ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Προσαρμογή εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου για βελτιστοποίηση στοχαστικών στοχικών συναρτήσεων σε προβλήματα υδατικών πόρων

Παναγιώτης Κοσσιέρης

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Διάρθρωση παρουσίασης

1. Διατύπωση προβλήματος στοχαστικής βελτιστοποίησης
2. Προσαρμογή εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου
3. Αξιολόγηση αλγορίθμου σε προβλήματα μαθηματικών συναρτήσεων
4. Στοχαστική βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου Ζυγός
5. Βαθμονόμηση μοντέλου βροχής Bartlett-Lewis και εφαρμογή στη βροχή της Αθήνας
6. Συμπεράσματα

Βελτιστοποίηση υπό αβεβαιότητα

- Η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την πλειονότητα των «πραγματικών» προβλημάτων βελτιστοποίησης, μεταξύ άλλων και των υδρολογικών
- Ως πηγές αβεβαιότητας θεωρούνται:
  - Τα σφάλματα μετρήσεων
  - Η έλλειψη μεγάλου μήκους δειγμάτων στη βαθμονόμηση
  - Η έλλειψη στοιχείων για κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος
  - Τα δομικά σφάλματα των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης, λόγω απλοποιητικών παραδοχών για κρίσιμες διεργασίες
  - Η διαχρονική μεταβολή των χαρακτηριστικών του συστήματος (λόγω εξωτερικών αλλαγών), που επηρεάζει τη μορφή του μέτρου επίδοσης και τους περιορισμούς
  - Η αδυναμία εκτίμησης της ακριβούς επίδοσης του συστήματος όταν δεν είναι διαθέσιμη η αναλυτική μαθηματική του διατύπωση
  - **Η χρήση τεχνικών δειγματοληψίας για την εκτίμηση της επίδοσης του συστήματος (στοχαστική προσομοίωση)**

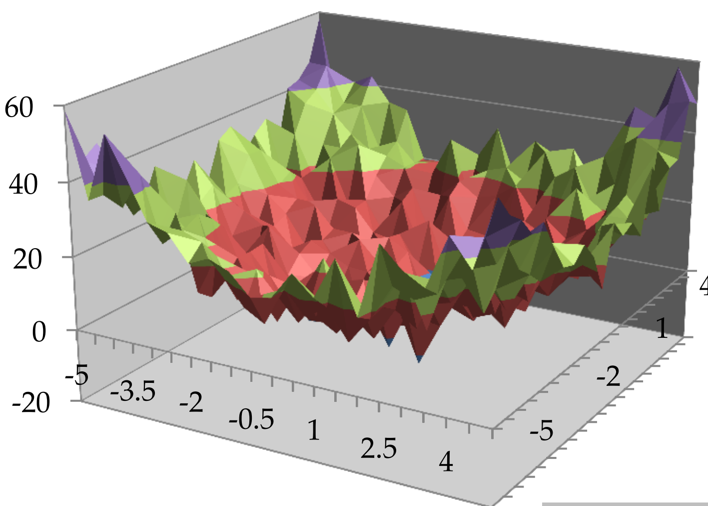
Ορισμός του προβλήματος

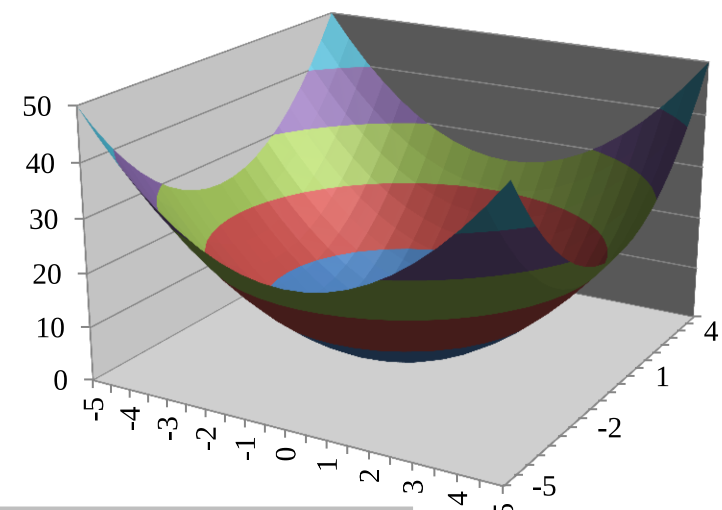
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης συστημάτων υπό αβεβαιότητα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής:

$$\min f(\mathbf{x}) = \min F(\mathbf{x}, \omega),\ \boldsymbol{\alpha} < \mathbf{x} < \mathbf{b}$$

όπου **x** διάνυσμα με *n* μεταβλητές ελέγχου, $f(\mathbf{x})$ το μέτρο επίδοσης, ω η στοχαστική συνιστώσα και $F(\mathbf{x}, \omega)$ μια τυχαία εκτίμηση του μέτρου επίδοσης στο σημείο **x**.

Στην περίπτωση μοντέλων προσομοίωσης, όπου η επίδοση του συστήματος *f* προκύπτει μέσω ιστορικών ή συνθετικών δειγμάτων, ο όρος ω συμβολίζει την αβεβαιότητα ως προς το δείγμα που επιλέγεται.





Σφαιροειδής συνάρτηση

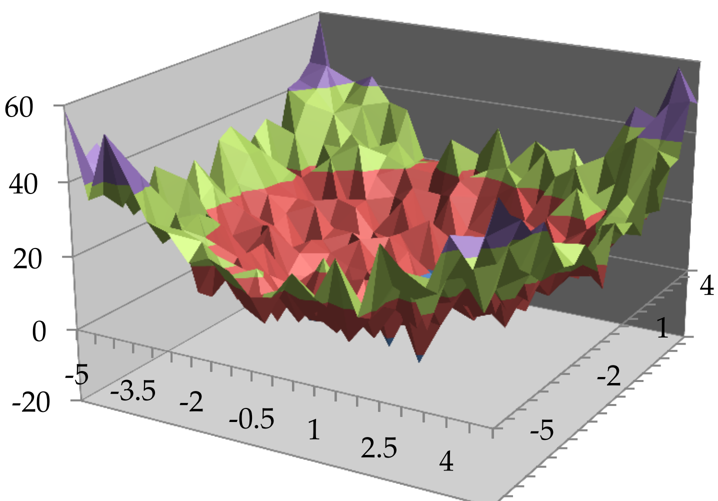
Ορισμός του προβλήματος

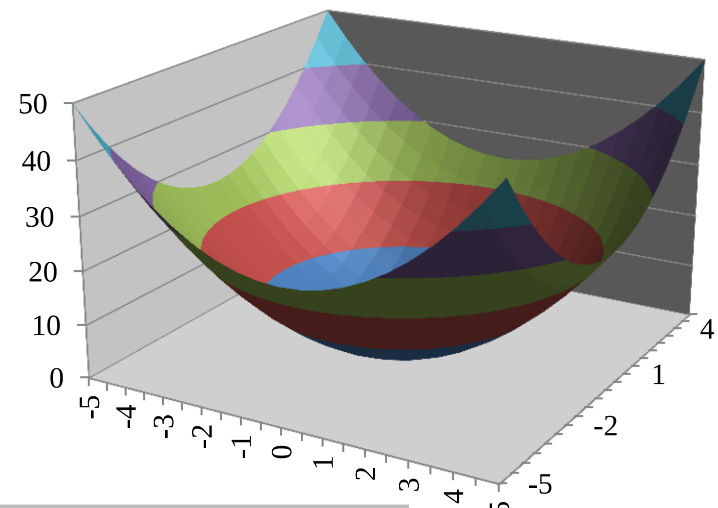
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης συστημάτων υπό αβεβαιότητα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής:

$$\min f(\mathbf{x}) = \min F(\mathbf{x}, \omega),\ \boldsymbol{\alpha} < \mathbf{x} < \mathbf{b}$$

όπου **x** διάνυσμα με *n* μεταβλητές ελέγχου, *f*(**x**) το μέτρο επίδοσης, *ω* η στοχαστική συνιστώσα και *F*(**x**, *ω*) μια τυχαία εκτίμηση του μέτρου επίδοσης στο σημείο **x**.

Στην περίπτωση μοντέλων προσομοίωσης, όπου η επίδοση του συστήματος *f* προκύπτει μέσω ιστορικών ή συνθετικών δειγμάτων, ο όρος *ω* συμβολίζει την αβεβαιότητα ως προς το δείγμα που επιλέγεται.





