



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

AMSEAS: Ένα προσαρμοστικό υβριδικό σχήμα μηχανικής μάθησης, εξελικτικών αλγορίθμων και ανόπτησης – απλόκου για βελτιστοποίηση στοχικών συναρτήσεων

Σπυρίδων Μ. Τσατταλιός

Επιβλέπων: Α. Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Διάρθρωση παρουσίασης

1. Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης
2. Επισκόπηση δημοφιλών μεθόδων και τεχνικών βελτιστοποίησης
3. Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης – απλόκου (EAS)
4. Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων
5. Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης – απλόκου εμπλουτισμένος με υποκατάστατα μοντέλα (SEEAS)
6. Ο νέος πρωτότυπος αλγόριθμος AMSEEAS
7. Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEAS μέσω σύγκρισής του με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης
8. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης συστημάτων

Βελτιστοποίηση



Η διαδικασία, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των **ακροτάτων** μιας συνάρτησης. Αναζητείται ένα διάνυσμα x^* , το οποίο ελαχιστοποιεί την **στοχική (αντικειμενική) συνάρτηση** του προβλήματος, f , στον συνεχή χώρο $D = [a, b] \subset \mathbb{R}^n$, δηλαδή:

$$f(x^*) = \min f(x), \quad a < x < b$$

**Η συνάρτηση f
στα προβλήματα
υδατικών πόρων:**

δεν έχει αναλυτική αλγεβρική έκφραση και δεν υπάρχει γνώση των παραγώγων της.

προκύπτει από την εφαρμογή ενός **μοντέλου προσομοίωσης**.

Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης

Μέθοδοι αναζήτησης τοπικών ακροτάτων

Τεχνικές έμμεσης αναζήτησης (μέθοδοι κλίσης): Βασίζονται στο διαφορικό λογισμό και απαιτούν γνώση των παραγώγων της συνάρτησης.

Τεχνικές άμεσης αναζήτησης: Δεν χρησιμοποιούν παραγώγους. Μια πολύ δημοφιλής κατηγορία τέτοιων τεχνικών είναι οι μέθοδοι που είναι βασισμένες στο άπλοκο.

Τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης

Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης

Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Ευρετικές μέθοδοι και υβριδικά σχήματα

Μέθοδοι βασισμένες στο άπλοκο (1/2)

Άπλοκο
(simplex)



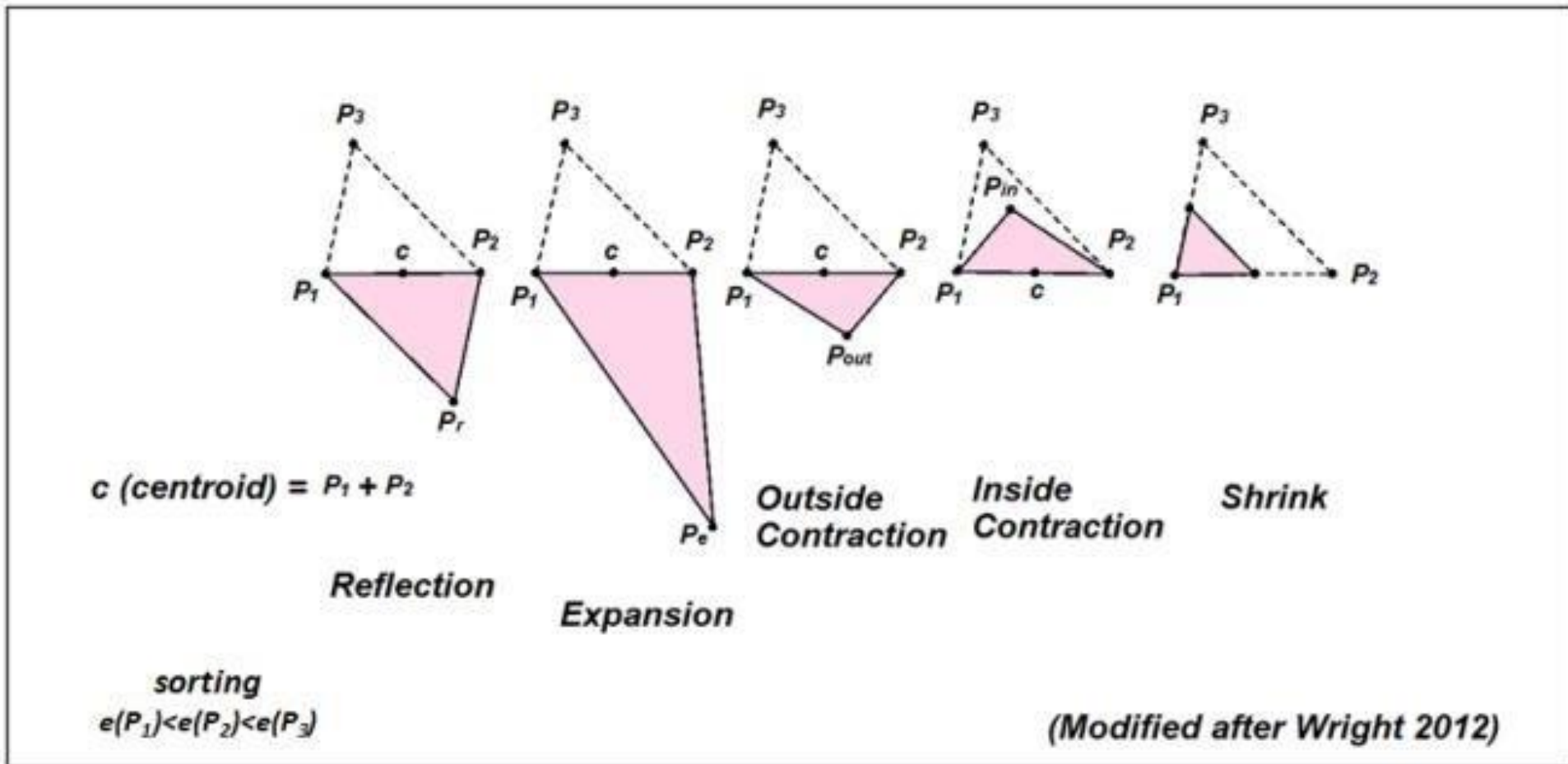
Γεωμετρικό κυρτό σχήμα, μη μηδενικού όγκου, που ορίζεται από ένα σύνολο $n+1$ σημείων, μη συνεπίπεδων, στο n -διάστατο πεδίο αναζήτησης R^n

Αλγόριθμος κατερχόμενου απλόκου (Nelder & Mead, 1965)

- Ο εφικτός χώρος αναζήτησης των λύσεων εξερευνάται μέσω **4 ειδών κινήσεων** του απλόκου:
 1. **Ανάκλαση** (reflection) της τρέχουσας χειρότερης κορυφής του απλόκου ως προς το κεντροειδές των υπολοίπων κορυφών.
 2. **Επέκταση** (expansion) κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης.
 3. **Εξωτερική ή εσωτερική συμπίεση** (outside/inside contraction) αντίθετα προς τη φορά ανάκλασης.
 4. **Συρρίκνωση** (shrinkage) γύρω από την τρέχουσα καλύτερη κορυφή του απλόκου.

