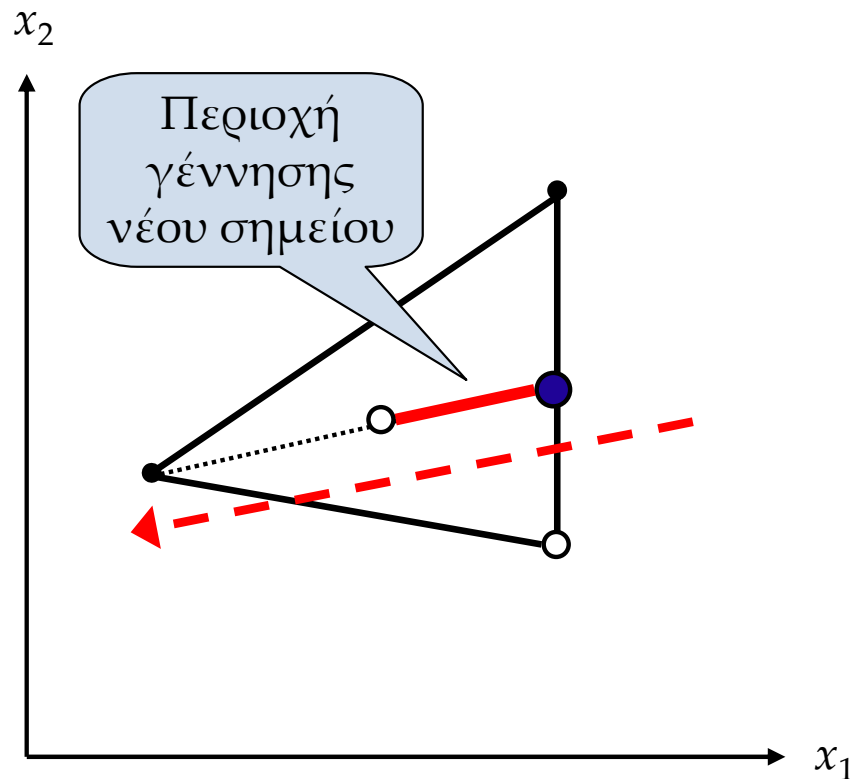
# Εξέλιξη μέσω ενός γενικευμένου σχήματος κατεχόμενου απλόκου: Πολλαπλή επέκταση



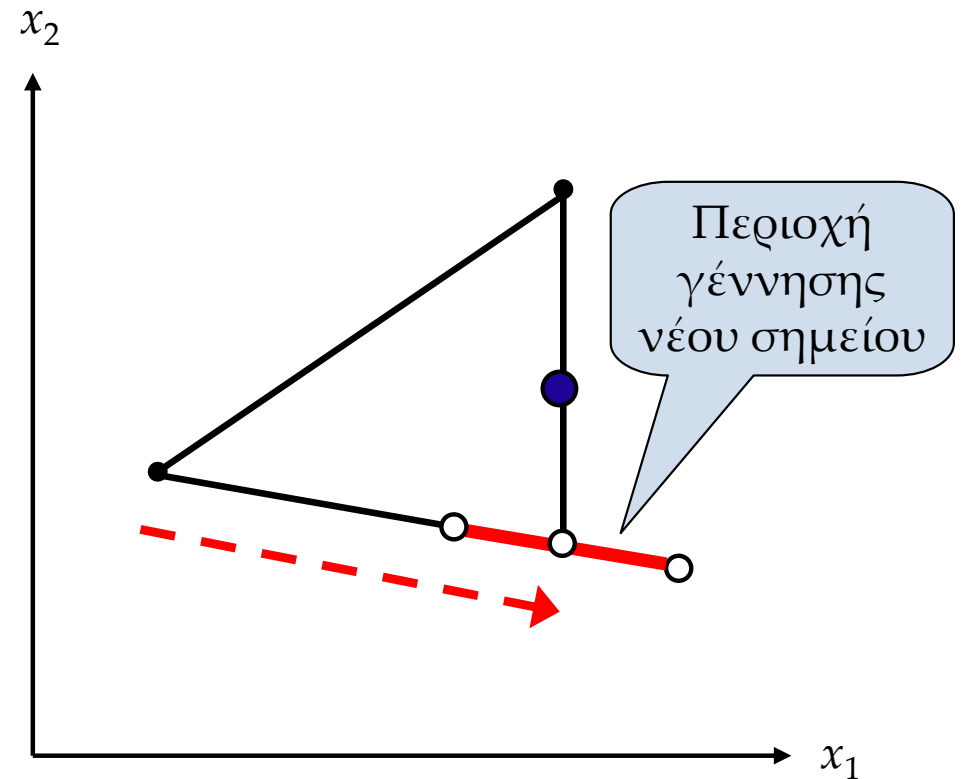
# Εξέλιξη μέσω ενός γενικευμένου σχήματος κατεχόμενου απλόκου: Εξωτερική συμπίεση



# Εξέλιξη μέσω ενός γενικευμένου σχήματος απλόκου: Εσωτερική συμπίεση και έλξη προς την καλύτερη κορυφή



Εσωτερική συμπίεση  
προς το κεντροειδές



Έλξη στην κατεύθυνση  
της καλύτερης κορυφής

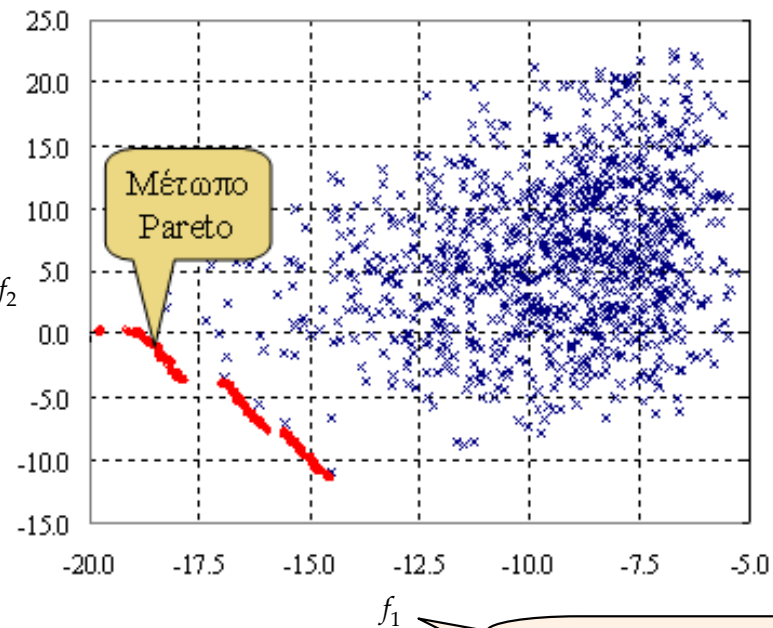
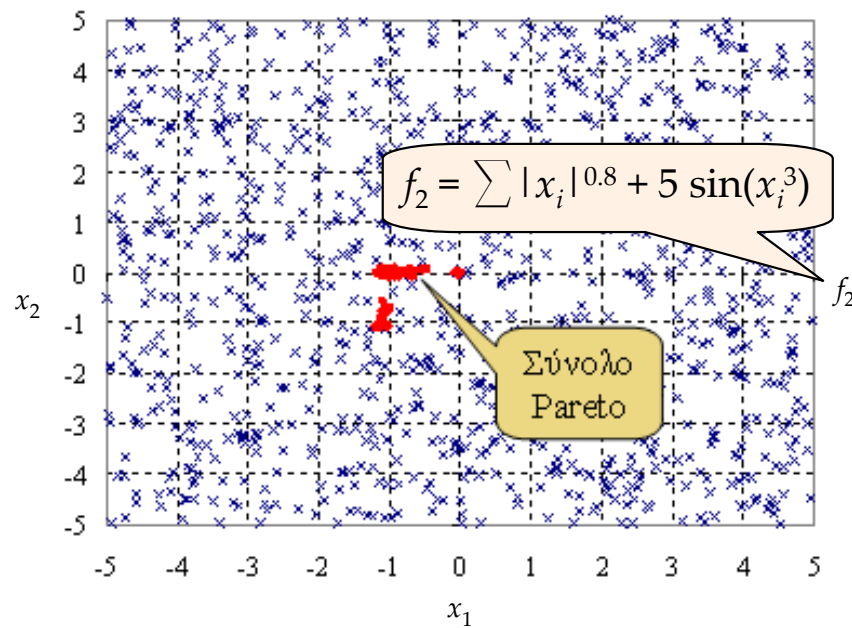
# Εξέλιξη μέσω μετάλλαξης – Τερματισμός

- Αν κανένας από τους μετασχηματισμούς εξωτερικής επέκτασης του απλόκου (ανάκλαση, πολλαπλή επέκταση, εξωτερική συμπίεση) δεν οδηγήσει σε βελτιωμένη λύση, τότε ο απόγονος γεννάται είτε στο εσωτερικό του απλόκου είτε μέσω μετάλλαξης, με συχνότητες  $1 - p_m$  και  $p_m$ , αντίστοιχα (τυπική τιμή  $p_m = 10\%$ ).
- Εφαρμόζονται δύο εναλλακτικές συναρτήσεις μετάλλαξης, με ίση πιθανότητα 50%. η πρώτη (μετάλλαξη μεγάλης κλίμακας) αποσκοπεί στη γέννηση τυχαίων λύσεων στατιστικά μακριά από το κέντρο βάρους του πληθυσμού, ενώ η δεύτερη (μετάλλαξη μικρής κλίμακας) παράγει λύσεις στη «γειτονιά» του προς αντικατάσταση ατόμου.
- Η χρήση μικτών τελεστών μετάλλαξης εξασφαλίζει ευελιξία σε επιφάνειες απόκρισης με διαφορετικά χαρακτηριστικά.
- Η εξελικτική διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιούνται ταυτόχρονα τα ακόλουθα κριτήρια:
  - όλα τα μέλη του πληθυσμού είναι εφικτά στο πεδίο αποτίμησης.
  - όλα τα μέλη του πληθυσμού είναι βέλτιστα Pareto.
  - το πλήθος των δοκιμών έχει ξεπεράσει μια οριακή τιμή.

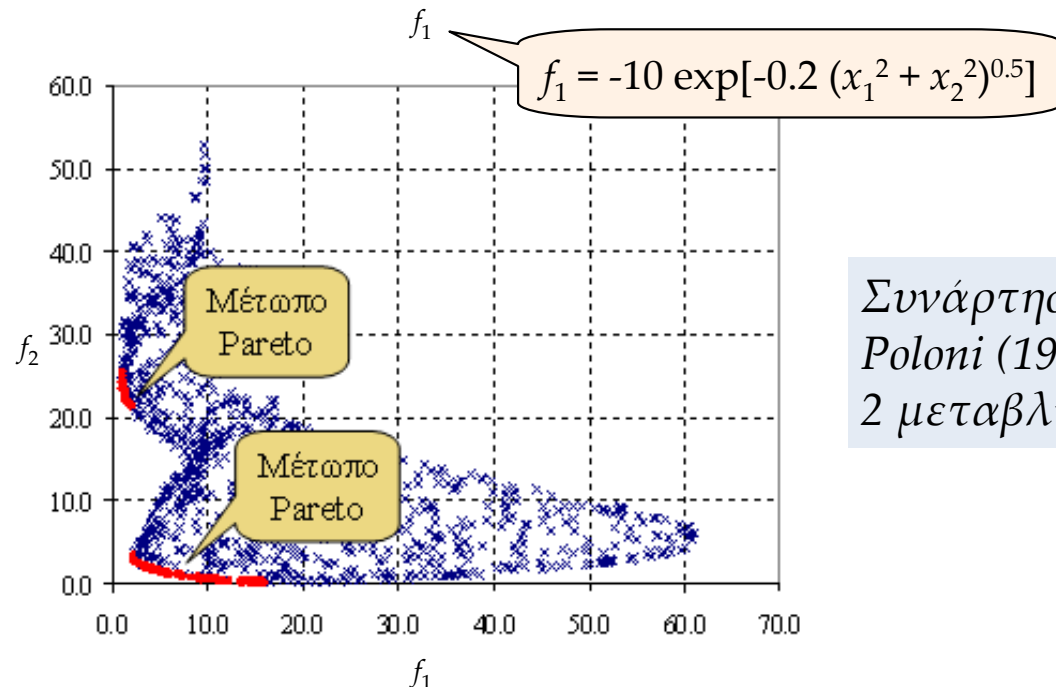
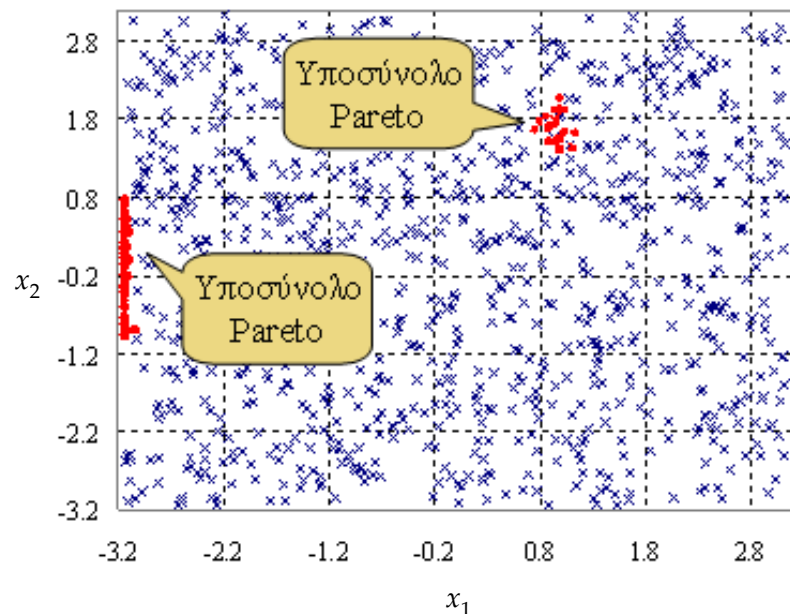
# Συγκριτική αξιολόγηση αλγορίθμων

- Αξιολογήθηκαν οι μέθοδοι NSGA, SPEA και MEAS με βάση 11 τυπικές συναρτήσεις ελέγχου (test functions) δύο κριτηρίων, που διαφοροποιούνται ως προς το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου και τη γεωμετρία του μετώπου Pareto (συνεχές ή μη, κυρτό ή μη κυρτό, συνδεδεμένο ή μη).
- Κάθε πρόβλημα επιλύθηκε 10 φορές, για διαφορετικούς αρχικούς πληθυσμούς 100 τυχαίων σημείων, με όριο δοκιμών τις 10 000. Ο μέσος όρος των μη κατωτέρων λύσεων και των απαιτούμενων δοκιμών αποτέλεσαν μέτρα επίδοσης της ακρίβειας και ταχύτητας, αντίστοιχα.
- Διερευνήθηκαν εναλλακτικές δομές των αλγορίθμων NSGA και SPEA:
  - με δυαδική ή πραγματική κωδικοποίηση των μεταβλητών ελέγχου.
  - με μήκος συμβολοσειράς 10 ή 100, αν η κωδικοποίηση είναι δυαδική.
  - με μονόπλευρη (ανταλλαγή συντεταγμένων) ή ομοιόμορφη διασταύρωση των γονέων, αν η κωδικοποίηση είναι πραγματική.
- Για τη μέθοδο MEAS διερευνήθηκαν διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $\lambda$  και  $\beta$  του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης και της συχνότητας μετάλλαξης  $p_m$  – η μέθοδος αποδείχθηκε ευαίσθητη μόνο όσον αφορά στα δυσχερή προβλήματα, όπου προτείνεται η θεώρηση υψηλής τιμής της  $p_m$ .

