

# Εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα

*Α. Ευστρατιάδης & Ν. Μαμάσης*





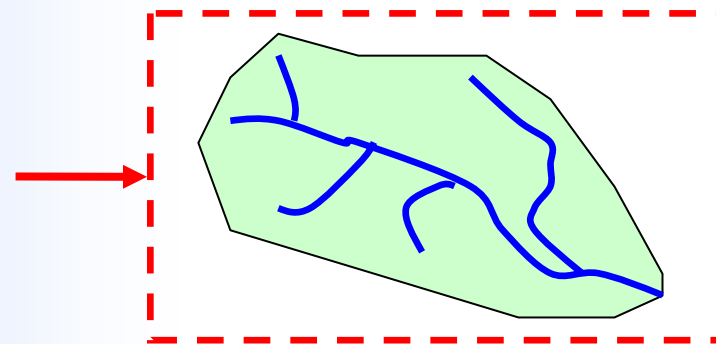
# Δομή παρουσίασης

- Ορισμοί και παραδείγματα
- Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων
- Πεδία εφαρμογής
- Εκτίμηση παραμέτρων
- Η διαδικασία αυτόματης βαθμονόμησης
- Προγνωστική ικανότητα και αβεβαιότητα
- Τα υδρολογικά μοντέλα του Υδροσκοπίου

# Ορισμός υδρολογικών μοντέλων

- Μαθηματικοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, κτλ.) και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, με σκοπό την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών, σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα.

«Φορτίσεις»,  $\mathbf{x}$ :  
βροχή, δυνητική  
εξατμοδιαπνοή,  
απολήψεις κλπ.



«Αποκρίσεις»,  $\mathbf{y}$ :  
Επιφανειακή και  
υπόγεια απορροή,  
εξατμοδιαπνοή,  
διαφυγές κλπ.

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

→ Ιδιότητες (μετρήσεις πεδίου) και παράμετροι

→ Αρχικές και οριακές συνθήκες



# Παράδειγμα 1: Η ορθολογική μέθοδος

- Η παροχή αιχμής  $Q$  (σε  $m^3/s$ ) μιας πλημμύρας (**απόκριση**) εκτιμάται από τη σχέση:

$$Q = 0.278 c i A$$

όπου  $i$  (σε  $mm/h$ ) η ένταση της βροχής διάρκειας ίσης με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής (**φόρτιση**),  $A$  (σε  $km^2$ ) η έκταση της λεκάνης (**ιδιότητα**) και  $c$  αδιάστατος συντελεστής απορροής (**παράμετρος**).

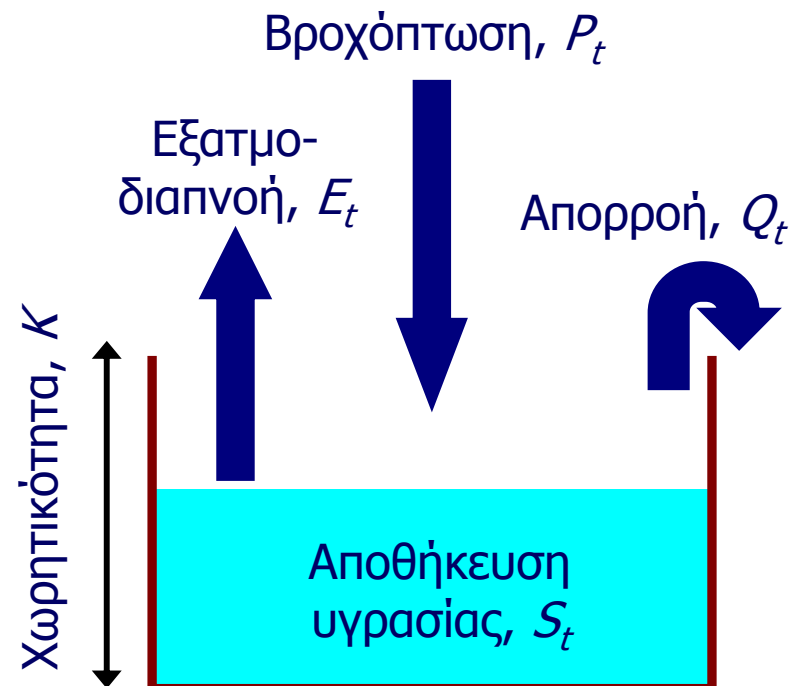
- Στην ορθολογική μέθοδο εκτιμάται η στιγμιαία τιμή της μεταβλητής που ενδιαφέρει στη μελέτη, ενώ παραλείπεται η περιγραφή της διαχρονικής εξέλιξης της ίδιας μεταβλητής και των λοιπών διεργασιών στη διάρκεια της πλημμύρας (**μοντέλο γεγονότος**).

