

ΠΜΣ «Διαχείριση Υδρομετεωρολογικών Καταστροφών»

Εισαγωγή στη διαχείριση των υδάτων και του υδάτινου περιβάλλοντος

Διάλεξη 2

Μοντέλα Υδατικών Οικοσυστημάτων και Εφαρμογές

Καθηγητής ΔΠΘ Γεώργιος Συλαίος

Τηλέφωνο 25410 79398, Mail: gsylaios@env.duth.gr ή skype: gsylaios

Συστήματα γλυκού και θαλασσινού νερού – Αλληλεπίδραση σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

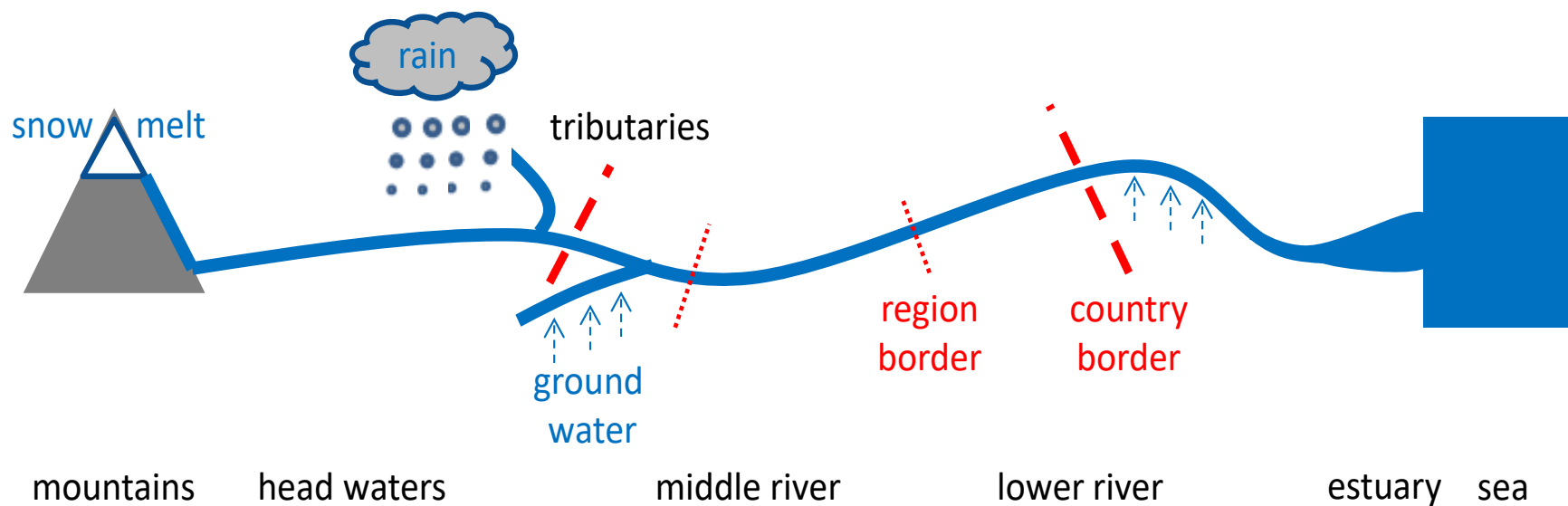
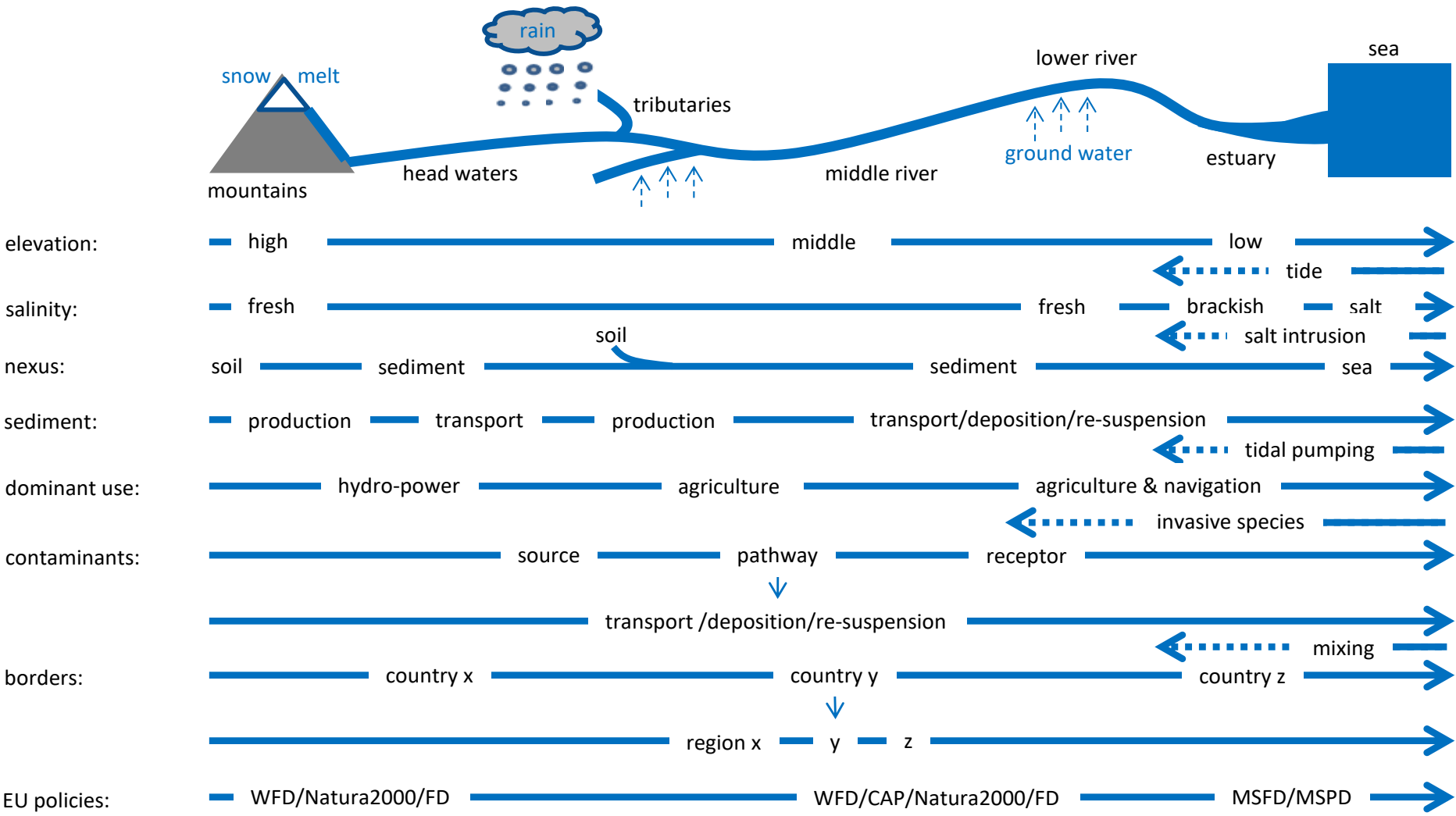


Fig. 3 – River-Sea systems: ‘from the mountains till at sea’.

A long the river-sea continuum (extremely simplified):



ΟΔΗΓΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ 2008/56/ΕΚ

4 Ευρωπαϊκές θαλάσσιες περιφέρειες

- Βαλτική Θάλασσα
- ΒΑ Ατλαντικό Ωκεανό
- Μεσόγειο Θάλασσα
- Μαύρη Θάλασσα

1^η νομοθετική πράξη προστασίας θαλάσσιας βιοποικιλότητας

Νομοθετικό πλαίσιο οικοσυστημικής προσέγγισης στη διαχείριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων

Υποχρεωτικό χρονοδιάγραμμα υλοποίησης, πίνακας 1.2 εργασίας

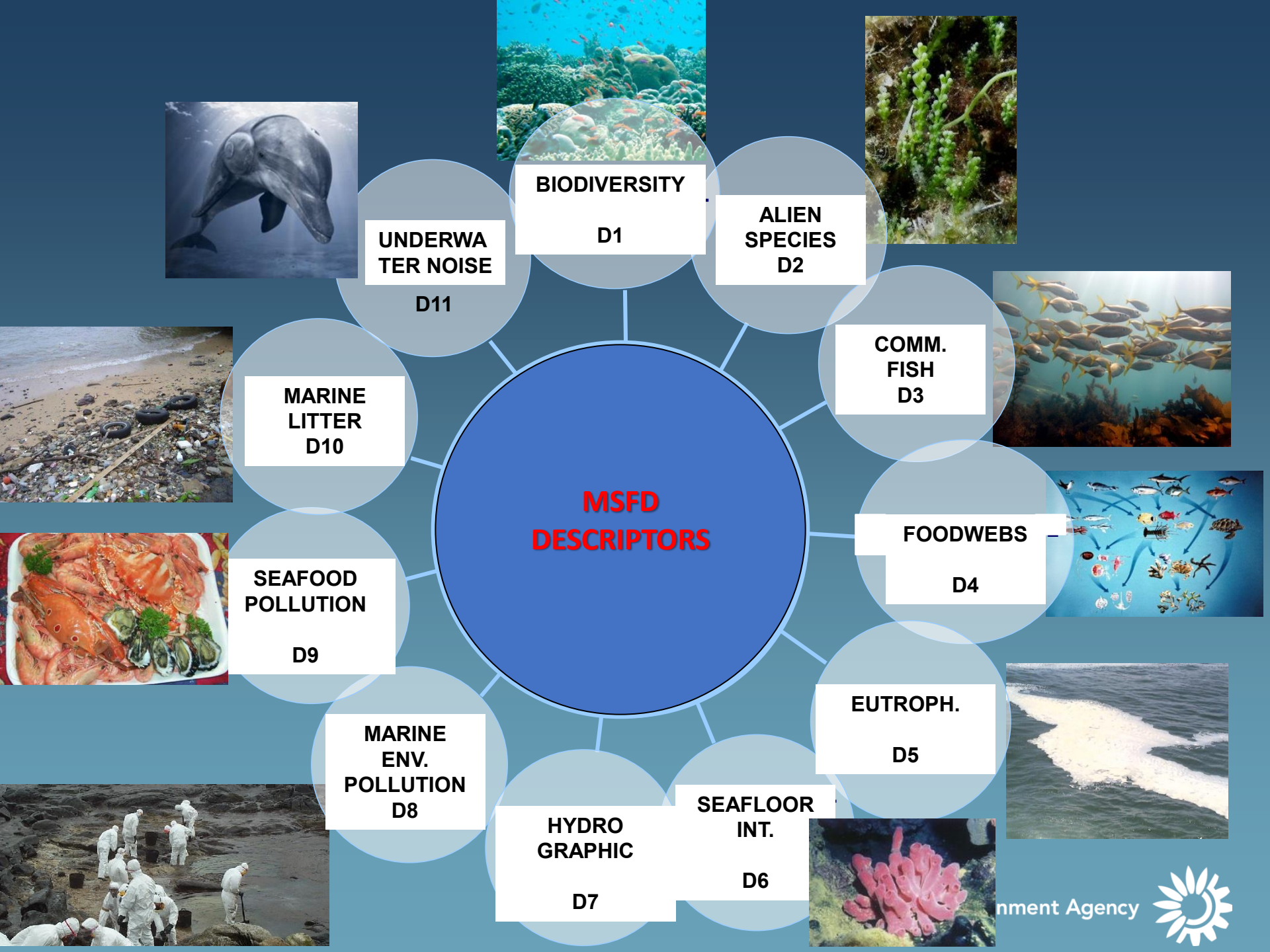
- 2008 έναρξη εφαρμογής
- 2020 επίτευξη ΚΠΚ

ΟΔΗΓΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ

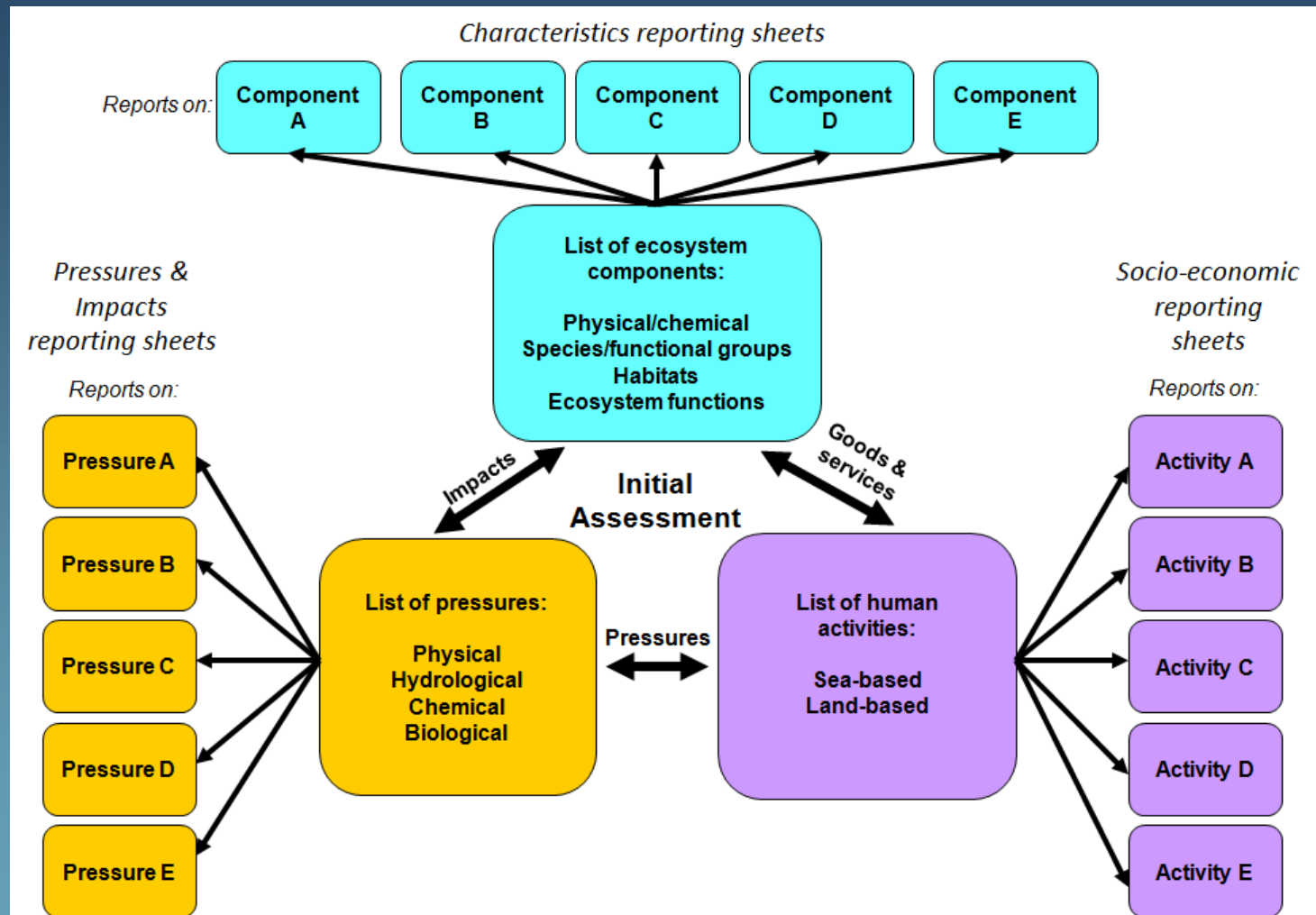
2008/56/ΕΚ

Την ΚΠΚ καθορίζουν 11 δείκτες ποιοτικής κατάστασης, πίνακας 1.3 εργασίας:

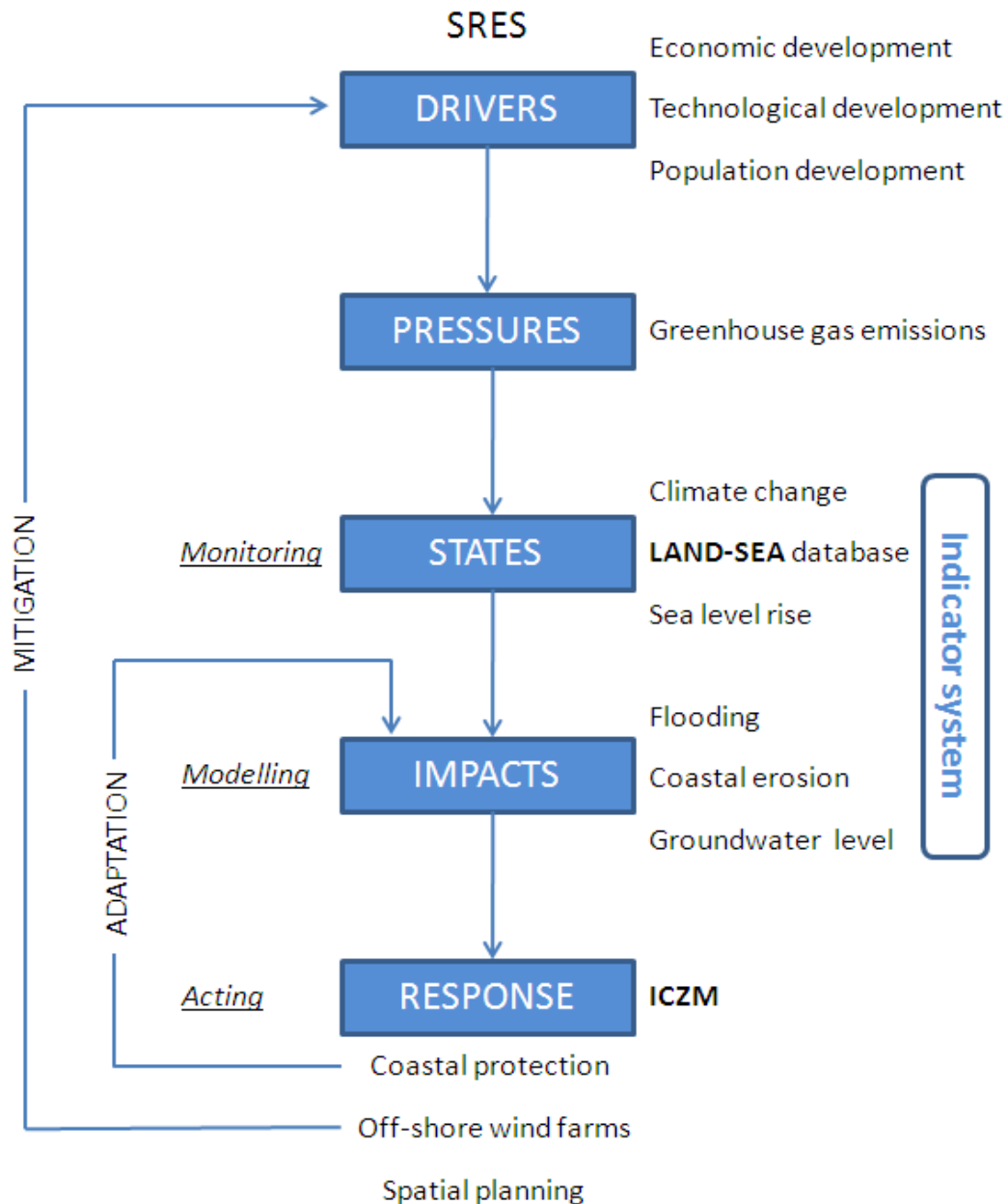
- Βιοποικιλότητα, D1
- Μη-αυτόχθονα είδη, D2
- Εμπορικά εκμεταλλεύσιμα ψάρια, μαλάκια και οστρακόδερμα, D3
- Δίκτυα θαλάσσιας τροφής, D4
- Ανθρωπογενής ευτροφισμός, D5
- Ακεραιότητα θαλάσσιου πυθμένα, D6
- Υδρογραφικές συνθήκες, D7
- Ρυπογόνες Ουσίες, D8
- Ρυπογόνες ουσίες σε ψάρια και άλλα θαλασσινά, D9
- Απορρίμματα στη θάλασσα, D10
- Ενέργεια και υποθαλάσσιος θόρυβος, D11



MSFD - Initial Assessment concept



The DPSIR framework



Ειδικότερα:

Κινητήριες Δυνάμεις

Αναφέρονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες
(μετακίνηση, βιομηχανία, γεωργία, χρήση ενέργειας, κτλ)

Πιέσεις

Αναφέρονται σε μεταβολές στο περιβάλλον που προκύπτουν από τις
παραπάνω διαδικασίες παραγωγής και κατανάλωσης
(ραδιενέργεια, παραγωγή αποβλήτων, ηχορύπανση, εκπομπές ρύπων,
εξάντληση πόρων, κτλ)

Κατάσταση

Αναφέρεται στις φυσικές, χημικές και βιολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος,
που μεταβάλλονται από τις παραπάνω πιέσεις
(ποιότητα νερού, εδάφους, αέρα, κατάσταση οικοσυστημάτων, κτλ)

Επιπτώσεις

Αναφέρονται στις συνέπειες που προκύπτουν από τις εκάστοτε καταστάσεις
(ανθρώπινη υγεία, κοινωνικο-οικονομική ισορροπία , ποιότητα
οικοσυστημάτων, κτλ)

Αποκρίσεις

Αναφέρονται στη θέσπιση μέτρων για την αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων
αποτελεσμάτων και έχουν εφαρμογή σε όλους τους κρίκους της αλυσίδας
του μοντέλου
(εναλλακτικά μέσα μεταφοράς, νομοθεσία σχετικά με τα επιτρεπτά όρια
εκπομπής αερίων, κτλ)

Περιγραφέας	Στόχος	Σχετική Πίεση	Κριτήριο	Στοιχεία Κριτηρίων	Υπουργική Απόφαση Αριθ. οικ. 126635/2016	Στοιχεία Κριτηρίου ΟΠΥ και ΟΠΘΣ
5- Ευτροφισμός	Ελαχιστοποιείται ο ανθρωπογενής ευτροφισμός και ιδίως οι δυσμενείς επιπτώσεις του, όπως απώλειες στη βιοποικιλότητα, υποβάθμιση του οικοσυστήματος, ανθίσσεις επιβλαβών φυκών και έλλειψη οξυγόνου στον βυθό των θαλασσών	Εισαγωγή θρεπτικών συστατικών, εισαγωγή οργανικής ύλης	D5C1 - Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών δεν κυμαίνονται σε επίπεδα που υποδεικνύουν δυσμενείς επιπτώσεις ευτροφισμού.	Θρεπτικά συστατικά στη στήλη ύδατος: Διαλυμένο ανόργανο άζωτο (DIN), ολικό άζωτο (TN), διαλυμένος ανόργανος φωσφόρος (DIP), ολικός φωσφόρος (TP).	GR 5.1.1: Συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών στη στήλη ύδατος (ενώσεων αλάτων αζώτου, φωσφόρου και πυριτίου).	Μέτρηση συγκεντρώσεων θρεπτικών συστατικών στη στήλη ύδατος (ενώσεων αλάτων αζώτου, φωσφόρου και πυριτίου), σε μικρογραμμομόρια ανά λίτρο (μmol/l).
					GR 5.1.2: Αναλογίες θρεπτικών συστατικών (πυρίτιο, άζωτο και φωσφόρος).	Υπολογισμός του λόγου N/P βάσει των συγκεντρώσεων των θρεπτικών αλάτων αζώτου, φωσφόρου
			D5C2 - Οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης α δεν κυμαίνονται σε επίπεδα που υποδεικνύουν δυσμενείς επιπτώσεις εμπλουτισμού με θρεπτικά συστατικά.	Χλωροφύλλη α στη στήλη ύδατος	GR 5.2.1: Συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α στο θαλασσινό νερό	Μέτρηση συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α στη στήλη των θαλασσίων υδάτων, σε μικρογραμμάρια ανά λίτρο (μg/l).
			D5C3 - Ο αριθμός, η χωρική έκταση και η διάρκεια των περιστατικών άνθισης επιβλαβών φυκών δεν κυμαίνονται σε επίπεδα που υποδεικνύουν δυσμενείς επιπτώσεις εμπλουτισμού με θρεπτικά συστατικά.	Ανθίσσεις επιβλαβών φυκών (π.χ. κυανοβακτήρια) στη στήλη ύδατος	GR 5.2.4: Συχνότητα εμφάνισης επιβλαβών και τοξικών ειδών φυτοπλαγκτού και πληθυσμιακών εκρήξεων (harmful algalblooms ή HABs)	Συχνότητα εμφάνισης επιβλαβών και τοξικών ειδών φυτοπλαγκτού και πληθυσμιακών εκρήξεων (Harmful Algal Blooms ή HABs). Περιστατικά άνθισης ως αριθμός περιστατικών, διάρκεια σε ημέρες ανά έτος, συγκεντρώσεις πληθυσμών τοξικών ειδών, αναφορές από ερευνητικά προγράμματα, αρμόδιες αρχές, κοινωνικά δίκτυα και βιβλιογραφία.

Τι είναι ένα Μαθηματικό Ομοίωμα ?

Ορίζεται ως η διαδικασία αναπαράστασης φυσικών, χημικών ή/και βιολογικών διεργασιών με τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων, καταστρωμένων με τρόπο ώστε αυτές να περιγράφουν τις διεργασίες του υδατικού συστήματος επαρκώς και με ακρίβεια.

Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του Μαθηματικού Ομοιώματος ?

- 1. Αντικείμενο Μ.Ο.**
- 2. Στόχοι ανάπτυξης (βασική έρευνα, εφαρμογή, περιγραφή διεργασιών, πρόγνωση συμπεριφοράς συστήματος, κλπ.)**
- 3. Μεταβλητές και Διεργασίες που προσομοιώνονται**
- 4. Διαστάσεις Μ.Ο.**
 - 0 διάσταση χώρου (box models)**
 - 1 διάσταση χώρου (1D steady state model)**
 - 1 διάσταση χώρου + χρόνος (1D dynamic model)**
 - 2 διαστάσεις χώρου (2D steady state model)**
 - 2 διαστάσεις χώρου (x, y ή x, z) + χρόνος (2D dynamic model)**
 - 3 διαστάσεις χώρου (3D steady state model)**
- 4. Μέθοδος Επίλυσης (αναλυτική, αριθμητική)**
- 5. Περιγραφικό ή Προγνωστικό Μ.Ο.**

Ισοζύγιο μάζας στο στοιχειώδη όγκο

Η συσσώρευση μάζας στο στοιχειώδη όγκο γράφεται:

$$\begin{aligned} \text{Συσσώρευση μάζας} = & \Sigma(\text{Εισροών από τα όρια}) - \Sigma(\text{Εκροών από τα όρια}) \\ & + \Sigma(\text{Πηγών εντός του στοιχειώδους όγκου}) \\ & - \Sigma(\text{Απωλειών εντός του στοιχειώδους όγκου}) \end{aligned}$$

Το παραπάνω ισοζύγιο δίνεται με τη μορφή ρυθμού μεταβολής της συσσώρευσης – απώλειας της μάζας στο στοιχειώδη όγκο, άρα σε χρονικό διάστημα dt ο ρυθμός συσσώρευσης είναι:

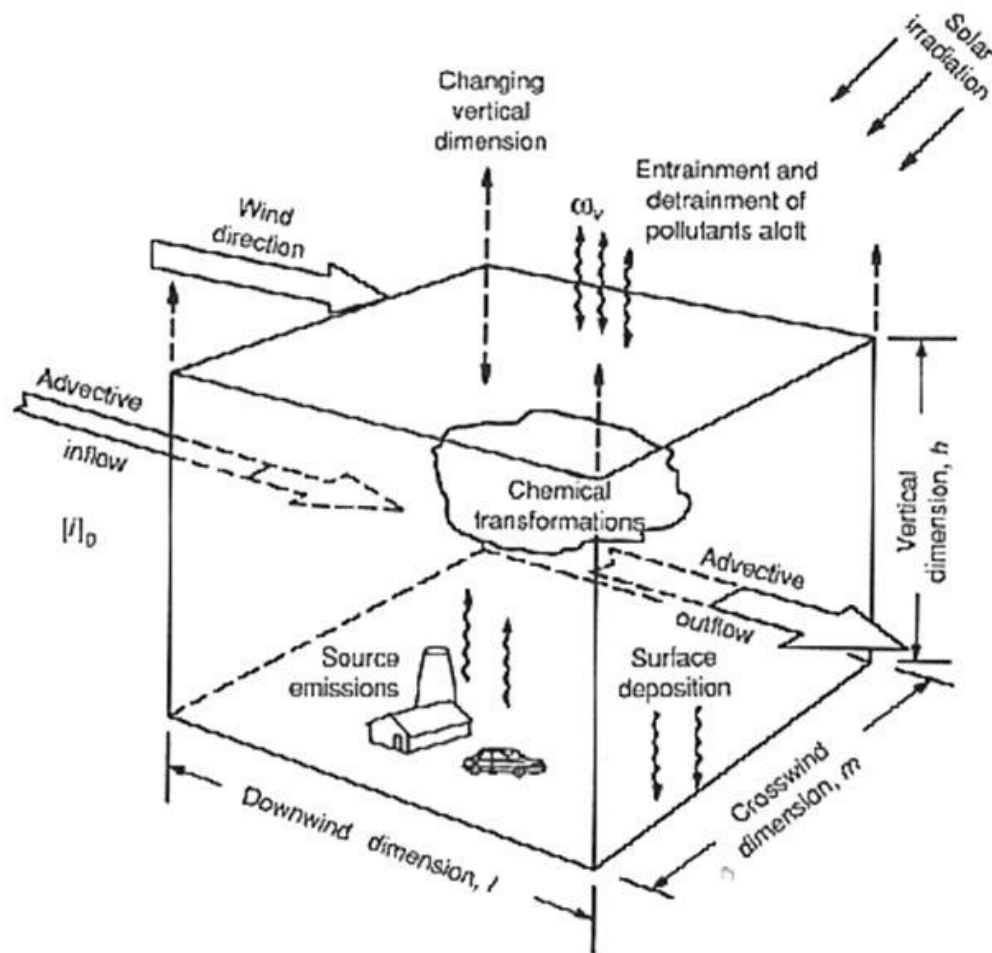
$$\text{Συσσώρευση στο στοιχειώδη όγκο} = 1/dt [(cV)_{t+dt} - (cV)_t]$$