# Χαρακτηριστικές συναρτήσεις ελέγχου (1)



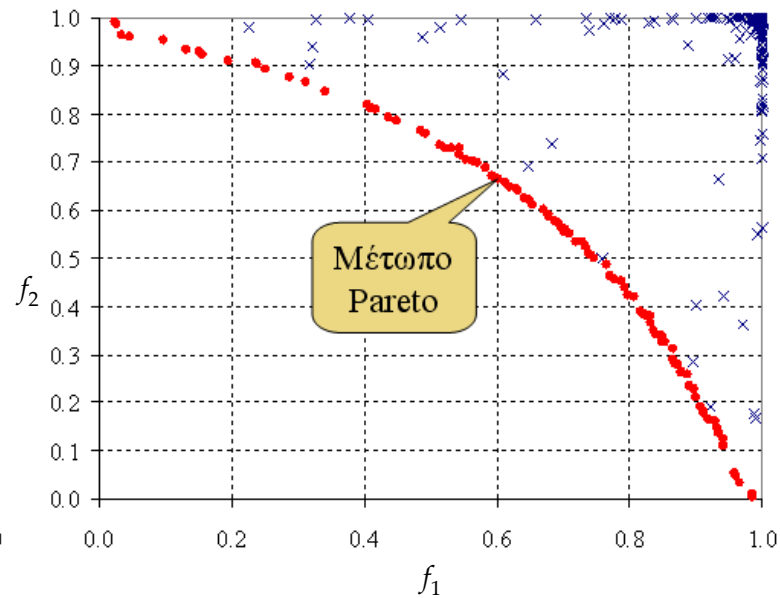
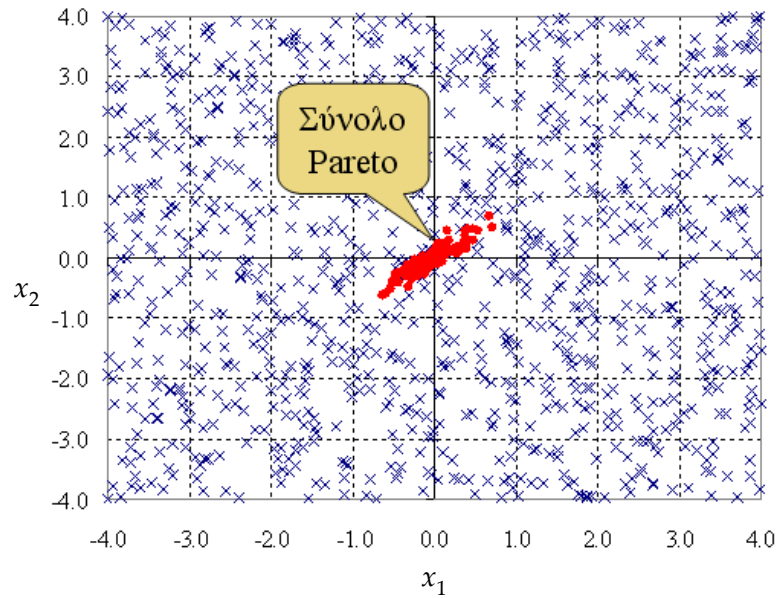
Συνάρτηση  
Kursawe (1991),  
3 μεταβλητών



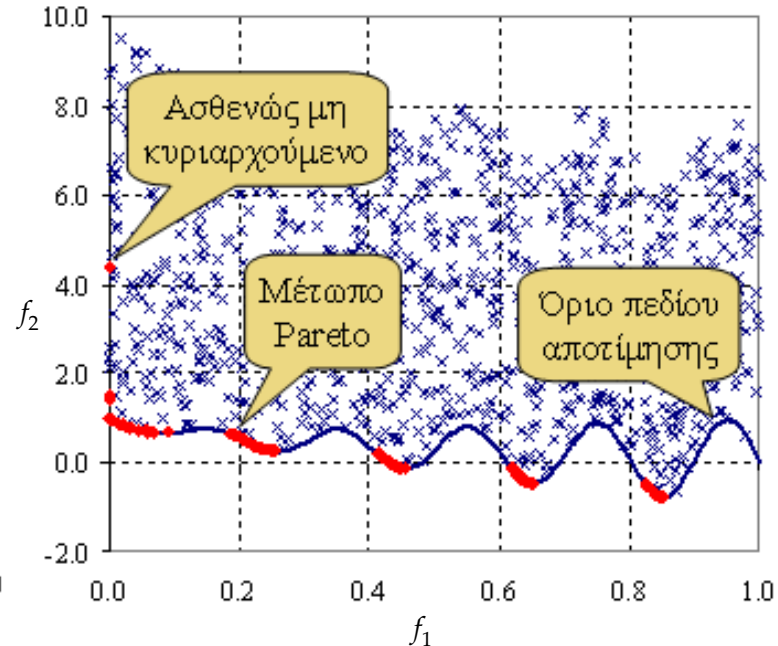
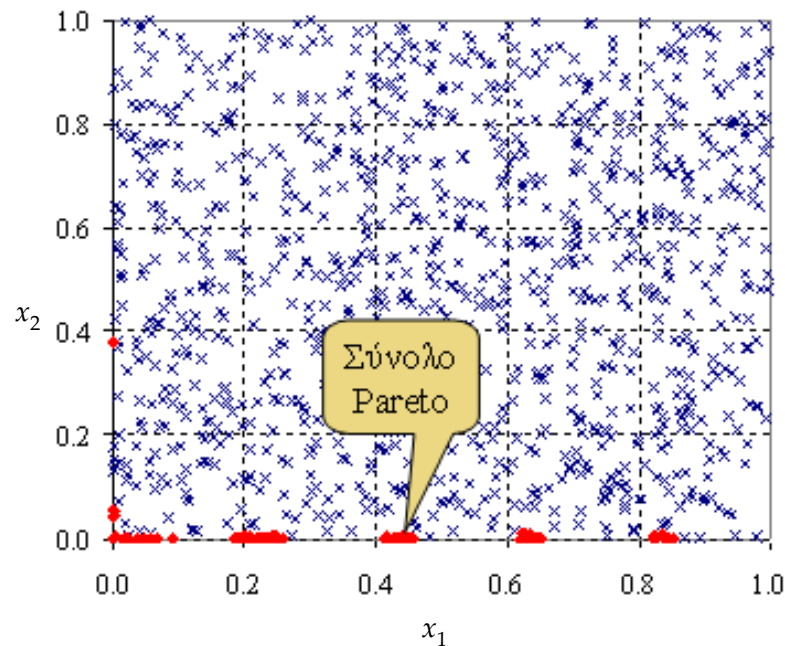
Συνάρτηση  
Poloni (1997),  
2 μεταβλητών



# Χαρακτηριστικές συναρτήσεις ελέγχου (2)



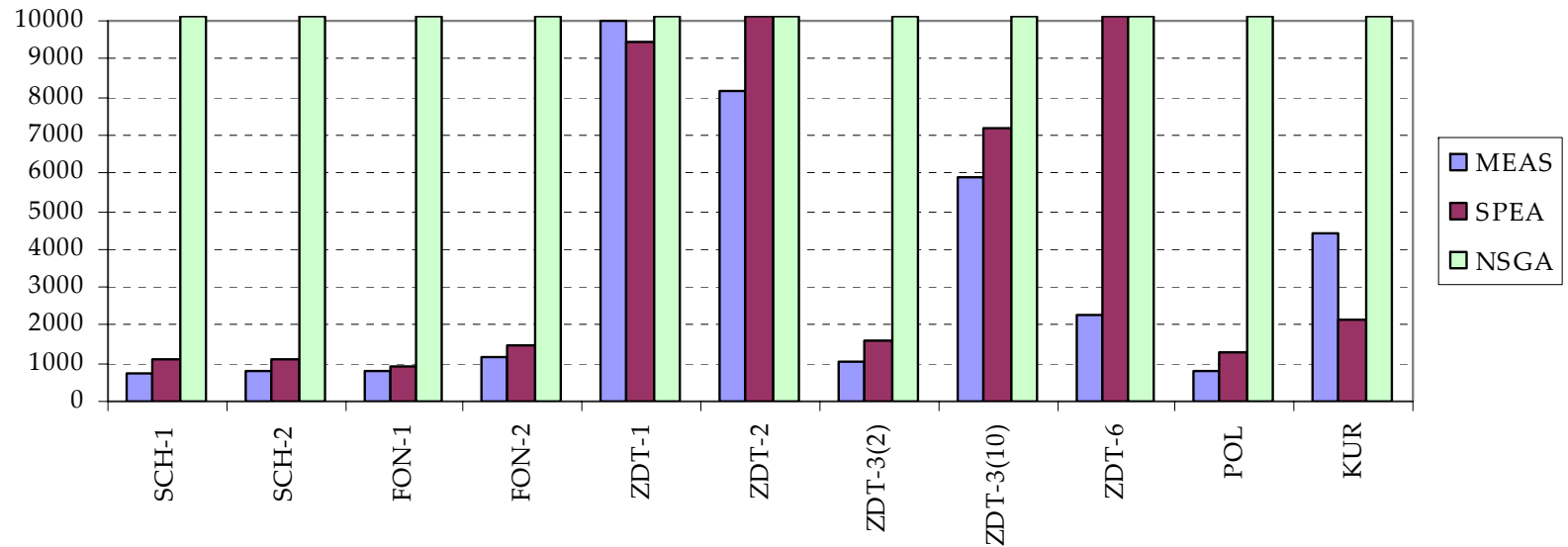
Συνάρτηση  
Fonseca II  
(1995), 3  
μεταβλητών



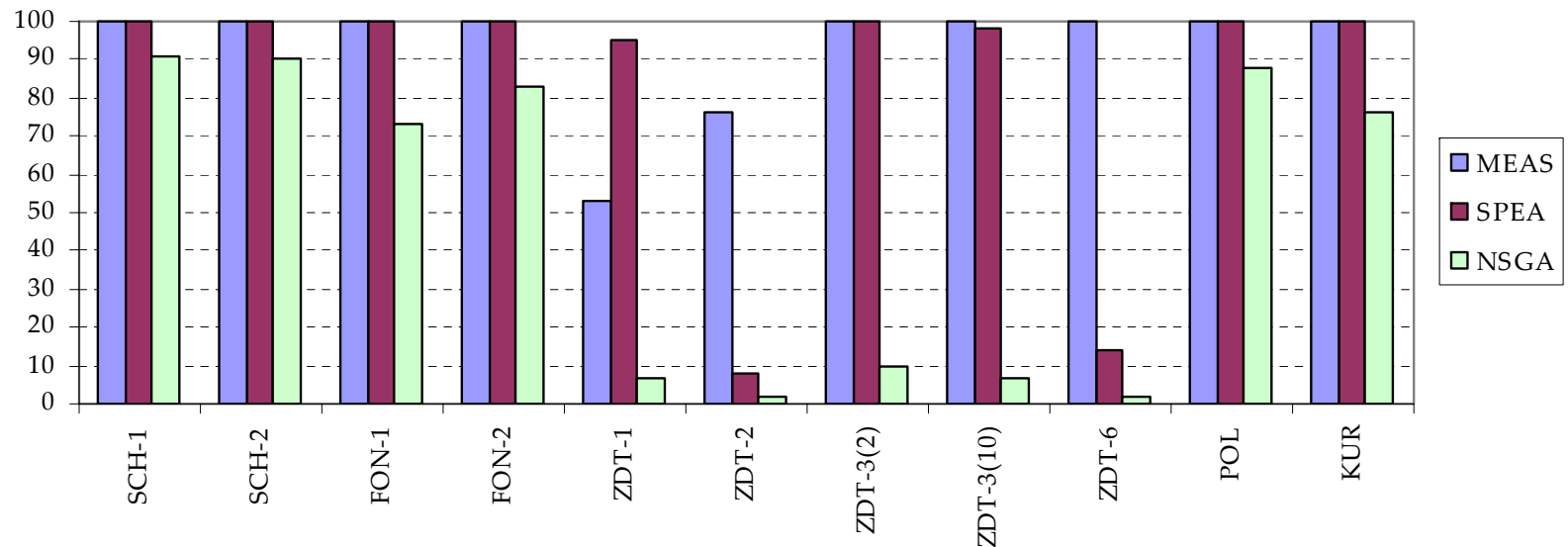
Συνάρτηση  
Zitzler, Deb &  
Thiele III (2000),  
2 μεταβλητών

# Αποτελέσματα συναρτήσεων ελέγχου

Μέσο πλήθος δοκιμών για παραγωγή 100 μη κατωτέρων λύσεων (με όριο τις 10 000)



Μέσο πλήθος μη κατωτέρων λύσεων, με όριο 10 000 δοκιμές

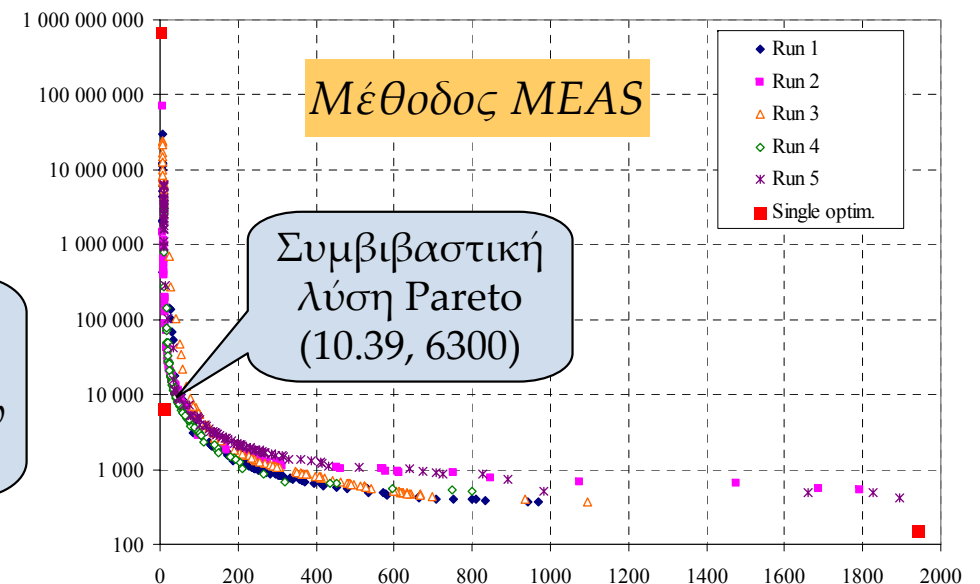
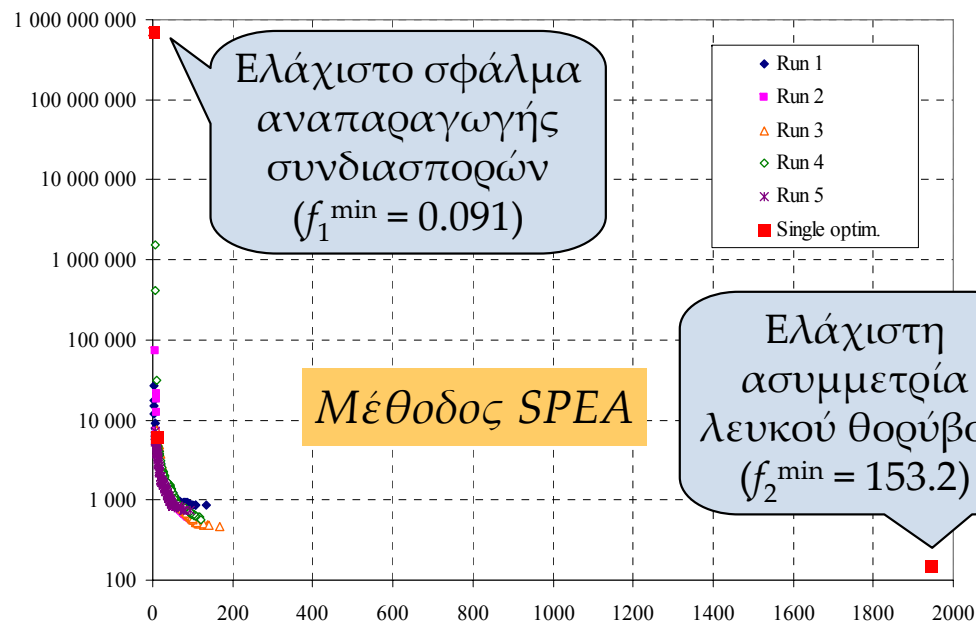


