



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας-Σχολή Περιβάλλοντος

Ανοικτό ακαδημαϊκό μάθημα

Μέθοδοι Προσομοίωσης και Εφαρμογές

Διδάσκοντες: Γ. Τσιρτσής, Καθηγητής

Δρ Β. Κολοβογιάννης, ΕΔΙΠ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## 7. ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΩΝ (BOX MODELS)

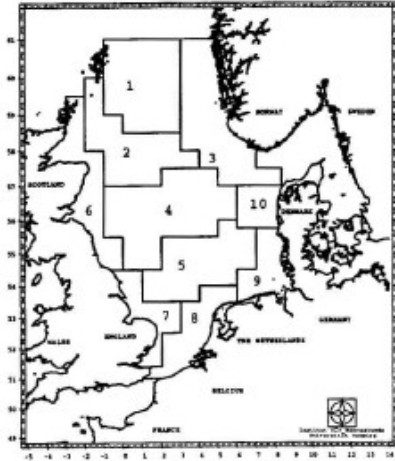
### 7.1. Μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (0-D)

Πέραν της μεταβλητότητας στο χρόνο, ένα θαλάσσιο σύστημα σχεδόν πάντα παρουσιάζει και χωρική μεταβλητότητα σε 1, 2 ή και 3 διαστάσεις. Μια πρώτη προσέγγιση στη χωρική διακριτοποίηση παρέχει μια παραλλαγή των 0-D μοντέλων, τα λεγόμενα box models, στα οποία η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε διαμερίσματα που θεωρείται ότι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς κάποια χαρακτηριστικά (π.χ. εισροές ύλης από χέρσο, γεινίαση με ανοιχτή θάλασσα). Εισάγεται έτσι κάποιου είδους χωρική διαφοροποίηση. Το σύστημα των εξισώσεων του μοντέλου επιλύεται ξεχωριστά για κάθε διαμέρισμα, που μπορεί να αντιπροσωπεύει μια θαλάσσια περιοχή αρκετών Km<sup>2</sup> και μεταβλητού βάθους, αλλά που αντιμετωπίζεται ως ομογενής όπως στα 0-D μοντέλα. Οι ανταλλαγές ύλης μεταξύ των διαμερισμάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να υπολογιστούν οι ροές μέσω των διεπιφανειών των διαμερισμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η φυσική κυκλοφορία δεν μπορεί να αγνοηθεί και οι ροές είτε παραμετροποιούνται με σχετικά απλές σχέσεις μεταφοράς-διάχυσης είτε υπολογίζονται με ακρίβεια από μοντέλο κυκλοφορίας.

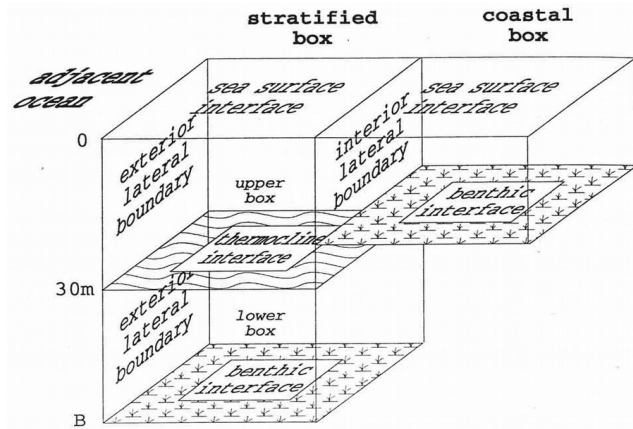
Παραδείγματα μοντέλων διαμερισμάτων: Ο Tsirtsis (1995) μελέτησε στοιχεία της δυναμικής του παράκτιου οικοσυστήματος της πόλης της Μυτιλήνης (Λέσβος) με τη χρήση box-model 2 διαμερισμάτων, αντιπροσωπευτικών ολιγότροφης και εύτροφης περιοχής αντίστοιχα. Το οικολογικό μοντέλο ERSEM, που περιγράφεται παρακάτω, εφαρμόστηκε αρχικά στη Βόρεια Θάλασσα ως σύστημα 2 στρωμάτων – η άνω στήλη νερού έως 30μ βάθος και η βαθύτερη στήλη έως πυθμένα, με κατακόρυφες αλλά και οριζόντιες ανταλλαγές υπολογιζόμενες από ξεχωριστό μοντέλο υδροδυναμικής (Σχήμα 2.15 α-β) (Lenhart et al. 1995). Οι Arhonditsis et al. (2000) χώρισαν τον κόλπο της Γέρας (Λέσβος) σε 4 διαμερίσματα, χαρακτηριστικά των εισροών που δέχονταν από τη λεκάνη απορροής, σε μια μελέτη της επίδρασης μη-σημειακών πηγών θρεπτικών στη δυναμική του οικοσυστήματος του κόλπου. Μια 2-D εκδοχή του υδροδυναμικού μοντέλου POM χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι ροές μέσα και έξω από τα διαμερίσματα (Σχήμα 2.15γ). Με την ίδια λογική, οι Chapelle et al. (2000) εφάρμοσαν ένα σύστημα προσομοίωσης οικολογικού box-model και μοντέλου 2-D κυκλοφορίας στη λιμνοθάλασσα Thau, στις μεσογειακές ακτές της Γαλλίας (Σχήμα 7.1).