Μέθοδοι βασισμένες στο άπλοκο (2/2)

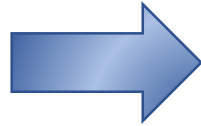
Κινήσεις του κατερχόμενου απλόκου



Πηγή: www.researchgate.net

Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτωσης (1/2)

Ανόπτωση



Διαδικασία ψύξης ενός υλικού πχ. μετάλλου, με στόχο την **αποκατάσταση ελάχιστης ενέργειας** στα μόρια του συστήματος. Για να καταστεί αυτό εφικτό, είναι απαραίτητος ο αργός ρυθμός ψύξης, καθώς διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος το σύστημα να εγκλωβιστεί σε μια κατάσταση υψηλότερης ενέργειας.

Γίνονται αποδεκτές από το σύστημα, όχι μόνο μεταβάσεις σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο, αλλά και ορισμένες μεταβάσεις σε υψηλότερο, σύμφωνα με κάποιο πιθανοτικό κριτήριο, με στόχο την προσπάθεια **διαφυγής από πιθανά τοπικά ενεργειακά ακρότατα**.

Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτωσης (2/2)

Αλγόριθμος ολικής βελτιστοποίησης των Kirkpatrick, et al., 1983

- Η αντικειμενική συνάρτηση αναπαριστά το μαθηματικό ανάλογο της ενέργειας του συστήματος.
- Στο σύστημα γίνονται πάντα αποδεκτές οι λύσεις που βελτιώνουν την τιμή της στοχικής συνάρτησης. Γίνονται όμως αποδεκτές και ορισμένες λύσεις που τη **χειροτερεύουν**, σύμφωνα με κάποιο **πιθανοτικό κριτήριο**, με στόχο την προσπάθεια **απεγκλωβισμού του αλγορίθμου από τοπικά ακρότατα**.
- Το πιθανοτικό κριτήριο σχετίζεται με τη θερμοκρασία του συστήματος, T , η οποία ρυθμίζεται μέσω ενός χρονοδιαγράμματος ανόπτωσης.

Γενετικοί αλγόριθμοι (1/3)

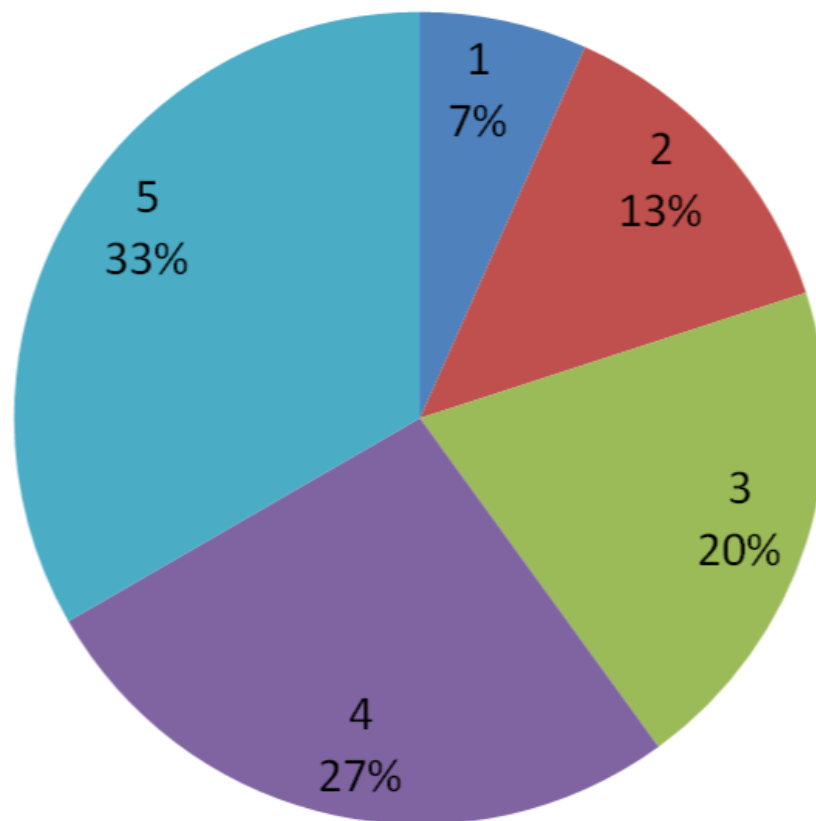
- ❖ Υποκατηγορία μιας ευρύτερης κατηγορίας αλγορίθμων, των λεγόμενων **εξελικτικών** αλγορίθμων.
- ❖ Εμπνευσμένοι από τις **αρχές της βιολογικής εξέλιξης** (θεωρία της εξέλιξης C. Darwin, 1858).
- ❖ Οι λύσεις του προβλήματος αποκαλούνται **άτομα**. Τα άτομα απαρτίζονται από συγκεκριμένα γενετικά χαρακτηριστικά, τα οποία ονομάζονται **χρωμοσώματα** και τα οποία κωδικοποιούνται σύμφωνα με κάποιο συγκεκριμένο σύστημα αρίθμησης πχ. δυαδικό.

Chromosome A	10110010110011100101
Chromosome B	11111110000000011111

- ❖ Η συγκλητική διαδικασία προχωρά με χρήση της έννοιας του **πληθυσμού** λύσεων, ο οποίος εξελίσσεται σε στάδια, τις λεγόμενες **γενιές**, μέσω χρήσης τριών **γενετικών τελεστών**, της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

Γενετικοί αλγόριθμοι (2/3)

- **Τελεστής επιλογής:** Αφορά στην επιλογή ορισμένων ατόμων του πληθυσμού για συμμετοχή στην διαδικασία **παραγωγής νέων λύσεων** του προβλήματος.

