

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΥΛΑΙΟΣ

ΜΑΘΗΜΑ 1^ο

Δομή Μαθήματος

1. Ισοζύγιο Μάζας στα Υδατικά Συστήματα
2. Ισοζύγιο Οξυγόνου στα Υδατικά Συστήματα
3. Βιολογικές Διεργασίες στα Υδατικά Συστήματα
4. Παράκτια Υδατικά Συστήματα και ο Ρόλος του ΜΠ
5. Ταξινόμηση Παράκτιων Υδατικών Συστημάτων
6. Δείκτες Τροφικής Κατάστασης
7. Κύκλοι Θρεπτικών Αλάτων
8. Χρόνος Παραμονής Νερού – Μαθηματικό Ομοίωμα LOICZ
9. Βαρέα Μέταλλα στα Παράκτια Υδατικά Συστήματα
10. Παράκτια Βιογεωχημικά Ομοιώματα
11. Θερμική Ρύπανση
12. Ρύπανση πετρελαιοειδών

Εργαστήρια

- Πως βρίσκω δεδομένα παροχής και ποιότητας νερού επιφανειακών υδατικών πόρων
- Πως αναλύω τα δεδομένα παροχής και ποιότητας νερού
- Πως βρίσκω δεδομένα θερμοκρασίας, αλατότητας, ρευμάτων, κυμάτων, ποιότητας νερού παράκτιων υδατικών συστημάτων
- Πως βρίσκω δεδομένα τηλεπισκόπησης για την ανάλυση ποιότητας νερού
- Πως αναλύω την κίνηση μιας πετρελαιοκηλίδας

Μαθησιακοί Στόχοι

- Κατανόηση βιογεωχημικών διεργασιών στα Υδατικά Συστήματα
- Κατάστρωση ισοζυγιακών εξισώσεων περιβαλλοντικών συστημάτων
- Κατάστρωση και επίλυση απλών μαθηματικών ομοιωμάτων μηδενικής διάστασης
- Χρήση γλώσσας προγραμματισμού R στην επίλυση μαθηματικών ομοιωμάτων
- Παραγωγή διαγραμμάτων, συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Ποιες είναι οι Κύριες Παράμετροι για να εκφράσουμε την Ποιότητα του Νερού;

Table 2.1 The most significant quality indicators

-
- 1 – Temperature
 - 2 – pH
 - 3 – Dissolved oxygen (DO)
 - 4 – Turbidity
 - 5 – Conductivity
 - 6 – Total organic carbon (TOC)
 - 7 – Bacteria
 - 8 – Viruses
 - 9 – Chemical oxygen demand (COD)
 - 10 – Biochemical oxygen demand (BOD)
 - 11 – Metals and non-metals (Cr, Cd, Ni, As, Hg, Na, Br. . .)
 - 12 – Phosphates
 - 13 – Nitrogen compounds
 - 14 – Organic compounds
 - 15 – Suspended solids
 - 16 – Salts (total dissolved salts)
-

Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

- Παρακολουθεί και αξιολογεί την ποσότητα και ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων νερών.
- Κάθε ΚΜ διαχωρίζει την επιφάνειά του σε Υδατικά Διαμερίσματα τα οποία δεν ταυτίζονται με διοικητικά όρια – Η Ελλάδα διακρίνεται σε 14 ΥΔ.
- Κάθε ΥΔ διακρίνεται σε Λεκάνες Απορροής και κάθε ΛΑΠ σε Υδατικά Σώματα επί των οποίων λαμβάνει χώρα η παρακολούθηση και αξιολόγηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών τους.
- Εισάγεται η λογική της **κλιμακωτής** διαβάθμισης (από εξαίρετη ποιότητα έως κακή ποιότητα) με βάση βιολογικούς δείκτες, αντί της ισχύουσας διάκρισης επιτρεπτό / μη επιτρεπτό, βάσει οριακών τιμών χημικών παραμέτρων.

Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Κάθε Υδατικό Σώμα χαρακτηρίζεται και κατηγοριοποιείται σε:

A) Ποτάμια Υδάτινα Σώματα

B) Λιμναία Υδάτινα Σώματα

Γ) Μεταβατικά Υδάτινα Σώματα

Δ) Παράκτια Υδάτινα Σώματα

E) Υπόγεια Υδάτινα Σώματα

Στη συνέχεια τα υδάτινα σώματα διαχωρίζονται περαιτέρω με βάση το διαφορετικό καθεστώς προστασίας (π.χ. αν εμπíπτουν σε προστατευόμενη περιοχή) ή τις ιδιαίτερες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που τα επηρεάζουν (πιέσεις).

Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Η αξιολόγηση της κατάστασης ενός επιφανειακού υδατικού σώματος βασίζεται σε τέσσερις κατηγορίες μετρούμενων παραμέτρων:

- A) Βιολογικές,
- B) Φυσικοχημικές,
- Γ) Χημικές,
- Δ) Υδρομορφολογικές
- E) Ουσίες Προτεραιότητας

Οι παράμετροι των A, B, Γ και Δ ομαδοποιούνται κατά την αξιολόγηση και περιγράφουν την οικολογική κατάσταση των Υδατικών Σωμάτων.



Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Τα υδάτινα σώματα (water bodies) παρακολουθούνται συστηματικά (τουλάχιστον μία δειγματοληψία ανά δίμηνο) με στόχο να ταξινομηθούν με βάση το σύστημα ταξινόμησης της ΟΠΝ. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει το προσδιορισμό:

A) της Οικολογικής Κατάστασης

* Υδατική Χημεία

- Γενικά Φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά

α) επίπεδα διαλ. Οξυγόνου

β) Θρεπτικά άλατα (νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, φωσφορικά, θειικά)

γ) Ανόργανα συστατικά

- Ειδικοί Ρύποι (όπως βαρέα μέταλλα)

* Έμβιο περιβάλλον (φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, φυτική βλάστηση πυθμένα (μακρόφυτα), βενθικά ασπόνδυλα, και ψάρια

* Υδρομορφολογικό Περιβάλλον

B) της Χημικής Κατάστασης

- Ουσίες Προτεραιότητας

ΠΟΤΑΜΟΙ	ΛΙΜΝΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΑΤΑ
ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Σύνθεση και αφθονία υδρόβιας χλωρίδας ²	Σύνθεση, αφθονία και βιομάζα φυτοπλαγκτόν	Σύνθεση, αφθονία και βιομάζα φυτοπλαγκτόν	Σύνθεση, αφθονία και βιομάζα φυτοπλαγκτόν
Σύνθεση και αφθονία βενθικής πανίδας ασπόνδυλων	Σύνθεση και αφθονία άλλης υδρόβιας χλωρίδας ³	Σύνθεση και αφθονία άλλης υδρόβιας χλωρίδας ⁴	Σύνθεση και αφθονία άλλης υδρόβιας χλωρίδας ⁵
Σύνθεση, αφθονία και δομή ηλικίας της ιχθυοπανίδας	Σύνθεση και αφθονία βενθικής πανίδας ασπόνδυλων Σύνθεση, αφθονία και δομή ηλικίας της ιχθυοπανίδας	Σύνθεση και αφθονία βενθικής πανίδας ασπόνδυλων Σύνθεση, αφθονία και δομή ηλικίας της ιχθυοπανίδας	Σύνθεση και αφθονία βενθικής πανίδας ασπόνδυλων Σύνθεση, αφθονία και δομή ηλικίας της ιχθυοπανίδας
ΥΔΡΟΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Υδρολογικό καθεστώς	Υδρολογικό καθεστώς	Παλιρροιακό καθεστώς	Παλιρροιακό καθεστώς
ποσότητα και δυναμική ροής του νερού	ποσότητα και δυναμική ροής του νερού	ροή γλυκού νερού	κατεύθυνση και κυρίαρχα ρεύματα
σύνδεση με τα ΥΥΣ	χρόνος παραμονής σύνδεση με τα ΥΥΣ	έκθεση στα κύματα	έκθεση στα κύματα
Συνέχεια ποταμών			
Μορφολογικές συνθήκες	Μορφολογικές συνθήκες	Μορφολογικές συνθήκες	Μορφολογικές συνθήκες
μεταβλητότητα βάθους και πλάτους ποταμού	μεταβλητότητα βάθους	μεταβλητότητα βάθους	μεταβλητότητα βάθους
δομή και υπόστρωμα κοίτης	ποσότητα, δομή και υπόστρωμα κοίτης	ποσότητα, δομή και υπόστρωμα κοίτης	δομή και υπόστρωμα παράκτιας κοίτης
δομή παράχθιας ζώνης	δομή όχθης της λίμνης	δομή διαπαλιρροιακής ζώνης	δομή διαπαλιρροιακής ζώνης
ΧΗΜΙΚΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Γενικά	Γενικά	Γενικά	Γενικά
Θερμικές συνθήκες Συνθήκες οξυγόνωσης Αλατότητα Κατάσταση οξίνισης Συνθήκες θρεπτικών ουσιών	Διαφάνεια Θερμικές συνθήκες Συνθήκες οξυγόνωσης Αλατότητα Κατάσταση οξίνισης	Διαφάνεια Θερμικές συνθήκες Συνθήκες οξυγόνωσης Αλατότητα Συνθήκες θρεπτικών ουσιών	Διαφάνεια Θερμικές συνθήκες Συνθήκες οξυγόνωσης Αλατότητα Συνθήκες θρεπτικών ουσιών