## Παράδειγμα 2: Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite

- Η **συνεχής** (μήνα προς μήνα) υδρολογική λειτουργία μιας λεκάνης περιγράφεται από το **υδραυλικό ανάλογο** μιας δεξαμενής, που αναπαριστά τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, ήτοι:

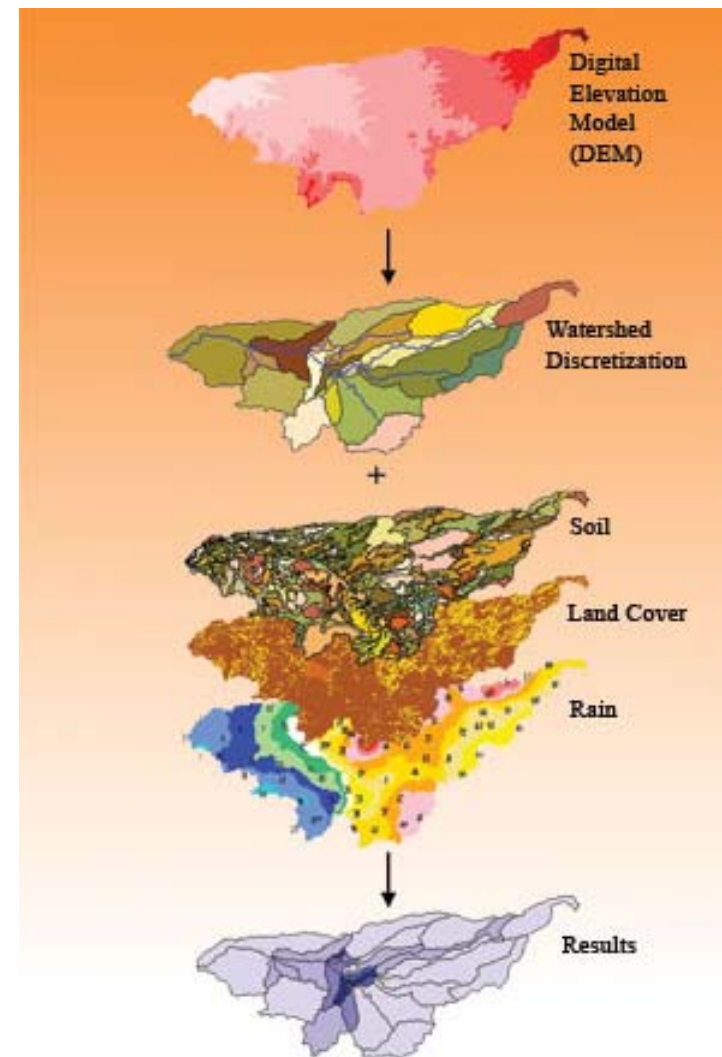
$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t$$

- Το μοντέλο περιλαμβάνει μία παράμετρο, τη χωρητικότητα της δεξαμενής  $K$ . Αν το τρέχον απόθεμα της δεξαμενής (= διαθέσιμη υγρασία εδάφους) υπερβεί το παραπάνω όριο, τότε η δεξαμενή υπερχειλίζει, δηλαδή παράγεται απορροή.