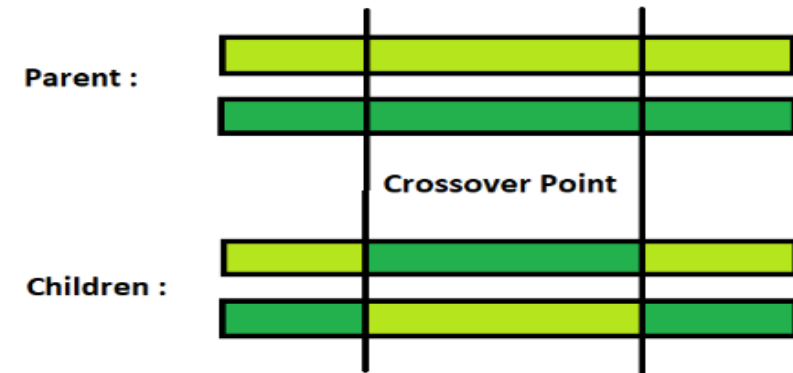
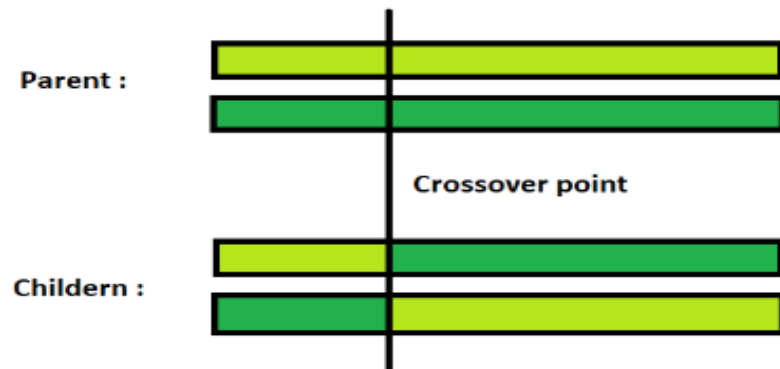


Individual	Fitness
1	1.0
2	2.0
3	3.0
4	4.0
5	5.0

Πηγή: www.researchgate.net

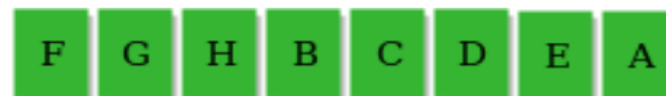
Γενετικοί αλγόριθμοι (3/3)

- **Τελεστής διασταύρωσης:** Δύο άτομα του πληθυσμού, που έχουν προκύψει μέσω του τελεστή της επιλογής, ανταλλάσσουν μέρος της γενετικής τους πληροφορίας, με στόχο την παραγωγή ισχυρότερων **απογόνων**.

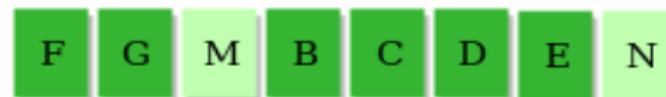


- **Τελεστής μετάλλαξης:** Αποσκοπεί στην ύπαρξη **γενετικής ποικιλομορφίας** εντός του πληθυσμού της κάθε γενιάς.

Before Mutation



After Mutation



Ο αλγόριθμος EAS (1/2)

Πλήρης ονομασία:

Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης – απλόκου



Evolutionary Annealing Simplex algorithm (**EAS**)

Βασική ιδέα: Σύζευξη της ικανότητας της **προσομοιωμένης ανόπτωσης** να απεγκλωβίζεται από τοπικά ακρότατα, με την ικανότητα του **απλόκου** να εντοπίζει μια περιοχή έλξης γρήγορα και με ακρίβεια. Ταυτόχρονα εισάγονται έννοιες από τους **εξελικτικούς αλγορίθμους**.

- ❖ Αναπτύχθηκε από τον Α. Ευστρατιάδη (2001, 2008).
- ❖ Παράγεται ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων με **τυχαίο** τρόπο.
- ❖ Η παραγωγή των νέων λύσεων, για την εξέλιξη του πληθυσμού, γίνεται μέσω του **απλόκου**.

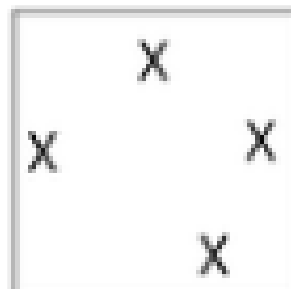
Ο αλγόριθμος EAS (2/2)

- ❖ Για την αξιολόγηση των κορυφών του απλόκου, δεν συγκρίνονται μόνο οι τιμές της στοχικής συνάρτησης της κάθε κορυφής, αλλά σε αυτές προστίθεται και ένας όρος **τυχειότητας**, ο οποίος προσαρμόζεται μέσω ενός **αυτορρυθμιζόμενου χρονοδιαγράμματος ανόπτησης**.
- ❖ Στο σύστημα ενσωματώνεται και ένας μηχανισμός **μετάλλαξης**, ο οποίος συμβάλλει στην ύπαρξη ποικιλομορφίας στις λύσεις του πληθυσμού.

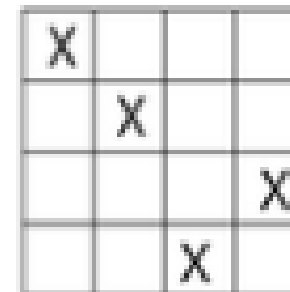
MATLAB  PYTHON

<https://github.com/spyrostsat/Global-Optimization-Algorithms/blob/main/EAS>

Παραγωγή αρχικού πληθυσμού μέσω τυχαίων λύσεων που ακολουθούν την **ομοιόμορφη κατανομή**:



Παραγωγή αρχικού πληθυσμού μέσω της στατιστικής μεθόδου **LHS**:



