



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

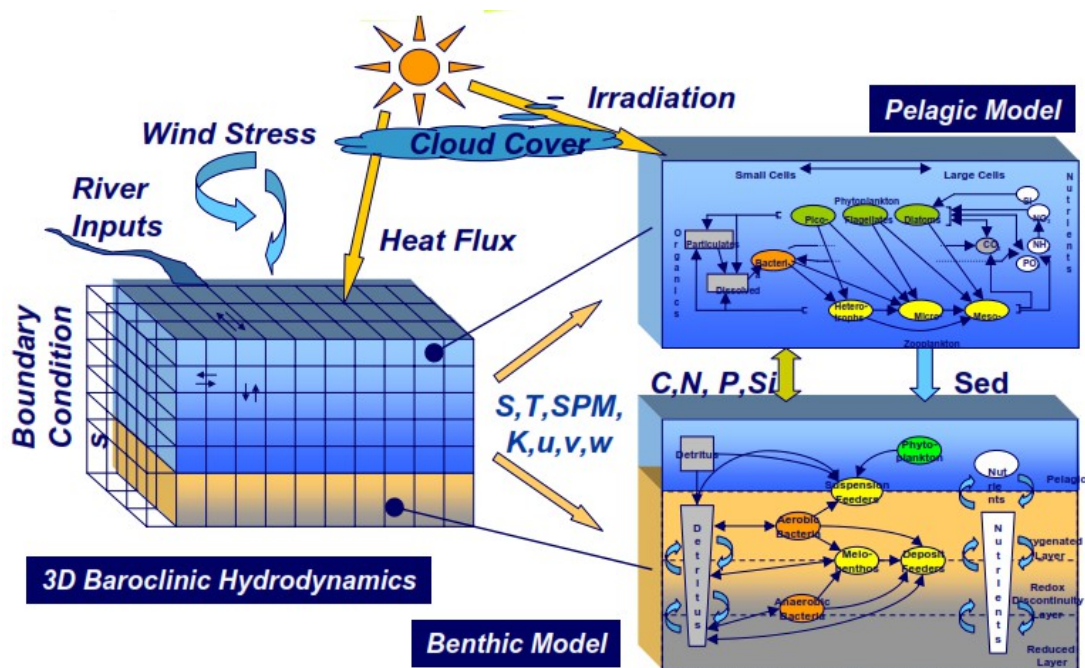
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## 12. ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ – ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ

### 12.1. Εισαγωγή

Σκοπός των συζευγμένων υδροδυναμικών – οικολογικών μοντέλων (ή αλλιώς των μοντέλων οικοσυστήματος) είναι η ρεαλιστική περιγραφή και πρόβλεψη της λειτουργίας ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος και η παρακολούθηση του πώς, οι συγκεντρώσεις και οι ροές στοιχείων που είναι βιολογικά σημαντικά (C, N, P, Si, O) μεταβάλλονται στο χρόνο και το χώρο, κάτω από την επίδραση φυσικών μηχανισμών διέγερσης (ρεύματα, θερμοκρασία, φως κ.α.), με όσο το δυνατό μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στο χώρο. Η ανάπτυξη πολύπλοκων μοντέλων οικοσυστήματος στηρίζεται στην εξέλιξη των επιμέρους πεδίων μοντελοποίησης, όπως τα υδροδυναμικά μοντέλα κυκλοφορίας, την προσομοίωση της δυναμικής του πλαγκτού σε σημεία-σταθμούς στη θάλασσα ή σε εργαστηριακές πειραματικές διατάξεις (μικρόκοσμοι - μεσόκοσμοι), την προσπάθεια κατανόησης της δομής και της δυναμικής των ανώτερων τροφικών επιπέδων, το ρόλο και τη λειτουργία του βένθους κλπ.



Σχήμα 12.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος με τρεις συνιστώσες - υπομοντέλα: υδροδυναμικό μοντέλο– οικολογικό μοντέλο υδάτινης στήλης – οικολογικό μοντέλο βένθους (Holt 2004).

