



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



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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

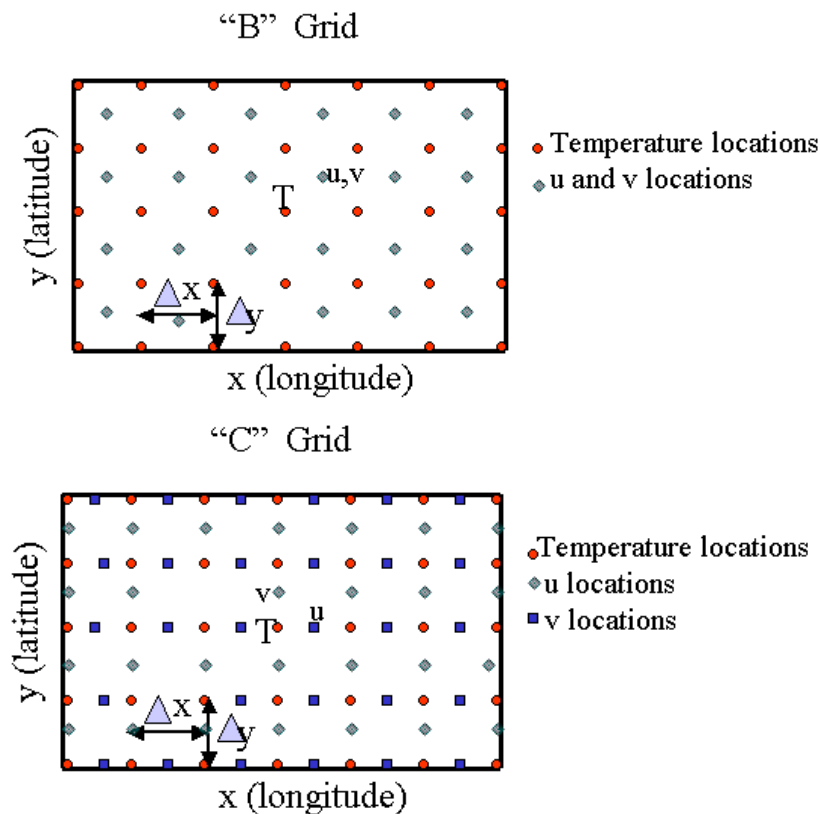
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



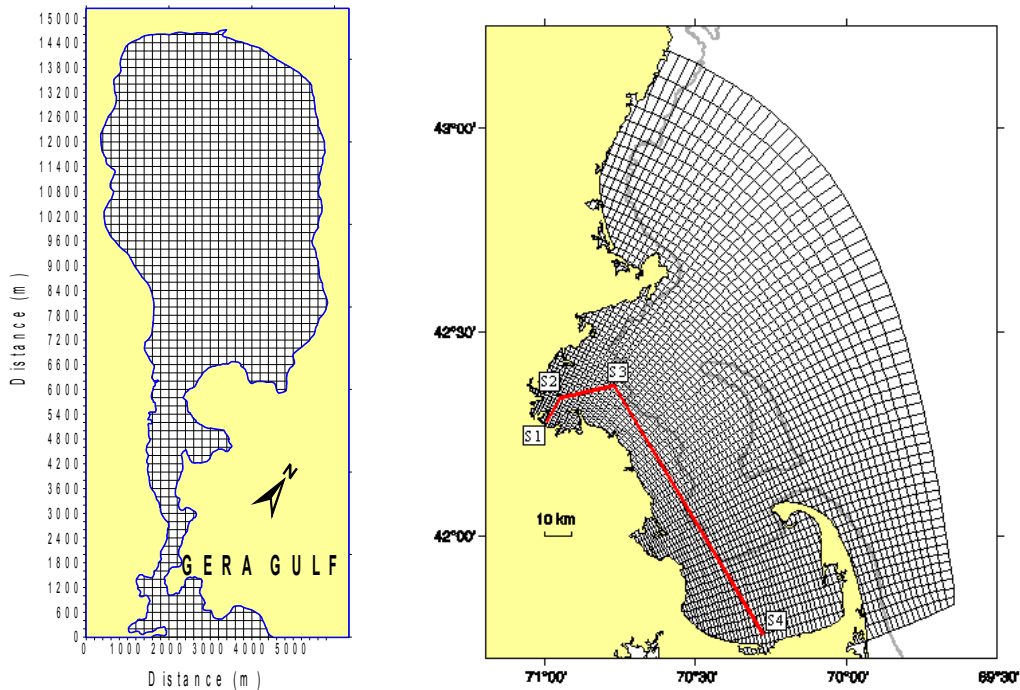
10. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ - ΠΛΕΓΜΑΤΑ