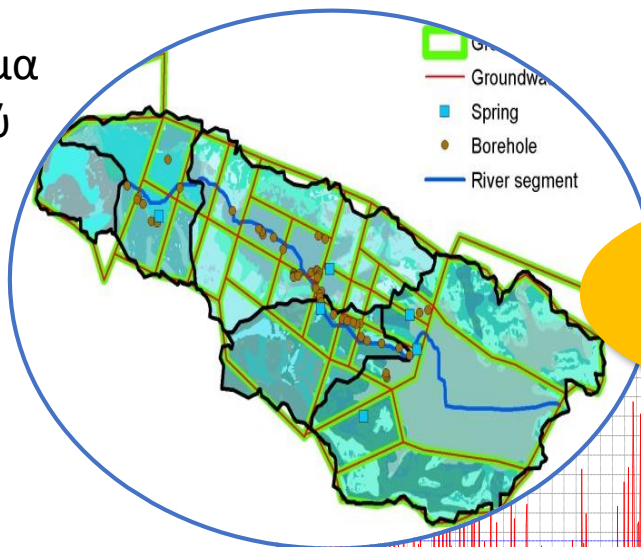
Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων (1/5)

Κίνητρο και ανάγκη

Σύνηθες ζήτημα σε πραγματικές εφαρμογές βελτιστοποίησης υδραυλικού μηχανικού:

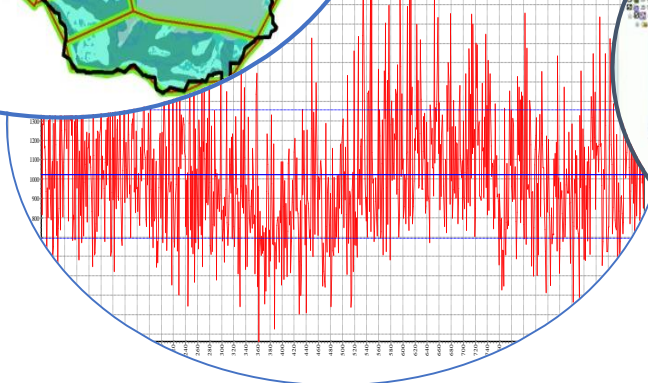
- ✓ **Χρονοβόρα** («δαπανηρή») **στοχική συνάρτηση**, που προκύπτει από πολύπλοκα μοντέλα προσομοίωσης, με ταυτόχρονη ύπαρξη αβεβαιότητας («**θορύβου**») στις τιμές της.

Καλιμπράρισμα
υδρολογικού
μοντέλου

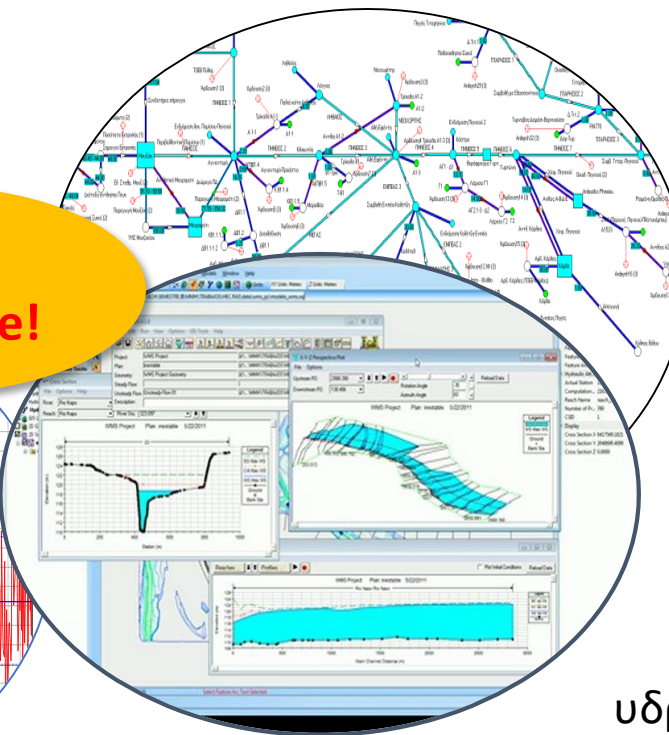


**Time
expensive!**

Στοχαστικά μοντέλα με
μεγάλες συνθετικές
χρονοσειρές



Προβλήματα λήψης
αποφάσεων σε πολύπλοκα
υδροσυστήματα με
πολλαπλά κριτήρια και
περιορισμούς



Αναλυτικά
υδραυλικά μοντέλα

Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων (2/5)

Κίνητρο και ανάγκη

- ✓ Η χρήση ενός τυπικού αλγορίθμου ολικής βελτιστοποίησης (πχ. γενετικού αλγορίθμου) αποφεύγεται σε τέτοια προβλήματα.



- ✓ Αρκεί να αναλογιστούμε έναν αλγόριθμο, ο οποίος για να αποκτήσει μόνο **1 μεμονωμένη τιμή** της στοχικής συνάρτησης απαιτείται υπολογιστικός φόρτος διάρκειας **1.5 λεπτού** και συνολικά χρειάζονται **10.000 επαναλήψεις** του μοντέλου για εύρεση μιας προσέγγισης του ελαχίστου.

Ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος για ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας θα ήταν:



$$1.5 \text{ min} \times 10.000 = 15.000 \text{ min} \approx 10 \text{ ημέρες!!}$$

Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων (3/5)

Ιδέα και ορισμός

Υποκατάστατα μοντέλα (surrogate models) ή αλλιώς μεταμοντέλα (metamodels)

- ✓ Συνήθεις τακτικές στον τομέα της βελτιστοποίησης συστημάτων.
- ✓ Αναλυτικά μοντέλα που **προσεγγίζουν** την επιφάνεια απόκρισης του πραγματικού μοντέλου προσομοίωσης.
- ✓ Ο χρόνος εκτέλεσής τους είναι **ασύλληπτα μειωμένος**.

**Υποκατάστατο
μοντέλο:**

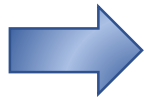


Εντοπίζει, γρήγορα, πιθανά «καλά» σημεία (λύσεις του προβλήματος), και ΜΟΝΟ σε αυτά τα «καλά» σημεία υπολογίζεται η τιμή της «χρονοβόρας» πραγματικής αντικειμενικής συνάρτησης.

Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων (4/5)

Υποκατάστατα μοντέλα και μηχανική μάθηση

**Μηχανική
Μάθηση
(Machine
Learning)**



Κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών, στον οποίο χρησιμοποιούνται τεχνικές στατιστικής, με στόχο να αποκτήσουν τα υπολογιστικά συστήματα την ικανότητα να **«μαθαίνουν»** από **δεδομένα** και να κάνουν προβλέψεις, χωρίς να ακολουθούν κάποιον ντετερμινιστικό αλγόριθμο.