# Αποσύνθεση μητρώων συνδιασπορών: Τοποθέτηση του προβλήματος

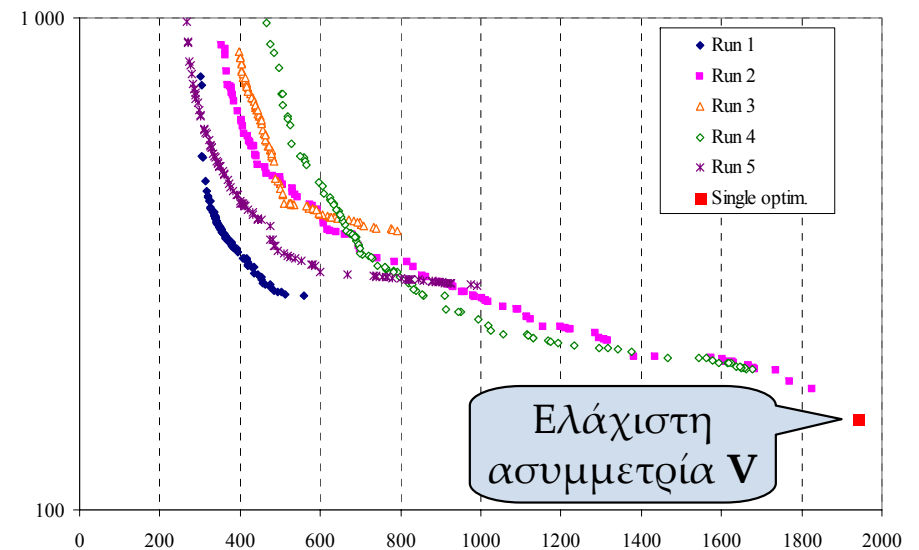
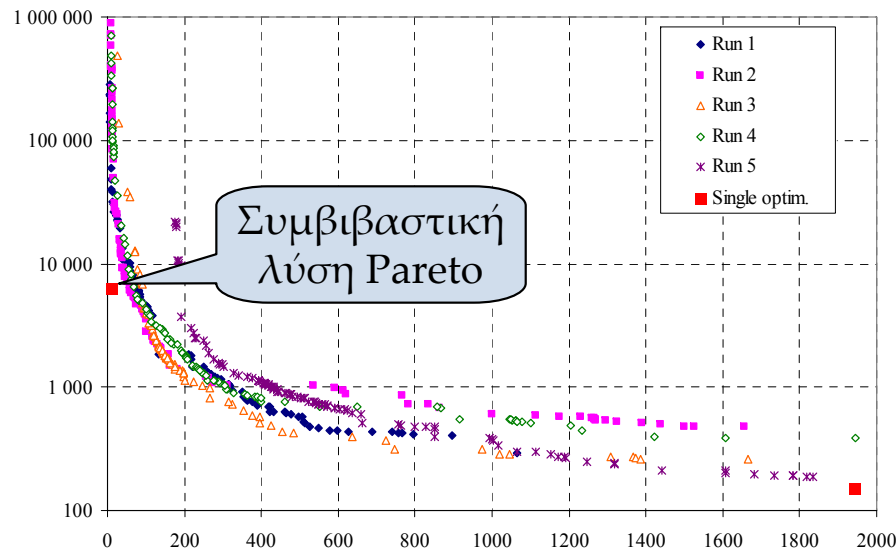
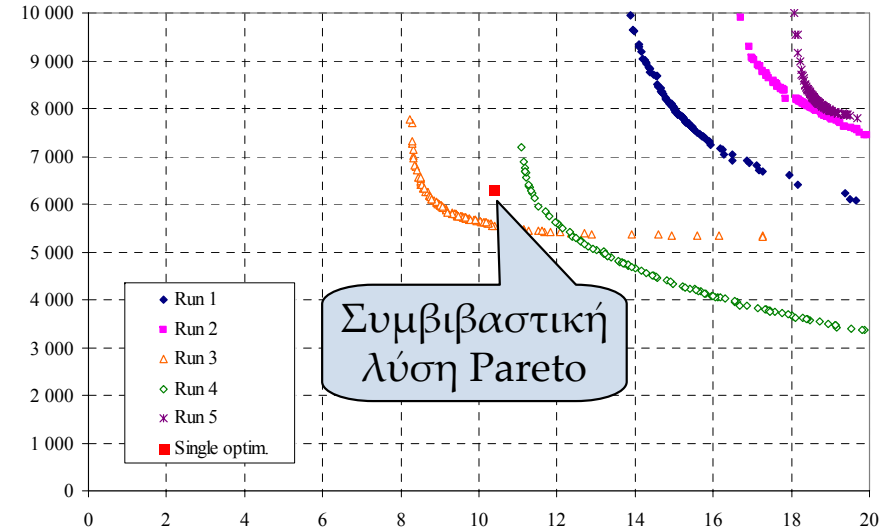
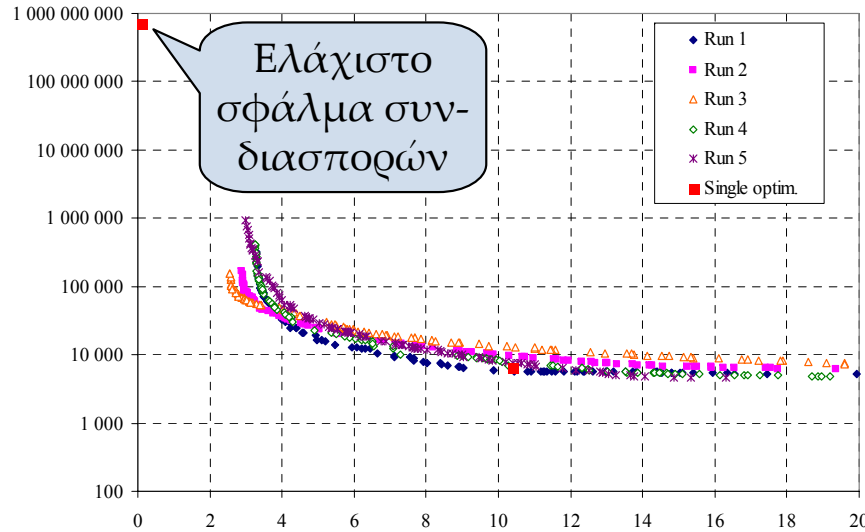
- Σε γραμμικά στοχαστικά μοντέλα της μορφής  $\mathbf{Y} = \mathbf{a} \mathbf{Z} + \mathbf{b} \mathbf{V}$  ζητείται ο προσδιορισμός του μητρώου  $\mathbf{b}$ , το οποίο δίνεται από μια σχέση της μορφής  $\mathbf{c} = \mathbf{b} \mathbf{b}^T$ , όπου  $\mathbf{c}$  μητρώο που περιέχει τις συνδιασπορές των  $\mathbf{Y}$  και  $\mathbf{Z}$ .
- Το πρόβλημα έχει άπειρες λύσεις αν το  $\mathbf{c}$  είναι θετικά ορισμένο, διαφορετικά δεν έχει λύση· επιπλέον, επειδή οι συντελεστές ασυμμετρίας των μεταβλητών ανανέωσης  $\mathbf{V}$  είναι συνάρτηση του  $\mathbf{b}$ , ήτοι  $\mu_3[\mathbf{V}] = \xi(\mathbf{b})$ , αν κάποια στοιχεία του  $\xi$  λάβουν σχετικά υψηλές τιμές, δεν είναι δυνατή η αναπαραγωγή των ασυμμετριών από τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών.
- Με βάση τα παραπάνω, διατυπώθηκε ένα πρόβλημα δύο αντικρουόμενων κριτηρίων, όπου το πρώτο αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος αναπαραγωγής των δειγματικών συνδιασπορών και το δεύτερο στην ελαχιστοποίηση της ασυμμετρίας του λευκού θορύβου.
- Η εφαρμογή έγινε για ένα περιοδικό σχήμα αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης  $\delta$  «θέσεων», που αναφέρονται στις μεταβλητές βροχόπτωσης και απορροής των ταμιευτήρων της ΕΥΔΑΠ για το μήνα Ιούνιο. Για το εν λόγω πρόβλημα, το πλήθος των στοιχείων του μητρώου  $\mathbf{b}$  είναι  $8 \times 8 = 64$ .

# Αποσύνθεση μητρώων συνδιασπορών: Πολυκριτηριακή ανάλυση

- Εκτιμήθηκαν οι ακραίες και μια ενδιάμεση (συμβιβαστική) λύση Pareto, με ολική βελτιστοποίηση μιας σταθμισμένης συνάρτησης των δύο κριτηρίων.
- Στη συνέχεια, έγιναν 5 ανεξάρτητες επιλύσεις του πολυκριτηριακού προβλήματος με τις μεθόδους SPEA (σχήμα κάτω δεξιά) και MEAS (σχήμα κάτω αριστερά), για πληθυσμό 100 ατόμων και με όριο τις 40 000 δοκιμές.
- Η μέθοδος MEAS, με υψηλή (50%) συχνότητα μετάλλαξης, παράγει εμφανώς πιο αντιπροσωπευτικά μέτωπα Pareto σε σχέση με την SPEA.



# Αποσύνθεση μητρώων συνδιασπορών: Διαμόρφωση υπομετώπων Pareto



**Μέρος Β:**  
**Υδρολογικές εφαρμογές –**  
**Το πρόβλημα βαθμονόμησης**  
**υδρολογικών μοντέλων**

---

# Πολυκριτηριακή ανάλυση συστημάτων υδατικών πόρων

- Αν και οι υδατικοί πόροι αποτελούν προνομιακό πεδίο εφαρμογής της πολυκριτηριακής ανάλυσης, παρατηρείται περιορισμένη διάδοση των σύγχρονων εξελικτικών τεχνικών, γεγονός που αποδίδεται:
  - στην εμπειροτεχνική (χωρίς βελτιστοποίηση) προσέγγιση αρκετών εφαρμογών.
  - στη ευρεία χρήση τυποποιημένων μεθόδων (π.χ. δυναμικός προγραμματισμός), που δεν επιδέχονται αλλαγές στη μαθηματική τους δομή.
  - στην ανάγκη προσδιορισμού μιας μοναδικής βέλτιστης λύσης, και όχι μιας πληθώρας συμβιβαστικών λύσεων Pareto.
- Εξετάστηκαν, συνοπτικά, τρεις κατηγορίες τεχνολογικών προβλημάτων, όπου έχουν υιοθετηθεί σύγχρονες πολυκριτηριακές προσεγγίσεις (ιδιαίτερα στις κατηγορίες 2 και 3):
  - διαχείριση ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού.
  - έλεγχος ποιότητας υδροφορέων.
  - σχεδιασμός και αποκατάσταση δικτύων ύδρευσης.
- Στην παρούσα έρευνα, η έμφαση δόθηκε στη εκτίμηση (βαθμονόμηση) των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων, γνωστή ως αντίστροφο πρόβλημα.

# Αυτόματη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων – Κλασική προσέγγιση

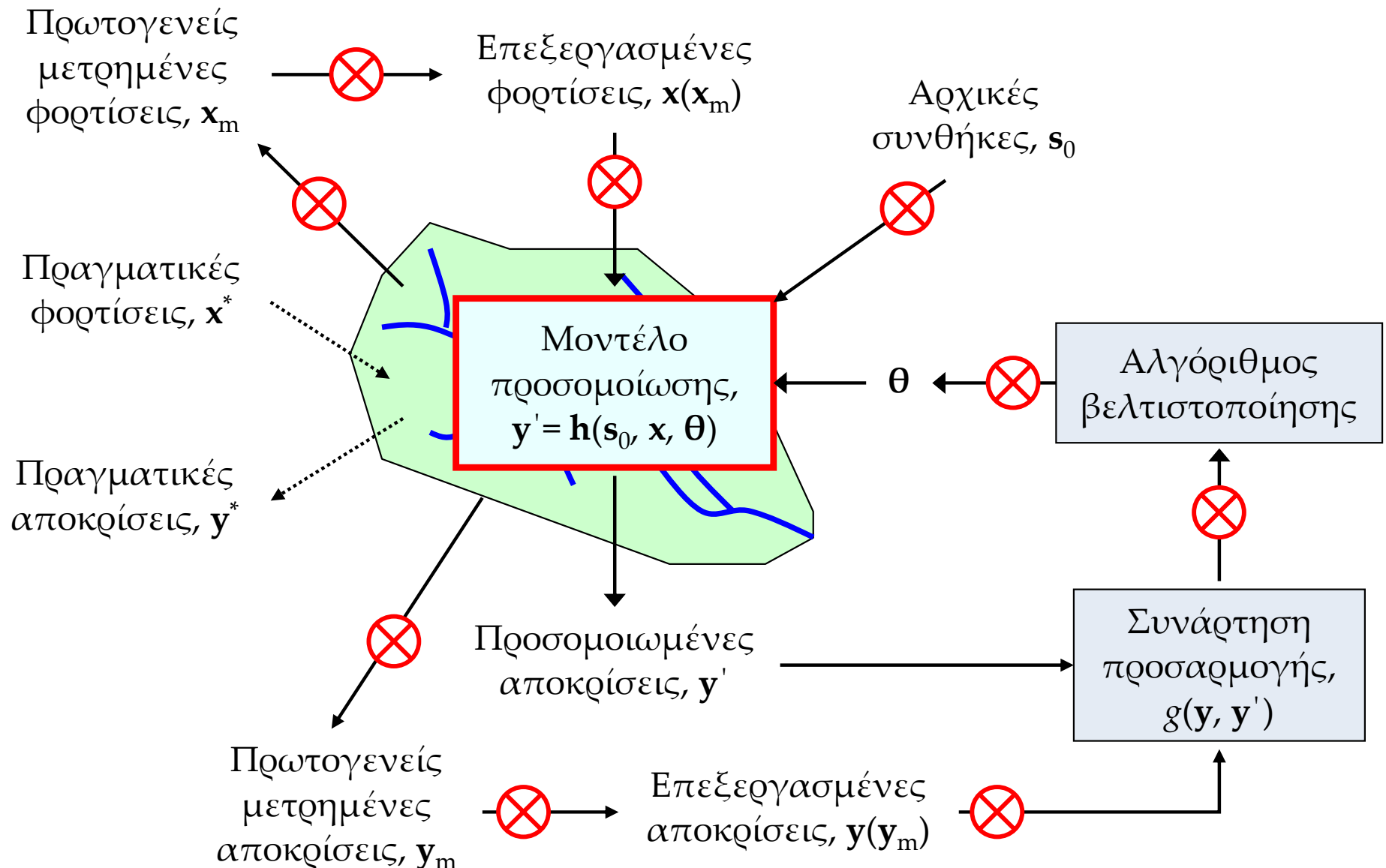
- Συνιστώσες διαδικασίας:
  - Επιλογή δείγματος μετρημένων/παρατηρημένων αποκρίσεων.
  - Διατύπωση καθολικού μέτρου προσαρμογής, που είναι στατιστικά συνεπές με τα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων.
  - Επιλογή παραμέτρων και εκτίμηση εφικτών ορίων τους.
  - Εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης.
  - Επαλήθευση σε μια ανεξάρτητη χρονική περίοδο.
- Η βέλτιστη λύση που εντοπίζει μια πλήρως αυτοματοποιημένη πρακτική δεν εγγυάται επαρκή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, ήτοι:
  - ικανοποιητική αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων κατά την περίοδο επαλήθευσης.
  - συνέπεια των βελτιστοποιημένων παραμέτρων ως προς το φυσικό υπόβαθρο.
  - ρεαλιστική δίαιτα των μη ελεγχόμενων (από μετρήσεις) αποκρίσεων.
- Τα σύγχρονα μοντέλα, που χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις σε δεδομένα, έντονο υπολογιστικό φόρτο και μεγάλο αριθμό παραμέτρων, η εφαρμογή της διαδικασίας καθίσταται, στην πράξη, προβληματική.



