

# ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

## Κίνητρο

για την έρευνα της προσομοίωσης της ροής και των φαινομένων της μεταφοράς ρυπαντών (υδροφορείς - ακόρεστη ζώνη)

Η ανάγκη να επιλύσουμε προβλήματα με πρακτικό ενδιαφέρον

## παραδείγματα

άντληση υπόγειου νερού για τα συστήματα παροχής  
ανάγκη απομάκρυνσης ρυπαντών από την ακόρεστη ζώνη για να  
εμποδίσουμε τη ρύπανση υποκείμενου υδροφορέα

## τυπικά προβλήματα διαχείρισης

τα μοντέλα παρέχουν πληροφορίες που απαιτούνται από διάφορες διατάξεις

## Τι είναι ένα πρόβλημα Διαχείρισης;

Γιατί χρειαζόμαστε τα μοντέλα κατά την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης;

## **πρέπει να ληφθούν αποφάσεις**

που αφορούν το σχεδιασμό ή τη λειτουργία ενός συστήματος  
π.χ , ένας υδροφόρος

## **για να πετύχουμε ορισμένους στόχους**

χωρίς την παραβίαση τεχνικών και μη τεχνικών περιορισμών

## **παραδείγματα**

- υποεπιφανειακή ρύπανση από την ανεξέλεγκτη διάθεση χημικού προϊόντος

## **μία απόφαση πρέπει να ληφθεί**

θα πρέπει να γίνει κάποια διορθωτική (θεραπευτική) παρέμβαση ή  
θα αφήσουμε τη φύση να συνεχίσει την πορεία της

## **απόφαση να πραγματοποιήσουμε παρεμβάσεις αποκατάστασης**

- ποιο είδος διορθωτικής ενέργειας πρέπει να επιλεγεί;
- πότε πρέπει να γίνουν αυτές οι ενέργειες;
- σε τι επίπεδο θα πρέπει να γίνουν;

## **οι αποφάσεις στην περίπτωση ενός υδροφόρου που τροφοδοτεί κάποιο σύστημα παροχής**

θα πρέπει να συμπεριλάβουν:

- τον αριθμό των παραγωγικών γεωτρήσεων
- την θέση τους
- το ρυθμό των αντλήσεων

## **επιθυμούμε την επίτευξη των στόχων με ένα ελάχιστο κόστος**

οι αποφάσεις υπόκεινται σε ποικίλους περιορισμούς που σχετίζονται με ορισμένες δραστηριότητες, π.χ., ρυθμοί άντλησης

επιπτώσεις από την εφαρμογή των εναλλακτικών αποφάσεων, π.χ., επιπτώσεις στα επίπεδα της στάθμης

## **δεν υπάρχει μοναδική λύση στο πρόβλημα**

Οι ίδιοι στόχοι μπορεί να επιτευχθούν με περισσότερους του ενός τρόπους χρειάζονται κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής λύσης

## Τι είναι μοντέλο;

- επιλεγμένη και απλοποιημένη εκδοχή ενός πραγματικού συστήματος και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό
- προσομοιώνει προσεγγιστικά τις σχέσεις διέγερσης - απόκρισης του συστήματος οι οποίες ενδιαφέρουν άμεσα



## Λέξεις κλειδιά:

Επιλεγμένη, Απλοποιημένη, Προσεγγιστικά, Σχέσεις Διέγερσης-Απόκρισης

## Τι μπορεί να κάνει ένα μοντέλο;

να προβλέψει τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος σε αντιστοιχία με την εφαρμογή διαφόρων ενεργειών

## Οι ενέργειες διεγείρουν το υπό θεώρηση σύστημα

**το μοντέλο παρέχει τη σχέση διέγερσης - απόκρισης του συστήματος**

Οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά πλαίσια διαχείρισης

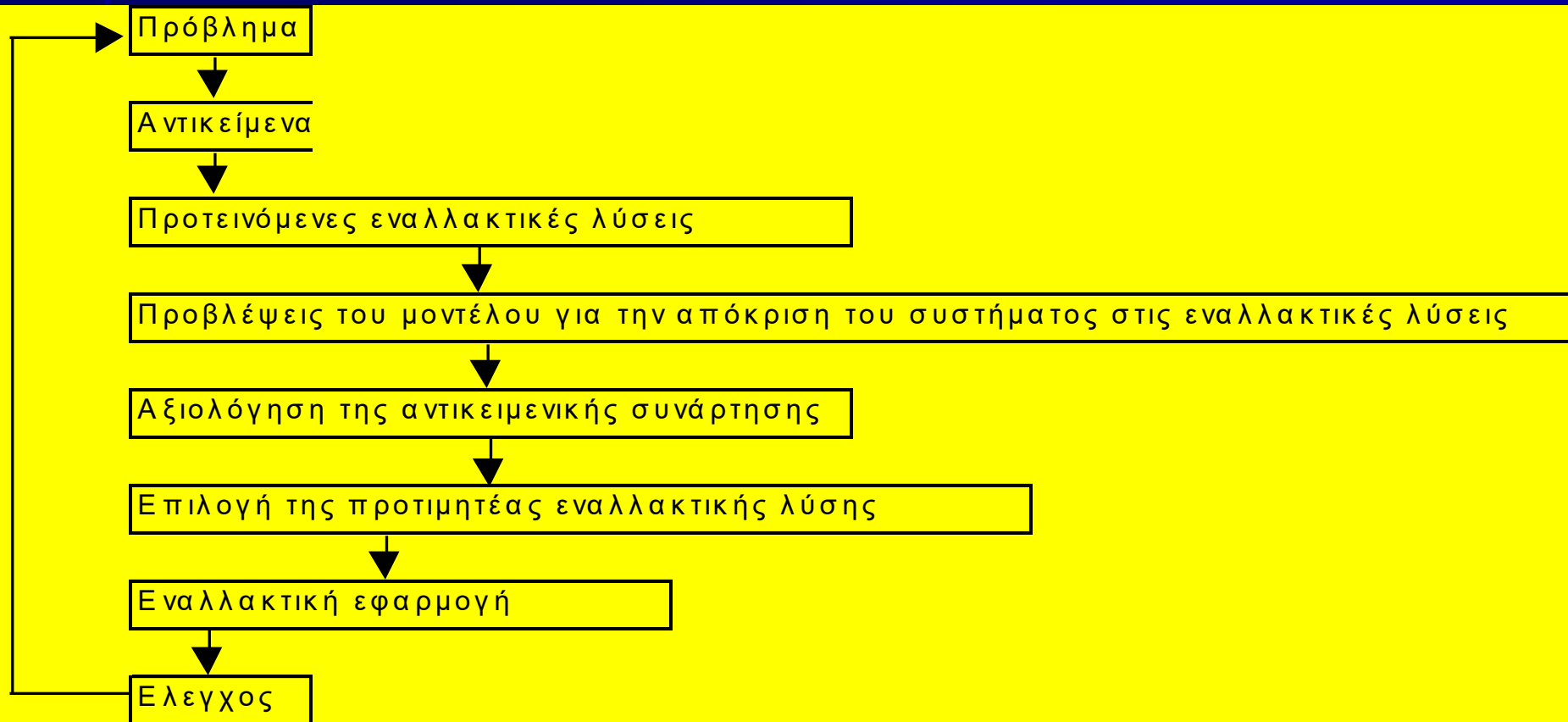
## παραδείγματα στόχων επιτυγχάνονται μέσω της μοντελοποίησης

- πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος σε αντιστοιχία με τις διεγέρσεις από την εφαρμογή αποφάσεων διαχείρισης
- καλύτερη κατανόηση του συστήματος από γεωλογικής, υδρολογικής και χημικής πλευράς
- δίνει τις πληροφορίες που απαιτούνται για συμμόρφωση σε ορισμένες διατάξεις
- παρέχει πληροφορίες για το σχεδιασμό των δικτύων παρατήρησης, μέσω της πρόβλεψης της μελλοντικής συμπεριφοράς του συστήματος
- παρέχει πληροφορίες για το σχεδιασμό των πειραμάτων στο ύπαιθρο

Πώς οι ενέργειες μοντελοποίησης ενσωματώνονται στη διαδικασία της διαχείρισης ενός συγκεκριμένου προβλήματος;

## ρόλος της προσομοίωσης στη διαδικασία λήψης απόφασης

πάντοτε αρχίζουμε από το δεδομένο πρόβλημα  
- κύριο στόχο ενός υπεύθυνου για τη λήψη αποφάσεων που επιθυμούμε να επιλύσουμε -



## **Στη συνέχεια**

αναγνωρίζουμε τις Εναλλακτικές Λύσεις για να επιλέξουμε τη βέλτιστη

## **προσδιορίζουμε τις απαιτούμενες πληροφορίες**

για να διευκολύνουμε τη συλλογή

## **παράδειγμα**

στάθμες του υπόγειου νερού σε αντιστοιχία με τις αντλήσεις με σκοπό να διασφαλίσουμε ότι οι περιορισμοί δεν παραβιάζονται

η πληροφορία περιλαμβάνεται στην απόκριση του συστήματος

## **ΜΟΝΤΕΛΟ**

–είναι το εργαλείο, το οποίο θα εφοδιάσουμε με τη συγκεκριμένη πληροφορία-

## **επακόλουθα βήματα**

Συντάσσουμε το μοντέλο (εγκυρότητα, ρύθμιση κ.τ.λ.) - για να λάβουμε τις απαιτούμενες πληροφορίες

## **Πληροφορίες**

χρησιμοποιούνται για την επιλογή της πιο επιθυμητής λύσης

## **πρόσθετες πληροφορίες συναθροίζονται**

Χρησιμοποιούνται

- ➔ στην επαναξιολόγηση του προβλήματος
- ➔ στην ανανέωση του μοντέλου και των προβλέψεών του

## **Για να πάρουμε αποφάσεις χρειαζόμαστε:**

Τη συμπεριφορά του μοντέλου ως εργαλείου πρόβλεψης του συστήματος διαχείρισης σε αντιστοιχία με το εφαρμόσιμο εναλλακτικών λύσεων

## **Λύση**

π.χ. ομάδα γεωτρήσεων, θέσεις, παροχές, χρονοδιαγράμματα, κ.τ.λ.

Το μοντέλο είναι το εργαλείο που παρέχει αυτή τη πληροφορία προσομοιώνει τη συμπεριφορά του πραγματικού προβλήματος

## **πως διεγείρουμε το μοντέλο;**

Η απόκριση του μοντέλου παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες

## **περιγραφή της μεθοδολογίας**

- 💧 σύνταξης μοντέλων
- 💧 επίλυσης\_προβλημάτων ροής και μεταφοράς ρυπαντών



## **Θεμελιώδεις έννοιες:**

- το μοντέλο σαν ένα εργαλείο πρόβλεψης
- διαδικασία σύνταξης του μοντέλου
- μέθοδοι επίλυσης και χρησιμότητά του

## **εφαρμόζονται πρωταρχικά:**

- στη ροή ρευστών
- στη μεταφορά ρυπαντών (υδροφορείς - ακόρεστη ζώνη)

## **πως εκφράζεται ένα μοντέλο;**

μαθηματικοί όροι - σύντομος τρόπος περιγραφής φυσικών/ χημικών φαινομένων που σχετίζονται με το συγκεκριμένο πρόβλημα

# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

## Βήμα 1:

Αναγνώριση των αναγκαίων πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης

- 🔹 Στάθμες του νερού σε επιλεγμένα σημεία
- 🔹 Εκροή πηγών
- 🔹 Ποιότητα του νερού
- 🔹 Ρυθμός διαφυγής του Υ.Ν. μέσω των ορίων