Σε περίπτωση που το $dt \rightarrow 0$, τότε:

$$\text{Συσσώρευση στο στοιχειώδη όγκο} = d/dt (cV) = V dc/dt$$

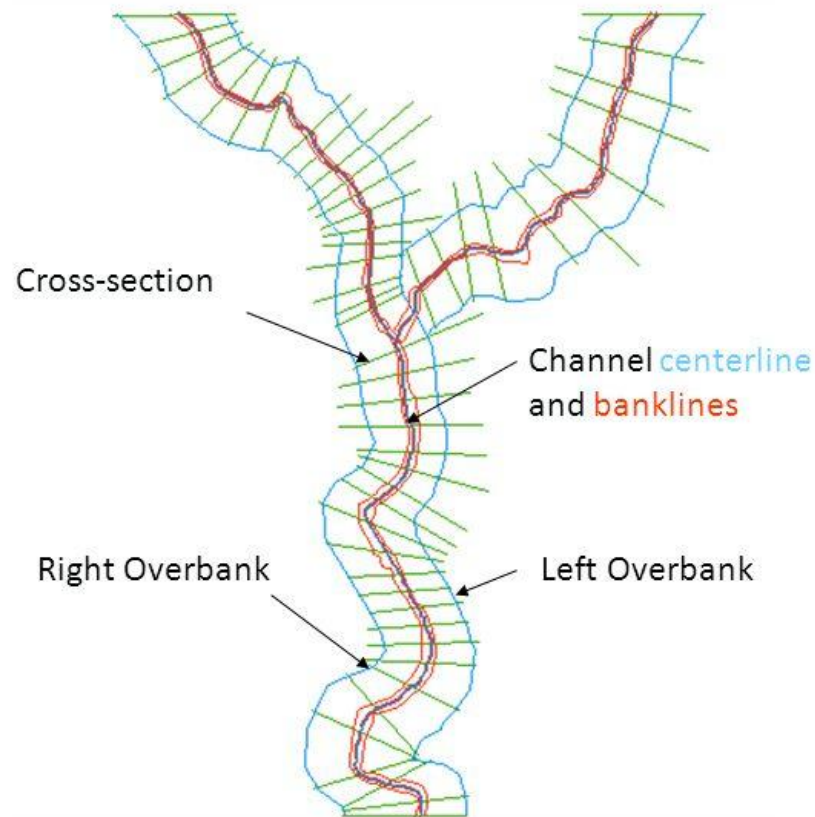


Μαθηματικό Ομοίωμα Μηδενικής Διάστασης (Box Model)



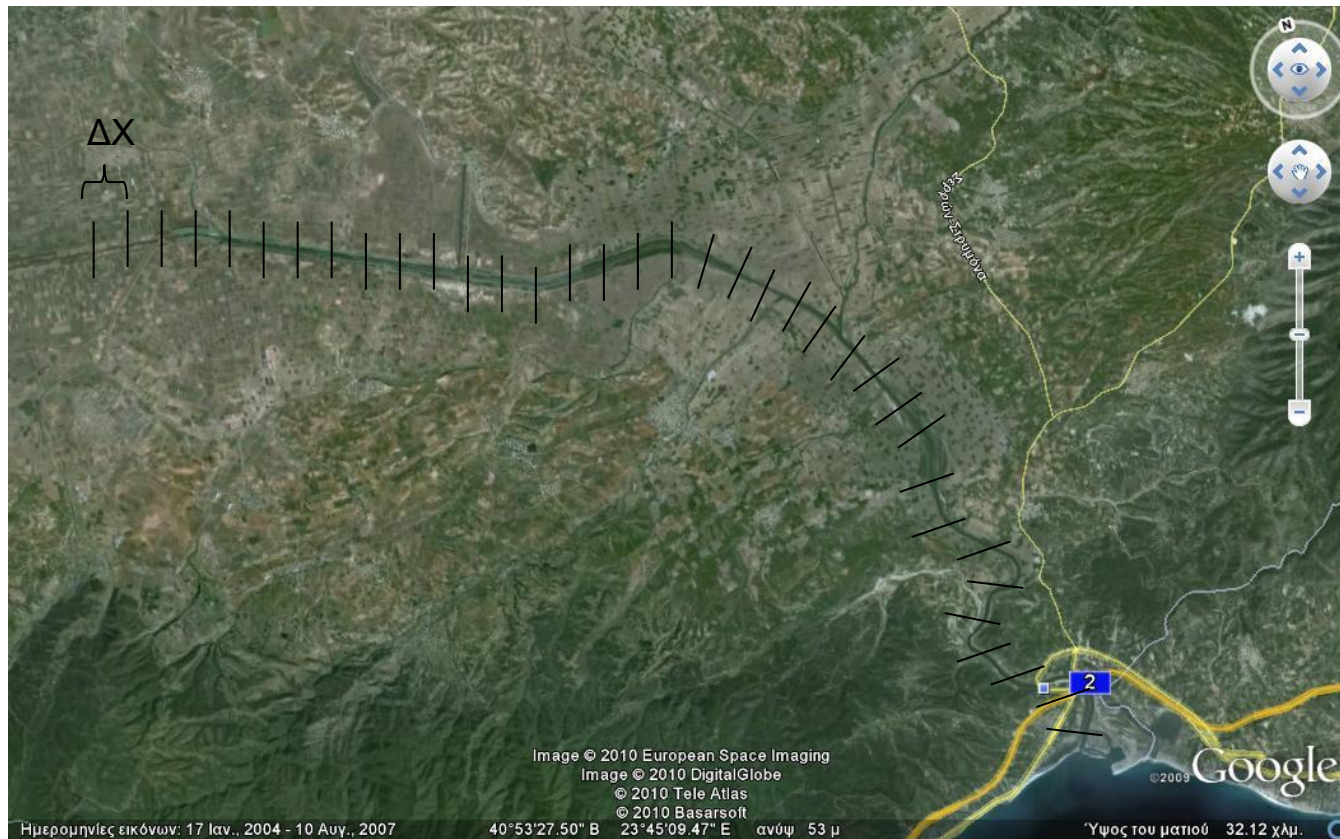
Μαθηματικό Ομοίωμα Μίας Διάστασης (1D River Model)

One-Dimensional Flow Computations



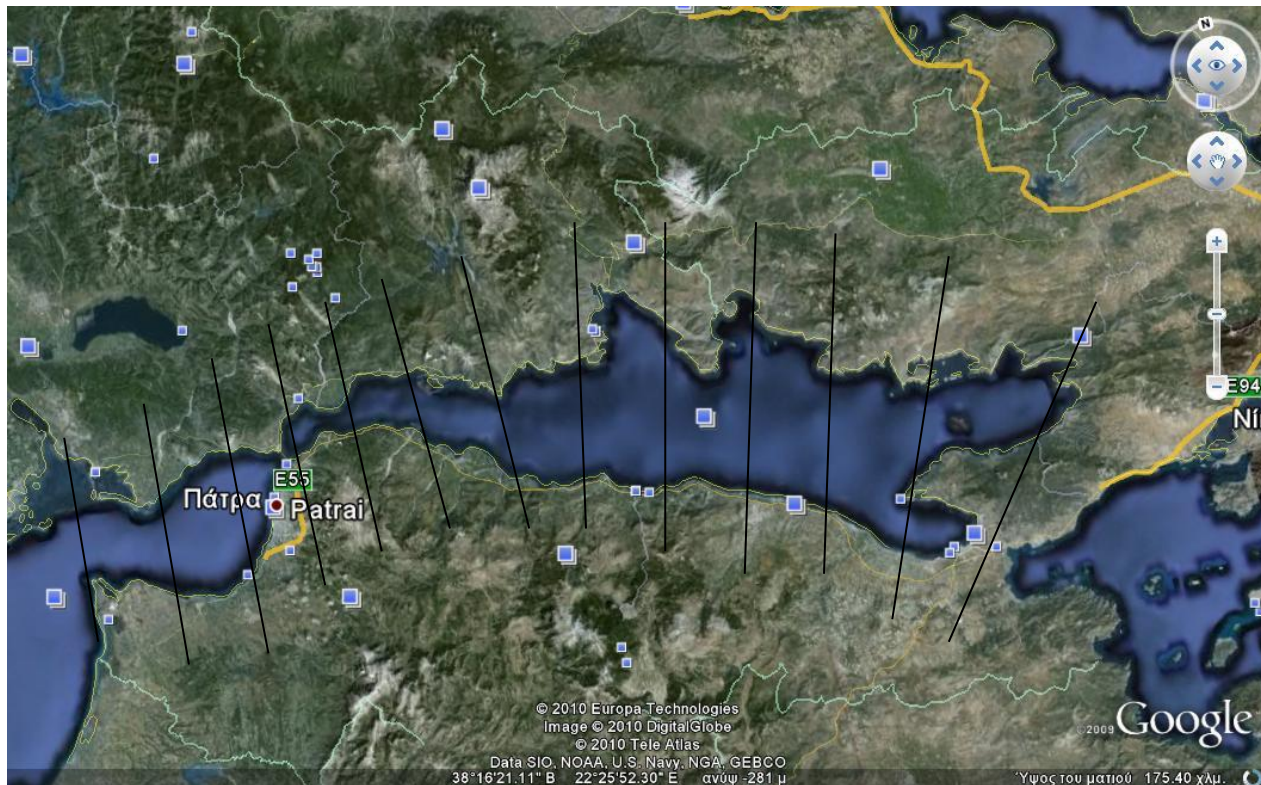
Μαθηματικό Ομοίωμα 1-διάστασης

Βήμα 1 – Διακριτοποίηση Περιοχής Μελέτης

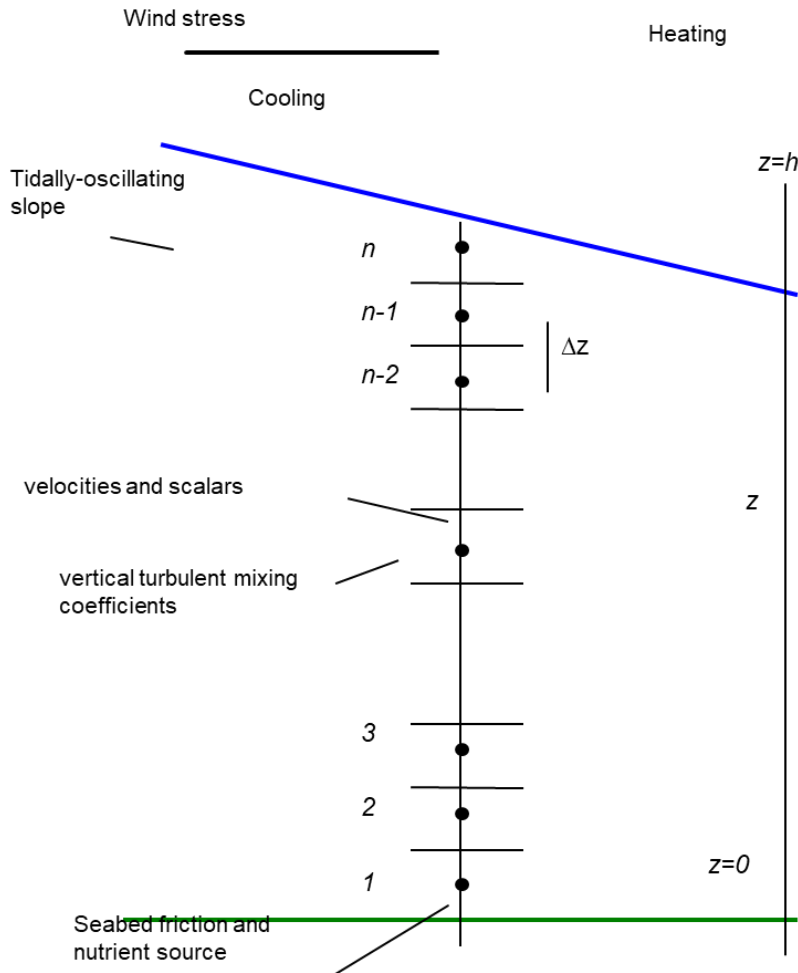


Μαθηματικό Ομοίωμα 1-διάστασης

Βήμα 1 – Διακριτοποίηση Περιοχής Μελέτης



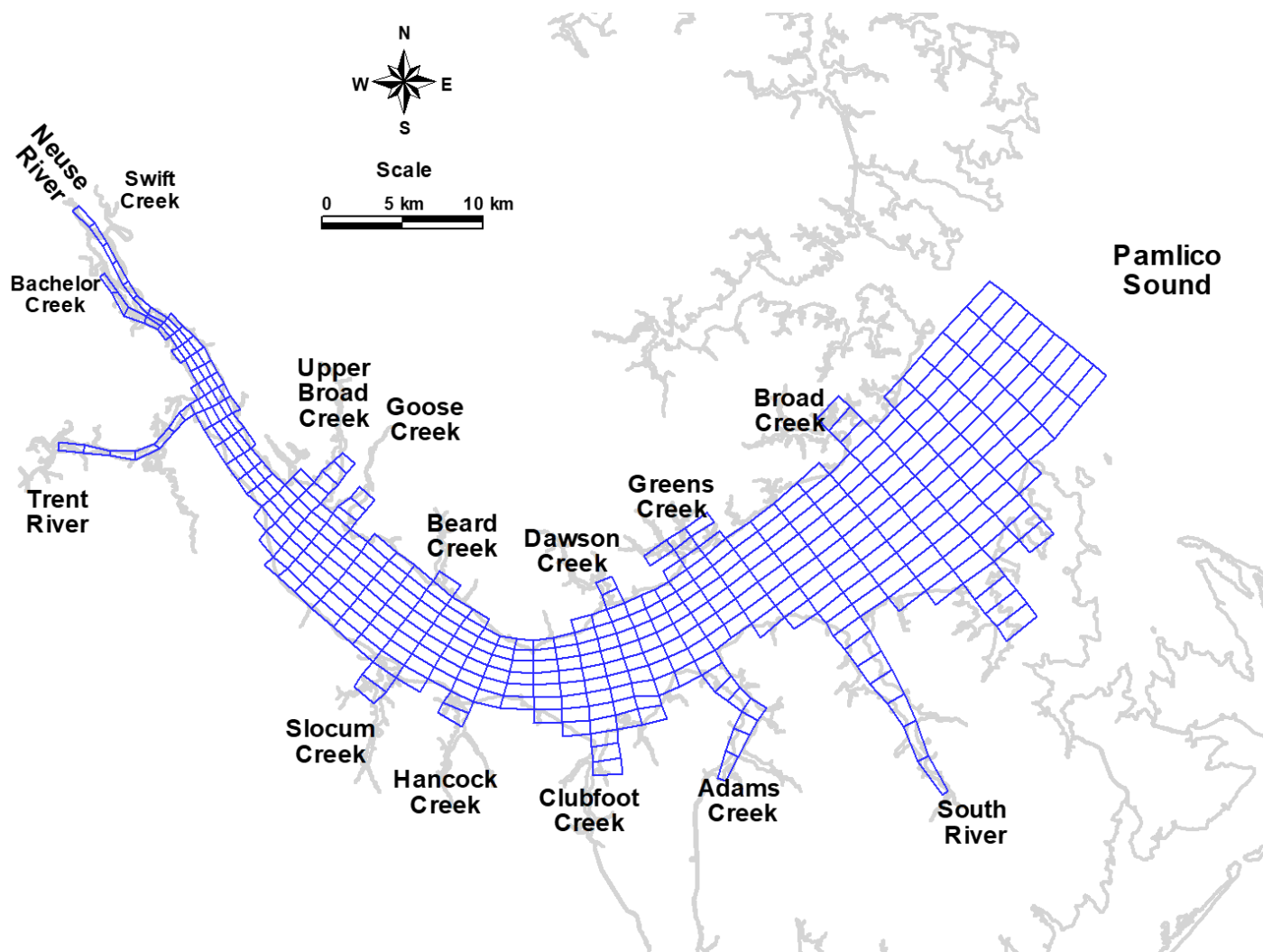
Μαθηματικό Ομοίωμα 1- διάστασης

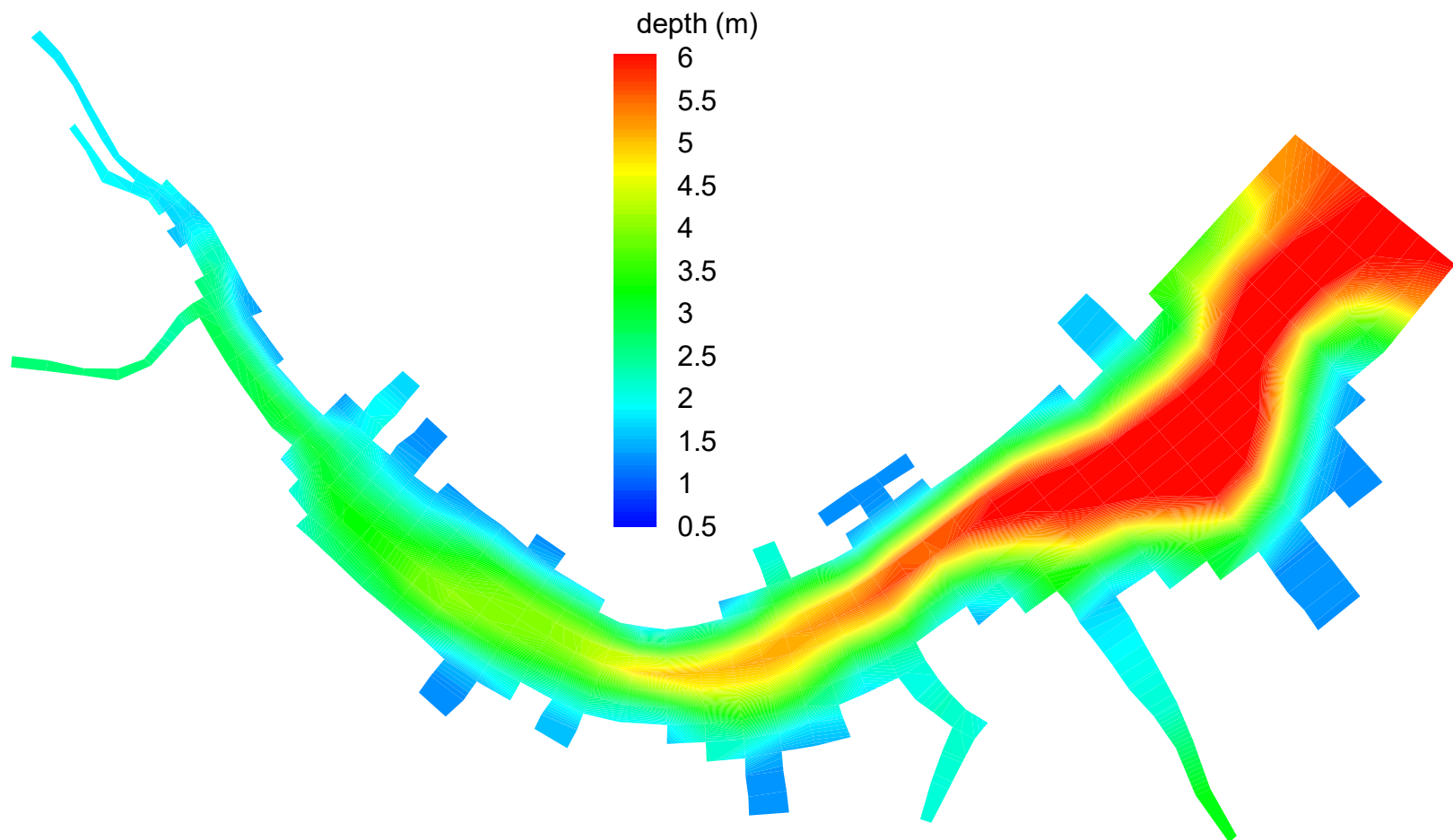


Κατακόρυφη διάσταση

Χρονική μεταβολή
στρωματοποίησης –
αποστρωματοποίησης
υδάτινης στήλης

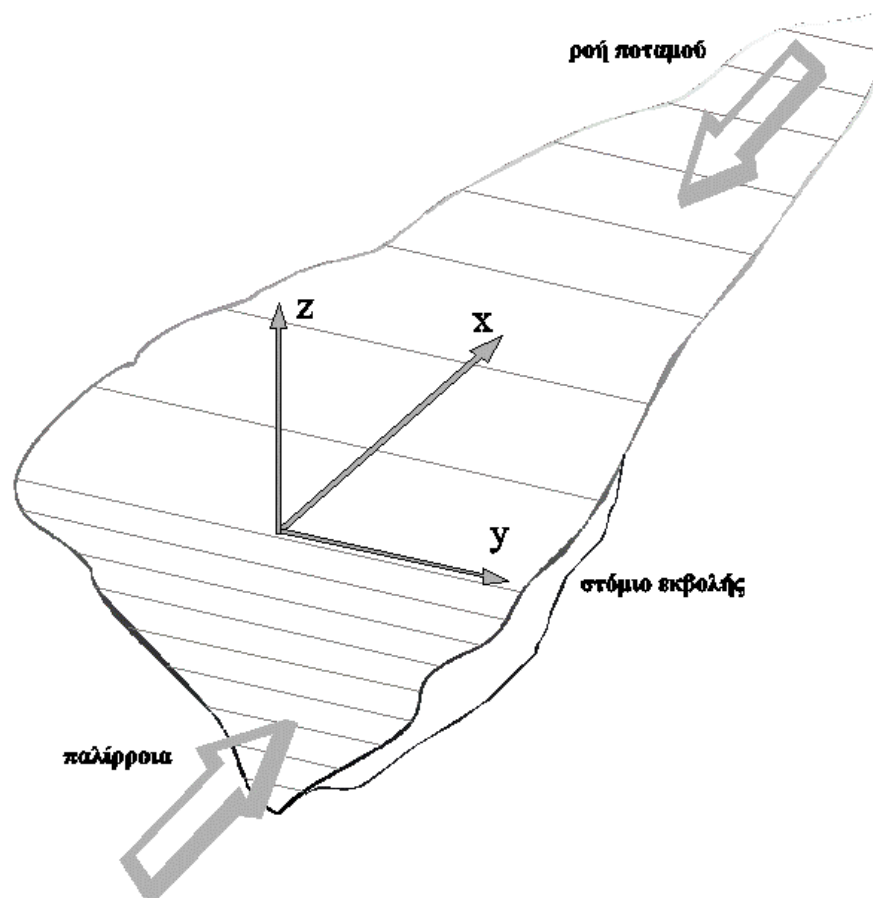
Μαθηματικό Ομοίωμα 2-διαστάσεων Οριζόντιων διαστάσεων



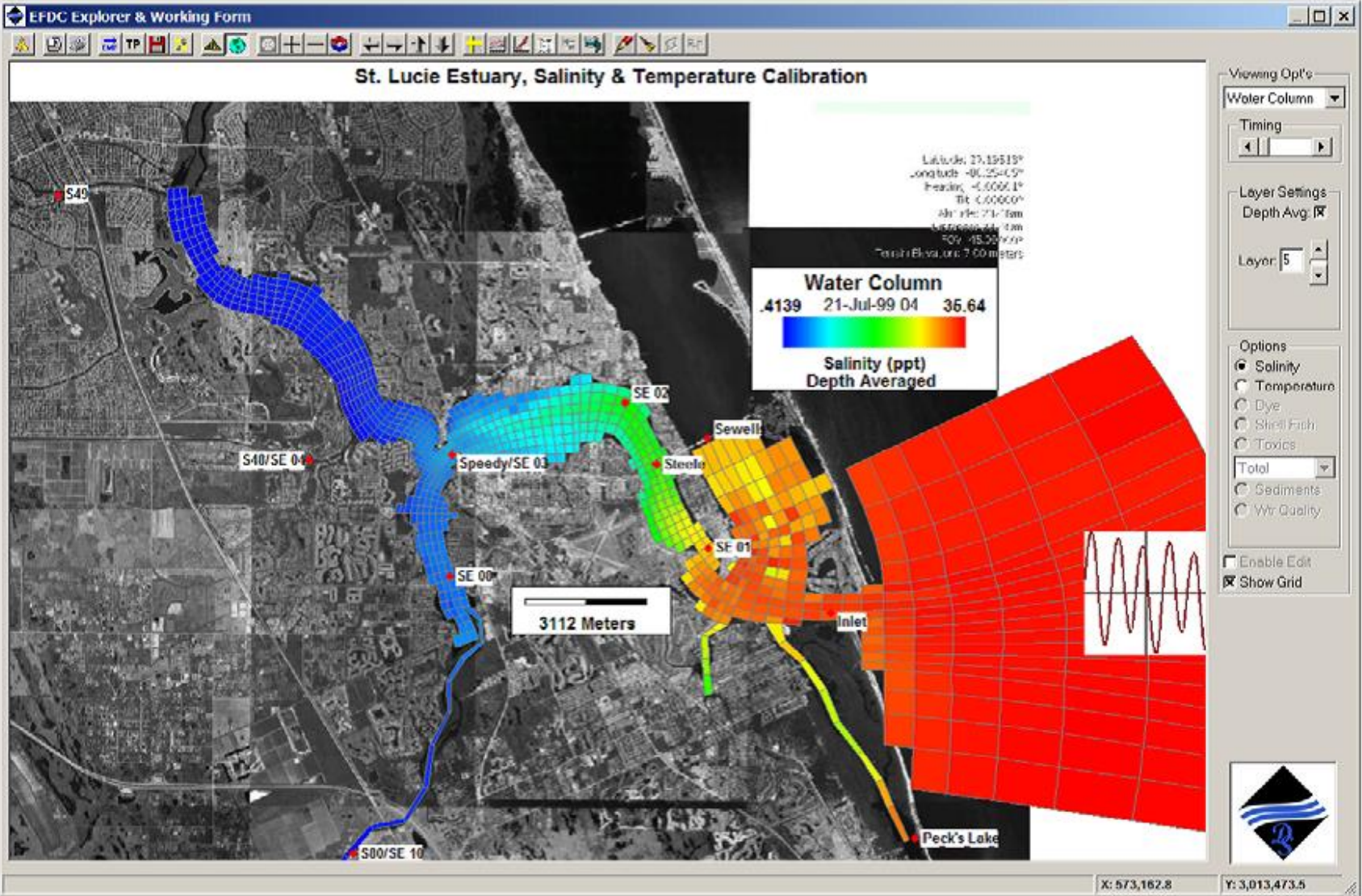


Μαθηματικό Ομοίωμα 2-διαστάσεων

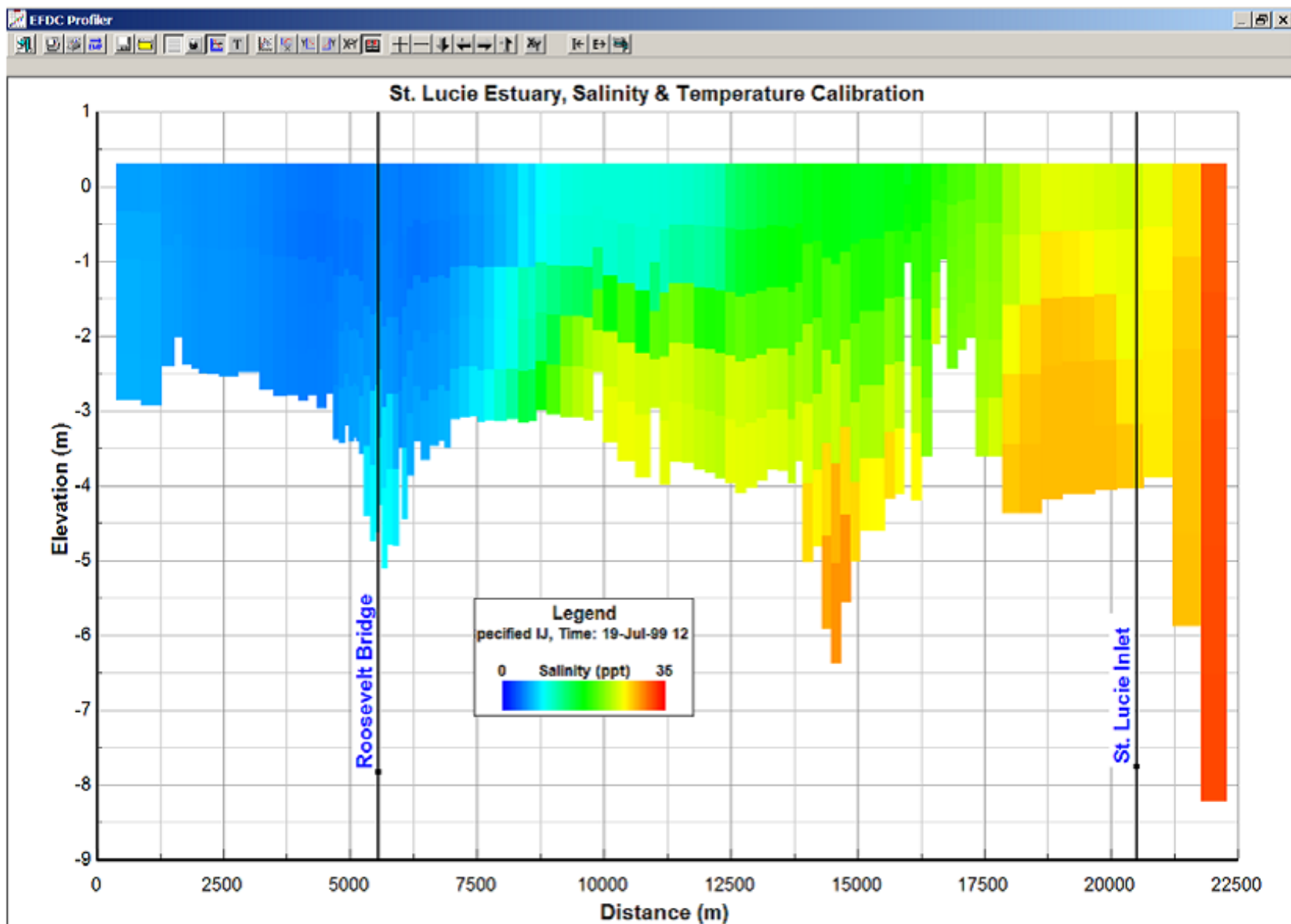
Οριζόντιας Διαμήκους – Κατακόρυφης Διάστασης