# Οι έννοιες της αβεβαιότητας και ισοδυναμίας

- Η διαδικασία βαθμονόμησης διέπεται από πληθώρα αβεβαιοτήτων, που αλληλεπιδρούν και ανακυκλώνονται κατά τη βελτιστοποίηση, ήτοι:
  - Δομικά σφάλματα μοντέλου (λόγω υπό- ή υπερ-παραμετροποίησης).
  - Τυπικά σφάλματα πρωτογενών και επεξεργασμένων δεδομένων.
  - Μη αντιπροσωπευτικότητα παρατηρημένης πληροφορίας.
  - Αδυναμία προσδιορισμού αρχικών και οριακών συνθηκών του μοντέλου.
  - Στατιστική ακαταλληλότητα ή/και μεροληψία μέτρων προσαρμογής.
  - Λανθασμένη θεώρηση ορίων εφικτότητας των παραμέτρων.
  - Εγγενείς δυσχέρειες βελτιστοποίησης, εξαιτίας της δημιουργίας εξαιρετικά τραχειών επιφανειών απόκρισης (τοπικά ακρότατα, σε διάφορες κλίμακες).
  - Παραγωγή πολλαπλών αποκρίσεων, μη ελεγχόμενων από μετρήσεις.
  - Διαχρονική μεταβολή χαρακτηριστικών λεκάνης – ανθρωπογενείς επεμβάσεις.
- Εξαιτίας των εγγενών αβεβαιοτήτων, ένα μοντέλο μπορεί να διατυπωθεί με πολλαπλές δομές και για κάθε δομή μπορούν να εντοπιστούν εναλλακτικές βέλτιστες τιμές παραμέτρων, που είναι εξίσου αποδεκτές (“behavioral”) από υδρολογική άποψη, χαρακτηριστικό που αποτελεί το υπόβαθρο της υπόθεσης της ισοδυναμίας (equifinality).

# Η βαθμονόμηση ως μαθηματικό «παιχνίδι»



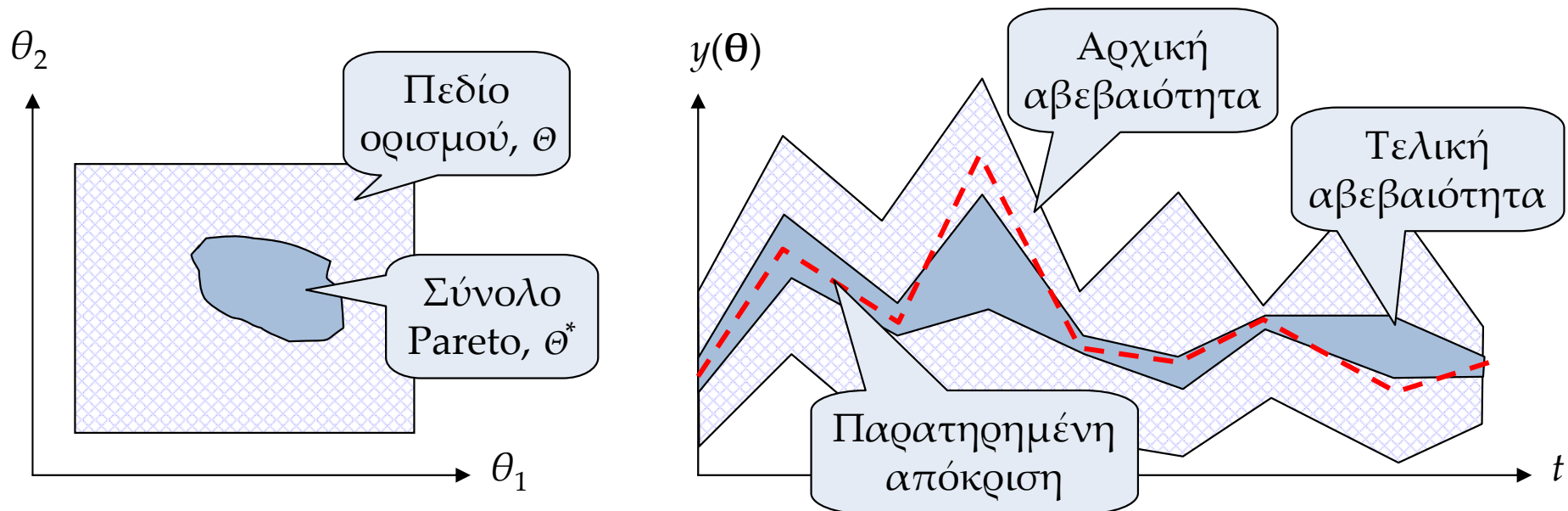
# Πολυκριτηριακή οπτική της ισοδυναμίας

- Στη γενική περίπτωση, το πρόβλημα βαθμονόμησης διατυπώνεται ως:

$$\min \mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}) = \{|e_1(\boldsymbol{\theta})|, |e_2(\boldsymbol{\theta})|, \dots, |e_T(\boldsymbol{\theta})|\}, \boldsymbol{\theta} \in \Theta$$

όπου  $e_t$  η διαφορά μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων αποκρίσεων σε κάθε χρονικό βήμα  $t$  και  $\boldsymbol{\theta}$  διάνυσμα παραμέτρων στον εφικτό χώρο  $\Theta$ .

- Συνδυάζοντας την έννοια της ισοδυναμίας με τη θεμελιώδη αρχή της κυριαρχίας, προκύπτει ότι δεν υπάρχει μια ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος, παρά άπειροι συνδυασμοί των παραμέτρων  $\boldsymbol{\theta}$  που είναι βέλτιστοι κατά Pareto.



# Χειρισμός σύνθετων υδρολογικών μοντέλων

- Αρχές σχηματοποίησης και παραμετροποίησης
  - Διάκριση χωρικής κλίμακας αναπαράστασης των διεργασιών και ορισμού των παραμέτρων, στην κατεύθυνση της διατύπωσης όσο πιο φειδωλών σχημάτων.
  - Καθορισμός της λεπτομέρειας της σχηματοποίησης αποκλειστικά από τις ανάγκες της μελέτης και τους περιορισμούς στο φόρτο της προσομοίωσης.
  - Συσχέτιση φυσικών χαρακτηριστικών λεκάνης και παραμέτρων, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από τη διαθέσιμη πληροφορία (υδρολογική και γεωγραφική).
- Έλεγχος πολλαπλών κριτηρίων
  - Προσαρμογή σε πολλαπλές αποκρίσεις και πολλαπλές πτυχές κάθε απόκρισης.
  - Διατήρηση μιας εύλογης αναλογίας, της τάξης του 5:1, μεταξύ του αριθμού των παραμέτρων και κριτηρίων, στη διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης.
  - Μεγιστοποίηση της πληροφορίας που εισάγεται στην προσαρμογή του μοντέλου, με αξιοποίηση ακόμα και σποραδικών μετρήσεων αλλά και κάθε τύπου γνώσης περί του συστήματος, με τη μορφή εμπειρικών κριτηρίων.
- Στρατηγική βαθμονόμησης
  - Διαδραστική παρακολούθηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης από τον χρήστη.
  - «Χειροκίνητη» απόρριψη λύσεων ανεπαρκούς προγνωστικής ικανότητας ή ακραίας συμπεριφοράς (ως προς την ανταγωνιστικότητα των κριτηρίων).

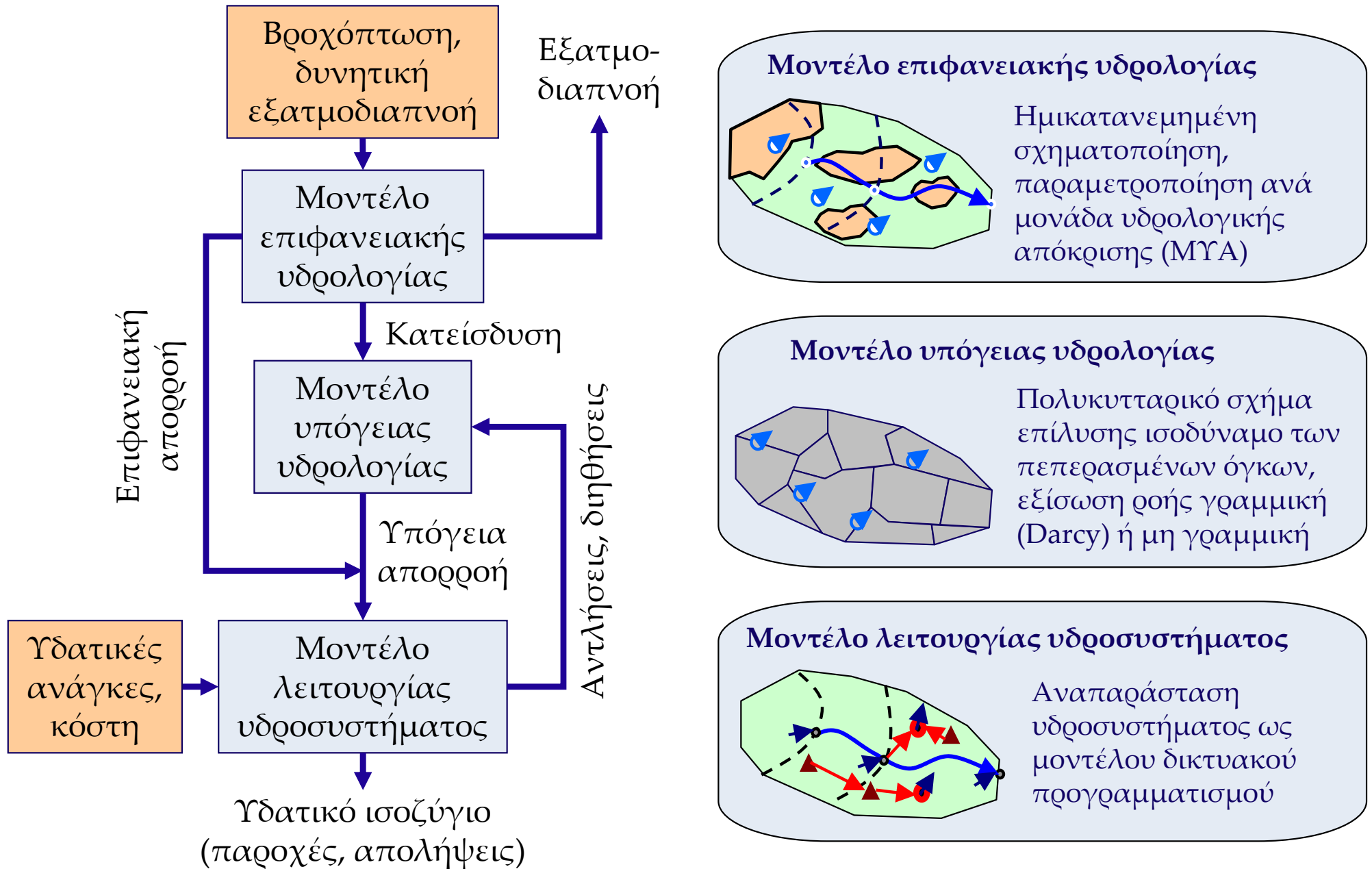
# Εφαρμογή στη λεκάνη του Β. Κηφισού



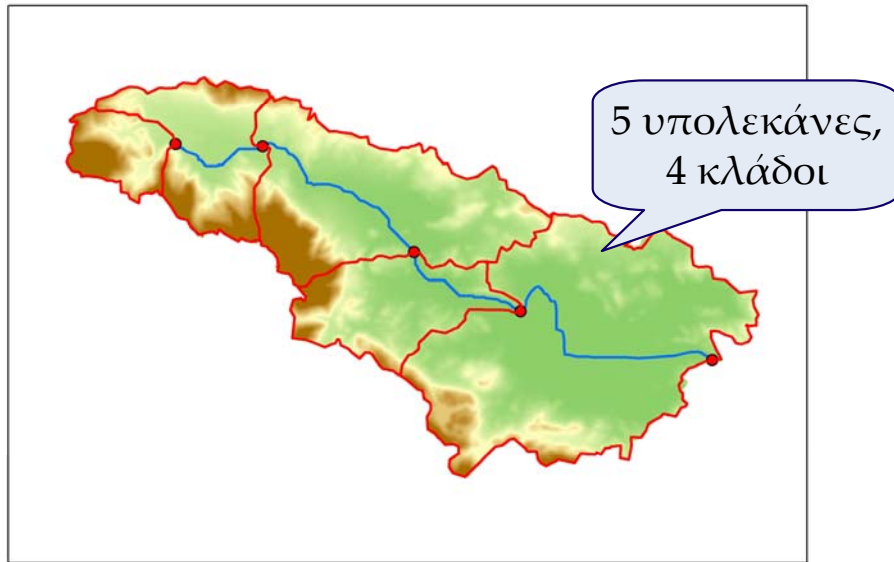
# Ζητούμενα μοντελοποίησης

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

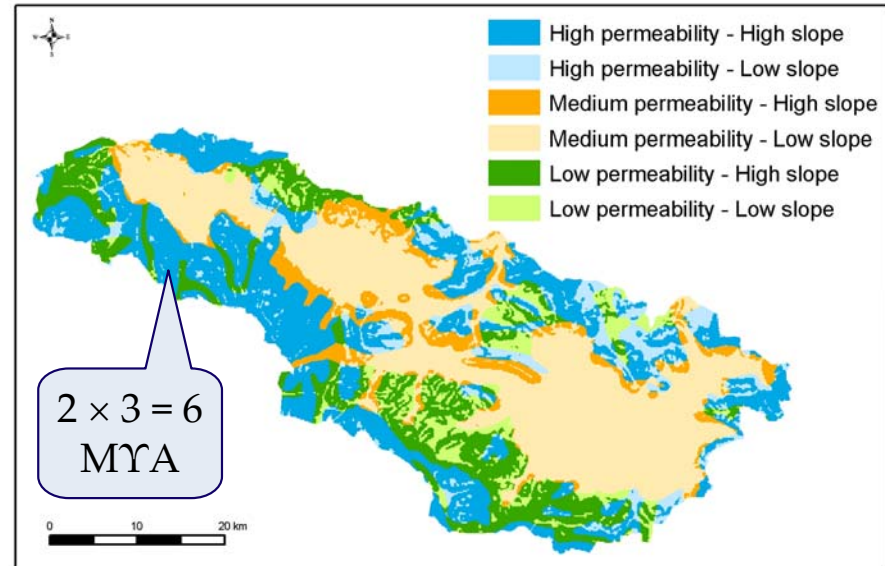
# Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ



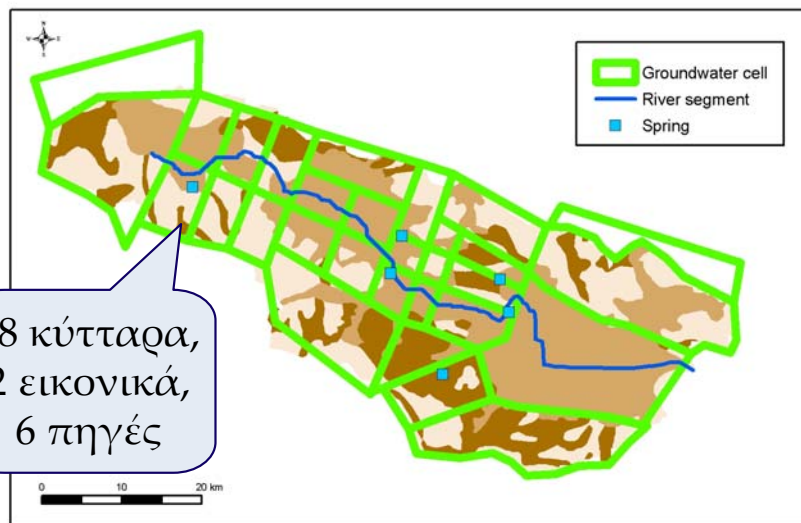
# Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση



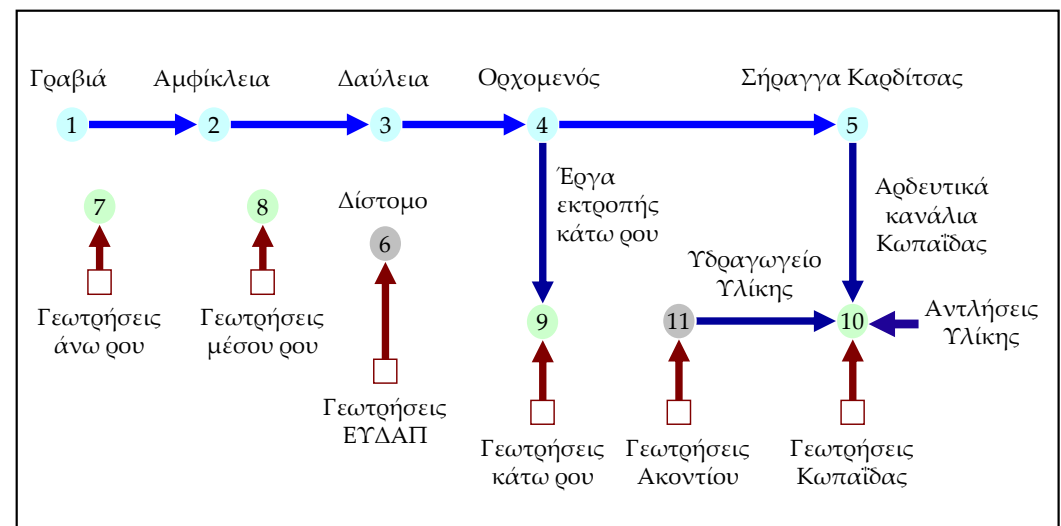
Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες



Μονάδες υδρολογικής απόκρισης



Κύτταρα υδροφορέα



Σχηματική διάταξη υδροσυστήματος



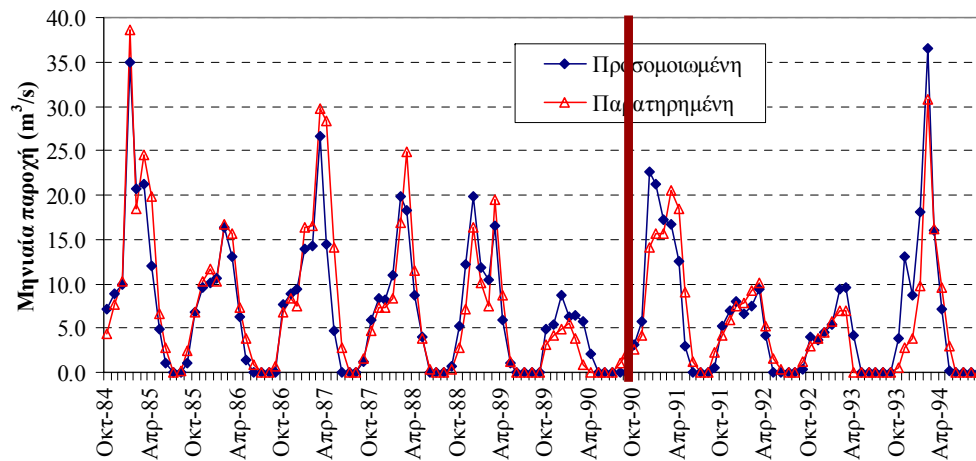
# Πρόβλημα «ολικής» βαθμονόμησης

- Περίοδος ελέγχου (μηνιαία προσομοίωση)
  - Οκτ. 1984 - Σεπ. 1990 (βαθμονόμηση), Οκτ. 1990 - Σεπ. 1994 (επαλήθευση)
- Μεταβλητές ελέγχου
  - 99 μεταβλητές ελέγχου (μετά από ενοποίηση ή μηδενισμό ορισμένων παραμέτρων), 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).

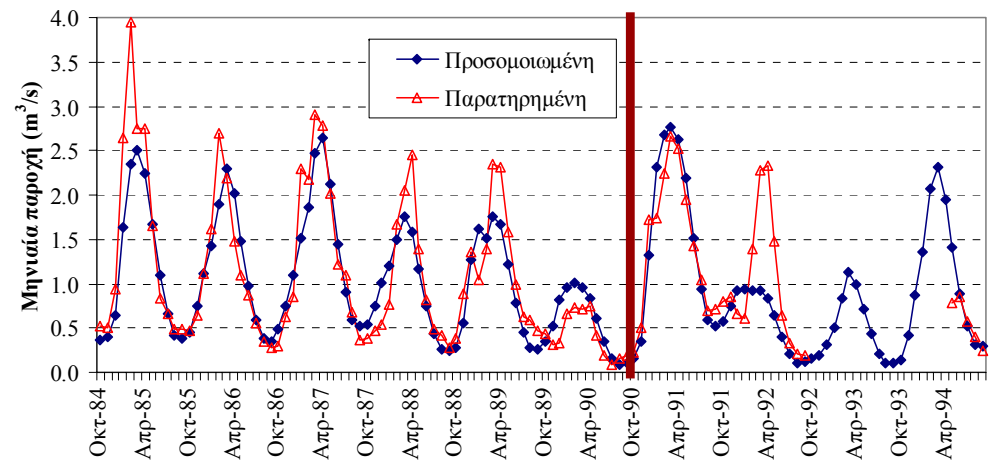
# Σύνοψη αποτελεσμάτων

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	-	-

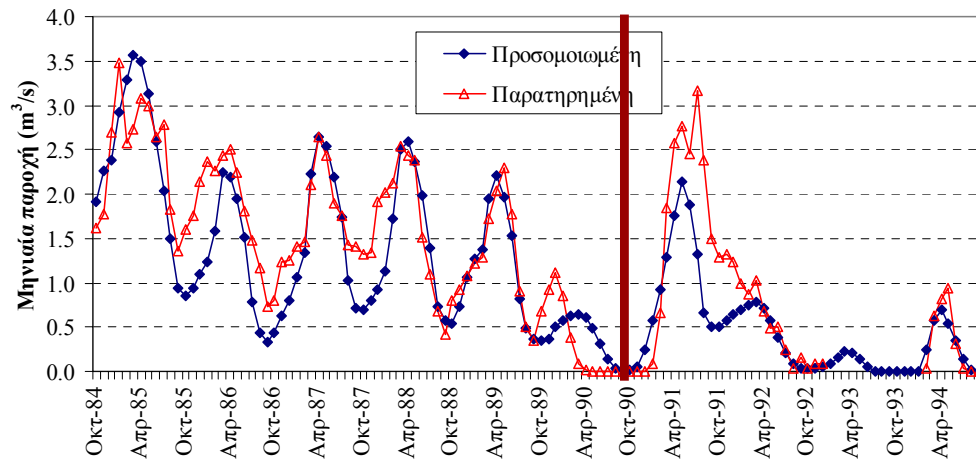
# Χαρακτηριστικά υδρογραφήματα



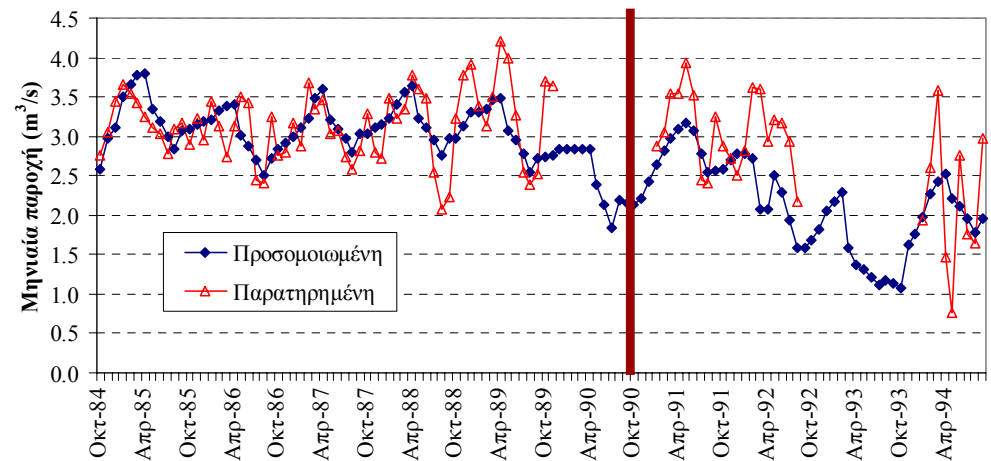
Έξοδος λεκάνης  
( $e_{cal} = 87.0\%$ ,  $e_{val} = 75.6\%$ )



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



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

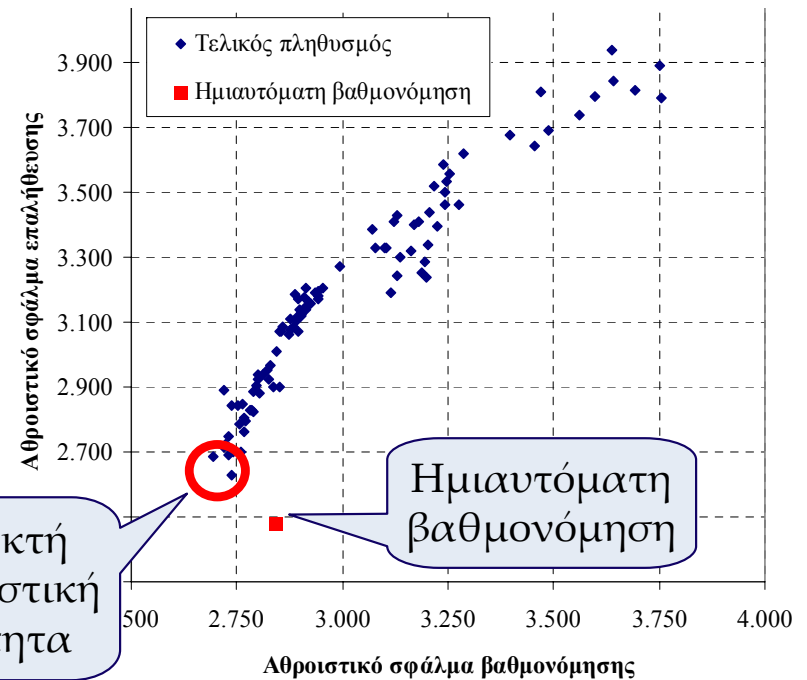
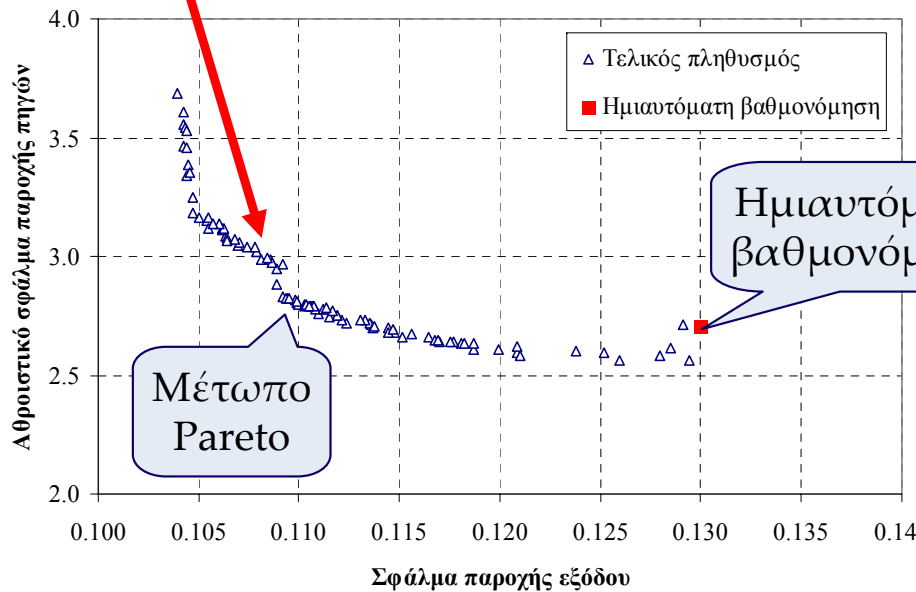
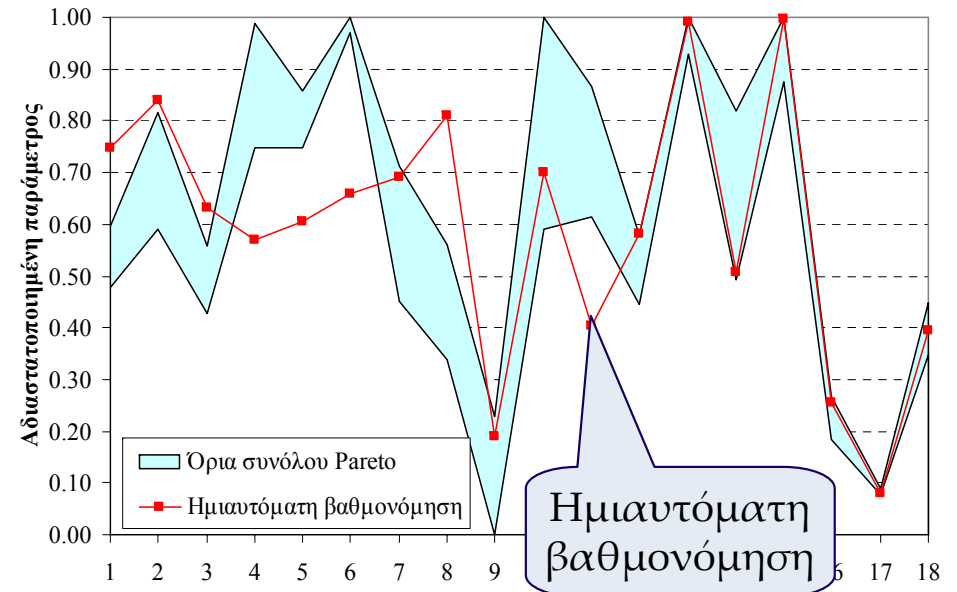
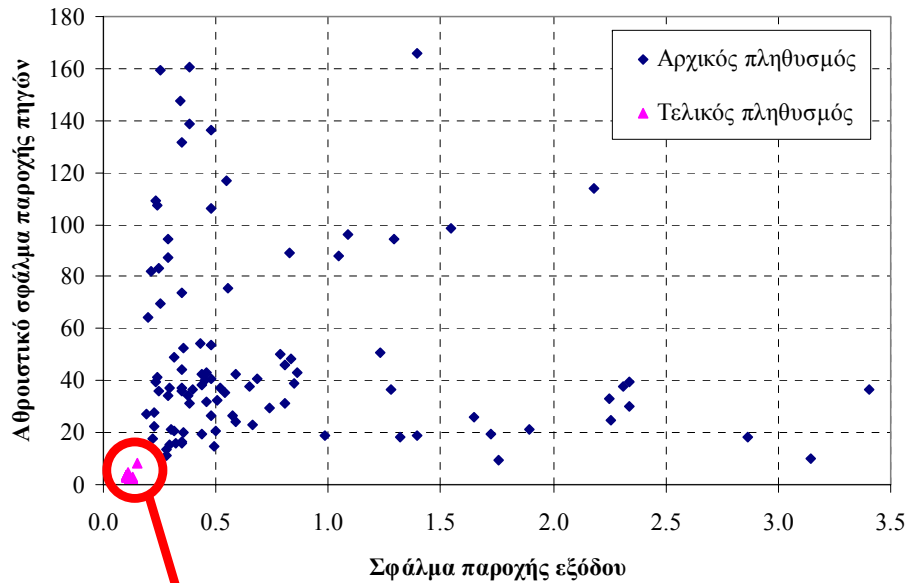