Η έννοια των υποκατάστατων μοντέλων (5/5)

Υποκατάστατα μοντέλα και μηχανική μάθηση

Η έννοια των **μεταμοντέλων** είναι άμεσα συνυφασμένη με τον τομέα της **μηχανικής μάθησης** και γενικότερα με τον κλάδο της **τεχνητής νοημοσύνης** (artificial intelligence).

Οποιοδήποτε **μοντέλο παλινδρόμησης** (regression model) του τομέα της αυτοεκμάθησης μηχανών μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης, αποκτώντας το **ρόλο του υποκατάστατου μοντέλου**.

Ο αλγόριθμος SEEAS (1/4)

Γενικά στοιχεία

Πλήρης ονομασία:

Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης – απλόκου εμπλουτισμένος με υποκατάστατα μοντέλα



Surrogate – Enhanced Evolutionary Annealing Simplex algorithm (**SEEAS**)

- ❖ Αναπτύχθηκε από τους I. Tsoukalas, P. Kossieris, A. Efstratiadis και C. Makropoulos (2015).
- ❖ Αλγόριθμος ολικής βελτιστοποίησης ειδικά σχεδιασμένος για «χρονοβόρες» στοχαστικές συναρτήσεις.
- ❖ **Επέκταση του EAS.**
- ❖ Ενσωμάτωση ενός **υποκατάστατου μοντέλου** στον πυρήνα του EAS και συγκεκριμένα του Cubic Radial Basis Function with Linear Polynomial Tail.

Ο αλγόριθμος SEEAS (2/4)

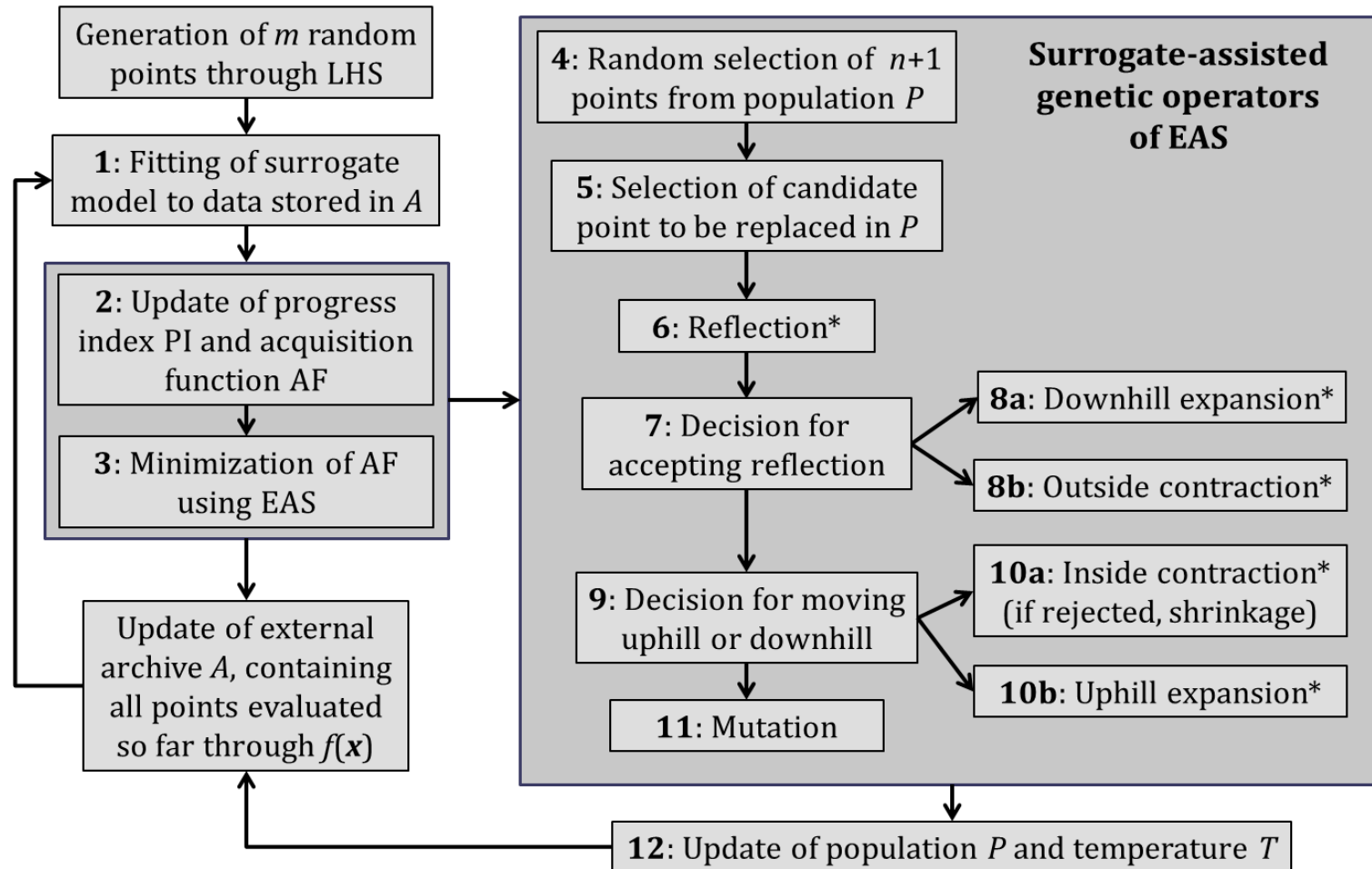
Επισκόπηση του αλγορίθμου

- ✓ Διατηρείται ένα **εξωτερικό αρχείο**, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα σημεία, στα οποία έχει γίνει υπολογισμός της πραγματικής «χρονοβόρας» αντικειμενικής συνάρτησης, για να μπορεί το μεταμοντέλο να κάνει προσαρμογή σε αυτά.

- ✓ Το **υποκατάστατο μοντέλο** στον SEEAS έχει δύο βασικές χρήσεις:
 1. Να **εντοπίζει λύσεις** του προβλήματος, οι οποίες βοηθούν στη συγκλητική διαδικασία και στις οποίες αξίζει να γίνει υπολογισμός της πραγματικής «χρονοβόρας» στοχικής συνάρτησης.
 2. Να **βοηθάει το κατερχόμενο άπλοκο**, διερευνώντας και προτείνοντας του κατευθύνσεις, για να εκτελέσει τις γνωστές κινήσεις του.