Σφαιροειδής συνάρτηση

Μέθοδοι επίλυσης στοχαστικών προβλημάτων

Μέθοδοι αναζήτησης τοπικών ακροτάτων

- **Τεχνικές έμμεσης αναζήτησης (μέθοδοι κλίσης)**
  - Μέθοδος στοχαστικής προσέγγισης-πλέον απότομης κατάβασης
  - Μέθοδοι προσέγγισης επιφάνειας απόκρισης
  - Τεχνικές εκτίμησης διανύσματος κλίσεων
- **Τεχνικές άμεσης αναζήτησης**
  - Μέθοδοι αναζήτησης σε πρότυπο
  - Μέθοδοι βασισμένες στο άπλοκο

Τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης

- **Αναζήτηση σε πλέγμα**
- **Τεχνικές Monte Carlo: Τυχαία δειγματοληψία**
- **Γενετικοί αλγόριθμοι**
- **Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης**
- **Ευρετικές μέθοδοι και υβριδικά σχήματα**

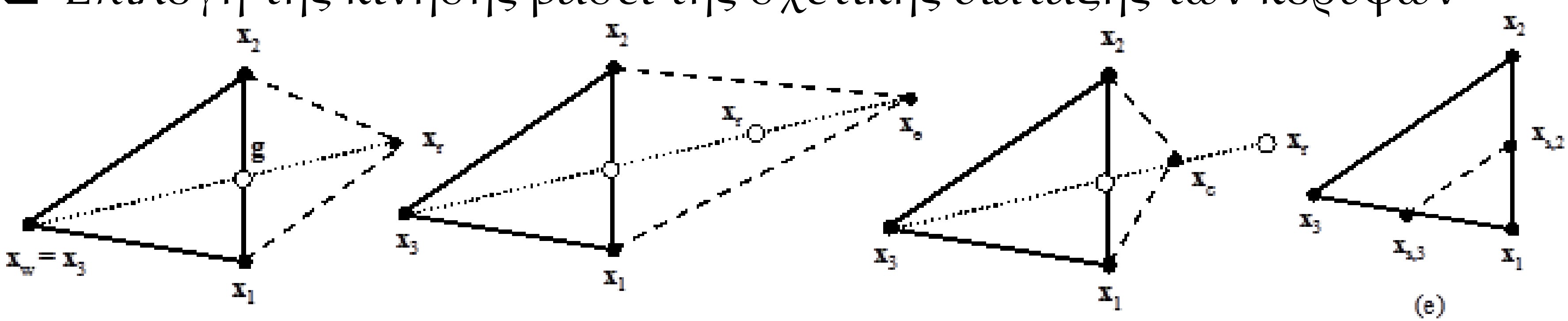
Μέθοδοι βασιζόμενες στο άπλοκο

Γενικό πλαίσιο

Άπλοκο ονομάζεται το γεωμετρικό σχήμα που ορίζεται από ένα σύνολο $n + 1$ γραμμικά ανεξάρτητων σημείων (κορυφών) στο R^n.

Αλγόριθμος κατερχόμενου απλόκου (Nelder & Mead, 1965)

- Χρήση του απλόκου ως γεωμετρικό ανάλογο της κλίσης για την εξερεύνηση του εφικτού χώρου αναζήτησης
- Παραγωγή νέων σημείων μέσω:
    - **Ανάκλασης** ως προς τη χειρότερη κορυφή
    - **Επέκτασης** ή **συμπίεσης** κατά τη διεύθυνση ανάκλασης
    - **Συρρίκνωσης** γύρω από την καλύτερη κορυφή
- Επιλογή της κίνησης βάσει της σχετικής διάταξης των κορυφών



Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης

Φυσικό υπόβαθρο

Ανόπτηση είναι η διαδικασία ψύξης ενός μετάλλου για την αποκατάσταση ελάχιστης ενέργειας στα μόρια του συστήματος. Αν η διαδικασία γίνει γρήγορα υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού σε μια κατάσταση υψηλότερης ενέργειας.

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης (Kirkpatrick et al., 1983)

- Στοχική συνάρτηση ως μαθηματικό ανάλογο της ενέργειας.
- Τα βήματα που βελτιώνουν τη τιμή της συνάρτησης γίνονται πάντα αποδεκτά, ενώ γίνονται αποδεκτά και βήματα αναρρίχησης, σύμφωνα με ένα πιθανοτικό κριτήριο που σχετίζεται με τη θερμοκρασία του συστήματος, *T*.
- Η πιθανότητα αποδοχής βημάτων αναρρίχησης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας που ρυθμίζεται μέσω ενός χρονοδιαγράμματος ανόπτησης. Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας εξασφαλίζει τον απεγκλωβισμό από τοπικά ακρότατα.

Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (1)

Γενικά χαρακτηριστικά

- **Ευρετική μέθοδος ολικής βελτιστοποίησης** (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2002) που συνδυάζει την ικανότητα της μεθόδου **προσομοιωμένης ανόπτησης** σε τραχείς επιφάνειες με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου **κατερχόμενου απλόκου** (Nelder & Mead, 1965) σε πιο ομαλές περιοχές.
- Τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι:
  - μια εξελικτική στρατηγική αναζήτησης με στόχο τη σταδιακή εξέλιξη ενός συνόλου σημείων-πληθυσμό (**εξελικτικοί αλγόριθμοι**)
  - η χρήση ενός αυτορρυθμιζόμενου χρονοδιαγράμματος ανόπτησης για τον έλεγχο της τυχαιότητας κατά τη διάρκεια της αναζήτησης
  - η χρήση ενός τροποποιημένου σχήματος κατερχόμενου απλόκου και η ενσωμάτωση τυχαιότητας στις κινήσεις του για την αποτελεσματικότερη προσαρμογή στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης
  - η χρήση στοχαστικών κανόνων μετάβασης και αποδοχής νέων λύσεων με την προσθήκη ενός στοχαστικού όρου, ανάλογου της θερμοκρασίας T, στη στοχική συνάρτηση, $g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + u\, T$
  - η ενσωμάτωση μηχανισμών που επιταχύνουν τη διαδικασία αναζήτησης (διαδοχικές επεκτάσεις) και επιτρέπουν τη διαφυγή από τοπικά ακρότατα (διαδοχικά βήματα ανάβασης)

Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (2)

Περιγραφή του αλγορίθμου

- Γεννάται ένας αρχικός πληθυσμός στο εσωτερικό του εφικτού χώρου
- Σε κάθε επανάληψη επιλέγονται με τυχαίο τρόπο $n + 1$ σημεία, που συνθέτουν το άπλοκο
- Εντοπίζεται η συμβατικά χειρότερη κορυφή του απλόκου σύμφωνα με το πιθανοτικό κριτήριο $g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + u\ T$ και εκτελείται ανάκλαση
- Ελέγχεται αν το σημείο ανάκλασης βελτιώνει την τιμή της συνάρτησης. Αν όχι, είτε απορρίπτεται είτε γίνεται αποδεκτό, βάσει κάποιου πιθανοτικού κριτηρίου που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του συστήματος T
  - Εφόσον επιτυγχάνεται βελτίωση, είτε εκτελούνται τυχαία διαδοχικά βήματα επέκτασης (επιτάχυνση της διαδικασίας) είτε εξωτερική συμπίεση
  - Εφόσον το σημείο απορρίπτεται, το άπλοκο εξελίσσεται εκτελώντας τυχαίες κινήσεις εσωτερικής συμπίεσης ή συρρίκνωσης
  - Εφόσον το σημείο γίνεται αποδεκτό, εκτελούνται ορισμένα βήματα αναρρίχησης για τον εντοπισμό γειτονικών περιοχών έλξης (μηχανισμός απεγκλωβισμού). Αν δεν επιτευχθεί αυτό, γεννάται ένα νέο σημείο μέσω μετάλλαξης, με στόχο τη διερεύνηση νέων περιοχών.

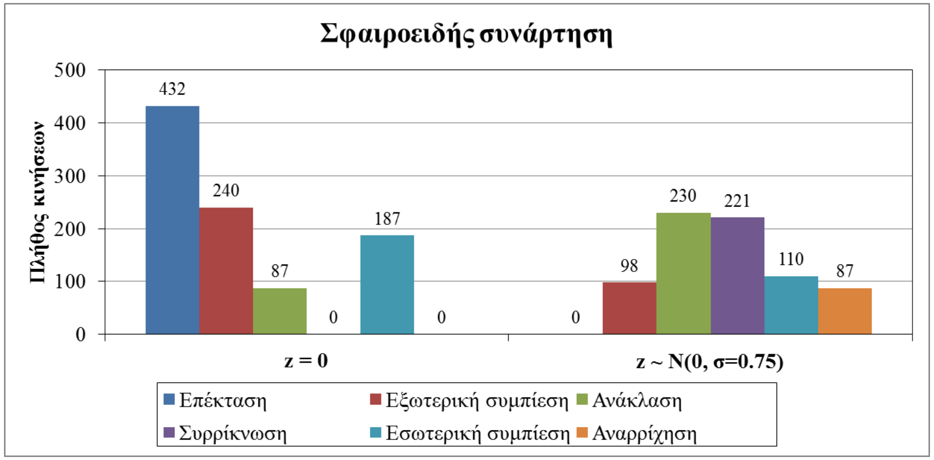
Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (3)

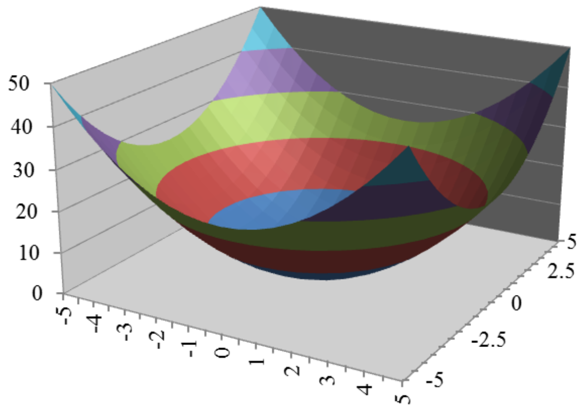
Ανάλυση αλγορίθμου για στοχαστικές στοχικές συναρτήσεις

