



Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ

Ενότητα 1: Υδρολογική προσομοίωση
1.1: Αρχές Υδρολογικής Προσομοίωσης

Καθ. Αθανάσιος Λουκάς

Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

Αντικείμενο

- Η εισαγωγή και κατανόηση:
 - των υδρολογικών μοντέλων επιφανειακής υδρολογίας και της υδρολογικής προσομοίωσης και πρόγνωσης,
 - της στοχαστικής υδρολογίας και των στοχαστικών διαδικασιών στην υδρολογία,
 - της ανάλυσης και προσομοίωσης υδρολογικών χρονοσειρών,
 - της ανάλυσης και προσομοίωσης ακρότατων υδρολογικών ποσοτήτων σχεδιασμού.



Αντικείμενο

- Ο ορισμός και χαρακτηρισμός των διαφόρων μορφών ξηρασίας και η σύνδεση μεταξύ τους.
- Η χρήση νέων τεχνολογιών (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Τηλεπισκόπησης) στην υδρολογία, καθώς και η κατανόηση των διεργασιών και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της αλλαγής γης στην ποσότητα και ποιότητα του νερού.



Ενδεικτικό Περίγραμμα Μαθήματος

1η Εβδομάδα (4 ώρες διδασκαλίας)

Εισαγωγή. Μαθηματικά μοντέλα βροχής-απορροής. Ταξινόμηση υδρολογικών μοντέλων. Παρουσίαση και εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων.

2η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Παρουσίαση και εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων. Ρύθμιση παραμετρικών μοντέλων. Δοκιμαστική ρύθμιση και αυτόματη ρύθμιση. Βελτιστοποίηση και πιστοποίηση

3η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Συστήματα υδρολογικής προσομοίωσης μεγάλων λεκανών απορροής. Υδρολογικές και υδραυλικές μεθοδολογίας διόδευσης απορροής. Ζεύξη υδρολογικών μοντέλων και μοντέλων διόδευσης απορροής.



Ενδεικτικό Περίγραμμα Μαθήματος

4η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Υδρολογική προσομοίωση και υδρολογική πρόγνωση.
Στοχαστική υδρολογική πρόγνωση. Βραχυπρόθεσμη υδρολογική πρόγνωση. Προσδιοριστική πρόγνωση. Στοχαστική πρόγνωση. Πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο. Τεχνικές βελτιστοποίησης μοντέλων.

5η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Στατιστική ανάλυση ακραίων υδρολογικών τιμών. Ανάλυση σειρών μεγίστων πλημμυρικών παροχών μερικής διάρκειας (Analysis of Partial Duration Series).

6η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Υδρολογική ξηρασία. Πιθανοθεωρητική ανάλυση ελαχίστων τιμών παροχών. Περιοχική στατιστική ανάλυση ακραίων υδρολογικών γεγονότων (Regional Analysis).



Ενδεικτικό Περίγραμμα Μαθήματος

7η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Ανάλυση υδρολογικών χρονοσειρών. Δομή και ιδιότητες υδρολογικών χρονοσειρών. Προσδιοριστικές συνιστώσες υδρολογικής χρονοσειράς. Μέθοδοι ανάλυσης χρονοσειρών. Μέθοδοι μονιμοποίησης χρονοσειρών.

8η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Στοχαστικά ομοιώματα χρονοσειρών. Στοχαστικά ομοιώματα μιας μεταβλητής. Ομοίωμα αυτοσυσχέτισης (autoregressive) AR(q). Ομοίωμα κυλιομένων μέσων όρων (moving average) MA(q). Σύνθετο ομοίωμα (autoregressive moving average) ARMA (p,q).

9η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Στοχαστικά ομοιώματα δύο μεταβλητών. Ομοίωμα συνάρτησης μεταφοράς θορύβου. Φίλτρο Kalman. Ανελίζεις Markov (Markov chains).



Ενδεικτικό Περίγραμμα Μαθήματος

10η & 11η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Εκτίμηση χωρικής κατανομής υδρομετεωρολογικών παραμέτρων. Μέθοδοι γεωστατιστικής (Kriging).

12η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Υδρολογία χιονοσκεπών περιοχών. Ισοζύγιο ενέργειας χιονιού. Φυσικές διεργασίες δημιουργίας απορροής από συσσωρευμένο χιόνι.

13η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Ξηρασίες. Ορισμοί τύπων ξηρασίας. Σημειακή και επιφανειακή ξηρασία. Μεθοδολογίες προσδιορισμού Δεικτών Ξηρασίας.

14η Εβδομάδα (4 ώ.δ.)

Νέες τεχνολογίες και υδρολογία. Εφαρμογές τηλεπισκόπησης, γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και νευρωνικών δικτύων στην επιφανειακή υδρολογία. Επιπτώσεις στις υδρολογικές διεργασίες από την αλλαγή χρήσης γης (Ολική και μερική εκχέρσωση δασών, διάνοιξη δασικών δρόμων, αστικοποίηση λεκανών απορροής). Επιπτώσεις στις υδρολογικές διεργασίες από την κλιματική αλλαγή.



Βιβλιογραφία

Κύρια διδακτικά βοηθήματα:

«Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» της Καθ. Μ. Α. Μιμίκου, καθώς και σημειώσεις του διδάσκοντα.

Επικουρικά διδακτικά βοηθήματα:

α) «Handbook of Hydrology» by D.R. Maidment (Editor),

β) «Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία» του Θ.Σ. Ξανθόπουλου.

γ) «Υδατικοί Πόροι: 1. Τεχνική Υδρολογία» του Γ. Τακίρη (Υπεύθυνος Έκδοσης)

δ) «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων» του Δ. Παπαμιχαήλ.



ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Stochastic Processes - Στοχαστικές Ανελίξεις

Πηγή¹: <http://www.itia.ntua.gr/dk-el/hydroglossica/>

- **Στοχαστική ανέλιξη** (αγγλικά stochastic process). Ο όρος περιγράφει μια τυχαία συνάρτηση, συνήθως του χρόνου, ή αλλιώς μια απειροπληθή οικογένεια τυχαίων μεταβλητών, και έχει προταθεί από τον Κάκουλλο (1978)*. Εναλλακτικά έχει χρησιμοποιηθεί ο όρος **στοχαστική διαδικασία**. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η λέξη ανέλιξη (από το ρήμα ανελίσσω = ξετυλίγω, εξελίσσομαι) μάλλον αποδίδει καλύτερα τον αγγλικό όρο process σε σχέση με τη λέξη **διαδικασία** (που αρχικώς σήμαινε τη δίκη και μετέπειτα τις τυπικές ενέργειες που απαιτεί η διεξαγωγή μιας δίκης· Μπαμπινιώτης, 1998).
- Σε άλλες περιπτώσεις που αναφέρονται σε φυσικά και όχι μαθηματικά συστήματα, ο όρος process αποδίδεται καλύτερα ως **διεργασία** (και πάλι όχι ως διαδικασία). Έτσι έχουμε φυσικές διεργασίες (όπως **υδρολογικές διεργασίες** – αγγλικά hydrological processes) ή τεχνητές διεργασίες (όπως **διεργασίες επεξεργασίας νερού** – αγγλικά water treatment processes), τα μαθηματικά μοντέλα των οποίων μπορεί να είναι ανελίξεις (εν προκειμένω, **στοχαστικές ανελίξεις**).
- Το επίθετο **στοχαστικός** εδώ δεν έχει τη σημασία που έχει στην καθομιλουμένη, αλλά αυτήν του τυχαίου. Με αυτή την έννοια έχει εισαχθεί ως επιστημονικός όρος από τον Ελβετό μαθηματικό Giacomo Bernoulli πριν 300 και πλέον χρόνια. Το επίθετο προέρχεται από το αρχαιοελληνικό ρήμα **στοχάζομαι** με την έννοια του **εικάζω** (η αρχική σημασία του **στοχάζομαι** είναι **σημαδεύω το στόχο**, κατόπιν έγινε **εικάζω**, **νομίζω**, και τέλος **συλλογίζομαι**).

(*) Κάκουλλος, Θ. Ν., *Στοχαστικές Ανελίξεις*, Αθήνα, 1978.

(*) Μπαμπινιώτης, Γ. Δ., *Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας με Σχόλια για τη Σωστή Χρήση των Λέξεων*, Κέντρο Λεξικολογίας, Αθήνα, 1998.

¹ Δημήτρης Κουτσογιάννης, Υδρογλωσσικά (<http://www.itia.ntua.gr/dk-el/hydroglossica/>)



ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ

- Τι σημαίνει υδρολογική προσομοίωση;
- Τι σημαίνει υδρογεωλογική προσομοίωση;
- Γιατί αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα προβλήματα;
- Τι χαρακτηρίζει μια λεκάνη απορροής ως «τροποποιημένη»;
- Μπορούν τα συνήθη υδρολογικά μοντέλα να εφαρμοστούν σε τέτοιου είδους λεκάνες;
- Πως υλοποιείται η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων, επιφανειακών και υπόγειων, σε τροποποιημένες λεκάνες
- Τι σημαίνει στοχαστική υδρολογία



Κατηγορίες Φαινομένων Πειραμάτων

Φαινόμενα - Πειράματα

Αιτιοκρατικά – Προσδιοριστικά

Ένα φαινόμενο ή πείραμα θεωρείται αιτιοκρατικό-προσδιοριστικό όταν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίζεται ή εκτελείται, καθορίζουν σύμφωνα με την αρχή της αιτιότητας το αποτέλεσμα.

Τυχαία – Στοχαστικά

Ένα φαινόμενο ή πείραμα θεωρείται τυχαίο-στοχαστικό όταν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίζεται ή εκτελείται, δεν καθορίζουν το αποτέλεσμα σύμφωνα με την αρχή της αιτιότητας. Το αποτέλεσμα αποδίδεται στην «τύχη». Η έννοια του «τυχαίου» συνδέεται με το **πολυσύνθετο** και το **περιορισμένο** της γνώσης των αιτίων που προκαλούν το αποτέλεσμα.



ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

- Προσδιοριστική Υδρολογία = $\Pi(\Omega = \alpha)_{x,y,z,t} = 1$
- Στοχαστική Υδρολογική Μεταβλητή: $X_t = N_t + Z_t$
 - Προσδιοριστική συνιστώσα N_t (π.χ. περιοδικότητα, τάση, εμμονή)
 - Στοχαστική συνιστώσα Z_t ;
 - Ένα χρονικά εξαρτημένο μέρος με ιστορική μνήμη και
 - Ένα ανεξάρτητο τυχαίο μέρος (λευκός θόρυβος, white noise)
- Στατιστική Υδρολογία
 - **Πιθανολογική υδρολογία** (ανάλυση υδρολογικών γεγονότων χωρίς χρονική ακολουθία) $\Pi(\Omega = \alpha)_{x,y,z,t} = 0$
 - **Στοχαστική υδρολογία** (ανάλυση υδρολογικών γεγονότων με χρονική ακολουθία)
 $\Pi(\Omega = \alpha)_{x,y,z,t} = \varepsilon \quad 0 < \varepsilon < 1$



ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

επιφανειακών και υπόγειων νερών

	Επιφανειακά μοντέλα	Μοντέλα υπόγειων νερών
Επιφάνεια αναφοράς	Λεκάνη απορροής	Υδροφορέας
Χρονοσειρές εισόδου	Βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή	Κατείσδυση και πλευρικές φορτίσεις, αντλήσεις
Χρονοσειρές εξόδου	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση	Στάθμες, εκφορτίσεις πηγών, υπόγειες διαφυγές
Χωρική κλίμακα	Αδιαμέριστη έως κατανεμημένη	Κατανεμημένη (διακριτοποίηση πεδίου ροής σε φατνία ή κύτταρα)
Μαθηματικό υπόβαθρο	Από «μαύρου κουτιού» έως φυσικής βάσης	Σύστημα διαφορικών εξισώσεων υπόγειας ροής
Παράμετροι	Εννοιολογικά μεγέθη ή μη μετρήσιμες ιδιότητες	Υδραυλικά μεγέθη υδροφορέα (αγωγιμότητα, ειδική απόδοση)
Βελτιστοποίηση	Βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις παροχής σε ποτάμια	Βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων και παροχής πηγών



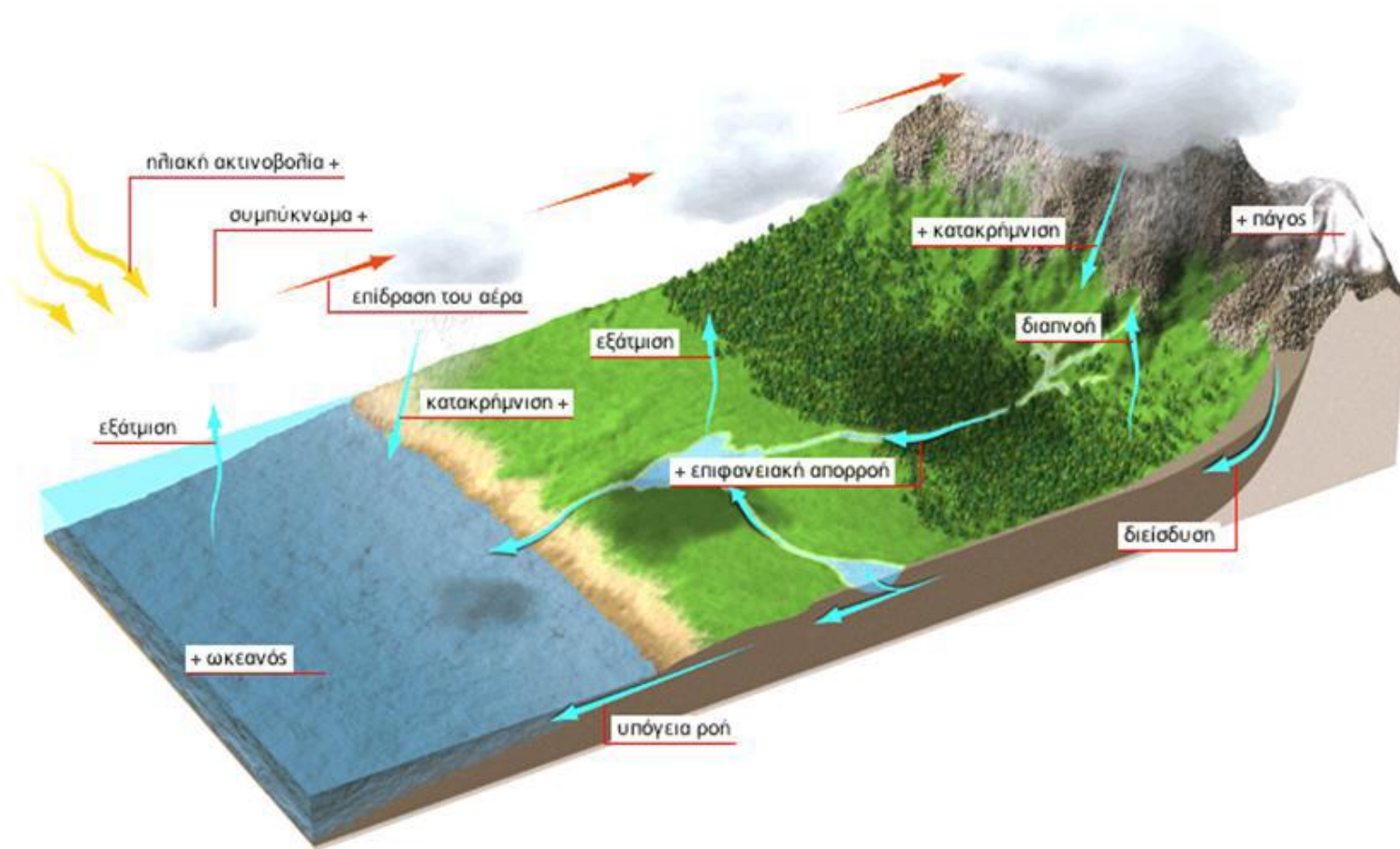
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