Ο αλγόριθμος SEEAS (3/4)

Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας



Ο αλγόριθμος SEEAS (4/4)

- ✓ Πολύ μεγάλη επιτυχία.
- ✓ Σύγκριση του με άλλους δημοφιλείς αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

MATLAB  PYTHON

<https://github.com/spyrostsat/Global-Optimization-Algorithms/blob/main/SEEAS>

Ο αλγόριθμος AMSEEEAS (1/3)

Γενικά στοιχεία

Πλήρης ονομασία:

Προσαρμοστικός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης – απλόκου εμπλουτισμένος με πολλά υποκατάστατα μοντέλα



Adaptive Multi-Surrogate Enhanced Evolutionary Annealing Simplex algorithm (**AMSEEEAS**)

- ❖ Πρωτότυπος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.
- ❖ Επέκταση του SEEAS.

Βασική ιδέα που εισάγεται: Δεν είναι ανάγκη ένας αλγόριθμος να περιορίζεται στην ενσωμάτωση ενός, μονάχα, μεταμοντέλου στον πυρήνα του. Πολλά μεταμοντέλα μπορούν να συνυπάρχουν στον ίδιο αλγόριθμο και να συνεργάζονται αποδοτικά στα πλαίσια μιας ομάδας, επιτυγχάνοντας βελτίωση της επίδοσης.

Ο αλγόριθμος AMSEEEAS (2/3)

Μοντέλα μηχανικής μάθησης

❖ Μελετώνται παραλλαγές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται στον αλγόριθμο, με πολλούς συνδυασμούς, 12 συνολικά διαφορετικά **μοντέλα αυτοεκμάθησης μηχανών**, εκ των οποίων **6**, τελικά, **ενσωματώνονται ταυτόχρονα** στον AMSEEEAS:

1. Decision Trees

2. Random Forests

3. Extra Trees

4. Gradient Boosting

5. Ada Boosting

6. Gaussian Processes

7. Cubic RBF with Polynomial Tail

8. Support Vector Machines

9. Polynomial Regression

10. Artificial Neural Networks

11. Naïve Bayes

12. k- Nearest Neighbors

Ο αλγόριθμος AMSEEEAS (3/3)

Θεμελιώδεις αρχές του αλγορίθμου

- ❖ Εισαγωγή της ιδέας **επιβολής ποινών στα μεταμοντέλα** που δεν έχουν επιθυμητή συμπεριφορά.
- ❖ Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ενεργοποίηση 1 υποκατάστατου μοντέλου από τα 6 συνολικά ενσωματωμένα (αμελητέα επιβάρυνση υπολογιστικού φόρτου).
- ❖ Πέραν αυτών των αλλαγών, η υπολογιστική διαδικασία του AMSEEEAS είναι **πανομοιότυπη** με αυτή του SEEAS.

**Υλοποίηση του AMSEEEAS σε
Python**



<https://github.com/spyrostsat/Global-Optimization-Algorithms/blob/main/AMSEEEAS>

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEEAS (1/13)

Σύγκριση του AMSEEEAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (1/7)

Σύγκριση του AMSEEEAS με 5 διαφορετικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης της διεθνούς κοινότητας:

- EAS (Efstratiadis, 2001)
- DDS (Tolson and Shoemaker, 2007)
- SEEAS (Tsoukalas et. al., 2015)
- DYCORS (Regis and Shoemaker, 2013)
- MLMSRBF (Regis and Shoemaker, 2007)

Δεν ενσωματώνουν στον πυρήνα τους κάποιο μεταμοντέλο

Ενσωματώνουν στον πυρήνα τους το ίδιο μεταμοντέλο, δηλαδή το Cubic RBF with Linear Polynomial Tail

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEES (2/13)

Σύγκριση του AMSEES με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (2/7)

Η σύγκριση γίνεται πάνω σε μία σουίτα συναρτήσεων αποτελούμενη από **6 συναρτήσεις ελέγχου**:

1. Sphere Function (Objective Function 1 – OF1)
2. Ackley Function (Objective Function 2 – OF2)
3. Griewank Function (Objective Function 3 – OF3)
4. Zakharov Function (Objective Function 4 – OF4)
5. Rastrigin Function (Objective Function 5 – OF5)
6. Levy Function (Objective Function 6 – OF6)

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2,$$

με $x_i \in [-5.12, 5.12]$ για $i = 1, 2, \dots, n$

Όλες αυτές οι συναρτήσεις έχουν ολικό ελάχιστο την τιμή $f_{\min} = 0$

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (3/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (3/7)

- ✓ 6 συναρτήσεις ελέγχου.
- ✓ Δύο διαφορετικές διαστάσεις για το κάθε πρόβλημα ($n = 15$ και $n = 30$ μεταβλητές ελέγχου).
- ✓ Δύο διαφορετικοί μέγιστοι επιτρεπόμενοι υπολογισμοί της στοχικής συνάρτησης (MFE = 500 και MFE = 1000 υπολογισμοί).
- ✓ Επομένως, **προκύπτουν 24 συνολικά διαφορετικά προβλήματα** προς βελτιστοποίηση.
- ✓ Για τη συλλογή επαρκών δειγμάτων, καθένα πρόβλημα εκτελείται 30 μεμονωμένες φορές.
- ✓ Εξασφάλιση **δίκαιων συγκρίσεων** μεταξύ των αλγορίθμων.

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEAS (4/13)

Σύγκριση του AMSEAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (4/7)

Συγκριτικοί πίνακες με μέτρο επίδοσης την μέση τιμή του κάθε δείγματος:

Mean and standard deviation of best solutions in 15-D test problems (optimal results are highlighted)													
MFE	Test Function	EAS		DDS		SEEAS		DYCORS		MLMSRBF		AMSEAS (GA)	
		Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev
500	OF1	1.938	0.978	0.852	0.479	0.002	0.001	0.002	0.001	0.019	0.014	0.0002	0.0002
	OF2	7.159	1.723	6.025	1.314	0.812	0.233	0.809	0.372	2.231	0.658	0.002	0.002
	OF3	7.682	2.997	2.626	1.269	0.538	0.118	0.885	0.084	1.085	0.052	0.853	0.118
	OF4	39.434	14.894	137.447	52.366	59.144	28.023	158.669	47.788	150.411	49.875	50.708	24.828
	OF5	86.245	14.148	24.887	7.081	46.268	15.359	38.958	12.340	45.920	18.803	30.651	18.990
	OF6	1.905	0.877	0.681	0.314	0.203	0.105	1.208	1.406	1.344	2.129	0.231	0.441
1000	OF1	0.378	0.177	0.150	0.079	0.001	0.001	0.001	0.000	0.011	0.007	0.0003	0.0002
	OF2	3.523	0.936	3.847	0.528	0.437	0.208	0.607	0.092	1.862	0.556	0.0002	0.0003
	OF3	2.444	1.061	1.505	0.299	0.368	0.140	0.809	0.082	1.040	0.037	0.833	0.118
	OF4	26.828	17.895	97.541	38.226	41.290	26.639	121.266	36.925	121.359	37.730	29.956	13.854
	OF5	59.735	17.012	11.233	3.136	29.733	12.838	33.585	13.490	35.784	11.031	19.689	9.266
	OF6	0.767	0.292	0.234	0.104	0.124	0.060	0.536	0.860	0.524	0.863	0.241	0.388

Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των καλύτερων λύσεων που βρέθηκαν από τους αλγορίθμους στα προβλήματα 15-D

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEES (5/13)

Σύγκριση του AMSEES με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (5/7)

Συγκριτικοί πίνακες με μέτρο επίδοσης την μέση τιμή του κάθε δείγματος:

<i>Mean and standard deviation of best solutions in 30-D test problems (optimal results are highlighted)</i>													
MFE	Test Function	EAS		DDS		SEEAS		DYCORS		MLMSRBF		AMSEES (GA)	
		Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev	Mean	StDev
500	OF1	4.305	1.163	9.516	2.737	0.019	0.006	0.083	0.034	0.739	0.708	0.003	0.002
	OF2	9.923	1.160	12.872	1.329	1.878	0.301	4.297	3.721	6.193	4.362	0.032	0.046
	OF3	17.866	3.455	38.398	12.050	0.782	0.118	1.265	0.079	3.459	1.927	0.983	0.038
	OF4	117.821	28.757	562.145	113.230	173.240	44.185	472.815	90.897	575.424	174.073	298.921	116.243
	OF5	228.693	18.442	132.149	24.567	122.658	19.427	112.046	23.076	165.437	46.846	177.644	20.262
	OF6	6.338	2.652	15.823	5.481	0.659	0.184	3.407	2.540	7.326	10.944	0.660	0.714
1000	OF1	2.529	0.933	2.112	0.791	0.006	0.004	0.011	0.004	0.358	0.177	0.003	0.003
	OF2	6.516	0.845	7.670	0.924	1.206	0.297	1.085	0.168	3.643	1.103	0.002	0.003
	OF3	8.836	2.617	8.273	2.679	0.549	0.093	1.020	0.026	2.420	0.713	1.005	0.106
	OF4	94.598	20.317	412.238	118.573	151.472	54.097	403.812	93.081	491.425	146.097	175.583	59.006
	OF5	198.335	16.587	71.598	15.028	98.371	19.505	85.267	22.956	134.864	39.193	54.790	42.263
	OF6	2.683	0.736	3.921	2.215	0.443	0.126	4.213	5.440	2.865	4.583	0.239	0.184

Μέση τιμή και τυπική απόκλιση των καλύτερων λύσεων που βρέθηκαν από τους αλγορίθμους στα προβλήματα 30-D

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEEAS (6/13)

Σύγκριση του AMSEEEAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (6/7)

Συγκριτικοί πίνακες με μέτρο επίδοσης την μέση τιμή του κάθε δείγματος:

	EAS	DDS	SEEAS	DYCORS	MLMSRBF	AMSEEEAS (GA)
1ος (φορές)	4	2	7	1	0	11
2ος (φορές)	0	2	10	5	0	8
3ος (φορές)	1	2	5	10	0	4
4ος (φορές)	1	2	1	4	16	0
5ος (φορές)	6	9	1	2	5	1
6ος (φορές)	12	7	0	2	3	0

Κατάταξη της επίδοσης των αλγορίθμων σύμφωνα με τη μέση τιμή των καλύτερων λύσεων που βρέθηκαν στα προβλήματα 15-D και 30-D

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEEAS (7/13)

Σύγκριση του AMSEEEAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε συναρτήσεις ελέγχου (7/7)

Αντίστοιχα, προκύπτουν και οι συγκριτικοί πίνακες με μέτρο επίδοσης την **διάμεσο** του κάθε δείγματος:

	EAS	DDS	SEEAS	DYCORS	MLMSRBF	AMSEEEAS (GA)
1ος (φορές)	4	2	4	2	0	12
2ος (φορές)	0	1	13	5	0	7
3ος (φορές)	0	1	5	9	3	4
4ος (φορές)	1	4	1	4	15	0
5ος (φορές)	6	9	1	2	4	1
6ος (φορές)	13	7	0	2	2	0

Κατάταξη της επίδοσης των αλγορίθμων σύμφωνα με τη διάμεσο των καλύτερων λύσεων που βρέθηκαν στα προβλήματα 15-D και 30-D

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (8/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (1/6)

- ❖ Μελετάται η λεκάνη απορροής του Ευήνου.
- ❖ Για ένα χρονικό διάστημα 50 ετών είναι δεδομένες οι μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και παρατηρημένης απορροής.
- ❖ Από τις **ιστορικές χρονοσειρές**, με χρήση του στοχαστικού μοντέλου **anySim** (Tsoukalas et. al., 2020) παράγονται **συνθετικές χρονοσειρές** για την βροχόπτωση, τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και την παρατηρημένη απορροή, μήκους 2048 ετών.

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (9/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (2/6)

