

Πανεπιστήμιο Αιγαίου



Σχολή Περιβάλλοντος  
Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας

**Ανάπτυξη και εφαρμογή συζευγμένου  
υδροδυναμικού-οικολογικού μοντέλου προσομοίωσης  
υψηλής ανάλυσης σε παράκτιο οικοσύστημα**

Βασίλειος Ν. Κολοβογιάννης  
Διδακτορική Διατριβή

Μυτιλήνη, Ιανουάριος 2014

## Σύνθεση εξεταστικής επιτροπής

Γιώργος Τσιρτσής	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Επιβλέπων Καθηγητής
Αντώνης Βελεγράκης	Καθηγητής Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής
Μιχάλης Καρύδης	Καθηγητής Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής
Ιωάννης Κρεστενίτης	Καθηγητής Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Βασίλης Ζερβάκης	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Θεοφάνης Καραμπάς	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τακβόρ Σουκισιάν	Κύριος Ερευνητής Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	vii
Περίληψη στα Ελληνικά.....	viii
Περίληψη στα Αγγλικά (abstract) .....	x
Κατάλογος σχημάτων.....	xii
Κατάλογος πινάκων.....	xx

### **ΜΕΡΟΣ Α΄: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Στόχοι.....	10
1.3. Διάρθρωση της εργασίας .....	12
<b>2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ....</b>	<b>14</b>
2.1. Αριθμητική προσομοίωση φυσικών διεργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον – Υδροδυναμικά μοντέλα .....	14
2.1.1. Εισαγωγή.....	14
2.1.2. Αρχές αριθμητικής προσομοίωσης θαλάσσιας κυκλοφορίας .....	15
2.1.3. Κατηγορίες υδροδυναμικών μοντέλων.....	18
2.2. Αριθμητική προσομοίωση οικολογικών διεργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον – Οικολογικά μοντέλα .....	28
2.2.1. Εισαγωγή .....	28
2.2.2. Εξέλιξη της μοντελοποίησης οικολογικών διεργασιών του θαλάσσιου περιβάλλοντος .....	30
2.2.3. Το ζήτημα της πολυπλοκότητας .....	37
2.2.4. Βαθμονόμηση και επαλήθευση .....	41
2.2.5. Η χωρική διάσταση .....	50
2.3. Συζευγμένα τρισδιάστατα υδροδυναμικά – οικολογικά μοντέλα .....	58
2.3.1. Εισαγωγή .....	58
2.3.2. Σύζευξη υδροδυναμικού με οικολογικό μοντέλο .....	62

## **ΜΕΡΟΣ Β΄: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

### **ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

<b>3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>69</b>
3.1. Το Στενό Μυτιλήνης και η παράκτια περιοχή της πόλης της Μυτιλήνης .....	69
3.2. Μετεωρολογία .....	70
3.3. Ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών στην περιοχή Στενού Μυτιλήνης .....	73
3.4. Φυσικές μεταβλητές και υδροδυναμική .....	76
3.5. Χημικές και βιολογικές μεταβλητές .....	79
3.6. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και ιζήματα .....	85
<b>4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.....</b>	<b>88</b>
4.1. Συλλογή δεδομένων πεδίου .....	88
4.1.1. Δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας .....	88
4.1.2. Δεδομένα πεδίου .....	88
4.2. Εργαστηριακή αναλυτική μεθοδολογία .....	91
<b>5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>93</b>
5.1. Υδροδυναμικό μοντέλο.....	93
5.1.1. Αναλυτική περιγραφή του Princeton Ocean Model (POM).....	93
5.1.2. Βαθυμετρία, επιλογή πλέγματος και υπολογιστικό πεδίο.....	103
5.1.3. Οριακές συνθήκες και συναρτήσεις φόρτισης.....	105
5.1.4. Αρχικές συνθήκες .....	110
5.2. Οικολογικό μοντέλο .....	114
5.2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο και μεταβλητές κατάστασης .....	114
5.2.2. Εξισώσεις οικολογικών μεταβλητών .....	117
5.2.3. Παράμετροι μοντέλου και τιμές .....	123
5.2.4. Συναρτήσεις φόρτισης.....	125
5.2.5. Ταχύτητα καταβύθισης φυτοπλαγκτού.....	127
5.2.6. Οριακές συνθήκες .....	129
5.2.7. Μέθοδος ολοκλήρωσης εξισώσεων οικολογικού μοντέλου .....	131
5.2.8. Αστικά απόβλητα .....	133
5.3. Διαδικασία Σύζευξης των δυο μοντέλων .....	140
5.3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο της σύζευξης .....	140
5.3.2. Οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες οικολογικών μεταβλητών .....	144

5.3.3. Διάγραμμα ροής μοντέλου .....	145
5.4. Ανάπτυξη συστήματος βαθμονόμησης οικολογικού μοντέλου.....	148
5.5. Συνοπτική περιγραφή εφαρμογής.....	152

## **ΜΕΡΟΣ Γ': ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

<b>6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ .....</b>	<b>155</b>
6.1. Φυσικές μεταβλητές.....	155
6.1.1. Υδρογραφία: θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα .....	155
6.1.2. Κυκλοφορία νερού: Ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος.....	167
6.1.3. Ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας: ελάττωση συναρτήσεων του βάθους και διαφάνεια νερού.....	178
6.1.4. Συζήτηση .....	182
6.2. Θρεπτικά ανόργανα άλατα, διαλυμένο οργανικό άζωτο και χλωροφύλλη-α.....	189
6.2.1. Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση .....	189
6.2.2. Διακύμανση των μεταβλητών οικοσυστήματος στο χρόνο.....	195
6.2.3. Συζήτηση .....	202
<b>7. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ</b>	
<b>ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....</b>	<b>205</b>
7.1. Επαλήθευση και ποσοτικοποίηση σφαλμάτων φυσικών μεταβλητών .....	205
7.1.1. Θερμοκρασία .....	205
7.1.2. Αλατότητα.....	211
7.1.3. Μέτρο ταχύτητας και διεύθυνση ρεύματος .....	215
7.2. Επαλήθευση και ποσοτικοποίηση σφαλμάτων οικολογικών μεταβλητών .....	221
7.2.1. Φυτοπλαγκτονικός άνθρακας .....	221
7.2.2. Νιτρικά άλατα .....	226
7.2.3. Αμμωνιακά άλατα .....	231
7.2.4. Φωσφορικά άλατα .....	236
7.2.5. Διαλυμένος οργανικός άνθρακας .....	241
<b>8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ .....</b>	<b>245</b>
8.1. Εισαγωγή .....	245
8.2. Φυσικές μεταβλητές και πεδίο ταχυτήτων .....	245
8.2.1. Θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα .....	245

8.2.2. Κυκλοφορία - Ανάπτυξη συστήματος δύο στρωμάτων.....	256
8.2.3. Στροβιλώδης κυκλοφορία στους κόλπους της ακτογραμμής .....	258
8.3. Οικολογικές μεταβλητές.....	261
8.3.1. Ετήσιος κύκλος φυτοπλαγκτού, θρεπτικών και διαλυμένου οργανικού άνθρακα .....	262
8.3.2. Χωρική διακύμανση φυτοπλαγκτού, θρεπτικών και διαλυμένου οργανικού άνθρακα: οριζόντιες και κατακόρυφες κατανομές	274

## **ΜΕΡΟΣ Δ΄: ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ**

<b>9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	279
9.1. Δυναμική του παράκτιου οικοσυστήματος της περιοχής μελέτης .....	280
9.1.1. Φυσικές μεταβλητές: Θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα, ταχύτητα ρεύματος, ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας.....	280
9.1.2. Οικολογικές μεταβλητές.....	285
9.2. Αξιολόγηση των επιδόσεων του συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος: επιτυχίες, μειονεκτήματα και κριτική.....	290
9.2.1. Φυσικές μεταβλητές (θερμοκρασία, αλατότητα, ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος).....	290
9.2.2. Οικολογικές μεταβλητές.....	295
9.2.3. Μεθοδολογία βελτιστοποίησης παραμέτρων οικολογικού υπομοντέλου .....	299
9.3. Επόμενα βήματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και προοπτικές .....	301
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ</b> .....	307
<b>ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ</b> .....	325

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

<b>Παράρτημα 1.</b> Ορολογία και παράδειγμα υπολογισμού επιτυχίας προσαρμογής .	326
<b>Παράρτημα 2.</b> Ποιότητα επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης (μηνιαίες μέσες τιμές στην εκροή) για την περίοδο προσομοίωσης.....	331

<b>Παράρτημα 3.</b> Αναλυτική περιγραφή υπορουτίνων οικολογικού σκέλους του μοντέλου .....	333
<b>Παράρτημα 4.</b> Ανάπτυξη συστήματος βελτιστοποίησης τιμών παραμέτρων οικολογικού υπομοντέλου μηδενικών διαστάσεων με χρήση του λογισμικού VisSim/OptimizePRO, Visual Solutions – Σχήματα.....	337
<b>Παράρτημα 5.</b> Περιγραφή ρουτίνων οπτικοποίησης αποτελεσμάτων μοντέλου (MATLAB) .....	342
<b>Παράρτημα 6.</b> Παρουσίαση μετρήσεων πεδίου – σχήματα φυσικών και οικολογικών μεταβλητών και ρευματομετρήσεων .....	345
<b>Παράρτημα 7.</b> Μέσες τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών σε παράκτιες περιοχές των ελληνικών θαλασσών .....	385
<b>Παράρτημα 8.</b> Επαλήθευση και εκτίμηση ικανότητας μοντέλου προσομοίωσης: ποιοτικές/διαγραμματικές τεχνικές επαλήθευσης του μοντέλου .....	387

## **Ευχαριστίες**

Νιώθω ευγνωμοσύνη προς έναν αριθμό ανθρώπων που συνέδραμαν ο καθένας με τον τρόπο του στην υλοποίηση αυτής της διατριβής. Αρχικά οφείλω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Γιώργο Τσιρτσή για την ευκαιρία που μου έδωσε και τη συνολική συμβολή του στην πραγματοποίηση της εργασίας. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή Αντώνη Βελεγράκη για το γνήσιο και ουσιαστικό ενδιαφέρον του και για τις καίριες υποδείξεις πάνω στο κείμενο, όπως και τον Καθηγητή Μιχάλη Καρύδη για τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στον Γιώργο Αρχοντίτση, Αναπληρωτή Καθηγητή στο Τμήμα Φυσικών και Περιβαλλοντικών Επιστημών του Πανεπιστημίου του Τορόντο σήμερα, για την απλόχερη βοήθειά του ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια της διατριβής. Επίσης, ευχαριστώ την κα Μαρία Καραντανέλλη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Επιστημών Θάλασσας, για τη συνδρομή της στο σκέλος των εργαστηριακών αναλύσεων και τον Θεόδωρο Νίτη για την συνδρομή του στην εκτέλεση του κώδικα του μοντέλου στο περιβάλλον UNIX των υπολογιστικών συστημάτων SUN του Τμήματος Επιστημών Θάλασσας.

Ευχαριστώ τη Ζωή Κωνσταντίνου, τον Αντώνη Σωτηρόπουλο, τον Βασίλη Βασιλείου και την Παναγιώτα Αλευρά που ως προπτυχιακοί φοιτητές συνέβαλαν τα μέγιστα στη συλλογή και εργαστηριακή ανάλυση των δεδομένων πεδίου, καθώς και τον καπετάνιο του πλωτού μέσου του Τμήματος Επιστημών Θάλασσας «Αμφιτρίτη» Νίκο Χατζηλία. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Βασίλαρο Σωτήρη, χημικό του Εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου της Δημόσιας Επιχείρησης Ύδρευσης Αποχέτευσης Λέσβου, για την παροχή στοιχείων ποιότητας επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης.

Χρωστάω πολλά στους φίλους μου Φάνια Βλατσιώτου, Χάρη Πλωμαρίτη, Ηρακλή Παναγιωτάκη, Κώστα Βερβερίδη, Πετρίνα Ζουγανέλη, Γιώργο Σαραγά, Αγγελική Κίτσιου και ξεχωριστά στη Μαρίνα Ρίτσου. Τους ευχαριστώ από καρδιάς για την βοήθεια, υπομονή, ηθική υποστήριξη και ενθάρρυνση όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά το Κοινωφελές Ίδρυμα «Αλέξανδρος Α. Ωνάσης» που με τίμησε με τη χορήγηση της υποτροφίας με αριθμό σύμβασης Χ-GR 011/2001-02.

Ελπίζω να μην αδικώ κάποιον λησμονώντας τον.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου, Γεωργία και Νίκο. Τους είμαι ολόψυχα ευγνώμων.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός ντετερμινιστικού εργαλείου αριθμητικής προσομοίωσης που εφαρμόστηκε σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα συλλογής δεδομένων πεδίου σε μια μικρή παράκτια περιοχή στο Βόρειο-ανατολικό Αιγαίο (παράκτια περιοχή ανοιχτά της πόλης της Μυτιλήνης, Νήσος Λέσβος). Στόχος ήταν η μελέτη, κατανόηση και ποσοτικοποίηση διεργασιών φυσικής κυκλοφορίας και οικολογικών διεργασιών στη στήλη του νερού μέσω προσομοίωσης υψηλής διακριτικής ικανότητας ενός ετήσιου κύκλου (hind-casting). Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο παράκτιου οικοσυστήματος λαμβάνοντας υπόψη (1) την ανάγκη για αύξηση της διακριτικής ικανότητας στην προσομοίωση παράκτιων θαλάσσιων διεργασιών για τη διερεύνηση περιβαλλοντικών ζητημάτων τοπικού χαρακτήρα, (2) την τάση για συστηματική απουσία από τη βιβλιογραφία μεθοδολογικών βημάτων 'καλής πρακτικής' στην ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων οικοσυστήματος όπως η βαθμονόμηση/βελτιστοποίηση οικολογικών παραμέτρων ή η εκτίμηση αβεβαιότητας και η ποσοτικοποίηση σφάλματος και (3) τη συζήτηση σχετικά με το βαθμό πολυπλοκότητας που πρέπει να ενσωματώνει ένα μοντέλο οικοσυστήματος. Το μοντέλο αποτελείται από ένα τρισδιάστατο υδροδυναμικό σκέλος κατάλληλο για παράκτιες περιοχές (Princeton Ocean Model), συζευγμένο με ένα σχετικά απλό οικολογικό μοντέλο στήλης νερού πέντε μεταβλητών και συγκεκριμένα, των συγκεντρώσεων φυτοπλαγκτού, νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών αλάτων και διαλυμένου οργανικού άνθρακα. Οι οικολογικές παράμετροι (π.χ. σταθερές ημικορεσμού, μέγιστοι ρυθμοί πρόσληψης θρεπτικών) βαθμονομήθηκαν με τη βοήθεια αυτοματοποιημένης διαδικασίας που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Δόθηκε έμφαση στην εκτίμηση της ικανότητας του μοντέλου: τα σφάλματα προσομοίωσης εκτιμήθηκαν με χρήση ποιοτικών, γραφικών τεχνικών και ποσοτικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας σειρά από μέτρα καλής προσαρμογής. Η παραπάνω διαδικασία έδειξε ότι οι φυσικές μεταβλητές προσομοιώνονται καλύτερα από τις οικολογικές. Η θερμοκρασία, η αλατότητα και το πεδίο ταχυτήτων αναπαράγονται πολύ ικανοποιητικά, με επιτυχία προσαρμογής στα δεδομένα πεδίου που κυμαίνεται από καλή έως πολύ καλή. Ενδεικτικά, η συνάρτηση κόστους (μέση τιμή ανά σταθμό δειγματοληψίας) κυμάνθηκε από 0.15 έως 0.23 για τη θερμοκρασία και από 0.81 έως 3.70 για το μέτρο ταχύτητας ρεύματος. Ο ετήσιος κύκλος της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας προσομοιώνεται με ικανοποιητική ακρίβεια (π.χ. μέση συνάρτηση κόστους μεταξύ 0.49 και 2.67), εκτός της περιοχής του λιμένα Μυτιλήνης, και μέρος αυτής της επιτυχίας αποδίδεται στην επαρκή αναπαραγωγή της δυναμικής των ανόργανων θρεπτικών αζώτου και κυρίως των φωσφορικών, που υποδεικνύονται ως ο κύριος περιοριστικός παράγοντας για τη φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη και των οποίων η μέση συνάρτηση κόστους κυμαίνεται μεταξύ 0.97 και 1.88. Τα αποτελέσματα του μοντέλου και τα δεδομένα πεδίου ανέδειξαν δομές και παρείχαν πληροφορία για φυσικές διεργασίες όπως η ανάπτυξη ανεμογενούς παράκτιου ρεύματος σε συνδυασμό με ένα υποεπιφανειακό στρώμα πάνω από τον πυθμένα

κινούμενο προς την αντίθετη κατεύθυνση και η ανάπτυξη στροβιλώδους κυκλοφορίας στις εγκολπώσεις της ακτογραμμής όταν η ταχύτητα ρεύματος στα ανοιχτά προσεγγίζει τα 0.1m/s. Το ποσοστό μετρήσεων πεδίου όπου ο λόγος N:P βρέθηκε πάνω από 16:1 κυμαίνεται μεταξύ 57% και 65% αναδεικνύοντας τη σημασία των ορθοφωσφορικών αλάτων ως περιοριστικό παράγοντα φυτοπλαγκτονικής αύξησης. Το μοντέλο αναπαρήγαγε τις βαθμίδες φυτοπλαγκτονικής βιομάζας που αναπτύσσονται σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους μεταξύ της εύτροφης περιοχής του λιμένα Μυτιλήνης (μέση συγκέντρωση χλωροφύλλης-α 1.08  $\mu\text{g/L}$ ) και των oligότροφων νερών ανοιχτά του στενού (μέση συγκέντρωση χλωροφύλλης-α 0.14  $\mu\text{g/L}$ ). Ως επόμενο βήμα προτείνεται η ανάπτυξη ενός διευρυμένου συστήματος προσομοίωσης περιλαμβάνοντας και άλλους τομείς των παράκτιων θαλάσσιων επιστημών (π.χ. δυναμική ιζημάτων, τηλεπισκόπηση, υδρολογικά μοντέλα και χερσαίες απορροές), ενώ η σύνδεση με μοντέλα πρόγνωσης που καλύπτουν ευρύτερες περιοχές θα δημιουργήσει επιχειρησιακά συστήματα με δυνατότητα ταυτόχρονης επίλυσης διεργασιών σε ποικίλες χωρικές κλίμακες και διάθεσης της αντίστοιχης προγνωστικής πληροφορίας για το θαλάσσιο περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο.

## **ABSTRACT**

The present study deals with the development, application and evaluation of a deterministic modelling tool, implemented along with a field sampling program, in a limited coastal area in the Northeast Aegean, the coastal area off the city of Mytilene, Lesvos Island. The aim was to study, understand and quantify physical circulation and water column ecological processes in a high resolution simulation of a past annual cycle. A marine ecosystem model was developed taking into consideration (1) the need to downscale the marine modelling effort to high resolution implementations in order to address small scale environmental issues of local character, (2) the scarcity of important "good practice" methodological steps such as parameter calibration/optimization or model uncertainty evaluation and error quantification in the published literature and (3) the debate about the degree of complexity an ecosystem model should incorporate. The model consists of a three dimensional hydrodynamic component suitable for coastal areas (Princeton Ocean Model) coupled to a relatively simple ecological model of five variables, namely, phytoplankton, nitrate, ammonia, phosphate and dissolved organic carbon concentrations. The ecological parameters (e.g. half saturation constants and maximum uptake rates for nutrients) were calibrated with an automated procedure developed for this purpose. Emphasis was placed on the evaluation of model performance: model errors were evaluated using qualitative, graphic techniques and were quantified with a number of goodness-of-fit measures. The assessment of model performance indicated a decrease of simulation skill from physical to biological/chemical variables. Temperature, salinity and velocity fields were reproduced successfully, with degrees of goodness-of-fit to field data varying from fairly to quite good. Indicatively, the cost function, expressed as mean value per sampling station, ranged from 0.15 to 0.23 for temperature and 0.81 to 3.70 for current speed. The annual cycle of phytoplankton biomass was simulated with sufficient accuracy (e.g. mean cost function ranging from 0.49 to 2.67), partly attributed to the adequate reproduction of the dynamics of growth limiting nutrients, nitrate, ammonia and the main limiting nutrient, phosphate, whose mean cost function ranged from 0.97 to 1.88. Model results and field data provided insight to physical processes such as the development of a wind-driven, coastal jet type of surface alongshore flow with a subsurface countercurrent flowing towards opposite direction and the formation of rotational flows in the embayments of the coastline when the offshore coastal current speed approaches values of about 0.1 m/s. The percentage of field measurements where the N:P ratio was found over 16:1 varied between stations from 57 and 65%, demonstrating the importance of phosphate as a limiting nutrient for phytoplankton growth. The model also successfully reproduced phytoplankton gradients, e.g. those developed almost all year round between the most eutrophic areas (city harbour with mean chlorophyll-a concentration of 1.08 µg/L) and the oligotrophic open waters (mean chlorophyll-a concentration of 0.14

$\mu\text{g/L}$ ). Having built on these bases, integration with other fields of coastal sciences (e.g. watershed modelling, sediment dynamics, remote sensing) is highly desirable, and a linkage to already existing forecasting models that cover wider areas is envisioned, so as to develop an operational modelling system able to resolve processes in a variety of spatial scales and aiming to routinely provide prognostic information about coastal ecosystems.

## Κατάλογος σχημάτων

- Σχήμα 1.1.** Ταξινόμηση μοντέλων με έμφαση στα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης (Moll and Radach, 2001).
- Σχήμα 1.2.** Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή και εφαρμογή ενός μοντέλου στο θαλάσσιο περιβάλλον (Dyke 2001).
- Σχήμα 1.3.** Κατανομή των τύπων οικοσυστήματος που έχουν μελετηθεί με μοντέλα προσομοίωσης μεταξύ 1990-2002 (από Arhonditsis and Brett 2004).
- Σχήμα 2.1.** Σχηματική αναπαράσταση μερικών από τις διεργασίες και μεταβλητές που λαμβάνει υπόψη του ένα υδροδυναμικό μοντέλο για τον παράκτιο χώρο (University Corporation for Atmospheric Research, 2013, τροποποιημένο).
- Σχήμα 2.2.** Χωρικές και χρονικές κλίμακες φυσικών διεργασιών και φαινομένων στη θάλασσα (Oregon State University, 2013).
- Σχήμα 2.3.** Κατηγοριοποίηση υδροδυναμικών μοντέλων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν (Ocean Models, 2013, τροποποιημένο).
- Σχήμα 2.4.** Απεικόνιση των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή – διακριτοποίηση του κατακόρυφου άξονα (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).
- Σχήμα 2.5.** Σχηματική παράσταση βαροκλιτικού και βαροτροπικού μοντέλου (Ocean Models, 2013, τροποποιημένο). Ορισμοί για βαροτροπικό/βαροκλιτικό υγρό μπορούν να βρεθούν στους Pond and Pickard (1983).
- Σχήμα 2.6.** Πεπερασμένες διαφορές: οριζόντιο πλέγμα τύπου B και C (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).
- Σχήμα 2.7.** Παραδείγματα οριζόντιας διακριτοποίησης (πλέγματος): αριστερά, ορθογώνιο πλέγμα (Kolovoyiannis and Tsirtsis 2005) και δεξιά, καμπυλόγραμμο πλέγμα (Signell et al. 2000).
- Σχήμα 2.8.** Σχηματικό παράδειγμα (conceptual model) ενός απλού μοντέλου NPZ (Nutrient – Phytoplankton – Zooplankton) επιφανειακής στήλης νερού και οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις διατήρησης μάζας, μία για κάθε μεταβλητή κατάσταση, που περιλαμβάνουν τις διεργασίες που θεωρούνται σημαντικές.
- Σχήμα 2.9.** Σχηματικό παράδειγμα ενός απλού μοντέλου οικοσυστήματος, που περιγράφει βασικές διεργασίες στην επιφάνεια της στήλης του νερού με 4 μεταβλητές κατάστασης : θρεπτικά – φυτοπλαγκτόν – ζωοπλαγκτόν – σωματιδιακή ύλη (τα λεγόμενα μοντέλα NPZD) (σχήμα από Dadou et al. 2004)
- Σχήμα 2.10.** Σχηματικό διάγραμμα του πελαγικού τμήματος του μοντέλου ERSEM: μεταβλητές κατάστασης και ροές άνθρακα και θρεπτικών μεταξύ των λειτουργικών ομάδων.
- Σχήμα 2.11.** Κατανομή της πολυπλοκότητας 153 εφαρμογών μοντέλων, με βάση τον αριθμό μεταβλητών κατάστασης (από Arhonditsis and Brett, 2004)
- Σχήμα 2.12.** Ποσοστό % των μοντέλων οικοσυστήματος που μελέτησαν οι Arhonditsis and Brett (2004) όπου (a) χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές βελτιστοποίησης για τη βαθμονόμηση, (b) ποσοτικοποιήθηκε η επιτυχία προσαρμογής αποτελεσμάτων προσομοίωσης-δεδομένων πεδίου και (c) εφαρμόστηκε κάποια μορφή επαλήθευσης (από Arhonditsis and Brett, 2004). (d) Κατανομή % των μεθόδων εκτίμησης των ικανοτήτων μοντέλου στις 142 δημοσιεύσεις που μελέτησαν οι Stow et al. (2009) (από Vichi, 2009).

- Σχήμα 2.13.** Σχηματική απεικόνιση διάφορων τύπων επαλήθευσης και τα στάδια εφαρμογής τους στην συνολική διαδικασία μοντελοποίησης (από Rykiel 1996).
- Σχήμα 2.14.** Γραφικές μέθοδοι επαλήθευσης : (α) Αποτελέσματα προσομοίωσης (γραμμή) και πειραματικές τιμές (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο. (β) Αποτελέσματα προσομοίωσης vs πειραματικών τιμών για την ίδια προσομοίωση (από Mayer and Butler 1993). (γ) Διάγραμμα Box-Whisker όπου εκτός τα προσομοιωμένα αποτελέσματα χλωροφύλλης –a (συνεχής γραμμή) παρουσιάζεται και στατιστική πληροφορία (εύρος τιμών, ελάχιστη και μέγιστη τιμή, ενδιάμεση τιμή, τεταρτημόρια) για τα δεδομένα πεδίου με μορφή κάθετης μπάρας για κάθε τιμή πεδίου (από Triantafyllou et al. 2001).
- Σχήμα 2.15.** (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).
- Σχήμα 2.16.** 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).
- Σχήμα 2.17.** Σχηματική αναπαράσταση ενός συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος με τρεις συνιστώσες - υπομοντέλα: υδροδυναμικό μοντέλο– οικολογικό μοντέλο υδάτινης στήλης – οικολογικό μοντέλο βένθους (Holt, 2004).
- Σχήμα 2.18.** Παράλληλη εξέλιξη υδροδυναμικών, οικολογικών μοντέλων και υπολογιστικής ισχύος (τροποποιημένο από James 2002).
- Σχήμα 2.19.** Σχηματική διαδικασία σύζευξης ενός υδροδυναμικού με ένα οικολογικό μοντέλο (από Zavatarelli et al. 2000)
- Σχήμα 3.1.** Η παράκτια περιοχή της πόλης της Μυτιλήνης (περιοχή μελέτης) και το ευρύτερο γεωγραφικό πλαίσιο.
- Σχήμα 3.2.** Ροδόγραμμα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, για την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.).
- Σχήμα 3.3.** Μεταβολή συναρτήσεως του χρόνου του ανύσματος του ανέμου (stick plot) για την περίοδο 1 Ιουνίου 2000 έως 30 Νοεμβρίου 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (μετρήσεις ανά 3 ώρες, πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)
- Σχήμα 3.4.** Ύψος βροχής για την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002 (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)
- Σχήμα 3.5.** Τυπικές κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας και αντίστοιχα διαγράμματα T-S για την περιοχή του Στενού Μυτιλήνης: Πάνω – χειμερινή περίοδος (17/1/1998, Σταθμός GRE-52), κάτω – θερινή περίοδος (8/9/1998, Σταθμός GRE-53). Σταθμοί από το δίκτυο δειγματοληψίας MEDPOL. (Angelidis -1998, Angelidis -1999).
- Σχήμα 3.6.** Διευθύνσεις και ταχύτητες ρεύματος επιφανειακού στρώματος (1-10m βάθος) σε περιοχές του Στενού Μυτιλήνης όπως προέκυψαν από ρευματομετρήσεις με ιχνηλάτες στις 15 – 16 Σεπτεμβρίου 1983 (Πηγή: Κατσίκη και Θεοχάρης 1983).
- Σχήμα 3.7.** Λεκάνη απορροής νοτιο-ανατολικών ακτών Λέσβου και υδρογραφικό δίκτυο (πηγή: Κίτσιου Δ.).