Μαθηματικό Ομοίωμα 3-διαστάσεων



Μαθηματικό Ομοίωμα 3-διαστάσεων



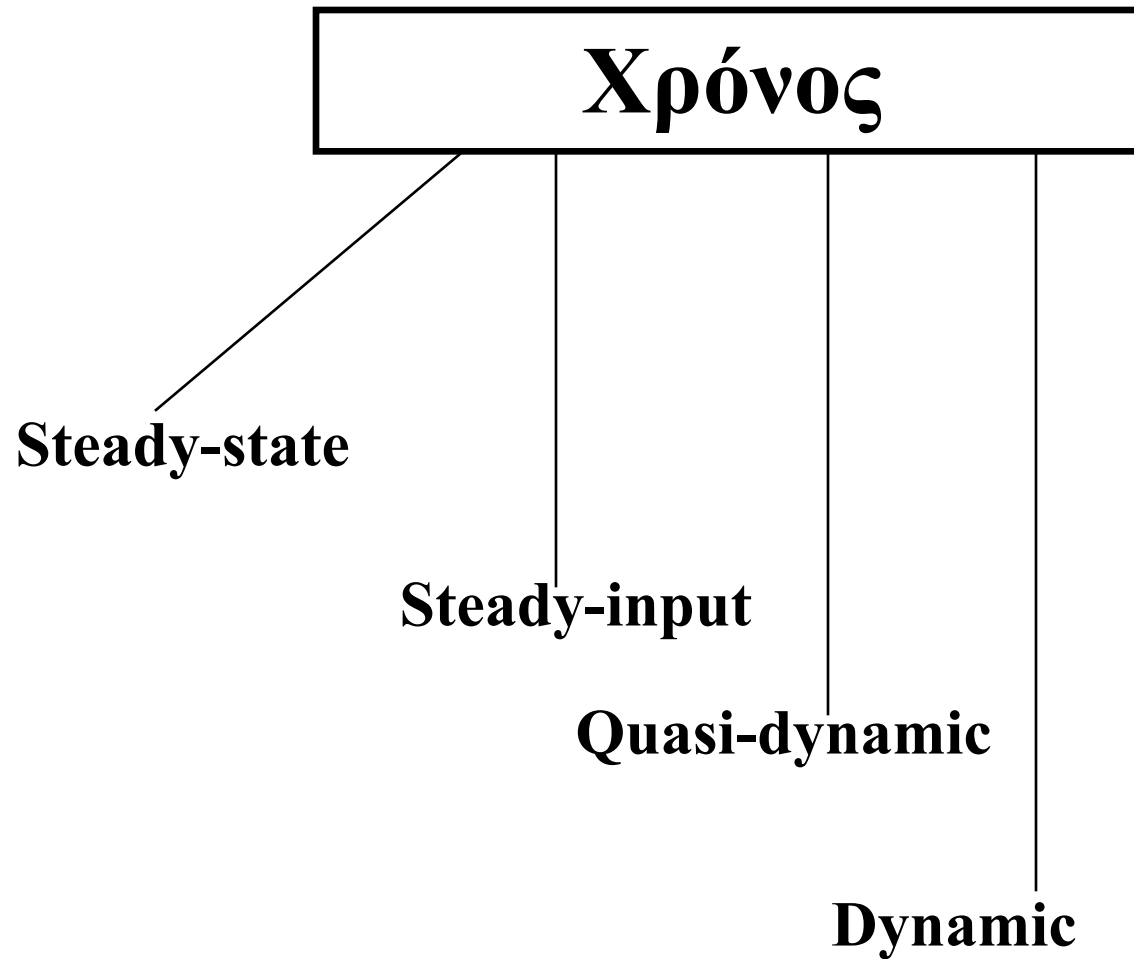
Χαρακτηριστικά Μαθηματικού Ομοιώματος

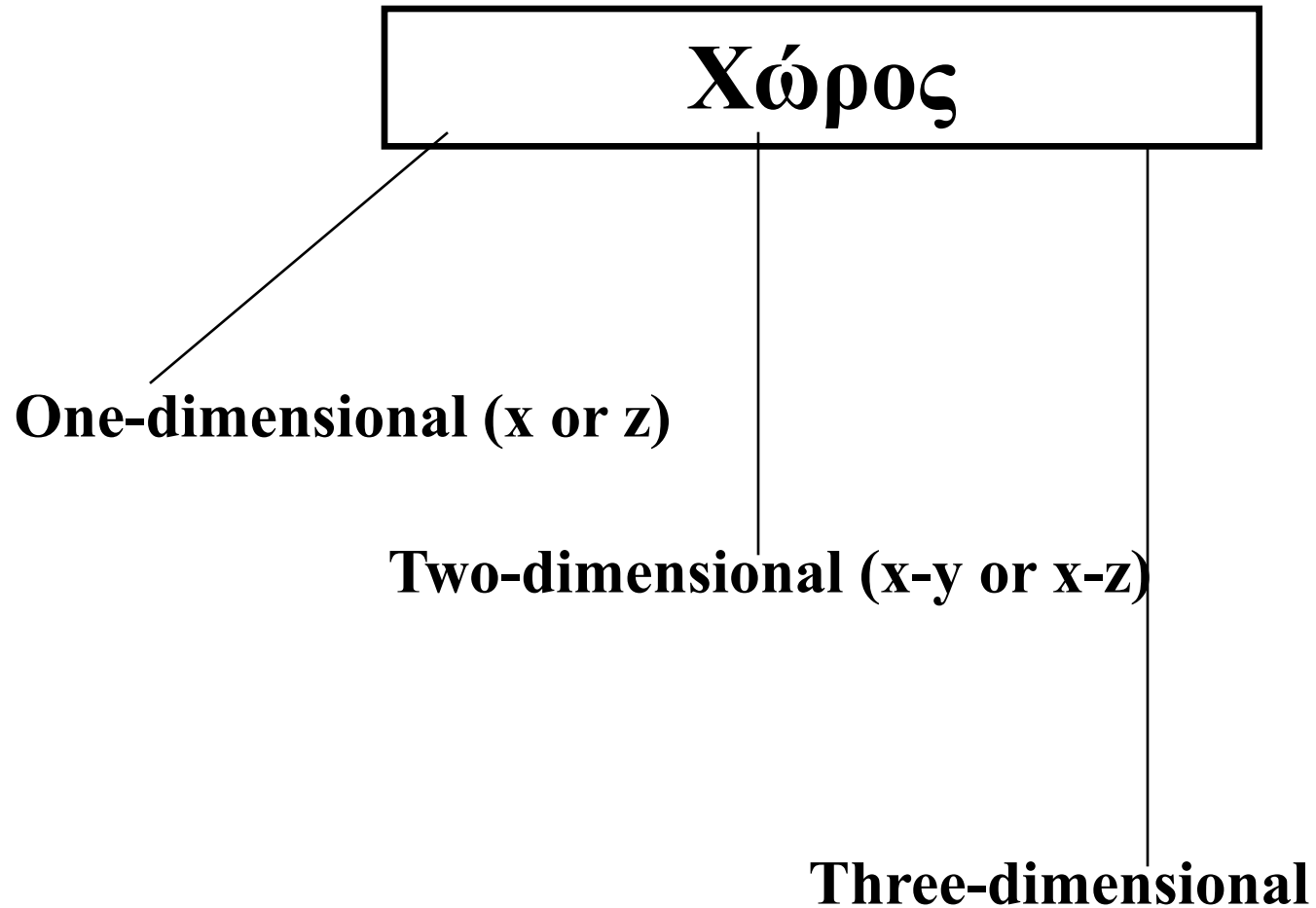
Αριθμός εξαρτημένων – ανεξάρτητων μεταβλητών $\Rightarrow$ αριθμός διεργασιών και αλληλοεπιδράσεων $\Rightarrow$ αριθμός παραμέτρων & οριακών συνθηκών $\Rightarrow$ υπολογιστικός χρόνος

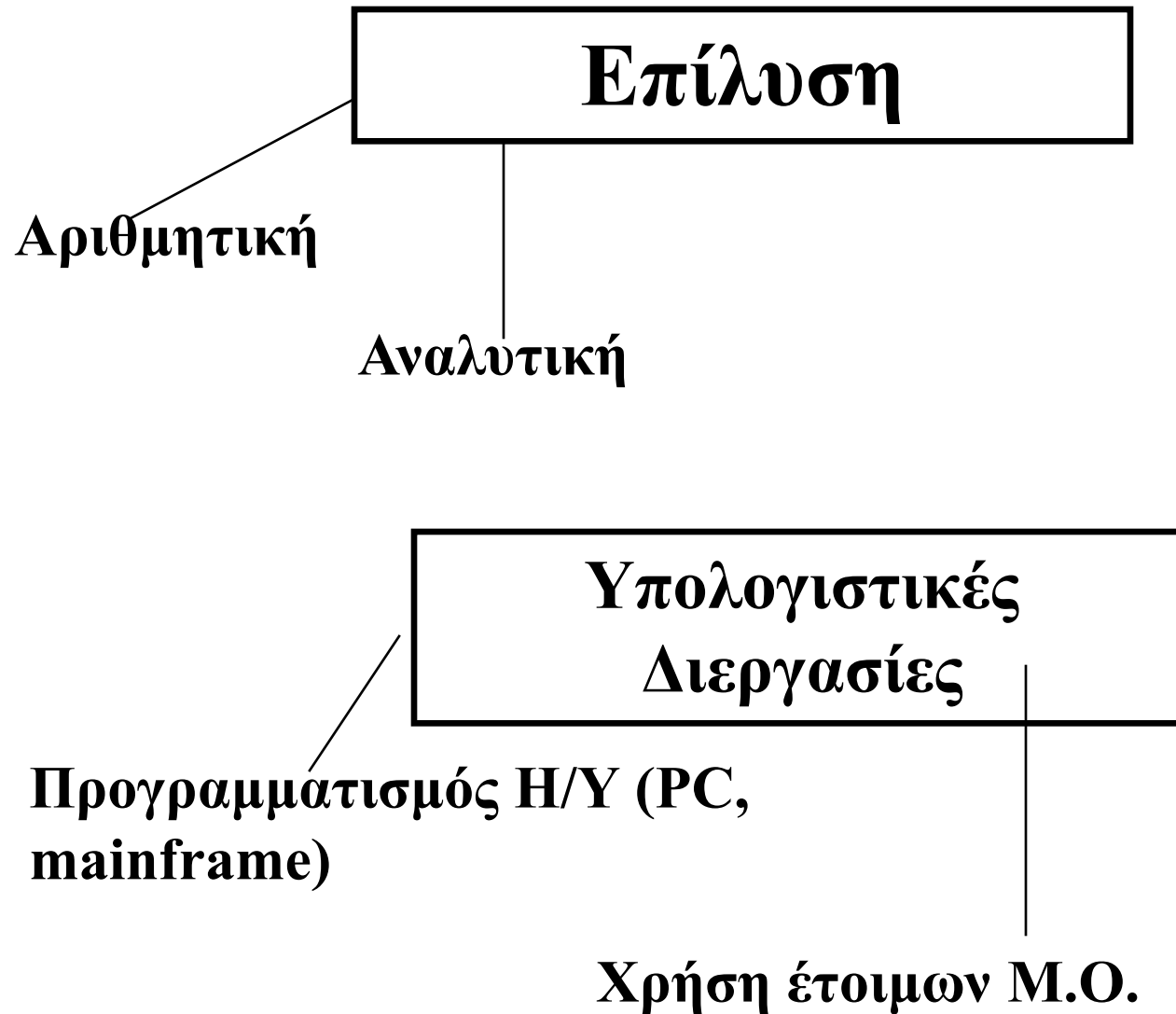
- Χημικές και Βιολογικές Διεργασίες $\Rightarrow$ 0 διάστασης M.O.
- Υδροδυναμικές Διεργασίες $\Rightarrow$ 1 – 3 διαστάσεων M.O.
- Διεργασίες Μεταφοράς – Διάχυσης Ρύπων $\Rightarrow$ 1 – 3 διαστάσεων M.O.

Μεταβλητές M.O.

- Ταχύτητα κίνησης νερού
- Θερμοκρασία, Αλατότητα, Πυκνότητα
- Βακτήρια
- BOD – DO
- Θρεπτικά άλατα
- Ευτροφισμός
- Τοξικοί Ρύποι







Βασικές Αρχές των Μαθηματικών Ομοιωμάτων

- Αρχές Διατήρησης Συντηρητικών Ιδιοτήτων**
 - Μάζα (υδάτινη μάζα, μάζα συστατικών)**
 - Ορμής**
 - Θερμότητας**

Τι είναι η Προσομοίωση

Ορίζεται η διαδικασία εφαρμογής θεμελιώδους γνώσης ή εμπειρίας με σκοπό τη περιγραφή ή τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος.

Οι προσομοιώσεις είναι χαμηλού κόστους – υψηλής απόδοσης εργαλεία τα οποία ‘αντικαθιστούν’ τα συνήθως σύνθετα φυσικά συστήματα.

Τα μοντέλα έχουν πλέον ενταχθεί στη καθημερινή πρακτική της οργάνωσης, της ανάλυσης και της σύνθεσης των παρατηρήσεων και των μετρήσεων που λαμβάνουν χώρα σε φυσικά συστήματα με σκοπό τη κατανόηση των διεργασιών, των αιτιών και των επιπτώσεών τους.

Οι στόχοι μίας προσομοίωσης γενικά μπορεί να είναι:

A) καθαρά ερευνητικοί (research-oriented),

B) καθαρά διαχειριστικοί (management-oriented).

Ειδικότεροι στόχοι θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν:

- Τη **κατανόηση** του συστήματος,
- Την **ανάλυση** της συμπεριφοράς του,
- Τον **έλεγχο ή τη ρύθμιση της λειτουργίας** του ώστε να επιτυγχάνονται συγκεκριμένοι σκοποί,
- Σχεδιαστικές μεθόδους **βελτίωσης ή προσαρμογής**
- Τη **πρόβλεψη** της λειτουργίας του στο μέλλον.

Κάθε ομοίωμα (μοντέλο) αντιπροσωπεύει πιο απλές διαδικασίες από αυτές του πολύπλοκου φυσικού συστήματος – **Παραδοχές**

Οι κυριότερες προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων στη βιβλιογραφία είναι:

- Τα φυσικά ομοιώματα
- Τα εμπειρικά ομοιώματα
- Τα μαθηματικά ομοιώματα

Φυσικά Ομοιώματα

Τα φυσικά ομοιώματα αποτελούν αναπαραστάσεις των πραγματικών φυσικών συστημάτων υπό κλίμακα, με σκοπό να διεξάγουμε πειράματα και παρατηρήσεις.

Τα αποτελέσματα από τέτοια πειράματα μπορεί να επεκταθούν στο πραγματικό φυσικό σύστημα.

Για να γίνει αυτό απαιτείται Διαστατική Ανάλυση (Dimensional Analysis) ώστε να μπορούν τα αποτελέσματα του φυσικού ομοιώματος να μεταφερθούν στο πεδίο με σχετική ασφάλεια.

Εμπειρικά Ομοιώματα

Τα εμπειρικά ομοιώματα (black box models) είναι αυτά όπου ο χρήστης εφαρμόζει την εμπειρία του ώστε να δημιουργήσει συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών του συστήματος, και να χρησιμοποιήσει παλαιότερες μετρήσεις ή παρατηρήσεις ώστε να εξετάσει την ισχύ των σχέσεών του.

Το αποτέλεσμα είναι ένα ομοίωμα το οποίο περιγράφει τις αλλαγές που θα συμβούν σε συγκεκριμένες παραμέτρους του συστήματος ως συνέπεια μεταβολών σε άλλες διασυνδεδεμένες μεταβλητές.

Μαθηματικά Ομοιώματα

Τα μαθηματικά ομοιώματα (ή μηχανιστικά ομοιώματα) βασίζονται στις βασικές θεωρίες και αρχές που διέπουν το σύστημα, όπου μαζί με απλοποιητικές παραδοχές προσπαθούν να συνάψουν μαθηματικές σχέσεις μεταξύ σημαντικών μεταβλητών του συστήματος.

Το τελικό ομοίωμα μπορεί να βαθμονομηθεί με τη χρήση ιστορικών δεδομένων, ή να πιστοποιηθεί με τη χρήση νέων επιπρόσθετων δεδομένων.

Τότε και μόνο τότε το ομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προγνώσεις.

Η πολύ μεγάλη διάδοση των μαθηματικών ομοιωμάτων περιόρισε σημαντικά την εφαρμογή των φυσικών ή εμπειρικών ομοιωμάτων.

Στα ομοιώματα αυτά το σύστημα μετασχηματίζεται από φυσικό σε μαθηματικό σύστημα, το οποίο περιγράφεται από σετ εξισώσεων οι οποίες επιλύονται για το προσδιορισμό συγκεκριμένων άγνωστων μεταβλητών.

Τα σετ των εξισώσεων είναι πάντα 'κλειστά' και γιαυτό συνηθίζεται η απλοποίηση των εξισώσεων μέσω παραδοχών.

Χαρακτηριστικά Μαθηματικών Ομοιωμάτων

Πλήρως Καθορισμένα ή Πιθανολογημένα



Όταν οι μεταβλητές σε ένα στατικό σύστημα ή οι μεταβολές τους σε ένα δυναμικό σύστημα είναι πλήρως καθορισμένες και τα αποτελέσματα είναι μοναδικά, τότε το ομοίωμα είναι **απόλυτα καθορισμένο (deterministic)**.

Όταν υπάρχει μία μη-προβλέψιμη τυχαιότητα στη τιμή ή τη μεταβολή μίας ή περισσοτέρων μεταβλητών του συστήματος, τότε το ομοίωμα θεωρείται **πιθανολογικό (probabilistic)**.

Παράδειγμα

Αν η εισροή ρύπου σε μία λίμνη είναι πλήρως καθορισμένη (παροχή, φορτίο, όγκος λίμνης, κλπ.), τότε το ομοίωμα παράγει ένα απόλυτα καθορισμένο αποτέλεσμα (deterministic).

Αν θεωρήσουμε μία μέση ροή μάζας του ρύπου η οποία διακυμαίνεται γύρω από το μέσο με τρόπο που πιθανολογούμε χωρίς να γνωρίζουμε ακριβώς, τότε το ομοίωμα καλείται πιθανολογικό (probabilistic).

Συνεχές ή διακριτοποιημένο ομοίωμα



Τα συνεχή ομοιώματα συνήθως αποτελούνται από διαφορικές εξισώσεις, ενώ τα διακριτοποιημένα αποτελούνται από εξισώσεις διαφορών.

Στατικό ή δυναμικό ομοίωμα



Χωρικά μεταβαλλόμενο ή ομοιογενές ομοίωμα



$$C = f(x,y,z)$$

Τα ομοιογενή στατικά ομοιώματα αντιπροσωπεύονται από αλγεβραϊκές εξισώσεις, ενώ τα δυναμικά ομοιογενή ομοιώματα από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (ordinary differential equations). Τα χωρικά μεταβαλλόμενα ομοιώματα αντιπροσωπεύονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (partial differential equations).

Γραμμικό ή μη-γραμμικό ομοίωμα



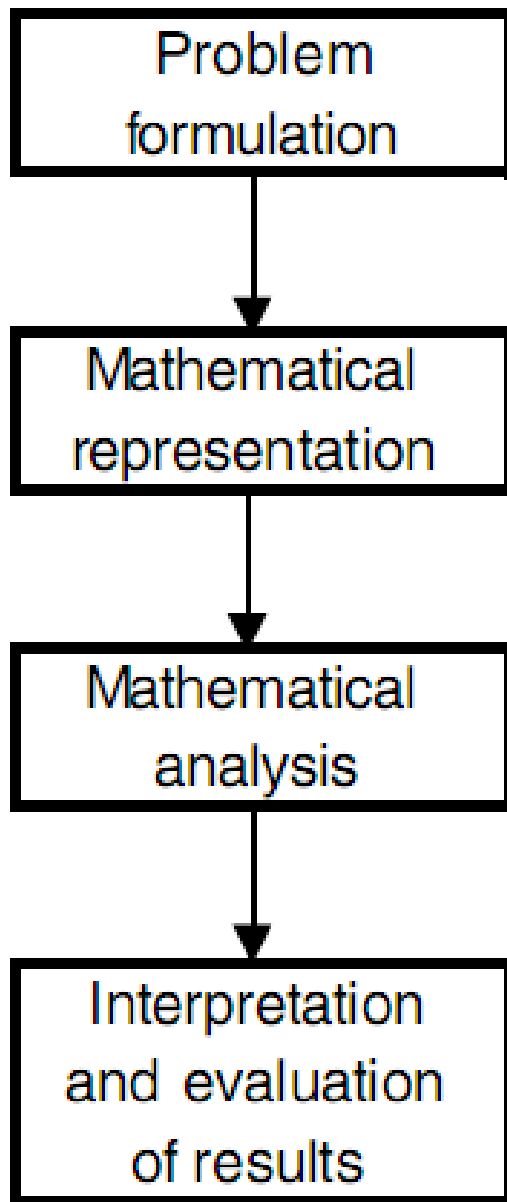
Όταν μία εξίσωση περιέχει μόνο μία μεταβλητή σε κάθε όρο, και η μεταβλητή βρίσκεται πάντα στη πρώτη δύναμη, τότε το ομοίωμα καλείται γραμμικό, αλλιώς είναι μη-γραμμικό.

Αναλυτικό ή αριθμητικό ομοίωμα



Στόχοι Περιβαλλοντικών Ομοιωμάτων

- Για τη βελτίωση της κατανόησης των περιβαλλοντικών διεργασιών, και της επίδρασής τους στη μεταφορά ρύπων σε ένα σύστημα,
- Για το προσδιορισμό βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης συγκέντρωσης ρύπου σε διάφορα τμήματα του οικοσυστήματος, και την εκτίμηση της έκθεσης, των επιπτώσεων και των κινδύνων από τους ρύπους αυτούς,
- Για τη πρόβλεψη μελλοντικών συγκεντρώσεων ρύπων υπό την επίδραση διαφορετικών φορτίων,
- Για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων απομείωσης ρύπων,
- Για τη προσομοίωση σύνθετων, επικίνδυνων και υψηλού κόστους διεργασιών που λαμβάνουν χώρα υπό πραγματικές συνθήκες,
- Για την ανάπτυξη μετα-δεδομένων για στατιστική επεξεργασία, ανάλυση και οπτικοποίηση,
- Για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων δραστηριοτήτων που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν μελλοντικά.



1. Καθορισμός σκοπού ομοιώματος
2. Χαρακτηρισμός του συστήματος
3. Απλοποίηση του συστήματος

1. Καθορισμός θεωρητικού πλαισίου
2. Παραγωγή συσχετίσεων
3. Καθορισμός συσχετίσεων

1. Βαθμονόμηση ομοιώματος
2. Πιστοποίηση ομοιώματος
3. Χρήση πιστοποιημένου ομοιώματος για πρόγνωση

M.O. 0-διάστασης (Box Models)

- Η αριθμητική επίλυση επιτρέπει περισσότερες δυνατότητες περιγραφής των διεργασιών (π.χ., ευτροφισμός, τοξικοί ρύποι)
- Επιτρέπει μεγαλύτερες δυνατότητες χωρικής διακριτοποίησης
- Οι ροές μάζας και οι συντελεστές μείξης παραμετροποιούνται από:
 - δεδομένα πεδίου και εμπειρικές σχέσεις
 - παράγονται από άλλα M.O. (π.χ., υδροδυναμικά)

Χρόνος Ανανέωσης (Flushing Time)

Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την αναπλήρωση μίας μάζας νερού ή μίας διαλυμένης ουσίας.

Σε καλά αναμεμιγμένα συστήματα ισχύει ο ορισμός: «**Χρόνος ανανέωσης μίας ουσίας είναι ο χρόνος που προκύπτει διαιρώντας την μάζα μίας ουσίας σε ένα σύστημα προς τον ρυθμό απομάκρυνσής της από το σύστημα**».

Επομένως για μία χημική ουσία:

$$T_f = \frac{M}{F}$$

Όπου M η συνολική μάζα της ουσίας και F η ροή μάζας στο όριο με την ανοικτή θάλασσα.

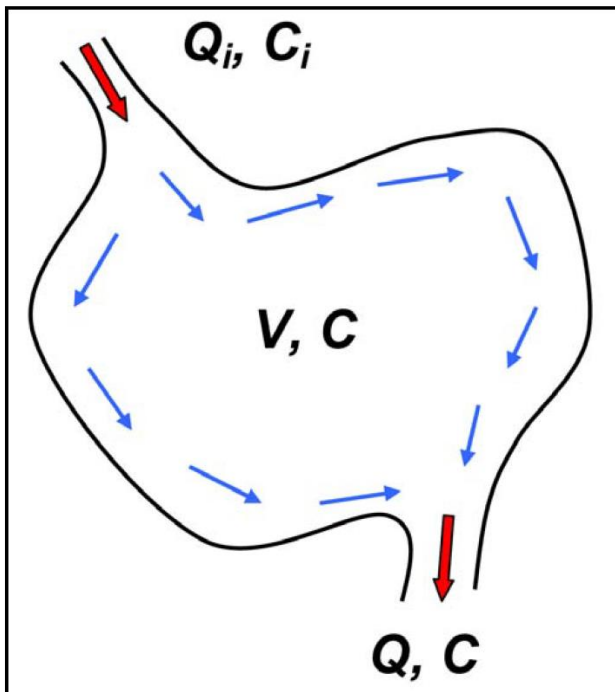
Ο Χρόνος Ανανέωσης εκφράζει την γενική τάση ανταλλαγής του συστήματος με την ανοικτή θάλασσα χωρίς να υπεισέρχεται σε λεπτομέρειες σχετικές με τις φυσικές διεργασίες και την χωρική κατανομή φυσικών ιδιοτήτων νερού.

Χρόνος Ανανέωσης (Flushing Time)

Σε περίπτωση υδάτινης μάζας:

$$T_f = \frac{V}{Q}$$

Όπου V είναι ο όγκος του παράκτιου συστήματος και Q η ροή όγκου στο όριο με την ανοικτή θάλασσα.

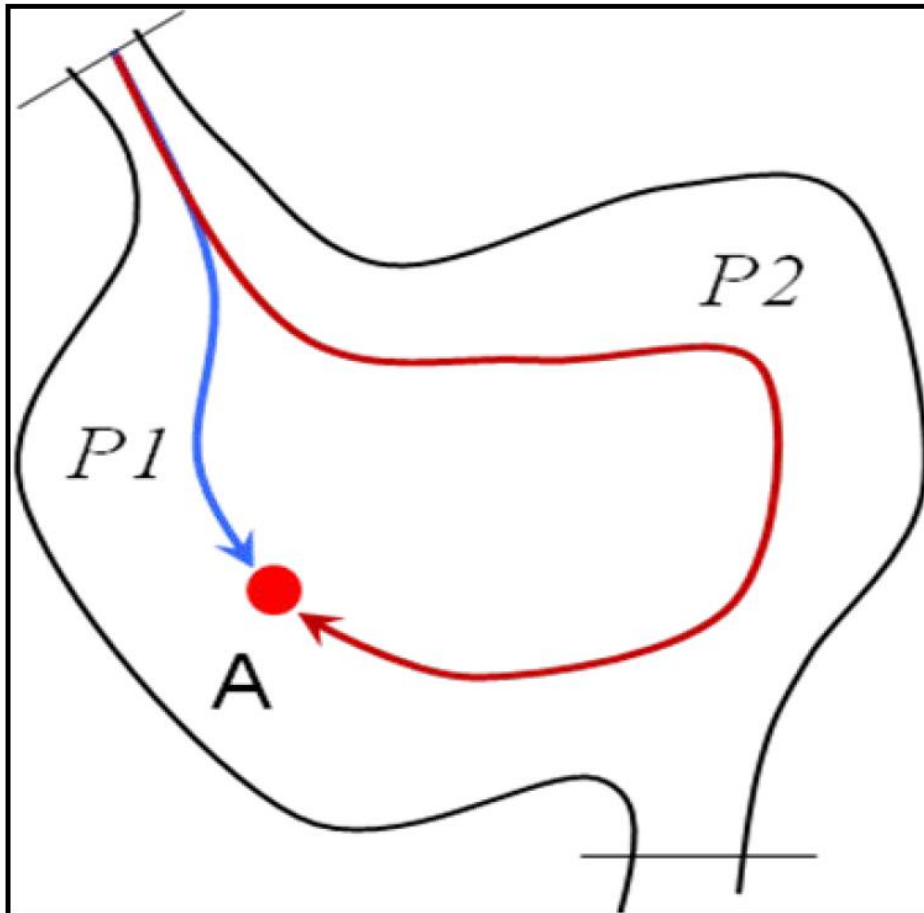


Ο χρόνος ανανέωσης μετρά τον χρόνο που απαιτείται για να απομακρυνθεί ένας ρύπος από το σύστημα, δηλ. να μειωθεί η συγκέντρωσή του.

$$V \frac{dC}{dt} = Q_i C_i - QC$$

Ηλικία Νερού (Water Age)

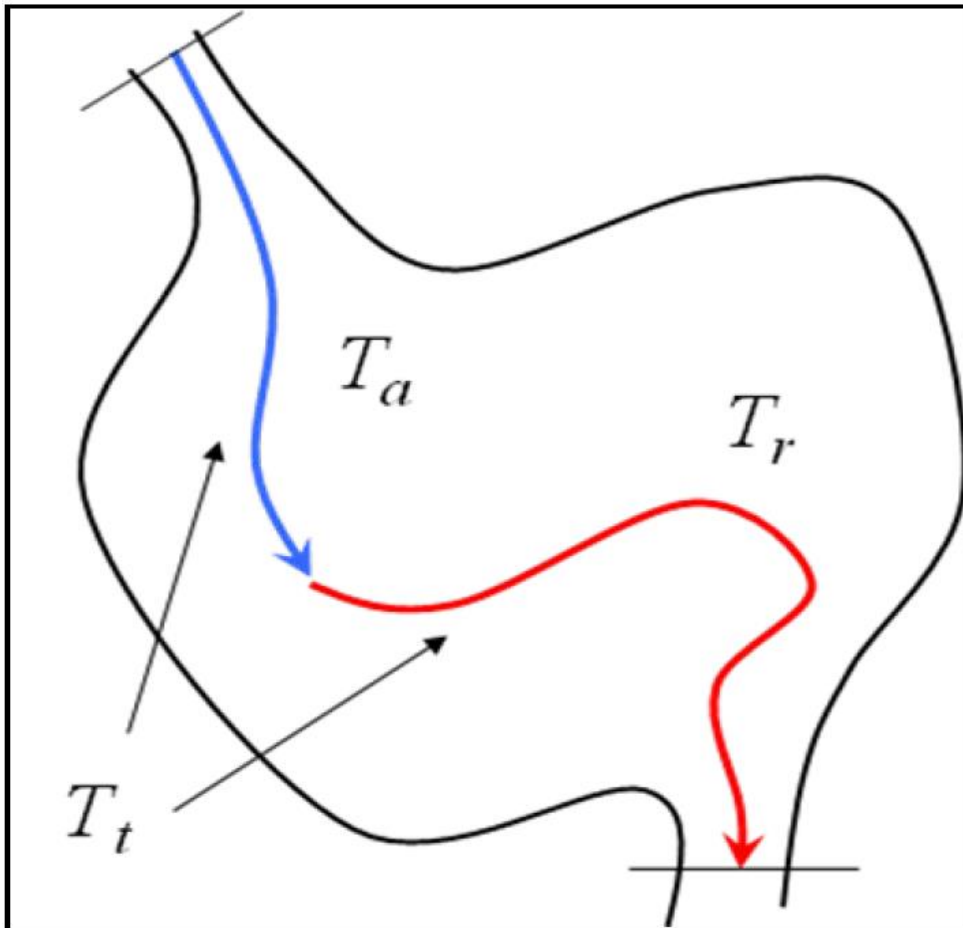
Ο Χρόνος Ανανέωσης είναι ένας μέσος όρος χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την απομάκρυνση μίας υδάτινης μάζας. Η **ηλικία του νερού** (T_a) είναι ο χρόνος από την στιγμή εισόδου μίας υδάτινης μάζας στο σύστημα. Η Ηλικία Νερού μεταβάλλεται κατά την κίνηση της υδάτινης μάζας μέσα στο σύστημα.



Θεωρώντας ότι η υδάτινη μάζα κινείται από το ποτάμιο στόμιο προς το ανοικτό όριο, μία μάζα νερού έχει μικρότερη ηλικία όσο πιο κοντά βρίσκεται προς το ποτάμιο όριο. Αν δύο υδάτινες μάζες μπουν ταυτόχρονα στο παράκτιο σύστημα και κινηθούν ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές, τότε όταν βρεθούν στο σημείο A έχουν διαφορετικές ηλικίες.

Χρόνος Παραμονής (Residence Time) και Χρόνος Διέλευσης (Transit Time)

Ο Χρόνος Παραμονής (T_r) είναι ο χρόνος που απαιτείται για μία υδάτινη μάζα που βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος να απομακρυνθεί από αυτό. Ο Χρόνος Παραμονής είναι συνάρτηση της σχετικής θέσης της υδάτινης μάζας εντός του συστήματος.



Επομένως, η ηλικία νερού και ο χρόνος παραμονής εκφράζουν τον συνολικό χρόνο που απαιτείται για μία υδάτινη μάζα ώστε να κινηθεί από το ποτάμιο στόμιο έως το ανοικτό με την θάλασσα όριο. Αυτός ο χρόνος καλείται **Χρόνος Διέλευσης (T_t)**.