Τέλος, τα μοντέλα διαφοροποιούνται ανάλογα με το πλέγμα και τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για την επίλυση των εξισώσεων. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι πεπερασμένες διαφορές (finite differences) σε αριθμητικό σχήμα διάφορων μορφών στην οριζόντια διάσταση (π.χ. Aracawa B, C – Σχήμα 10.1). Το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιείται για την οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου μπορεί να είναι είτε ορθογώνιο (rectilinear–orthogonal) είτε καμπυλόγραμμο (curvilinear) (Σχήμα 10.2). Επίσης χρησιμοποιούνται σε μικρότερο βαθμό και τα πεπερασμένα στοιχεία (finite elements) για την οριζόντια διακριτοποίηση (για παράδειγμα το μοντέλο ADCIRC, <http://adcirc.org/>), κυρίως για διεργασίες της παράκτιας ζώνης. Σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, οι μεταβλητές υπολογίζονται σε στοιχειώδεις όγκους τριγωνικού σχήματος.

Εκτός από τα συγγράμματα των Kantha and Clayson (2000), Dyke (2001), Hearn (2008) και Kämpf (2010), οι βασικές έννοιες και τα στάδια ανάπτυξης ενός υδροδυναμικού μοντέλου προσομοίωσης περιγράφονται στις ιστοσελίδες <http://www.oc.nps.navy.mil/nom/modeling> (Numerical Ocean Modeling Concepts, 2013) και <http://www.phy.ornl.gov/csep/CSEP/OM/OM.html> (Ocean Models, 2013).



Σχήμα 10.1. Πεπερασμένες διαφορές: οριζόντιο πλέγμα τύπου B και C (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).



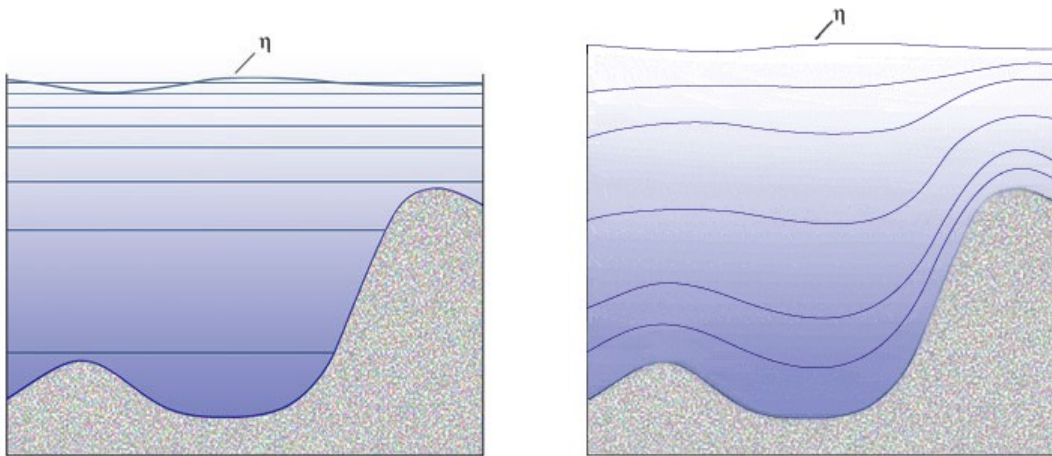
Σχήμα 10.2. Παραδείγματα οριζόντιας διακριτοποίησης (πλέγματος): αριστερά, ορθογώνιο πλέγμα (Kolovoyiannis and Tsirtsis 2005) και δεξιά, καμπυλόγραμμο πλέγμα (Signell et al. 2000).