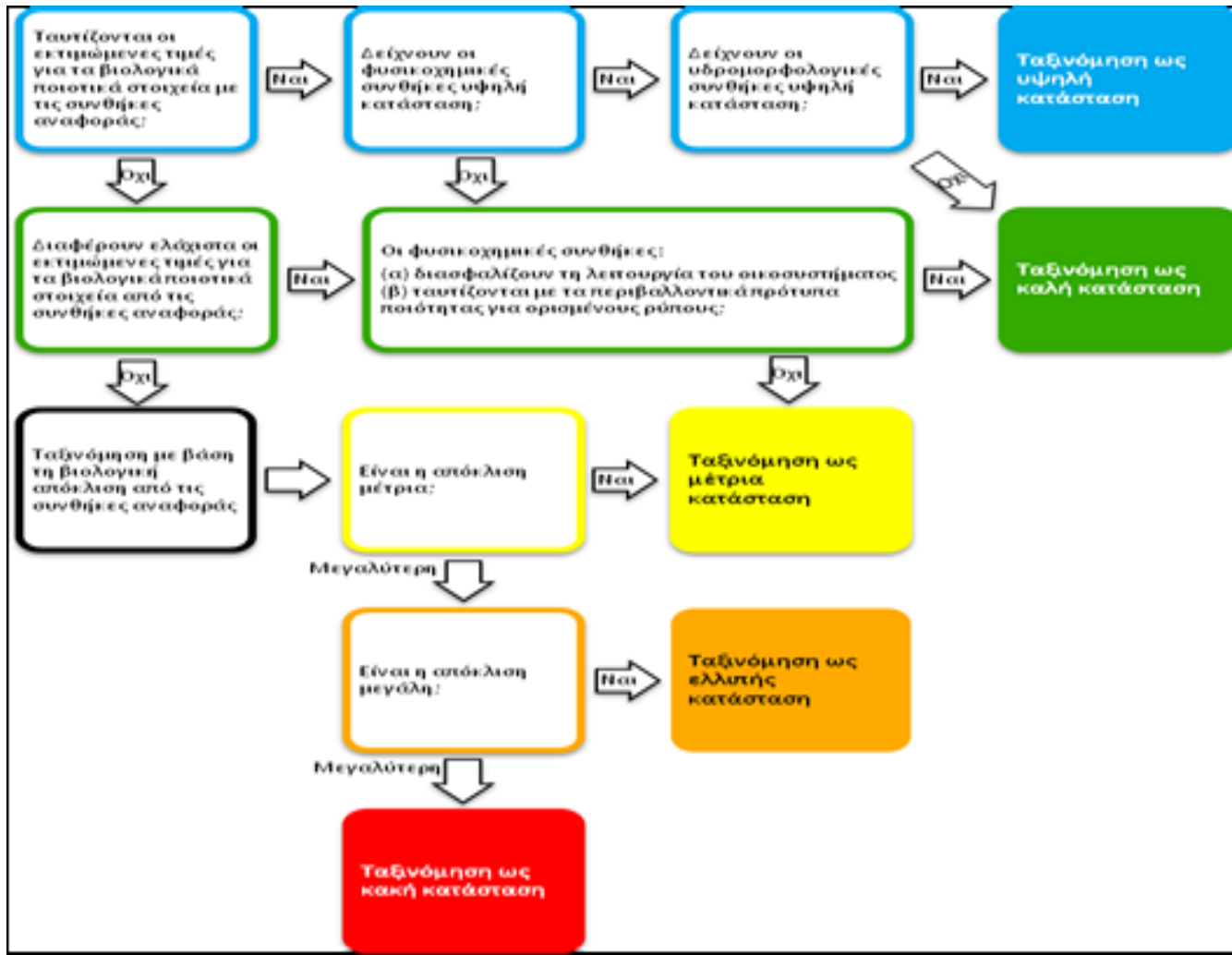
Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης και αντίστοιχος χρωματικός κώδικας, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ

Κατάταξη οικολογικής ποιότητας	Χρωματισμός
Υψηλή	Μαύρο
Καλή	Πράσινο
Μέτρια	Κίτρινο
Ελλιπής	Κόκκινο
Κακή	Μαύρο

Υψηλή Κατάσταση (High): Έλλειψη, ή ήσσονος σημασίας ανθρωπογενείς μεταβολές των τιμών των φυσικοχημικών και των υδρο-μορφολογικών στοιχείων. Οι τιμές των βιολογικών στοιχείων αντικατοπτρίζουν εκείνες των συνθηκών αναφοράς.

- Καλή Κατάσταση (Good): Οι τιμές των βιολογικών στοιχείων εμφανίζουν χαμηλού επιπέδου αλλοιώσεις, λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, αλλά διαφοροποιούνται σε μικρό βαθμό από τις τιμές που χαρακτηρίζουν το σύστημα επιφανειακών υδάτων υπό μη διαταραγμένες συνθήκες.
- Μέτρια Κατάσταση (Moderate): Οι τιμές των βιολογικών στοιχείων παραλλάσσουν μετρίως τις τιμές που χαρακτηρίζουν φυσιολογικά το σύστημα επιφανειακών υδάτων υπό μη διαταραγμένες συνθήκες.
- Ελλιπής Κατάσταση (Poor): Τα ύδατα εμφανίζουν ενδείξεις σημαντικών αλλοιώσεων των τιμών των βιολογικών στοιχείων του τυπικού συστήματος επιφανειακών υδάτων. Οι βιολογικές κοινότητες διαφέρουν ουσιαστικά από εκείνες που χαρακτηρίζουν το σύστημα επιφανειακών υδάτων σε μη διαταραγμένες συνθήκες.
- Κακή Κατάσταση (Bad): Τα ύδατα τα οποία εμφανίζουν ενδείξεις σοβαρών αλλοιώσεων των τιμών των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων του τυπικού συστήματος επιφανειακών υδάτων. Απουσιάζει μεγάλο μέρος των βιολογικών κοινοτήτων που χαρακτηρίζουν φυσιολογικά το σύστημα επιφανειακών υδάτων σε μη διαταραγμένες συνθήκες.



Λογικό διάγραμμα αξιολόγησης οικολογικής κατάστασης φυσικού υδατικού συστήματος.

ΠΡΟΣΟΧΗ

Η ταξινόμηση σε καλή, μέτρια, ελλιπή ή κακή κατάσταση προϋποθέτει την εξέταση **μόνο βιολογικών παραμέτρων** ή και **φυσικοχημικών για την ταξινόμηση σε καλή κατάσταση**. Όταν οι βιολογικές συνθήκες είναι σύμφωνες με εκείνες που απαιτούνται για την ταξινόμηση σε καλή, μέτρια, ελλιπή ή κακή κατάσταση αντίστοιχα, τότε οι εξ ορισμού ικανοποιούνται οι υδρομορφολογικές συνθήκες και δεν επηρεάζουν την ταξινόμηση.

Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Τα αποτελέσματα για την ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης κάθε σταθμού επιφανειακών υδάτων, πρέπει να εκφράζονται ως λόγοι της οικολογικής ποιότητας (Ecological Quality Ratio, EQR), όπου οι βιολογικές παράμετροι αποτελούν απόκλιση από τις συνθήκες αναφοράς και οι φυσικοχημικές-υδρομορφολογικές παράμετροι είναι τέτοιες που να στηρίζουν τα αποτελέσματα των βιολογικών ποιοτικών στοιχείων (Οδηγία 2000/60/ΕΚ, Παράρτημα V).

Ο λόγος εκφράζεται ως η αριθμητική τιμή μεταξύ του μηδενός και του ενός, όπου η υψηλή οικολογική κατάσταση δηλώνεται με την τιμή ένα (1) και η κακή οικολογική κατάσταση αντιπροσωπεύεται από το μηδέν (0).



Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Β. Χημική κατάσταση

Η ταξινόμηση σε κλάσεις ποιότητας της χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδατικών συστημάτων πραγματοποιείται μετά από έλεγχο της τήρησης των οριακών τιμών ποιότητας ορισμένων επικίνδυνων ουσιών που καταλήγουν στο υδάτινο περιβάλλον.

Στην ΚΥΑ Η.Π. 51354/2641/Ε103/2010 (ΦΕΚ Β' 1909) καθορίζονται Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) για 101 χημικές ενώσεις ή ομάδες χημικών ενώσεων, εκ των οποίων 41 αφορούν σε ουσίες προτεραιότητας και άλλους ρύπους, που έχουν θεσπιστεί σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (Οδηγία 105/2008/ΕΕ) και 60 αφορούν σε ειδικούς ρύπους, οι οποίοι είτε έχουν ανιχνευθεί στα υδατικά συστήματα της χώρας, είτε αναφέρονταν σε παλαιότερες νομοθετικές ρυθμίσεις.

Τα ΠΠΠ αφορούν είτε στην Ετήσια Μέση Συγκέντρωση (ΕΜΣ) είτε στη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Συγκέντρωση (ΜΕΣ).



Για κάθε επιφανειακό υδατικό σύστημα, ο χαρακτηρισμός της καλής χημικής κατάστασης εξαρτάται από τις ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις, οι οποίες δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις τιμές των θεσμοθετημένων ορίων.

Η υπέρβαση τιμής σε οποιοδήποτε θέση ενός συστήματος, συνεπάγεται το χαρακτηρισμό του ως Κατώτερης της Καλής.

Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Κατηγορίες αξιολόγησης της χημικής κατάστασης επιφανειακών υδατικών συστημάτων

Κατάταξη χημικής κατάστασης

	Καλή
	Κατώτερη της Καλής

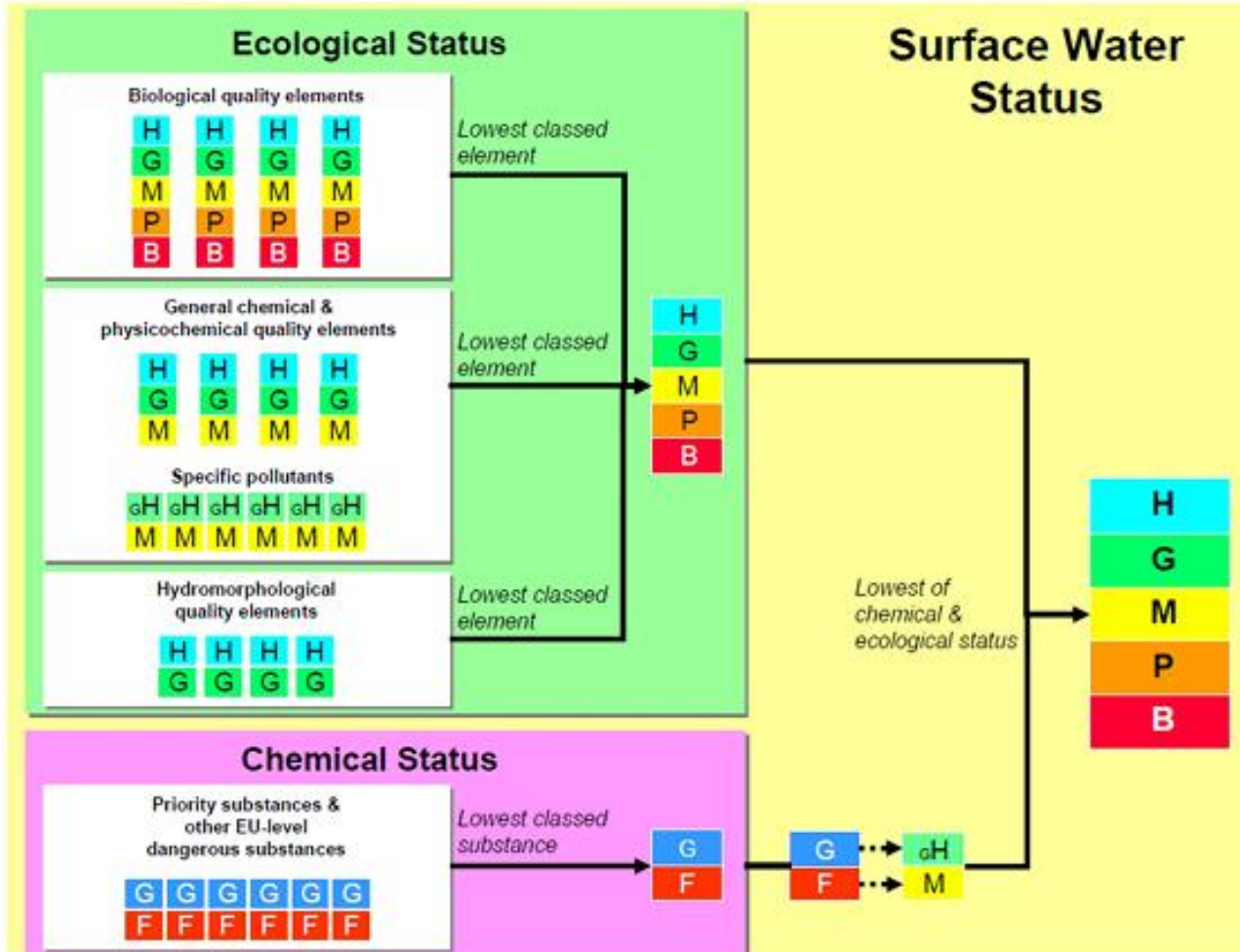
Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60 ΕΕ)