υδρολογικών και διαχειριστικών μοντέλων

	Επιφανειακά μοντέλα	Μοντέλα υπόγειων νερών
Επιφάνεια αναφοράς	Λεκάνη απορροής ή υδροφορέας	Υδροσύστημα (υδραυλικά έργα και χρήσεις νερού)
Χρονοσειρές εισόδου	Βροχόπτωση, δυνητική εξατμισοδιαπνοή	Προσφορά (υδρολογικές εισροές) και ζήτηση νερού
Χρονοσειρές εξόδου	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση	Ρυθμιζόμενες παροχές, απολήψεις, αντλήσεις
Χωρική κλίμακα	Αδιαμέριστη έως κατανεμημένη	Σχηματοποίηση δικτυακής μορφής
Μαθηματικό υπόβαθρο	Από «μαύρου κουτιού» έως φυσικής βάσης	Συστημική προσέγγιση
Παράμετροι	Εννοιολογικά μεγέθη ή μη μετρήσιμες ιδιότητες	Σχετικές με τη διαχειριστική πολιτική και τη λειτουργία των έργων
Βελτιστοποίηση	Βαθμονόμηση με βάση μετρήσεις παροχής	Εντοπισμός και αξιολόγηση μελλοντικών διαχειριστικών πολιτικών



ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ



ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Υδρολογικές Μεταβλητές

Κλιματικές

Βροχόπτωση,
Θερμοκρασία,
Ηλιοφάνεια κ.α.

Υδραυλικές

Διατομή Ρέματος,
Κινητική Ενέργεια
Ρέματος κ.α.

Γεωλογικές – Εδαφικές – Φυτογραφικές

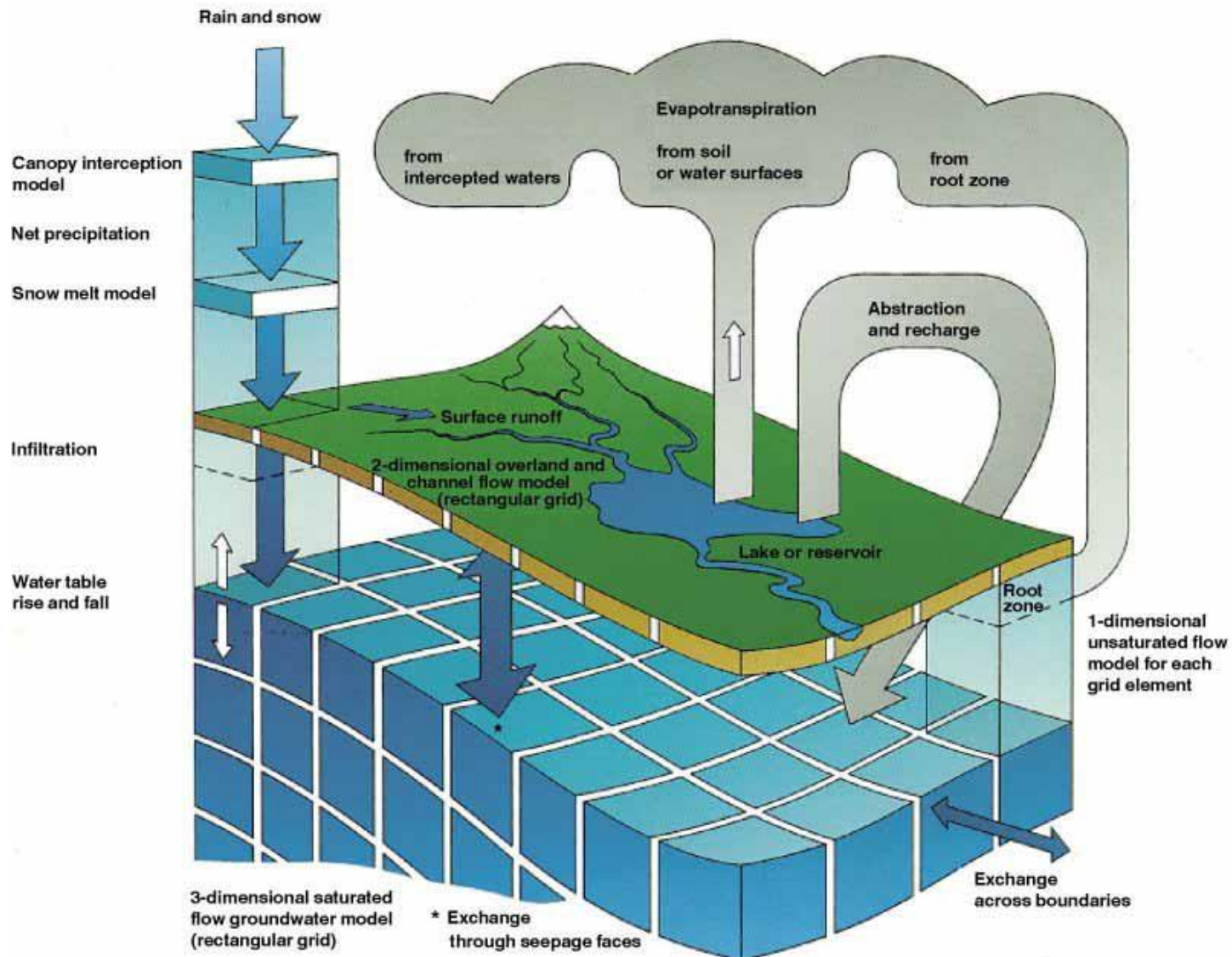
Τύπος Εδάφους,
Διηθητική
Ικανότητα κ.α.

Φυσιογραφικές Λεκάνης Απορροής

Κλίση, Υψόμετρο,
Χρήσεις Γης κ.α.

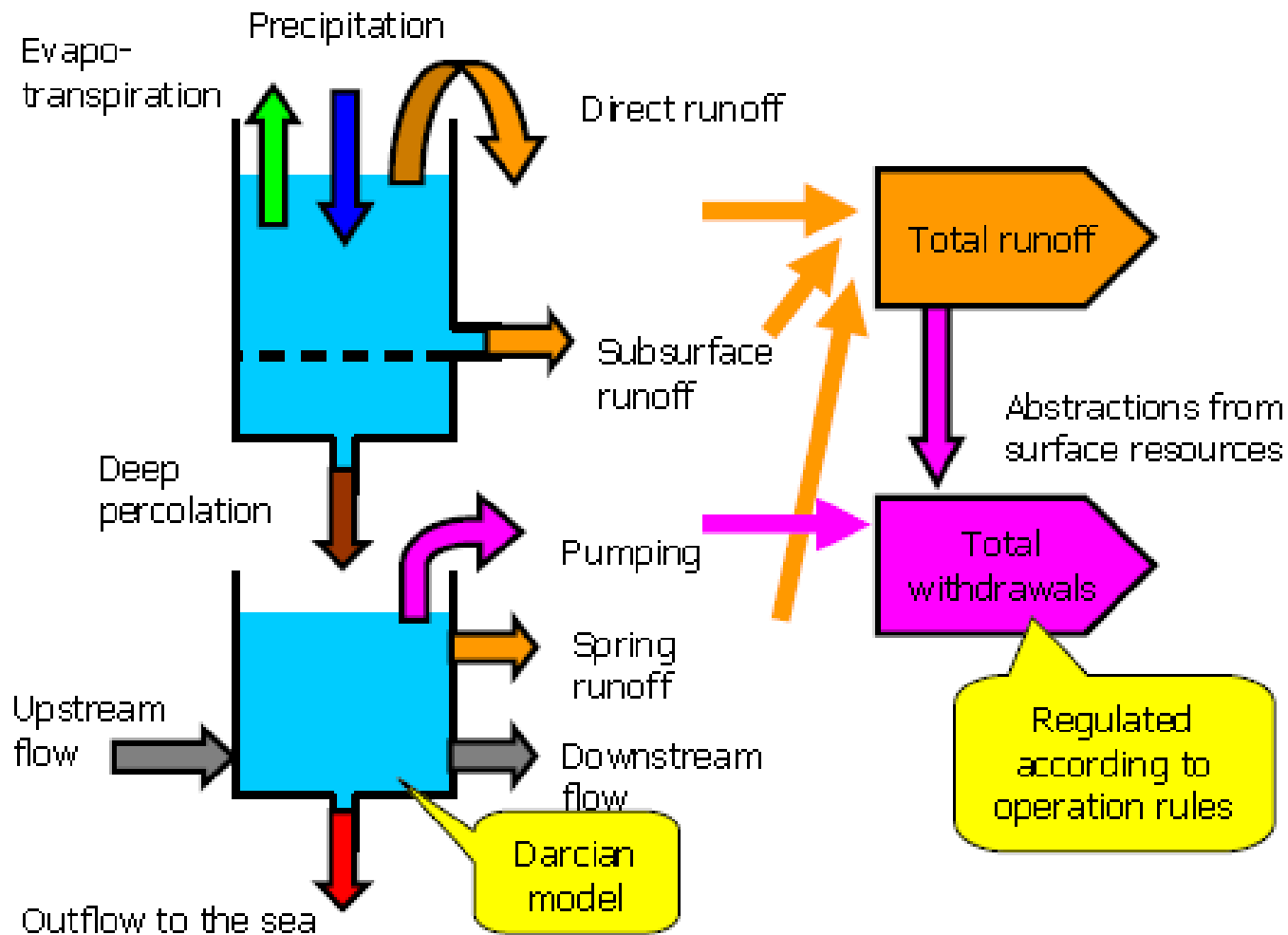


ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ



Πηγή: <http://www.dhisoftware.com/mikeshe>

ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ



Επιφανειακά νερά, υπόγεια νερά και υδραυλικά έργα: ένας αδιαίρετος κύκλος

- Κατείσδυση μέσω της ακόρεστη ζώνης
- Απώλειες λόγω διήθησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου
- Βασική απορροή ποταμών λόγω της εκφόρτισης πηγών
- Απολήψεις από επιφανειακά νερά
- Αντλήσεις νερού
- Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων
- Επιστροφές νερού μέσω αποστραγγιστικών και αποχετευτικών δικτύων



Θεμελιώδεις αρχές μαθηματικών μοντέλων

- Εργαλείο ολοκληρωμένης γεω-υδρολογικής προσομοίωσης πολύπλοκων λεκανών απορροής.
- Συνδυάζοντας μια δέσμη μοντέλων αναπαριστά:
 - τις φυσικές διεργασίες στο έδαφος, την ακόρεστη ζώνη και τον υδροφορέα
 - τις χρήσεις νερού και τη λειτουργία των κύριων υδραυλικών έργων
- Κατάλληλο για χρονικές κλίμακες από ημερήσια έως μηνιαία.
- Συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για την παραγωγή των χωρικών δεδομένων.
- Χρησιμοποιεί εξελιγμένες τεχνικές βαθμονόμησης και πολλαπλά κριτήρια προσαρμογής ώστε να εξασφαλίζεται συνέπεια με:
 - τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης
 - τις παρατηρημένες αποκρίσεις (παροχές ποταμών και πηγών, στάθμες)
- Εκτιμά, στη χωρική κλίμακα που ορίζει ο χρήστης:
 - το ισοζύγιο των υδατικών πόρων, επιφανειακών και υπόγειων
 - τις απολήψεις του υδροσυστήματος, σε διάφορες θέσεις ελέγχου
 - τη δίαιτα των ροών (διόδευση) κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου

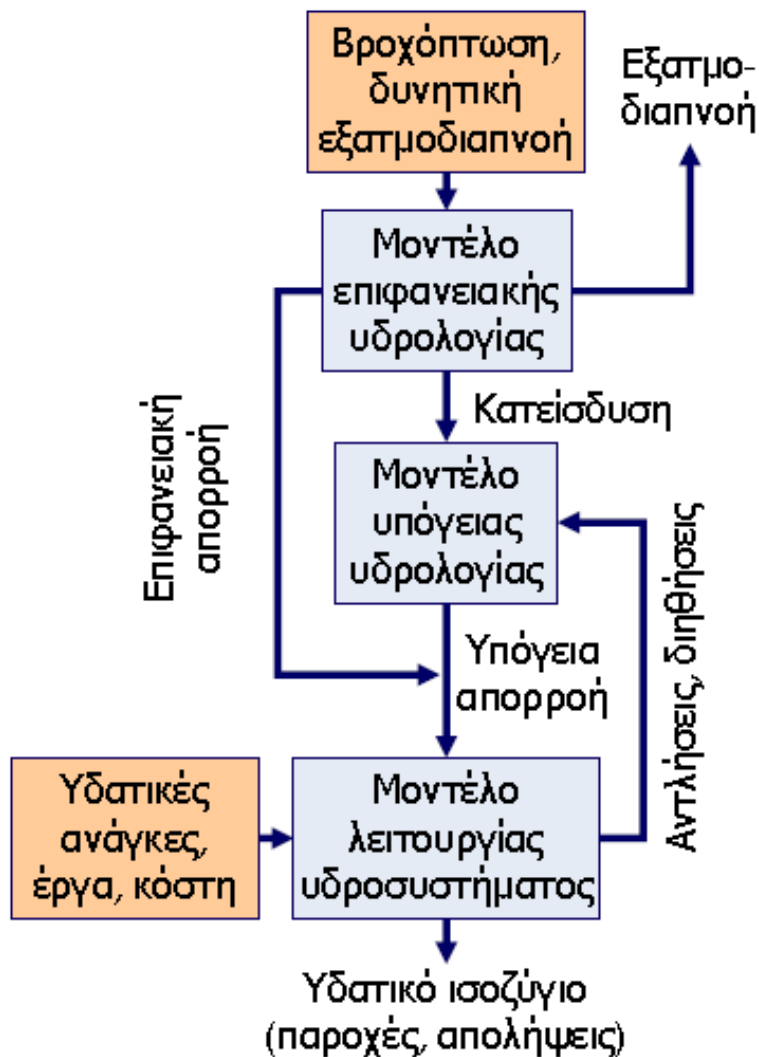


Θεματικά επίπεδα και διασυνδέσεις

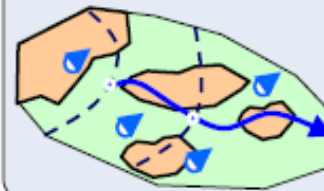
- Δικτυακή σχηματοποίηση, με τη μορφή θεματικών επιπέδων:
 - επιφανειακό σύστημα: υδρογραφικό δίκτυο, υπολεκάνες, πηγές
 - μονάδες υδρολογικής απόκρισης: γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι οποίες αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών
 - υπόγειο σύστημα (υδροφορέας): δίκτυο διασυνδεόμενων δεξαμενών που εκφορτίζονται είτε επιφανειακά, μέσω των πηγών, ή υπόγεια, προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα
 - σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων (υδροσύστημα): σχηματική απεικόνιση θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, έργων αξιοποίησης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις) και χρήσεων νερού.
- Τα θεματικά επίπεδα συνδέονται μέσω:
 - των υδατορευμάτων (υδρογραφικό δίκτυο → υδροφορέας)
 - των πηγών (υδροφορέας → υδρογραφικό δίκτυο)
 - των γεωτρήσεων (υδροφορέας → υδροσύστημα)
 - των υδραγωγείων (υδρογραφικό δίκτυο → υδροσύστημα, και αντίστροφα).



Συνδυαστική λειτουργία μοντέλων



Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας



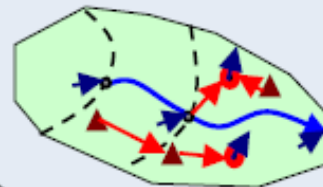
Ημικατανεμημένη χωρική κλίμακα (υπολεκάνες), παραμετροποίηση ανά μονάδα υδρολογικής απάκρισης (MYA)

Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας



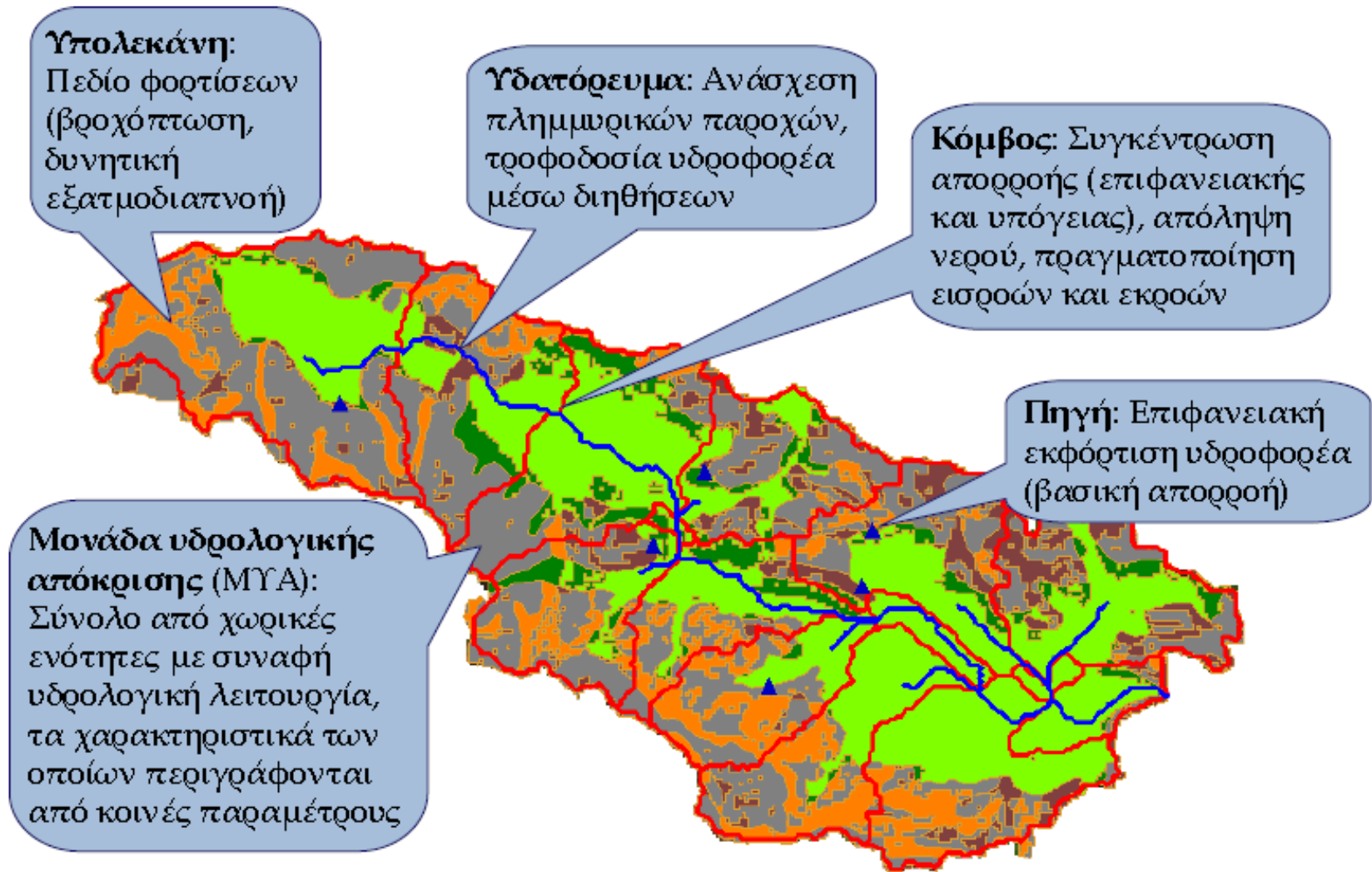
Πολυκυτταρικό σχήμα επίλυσης ισοδύναμο των πεπερασμένων όγκων, εξίσωση ροής γραμμική (Darcy) ή μη γραμμική

Μοντέλο λειτουργίας υδροσυστήματος

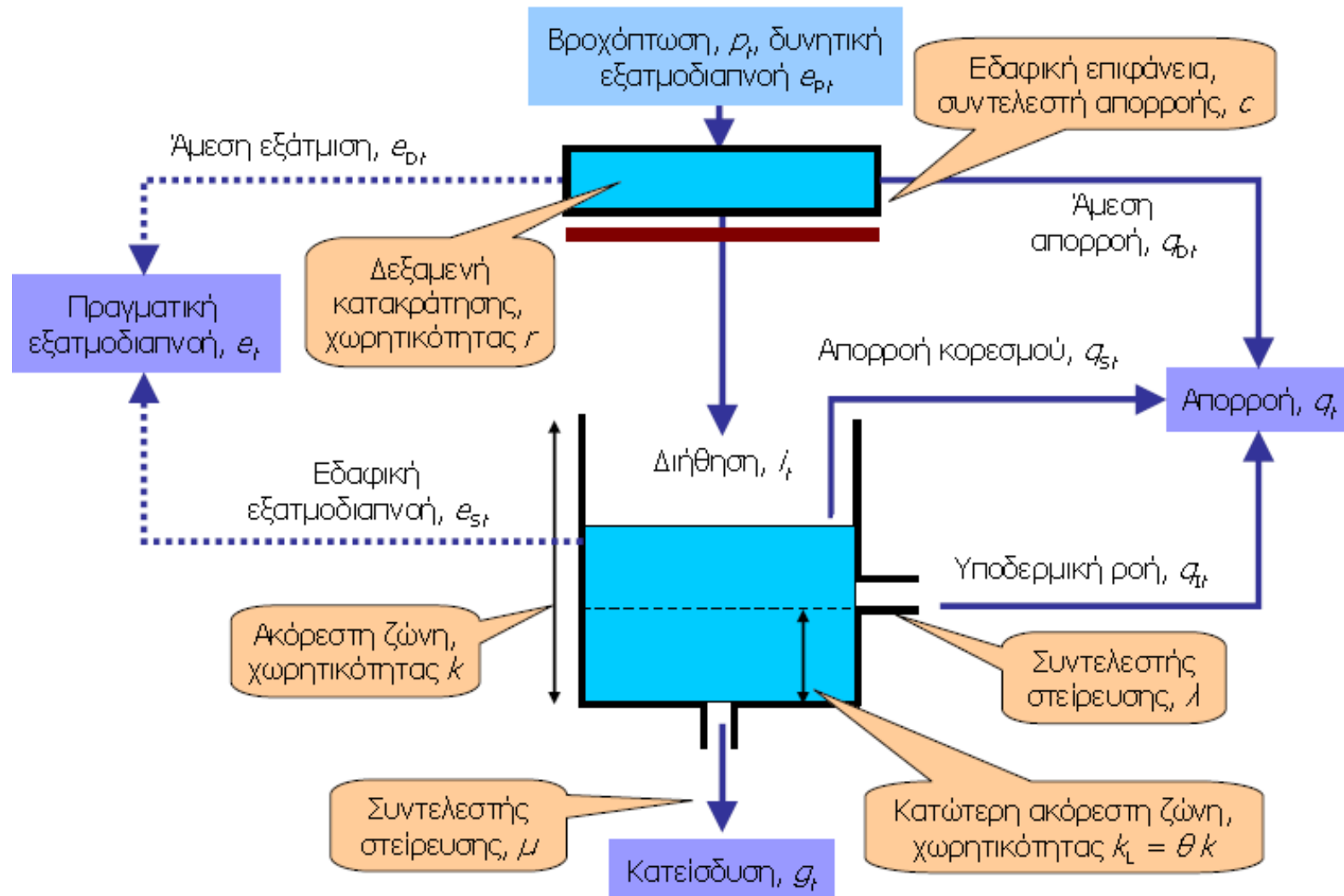


Αναπαράσταση χρήσεων νερού και λειτουργίας υδραυλικών έργων μέσω γραμμικής βελτιστοποίησης

Συνιστώσες επιφανειακών διεργασιών



Μοντελοποίηση επιφανειακών διεργασιών



Υδρολογική προσομοίωση με χρήση μαθηματικών μοντέλων

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης. Τα μοντέλα περιγράφουν

- Μεμονωμένα γεγονότα (event-type ή **event-based models**):
 - ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας
- τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ λεκάνη απορροής) (**continuous models**)



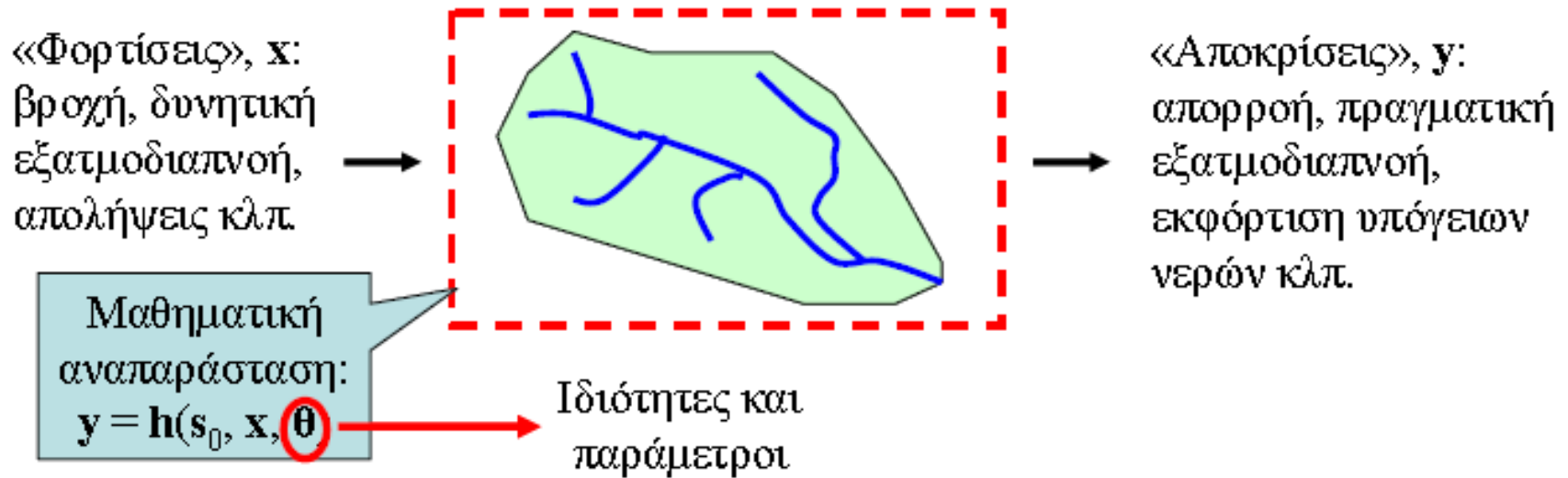
Υδρολογική προσομοίωση με χρήση μαθηματικών μοντέλων

Στην πρώτη περίπτωση, η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστημικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), παραλείποντας τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν στη μελέτη, όπως η εξατμισοδιαπνοή και η διήθηση.

Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η προσέγγιση διέπεται, εν μέρει έστω, από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο (physical ή conceptual, αναπαριστώντας σε συνεχή χρόνο (continuous-time) τις κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης.