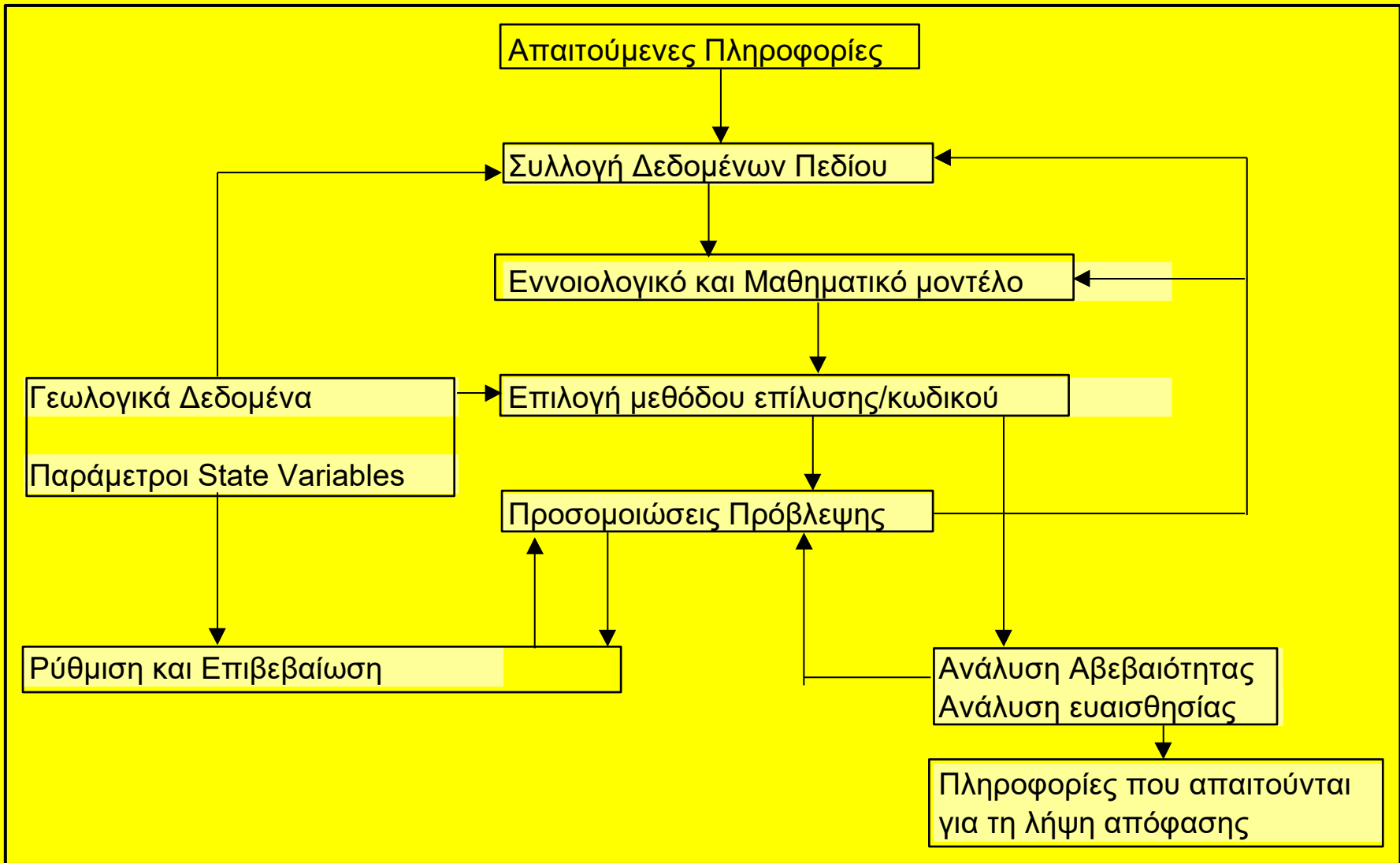
τα μοντέλα είναι αναγκαία:

για την πρόβλεψη του αποτελέσματος των αποφάσεων διαχείρισης

οι **ίδιοι αντικειμενικοί στόχοι** μπορούν να επιτευχθούν μέσω περισσότερων του ενός σχεδίου λειτουργίας

**Για** να επιλέξει ο διαχειριστής το πιο επιθυμητό σχέδιο χρειάζεται:

- 🔹 να προσδιορίσει τιμές για μία ομάδα μετρήσεων,
  - 🔹 ή κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση:
1. της επιτυχίας ενός επιλεγμένου σχεδίου και
  2. της επίτευξης των αντικειμενικών στόχων



## παραδείγματα τέτοιων μετρήσεων:

- 💧 Τα κόστος ενός προγράμματος
- 💧 η περίοδος που απαιτείται για αποκατάσταση (remediation)
- 💧 η ποιότητα του νερού που φθάνει σε έναν υποκείμενο υδροφόρο
- 💧 η ποσότητα και ποιότητα του νερού που μπορεί να αντληθεί

## Οι πραγματικές τιμές των διαφόρων μετρήσεων εξαρτώνται από:

- το σύστημα διαχείρισης
- την απόκρισή τους στην εφαρμογή του προτεινόμενου σχεδίου

## η φύση του συστήματος και προβλήματος

αποκλείουν την πιθανότητα πραγματικής εφαρμογής στην προσπάθεια να μετρήσουμε την απόκρισή του

η ικανότητα να προβλέψουμε τις μελλοντικές συνθήκες επιτρέπει τον προϋπολογισμό της αξίας των κριτηρίων

## Οι προβλεφθείσες αποκρίσεις του συστήματος

π.χ. στάθμη, συγκεντρώσεις χημικών ειδών  
υποδεικνύουν τα σχέδια που παραβιάζουν τους περιορισμούς που επιβλήθηκαν

## **Βήμα 2:**

Το **πραγματικό σύστημα** και η **συμπεριφορά του** μπορεί να είναι πολύ σύνθετα, εξαρτώμενα από τις λεπτομέρειες που συμπεριλαμβάνει η περιγραφή του

**παράδειγμα,**

η μορφή κάθε ιδιαίτερου κόκκου του εδάφους π.χ., θα συμπεριλάβει κάθε αργιλικό φακό μέσα σε ένα αμμώδη σχηματισμό, ή τον αέρα που είναι διαλυμένος στο νερό;

**η αποτελεσματική απόφαση διαχείρισης δεν μπορεί να εξαρτάται:**

από υπερβολική περιγραφή του συστήματος και της συμπεριφοράς του

**χρειάζεται να απλοποιήσουμε την περιγραφή και τη συμπεριφορά του ώστε να είναι χρήσιμο για το σκοπό του σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων**

**απλουστεύσεις:**

εισάγονται με τη μορφή ομάδας από υποθέσεις εκφράζουν την κατανόησή για τη φύση του συστήματος και της συμπεριφοράς του

## οι απλοποιημένες υποθέσεις έχουν σχέση με

- 🔹 τη γεωμετρία της διερευνούμενης περιοχής
- 🔹 τον τρόπο εξομάλυνσης των επιδράσεων των ετερογενειών
- 🔹 τη φύση των στερεών και ρευστών φάσεων (αέρας και νερό)
- 🔹 το καθεστώς ροής των ρευστών
- 🔹 τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα

**μια απλοποιημένη εκδοχή ενός πραγματικού συστήματος**

**κανένα μοναδικό μοντέλο δεν υπάρχει που να το περιγράφει**

**Διαφορετικές ομάδες από απλοποιημένες υποθέσεις οδηγούν σε διαφορετικά μοντέλα**

**Χρειάζεται προσέγγιση με διαφορετικό τρόπο**

# Η επιλογή του κατάλληλου εννοιολογικού μοντέλου εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες:

## ● Το αντικείμενο-α της διερεύνησης

π.χ., πληροφορίες απαραίτητες για να εκπληρωθεί ο στόχος, για να λάβουμε δηλαδή διαχειριστικές αποφάσεις

- Οι διαθέσιμοι πόροι (ειδικοί, ειδικευμένο προσωπικό, δεδομένα πεδίου, υπολογιστές)
- η ικανότητα κατανόησης και περιγραφής των διαδικασιών
- οι απαραίτητες πληροφορίες για την **επιβεβαίωση του μοντέλου** και τον **προσδιορισμό των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων**
- Το πλαίσιο νόμων και διατάξεων που αφορά την περίπτωση