Ο τρόπος διακριτοποίησης της κατακόρυφης διάστασης (του βάθους) διαφοροποιεί τα μοντέλα σε τέσσερις κατηγορίες. Τα μοντέλα των Bryan-Cox, το MOM και γενικά τα ομοιώματα που φιλοδοξούν να περιγράψουν με ακρίβεια τις διεργασίες στο επιφανειακό στρώμα του ωκεανού χρησιμοποιούν το σύστημα των Ζήτα – συντεταγμένων, δηλαδή οριζόντια επίπεδα με σταθερή ή μεταβλητή απόσταση μεταξύ τους. Έτσι, διατηρείται επαρκής ανάλυση για τη ρεαλιστική προσομοίωση των θερμο-υδροδυναμικών διεργασιών στο τμήμα αυτό της θάλασσας που έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα (Σχήμα 10.3α). Οι Blumberg and Mellor (1983, 1987) και Haidvogel et al. (1991) εισήγαγαν ένα μετασχηματισμένο σύστημα κατακόρυφης διακριτοποίησης, που αναφέρεται ως σύστημα σίγμα – συντ/νων (sigma ή terrain following). Γενικά, ορίζεται ως $\sigma = z/D$ με z το βάθος και D το ολικό βάθος της στήλης του νερού, υιοθετήθηκε από την μετεωρολογία και τη μοντελοποίηση ατμοσφαιρικών διεργασιών και αποδεικνύεται ιδιαίτερα κατάλληλο για παράκτιες εφαρμογές αφού διατηρείται η ανάλυση της στήλης πάνω από απότομες μεταβολές της βαθυμετρίας (Σχήμα 10.3β). Μια τρίτη προσέγγιση ακολουθείται από μοντέλα που στοχεύουν να περιγράψουν τη λειτουργία βαθιών ωκεάνιων μαζών και στηρίζεται στο γεγονός ότι ο ωκεανός είναι ρηχός (αν συγκρίνει κανείς τις οριζόντιες με τις κατακόρυφες κλίμακες) και στρωματοποιημένος. Αυτό έχει ως συνέπεια, οι κινήσεις στο εσωτερικό των ωκεανών να γίνονται πολύ ευκολότερα κατά μήκος των ισόπυκνων επιφανειών (επιφανειών ίσης πυκνότητας), καθώς έτσι χρειάζεται πολύ λιγότερη ενέργεια, παρά διαμέσου αυτών (Knauss 1997). Παραδείγματα μοντέλων που χρησιμοποιούν το σύστημα των ισόπυκνων συντεταγμένων (isopycnal ή isopycnal models) είναι τα μοντέλα MICOM και OCCAM. Οι ισόπυκνες συντεταγμένες (Σχήμα 10.3γ), η θέση και το πάχος των οποίων μεταβάλλονται συναρτήσει της δυναμικής, είναι πιο κατάλληλες και για προσομοιώσεις μεγάλων περιόδων, όπου η διατήρηση - συνέχεια των χαρακτηριστικών των μαζών νερού είναι σημαντική (Kantha and Clayson 2000, Griffies

et al. 2010).

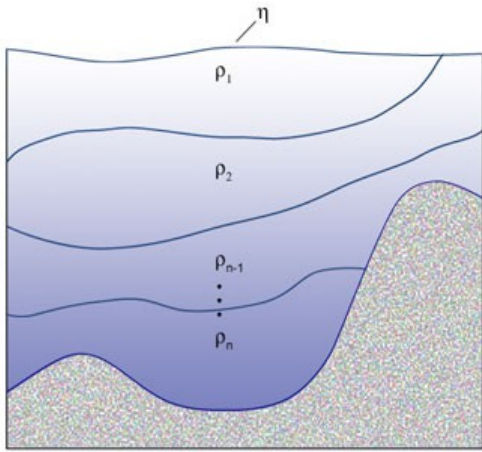
Τα τελευταία χρόνια διαφαίνεται μια τάση ενοποίησης των τριών αυτών συστημάτων κατακόρυφης διακρίτοποίησης και δημιουργίας μιας νέας γενιάς υδροδυναμικών μοντέλων με υβριδικό σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι ισόπυκνο στις ανοιχτές, βαθιές ωκεάνιες περιοχές, ενώ το σύστημα συντεταγμένων μετασχηματίζεται ομαλά σε σίγμα πάνω από ρηχές, παράκτιες ζώνες και σε ζήτα συντεταγμένες στο επιφανειακό, αναμεμιγμένο στρώμα της θάλασσας (Σχήμα 10.3δ). Συνδυάζονται έτσι τα πλεονεκτήματα και των τριών προσεγγίσεων. Παράδειγμα μοντέλου υβριδικών συντεταγμένων αποτελεί το HYCOM (Halliwell 2001, Androulidakis and Kourafalou 2011).