Το Μαθηματικό Ομοίωμα LOICZ για τη Προσομοίωση των Ροών N, P, C στη Παράκτια Ζώνη

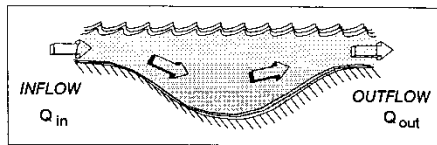
- Το μοντέλο LOICZ συμβάλει στον Υπολογισμό των Ροών C, N, P στη Παγκόσμια Παράκτια Ζώνη.
- Το μοντέλο LOICZ προσομοιώνει τις ανόργανες διεργασίες που σχετίζονται με τις εισροές N, P, C και τις συνδέει με τη παρουσία και την ανάπτυξη αυτότροφων ή ετερότροφων οργανισμών
- Το μοντέλο LOICZ περιγράφει τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή ως συνάρτηση:
 - Των χερσαίων εισροών ενώσεων C, N, P
 - Των ωκεάνιων ανταλλαγών των ενώσεων C, N, P
 - Των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις χερσαίες λεκάνες απορροής που επικοινωνούν με τη θάλασσα
 - Η προσομοίωση των τοπικών διεργασιών συμβάλλει στη κατανόηση των παγκόσμιων διεργασιών.

Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας

$$\text{Συσσώρευση Μάζας} = \text{Πηγές Μάζας} - \text{Αποθήκευση Μάζας}$$

- Αν $\text{Πηγές} > \text{Αποθήκευσης} \Rightarrow \text{Συσσώρευση} > 0 \Rightarrow \text{αύξηση μάζας στη περιοχή μελέτης}$
- Αν $\text{Πηγές} < \text{Αποθήκευσης} \Rightarrow \text{Συσσώρευση} < 0 \Rightarrow \text{μείωση μάζας στη περιοχή μελέτης}$
- Αν $\text{Πηγές} = \text{Αποθήκευσης} \Rightarrow \text{Συσσώρευση} = 0 \Rightarrow \text{διατήρηση μάζας στη περιοχή μελέτης}$

WATER BALANCE FOR A SIMPLE POND
(Non-Reactive Material)



$$\text{Water Mass} = \rho V$$

$$\rho [M L^{-3}]$$

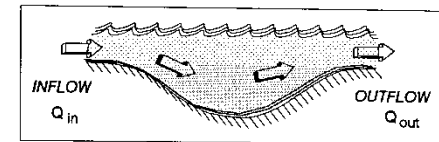
$$V [L^3]$$

$$\text{Accumulation} = \frac{\text{Change in Water Mass}}{\text{Time}}$$

$$= \frac{\Delta \rho V}{\Delta t} \quad \text{Where } \Delta \text{ is Change}$$

$$= \frac{dV\rho}{dt} \quad \text{if } \Delta \text{ is "small"} \quad \left[\frac{M L^{-3}}{L^3 T} \right]$$

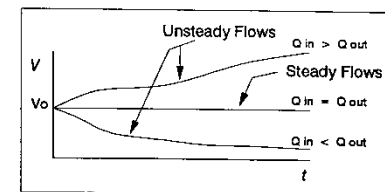
WATER BALANCE FOR A SIMPLE POND
(Non-Reactive Material)



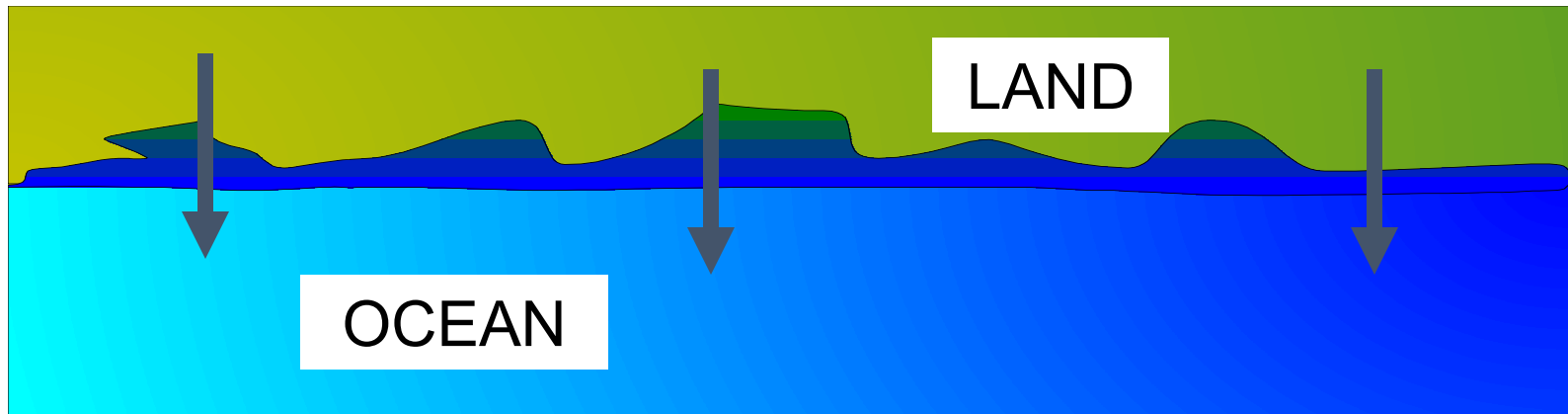
$$\text{Accumulation} = \text{INFLOW} - \text{OUTFLOW}$$

$$\frac{d\rho V}{dt} = (\rho_{in} - \rho_{out}) Q$$

$$\text{OR, } \frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad \text{for constant } \rho$$



Η Παγκόσμια Παράκτια Ζώνη: Καλύπτει μια στενή, ανομοιογενή και ‘βιο-χημικά’ ενεργή λωρίδα



Η παγκόσμια παράκτια ζώνη είναι μήκους ~ 500,000 χλμ και μέσου πλάτους περίπου 50 χλμ

Το μεγαλύτερο μέρος των χημικών ενώσεων που εισέρχονται στον ωκεανό, διέρχονται μέσω της παγκόσμιας παράκτιας ζώνης

Οι εντονότερες βιο-γεωχημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα στη περιοχή αυτή (εκβολές ποταμών, ημίκλειστοι κόλποι, λιμνοθάλασσες, υφαλοκρηπίδες).

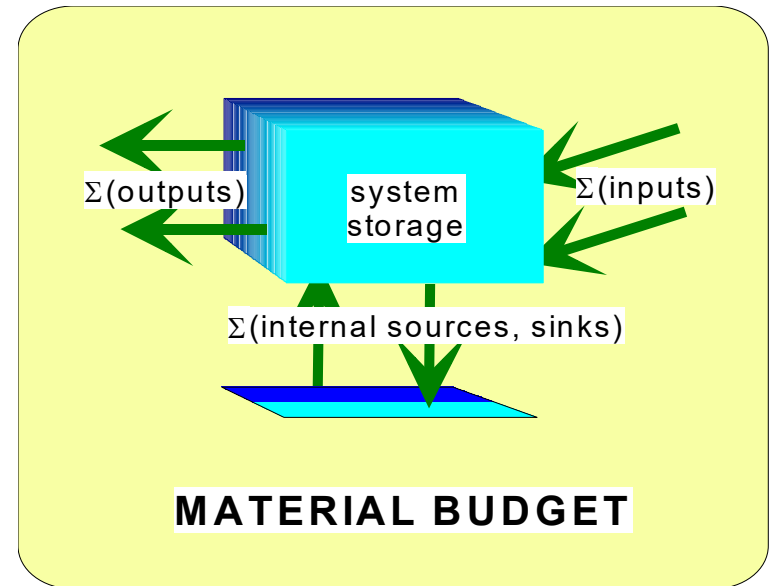
Ανάπτυξη μίας Παγκόσμια Εφαρμόσιμης Τεχνικής Υπολογισμού των Ροών C, N, P στη Παράκτια Ζώνη

- **Δυνατότητα να εργαζόμαστε με δευτερογενή δεδομένα;**
- **Χαμηλές απαιτήσεις σε δεδομένα;**
- **Ευρέως εφαρμόσιμη μέθοδος;**
- **Ευκολία κατανόησης διεργασιών $\Rightarrow$ Συγκρίσιμα συμπεράσματα $\Rightarrow$ συγκρίσιμες διαδικασίες λήψης απόφασης;**
- **Παροχή πληροφοριών σχετικά με τις διεργασίες και τις ροές CNP.**

LOICZ Μεθοδολογία Ανάπτυξης Ισοζυγίων

- Διατήρηση Μάζας: η πλέον βασική αρχή της Οικολογίας και της Γεωχημίας.

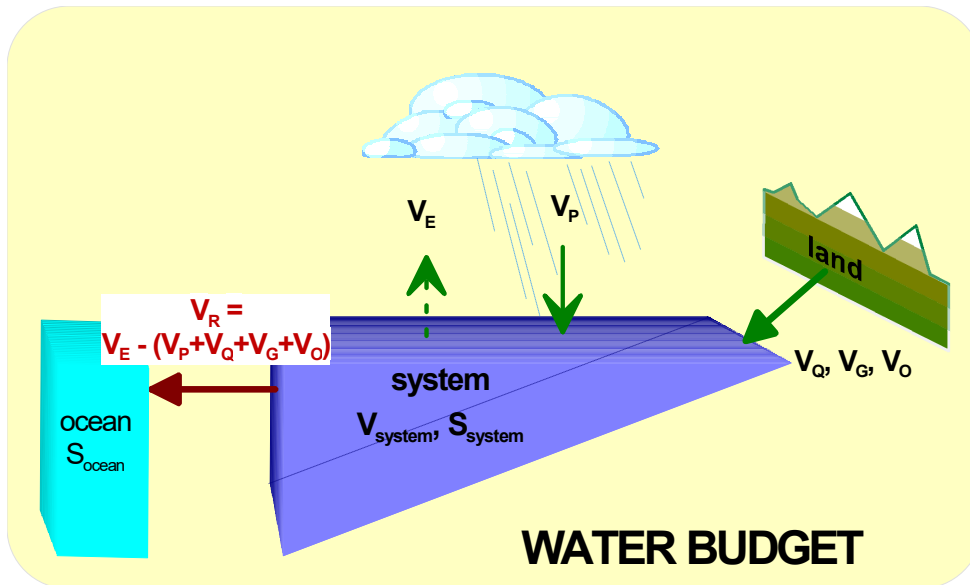
$$\frac{dM}{dt} = \sum inputs - \sum outputs + \sum [sources - sinks]$$



Ο όρος " dM/dt " : Μεταβολή μάζας κάθε υλικού του συστήματος σε σχέση με το χρόνο.

Συνήθως $dM/dt = 0 \Rightarrow$ η μάζα του συστήματος διατηρείται σταθερή $\Rightarrow$ σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας (steady state).

Ισοζύγιο Νερού



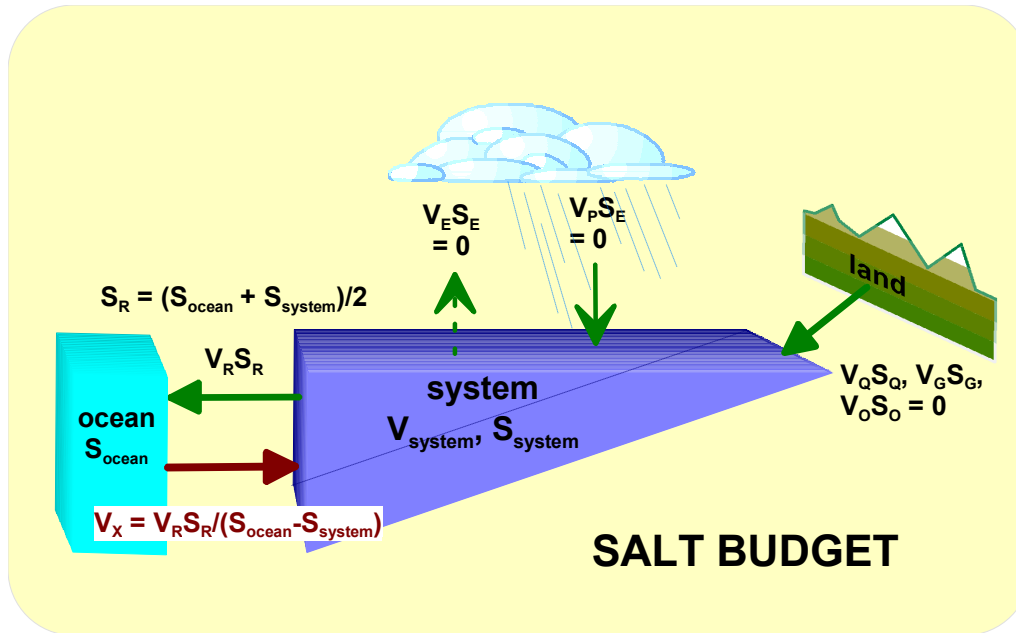
• Ισοζύγιο Νερού

- Γνωστές εισροές γλυκού νερού.
- Υπολογισμός υπολειπόμενης ροής (V_R) για τη διατήρηση του όγκου.

$$\frac{dM}{dt} = \sum inputs - \sum outputs + \sum [sources - sinks]$$

$$V_R = -V_Q - V_P - V_O - V_G + |V_E|$$

Ισοζύγιο Άλατος



• Ισοζύγιο Άλατος

- Οι καθαρές ροές είναι γνωστές.
- Ο όρος μείξης (V_X) προκύπτει από την αρχή διατήρησης άλατος

$$0 = \sum (V_E S_E + V_P S_P + V_G S_G + V_O S_O + V_R S_R + V_X S_{ocean}) - \sum (V_E S_E + V_X S_{system})$$

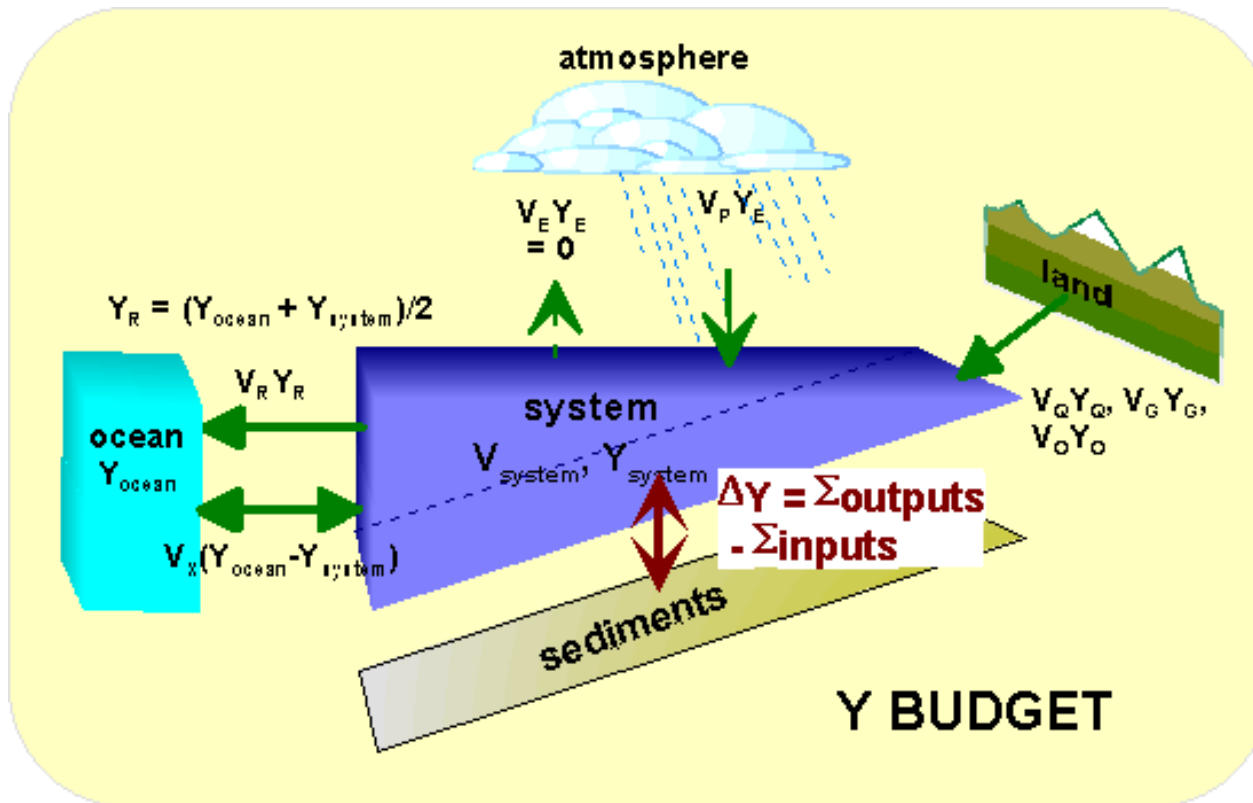
$$0 = \sum (V_R S_R + V_X S_{ocean}) - \sum (V_X S_{system})$$

$$V_X = \frac{V_R S_R}{(S_{system} - S_{ocean})}$$

Υπολογισμός Χρόνου Ανανεωσιμότητας Συστήματος

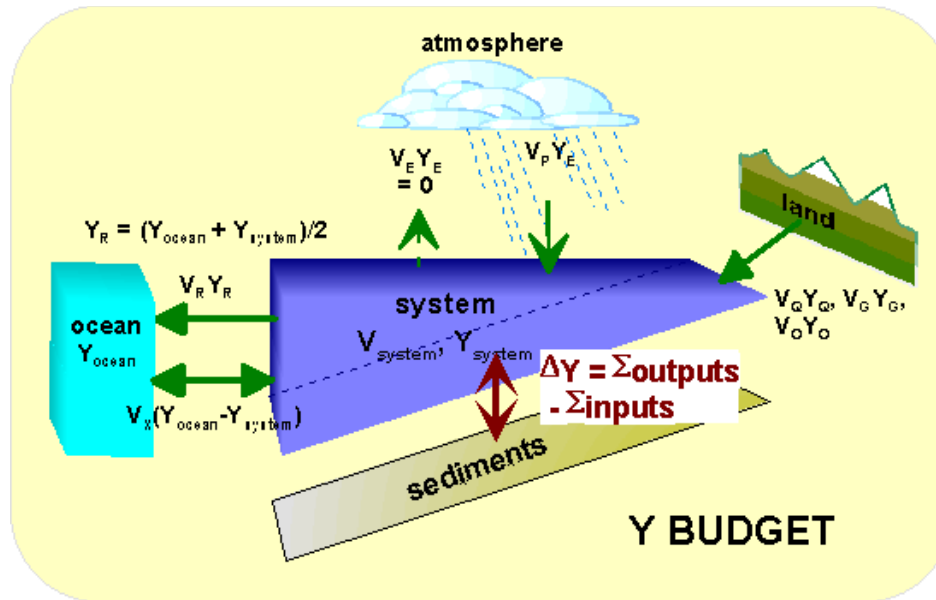
$$\tau = \frac{V_{\text{sys}}}{(V_x + |V_R|)}$$

Ισοζύγιο CNP



$$d(VY)/dt = V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_O Y_O + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{ocean} - Y_{gulf}) + \Delta Y$$

Ισοζύγια Φωσφόρου



$$d(VY)/dt = V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_O Y_O + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{ocean} - Y_{gulf}) + \Delta Y$$

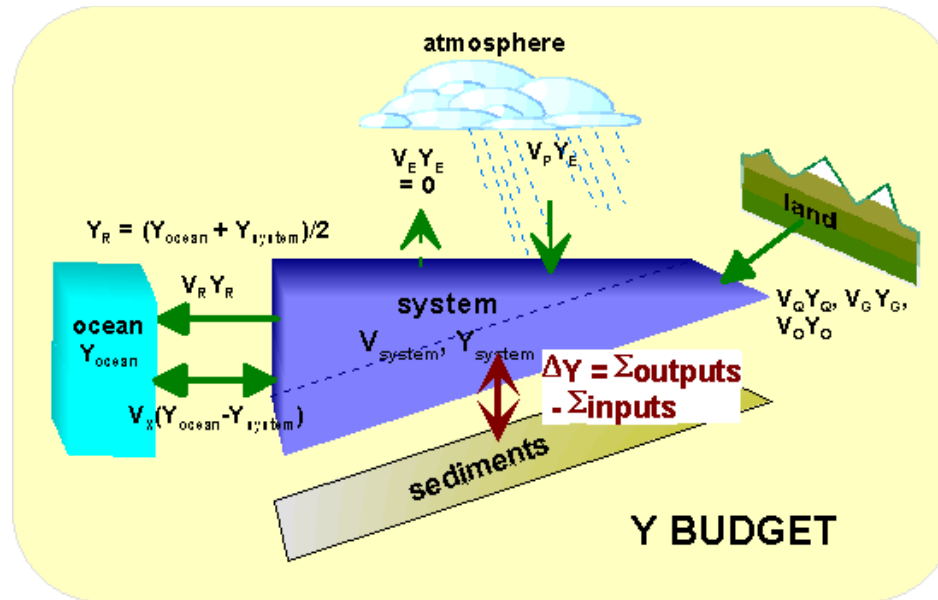
- $\Delta DIP > 0 \Rightarrow$ DIP κινείται από το ίζημα προς το σύστημα $\Rightarrow$ το σύστημα παράγει οργανικό υλικό μέσω της αναπνοής $\Rightarrow (p-r) < 0$
- $\Delta DIP < 0 \Rightarrow$ DIP κινείται από το σύστημα προς το ίζημα $\Rightarrow$ το σύστημα καταναλώνει οργανικό υλικό μέσω της φωτοσύνθεσης $\Rightarrow (p-r) > 0$

$$[p-r] = -\Delta DIP \times (C:P)_{part}$$

$$(C:P)_{part} = 106:1 \text{ (πλαγκτόν)}$$

$$(C:P)_{part} = 550:1 \text{ (μακροφύκη)}$$

Ισοζύγιο Αζώτου



$$d(VY)/dt = V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_O Y_O + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{ocean} - Y_{gulf}) + \Delta Y$$

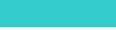
$$[nfix - denitr] = \Delta N_{obs} - \Delta N_{exp} = \Delta N_{obs} - \Delta DIP \times (N:P)_{part}$$

- $(nfix - denitr) > 0 \Rightarrow$ nitrification prevails $\Rightarrow$ Converts N_2 to organic nitrogen
- $(nfix - denitr) < 0 \Rightarrow$ denitrification prevails $\Rightarrow$ Converts nitrate to Nitrogen gas (never measured)

ESTIMATION OF WASTE LOAD

(This spreadsheet calculates DIN and DIP load in waste generated by various activities. Knowledge of the activities relevant to your coastal water body is necessary and the only input needed in the spreadsheet would be the activity level of the waste generating activity in column F. Sum of the DIN and DIP load are given at the bottom of the table (column L and M). There are two other spreadsheets at the bottom to calculate DIN and DIP concentration from BOD and COD concentration.)

Activity	Discharge coef (unit)	Reference	Activity level (no) (unit)	Total N (kg/yr)	Total P (kg/yr)	%entering the bay	DIN (mol/yr)	DIP (mol/yr)
Household								
a. solid waste	0.71 kgN/pm/yr 0.07 kgP/pm/yr	a b	70000 person	49700	4900	20	269800	15806.45161
b. domestic sewage	1.53 kgN/pm/yr 0.18 kgP/pm/yr	c c	70000 person	107100	12600	100	2907000	203225.8065
c. detergent	0.18 kgP/pm/yr	c	70000 person		12600	100	0	203225.8065
Urban runoff (unsewered areas)	1.9 mgN/liter 0.4 mgP/liter	d d	avg rain(m/yr) x urban area(m2)	0	0	25	0	0
Livestock								
a. cattle	2.74 kgN/cow/yr 0.4 kgP/cow/yr	e e	4755 cow	13028.7	1902	30	106090.8429	9203.225806
b. horses	3.1 kgN/hor/yr 0.5 kgP/hor/yr	e e	27 horse	83.7	13.5	30	681.5571429	65.32258065
c. sheep	0.25 kgN/shp/yr 0.023 kgP/shp/yr	e e	52711 sheep	13177.75	1212.353	30	107304.5357	5866.224194
a. piggery	0.57 kgN/pig/yr 0.18 kgP/pig/yr	e e	1829 pig	1042.53	329.22	30	8489.172857	1593
b. poultry	0.0024 kgN/bird/yr 0.1 kgP/bird/yr	f f	95043 bird	228.1032	9504.3	30	1857.411771	45988.54839

Aquaculture								
a. prawn	5.2 kgN/ton/yr	g	 ton prawn	0	0	25	0	0
	4.7 kgP/ton/yr	g						
b. milkfish	2.9 kgN/ton/yr	b	 ton fish	0	0	25	0	0
	2.6 kgP/ton/yr	b						
Non-point agricultural runoff								
a. cropland erosion	1.68 kgN/ton	b	 ton soil eroded/yr	0	0	25	0	0
	0.04 kgP/ton	b						
Manufacturing								
a. slaughtering								
- cattle	0.3 kgN/cattle	e	 cattle/yr	0	0	25	0	0
	0.02 kgP/cattle	e						
- pig	0.08 kgN/pig	e	 pig/yr	0	0	25	0	0
	0.006 kgP/pig	e						
- lamb	0.04 kgN/lamb	e	 lamb/yr	0	0	25	0	0
	0.003 kgP/lamb	e						
b. packing								
- cattle	0.56 kgN/cattle	e	 cattle/yr	0	0	25	0	0
	0.15 kgP/cattle	e						
- pig	0.16 kgN/pig	e	 pig/yr	0	0	25	0	0
	0.05 kgP/pig	e						
- lamb	0.07 kgN/lamb	e	 lamb/yr	0	0	25	0	0
	0.02 kgP/lamb	e						
c. dairy products								
- butter	1.95 kgN/ton	e	 ton butter/yr	0	0	25	0	0
	0.42 kgP/ton	e						
- cheese	1.56 kgN/ton	e	 ton cheese/yr	0	0	25	0	0
	0.34 kgP/ton	e						
- condensed milk	0.39 kgN/ton	e	 ton milk/yr	0	0	25	0	0
	0.08 kgP/ton	e						
- powdered milk	1.5 kgN/ton	e	 ton milk/yr	0	0	25	0	0
	0.34 kgP/ton	e						

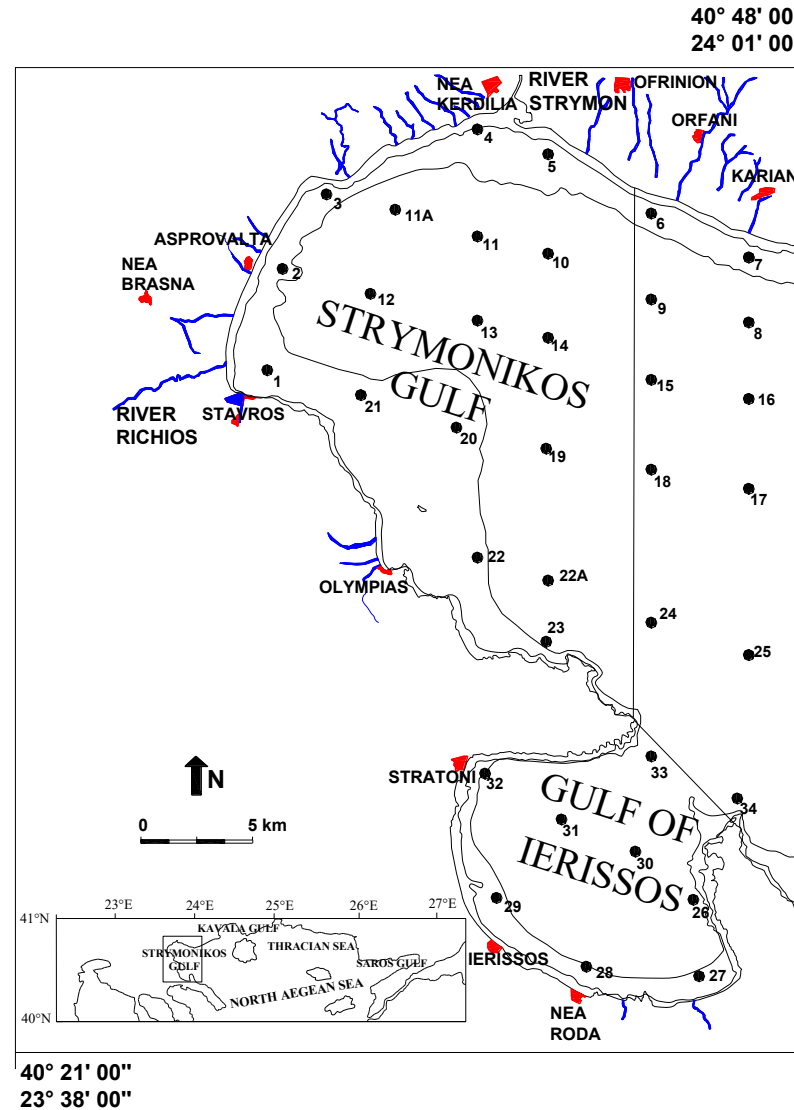
d. canning									
- catfish	0.65 kgN/ton	e		ton catfish/yr	0		25	0	
- blue crab	1 kgN/ton	e		ton crab/yr	0		25	0	
- shrimp	10 kgN/ton	e		ton shrimp/yr	0		25	0	
- tuna	2.1 kgN/ton	e		ton tuna/yr	0		25	0	
e. bakery products	0.005 kgN/ton	e		ton baked products/yr	0		25	0	
f. specialty foods									
- prepared dinners	0.44 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.19 kgP/ton	e							
- frozen bakery pdts	0.3 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.08 kgP/ton	e							
- dressing, sauces and spreads	0.04 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.03 kgP/ton	e							
- meat specialty	0.57 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.1 kgP/ton	e							
- canned soups and baby foods	0.47 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.18 kgP/ton	e							
- sauced vegetable	1.1 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.33 kgP/ton	e							
- sweet syrups, jams, jellies	0.04 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.05 kgP/ton	e							
- Chinese and Mexican food	0.28 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.14 kgP/ton	e							
- breaded frozen pdt	2.6 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	0.35 kgP/ton	e							
g. wheat, starch gluten	3.7 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0	0
	1 kgP/ton	e							
h. yeast manufacture	127 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0	
i. Tanneries									
- cattlehide	20.3 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0	
- sheepskin	4 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0	
- pigskin	5.7 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0	
j. Plywood	0.24 kgN/1000m3	e		m3/yr	0		25	0	

k. Fertilizer								
- ammonia nitrate	2.9 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	70	0
- ammonia sulfate	10 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0
- urea	10 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0
- phosphoric acid	5 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	70	0
	17 kgP/ton	e						
- normal sugar phosphate	0.65 kgP/ton	e		ton/yr		0	25	0
- triple sugar phosphate	0.32 kgP/ton	e		ton/yr		0	25	0
- NPP fertilizer	0.4 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0
l. Drugs and medicines								
- fermentation pdts	279 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0
	40 kgP/ton	e						
- vaccine pdn	6 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0
	4 kgP/ton	e						
- chem synthesis products	54.4 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0
	7.4 kgP/ton	e						
- mixing, compounding and formulation	0.2 kgN/ton	e		ton/yr	0	0	25	0
	0.14 kgP/ton	e						
m. Petroleum refinery								
- topping refinery	1.2 kgN/1000m3	e		m3 crude oil/yr	0		25	0
- cracking refinery	28.3 kgN/1000m3	e		m3 crude oil/yr	0		25	0
- petrochemical ref	34.3 kgN/1000m3	e		m3 crude oil/yr	0		25	0
- lub oil refinery	24.1 kgN/1000m3	e		m3 crude oil/yr	0		25	0
- integrated ref	20.5 kgN/1000m3	e		m3 crude oil/yr	0		25	0
- coke plant	3.5 kgN/ton	e		ton coke/yr	0		25	0
n. Iron and steel								
	0.27 kgN/ton	e		ton/yr	0		25	0
SUM (mole/yr)							3,401,223.52	484,974.39
SUM (mole/day)							9,318.42	1,328.70

Table 5. Nutrient sources, activity levels, modified effluent discharge coefficients and total amounts of nitrogen (N) and phosphorus (P) loads entering Nestos river lagoons.