- Σχήμα 4.1.** Περιοχή μελέτης και σταθμοί δειγματοληψίας.
- Σχήμα 5.1.** Το σύστημα των σίγμα συντεταγμένων (από Mellor, 1996).
- Σχήμα 5.2.** Το αριθμητικό πλέγμα για το δισδιάστατο τμήμα του κώδικα του υδροδυναμικού υπομοντέλου (external mode).
- Σχήμα 5.3.** Το αριθμητικό πλέγμα για το τρισδιάστατο τμήμα του κώδικα του υδροδυναμικού υπομοντέλου (internal mode). Το Q αντιστοιχεί στους συντελεστές κατακόρυφης ανάμιξης και διάχυσης  $K_M, K_H$ , και τα μεγέθη τύρβης  $q^2, q^2_l$ . Το T αντιστοιχεί στα μεγέθη T, S ή την πυκνότητα R.
- Σχήμα 5.4.** Το καμπυλόγραμμο πλέγμα (κάνναβος) (αριστερά) και η βαθυμετρία που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο (δεξιά). Διακρίνεται η μάσκα στεριάς.
- Σχήμα 5.5.** Αρχείο βαθυμετρίας όπως προκύπτει τελικά από το SeaGrid και χρησιμοποιείται στο μοντέλο: (οι στήλες από αριστερά) I (αριθμός κόμβου στον άξονα x), J (αριθμός κόμβου στον άξονα y), DX, DY (διαστάσεις κελιού), Βάθος ενώ οι δυο τελευταίες στήλες είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος των κόμβων του πλέγματος.
- Σχήμα 5.6.** Δημιουργία δισδιάστατων επιφανειακών πεδίων θερμοκρασίας / αλατότητας με παρεμβολή σημειακών πειραματικών μετρήσεων.
- Σχήμα 5.7.** Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας δισδιάστατων επιφανειακών πεδίων θερμοκρασίας – αλατότητας με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, από πειραματικά δεδομένα. Διακρίνεται η στεριά (μαύρο) και ο πυθμένας (ανάγλυφο) της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 5.8.** Ανατολικά ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας δισδιάστατων κάθετων πεδίων (τομών) θερμοκρασίας – αλατότητας με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, από πειραματικά δεδομένα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για βόρεια και νότια ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου. Διακρίνεται η στεριά (μαύρο) και ο πυθμένας (ανάγλυφο) της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 5.9.** Σχηματική παράσταση του οικολογικού υπομοντέλου: σχέσεις μεταξύ μεταβλητών κατάστασης, ροές ύλης και συναρτήσεις φόρτισης.
- Σχήμα 5.10.** Σχηματική περιγραφή της ανανέωσης της συγκέντρωσης μιας οικολογικής μεταβλητής σε κάθε βήμα χρόνου ύστερα από την σύζευξη φυσικών και οικολογικών διεργασιών.
- Σχήμα 5.11.** Γενικευμένο διάγραμμα ροής του συζευγμένου μοντέλου. Τα κουτιά με τις πλαϊνές γραμμές περιέχουν υπορουτίνες. Οι κυριότερες υπορουτίνες του οικολογικού υπομοντέλου περικλείονται από την διακεκομμένη γραμμή.
- Σχήμα 6.1.** Δειγματοληψία VK13 – 4 Μαρτίου 2002: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S –διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.
- Σχήμα 6.2.** Δειγματοληψία VK7 – 30 Μαΐου 2001: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S –διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.
- Σχήμα 6.3.** Δειγματοληψία VK18 – 30 Ιουλίου 2002: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που

ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S –διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.

- Σχήμα 6.4.** Δειγματοληψία VK19 – 4 Οκτωβρίου 2002. Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως  $\sigma-t$  ( $\text{kg/m}^3$ ) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και  $\sigma-t$  κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S –διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.
- Σχήμα 6.5.** (αριστερά) Διάγραμμα T-S σε συνάρτηση με το χρόνο για τον σταθμό M1 και (δεξιά) η συν-διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας (γκρι καμπύλη) κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου πάνω στο ίδιο διάγραμμα. Τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε δυο περιόδους: χειμερινή (Νοε έως Απρ – μπλε) και θερινή (Μαϊ έως Οκτ - κόκκινο).
- Σχήμα 6.6.** Ροδογράμματα ταχύτητας ρεύματος (διεύθυνση προς την οποία πηγαίνει το ρεύμα) όπως προκύπτουν από όλες τις ρευματομετρήσεις που διεξήχθησαν σε κάθε σταθμό για δύο βάθη.
- Σχήμα 6.7.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 30 Ιουλίου 2002: Ταχύτητα ( $\text{cm/s}$ ) και διεύθυνση ρεύματος ( $\text{deg}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.
- Σχήμα 6.8.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 24 Μαΐου 2002: Ταχύτητα ( $\text{cm/s}$ ) και διεύθυνση ρεύματος ( $\text{deg}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.
- Σχήμα 6.9.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 4 Οκτωβρίου 2002: Ταχύτητα ( $\text{cm/s}$ ) και διεύθυνση ρεύματος ( $\text{deg}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.
- Σχήμα 6.10.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 4 Μαρτίου 2002: Ταχύτητα ( $\text{cm/s}$ ) και διεύθυνση ρεύματος ( $\text{deg}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.
- Σχήμα 6.11.** Κατακόρυφη κατανομή γεωστροφικού ρεύματος (συνεχής γραμμή), όπως υπολογίστηκε από προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας σε τέσσερις δειγματοληψίες: (α) VK18 – 30 Ιουλίου 02, (β) VK16 – 24 Μαΐου 02, (γ) VK19 – 4 Οκτ 02 και (δ) VK13 - 4 Μαρ 02. Σημειώνονται οι ρευματομετρήσεις πεδίου (σημεία) στα αντίστοιχα βάθη.
- Σχήμα 6.12.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{M}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.13.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{M}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.14.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης αμμωνιακών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{M}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.15.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης Διαλυμένου Ανόργανου Αζώτου DIN (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



- Σχήμα 6.16.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης Διαλυμένου Οργανικού Αζώτου DON (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.17.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης φωσφορικών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{M}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.18.** Διακύμανση στο χρόνο του λόγου αζώτου προς φωσφόρο ( $\text{DIN:PO}_4^{-3}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.19.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης πυριτικών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{M}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 6.20.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης χλωροφύλλης *a* (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε  $\mu\text{g/L}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.
- Σχήμα 7.1.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για θερμοκρασία για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) κατά την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.2.** Σταθμός M1: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την θερμοκρασία για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά).
- Σχήμα 7.3.** Σταθμός M2: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την θερμοκρασία για όλη την περίοδο προσομοίωσης (πάνω αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω), σε βάθος 10m (κάτω αριστερά) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).
- Σχήμα 7.4.** Διακύμανση σφάλματος θερμοκρασίας ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.
- Σχήμα 7.5.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για αλατότητα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.6.** Σταθμός M1: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά).
- Σχήμα 7.7.** Σταθμός M2: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).
- Σχήμα 7.8.** Διακύμανση σφάλματος αλατότητας ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.
- Σχήμα 7.9.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για τον φυτοπλαγκτονικό άνθρακα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) - εκτός του M1- και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει

απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

- Σχήμα 7.9α.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για τον φυτοπλαγκτονικό άνθρακα για τον σταθμό M1 την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.10.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση φυτοπλαγκτού στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).
- Σχήμα 7.11.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης φυτοπλαγκτονικού άνθρακα ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.
- Σχήμα 7.12.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση νιτρικών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.13.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση νιτρικών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).
- Σχήμα 7.14.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης νιτρικών αλάτων ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.
- Σχήμα 7.15.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση αμμωνιακών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.16.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση αμμωνιακών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).
- Σχήμα 7.17.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης αμμωνιακών αλάτων ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1, M2 και M6 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.
- Σχήμα 7.18.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση φωσφορικών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).
- Σχήμα 7.19.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση φωσφορικών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).
- Σχήμα 7.20.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης φωσφορικών αλάτων ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού

σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

**Σχήμα 7.21.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

**Σχήμα 7.22.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

Σχήμα 7.23. Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

**Σχήμα 8.1.** Βαθυμετρία περιοχής μελέτης και οι καμπύλες A-B (παράλληλα με την ακτή), C-D και E-F (κάθετα προς την ακτή) κατά μήκος των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια κατακόρυφες κατανομές (τομές) των προσομοιωμένων μεταβλητών. Διακρίνονται επίσης οι σταθμοί δειγματοληψίας.

**Σχήμα 8.2.** Προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος φυσικών μεταβλητών: Κατακόρυφες κατανομές (τομές) θερμοκρασίας (oC), αλατότητας και πυκνότητας ( $\sigma-t$ , kg/m<sup>3</sup>) όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της γραμμής A-B (Σχήμα 8.1) σε 4 χαρακτηριστικά εποχιακά στιγμιότυπα.

**Σχήμα 8.3.** Προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος φυσικών μεταβλητών: Κατακόρυφες κατανομές (τομές) θερμοκρασίας (oC), αλατότητας, πυκνότητας ( $\sigma-t$ , kg/m<sup>3</sup>) και της συνιστώσας V της ταχύτητας (m/s) όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των γραμμών C-D (αριστερή στήλη) και E-F (δεξιά στήλη) (βλ. σχήμα 8.1) σε 4 χαρακτηριστικά εποχιακά στιγμιότυπα.

**Σχήμα 8.4.** Ανάδυση και καταβύθιση μαζών νερού λόγω ανεμογενούς κυκλοφορίας, όπως αποτυπώνεται ως κατακόρυφη μετατόπιση του θερμοκλινούς και του πυκνοκλινούς ( $\alpha - \beta$ , τομή C-D, 12-13 Ιουνίου 2002) και του ασθενούς αλοκλινούς και των ισόπυκνων καμπυλών ( $\gamma - \delta$ , τομή E-F, 23-24 Μαρτίου 2002). Παρουσιάζεται και το οριζόντιο πεδίο ταχυτήτων σε 2m βάθος στην ευρύτερη περιοχή και η διεύθυνση-ταχύτητα ανέμου (δεξιά).

**Σχήμα 8.5.** Σύγκριση και διαφορές στην κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, πυκνότητας και ταχύτητας ρεύματος (συνιστώσα V, άξονας βορράς-νότος) μεταξύ 30ης Απρ 2001 και 30ης Απρ 2002, δηλ ένα χρόνο μετά.

**Σχήμα 8.6.** Κατακόρυφη κατανομή κάθετα στην ακτή της V-συνιστώσας της ταχύτητας (m/s) και οριζόντια κατανομή πεδίου ταχυτήτων σε 4 βάθη (2, 10, 20 και 30m) σε 2 στιγμιότυπα.

**Σχήμα 8.7.** Ανάπτυξη στροβιλώδους κυκλοφορίας στην περιοχή μελέτης: στιγμιότυπα από διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας, εποχές και βάθη. Διακρίνονται ισοβαθείς των 10, 20, 30 και 40 m.

**Σχήμα 8.9.** Οριζόντια κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και πεδίο ταχυτήτων ρεύματος όπως υπολογίζονται από το μοντέλο σε 3 βάθη (2, 10 και 20m)

σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.

- Σχήμα 8.10.** Κατακόρυφες κατανομές (τομές) φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και ισόθερμες καμπύλες, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της καμπύλης A-B και κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των καμπυλών C-D και E-F (βλ. Σχήμα 8.1) σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.
- Σχήμα 8.11.** Νιτρικά και αμμωνιακά άλατα: οριζόντια κατανομή σε βάθος 2m και κατακόρυφη κατανομή κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.
- Σχήμα 8.12.** Φωσφορικά άλατα και διαλυμένος οργανικός άνθρακας: οριζόντια κατανομή (επιφάνεια ή βάθος 2m) και κατακόρυφη κατανομή κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.
- Σχήμα 8.13.** Εξέλιξη εαρινής αύξησης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας (άνοιξη 2002, τρία στιγμιότυπα ανά 10 μέρες περίπου) και αντίστοιχη μεταβολή αποθεμάτων αμμωνιακών και νιτρικών αλάτων στη στήλη του νερού. Οριζόντιες κατανομές σε βάθος 2m και κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D.
- Σχήμα 8.14.** Κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στη περιοχή ανοιχτά του λιμένα σε διαδοχικά στιγμιότυπα ημερήσιας συχνότητας την περίοδο 20-28 Απρ 2002. Οριζόντια κατανομή σε βάθος 2m και κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D.
- Σχήμα 8.15.** Παράδειγμα ανάπτυξης οριζόντιας και κατακόρυφης βαθμίδας συγκέντρωσης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών αλάτων.
- Σχήμα 8.16.** Μεταφορά και διασπορά φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στην ευρύτερη περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης από την κυκλοφορία του νερού υπό την επίδραση ανέμου από επικρατούσες διευθύνσεις (στιγμιότυπα). Αριστερά, βόρειο-ανατολικός άνεμος – φθινόπωρο, δεξιά, νότιο-ανατολικός άνεμος – άνοιξη. Διακρίνονται οι ισοβαθείς των 10, 20, 30, 40m αντίστοιχα από την ακτή.
- Σχήμα 9.1.** Παράδειγμα συνιστωσών ενός συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης διεργασιών παράκτιων οικοσυστημάτων, που θα μπορούσε να αναπτυχθεί για περιοχή περιορισμένης χωρικής κλίμακας (local scale), στα πρότυπα συστημάτων επιχειρησιακής ωκεανογραφίας ευρύτερων περιοχών.
- Σχήμα 9.2.** Παράλληλη εκτέλεση μοντέλων που καλύπτουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες και μείωση της κλίμακας των επιχειρησιακών εφαρμογών (downscaling). (Τα δυο πρώτα σχήματα από την ιστοσελίδα του συστήματος Ποσειδών του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., προσαρμογή συνολικού σχήματος από Prandle et al., 2005).

## Κατάλογος πινάκων

- Πίνακας 2.1.** Ποσοτικά (στατιστικά) μέτρα καλής προσαρμογής (ή μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος) που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία.
- Πίνακας 2.2.** Χαρακτηριστικά Τρισδιάστατων μοντέλων θαλάσσιου οικοσυστήματος (με έμφαση από το 2000 και μετά). Συντομογραφίες: P: φυτοπλαγκτόν, B: βακτήρια, N: Διαλυμένο ανόργανο άζωτο, D: θρύμματα, B<sub>n</sub>: βενθικό άζωτο, BD: βενθικά θρύμματα, L<sub>T</sub>: Θολερότητα, P1: διάτομα, P2: αυτότροφα μαστιγωτά, P3: νανο-μαστιγωτά, P4: κυανοβακτήρια, Z1: μικρο-ζωοπλαγκτόν, Z2: μεσο-ζωοπλαγκτόν, PS: σωματιδιακό πυρίτιο, POM: σωματιδιακή οργανική ύλη, DOM: διαλυτή οργανική ύλη, DO: διαλυμένο οξυγόνο, BOD: βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο, DOP: διαλυμένος οργανικός φώσφορος.
- Πίνακας 3.1.** Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και εύρος θερμοκρασίας (°C), ατμοσφαιρικής πίεσης (bar) και σχετικής υγρασίας (%) για την περίοδο Ιούνιος 1, 2000 – Μάιος 31, 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)
- Πίνακας 3.2.** Συστηματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο Στενό Μυτιλήνης (ενδεικτικά).
- Πίνακας 3.3.** Μέση τιμή και εύρος διακύμανσης αλατότητας στην παράκτια περιοχή της πόλης Μυτιλήνης (26 Απριλίου 1991 έως 7 Δεκεμβρίου 1993, μηνιαίες δειγματοληψίες, Τσιρτσής 1994).
- Πίνακας 3.4.** Μέση τιμή και εύρος θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας στην παράκτια περιοχή του Στενού Μυτιλήνης, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα MEDPOL για τις χρονιές 1995 - 1999 και 2004.
- Πίνακας 3.5.** Εύρος τιμών και μέση τιμή ανόργανων θρεπτικών αλάτων, διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), χλωροφύλλης-α (chl-a) και διαλυμένου οξυγόνου (DO) για σταθμούς στο Στενό Μυτιλήνης, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα MED POL 1995-1999, 2004 και Τσιρτσή (1994). Ενδεικτικές τιμές των ίδιων μεταβλητών σε άλλες περιοχές και τύπους νερού στην Ελλάδα (Ανατολική Μεσόγειος) και τη Βόρεια Θάλασσα.
- Πίνακας 3.6.** Αφθονία ειδών ανά κλάση φυτοπλαγκτού στους σταθμούς M1 και M2. Μετρήσεις Τσιρτσή (1994).
- Πίνακας 3.7.** Κοκκομετρική σύσταση και περιεχόμενο σε οργανικό άνθρακα, ανθρακικό ασβέστιο και σίδηρο στα ιζήματα των ανατολικών ακτών Λέσβου, το 2004 (Angelidis 2004).
- Πίνακας 4.1.** Κωδικός πλόα, ημερομηνίες διεξαγωγής δειγματοληψιών, βάθη συλλογής νερού και πόντισης ρευματομέτρων για κάθε σταθμό.
- Πίνακας 5.1.** Οι μετασηματισμένες, στο σύστημα των σ-συντεταγμένων, εξισώσεις συνέχειας, κίνησης, διατήρησης μάζας, θερμοκρασίας, αλατότητας και τυρβωδών ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται στο POM (από Mellor, 1996).
- Πίνακας 5.2.** Μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες για τις μεταβλητές του μοντέλου και περιληπτικά, η φυσική σημασία τους.
- Πίνακας 5.3.** Μεταβλητές κατάστασης οικολογικού υπομοντέλου. (Υπενθυμίζεται ότι Molarity (M) =  $\text{grat L}^{-3}$ )
- Πίνακας 5.4.** Διεργασίες που περιλαμβάνονται ή παραμετροποιούνται στο βιοχημικό υπομοντέλο (MEL: Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων).
- Πίνακας 5.5.** Παράμετροι του οικολογικού υπομοντέλου: περιγραφή, τιμή και μονάδες. Οι τιμές προέκυψαν μετά από βαθμονόμηση εκτός από αυτές που σημειώνονται με αστερίσκο (\*).
- Πίνακας 5.6.** Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας καταβύθισης φυτοπλαγκτού.

- Πίνακας 5.7.** Παράμετροι και συναρτήσεις οριακών συνθηκών πυθμένα για τη διαλυτή ύλη του μοντέλου.
- Πίνακας 5.8.** Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μέσων τιμών των χημικών μεταβλητών ανεπεξέργαστων λυμάτων, όπως μετρήθηκαν στους αγωγούς αποχέτευσης που εκβάλλουν στο λιμάνι της Μυτιλήνης την περίοδο Ιούλιος – Δεκέμβριος 1992 (από Τσιρτσή, 1994 – σελ35).
- Πίνακας 5.9.** Παράμετροι ποιότητας ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων λυμάτων πόλεων Θεσσαλονίκης και Μυτιλήνης και σχετικές αναφορές.
- Πίνακας 5.10.** Η πλήρης μορφή των εξισώσεων των οικολογικών μεταβλητών του συζευγμένου μοντέλου.
- Πίνακας 5.11.** Συζευγμένο Μοντέλο: Συναρτήσεις Φόρτισης (forcing functions) του βιοχημικού υπομοντέλου. Εκτός από την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, όλες οι συναρτήσεις φόρτισης είναι αποτελέσματα του POM.
- Πίνακας 5.12.** Μεταβλητές και υπορουτίνες του φυσικού και του οικολογικού υπομοντέλου που εμφανίζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 5.11.
- Πίνακας 5.13.** Ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου από τον σταθμό M2 που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του οικολογικού σκέλους του μοντέλου (πηγή, Τσιρτσής, 1994).
- Πίνακας 5.14.** Περίληψη των χαρακτηριστικών των επιμέρους και του συζευγμένου μοντέλου και περιγραφή της εφαρμογής.
- Πίνακας 6.1.** Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση των μετρήσεων θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως σίγμα-t ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας.
- Πίνακας 6.2.** Ρευματομετρήσεις: εύρος (min-max), μέση τιμή (avg) και τυπική απόκλιση (stdv) του μέτρου της ταχύτητας ρεύματος ( $\text{cm}/\text{s}$ ) στο δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας. Παρατίθεται και ο αριθμός παρατηρήσεων (No Obs).
- Πίνακας 6.3.** Ημερομηνίες παρατήρησης παράκτιου ρεύματος. Με πλάγια γράμματα, οι ρευματομετρήσεις που έγιναν από τέλη Απριλίου έως Οκτώβριο.
- Πίνακας 6.4.** Ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας (ροή ενέργειας,  $\text{W}/\text{m}^2$ ) στην επιφάνεια της θάλασσας (surface) και λίγα μέτρα πάνω από τον πυθμένα κάθε σταθμού (underwater). Αναγράφεται η ημερομηνία δειγματοληψίας. Στη στήλη % dIFF σημειώνεται η υποθαλάσσια φωτεινή ισχύς στο αντίστοιχο βάθος ως ποσοστό της επιφανειακής ισχύος. Επίσης παρουσιάζεται ο συντελεστής απόσβεσης ( $\text{m}^{-1}$ ).
- Πίνακας 6.5.** Βάθος εξαφάνισης δίσκου Secchi ( $D_{Secchi}$ , m), συντελεστής απόσβεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $k$  ( $\text{m}^{-1}$ ) εκτιμώμενος από τη σχέση  $k = 1.7/D_{Secchi}$  και βάθος εύφωτης ζώνης (m), εκτιμώμενο από τη σχέση  $D_{euphotic} = 4.6052/k$ .
- Πίνακας 6.6.** Θεωρητικό βάθος Ekman (εύρος και μέση τιμή), όπως υπολογίζεται από τα ανεμολογικά δεδομένα και τη σχέση 6.1 για 4 ημερομηνίες δειγματοληψίας έως και 48h πριν αλλά και για το σύνολο της περιόδου 1 Ιουν 2000 - 30 Νοε 2002.
- Πίνακας 6.7.** Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), νιτρωδών ( $\text{NO}_2^-$ ) και αμμωνιακών αλάτων ( $\text{NH}_4^+$ ), διαλυτού οργανικού αζώτου (DON), φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), πυριτικών αλάτων ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), χλωροφύλλης -α (chl-a) και λόγου N : P σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας.
- Πίνακας 6.8.** Μέσες τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών ( $\mu\text{M}$ ) σε θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου (πηγή: Ladakis et al., 2003).
- Πίνακας 6.9.** Χαρακτηρισμός επιπέδου ρύπανσης και ποιότητας παράκτιων νερών βάσει (1) εποχιακών συγκεντρώσεων θρεπτικών αλάτων (χειμερινές και θερινές συγκεντρώσεις φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών), από Pavlidou et al. 2005 και (2) συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α, από

Ignatiades 2005. Οι κλίμακες προτείνονται βάσει μετρήσεων από διάφορες περιοχές των ελληνικών θαλασσών.

- Πίνακας 6.10.** Ποσοστό των μετρήσεων στο οποίο ο λόγος N:P βρέθηκε πάνω από 16:1 (P-limited) για κάθε σταθμό.
- Πίνακας 7.1.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης θερμοκρασίας στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.2.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης αλατότητας στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.3.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης για το μέτρο της ταχύτητας ρεύματος στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέσες τιμές για τα δύο βάθη μετρήσεων).
- Πίνακας 7.4.** Ποσοστό % επιτυχίας της προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος στους σταθμούς δειγματοληψίας, όπως ποσοτικοποιείται από τη σχέση 7.2.
- Πίνακας 7.5.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης φυτοπλαγκτονικού άνθρακα στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.6.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.7.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης αμμωνιακών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.8.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης φωσφορικών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).
- Πίνακας 7.9.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης διαλυμένου οργανικού άνθρακα στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή και στόχοι

#### 1.1. Εισαγωγή

Τα θαλάσσια οικοσυστήματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας, αβεβαιότητας και δυσκολίας στη συλλογή μετρήσεων, και όλα αυτά δυσχεραίνουν την κατανόηση και ποσοτικοποίησή τους. Η πολυπλοκότητα και η αβεβαιότητα οφείλονται κυρίως σε δυο λόγους. Πρώτον, απορρέουν από την πληθώρα μεταβλητών (φυσικών, βιολογικών, χημικών και γεωλογικών) και των μεταξύ τους διεργασιών, που πολλές φορές είναι μη-γραμμικές ή στοχαστικές και εκδηλώνονται σε μεγάλο εύρος χωρικής και χρονικής κλίμακας (Mann and Lazier 1996, James 2002). Δεύτερον, τα θαλάσσια οικοσυστήματα εκδηλώνουν μη-γραμμικές συμπεριφορές που δεν προκύπτουν από την απλή άθροιση ή υπέρθεση των επιμέρους τμημάτων /διεργασιών, αλλά είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας τους ως συστήματα. Αυτό αποτελεί κεντρική θέση της ολιστικής προσέγγισης των οικοσυστημάτων: τα πάντα συνδέονται μεταξύ τους και το σύνολο είναι 'μεγαλύτερο' από το άθροισμα των τμημάτων (Jorgensen 1999).

Η μελέτη της δυναμικής των παράκτιων οικοσυστημάτων προϋποθέτει διεπιστημονική και συστημική προσέγγιση (Huthnance et al. 1993, Robinson et al. 1999, Green et al. 2009). Για την κατανόηση της λειτουργίας του παράκτιου θαλάσσιου οικοσυστήματος χρειάζεται σύνθεση της γνώσης και της εμπειρίας από διάφορα επιστημονικά πεδία, όπως η υδροδυναμική, η οικολογία, η βιογεωχημεία, η ιζηματολογία ενώ η μοντελοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει αριθμητική ανάλυση και τεχνικές προγραμματισμού (James 2002). Ορισμένα παραδείγματα της προόδου των τελευταίων δεκαετιών στην θαλάσσια έρευνα περιλαμβάνουν την ανάδειξη της σπουδαιότητας των μικροβιακών διεργασιών (μικροβιακός κύκλος) στην ανακύκλωση ύλης στο θαλάσσιο τροφικό πλέγμα (Azam et al. 1983), την δυνατότητα συλλογής δεδομένων πεδίου με συνοπτικό και μαζικό τρόπο που προσφέρουν οι δορυφόροι και οι τηλεπισκοπικές / τηλεμετρικές μέθοδοι, την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, που ανοίγει διαρκώς νέες προοπτικές, προσφέροντας μεγάλες ταχύτητες επεξεργασίας και δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων, την ωρίμανση των αριθμητικών μοντέλων υδροδυναμικής κυκλοφορίας

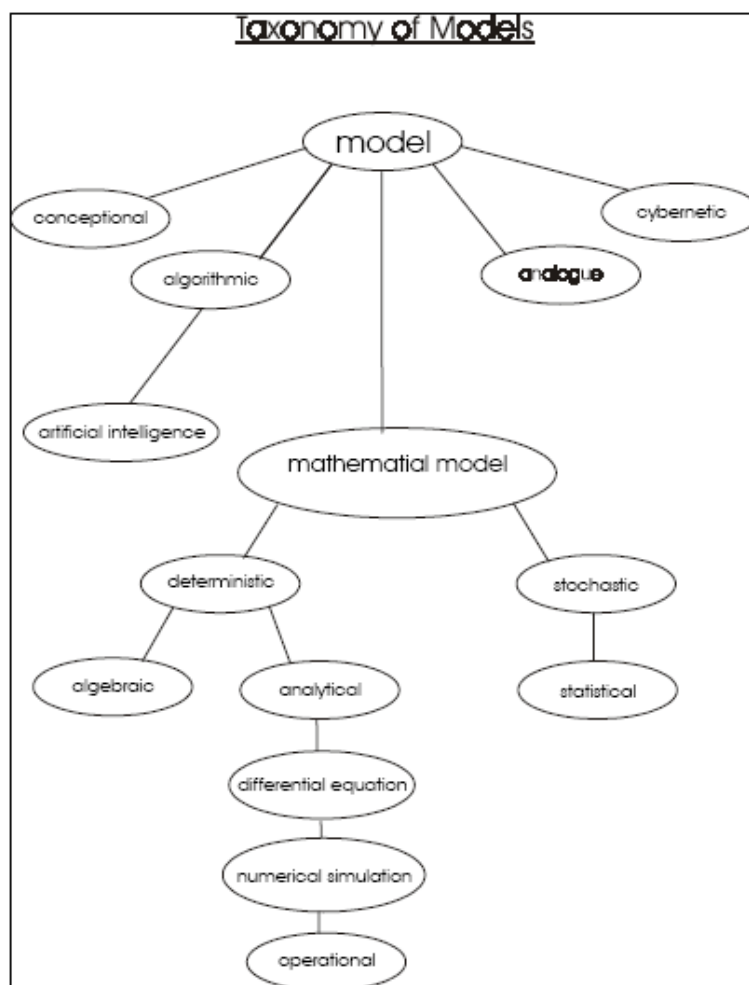


και την συμβολή τους στην διερεύνηση των μηχανισμών φυσικής κυκλοφορίας των νερών (Kantha and Clayson 2000), την ανάδειξη του ρόλου που διαδραματίζουν οι φυσικές συνθήκες και διεργασίες στη διαμόρφωση της δομής και της δυναμικής των βιολογικών συστημάτων σε όλες τις χωρικές κλίμακες (Mann and Lazier 1996, Longhurst 2006, Blackford et al. 2010): οι φυσικές διεργασίες καθορίζουν το πλαίσιο (όπως η θερμική στρωμάτωση στη στήλη νερού, η ανάβλυση βαθιών νερών σε παράκτιες περιοχές, η μεταφορά – διασπορά μιας φυτοπλακτονικής έξαρσης από την κυκλοφορία νερού, η ρύθμιση του ρυθμού βιολογικών διεργασιών, όπως η αύξηση των κυττάρων φυτοπλακτού, από την θερμοκρασία νερού) μέσα στο οποίο λειτουργούν οι χημικές-βιολογικές διεργασίες, και τελικά καθορίζουν την πορεία ενός οικολογικού γεγονότος. Αμφίδρομα, η βιολογική δραστηριότητα επενεργεί στις φυσικές συνθήκες τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο (για παράδειγμα με τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα κατά τη φωτοσύνθεση στα επιφανειακά νερά και άρα την απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα, συνεισφέροντας στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και των επιπτώσεων από την κλιματική αλλαγή και ρυθμίζοντας το παγκόσμιο κλίμα), όσο και σε τοπικό επίπεδο και μικρές χρονικές κλίμακες, όπως ο περιορισμός της διείσδυσης φωτός στη στήλη νερού από το φυτοπλαγκτό (φωτοσκίαση) και κατά συνέπεια η μεταβολή της λειτουργίας ενός οικοσυστήματος. Αυτή η προσέγγιση, που αναλύεται εκτενώς από τους Mann and Lazier (1996) και θέλει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες να είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με σχέσεις περίπλοκες, ορίζοντας από κοινού τις ιδιότητες του συνολικού θαλάσσιου συστήματος, έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διαχείριση του παράκτιου χώρου, ο οποίος, ως κύριο ενδιαίτημα του ανθρώπινου είδους, υφίσταται διαρκώς αυξανόμενες πιέσεις από την πληθώρα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Τα σύγχρονα μοντέλα θαλάσσιου οικοσυστήματος ή συζευγμένα υδροδυναμικά – οικολογικά μοντέλα είναι προϊόντα αυτής της διαρκούς και πολυετούς προσπάθειας σύνθεσης των διαφορετικών πεδίων και των διαφορετικών αντιλήψεων για το πώς λειτουργεί ένα οικοσύστημα. Αποτελούμενα από συνιστώσες όπως ένα υδροδυναμικό μοντέλο φυσικής κυκλοφορίας και ένα μοντέλο βιογεωχημικών διεργασιών και/ή δυναμικής πληθυσμού, πολλές φορές συνδεδεμένα με μοντέλα μεταφοράς ρύπων ή ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, επιχειρούν να περιγράψουν με μαθηματικό τρόπο διεργασίες οικοσυστήματος και την εξέλιξή τους στο χώρο και το χρόνο. Με πολυπλοκότητα που καθορίζεται αφενός από την ανάγκη για όσο το δυνατό πιστότερη περιγραφή του οικοσυστήματος και αφετέρου από τους περιορισμούς που

επιβάλλουν η έλλειψη μετρήσεων πεδίου, τα κενά στη θεωρία και η υπολογιστική ισχύς (Nihoul 1998, Blackford et al. 2010), ενσωματώνουν τα επιτεύγματα των επιμέρους επιστημονικών πεδίων και δείχνουν να ωριμάζουν με γοργούς ρυθμούς προς την κατεύθυνση της επιχειρησιακής εφαρμογής τους, παρόλη την σχετικά σύντομη ιστορία τους (James 2002, Siddorn et al. 2007). Η προοπτική αυτή αποκτά ξεχωριστή σημασία για την διαχείριση του παράκτιου θαλάσσιου χώρου: τα συζευγμένα μοντέλα οικοσυστήματος μπορούν να αποτελέσουν εκτός από ερευνητικά εργαλεία, και εργαλεία διαχείρισης, που θα παρέχουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις οικολογικών διεργασιών, δυνατότητα παρακολούθησης της ποιότητας νερών, ανάπτυξη και έλεγχο διαχειριστικών σεναρίων και πρόγνωση της μελλοντικής κατάστασης ενός οικοσυστήματος, στα πρότυπα των επιχειρησιακών συστημάτων φυσικών διεργασιών που έχουν ήδη αναπτυχθεί (James 2002, Holt et al. 2005, Arhonditsis et al. 2006, Siddorn et al. 2007, OSPAR Commission 2008, Wild-Allen et al. 2010, Fennel 2010, MEECE 2013).