## Οι αντικειμενικοί στόχοι μιας διερεύνησης υπαγορεύουν

- ποιοι από τους χαρακτήρες
- ποια συμπεριφορά αυτών στην περιοχή
- και σε ποιο βαθμό ακρίβειας και λεπτομέρειας

**θα αντιπροσωπευθούν στο μοντέλο;**

### **Σε μερικές περιπτώσεις,**

είναι αρκετό να λάβουμε υπολογισμούς των μέσων ετήσιων ρυθμών κατείσδυσης

### **Σε άλλες περιπτώσεις,**

είναι αρκετό να υπολογίσουμε το μέσο χρόνο διαδρομής ενός ρυπαντή από το έδαφος προς υποκείμενο υδροφόρο

### **Η παραμόρφωση του εδάφους**

μπορεί αιτιολογημένα να παραβλεφθεί κατά την ανάλυση της ρύπανσης του υπόγειου νερού

**είναι πρωταρχικής θεώρησης σε προβλήματα μηχανικής θεμελίωσης**

**περιορισμοί που επιβάλλονται εξαιτίας περιορισμένων πόρων**

δεν μπορεί να παραβλεφθούν

**παράδειγμα,** ένα πιο λεπτομερές μοντέλο

- έχει φανερά μεγαλύτερο κόστος
- απαιτεί περισσότερο εξειδικευμένους ειδικούς μοντέλων
- πιο πολύπλοκους υπολογιστικούς κώδικες
- μεγαλύτερους υπολογιστές



**είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι:**

η ρύθμιση και ο προσδιορισμός των συντελεστών σε περισσότερο λεπτομερή μοντέλα απαιτούν περισσότερες μετρήσεις

οι πληροφορίες αυτές κοστίζουν πολύ περισσότερο από τους κώδικες και το χρόνο απασχόλησης στον υπολογιστή

**το δεύτερο βήμα** στη διαδικασία σύνταξης ενός μοντέλου είναι

**η κατασκευή ενός εννοιολογικού μοντέλου**

συνίσταται από ένα σύνολο υποθέσεων οι οποίες ανάγουν το πραγματικό πρόβλημα και την πραγματική περιοχή σε απλοποιημένες εκδοχές

**οι εκδοχές είναι ικανοποιητικές**

όσον αφορά τους αντικειμενικούς στόχους της σύνταξης του μοντέλου και των συνδεδεμένων με αυτό διαχειριστικών προβλημάτων

## Υποθέσεις που σχετίζονται με τέτοια χαρακτηριστικά:

- 🔹 Γεωμετρία των επιφανειών που οριοθετούν την περιοχή
- 🔹 Πόσες διαστάσεις
- 🔹 Συμπεριφορά σε σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες
- 🔹 Είδος υλικού, ανομοιογένεια, ανισοτροπία, ελαστική συμπεριφορά
- 🔹 Αριθμός και είδη ρευστών φάσεων, χημικά είδη
- 🔹 Οι εκτεταμένες ποσότητες που μεταφέρονται στην περιοχή

### ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ

είναι: η μάζα, (π.χ. χημικού είδους), ορμή, ενέργεια (θερμότητα), κυρίως του νερού, του αέρα και των στερεών φάσεων

- 🔹 Οι ιδιότητες των ρευστών φάσεων  
(πυκνότητα, ιξώδες, συμπιεστότητα, παρουσία διαλυτών)
- 🔹 Οι μηχανισμοί μεταφοράς εντός της περιοχής
- 🔹 Η δυνατότητα αλλαγής φάσης και ανταλλαγής χημικών ειδών ανάμεσα σε γειτονικές φάσεις



Οι σημαντικές χημικές, φυσικές και βιολογικές διαδικασίες



τα καθεστώτα ροής των εμπλεκόμενων ρευστών (π.χ. γραμμική, μη γραμμική)



Η ύπαρξη μη ισοθερμικών συνθηκών

(και η επίδρασή τους στις ιδιότητες των ρευστών και στερεών καθώς και στις χημικές-βιολογικές διαδικασίες)



Η παρουσία υποτιθέμενων απότομων μακροσκοπικών ορίων μεταξύ των ρευστών, όπως μια υδροστατική επιφάνεια



Οι συναφείς μεταβλητές κατάστασης, και οι περιοχές ή όγκοι για τους οποίους οι μέσες τιμές τέτοιων μεταβλητών θα ληφθούν



Η παρουσία πηγών και καταβόθρων των ρευστών και των ρυπαντών εντός του της περιοχής, και η φύση τους (χωρική κατανομή και περιοδική μεταβολή)



Οι συνθήκες στα όρια της περιοχής



Οι αρχικές συνθήκες της περιοχής

## **περισσότερα στοιχεία**

μπορεί να περιλαμβάνονται στο εννοιολογικό μοντέλο κάθε ιδιαίτερης περίπτωσης

Οι υποθέσεις θα πρέπει να αριθμούνται A1, A2, κτλ.

## **Η επιλογή του κατάλληλου εννοιολογικού μοντέλου**

για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα είναι το πιο σπουδαίο βήμα στη διαδικασία σύνταξης του μοντέλου

## **Αποφεύγουμε**

1. τις υπεραπλουστεύσεις - δεν θα πάρουμε τις αναγκαίες πληροφορίες
2. και τις υποαπλουστεύσεις - δεν θα πάρουμε τις πληροφορίες για τη ρύθμιση και τον προσδιορισμό των συντελεστών ούτε και τους αναγκαίους πόρους

## **Ακατάλληλες ή λανθασμένες υποθέσεις**

το μοντέλο δεν αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά που είναι συναφή με το συγκεκριμένο πρόβλημα της διαχείρισης

Το σύνολο των υποθέσεων αποτελεί την

**επιγραφή του μοντέλου**

*Το ίδιο μοντέλο*

*δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα διαφορετικό πρόβλημα*

**Παρά μόνο τότε**

*όταν η εξέταση της επιγραφής διασφαλίζει ότι αυτό ταιριάζει στο  
πρόβλημα κάποιου*

## ΒΗΜΑ 3

Το εννοιολογικό μοντέλο εκφράζεται με τη μορφή μαθηματικού μοντέλου και εφαρμόζεται ένα συνεχές μοντέλο

αποτελείται από:



τον καθορισμό της γεωμετρίας των επιφανειών που οριοθετούν τη περιοχή



τις εξισώσεις που εκφράζουν τις ισορροπίες των εκτεταμένων ποσοτήτων (π.χ., μάζα ρευστών/χημικών ειδών, ενέργεια)