Σχηματική απεικόνιση ενός μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης



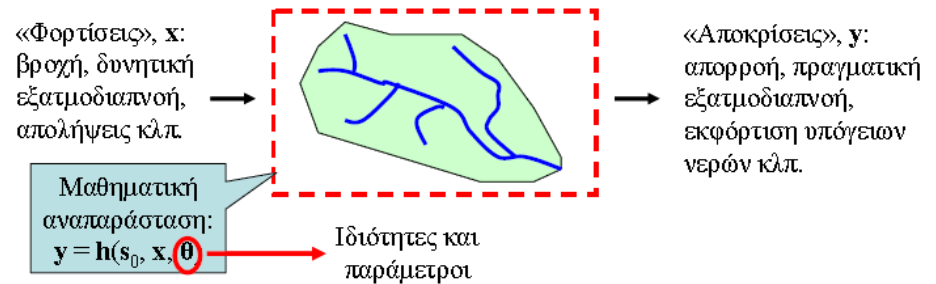
Τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης, αναπαριστούν τις συνεχείς φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων, μέσω μαθηματικών σχέσεων, καθορισμένης χωρικής και χρονικής διακριτότητας. Με την παραπάνω παραδοχή, κάθε τέτοιο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής:



Σχηματική απεικόνιση ενός μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης

Με την προηγούμενη παραδοχή, κάθε τέτοιο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$$



όπου:

\mathbf{s}_0 οι αρχικές και οριακές συνθήκες του φυσικού συστήματος (π.χ. ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού) στην έναρξη της προσομοίωσης, δηλαδή στο χρονικό βήμα $t = 0$,

\mathbf{x} οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς φορτίσεις (π.χ. βροχόπτωση, δυναμική εξατμοδιαπνοή),

$\boldsymbol{\theta}$ τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, και

\mathbf{y} οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του μοντέλου (π.χ. απορροή, εξατμοδιαπνοή, εκφόρτιση υπόγειων νερών).



Υδρολογική προσομοίωση με χρήση μαθηματικών μοντέλων

Εφαρμογή για τη χωρική όσο και τη χρονική «επέκταση» των παρατηρημένων δειγμάτων, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου του συστήματος, δηλαδή οι φορτίσεις και οι παράμετροι. Πράγματι, με τα μοντέλα επιτυγχάνεται η προσομοίωση πολλαπλών διεργασιών του φυσικού συστήματος και σε πολλαπλές θέσεις ενδιαφέροντος (ακόμα και εκτός της ίδιας λεκάνης), που περιγράφονται από τις διάφορες μεταβλητές εξόδου. Βεβαίως, αν και οι έξοδοι ενός υδρολογικού μοντέλου είναι πολύ περισσότερες από τις εισόδους, είναι συνήθως μη ελεγχόμενες, αφού δεν μπορούν να τεκμηριωθούν από μετρήσεις.

Από την άλλη πλευρά, η χρονική επέκταση υποδηλώνει ότι ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο πρόγνωσης, για τη διερεύνηση των επιπτώσεων διαφόρων κλιματικών, διαχειριστικών και άλλων σεναρίων στο υδατικό δυναμικό μιας λεκάνης.



Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων

- (1) Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση (perceptual model)
- (2) Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model)
- (3) Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας (procedural model)
- (4) Υπολογισμός παραμέτρων (model calibration)
- (5) Αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας (model validation)



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

- το σκοπό της μελέτης
- την εμπειρία του μελετητή
- τα διαθέσιμα δεδομένα

Οι Singh and Woolhiser (2002), σε μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, ξεχωρίζουν ένα πλήθος 70 περίπου καταξιωμένων υδρολογικών σχημάτων, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- το πεδίο εφαρμογής τους·
- τη χωρική τους κλίμακα·
- την μαθηματική τους δομή·
- τη χρονική τους διακριτικότητα.



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Πεδίο Εφαρμογής

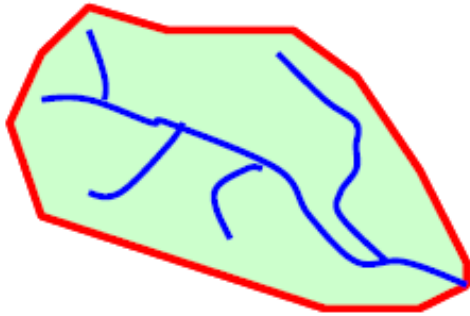
Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών πρακτικών διαχείρισής τους, αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των σχετικών φυσικών διεργασιών.

- Μοντέλα Βροχής – Απορροής

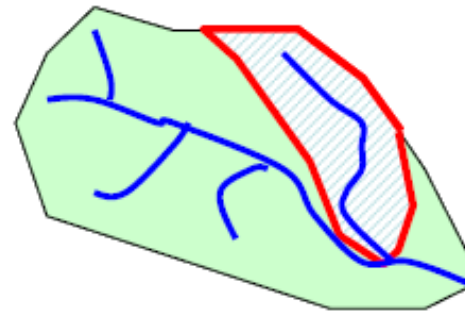
Τα μοντέλα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας δεν λειτουργούν πλέον αυτόνομα, αλλά αποτελούν συνιστώσες συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, στα οποία εντάσσονται κλιματικά, διαχειριστικά και υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα δίαιτας ρύπων σε υδάτινα σώματα και στο υπέδαφος, καθώς και μοντέλα στερεομεταφοράς



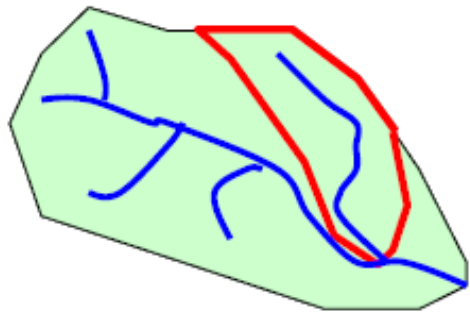
Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων Χωρική Κλίμακα



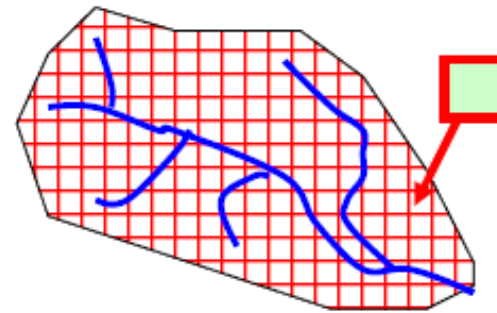
Αδιαμέριστα (lumped)



Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed)



Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped)



Κατανεμημένα (distributed)



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων Χωρική Κλίμακα

- **Αδρομερής ή Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική (lumped):** Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.
- **Ημικατανεμημένη (semi-distributed):** Η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές, που αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες (συνηθέστερα) είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Μετά το πέρας των υπολογισμών για κάθε χωρική ενότητα, η αντίστοιχη απόκριση (δηλαδή η απορροή) «μεταφέρεται» στην έξοδο της λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή σχημάτων διόδευσης.



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Χωρική Κλίμακα

- **Ημιαδιαμέριστη (semi-lumped):** Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.
- **Κατανεμημένη (distributed):** Γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας, ήτοι κύτταρα, τα οποία προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένοι όγκοι). Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων).



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Χρονική Διακριτότητα

- Άμεσα εξαρτώμενη από τον σκοπό του μοντέλου.
- Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.
 - Η λεπτή χρονική κλίμακα επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων προϋποθέτει κατάλληλη μετρητική υποδομή στη λεκάνη, από καταγραφικά όργανα σε συνεχή χρόνο, όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους.
 - Επισημαίνεται ότι σε τέτοιες κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα χρονισμένα, ώστε να αποτυπώνουν τους πραγματικούς χρόνους υστέρησης



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Μαθηματική Δομή

- μοντέλα φυσικής βάσης
- εννοιολογικά μοντέλα
- στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα
- μοντέλα «μαύρου κουτιού»



Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Μαθηματική Δομή

Σύγκριση υδρολογικών μοντέλων με βάση τη μαθηματική τους δομή

Τύπος μοντέλου	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
Φυσικής Βάσης	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά	Παραμετρικές σχέσεις σε υδρολογικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών ιδιοτήτων της λεκάνης
Στατιστικά και Στοχαστικά	Σχέσεις που αναπαράγουν τη στατιστική δομή των παρατηρημένων δειγμάτων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
«Μαύρου Κουτιού»	Μη γραμμικοί μετασχηματισμοί	Απολύτως καμία



Μοντέλα φυσικής βάσης

- Τα **μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based)** είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή τις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες.
- Επειδή η χωρική ανάλυση των μοντέλων αυτών είναι πυκνή, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών τους είναι εξαιρετικά μεγάλο. Θεωρητικά, τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους, οπότε είναι δυνατό να εκτιμηθούν με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, καθώς και από παρατηρήσεις πεδίου. Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα, αφού η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών, προϋποθέτει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε όσο το δυνατό πιο λεπτομερή χωρική κλίμακα (ειδικά όταν η μελέτη γίνεται για μικρές λεκάνες και σχετικά ξηρά κλίματα).



Μοντέλα φυσικής βάσης (συν.)

- Είναι τα μοναδικά μοντέλα που δεν βασίζονται σε μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, για την προσαρμογή των παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται κατάλληλα για την εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις (ungauged watersheds), κάτι που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των υδρολογικών επιστημών τα τελευταία έτη.
- Συνήθως, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες έρευνες, όπως η εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλίμα, τη φυτοκάλυψη ή τις χρήσεις γης, ενώ συχνά συνδυάζονται με υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων στο νερό και το έδαφος, καθώς και μοντέλα μεταφοράς φερτών.
- Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την πρόγνωση και προσομοίωση της απορροής, είναι υπολογιστικά ασύμφορη και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προγνώσεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα.



Εννοιολογικά μοντέλα

- Τα **εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα** διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως **μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας** (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους
- Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Τα εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές κλίμακες και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας (10 έως 20 παραμέτρους για ξηρές ή ημίξηρες λεκάνες, έως ελάχιστες παράμετροι για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό).
- Αρκετοί ερευνητές εκφράζουν έντονο σκεπτικισμό ως προς τη δυνατότητα γενίκευσης των σημειακών φυσικών νόμων, που ισχύουν στην απειροστή κλίμακα (δηλαδή σε έναν πεπερασμένο όγκο αναφοράς), για την προσομοίωση χωρικά κατανεμημένων διεργασιών, έστω και σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια. Έτσι, θεωρούν ότι ακόμη και τα κατανεμημένα σχήματα είναι στην πραγματικότητα εννοιολογικά, όχι όμως σε κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης αλλά στη μονάδα χωρική διακριτότητας που αναφέρεται η σχηματοποίηση του μοντέλου, στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο



Στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα

- Τα **στατιστικά** και **στοχαστικά μοντέλα**, που βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού.
- Τα **στατιστικά μοντέλα** χρησιμοποιούν μεθόδους της επαγωγικής στατιστικής, και είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.
- Τα **στοχαστικά μοντέλα**, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων, είναι πληρέστερα, καθώς λαμβάνουν υπόψη και τη χρονική αλληλεπίδραση ή αλλιώς στοχαστική δομή των φαινομένων, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση.
- Οι παράμετροί των παραπάνω μοντέλων εξαρτώνται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων δειγμάτων, τα οποία και αναπαράγουν, και όχι από τα ίδια τα δείγματα.
- Σε αντίθεση με την καθαρά *προσδιοριστική προσέγγιση* που υιοθετούν τα μοντέλα φυσικής και εννοιολογικής βάσης, τα στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων.



Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box models)

- Στα **μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box)**, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα. Το πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης.
- Στην υδρολογία, ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα **νευρωνικά δίκτυα**, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους. Η δομή (αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων) και οι παράμετροί τους δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο, και προκύπτουν μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής που βασίζεται στη χρήση γενετικών, συνήθως, αλγορίθμων και είναι γνωστή ως *εκπαίδευση* (training) του δικτύου. Στην πράξη, το νευρωνικό δίκτυο είναι ένας κρυφός υπολογιστικός κώδικας, στον οποίο δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης.
- Άλλη κατηγορία μοντέλων μαύρου κουτιού είναι τα **γενετικού προγραμματισμού**, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και επίσης δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε προσεγγίζουν περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων.
- Η διάδοση των νευρωνικών δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και η συνηθέστερη εφαρμογή τους είναι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων. Ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων, και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών.



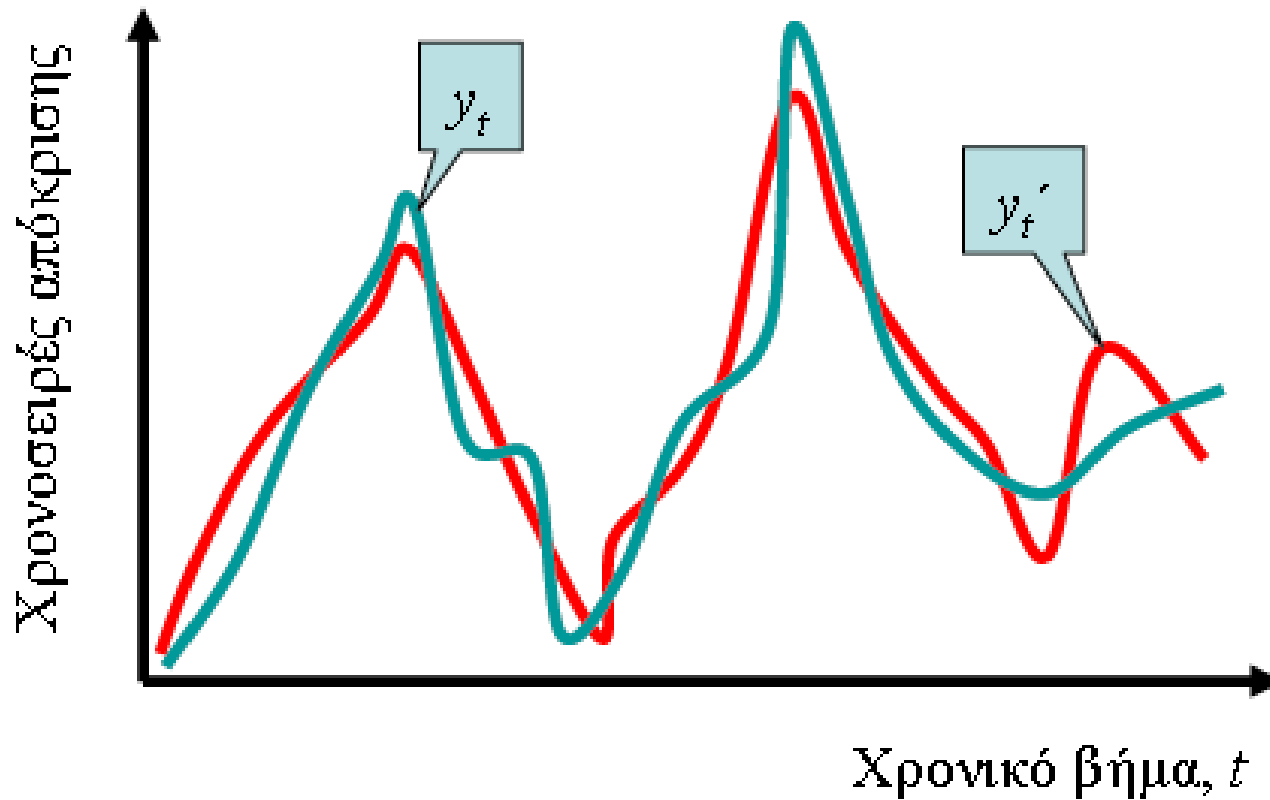
Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