Γ. Συνολική αξιολόγηση και ταξινόμηση

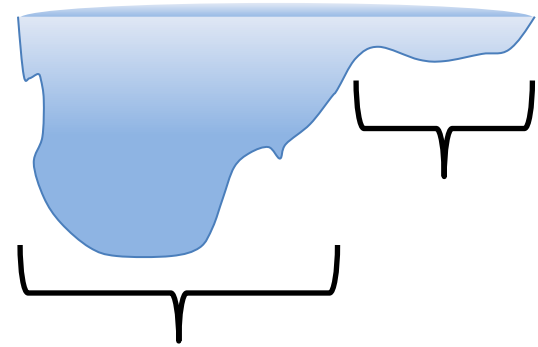
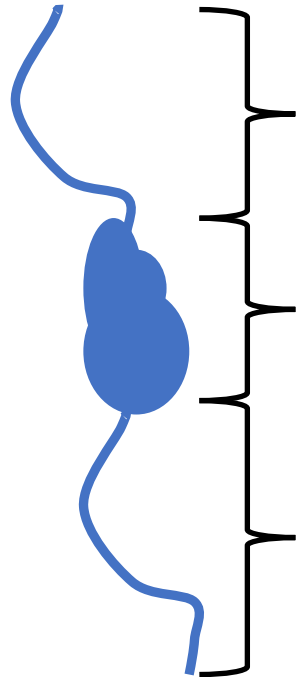
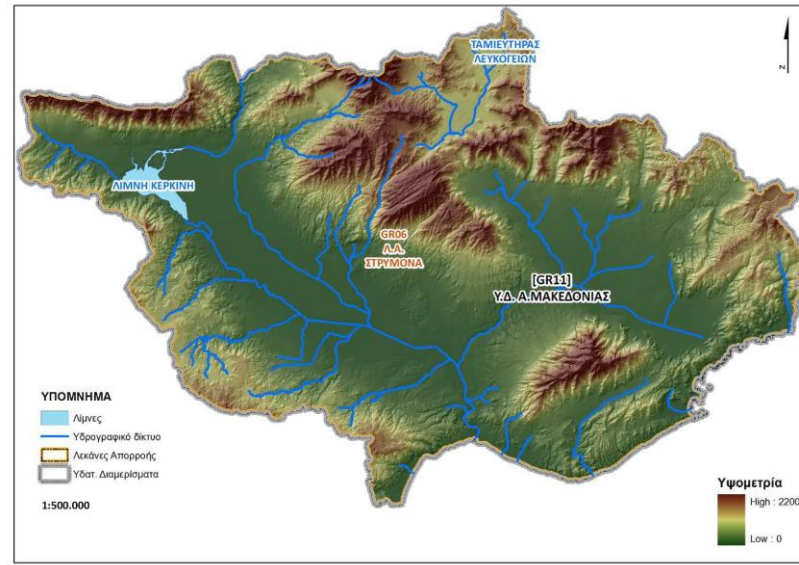
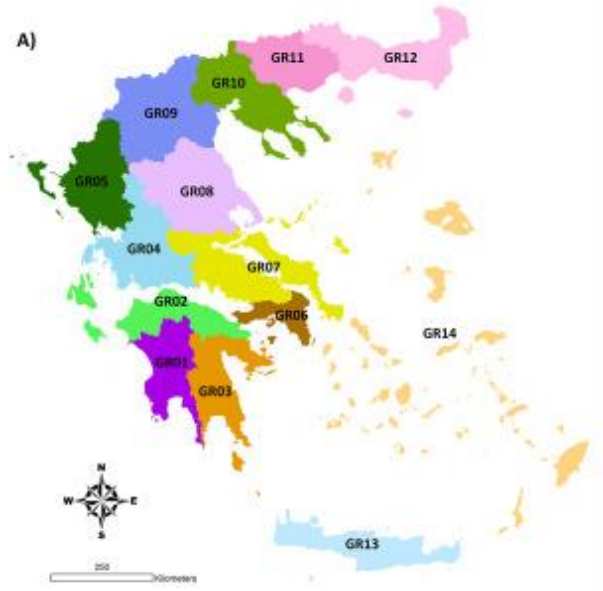
Η διαδικασία ταξινόμησης της συνολικής κατάστασης των επιφανειακών υδατικών συστημάτων βασίζεται στην συν-αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης και της χημικής κατάστασης.

Στην τελική ταξινόμηση της συνολικής κατάστασης επικρατεί ο **κανόνας του (one out all out)**, κατά τον οποίο η αξιολόγηση βασίζεται στην χαμηλότερη τιμή ανάμεσα στην οικολογική και χημική κατάσταση.

Σύστημα Ταξινόμησης Επιφανειακών Νερών



Λογικό διάγραμμα αξιολόγησης της συνολικής κατάστασης των επιφανειακών υδατικών συστημάτων