Στα τρισδιάστατα μοντέλα οικοσυστήματος, η επίδραση των φυσικών διεργασιών γίνεται πιο ρεαλιστική. Έτσι, εφαρμόζεται στη πράξη η αντίληψη ότι, οι φυσικοί μηχανισμοί είναι καθοριστικοί για τις περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα στις οποίες αναπτύσσονται και λειτουργούν οι οργανισμοί και λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες ενός οικοσυστήματος (Mann and Lazier 1996, Fennel and Neumann 2004). Η επίδραση των χημικών και βιολογικών διεργασιών πάνω στις φυσικές θεωρείται γενικά περιορισμένη και η μοντελοποίηση της φυσικής κυκλοφορίας μπορεί να επιτευχθεί πολύ ικανοποιητικά χωρίς να ληφθεί υπόψη η βιολογία ή η χημεία. Αντίθετα, οι φυσικές διεργασίες και μηχανισμοί, που περιλαμβάνουν τα ρεύματα, τη θερμοκρασία, την αλατότητα, τις παλίρροιας, τα κύματα και τις οριζόντιες και κατακόρυφες δομές που όλα αυτά δημιουργούν, παίζουν αποφασιστικό

ρόλο στον τύπο και τη δυναμική ενός οικοσυστήματος, μεταφέροντας και διασπείροντας την σωματιδιακή και διαλυτή, οργανική και ανόργανη, ζώσα και αβιοτική ύλη του θαλάσσιου περιβάλλοντος και ρυθμίζοντας όλες τις βιολογικές δραστηριότητες, από τη μεταφορά θρεπτικών και βακτηρίων και την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού ως τις κατακόρυφες κινήσεις του ζωπλαγκτού και τη συμπεριφορά των ψαριών (Mann and Lazier 1996, Longhurst 2006, Blackford et al. 2010). Επομένως, ένα μοντέλο που φιλοδοξεί να ποσοτικοποιήσει και να προσομοιώσει ρεαλιστικά τη δυναμική ενός οικοσυστήματος πρέπει να είναι σε θέση να περιγράψει όσο το δυνατόν πιστότερα τις φυσικές συνθήκες και τις μεταβολές τους (James 2002).

Το θεμέλιο για τη μοντελοποίηση των κατώτερων τροφικών επιπέδων ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος είναι το πώς το φυτοπλαγκτόν (η βάση της τροφικής αλυσίδας) αναπτύσσεται σε συνάρτηση με τα θρεπτικά και το φως. Ανάλογα με το ερευνητικό ερώτημα και την εφαρμογή, τα συζευγμένα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα γενικά περιλαμβάνουν:

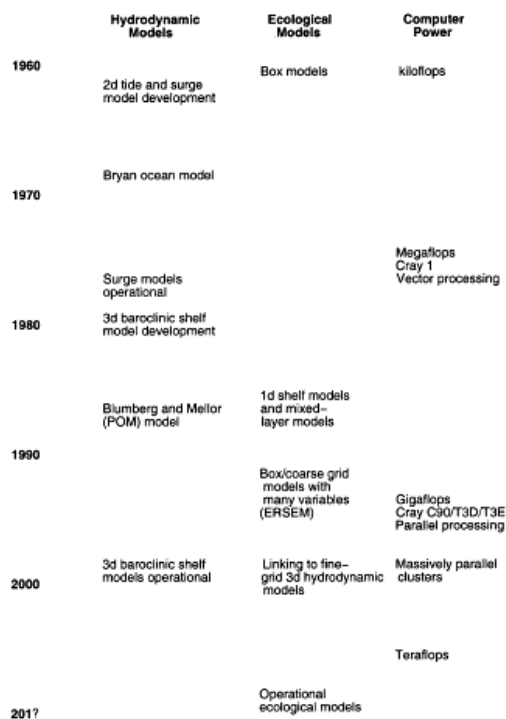
- βιοχημικές διεργασίες της στήλης νερού (π.χ. πρόσληψη θρεπτικών από φυτοπλαγκτόν),
- περιγραφή της μεταβολής του φωτός κάτω από την επιφάνεια (για τους όρους ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού),
- περιγραφή των αλληλεπιδράσεων στο τροφικό πλέγμα (σχέσεις μεταξύ φυτών, μεταξύ ζώων, σχέσεις φυτών-ζώων, μικροβιακός κύκλος),
- ανταλλαγές ύλης με το εξωτερικό περιβάλλον (εισροές θρεπτικών, οργανικής-σωματιδιακής ύλης από τη στεριά, την ατμόσφαιρα, παροχές ποταμών, οριακές συνθήκες),
- σύνδεση των διεργασιών στο ίζημα (βιολογικές-γεωλογικές) με τη στήλη του νερού,
- αναδράσεις (feedbacks) και μεταβολές στα οικοσυστήματα λόγω κλιματικών αλλαγών (μεταβολές στους βιολογικούς πόρους και διαχείριση τους, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και οξίνιση των ωκεανών),
- ποσοτική περιγραφή φυσικών διεργασιών μεταφοράς (transport) βιοτικών και αβιοτικών συστατικών του οικοσυστήματος (οριζόντια μεταφορά, κατακόρυφη ανάμιξη, καταβύθιση).