Calibration

- Η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές.
 - Διαφοροποιείται από τον γενικότερο όρο εκτίμηση παραμέτρων, που μπορεί να αναφέρεται σε μια εμπειρική ή διαισθητική διαδικασία «εκ των προτέρων» ορισμού των παραμέτρων του μοντέλου, χωρίς «εκ των υστέρων» έλεγχο της επίδοσής του, με βάση πραγματικά δεδομένα.
- Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα



Η έννοια της προσαρμογής ενός μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, με σύγκριση των προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποκρίσεων



Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

- Έστω h η προσδιοριστική υπολογιστική διαδικασία που υλοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης μιας υδρολογικής λεκάνης (εννοιολογικό ή φυσικής βάσης), και περιέχει n το πλήθος βαθμούς ελευθερίας. Έστω s_0 οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου, x οι χρονοσειρές φόρτισης, που είναι διαθέσιμες για χρονικό ορίζοντα T , και y οι χρονοσειρές των παρατηρημένων αποκρίσεων του συστήματος, για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Αν $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ είναι ένα δεδομένο σύνολο τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, τότε η προσομοιωμένη απόκριση y' προκύπτει ως:

$$y' = h(s_0, x, \theta)$$



Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

- Ως βαθμονόμηση νοείται ο εντοπισμός των πλέον πρόσφορων τιμών των παραμέτρων θ , με τις οποίες εξασφαλίζεται η προσαρμογή των αποκρίσεων του μοντέλου y' στις αντίστοιχες παρατηρήσεις y , μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος (trial and error).
- η βαθμονόμηση προϋποθέτει τη σύγκριση των προσομοιωμένων αποκρίσεων της λεκάνης σε σχέση με τις παρατηρημένες, με βάση κάποιο ποσοτικό, ποιοτικό ή εμπειρικό κριτήριο αξιολόγησης της συμπεριφοράς του μοντέλου



Εμπειρική Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

- Πρόκειται για χειρωνακτική, και συνεπώς όχι αυστηρά συστηματική διαδικασία, που βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει, σύμφωνα με την κρίση και εμπειρία του, ο μελετητής.
 - Η τελική επιλογή των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας «με το μάτι» την προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα
 - Μη αντικειμενική μέθοδος → μη ύπαρξη αριθμητικού κριτηρίου σφάλματος
 - Ενσωματώνει υδρολογική εμπειρία
 - Οδηγεί σε ρεαλιστικές τιμές παραμέτρων, αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.



Αυτόματη Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

- Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η στοχική (αντικειμενική) συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου.
 - Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης
 - Πλεονεκτήματα: ευκολία και η αντικειμενικότητά της μεθόδου
 - Μειονέκτημα → πλήρης εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα που μεταφέρονται από τα δεδομένα, τις υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές αβεβαιότητας,
 - Συμπεριφορά μαύρου κουτιού με παραμέτρους που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράξει όλο το επιθυμητό φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης



Ημιαυτόματη Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

- Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, βάσει της οποίας ο μελετητής παρακολουθεί την πορεία της βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση.
 - συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης
 - Θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων



Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

Αξιοπιστία μεθόδου βαθμονόμησης:

- το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης, με ικανοποιητική ακρίβεια
- στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος



Μαθηματικό πλαίσιο βαθμονόμησης

$$\begin{aligned} \max \mathbf{g}(\mathbf{e}) &= \mathbf{g}[\mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})] \\ \text{s.t. } \boldsymbol{\theta} &\in \Theta \end{aligned}$$

όπου

$\mathbf{g}(\cdot)$ ένα σύνολο μέτρων καλής προσαρμογής (goodness-of-fit),

$\Theta \subset R^p$ ο εφικτός χώρος, και

\mathbf{e} διάνυσμα σφάλματος ή αλλιώς υπόλοιπο (residual) του μοντέλου, που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων αποκρίσεων, δηλαδή

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}'$$

Συνήθως, ο εφικτός χώρος ορίζεται από δύο διανύσματα ακραίων τιμών $\boldsymbol{\theta}_{\min}$ και $\boldsymbol{\theta}_{\max}$, που εκφράζουν τα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης των τιμών των παραμέτρων



Βήματα αυτόματης βαθμονόμησης

Βήμα 1. Επιλέγονται οι παράμετροι (μεταβλητές ελέγχου) του μοντέλου θ .

Βήμα 2. Επιλέγεται ένα δείγμα παρατηρήσεων ως προς τις αποκρίσεις \mathbf{y} , για χρονικό ορίζοντα T , που θεωρείται αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής δίαιτας του φυσικού συστήματος.

Βήμα 3. Διαμορφώνεται ένα βαθμωτό μέτρο προσαρμογής g μεταξύ των προσομοιωμένων, \mathbf{y}' , και των παρατηρημένων, \mathbf{y} , χρονοσειρών απόκρισης.

Βήμα 4. Ορίζεται το πεδίο αναζήτησης Θ των παραμέτρων, που κατά κανόνα δίνεται με τη μορφή άνω και κάτω ορίων τους.

Βήμα 5. Διατυπώνεται το πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης:

$$\max g(\theta), \theta \in \Theta$$

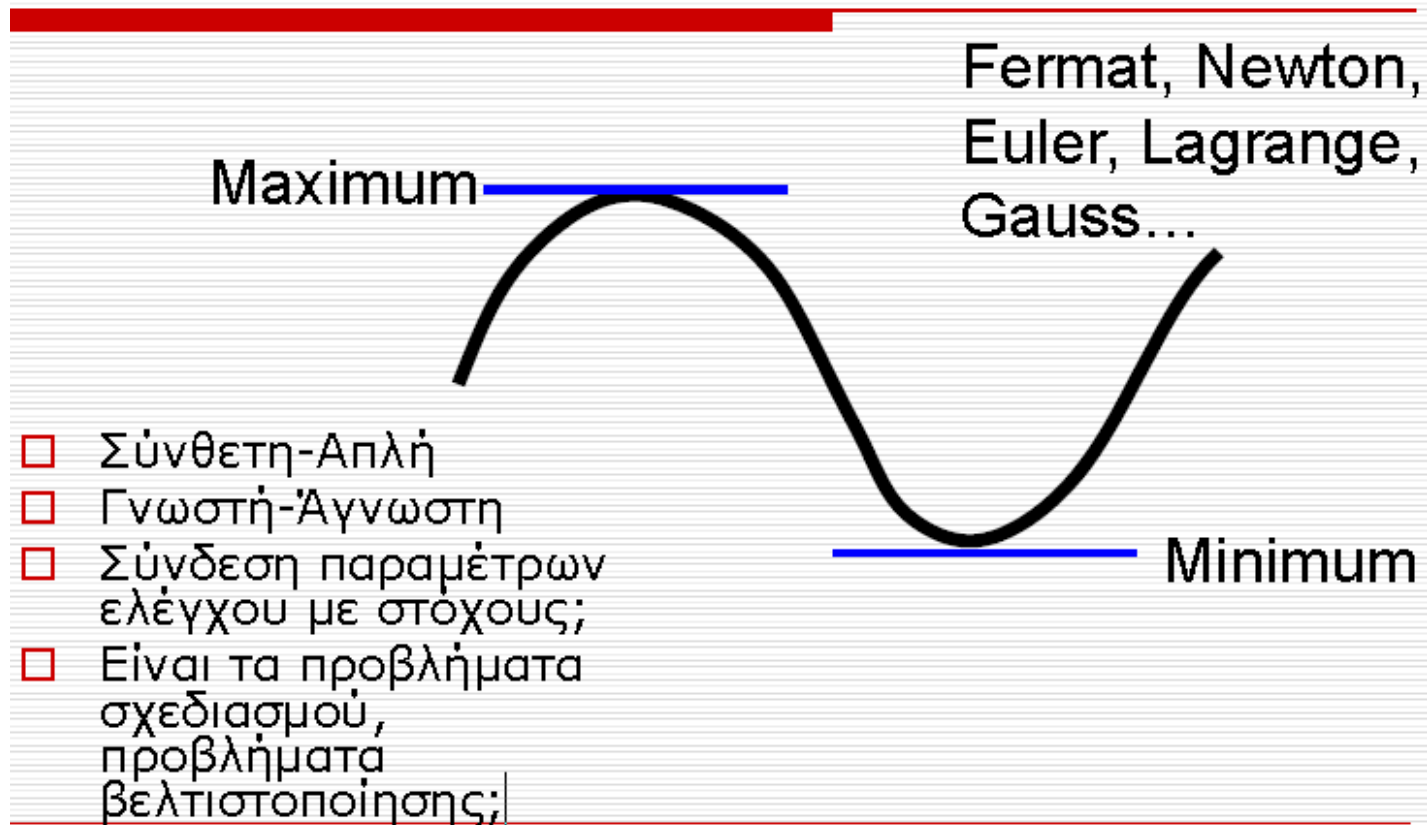
Βήμα 6. Με εφαρμογή ενός αλγορίθμου μη γραμμικής βελτιστοποίησης, εντοπίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, θ^* .



Βελτιστοποίηση Συστημάτων

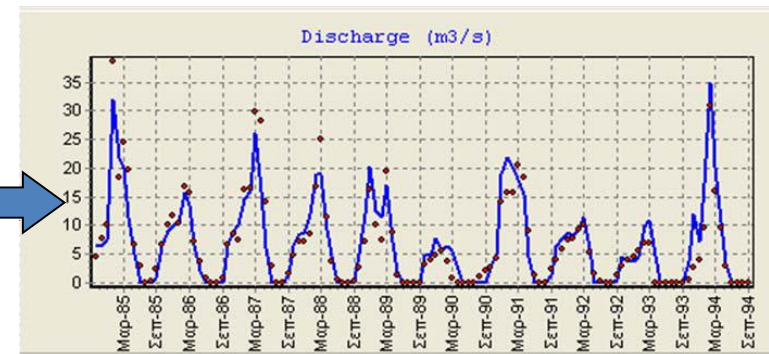
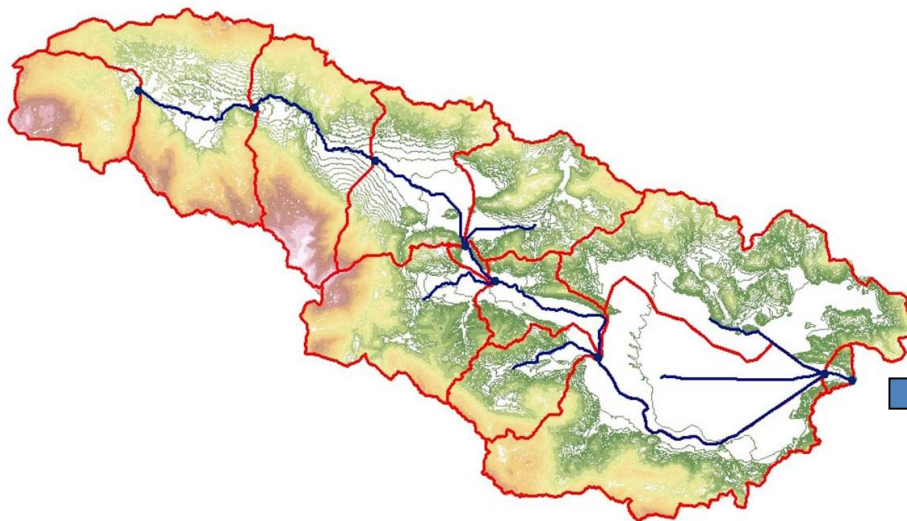
- Ποιο είναι το πρόβλημα;
- Όλα τα προβλήματα μηχανικού είναι (ουσιαστικά) προβλήματα βελτιστοποίησης!