Πηγές Μέλανα  
( $e_{cal} = 26.5\%$ ,  $e_{val} = 9.5\%$ )

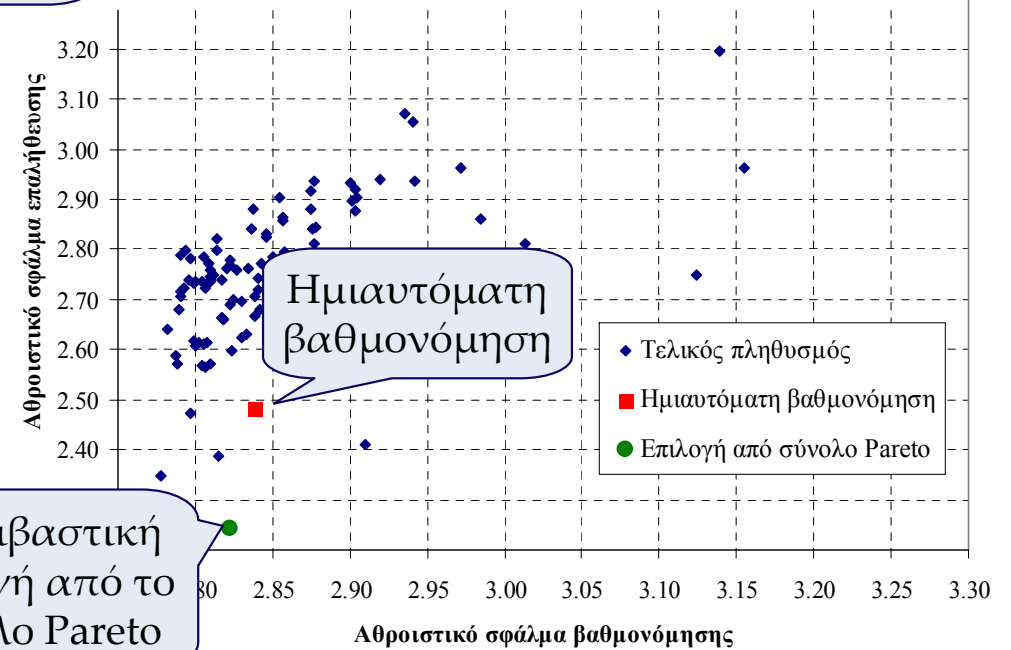
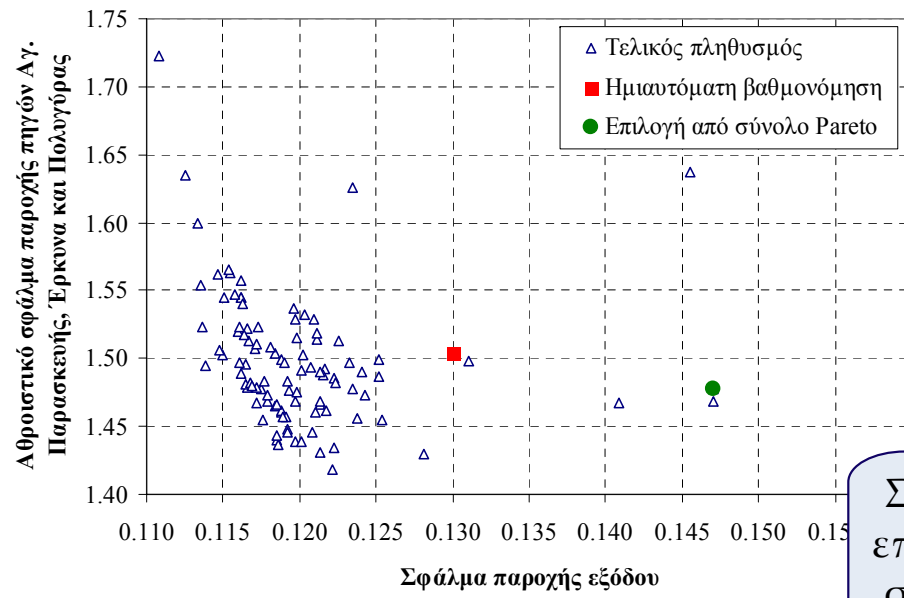
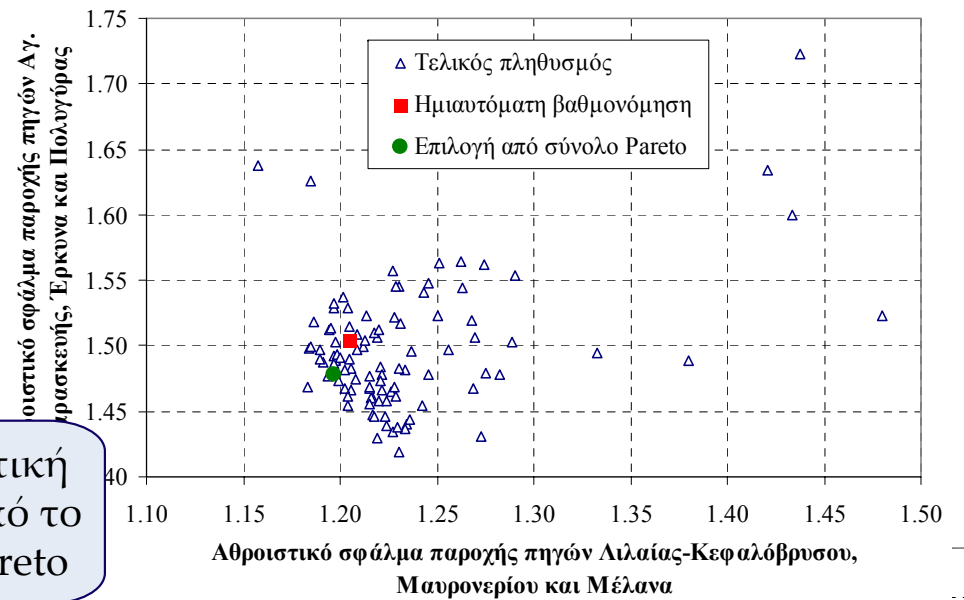
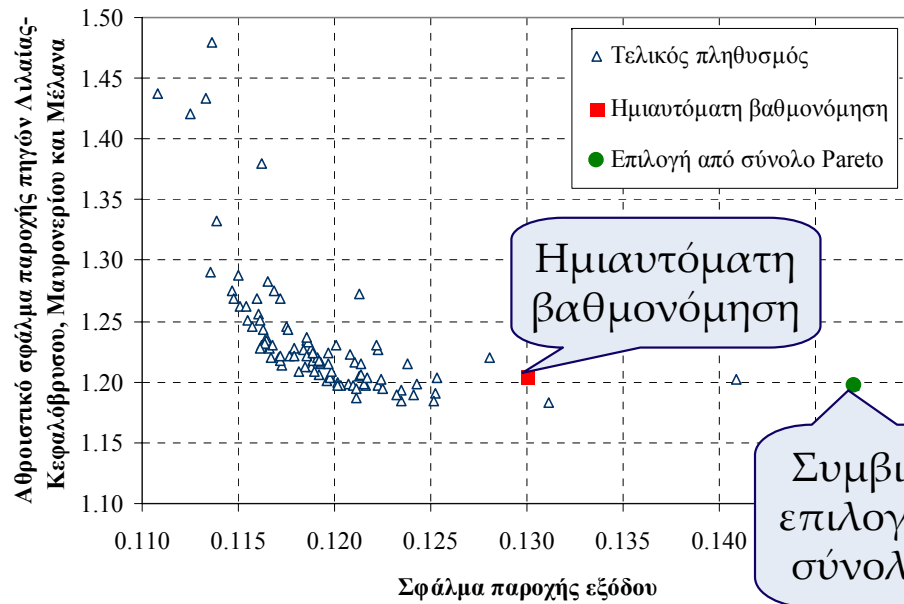
# Πολυκριτηριακές αναλύσεις

- Βελτιστοποίηση 18 κύριων παραμέτρων μοντέλου
  - Χωρητικότητες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας.
  - Συντελεστές στείρευσης για παραγωγή κατεΐσδυσης.
  - Υδραυλικές αγωγιμότητες κυττάρων που αναπαριστούν πηγές.
- Διατύπωση πολυκριτηριακών προβλημάτων
  - Πρόβλημα 1: Σφάλμα (= 1 – efficiency) υδρογραφήματος εξόδου, αθροιστικό σφάλμα υδρογραφημάτων πηγών (2 κριτήρια).
  - Πρόβλημα 2: Διαχωρισμός πηγών σε κύριες (Λιλαίας-Κεφαλόβρουσου, Μαυρονερίου, Μέλανα) και δευτερεύουσες (3 κριτήρια).
  - Πρόβλημα 3: Πλήρης διαχωρισμός υδρογραφημάτων (7 κριτήρια).
- Κατηγορίες προβλημάτων
  - Τύπου Α: Χωρίς περιορισμούς εφικτότητας κριτηρίων.
  - Τύπου Β: Με όρια εφικτότητας, ώστε να εντοπιστούν συμβιβαστικές λύσεις.
- Αποτελέσματα αναλύσεων (μέθοδος MEAS, 100 σημεία, 5000 δοκιμές)
  - Μέτωπα Pareto ή χαρακτηριστικές τομές αυτών (για προβλήματα 2-3).
  - Όρια συνόλων Pareto (= όρια αβεβαιότητας παραμέτρων)
  - Συσχέτιση καθολικού κριτηρίου βαθμονόμησης και επαλήθευσης.