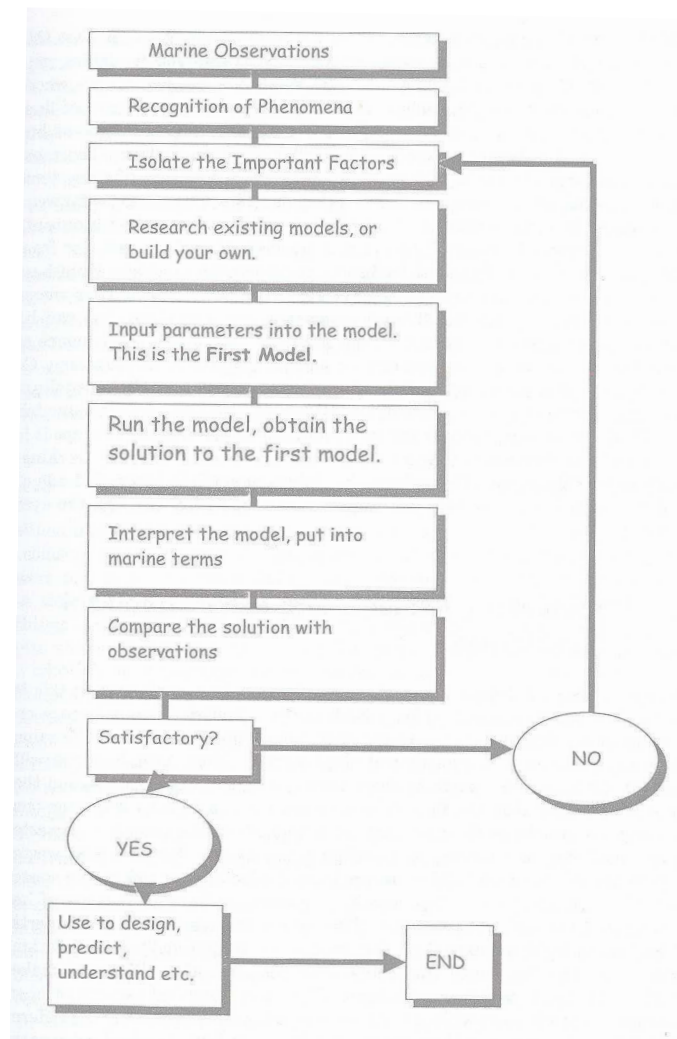
Συνθέτοντας τους ορισμούς που δίνουν οι Moll and Radach (2001) και Fennel and Neumann (2004) μπορεί να ειπωθεί ότι μοντέλο είναι μια εξιδανικευμένη απλοποίηση της πραγματικότητας, ένα πρότυπο που διατηρεί τις βασικές ιδιότητες και περιλαμβάνει τις 'σημαντικότερες' διεργασίες ενός συστήματος. Η απλοποίηση είναι απαραίτητη για να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα του συστήματος. Στο Σχήμα 1.1, οι Moll and Radach (2001) ταξινομούν τα διάφορα είδη μοντέλων δίνοντας έμφαση στα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης, ενώ στο Σχήμα 1.2 (Dyke 2001), παρουσιάζεται η φιλοσοφία που διέπει τη μοντελοποίηση διεργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η έννοια του μοντέλου μπορεί να πάρει διαφορετικό περιεχόμενο ανάλογα με την προσέγγιση, από ακριβής αναπαραγωγή σε γενική απεικόνιση, από στοχαστικά μοντέλα σε μοντέλα διεργασιών, από 'απλά' μοντέλα σε 'σύνθετα' (Blackford et al. 2010). Στα αριθμητικά μοντέλα, οι ιδιότητες του συστήματος εκφράζονται με μαθηματικές σχέσεις, με ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν τους μηχανισμούς που συνδέουν τις διάφορες μεταβλητές του συστήματος. Παρότι δεν δίνουν ακριβείς λύσεις στις εξισώσεις, όπως θα έδινε ένα αναλυτικό μοντέλο λόγω της φύσης των αριθμητικών τεχνικών που εφαρμόζονται για την επίλυση, έχουν χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ελκυστικά (Dyke 2001, Fennel and Neumann 2004): μπορούν να επιλύουν ταυτόχρονα πολύ μεγάλο αριθμό εξισώσεων που περιγράφουν φαινόμενα μη-γραμμικά, όπως οι τυρβώδεις ροές, ενώ είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.



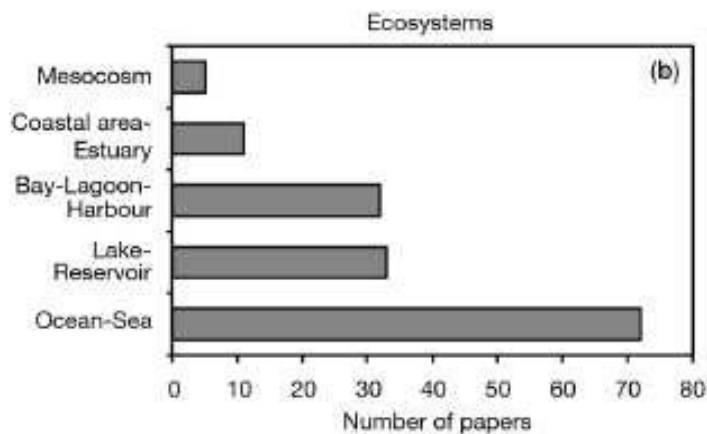
**Σχήμα 1.1.** Ταξινόμηση μοντέλων με έμφαση στα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης (Moll and Radach, 2001).

Η μοντελοποίηση διεργασιών είναι πλέον ένα δυναμικό πεδίο στις θαλάσσιες επιστήμες (Kantha and Clayson 2000, Fennel and Neumann 2004) και η συνεισφορά της στην πρόοδο της γνώσης και στην κατανόηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων θεωρείται κεφαλαιώδους σημασίας (Anderson 2010). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχει γενικευτεί η χρήση αριθμητικών ομοιωμάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως φανερώνει ο μεγάλος αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων (Moll and Radach 2001, Arhonditsis and Brett 2004, Stow et al. 2009). Ωστόσο, η ανασκόπηση των Arhonditsis and Brett (2004) και η συνέχεια της (Arhonditsis et al. 2006) ανέδειξαν τον περιορισμένο αριθμό δημοσιεύσεων, που αφορούσαν εφαρμογές μοντέλων για διερεύνηση περιβαλλοντικών προβλημάτων σε μικρή, τοπική κλίμακα (κόλποι, εγκαλωπώσεις, λιμάνια, εκβολικά συστήματα) συγκριτικά με εφαρμογές μοντέλων σε άλλους τύπους οικοσυστημάτων π.χ. περιφερειακές θάλασσες και ωκεάνια

συστήματα (Σχήμα 1.3). Σε συνδυασμό με τον αντίστοιχα μικρό αριθμό βιβλιογραφικών αναφορών στις δημοσιεύσεις αυτές, το συμπέρασμα είναι ότι, μέχρι πολύ πρόσφατα τουλάχιστον, αυτά τα μικρής κλίμακας οικοσυστήματα δεν φαίνεται να έχουν προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον επαρκώς, και παρά τα αυξανόμενα πιστικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν, η χρήση μοντέλων ως βοήθημα για τη διερεύνηση και ολοκληρωμένη διαχείρισή τους είναι περιορισμένη. Οι Blackford et al. (2010), συνοψίζοντας τις προκλήσεις που έχει μπροστά της η μοντελοποίηση θαλάσσιων οικολογικών διεργασιών, επισημαίνουν ως μια από αυτές, την ανάγκη περισσότερων τέτοιων ερευνητικών εφαρμογών και την ανάπτυξη εργαλείων τα προϊόντα των οποίων θα μπορούν να απευθύνονται σε αυτούς που διαμορφώνουν και εφαρμόζουν πολιτικές περιβαλλοντικής προστασίας και διαχείρισης της παράκτιας ζώνης.



**Σχήμα 1.2.** Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή και εφαρμογή ενός μοντέλου στο θαλάσσιο περιβάλλον (Dyke 2001).



**Σχήμα 1.3.** Κατανομή των τύπων οικοσυστήματος που έχουν μελετηθεί με μοντέλα προσομοίωσης μεταξύ 1990-2002 (από Arhonditsis and Brett 2004).

Μολονότι μόνο μία σε βάθος και έκταση διερεύνηση της σημερινής κατάστασης των μοντέλων θαλασσιών οικοσυστημάτων ανάλογη των εργασιών των Arhonditsis and Brett (2004) και Arhonditsis et al. (2006) θα μπορούσε να δώσει ενημερωμένη εικόνα, εντούτοις φαίνεται από την ανασκόπηση της παρούσας εργασίας ότι, μόνο σποραδικές μελέτες μικρής κλίμακας εμφανίζονται στη βιβλιογραφία (π.χ. Savvidis et al 2011, Pastress and Solidoro 2012) και ακόμα λιγότερες που να χρησιμοποιούν τρισδιάστατη διακριτοποίηση του χώρου προς την κατεύθυνση της επιχειρησιακής εφαρμογής (π.χ. Korres et al. 2012).

Στην παρούσα εργασία, το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται στην ανάπτυξη μεθοδολογίας που θα μπορεί να εφαρμοστεί στο ευρύτερο πλαίσιο της διαχείρισης του παράκτιου χώρου ώστε, σε τοπικό επίπεδο, να δίνει απαντήσεις σε ερωτήματα που αφορούν τη φαινομενολογία μιας περιοχής όπως: ποιες είναι οι κύριες διεργασίες του παράκτιου οικοσυστήματος από πλευράς φυσικής κυκλοφορίας θαλασσιών μαζών και αλληλεπίδρασης μεταβλητών στα κατώτερα τροφικά επίπεδα (ανόργανα θρεπτικά άλατα – φυτοπλαγκτό – οργανική ύλη); Ποια είναι η δυναμική αυτών των διεργασιών και πώς ποσοτικοποιείται στη διάρκεια ενός ετήσιου κύκλου; Κρίνεται ότι τα ερωτήματα αυτά δεν μπορούν να απαντηθούν ικανοποιητικά μόνο με μεθοδολογίες όπως λ.χ. οι σποραδικές στο χώρο και χρόνο δειγματοληψίες πεδίου ή η τηλεπισκόπηση, λόγω των περιορισμών που επιβάλλει η μεμονωμένη εφαρμογή αυτών των προσεγγίσεων. Προκύπτει επομένως η αναγκαιότητα χρήσης ενός εργαλείου που αφενός θα εστιάζει στις διεργασίες, αφετέρου θα είναι ικανό να ανταποκριθεί στη μεγάλη διακριτική ικανότητα στο χώρο και το χρόνο που απαιτεί η έρευνα του

παράκτιου χώρου σε μικρή, τοπική, χωρική κλίμακα. Μεγάλο μέρος της εργασίας αυτής αφιερώνεται στην ανάπτυξη ενός τέτοιου εργαλείου σύνθεσης της ευρύτερης εικόνας: ενός μοντέλου οικοσυστήματος, προϊόν της σύζευξης ενός υδροδυναμικού μοντέλου φυσικής κυκλοφορίας τριών διαστάσεων, δοκιμασμένου και κατάλληλου για παράκτιες περιοχές, με ένα οικολογικό σκέλος που θα είναι σχετικά απλό αλλά ρεαλιστικό, και στοχευμένο στις υπό διερεύνηση διεργασίες, όχι όμως σε βάρος της δυνατότητάς του να εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιοχές (generic use).

Η επιλογή ενός απλού οικολογικού σκέλους, με την έννοια ότι περιγράφει αφαιρετικά τα κατώτερα επίπεδα οργάνωσης του παράκτιου θαλάσσιου οικοσυστήματος χρησιμοποιώντας λίγες μεταβλητές κατάστασης που συναθροίζουν π.χ. μεγάλο αριθμό οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών ('φυτοπλαγκτόν') ή ένα ευρύτατο φάσμα ουσιών ('διαλυμένη οργανική ύλη'), μπορεί να θεωρείται ότι υπεραπλουστεύει το πραγματικό σύστημα (Arhonditsis and Brett 2004), ωστόσο είναι επαρκής για τα οικολογικά φαινόμενα που έχει στόχο να διερευνήσει, όπως οι ετήσιοι κύκλοι φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και θρεπτικών και εν γένει διεργασίες ευτροφισμού. Οι Friedrichs et al. (2006) έδειξαν πως ένα απλό μοντέλο τριών μεταβλητών κατάστασης Θρεπτικών-Φυτοπλαγκτού-Ζωοπλαγκτού (NPZ model), το οποίο έχει βαθμονομηθεί προσεκτικά μπορεί να περιγράψει διεργασίες της ανοιχτής θάλασσας (open ocean) το ίδιο καλά με ένα σύνθετο μοντέλο αυξημένης τροφικής διακριτικής ικανότητας. Τα 'απλά' μοντέλα τεσσάρων μεταβλητών κατάστασης Θρεπτικά-Φυτοπλαγκτό-Ζωοπλαγκτό-Σωματιδιακή ύλη (τα λεγόμενα NPZD models) εξακολουθούν να αποδεικνύουν την αξία τους ως ερευνητικά εργαλεία τόσο σε περιφερειακή όσο και σε ευρύτερη ωκεάνια κλίμακα (Friedrichs and Hofmann 2001, Kawamiya and Oschlies 2003, Schartau and Oschlies 2003, Friedrichs et al. 2007). Ένα από τα συμπεράσματα των Friedrichs et al. (2007), οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις δώδεκα διαφορετικών μοντέλων τύπου NPZD, ήταν ότι τα 'απλά' μοντέλα μπορούν να λειτουργήσουν το ίδιο καλά με τα πιο σύνθετα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όταν βαθμονομηθούν προσεκτικά για τις περιοχές αυτές. Αν και τα προσομοιωμένα αποτελέσματα που παράγουν απέχουν από το να χαρακτηριστούν ιδανικά, ωστόσο μπορούν να αναπαράγουν πολύ ικανοποιητικά βασικά χαρακτηριστικά όπως η διακύμανση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας η οποία περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών, φωτός και τη βόσκηση (Anderson 2005). Η διαπίστωση ότι η αυξημένη πολυπλοκότητα, εν ονόματι της πιστότερης περιγραφής διεργασιών του πραγματικού συστήματος, δεν

εξασφαλίζει υποχρεωτικά καλύτερες επιδόσεις για ένα μοντέλο, διατυπώνεται σαφώς σε ανασκοπήσεις και συγκριτικές μελέτες (π.χ. Arhonditsis and Brett 2004, Arhonditsis et al. 2006). Ο βαθμός της πολυπλοκότητας που ενσωματώνει ένα μοντέλο θα πρέπει να είναι συνάρτηση τόσο του ερευνητικού ερωτήματος και των οικολογικών μηχανισμών που φιλοδοξεί να διερευνήσει, όσο και της γνώσης και κατανόησης των μηχανισμών αυτών αλλά και των διαθέσιμων δεδομένων πεδίου. Επιπλέον, η επιλογή ενός απλού οικολογικού σκέλους για σύνδεση (coupling) με ένα 3D μοντέλο φυσικής κυκλοφορίας θεωρείται η ενδεικνυόμενη σε αυτό το αρχικό στάδιο ανάπτυξης ενός σύνθετου, συζευγμένου, 3D μοντέλου οικοσυστήματος. Όπως συνηγορεί ο Anderson (2005) υπέρ της σταδιακής, και κάτω από συγκεκριμένους όρους, αύξησης της πολυπλοκότητας στην ανάπτυξη και εξέλιξη θαλάσσιων βιογεωχημικών μοντέλων, 'κάποιος μαθαίνει να περπατάει πρώτα προτού τρέξει'. Το μείζον ζήτημα της πολυπλοκότητας (model complexity) αναλύεται στην παράγραφο 2.2.

Κατά την ανάπτυξη, εφαρμογή και ανάλυση των αποτελεσμάτων του συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος στην εργασία αυτή, ακολουθούνται συγκεκριμένα μεθοδολογικά βήματα όπως βαθμονόμηση των τιμών των παραμέτρων (calibration), εκτίμηση των ικανοτήτων του μοντέλου με ποιοτικές και ποσοτικές τεχνικές, επαλήθευση με ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας / σφάλματος (verification/error quantification). Οι πρακτικές αυτές αρχίζουν να αναγνωρίζονται και να προτείνονται πλέον ως απαραίτητες διαδικασίες – ένα είδος μεθοδολογικού πρωτόκολλου – ώστε να θεωρείται η ανάπτυξη ενός μοντέλου σύμφωνη με κανόνες 'καλής πρακτικής', να τεκμηριώνεται η ποιότητα της εφαρμογής και να ενισχύεται η αξιοπιστία του μοντέλου ως εργαλείου (Arhonditsis and Brett 2004, Jakeman et al. 2006). Παραδόξως, ορισμένα από τα μεθοδολογικά αυτά βήματα τείνουν να απουσιάζουν σε μεγάλο μέρος δημοσιευμένων μελετών που χρησιμοποιούν μοντέλα, και ειδικά το στάδιο της εκτίμηση των ικανοτήτων με ποσοτικές τεχνικές και η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας του μοντέλου, όπως δείχνουν οι σχετικές ανασκοπήσεις των Arhonditsis and Brett (2004), Arhonditsis et al. (2006) και Stow et al. (2009). Η εφαρμογή του μοντέλου, σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα συλλογής δεδομένων πεδίου, χρησιμοποιείται ως μεθοδολογία διερεύνησης, κατανόησης και ποσοτικοποίησης φυσικών και οικολογικών διεργασιών πρωτογενούς παραγωγής και ευτροφισμού μέσω της αναπαραγωγής μιας παρελθούσας κατάστασης (hindcasting)

και συγκεκριμένα ενός ετήσιου κύκλου. Κύριο γνώρισμα και πλεονέκτημα αυτής της τοπικής εφαρμογής είναι η μεγάλη διακριτική ικανότητα.

Περιοχή εφαρμογής αυτής της μεθοδολογίας (case study) είναι ο παράκτιος χώρος ανοιχτά της πόλης της Μυτιλήνης, στη νήσο Λέσβο. Είναι μια περιοχή με ιδιαιτερότητες, καθώς πρόκειται για ρηχό σχετικά οικοσύστημα, που βρίσκεται στο Στενό Μυτιλήνης, δηλαδή σε δίαυλο του ευρύτερου αρχιπελαγικού συστήματος του ολιγότροφου Ανατολικού Αιγαίου, ενώ η γειτνίασή της με την κατοικημένη στεριά την καθιστά αποδέκτη χερσαίων απορροών τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών, όπως ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων λυμάτων.



## 1.2. Στόχοι

Σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας που θα μπορεί να εφαρμοστεί στο ευρύτερο πλαίσιο της διαχείρισης του παράκτιου χώρου ώστε, σε τοπικό επίπεδο, να δίνει απαντήσεις σε ερωτήματα όπως: ποιες είναι οι κύριες διεργασίες ενός παράκτιου οικοσυστήματος από πλευράς φυσικής κυκλοφορίας θαλασσιών μαζών και αλληλεπίδρασης μεταβλητών στα κατώτερα τροφικά επίπεδα (ανόργανα θρεπτικά άλατα – φυτοπλαγκτό – οργανική ύλη); Ποια είναι η δυναμική αυτών των διεργασιών και πώς ποσοτικοποιείται στη διάρκεια ενός ετήσιου κύκλου;

Μεγάλο μέρος της εργασίας αφιερώνεται στην ανάπτυξη ενός εργαλείου ικανού να ανταποκριθεί στη υψηλή διακριτική ικανότητα στο χώρο και το χρόνο που απαιτεί η έρευνα και διαχείριση του παράκτιου χώρου σε μικρή, τοπική χωρική κλίμακα: ενός μοντέλου οικοσυστήματος, προϊόν της σύζευξης ενός υδροδυναμικού μοντέλου φυσικής κυκλοφορίας τριών διαστάσεων, δοκιμασμένου και κατάλληλου για παράκτιες περιοχές (Princeton Ocean Model – POM), με ένα οικολογικό σκέλος που θα είναι σχετικά απλό (της οικογένειας μοντέλων τύπου Fasham, με λίγες μεταβλητές κατάστασης) αλλά ρεαλιστικό, και στοχευμένο στις υπό διερεύνηση διεργασίες αλλά και στις ιδιαιτερότητες της περιοχής (purpose-built), όχι όμως σε βάρος της δυνατότητάς του να εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιοχές (generic use). Μετά από διαδικασίες βαθμονόμησης (calibration) και επαλήθευσης/ποσοτικοποίησης σφαλμάτων (verification/error quantification), η εφαρμογή του μοντέλου, σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα συλλογής δεδομένων πεδίου, χρησιμοποιείται ως μέθοδος διερεύνησης, κατανόησης και ποσοτικοποίησης φυσικών και οικολογικών διεργασιών, κυρίως πρωτογενούς παραγωγής και ευτροφισμού (διακύμανση και κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, θρεπτικών, διαλυμένης οργανικής ύλης), σε παράκτιες περιοχές, μέσω της αναπαραγωγής μιας παρελθούσας κατάστασης και συγκεκριμένα ενός ετήσιου κύκλου. Περιοχή εφαρμογής αυτής της μεθοδολογίας είναι ο παράκτιος χώρος ανοιχτά της πόλης της Μυτιλήνης, στη νήσο Λέσβο.

Η χρήση ενός 3D μοντέλου ενδείκνυται λόγω των πλεονεκτημάτων και δυνατοτήτων που προσφέρει, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή και αναλύεται στα επόμενα, αλλά και λόγω της προοπτικής ανάπτυξης ενός εργαλείου που θα μπορεί να συνθέσει και να συνεργαστεί σε επιχειρησιακό επίπεδο με άλλα γνωστικά πεδία της θαλάσσιας έρευνας και διαχείρισης της παράκτιας ζώνης.

Συγκεκριμένα, οι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν ήταν:

- Η εφαρμογή τρισδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου με μεγάλη χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα, για την προσομοίωση της κυκλοφορίας των θαλάσσιων μαζών στην παράκτια περιοχή της πόλης της Μυτιλήνης, στο Στενό Μυτιλήνης.
- Η ανάπτυξη οικολογικού μοντέλου που προσομοιώνει βασικές διεργασίες οικοσυστήματος στα κατώτερα τροφικά επίπεδα.
- Η σύνδεση του μοντέλου φυσικής κυκλοφορίας και του οικολογικού μοντέλου και ανάπτυξη ενός συζευγμένου υδροδυναμικού - οικολογικού αριθμητικού ομοιώματος μεγάλης χωρικής και χρονικής διακριτικής ικανότητας.
- Η εφαρμογή του συζευγμένου μοντέλου στην παράκτια περιοχή μελέτης και η αξιολόγηση της ικανότητας του να αναπαράγει τις μετρήσεις πεδίου μέσα από εκτενή άσκηση ποσοτικοποίησης του σφάλματος προσομοίωσης.
- Η χρήση των αποτελεσμάτων του συζευγμένου μοντέλου, σε συνδυασμό με όλη την πληροφορία που προέκυψε από την μελέτη του οικοσυστήματος, για την κατανόηση και ποσοτική περιγραφή της αλληλεπίδρασης φυσικών διεργασιών - ανόργανων θρεπτικών – φυτοπλαγκτού – οργανικής ύλης σε χρονική κλίμακα ετήσιου κύκλου στην παράκτια ζώνη της Μυτιλήνης.

### 1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Το ΜΕΡΟΣ Α΄, ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ συνεχίζεται με το κεφάλαιο 2. Η παράγραφος 2.1 είναι αφιερωμένη στα υδροδυναμικά μοντέλα: περιγράφονται το θεωρητικό υπόβαθρο και οι διεργασίες που προσομοιώνουν, η χρησιμότητα, τα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματά τους. Παρουσιάζονται οι αρχές αριθμητικής προσομοίωσης και λειτουργίας των υδροδυναμικών μοντέλων ενώ γίνεται μια επιλεκτική ανασκόπηση μοντέλων διαφόρων τύπων με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης στη διεθνή βιβλιογραφία. Στην παράγραφο 2.2 γίνεται σύντομη ιστορική αναδρομή των οικολογικών μοντέλων στο θαλάσσιο χώρο, περιγράφονται διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης του θαλάσσιου οικοσυστήματος και παρουσιάζονται δημοσιεύσεις με σημαντικά ευρήματα που συνεισέφεραν στην εξέλιξη της αντίληψης γύρω από τα οικολογικά μοντέλα. Το ΜΕΡΟΣ Α΄, ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ κλείνει με την παράγραφο 2.3 η οποία εξετάζει τα συζευγμένα υδροδυναμικά – οικολογικά μοντέλα τριών διαστάσεων (ή τρισδιάστατα μοντέλα οικοσυστήματος). Περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται η σύνδεση φυσικών και βιογεωχημικών διεργασιών και γίνεται ιστορική αναδρομή και βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογών 3D μοντέλων με παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών τους.

Στο ΜΕΡΟΣ Β΄, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης (γενικά χαρακτηριστικά, μετεωρολογικά δεδομένα, ανασκόπηση προηγούμενων εργασιών) ενώ στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι εργασίες πεδίου (δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας, πλόες, μεταβλητές που μετρήθηκαν) και η αναλυτική εργαστηριακή μεθοδολογία. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης και εφαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης (υδροδυναμικό και οικολογικό σκέλος, διαδικασία σύζευξής τους, υπολογιστικό πεδίο, παράμετροι μοντέλου και βαθμονόμησή τους, συναρτήσεις φόρτισης, οριακές συνθήκες).