Συνάρτηση;



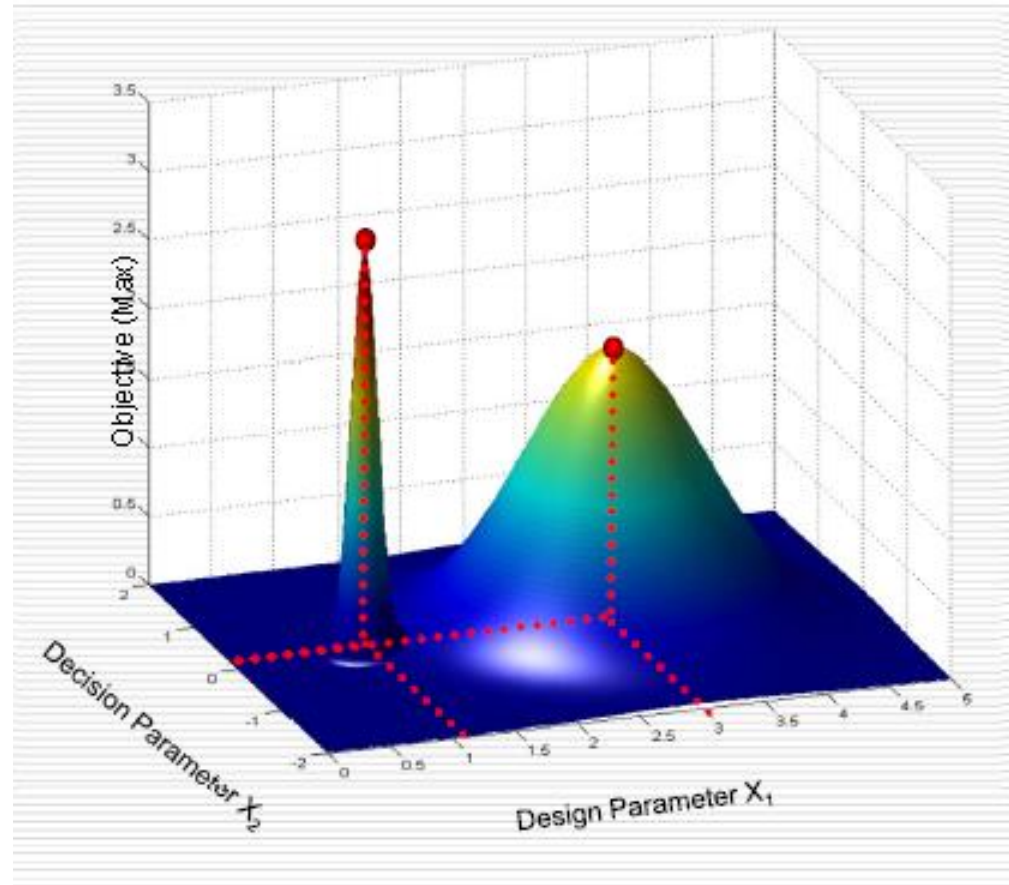
Βέλτιστη προσαρμογή (βαθμονόμηση) υδρολογικών μοντέλων

- Αναπαράσταση σύνθετων φυσικών συστημάτων (λεκάνες απορροής, υδροφορείς)
- Διεργασίες με έντονη χωρική ετερογένεια
- Έμμεση εκτίμηση παραμέτρων, μέσω «σύγκρισης» των αποκρίσεων του μοντέλου με μετρήσεις



Βέλτιστη λύση

- Αβεβαιότητα στις παραμέτρους
- Αβεβαιότητα στην αντίληψή μας για το πρόβλημα
- Μεταβολές στα δεδομένα και τις διεργασίες του συστήματος
- «Εύρωστη» λύση (robust solution)



Βελτιστοποίηση Συστημάτων

- Όσο και αν τα προβλήματα αυτά είναι διαφορετικά (συνιστώσες, διεργασίες, παράμετροι, κριτήρια, ...γνωστικά πεδία)
- Με την εφαρμογή μιας σωστής αφαιρετικής διαδικασίας μπορούν να διατυπωθούν με τρόπο που να αντιμετωπίζονται από τυποποιημένους αλγόριθμους βελτιστοποίησης
- Είναι σημαντικό να μπορείτε να δείτε μέσα σε κάθε πρόβλημα, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης!
- Ο αφαιρετικός αυτός τρόπος σκέψης ονομάζεται: **«Συστημική προσέγγιση»**



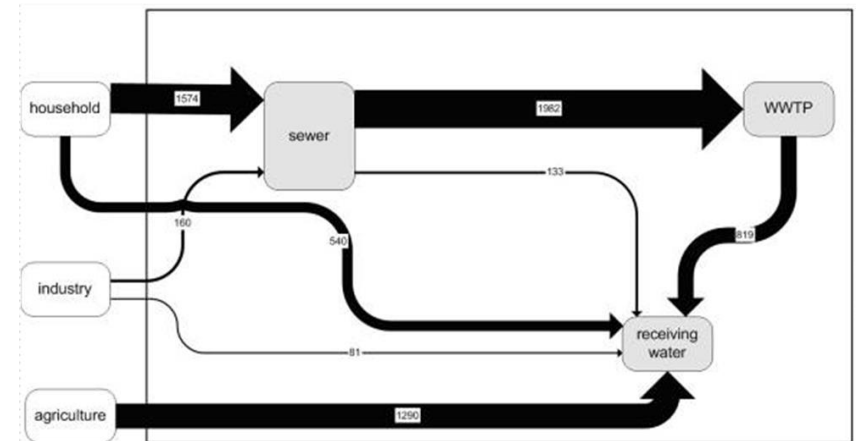
Συστημική Προσέγγιση

- Ανάλυση συστημάτων (systems analysis):
 - Μεθοδολογική αντιμετώπιση πολύπλοκων δομών ή φαινομένων, για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική λύση.
 - Αποσκοπεί στην αναγνώριση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί ένα σύστημα, χωρίς λεπτομερειακή θεώρηση των σχέσεων ή φυσικών διεργασιών που το διέπουν (Grigg, 1996).



Διαδικασία Συστημικής Ανάλυσης

- Αποδόμηση του σύνθετου προβλήματος σε μικρότερα μέρη και ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των (σημαντικών) συνιστωσών του
- Αναπαράσταση εισόδων, εξόδων και εσωτερικών διεργασιών συστήματος (προσομοίωση)
- Ορισμός μεταβλητών ελέγχου (παράμετροι) και κριτηρίων/μέτρων αξιολόγησης
- Επιλογή μεθοδολογίας βελτιστοποίησης

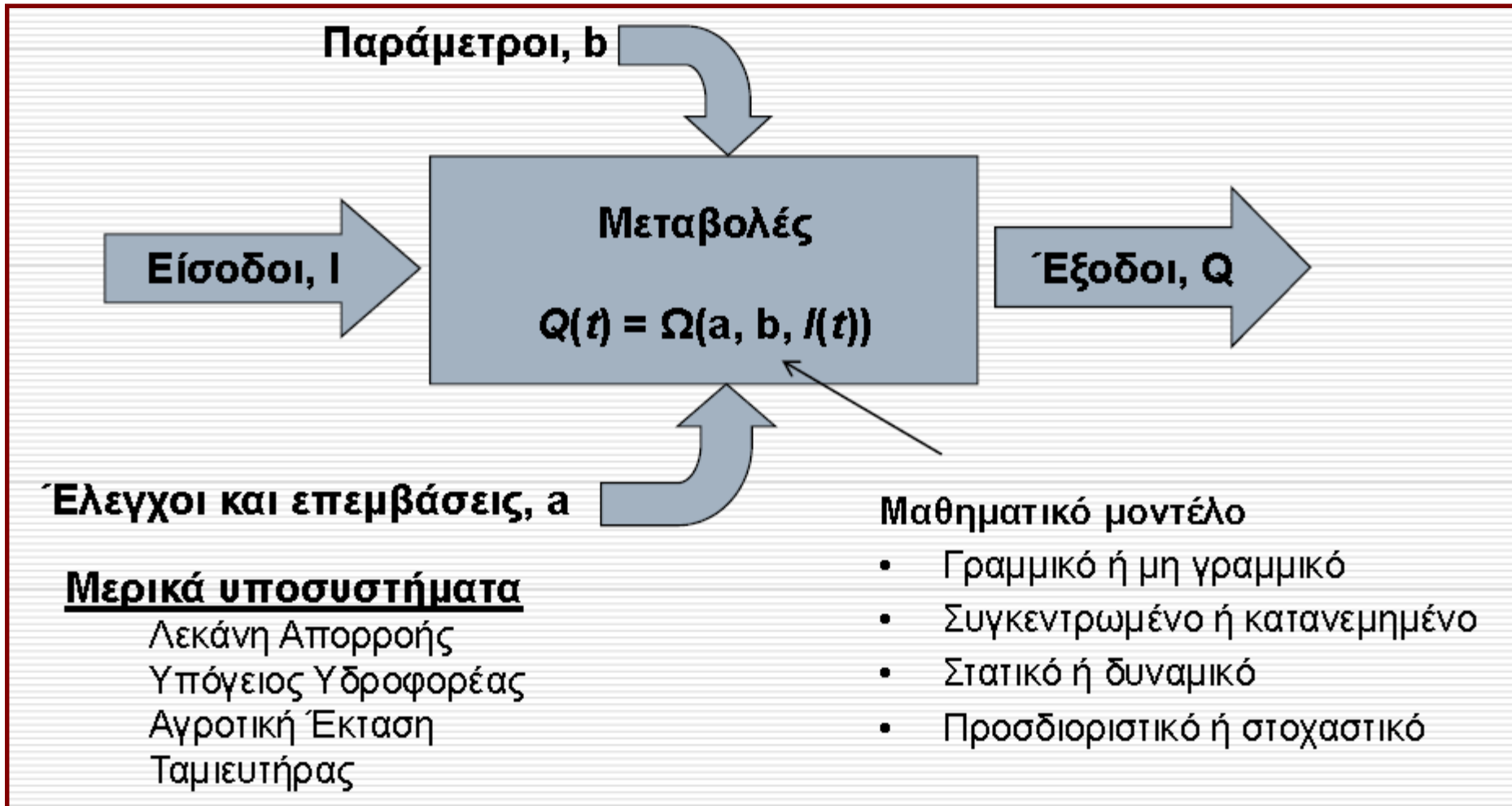


Συστήματα

- **Σύστημα:** (system): Σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από (Mays & Tung, 1992):
 - ένα όριο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον
 - αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι-φορτίσεις, έξοδοι-αποκρίσεις)
 - σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων και εξόδων



Αναπαράσταση Συστήματος



Εργαλεία Βελτιστοποίησης Συστημάτων

- Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης
- Αλγόριθμοι γραμμικής βελτιστοποίησης
- Αλγόριθμοι δικτυακής βελτιστοποίησης
- Μέθοδοι αναζήτησης τοπικών ακρότατων
- Τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης
- Κλασικοί γενετικοί αλγόριθμοι
- Υβριδικοί εξελικτικοί αλγόριθμοι



Κριτήρια Καλής Προσαρμογής

- Κανονικά Σφάλματα
- Ετεροσκεδαστικά σφάλματα
- Συσχετισμένα σφάλματα



Κανονικά Σφάλματα

- τα υπόλοιπα (residuals) $e_t = y_t - y_t'$
- $e_i = y_i - f_i$
- Τυχαίες μεταβλητές
 - Θεωρούνται λευκός γκαουσιανός θόρυβος
 - ακολουθούν κανονική κατανομή
 - έχουν μηδενική μέση τιμή, δηλαδή $E[e_i] = 0$
 - διατηρούν σταθερή διασπορά σ_e^2 για κάθε $i = 1, \dots, T$
 - είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους, δηλαδή $\text{Cov}[e_i, e_s] = 0$ για κάθε $i \neq s$.
- Η αναπαραγωγή χαρακτηριστικών εξασφαλίζεται με το κριτήριο απλών ελαχίστων τετραγώνων (simple least squares, SLS),

$$SLS = \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2$$



Κανονικά Σφάλματα

- **Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE)**

$$\mathbf{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$$

n : το πλήθος των παραδειγμάτων στο σύνολο L

- **Μέσο Απόλυτο Εκατοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)**

$$\mathbf{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - y_i}{y_i} \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |pe_i|$$



Κανονικά Σφάλματα

- **Μέσο Τετραγωνισμένο Σφάλμα (Mean Squared Error, MSE)**

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i^2|$$

n : το πλήθος των παραδειγμάτων στο σύνολο L

- **Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Squared Error, RMSE)**

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |e_i^2|}{n}}$$



Κανονικά Σφάλματα

- Βαθμός Απόδοσης ή Αποτελεσματικότητας (Model Efficiency, Eff)

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- Δείκτης Συμφωνίας (Index of Agreement, IA)

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|f_i - \bar{y}| + |f_i - \bar{y}|)^2}$$



Κανονικά Σφάλματα

- **Δείκτης Εμμονής (Persistence Index, PI)**

$$PI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})^2}$$

- Οι **Eff** και **PI** κυμαίνονται από $-\infty$ έως ένα (1), ενώ ο **IA** από 0.0 (μη αποδεκτό μοντέλο) έως 1.0 (τέλειο μοντέλο).
- Είναι αδιάστατοι συντελεστές που κρίνουν την συνολική απόδοση της μεθόδου και αποτελούν βελτιώσεις του συντελεστή προσδιορισμού, **R²**, για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων και των προγνώσεων αφού είναι ευαίσθητα στις αλλαγές των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων μέσων τιμών και διακυμάνσεων [Legates and McCabe, 1999; Dawson et al., 2007].



Ετεροσκεδαστικά Σφάλματα

- Η **ετεροσκεδαστικότητα** υποδηλώνει μη σταθερή διασπορά των σφαλμάτων του μοντέλου, που σημαίνει ότι η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων δεν είναι κοινή για όλο το δείγμα.
 - Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο ελαχίστων τετραγώνων καθώς και όλα τα ισοδύναμα μέτρα προσαρμογής, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού, δεν αναπαράγουν τη στατιστική δομή των σφαλμάτων.
- Γραφική απεικόνιση των σφαλμάτων συναρτήσει των αντίστοιχων παρατηρημένων τιμών.
 - η σημειοσειρά (y_i, e_i) κατανέμεται με τρόπο ώστε να σχηματίζεται ένα τυχαίο νέφος, χωρίς συστηματικές διαφοροποιήσεις, γύρω από τον οριζόντιο άξονα $e = 0$, τότε θεωρείται ότι υπάρχει ομοσκεδαστικότητα
 - Εάν υπάρχει συστηματικότητα στη διάταξη των σημείων (για παράδειγμα, τα σημεία σχηματίζουν κάποια καμπύλη ή τα σημεία αποκλίνουν λιγότερο από την οριζόντιο για μικρές τιμές της y_i και περισσότερο για μεγάλες τιμές της y_i), τότε υπάρχει ετεροσκεδαστικότητα



Ετεροσκεδαστικά Σφάλματα

- Έλεγχος και μέσω τυπικών στατιστικών δοκιμών, όπως η *Kruskal-Wallis*.
- Διόρθωση της ετεροσκεδαστικότητας γίνεται μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών των χρονοσειρών απόκρισης y_i και y_i' , όπως ο απλός λογαριθμικός ή η γενικευμένη διατύπωση αυτού, γνωστή ως μετασχηματισμός *Box-Cox*.

$$y_t^* = \begin{cases} \frac{(y_t + \alpha)^\xi - 1}{\xi} & \xi \neq 0 \\ \log(y_t + \alpha) & \xi = 0 \end{cases}$$

Η σταθερά α εισάγεται για να εξασφαλίσει θετικές τιμές της ποσότητας μέσα στην παρένθεση, ενώ η σταθερά ξ επιλέγεται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιεί την ασυμμετρία των μετασχηματισμένων μεταβλητών