Ένα ακόμα κριτήριο διαχωρισμού των υδροδυναμικών μοντέλων είναι το πώς προσεγγίζουν τις κατανομές πυκνότητας στο εσωτερικό του ωκεανού. Στα βαροτροπικά μοντέλα (π.χ. Bryan and Cox 1972) αγνοούνται οι μεταβολές πυκνότητας: η προσομοιωμένη θαλάσσια μάζα θεωρείται ότι έχει σταθερή πυκνότητα, υπολογίζονται οι μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης, οι μέσες κατά βάθος οριζόντιες ταχύτητες και οι οριζόντιες ροές ενός συστήματος που θεωρείται δισδιάστατο. Στα βαροκλινικά ή τρισδιάστατα μοντέλα, όπου λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της πυκνότητας, οι εξισώσεις λύνονται σε τρεις διαστάσεις και υπολογίζονται οι κατανομές των μεταβλητών συναρτήσει του βάθους ρευμάτων όπως και οι κατανομές της θερμοκρασίας και της αλατότητας (Σχήμα 10.4). Στα σύγχρονα αριθμητικά ομοιώματα έχει καθιερωθεί η τεχνική διαχωρισμού του βήματος χρόνου (mode splitting techniques) (Luyten et al. 1999): το δισδιάστατο – βαροτροπικό κομμάτι της δυναμικής (ανύψωση της ελεύθερης θαλάσσιας επιφάνειας και μέσα κατά βάθος ρεύματα) υπολογίζεται ξεχωριστά σε ένα μικρό βήμα χρόνου, ενώ το τρισδιάστατο – βαροκλινικό κομμάτι της δυναμικής (κατακόρυφη δομή των ρευμάτων, θερμοκρασίας, αλατότητας) υπολογίζεται σε ένα πολύ μεγαλύτερο βήμα χρόνου.

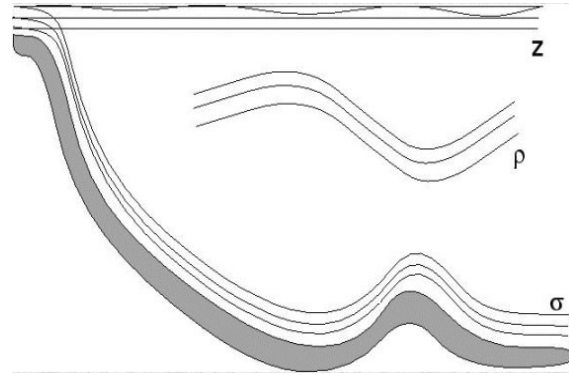


(α) Z - συντεταγμένες

(β) σίγμα – συντεταγμένες



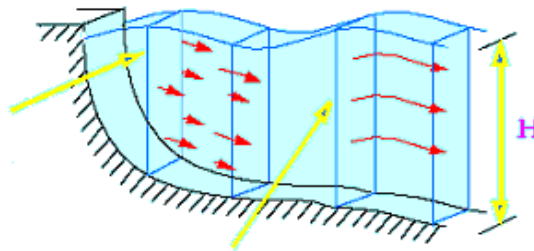
(γ) ισόπυκνες συντεταγμένες



(δ) υβριδικές συντεταγμένες

Σχήμα 10.3. Απεικόνιση των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή – διακριτοποίηση του κατακόρυφου άξονα (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).

Στήλη νερού με διαφορετικά
κατά βάθος οριζόντια
ρεύματα
(Βαροκλιτική)



Στήλη νερού με
κατακόρυφως ομογενή
οριζόντια ρεύματα
(Βαροτροπική)

Σχήμα 10.4. Σχηματική παράσταση βαροκλιτικού και βαροτροπικού μοντέλου (Ocean Models, 2013, τροποποιημένο). Ορισμοί για βαροτροπικό/βαροκλιτικό υγρό μπορούν να βρεθούν στους Pond and Pickard (1983).