# Παράδειγμα 3: Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

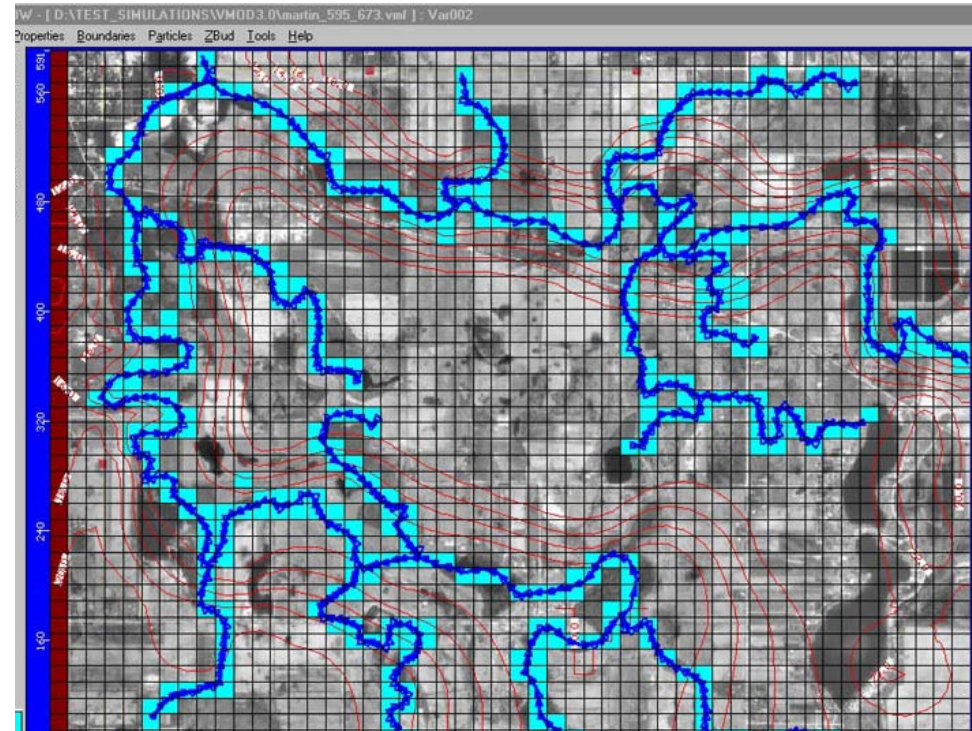
- Αναπαριστά πολλαπλές διεργασίες (υδρολογικές, υδροδυναμικές, υδροχημικές), σε κλίμακα υπολεκάνης.
- Απαιτεί πληθώρα χρονοσειρών εισόδου, καθώς και ιδιοτήτων και παραμέτρων, που εισάγονται στις φυσικές εξισώσεις των διεργασιών.
- Συνεργάζεται με Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας για την παραγωγή των χωρικών δεδομένων.



**Πηγή:** <http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa/images/map-layers.jpg>

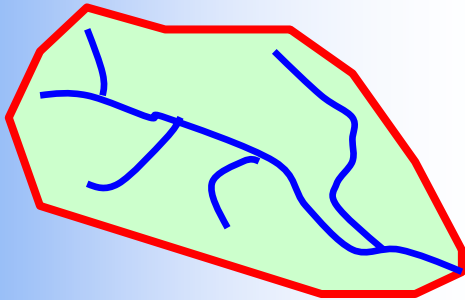
# Παράδειγμα 4: MODFLOW

- Αναπαριστά τις διεργασίες της κορεσμένης ζώνης (υδροφορέας), επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις της υπόγειας ροής σε ορθογωνικό κάρναβο λεπτής διακριτότητας.
- Οι φορτίσεις (κατείσδυση, αντλήσεις) δίνονται «εξωτερικά», ήτοι από τον χρήστη ή άλλο μοντέλο.
- Για την ορθή προσαρμογή του μοντέλου απαιτείται καλή γνώση της γεωμετρίας του υδροφορέα, της πιεζομετρίας και των υδρολογικών αποκρίσεων (εκφορτίσεις πηγών).