Nutrient Sources		Effluent Discharge Coefficients		Total amounts of nourishing loads (kg/yr)	
Activity	Level of Activity	N	P	N	P
<i>Household</i>					
Solid Wastes	14,786 inhabitants	0.355 kg/person/yr	0.035 kg/person/yr	5,249.0	517.5
Domestic Sewage	14,786 inhabitants	0.765 kg/person/yr	0.090 kg/person/yr	11,311.2	1,330.7
Detergent	14,786 inhabitants	-----	0.090 kg/person/yr	-----	1,330.7
Total Household Impact				16,560.2	3,178.9
<i>Livestock</i>					
Cattle	4,755 cows	1.37 kg/cow/yr	0.20 kg/cow/yr	6,514.3	951.0
Sheep	52,711 sheep	0.10 kg/sheep/yr	0.011 kg/sheep/yr	6,588.8	606.1
Pigs	1,829 pigs	0.285 kg/pig/yr	0.09 kg/pig/yr	521.2	164.6
Horses	27 horses	1.55 kg/horse/yr	0.25 kg/horse/yr	41.8	6.7
Poultry	95,043 birds	0.0012 kg/bird/yr	0.05 kg/bird/yr	114.0	4,752.1
Total Livestock Impact				13,738.3	6,480.5
<i>Non-point Agricultural Runoff</i>					
Cultivated Areas	10,106 ha	2.00 kg/ha/yr	0.10 kg/ha/yr	20,212.0	1,010.6
Non-cultivated Areas	84.3 ha	12 kg/ha/yr	0.2 kg/ha/yr	1,011.6	16.8
Total Agricultural Impact				21,223.6	1,027.4
Total Nutrient Loads				51,522.1	10,686.8

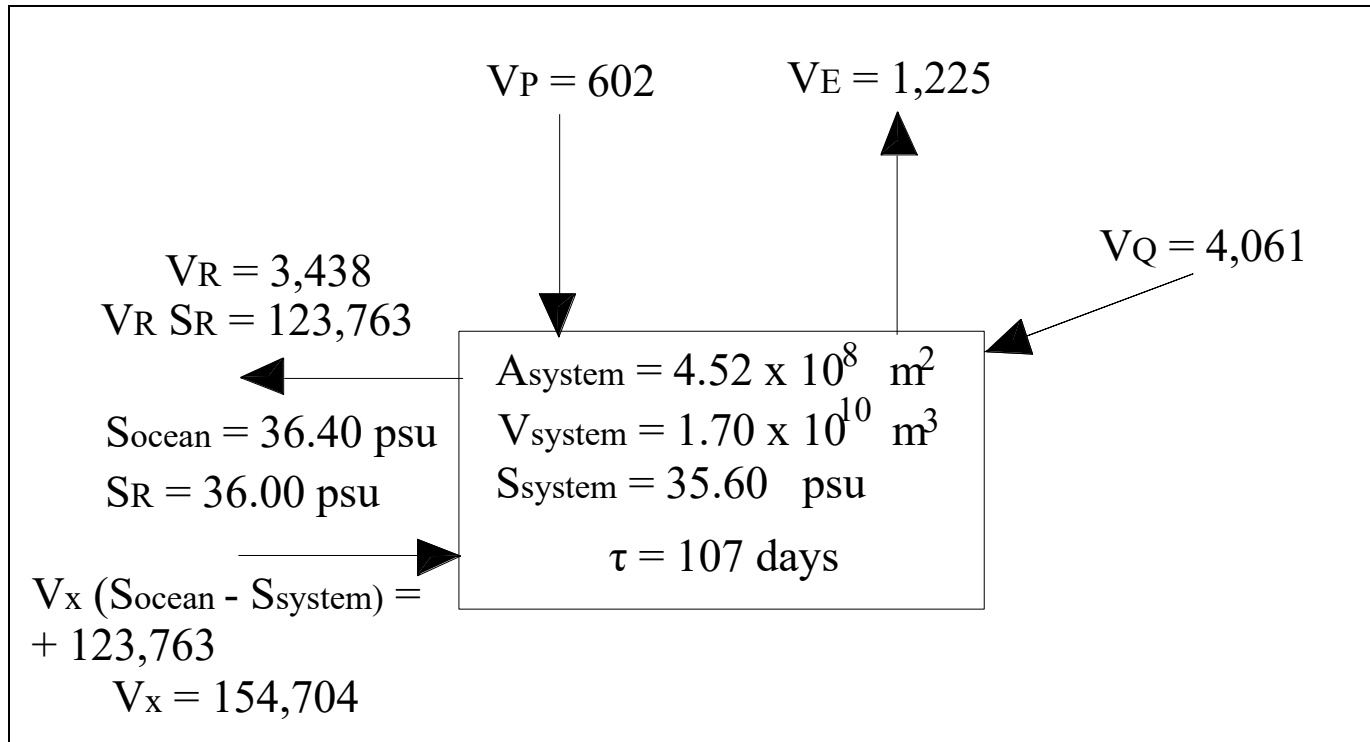
Εφαρμογή Μοντέλου LOICZ στο Στρυμονικό Κόλπο – 1 Box Model



Δεδομένα Εισόδου για τα Ισοζύγια

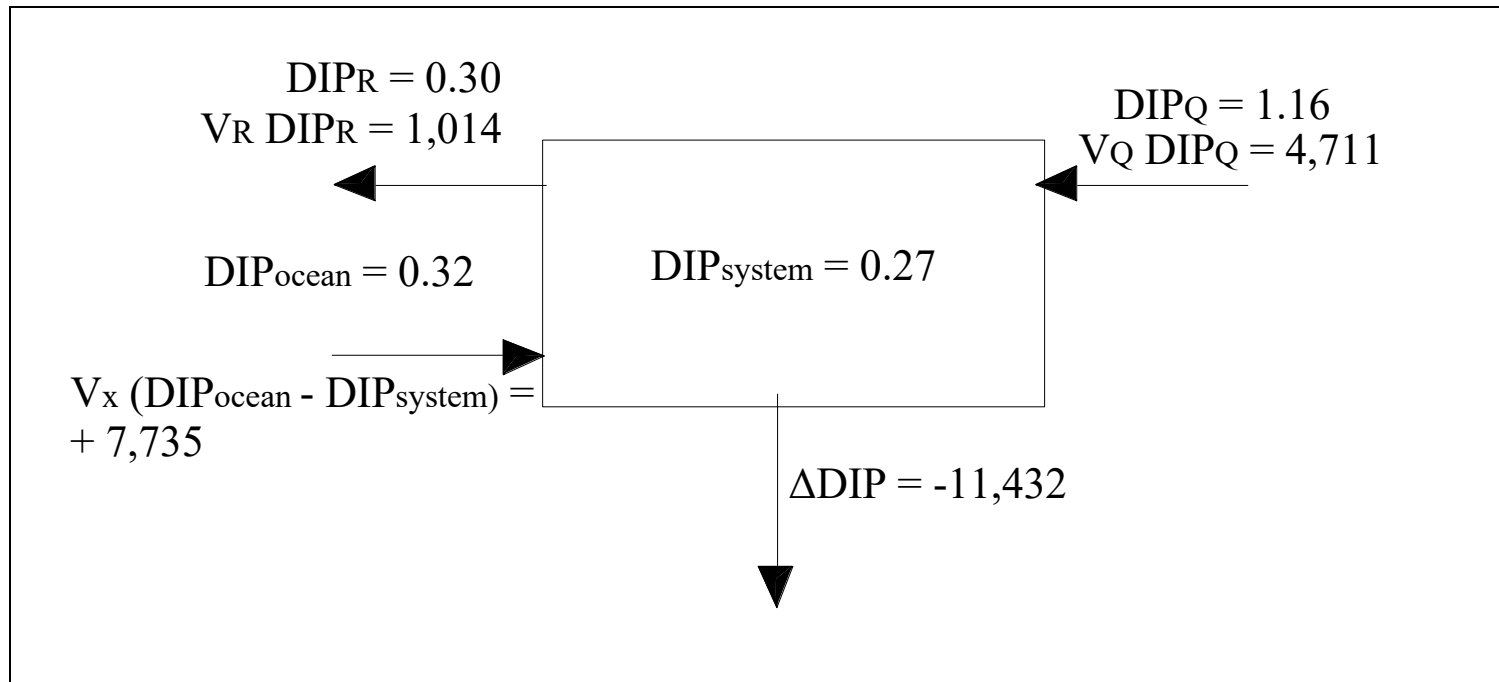
	Strymonikos Gulf	Ierissos Gulf
System Area (m ²)	4.52×10^8	1.20×10^8
System Volume (m ³)	1.70×10^{10}	8.4×10^9
River Discharge (m ³ sec ⁻¹)	47.0	0.48
Precipitation (mm d ⁻¹)	1.33	1.33
Evaporation (mm d ⁻¹)	2.71	2.71
System Salinity (psu)	35.6	36.3
Ocean Salinity (psu)	36.4	36.4
System DIP (mmol/m ³)	0.27	0.45
Ocean DIP (mmol/m ³)	0.32	0.32
River DIP (mmol/m ³)	1.16	0.60
System DIN (mmol/m ³)	2.65	1.61
Ocean DIN (mmol/m ³)	1.30	1.30
River DIN (mmol/m ³)	26.84	2.00

Ετήσιο Ισοζύγιο Νερού & Άλατος Στρυμονικού Κόλπου και Κόλπου Ιερισσού



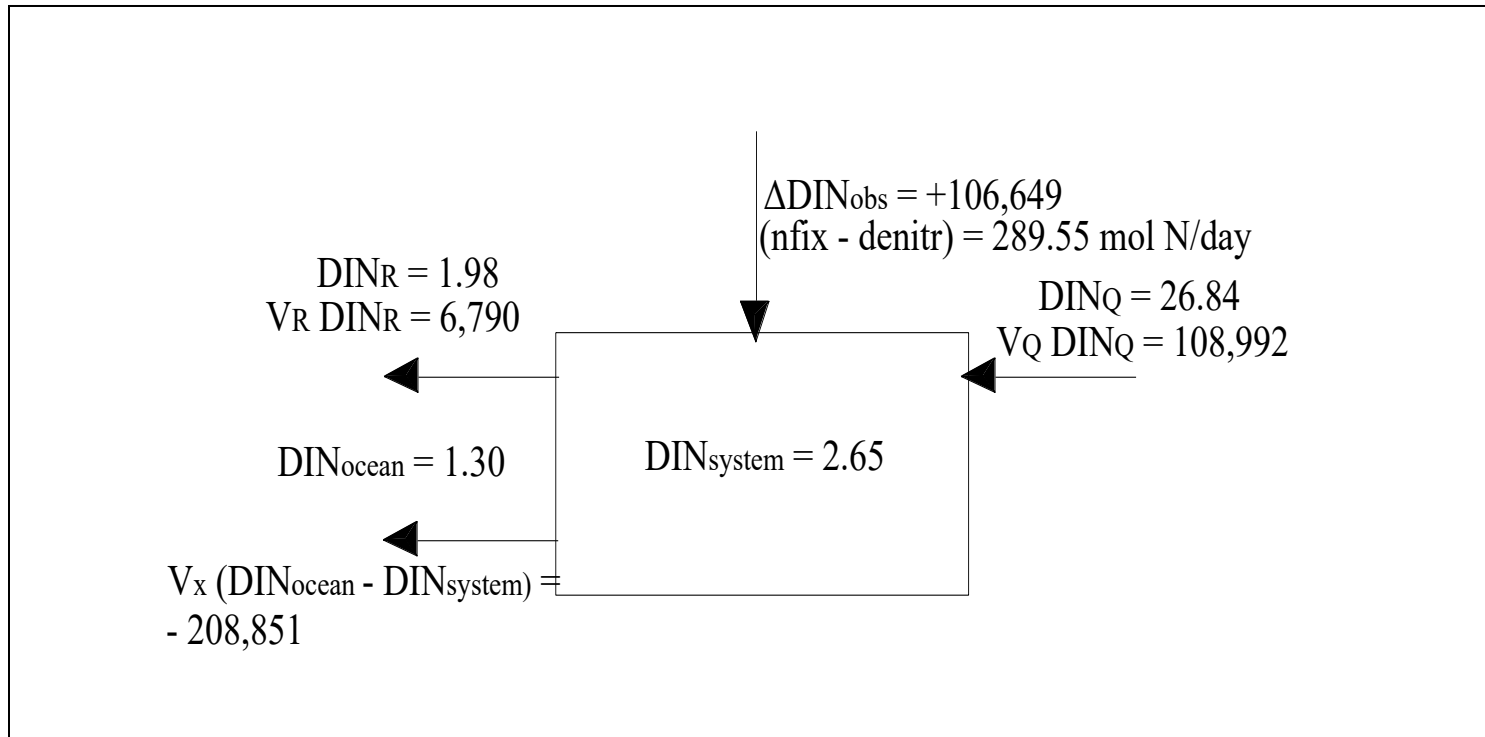
Water fluxes in $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ and salt fluxes in $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$

Ετήσιο Ισοζύγιο Φωσφόρου Στρυμονικού Κόλπου



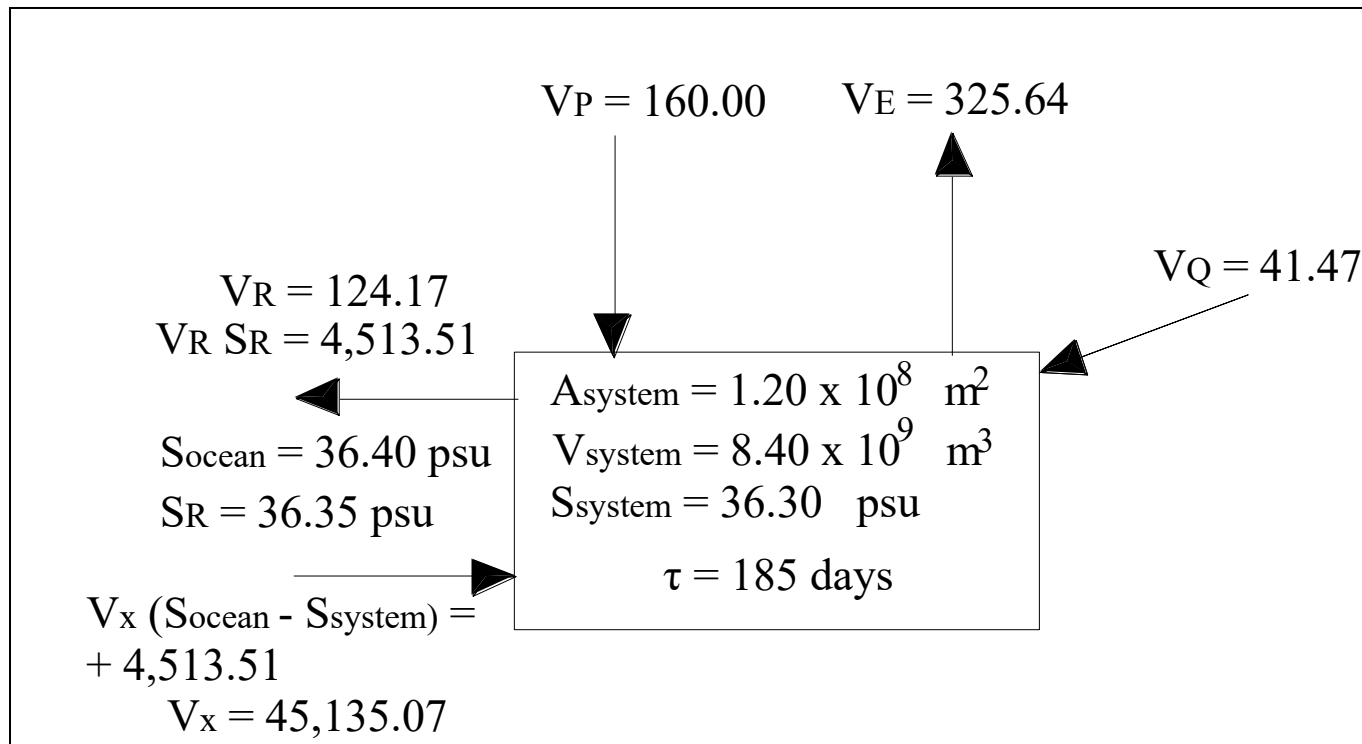
DIP concentrations in mmol m^{-3} and DIP fluxes in mol d^{-1} .

Ετήσιο Ισοζύγιο Αζώτου Στρυμονικού Κόλπου



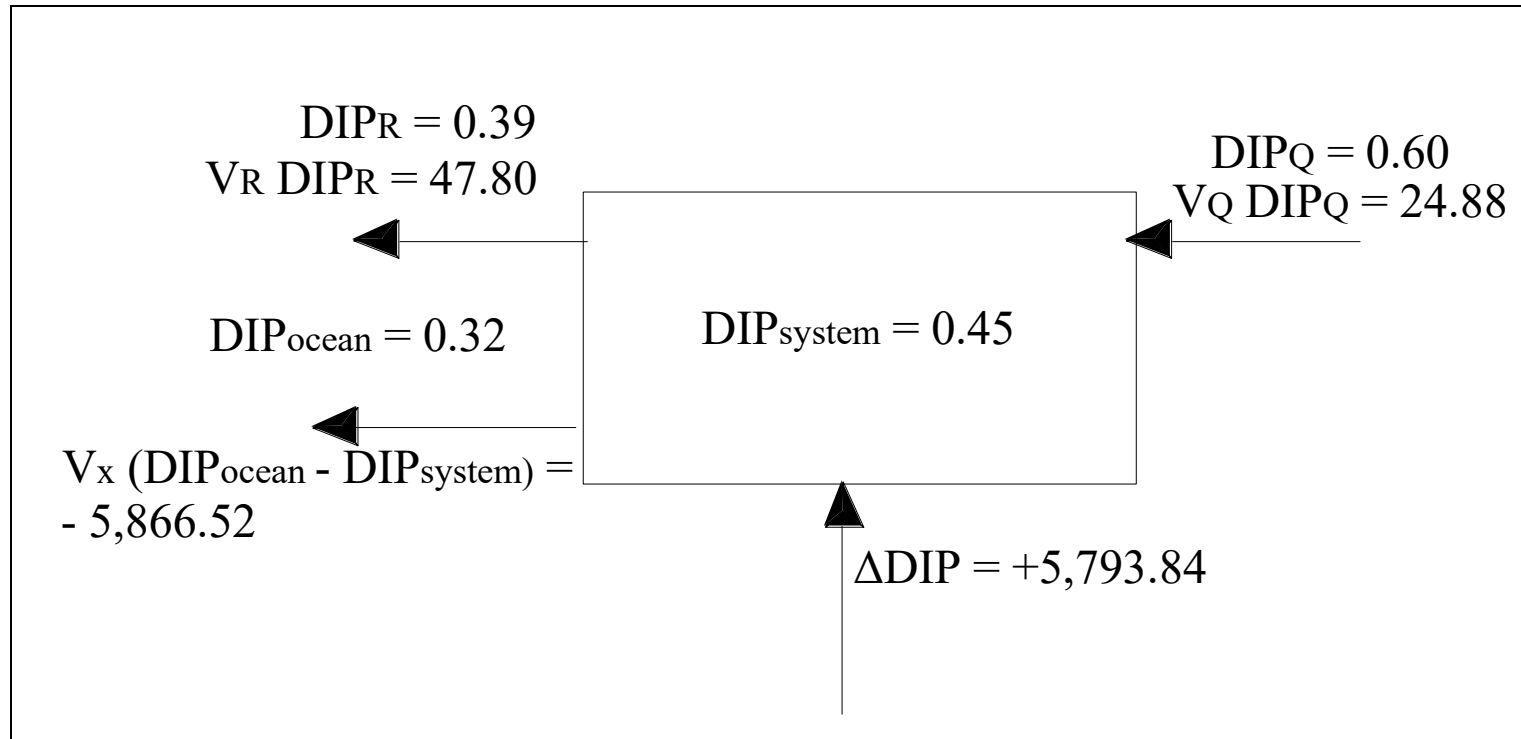
DIN concentrations in mmol m^{-3} and DIN fluxes in mol d^{-1}

Ισοζύγια Νερού και Άλατος Κόλπου Ιερισσού



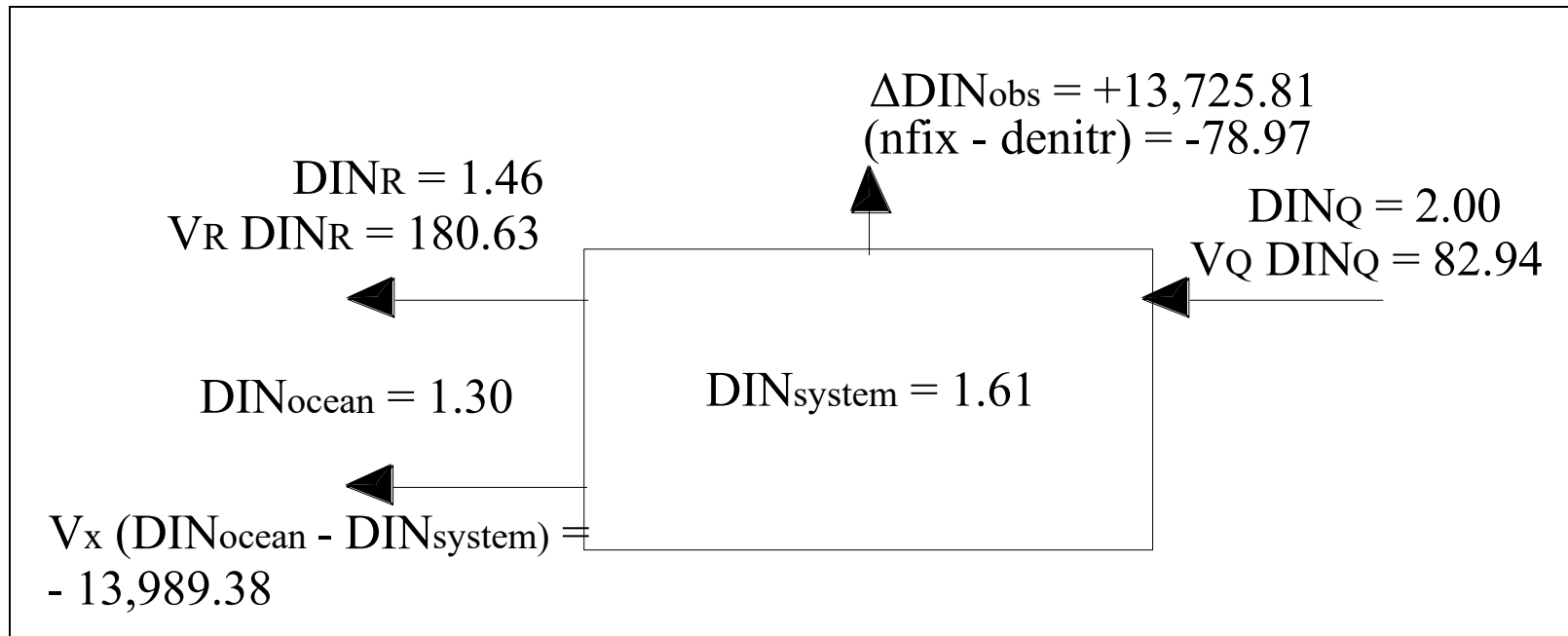
Water fluxes in $10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ and salt fluxes in $10^3 \text{ psu m}^3 \text{ d}^{-1}$

Ετήσιο Ισοζύγιο Φωσφόρου Κόλπου Ιερισσού



DIP concentrations in mmol m^{-3} and DIP fluxes in mol d^{-1} .

Ετήσιο Ισοζύγιο Αζώτου Κόλπου Ιερισσού



DIN concentrations in mmol m^{-3} and DIN fluxes in mol d^{-1}

Summary for annual phosphorus and nitrogen stoichiometric calculations for net ecosystem metabolism

	Strymonikos Gulf	Ierissos Gulf
Residence Time (d)	107	185
ΔDIP (mol d ⁻¹)	-11,432	+5.795
ΔDIP (mmol m ⁻² d ⁻¹)	-0.025	+0.05
ΔDIN (mol d ⁻¹)	+106,649	+13,728
ΔDIN (mmol m ⁻² d ⁻¹)	+0.24	+0.11
$[p - r]$ (mmol C m ⁻² d ⁻¹)	+2.68	-5.11
$[nfix - denitr]$ (mmol N m ⁻² d ⁻¹)	+0.64	-0.65

Σύνθετα Παράκτια Βιογεωχημικά Μαθηματικά Ομοιώματα

Απλή Προσομοίωση Πρόσληψης Θρεπτικών από Φυτοπλαγκτόν (Μετασχηματισμός Μάζας)

Ξεκινάμε με ένα απλό παράδειγμα όπου οι διεργασίες μετασχηματισμού χαρακτηρίζονται από μία πρώτης τάξης χημική αντίδραση, όπου μία παράμετρος S (έστω θρεπτικά άλατα) μετασχηματίζεται σε μία άλλη παράμετρο P (έστω φυτοπλαγκτόν) με σταθερό ρυθμό k .

Αρχικά, τη χρονική στιγμή $t = 0$ υπάρχει μόνο η παράμετρος $S = S_0$ στο σύστημα ενώ $P_0 = 0$.

Θεωρώντας ότι η παράμετρος S μειώνεται με το χρόνο με τον ίδιο ρυθμό που η παράμετρος P αυξάνει, έχουμε τις εξισώσεις

$$\frac{d}{dt} S = -kS, \quad \frac{d}{dt} P = kS$$

Προσθέτοντας τις έχουμε

$$\frac{d}{dt} (S + P) = 0$$

Η λύση των εξισώσεων

$$\frac{d}{dt} S = -kS, \quad \frac{d}{dt} P = kS$$

δίνεται από τις εκθετικές συναρτήσεις

$$S = S_0 e^{-kt}, \quad P = S_0 (1 - e^{-kt})$$

Από όπου προκύπτει ότι η μάζα του συστήματος διατηρείται καθώς

$$S + P = S_0$$

Ο κώδικας σε γλώσσα R είναι

```
## Simple nutrient uptake
```

```
S0 = 5    # Initial concentration of nutrients (mmol/m3)
```

```
P0 = 0    # Initial concentration of phytoplankton (mmol/m3)
```

```
k = 1     # Rate of transformation ( $d^{-1}$ )
```

```
t = seq(from = 0, to = 6, by = 0.1) # Define the time the model will run (days)
```

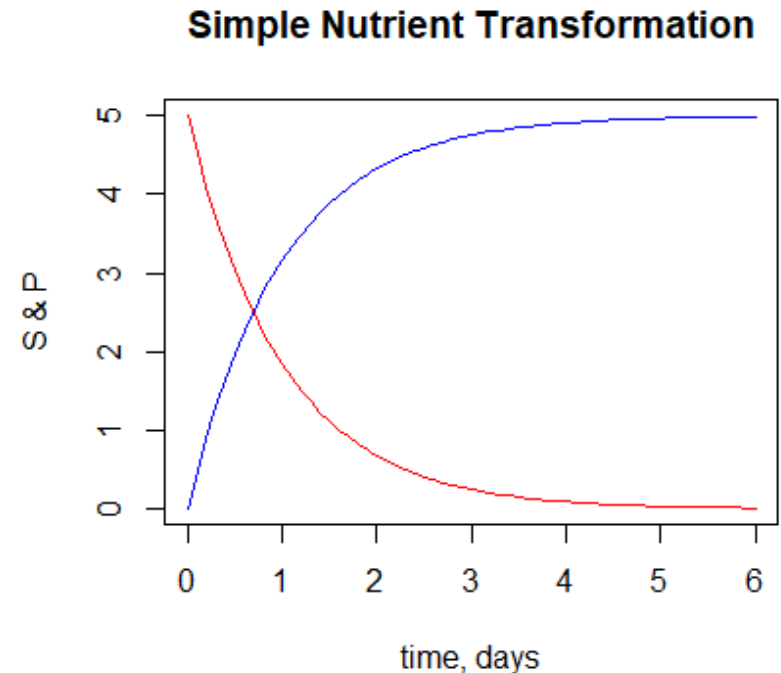
```
## Model equations
```

```
S = S0*exp(-k*t) # Model equation 1
```

```
P = S0*(1-exp(-k*t)) # Model equation 2
```

```
plot(t,S, type = 'l', col='red', xlab = 'time, days', ylab = 'S & P', main = 'Simple  
Nutrient Transformation')
```

```
lines(t,P, col = 'blue')
```



Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια τέτοια προσέγγιση για να προσομοιώσουμε την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού σε ένα παράκτιο οικοσύστημα?

Γενικά ΝΑΙ, αλλά με μία βασική αλλαγή στις οριακές συνθήκες.

Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι για την εκκίνηση της πρωτογενούς παραγωγής απαιτείται η παρουσία κάποιων ατόμων φυτοπλαγκτόν τα οποία στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται και η πρόσληψη θρεπτικών είναι ανάλογη της παρουσίας ατόμων φυτοπλαγκτόν.