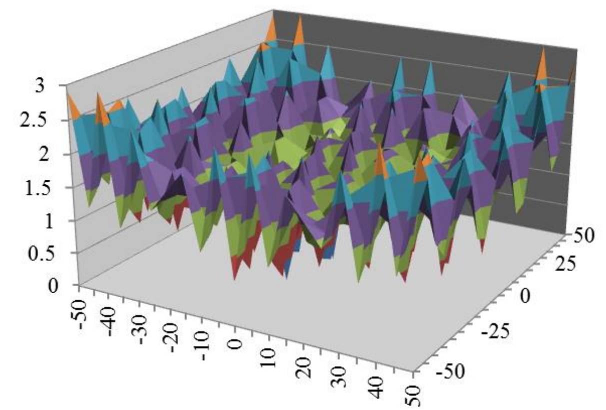
- **Εξέλιξη της διαδικασίας αναζήτησης με βάση τον πληθυσμό**
  - Εξερεύνηση μεγάλου ποσοστού του εφικτού χώρου αναζήτησης μέσω της παραγωγής σημείων, αρχικά μεγάλης διασποράς.
  - Γέννηση απλόκων με μεγάλο όγκο και συνεπώς μεγάλη ικανότητα κίνησης.
  - Χρήση πολλών απλόκων, αντί ενός, για τη εξερεύνηση του χώρου, που σημαίνει μικρότερη πιθανότητα γρήγορου εκφυλισμού
- **Χρήση του απλόκου για την εξερεύνηση του εφικτού χώρου**
  - Μεγάλη ικανότητα προσαρμογής στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μη κυρτών επιφανειών απόκρισης
  - Επιλογή κίνησης βάσει της σχετικής κατάταξης των κορυφών, που συνεπάγεται μικρή επίδραση του θορύβου στη διαδικασία
- **Ενσωμάτωση τεχνικών διαφυγής από τοπικά ακρότατα**
- **Αυτορρύθμιση αρχικής θερμοκρασίας χρονοδιαγράμματος ανόπτησης**
  - Αρχικά η απόκλιση μεταξύ των λύσεων οφείλεται κατά κύριο λόγω στη γεωμετρία της επιφάνειας απόκρισης και όχι στο θόρυβο

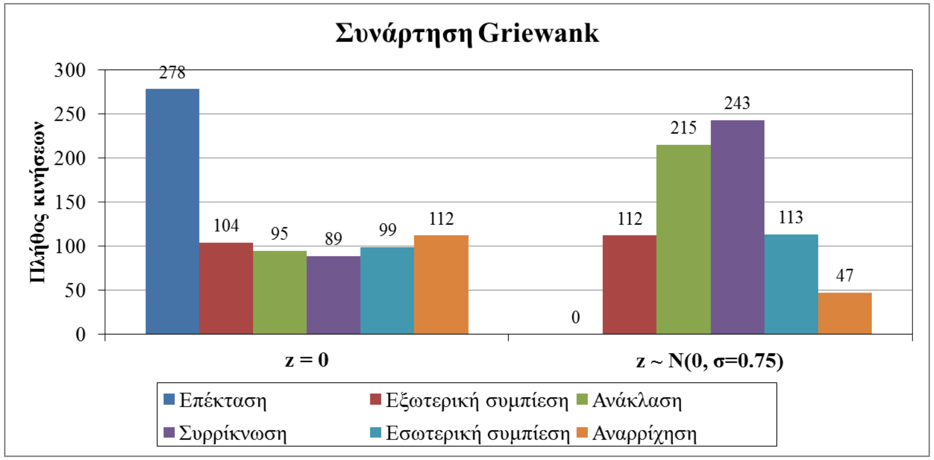
Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (4)

Ανάλυση συμπεριφοράς αλγορίθμου σε διαταραγμένες επιφάνειες







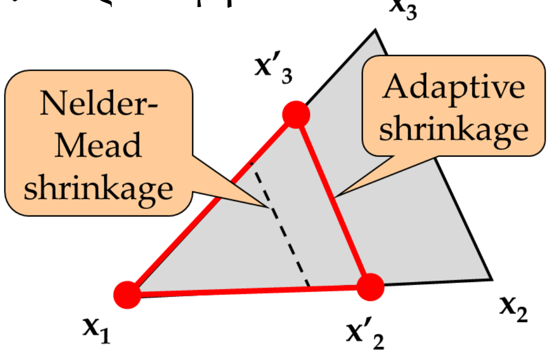


Η αβεβαιότητα αλλάζει δραστικά την πορεία αναζήτησης του αλγορίθμου, ευνοώντας κινήσεις που μειώνουν τον όγκο του απλόκου, ώστε να γίνει αποτελεσματική προσαρμογή στη διαταραγμένη επιφάνεια απόκρισης.

Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (5)

Ενσωμάτωση νέων στοιχείων και μηχανισμών

Ο αρχικός αλγόριθμος τροποποιήθηκε με στόχο την αποφυγή πρόωρης σύγκλισης σε κάποιο μη βέλτιστο σημείο λόγω της επικράτησης του θορύβου κατά τη διαδικασία αναζήτησης. Οι τροποποιήσεις αυτές περιλαμβάνουν:



- **Δυναμική ρύθμιση του συντελεστή συρρίκνωσης** ώστε να αποτρέπεται ο πρόωρος εκφυλισμός του απλόκου. Η ρύθμιση γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}'_s = \delta \mathbf{x}_i + (1-\delta)\mathbf{x}_1 \text{ , όπου } \delta = 1 - 0.5\frac{T^{[k]}}{T^{[0]}}$$

- **Επαναϋπολογισμός της τρέχουσας καλύτερης λύσης στον πληθυσμό** ύστερα από n διαδοχικούς μετασχηματισμούς που μειώνουν τον όγκο του απλόκου (συρρίκνωση ή συμπίεση) ή ύστερα από m επαναληπτικούς κύκλους που δεν έχει επιτευχθεί βελτίωση της λύσης. Η τακτική αυτή έχει ως στόχο να αποτρέψει την επικράτηση κάποιας τιμής που έχει λανθασμένα επιλεγεί ως βέλτιστη λόγω θορύβου ή λόγω λανθασμένης μέτρησης.
- **Επανανόπτηση του συστήματος** όταν η θερμοκρασία T γίνει μικρότερη από κάποια τιμή (π.χ. 0.1), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη τυχαιότητα κατά τα τελικά στάδια

Εφαρμογή σε μαθηματικά προβλήματα (1)

- Οι δυο αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον R υπό τη μορφή πλήρους πακέτου (http://itia.ntua.gr/en/softinfo/29/).
- Επιλέχτηκαν 6 τυπικές συναρτήσεις ελέγχου από τη βιβλιογραφία, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και πολυπλοκότητα. Το ολικό βέλτιστο σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται στη θέση $\mathbf{x}^* = \mathbf{0}$.
- Για κάθε πρόβλημα εκτελέστηκαν 100 στοχαστικά ανεξάρτητες βελτιστοποιήσεις, θεωρώντας $n = 2$ και $n = 10$ μεταβλητές επίλυσης, καθώς και τρία διαφορετικά μεγέθη πληθυσμού ($n + 1$, $2n + 1$, $8n + 1$).
- Η προσομοίωση της αβεβαιότητας που υπάρχει κατά τη βελτιστοποίηση πραγματικών συστημάτων έγινε με τη προσθήκη μιας τυχαίας μεταβλητής από κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν. Για την πιστότερη αναπαραγωγή της διαδικασίας επιλεχτήκαν τρία επίπεδα ένταση θορύβου, $N(0.0, 0.75)$, $N(0.0, 1.00)$ και $N(0.0, 1.25)$
- Η σύγκριση των δυο αλγορίθμων έγινε ως προς την ακρίβεια εντοπισμού του ολικά βέλτιστου σημείου της ντετερμινιστικής περίπτωσης.