Τα μειονεκτήματα του διαχωρισμού μιας περιοχής σε διαμερίσματα είναι η δημιουργία τεχνητά-αριθμητικά ενισχυμένων ροών ανταλλαγής μεταξύ των διαμερισμάτων και η αδυναμία περιγραφής φαινομένων της στήλης νερού, όπως ο σχηματισμός μέγιστων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης (OSPAR Commission 2008). Βεβαίως, όσο πιστότερα περιγράφονται οι ανταλλαγές π.χ. με τη παράλληλη χρήση ενός υδροδυναμικού μοντέλου, όσο μικρότερο είναι το ύψος ενός διαμερίσματος, όσο περισσότερα είναι τα διαμερίσματα στα οποία έχει καταταμηθεί η στήλη νερού, τόσο ελαχιστοποιούνται τα μειονεκτήματα αυτά. Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση του διαχωρισμού μιας περιοχής σε διαμερίσματα ή πολύγωνα τα οποία θεωρείται ότι παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (βιογεωγραφικά, οικολογικά, βαθυμετρικά) υιοθετείται από σύγχρονες εφαρμογές μοντέλων οικοσυστήματος (π.χ. Σχήμα 7.1ε-στ, Fulton et al. 2010, Ainsworth et al. 2012, Macias et al. 2012) κυρίως για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας.

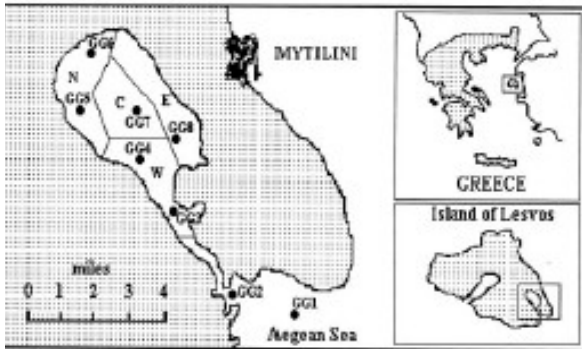
(α)



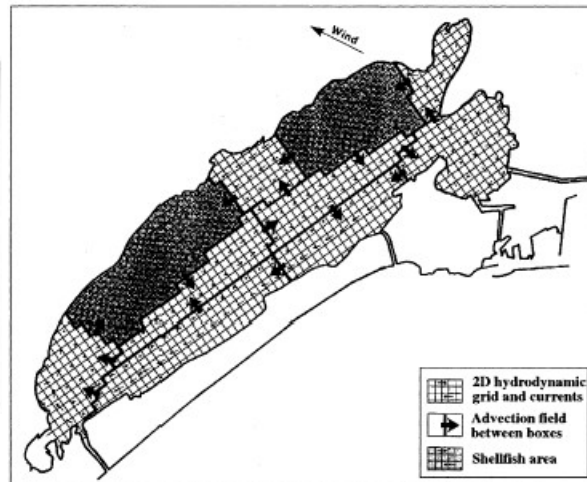
(β)