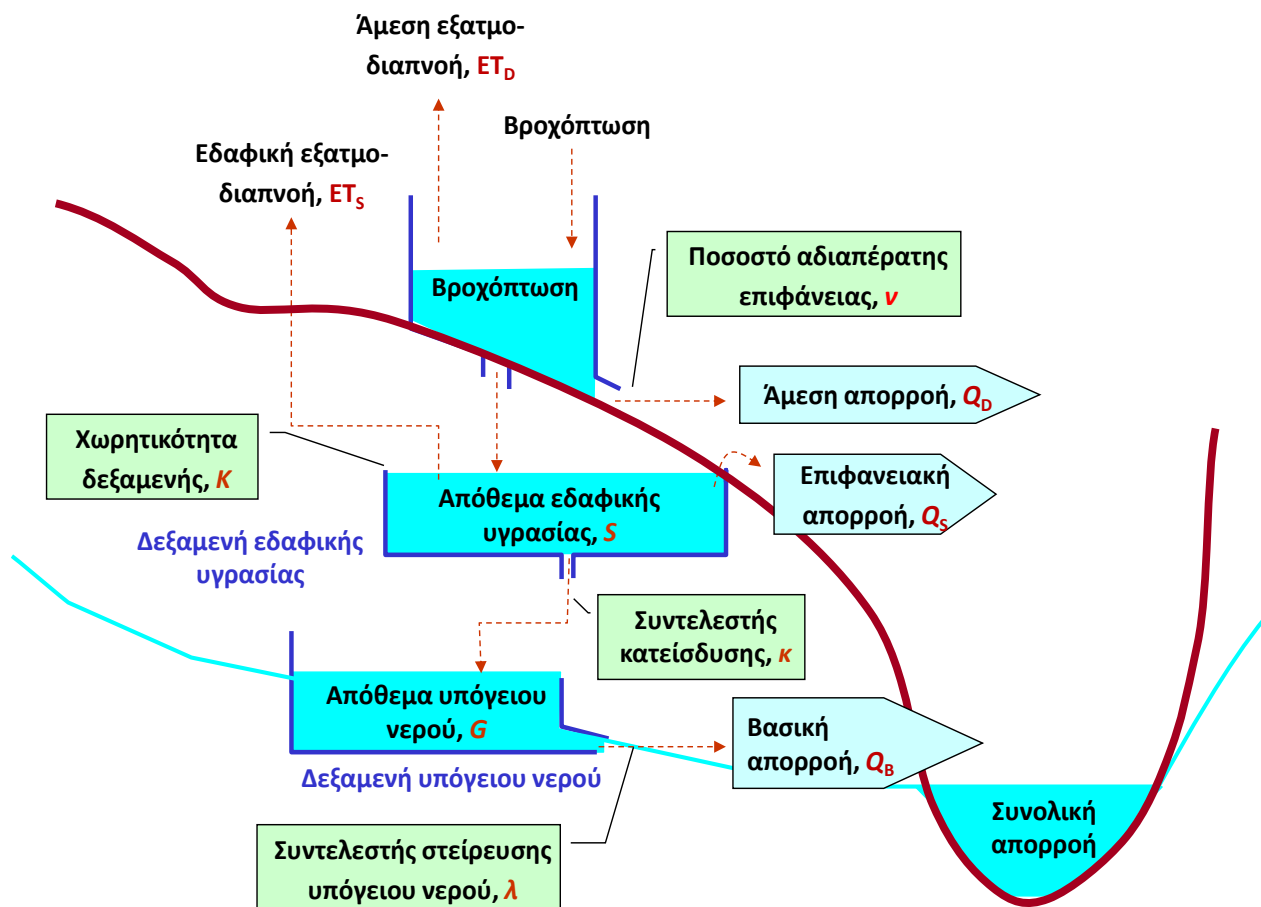
Στόχος του προβλήματος



Επιδιώκεται η επίλυση του κλασικού «αντίστροφου» προβλήματος, δηλαδή του προβλήματος **καλιμπραρίσματος** μοντέλου, στο οποίο αναζητούνται οι καταλληλότερες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, με στόχο την ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων απορροών.

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (10/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (3/6)



Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου

Εκτιμάται η συνολική απορροή της λεκάνης με εφαρμογή διαδοχικών μετασχηματισμών της βροχόπτωσης, μέσω ενός συστήματος διασυνδεδεμένων δεξαμενών.

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (11/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (4/6)

- ❖ Το πρόβλημα βελτιστοποίησης αφορά την εύρεση των καταλληλότερων τιμών για τις ακόλουθες **4 μεταβλητές ελέγχου**:
 - ✓ το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας, v
 - ✓ τη χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, K
 - ✓ τον συντελεστή κατείσδυσης, k
 - ✓ τον συντελεστή στείρευσης υπόγειου νερού, λ

Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEEAS (12/13)

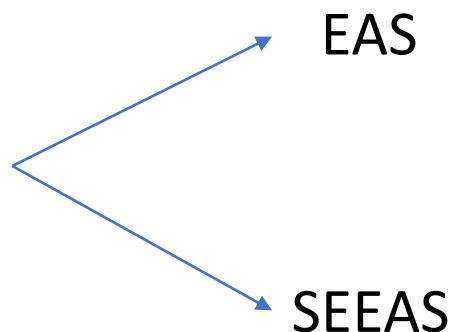
Σύγκριση του AMSEEEAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (5/6)

Στοχική συνάρτηση του προβλήματος



Συντελεστής Nash-Sutcliffe (**NSE**)

Σύγκριση του AMSEEEAS με:



Αξιολόγηση της επίδοσης του AMSEEDAS (13/13)

Σύγκριση του AMSEEDAS με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης πάνω σε πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (6/6)

Mean, standard deviation and median value of best Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) metrics found by the algorithms on the calibration problem									
MFE	EAS			SEEAS			AMSEEDAS		
	MEAN	STDEV	MEDIAN	MEAN	STDEV	MEDIAN	MEAN	STDEV	MEDIAN
100	0.764	0.007	0.762	0.762	0.007	0.761	0.761	0.006	0.760
500	0.770	0.007	0.775	0.771	0.006	0.774	0.775	0.003	0.776
1000	0.773	0.006	0.776	0.775	0.003	0.776	0.776	0.000	0.776

Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και διάμεσος των καλύτερων τιμών του δείκτη NSE στο πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου για τους αλγορίθμους EAS, SEEAS και AMSEEDAS

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- ❑ **Αντικατάσταση της ιδέας των ποινών** από μια διαφορετική μεθοδολογία για αποδοτική συνύπαρξη των πολλών μεταμοντέλων στον ίδιο αλγόριθμο, με στόχο την προσθήκη περισσότερης **στοχαστικότητας**.
- ❑ Διερεύνηση **διαφορετικών μοντέλων μηχανικής μάθησης** και διαφορετικών συνδυασμών αυτών, όπως επίσης και μεταβολή του **πλήθους** των μεταμοντέλων που ενσωματώνονται στον αλγόριθμο, με στόχο την προσπάθεια για περαιτέρω αύξηση της επίδοσης.
- ❑ **Οριστική απενεργοποίηση** και απομάκρυνση των μεταμοντέλων από τον αλγόριθμο, εφόσον αυτά επέλθουν σε κατάσταση ποινής συγκεκριμένο αριθμό φορών, για να μην ξοδεύονται άσκοπα υπολογισμοί της στοχικής συνάρτησης.

Σας ευχαριστώ πολύ!