Όταν η περιγραφή φυσικών διεργασιών (7) παρέχεται από ένα 3D μοντέλο κυκλοφορίας, τότε προκύπτει ένα τρισδιάστατο μοντέλο θαλάσσιου οικοσυστήματος (Σχήμα 12.1).

Η μοντελοποίηση του θαλάσσιου οικοσυστήματος σε τρεις διαστάσεις (οριζόντια και κατακόρυφη διακριτοποίηση ταυτόχρονα) έγινε εφικτή στα τέλη της δεκαετίας του 1980, οπότε αφενός οι μη-γραμμικές οικολογικές εξισώσεις μπορούσαν να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και αφετέρου, η υπολογιστική ισχύς μπορούσε να ανταποκριθεί στην απαιτούμενη διακριτική ικανότητα, χωρική, χρονική και τροφική (James 2002 - Σχήμα 12.2, Fennel and Neumann 2004). Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών ακολούθησε την εξέλιξη των μοντέλων κυκλοφορίας, που έφτασαν σε τέτοιο βαθμό ωριμότητας ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα ως μηχανισμοί διέγερσης (forcing) (Radach and Moll 2001). Γύρω στο 1986, εμφανίστηκαν οι πρώτες προσπάθειες τρισδιάστατης μοντελοποίησης στην Ιαπωνία (Kishi and Ikeda 1986) και στις Η.Π.Α., με τις προσπάθειες να εκκινούνται από τον Βόρειο Ατλαντικό (Walsh et al. 1988, Sarmiento et al. 1993) και να επεκτείνονται σε παγκόσμια κλίμακα (π.χ. Bacastow and Maier-Reimer 1990, Six and Maier-Reimer 1996). Οι εφαρμογές αυτές στηρίχθηκαν στην μέχρι τότε δουλειά και την εμπειρία που αποκτήθηκε από εφαρμογές οικολογικών μοντέλων μηδενικών, μίας και δύο διαστάσεων.

Τα οικολογικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται για τη ποσοτικοποίηση της

παραγωγικότητας σε παγκόσμιο επίπεδο (π.χ. Moore et al. 2004) και την διερεύνηση ζητημάτων που σχετίζονται με κλιματικές αλλαγές, όπως η διακύμανση της μερικής πίεσης του 'φυσικού' διοξειδίου του άνθρακα και η μεταφορά 'ανθρωπογενούς' διοξειδίου του άνθρακα στους ωκεανών (π.χ. Le Quére et al. 2005). Τα οικολογικά μοντέλα που εφαρμόζονται σε ημίκλειστες θάλασσες ή θάλασσες πάνω από υφαλοκρηπίδες (shelf seas) διερευνούν λειτουργίες του οικοσυστήματος που σχετίζονται περισσότερο με φαινόμενα ευτροφισμού, παραγωγικότητας σε περιφερειακό επίπεδο και ανταλλαγής ύλης με την ανοιχτή θάλασσα (OSPAR Commission 2008). Οι εργασίες των Hofmann (1988) και Hofmann and Ambler (1988) οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου οικοσυστήματος για τις παράκτιες περιοχές του Βορειοδυτικού Ατλαντικού. Οι McGillicuddy et al. (1995a,b) χρησιμοποίησαν ένα 3D μοντέλο μέσης κλίμακας για να προσομοιώσουν την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση στον Βόρειο Ατλαντικό, ενώ οι Franks and Chen (2001) παρουσίασαν ένα 3D μοντέλο για την παράκτια περιοχή Georges Bank (Βορειοδυτικός Ατλαντικός).