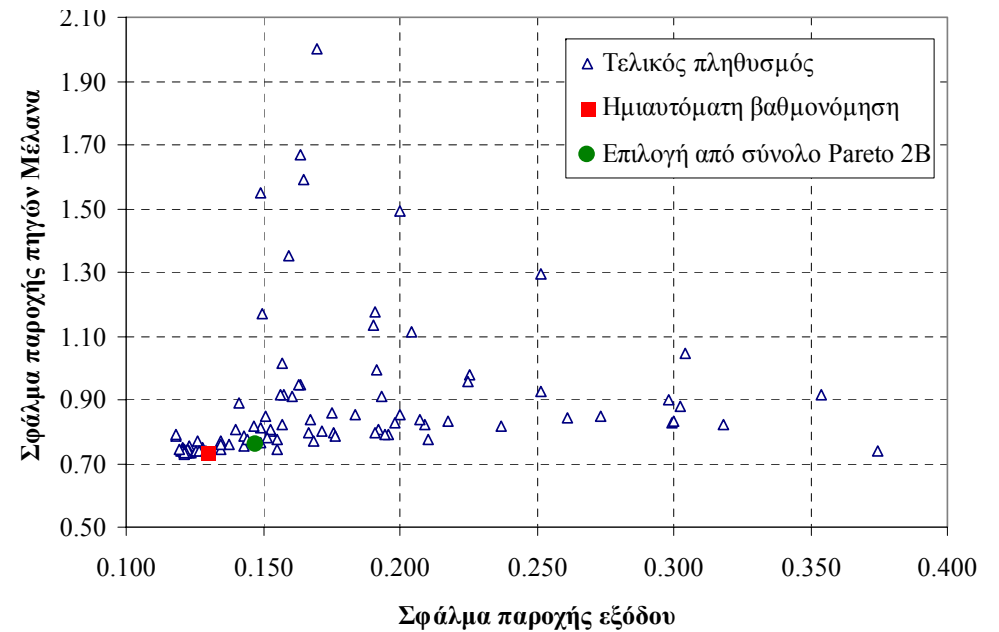
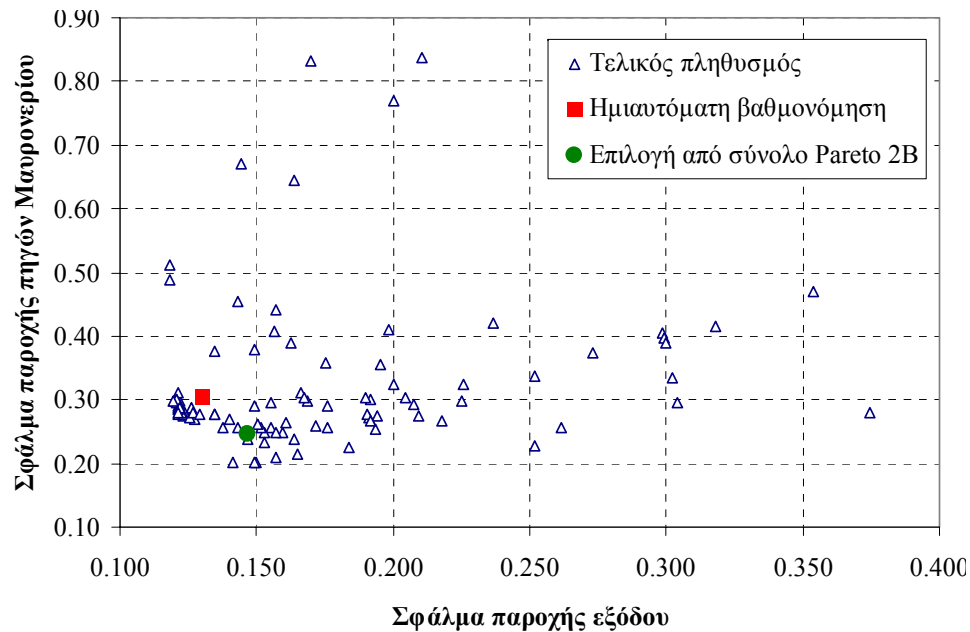
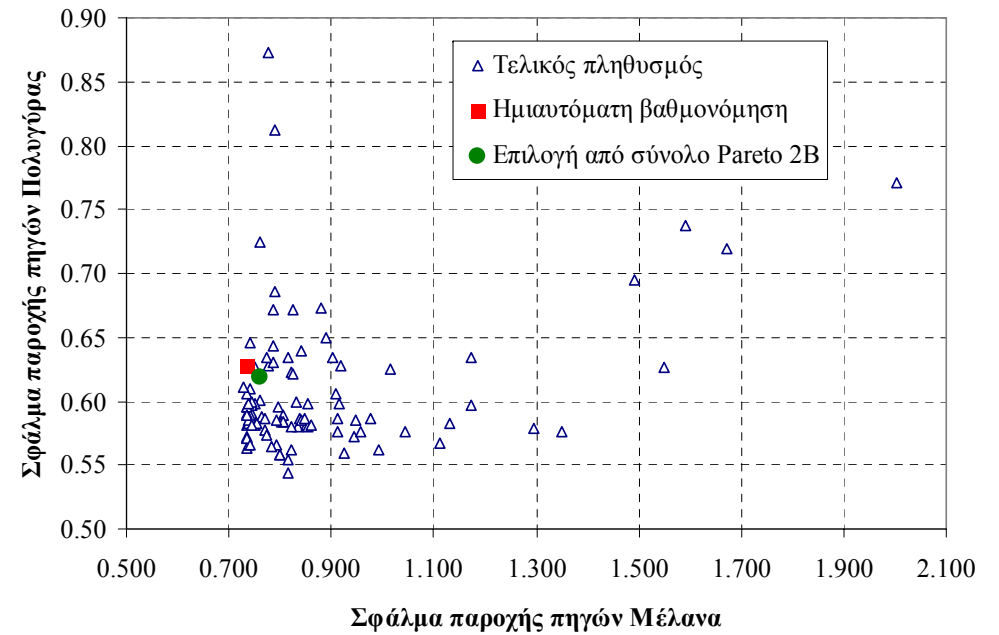
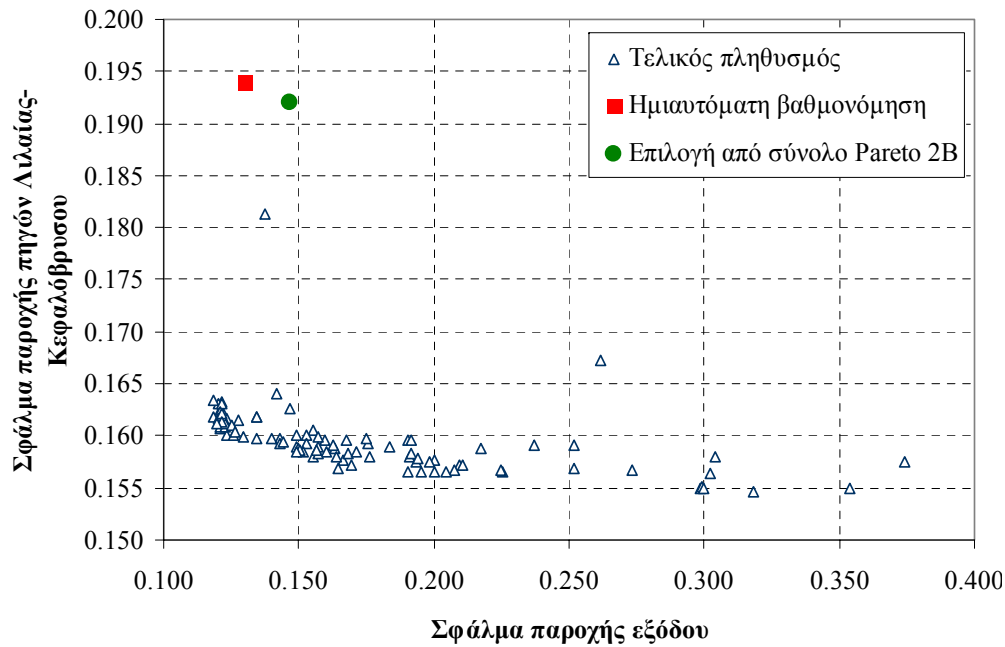
# Πρόβλημα 1Α: Χαρακτηριστικά διαγράμματα



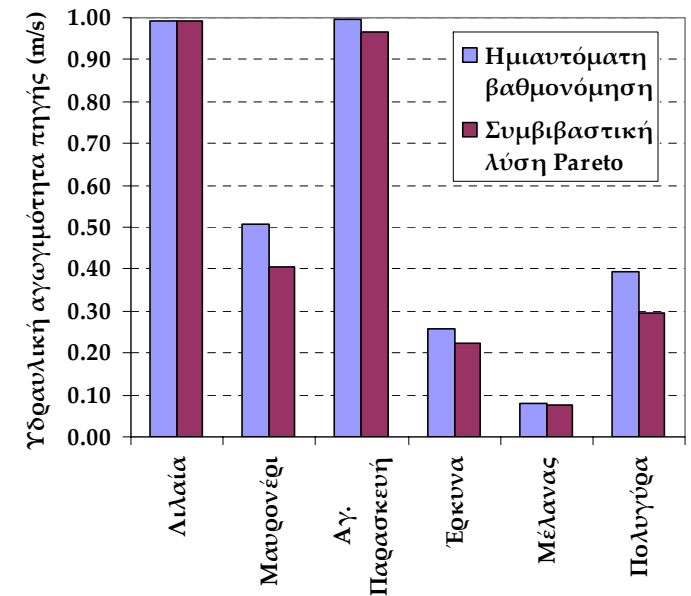
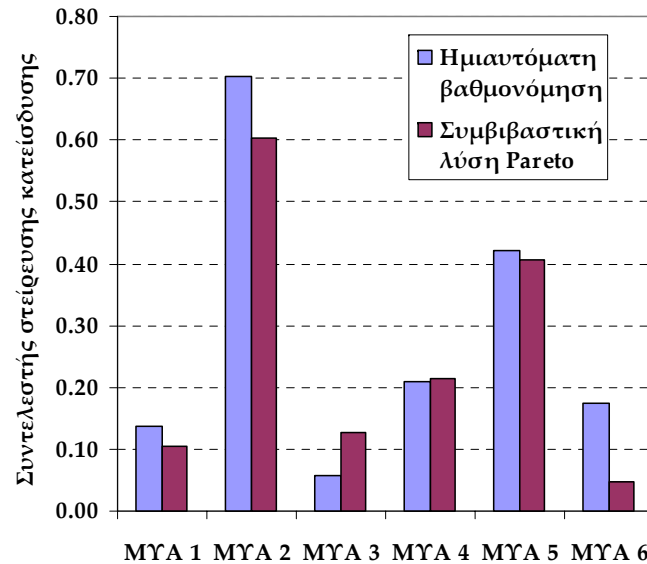
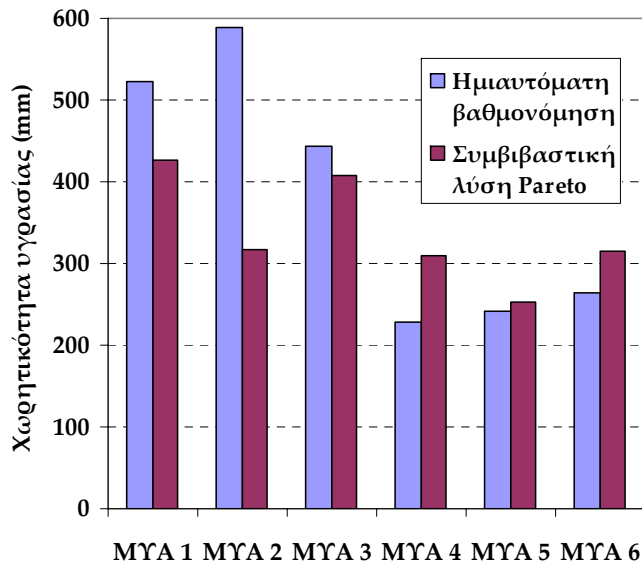
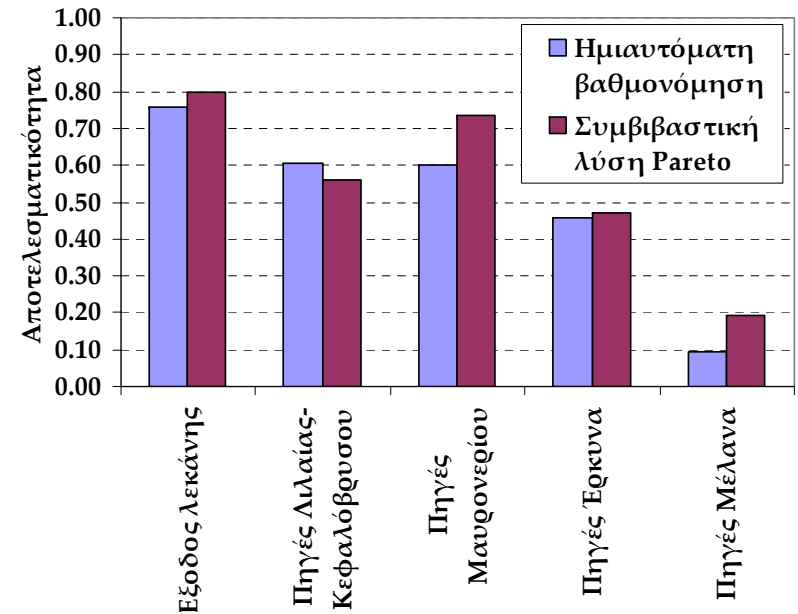
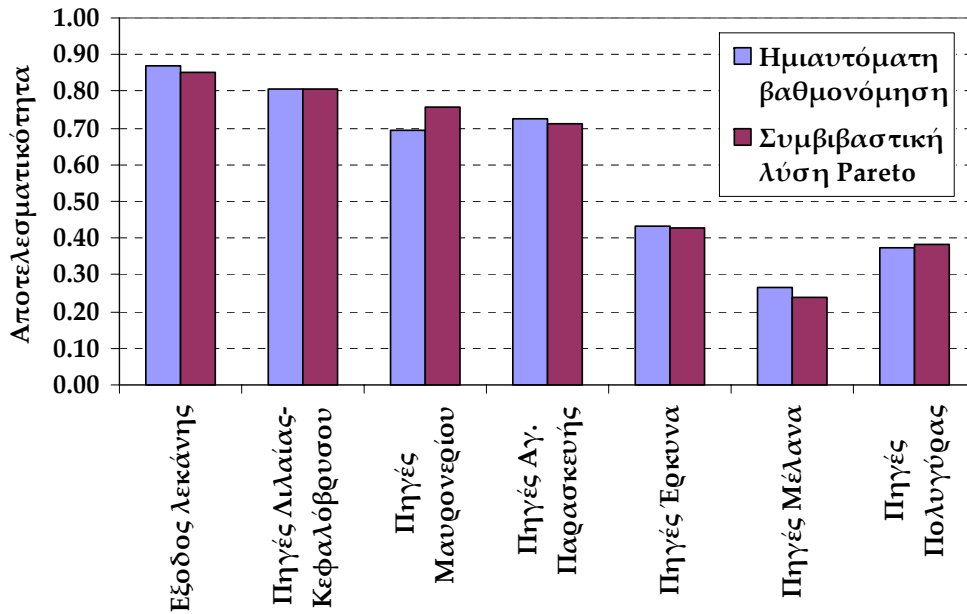
# Πρόβλημα 2B: Εντοπισμός συμβιβαστικής λύσης



# Πρόβλημα 3Α: Ανταγωνισμοί κριτηρίων



# Σύγκριση βέλτιστων λύσεων (1984-1994)





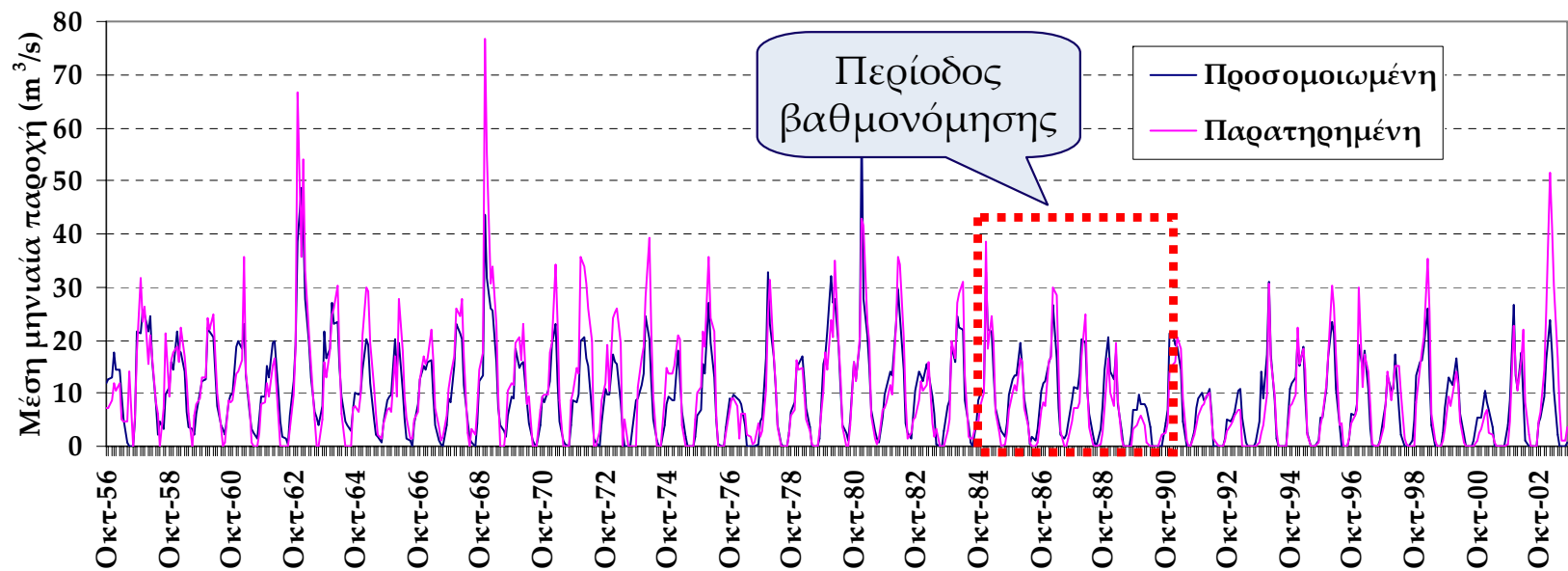
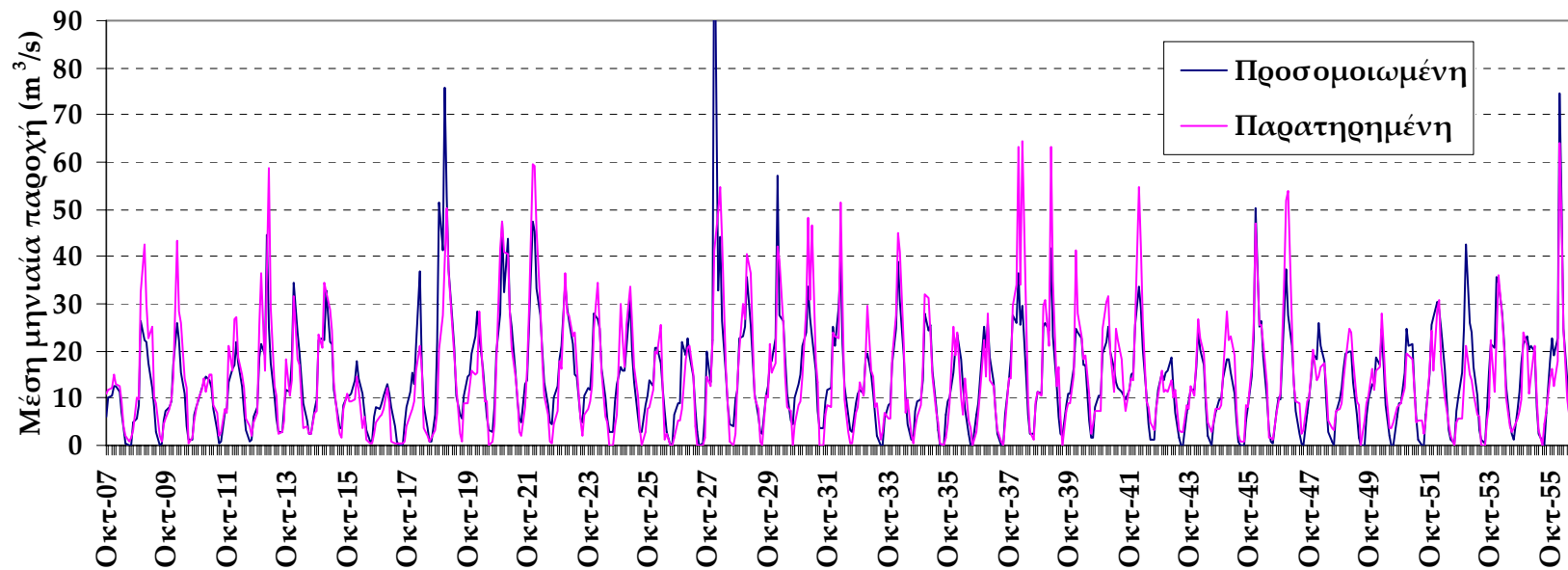
# Μακροχρόνιος έλεγχος μοντέλου (1907-2003)

- Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης:
  - 1969-2000: Μέθοδος Thiessen και υψομετρική αναγωγή, για τις 5 υπολεκάνες.
  - Λοιπά έτη: Οργανική συσχέτιση με Αλίαρτο, Γραβιά και Λειβαδιά.
- Χρονοσειρά δυνητικής εξατμοδιαπνοής:
  - 1984-1994: Μέθοδος Penman (ενιαία χρονοσειρά για όλη τη λεκάνη).
  - Λοιπά έτη: Προσαρμογή ημιεμπειρικού μοντέλου στο δείγμα Penman και επέκτασή του με είσοδο την μέση μηνιαία θερμοκρασία στην Αλίαρτο.
- Χρονοσειρές αρδευτικών αναγκών:
  - 1980-2003: Σταθερές, με βάση τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.
  - 1907-1979: Θεώρηση ρυθμού ετήσιας μείωσης 1%.
- Χρονοσειρές παροχής:
  - 1907-2003: Πλήρες δείγμα μέσης μηνιαίας παροχής στην έξοδο της λεκάνης.
  - Πρόσφατες υδρομετρήσεις ΙΓΜΕ (1980-2000).
  - Παλαιές μετρήσεις ΥΠΔΕ, Οργανισμού Κωπαΐδας και άλλων φορέων.
- Αρχικές στάθμες δεξαμενών υπόγειου νερού:
  - Ίσες με τις στάθμες της 1/10/1984 (επισφαλής παραδοχή, δεδομένου ότι υπάρχει συστηματική εκμετάλλευση του υδροφορέα επί μακρό χρονικό διάστημα).

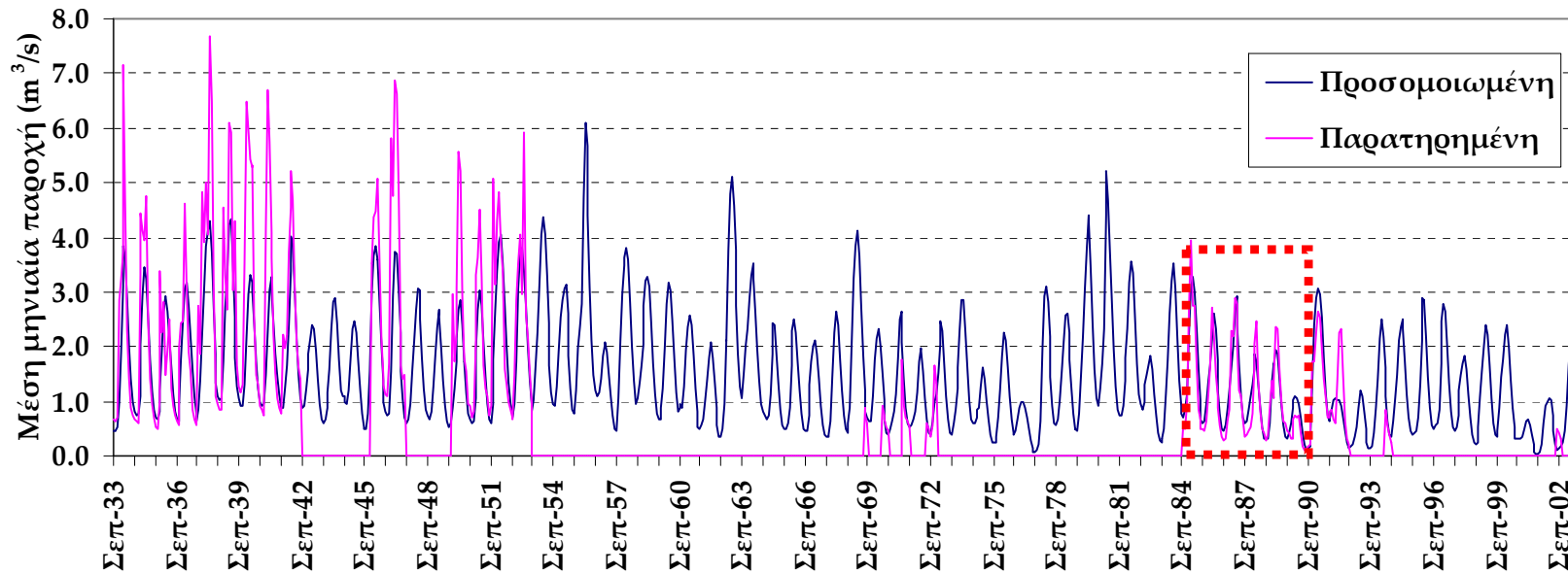
# Σύγκριση βέλτιστων λύσεων (1907-2003)

Μηνιαία απορροή	Δείγμα (μήνες)	Ημιαυτόματη βαθμονόμηση		Συμβιβαστική λύση Pareto	
		Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής	Αποτελεσματικότητα	Μεροληψία μέσης τιμής
Έξοδος Λεκάνης	1152	0.723	-0.027	0.732	-0.041
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	297	0.538	-0.266	0.597	-0.184
Πηγές Μαυρονερίου	245	0.745	0.163	0.632	0.317
Πηγές Αγίας Παρασκευής	62	0.377	0.226	0.048	0.555
Πηγές Έρκυνα	171	-0.100	0.189	-0.099	0.194
Πηγές Μέλανα	166	-0.292	0.114	-0.606	0.178
Πηγές Πολυγύρας	83	-6.795	0.675	-7.766	0.734

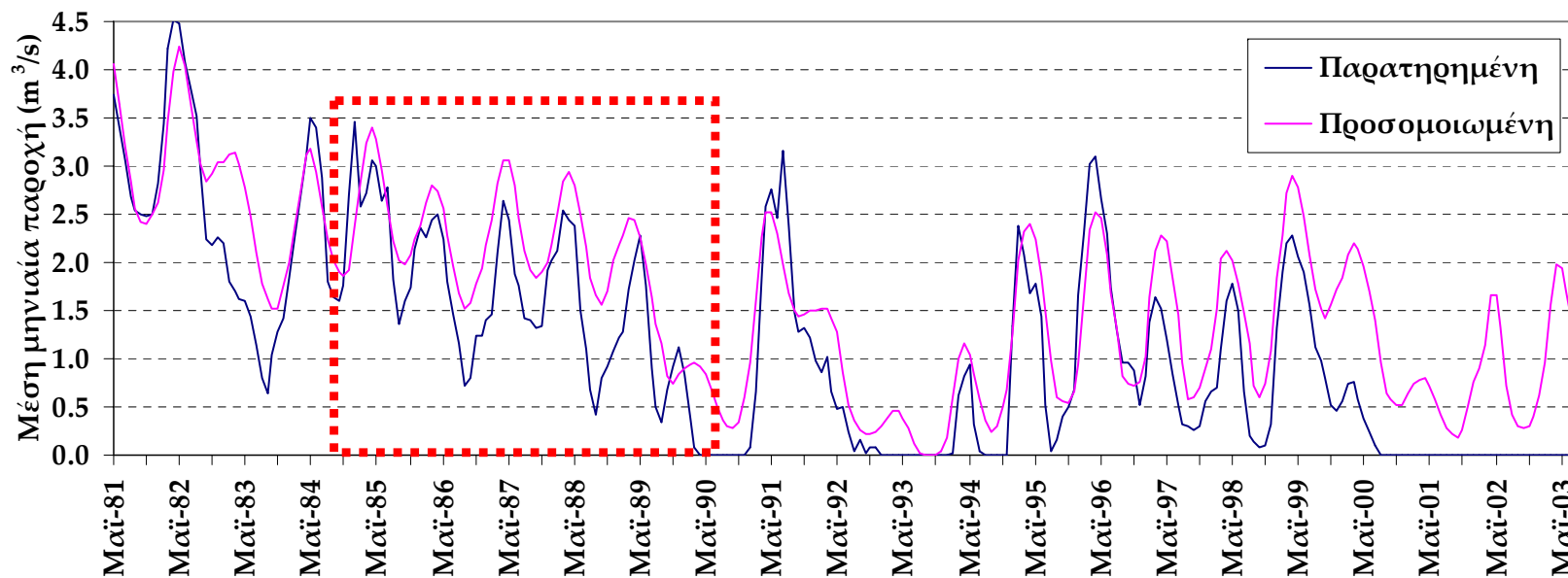
# Αναπαραγωγή υδρογραφήματος εξόδου



# Αναπαράγωγή υδρογραφημάτων πηγών



Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου



Πηγές Μαυρονερίου

# Συμπεράσματα (1)

- Η κλασική, «βαθμωτή» προσέγγιση των προβλημάτων βελτιστοποίησης:
  - αποκρύπτει τους ανταγωνισμούς των κριτηρίων.
  - επιτρέπει την καθοδήγηση της διαδικασίας σε προαποφασισμένες λύσεις.
  - είναι πιο δύσκολη στην εφαρμογή της, σε σχέση με την πολυκριτηριακή.
- Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης:
  - παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη, την τελευταία δεκαετία.
  - χρησιμοποιούν τους παραγωγικούς μηχανισμούς των γενετικών αλγορίθμων, χωρίς προσαρμογή στα χαρακτηριστικά του διανυσματικού προβλήματος.
  - αξιολογούν τις λύσεις αποκλειστικά με βάση την έννοια της κυριαρχίας.
- Η μέθοδος MEAS:
  - εμπεριέχει αρκετά καινοτόμα στοιχεία που εγγυώνται τον εντοπισμό αντιπροσωπευτικών λύσεων Pareto, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.
  - είναι πλήρως συγκρίσιμη των καταξιωμένων βιβλιογραφικών τεχνικών.
  - εστιάζει στις ιδιαιτερότητες των υδρολογικών εφαρμογών, αναζητώντας πρόσφορους συμβιβασμούς των κριτηρίων.
- Στα προβλήματα βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων:
  - υπάρχει υστέρηση στη διάδοση των σύγχρονων πολυκριτηριακών εργαλείων.
  - δεν είναι σαφής η επιχειρησιακή αξιοποίηση των αποτελεσμάτων τους.

## Συμπεράσματα (2)

- Η σύγχρονη οπτική στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων:
  - απορρίπτει τη λογική μιας αυτοματοποιημένης αλγοριθμικής διαδικασίας·
  - αποδέχεται την ύπαρξη πολλών ισοδύναμα αποδεκτών λύσεων, ως συνέπεια των εγγενών αβεβαιοτήτων σε όλα τα στάδια διαμόρφωσης ενός μοντέλου·
- Η ευρεία διάδοση όλο και πιο σύνθετων μοντέλων έρχεται σε αντίφαση:
  - με τη θεμελιώδη απαίτηση διατύπωσης σχημάτων φειδωλών σε παραμέτρους·
  - με την (διεθνώς παρατηρούμενη) υποβάθμιση της μέριμνας για μετρήσεις·
- Η ευρωστία ενός μοντέλου εξασφαλίζεται όταν:
  - η σχηματοποίηση και παραμετροποίησή του αντικατοπτρίζει τη διαθέσιμη γνώση για την υπό μελέτη λεκάνη·
  - αξιοποιείται κάθε τύπου πληροφορία καθώς και η υδρολογική εμπειρία, στην κατεύθυνση της παραγωγής ρεαλιστικών αποτελεσμάτων για κάθε πτυχή του·
- Η εφαρμογή πολυκριτηριακών προσεγγίσεων στη βαθμονόμηση:
  - είναι αναγκαία για την «ερμηνεία» σχημάτων με μεγάλο αριθμό παραμέτρων·
  - επιτρέπει ταυτόχρονη προσαρμογή σε πολλαπλές αποκρίσεις της λεκάνης·
  - βοηθά στην ανίχνευση αβεβαιοτήτων και δομικών σφαλμάτων·
  - συμβάλλει στον εντοπισμό πρόσφορων συμβιβαστικών λύσεων, με σχετικά μικρό φόρτο συγκριτικά με μια στρατηγική υβριδικής βελτιστοποίησης·

# Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Μέθοδος MEAS
  - Εμβάθυνση στις υπολογιστικές διαδικασίες και αλγοριθμικές παραμέτρους.
  - Αξιολόγηση με βάση θεωρητικές συναρτήσεις περισσότερων των δύο κριτηρίων.
  - Βελτίωση αποδοτικότητας, στην περίπτωση χρήσης περιορισμών εφικτότητας.
- Εκτίμηση παραμέτρων στοχαστικών μοντέλων
  - Πολυκριτηριακή προσέγγιση, για διάφορες εκδοχές στοχαστικών σχημάτων.
  - Κριτήρια αξιολόγησης υδρολογικά αποδεκτών λύσεων.
- Στρατηγική βαθμονόμησης σύνθετων μοντέλων
  - Μερική αυτοματοποίηση υβριδικής διαδικασίας, με διαδραστική επέμβαση του χρήστη στη βελτιστοποίηση.
  - Ανάλυση ευαισθησίας για διάφορα επίπεδα χωρικής ανάλυσης των διεργασιών και παραμέτρων, καθώς και λεπτομέρειας των δεδομένων εισόδου.
- Προοπτικές πολυκριτηριακής βαθμονόμησης
  - Ανάπτυξη πλαισίου αξιολόγησης βέλτιστων Pareto λύσεων, με βάση την προγνωστική τους ικανότητα.
  - Παράλληλη επεξεργασία αποτελεσμάτων, για εξοικονόμηση φόρτου.
  - Σύζευξη μεθόδων βελτιστοποίησης και ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας, με χρήση πιθανοτικών προσεγγίσεων.