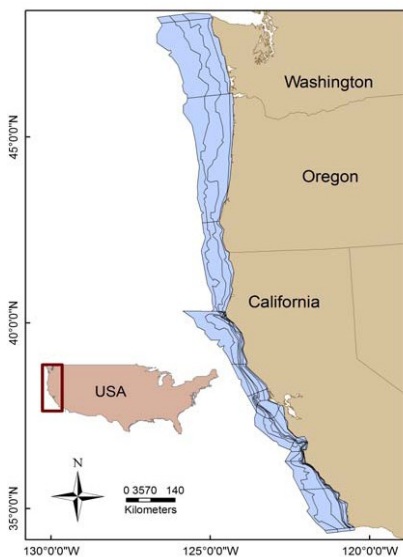
(γ)



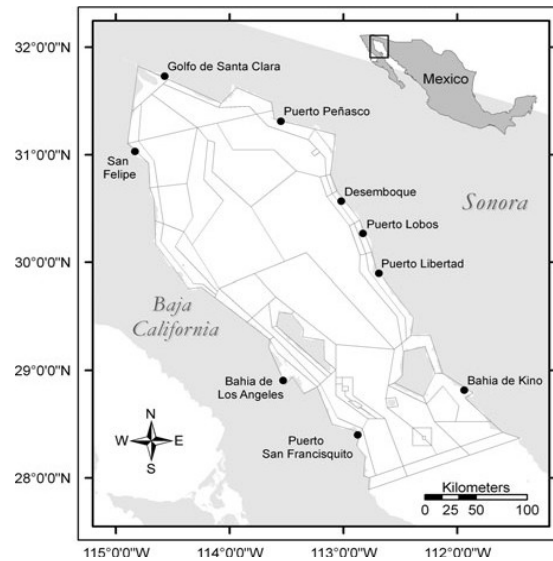
(δ)



(ε)



(στ)

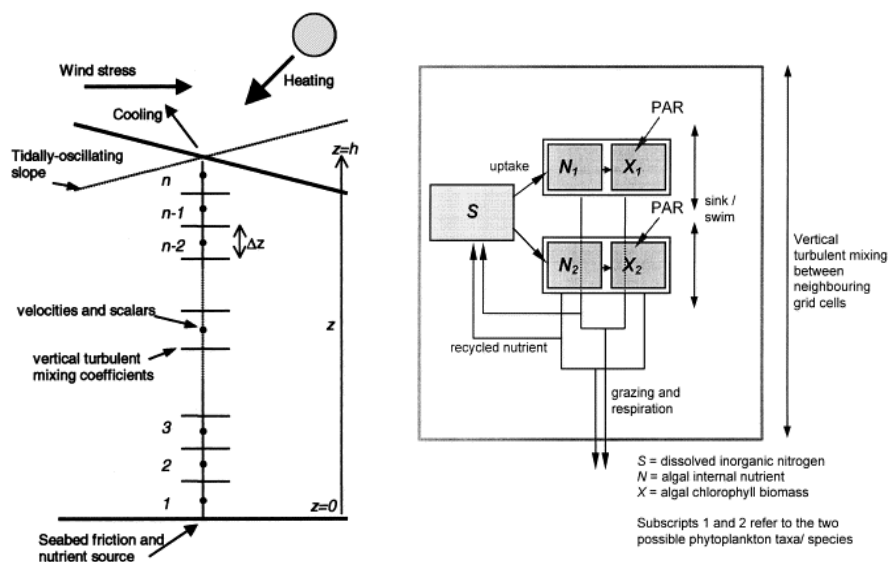


Σχήμα 7.1. (α) Η διαίρεση της περιοχής μελέτης σε διαμερίσματα και (β) η δομή των διαμερισμάτων σε μια εφαρμογή του μοντέλου ERSEM στη Βόρεια Θάλασσα (από Lenhart et al. 1995). (γ) Ο Κόλπος

Γέρος και η διαίρεσή του σε 5 διαμερίσματα (Arhonditsis et al. 2000). (δ) Box-model για την λιμνοθάλασσα Thau, Γαλλία (Chapelle et al 2000). (ε) και (στ) Εφαρμογές του μοντέλου Atlantis στις δυτικές ακτές των Η.Π.Α. (Fulton et al. 2010, Ainsworth et al. 2012).