Εφαρμογή σε μαθηματικά προβλήματα (2)

	Κλασικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (*n* = 2)											
	***m* = *n*+1**				***m* = 2*n*+1**				***m* = 8*n*+1**			
	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**
OF1	0.000	1.085	1.098	1.774	0.000	0.254	0.303	0.531	0.000	0.068	0.076	0.097
OF2	0.064	3.763	2.317	4.740	0.016	1.454	1.234	1.842	0.000	0.239	0.350	0.360
OF3	2.815	6.094	7.068	6.460	1.588	2.335	2.330	2.681	0.169	0.335	0.422	0.441
OF4	0.466	3.329	2.494	2.554	0.071	0.543	0.858	0.905	0.009	0.247	0.369	0.542
OF5	3.015	9.028	9.703	10.000	0.452	1.715	2.846	3.998	0.000	0.113	0.127	0.167
OF6	0.000	4.661	4.465	1.499	0.003	0.135	0.765	0.328	0.000	0.041	0.058	0.066
Μέση τιμή	**1.060**	**4.660**	**4.524**	**4.505**	**0.355**	**1.073**	**1.390**	**1.714**	**0.030**	**0.174**	**0.234**	**0.279**

	Τροποποιημένος αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (*n* = 2)											
	***m* = *n*+1**				***m* = 2*n*+1**				***m* = 8*n*+1**			
	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**	***z* = 0**	***N* (0, 0.75)**	***N* (0, 1.00)**	***N* (0, 1.25)**
OF1	0.000	0.303	0.324	0.596	0.000	0.129	0.217	0.228	0.000	0.092	0.097	0.108
OF2	0.003	1.506	1.238	1.240	0.001	0.389	0.578	0.597	0.000	0.096	0.137	0.115
OF3	0.641	2.560	2.600	3.520	0.060	0.488	0.637	0.686	0.000	0.134	0.228	0.197
OF4	0.025	0.957	0.801	1.293	0.011	0.335	0.398	0.451	0.000	0.531	0.664	0.610
OF5	0.495	4.341	8.226	5.872	0.000	0.896	0.474	0.708	0.000	0.183	0.240	0.320
OF6	0.000	0.370	0.635	0.758	0.000	0.079	0.080	0.114	0.000	0.052	0.070	0.082
Μέση τιμή	**0.194**	**1.673**	**2.304**	**2.213**	**0.012**	**0.386**	**0.397**	**0.464**	**0.000**	**0.182**	**0.239**	**0.239**

OF1: Σφαιροειδής; OF2: Rosenbrock's; OF3: Rastrigin's; OF4: Griewank's

OF5: Ackley's; OF7: Brown's almost-linear

Εφαρμογή σε μαθηματικά προβλήματα (3)

	Κλασικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου ($n = 10$)											
	$m = n+1$				$m = 2n+1$				$m = 8n+1$			
	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)
OF1	0.312	2.930	2.937	3.461	0.002	0.898	1.047	1.044	0.000	0.118	0.123	0.157
OF2	49.166	121.804	143.555	121.159	8.684	26.831	27.185	25.600	4.573	9.039	9.093	9.096
OF3	19.940	36.223	35.239	37.636	8.666	19.961	20.507	22.964	2.797	4.375	5.226	4.961
OF4	2.459	8.597	9.778	9.804	0.382	3.073	2.978	2.973	0.021	1.129	1.160	1.227
OF5	7.733	12.466	12.351	13.449	4.018	7.382	8.041	8.643	0.000	1.845	2.640	3.260
OF6	13.241	49.450	35.771	37.777	0.806	6.719	9.391	7.820	0.000	0.408	0.510	0.696
Μέση τιμή	**15.475**	**38.578**	**39.938**	**37.214**	**3.760**	**10.811**	**11.525**	**11.507**	**1.232**	**2.819**	**3.125**	**3.233**

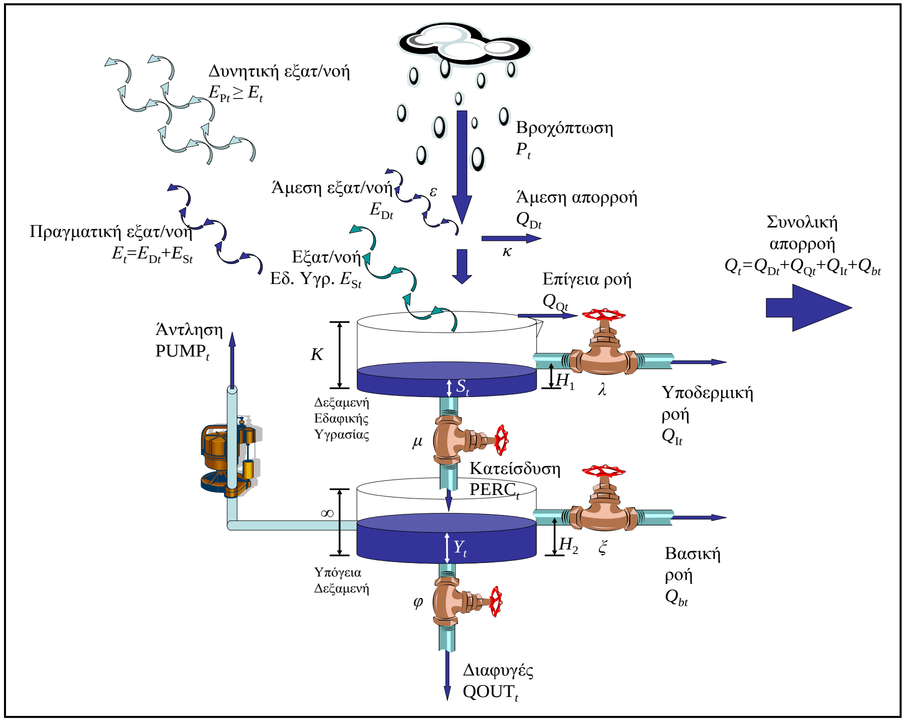
	Τροποποιημένος αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου ($n = 10$)											
	$m = n+1$				$m = 2n+1$				$m = 8n+1$			
	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)	$z = 0$	N (0, 0.75)	N (0, 1.00)	N (0, 1.25)
OF1	0.000	1.731	1.943	2.140	0.001	0.494	0.389	0.430	0.002	0.052	0.059	0.091
OF2	5.974	121.292	138.207	162.009	5.845	9.415	10.299	9.683	0.633	8.722	8.789	8.817
OF3	11.367	31.595	33.390	34.226	6.264	9.476	9.924	10.477	0.965	1.731	2.678	3.269
OF4	0.462	6.196	6.276	8.071	0.234	1.690	1.855	1.821	0.082	1.031	1.084	1.092
OF5	5.582	10.351	11.717	13.137	2.417	5.696	5.871	6.614	0.000	0.400	0.845	1.371
OF6	1.790	13.021	16.028	15.860	0.349	3.052	3.381	3.707	0.000	0.131	0.206	0.251
Μέση τιμή	**4.196**	**30.698**	**34.593**	**39.241**	**2.518**	**4.971**	**5.286**	**5.455**	**0.280**	**2.011**	**2.277**	**2.482**

OF1: Σφαιροειδής; OF2: Rosenbrock's; OF3: Rastrigin's; OF4: Griewank's

OF5: Ackley's; OF7: Brown's almost-linear

Βαθμονόμηση μοντέλου υδατικού ισοζυγίου

- **«Αντίστροφο» πρόβλημα**: εύρεση των παραμέτρων του μοντέλου ώστε να ελαχιστοποιείται η απόκλιση μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων απορροών.
- Προσαρμογή του υδρολογικού μοντέλου Ζυγός, 12 μεταβλητών ελέγχου (9 παράμετροι και 2 αρχικές συνθήκες). Υλοποίηση σε γλώσσα R.

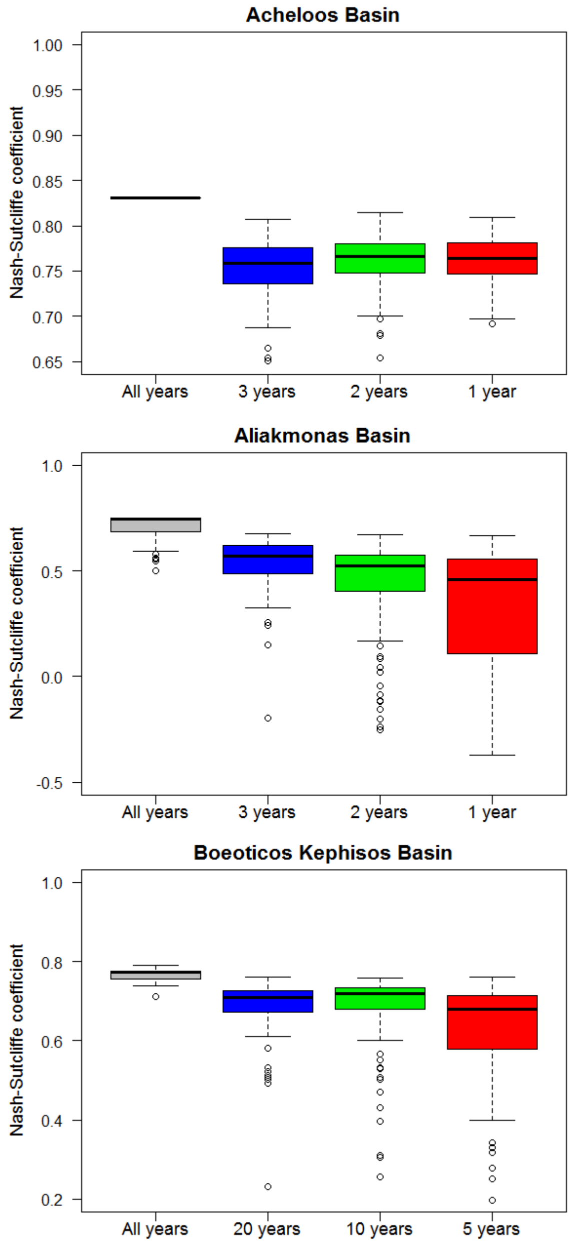


(πηγή: Kozanis et al., 2010)