Στο ΜΕΡΟΣ Γ΄, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ παρουσιάζονται και αναλύονται οι μετρήσεις πεδίου (κεφάλαιο 6), γίνεται εκτίμηση της ικανότητας προσομοίωσης του μοντέλου μέσω διαγραμματικών τεχνικών και ποσοτικοποίησης του σφάλματος (κεφάλαιο 7), ενώ στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η προσομοιωμένη δυναμική της περιοχής μελέτης μέσα από τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Τέλος, στο ΜΕΡΟΣ Δ΄, ΣΥΝΘΕΣΗ συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα της εργασίας αναφορικά με το οικοσύστημα της περιοχής μελέτης (παράγραφος 9.1 κεφαλαίου 9)

και των δυνατοτήτων του εργαλείου προσομοίωσης (παράγραφος 9.2), ενώ προτείνονται βελτιώσεις και κατευθύνσεις προς τις οποίες μπορεί να εξελιχθεί η μεθοδολογία (παράγραφος 9.3). Την εργασία συμπληρώνουν παραρτήματα (αναλυτική περιγραφή υπορουτίνων του οικολογικού υπομοντέλου, παρουσίαση του συνόλου των σχημάτων όπου αποτυπώνονται οι μετρήσεων πεδίου, διαγράμματα επαλήθευσης προσομοιωμένων αποτελεσμάτων, κ.α.) καθώς και το ηλεκτρονικό παράρτημα όπου παρέχονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε αρχεία τύπου βίντεο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης θαλάσσιων διεργασιών

#### 2.1. Αριθμητική Προσομοίωση Φυσικών Διεργασιών στο Θαλάσσιο Περιβάλλον – Υδροδυναμικά μοντέλα

##### 2.1.1. Εισαγωγή

Η κατανόηση των υδροδυναμικών μηχανισμών των θαλάσσιων μαζών αποτελεί προϋπόθεση για το σύνολο των μελετών που σχετίζονται με το θαλάσσιο περιβάλλον (Nihoul 1999). Ωστόσο, η αναλυτική λύση των εξισώσεων της θαλάσσιας κίνησης είναι εξαιρετικά δύσκολη ή και αδύνατη για πραγματικές ροές στη θάλασσα. Αυτό συμβαίνει λόγω των μη-γραμμικών όρων της τυρβώδους ροής και της ανάγκης για ρεαλιστική αναπαράσταση του πυθμένα και της ακτογραμμής. Επιπρόσθετα, η εικόνα της δυναμικής της θάλασσας, όπως προκύπτει μόνο από μετρήσεις είναι ατελής και αποσπασματική: οι μετρήσεις πεδίου με πλοία είναι αραιές στο χώρο και το χρόνο, ενώ οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν μεγάλη χωρική κάλυψη και επαναληψιμότητα, αλλά σε μικρό αριθμό μεταβλητών και μόνο κοντά στην επιφάνεια (Stewart 2005). Το 'κενό' μπορούν να καλύψουν τα υδροδυναμικά αριθμητικά μοντέλα, τα οποία παρέχουν λεπτομερή και αρκετά ακριβή εικόνα για τη δυναμική ενός θαλάσσιου συστήματος. Έχουν ως βασικό στόχο να περιγράψουν τη χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή των ρευμάτων και φυσικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η πυκνότητα σε μια θαλάσσια περιοχή. Ενσωματώνοντας όλες τις σημαντικές διεργασίες και μηχανισμούς, προσομοιώνουν ρεαλιστικά τη θαλάσσια κίνηση, κάνουν παρεμβολή των μεταβλητών που προσδιορίζουν στο χώρο και το χρόνο και υπολογίζουν μελλοντικές κατανομές των μεταβλητών αυτών (πρόγνωση) (Kantha and Clayson 2000, Stewart 2005, Kämpf 2010).

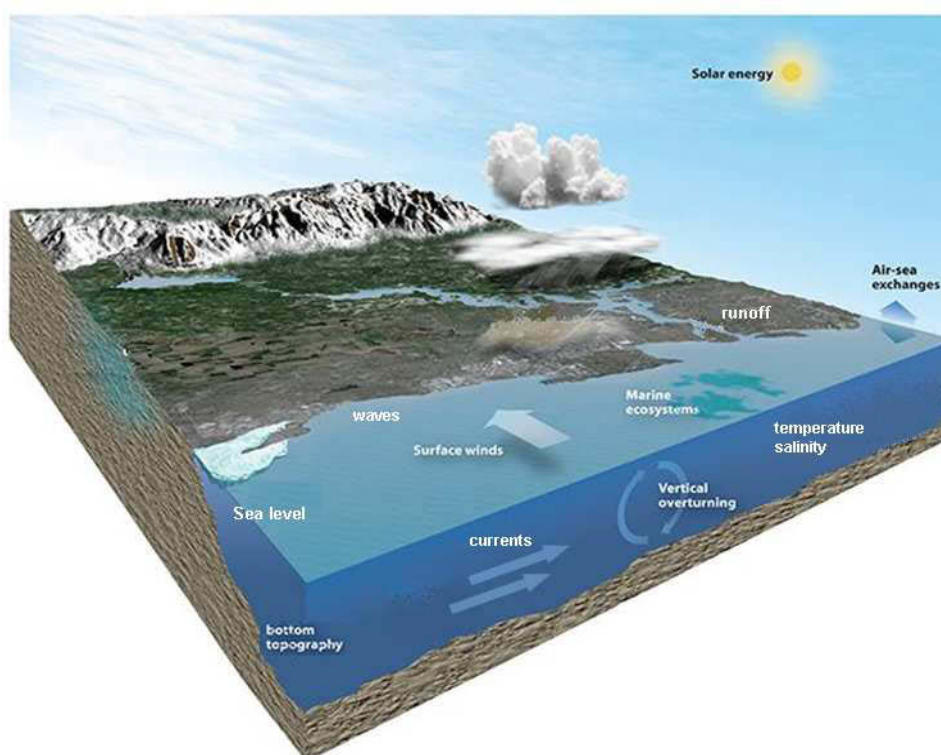
Φυσικά, όπως σε όλα τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην έρευνα, υπάρχουν μειονεκτήματα. Τα αριθμητικά υδροδυναμικά μοντέλα δεν μπορούν να δώσουν πλήρη και απόλυτη περιγραφή των πεδίων ροής της θάλασσας και αυτό οφείλεται σε μια σειρά από λόγους (π.χ. Kantha and Clayson 2000, Griffies et al. 2010) και οι οποίοι επιγραμματικά παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Είναι απλοποιήσεις των πολυσύνθετων μηχανισμών που προκαλούν την κυκλοφορία στη θάλασσα, και κάνουν παραδοχές (όπως η υδροστατική προσέγγιση ή η μέση κατά βάθος κυκλοφορία) για λόγους διευκόλυνσης.
- Ένα συνεχές μέσο, όπως η θάλασσα, 'μεταπίπτει' και αντιμετωπίζεται ως διακριτό μέσο, που αποτελείται από διακριτά σημεία (σημεία πλέγματος – grid points), ενώ ο χρόνος αποτελείται από μικρά βήματα χρόνου  $\Delta t$ . Στα σημεία αυτά πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί, από διακριτές εξισώσεις πλέον (discrete equations), η φύση των οποίων διαφέρει από τις 'αρχικές', συνεχείς εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δυναμική ενός συνεχούς μέσου. Για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου δεν είναι τίποτα γνωστό. Αυτή η διακριτοποίηση επιβάλλεται από τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- Εξαιτίας της διακριτοποίησης, είναι δύσκολο να υπολογιστούν οι τυρβώδεις ροές (turbulence) σε όλες τις χωρικές και χρονικές κλίμακες. Οι τυρβώδεις διεργασίες, η φύση των οποίων είναι ούτως ή άλλως αντικείμενο μελέτης και ποσοτικοποίησης, χρειάζεται να παραμετροποιηθούν στις κλίμακες που δεν επιλύονται από το μοντέλο (subgrid-scale parameterization).
- Είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να εξαλειφθούν όλων των ειδών τα λάθη που υπάρχουν στις χιλιάδες γραμμές κώδικα από τις οποίες αποτελείται συχνά ένα αριθμητικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια στους υπολογισμούς (στρογγυλοποιήσεις, αριθμός δεκαδικών ψηφίων) επηρεάζει σε μικρό ή μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.
- Η ατελής γνώση των συνθηκών που επικρατούν στα σημεία που τελειώνει το υπολογιστικό πεδίο του μοντέλου (ανοιχτά όρια) και των ανταλλαγών θερμότητας, νερού και ορμής με την ατμόσφαιρα οδηγεί πολλές φορές σε αποτελέσματα που απέχουν από την πραγματικότητα. Τα υδροδυναμικά μοντέλα έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε δεδομένα πεδίου για την εκκίνηση, εκτέλεση και επαλήθευσή τους.

### **2.1.2. Αρχές αριθμητικής προσομοίωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας και περιγραφή λειτουργίας υδροδυναμικών μοντέλων**

Βασική επιδίωξη των μοντέλων προσομοίωσης της θαλάσσιας δυναμικής είναι η ρεαλιστική περιγραφή και αναπαραγωγή των κατανομών στο χώρο και το χρόνο των πεδίων ταχυτήτων και άλλων φυσικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα (Kantha and Clayson 2000, Kämpf 2010). Οι εξισώσεις που

χρησιμοποιούνται (οι πρωτογενείς εξισώσεις – primitive equations), δανεισμένες από την ρευστομηχανική, είναι δοκιμασμένες και κοινά αποδεκτές (Nihoul, 1999). Οι μεταβλητές κατάστασης των μοντέλων αυτών είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας  $V$  στους τρεις άξονες, η θερμοκρασία  $T$ , η αλατότητα  $S$ , και σε ορισμένες περιπτώσεις η ανύψωση της ελεύθερης στάθμης  $\eta$ . Υπομοντέλα περιγραφής της τύρβης (π.χ. Mellor and Yamada 1982) χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση της κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης-διάχυσης και για τον υπολογισμό μεγεθών που σχετίζονται με την τυρβώδη ροή, όπως η τυρβώδης κινητική ενέργεια  $k$ , ο ρυθμός απόσβεσης (dissipation rate) αυτής  $\varepsilon$  ή η τυπική κλίμακα τύρβης  $\ell$  (turbulent mixing length). Ο τύπος των αριθμητικών σχημάτων που χρησιμοποιούνται, ο τρόπος διακριτοποίησης στην κατακόρυφο (z-επίπεδα, σίγμα-συντεταγμένες, ισόπυκνα), ο τρόπος υπολογισμού της τυρβώδους ανάμιξης - διάχυσης, η χρήση ή μη της υδροστατικής προσέγγισης είναι μερικές από τις διαφορές των βασικότερων μοντέλων αλλά και τομείς συνεχούς εξέλιξής τους (Ezer et al. 2002, Griffies et al. 2010).



**Σχήμα 2.1.** Σχηματική αναπαράσταση μερικών από τις διεργασίες και μεταβλητές που λαμβάνει υπόψη του ένα υδροδυναμικό μοντέλο για τον παράκτιο χώρο (University Corporation for Atmospheric Research, 2013, τροποποιημένο).

Οι διαφορικές εξισώσεις της κίνησης, της συνέχειας και της διατήρησης της θερμότητας και του άλατος γράφονται σε μορφή πεπερασμένων διαφορών συνήθως, για να λυθούν με αριθμητικές μεθόδους (Mathews 1992) σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού, συνηθέστερα σε FORTRAN (Kantha and Clayson 2000). Η επιλογή της περιοχής εφαρμογής του μοντέλου και η διακριτοποίησή του στο χώρο και το χρόνο αποτελούν κρίσιμο στάδιο στην ανάπτυξη μιας αριθμητικής προσομοίωσης (Hearn 2008). Η περιοχή χωρίζεται σε στοιχειώδη χωρικά βήματα  $dx$ ,  $dy$  - και  $dz$  αν το μοντέλο είναι τρισδιάστατο (χωρική διακριτοποίηση – ανάλυση). Δημιουργείται έτσι ένα πλέγμα (κάναβος), στο κάθε κελί του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις και ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών σε κάθε βήμα χρόνου  $dt$  (χρονική διακριτοποίηση). Απαραίτητος είναι ο υπολογισμός του βάθους σε κάθε σημείο του πλέγματος, δηλαδή η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης είναι ένα από τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου.

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων του μοντέλου αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα αρχικών και οριακών τιμών (Mathews 1992, Griebel et al. 1998). Επομένως, η επαρκής περιγραφή των αρχικών και κυρίως των οριακών συνθηκών αποτελεί ένα ακόμα βασικό στάδιο και είναι καθοριστικής σημασίας για μία επιτυχή αριθμητική προσομοίωση. Πρέπει να παρέχονται τιμές θερμοκρασίας, αλατότητας και ταχύτητας στα ανοιχτά όρια που γειτνιάζουν με τη θαλάσσια μάζα που είναι εκτός υπολογιστικού πεδίου, όπως επίσης τιμές θερμοκρασίας και αλατότητας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών, λαμβάνονται υπόψη οι μηχανισμοί διέγερσης του συστήματος (forcing functions): (α) στην διεπιφάνεια θάλασσας-ατμόσφαιρας πρέπει να καθοριστούν οι ροές θερμότητας, νερού (εξάτμιση μείον βροχόπτωση) και ορμής (τάση ανέμου), (β) στα κλειστά όρια θάλασσας-στεριάς όπου οι ανταλλαγές τίθενται ίσες με μηδέν (εκτός αν έχουμε παροχές, π.χ. από ποτάμια), (γ) στα ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου, όπου υπάρχει επίδραση της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής με την περιοχή ενδιαφέροντος. Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν το σύστημα όταν  $t=0$ . Οι αρχικές κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας μπορεί να είναι ομοιόμορφες στο εσωτερικό της θαλάσσιας μάζας ή τρισδιάστατες, που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα.

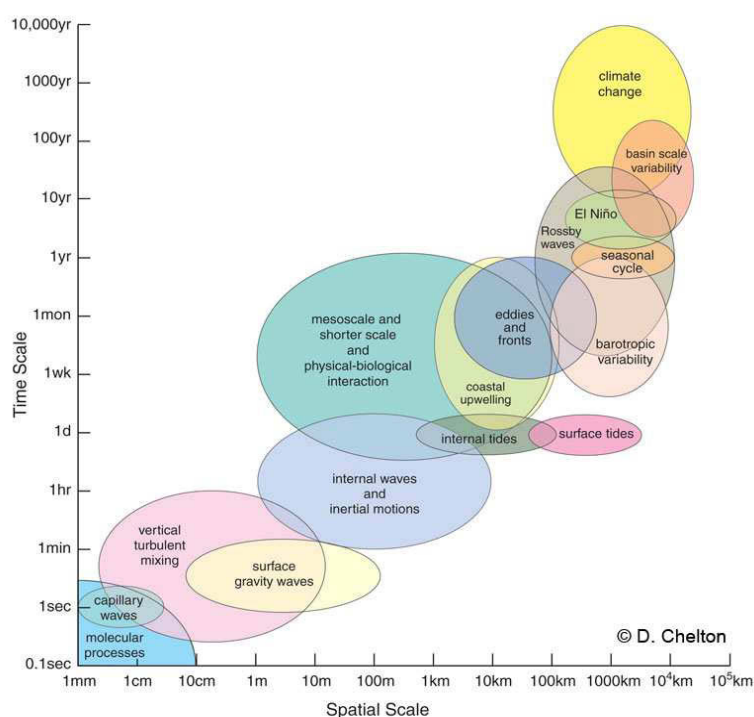
Το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων συμπληρώνεται (κλείνει) με τη χρήση πρόσθετων εξισώσεων που περιγράφουν την τυρβώδη φύση των κινήσεων του θαλασσινού νερού (αν και οι μηχανισμοί των τυρβωδών φαινομένων δεν είναι ακόμα



απόλυτα κατανοητοί). Στα πιο εκλεπτυσμένα μοντέλα χρησιμοποιείται συνήθως ένα υπομοντέλο τύρβης για τον υπολογισμό της τυρβώδους διάχυσης (π.χ Mellor and Yamada 1982). Ο υπολογισμός των τιμών των μεταβλητών σε κάθε βήμα χρόνου  $\Delta t$  (ο υπολογισμός δηλαδή των νέων πεδίων ταχυτήτων, θερμοκρασίας, αλατότητας κ.ο.κ) γίνεται με την ολοκλήρωση του συστήματος των εξισώσεων στο χρόνο ή αλλιώς, την εκτέλεση του μοντέλου.

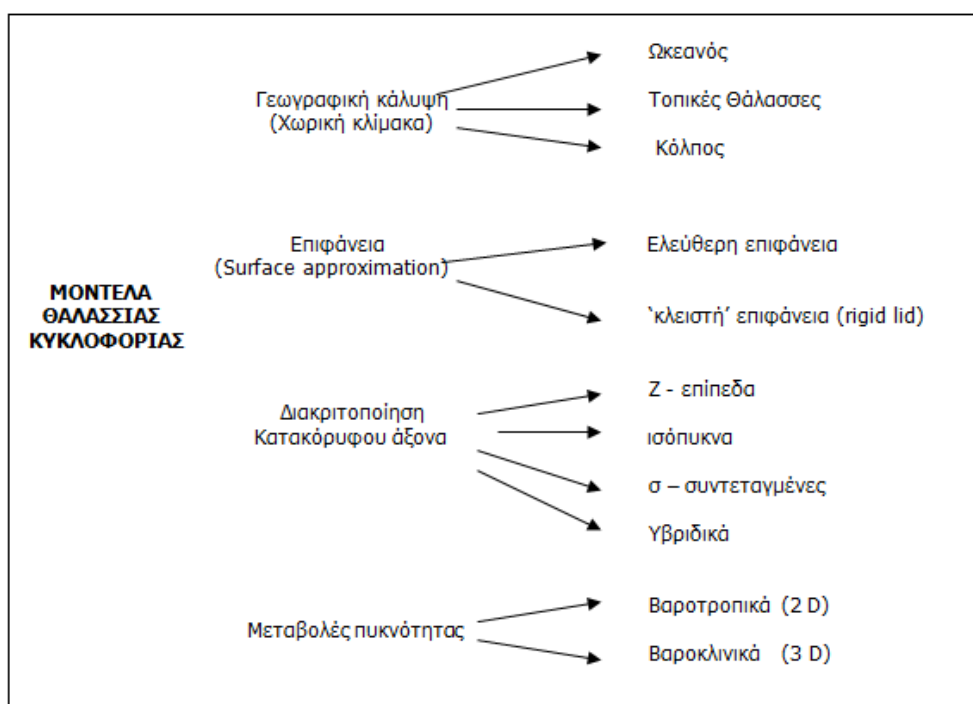
### 2.1.3. Κατηγορίες υδροδυναμικών μοντέλων

Η κυκλοφορία των υδάτινων μαζών στη θάλασσα είναι αποτέλεσμα πλήθους διεργασιών και φαινομένων, όπως οι επιφανειακές ανταλλαγές θερμότητας, νερού και ορμής (δράση ανέμου) με την ατμόσφαιρα, οι μεταβολές πυκνότητας που σχετίζονται με διαφορετικές μάζες νερού, η επίδραση αστρονομικών δυνάμεων (παλίρροιες) και φαινόμενα διατμητικών τάσεων (Pond and Pickard 1983, Knauss 1997). Αυτοί οι μηχανισμοί διέγερσης προκαλούν κινήσεις στους ωκεανούς και τις θάλασσες που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από χωρικές και χρονικές κλίμακες: από λίγα εκατοστά και μέτρα έως εκατοντάδες χιλιόμετρα και από δευτερόλεπτα - ώρες έως υπερδεκαετίες - εκατονταετίες (Σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.2.** Χωρικές και χρονικές κλίμακες φυσικών διεργασιών και φαινομένων στη θάλασσα (Oregon State University, 2013).

Στις σχεδόν τέσσερις δεκαετίες που χρησιμοποιούνται τα υδροδυναμικά μοντέλα για τη διερεύνηση της λειτουργίας των θαλασσών έχει γίνει κατανοητό ότι κανένα μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει και να αναπαράγει με ακρίβεια όλα τα φαινόμενα κυκλοφορίας σε όλες τις κλίμακες (James, 2002). Αυτό συμβαίνει τόσο λόγω περιορισμών που εξακολουθεί να επιβάλλει η διαθέσιμη ισχύς των υπολογιστικών συστημάτων μέχρι σήμερα, όσο και λόγω της ατελούς γνώσης και άρα περιγραφής ορισμένων φυσικών φαινομένων, όπως οι τυρβώδεις ροές. Έτσι, οι προσπάθειες μοντελοποίησης έχουν διαφοροποιηθεί: κάποια μοντέλα περιγράφουν καλύτερα την ωκεάνια θερμόαλη κυκλοφορία μεγάλης κλίμακας και τους μέσης κλίμακας σχηματισμούς (mesoscale eddies), άλλα εστιάζουν στο επιφανειακό αναμεμιγμένο στρώμα της θάλασσας, ενώ άλλα έχουν αναπτυχθεί πρωτίστως για παράκτιες εφαρμογές πάνω από την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα (Kantha and Clayson, 2000). Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μια ταξινόμηση των υδροδυναμικών μοντέλων σύμφωνα με τα κυριότερα κριτήρια που έχουν επικρατήσει στην ωκεανογραφία (Ocean Models, 2013).



**Σχήμα 2.3.** Κατηγοριοποίηση υδροδυναμικών μοντέλων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν (Ocean Models, 2013, τροποποιημένο).

Στη συνέχεια, χωρίς να επιχειρείται εξαντλητική ανασκόπηση, γίνεται μια επιλεκτική παρουσίαση υδροδυναμικών μοντέλων, αντιπροσωπευτικών των διαφόρων κατηγοριών, με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης στη διεθνή βιβλιογραφία. Στην διεύθυνση [http://stommel.tamu.edu/~baum/ocean\\_models.html](http://stommel.tamu.edu/~baum/ocean_models.html) (Ocean/Atmosphere Circulation Modeling Projects, Department of Oceanography, Texas A&M University) παρατίθεται λίστα με τους δικτυακούς τόπους περίπου 50 αριθμητικών μοντέλων. Εκεί μπορούν να βρεθούν πληροφορίες για κάθε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας, σχετική βιβλιογραφία, και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και ο κώδικας του μοντέλου και οδηγίες για την χρήση του. Επίσης, ολοκληρωμένες και σε βάθος προσεγγίσεις πάνω στην μοντελοποίηση θαλάσσιων διεργασιών δίνονται από τους Haidvogel and Beckmann (1999), Kantha and Clayson (2000), Dyke (2001), Hearn (2008) και Kämpf (2010).

Υπάρχουν μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (ocean general circulation models, OGCM) που σχεδιάστηκαν να προσομοιώνουν τη δυναμική του παγκόσμιου ωκεανού και διεργασίες σε επιμέρους ωκεάνιες λεκάνες, με πρώτο και πιο δημοφιλές μοντέλο αυτό του Bryan (1969). Οι Bryan and Cox (1972) θεώρησαν σταθερή την πυκνότητα και μελέτησαν φαινόμενα μεταφοράς στον παγκόσμιο ωκεανό με ένα βαροτροπικό, δισδιάστατο ομοίωμα. Έκτοτε, τα μοντέλα των Bryan and Cox αποτέλεσαν τη βάση και εξελίχθηκαν σε πλήθος και ποικιλία μοντέλων. Ένα από τα πλέον δημοφιλή μοντέλα που προέκυψαν από αυτά των Bryan and Cox είναι το MOM (Modular Ocean Model) που αναπτύχθηκε και εξελίσσεται από ερευνητές στο Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) στις Η.Π.Α. Το μοντέλο OCCAM που αναπτύχθηκε στο Southampton Oceanography Center (Ηνωμένο Βασίλειο) και στηρίζεται στο MOM είναι ένα τρισδιάστατο ομοίωμα πρωτογενών εξισώσεων που εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πρόγραμμα έρευνας της κυκλοφορίας του Παγκόσμιου ωκεανού. Εφαρμόζεται σε μελέτες παγκόσμιας κυκλοφορίας και κλιματικών αλλαγών (Webb et al. 1998), ενώ έχει μελετηθεί και η δυναμική επιμέρους ωκεάνιων μαζών, όπως ο Ειρηνικός (Saunders et al. 1999).

Οι Nihoul and Jamart (1987) και Lynch and Davies (1995) παρουσίασαν μια σειρά από τρισδιάστατα μοντέλα, κατάλληλα για περιφερειακές θάλασσες, ημικλειστές θάλασσες, κόλπους και παράκτιες περιοχές. Σε αυτά περιλαμβάνονται το γνωστό Princeton Ocean Model (POM) των Blumberg-Mellor (1987) και το μοντέλο του Backhaus (1985). Οι διεργασίες που πρέπει να είναι ικανά να περιγράψουν τα

ομοιώματα αυτά - επίδραση εκβολών ποταμών και οριζόντιες βαθμίδες πυκνότητας, δημιουργία - υποχώρηση θερμοκλινούς, παλίρροιες, τυρβώδεις διεργασίες από πυθμένα και από επιφάνεια (διατμητικές τάσεις ανέμου), αναδύσεις νερού και κινήσεις Ekman, δημιουργία βαθιών νερών, κύματα καταιγίδας, μεταφορά ρυπαντών - καλύπτουν χωρικές κλίμακες από δεκάδες μέτρα μέχρι 100km και χρονικές κλίμακες από ώρες μέχρι μήνες (Σχήματα 2.2 και 2.4). Η δυναμική της Βόρειας Θάλασσας, και γενικότερα η υφαλοκρηπίδα της βορειοδυτικής Ευρώπης, έχει μελετηθεί συστηματικά από πλήθος ερευνητών και μοντέλων (π.χ. Backhaus 1985, Oey and Chen 1992, Lenhart et al. 1995, Pohlman 1996a, b, c, Hjøllø et al. 2009). Η Μεσόγειος επίσης αποτελεί πεδίο έρευνας μέσω εφαρμογής μιας σειράς αριθμητικών προσομοιώσεων, τόσο ολόκληρη η λεκάνη όσο και τμήματά της. Ο Beckers (1991) χρησιμοποίησε ένα τρισδιάστατο ομοίωμα με πλέγμα 15km για να μελετήσει την εποχικότητα στη Δυτική Μεσόγειο. Οι Zavatarelli and Mellor (1995) εφάρμοσαν το μοντέλο POM σε ολόκληρη τη Μεσόγειο με μεταβλητό μέγεθος κελιών (curvilinear grid) ενώ το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και από τους Drakopoulos and Lascaratos (1999) και Lascaratos and Nittis (1998) που διερεύνησαν τη δημιουργία του λεγόμενου ενδιάμεσου νερού στη θάλασσα της Λεβαντίνης στην Ανατολική Μεσόγειο και Skliris et al. (2007) που μελέτησαν την αντίδραση της Μεσογείου και των επιμέρους λεκανών της στις μεταβολές του ισοζυγίου γλυκού νερού που έχουν καταμετρηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Το μοντέλο MOM εφαρμόστηκε από αρκετούς ερευνητές, οι οποίοι διερεύνησαν τη γενική κυκλοφορία σε ολόκληρη τη λεκάνη (Roussenon et al. 1995), την επίδραση της τοπογραφίας (Alvarez et al. 1994) και τους μηχανισμούς λειτουργίας ενδιάμεσων και βαθιών νερών (Haines and Wu 1998). Το πρόγραμμα MEDMEX (Mediterranean Model Evaluation Experiment), στο οποίο συμμετείχαν ερευνητικά ινστιτούτα και πανεπιστήμια από αρκετές ευρωπαϊκές χώρες, είχε ως στόχο τη σύγκριση της λειτουργίας και των αποτελεσμάτων μιας σειράς μοντέλων και την περαιτέρω βελτίωσή τους (Beckers et al. 2002). Στο πείραμα αυτό, τα μοντέλα GHER, POM, OPA και δυο εκδόσεις του MOM εφαρμόστηκαν στη Μεσόγειο σε κοινή βάση (ίδια χωρική ανάλυση και οδηγούμενα από τα ίδια ατμοσφαιρικά δεδομένα). Κανένα μοντέλο δεν έδειξε να λειτουργεί 'καλύτερα' από τα άλλα: ορισμένα περιγράφουν πιστότερα τη μεταβλητότητα, άλλα περιγράφουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά των βαθιών νερών κ.ο.κ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, αναπαράγουν ικανοποιητικά τη γενική κυκλοφορία της Μεσογείου, δίνοντας σε γενικές γραμμές παρόμοια αποτελέσματα όταν βαθμονομηθούν κατάλληλα οι πλέον ευαίσθητες παράμετροι, οι συντελεστές

κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης. Πιο πρόσφατες αριθμητικές προσομοιώσεις σε επιμέρους θαλάσσιες περιοχές της Μεσογείου περιλαμβάνουν τη διερεύνηση της κυκλοφορίας στη βορειοδυτική υφαλοκρηπίδα της Μεσογείου από τους Garreau et al. (2011), τη διερεύνηση της επίδρασης της τοπογραφίας στην ανεμογενή κυκλοφορία στη βόρεια Αδριατική από τους Malačič et al. (2012), ενώ, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, η υδροδυναμική πολλών περιοχών μέσης και μικρής κλίμακας έχει μελετηθεί σε συνάρτηση με την οικολογία και τη γεωχημεία.

Ένα άλλο κριτήριο διαφοροποίησης των μοντέλων είναι ο τρόπος που προσεγγίζουν την επιφάνεια του ωκεανού (Σχήμα 2.3). Στην πραγματικότητα, η επιφάνεια της θάλασσας δεν είναι επίπεδη και ομαλή αλλά μετατοπίζεται (παραμορφώνεται) κάτω από την επίδραση του ανέμου, των βαρομετρικών συστημάτων, των παλιρροιακών δυνάμεων και την ίδια της κίνησης του νερού (Csanady 1982, Pond and Pickard 1983). Τα επιφανειακά ανεμογενή κύματα, για παράδειγμα, υψώνονται ως και μερικά μέτρα πάνω από τη μέση στάθμη, έχουν μικρό χρόνο ζωής και μεγάλες ταχύτητες διάδοσης (Komar 1998). Σε ορισμένα μοντέλα (π.χ. Bryan 1969, MOM, HOPS) και κυρίως σε προσομοιώσεις κλιματικών ερευνών που προσομοιώνονται μεγάλες περίοδοι, δεν λαμβάνονται υπόψη οι μετατοπίσεις της επιφάνειας, η οποία θεωρείται σταθερή (προσέγγιση rigid lid). Αποφεύγονται έτσι οι ισχυροί περιορισμοί που επιβάλλει στο βήμα χρόνου ο συνυπολογισμός των ταχέως κινουμένων κυμάτων βαρύτητας (απαιτείται μικρό βήμα χρόνου), χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η προσομοίωση της κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας. Σε άλλα μοντέλα χρησιμοποιούνται τεχνικές αριθμητικής επίλυσης (διαδοχικά βήματα – mode splitting techniques) που επιτρέπουν στην θαλάσσια επιφάνεια να μετατοπίζεται ελεύθερα και να υπολογίζεται προγνωστικά.