Σχήμα 12.2. Παράλληλη εξέλιξη υδροδυναμικών, οικολογικών μοντέλων και υπολογιστικής ισχύος (τροποποιημένο από James 2002).

Μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων υπάρχει για την ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Θάλασσας, όπου δραστηριοποιούνται πολλά ευρωπαϊκά πανεπιστήμια και ερευνητικά ινστιτούτα (OSPAR Commission 2008). Αρκετά μοντέλα μίας διάστασης επεκτάθηκαν και εφαρμόστηκαν ως τρισδιάστατα οικολογικά ομοιώματα στην περιοχή (Aksnes et al. 1995, Skogen et al. 1995, Moll 1998 και 2000). Ο Skogen παρουσίασε στις αρχές του 1990 το 3D μοντέλο NORWECOM το οποίο αρχικά προσομοίωνε μόνο πελαγικές διεργασίες (Skogen et al. 1995) και στη συνέχεια ενισχύθηκε με ένα απλό υπομοντέλο βενθικών διεργασιών (Moll 2000, ECOHAM). Τα στενά της Μάγχης (English Channel) ήταν το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου ELISE των Hoch and Garreau (1998). Η δυναμική της περιοχής της νότιας Βόρειας Θάλασσας (Southern Bight) προσομοιώθηκε από τους Luyten et al. (1999) με χρήση του

μοντέλου COHERENS, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ομώνυμου ευρωπαϊκού προγράμματος Coupled Hydrodynamical Ecological model for Regional and Shelf seas – COHERENS. Το σύνθετο οικολογικό μοντέλο ERSEM (Baretta et al. 1995) συνδέθηκε με το 3D υδροδυναμικό μοντέλο POLCOMS και εφαρμόστηκε σε πλήρως τρισδιάστατη έκδοση από τους Allen et al. (2001) στην βορειοδυτική, ευρωπαϊκή υφαλοκρηπίδα, υπό το όνομα POL3dERSEM (σημερινή ονομασία POLCOMS-ERSEM). Αντίστοιχη δραστηριότητα υπάρχει και στη Μεσόγειο (π.χ. Pinardi and Corppini 2010, ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε 2013 [http://poseidon.hcmr.gr/ecological\\_forecast.php](http://poseidon.hcmr.gr/ecological_forecast.php)). Πληρέστερη ανασκόπηση 3D μοντέλων οικοσυστήματος πριν το 2000 μπορεί να βρεθεί στους Hofmann and Lascara (1998) και Moll and Radach (2001, 2003).

## 12.2 Σύζευξη υδροδυναμικού με οικολογικό μοντέλο

Ένα μοντέλο οικολογίας συνδέεται με ένα 3D μοντέλο φυσικής κυκλοφορίας μέσω της εξίσωσης μεταφοράς – διάχυσης. Κάθε μεταβλητή κατάστασης ενός συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος περιγράφεται από μια εξίσωση της μορφής (1). Η γενική εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της συγκέντρωσης οποιασδήποτε μη-συντηρητικής, βιοχημικής μεταβλητής σε ένα σημείο στον τρισδιάστατο χώρο και το χρόνο είναι (Zavatarelli et al. 2000, Franks 2002):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - (w + w_s) \frac{\partial C}{\partial z} + D_h \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left. \frac{dC}{dt} \right|_{biochem} \quad (1)$$

Μεταφορά – Advection

Τυρβώδης Διάχυση

Καθίζηση - Sinking

Turbulent Diffusion

όπου το  $C$  αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση της μεταβλητής κατάστασης (θρεπτικά, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτήρια, κτλ),  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι οριζόντιες και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του νερού που υπολογίζονται από το υδροδυναμικό μοντέλο,  $D_h$  και  $D_z$  οι συντελεστές οριζόντιας και κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης (horizontal-vertical eddy diffusivities) που υπολογίζονται και αυτοί από το υδροδυναμικό μοντέλο και  $w_s$  η ταχύτητα καθίζησης ή κατακόρυφης κολύμβησης μιας μεταβλητής.