## 7.2. Μοντέλα μίας διάστασης (1-D)

Το κίνητρο για την ανάπτυξη 1-D μοντέλων (στήλης νερού - κατακόρυφη διάσταση) ήταν η κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην εαρινή έξαρση του φυτοπλαγκτού και η ενιαία αντιμετώπιση του φαινομένου από την σκοπιά της βιολογίας και της φυσικής ταυτόχρονα, στην ίδια χωρική διάσταση και κάτω από τους ίδιους μηχανισμούς διέγερσης (Radach and Moll 2001). Τα περισσότερα 1-D ομοιώματα περιλαμβάνουν ένα απλό σχετικά οικολογικό μοντέλο, 3-15 μεταβλητών κατάστασης και αναπτύσσονται συνήθως στα πλαίσια προγράμματος για μια συγκεκριμένη περιοχή. Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεγάλου αριθμού 1-D οικολογικών μοντέλων μπορεί να βρεθεί στους Evans and Garçon (1997) που εστιάζουν σε βιογεωχημικές διεργασίες σε ωκεάνιες περιοχές και στους Radach and Moll (2001).



Σχήμα 7.1. Σχηματική παράσταση 1D οικολογικού μοντέλου: το κατακόρυφο πλέγμα του φυσικού μοντέλου και τα μεγέθη που υπολογίζει και η δομή του απλού βιοχημικού μοντέλου που επιλύεται σε κάθε σημείο του πλέγματος (δηλ. σε κάθε διαμέρισμα). Τροποποιημένο από Sharples (1999).

Από τεχνικής άποψης, τα 1-D μοντέλα εφαρμόζονται σε σημεία στο θαλάσσιο χώρο όπου μελετάται η διακύμανση των οικολογικών μεταβλητών σε συνάρτηση με το βάθος. Το Σχήμα 2.16 είναι παράδειγμα της δομής ενός μοντέλου στήλης νερού: η στήλη χωρίζεται σε n διαμερίσματα από κατακόρυφο πλέγμα (grid), ένα φυσικό μοντέλο (όπως π.χ. το τμήμα του POM των Blumberg and Mellor (1987) που υπολογίζει την κατακόρυφη ανάμιξη με το τυρβώδες μοντέλο των Mellor and Yamada (1982)) οδηγούμενο από μηχανισμούς διέγερσης αναλαμβάνει να υπολογίσει κατακόρυφες ταχύτητες και συντελεστές κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν το δυναμικό φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το οικοσύστημα που προσομοιώνει το

βιοχημικό μοντέλο. Έτσι προκύπτει ένα συζευγμένο μονοδιάστατο σύστημα προσομοίωσης με πλεονέκτημα την σχετική απλότητα και μειονέκτημα την έλλειψη της οριζόντιας φυσικής κυκλοφορίας και της επίδρασης που ασκεί, καθώς και την έλλειψη της οριζόντιας χωρικής διάστασης στην διερεύνηση οικολογικών διεργασιών.

Θα αναφερθούν ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές αυτού του τύπου, από αυτές που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία για διάφορες περιοχές. Τα NPZ(D) μοντέλα, συνδεδεμένα με μοντέλα κατακόρυφων φυσικών διεργασιών έχουν το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, με στόχους που ποικίλουν από αναπαραγωγή και εξήγηση παρατηρήσεων πεδίου, κατανόηση βασικών δομών και διεργασιών μέχρι ποσοτικοποίηση ισοζυγίων αζώτου και φωσφόρου.

Ο Moll (1997c) χρησιμοποίησε ένα μοντέλο NPZD πρωτογενούς παραγωγής για να αναπαράγει την -περιοριζόμενη από φωσφόρο- ανάπτυξη και έξαρση ενός φυτοπλαγκτονικού είδους στα ανοιχτά των γερμανικών ακτών (German Bight) στη Βόρεια Θάλασσα. Για να προσομοιωθεί με επιτυχία ο ετήσιος κύκλος της δυναμικής του φυτοπλαγκτού, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μηχανισμοί αναγέννησης των θρεπτικών και κατ' επέκταση, ο μικροβιακός κύκλος στο τροφικό πλέγμα. Ακολουθώντας αυτή τη γραμμή σκέψης, οι Fasham et al. (1990) επέκτειναν το μοντέλο NPZD περιλαμβάνοντας έναν απλό μικροβιακό κύκλο. Το μοντέλο τους, που αποτέλεσε σημείο αναφοράς για πλήθος εφαρμογών, αποτελείτο από ένα φυσικό μοντέλο επιφανειακού αναμεμιγμένου στρώματος και 7 οικολογικές μεταβλητές: φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτήρια, νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα, διαλυτό οργανικό άζωτο και θρύμματα (detritus) και ποσοτικοποιούσε ικανοποιητικά τον κύκλο αζώτου στα επιφανειακά ωκεάνια στρώματα. Η εφαρμογή των Oguz et al. (1999) στη Μαύρη Θάλασσα περιλάμβανε ως μεταβλητές τα νιτρικά, αμμωνιακά, σωματιδιακή ύλη (θρύμματα), δύο ομάδες φυτοπλαγκτού και δυο ομάδες ζωοπλαγκτού. Τα νεκρά κύτταρα και η σωματιδιακή ύλη που βυθιζόταν από την εύρωτη ζώνη ανοργανοποιούνταν σε αμμωνιακά, που μετατρέπονταν με οξείδωση σε νιτρικά, ενώ η κατακόρυφη τυρβώδης διάχυση τροφοδοτούσε το επιφανειακό στρώμα με θρεπτικά. Με το μοντέλο αυτό και περιλαμβάνοντας τον κύκλο αζώτου, οι ερευνητές πέτυχαν την αναπαραγωγή της θερινής πρωτογενούς παραγωγής.