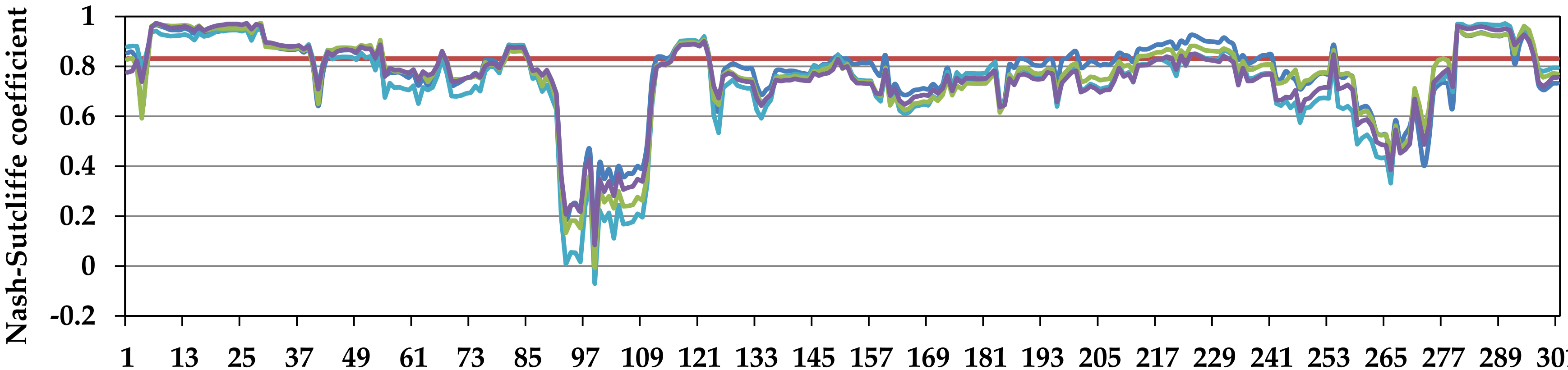
- Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διακρίνεται από πλήθος δυσκολιών και αβεβαιοτήτων. Κάποια από αυτά είναι:
  - Δομικά σφάλματα μοντέλου
  - Σφάλματα μετρήσεων και δεδομένων εισόδου
  - Εξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων
  - Μεροληψία από το μέτρο προσαρμογής που βελτιστοποιείται

Στοχαστική βαθμονόμηση

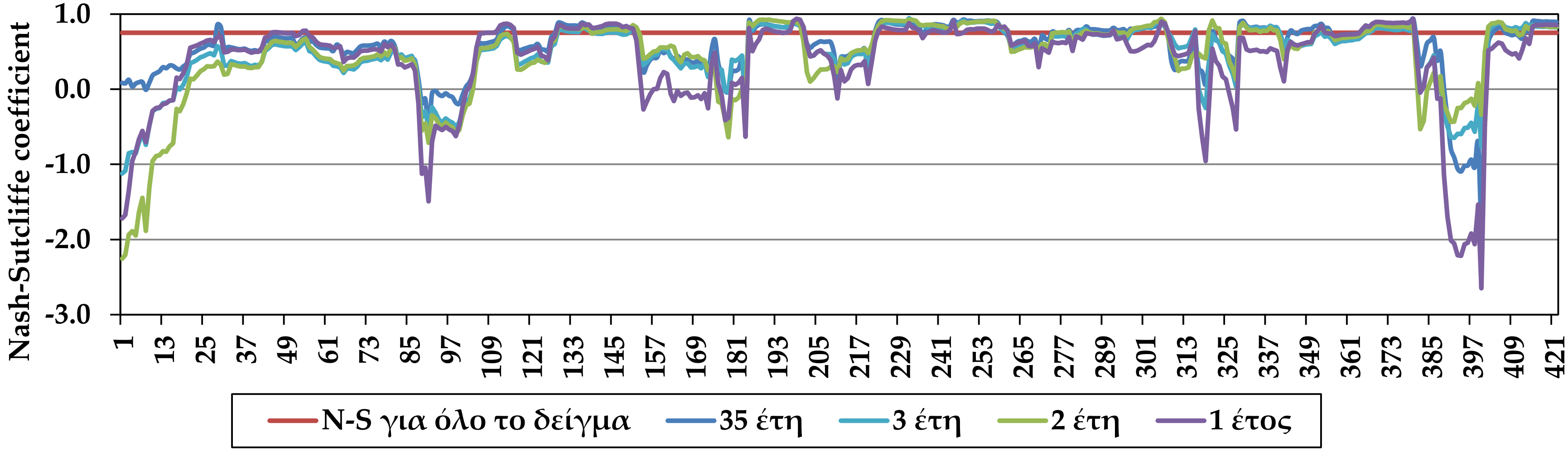
- Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων μεταβάλλονται ανάλογα με την περίοδο βαθμονόμησης, επηρεάζοντας την προγνωστική ικανότητά του.
- Για τον έλεγχο της ευρωστίας του μοντέλου και της διαδικασίας βελτιστοποίησης προτείνεται η στοχαστική βαθμονόμηση, όπου το κριτήριο προσαρμογής (π.χ. NSE) εκτιμάται μέσω μεταβαλλόμενων δειγμάτων που προκύπτουν με τυχαία επιλογή από το συνολικό δείγμα.
- Η παραπάνω τακτική εφαρμόστηκε για τη βαθμονόμηση του μοντέλο Ζυγός σε τρεις μεγάλες λεκάνες απορροής (Αχελώος, Αλιάκμονας, Βοιωτικός Κηφισός), με διαφορετική υδρολογική συμπεριφορά.
- Για κάθε λεκάνη εκτελέστηκαν 100 στοχαστικά ανεξάρτητες δοκιμές βαθμονόμησης με τη λήψη χρονικών παραθύρων διαφορετικού μήκους.



Στοχαστική βαθμονόμηση (2)