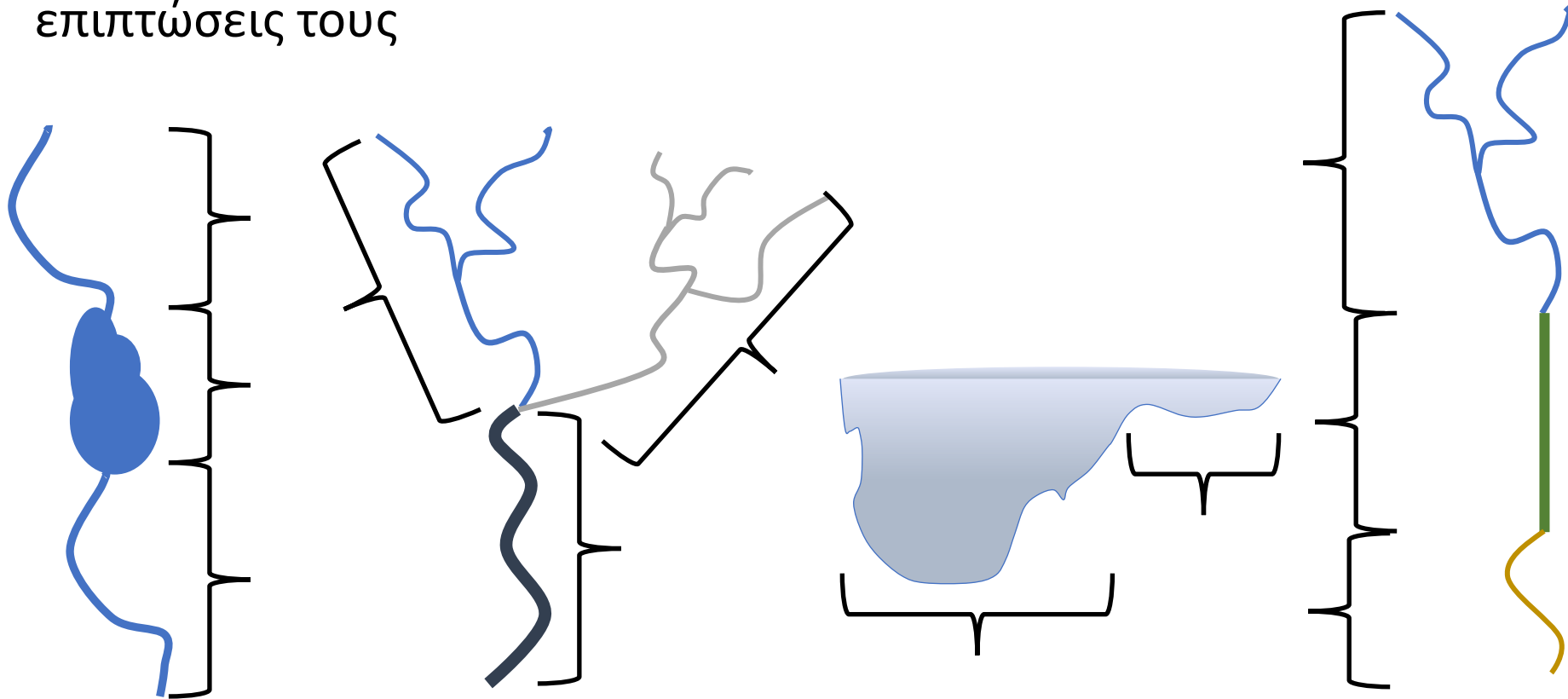


Η έννοια της Λεκάνης Απορροής στη Διαχείριση Νερού

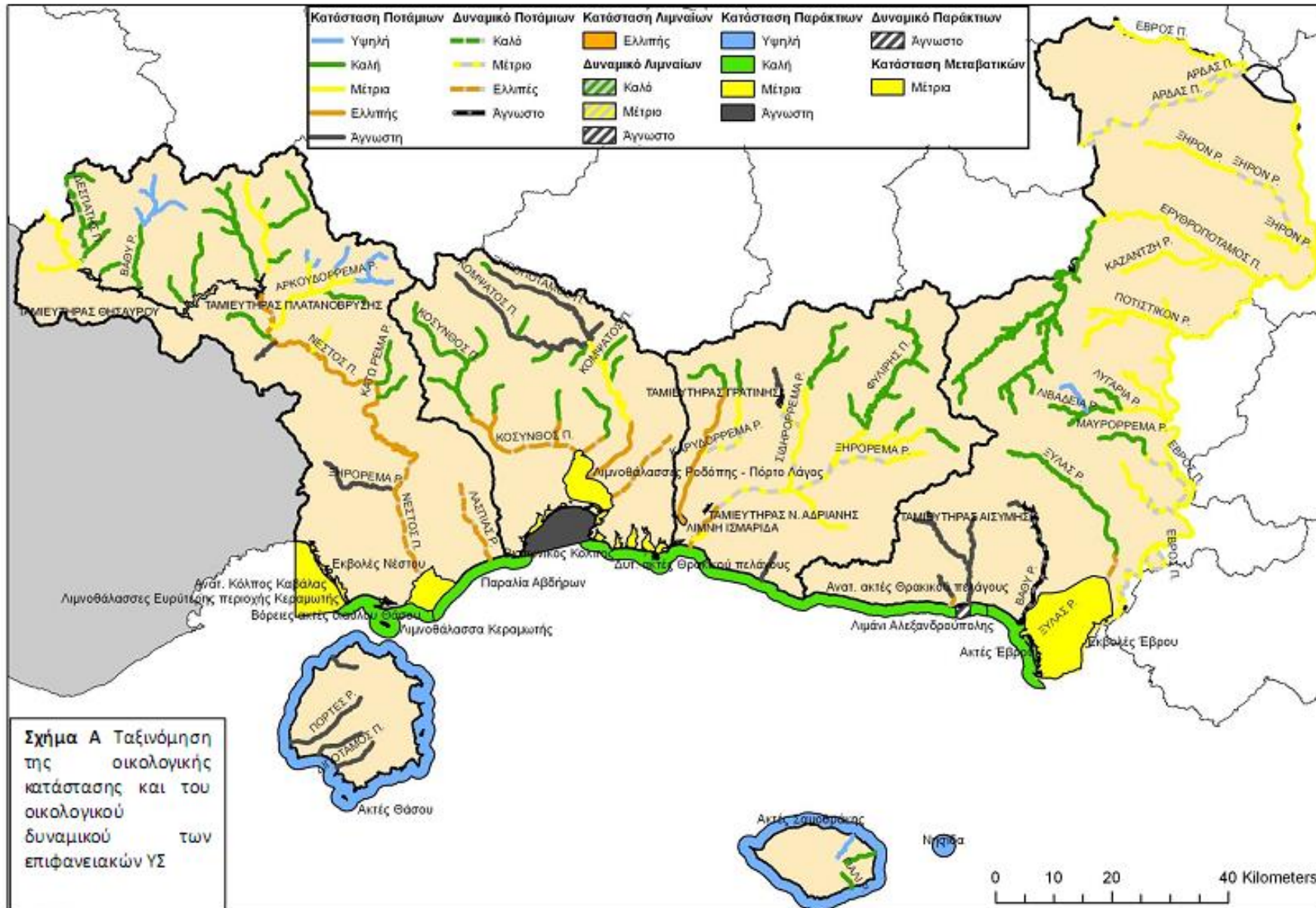


Τυπολογία

Προσδιορίζουμε τα Υδάτινα Σώματα με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και αξιολογούμε – αναλύουμε τις πιέσεις και τις επιπτώσεις τους



Παράδειγμα Ταξινόμησης Επιφανειακών Νερών



Πως προσδιορίζουμε την Ποιότητα Νερού;

Για να προσδιορίσουμε την ποιότητα νερού στα εσωτερικά ύδατα θα πρέπει να παρακολουθούμε την μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε μιας από τις Κύριες Παραμέτρους Ποιότητας Νερού στον χρόνο και στον χώρο.

Γιαυτό χρειαζόμαστε αξιόπιστα δεδομένα, δηλαδή χημικές αναλύσεις νερού με την εφαρμογή των Πρότυπων Μεθόδων (Standard Methods).

Η συλλογή δειγμάτων και οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνουν σε καλά επιλεγμένα σημεία και να επαναλαμβάνονται στον χρόνο με ακριβώς τις ίδιες μεθόδους και διαδικασίες.

Ισοζύγια Μάζας στα Υδατικά Συστήματα

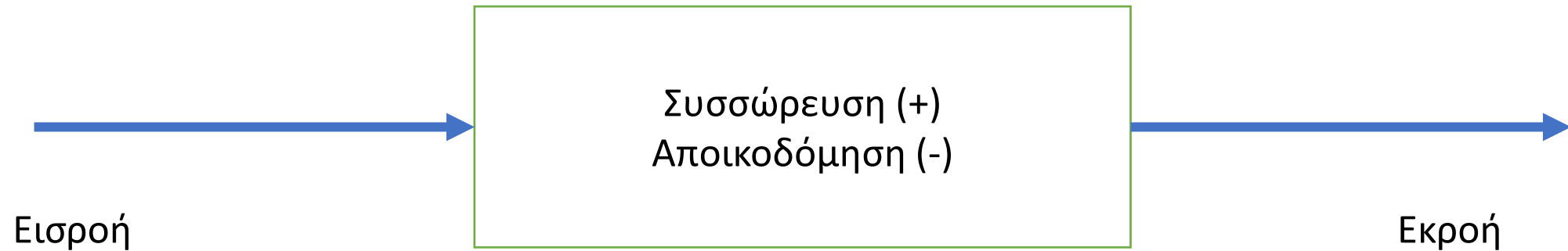
- Τα ισοζύγια μάζας βασίζονται στον Νόμος Διατήρησης Μάζας
- ΝΔΜ -> σε κάθε χημική αντίδραση δεν υπάρχει καταστροφή ή δημιουργία υλικού, άρα η μάζα διατηρείται, ωστόσο μετασχηματίζεται
- Όταν ένας ρύπος εισέλθει σε ένα υδατικό σύστημα υπάρχουν τρεις πιθανές διαδικασίες:
 - α) ένα μέρος του ρύπου θα απομακρυνθεί από το ΥΣ
 - β) ένα μέρος του ρύπου θα συσσωρευτεί στο εσωτερικό του ΥΣ
 - γ) ένα μέρος του ρύπου θα μετασχηματιστεί.

Αυτό μαθηματικά διατυπώνεται:

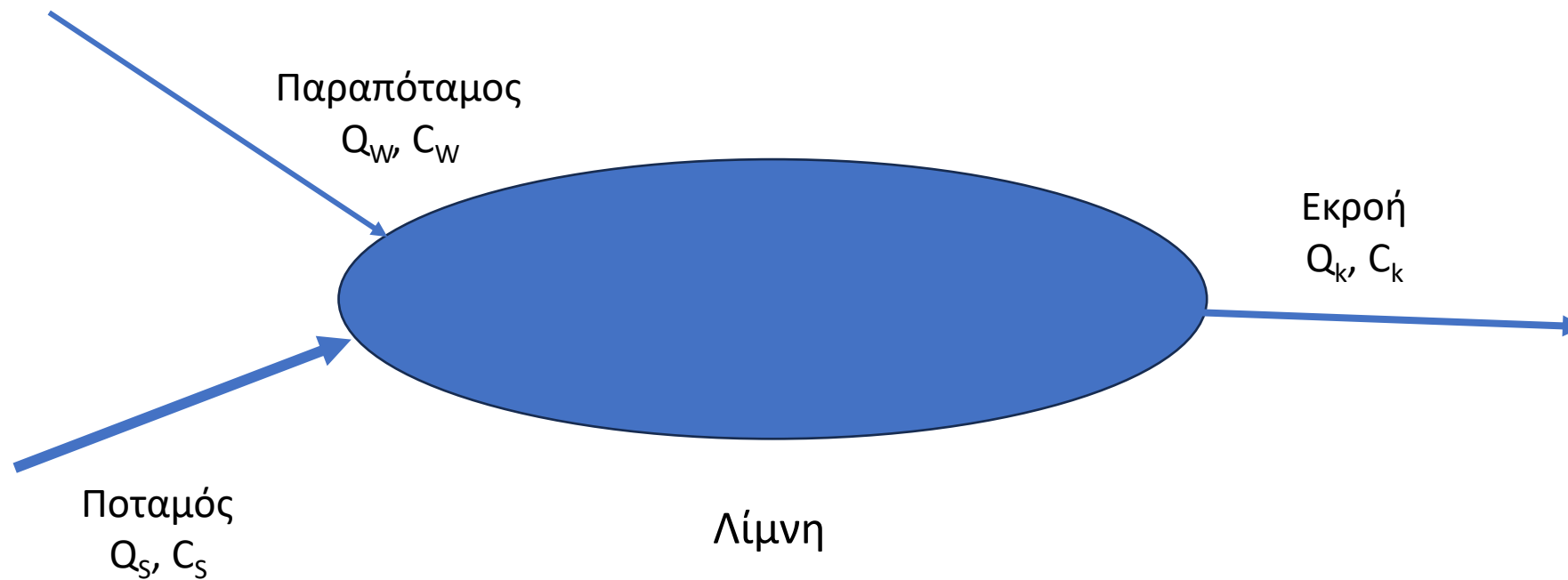
$$\text{Εισροή} = \text{Εκροή} + \text{Αποικοδόμηση} + \text{Συσώρευση}$$

Ισοζύγιο Μάζας στα Υδατικά Συστήματα

$$\text{Εισροή} = \text{Εκροή} + \text{Αποικοδόμηση} + \text{Συσσώρευση}$$



Ισοζύγια Μάζας στα Υδατικά Συστήματα



Ισοζύγιο Μάζας για
Συντηρητική Ουσία

$$Q_S \times C_S + Q_W \times C_W = Q_K \times C_K$$

Συντηρητική Ουσία: Η ουσία που δεν υφίσταται χημικούς, βιολογικούς και γεωχημικούς μετασχηματισμούς. Υφίσταται μόνο φυσικές διεργασίες (μείξη, διάχυση, μεταφορά, κλπ.).