Μέσα στο υδάτινο περιβάλλον, όλες οι οικολογικές μεταβλητές υπόκεινται στις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς (advection) και της τυρβώδους κίνησης του νερού (turbulent diffusion), όπως κάθε συντηρητική μεταβλητή, π.χ. αλατότητα  $S$ . Όμως, η μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε οικολογικής μεταβλητής στο χώρο και το χρόνο εξαρτάται και από περίπλοκες βιοχημικές διεργασίες οικοσυστήματος, γεγονός που τις καθιστά μη-συντηρητικές. Οι βιολογικές και χημικές αυτές διεργασίες συνιστούν το οικολογικό υπομοντέλο και παριστάνονται από τον ρυθμό μεταβολής

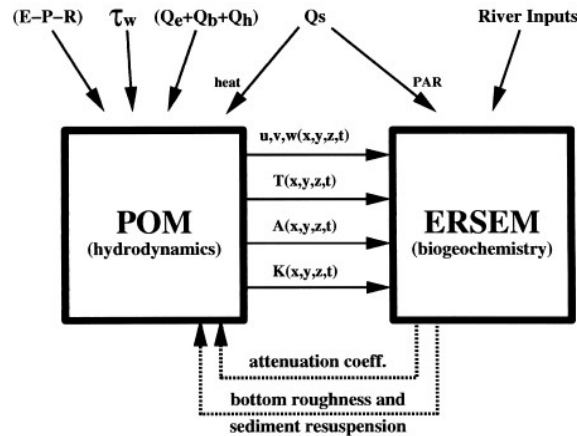
$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_{biochem}$$

Τα δυο μοντέλα συνήθως επιλύονται (εκτελούνται) ταυτόχρονα και η ολοκλήρωση της εξίσωσης (1) γίνεται σε κάθε σημείου του υπολογιστικού πλέγματος. Άλλοι τρόποι σύνδεσης οικολογικών με φυσικές διεργασίες (εκτός μεταφοράς και διάχυσης) είναι μέσω της θερμοκρασίας (που επίσης υπολογίζεται από το υδροδυναμικό μοντέλο), η διακύμανση της οποίας επιδρά στη δυναμική βιολογικών συστημάτων, και μέσω της μεταβολής της έντασης ακτινοβολίας με το βάθος (Franks



2002).

Η παραπάνω διαδικασία σύνδεσης παρουσιάζεται σχηματικά από τους Zavatarelli et al. 2000 (Σχήμα 12.3): το υδροδυναμικό σκέλος (μοντέλο POM), 'οδηγούμενο' από τις ανταλλαγές ορμής (άνεμος,  $\tau_w$ ), θερμότητας ( $Q_s$ ,  $Q_e+Q_b+Q_h$ ) και νερού (εξάτμιση, βροχόπτωση, ποτάμιες απορροές, E-P-R) υπολογίζει την ταχύτητα (τρεις συνιστώσες  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), τη θερμοκρασία ( $T$ ) και τους οριζόντιους και κατακόρυφους συντελεστές τυρβώδους διάχυσης ( $A$ ,  $K$ ), μεταβλητές που με τη σειρά τους λειτουργούν ως συναρτήσεις φόρτισης για το οικολογικό σκέλος (μοντέλο ERSEM), μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία (φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, PAR) και τις εισροές ύλης από τα ποτάμια.



Σχήμα 12.3. Σχηματική διαδικασία σύζευξης ενός υδροδυναμικού με ένα οικολογικό μοντέλο (από Zavatarelli et al. 2000)