Λεκάνη Αχελώου



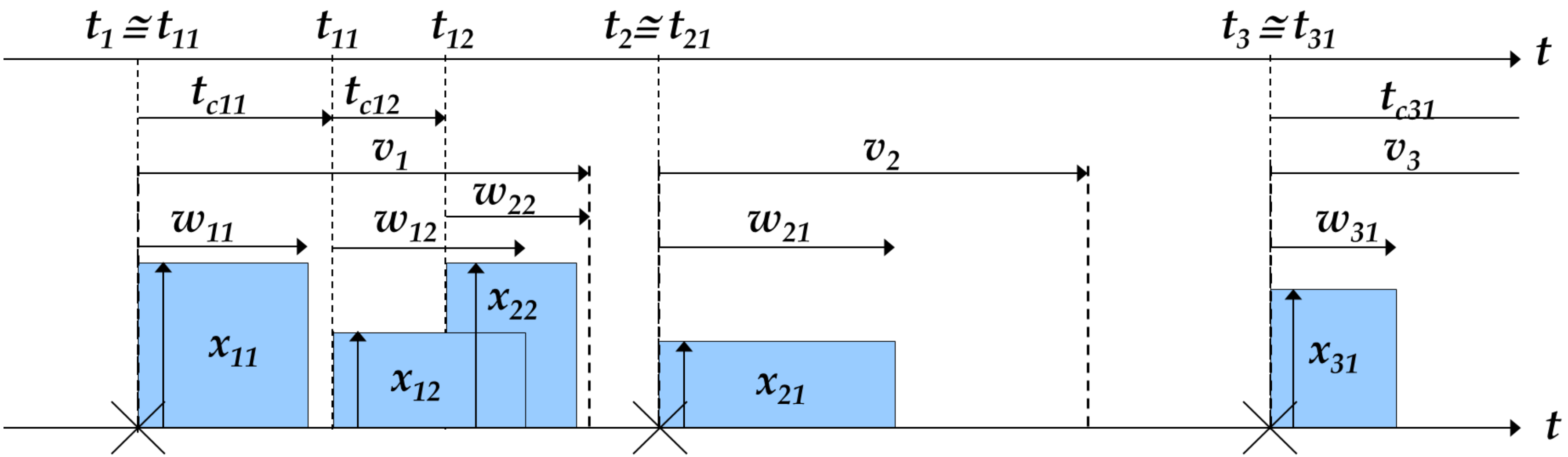
Λεκάνη Αλιάκμονα

Βαθμονόμηση μοντέλων σημειακών ανελίξεων

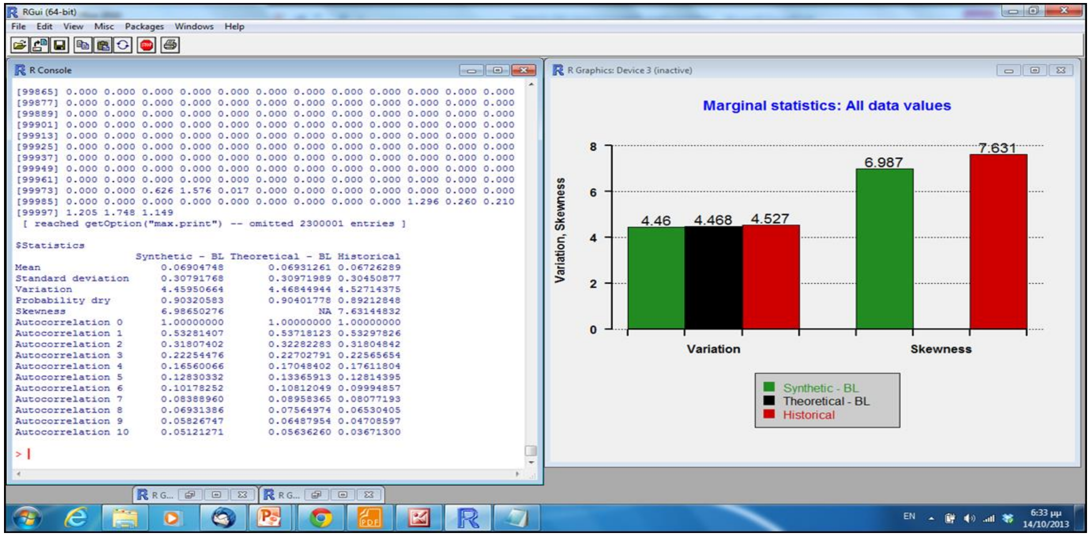
- Τα μοντέλα σημειακών ανελίξεων προσομοιώνουν τη βροχόπτωση σε συνεχή χρόνο με χρήση απλοποιητικών μαθηματικών παραδοχών (παραμέτρων) για τα βασικά μεγέθη του φαινομένου.
- Για δεδομένο σύνολο παραμέτρων, τα βασικότερα στατιστικά χαρακτηριστικά της βροχής (μέση τιμή, διασπορά, αυτοσυσχέτιση, πιθανότητα στεγνής περιόδου) υπολογίζονται αναλυτικά.
- Το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η εύρεση των παραμέτρων για δεδομένα μεγέθη, δεν έχει αναλυτική μαθηματική επίλυση.
- Η εκτίμηση επιτυγχάνεται μέσω βαθμονόμησης, επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση της “απόστασης” μεταξύ ιστορικών και θεωρητικών μεγεθών.
- Στο πρόβλημα ενσωματώνεται πλήθος αβεβαιοτήτων από:
  - την επιλογή των στατιστικών μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν
  - την έκφραση του μέτρου επίδοσης που υιοθετείται
  - την ιδιαίτερα πολύπλοκη μορφή της επιφάνειας απόκρισης
  - την ύπαρξη μεγάλου πλήθους ισοδύναμων φαινομενικά λύσεων (μεγάλο πλήθος τοπικών ελαχίστων)

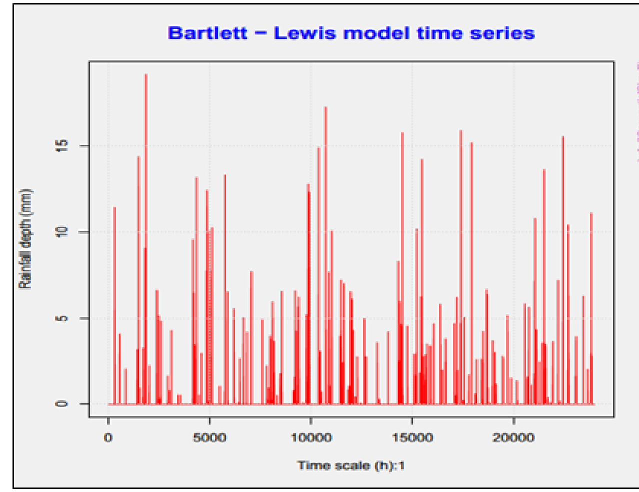
Μοντέλα ανέλιξης Bartlett-Lewis

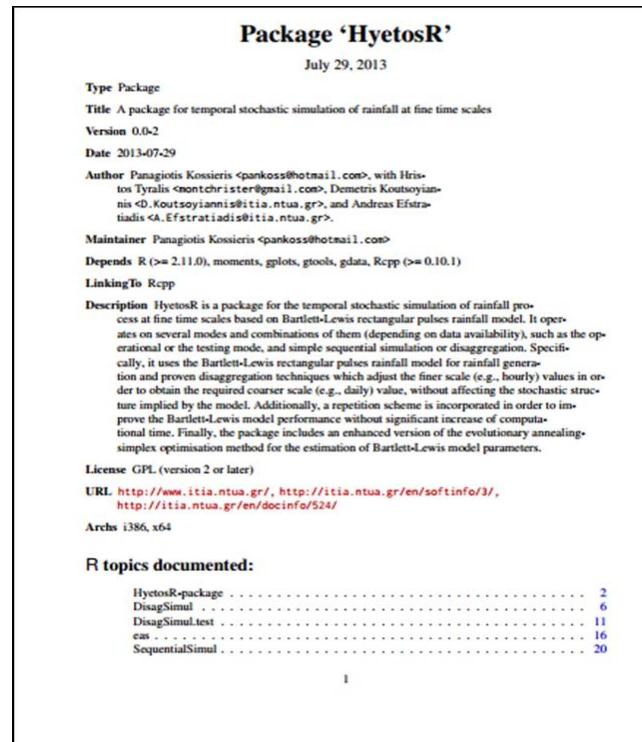
- Υποθέσεις αρχικού μοντέλου (Rodriguez-Iturbe et al., 1987)
  - **Αφίξεις καταιγίδων**, t_i, από ανέλιξη Poisson με παράμετρο λ
  - **Αφίξεις παλμών**, t_{ij}, από ανέλιξη Poisson με παράμετρο β
  - **Παράθυρο αφίξεων**, vij, από εκθετική κατανομή με παράμετρο γ
  - **Διάρκειες παλμών**, w_{ij}, από εκθετική κατανομή με παράμετρο η
  - **Εντάσεις παλμών**, x_{ij}, από εκθετική κατανομή με παράμετρο $1/\mu_\chi$
- Στο τυχαίο μοντέλο (Rodriguez-Iturbe et al., 1988) η παράμετρος η ακολουθεί γάμα κατανομή με παράμετρο κλίμακας υ και παράμετρο σχήματος α, και μεταβάλλεται μεταξύ των καταιγίδων έτσι ώστε οι λόγοι β/η και γ/η να παραμένουν σταθεροί.



Το λογισμικό HyetosR







Package 'HyetosR'

July 29, 2013

Type Package

Title A package for temporal stochastic simulation of rainfall at fine time scales

Version 0.0-2

Date 2013-07-29

Author Panagiotis Kossieris <pankoss@hotmail.com>, with Hristos Tyralis <montchrister@gmail.com>, Demetris Koutsoyiannis <D.Koutsoyiannis@itia.ntua.gr>, and Andreas Efstratiadis <A.Efstratiadis@itia.ntua.gr>.

Maintainer Panagiotis Kossieris <pankoss@hotmail.com>

Depends R (>= 2.11.0), moments, gplots, gtools, gdata, Rcpp (>= 0.10.1)

LinkingTo Rcpp

Description HyetosR is a package for the temporal stochastic simulation of rainfall process at fine time scales based on Bartlett-Lewis rectangular pulses rainfall model. It operates on several modes and combinations of them (depending on data availability), such as the operational or the testing mode, and simple sequential simulation or disaggregation. Specifically, it uses the Bartlett-Lewis rectangular pulses rainfall model for rainfall generation and proven disaggregation techniques which adjust the finer scale (e.g., hourly) values in order to obtain the required coarser scale (e.g., daily) value, without affecting the stochastic structure implied by the model. Additionally, a repetition scheme is incorporated in order to improve the Bartlett-Lewis model performance without significant increase of computational time. Finally, the package includes an enhanced version of the evolutionary annealing-simplex optimisation method for the estimation of Bartlett-Lewis model parameters.