Άρα $t = 0$, $N = N_o$, $P = P_o$ και όχι $P=0$

Άρα το ομοίωμα:

$$\frac{d}{dt}P = kP, \quad \frac{d}{dt}N = -kP$$

με αρχικές συνθήκες $N_o = 5 \text{ mmol/m}^3$ και $P_o = 0.5 \text{ mmol/m}^3$, $k = 1 \text{ d}^{-1}$ δίνει

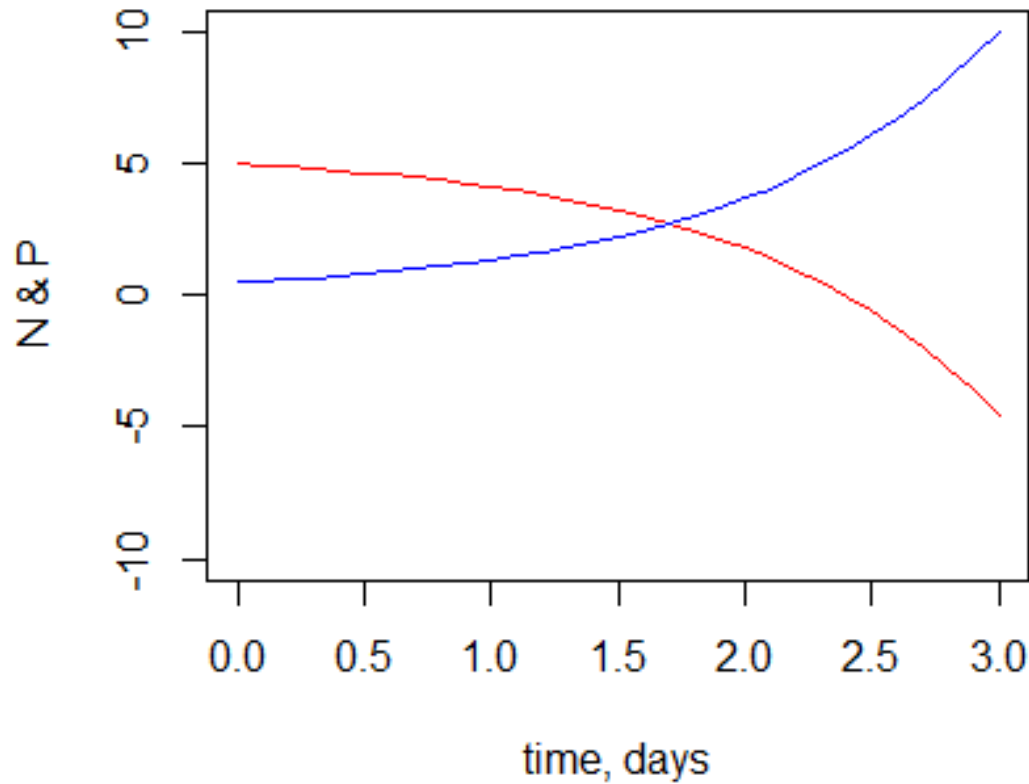
$$P = P_o e^{kt} \quad N = N_o + P_o(1 - e^{kt})$$

$$P = P_0 e^{kt} \quad N = N_0 + P_0(1 - e^{kt}) \quad P_0 = 0.05 \quad N_0 = 5.00 \quad k = 1 \text{ d}^{-1}$$

Ο κώδικας σε γλώσσα R είναι

```
## Simple nutrient uptake
N0 = 5    # Initial concentration of nutrients (mmol/m3)
P0 = 0.5  # Initial concentration of phytoplankton (mmol/m3)
k = 1     # Rate of transformation (d^-1)
t = seq(from = 0, to = 3, by = 0.1) # Define the time the model will run (days)
## Model equations
P = P0*exp(k*t) # Model equation 1
N = N0+P0*(1-exp(k*t)) # Model equation 2
plot (t,N, type = 'l', col='red', xlab = 'time, days', ylab = 'N & P', main = 'Simple
Nutrient Transformation', ylim=c(-10,10))
lines(t,P, col = 'blue')
```

Simple Nutrient Transformation



ΑΠΟΤΥΧΙΑ !!! Το μοντέλο παράγει αρνητικές συγκεντρώσεις στα θρεπτικά άλατα

Μήπως οι αλλαγές στην συγκέντρωση φυτοπλαγκτόν περιορίζονται από την τιμή της συγκέντρωσης των θρεπτικών αλάτων ??

Με σκοπό να υπερβούμε αυτό το πρόβλημα, θεωρούμε μια συγκέντρωση αναφοράς ίση με το N_0 και ένα ρυθμό μετατροπής k' ίσο με k προς τη συγκέντρωση αναφοράς. Το ομοίωμα γίνεται:

$$\frac{d}{dt} N = -k'NP, \quad \frac{d}{dt} P = k'NP$$

Επιλύουμε για αρχικές συνθήκες $N_0 = 5 \text{ mmol/m}^3$, $P_0 = 0.5 \text{ mmol/m}^3$, $k' = k/N_0 = 0.2/\text{d/mmol N/m}^3$.

Οι λύσεις είναι:

$$P = P_0 \frac{P_0 + N_0}{P_0 + N_0 e^{[-k'(P_0 + N_0)t]}} \quad N = N_0 \frac{(N_0 + P_0)e^{[-k'(P_0 + N_0)t]}}{P_0 + N_0 e^{[-k'(P_0 + N_0)t]}}$$

Ο κώδικας σε γλώσσα R είναι

```
## Simple nutrient uptake
```

```
N0 = 5      # Initial concentration of nutrients (mmol/m3)
```

```
P0 = 0.5    # Initial concentration of phytoplankton (mmol/m3)
```

```
k = 1       # Rate of transformation (d-1)
```

```
k1 = k/N0   # New rate of nutrient transformation dependent on N0 conc
```

```
t = seq(from = 0, to = 8, by = 0.1) # Define the time the model will run  
(days)
```

```
## Model equations
```

```
alfa = (P0+N0*exp(-k1*(P0+N0)*t))
```

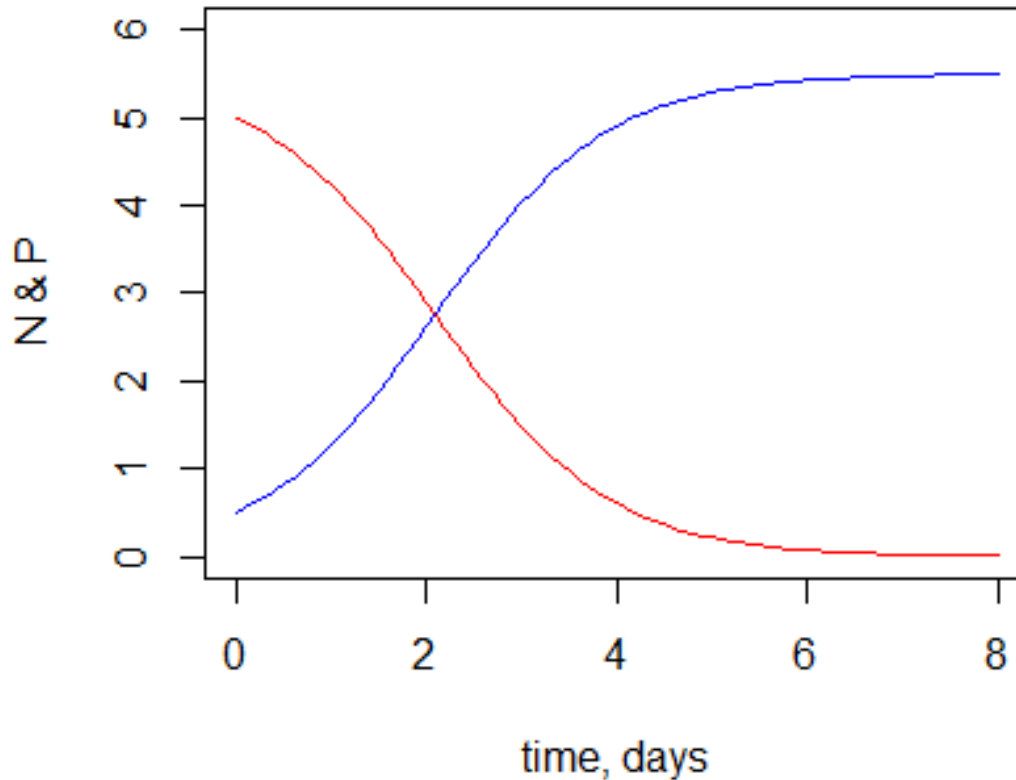
```
P = P0*(P0+N0)/alfa # Model equation 1
```

```
N = N0*((N0+P0)*exp(-k1*(P0+N0)*t))/alfa # Model equation 2
```

```
plot(t,N, type = 'l', col='red', xlab = 'time, days', ylab = 'N & P', main = 'Simple  
Nutrient Transformation', ylim=c(0,6))
```

```
lines(t,P, col = 'blue')
```


Simple Nutrient Transformation



Το ομοίωμα αυτό είναι ευσταθές. Ωστόσο, ένα ασθενές σημείο είναι η παραδοχή ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν αυξάνει ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων.

Περιοριστικός παράγοντας φωτοσύνθεσης

Είναι γνωστό ότι οι ρυθμοί που ελέγχουν τη πρωτογενή παραγωγή **δεν είναι σταθεροί** αλλά εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων όπως είναι το φως και τα θρεπτικά άλατα. Άρα ρυθμοί μετασχηματισμού όπως ο συντελεστής k των χημικών αντιδράσεων δεν είναι σταθεροί αλλά χρήζουν νέας θεώρησης.

Έτσι αναπτύχθηκε ο **Κανόνας του Ελαχίστου (Law of the Minimum)** που ορίζει ότι αν ένα από τα βασικά θρεπτικά άλατα περιοριστεί σημαντικά στο παράκτιο υδατικό σύστημα, τότε η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν σταματά.

Το δεύτερο σημαντικό γεγονός ήταν η ύπαρξη μίας σταθερής ποσοτικής αναλογίας μεταξύ του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου ($C:N:P = 106:16:1$) στα ζωντανά κύτταρα φυτοπλαγκτού (λόγος Redfield).

Αυτό σημαίνει ότι διαχειριστικά μπορούμε να επικεντρωθούμε σε μόνο το ένα από τα δύο βασικά θρεπτικά άλατα, δηλ. σε αυτό που περιορίζεται (εξαντλείται) πρώτο και άρα αποτελεί το περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού.

Επίσης, η γνώση της συγκέντρωσης του ενός θρεπτικού άλατος επιτρέπει τον υπολογισμό του άλλου άλατος

Έστω N είναι η συγκέντρωση ενός θρεπτικού άλατος και P η συγκέντρωση φυτοπλαγκτού, τότε

$$\frac{d}{dt}P = r_{\max} f(N) P$$

Όπου $r_{\max}$ είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης πλαγκτού σε δεδομένες συνθήκες φωτός και θερμοκρασίας.

Το $f(N)$ είναι μία συνάρτηση που εκφράζει την μεταβολή της συγκέντρωσης θρεπτικών αλάτων, όπως επηρεάζεται από το $r_{\max}$.

$f(N) = 0$ σημαίνει ότι τα θρεπτικά άλατα καταναλώθηκαν πλήρως

$f(N) = 1$ σημαίνει ότι υπάρχει πληθώρα θρεπτικών αλάτων

Μία εμπειρική σχέση για το $f(N)$ είναι η συνάρτηση Michaelis-Menten

$$f(N) = \frac{N}{k_N + N}$$

Όπου k_N είναι η σταθερά ημι-κορεσμού, π.χ., $f(N) = 0.5$

Οπότε οι νέες σχέσεις είναι

$$\frac{d}{dt} N = -r_{\max} \frac{N}{k_N + N} P, \quad \frac{d}{dt} P = r_{\max} \frac{N}{k_N + N} P$$

Τυπικές τιμές είναι $r_{\max} = 0.8 \text{ d}^{-1}$, $k_N = 2 \text{ mmol m}^{-3}$.

Ο κώδικας σε γλώσσα R είναι

```
## Improved Nutrient to Phytoplankton model ##  
#####  
# load package with the integration routine:  
install.packages("deSolve")  
library(deSolve)  
#-----#  
# the model equations: #  
#-----#  
NP<-function(t,state,parameters)  
{  
  with(as.list(c(state,parameters)),{ # unpack the state variables, parameters  
  
    uptake = r_max*DIN/(k_N+DIN)  
  
    dDIN =-uptake*PHYTO;  
    dPHYTO = uptake*PHYTO;  
  
    # the output, packed as a list  
    list(c(dDIN,dPHYTO)) # the rate of change  
  
  })  
} # end of model
```

```

#-----#
# the model parameters: #
#-----#
parameters<-c(k_N = 2,      # half saturation constant
              r_max = 0.8)  # max uptake rate of phytoplankton


#-----#
# the initial conditions: #
#-----#

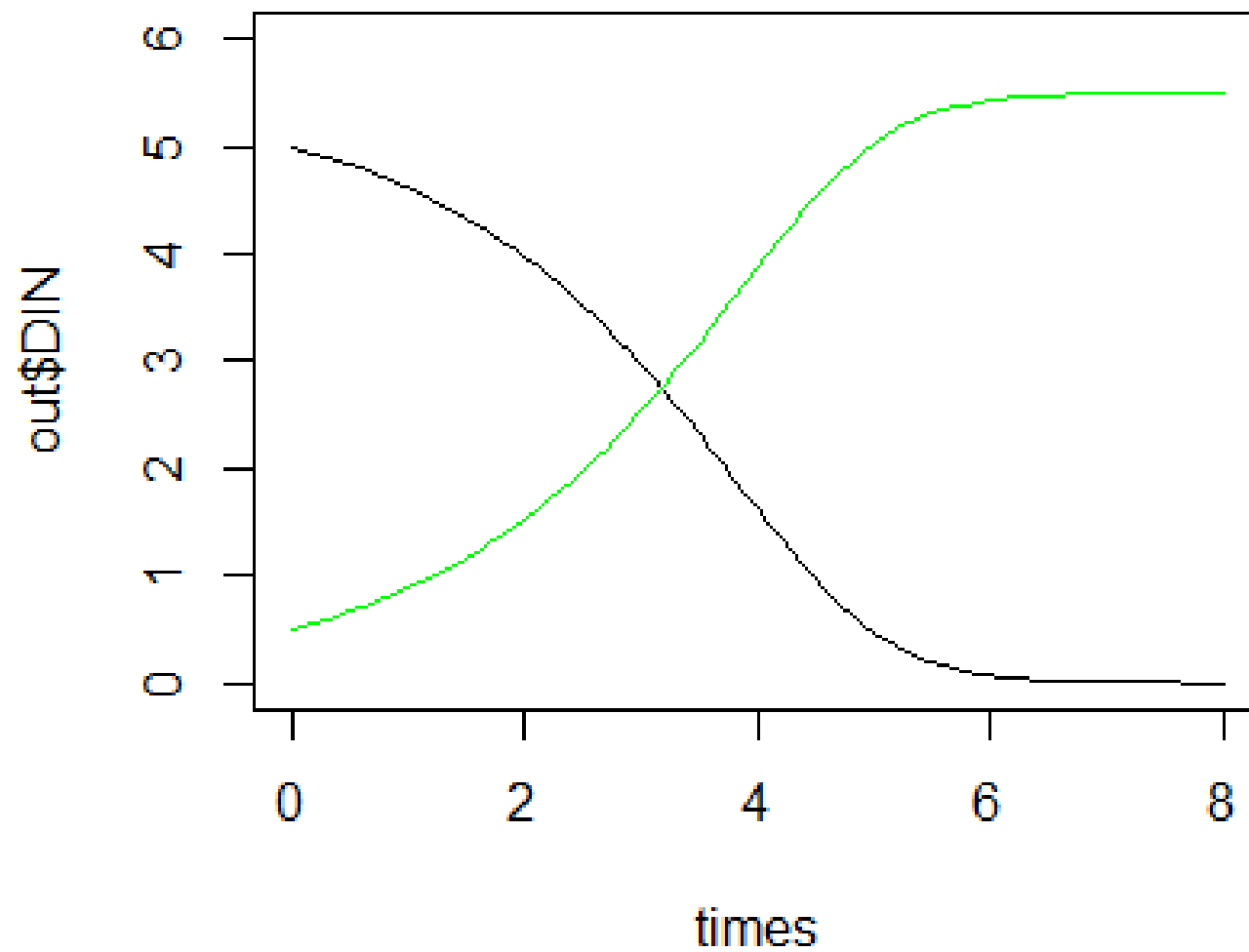
state      <-c(DIN  =5.0,      # state variable initial conditions, units mmolN/m3
              PHYTO =0.5)

#-----#
# RUNNING the model:  #
#-----#
# 2 steps
# step 1 : run the model for 365 days, no intermediate output required

times      <-seq(0,8, by=0.1)
out         <-as.data.frame(ode(state,times,NP,parameters))

plot(times,out$DIN, typ='l',xlim=c(0,8),ylim=c(0,6))
lines(times,out$PHYTO, col='green')

```



ΠΡΟΣΟΧΗ !! Η συνάρτηση Michaelis-Menten αναπτύχθηκε για να περιγράψει αντιδράσεις ενζύμων

Δεν είναι γνωστό αν η πρόσληψη θρεπτικών αλάτων περιλαμβάνει αντιδράσεις ενζύμων

Συνεπώς οι παραδοχές που κάνουμε είναι:

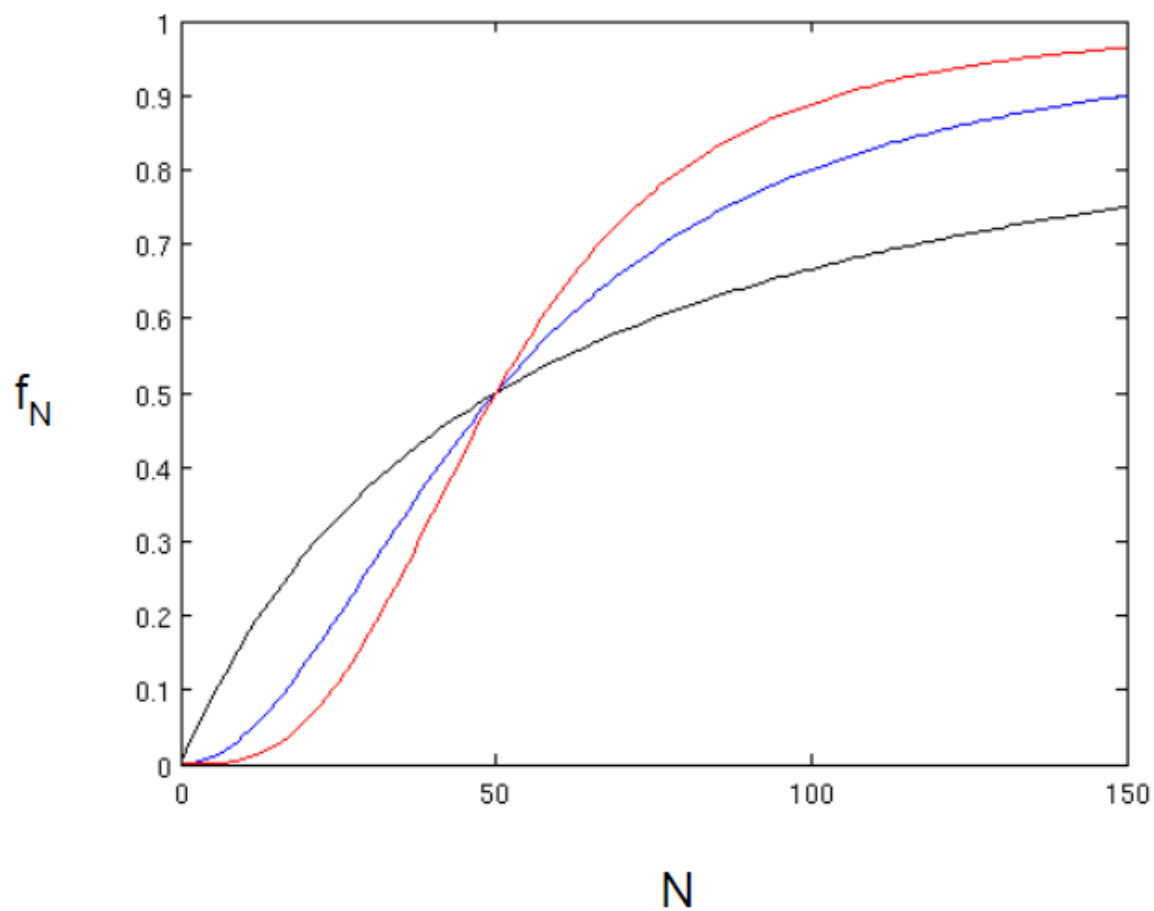
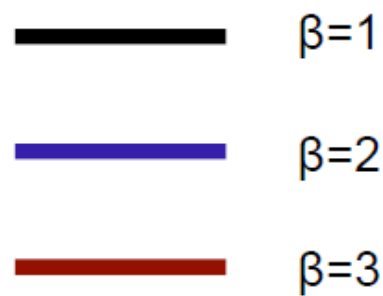
1. Η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν σταματά όταν τα θρεπτικά άλατα καταναλωθούν
2. Η ανάπτυξη είναι ανεξάρτητη των θρεπτικών σε υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων
3. Πρακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε συνάρτηση που περιλαμβάνει την σταθερά ημικορεσμού.

Για παράδειγμα μπορούμε να φτιάξουμε μια οικογένεια συναρτήσεων της μορφής

$$f(N) = \frac{N^\beta}{k_N^\beta + N^\beta} \quad \text{Όπου } \beta = 1, 2, 3, \dots, N$$

$\beta = 1, 2, 3, \dots, N$

$$f(N) = \frac{N^\beta}{N^\beta + k_N^\beta}$$



Τι μάθαμε ως τώρα:

1. Θεωρήσαμε ότι η διαδικασία πρόσληψης θρεπτικών αλάτων από το φυτοπλαγκτόν είναι μία διαδικασία μετασχηματισμού μάζας 1^{ης} τάξης
2. Προσαρμόσαμε την περιγραφή της διεργασίας στο πρόβλημα (π.χ., η ανάπτυξη φυτοπλαγκτόν εξαρτάται από την διαθεσιμότητα θρεπτικών αλάτων, αλλά δεν συνεχίζει γραμμικά έως την εξάντληση των θρεπτικών αλλά φτάνει έως ένα επίπεδο που αντιστοιχεί στον ημικορεσμό του φυτοπλαγκτόν).
3. Χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση Michaelis-Menten-Monod για να περιγράψουμε μαθηματικά την διεργασία
4. Πήγαμε από την αναλυτική στην αριθμητική λύση
5. Το ομοίωμα φτάνει σε κατάσταση ισορροπίας (steady state) όταν τα θρεπτικά καταναλώνονται.

Το Ομοίωμα NPD

Έως τώρα εξετάσαμε τη περίπτωση της πρόσληψης θρεπτικών αλάτων από το φυτοπλαγκτόν, κατά την οποία τα μοντέλα φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας μόλις τα θρεπτικά καταναλωθούν πλήρως.

Στο σημείο αυτό θα θεωρήσουμε την ανάστροφη διεργασία, δηλ. της μετατροπής πλαγκτού σε θρεπτικά μέσα από

α) τη ταχεία έκλυση θρεπτικών κατά την αναπνοή και το μεταβολισμό του φυτοπλαγκτόν, και

β) την αργή αποσύνθεση νεκρών κυττάρων που ονομάζονται detritus (νεκρή οργανική ύλη).

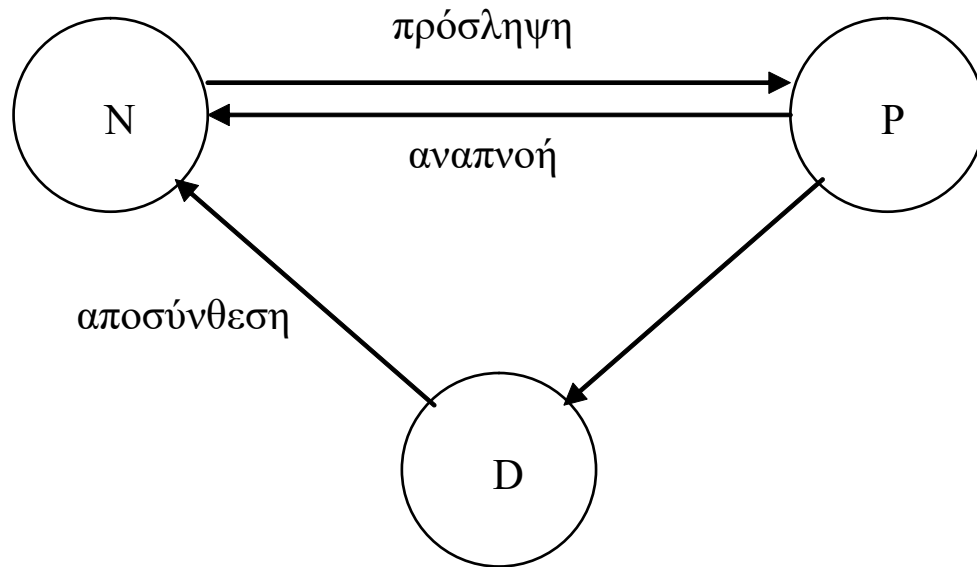
Το μοντέλο αυτό καλείται NPD γιατί περιλαμβάνει **Nutrients – Plankton – Detritus**.

Θεωρούμε μόνο ένα θρεπτικό άλας ως το περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης πλαγκτού, π.χ., το άζωτο.

Η πρωτογενής παραγωγή οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία σε συνδυασμό με τη πρόσληψη των διαθέσιμων θρεπτικών αλάτων (N) από το φυτοπλαγκτόν (P).

Ο μεταβολισμός και η αναπνοή του φυτοπλαγκτόν προκαλούν την άμεση έκλυση θρεπτικών αλάτων.

Η περιορισμένη διάρκεια ζωής του φυτοπλαγκτόν το μετατρέπει σε νεκρή οργανική ύλη (D), η αποσύνθεση της οποίας προκαλεί αύξηση στη συγκέντρωση θρεπτικών.



Η έκλυση θρεπτικών μέσω της αναπνοής είναι πολύ γρήγορη διεργασία – αντίθετα η έκλυση θρεπτικών λόγω αποσύνθεσης είναι πολύ αργή διεργασία

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι

$$\frac{d}{dt} N = -r_{\max} \frac{N P}{k_N + N} + l_{PN} P + l_{DN} D$$

$$\frac{d}{dt} P = r_{\max} \frac{N P}{k_N + N} - l_{PN} P - l_{PD} P$$

$$\frac{d}{dt} D = l_{PD} P - l_{DN} D$$

Τιμές παραμέτρων είναι:

$$N_0 = 5 \text{ mmol/m}^3$$

$$P_0 = 0.5 \text{ mmol/m}^3$$

$$D_0 = 0$$

$$k_N = 0.3 \text{ mmol/m}^3$$

$$r_{\max} = 1 \text{ d}^{-1}$$

$$I_{DN} = 0.06$$

$$I_{PN} = 0.5$$

$$I_{PD} = 0.05$$

```

## An NPD model (Nutrient, Phytoplankton, ##
## Detritus) ##
#####
# load package with the integration routine:
install.packages("deSolve")
library(deSolve)

#-----#
# the model equations: #
#-----#
NPD<-function(t,state,parameters)
{
  with(as.list(c(state,parameters)),{ # unpack the state variables, parameters

    uptake = r_max*DIN/(k_N+DIN)

    dDIN =-uptake*PHYTO+LPN*PHYTO+LDN*DETRITUS;
    dPHYTO = uptake*PHYTO-LPN*PHYTO-LPD*PHYTO;
    dDETRITUS = LPD*PHYTO-LDN*DETRITUS;

    # the output, packed as a list
    list(c(dDIN,dPHYTO,dDETRITUS))          # the rate of change
  })
} # end of model

```



```
# the model parameters: #
```

```
parameters<-c(k_N = .3,      # half saturation constant
              r_max = 1,      # max uptake rate of phytoplankton
              LPN = .50,      # respiration / extracellular release
              LPD = .05,      # loss rate of zooplankton
              LDN = .06)
```

```
#-----#
```

```
# the initial conditions: #
```

```
#-----#
```

```
state      <-c(DIN   =5.0,          # state variable initial conditions, units mmolN/m3
               PHYTO =0.5,
               DETRITUS =0.0)
```

```
#-----#
```

```
# RUNNING the model: #
```

```
#-----#
```

```
# 2 steps
```

```
# step 1 : run the model for 365 days, no intermediate output required
```

```
times      <-seq(0,365, by=1)
```

```
out        <-as.data.frame(ode(state,times,NPD,parameters))
```

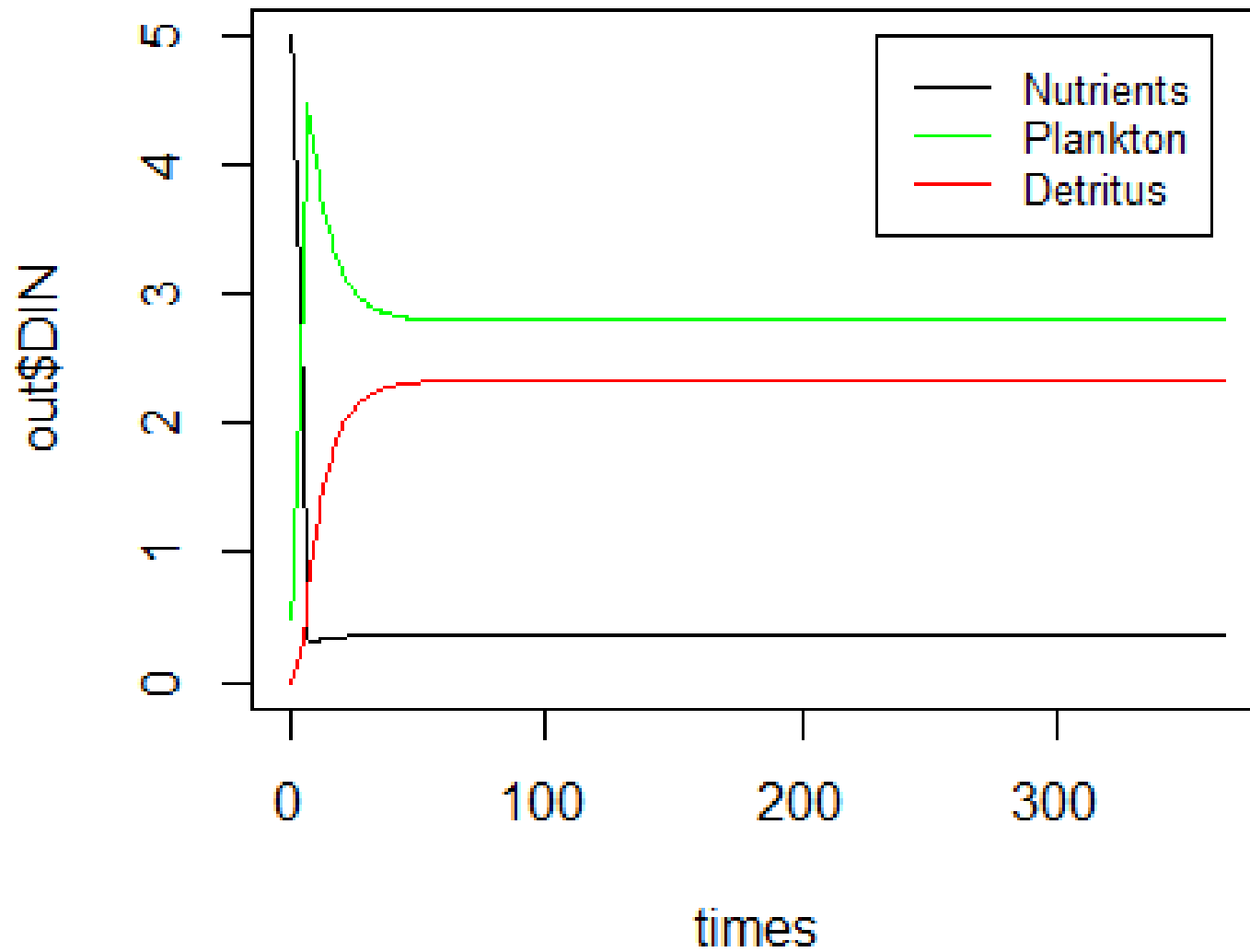
```
plot(times,out$DIN, typ='l',xlim=c(0,365),ylim=c(0,5))
```

```
lines(times,out$PHYTO, col='green')
```

```
lines(times,out$DETRITUS, col='red')
```

```
legend(230, 5, legend=c("Nutrients", "Plankton", "Detritus"),col=c("black","green","red"), lty=1,
      cex=0.8)
```

NPD model output



Τι μαθαίνουμε από το μοντέλο NPD

1. Η αναπνοή και ο μεταβολισμός των κυττάρων φυτοπλαγκτόν δημιουργούν μία ροή θρεπτικών αλάτων
2. Ο θάνατος του φυτοπλαγκτόν μετατρέπει την οργανική ύλη σε νεκρή οργανική ύλη (detritus)
3. Η αποσύνθεση οδηγεί στην επίδραση των βακτηριδίων για την μετατροπή της νεκρής οργανικής ύλης σε θρεπτικά άλατα, κλείνοντας έτσι τον κύκλο των θρεπτικών αλάτων
4. Στο μοντέλο NPD θεωρούμε όλους τους ρυθμούς μετασχηματισμού σταθερούς
5. Το μοντέλο φτάνει σε κατάσταση ισορροπίας όταν η συγκέντρωση των θρεπτικών γίνει ίση με N_{ss} , το σημείο που τα θρεπτικά παραμένουν σταθερά στον χρόνο

$$N_{ss} = \frac{k_N (l_{PN} + l_{PD})}{r_{max} - (l_{PN} + l_{PD})}$$

Ανάπτυξη Ζωοπλαγκτόν

Στο σημείο αυτό το μοντέλο γίνεται ακόμη πιο σύνθετο με την εισαγωγή του επόμενου τροφικού επιπέδου, του ζωοπλαγκτόν.