Ισοζύγια Μάζας στα Υδατικά Συστήματα

- Για μη-συντηρητικές ουσίες ισχύει

Εισροή = Εκροή + Διάσπαση

Διάσπαση ή αποικοδόμηση περιγράφεται από **πρώτης τάξης κινητικές αντιδράσεις** -> ο ρυθμός μείωσης της συγκέντρωσης της ουσίας είναι ανάλογος της συνολικής ποσότητας της ουσίας στο σύστημα = $C \times V$.

$$\frac{dm}{dt} = K \times C \times V$$

Όπου K ο ρυθμός διάσπασης της ουσίας (1/day). Για την εφαρμογή της εξίσωσης θεωρούμε ομοιόμορφη συγκέντρωση C σε όλο τον όγκο του υδατικού συστήματος -> αντιδραστήρες συνεχούς ανάμειξης (Continuously-Stirred Tank Reactor, CSTR)

Ισοζύγια Μάζας στα Υδατικά Συστήματα

Για την συσσώρευση μάζας εντός του υδατικού συστήματος ισχύει

$$\text{Συσσώρευση } \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta VC}{\Delta t} = V \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

Επειδή ο όγκος του υδατικού συστήματος είναι σταθερός.

Άρα, το ισοζύγιο μάζας του υδατικού συστήματος γράφεται

$$V \frac{\Delta C}{\Delta t} = W(t) - QC - KCV - Sb$$

Δηλαδή, **Συσσώρευση = Εισροή – Εκροή – Διάσπαση – Καθίζηση**

Όπου $S_b = v A_s C$, όπου A_s είναι το εμβαδόν πυθμένα του υδατικού συστήματος, v η ταχύτητα καθίζησης της ουσίας (m/day).

Όλοι οι όροι έχουν μονάδες (g/day).

Παράδειγμα 1

Ποταμός με παροχή $12 \text{ m}^3/\text{s}$ συμβάλει παραπόταμος παροχής $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Τα χλωροϊόντα (συντηρητική ουσία) έχουν συγκέντρωση στον ποταμό 18 mg/L και στον παραπόταμο 26 mg/L . Να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ουσίας μετά την ανάμειξη.

Ισοζύγιο Μάζας: $Q_S C_S + Q_W C_W = Q_K C_K \rightarrow$

$$C_K = (Q_S C_S + Q_W C_W) / Q_K = (12 \times 18 + 5 \times 36) / (12 + 5) = 23.29 \text{ mg/L}$$

Παράδειγμα 2

Σε λίμνη με όγκο $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ εκβάλλει ποτάμι με παροχή $8 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση ρύπου 8 mg/L καθώς και αστικός οχετός με παροχή $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ και συγκέντρωση στα λύματα 100 mg/L . Αν ο συντελεστής αποδόμησης του ρύπου είναι $0,2 \text{ day}^{-1}$ να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ουσίας εντός της πλήρως αναμεμιγμένης λίμνης και η παροχή και συγκέντρωση της εκροής της.

Ισοζύγιο Μάζας: Εισροή = Εκροή + Αποικοδόμηση

$$\text{Εισροή} = Q_S C_S + Q_W C_W = (8 \times 8 + 0.6 \times 100) (\text{m}^3/\text{s}) (\text{mg/L}) \times (1000 \text{ L/m}^3) = 120.000 (\text{mg/s})$$

$$\text{Εκροή} = Q_k C_k = (Q_S + Q_W) C_k = (8 + 0.6) (\text{m}^3/\text{s}) C_k (\text{mg/L}) \times (1000 \text{ L/m}^3) = 8.6 \times 10^3 C_k (\text{mg/s})$$

$$\text{Αποικοδόμηση} = KCV = 0.2 C_L 10 \times 10^6 (\text{day}^{-1} \text{ mg/L m}^3) \times (1000 \text{ L/m}^3) / (24 \text{ h/day} \times 3600 \text{ s/h}) = 23.1 \times 10^3 C (\text{mg/s})$$

Αλλά, η συγκέντρωση $C_k = C_L$ οπότε η εξίσωση Διατήρησης Μάζας γίνεται

$$120.000 \text{ (mg/s)} = 8.600 C_k \text{ (mg/s)} + 23.100 C_k \text{ (mg/s)}$$

$$C_k = 120.000 / (8.600 + 23.100) = 3.785 \text{ (mg/L)}$$

Αντιδράσεις αποικοδόμησης/μετασχηματισμού ρύπου

$$\frac{dC_A}{dt} = -Kf(C_A, C_B, \dots)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = -KC_A^\alpha C_B^\beta$$

Όπου το άθροισμα $\alpha + \beta$ είναι η τάξη της αντίδρασης. Συνήθως οι αντιδράσεις αφορούν στην αποικοδόμηση ενός και μόνο ρύπου, άρα η εξίσωση γίνεται

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n$$

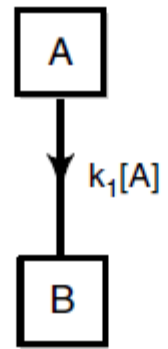
Όπου το άθροισμα n είναι η τάξη της αντίδρασης.

$$\frac{dC}{dt} = -K \quad \text{Όπου } n = 0 \text{ άρα αντίδραση μηδενικής τάξης}$$

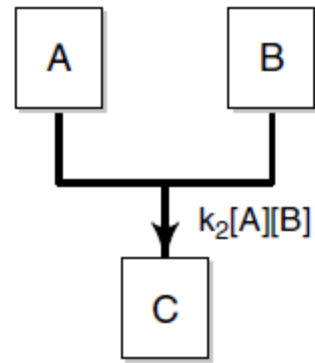
$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad \text{Όπου } n = 1 \text{ άρα αντίδραση πρώτης τάξης}$$

$$\frac{dC}{dt} = -KC^2 \quad \text{Όπου } n = 2 \text{ άρα αντίδραση δεύτερης τάξης}$$

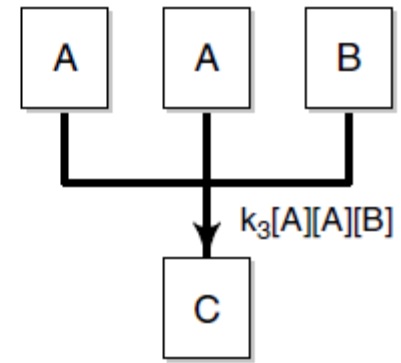
A reaction order 1



B reaction order 2



C reaction order 3



$$\frac{dC}{dt} = -K \rightarrow C = C_0 - Kt \quad \text{Κινητική αντίδραση μηδενικής τάξης}$$

$$\frac{dC}{dt} = -KC \rightarrow C = C_0 e^{-Kt} \quad \text{Κινητική αντίδραση πρώτης τάξης}$$

$$\frac{dC}{dt} = -KC^2 \rightarrow C = C_0 / (1 + KC_0 t) \quad \text{Κινητική αντίδραση δεύτερης τάξης}$$

Συνήθως θεωρούμε ότι οι μη-συντηρητικές ουσίες που εισέρχονται σε υδατικά συστήματα ακολουθούν κινητικές αντιδράσεις 1^{ης} τάξης.

$$\frac{dC}{dt} = KC$$

$$\frac{dC}{C} = K dt$$

Στις αντιδράσεις 1^{ης} τάξης υπάρχει μόνο μία σταθερά (A).

$$\int \frac{dC}{C} = \int (K dt)$$

$$\int d(\ln C) = \int (K dt)$$

$$\ln C = Kt + A$$

$$C(t) = Ae^{Kt}$$

$$C(t) = Ae^{Kt}$$

$$C(t_0) = Ae^{Kt_0} \Rightarrow A = C(t_0)e^{-Kt_0}$$

The general solution

$$C(t) = C(t_0)e^{K(t-t_0)} \Rightarrow C = C_0 e^{K(t-t_0)}$$

Για διεργασίες αποικοδόμησης ρύπων η παράμετρος K είναι αρνητική, καθώς η τιμή του ρύπου μειώνεται στον χρόνο.