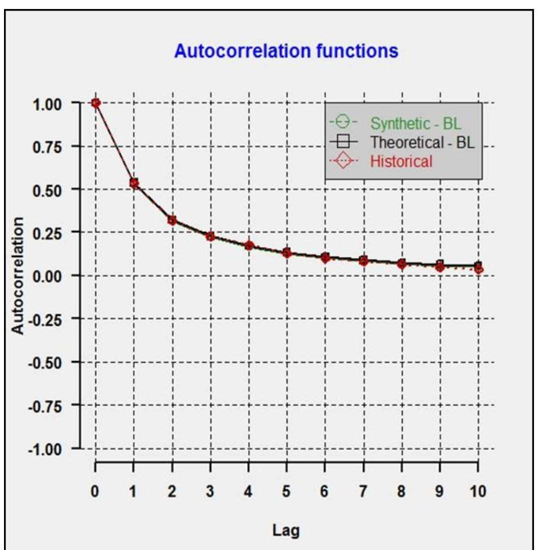
License GPL (version 2 or later)

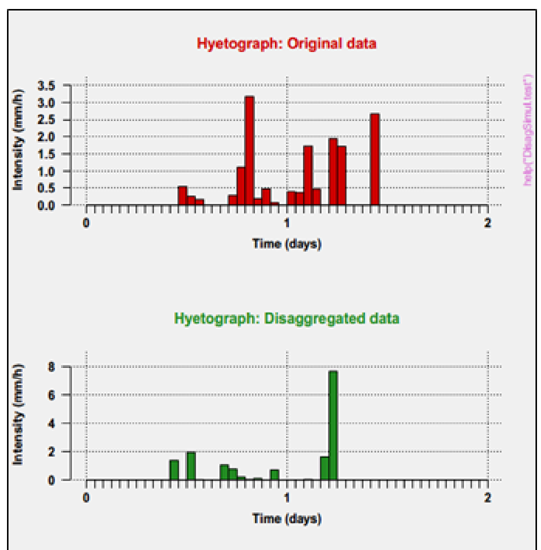
URL http://www.itia.ntua.gr/, http://itia.ntua.gr/en/softinfo/3/, http://itia.ntua.gr/en/docinfo/524/

Archs i386, x64

R topics documented:

1



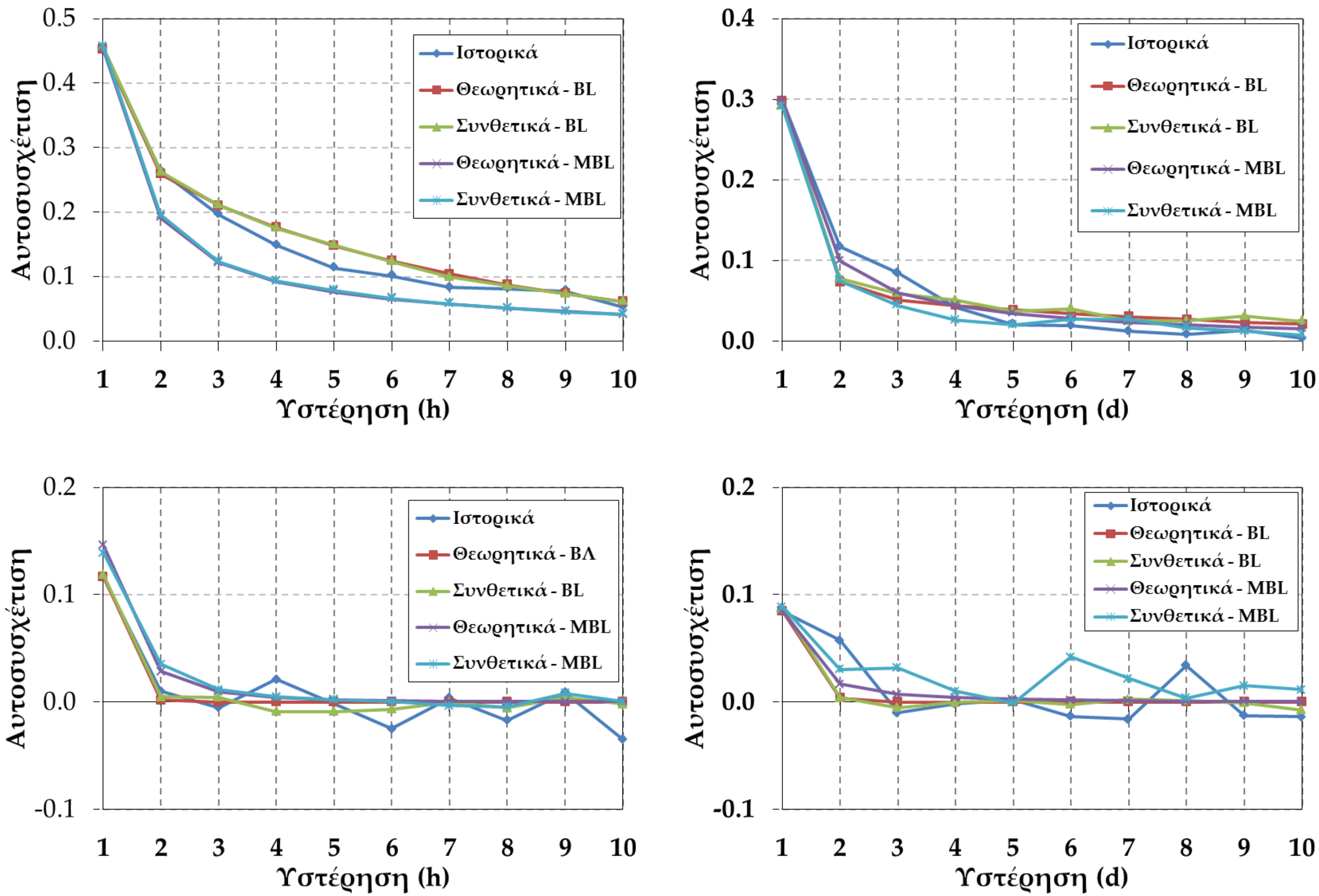


Εφαρμογή στη βροχή της Αθήνας

- Εξετάστηκε η επίδοση του κλασικού (BL) και του τυχαίου μοντέλου (MBL) Bartlett-Lewis στα ωριαία βροχομετρικά δεδομένα από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (1927 – 1996), για δυο μήνες με διαφορετική μετεωρολογική συμπεριφορά (Ιανουάριος, Ιούνιος).
- Για την εκτίμηση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν τα θεωρητικά στατιστικά μεγέθη (μέση τιμή, διασπορά, αυτοσυνδιασπορά και πιθανότητα απουσίας βροχόπτωσης) για τις κλίμακας 1 και 24 h.
- Τα προσομοιωμένα χαρακτηριστικά προέκυψαν από συνθετικές χρονοσειρές ωριαίων υψών βροχής μήκους 1000 ετών.

	Ιστορικά	**Θεωρητικά - BL**	**Συνθετικά - BL**	**Θεωρητικά - MBL**	**Συνθετικά - MBL**	
Μέση τιμή (mm)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	**Ιανουάριος (1h)**
Τυπική Απόκλιση (mm)	0.458	0.458	0.458	0.458	0.457	
Ασυμμετρία	16.957	-	11.884	-	12.663	
Μέση τιμή (mm)	1.555	1.555	1.557	1.563	1.563	**Ιανουάριος (24h)**
Τυπική Απόκλιση (mm)	4.532	4.532	4.535	4.053	4.083	
Ασυμμετρία	5.301	-	4.235	-	5.289	
Μέση τιμή (mm)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	**Ιούνιος (24h)**
Τυπική Απόκλιση (mm)	0.370	0.370	0.375	0.370	0.374	
Ασυμμετρία	50.578	-	47.684	-	49.428	
Μέση τιμή (mm)	0.365	0.365	0.360	0.365	0.365	**Ιούνιος (24h)**
Τυπική Απόκλιση (mm)	2.694	2.694	2.822	2.692	2.638	
Ασυμμετρία	11.881	-	13.807	-	22.757	