Οι Tett and Walne (1995) σε μια εφαρμογή τους στη Βόρεια Θάλασσα πρότειναν μια σειρά από βελτιώσεις για να αυξηθεί η ικανότητα αναπαραγωγής των οικολογικών μεταβλητών από τα 1-D ομοιώματα: (1) αύξηση της κατακόρυφης διακριτικής ικανότητας, (2) παραμετροποίηση και συνυπολογισμός της οριζόντιας κυκλοφορίας, (3) αύξηση της τροφικής διακριτικής ικανότητας με διαίρεση του 'φυτοπλαγκτού' - 'ζωοπλαγκτού' σε επιμέρους λειτουργικές ομάδες και προσθήκη κύκλων και άλλων θρεπτικών - φωσφόρος, πυρίτιο, διαλυμένες οργανικές ενώσεις, (4) σύνδεση στήλης - πυθμένα με περιγραφή βιογεωχημικών διεργασιών του ιζήματος και επαναιώρησης. Η Μεσόγειος έχει επίσης υπάρξει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών. Οι Allen et al. (2002) χρησιμοποίησαν μια μονοδιάστατη έκδοση του ERSEM, την οποία εφάρμοσαν σε 7 σημεία-σταθμούς κατά μήκος της Μεσογείου. Στόχος ήταν να μελετηθεί η πρωτογενής και βακτηριακή παραγωγή κατά μήκος της τροφικής βαθμίδας που παρατηρείται στη θάλασσα αυτή, και να προσδιοριστούν βιογεωχημικοί και φυσικοί μηχανισμοί που οδηγούν σε αυτήν την οριζόντια βαθμίδα μεταξύ δυτικής-ανατολικής Μεσογείου. Ανάμεσα στα συμπεράσματα ήταν ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζουν οι φυσικές διεργασίες κατακόρυφης ανάμιξης στον καθορισμό των επιπέδων ετήσιας πρωτογενούς και βακτηριακής παραγωγής, ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας έχει περισσότερο αυτότροφη παρά ετερότροφη προέλευση, η ανατολική λεκάνη χαρακτηρίζεται από έντονο ανταγωνισμό για θρεπτικά μεταξύ φυτοπλαγκτού και βακτηρίων, ενώ η δυτική λεκάνη χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα ετερότροφης δραστηριότητας. Οι Shigemitsu et al. (2012) χρησιμοποίησαν ένα κατακόρυφο μονοδιάστατο μοντέλο 14 μεταβλητών κατάστασης για να περιγράψουν ποσοτικά τον ετήσιο κύκλο

της δυναμική του διαλυτού σιδήρου και άλλων θρεπτικών στη στήλη νερού σε περιοχή ανοιχτά της Ιαπωνίας στον βορειοδυτικό Ειρηνικό. Τα μονοδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται και σε οικοσυστήματα λιμνών (π.χ. Prokorkin et al. 2010).