Ωστόσο, ο μετασχηματισμός προκαλεί την μετατροπή του ρύπου σε μια άλλη χημική ένωση, της οποίας η συγκέντρωση αυξάνει στον χρόνο με αντίστοιχο ρυθμό K .

Η τιμή της σταθεράς A υπολογίζεται από τις αρχικές συνθήκες της εξίσωσης.

Για σταθερές συνθήκες, το ισοζύγιο μάζας εκφράζεται από μια γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης:

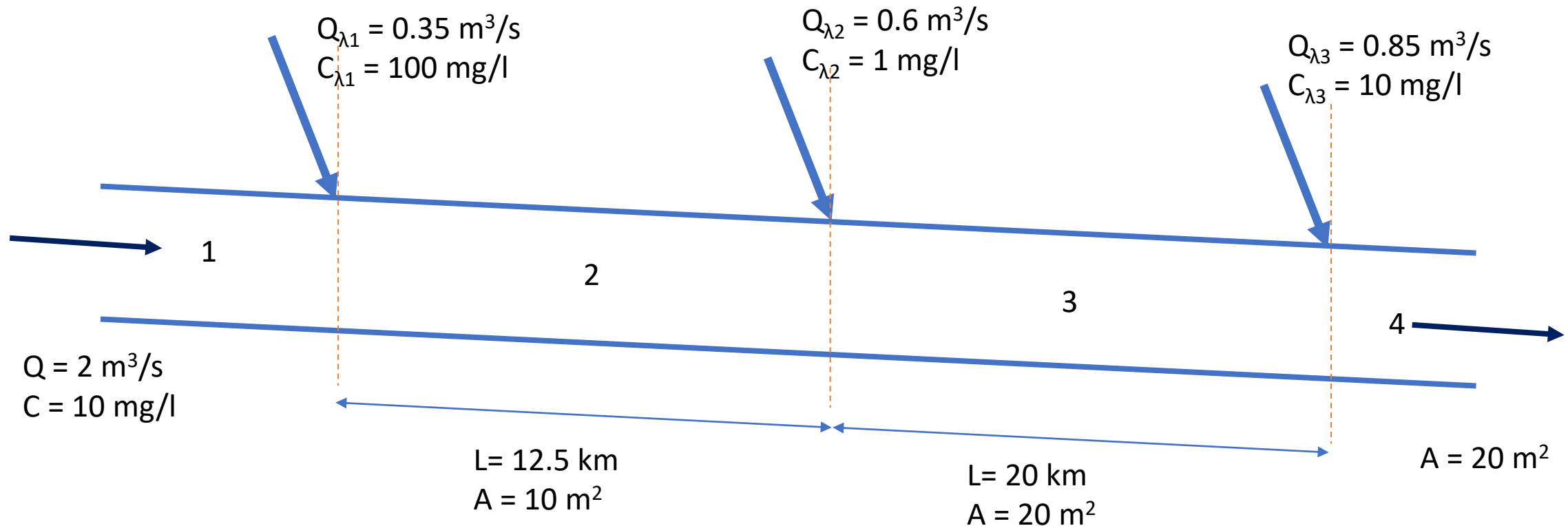
$$\frac{1}{A} \frac{d(QC)}{dx} = -KC \Rightarrow \frac{Q}{A} \frac{dC}{dx} = -KC \Rightarrow U \frac{dC}{dx} = -KC$$

$$\frac{dx}{dt} \frac{dC}{dx} = -KC \Rightarrow \frac{dC}{dt} = U \frac{dC}{dx} = -KC$$

$$C = C_0 e^{-Kt} = C_0 e^{-Kx/U}$$

Άσκηση 3

Κατά μήκος ενός ποταμού χύνονται τα απόβλητα από τρεις σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων. Δίνονται παρακάτω οι παροχές και οι συγκεντρώσεις ρύπου. Α) Να υπολογιστεί η συγκέντρωση ρύπου κατά μήκος του ποταμού αν θεωρηθεί ως συντηρητικός, Β) Να υπολογιστεί η συγκέντρωση ρύπου κατά μήκος του ποταμού αν θεωρηθεί ως μη-συντηρητικός με ρυθμό αποικοδόμησης $K = 0.25$ ανά ημέρα.



Ισοζύγιο Μάζας για Συντηρητική Ουσία

Το ισοζύγιο μάζας για την περιοχή 2 είναι:

$$Q_2 = Q_1 + Q_{\lambda 1} = 2 + 0.35 = 2.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_2 = (Q_1 C_1 + Q_{\lambda 1} C_{\lambda 1}) / (Q_1 + Q_{\lambda 1}) = (10 \times 2 + 100 \times 0.35) / 2.35 = 23.4 \text{ mg/L}$$

Η παροχή και η συγκέντρωση αυτή διατηρείται σταθερή έως το τέλος του 2^{ου} κελιού.

Στο κελί 3 η συγκέντρωση είναι

$$Q_3 = Q_2 + Q_{\lambda 2} = 2.35 + 0.6 = 2.95 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_3 = (Q_2 C_2 + Q_{\lambda 2} C_{\lambda 2}) / (Q_2 + Q_{\lambda 2}) = (23.4 \times 2.35 + 1 \times 0.6) / 2.95 = 18.84 \text{ mg/L}$$

Η παροχή και η συγκέντρωση αυτή διατηρείται σταθερή έως το τέλος του 3^{ου} κελιού.

Στο κελί 4 η συγκέντρωση είναι

$$Q_4 = Q_3 + Q_{\lambda 3} = 2.95 + 0.85 = 3.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_4 = (Q_3 C_3 + Q_{\lambda 3} C_{\lambda 3}) / (Q_3 + Q_{\lambda 3}) = (2.95 \times 18.84 + 10 \times 0.85) / 3.8 = 16.86 \text{ mg/L}$$

Κώδικας σε R για την επίλυση ισοζυγίου μάζας σε ποταμό με εισροές συντηρητικής ουσίας

```
cons_poll = function(input) {  
  ##input is a dataframe of two arrays, discharge and pollutant concentration  
  ##topography is a dataframe of two arrays, length and area per segment  
  ##decay is a constant with negative value  
  Q = vector(mode="numeric", length = length(input$discharge))  
  C = vector(mode="numeric", length = length(input$discharge))  
  Q[1] = input$discharge[1]; C[1] = input$pollutant[1]  
  for (i in 2:length(input$discharge)) {  
    Q[i] = Q[i-1]+input$discharge[i]  
    C[i] = (Q[i-1]*C[i-1]+ input$discharge[i]*input$pollutant[i])/Q[i] }  
  output = data.frame(Q,C)  
  return(output)  
}  
discharge = c(2,0.35,0.6,0.85)  
pollutant = c(10,100,1,10)  
input = data.frame(discharge,pollutant)  
cons_poll(input)
```

Ισοζύγιο Μάζας για Μη-Συντηρητική Ουσία

Η συγκέντρωση της μη-συντηρητικής ουσίας μεταβάλλεται κατά μήκος του ποταμού. Η μεταβολή εξαρτάται από την συγκέντρωση στην είσοδο του κάθε κελιού, την απόσταση κίνησης του ρύπου στο κάθε κελί και την σταθερά αποικοδόμησης.