Ετεροσκεδαστικά Σφάλματα

- Διόρθωση με διατύπωση συναρτήσεων σταθμισμένων τετραγωνικών σφαλμάτων, στις οποίες κάθε μεμονωμένο σφάλμα e_t πολλαπλασιάζεται επί ένα συντελεστή βάρους w_t , η τιμή του οποίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της αντίστοιχης διασποράς σ_t^2 .
 - ετεροσκεδαστικό σφάλμα μέγιστης πιθανοφάνειας (heteroscedastic maximum likelihood error, **HMLE**) (Sorooshian and Dracup, 1980)

$$HMLE = \frac{\sum_{t=1}^T w_t (y_t - y_t')^2}{T \left(\prod_{t=1}^T w_t \right)^{1/T}}$$

$$w_t = y_t^{2(\lambda - 1)}$$

λ = Box-cox συντελεστής

Όλοι οι παράμετροι (λ , θ) προκύπτουν με ελαχιστοποίηση της HMLE



Συσχετισμένα Σφάλματα

- όταν τα σφάλματα είναι χρονικά εξαρτημένα, δηλαδή $\text{Cov}[e_t, e_s] \neq 0$ για $t \neq s \rightarrow$ τότε RMSE (και μαθηματικά ισοδύναμα) ακατάλληλο
 - Ειδικότερα, όταν υπάρχει θετική συσχέτιση, δηλαδή ένα θετικό σφάλμα τείνει να ακολουθείται από ένα επίσης θετικό σφάλμα, και αντίστροφα, τότε η συνάρτηση SLS υπεκτιμά την πραγματική διασπορά των υπολοίπων, σ_e^2 .
- η απαλοιφή της αυτοσυσχέτισης γίνεται είτε με κατάλληλο μετασχηματισμό των σφαλμάτων ή με χρήση κατάλληλης στοχικής συνάρτησης
 - μετασχηματισμός με εφαρμογή μοντέλων αυτοπαλινδρόμησης (π.χ. ARMA)

➤ π.χ για $AR(1) \rightarrow e_t = \alpha e_{t-1} + \xi_t$

$$SLS = \sum_{i=1}^T (e_i - \alpha e_{i-1})^2$$

➤ Χρήση του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης ως αντικειμενική συνάρτηση

$$\rho_1 = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - y_t') (y_{t-1} - y_{t-1}')}{\sigma_y \sigma_{y'}}$$

Συσχετισμένα Σφάλματα

- Άλλος τρόπος ελέγχου της αυτοσυσχέτισης των σφαλμάτων είναι μέσω στατιστικών ελέγχων,
 - π.χ. η δοκιμή *Durbin-Watson*

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^T (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T e_t^2}$$

- Οι κρίσιμες τιμές της ελεγχουσυνάρτησης *DW* δίνονται από πίνακες. Γενικά, τιμές κοντά στο 2 υποδηλώνουν απουσία θετικής συσχέτισης και πολύ καλή προσαρμογή του μοντέλου



Συνδυαστικά Κριτήρια

- Τα μέτρα καλής προσαρμογής που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να διατυπωθούν όχι μόνο αυτόνομα αλλά και συνδυαστικά.
 - *με εφαρμογή τυπικών τεχνικών συνάθροισης, γνωστών από την κλασική θεωρία πολυκριτηριακής ανάλυσης,*
 - *Συνηθέστερη μέθοδος: αθροιστική μέθοδος των βαρών*
 - *Προσοχή στην επιλογή στατιστικών κριτηρίων*
 - *Επιλέγονται συνήθως στατιστικοί παράμετροι με μικρή συσχέτιση που εστιάζουν σε σε διαφορετικές πτυχές των αποκρίσεων*



Επαλήθευση Μοντέλων

- *επαλήθευση* (validation) νοείται μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν
 - γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της υδρολογικής λεκάνης.
 - Μέθοδος χωριστού δείγματος (split-sample test)
 - Αποφυγή υπερ-προσαρμογής

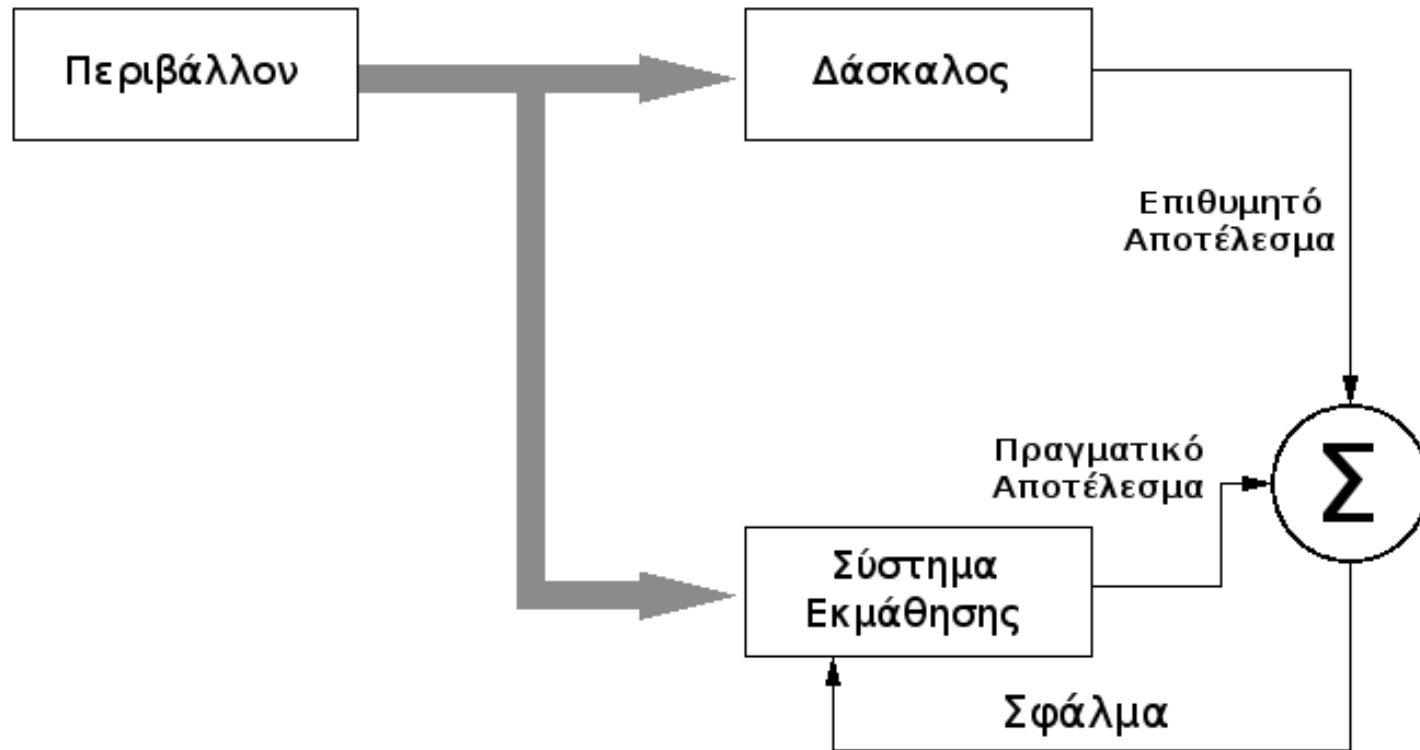


Ανάλυση Ευαισθησίας Μαθηματικών Μοντέλων

- Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) είναι μια διαδικασία αξιολόγησης της επίδρασης των παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων, για την ποσοτικοποίηση της ευαισθησίας τους στην εξεταζόμενη μεταβλητή (π.χ. απορροή)
 - Αποσκοπεί στη μείωση του εύρους των παραμέτρων
 - Στη γενίκευση των παραμέτρων χρησιμοποιώντας π.χ τυπικές ή περιοχικές τιμές
 - Στην απαλοιφή ή ενσωμάτωση των παραμέτρων σε άλλες πιο γενικές κατηγορίες

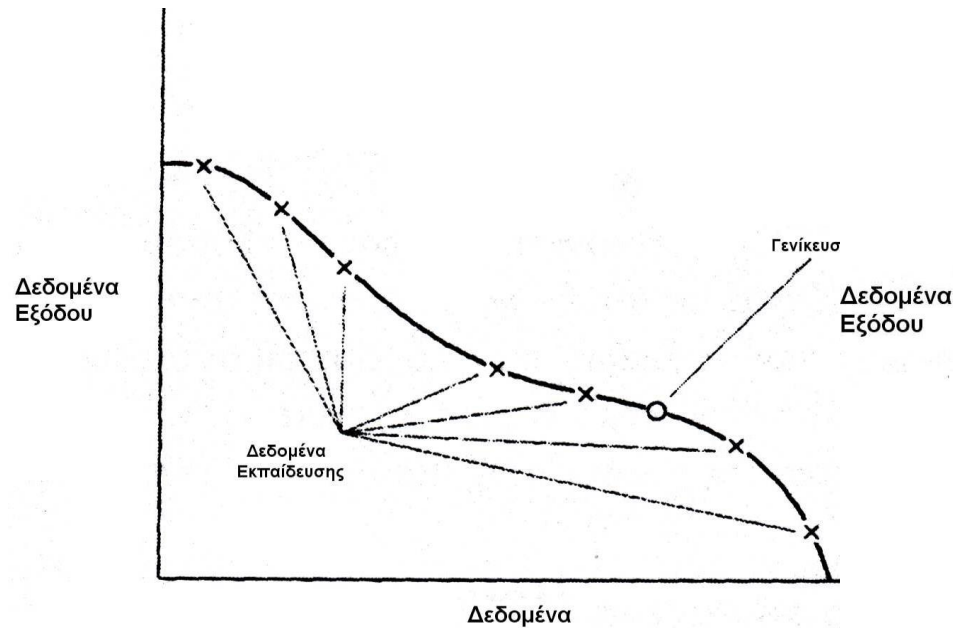


Βελτιστοποίηση και Επαλήθευση Μοντέλων

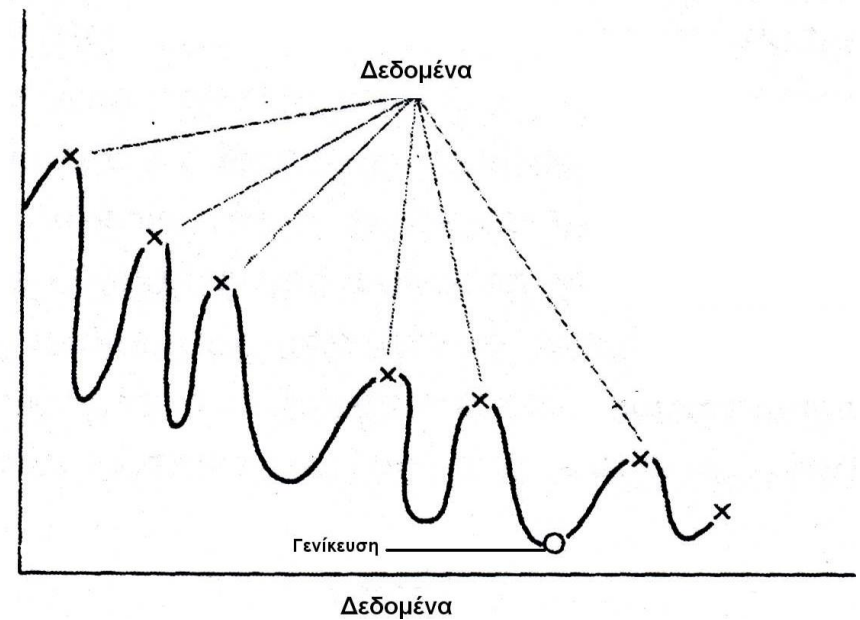


Βελτιστοποίηση και Επαλήθευση Μοντέλων

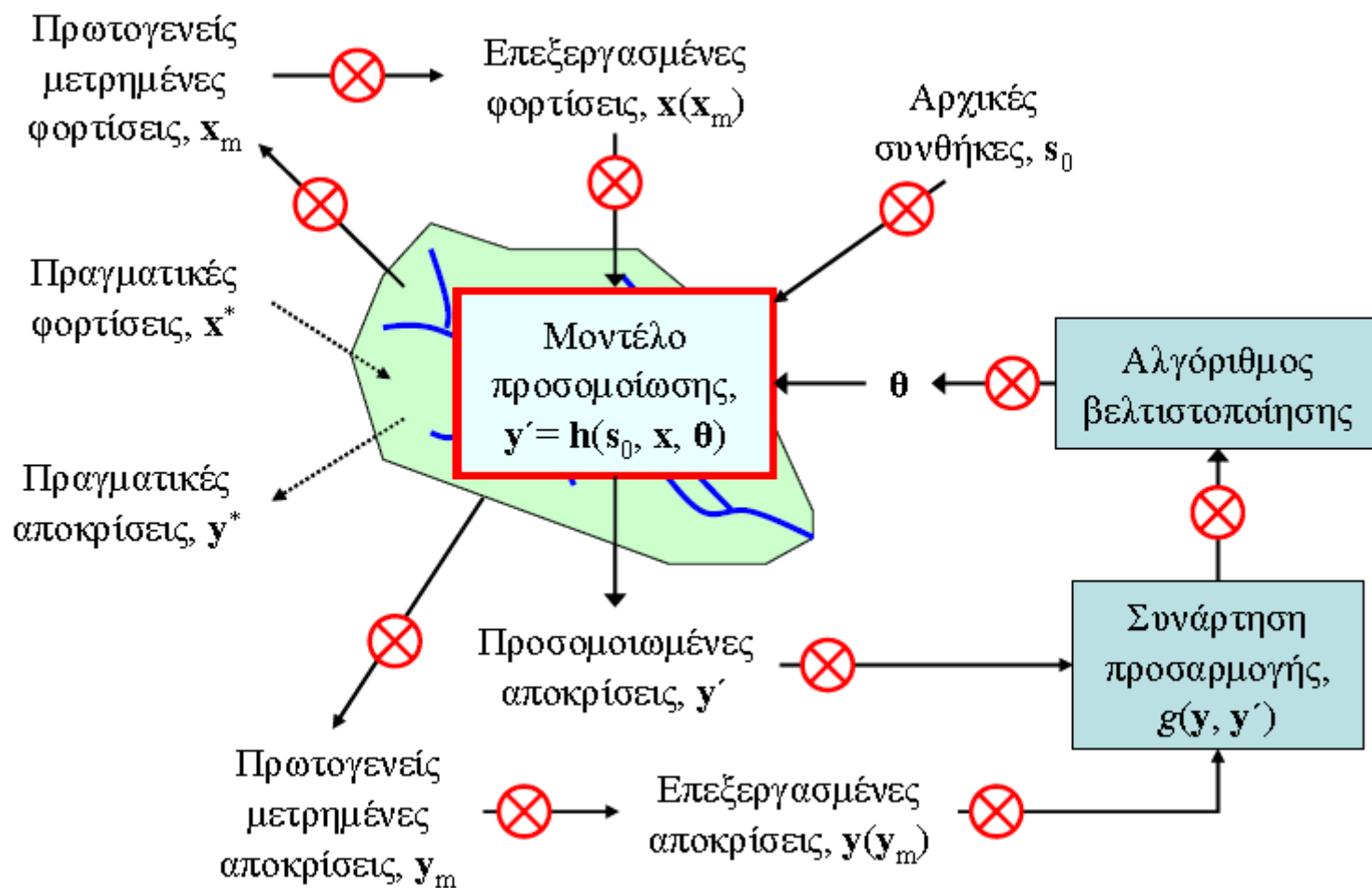
Σωστή προσαρμογή δεδομένων
(καλή γενίκευση)