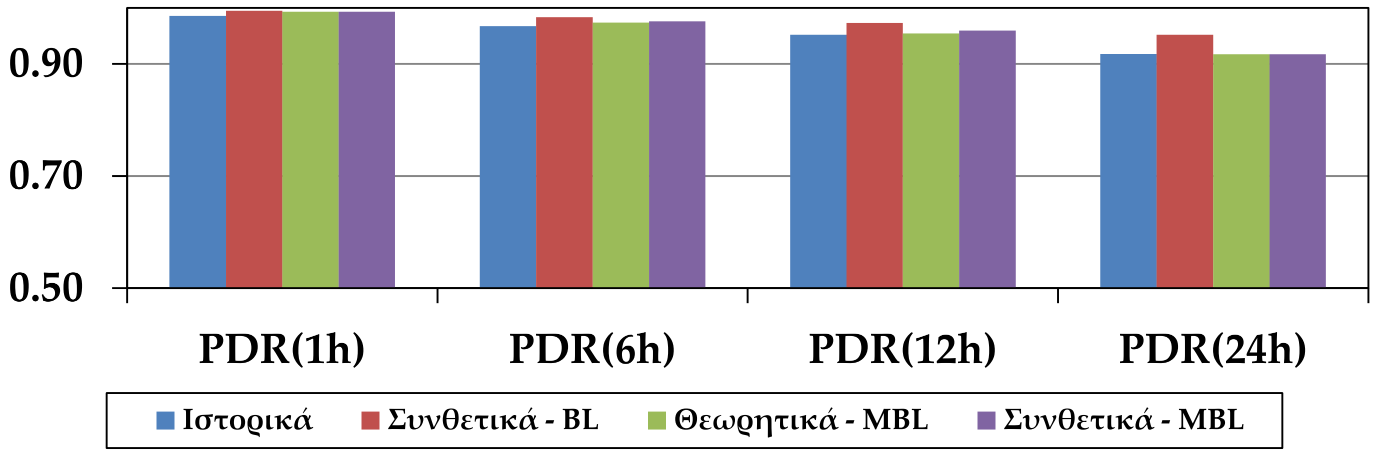
Αναπαραγωγή δομής αυτοσυσχέτισης



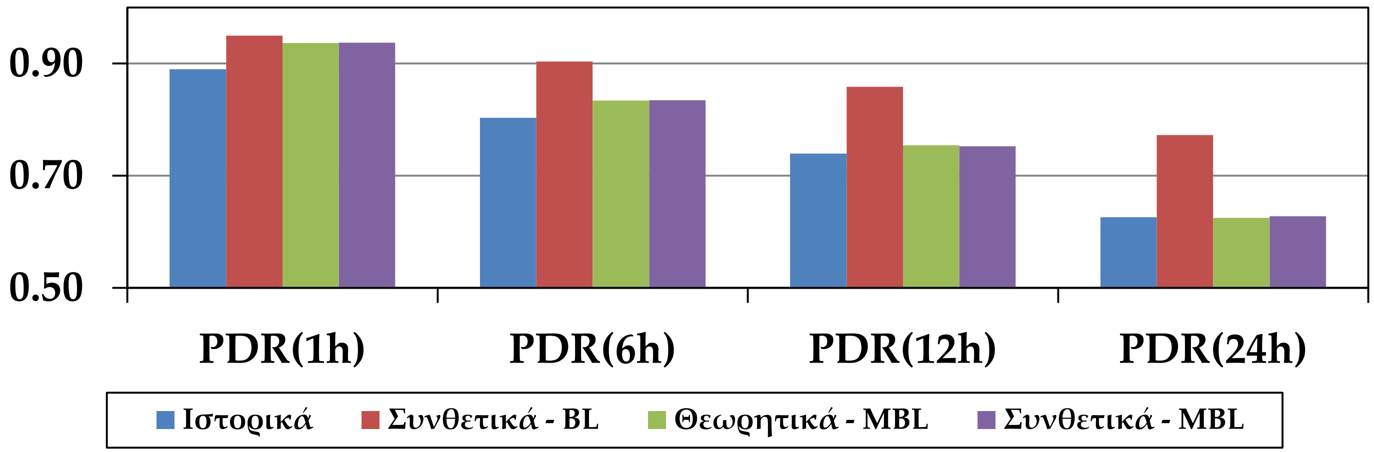
Ιανουάριος

Ιούνιος

Πιθανότητα απουσίας βροχόπτωσης



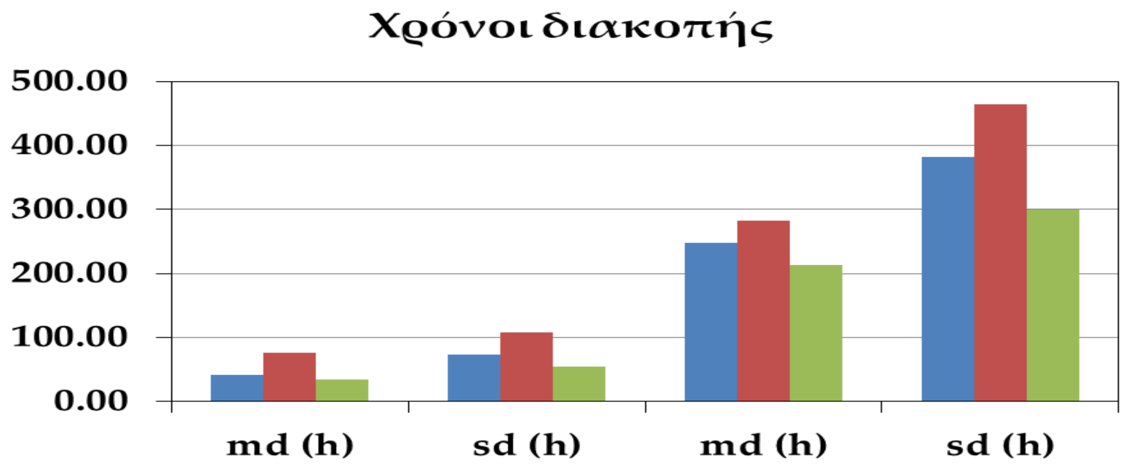
Ιανουάριος



Ιούνιος

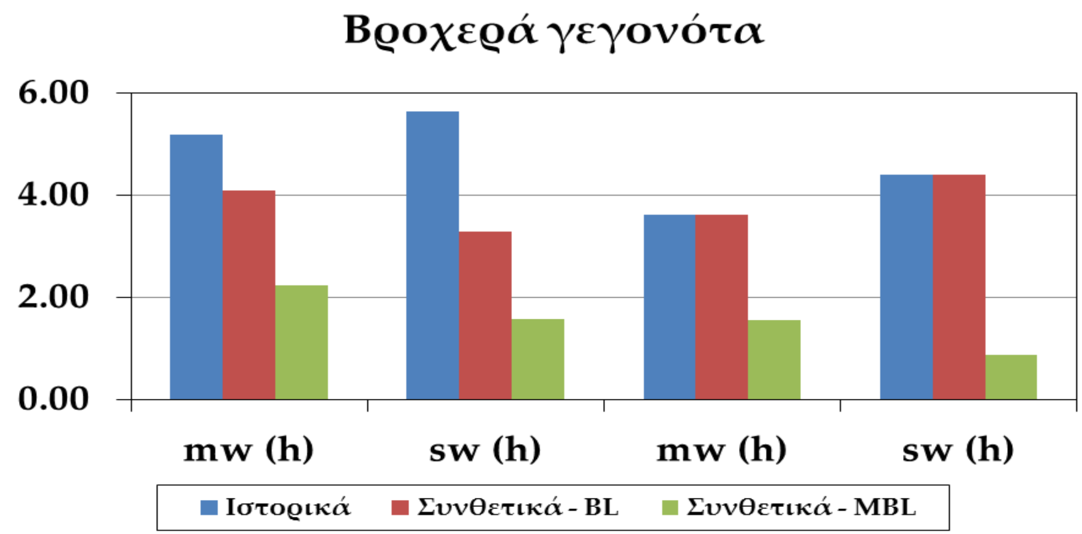
Χρονικές ιδιότητες γεγονότων

Και οι δυο εκδόσεις του μοντέλου Bartlett-Lewis αδυνατούν να αναπαράξουν την υψηλή μεταβλητότητα των γεγονότων βροχής, λόγω της υπερομαδοποίησης των παλμών εντός των καταιγίδων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της πιθανότητας απουσίας βροχόπτωσης στην ωριαία και ημερήσια κλίμακα, όπως επίσης και τη παραγωγή γεγονότων μικρότερης διάρκειας, mw(h), με μεγαλύτερους χρόνους διακοπής, md (h).



Ιανουάριος

Ιούνιος



Γενικά συμπεράσματα

- Οι διάφορες πηγές αβεβαιότητας επιβάλλουν την αντιμετώπιση των προβλημάτων βελτιστοποίησης ως στοχαστικών.
- Οι έντονα διαταραγμένες και συνεχώς μεταβαλλόμενες επιφάνειες απόκρισης δυσχεραίνουν ιδιαίτερα τη διαδικασία αναζήτησης, προκαλώντας συχνά πρόωρη σύγκλιση των αλγορίθμων σε μη βέλτιστα σημεία.
- Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου μετά τις προσαρμογές που έγιναν δείχνουν μεγάλη ικανότητα στο να εντοπίζουν εύρωστες λύσεις, ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση μεγάλων πληθυσμών.
- Οι νέοι μηχανισμοί που ενσωματώθηκαν προστατεύουν το άπλοκο από πρόωρο εκφυλισμό λόγω των διαδοχικών συρρικνώσεων και συμπιέσεων.

Ειδικά συμπεράσματα

- Η ευρωστία του αλγορίθμου αποδείχτηκε τόσο σε μαθηματικά προβλήματα όσο και στις δυο ιδιαίτερα απαιτητικές εφαρμογές.
- Με τη βοήθεια του μοντέλου Ζυγός αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη μέθοδος στοχαστικής βαθμονόμησης με χρήση κινητών παραθύρων, που αποσκοπεί να εξασφαλίσει καλύτερη προγνωστική ικανότητα των υδρολογικών μοντέλων σε αντικατάσταση του κλασικού προτύπου βαθμονόμηση-επαλήθευση.
- Το μοντέλο ορθογωνικών παλμών Bartlett-Lewis καταφέρνει να διατηρήσει με μεγάλη επιτυχία τα βασικά χαρακτηριστικά της βροχής της Αθήνας στην ωριαία και ημερήσια κλίμακα.
- Το μοντέλο BL αδυνατεί να αναπαράξει τις χρονικές ιδιότητες των βροχερών και στεγνών περιόδων, υπερεκτιμώντας τις μέσες διάρκειες των χρόνων διακοπής και υποεκτιμώντας τις διάρκειες των γεγονότων.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

- Efstratiadis, A., & D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of 5th International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423–1428, IWA, 2002.
- Rodriguez-Iturbe I., D.R. Cox, & V. Isham, Some models for rainfall based on stochastic point processes, *Proc. R. Soc. Lond.*, A410, 269-288, 1987.
- Rodriguez-Iturbe I., D.R. Cox, and V. Isham, A point process model for rainfall: Further developments, *Proc. R. Soc. Lond.*, A417, 283-298, 1988.
- Nelder, J. A., & R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, Science, 220, 671-680, 1983.
- Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4), Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας», Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 173 σελίδες, Αθήνα, Ιούνιος 2010.

Ευχαριστώ πολύ