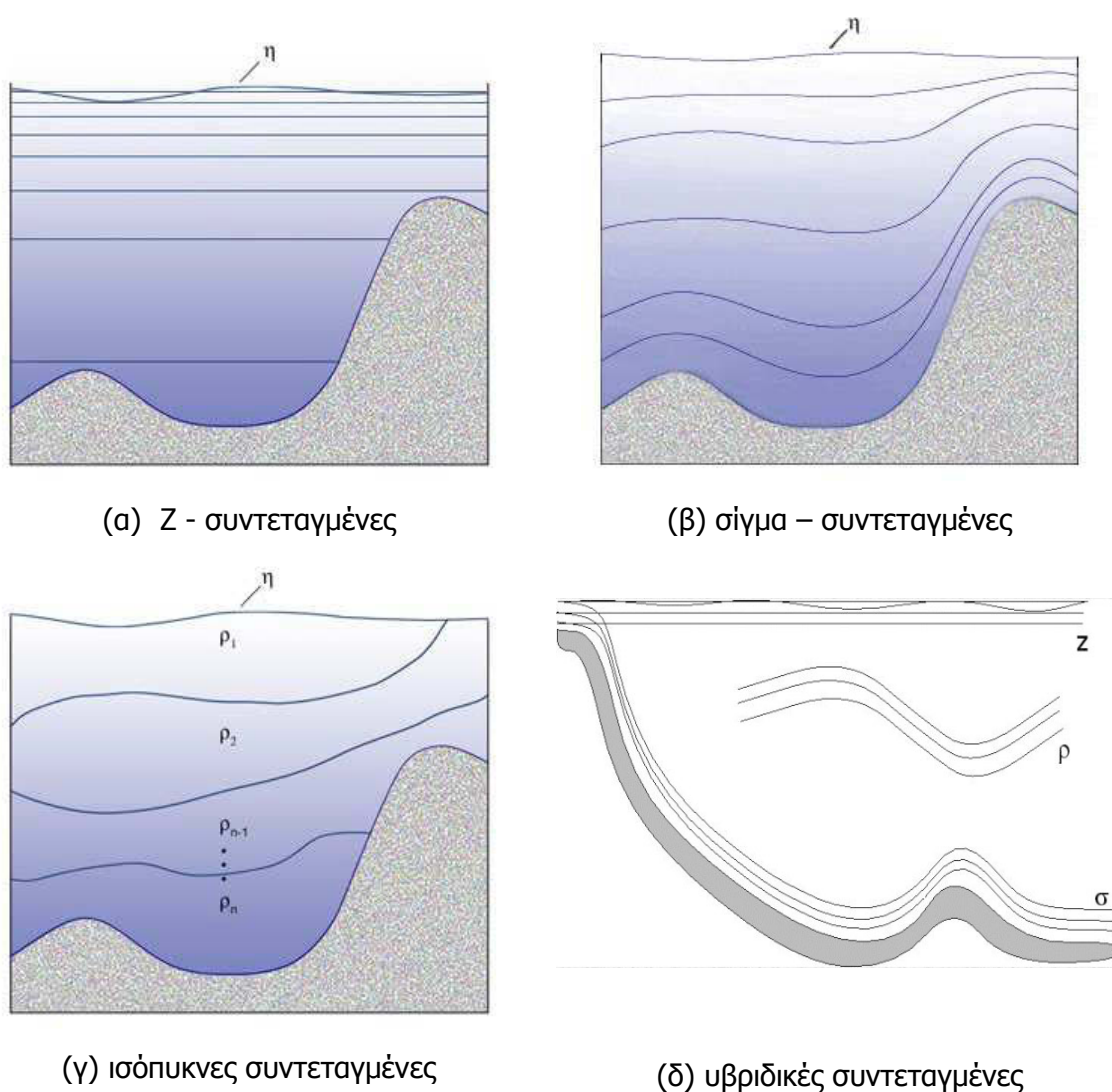
Ο τρόπος διακριτοποίησης της κατακόρυφης διάστασης (του βάθους) διαφοροποιεί τα μοντέλα σε τέσσερις κατηγορίες (Σχήμα 2.3). Τα μοντέλα των Bryan-Cox, το MOM και γενικά τα ομοιώματα που φιλοδοξούν να περιγράψουν με ακρίβεια τις διεργασίες στο επιφανειακό στρώμα του ωκεανού χρησιμοποιούν το σύστημα των 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 2.4a). 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 2.4β). 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 1998). Παραδείγματα μοντέλων που χρησιμοποιούν το σύστημα των ισόπυκνων συντεταγμένων (isopycnic ή isopycnal models) είναι τα μοντέλα MICOM και OCCAM. Οι ισόπυκνες συντεταγμένες (Σχήμα 2.4γ), 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).

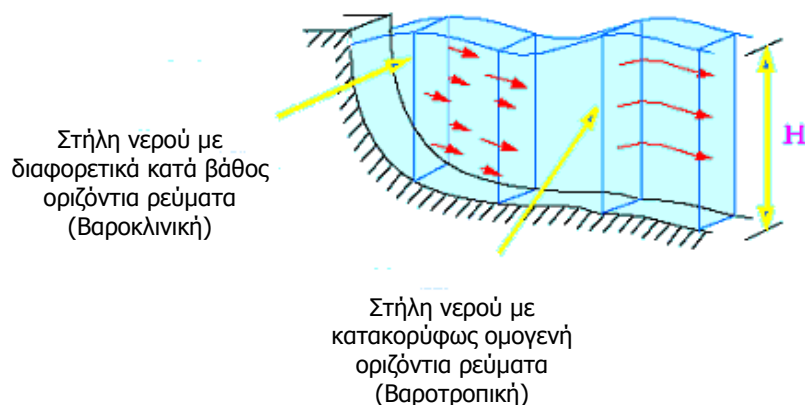
Τα τελευταία χρόνια διαφαίνεται μια τάση ενοποίησης των τριών αυτών συστημάτων κατακόρυφης διακριτοποίησης και δημιουργίας μιας νέας γενιάς υδροδυναμικών μοντέλων με υβριδικό σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι ισόπυκνο στις ανοιχτές, βαθιές ωκεάνιες περιοχές, ενώ το σύστημα συντεταγμένων μετασχηματίζεται ομαλά σε σίγμα πάνω από ρηχές, παράκτιες ζώνες και σε ζήτα συντεταγμένες στο επιφανειακό, αναμεμιγμένο στρώμα της θάλασσας (Σχήμα 2.4δ). 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 2.5). 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.



**Σχήμα 2.4.** Απεικόνιση των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή – διακριτοποίηση του κατακόρυφου άξονα (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).

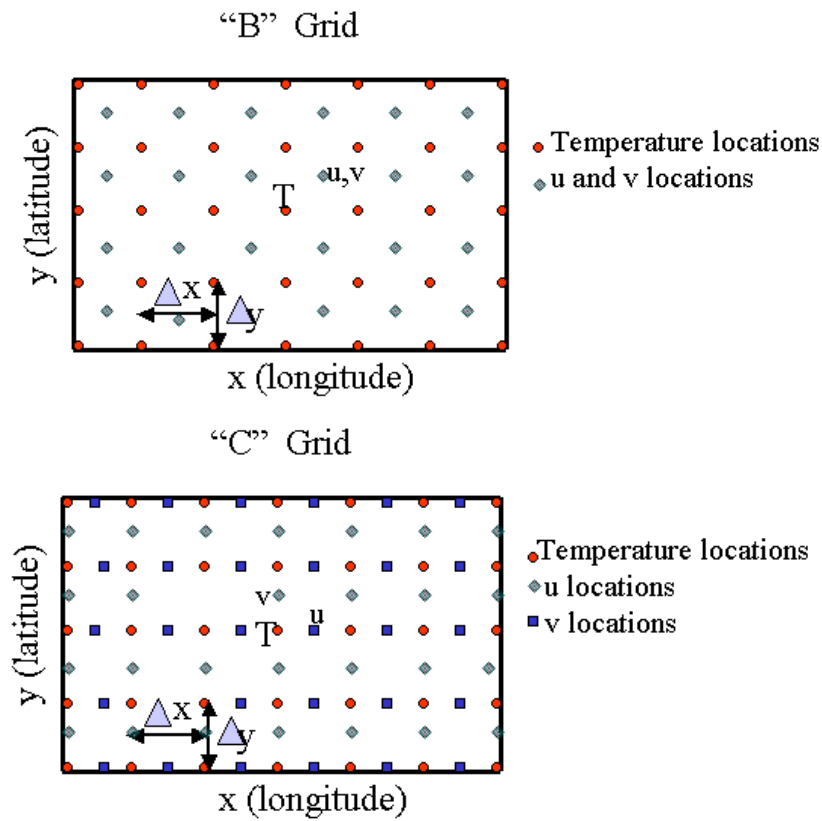


**Σχήμα 2.5.** Σχηματική παράσταση βαροκλινικού και βαροτροπικού μοντέλου (Ocean Models, 2013, τροποποιημένο). Ορισμοί για βαροτροπικό/βαροκλινικό υγρό μπορούν να βρεθούν στους Pond and Pickard (1983).

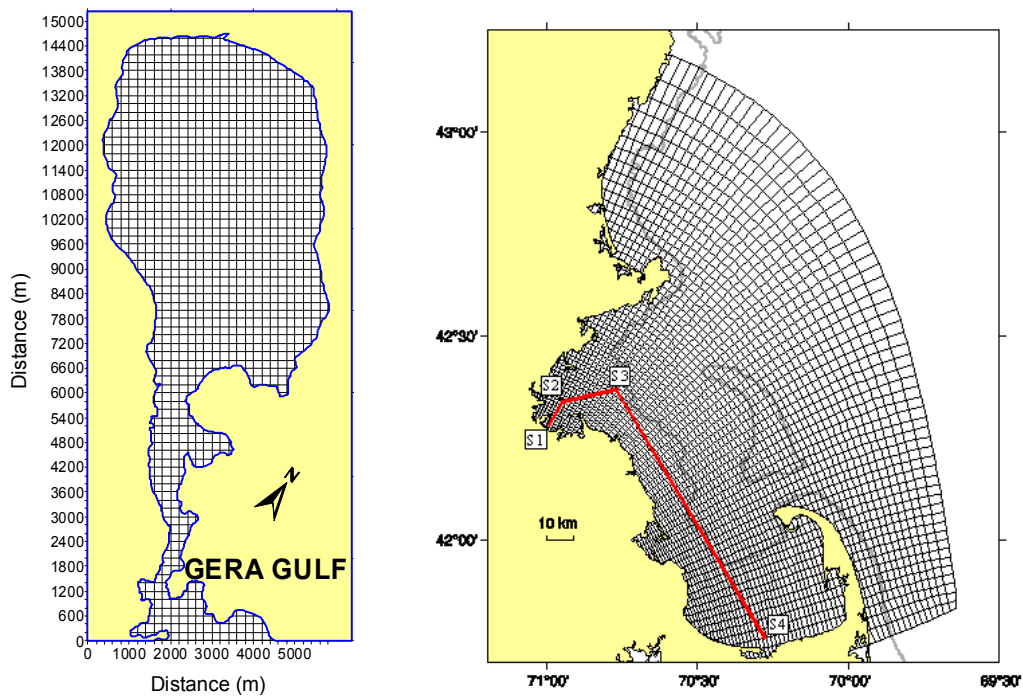
Τέλος, τα μοντέλα διαφοροποιούνται ανάλογα με το πλέγμα και τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για την επίλυση των εξισώσεων. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι πεπερασμένες διαφορές (finite differences) σε αριθμητικό σχήμα διάφορων μορφών στην οριζόντια διάσταση (π.χ. Aracawa B, C – Σχήμα 2.6). Το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιείται για την οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου μπορεί να είναι είτε ορθογώνιο (rectilinear–orthogonal) είτε καμπυλόγραμμο (curvilinear) (Σχήμα 2.7). 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 2.6.** Πεπερασμένες διαφορές: οριζόντιο πλέγμα τύπου B και C (Numerical Ocean Modeling Concepts, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>).



**Σχήμα 2.7.** Παραδείγματα οριζόντιας διακριτοποίησης (πλέγματος): αριστερά, ορθογώνιο πλέγμα (Kolonoyiannis and Tsirtsis 2005) και δεξιά, καμπυλόγραμμο πλέγμα (Signell et al. 2000).

## **2.2. Αριθμητική Προσομοίωση Οικολογικών Διεργασιών στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.**

### **2.2.1. Εισαγωγή - έννοιες μοντελοποίησης οικολογικών διεργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον**

Στην παράγραφο 2.2 που ακολουθεί, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση εννοιών της μοντελοποίησης της θαλάσσιας οικολογίας και βιογεωχημείας. Μέσα από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, περιγράφονται οι κυριότερες τάσεις και προσεγγίσεις στην αριθμητική προσομοίωση οικολογικών διεργασιών *στα κατώτερα τροφικά επίπεδα της στήλης του νερού*. Παρουσιάζονται συγκεκριμένες εφαρμογές με σημαντικά αποτελέσματα που βοήθησαν στην εξέλιξη των οικολογικών μοντέλων μέχρι την κατασκευή των σύγχρονων τρισδιάστατων μοντέλων οικοσυστήματος. Αυτά τα τελευταία περιγράφονται στην παράγραφο 2.3. Διευκρινίζεται ότι δεν επιχειρείται εξαντλητική ανασκόπηση, καθώς υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία πολύ μεγάλος αριθμός οικολογικών μοντέλων, που αντιμετωπίζουν διάφορες πτυχές του θαλάσσιου οικοσυστήματος σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Όπου κρίνεται σκόπιμο, γίνεται παραπομπή σε ανασκοπήσεις ερευνητών που εστιάζουν σε συγκεκριμένα ζητήματα. Για λόγους πληρότητας, το περιεχόμενο της ορολογίας που χρησιμοποιείται, όπως μεταβλητή κατάσταση, παραμετροποίηση – παράμετρος, μηχανισμοί διέγερσης, κ.α. διευκρινίζεται στο Παράρτημα 1.

Ήδη στο Σχήμα 1.2 παρουσιάστηκε μια γενική ταξινόμηση των μοντέλων. Υπάρχει μια μεγάλη συλλογή από θεωρίες και προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση διεργασιών στο θαλάσσιο οικοσύστημα, και στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται αρκετές κατηγοριοποιήσεις των τύπων μοντέλων που αναπτύσσονται (π.χ. Dippner 2006, Fulton 2010). Ανάπτυξη της φιλοσοφίας και των διαδικασιών μοντελοποίησης μπορεί να βρεθεί στους Franks (2002), James (2002), Fennel and Neumann (2004) και Anderson (2010).

Γενικά, τα οικολογικά μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο προσέγγισης του οικοσυστήματος, τον σκοπό για τον οποίον αναπτύσσονται, τον τύπο του οικοσυστήματος που καλούνται να διερευνήσουν, την πολυπλοκότητά τους, δηλαδή το βαθμό ρεαλισμού που φιλοδοξούν να ενσωματώσουν, και η οποία είναι συνάρτηση της λεγόμενης τροφικής διακριτικής ικανότητας (trophic resolution) και της διακριτικής ικανότητάς τους στο χώρο και το χρόνο. Ακόμα, μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με τους μηχανισμούς διέγερσης (driving forces ή forcing

functions) που χρησιμοποιούν, τις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και το είδος των εξισώσεων, το επίπεδο εφαρμογής βημάτων 'καλής πρακτικής' κατά την ανάπτυξη και χρήση του μοντέλου, όπως η βαθμονόμηση (calibration), η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) και η επαλήθευση (verification, validation). Όλα τα παραπάνω, που καθορίζουν τη μορφή, το είδος και την ποιότητα ενός μοντέλου ή μιας εφαρμογής, εξαρτώνται από τα ερευνητικά ερωτήματα που τίθενται, τη διαθέσιμη γνώση για τη δομή του οικοσυστήματος ενδιαφέροντος, καθώς και τους διαθέσιμους πόρους (π.χ. τα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου και τις υλικές υποδομές).

Η ανασκόπηση αυτή εστιάζει στα αριθμητικά οικολογικά μοντέλα βιογεωχημικών διεργασιών της θαλάσσιας υδάτινης στήλης (mechanistic marine biogeochemical models – Arhondistis and Brett 2004): ένα σύστημα λίγων ή αρκετών διαφορετικών εξισώσεων που περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο συμπεριφορές και διεργασίες τμημάτων (compartments) ενός οικοσυστήματος. Για το λόγο αυτό, στη βιβλιογραφία ομαδοποιούνται και κάτω από τον τίτλο compartment models (π.χ. Dippner 2006). Οι διαφορετικές εξισώσεις είναι συνήθεις, εκφρασμένες με μορφή εξισώσεων διατήρησης (Σχήμα 2.8 δεξιά), ενώ όταν λαμβάνονται υπόψη διεργασίες φυσικής κυκλοφορίας, οι εξισώσεις είναι μερικές διαφορικές, περιλαμβάνοντας διεργασίες μεταφοράς – τυρβώδους διάχυσης, οι λεγόμενες εξισώσεις ADR (Advection – Diffusion – Reaction).

Η φιλοσοφία πίσω από αυτήν την προσέγγιση μοντελοποίησης φυσικών οικοσυστημάτων βασίζεται στη χρήση μιας συγκεκριμένης 'αφαίρεσης', ώστε να απλοποιηθούν και να μελετηθούν ευκολότερα οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων ενός τροφικού πλέγματος, δηλαδή οι αλληλεπιδράσεις ζωντανών οργανισμών μεταξύ τους και με την οργανική και ανόργανη ύλη, διαλυτή και σωματιδιακή. Η 'αφαίρεση' αυτή λέγεται τροφικές κατηγορίες (trophic categories) ή λειτουργικές ομάδες (functional groups) (Dippner, 2006): σε γενικές γραμμές, γίνεται ομαδοποίηση – συν-άθροιση μεγάλου αριθμού οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών ('φυτοπλαγκτονική βιομάζα', 'ζωοπλαγκτό') ή ενός ευρέος φάσματος ουσιών (π.χ. 'ανόργανα θρεπτικά', 'διαλυμένη οργανική ύλη') σε οντότητες που θεωρούνται ενιαίες (compartments) με βάση τις ανάγκες για την απαραίτητη ενέργεια, π.χ. οι φωτοαυτότροφοι οργανισμοί χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία ως πηγή ενέργειας για φωτοσύνθεση, οι ετερότροφοι οργανισμοί στηρίζουν τη θρέψη τους στους αυτότροφους ή άλλους ετερότροφους οργανισμούς και τη σωματιδιακή ύλη, ενώ η ανόργανη ύλη, διαλυμένη και σωματιδιακή, δεν χρειάζεται καθόλου ενέργεια. Μια τέτοια οντότητα (ή διαμέρισμα – compartment) μπορεί να αποτελεί

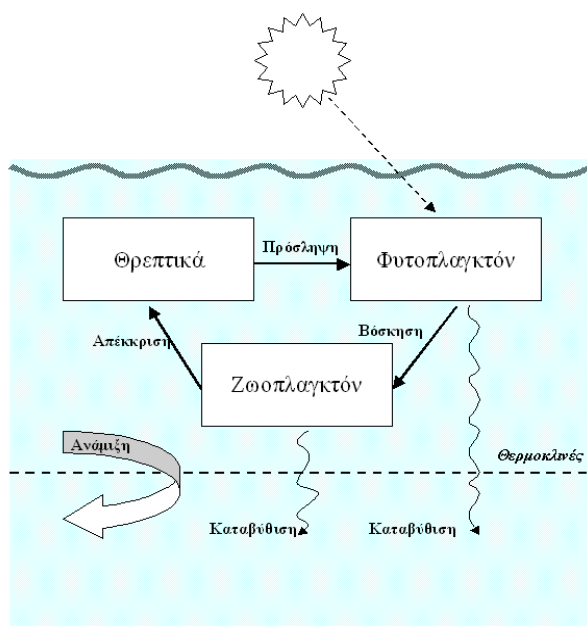
μόνη της μια μεταβλητή κατάσταση που αλληλεπιδρά με άλλες μεταβλητές κατάσταση, ή να διαχωρίζεται σε περισσότερες μεταβλητές κατάσταση, π.χ. θρεπτικά: νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά, φυτοπλαγκτό: διάτομα και μαστιγωτά, ζωοπλαγκτό: μικρο- και μεσο-ζωοπλαγκτό. Η εισαγωγή της έννοιας της τροφικής κατηγορίας ή λειτουργικής ομάδας αποδείχτηκε εξαιρετικά επιτυχής και χρησιμοποιείται ευρύτατα στη μοντελοποίηση της δυναμικής θαλάσσιων οικολογικών διεργασιών.

### **2.2.2. Εξέλιξη της μοντελοποίησης οικολογικών διεργασιών του θαλάσσιου περιβάλλοντος**

Από τις εργασίες πρωτοπόρων, όπως οι Riley (1946, 1947) και Steele (1962, 1974) και έκτοτε, η μοντελοποίηση οικολογικών διεργασιών στο θαλάσσιο περιβάλλον παραμένει μια δυναμική και ακμάζουσα περιοχή έρευνας στις θαλάσσιες επιστήμες, με τα μοντέλα να παρέχουν σημαντικά εργαλεία κατανόησης, σύνθεσης και πρόγνωσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Franks 2002, Arhonditsis et al. 2006, Blackford et al. 2010). Τα πρώτα μοντέλα του θαλάσσιου οικοσυστήματος, αναγκαστικά, ήταν απλά, καθώς το επιστημονικό πεδίο βρισκόταν στα πρώτα στάδια εξέλιξης και εξαιτίας των περιορισμών που επέβαλαν η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς και οι ελλιπείς γνώσεις πάνω σε θεμελιώδη ζητήματα θαλάσσιας οικολογίας (Anderson 2005). Οι πρώτες εξισώσεις για τη δυναμική του πλαγκτού μορφοποιήθηκαν από τον Riley (1946, 1947) όταν παρουσίασε δύο μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (0-D) για τη δυναμική του φυτοπλαγκτού και του ζωοπλαγκτού αντίστοιχα στην περιοχή Georges Bank (Κόλπος Maine, ΒΔ Ατλαντικός). Το μοντέλο υπέθετε ότι η περιοχή είναι ομογενής χωρικά, οι μεταβλητές κατάστασης μεταβάλλονταν μόνο ως προς το χρόνο και ήταν απλές στη σύλληψή τους (π.χ. δεν γινόταν διαχωρισμός σε είδη, μεγέθη ή στάδια ανάπτυξης), ενώ τα αποτελέσματα ήταν μέσες χωρικές κατανομές των προσομοιωμένων μεταβλητών. Παρόλα αυτά, άρχισε να διαφαίνεται ότι, ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν δυναμικές διεργασίες και μηχανισμούς ενός οικοσυστήματος, με τις όποιες ατέλειες, μπορεί να περιγράψει και να εξηγήσει πιστότερα τις μετρήσεις πεδίου και την μεταβλητότητά τους από μια απλή στατιστική ανάλυση (Radach and Moll 2001).

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα 'θρεπτικά – φυτοπλαγκτόν – ζωοπλαγκτόν', που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8, το λεγόμενο μοντέλο NPZ (Nutrient-

Phytoplankton-Zooplankton) για την επιφάνεια της θάλασσας (π.χ. Steele 1974), του οποίου η δομή, οι αρχές, βασικές διεργασίες και εξισώσεις, η σύνδεση με τη φυσική κυκλοφορία και η χρησιμότητά τους αναλύονται διεξοδικά από τον Franks (2002).



### Ρυθμός μεταβολής συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού

$$\frac{dP}{dt} = + \text{ανάπτυξη} - \text{θνησιμότητα}$$

(βόσκησις)

- απεκκρίσεις
- καταβύθιση

### Ρυθμός μεταβολής συγκέντρωσης ζωοπλαγκτού

$$\frac{dZ}{dt} = + \text{ανάπτυξη (λόγω κατανάλωσης}$$

φυτοπλαγκτού)

- θνησιμότητα (ανώτεροι θηρευτές)
- απεκκρίσεις

### Ρυθμός μεταβολής συγκέντρωσης θρεπτικών

$$\frac{dN}{dt} = - \text{ανάπτυξη φυτοπλαγκτού}$$

- + απεκκρίσεις
- + ανάμιξη

**Σχήμα 2.8.** Σχηματικό παράδειγμα (conceptual model) ενός απλού μοντέλου NPZ (Nutrient – Phytoplankton – Zooplankton) επιφανειακής στρώσης νερού και οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις διατήρησης μάζας, μία για κάθε μεταβλητή κατάσταση, που περιλαμβάνουν τις διεργασίες που θεωρούνται σημαντικές.

Το σύστημα των εξισώσεων του Σχήματος 2.8 μπορεί να γραφτεί σε μια γενική μορφή ως εξής:

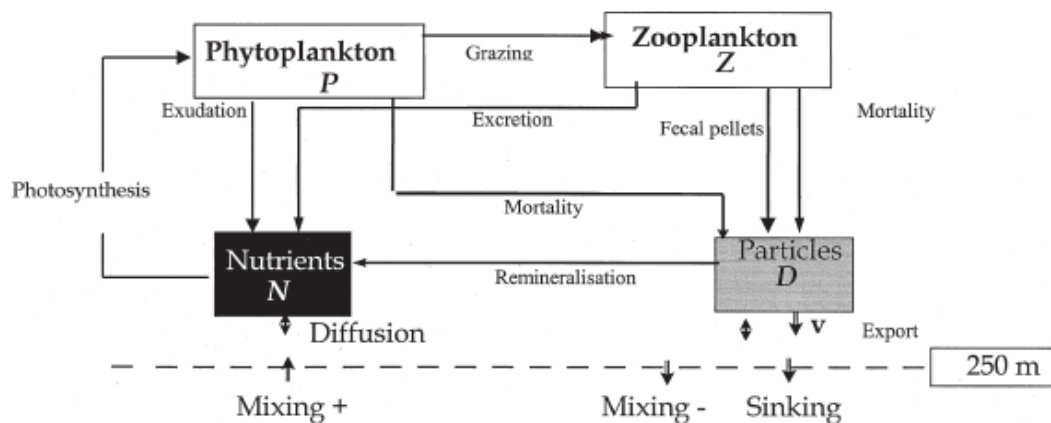
$$\frac{dP}{dt} = f(N) \varphi(I) \theta(T)P - g(P)Z - emp(P)P - s(P)P$$

$$\frac{dZ}{dt} = \gamma g(P)Z - empz(Z)Z \quad (2.3)$$

$$\frac{dN}{dt} = -f(N) \varphi(I) \theta(T)P + (1-\gamma)g(P)Z + emp(P)P + empz(Z)Z + eNo$$

Οι διεργασίες που μοντελοποιούνται στο παράδειγμα αυτό είναι: η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού ως συνάρτηση των περιοριστικών παραγόντων θρεπτικά  $f(N)$ , ακτινοβολία  $\varphi(I)$  και της επίδρασης της θερμοκρασίας  $\theta(T)$ , η βόσκηση του φυτοπλαγκτού από το ζωοπλαγκτόν  $g(P)$ , η απώλεια βιομάζας για το φυτοπλαγκτό  $emp(P)$  και το ζωοπλαγκτό  $empz(Z)$  λόγω απεκκρίσεων, θνησιμότητας και θήρευσης από οργανισμούς που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο και αντιμετωπίζονται ως εισροές στα θρεπτικά. Επίσης περιλαμβάνεται η καταβύθιση του φυτοπλαγκτού  $s(P)$  και η εισροή θρεπτικών από τα βαθύτερα στρώματα λόγω ανάμιξης  $eNo$ . Η παράμετρος  $\gamma$  παριστάνει (παραμετροποιεί) την ικανότητα αφομοίωσης της τροφής από το ζωοπλαγκτό. Η επιλογή της μαθηματικής έκφρασης των οικολογικών διεργασιών (transfer functions), που περιγράφουν τη διακύμανση των μεταβλητών αυτών και συνδέουν τις μεταβλητές μεταξύ τους, είναι κρίσιμη για τη δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου (Franks 2002).

Με την προσθήκη άλλης μιας οικολογικής μεταβλητής, της ανόργανης σωματιδιακής ύλης (θρύμματα – detritus), με αντίστοιχες διεργασίες εκφρασμένες μαθηματικά με άλλη μια διαφορική εξίσωση, προκύπτει ένα μοντέλο NPZD (Σχήμα 2.9). Η προσθήκη και άλλων μεταβλητών κατάστασης μπορεί να συνεχιστεί, αν κριθεί σκόπιμο, π.χ. και άλλα θρεπτικά, διαχωρισμό του 'φυτοπλαγκτού σε 'διάτομα' και 'μαστιγωτά', δυο λειτουργικές ομάδες ζωοπλαγκτού κλπ, αναπτύσσοντας έτσι και άλλες μορφές μοντέλων της οικογένειας NPZD, π.χ. 2N-2P-2Z-D.