τις εξισώσεις ροής που συσχετίζουν τις ροές με τις εκτεταμένες ποσότητες σε σχέση με τις συναφείς μεταβλητές κατάστασης του προβλήματος



τις βασικές εξισώσεις που καθορίζουν τη συμπεριφορά των ιδιαίτερων φάσεων και χημικών ειδών  
π.χ., εξάρτηση της πυκνότητας και του ιξώδους από την πίεση, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών

## **Πηγές και καταβόθρες**

(μηχανισμοί επίσπευσης) των συναφών εκτεταμένων ποσοτήτων

## **Αρχικές συνθήκες**

περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος σε κάποιο αρχικό χρόνο

## **Οριακές συνθήκες**

περιγράφουν την αλληλεπίδραση της περιοχής με το περιβάλλον της  
δια μέσου των ορίων τους

**ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ** είναι:

η μάζα, (π.χ. χημικού είδους), ορμή, ενέργεια (θερμότητα), κυρίως του νερού, του αέρα και των στερεών φάσεων

**ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ:**

έχουν συχνά τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων



## **Δύο υποθέσεις συμπεριλαμβάνονται**

συνήθως στην πλειοψηφία των εννοιολογικών μοντέλων  
τα οποία περιγράφουν την μεταφορά εκτεταμένων ποσοτήτων  
σε πορώδη μέσα

### **1. Συνεχές μέσο**

χρησιμοποίηση του Νόμου του Darcy για την περιγραφή της ροής των ρευστών  
στο συνεχές πορώδες μέσο

η μερική διαφορική εξίσωση ισορροπίας (π.χ. της μάζας του ρευστού)  
περιγράφει την συμπεριφορά σε κάθε σημείο εντός της περιοχής

## Σε ορισμένες περιπτώσεις ενδιαφερόμαστε μόνο για:

- το τι συμβαίνει (πληροφορίες)
- τη συσσωρευμένη ή μέση συμπεριφορά μιας πλήρους περιοχής, ή για τμημάτων αυτής

## τότε χρειάζεται ένα άλλο είδος μοντέλου

- 💧 μοντέλο συσσωρευμένων παραμέτρων
- 💧 υποδιαίρεσης (compartmental) ή
- 💧 με πολλά κελιά (multi-cell)

Οι ισορροπίες των εκτεταμένων ποσοτήτων ορίζονται:  
για κελιά διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων με τη χρήση των  
μέσων όρων

**2.** Σε περιπτώσεις μεγάλης ετερογένειας χρειάζεται ένα διαφορετικό μοντέλο  
lump ή input-output

## Μετάβαση από τη μικροσκοπική κλίμακα στο μακροσκοπικό μοντέλο

διαδικασία υπολογισμού των μέσων όρων των συντελεστών:  
π.χ., διαπερατότητα, διαχυτότητα της υγρασίας

οι **αριθμητικές τιμές όλων των συντελεστών** που εμφανίζονται στο μοντέλο πρέπει να είναι γνωστές από:

- 🔹 εργαστηριακά ή πειράματα πεδίου
- 🔹 τη βιβλιογραφία ή
- 🔹 παρόμοιες περιπτώσεις και συνθήκες,
- 🔹 ή από προσωπική γνώση του συντάκτη του μοντέλου που βασίζεται στην εμπειρία του

**Οι συντελεστές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές τους που προβλέπονται από το μοντέλο και ισχύουν μόνο για το συγκεκριμένο μοντέλο**

## Παράδειγμα

προσέγγιση μιας περιοχής σαν ομοιογενούς- μία τιμή για τη διαπερατότητα ή υποθέτουμε για την ίδια περιοχή - την παρουσία στρωμάτων - μια τιμή για κάθε στρώμα

## προσοχή!!!!

Όταν οι συντελεστές ενός μοντέλου χρησιμοποιούνται και σε ένα άλλο τότε μπορεί να προκύψουν σφάλματα που εξαρτώνται από τις διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα

## Βήμα 4 Ανάπτυξη ενός αριθμητικού μοντέλου και κώδικα

Μετά τη σύνταξη του μαθηματικού μοντέλου είναι αναγκαίο να επιλύσουμε αυτό στις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν

### προτιμώμενη μέθοδος - η αναλυτική

πολυπλοκότητα στα περισσότερα προβλήματα που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον

### είναι αδύνατη η προσέγγιση με αναλυτικές λύσεις

Γι' αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι μετασχηματισμός του μαθηματικού μοντέλου σε αριθμητικό

οι μερικές διαφορικές εξισώσεις αντιπροσωπεύονται από τις αντίστοιχες αριθμητικές τους τιμές

πρόγραμμα Η/Υ ή κώδικας είναι αναγκαίος για την επίλυση

### Δημόσιοι ή εμπορικοί –

είναι φθηνότερο να προμηθευτείς ένα κώδικα από το να τον αναπτύξεις

- Κώδικες για προβλήματα ροής
- Κώδικες για μεταφορά ρύπων σε απλή ή πολυφασική ροή
- Κώδικες για βιολογικές αντιδράσεις και μετασχηματισμούς

## **ΒΗΜΑ 5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (validation)**

Η κατάλληλη διαδικασία προσδιορισμού του πόσο καλά η θεωρητική βάση του μοντέλου και η εφαρμογή του υπολογιστή περιγράφουν τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος με όρους όπως:

**Βαθμός συσχέτισης** ανάμεσα στις υπολογιζόμενες και στις ανεξάρτητα παρατηρούμενες αποκρίσεις αιτίας - αποτελέσματος του πρωτότυπου σε πραγματικές συνθήκες υπόγειου υδροφόρου συστήματος

**Αναπαριστά** το τελευταίο σκαλοπάτι στον προσδιορισμό της καταλληλότητας των παραγόμενων για το πρωτότυπο σύστημα - σε πραγματικές συνθήκες - ποσοτικοποιημένων σχέσεων, για το οποίο το μοντέλο σχεδιάσθηκε να προσομοιώσει

**περιλαμβάνει τη σύγκριση λύσεων** του κώδικα με εκείνες που προέκυψαν από αναλυτικές μεθόδους (όταν τέτοιες λύσεις είναι διαθέσιμες)

**Πότε μπορεί να γίνει αυτό;**

Σε μερικές απλοποιημένες γεωμετρίες της περιοχής, ομοιογενή υλικά, κ.τ.λ.