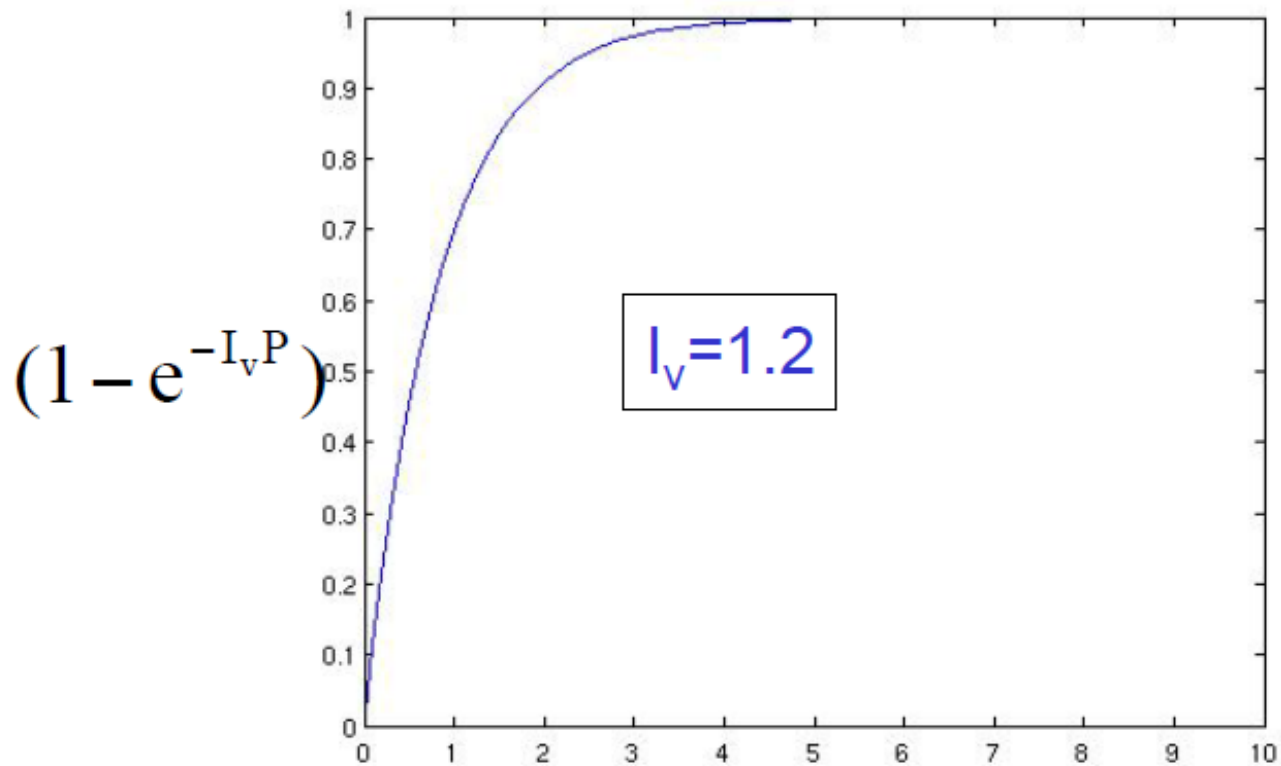
Η κατανάλωση φυτοπλαγκτόν από το ζωοπλαγκτόν οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης του πρώτου. Άρα το φυτοπλαγκτόν αποτελεί το περιοριστικό παράγοντα της ανάπτυξης του ζωοπλαγκτόν.

Έστω Z είναι η συγκέντρωση ζωοπλαγκτόν ανά μονάδα όγκου, τότε η ανάπτυξή του περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{d}{dt}Z = g(P)Z$$

Όπου $g(P)$ είναι ο ρυθμός κατανάλωσης του φυτοπλαγκτού

$$g(P) = g_{\max} (1 - e^{-I_u P}) \quad \text{Όπου } I_u \text{ είναι η παράμετρος } I_{\text{u}} \text{lev}$$



Εναλλακτικά, υπάρχει η συνάρτηση Monod

$$g(P) = g_{\max} \frac{P}{I_v^{-1} + P}$$

Και η τετραγωνική Ivlev συνάρτηση

$$g(P) = g_{\max} (1 - e^{-I_v^2 P^2})$$

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι

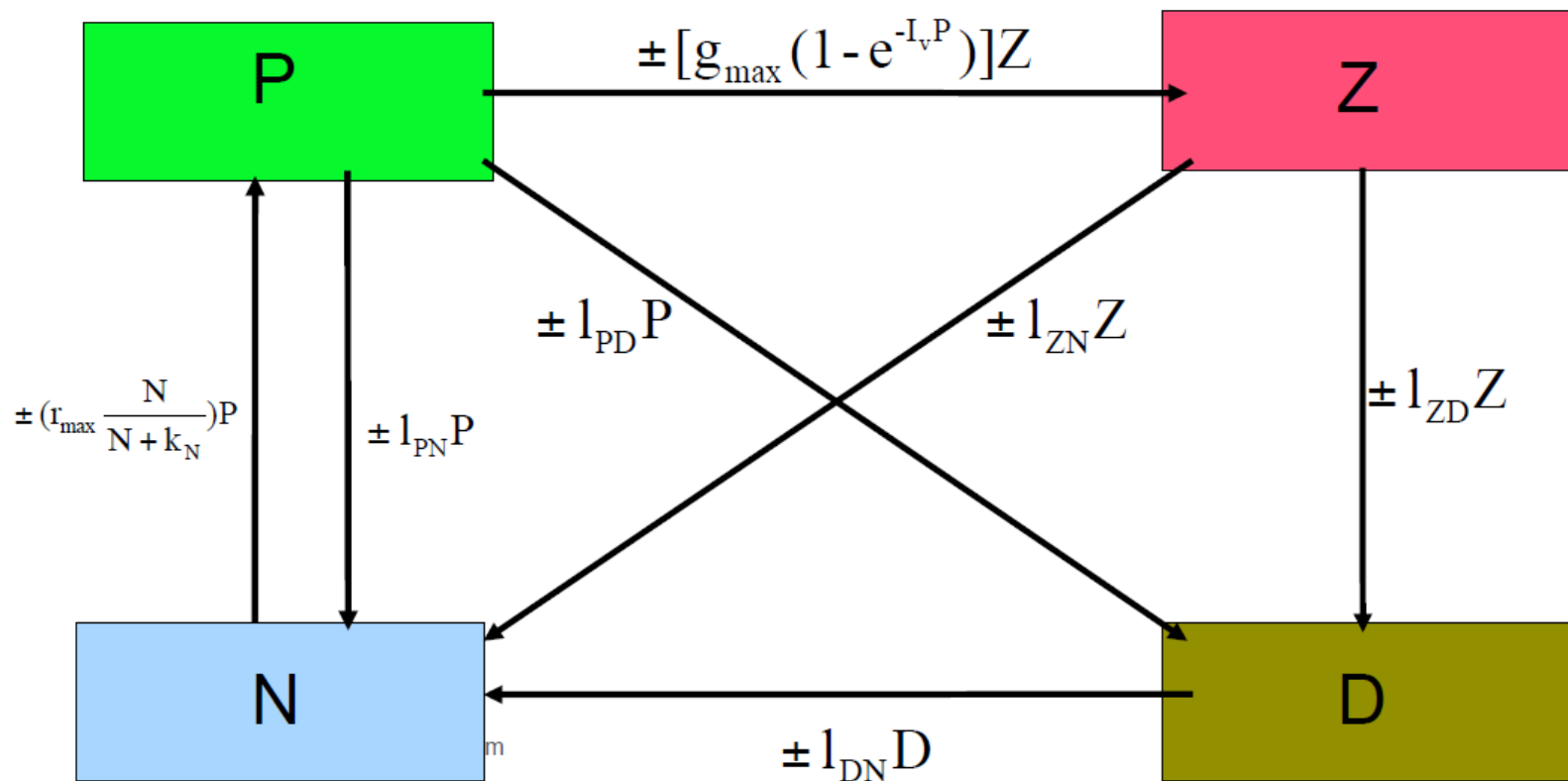
$$\frac{d}{dt}N = -R(N,t)P + l_{PN}(P - P_0) + l_{ZN}(Z - Z_0) + L_{DN}D + A_{mix}(D - N) + S_N^{ext}$$

$$\frac{d}{dt}P = +R(N,t)P - G(P,t)Z - (l_{PN}P + l_{PD})(P - P_0)$$

$$\frac{d}{dt}Z = G(P,t)Z - (l_{ZD} + l_{ZN})(Z - Z_0)$$

$$\frac{d}{dt}D = l_{ZD}(Z - Z_0) + l_{PD}(P - P_0) - L_{DN}D - A_{mix}(D - N) + S_D^{ext}$$

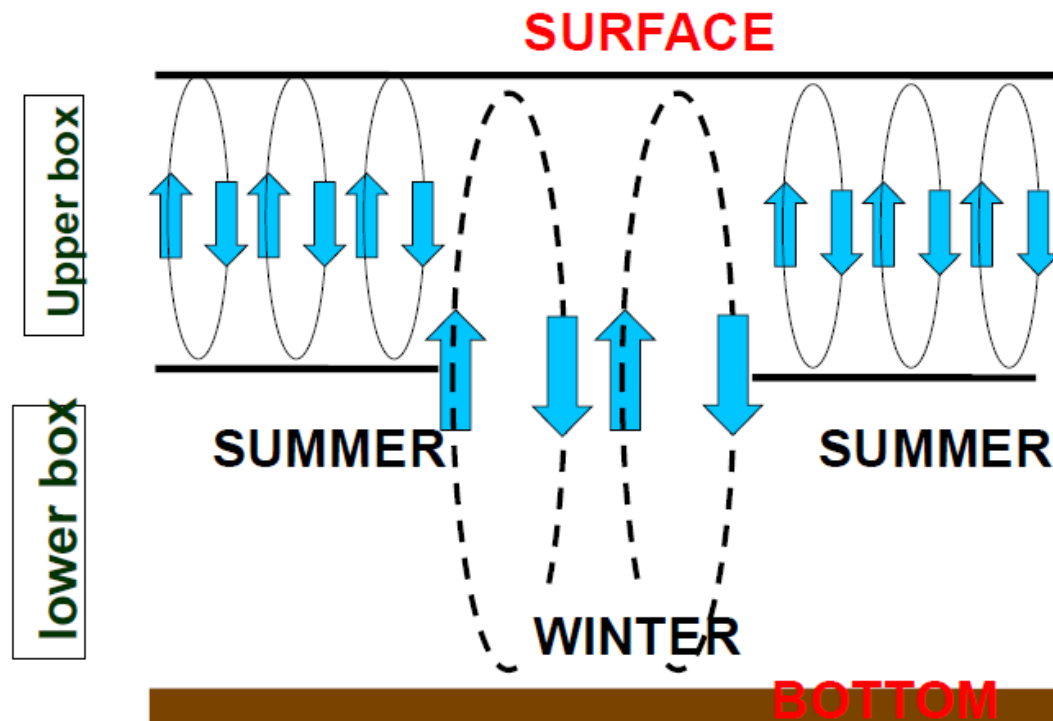
Η ανάπτυξη φυτοπλαγκτού με ρυθμό $R=r_{\max}f(N)$ αποτελεί πηγή για τη παράμετρο P αλλά απώλεια για τη παράμετρο N . Το ζωοπλαγκτό Z καταναλώνει P με ρυθμό G . Όπως προηγούμενα ορίζουμε όρους μεταφοράς μάζας L_{XY} ή I_{XY} ως 'απώλεια του X προς το Y ', όπου I_{XY} αναφέρεται σε σταθερούς ρυθμούς μεταφοράς και L_{XY} σε μεταβαλλόμενους.



Μετασχηματισμοί μάζας μεταξύ των «δεξαμενών» μάζας του ομοιώματος

Η διεργασία πρόσληψης θρεπτικών με ρυθμό R και η διεργασία κατανάλωσης πλαγκτού με ρυθμό G 'ξεκινούν' να συμβαίνουν με βάση ένα διακόπτη $\theta_+ = \theta(\Delta d - d_0)$, που σημαίνει ότι οι ρυθμοί είναι μη-μηδενικοί μόνο κατά τη περίοδο του έτους που το κανονικοποιημένο μήκος της ημέρας Δd υπερβαίνει το μήκος ημέρα 'κατωφλίου' d_0 .

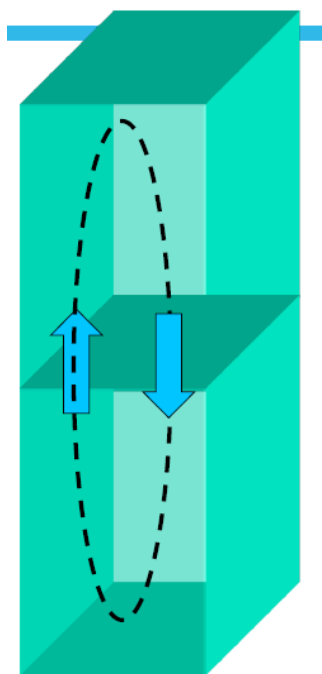
Έτσι ορίζεται η βιολογικά ενεργή περίοδος του μοντέλου.



Ο ρυθμός ανάμειξης A_{mix} ελέγχει τη μείξη του επιφανειακού και του πυθμιαίου στρώματος από το τέλος του φθινοπώρου έως την άνοιξη με βάση το διακόπτη $\theta_- = \theta(d_0 - \Delta d)$.

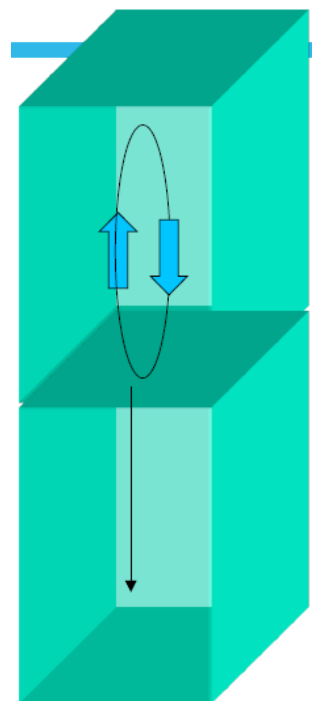
Έτσι ο ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού είναι:

$$R(N, t) = \theta^+ r_{\max} f(N) = \theta(\Delta d - d_0) r_{\max} \frac{N^2}{k_N^2 + N^2}$$



Χειμώνας – Η βιολογική
δράση σταματά

$$\theta(d - d_0) = 0$$



Καλοκαίρι – Η βιολογική
δράση ξεκινά

$$\theta(d - d_0) = 1$$

Ο μέγιστος ρυθμός πρόσληψης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του φωτός. Ο ρυθμός κατανάλωσης ζωοπλαγκτού ορίζεται ως:

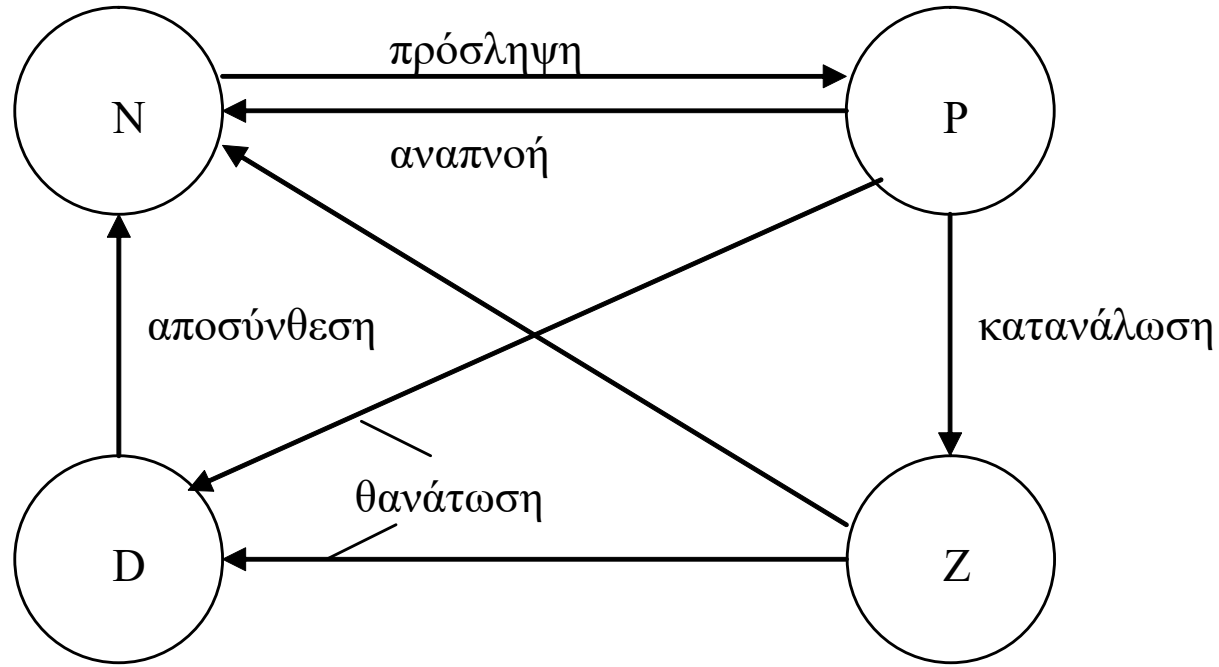
$$G(P, t) = \theta^+ g_{\max} g(P) = \theta(\Delta d - d_0) g_{\max} (1 - \exp(-I_u P^2))$$

Τόσο ο R όσο και ο G είναι μηδενικοί κατά τη περίοδο από τέλος φθινοπώρου έως αρχή άνοιξης

Ο όρος $A_{\text{mix}}(\text{D-N})$ περιγράφει τη κατακόρυφη ανάμειξη των δύο στρωμάτων του συστήματος η οποία συμβαίνει κυρίως το χειμώνα με ρυθμό α_{mix} , δηλαδή:

$$A_{\text{mix}} = \alpha_{\text{mix}} \theta(d_0 - \Delta d)$$

Λόγω της ανάμειξης αυτής έχουμε τη μεταφορά και τη μετατροπή του υλικού της νεκρής οργανικής ύλης σε θρεπτικά άλατα που καταλαμβάνουν ολόκληρη την υδάτινη στήλη (D=N).



$$\frac{d}{dt}N = -R(N,t)P + l_{PN}(P - P_0) + l_{ZN}(Z - Z_0) + L_{DN}D + A_{mix}(D - N) + S_N^{ext}$$

$$\frac{d}{dt}P = +R(N,t)P - G(P,t)Z - (l_{PN}P + l_{PD})(P - P_0)$$

$$\frac{d}{dt}Z = G(P,t)Z - (l_{ZD} + l_{ZN})(Z - Z_0)$$

$$\frac{d}{dt}D = l_{ZD}(Z - Z_0) + l_{PD}(P - P_0) - L_{DN}D - A_{mix}(D - N) + S_D^{ext}$$

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων του ομοιώματος NPZD.

Σύμβολο	Αριθμητική τιμή	Σύμβολο	Αριθμητική τιμή
$r_{\max}$	1 d ⁻¹	$g_{\max}$	0.5 d ⁻¹
k_N	0.1	I_u	1.2
I_{PN}	0.01 d ⁻¹	I_{ZN}	0.01 d ⁻¹
I_{PD}	0.02 d ⁻¹	I_{ZD}	0.02 d ⁻¹
α_{mix}	0.5 d ⁻¹	I_{DN}	0
$N(0)$	0.99	$P(0)$	0.01
$Z(0)$	0.01	$D(0)$	0.99
Z_o	0.01	P_o	0.01
S_N^{ext}	0	S_D^{ext}	0

ΠΡΟΣΟΧΗ !!

Οι συγκεντρώσεις των N , P , Z , D που παράγονται από το μοντέλο είναι αδιαστατοποιημένες, δηλαδή έχουν διαιρεθεί με την αρχική συγκέντρωση $N(0)$, $P(0)$, $Z(0)$, $D(0)$, αντίστοιχα.

Οι απώλειες των P & Z δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα επίπεδα βάσης P_0 και Z_0 .

$$R(N, t) = \theta r_{\max} \frac{N^2}{N^2 + k_N^2}$$

Phytoplankton growth

$$G(P, t) = \theta [1 - \exp(-I_v^2 Z^2)]$$

Zooplankton growth

$$r_{\max}=1\text{d}^{-1}$$

$$g_{\max}=0.5\text{d}^{-1}$$

$$K_n=0.1$$

$$I_v=1.2$$

$$I_{PN}=0.01\text{d}^{-1}$$

$$I_{ZN}=0.01\text{d}^{-1}$$

$$I_{PD}=0.02\text{d}^{-1}$$

$$I_{ZD}=0.02\text{d}^{-1}$$

$$A_{\text{mix}}=0.5\text{d}^{-1}$$

$$L_{DN}=0$$

$$N(0)=0.99$$

$$P(0)=0.01$$

$$Z(0)=0.01$$

$$D(0)=0.99$$

$$Z_{bk}=0.01$$

$$P_{bk}=0.01$$

$$S_{\text{extN}}=0.0$$

$$S_{\text{extD}}=0.0$$

```

## An NPZD model (Nutrient, Phytoplankton, ##
## Zooplankton, Detritus)                ##
#####
# load package with the integration routine:
install.packages("deSolve")
library(deSolve)

#-----#
# the model equations: #
#-----#
daylength = function(t) {
  latitude = 40
  lat = latitude*2*pi/360   #Latitude

  A = c(.006918,-.399912,-.006758,-.002697)
  B = c(.070257,.000907, .001480)
  G = 2*pi/365*t
  # inclination
  inc = A[1]+A[2]*cos(G)+A[3]*cos(2*G)+A[4]*cos(3*G)
  inc = inc+B[1]*sin(G)+B[2]*sin(2*G)+B[3]*sin(3*G)
  # length of the day
  arg = -sin(lat)*sin(inc)/cos(lat)/cos(inc)
  Delta = 24/pi*acos(arg)   # in hours
  Delta/24      # normalized
}

```

```
t = 1:365
```

```
daylength(t)-daylength(75)
```

```
NPZD<-function(t,state,parameters)
```

```
{
```

```
  with(as.list(c(state,parameters)),{ # unpack the state variables, parameters
```

```
    d0 = daylength(75)
```

```
    d1 = daylength(t)
```

```
    if (d1>d0) {
```

```
      theta=1
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
      theta=0
```

```
    }
```

```
    A_mix = .5      # winter mixing
```

```
    r_max = r_max*theta
```

```
    uptake = r_max*DIN*DIN/(k_N+DIN*DIN)
```

```
    g_max = g_max*theta
```

```
    grazing = g_max*(1-exp(-I*PHYTO*PHYTO))
```

```
    theti = 1-theta
```

```
    A_mix1 = theti*A_mix
```


#Detritus Processes

$ZMort = LZD * (ZOOPL - x0)$

$PMort = LPD * (PHYTO - x0)$

$Resusp = A_mix1 * (DETRITUS - DIN)$

$ExtrD = SD_ext$

#Nutrients Processes

$ZRecycl = LZN * (ZOOPL - x0)$

$PResp = LPN * (PHYTO - x0)$

$Strat_Mix = A_mix1 * (DETRITUS - DIN)$

$ExtrN = SN_ext$

$Puptake = PHYTO * uptake$

#Plakton Processes

$Plankton_Mort = (LPN + LPD) * (PHYTO - x0)$

$Zooplankton_Grazing = grazing * PHYTO$

#Zooplankton Processes

$Mortality = (LZD + LZN) * (ZOOPL - x0)$

$dDIN = ZRecycl + PResp + Strat_Mix + ExtrN - Puptake$

$dPHYTO = Puptake - Plankton_Mort - Zooplankton_Grazing$

$dZOOPL = Zooplankton_Grazing - Mortality$

$dDETRITUS = ZMort + PMort - Resusp + ExtrD$

the output, packed as a list

$list(c(dDIN, dPHYTO, dZOOPL, dDETRITUS))$

$\})$

the rate of change

} # end of model

```
#-----#
```

```
# the model parameters: #
```

```
#-----#
```

```
parameters<-c(k_N = .1,      # half saturation constant
              r_max = 1,      # max uptake rate of phytoplankton
              LPN = .01,      # respiration / extracellular release
              LPD = .02,      # loss rate of zooplankton
              LDN = .02,
              g_max = .5,     # max grazing rate
              I = 1.2,        # Ivlev constant
              LZN = .01,      # in upper layer recycled material
              LZD = .02,      # loss rate of zooplankton
              x0 = .01,       # background plankton level
              SN_ext = 0,
              SD_ext = 0)
```

```
#-----#
```

```
# the initial conditions: #
```

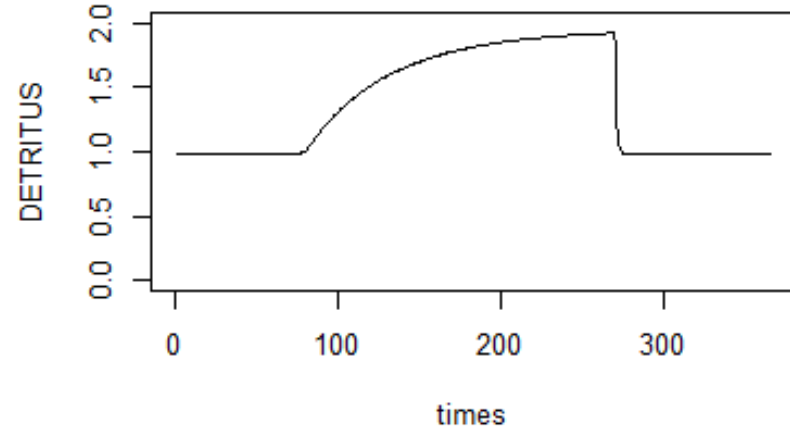
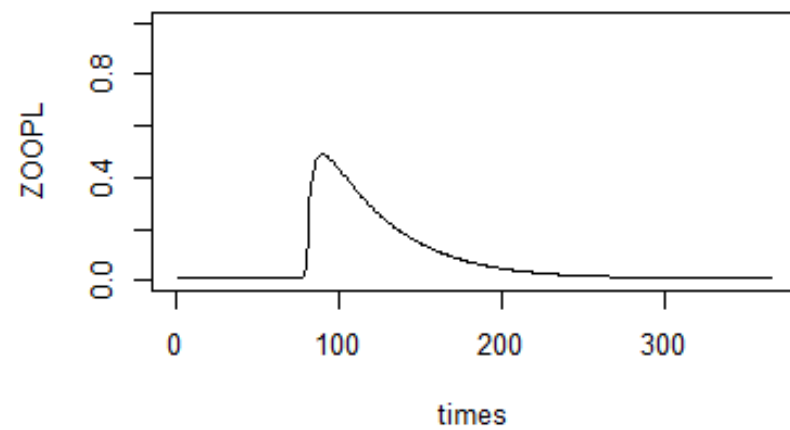
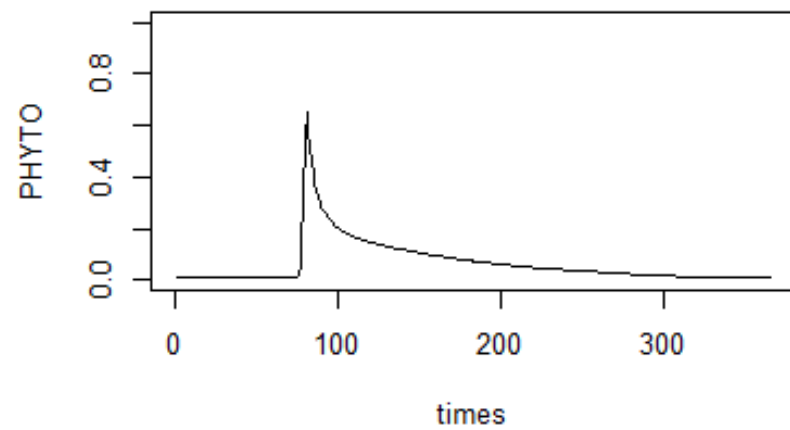
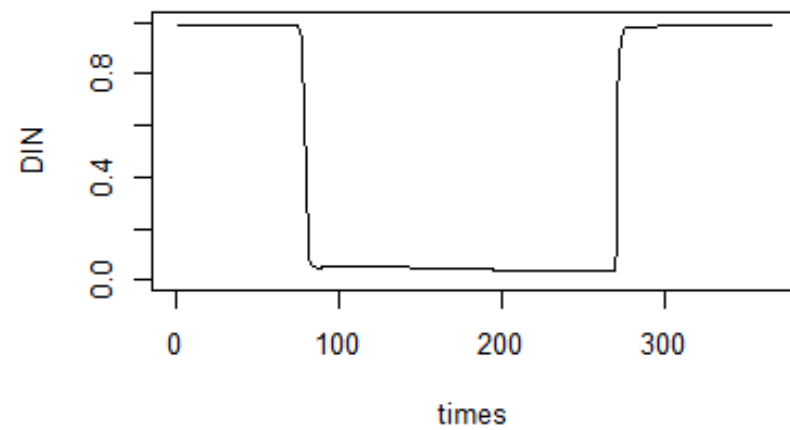
```
#-----#
```

```
state <-c(DIN  =0.99,          # state variable initial conditions, units mmolN/m3
          PHYTO =0.01,
          ZOOPL =0.01,
          DETRITUS =0.99)
```

```
#-----#  
# RUNNING the model: #  
#-----#  
# 2 steps  
# step 1 : run the model for 365 days, no intermediate output required
```

```
times    <-seq(1,365, by=1)  
out      <-as.data.frame(ode(state,times,NPZD,parameters))
```

```
par(mfrow=c(2,2))  
plot(times,out$DIN, typ='l',xlim=c(0,365),ylim=c(0,1),ylab="DIN")  
plot(times,out$PHYTO, typ='l', xlim=c(0,365),ylim=c(0,1),ylab="PHYTO")  
plot(times,out$ZOOPL, typ='l', xlim=c(0,365),ylim=c(0,1),ylab="ZOOPL")  
plot(times,out$DETRITUS, typ='l', xlim=c(0,365),ylim=c(0,2),ylab="DETRITUS")
```



Κύρια συμπεράσματα

Το μοντέλο NPZD δεν περιλαμβάνει τους «αποσυνθετές» δηλ. τα βακτήρια

Ωστόσο, έμμεσα δράση τους λαμβάνεται υπόψη καθώς θεωρούμε ότι:

A) η βιομάζα των βακτηρίων είναι σε κατάσταση ισορροπίας (steady state) δηλ. σταθερή στο χρόνο, ($dB/dt = 0$)

B) Η οργανική βιομάζα (φυτοπλαγκτόν + ζωοπλαγκτόν) αποσυντίθεται στιγμιαία και πλήρως και απελευθερώνεται ως ανόργανα θρεπτικά άλατα.