**Σχήμα 2.9.** Σχηματικό παράδειγμα ενός απλού μοντέλου οικοσυστήματος, που περιγράφει βασικές διεργασίες στην επιφάνεια της στήλης του νερού με 4 μεταβλητές κατάστασης : θρεπτικά – φυτοπλαγκτόν – ζωοπλαγκτόν – σωματιδιακή ύλη (τα λεγόμενα μοντέλα NPZD) (σχήμα από Dadou et al. 2004)

Στα χρόνια που ακολούθησαν τα πρώτα μοντέλα του Riley, έγινε σημαντική πρόοδος στην κατανόηση και ποσοτικοποίηση λειτουργιών του θαλάσσιου οικοσυστήματος: στο πεδίο της φωτοσύνθεσης και της επίδρασης του φωτός (Steele 1962), στην κινητική και πρόσληψη θρεπτικών (Dugdale and Goering 1967), στη μελέτη και ποσοτικοποίηση ζωοπλαγκτονικών διεργασιών (Steele and Mullin 1977), στην ανάδειξη της σπουδαιότητας των μικροβιακών διεργασιών (μικροβιακός κύκλος) στην ανακύκλωση ύλης στο θαλάσσιο τροφικό πλέγμα με την εισαγωγή της έννοιας του 'μικροβιακού βρόγχου' (microbial loop, Azam et al. 1983). Παράλληλα, άρχισε να γίνεται εμφανής ο ρόλος των φυσικών διεργασιών και η ανάγκη για ρεαλιστικότερες προσομοιώσεις. Τα ευρήματα από την φυσική ωκεανογραφία άρχισαν να ενσωματώνονται αποσπασματικά σε οικολογικά μοντέλα, όπως στα ομοιώματα των Walsh (1975) και Wroblewski (1977), που περιελάμβαναν προσομοιώσεις κυκλοφορίας και τυρβώδους διάχυσης. Αναπτύχθηκε σταδιακά η αντίληψη ότι το θαλάσσιο περιβάλλον έπρεπε να αντιμετωπίζεται ως σύστημα, και ότι στην κατασκευή μοντέλων οικοσυστήματος έπρεπε να ληφθούν υπόψη και άλλα γνωστικά πεδία εκτός της βιολογίας.

Τα μοντέλα της οικογένειας NPZD, που εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως (Friedrichs et al. 2007), όντας αρκετά απλά, αποτέλεσαν τη βάση ανάπτυξης μοντέλων οικοσυστήματος που λάμβαναν υπόψη φυσικούς μηχανισμούς κυκλοφορίας στη κατακόρυφη στήλη του νερού, όπως οι κατακόρυφες τυρβώδεις κινήσεις του νερού (1-D water column process models, π.χ. Doney et al. 1996). Σημείο αναφοράς

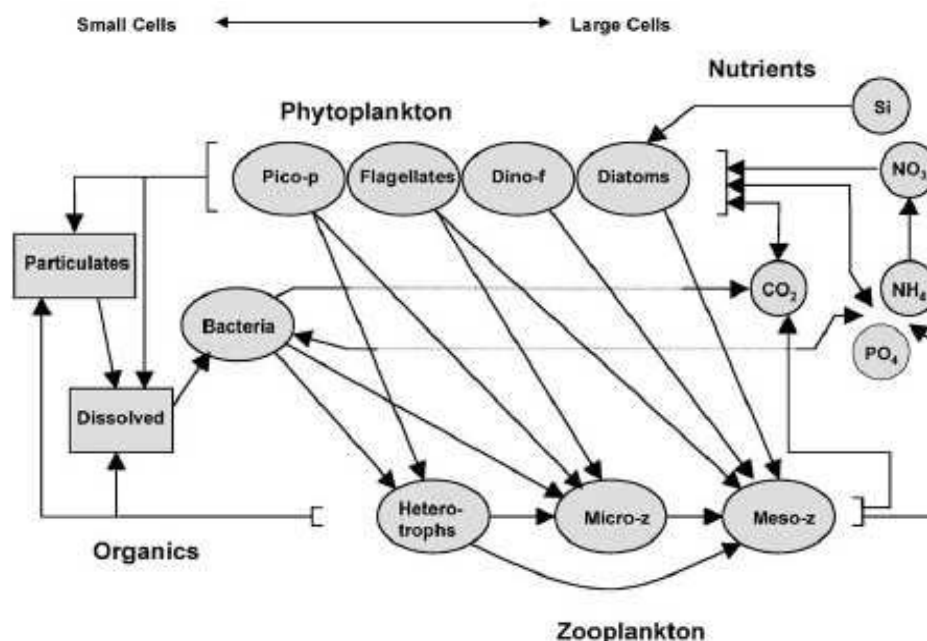
αποτελεί η εξαιρετικά δημοφιλής εργασία των Fasham et al. (1990), οι οποίοι παρουσίασαν ένα απλοποιημένο μοντέλο τροφικού πλέγματος του ανώτερου στρώματος του ωκεανού: με καινοτομίες όπως η χρήση ξεχωριστών διατυπώσεων για τις ροές νιτρικών και αμμωνιακών που σχετίζονται με την νέα και αναγεννημένη πρωτογενή παραγωγή και η βελτιωμένη αναπαράσταση των διεργασιών ανακύκλωσης που σχετίζονται με τον μικροβιακό κύκλο, το μοντέλο των Fasham et al. (1990) αποτέλεσε βάση και έμπνευση για πλήθος άλλων εργασιών και εφαρμογών, και σύμφωνα με τους Arhonditsis et al. (2006) συγκεντρώνει τον μεγαλύτερο αριθμό αναφορών στη σχετική βιβλιογραφία. Παράλληλα, τα μοντέλα τύπου NPZD συνδέθηκαν με 3-D μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, οδηγώντας στη δημιουργία 3-D μοντέλων οικοσυστήματος κυρίως μεσαίας και μεγάλης χωρικής κλίμακας (π.χ. Sarmiento et al. 1993, Six and Maier-Reimer 1996).

Τα τελευταία χρόνια, και καθώς η εξέλιξη των οικολογικών αριθμητικών μοντέλων τείνει να ακολουθεί την γενικότερη εξέλιξη των επιστημονικών γνώσεων γύρω από τη δομή και τη δυναμική του θαλάσσιου οικοσυστήματος (Τσιρτσής 1994), επικρατεί η τάση για αύξηση της πολυπλοκότητας που ενσωματώνουν τα μοντέλα οικοσυστήματος σε ότι αφορά την τροφική διακριτική τους ικανότητα, με προσθήκη περισσότερων μεταβλητών κατάστασης και διεργασιών. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του πραγματικού θαλάσσιου συστήματος, αλλά και το ερευνητικό ενδιαφέρον που έχει ανακύψει σε ζητήματα όπως η εμβάθυνση στην ποικιλότητα βιολογικών λειτουργιών και διεργασιών και οι αναδράσεις (feedbacks) και οι μεταβολές στα οικοσυστήματα λόγω κλιματικών αλλαγών (μεταβολές στους βιολογικούς πόρους και διαχείριση τους, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και οξίνιση των ωκεανών) (Hannah et al. 2010, Blackford 2010), η άποψη ότι στα μοντέλα οικοσυστήματος πρέπει να συμπεριληφθεί περισσότερη λεπτομέρεια, αν αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για ρεαλιστικές και αξιόπιστες προβλέψεις, κερδίζει έδαφος (Anderson 2010).

Ένα από τα πλέον σύνθετα οικολογικά μοντέλα, που ακολουθεί αυτήν τη φιλοσοφία, προσομοιώνοντας πολλές πλαγκτονικές λειτουργικές ομάδες και πολλούς βιογεωχημικούς κύκλους, και το οποίο έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον (Arhonditsis et al. 2006), είναι το ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model), που αναπτύχθηκε για περιφερειακές θάλασσες εύκρατων περιοχών όπως η Βόρεια θάλασσα: το οικοσύστημα προσομοιώνεται ως ένα δίκτυο φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που παρουσιάζουν συστημική συμπεριφορά (Baretta et al.



1995). Αποτελείται από μεγάλο αριθμό μεταβλητών κατάστασης (70 περίπου) και επομένως διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν οικολογικές διεργασίες στη στήλη του νερού και στο βενθικό σύστημα, οδηγούμενες από το φως και τις υδροδυναμικές συνθήκες. Υιοθετήθηκε η προσέγγιση των 'λειτουργικών ομάδων' (functional groups) για την περιγραφή και ομαδοποίηση των ζωντανών οργανισμών: οι οργανισμοί κατατάσσονται σύμφωνα με το τροφικό επίπεδό τους και ομαδοποιούνται σύμφωνα με τους τροφικούς δεσμούς τους και/ή το μέγεθός τους. Στην περιγραφή της δυναμικής των λειτουργικών ομάδων περιλαμβάνονται φυσιολογικές διεργασίες (όπως κατάποση, αναπνοή, απέκκριση, κ.α.) και διεργασίες πληθυσμών (ανάπτυξη, θνησιμότητα, μετακίνηση). Οι διεργασίες αυτές προσομοιώνονται με ροές άνθρακα ή θρεπτικών μεταξύ των λειτουργικών ομάδων. Όλοι οι οργανισμοί που θεωρούνται ότι ανήκουν στην ίδια λειτουργική ομάδα (π.χ. διάτομα ή πικοπλαγκτόν) έχουν τις ίδιες λειτουργικές ιδιότητες και τις ίδιες τροφικές αλληλεπιδράσεις: π.χ. στο φυτοπλαγκτόν ανήκει η ομάδα 'Διάτομα', αυτότροφοι οργανισμοί με κυτταρικό μέγεθος 20-200  $\mu\text{m}$ , που προσλαμβάνουν πυρίτιο και βοσκούνται από το μεσο-ζωοπλαγκτόν (Σχήμα 2.10).



**Σχήμα 2.10.** Σχηματικό διάγραμμα του πελαγικού τμήματος του μοντέλου ERSEM: μεταβλητές κατάστασης και ροές άνθρακα και θρεπτικών μεταξύ των λειτουργικών ομάδων.

Μια γενική ομαδοποίηση των οργανισμών του θαλάσσιου οικοσυστήματος είναι: παραγωγοί (φυτοπλαγκτόν), αποδομητές (βακτήρια) και καταναλωτές (ζωοπλαγκτόν)

Η πρόσληψη και η απώλεια άνθρακα C δίνεται από τις παρακάτω γενικές εξισώσεις για τους παραγωγούς (2.4α), για τους αποικοδομητές (2.4β) και για τους καταναλωτές (2.4γ):

$$\frac{dC}{dt} = (\text{Αφομοίωση} - \text{Απέκκριση} - \text{Αναπνοή} - \text{Κυττ. Λύση} - \text{Καθίζηση}) C - \text{Βόσκηση} \quad (2.4\alpha)$$

$$\frac{dC}{dt} = \text{Πρόσληψη DOC} + \text{Αποδόμηση Θρυμμάτων} - (\text{Αναπνοή}) C - \text{Βόσκηση} \quad (2.4\beta)$$

$$\frac{dC}{dt} = (\text{Αφομοίωση} - \text{Απέκκριση} - \text{Αναπνοή} - \text{Θνησιμότητα}) C - \text{Θήρευση} \quad (2.4\gamma)$$

Λεπτομερής περιγραφή του ERSEM (φιλοσοφία, δομή, υπομοντέλα, κώδικας, μεθοδολογία εφαρμογής) μπορεί να βρεθεί στους Baretta et al. (1995), Ebenhoeh et al. (1997) και στις ιστοσελίδες του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του Πανεπιστημίου του Αμβούργου (<http://www.ifm.zmaw.de/research/models/ersem/>) και του Plymouth Marine Laboratory ([http://imarnet.org/models\\_imar/ersem.aspx](http://imarnet.org/models_imar/ersem.aspx)).

Η χρήση σύνθετων μοντέλων οικοσυστήματος που προσομοιώνουν πολλές φυτοπλαγκτονικές λειτουργικές ομάδες (plankton functional groups – PFTs) και πολλούς βιογεωχημικούς κύκλους στοιχείων, καταρχήν για την αναπαραγωγή γνωστών κατανομών μεταβλητών του οικοσυστήματος αλλά και για την περαιτέρω διερεύνηση σημαντικών βιογεωχημικών διεργασιών και μηχανισμών που ελέγχουν τη δομή και δυναμική του οικοσυστήματος, για την κατανόηση και ποσοτικοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ θαλάσσιου οικοσυστήματος και κλίματος, γενικεύεται σταδιακά τα τελευταία χρόνια, ακόμα και σε κλίμακες του παγκόσμιου ωκεανού (Moore et al. 2004, Le Quere et al. 2005). Παράλληλα, δείχνουν να έχουν ωριμάσει αρκετά ώστε να δοκιμάζεται η επιχειρησιακή εφαρμογή τους, σε περιοχές όπου υπάρχει επάρκεια διαθέσιμων δεδομένων πεδίου. Οι Siddorn et al. (2007) παρουσιάζουν ένα σύνθετο μοντέλο οικοσυστήματος για την περιοχή της Βορειο – Δυτικής Ευρωπαϊκής Υφαλοκρηπίδας, αποτελούμενο από ένα 3D υδροδυναμικό μοντέλο κυκλοφορίας μέσης χωρικής διακριτικής ικανότητας (POLCOMS), συζευγμένο με το οικολογικό μοντέλο ERSEM, σε επιχειρησιακό πλαίσιο που επιτρέπει προγνωστικές προσομοιώσεις, με στόχο την παροχή προϊόντων και υπηρεσιών τόσο στην επιστημονική κοινότητα όσο και στη διαχείριση του παράκτιου χώρου σε ευρεία κλίμακα. Ωστόσο, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί σε όλους τους

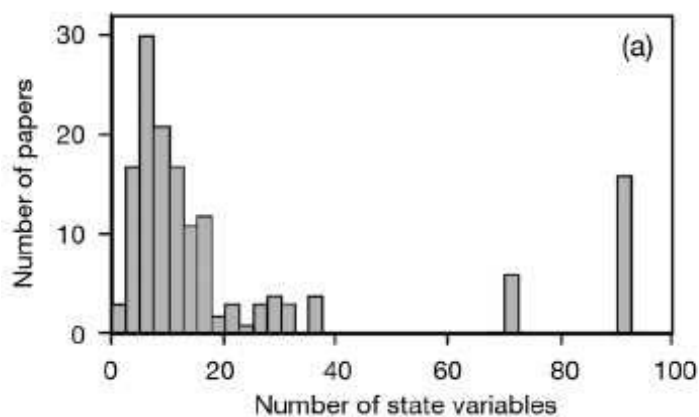
τομείς της μοντελοποίησης, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής μοντέλων που θα περιγράφουν ολοκληρωμένα και ρεαλιστικά το οικοσύστημα από άκρη σε άκρη (end-to-end models), δηλαδή από τη φυσική κυκλοφορία έως και τη δυναμική ιχθυοπληθυσμών, φαντάζει μακρινή (Blackford et al. 2010). Η εφαρμογή ενός τέτοιου αριθμητικού ομοιώματος και των προκλήσεων και περιορισμών του περιγράφεται από τον Fennel (2010), ο οποίος σύνδεσε ένα μοντέλο NPZD με ένα μοντέλο παραγωγής ιχθυομάζας, δημιουργώντας ένα μοντέλο NPZDF, μηδενικών διαστάσεων (box-model) για τη Βαλτική Θάλασσα. Η πρόκληση έγκειται στη σύνδεση και μοντελοποίηση διεργασιών που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα χρονικής κλίμακας, ενώ προβλέπεται ότι θα περάσει αρκετός καιρός μέχρι να συνδεθεί αυτό το NPZDF μοντέλο με ένα 3D μοντέλο φυσικής κυκλοφορίας.

### 2.2.3. Το ζήτημα της πολυπλοκότητας

Από την προηγούμενη παράγραφο διαπιστώνει κανείς ότι η εξέλιξη στα οικολογικά μοντέλα είναι συνυφασμένη με την προσπάθεια ενσωμάτωσης σε αυτά, κάθε φορά, της νέας επιστημονικής γνώσης και των νέων αντιλήψεων για τη δομή και τη δυναμική του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Ωστόσο, η όσο το δυνατό ρεαλιστικότερη προσομοίωση του πραγματικού θαλάσσιου συστήματος με όλη την πολυπλοκότητά του, και η όσο το δυνατό πιστότερη αποτύπωση μεγάλου αριθμού διεργασιών, έχει το κόστος της, καταλήγοντας αναπόφευκτα σε αύξηση της πολυπλοκότητας στη δομή των ίδιων των εργαλείων-μοντέλων. Ο όρος 'πολυπλοκότητα μοντέλου' αναφέρεται (α) στην τροφική διακριτική ικανότητα, δηλαδή τον αριθμό μεταβλητών κατάστασης, παραμέτρων και διεργασιών/μηχανισμών που περιγράφει και επιλύει ένα μοντέλο σε όλα τα επίπεδα οργάνωσης του τροφικού πλέγματος ενός οικοσυστήματος, (β) στην χωρική διακριτική ικανότητα του μοντέλου, δηλαδή στις διαστάσεις του χώρου που επιλύει το μοντέλο ή καλύτερα, πώς αντιμετωπίζεται ένα οικοσύστημα ως χωρική ενότητα (από μηδενικών διαστάσεων 0-D box-models μέχρι τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα οικοσυστήματος και από μικρούς κόλπους έως τον παγκόσμιο ωκεανό) και (γ) την χρονική διάρκεια μιας προσομοίωσης, με οικολογικά γεγονότα να καλύπτουν χρονική κλίμακα λίγων ημερών (π.χ. εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση) έως πολλών δεκαετιών (μεταβολές σε οικοσυστήματα λόγω κλιματικών αλλαγών, π.χ. Neumann 2010).

Ο βαθμός πολυπλοκότητας που πρέπει να ενσωματώνουν τα μοντέλα αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και μεγάλης συζήτησης στη σχετική επιστημονική κοινότητα (Blackford et al. 2010). Οι Arhonditsis and Brett (2004)

συγκέντρωσαν από τη διεθνή βιβλιογραφία και μελέτησαν 153 περιπτώσεις δημοσιευμένων μοντέλων μεταξύ 1990 – 2002. Στο ιστόγραμμα συχνοτήτων του Σχήματος 2.11 παρουσιάζεται η κατανομή της πολυπλοκότητας των μοντέλων αυτών, με βάση τον αριθμό μεταβλητών κατάστασης που έχουν.



**Σχήμα 2.11.** Κατανομή της πολυπλοκότητας 153 εφαρμογών μοντέλων, με βάση τον αριθμό μεταβλητών κατάστασης (από Arhonditsis and Brett, 2004)

Η μεγάλη πλειοψηφία των μοντέλων χρησιμοποιεί λιγότερες από 20 μεταβλητές κατάστασης, κάτι αναμενόμενο, καθώς μεγάλη πολυπλοκότητα αυξάνει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών κατάστασης και ταυτόχρονα οδηγεί σε μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος για την γρήγορη εκτέλεση της προσομοίωσης. Απλά μοντέλα, του τύπου Fasham et al. (1990), αποτελούνται από μικρό αριθμό (<10) μεταβλητών κατάστασης, που συναθροίζουν λειτουργικές ομάδες αποτελούμενες από μεγάλο αριθμό οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών (‘φυτοπλαγκτόν’, ‘ζωοπλαγκτόν’, ‘βακτήρια’), οργανικής και ανόργανης ύλης, διαλυτής και σωματιδιακής ύλης (‘ανόργανα θρεπτικά’, ‘διαλυμένη οργανική ύλη’, ‘αιωρούμενα στερεά’). Οι μεταβλητές αυτές προσομοιώνονται σύμφωνα με το περιεχόμενό τους σε άνθρακα ή άζωτο. Στον αντίποδα, υπάρχει μικρότερος αριθμός πολύπλοκων μοντέλων (>70 μεταβλητές κατάστασης). Αυτά περιλαμβάνουν τους κύκλους πολλών στοιχείων (C, N, P, Si, Fe), πολλές, διαφορετικές λειτουργικές ομάδες σε διάφορα επίπεδα οργάνωσης ενός οικοσυστήματος, καθώς και διεργασίες ιζήματος και ανταλλαγές με το νερό. Η οικογένεια μοντέλων ERSEM ανήκει σε αυτήν την κατηγορία (Baretta et al. 1995, Ebenhoh et al. 1997). Μεταξύ των δυο άκρων υπάρχουν πολλά μοντέλα ενδιάμεσης πολυπλοκότητας, όπως το μοντέλο μίας διάστασης (1-D) των Dadou et al. (2001) με 14 μεταβλητές κατάστασης, που αναπτύχθηκε για να μελετήσει τις ροές οργανικής ύλης μεταξύ εύφωτης ζώνης και

ιζήματος στον Βορειοανατολικό, τροπικό Ατλαντικό, η εφαρμογή των Gregoire et al. (1998), που χρησιμοποίησαν το 3-D, υδροδυναμικό μοντέλο GHER, συζευγμένο με ένα οικολογικό μοντέλο 13 μεταβλητών κατάστασης, για να διερευνήσουν βασικά χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος της Μαύρης Θάλασσας, και το βιογεωχημικό μοντέλο 38 μεταβλητών κατάστασης που χρησιμοποίησαν οι Zaldivar et al. (2003) στη λιμνοθάλασσα Sacca Di Goro, στις ακτές της Αδριατικής στην Ιταλία.

Τα 'απλά' μοντέλα είναι πιο κατανοητά, ευκολότερα στο χειρισμό, με λιγότερες διεργασίες και άρα παραμέτρους για να βαθμονομηθούν. Τα απλά μοντέλα τύπου NPZD κυριάρχησαν τις προηγούμενες δεκαετίες και εξακολουθούν να αποδεικνύουν την αξία τους ως ερευνητικά εργαλεία τόσο σε περιφερειακή όσο και σε ευρύτερη ωκεάνια κλίμακα (Friedrichs and Hofmann 2001, Kawamiya and Oschlies 2003, Schartau and Oschlies 2003, Friedrichs et al. 2007). Οι Friedrichs et al. (2006) έδειξαν πως ένα απλό μοντέλο τριών μεταβλητών κατάστασης Θρεπτικών-Φυτοπλαγκτού-Ζωοπλαγκτού (NPZ model), το οποίο έχει βαθμονομηθεί προσεκτικά μπορεί να περιγράψει διεργασίες της ανοιχτής θάλασσας (open ocean) το ίδιο καλά με ένα σύνθετο μοντέλο αυξημένης τροφικής διακριτικής ικανότητας. Αν και τα προσομοιωμένα αποτελέσματα που παράγουν τα 'απλά' μοντέλα απέχουν από το να χαρακτηριστούν ιδανικά, ωστόσο μπορούν να αναπαράγουν πολύ ικανοποιητικά βασικά χαρακτηριστικά όπως η διακύμανση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας η οποία περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών, φωτός και τη βόσκηση (Anderson 2005) και οι κατανομές βιογεωχημικών μεταβλητών. Η κριτική που ασκείται στα απλά μοντέλα επικεντρώνεται στον υπερ-απλουστευμένο τρόπο που περιγράφουν τη δυναμική του περίπλοκου, πραγματικού συστήματος: οι λίγες μεταβλητές κατάστασης, που συναθροίζουν π.χ. μεγάλο αριθμό οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών ('φυτοπλαγκτόν', 'ζωοπλαγκτόν'), οι λίγες, βασικές εξισώσεις και οι πολλές υποθέσεις, δεν επαρκούν για να περιγράψουν και να αποτυπώσουν με λεπτομέρεια και ακρίβεια διεργασίες-κλειδιά που θεωρούνται σημαντικές, όπως π.χ. διεργασίες ευαίσθητες στις αλλαγές θερμοκρασίας και pH όπως η βακτηριακή ανοργανοποίηση, οι ρυθμοί ζωοπλαγκτονικής θήρευσης, οι λειτουργίες φυτοπλαγκτονικών ομάδων που χρησιμοποιούν ανθρακικό ασβέστιο (calcifying phytoplankton, π.χ. κοκκολιθοφόρα) και γενικότερα, η ποσοτικοποίηση των αναδράσεων και αλληλεπιδράσεων μεταξύ θαλάσσιου οικοσυστήματος και κλίματος (Arhonditsis and Brett 2004, Le Quere 2006, Anderson 2010, Hannah et al. 2010, Blackford 2010).

Από την άλλη μεριά, τα σύνθετα ομοιώματα μοντελοποιούν τη δυναμική μεγάλου αριθμού οικολογικών μεταβλητών, παραμετροποιούν μεγάλο αριθμό διεργασιών και θεωρητικά έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πιο ακριβείς και ρεαλιστικές προσομοιώσεις του πολύπλοκου, πραγματικού οικοσυστήματος (Arhonditsis and Brett 2004). Η εργασία των Friedrichs et al. (2007), οι οποίοι συνέκριναν τις επιδόσεις 12 μοντέλων τύπου NPZD, υπέδειξε ανάμεσα στα άλλα, ότι μοντέλα που περιλαμβάνουν περισσότερες διεργασίες με περισσότερη λεπτομέρεια, τείνουν να είναι πιο κατάλληλα για γενική χρήση (generic use) και μεταφορά – εφαρμογή σε διαφορετικές περιοχές (portability). Προϋποθέσεις βεβαίως για αυτό, είναι ότι υπάρχει ακριβής γνώση και περιγραφή των μηχανισμών που μοντελοποιούνται και επαρκή δεδομένα πεδίου για την αξιολόγησή τους (Anderson 2005). Και στα σύνθετα μοντέλα ασκείται κριτική για τις αδυναμίες και τα μειονεκτήματά τους: είναι δύσκολα στο χειρισμό σε όλα τα στάδια, από την ανάπτυξη έως την επιβεβαίωσή και αξιολόγησή τους, ενώ δεν είναι αυτονόητο ότι τα προϊόντα της προσομοίωσης είναι καλύτερα από αυτά των απλών μοντέλων. Ένα από τα συμπεράσματα των Friedrichs et al. (2007), ήταν ότι τα 'απλά' μοντέλα μπορούν να λειτουργήσουν το ίδιο καλά με τα πιο σύνθετα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όταν βαθμονομηθούν προσεκτικά για τις περιοχές αυτές. Η διαπίστωση ότι η αυξημένη πολυπλοκότητα, εν ονόματι της πιστότερης περιγραφής διεργασιών του πραγματικού συστήματος, δεν εξασφαλίζει υποχρεωτικά καλύτερες επιδόσεις για ένα μοντέλο, διατυπώνεται σαφώς σε ανασκοπήσεις και συγκριτικές μελέτες (π.χ. Arhonditsis and Brett 2004, Anderson 2005), και αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στο έλλειμμα γνώσης και κατανόησης που εξακολουθεί να υπάρχει γύρω από τις οικολογικές διεργασίες και τους μηχανισμούς που φιλοδοξούν να συμπεριλάβουν τα μοντέλα αυτά. Επιπλέον, οι μεγάλες απαιτήσεις σε δεδομένα πεδίου, αφενός για την βαθμονόμηση, δηλαδή τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών του μεγάλου αριθμού παραμέτρων και την εκτίμηση της ικανότητάς τους, περιορίζουν την εφαρμογή τους σε περιοχές για τις οποίες αυτά είναι διαθέσιμα.

Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολύ μεγάλου αριθμού παραμέτρων, που πολλές φορές συσχετίζονται μεταξύ τους, ιδιαίτερα όταν τα δεδομένα πεδίου δεν επαρκούν, γεγονός πολύ συχνό στην ωκεανογραφία, οδηγεί σε μεγάλες αβεβαιότητες στις τιμές των παραμέτρων (underdetermination), άρα και στα αποτελέσματα ενός μοντέλου, υπονομεύοντας την αξία του. Το ζήτημα της μείωσης της ακρίβειας και αξιοπιστίας ενός μοντέλου όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητά του (τροφική, χωρική και χρονική) παρουσίασαν αρχικά οι Costanza and Sklar (1985), και εξακολουθεί να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα (Arhonditsis and Brett 2004, Anderson 2005, Blackford et al.

2010, Hannah et al 2010). Επισημαίνεται ότι η χρήση ενός απλού μοντέλου δεν σημαίνει απαραίτητα μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ο βαθμός της πολυπλοκότητας που ενσωματώνει ένα μοντέλο θα πρέπει να είναι συνάρτηση τόσο του ερευνητικού ερωτήματος και των οικολογικών μηχανισμών που φιλοδοξεί να διερευνήσει, όσο και της γνώσης και κατανόησης των μηχανισμών αυτών αλλά και των διαθέσιμων δεδομένων πεδίου. Είναι αυτά τα κριτήρια που θα πρέπει να καθορίζουν τον τύπο μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή και όχι το γεγονός ότι υπάρχουν πιο πολύπλοκα – ρεαλιστικά ομοιώματα (Franks 2002, Fennel and Neumann 2004). Ένα μοντέλο είναι όσο πολύπλοκο χρειάζεται, επιτυγχάνοντας τη λεγόμενη 'βέλτιστη πολυπλοκότητα' (optimum complexity) όταν όλες οι διεργασίες, τα τμήματα και οι μηχανισμοί φόρτισης που ενδιαφέρουν κάθε φορά, περιλαμβάνονται και περιγράφονται με επάρκεια (Nihoul 1998, Fulton 2010). Η επιλογή ενός απλού οικολογικού ομοιώματος, με την έννοια ότι περιγράφει αφαιρετικά τα κατώτερα επίπεδα οργάνωσης του παράκτιου θαλάσσιου οικοσυστήματος χρησιμοποιώντας λίγες μεταβλητές κατάστασης, που συναθροίζουν π.χ. μεγάλο αριθμό οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών και λειτουργιών ('φυτοπλαγκτόν'), μπορεί να θεωρείται ότι υπεραπλουστεύει το πραγματικό σύστημα, ωστόσο είναι απολύτως αποδεκτή, εφόσον είναι επαρκής για τα οικολογικά φαινόμενα που έχει στόχο να διερευνήσει, όπως για παράδειγμα οι ετήσιοι κύκλοι φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και θρεπτικών και εν γένει διεργασίες ευτροφισμού. Οι προσομοιώσεις ενός θαλάσσιου οικοσυστήματος θα πρέπει να περνούν από την όσο το δυνατό πληρέστερη κατανόηση ενός απλού μοντέλου, στην πιο σύνθετη διερεύνηση από ένα πιο πολύπλοκο μοντέλο, όταν είναι ξεκάθαρο ότι το πρώτο δεν επαρκεί για να απαντήσει στα ερευνητικά ερωτήματα (Franks 2002).