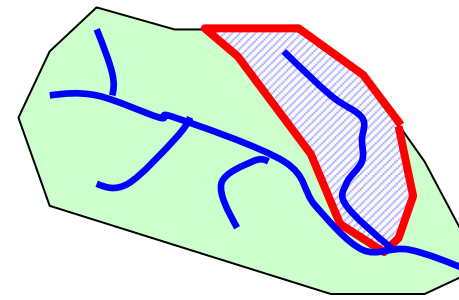


Πηγή: [http://www.rockware.com/assets/products/185/overview/lobby/vm\\_overview2b.jpg](http://www.rockware.com/assets/products/185/overview/lobby/vm_overview2b.jpg)

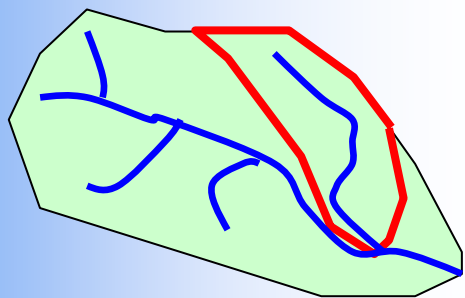
# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων: (α) Με βάση την χωρική κλίμακα



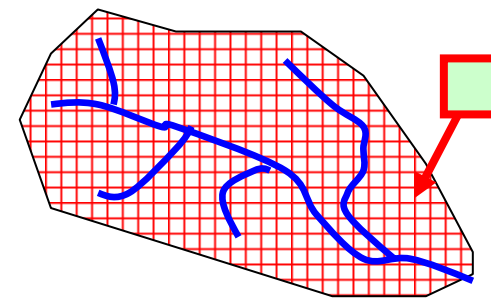
**Αδιαμέριστα** (lumped): Κοινές φορτίσεις και κοινές παράμετροι για όλη τη λεκάνη απορροής



**Ημι-κατανεμημένα** (semi-distributed): Διαφορετικές φορτίσεις και παράμετροι ανά χωρική ενότητα



**Ημι-αδιαμέριστα** (semi-lumped): Διαφορετικές φορτίσεις αλλά κοινές παράμετροι ανά χωρική ενότητα



**Πλήρως κατανεμημένα** (distributed): Κατάτμηση σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες και χρήση φυσικών εξισώσεων





# Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων: (β) Με βάση τη μαθηματική δομή

	<b>Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>Φυσική συνέπεια</b>
<b>Μοντέλα φυσικής βάσης</b>	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή (απειροστή;) χωρική κλίμακα
<b>Εννοιολογικά μοντέλα</b>	Παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης
<b>Στατιστικά-στοχαστικά μοντέλα</b>	Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
<b>Μοντέλα «μαύρου κουτιού»</b>	Διαδοχικοί μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος	Απολύτως καμία



# Υδρολογικά μοντέλα: Πεδία εφαρμογής

- Εκτίμηση επιφανειακού και υπόγειου **υδατικού δυναμικού**, σε διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος (μελέτες σχεδιασμού και διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων)
- Εκτίμηση **πλημμυρικών μεγεθών** (υδρογραφήματα, παροχές αιχμής), σε διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος (μελέτες σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων)
- Εκτίμηση **επιπτώσεων** λόγω αλλαγών στις πρακτικές διαχείρισης των υδατικών πότων, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (αστικοποίηση, αποψίλωση, διευθετήσεις ποταμών) και τις χρήσεις γης.
- **Πρόγνωση** υδρολογικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο (επιχειρησιακή διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων, διαχείριση πλημμυρικής διακινδύνευσης)