Βελτιωμένο μοντέλο NPZD

Για να γίνει το μοντέλο όσο γίνεται πιο ρεαλιστικό, εισάγουμε στον προηγούμενο κώδικα δύο αλλαγές:

A) Μεταβλητοί ρυθμοί θανάτωσης φυτοπλαγτόν

Παρατηρήσεις πεδίου δείχνουν ότι ο ρυθμός βύθισης φυτοπλαγκόν λόγω θανάτου είναι υψηλότερος κατά την διάρκεια επεισοδίων ευτροφισμού και χαμηλότεροι κατά την oligotrophic περίοδο.

Συνεπώς:

$$L_{PD} = \theta l_{PD} \exp[-(t - t_{start})/30] + \theta l_{PD}^0$$

Β) Μεταβλητή σταθερά ημι-κορεσμού

Πρόκειται για μία παραμετροποίηση της συγκέντρωσης του φυτοπλαγκτόν πριν και μετά την άνθιση κατά τον ευτροφισμό. Καθώς ο ευτροφισμός εξελίσσεται τα είδη διαδέχονται το ένα το άλλο. Έτσι μπορεί να ξεκινήσουμε με την άνθιση των διατόμων και να περάσουμε σε άνθιση δυνομαστιγωτών. Άρα διαφορετικά είδη φυτοπλαγκτόν, διαφορετικές σταθερές ημι-κορεσμού.

$$k_N = k_N^0 \exp[a_e (T - T_{ref})]$$

Γ) Μεταβλητοί ρυθμοί αναπνοής σχετιζόμενοι με την πρόσληψη θρεπτικών

Οι ρυθμοί αναπνοής και έκλυσης θρεπτικών είναι συνάρτηση της παραγωγής φυτοπλαγκτόν και όχι της βιομάζας του.

$$L_{PN} = l_{PN} R(N, T)$$

Τέλος εφαρμόζουμε κάποιους μεταβλητούς ρυθμούς κατανάλωσης φυτοπλαγκτόν από ζωοπλαγκτόν

$$g_{\max} = g_{\max}^0 \exp[a_e (T - T_{\text{ref}})]$$

$$I_v = I_v^0 \exp[a_e (T - T_{\text{ref}})]$$

$$L_{\text{ZN}} = l_{\text{ZN}} G(P, T)$$

$$r_{\max 0}=1 \mathrm{d}^{-1}$$

$$g_{\max }=0.5 \mathrm{d}^{-1}$$

$$K_{n 0}=0.05$$

$$I_{v 0}=3$$

$$I_{P N}=0.1 \mathrm{d}^{-1}$$

$$I_{Z N}=0.3 \mathrm{d}^{-1}$$

$$I_{P D 0}=0.1 \mathrm{d}^{-1}$$

$$I_{Z D 0}=0.08 \mathrm{d}^{-1}$$

$$A_{\text {mix }}=0.5 \mathrm{d}^{-1}$$

$$L_{D N}=0.001 \mathrm{d}^{-1} \text { or } 0.003 \mathrm{d}^{-1}$$

$$N(0)=0.99$$

$$P(0)=0.01$$

$$Z(0)=0.01$$

$$D(0)=0.99$$

$$Z_{b k}=0.01$$

$$P_{b k}=0.01$$

$$S_{\text {ext } N}=0.0 \text { or } 0.005 \mathrm{d}^{-1}$$

$$S_{\text {ext } D}=0.0 \text { or } -0.005 \mathrm{d}^{-1}$$

```
## An upgraded NPZD model (Nutrient, Phytoplankton, ##  
## Zooplankton, Detritus) ##  
#####
```

```
# load package with the integration routine:  
install.packages("deSolve")  
library(deSolve)
```

```
#-----#  
# the model equations: #  
#-----#
```

```
daylength = function(t) {  
  latitude = 40  
  lat = latitude*2*pi/360  #Latitude  
  
  A = c(.006918,-.399912,-.006758,-.002697)  
  B = c(.070257,.000907, .001480)  
  G = 2*pi/365*t  
  # inclination  
  inc = A[1]+A[2]*cos(G)+A[3]*cos(2*G)+A[4]*cos(3*G)  
  inc = inc+B[1]*sin(G)+B[2]*sin(2*G)+B[3]*sin(3*G)  
  # length of the day  
  arg = -sin(lat)*sin(inc)/cos(lat)/cos(inc)  
  Delta = 24/pi*acos(arg)  # in hours  
  Delta/24      # normalized  
}
```

```
t = 1:1095
```

```
daylength(t)-daylength(75)
```

```
NPZD<-function(t,state,parameters)
```

```
{
```

```
  with(as.list(c(state,parameters)),{ # unpack the state variables, parameters
```

```
    d0 = daylength(75)
```

```
    d1 = daylength(t)
```

```
    if (d1>d0) {
```

```
      theta=1
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
      theta=0
```

```
    }
```

```
    tstart1 = 210;  tend1 = 220
```

```
    d2 = daylength(tstart1);  d3 = daylength(tend1)
```

```
    if (d1>d2) {
```

```
      theta1=1
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
      theta1=0
```

```
    }
```

```
if (d1>d3) {  
  theta2=1  
}  
else {  
  theta2=0  
}
```

zeta = theta2-theta1

A_mix = .5 # winter mixing

alfa = 0.063

Epp = exp(alfa*d1) # Eppley factor

r_max = r_max*theta*d1*Epp

k_N1 = k_N/Epp

uptake = r_max*DIN*DIN/(k_N1+DIN*DIN)

g_max = g_max*theta*d1*Epp

I=I*Epp*1.43*d1

grazing = g_max*(1-exp(-I*PHYTO*PHYTO))

theti = 1-theta

A_mix1 = theti*A_mix

LPN1 = LPN*uptake*PHYTO

LPD1 = (theta*LPD*exp(-(t-tstart1)/30)+theti*LPD))*PHYTO

LZN1 = LZN*grazing*ZOOPL

LZD1 = LZD*(1-d1)*ZOOPL

LD = 0.01*zeta

#Detritus Processes

$$\text{ZMort} = \text{LZD} * (\text{ZOOPL} - x0)$$

$$\text{PMort} = \text{LPD1} * (\text{PHYTO} - x0)$$

$$\text{Resusp} = \text{A_mix1} * (\text{DETRITUS} - \text{DIN})$$

$$\text{ExtrD} = \text{SD_ext}$$

#Nutrients Processes

$$\text{ZRecycl} = \text{LZN} * (\text{ZOOPL} - x0)$$

$$\text{PResp} = \text{LPN} * (\text{PHYTO} - x0)$$

$$\text{Strat_Mix} = \text{A_mix1} * (\text{DETRITUS} - \text{DIN})$$

$$\text{ExtrN} = \text{SN_ext}$$

$$\text{Puptake} = \text{PHYTO} * \text{uptake}$$

#Plakton Processes

$$\text{Plankton_Mort} = (\text{LPN} + \text{LPD1}) * (\text{PHYTO} - x0)$$

$$\text{Zooplankton_Grazing} = \text{grazing} * \text{PHYTO}$$

#Zooplankton Processes

$$\text{Mortality} = (\text{LZD} + \text{LZN}) * (\text{ZOOPL} - x0)$$

$$d\text{DIN} = -\text{Puptake} + \text{ZRecycl} + \text{PResp} + \text{Strat_Mix} + \text{LD} * \text{DETRITUS} + \text{ExtrN}$$

$$d\text{PHYTO} = \text{Puptake} - \text{Plankton_Mort} - \text{Zooplankton_Grazing}$$

$$d\text{ZOOPL} = \text{Zooplankton_Grazing} - \text{Mortality}$$

$$d\text{DETRITUS} = \text{ZMort} + \text{PMort} - \text{Resusp} - \text{LD} * \text{DETRITUS} + \text{ExtrD}$$

```

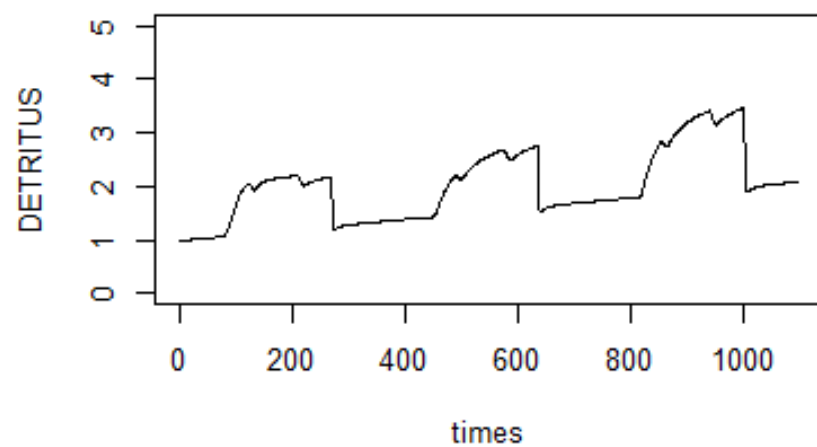
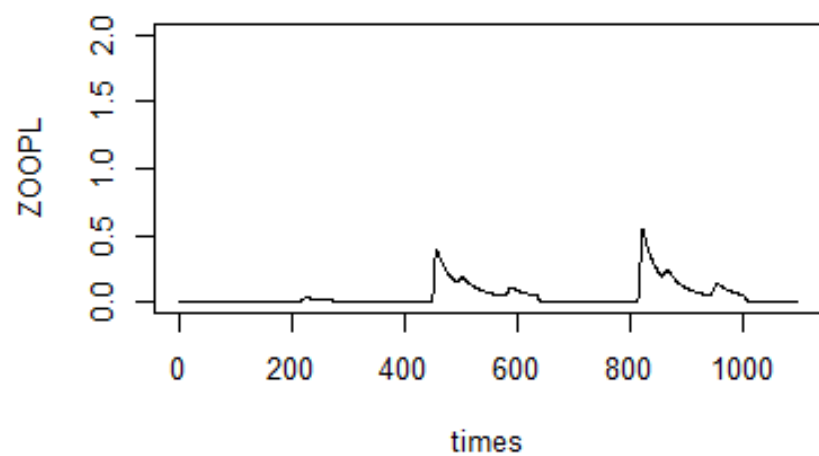
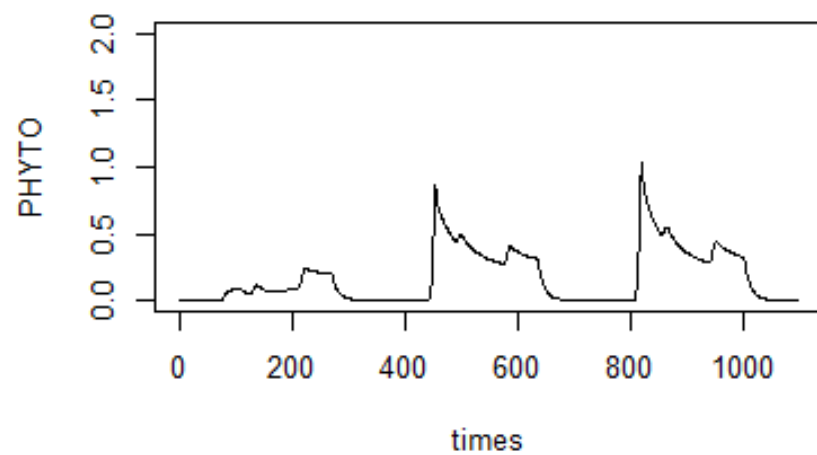
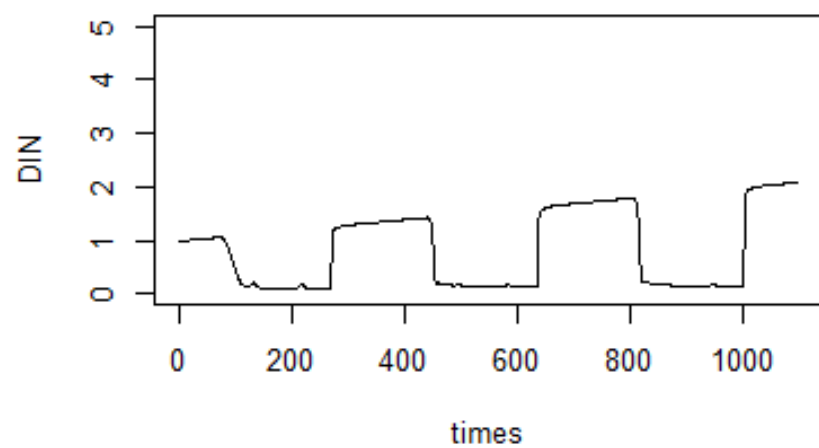
# the output, packed as a list
  list(c(dDIN,dPHYTO,dZOOPL,dDETRITUS))
})
} # end of model
#-----#
# the model parameters: #
#-----#
parameters<-c(k_N = .05,      # half saturation constant
              r_max = 1,      # max uptake rate of phytoplankton
              LPN = .1,       # respiration / extracellular release
              LPD = .1,       # loss rate of zooplankton
              LDN = .2,
              g_max = .5,     # max grazing rate
              l = 3,          # lvlev constant
              LZN = .3,       # in upper layer recycled material
              LZD = .08,      # loss rate of zooplankton
              x0 = .01,       # background plankton level
              SN_ext = 0.002,
              SD_ext = 0)
#-----#
# the initial conditions: #
#-----#
state <-c(DIN =0.99,          # state variable initial conditions, units mmolN/m3
          PHYTO =0.01,
          ZOOPL =0.01,
          DETRITUS =0.99)

```

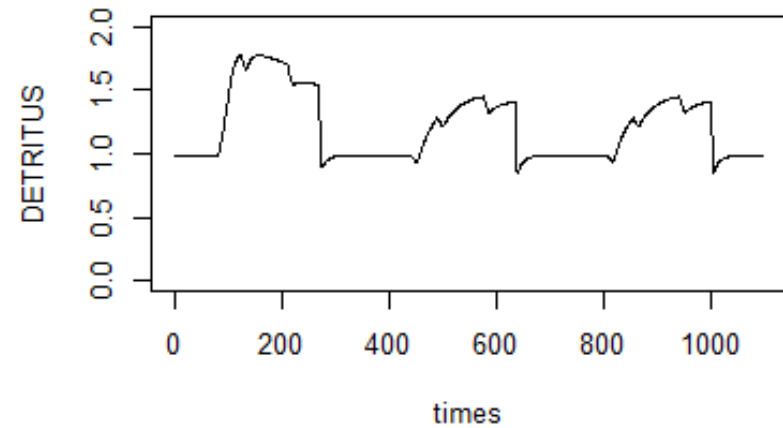
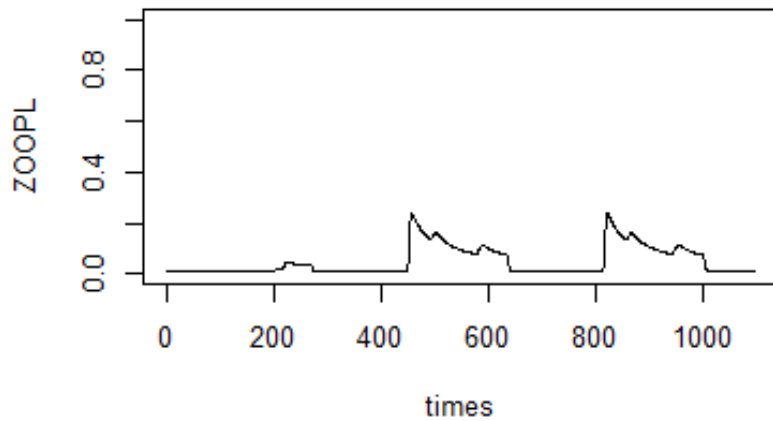
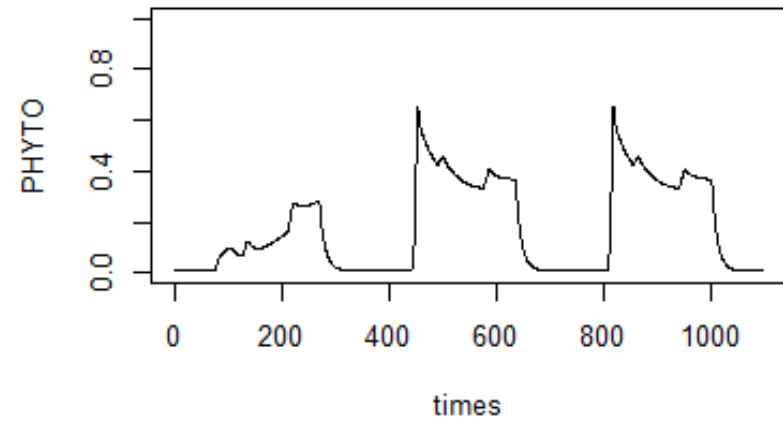
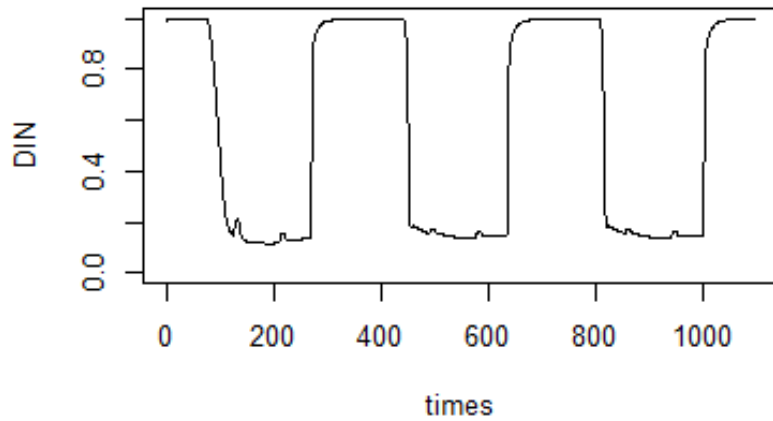
```
#-----#  
# RUNNING the model:  #  
#-----#  
# 2 steps  
# step 1 : run the model for 365 days, no intermediate output required
```

```
times    <-seq(1,1095, by=1)  
out      <-as.data.frame(ode(state,times,NPZD,parameters))
```

```
par(mfrow=c(2,2))  
plot(times,out$DIN, typ='l',xlim=c(0,1095),ylim=c(0,5),ylab="DIN")  
plot(times,out$PHYTO, typ='l', xlim=c(0,1095),ylim=c(0,2),ylab="PHYTO")  
plot(times,out$ZOOPL, typ='l', xlim=c(0,1095),ylim=c(0,2),ylab="ZOOPL")  
plot(times,out$DETRITUS, typ='l', xlim=c(0,1095),ylim=c(0,5),ylab="DETRITUS")
```



Όταν $SN_{ext} = 0.005$ η εξωτερική φέρτιση θρεπτικών από ποτάμια και $Sd_{ext} = -0.005$ ο ρυθμός ιζηματοποίησης της νεκρής οργανικής ύλης.



Lagoon box model

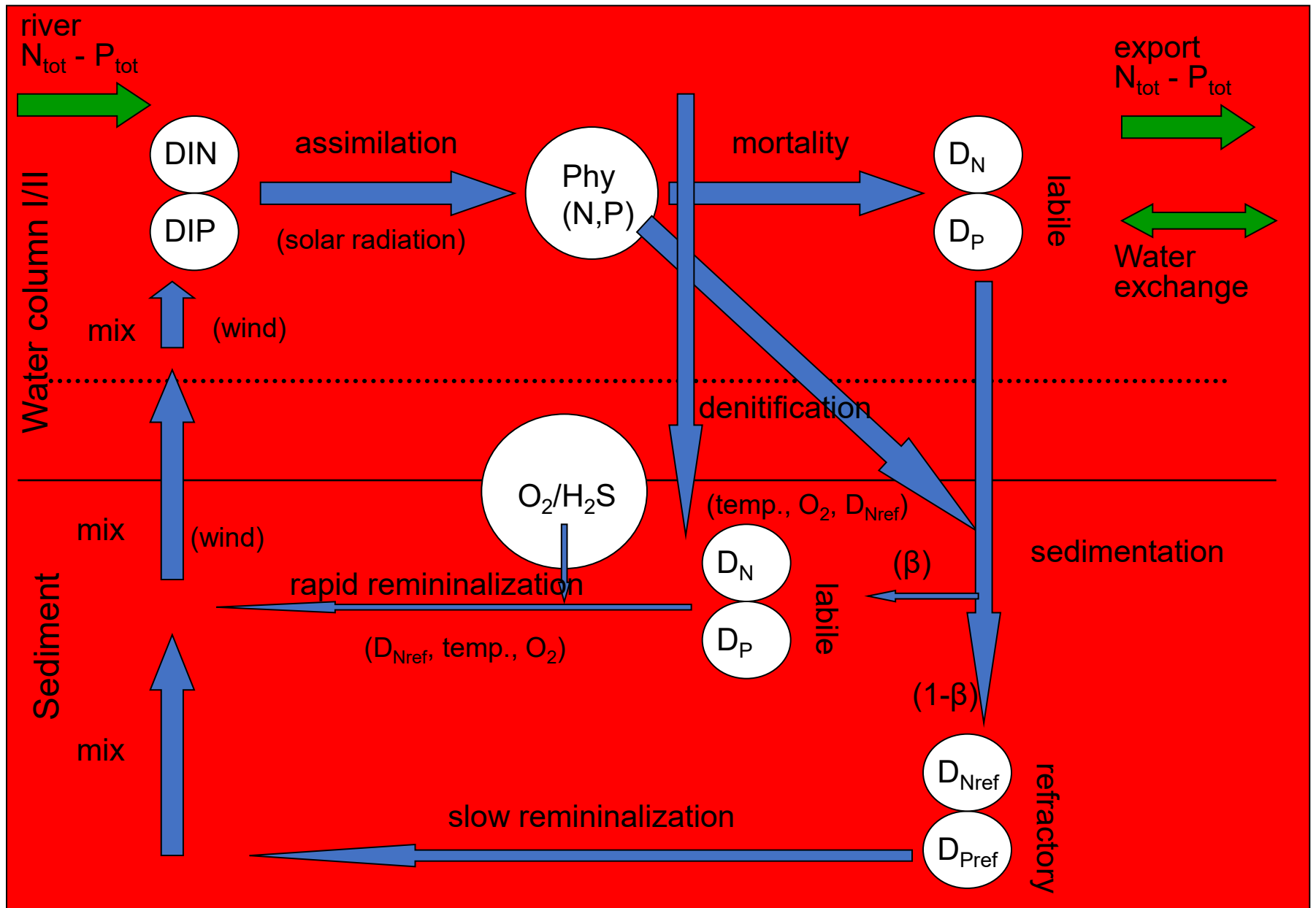
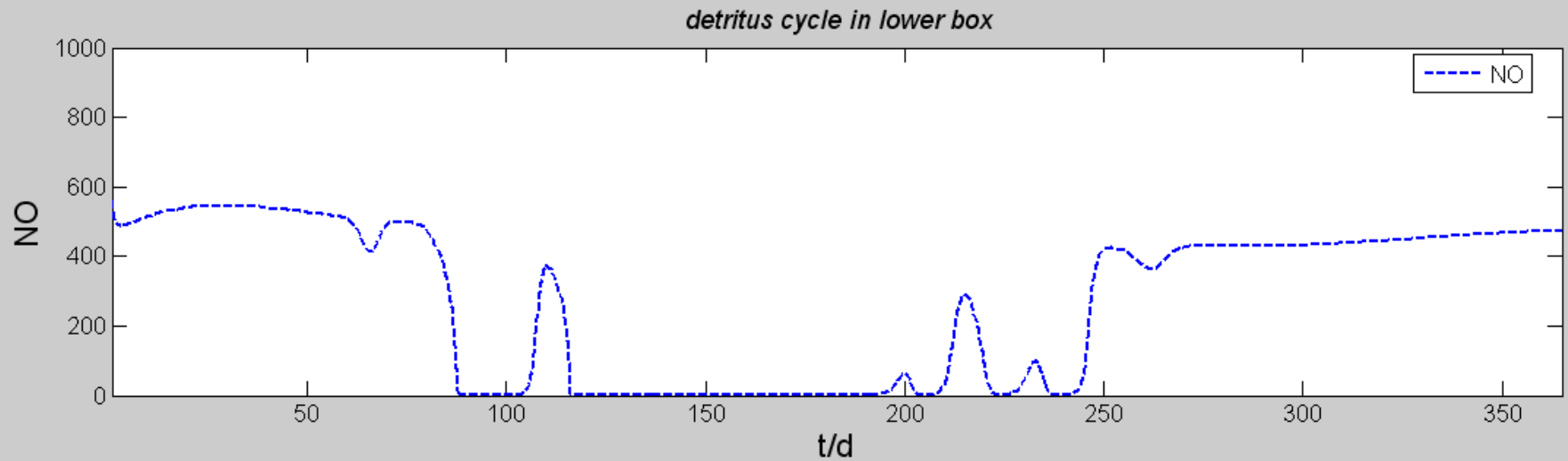
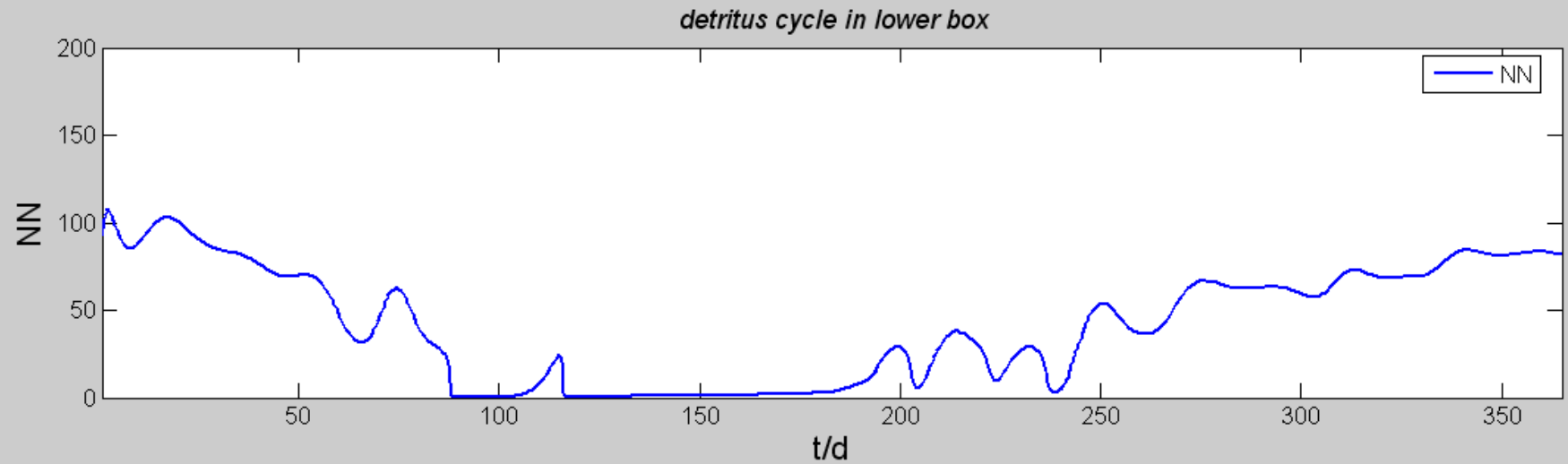


Table 1
State variables of the model

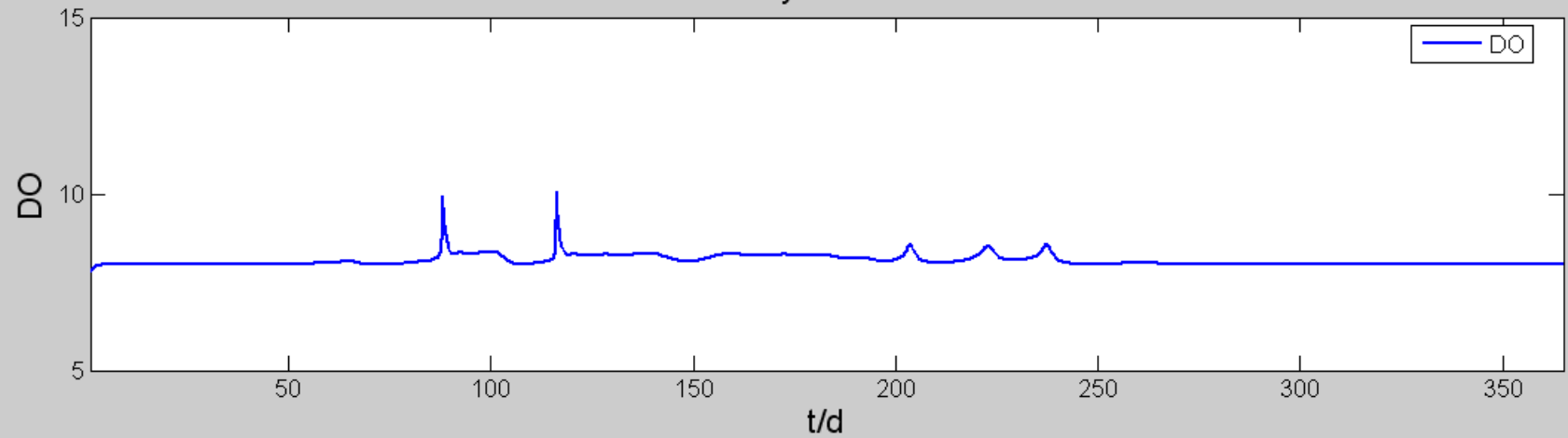
Index k	Definition	Units
<i>Pelagic variables</i>		
A1	Autotroph group 1, cyanobacteria	mg N m ⁻³
A2	Autotroph group 2, diatoms	mg N m ⁻³
A3	Autotroph group 3, summer species	mg N m ⁻³
ZH	Heterotroph community	mg N m ⁻³
DN	Detritus nitrogen	mg N m ⁻³
DP	Detritus phosphorus	mg P m ⁻³
DS	Detritus silica, biogenic silica	mg Si m ⁻³
NN	Reduced nitrogen, ammonium	mg N m ⁻³
NP	Phosphate	mg P m ⁻³
NS	Silicate	mg Si m ⁻³
NO	Oxidized nitrogen, nitrite + nitrate	mg N m ⁻³
O2	Dissolved oxygen	g O ₂ m ⁻³
<i>Sediment variables</i>		
BN	Benthic nitrogen	mg N m ⁻²
BP	Benthic phosphorus	mg P m ⁻²
BS	Benthic silica	mg Si m ⁻²

1-box Model Results



1-box Model Results

detritus cycle in lower box



detritus cycle in lower box