#### **2.2.4. Βαθμονόμηση και επαλήθευση**

##### Αβεβαιότητα και μεθοδολογικά βήματα περιορισμού της

Τα αποτελέσματα ενός μοντέλου προσομοίωσης παρουσιάζουν αβεβαιότητα, καθώς η ανάπτυξη ενός μοντέλου βασίζεται σε παραδοχές, υποθέσεις, αφαιρέσεις και απλοποιήσεις (Loehle 1987). Οι αιτίες που εισάγουν αβεβαιότητα στα αποτελέσματα ενός μοντέλου ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τους O'Neill and Gardner (1979), Walters (1986) και Allen et al. (2007):

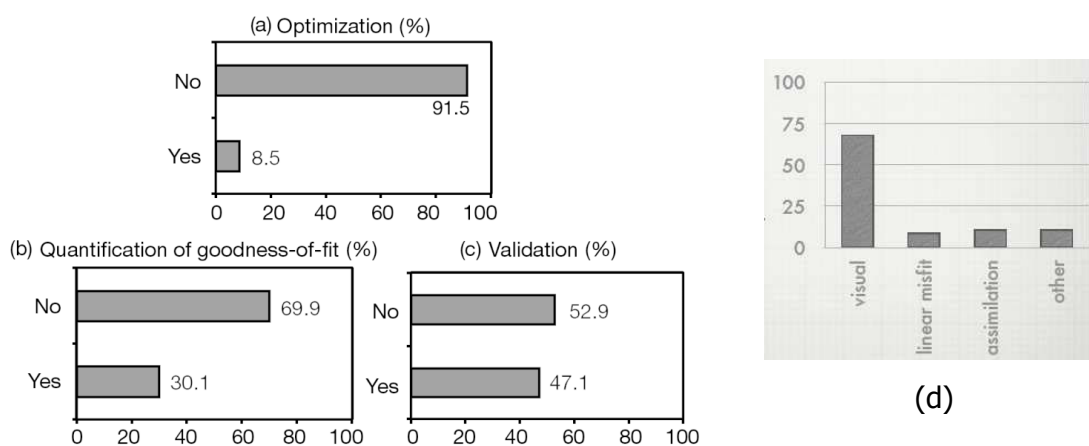
- (α) αβεβαιότητα προερχόμενη από τη δομή του μοντέλου, δηλαδή την περιγραφή των διεργασιών και των αλληλεπιδράσεων των μεταβλητών του μοντέλου,
- (β) αβεβαιότητα προερχόμενη από την αβεβαιότητα των τιμών των παραμέτρων
- (γ) αβεβαιότητα προερχόμενη από σφάλματα των αρχικών τιμών, των οριακών συνθηκών και των μηχανισμών διέγερσης-συναρτήσεων φόρτισης.

Στην πρώτη περίπτωση, η αβεβαιότητα είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Οφείλεται σε σφάλματα που προκύπτουν από την αφαίρεση διεργασιών που κρίνονται ως όχι ιδιαίτερα σημαντικές για το μοντέλο, από την μαθηματική έκφραση των διεργασιών του οικοσυστήματος και από την χρησιμοποιούμενη χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα. Στην δεύτερη περίπτωση, οφείλεται στην έλλειψη γνώσης των ακριβών τιμών των παραμέτρων και αντιμετωπίζεται σε μεγάλο βαθμό κατά την βαθμονόμηση. Τέλος στην τρίτη περίπτωση, η αβεβαιότητα οφείλεται σε σφάλματα στις αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάσταση, στις τιμές των συναρτήσεων φόρτισης και των οριακών συνθηκών. Αν οι τιμές αυτές προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις, τότε τα σφάλματα είναι σφάλματα μετρήσεων. Στην περίπτωση μοντέλων πρόγνωσης, οι τιμές αυτές προέρχονται από άλλα μοντέλα προσομοίωσης, οπότε εμπεριέχουν την αβεβαιότητα του ίδιου του μοντέλου από το οποίο προέρχονται.

Η ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας των μοντέλων οικοσυστήματος και η καλύτερη εκτίμηση, κατανόηση και ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων προσομοίωσης, εξακολουθούν να αποτελούν μείζον ζήτημα για την επιστημονική κοινότητα (Blackford et al. 2010). Θα περίμενε κανείς ότι μεθοδολογικές διαδικασίες (conventional modeling procedures) που συνεισφέρουν τα μέγιστα προς την κατεύθυνση αυτή, όπως για παράδειγμα η βαθμονόμηση παραμέτρων με τεχνικές βελτιστοποίησης (optimization) και η ποσοτική εκτίμηση των ικανοτήτων και επιδόσεων ενός μοντέλου, θα ήταν καθιερωμένες και θα εφαρμόζονταν σε επίπεδο ρουτίνας κατά την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μοντέλου. Κάτι τέτοιο όμως δεν φαίνεται να ισχύει: οι Arhonditsis and Brett (2004), μελετώντας τις περιπτώσεις 153 δημοσιευμένων εφαρμογών μοντέλων μεταξύ 1990 – 2002, διαπίστωσαν ότι μόνο το 8.5% των μοντέλων είχαν βαθμονομηθεί με τεχνικές βελτιστοποίησης των παραμέτρων (Σχήμα 2.12(a)) ενώ στη μεγάλη πλειοψηφία (91.5%) των μοντέλων, η βαθμονόμηση είχε γίνει χρησιμοποιώντας τιμές παραμέτρων από τη βιβλιογραφία (γεγονός που οι συγγραφείς απέδωσαν εν μέρει στο ότι οι τεχνικές βελτιστοποίησης άρχισαν να αναπτύσσονται κυρίως στο δεύτερο μισό της περιόδου μελέτης).



Σε ότι αφορά στην αξιολόγηση των ικανοτήτων ενός μοντέλου, οι Arhonditsis and Brett (2004) αναφέρουν ότι μόνο το 30% των μελετών χρησιμοποίησαν κάποια αντικειμενική μέθοδο εκτίμησης της ποιότητας του μοντέλου όπως ποσοτικοποίηση της επιτυχίας προσαρμογής των αποτελεσμάτων προσομοίωσης στα δεδομένα πεδίου, ενώ μόνο το 47% των μελετών ανέφεραν κάποιας μορφής επαλήθευση (validation) του μοντέλου (Σχήμα 2.12(b-c)). Στη συνέχεια της έρευνας αυτής, οι Arhonditsis et al. (2006) δεν βρήκαν συσχέτιση μεταξύ των ικανοτήτων ή της ακρίβειας του μοντέλου και των μεθόδων που αυτά προσδιορίστηκαν, όπως αναφέρονται στη δημοσίευση, και των βιβλιογραφικών αναφορών της δημοσίευσης αυτής. Οι Stow et al. (2009), στην ανασκόπηση 142 δημοσιευμένων μοντέλων οικοσυστήματος μεταξύ 2000 - 2007 σε πέντε περιοδικά (J. of Geophysical Research-Oceans, Deep Sea Research I and II, J. of Marine Systems, J. of Oceanography, Ocean Modelling) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μόνη καθιερωμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα από την επιστημονική κοινότητα για την εκτίμηση των ικανοτήτων και επιδόσεων ενός μοντέλου (skill assessment) είναι η οπτική σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων με τα δεδομένα πεδίου, μέσω σχετικών διαγραμμάτων (Σχήμα 2.12(d)).



**Σχήμα 2.12.** Ποσοστό % των μοντέλων οικοσυστήματος που μελέτησαν οι Arhonditsis and Brett (2004) όπου (a) χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές βελτιστοποίησης για τη βαθμονόμηση, (b) ποσοτικοποιήθηκε η επιτυχία προσαρμογής αποτελεσμάτων προσομοίωσης-δεδομένων πεδίου και (c) εφαρμόστηκε κάποια μορφή επαλήθευσης (από Arhonditsis and Brett, 2004). (d) Κατανομή % των μεθόδων εκτίμησης των ικανοτήτων μοντέλου στις 142 δημοσιεύσεις που μελέτησαν οι Stow et al. (2009) (από Vichi, 2009).

Βαθμονόμηση (calibration) και βελτιστοποίηση (optimization). Βαθμονόμηση είναι η διαδικασία 'ρύθμισης' του μοντέλου, θέτοντας κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους έτσι ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά στην εκάστοτε εφαρμογή του. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, λόγω της παραμετροποίησης διεργασιών στα μαθηματικά μοντέλα, είναι δυνατόν οι τιμές της ίδιας παραμέτρου να διαφέρουν από μοντέλο σε μοντέλο. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι ενδέχεται η τιμή μιας παραμέτρου να είναι μοναδική για ένα μοντέλο, εφ' όσον μέσω αυτής εκφράζονται διεργασίες που δεν συμπεριλαμβάνονται σε αντίστοιχες παραμέτρους συγγενικών μοντέλων. Η διαδικασία που αποσκοπεί στην εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου, δηλαδή αυτών που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή προσαρμογή του μοντέλου σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, λέγεται βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Κατά την βαθμονόμηση συχνά προσδιορίζεται, πέραν της βέλτιστης τιμής της κάθε παραμέτρου, μία περιοχή τιμών μέσα στην οποία μπορεί να μεταβάλλεται η παράμετρος αυτή.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου είναι δυνατόν να γίνει κατ' αρχήν με την μέθοδο της δοκιμής και επιτυχίας (trial and error) χρησιμοποιώντας τιμές παραμέτρων από τη βιβλιογραφία: μεταβάλλεται η τιμή μιας παραμέτρου, εκτελείται η προσομοίωση και αξιολογείται η προσαρμογή του μοντέλου στις πειραματικές τιμές με μία από τις μεθόδους που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο (βλ. *Επιτυχία Προσαρμογής*). Το ίδιο γίνεται για όλες τις παραμέτρους αλλάζοντας μία κάθε φορά μέσα σε ένα διάστημα τιμών που ορίζεται από τη βιβλιογραφία, έως ότου επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσαρμογή (fit). Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει μια σειρά από μειονεκτήματα: δεν εξασφαλίζει ότι το 'τελικό' σύνολο τιμών είναι το βέλτιστο δυνατό ενώ δεν μπορεί να διακρίνει εάν η οποιαδήποτε έλλειψη προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα οφείλεται σε κακή επιλογή τιμών παραμέτρων ή ανεπαρκή δομή του μοντέλου. Επιπλέον, περιέχει υποκειμενικότητα, είναι χρονοβόρα και οπωσδήποτε δεν συνιστάται για την βαθμονόμηση σύνθετων μοντέλων οικοσυστήματος με μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Εναλλακτικά, έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένες μέθοδοι βαθμονόμησης που προσφέρουν αφενός αντικειμενικότητα, αφετέρου βελτιστοποιημένο τρόπο προσδιορισμού (optimized techniques - optimization) του 'καλύτερου' συνόλου παραμέτρων. Βασική αρχή είναι οι επαναλαμβανόμενες δοκιμές του μοντέλου με διαφορετικές τιμές παραμέτρων κάθε φορά, ωσότου επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα. Το ποσοτικό μέτρο της επιτυχίας προσαρμογής μπορεί να διαφέρει από μέθοδο σε μέθοδο, π.χ.:

- Ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους (cost function – οι διαφορές μεταξύ αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραματικών παρατηρήσεων, προτυποποιημένες με την τυπική απόκλιση των πειραματικών παρατηρήσεων) (π.χ. Sjøiland and Skogen 2000),
- Μεγιστοποίηση μιας έκφρασης πιθανότητας (π.χ. Hurtt and Armstrong 1999).
- Υπολογισμός κάποιου μέτρου όπως περιγράφεται στη παράγραφο *Επαλήθευση και Επιτυχία Προσαρμογής*,

αλλά πάντα ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας [Αποτελέσματα Μοντέλου – Πειραματικά Δεδομένα].

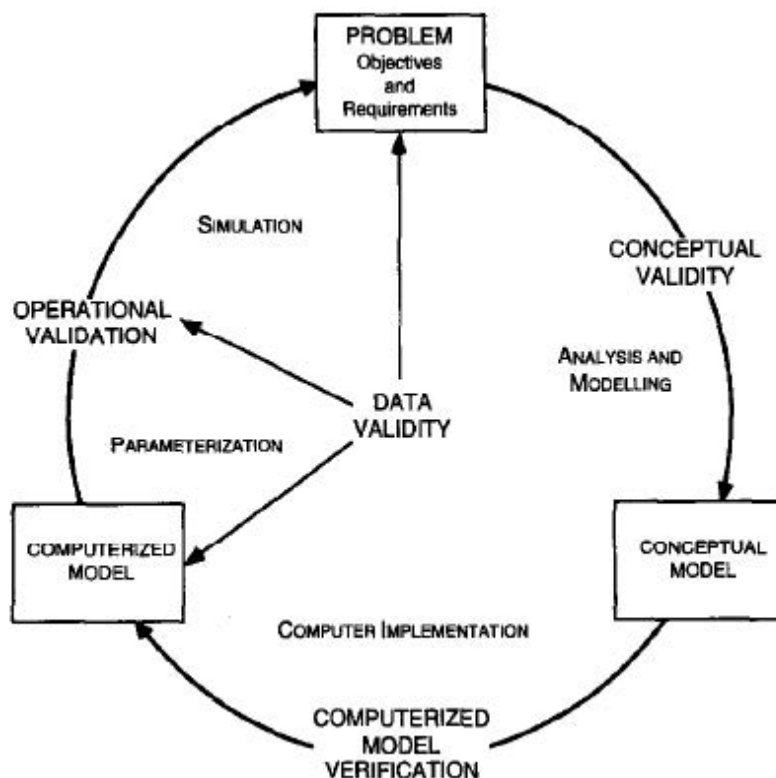
Θα πρέπει να τονιστεί ότι η βαθμονόμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου δεν οδηγεί οπωσδήποτε σε επιτυχή προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα. Ενδέχεται η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης ή η διατύπωση των διαφορικών εξισώσεων να μην είναι επιτυχείς και το μοντέλο να μην προσομοιώνει ικανοποιητικά το φυσικό σύστημα. Στην περίπτωση, που η βαθμονόμηση δεν οδηγεί σε επιτυχή προσαρμογή, πρέπει να επανεξεταστεί η συνολική δομή του μοντέλου, δηλαδή η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης και η διατύπωση των διαφορικών εξισώσεων μεταβολής αυτών.

Στην παράγραφο 5.4. «Ανάπτυξη συστήματος βαθμονόμησης οικολογικού υπομοντέλου», περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση του οικολογικού σκέλους του συζευγμένου μοντέλου, οι περιορισμοί της τεχνικής, ενώ συζητούνται εναλλακτικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης.

Αξιολόγηση/εκτίμηση ικανοτήτων μοντέλου (skill assessment): επιτυχία προσαρμογής (goodness-of-fit) και επαλήθευση (validation)

Το ζήτημα της αξιολόγησης των ικανοτήτων ενός μοντέλου μέσω της επαλήθευσής του, της αξιολόγησης δηλαδή του κατά πόσο ένα μοντέλο ανταποκρίνεται στο σκοπό για τον οποίον αναπτύχθηκε, είναι ακανθώδες και αμφιλεγόμενο, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία (Arhonditsis and Brett 2004). Η σύγχυση αυτή γύρω από το περιεχόμενο της έννοιας 'επαλήθευση' προκύπτει τόσο από τη φιλοσοφική προσέγγιση των ερευνητών όσο και από τους τύπους επαλήθευσης και τις πρακτικές μεθόδους που προτείνονται (Oreskes et al. 1994, Dee 1995, Rykiel 1996, Stow et al. 2009).

Συνθέτοντας τους ορισμούς που προτείνουν οι παραπάνω συγγραφείς, μπορεί να ειπωθεί ότι, επαλήθευση είναι μια απαραίτητη διαδικασία αξιολόγησης που μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν ένα μοντέλο είναι αποδεκτό για τη χρήση για την οποία αναπτύχθηκε, εφόσον παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια και ανταποκρίνεται σε καθορισμένα κριτήρια. Στο τελικό στάδιο, η επαλήθευση περιλαμβάνει την σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου.



**Σχήμα 2.13.** Σχηματική απεικόνιση διάφορων τύπων επαλήθευσης και τα στάδια εφαρμογής τους στην συνολική διαδικασία μοντελοποίησης (από Rykiel 1996).

Η συνολική διαδικασία επαλήθευσης μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους τύπους επαλήθευσης, οι οποίοι εφαρμόζονται σε διάφορα στάδια της ανάπτυξης ενός μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, και που κανένας από μόνος του δεν εξασφαλίζει ότι ένα μοντέλο θα παράγει ακριβείς προβλέψεις. Κατά το αρχικό στάδιο διατύπωσης του ερευνητικού ερωτήματος και μορφοποίησης του μοντέλου, το μοντέλο θα πρέπει να επαληθευτεί *εννοιολογικά* ή *θεωρητικά* (*conceptual - structural validation*). Αυτό σημαίνει ότι οι θεωρίες, οι υποθέσεις και οι παραμετροποιήσεις που ενσωματώνει το θεωρητικό μοντέλο (που θα μορφοποιηθεί σε σύστημα εξισώσεων) είναι σωστές, ή τουλάχιστον δικαιολογημένες, και ότι η μοντελοποίηση του

προβλήματος ή του περιβαλλοντικού συστήματος, η λογική, η δομή, τα μαθηματικά, οι σχέσεις αιτίου-αιτιατού είναι επιστημονικά ορθές και δικαιολογημένες για τη χρήση για την οποία προορίζεται (Rykiel 1996, Moll and Radach 2001).

Κατά τη φάση ανάπτυξης του κώδικα του μοντέλου (σε γλώσσα προγραμματισμού ή σε οποιοδήποτε άλλο περιβάλλον) και της επίλυσης από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, θα πρέπει να επαληθευτεί ότι στο μοντέλο, έχουν μεταφερθεί με ακρίβεια οι μαθηματικές εξισώσεις και εκφράσεις και επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους σωστά (*code verification, software-algorithmic validation*). Πρόκειται κυρίως για τεχνική εργασία με σκοπό να ελαχιστοποιήσει τους δύο τύπους σφαλμάτων (Rykiel 1996) (α) σφάλματα προγραμματισμού (*debugging*) και (β) σφάλματα λογικής προγράμματος, έτσι ώστε οι ιδέες να μεταφραστούν σε κώδικα προγραμματισμού με πιστότητα και ακρίβεια.

Σε ορισμένες δημοσιεύσεις, η διαδικασία της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου με μετρήσεις πεδίου κατά τη φάση της βαθμονόμησης (*calibration, parameterization*) ενός μοντέλου αναφέρεται ως ένα είδος επαλήθευσης (*replicative validation*) (Arhonditsis and Brett 2004). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, καθώς οι μετρήσεις πεδίου περιέχουν και οι ίδιες σφάλματα και δίνουν μόνο μια ατελή εικόνα του θαλάσσιου συστήματος, ακόμα και τα δεδομένα πεδίου και οι ερμηνείες τους πρέπει να επαληθεύονται και να περνούν από διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητάς τους (*data validation – quality control*), έτσι ώστε να αποτελούν όσο το δυνατόν πιστότερη εικόνα του πραγματικού συστήματος προς την οποία προσπαθεί να συγκλίνει το μοντέλο.

Στο στάδιο λειτουργίας του μοντέλου και αφού ολοκληρωθεί η εκτέλεση (*run*), τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου (*predictive – operational validation*) και εκτιμάται η *επιτυχία προσαρμογής (goodness-of-fit)* των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα από το πραγματικό σύστημα. Η επιτυχία προσαρμογής μπορεί να εκτιμηθεί είτε ποιοτικά, μέσω διαγραμμάτων, είτε ποσοτικά, με υπολογισμό του σφάλματος της προσομοίωσης, όπως περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες δυο παραγράφους. Τέλος, τα μοντέλα που θεωρούνται επαληθευμένα ως ένα βαθμό, μπορούν να ελεγχθούν ως προς την ικανότητα εφαρμογής τους και σε άλλες περιοχές μελέτης και άλλους τύπους οικοσυστημάτων (*transferability, portability*) (Arhonditsis and Brett 2004).

### Μέθοδοι επαλήθευσης και εκτίμησης της επιτυχία προσαρμογής

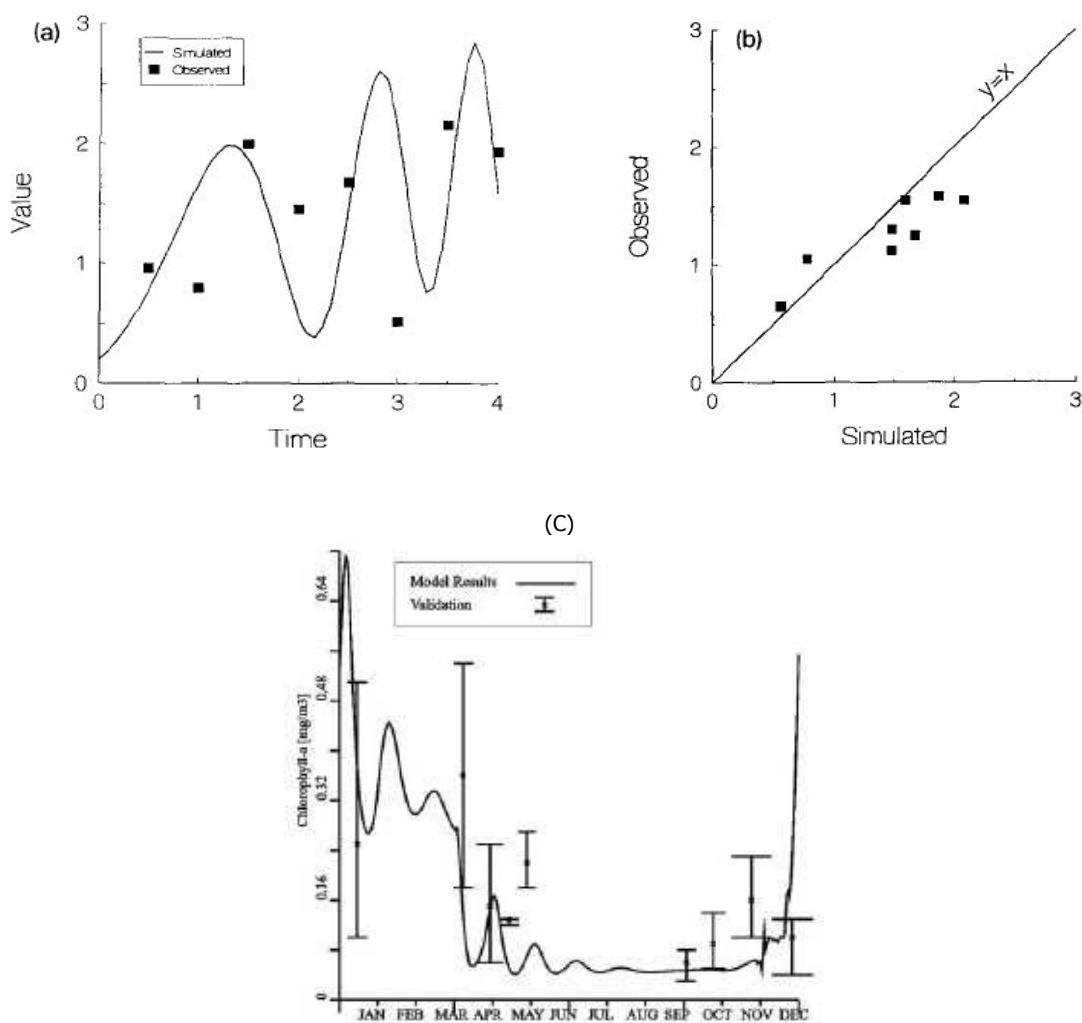
Οι μέθοδοι και τεχνικές επαλήθευσης που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε γραφικές/ποιοτικές, σε μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος ή απόκλισης και σε στατιστικές μεθόδους.

Η πρώτη και απλούστερη προσέγγιση είναι η σύγκριση των τιμών της προσομοίωσης με τις πειραματικές τιμές όταν αυτές σχεδιαστούν στο ίδιο διάγραμμα σε συνάρτηση με τον χρόνο (ημέρες, εποχή, ετήσιος κύκλος, υπερετήσια περίοδος) (Σχήμα 2.14a). Ο σχεδιασμός στο ίδιο διάγραμμα των προσομοιωμένων ως προς τις πειραματικές τιμές (με τη γραμμή  $y = x$  να υποδεικνύει την απόλυτη ταύτιση) προτείνεται από τους Mayer and Butler (1993) ως καλύτερη τεχνική με μεγαλύτερη διαγνωστική ικανότητα (Σχήμα 2.14b). Οι προσομοιωμένες και οι πειραματικές τιμές μπορούν να σχεδιαστούν και ως κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) για έναν σταθμό, αλλά και ως δισδιάστατες οριζόντιες κατανομές για μια περιοχή, πχ προσομοιωμένο πεδίο χλωροφύλλης σε σύγκριση με δορυφορική εικόνα χλωροφύλλης.

Η αξιολόγηση της επιτυχίας προσαρμογής με τις γραφικές αυτές μεθόδους είναι καθαρά ποιοτική, σαφώς εμπεριέχει υποκειμενικότητα και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνότερα στην διεθνή βιβλιογραφία (Stow et al. 2009). Το Σχήμα 2.14c δείχνει ένα διάγραμμα Box - Whisker όπου εκτός από την τιμή των δεδομένων πεδίου (πχ για ένα σταθμό μια χρονική στιγμή) παρουσιάζεται και στατιστική πληροφορία (εύρος τιμών, ελάχιστη και μέγιστη τιμή, ενδιάμεση τιμή, τεταρτημόρια) για αυτά δεδομένα πεδίου μαζί με τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Πέραν της ποιοτικής προσέγγισης και των γραφικών μεθόδων, διατίθενται στην διεθνή βιβλιογραφία και ποσοτικές μέθοδοι εκτίμησης της προσαρμογής ενός μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από ένα πραγματικό σύστημα (Mayer and Butler 1993, Power 1993, Moll and Radach 2001, Nittis et al. 2001). Έχουν αναπτυχθεί πολλά *μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος*, που είναι παραλλαγές και εκφράσεις του σφάλματος ενός μοντέλου, όπως *συναρτήσεις κόστους (cost functions)*, το *μέσο σφάλμα (mean error)*, το *σφάλμα RMS (RMS error)*, η *ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)*. Ποσοτικά μέτρα που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1 (που παρατίθεται στο τέλος του κεφαλαίου), με τους μαθηματικούς τύπους που ορίζονται,

παραδείγματα βιβλιογραφικών αναφορών όπου η θεωρητική βάση τους και η εφαρμογή τους περιγράφεται αναλυτικά, καθώς και προτεινόμενες κλίμακες τιμών των μέτρων για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης του μοντέλου. Λέγονται αλλιώς και *μέτρα απόκλισης (deviance measures)* καθώς στην πραγματικότητα εκτιμούν την απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών δεδομένων, αλλά και *μέτρα καλής προσαρμογής (goodness-of-fit measures)*.



**Σχήμα 2.14.** Γραφικές μέθοδοι επαλήθευσης : (α) Αποτελέσματα προσομοίωσης (γραμμή) και πειραματικές τιμές (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο. (β) Αποτελέσματα προσομοίωσης vs πειραματικών τιμών για την ίδια προσομοίωση (από Mayer and Butler 1993). (γ) Διάγραμμα Box-Whisker όπου εκτός τα προσομοιωμένα αποτελέσματα χλωροφύλλης –α (συνεχής γραμμή) παρουσιάζεται και στατιστική πληροφορία (εύρος τιμών, ελάχιστη και μέγιστη τιμή, ενδιάμεση τιμή, τεταρτημόρια) για τα δεδομένα πεδίου με μορφή κάθετης μπάρας για κάθε τιμή πεδίου (από Triantafyllou et al. 2001).

Στατιστικές μέθοδοι κατά τη διαδικασία επαλήθευσης μοντέλων χρησιμοποιούνται σπανιότερα στη βιβλιογραφία, και περιλαμβάνουν στατιστικά τεστ όπως το t-τεστ, ανάλυση συσχέτισης και παλινδρόμησης προσομοιωμένων – πειραματικών τιμών (Mayer and Butler 1993, Power 1993), αλλά και μη παραμετρικές πολυμεταβλητές τεχνικές (π.χ. Multi-dimensional scaling ordination - MDS) και τεχνικές δανεισμένες από συναφή με τις γεωεπιστήμες πεδία (Self – Organising Map – SOM) (Allen et al. 2007).