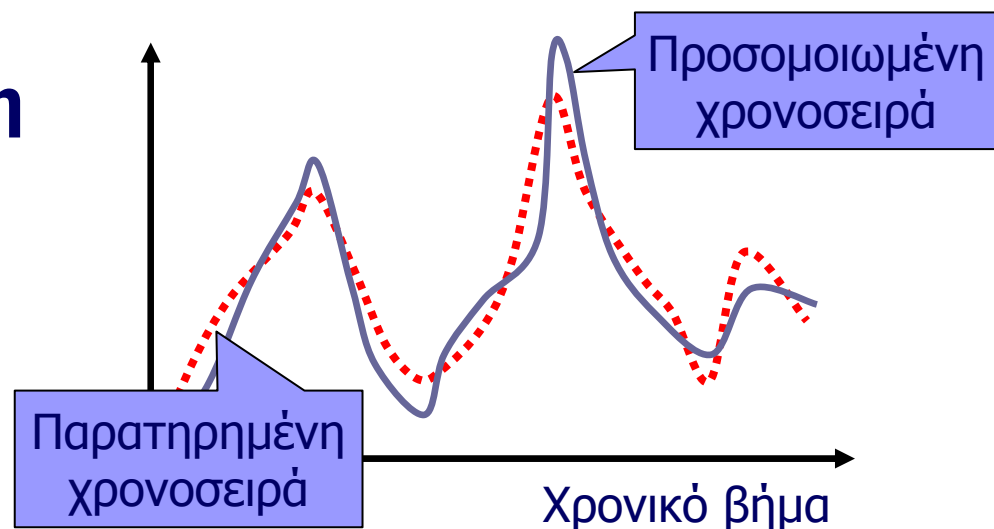


# Εκτίμηση παραμέτρων εννοιολογικών μοντέλων: Τοποθέτηση του προβλήματος

- Η μαθηματική δομή των εννοιολογικών μοντέλων δεν είναι μονοσήμαντη – περιγράφεται από **παραμετρικές σχέσεις**.
- Οι παράμετροι δεν αντιπροσωπεύουν μετρήσιμα μεγέθη, αλλά **μέσα χαρακτηριστικά** του φυσικού συστήματος στην αντίστοιχη χωρική κλίμακα αναφοράς.
- Εφόσον διατίθενται συστηματικές μετρήσεις της απόκρισης της λεκάνης (π.χ. απορροή), είναι δυνατή η **επαγωγική εκτίμηση** των παραμέτρων, με έλεγχο της **προσαρμογής** των προσομοιωμένων στα παρατηρημένα δεδομένα.
- Η διαδικασία είναι γνωστή ως **βαθμονόμηση** (calibration), η οποία μπορεί να υλοποιηθεί είτε **εμπειρικά** (δοκιμάζοντας «με το χέρι» διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων), είτε **αυτόματα** (μέσω βελτιστοποίησης) είτε με συνδυασμό των παραπάνω (υβριδική βαθμονόμηση).

# Η τυπική διαδικασία αυτόματης βαθμονόμησης

- Ορίζεται το **πεδίο ορισμού** των τιμών των παραμέτρων.
- Επιλέγεται ένα δείγμα παρατηρήσεων, που πρέπει να είναι **αντιπροσωπευτικό** της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης.
- Διαμορφώνεται ένα **μέτρο προσαρμογής** μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων χρονοσειρών.
- Διατυπώνεται το πρόβλημα **βελτιστοποίησης** του μέτρου προσαρμογής ως προς τις παραμέτρους, το οποίο επιλύεται μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αναζήτησης (**μη γραμμικός αλγόριθμος**).
- Ελέγχεται η προσαρμογή του μοντέλου σε μια μεταγενέστερη περίοδο (**επαλήθευση**).