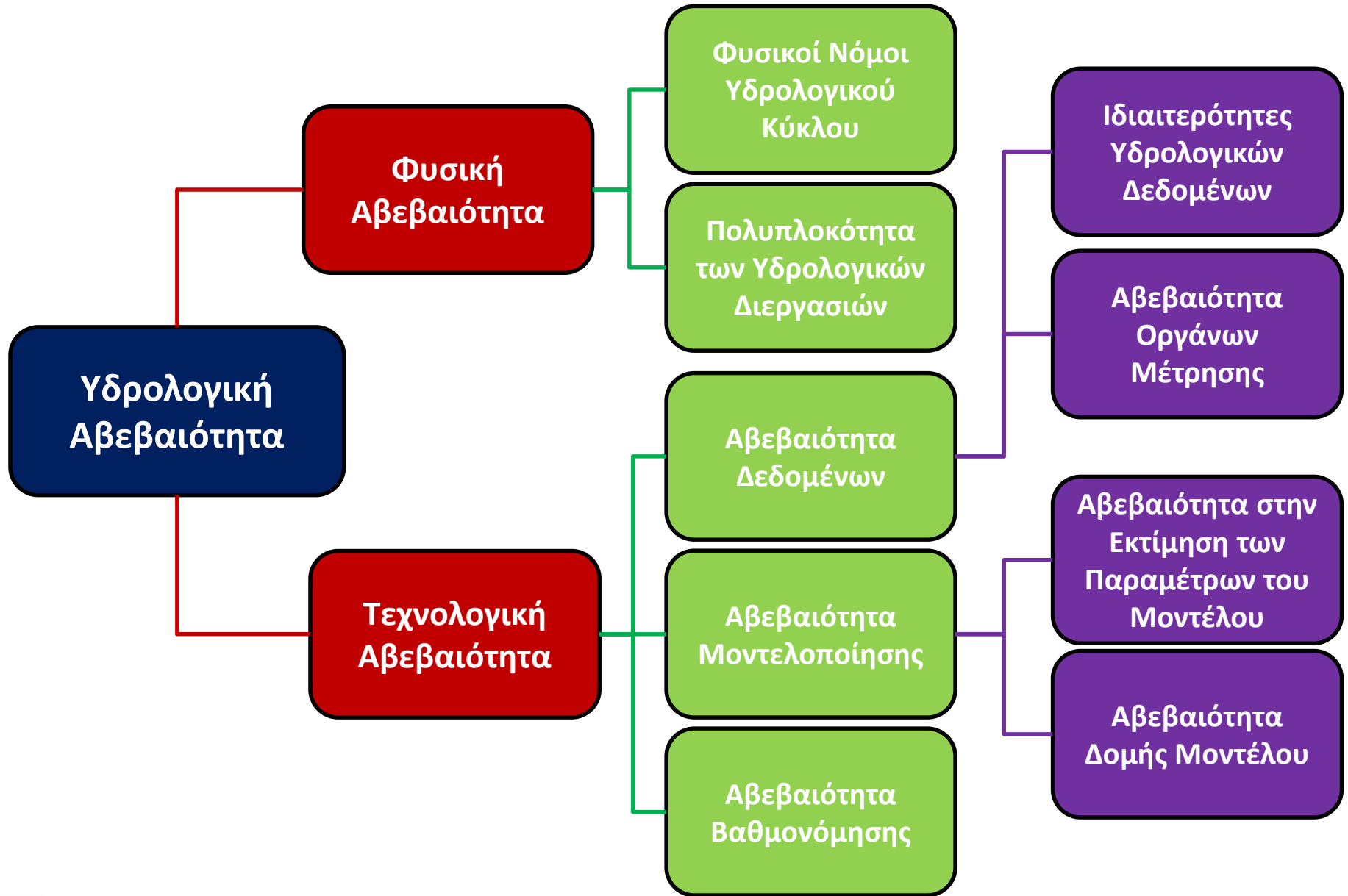
Υπερπροσαρμοσμένα δεδομένα
(κακή γενίκευση)



Αυτόματη βαθμονόμηση και αβεβαιότητα



Υδρολογική αβεβαιότητα



Πηγές αβεβαιότητας

- δομικά σφάλματα μοντέλου
- σφάλματα δεδομένων
- μη αντιπροσωπευτικότητα υδρολογικής πληροφορίας
- αδυναμία προσδιορισμού αρχικών και οριακών συνθηκών προσομοίωσης
- ακαταλληλότητα μέτρου προσαρμογής
- λανθασμένη εκτίμηση ορίων πεδίου αναζήτησης
- αδυναμίες αλγορίθμου αναζήτησης ακροτάτων
- μη ελεγχόμενες μεταβλητές απόκρισης
- μεταβολή των χαρακτηριστικών του συστήματος



Δομικά Σφάλματα μοντέλου

- Τα υδρολογικά μοντέλα, μη εξαιρώντας τα κατανεμημένα σχήματα φυσικής βάσης, δεν υλοποιούν παρά μια αδρή αναπαράσταση των εξαιρετικά πολύπλοκων και χωρικά ανομοιογενών διεργασιών, που πραγματοποιούνται στην χωρική κλίμακα της σχηματοποίησης
 - **Υπερ-παραμετροποίηση**
 - Σχετίζεται με ένα πολύ πιο σύνθετο πλέγμα αβεβαιοτήτων χωρίς, κατ' ανάγκη, εμφανή επίδραση στην ποιότητα της προσαρμογής του
 - Η υπερ-παραμετροποίηση προέρχεται από την απλοϊκή όσο και λανθασμένη
 - λογική ότι μια αναλυτικότερη περιγραφή των διεργασιών, που αναγκαστικά επιβάλλει τη χρήση περισσότερων παραμέτρων, αυξάνει την ακρίβεια του μοντέλου
 - **Υπο-παραμετροποίηση**
 - υπεραπλουστευμένη αναπαράσταση των διεργασιών
 - απόκρυψη σημαντικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου
 - χρήση μικρότερης χρονικής κλίμακας σε σχέση με αυτήν που υποστηρίζει το μοντέλο.



Δομικά Σφάλματα μοντέλου

- Η δομή του μοντέλου πρέπει να είναι συμβατή με τη λεγόμενη *αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης* (principle of parsimony)
 - Η βέλτιστη δομή ενός μοντέλου είναι αυτή που επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα με τα ελάχιστα πλήθος παραμέτρων.
- **Παράγοντες καλής παραμετροποίησης**
 - τις φυσικές διεργασίες που κρίνονται σημαντικές για την ορθή αναπαράσταση του συστήματος
 - τη χωρική και χρονική κλίμακα των διεργασιών
 - την υδρολογική πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατύπωση του απαιτούμενου
 - αριθμού μέτρων καλής προσαρμογής
 - τους χρονικούς περιορισμούς της βελτιστοποίησης



Σφάλματα Δεδομένων

- συστηματικά και τυχαία σφάλματα μετρήσεων
- σφάλματα χρονικής μεταβλητότητας
- σφάλματα χωρικής μεταβλητότητας
- σφάλματα αναγωγής της δευτερογενούς πληροφορίας σε πρωτογενή
- σφάλματα κλίμακας



Αντιπροσωπευτικότητα υδρολογικής πληροφορίας

- Απεικόνιση των δεδομένων μετρήσεων του πραγματικού φάσματος

Προσδιορισμός αρχικών συνθηκών

- Ως αρχικές συνθήκες ενός υδρολογικού μοντέλου νοούνται μεγέθη που αντιστοιχούν σε μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης που εκφράζουν αποθήκευση νερού (π.χ. εδαφική υγρασία, υπόγεια αποθήκευση, κτλ.)
- Για την άρση της ασάφειας που προκύπτει εξαιτίας του υποκειμενικού τρόπου προσδιορισμού των αρχικών συνθηκών, ορίζεται συνήθως μια περίοδος προθέρμανσης (warm-up period) κατά την οποία δεν ελέγχεται η προσαρμογή του μοντέλου (δηλαδή δεν υπολογίζεται η τιμή του μέτρου επίδοσης) ώστε να μην επηρεάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης από εγγενή σφάλματα εκτίμησης των αρχικών συνθηκών.



Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης

- Η εκτίμηση των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων μέσω αυτόματης βαθμονόμησης προϋποθέτει τη διατύπωση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, που περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:
 - τον ορισμό ενός αριθμητικού μέτρου καλής προσαρμογής $g(\theta)$ του μοντέλου, που ταυτίζεται με τη βαθμωτή στοχική συνάρτηση ενός προβλήματος ολικής βελτιστοποίησης
 - τον προσδιορισμό ενός εφικτού εύρους διακύμανσης των παραμέτρων $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, που ταυτίζεται με το πεδίο αναζήτησης

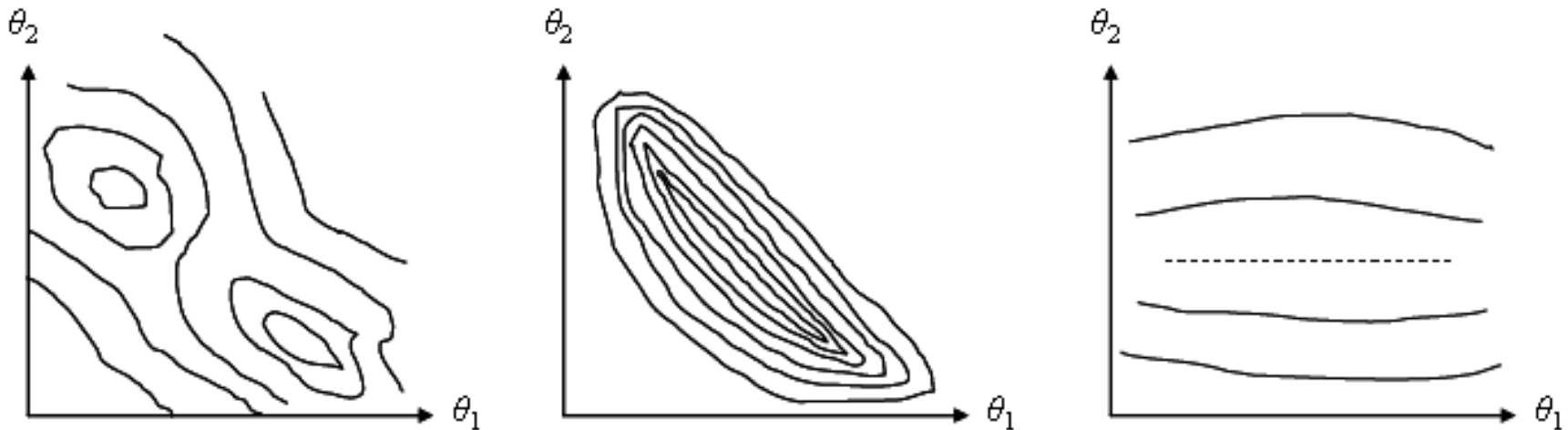


Γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφάνειας απόκρισης

- η ύπαρξη πολλών περιοχών έλξης, στις οποίες μπορεί να κατευθυνθεί η διαδικασία αναζήτησης, ανάλογα με τις συνθήκες εκκίνησης
- η ύπαρξη τοπικών ακροτάτων μικρής κλίμακας, δηλαδή πολλών στάσιμων σημείων εντός κάθε περιοχής έλξης
- η τραχεία γεωμετρία του χώρου αναζήτησης, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ασυνεχειών που οφείλονται σε περιορισμούς τύπου κατωφλίου
- η ευαισθησία της επιφάνειας απόκρισης, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των παραμέτρων
- η έντονα τραχεία γεωμετρία, εξαιτίας της ύπαρξης «αυχένων» και μακρόστενων «χαραδρών».



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφάνειας απόκρισης



Χαρακτηριστικές γεωμετρικές ιδιαιτερότητες της επιφάνειας απόκρισης προβλημάτων βαθμονόμησης: (α) αριστερά, σχηματίζονται δύο τοπικά ακρότατα, (β) στο κέντρο, σχηματίζεται μια μακρόστενη χαράδρα, εξαιτίας της ισχυρής αλληλεπίδρασης των παραμέτρων ϑ_1 και ϑ_2 , (γ) δεξιά, σχηματίζεται μια πλατιά κοιλάδα, επειδή η παράμετρος ϑ_1 παρουσιάζει πολύ χαμηλή ευαισθησία ως προς τη στοχική συνάρτηση.



Μη ελεγχόμενες μεταβλητές απόκρισης

- Βαθμονόμηση με βάση απορροές (π.χ. έξοδος λεκάνης)
- Οι υπόλοιπες αποκρίσεις, είτε αναφέρονται στην απορροή σε άλλες θέσεις της λεκάνης είτε σε άλλες μεταβλητές εξόδου (π.χ. πραγματική εξατμοδιαπνοή, εκροές εκτός λεκάνης) ή ακόμη και σε «εσωτερικές» μεταβλητές του μοντέλου (π.χ. αποθήκευση εδαφική υγρασία, αποθήκευση υπόγειου νερού), είναι μη ελεγχόμενες
- Εμπειρία μηχανικού στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του υδατικού ισοζυγίου



Αλλαγή των χαρακτηριστικών του συστήματος

- Τρεις κύριες κατηγορίες
 - αλλαγή των κλιματικών συνθηκών
 - αλλαγή των επιφανειακών χαρακτηριστικών της λεκάνης
 - αλλαγή του καθεστώτος των απολήψεων νερού



Βιβλιογραφία

- Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων. «Υδρολογικά Μοντέλα και Εφαρμογές», Σημειώσεις-Διαφάνειες Μαθήματος Προχωρημένη Υδρολογία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009 (http://users.itia.ntua.gr/nikos/adv_hydrology/).
- Ευστρατιάδης, Α. «Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων», Διδακτορική διατριβή, 391 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.
- Μακρόπουλος, Χ., και Α. Ευστρατιάδης. «Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων και Υδροπληροφορικής», 307 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011 (<https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/1109/>).
- Μιμίκου, Μ.Α. «Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 3^η Έκδοση, 2006.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