Στο Σχήμα 2 που παρουσιάστηκε νωρίτερα, ο James (2002) συνόψισε την παράλληλη χρονικά εξελικτική πορεία των υδροδυναμικών και των οικολογικών μοντέλων σε σχέση με την ανάπτυξη της ισχύος των υπολογιστικών συστημάτων ως τις αρχές της δεκαετίας του 2000. Είναι εμφανές ότι απαιτείται μία περίοδος εξέλιξης και ωρίμανσης ωστόσο τα μοντέλα να αποκτήσουν επιχειρησιακή και προγνωστική ικανότητα, κάτι που γίνεται εφικτό μέσω της συνεχούς τεχνολογικής προόδου και της αύξησης της υπολογιστικής ισχύος που είναι ικανή να εξυπηρετήσει τις μεγάλες ανάγκες των μοντέλων μεγάλης διακριτικής ικανότητας. Η κατανόηση και ποσοτική περιγραφή των φαινομένων στο θαλάσσιο περιβάλλον, η μεταβλητότητα των οποίων εκδηλώνεται σε ένα ευρύτατο φάσμα χωρικής και χρονικής κλίμακας του γήινου συστήματος, καθώς και η μελέτη της επίδρασης που έχουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε αυτά, είναι προϋποθέσεις για την ορθολογική διαχείριση του θαλάσσιου συστήματος (Hardman-Mountford et al. 2005). Τα μοντέλα είναι εργαλεία που, με τα μειονεκτήματά και τα πλεονεκτήματά τους βοηθούν προς την κατεύθυνση αυτή, ενώ η ανάπτυξη επιχειρησιακών μοντέλων οικοσυστήματος θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και την πρόγνωση της ποιότητας των παράκτιων υδάτων, συνεπώς την αποτελεσματικότερη διαχείριση της παράκτιας ζώνης (Holt et al. 2005, Allen et al. 2007a and 2007, Green et al. 2009).

### 12.3 Διαδικασία Σύζευξης των δύο μοντέλων

Η γενική εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της συγκέντρωσης οποιασδήποτε μη-συντηρητικής, βιοχημικής μεταβλητής στον τρισδιάστατο χώρο και το χρόνο είναι:



$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - (w + w_s) \frac{\partial C}{\partial z} + D_h \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left. \frac{dC}{dt} \right|_{\text{biochem}}$$

Μεταφορά – Advection

Τυρβώδης Διάχυση

Καθίζηση - Sinking

Turbulent Diffusion

όπου το  $C$  αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση κάθε μεταβλητής κατάστασης του οικολογικού μοντέλου (θρεπτικά, φυτοπλαγκτόν, οργανική ύλη),  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι οριζόντιες και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του νερού που υπολογίζονται από το υδροδυναμικό μοντέλο,  $D_h$  και  $D_z$  οι συντελεστές οριζόντιας και κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης (horizontal-vertical eddy diffusivities) που υπολογίζονται και αυτοί από το υδροδυναμικό μοντέλο και  $w_s$  η ταχύτητα καθίζησης ή κατακόρυφης κολύμβησης μιας μεταβλητής.

Η παραπάνω σχέση είναι αντίστοιχη των σχέσεων για την αλατότητα και για την θερμοκρασία. Μέσα στο υδάτινο περιβάλλον, όλες οι οικολογικές μεταβλητές υπόκεινται στις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς (advection) και της τυρβώδους κίνησης του νερού (turbulent diffusion), όπως κάθε συντηρητική μεταβλητή, π.χ. αλατότητα  $S$ . Όμως, η μεταβολή της συγκέντρωσης κάθε οικολογικής μεταβλητής στο χώρο και το χρόνο εξαρτάται και από περίπλοκες βιοχημικές διεργασίες οικοσυστήματος, γεγονός που τις καθιστά μη-συντηρητικές. Οι βιολογικές και χημικές αυτές διεργασίες, που περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2 και συνιστούν το οικολογικό υπομοντέλο,

παριστάνονται από τον ρυθμό μεταβολής  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_{\text{biochem}}$ . Δηλαδή, ο ρυθμός αυτός αντιπροσωπεύει κάθε

μία από τις εξισώσεις των οικολογικών μεταβλητών όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2.2. Επιπρόσθετα, στην εξίσωση σύζευξης εμφανίζεται και η ταχύτητα καθίζησης  $w_s$ , που είναι διάφορη του μηδενός μόνο για το φυτοπλαγκτόν. Έτσι, η διεργασία της καταβύθισης για το φυτοπλαγκτόν περιλαμβάνεται ως ξεχωριστός όρος στην εξίσωση μεταφοράς στον κατακόρυφο άξονα:

$$- w_s \frac{\partial PHYT}{\partial z}.$$

Η ανάπτυξη ενός συζευγμένου αριθμητικού ομοιώματος συνίσταται ουσιαστικά στην ένωση των δυο υπομοντέλων, του φυσικού που αναπαράγει τις συνθήκες υδροδυναμικής κυκλοφορίας του νερού, και του βιοχημικού που προσομοιώνει βασικές οικολογικές διεργασίες του θαλάσσιου οικοσυστήματος.