**Όταν η παραγωγή αναλυτικών λύσεων δεν είναι προσιτή**

συγκρίνουμε λύσεις που προέκυψαν από τη χρήση διαφορετικών κωδικών οι καλοί κώδικες, ιδιαίτερα οι εμπορικοί πρέπει να έχουν καλώς επιβεβαιωμένη επαλήθευση του κώδικα

## **ΒΗΜΑ 6: ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (verification)**

η διαδικασία προσδιορισμού του αν η ακρίβεια και η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου βρίσκονται μέσα στα αποδεκτά όρια σφάλματος μέσω δοκιμών ανεξαρτήτων από τη διαδικασία ρύθμισης

**αποδεκτή προσέγγιση**, χρησιμοποιώντας μια ομάδα από τιμές παραμέτρων και οριακών συνθηκών από ένα ρυθμισμένο μοντέλο, μιας δεύτερης ομάδας από δεδομένα πεδίου που μετρήθηκαν σε παρόμοιες υδρολογικές συνθήκες

**δηλαδή,**

ότι το μοντέλο πράγματι περιλαμβάνει όλες τις συναφείς διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν τη σχέση διέγερσης-απόκρισης που ενδιαφέρει με ένα αποδεκτό βαθμό ακρίβειας

**Ο μόνος τρόπος είναι ένα πείραμα για την πραγματική θέση που σπάνια είναι πραγματοποιήσιμο**

- συχνά επικυρώνουμε το μοντέλο κατ' αρχήν, μέσω της διενέργειας ελεγχόμενων εργαστηριακών πειραμάτων (εύκολο)
- Πολλοί χαρακτήρες των πειραμάτων στο πεδίο δεν μπορούν όχι μόνον να ελεγχθούν αλλά ακόμη και να αναγνωρισθούν
- ετερογένεια και ανισοτροπία του πεδίου

η επικύρωση του μοντέλου μερικές φορές συνδυάζεται με τη ρύθμιση

## ΒΗΜΑ 7 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

υπολογισμός των παραμέτρων

οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών πρέπει να είναι γνωστές  
η φυσική αναπλήρωση, η θέση και τύπος των ορίων

συντελεστές του μοντέλου παράμετροι που πρέπει να αναγνωρισθούν

αναγνώριση του προβλήματος,

αντίστροφο πρόβλημα, ή πρόβλημα υπολογισμού των παραμέτρων

ρύθμιση του μοντέλου

προσδιορίζονται οι τιμές των συντελεστών μέσω της επίλυσης ενός αντιστρόφου προβλήματος για μια θέση που ενδιαφέρει χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη συγκεκριμένη θέση

## εξετάζονται ιστορικά δεδομένα

για να βρεθεί μια περίοδος για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα όσον αφορά: τις αρχικές συνθήκες και διεγέρσεις του συστήματος π.χ. με τη μορφή

- φυσικής αναπλήρωσης
  - κατείσδυσης
  - εισαγωγής ρυπαντών
  - αλλαγών στις οριακές συνθήκες
  - παρατηρήσεων για την απόκριση του συστήματος
- με τη μορφή των χρονικών και χωρικών κατανομών των μεταβλητών κατάστασης, π.χ., περιεχόμενη υγρασία και συγκεντρώσεις διαλελυμένων ουσιών



## Η ύπαρξη τέτοιων περιόδων επιτρέπει

- ➔ την ενσωμάτωση των αρχικών συνθηκών των γνωστών διεγέρσεων του πραγματικού συστήματος
- ➔ την παραγωγή της απόκρισης του μοντέλου

## στις συνθήκες αυτές

για να παράγουμε την απόκριση του μοντέλου, πρέπει να υποθέσουμε μερικές δοκιμαστικές τιμές των επιζητούμενων συντελεστών

## Στη συνέχεια

συγκρίνονται οι παρατηρηθείσες αποκρίσεις με αυτές του μοντέλου

Οι **επιζητούμενες τιμές** των συντελεστών είναι εκείνες

οι οποίες θα ταυτίζονται και στα δύο σύνολα τιμών

δεν θα πρέπει να προσμένουμε **πλήρη ταύτιση των τιμών** των δύο συνόλων

ψάχνουμε για **την πιο καλή εναρμόνιση των τιμών** μεταξύ των δύο συνόλων,  
σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια

## **Τεχνικές για τον προσδιορισμό της καλύτερης ή βέλτιστης ταύτισης των συντελεστών**

**Το πόσο καλές είναι οι τιμές των συντελεστών εξαρτάται από τα επιλεγέντα κριτήρια για το βαθμό εναρμόνισης των μεταβλητών κατάστασης**

Τα κριτήρια εξαρτώνται από τους στόχους της προσομοίωσης

**Προσέγγιση δοκιμής- απόρριψης** (Trial-and-error approach)

**Πιο πολύπλοκες μέθοδοι βελτιστοποίησης**

Ακόμη και τώρα δεν είναι γνωστό αν το αντίστροφο πρόβλημα για τις συνθήκες αυτές θα αποφέρει μία και μοναδική λύση

Όταν οι παραπάνω συνθήκες δεν υπάρχουν τότε μπορούν να δημιουργηθούν με πειράματα:

- 🔹 στο πεδίο
- 🔹 στο εργαστήριο

όπου οι μεταβλητές κατάστασης μπορούν να παρατηρηθούν και για τις οποίες μπορεί να προσδιοριστεί μία λύση του μοντέλου (κατά προτίμηση αναλυτική)

**Ως συντελεστές για μια δεδομένη θέση** κατά την αρχική φάση των διερευνήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

**τιμές, π.χ. από άλλες παρόμοιες με την ερευνοούμενη θέσεις για την εξαγωγή των πρώτων συμπερασμάτων**

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για ένα ιδιαίτερο συντελεστή ένα πεδίο τιμών, με σκοπό να προσδιορίσουμε την ευαισθησία των προβλεφθέντων αποτελεσμάτων σε σχέση με την μεταβλητότητα του συντελεστή

**Τα συμπεράσματα από την ανάλυση ευαισθησίας θα αποτελέσουν οδηγό για την επίλυση του προβλήματος αναγνώρισης**

Πηγές των συντελεστών και των παραμέτρων του μοντέλου:

### 1. Μελέτη της βιβλιογραφίας

Τιμές που προέκυψαν από προσομοίωση παρόμοιων συνθηκών, παρόμοια εδάφη, παρόμοιες ρευστές φάσεις και παρόμοια χημικά είδη

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτοι υπολογισμοί

στη διαδικασία ρύθμισης

ή στην ανάλυση ευαισθησίας κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού πειραμάτων στο πεδίο

### 2. Πειράματα στο εργαστήριο

παρέχουν καλές πληροφορίες για παραμέτρους που δεν εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους

### 3. Πειράματα στο πεδίο

Δοκιμαστικές αντλήσεις

## **ΒΗΜΑ 8** ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για να μας δώσει τις απαιτούμενες πληροφορίες

## ΒΗΜΑ 9

Ανάλυση της αβεβαιότητας του μοντέλου και στοχαστική προσομοίωση  
σπουδαίο χαρακτηριστικό της προσομοίωσης  
συνδέεται στενά με το πρόβλημα της αναγνώρισης των παραμέτρων

αβεβαιότητα για πολλά στοιχεία που συνδέονται με το μοντέλο  
παράδειγμα

Είναι το εννοιολογικό μοντέλο αντιπροσωπευτικό των πραγματικών συνθηκών;

αβεβαιότητα από την ετερογένεια του στερεού σκελετού,  
(πορώδες, διαπερατότητα)

Είναι οι τιμές των συντελεστών σωστές;

λάθη στα δεδομένα παρατήρησης προσδίδουν αβεβαιότητα στις τιμές των μεταβλητών κατάστασης

ετερογενή μέσα ποτέ δεν έχουμε επαρκεί δεδομένα  
αβεβαιότητα για τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης

Είναι τα επιλεγμένα όρια κατάλληλα;

Είναι σωστές οι υποθετικές συνθήκες που ισχύουν στα όρια;

ανοίγει ο δρόμος για την ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων

Τα **στοχαστικά μοντέλα υπόγειων υδάτων**,

επιτρέπουν στον συντάκτη να υπολογίζει την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου, συνηθέστερα, μοντελοποιώντας την ετερογενή υδραυλική αγωγιμότητα ως μια τυχαία μεταβλητή που σχετίζεται με το χώρο

Η εννοιολογική, **lumped parameter προσομοίωση** είναι μια εναλλακτική προσέγγιση που παρακάμπτει μερικές από τις πολυπλοκότητες που ενσωματώνονται στα φυσικά μοντέλα, αλλά διατηρεί κάποιες θεμελιώδεις φυσικές αρχές από την εννοιολογική κατανόηση των συστημάτων υπογείων υδάτων.

Αυτοί οι τύποι των μοντέλων μπορούν να αξιολογηθούν και να περιοριστούν από φυσικά μετρημένα δεδομένα πεδίου, αλλά είναι αρκετά απλά ώστε να τρέχουν γρήγορα, με μικρό κόστος και χωρίς την ανάγκη για ευρεία εξειδίκευση στη μοντελοποίηση. Απαιτούν επίσης λιγότερες παραμέτρους από τα φυσικά μοντέλα, γεγονός που τα επιτρέπει να περιορίζονται σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες βαθμονόμησης

οι πληροφορίες για τους συντελεστές

εισάγονται με τη μορφή πιθανολογικών κατανομών των τιμών

η κατανομή αυτή μπορεί να παραχθεί μέσω καταλλήλων μεθόδων επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος

Πιθανολογικές τιμές των συντελεστών του μοντέλου θα δώσουν πιθανολογικές προβλεφθείσες τιμές

Η αβεβαιότητα που συνδέεται με την ετερογένεια είναι ο κανόνας

Η ετερογένεια μπορεί να συμπεριλαμβάνει πεδίο από πολλές τάξεις μεγέθους

συστηματική άγνοια της ετερογένειας  
μπορεί να οδηγήσει σε τεράστια λάθη

χρήσιμα τα δεδομένα γεωτρήσεων, γεωφυσικές πληροφορίες

Ανάγκη για στατιστική περιγραφή - στατιστικά μοντέλα



## Σαν πρώτο βήμα

είναι ανάγκη το ενδιαφέρον μας να εστιαστεί σε ένα εννοιολογικό και ντετερμινιστικό μαθηματικό μοντέλο,

χωρίς αυτό να σημαίνει ότι

παραβλέπουμε την ύπαρξη αβεβαιοτήτων ή πιστεύουμε ότι η επίδρασή τους είναι αμελητέα

## **ΒΗΜΑ 10** σύνοψη, συμπεράσματα, και έκθεση

Αυτά θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν:

 τις πληροφορίες τις οποίες προσδοκούμε να παράσχει το μοντέλο,

 πρόσθετες πληροφορίες που αναφέρονται

1. στην ακρίβεια των πληροφοριών,

2. στην αβεβαιότητα που περικλείει το μοντέλο,

υποδεικνύοντας συνέχιση της εργασίας ή άλλες δραστηριότητες

## Η έκθεση μπορεί να είναι

μέρος από μία μεγαλύτερη έκθεση, παράρτημα ή αυτοδύναμη έκθεση

τα διάφορα βήματα έχουν παρουσιαστεί με μια ορισμένη σειρά  
δεν σημαίνει ότι η πραγματική διαδικασία αναγκαστικά ακολουθεί  
χρονολογικά αυτή τη σειρά

## Σε κάποιες χρονικές στιγμές

είναι απαραίτητο να τρέξουμε το μοντέλο με σκοπό να αναγνωρίσουμε ποιες πρόσθετες πληροφορίες είναι δυνατόν να απαιτηθούν

## Πειράματα είναι δυνατόν να γίνουν για:

- 🔹 την επιβεβαίωση του μοντέλου
- 🔹 να λάβουμε τιμές των διαφόρων παραμέτρων
- 🔹 να τροφοδοτήσουμε κάποια από τα αρχικά βήματα για να τα αναβαθμίσουμε

## ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

- 🔹 μεγάλη ετερογένεια
- 🔹 έλλειψη δεδομένων για τη ρύθμιση του μοντέλου
- 🔹 αβεβαιότητα για τα όρια και τις οριακές συνθήκες
- 🔹 ανεπαρκής γνώση για τη θερμοδυναμική πολύπλοκων περιπτώσεων από πολλές πολυσύνθετες φάσεις (μη ισόθερμες συνθήκες)
- 🔹 μη επαρκής γνώση χημικών και βιολογικών μετασχηματισμών

Μπορεί ένα μοντέλο να προβλέψει μελλοντικές συνθήκες σε οποιοδήποτε επιθυμητό βαθμό, ή αποδεκτό βαθμό ακρίβειας;

Π.χ. αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων στην ακόρεστη ζώνη ενός πολύ ετερογενούς ρωγματώμενου πετρώματος

**χρόνος** - εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρόνια

**περιοχή ενδιαφέροντος** - εκτείνεται σε πολλά χιλιόμετρα

**επιβεβαιώνουμε το πρόβλημα σε συνθήκες εργαστηρίου**

στη συνέχεια το εφαρμόσουμε σε τέτοια πρακτικά **μακράς κλίμακας** προβλήματα

Τα μοντέλα **παίζουν καθοριστικό ρόλο** σε οποιαδήποτε διαδικασία σχεδιασμού

Η χρησιμότητά τους δεν βρίσκεται μόνο στην ικανότητά τους να προβλέπουν με ακρίβεια την απόκριση του συστήματος