Βασικό πλεονέκτημα ενός κατακόρυφου 1-D μοντέλου έναντι πιο σύνθετων μοντέλων (π.χ. τρισδιάστατων) είναι η απλότητα σε σχέση με (1) τις ανάγκες αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων και (2) τις ανάγκες για δεδομένα σε ανοιχτά όρια, τα οποία ενδέχεται να είναι εκτενή και ανεπαρκώς ορισμένα λόγω της ποιότητας και ποσότητας των δεδομένων αυτών. Ωστόσο, τα κατακόρυφα 1-D μοντέλα κρίνονται ανεπαρκή για περιοχές με έντονες οριζόντιες βαθμίδες και σημαντικές οριζόντιες ανταλλαγές μάζας, όπως τα παράκτια συστήματα που επηρεάζονται από ανθρωπογενή δραστηριότητα (OSPAR Commission 2008).

### **7.3. Μοντέλα δύο διαστάσεων (2-D)**

Η ανάπτυξη και ωρίμανση ρεαλιστικών μοντέλων κυκλοφορίας για τους ωκεανούς και τις περιφερειακές θάλασσες και η ανάγκη να εξηγηθούν και να προσομοιωθούν οι χωρικές κατανομές των οικο-μεταβλητών έδωσε νέα ώθηση στα οικολογικά μοντέλα. Αναπτύχθηκαν δυο προσεγγίσεις: η κατακόρυφη τομή και το οριζόντιο δισδιάστατο πεδίο (Radach and Moll 2001). Στην κατακόρυφη τομή, το μοντέλο προσομοίωνε τη δυναμική ενός οικοσυστήματος σε κατακόρυφο επίπεδο κάθετα προς την ακτή (cross-shelf vertical plane), κυρίως σε περιοχές ανάβλυσης νερού. Οι εξισώσεις του συζευγμένου πλέον μοντέλου ήταν της μορφής 'μεταφορά-διάχυση-βιοχημεία', ενώ οι απλές σχέσεις που ποσοτικοποιούν τη 'βιοχημεία' θεωρήθηκαν επαρκείς για να περιγράψουν την κατακόρυφη δυναμική του οικολογικού συστήματος, καθώς αυτό καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη δυναμική της ανάβλυσης. Χαρακτηριστικό τέτοιο μοντέλο ήταν του Wroblewski (1977) για την θαλάσσια περιοχή του Oregon, Η.Π.Α.

Η δεύτερη προσέγγιση μελετάει την οριζόντια δισδιάστατη δομή και δυναμική ενός οικοσυστήματος. Για να προσομοιωθεί η χωρική κατανομή του φυτοπλαγκτού, για παράδειγμα, απαιτείται να περιγραφούν τα πεδία ροής και οι μέσες κατά βάθος ταχύτητες, δηλαδή η υδροδυναμική μιας περιοχής ολοκληρωμένη στην κατακόρυφη διάσταση. Οι οικολογικές εξισώσεις επιλύονται στο ίδιο οριζόντιο πλέγμα με το φυσικό μοντέλο. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι των Vested et al. (1996) που συνδύασαν ένα 2D μοντέλο κυκλοφορίας με ένα μοντέλο 12 οικολογικών μεταβλητών για να προσομοιώσουν έναν ετήσιο κύκλο στη Βόρεια Θάλασσα ενώ παράλληλα, συνέκριναν τη συμπεριφορά διαφόρων σχημάτων αριθμητικής επίλυσης της οριζόντιας μεταφοράς και διάχυσης, το μοντέλο FV2D που χρησιμοποίησαν οι van den Berg et al. (1996a) για να μελετήσουν την κατανομή και διακύμανση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στη Β. Θάλασσα και το μοντέλο των Chen et al. (1997), ένας συνδυασμός 2D μοντέλου κυκλοφορίας πρωτογενών εξισώσεων και NPZ οικολογικού μοντέλου για τη μελέτη της επίδρασης ποτάμιων απορροών στο οικοσύστημα της υφαλοκρηπίδα του Texas, Η.Π.Α. Πιο πρόσφατα παραδείγματα περιλαμβάνουν την εφαρμογή των Salalacinska et al. (2010), οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά ενός δισδιάστατου μοντέλου οικοσυστήματος και τις δυνατότητές του στην περιγραφή της δυναμικής τοξικών φυτοπλαγκτονικών εξάρσεων (HAB, harmful algal blooms) στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Θάλασσας και την πιο μικρής κλίμακας εφαρμογή των Arndt et al. (2011), οι οποίοι διερεύνησαν τη ροή και το μετασχηματισμό άνθρακα και θρεπτικών στο ρηχό παράκτιο σύστημα των εκβολών Scheldt μεταξύ νοτιοδυτικής Ολλανδίας και Βελγίου.