Στο κελί 1 έχουμε $Q_2 = 2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ και $C_2 = 23.4 \text{ mg/L}$

Στο κελί 2 ο χρόνος κίνησης είναι

$$t = V/Q = (L \times A)/Q = (12500 \text{ (m)} \times 10 \text{ (m}^2))/2.35 \text{ (m}^3/\text{s}) = 53191.5 \text{ s} = 0.615 \text{ days.}$$

Η συγκέντρωση ρύπου στο τέλος του κελιού 2 είναι

$$C_{2(\text{τελος})} = C_{2(\text{Αρχή})} e^{-Kt} = 23.4 \times e^{-0.25 \times 0.615} = 20.07 \text{ mg/L}$$

Στο κελί 3 έχουμε

$$Q_3 = Q_2 + Q_{\lambda 2} = 2.35 + 0.6 = 2.95 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_3 = (Q_2 C_2 + Q_{\lambda 2} C_{\lambda 2}) / (Q_2 + Q_{\lambda 2}) = (20.07 \times 2.35 + 1 \times 0.6) / 2.95 = 16.19 \text{ mg/L}$$

Ο χρόνος κίνησης εντός του κελιού 3 είναι

$$t = V/Q = (L \times A)/Q = (20000 \times 20)/2.95 = 135593 \text{ s} = 1.57 \text{ days}$$

Η συγκέντρωση ρύπου στο τέλος του κελιού 3 είναι

$$C_{3(\text{τελος})} = C_{3(\text{Αρχή})} e^{-Kt} = 16.19 \times e^{-0.25 \times 1.57} = 10.93 \text{ mg/L}$$

Στο κελί 4 η παροχή και η συγκέντρωση είναι

$$Q_4 = Q_3 + Q_{\lambda 3} = 2.95 + 0.85 = 3.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_4 = (Q_3 C_3 + Q_{\lambda 3} C_{\lambda 3}) / (Q_3 + Q_{\lambda 3}) = (2.95 \times 10.93 + 10 \times 0.85) / 3.8 = 10.72 \text{ mg/L}$$

Στο κελί 4 η συγκέντρωση του ρύπου μειώνεται εκθετικά προς τα κατάντη.

Σε απόσταση 10 χλμ κατάντη ο χρόνος κίνησης είναι

$$t_4 = V/Q = (L \times A)/Q = (10000 \times 10)/3.8 = 0.304 \text{ days}$$

Στην απόσταση αυτή η συγκέντρωση του ρύπου είναι

$$C_4 = C_{4(\text{Αρχή})} e^{-Kt} = 10.72 e^{-0.25 \times 0.609} = 9.93 \text{ mg/L}$$

Κώδικας σε R για την επίλυση ισοζυγίου μάζας σε ποταμό με εισροές μη-συντηρητικής ουσίας

```
non_cons_poll = function(input,topography,decay) {  
  ##input is a dataframe of two arrays, discharge and pollutant concentration  
  ##topography is a dataframe of two arrays, length and area per segment  
  ##decay is a constant with negative value  
  Q = vector(mode="numeric", length = length(input$discharge))  
  C = vector(mode="numeric", length = length(input$discharge))  
  L = vector(mode = "numeric", length = length(topography$area))  
  A = vector(mode = "numeric", length = length(topography$area))  
  time = vector(mode = "numeric", length = length(topography$area))  
  Q[1] = input$discharge[1]; C[1] = input$pollutant[1]; time[1] = 0  
  for (i in 2:length(input$discharge))  
  {  
    Q[i] = Q[i-1]+input$discharge[i]  
    C[i] = (Q[i-1]*C[i-1]+input$discharge[i]*input$pollutant[i])/Q[i]  
    time[i] = (topography$Length[i-1]*1000*topography$area[i-1])/(Q[i]*86400)  
    C[i] = C[i]*exp(-decay*time[i])  
  }  
  output = data.frame(Q,C,time)  
  return(output)  
}
```

```
discharge = c(2,0.35,0.6,0.85)
pollutant = c(10,100,1,10)
input = data.frame(discharge, pollutant)
```

```
Length = c(12.5,20,10)
area = c(10,20,10)
topography = data.frame(Length,area)
```

```
decay = 0.25
```

```
non_cons_poll(input, topography, decay)
```

Μη-σημειακή Ρύπανση

Ως μη-σημειακές ή διάχυτες πηγές ρύπανσης θεωρούνται αυτές που δεν εκπέμπονται από κάποιο αγωγό εκροής. Αφορούν κυρίως την αγροτική ρύπανση. Θεωρούμε ότι η εισροή της μη-σημειακής ρύπανσης εισέρχεται σε ένα ποτάμι ή λίμνη καθ' όλο το μήκος του ποταμού ή καθ' όλη την περίμετρο της λίμνης.

Η εξίσωση ισοζυγίου μάζας για μη-σημειακή ρύπανση σε μη-συντηρητικό ρύπο γράφεται

$$\frac{1}{A} \frac{d(QC)}{dx} = S_D - KC$$

Όπου S_D είναι η φόρτιση του μη-συντηρητικού ρύπου λόγω μη-σημειακής ρύπανσης ($ML^{-3}T^{-1}$).

Αν η ροή μάζας ανά μήκος ποταμού είναι W ($ML^{-1}T^{-1}$) τότε

$$S_D = \frac{Wdx}{V} = \frac{Wdx}{Adx} = \frac{W}{A}$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης για το ισοζύγιο μάζας είναι

$$C = C_0 e^{-Kx/U} + \frac{S_D}{K} (1 - e^{-Kx/U}) = C_0 e^{-Kt} + \frac{S_D}{K} (1 - e^{-Kt})$$

Παράδειγμα 3

Σε ένα ποτάμι με παροχή $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ συμβάλει παραπόταμος με παροχή $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Η συγκέντρωση μίας διασπώμενης ουσίας στο ποτάμι είναι $C_S = 20 \text{ mg/l}$ και στον παραπόταμο είναι $C_W = 38 \text{ mg/l}$. Σε απόσταση 8 χλμ από το σημείο συμβολής υπάρχει μη-σημειακή ρύπανση η οποία επηρεάζει τον ποταμό για τα επόμενα 8 χλμ με φορτίο $15 \text{ g/m}^3/\text{day}$. Αν η διατομή του ποταμού είναι σταθερή σε όλο το μήκος του και ίση με 18 m^2 και ο συντελεστής αποικοδόμησης είναι $K = 0.8 \text{ day}^{-1}$, να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ουσίας σε απόσταση 24 χλμ από την θέση συμβολής.

Το ισοζύγιο μάζας για την περιοχή 1 έως το σημείο συμβολής είναι:

$$Q_1 = Q_S + Q_W = 1.4 + 0.4 = 1.80 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_1 = (Q_S C_S + Q_W C_W) / (Q_S + Q_W) = (1.4 \times 20 + 0.4 \times 38) / 1.80 = 24.0 \text{ mg/L}$$

Από το σημείο συμβολής ο ρύπος παρουσιάζει αποικοδόμηση για τα επόμενα 8 χλμ. Η συγκέντρωση της μη-συντηρητικής ουσίας μεταβάλλεται κατά μήκος του ποταμού. Η μεταβολή εξαρτάται από την συγκέντρωση στην είσοδο του κελιού, την απόσταση κίνησης του ρύπου στο κελί (8 χλμ) και την σταθερά αποικοδόμησης. Επομένως

Στο κελί 2 μήκους 8 χλμ αμέσως μετά την συμβολή των ποταμών ο χρόνος κίνησης είναι $t = V/Q = (L \times A)/Q = (8000 \text{ (m)} \times 18 \text{ (m}^2))/1.80 \text{ (m}^3/\text{s)} = 80.000 \text{ s} = 0.925 \text{ days}$.

Η συγκέντρωση ρύπου στο τέλος του κελιού 2 είναι

$$C_{2(\text{τελος})} = C_{2(\text{Αρχή})} e^{-Kt} = 24.0 \times e^{-0.80 \times 0.925} = 11.45 \text{ mg/L}$$

Στο κελί 3, δηλ. στα επόμενα 8 χλμ λαμβάνει χώρα τόσο η αποικοδόμηση του ρύπου, με τον ίδιο ρυθμό όπως προηγουμένως, όσο και η μη-σημειακή φόρτιση, επομένως

$$C = C_0 e^{-Kx/U} + \frac{S_D}{K} (1 - e^{-Kx/U}) = C_0 e^{-Kt} + \frac{S_D}{K} (1 - e^{-Kt})$$

$$C = 11.45 e^{-0.80*0.925} + 15/0.80*(1 - e^{-0.80*0.925}) = 5.46 + 9.80 = 15.26 \text{ mg/L}$$

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην αποικοδόμηση του ρύπου κατά το μήκος των 8 χλμ ενώ ο δεύτερος στην φόρτιση από την μη-σημειακή πηγή.

Συνεπώς σε απόσταση 24 χλμ από το σημείο συμβολής, άρα για το επόμενο μήκος 8 χλμ, η συγκέντρωση είναι

$$C = 15.26 e^{-0.80*0.925} = 7.28 \text{ mg/L και η παροχή } Q = 1.8 \text{ m}^3/\text{s}.$$