# Συνιστώσες αβεβαιότητας στην εκτίμηση των παραμέτρων

- **Ακατάλληλη δομή μοντέλου:** Υπερβολικά αδρή αναπαράσταση έως απόκρυψη διεργασιών (υπο-παραμετροποίηση) ή χρήση περισσότερων παραμέτρων από όσες μπορούν να υποστηρίξουν η διαθέσιμη γνώση και οι μετρήσεις (υπερ-παραμετροποίηση).
- **Μη αντιπροσωπευτικότητα δεδομένων:** Χρήση δειγμάτων απόκρισης που δεν καλύπτουν επαρκώς το φάσμα των υδρολογικών καταστάσεων της λεκάνης, μέσω και ακραίων.
- **Σφάλματα δεδομένων:** Οι μετρήσεις και οι επεξεργασίες από τις οποίες προκύπτουν οι χρονοσειρές του μοντέλου (φορτίσεις και αποκρίσεις) υπόκεινται σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα.
- **Αρχικές και οριακές συνθήκες:** Οι συνθήκες εκκίνησης της προσομοίωσης είναι μη μετρήσιμες, ενώ η γεωμετρία του συστήματος είναι συχνά άγνωστη (π.χ. όρια υδροφορέων).
- **Αδυναμίες αλγορίθμων:** Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι έντονα μη γραμμικό, ενώ η πολυπλοκότητά του αυξάνει εκθετικά με το πλήθος των παραμέτρων.
- **Υπόθεση σταθερών παραμέτρων:** Οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται, λόγω αλλαγών στις συνθήκες τις λεκάνης.



# Η έννοια της προγνωστικής ικανότητας

- Η σύγχρονη οπτική στη βαθμονόμηση μοντέλων:
  - απορρίπτει τη λογική μιας πλήρους αυτοματοποιημένης διαδικασίας
  - αποδέχεται την ύπαρξη πολλών αποδεκτών λύσεων, λόγω εγγενών αβεβαιοτήτων σε όλα τα στάδια διαμόρφωσης του μοντέλου
- Η προγνωστική ικανότητα ενός μοντέλου εξασφαλίζεται αν:
  - η σχηματοποίηση και παραμετροποίηση του μοντέλου αντικατοπτρίζει τη διαθέσιμη γνώση για την υπό μελέτη λεκάνη
  - αξιοποιείται κάθε τύπου πληροφορία σε συνδυασμό με την υδρολογική εμπειρία, στην κατεύθυνση της παραγωγής ρεαλιστικών αποτελεσμάτων για κάθε πτυχή του.
- Η άκριτη χρήση όλο και πιο σύνθετων μοντέλων αυξάνει την αβεβαιότητα καθώς έρχεται σε αντίφαση:
  - με την απαίτηση διατύπωσης σχημάτων φειδωλών σε παραμέτρους
  - με την υποβάθμιση των μετρητικών υποδομών.



# Τα υδρολογικά μοντέλα του Υδροσκοπίου

	<b>ΖΥΓΟΣ</b>	<b>ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ</b>	<b>SWAT</b>
Χωρική κλίμακα	Αδιαμέριστη	Ημι-κατανεμημένη	Κατανεμημένη
Χρονικό βήμα	Μηνιαίο	Μηνιαίο, ημερήσιο	Μηνιαίο, ημερήσιο
Συνιστώσες μοντέλου	Λεκάνη απορροής	Υδρογραφικό δίκτυο, υδροφορέας, υδραυλικά έργα, χρήσεις νερού	Υδρογραφικό δίκτυο, υδραυλικά έργα, πηγές ρύπανσης, γεωργικές πρακτικές
Δεδομένα εισόδου	Υδρολογικά	Γεωγραφικά, υδρολογικά, υδραυλικά, διαχειριστικά	Γεωγραφικά, υδρολογικά, υδραυλικά, ποιοτικά
Κύρια δεδομένα εξόδου	Απορροή εξόδου	Παροχές υδατορευμάτων και πηγών, στάθμες υδροφορέα, απολήψεις	Παροχές υδατορευμάτων, συγκεντρώσεις ρύπων, στερεοαπορροή
Βαθμονόμηση	Αυτοματοποιημένη	Αυτοματοποιημένη, με πολλαπλά κριτήρια	Αυτοματοποιημένη
Χρήση ΣΓΠ	Όχι	Ναι	Ναι