- 💧 προσφέρουν αναβάθμιση της κατανόησής μας για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα
- 💧 μαθαίνουμε περισσότερα για τους ρόλους των διαφόρων διαδικασιών






**Η ανάλυση ευαισθησίας υποδεικνύει τις πιο σημαντικές τιμές**

## οι μεθόδοι στοχαστικής ανάλυσης

παράγουν πιθανολογική κατανομή αποτελεσμάτων και

- μπορούν να οδηγήσουν στη συλλογή πρόσθετων δεδομένων
- Σχεδιασμό των δικτύων παρατήρησης ή ελέγχου
- Σχεδιασμό των πειραμάτων
- να μας οδηγήσουν στη λήψη αποφάσεων που στηρίζονται στη σωστή ενημέρωση

## Μάθαμε τι είναι ένα μοντέλο

-  Το ρόλο των μοντέλων στο σχεδιασμό και στη διαδικασία λήψης απόφασης
-  Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για την ανάπτυξη και τη χρησιμοποίηση των μοντέλων
-  Το βασικό περιεχόμενο του μοντέλου ροής και μεταφοράς ρυπαντών σε ένα συνεχές πορώδες μέσο
-  Τη βασική δομή της έκθεσης για την προσομοίωση
-  Συζητήσαμε για τις αβεβαιότητες του μοντέλου

# Εξισώσεις Κίνησης των Υπόγειων Υδάτων

Η τρισδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών σταθερής πυκνότητας δια μέσου του πορώδους γεωλογικού υλικού μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

για **ελεύθερους υδροφόρους** και

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

για **αρτεσιανούς υδροφόρους** όπου:

- $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  και  $K_{zz}$  είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των  $x, y$  και  $z$  αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $Lt^{-1}$ ).
- $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  και  $T_{zz}$  είναι οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των  $x, y$  και  $z$  αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $L^2t^{-1}$ ).
- $h$  είναι το υδραυλικό φορτίο ( $L$ ).
- $W$  είναι η ογκομετρική ροή (flux) ανά μονάδα χρόνου και αναπαριστά εισροές και/ή εκροές του νερού ( $t^{-1}$ ).
- $S_y$  είναι η ειδική απόδοση του πορώδους υλικού
- $t$  είναι ο χρόνος ( $t$ ).

# Υπορουτίνες (modules) του MODFLOW

Το MODFLOW περιλαμβάνει το κυρίως πρόγραμμα και μια σειρά από εντελώς ανεξάρτητες υπορουτίνες, τα "modules"

Τα modules έχουν ομαδοποιηθεί με τη μορφή «πακέτων» και κάθε πακέτο είναι μια ομάδα από modules που έχουν σχέση με μια απλή φάση της προσομοίωσης

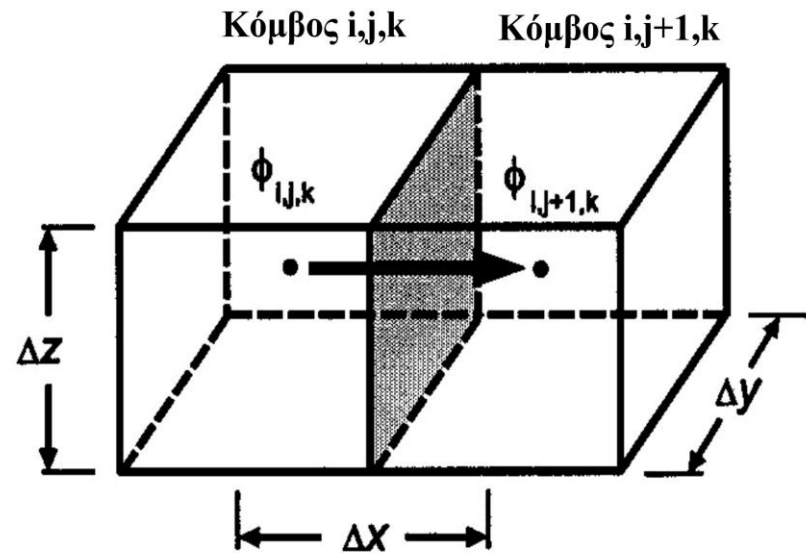
# «Πακέτα» του MODFLOW

## Basic Package (BAS):

- Πρόκειται για το πακέτο που διαπραγματεύεται ένα αριθμό διαχειριστικών εργασιών του μοντέλου. Αυτό «διαβάζει» πληροφορίες για τον αριθμό των σειρών, στηλών, στρωμάτων και περιόδων φόρτισης του μοντέλου καθώς και πληροφορίες για τα πακέτα (κύριες επιλογές) που θα χρησιμοποιηθούν και για τη θέση των εισαγόμενων πληροφοριών που σχετίζονται με τα πακέτα αυτά.

## Block-Centered Flow Package (BCF):

- Το πακέτο αυτό υπολογίζει τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας.
- Επίσης υπολογίζει τους όρους οι οποίοι καθορίζουν το ρυθμό ροής του νερού προς και από την αποθήκευση.
- Για να γίνουν οι διάφοροι υπολογισμοί, είναι απαραίτητη προϋπόθεση ο κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο της αντίστοιχης κυψελίδας του μοντέλου





# «Πακέτα» του MODFLOW

- **Recharge Package:** Το πακέτο αυτό όπως αναφέρθηκε, σχεδιάστηκε για να προσομοιώσει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα
- **Well Package:** Η προσομοίωση των χαρακτηριστικών των γεωτρήσεων απόληξης νερού από ένα υδροφορέα (ή και το αντίθετο), σε ένα προκαθορισμένο ρυθμό άντλησης (ή εμπλουτισμού) και σε μια δεδομένη χρονική περίοδο είναι ο στόχος του πακέτου αυτού.
- **Solver Package:** Το πακέτο αυτό συνιστά τη μέθοδο επίλυσης του μοντέλου. Ο WHS Solver αποτελεί μια μέθοδο επίλυσης ενός εκτενούς συστήματος γραμμικών εξισώσεων μέσω επαναληπτικών διαδικασιών (iterations). Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της στάθμης για κάθε κόμβο.
- **General Head:** Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται για την προσομοίωση διαφόρων τύπων υπόγειας υδραυλικής επικοινωνίας.
- **Output Control:** Αποτελεί μια κυρίαρχη δυνατότητα επιλογής του Basic Package η οποία καθορίζει τη μορφή εξόδου των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.