Στο Παράρτημα 1 δίνεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα υπολογισμού της επιτυχίας προσαρμογής αποτελεσμάτων μοντέλου σε δεδομένα πεδίου: πρόκειται για την μέθοδο εκτίμησης προσαρμογής που έχει προταθεί από τους Hoop et al. (1992) και έχει ενσωματωθεί στο περιβάλλον ανάπτυξης οικολογικών μοντέλων SENECA. Τέλος, στο κεφάλαιο 7 «Επαλήθευση και εκτίμηση ικανότητας μοντέλου προσομοίωσης» αξιολογείται η ικανότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή, με την εφαρμογή ποιοτικών/γραφικών τεχνικών επαλήθευσης και τον υπολογισμό μέτρων ποσοτικοποίησης του σφάλματος των φυσικών και οικολογικών προσομοιωμένων μεταβλητών.



## 2.2.5. Η χωρική διάσταση

### Μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (0-D) – box models

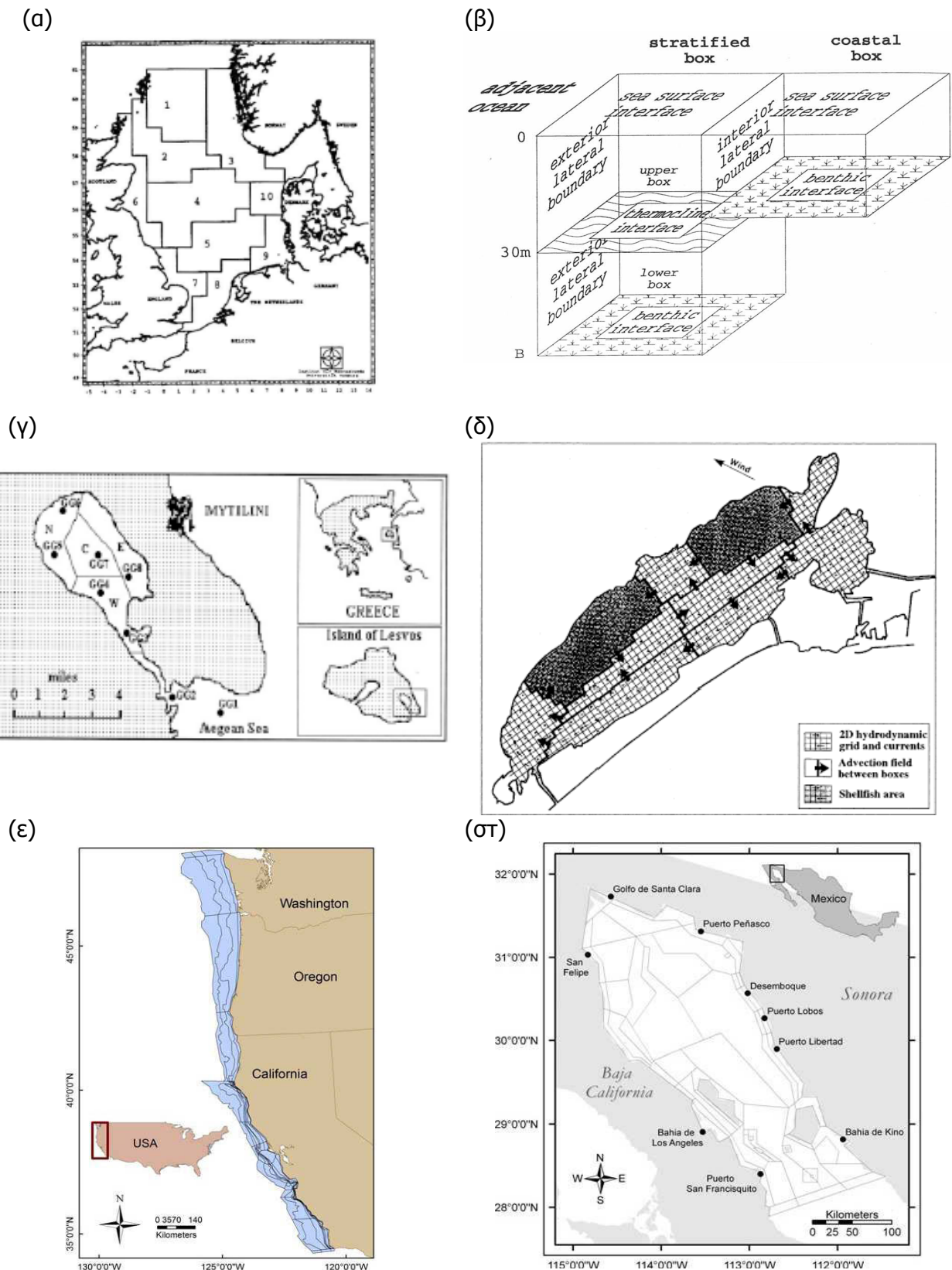
Στα μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (0-D), γίνεται η παραδοχή ότι ένα σύστημα δεν έχει χωρικές διαφοροποιήσεις και μελετάται η μεταβολή του μόνο ως προς το χρόνο, όπως για παράδειγμα το οικοσύστημα ενός εργαστηριακού μικρόκοσμου ή το οικοσύστημα μιας θαλάσσιας περιοχής που θεωρείται ομογενής ως προς κάποια μεγέθη, η μεταβολή των οποίων στο χώρο δεν απασχολεί τον ερευνητή και θέλει να απομονώσει. Αποτελεί την πιο απλή μορφή οικολογικού μοντέλου και αυτό μεταφράζεται σε σχετική ευκολία στην εφαρμογή (implementation) και σε μικρό χρόνο προσομοίωσης. Για την εφαρμογή τέτοιων μοντέλων δεν απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού, καθώς υπάρχουν έτοιμα, φιλικά προς τον χρήστη πακέτα στο περιβάλλον των οποίων γίνεται εύκολα η ανάπτυξη και εφαρμογή του μοντέλου (π.χ. VisSim, STELLA, SENECA). Το σύστημα των εξισώσεων του μοντέλου αποτελείται από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (καθώς έχουμε μεταβολή μόνο ως προς το χρόνο  $t$ ), ο χρόνος ολοκλήρωσης του οποίου είναι της τάξεως των λίγων δευτερολέπτων – λεπτών. Προφανές μειονεκτήματα της προσέγγισης είναι η υπερ-απλούστευση ενός οικοσυστήματος, με την αφαίρεση κάθε χωρικής διαφοροποίησης των μεταβλητών κατάστασης, γεγονός που τα καθιστά ανεπαρκή εργαλεία για την εμβάθυνση στις λειτουργίες ενός οικοσυστήματος (Nihoul 1999). Ωστόσο η λεπτομέρεια και η πολυπλοκότητα στις βιογεωχημικές διεργασίες μπορεί να είναι πολύ αυξημένη (Fennel and Neumann 2004). Τα μοντέλα μηδενικών διαστάσεων συνεχίζουν να αναπτύσσονται, κυρίως ως πρώτη προσέγγιση και ως προπομποί περισσότερο εξελιγμένων και περίπλοκων μοντέλων.

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, γειτνίαση 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  $\text{Km}^2$  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 2.15δ).

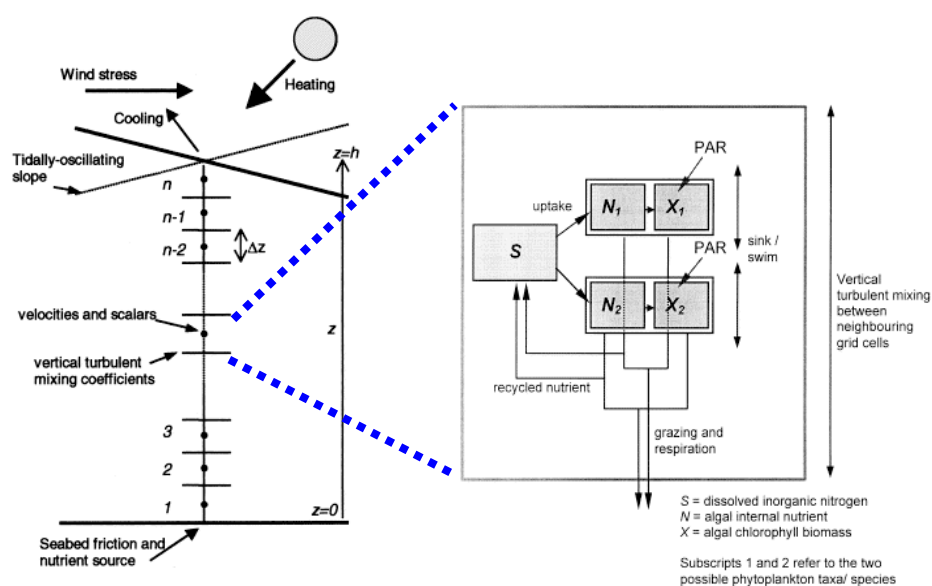
Τα μειονεκτήματα του διαχωρισμού μιας περιοχής σε διαμερίσματα είναι η δημιουργία τεχνητά-αριθμητικά ενισχυμένων ροών ανταλλαγής μεταξύ των διαμερισμάτων και η αδυναμία περιγραφής φαινομένων της στήλης νερού, όπως ο σχηματισμός μέγιστων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης (OSPAR Commission 2008). Βεβαίως, όσο 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 κατατμηθεί 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 2.15ε-στ, Fulton et al. 2010, Ainsworth et al. 2012, Macias et al. 2012) κυρίως για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας.



**Σχήμα 2.15.** (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 Θαυ, 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).

### 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 2.16.** 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 εύφωτη ζώνη ανοργανοποιούνταν σε αμμωνιακά, που μετατρέπονταν με οξειδωση 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).

### 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 FYFY 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

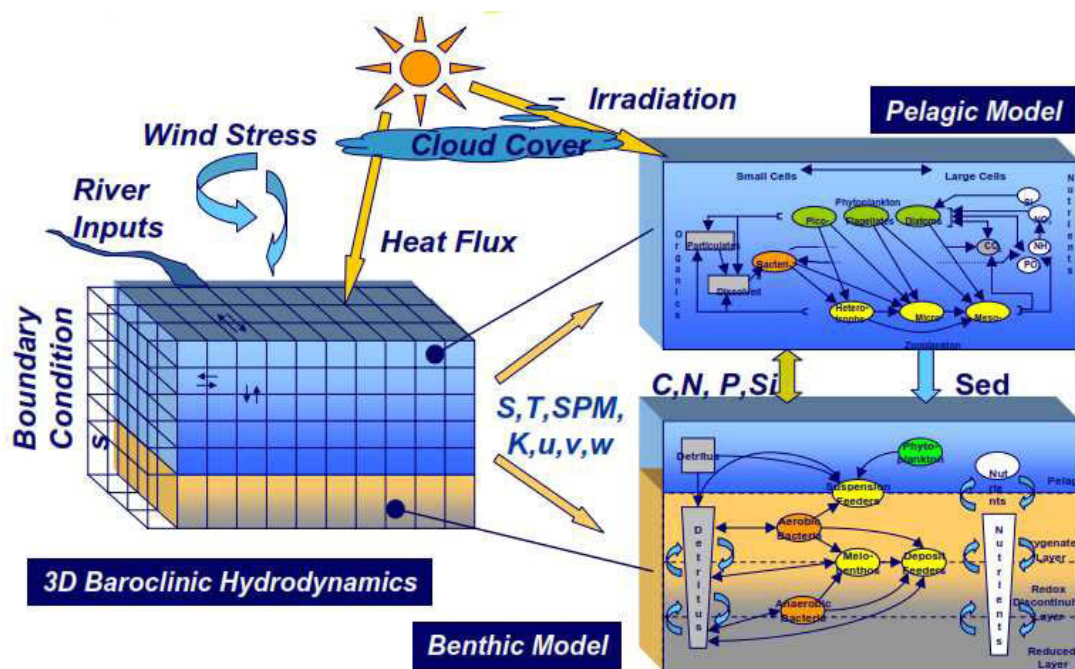
τοξικών φυτοπλαγκτονικών εξάρσεων (HAB, harmful algal blooms) στην ευρύτερη περιοχή της Βόρειας Θάλασσας και την πιο μικρής κλίμακας εφαρμογή των Arndt et al. (2011), οι οποίοι διερεύνησαν τη ροή και το μετασχηματισμό άνθρακα και θρεπτικών στο ρηχό παράκτιο σύστημα των εκβολών Scheldt μεταξύ νοτιοδυτικής Ολλανδίας και Βελγίου.



## 2.3. Συζευγμένα υδροδυναμικά – οικολογικά μοντέλα τριών διαστάσεων.

### 2.3.1. Εισαγωγή

Σκοπός των συζευγμένων υδροδυναμικών – οικολογικών μοντέλων (ή αλλιώς των τρισδιάστατων 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, που περιγράφηκαν νωρίτερα, 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 2.17.** Σχηματική αναπαράσταση ενός συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος με τρεις συνιστώσες - υπομοντέλα: υδροδυναμικό μοντέλο– οικολογικό μοντέλο υδάτινης στήλης – οικολογικό μοντέλο βένθους (Holt, 2004).

Ήδη στην ενότητα 2.2, με τις αναφορές στα 1-D και 2-D οικολογικά μοντέλα, εισήχθη η έννοια της σύνδεσης των φυσικών – υδροδυναμικών διεργασιών με τις βιοχημικές διεργασίες ενός οικοσυστήματος. 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 παλίρροιες, 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 ζωοπλαγκτού 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 περιγράφει όσο το δυνατόν πιστότερα τις φυσικές συνθήκες και τις μεταβολές τους (James 2002).

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα (ενότητα 2.2), 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:

- (1) βιοχημικές διεργασίες της στήλης νερού (π.χ. πρόσληψη θρεπτικών από φυτοπλαγκτόν),
- (2) περιγραφή της μεταβολής του φωτός κάτω από την επιφάνεια (για τους όρους ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού),
- (3) περιγραφή των αλληλεπιδράσεων στο τροφικό πλέγμα (σχέσεις μεταξύ φυτών, μεταξύ ζώων, σχέσεις φυτών-ζώων, μικροβιακός κύκλος),

- (4) ανταλλαγές ύλης με το εξωτερικό περιβάλλον (εισροές θρεπτικών, οργανικής-σωματιδιακής ύλης από τη στεριά, την ατμόσφαιρα, παροχές ποταμών, οριακές συνθήκες),
- (5) σύνδεση των διεργασιών στο ίζημα (βιολογικές-γεωλογικές) με τη στήλη του νερού,
- (6) αναδράσεις (feedbacks) και μεταβολές στα οικοσυστήματα λόγω κλιματικών αλλαγών (μεταβολές στους βιολογικούς πόρους και διαχείριση τους, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και οξίνιση των ωκεανών),
- (7) 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 2.17).

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 2.18, 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

‘άνθρωπογενούς’ διοξειδίου του άνθρακα στους ωκεανών (π.χ. Le Qué   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).

	Hydrodynamic Models	Ecological Models	Computer Power
1960	2d tide and surge model development	Box models	kiloflops
1970	Bryan ocean model		
	Surge models operational		Megaflops Cray 1 Vector processing
1980	3d baroclinic shelf model development		
	Blumberg and Mellor (POM) model	1d shelf models and mixed-layer models	
1990		Box/coarse grid models with many variables (ERSEM)	Gigaflops Cray C90/T3D/T3E Parallel processing
2000	3d baroclinic shelf models operational	Linking to fine-grid 3d hydrodynamic models	Massively parallel clusters
			Teraflops
201?		Operational ecological models	

**Σχήμα 2.18.** 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 Coppini 2010, ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε 2013 [http://poseidon.hcmr.gr/ecological\\_forecast.php](http://poseidon.hcmr.gr/ecological_forecast.php)).

Περισσότερες εργασίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2, όπου δίνεται έμφαση σε μελέτες που δημοσιεύτηκαν από το 2000 και μετά. Πληρέστερη ανασκόπηση 3D μοντέλων οικοσυστήματος πριν το 2000 μπορεί να βρεθεί στους Hofmann and Lascara (1998) και Moll and Radach (2001, 2003).

### **2.3.2. 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 (2.11). 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):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - (w + w_s) \frac{\partial C}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left. \frac{dC}{dt} \right|_{\text{biochem}} \quad (2.11)$$

---

*Μεταφορά – Advection*

*Καθίζηση - Sinking*

*Τυρβώδης Διάχυση*

*Turbulent Diffusion*

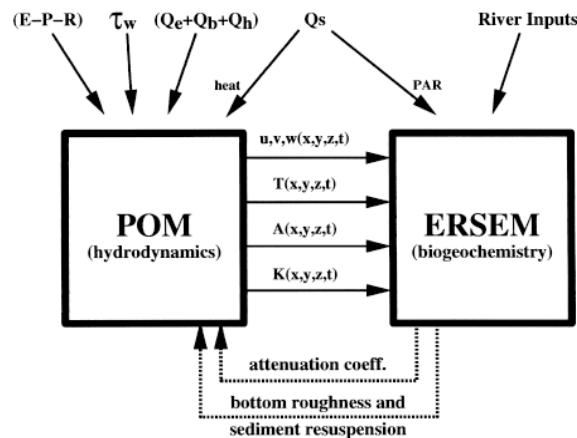
όπου το  $C$  αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση της μεταβλητής κατάσταση (θρεπτικά, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτήρια, κτλ),  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι οριζόντιες και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του νερού που υπολογίζονται από το υδροδυναμικό μοντέλο,  $D_h$  και  $D_z$  οι συντελεστές οριζόντιας 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  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_{\text{biochem}}$ .

Τα δυο μοντέλα συνήθως επιλύονται (εκτελούνται) ταυτόχρονα και η ολοκλήρωση της εξίσωσης (2.11) 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 2.19): 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 2.19.** Σχηματική διαδικασία σύζευξης ενός υδροδυναμικού με ένα οικολογικό μοντέλο (από Zavatarelli et al. 2000)

Στο Σχήμα 2.18 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 μειονεκτήματα 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).

**Πίνακας 2.1.** Ποσοτικά (στατιστικά) μέτρα καλής προσαρμογής (ή μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος) που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία.

Όνομα	Έκφραση	Περιγραφή	Προτεινόμενη Κλίμακα	Βιβλιογραφική Αναφορά
Συνάρτηση κόστους (cost function)	$CF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ M_i - D_i }{\sigma_D}$	Δίνει ένα αδιάστατο αριθμό, που ποσοτικοποιεί την διαφορά (ή απόκλιση) των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ με τα πειραματικά δεδομένα $D_i$ . Η διαφορά αυτή διαιρείται με την τυπική απόκλιση $\sigma_D$ των πειραματικών δεδομένων για να προτυποποιηθεί (συνολικά $n$ διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα). Ο λόγος της διαφοράς μοντέλου-πειρ. δεδομένων προς την διασπορά των πειρ. δεδομένων.	Όσο πιο κοντά στο μηδέν η τιμή της συνάρτησης, τόσο καλύτερη προσαρμογή:  $CF < 1$ = πολύ καλή, $1 - 2$ = καλή $2 - 5$ = μέτρια $> 5$ = κακή (Allen et al. -2007)	Soiland and Skogen (2000) Moll and Radach (2001) Allen et al. (2007)
Μέσο Σφάλμα (Mean error ή Bias)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - D_i)$	Το άθροισμα των διαφορών (ή αποκλίσεων) των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ με τα πειραματικά δεδομένα $D_i$ , διαιρεμένο με τον διαθέσιμο αριθμό πειραματικών δεδομένων $n$ .		Mayer and Butler (1993) Nittis et al. (2001)
Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)	$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - D_i)}{\sum_{i=1}^n D_i}$	Το άθροισμα των διαφορών (ή αποκλίσεων) των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ με τα πειραματικά δεδομένα $D_i$ προς το άθροισμα των πειραματικών δεδομένων για προτυποποίηση. Μετράει κατά πόσο το μοντέλο υπο- ή υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα.	Όσο πιο κοντά στο μηδέν, τόσο καλύτερη προσαρμογή:  $ PBIAS  < 10$ = εξαιρετική, $10 - 20$ = πολύ καλή $20 - 40$ = καλή $> 40$ = κακή	Allen et al. (2007)
% σύγκλιση (Percentage Bias score)	$BIASscore = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{D_i}$	Το άθροισμα των λόγων των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ προς τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα $D_i$ , διαιρεμένο με τον διαθέσιμο αριθμό πειραματικών δεδομένων $n$ .	Όσο πιο κοντά στο 100%, τόσο καλύτερη προσαρμογή.	Nittis et al. (2001)
RMS σφάλμα	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - D_i)^2}{n}}$	Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (ή αποκλίσεων) των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ με τα πειραματικά δεδομένα $D_i$ διαιρεμένα με τον διαθέσιμο αριθμό πειραματικών δεδομένων $n$ . Το τετράγωνο των σφαλμάτων ανταμείβει την καλή προσαρμογή και 'τιμωρεί' την κακή.		Mayer and Butler (1993) Nittis et al. (2001) Moll and Radach (2001) Holt et al. (2005) Allen et al. (2007)
Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)	$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - D_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{D} - D_i)^2}$	Μετράει το λόγο του σφάλματος του μοντέλου (διαφορές των αποτελεσμάτων του μοντέλου $M_i$ με τα πειραματικά δεδομένα $D_i$ ) προς την μεταβλητότητα των πειραματικών δεδομένων ( $\bar{D} - D_i$ ), όπου $\bar{D}$ η μέση τιμή. Το τετράγωνο των σφαλμάτων ανταμείβει την καλή προσαρμογή και 'τιμωρεί' την κακή. Αδιάστατος δείκτης.	$ME > 0.65$ = εξαιρετική, $0.65 - 0.5$ = πολύ καλή $0.5 - 0.2$ = καλή $< 0.2$ = κακή (Allen et al. -2007)	Mayer and Butler (1993) Allen et al. (2007)



**Πίνακας 2.2.** Χαρακτηριστικά Τρισδιάστατων μοντέλων θαλάσσιου οικοσυστήματος (με έμφαση από το 2000 και μετά).

Συνομογραφίες: P: φυτοπλαγκτόν, B: βακτήρια, N: Διαλυμένο ανόργανο άζωτο, D: θρύμματα, B<sub>n</sub>: βενθικό άζωτο, BD: βενθικά θρύμματα, L<sub>T</sub>: Θολερότητα, P1: διάτομα, P2: αυτότροφα μαστιγώτα, P3: νανο-μαστιγώτα, P4: κυανοβακτήρια, Z1: μικρο-ζωοπλαγκτόν, Z2: μεσο-ζωοπλαγκτόν, PS: σωματιδιακό πυρίτιο, POM: σωματιδιακή οργανική ύλη, DOM: διαλυτή οργανική ύλη, DO: διαλυμένο οξυγόνο, BOD: βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο, DOP: διαλυμένος οργανικός φώσφορος.

Περιοχή	Μοντέλο Κυκλοφορίας	Μοντέλο Οικολογίας	Χωρική / Χρονική κλίμακα	Σκοπός	Επαλήθευση – εκτίμηση ικανότητας	Συγγραφείς - Αναφορά
Ατλαντικός Mid-Atlantic Bight	Βαροτροπικό, 3 στρώματα	NO <sub>3</sub> , P	100s Km (3x3Km), εποχή	Εαρινή έξαρση, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων		Walsh et al. (1988)
Θάλασσα Bering	Πρωτογενείς εξισώσεις (GHER)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , P, Z, D	100s Km, εποχή	Ροές N και C, Εξήγηση δεδομένων πεδίου		Nihoul et al. (1993)
Ευρύτερη Βόρεια Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , P(P1, P2), D, L <sub>T</sub>	100s Km (20x20Km, 11 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	Πρωτογενής παραγωγή, Μεταφορά ύλης, σενάρια	Γραφική, εν μέρει	Skogen et al. (1995)
<b>NORWECOM</b>						
Μαύρη Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις (GHER)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , P(P1, P2,P3), Z(Z1,Z2), B, PS, POM, DOM	100s Km (15x15Km, 25 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	εφαρμογή μοντέλου, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων		Gregoire et al. (1998)
English Channel (Βόρεια Θάλασσα)	Οριζόντια υπολειμματική κυκλοφορία + κατακόρυφο θερμικό μοντέλο	Διαλυμένο, σωματιδιακό και βενθικό N, Si και Φωσφόρος, P(P1,P2) (13 μεταβλητές)	100s Km, (2x2 νμ, 10 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος (1h)	Πρωτογενής παραγωγή, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων	Γραφική, εν μέρει	Hoch and Garreau (1998)
Μεσόγειος	Πρωτογενείς εξισώσεις (MOM)	N, P, D	100s Km, (1/4°x1/4°, 31 z-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος (2400s)	Κύκλος N, επίδραση κυκλοφορίας, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων	Ποιοτική, δορυφορικές εικόνες Chl	Crispi et al. (1998, 1999)
Βόρεια Θάλασσα, Southern Bight	Πρωτογενείς εξισώσεις	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , φυτοπλαγκτονικός C και N, θρυμματικός C και N, ζωοπλαγκτονικό N	100s Km, (1/10°x1/15°, 20 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος (600s)	εφαρμογή μοντέλου, ευτροφισμός	Γραφική	Luyten et al. (1999)
<b>COHERENS</b>						
Αδριατική (ιδεατή)	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό τροφικό δίκτυο (ERSEM) 27 μεταβλητές	100s Km (25x25Km, 10 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος (4370s)	Μεθοδολογία σύνδεσης και εφαρμογή μοντέλου, Πρωτογενής παραγωγή, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων	Γραφική	Zavatarelli et al (2000)
Βορειοδυτικός Ατλαντικός (ιδεατή)	Πρωτογενείς εξισώσεις (MICOM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , P, Z, B, D, DON (FDM)	100s Km (2x2Km), Ετήσιος κύκλος	Επίδραση ωκεάνιων σχηματισμών στο οικοσύστημα, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων		Spall and Richards (2000)

Περιοχή	Μοντέλο Κυκλοφορίας	Μοντέλο Οικολογίας	Χωρική / Χρονική κλίμακα	Σκοπός	Επαλήθευση – εκτίμηση ικανότητας	Συγγραφείς - Αναφορά
Ευρύτερη Βόρεια Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , P(P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> ), D, L <sub>T</sub>	100s Km	Σύγκριση 2 μοντέλων, ποσοτικοποίηση διακύμανσης πρωτογενούς παραγωγής		Skogen and Moll (2000)
	<b>NORWECOM</b>		20x20Km, 12 σ-επίπεδα και			
	Πρωτογενείς εξισώσεις	PO <sub>4</sub> , P, BD	20x20Km, 19 επίπεδα Υπερ-ετήσια περίοδος			
	<b>ECOHAM1</b>					
Βαλτική	Πρωτογενείς εξισώσεις (MOM2.2) με ελεύθερη επιφάνεια	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>4</sub> , Z, O <sub>2</sub> , D, BD	100s Km (3x3 ν.μ.), πάνω από 12 z-επίπεδα, Ετήσιος κύκλος	Εκτίμηση ισοζυγίων και ροές N και O <sub>2</sub> διαδοχή φυτ. ειδών, απομάκρυνση N στην παράκτια ζώνη		Neumann (2000)
Μαύρη Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις (GHER)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , P, Z, O <sub>2</sub> , D, B <sub>n</sub>	100s Km (5x5Km, 25 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	Ποσοτικοποίηση ισοζυγίων O <sub>2</sub> , N, Αερισμός, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων		Gregoire and Lacroix (2001)
Βορειοδυτικός Ατλαντικός, Κόλπος Maine	Πρωτογενείς εξισώσεις (ECOM-si από POM)	N, P, Z	100s Km (1.5~20Km καμπυλόγραμμο, 31 σ-επίπεδα), Παλιρροιακός κύκλος (414s)	Αναπαραγωγή κατανομών πλαγκτού-θρεπτικών που οδηγούνται από φυσικούς μηχανισμούς	Ποιοτική, δορυφορικές εικόνες Chl	Franks and Chen (2001)
Παγασητικός Κόλπος, Αιγαίο	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό τροφικό δίκτυο (ERSEM)	10s Km ετήσιος κύκλος	Επίδραση σημειακών πηγών θρεπτικών στο παράκτιο οικοσύστημα	Γραφική	Triantafyllou et al. (2001)
Βόρεια Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις, σ-συντεταγμένες (POL3DB)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό και βενθικό τροφικό δίκτυο (ERSEM)	100s Km (~12Km), εποχή (φυσική 400s, οικολογία 1200s)	Εφαρμογή μοντέλου με μεγάλη διακριτική ικανότητα (χωρική-τροφική), Εαρινή έξαρση	Γραφική	Allen et al. (2001)
	<b>POL3dERSEM</b>					
Μεσόγειος, Κρητικό Πέλαγος	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό τροφικό δίκτυο (ERSEM)	100s Km (1/20°x1/20°, 30 σ-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	Πρωτογενής, βακτηριακή παραγωγή	Cost function	Petihakis et al. (2002)
Μεσόγειος	Πρωτογενείς εξισώσεις	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , ultra-P, net-P, Z, B, D, O <sub>2</sub> , DOM	100s Km, (1/4°x1/4°, 31 z-επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	Κύκλος φωσφόρου και αζώτου, συσχέτιση τροφικής βαθμίδας δυτικής-ανατολικής λεκάνης με φυσικούς μηχανισμούς	Εν μέρει, στατιστική συσχέτιση με δορυφορικές εικόνες Chl	Crispi et al. (2002)
	<b>ECHYM</b>					
Ιαπωνία Κόλπος Hakana	Πρωτογενείς εξισώσεις	14 μεταβλητές (...NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , P, DO, DON, BOD...)	10s Km (250x250m, 5 επίπεδα), Ετήσιος κύκλος	Ποιότητα νερών, Μεταφορά και τύχη ρυπαντών	Γραφικά	Shen et al. (2002)

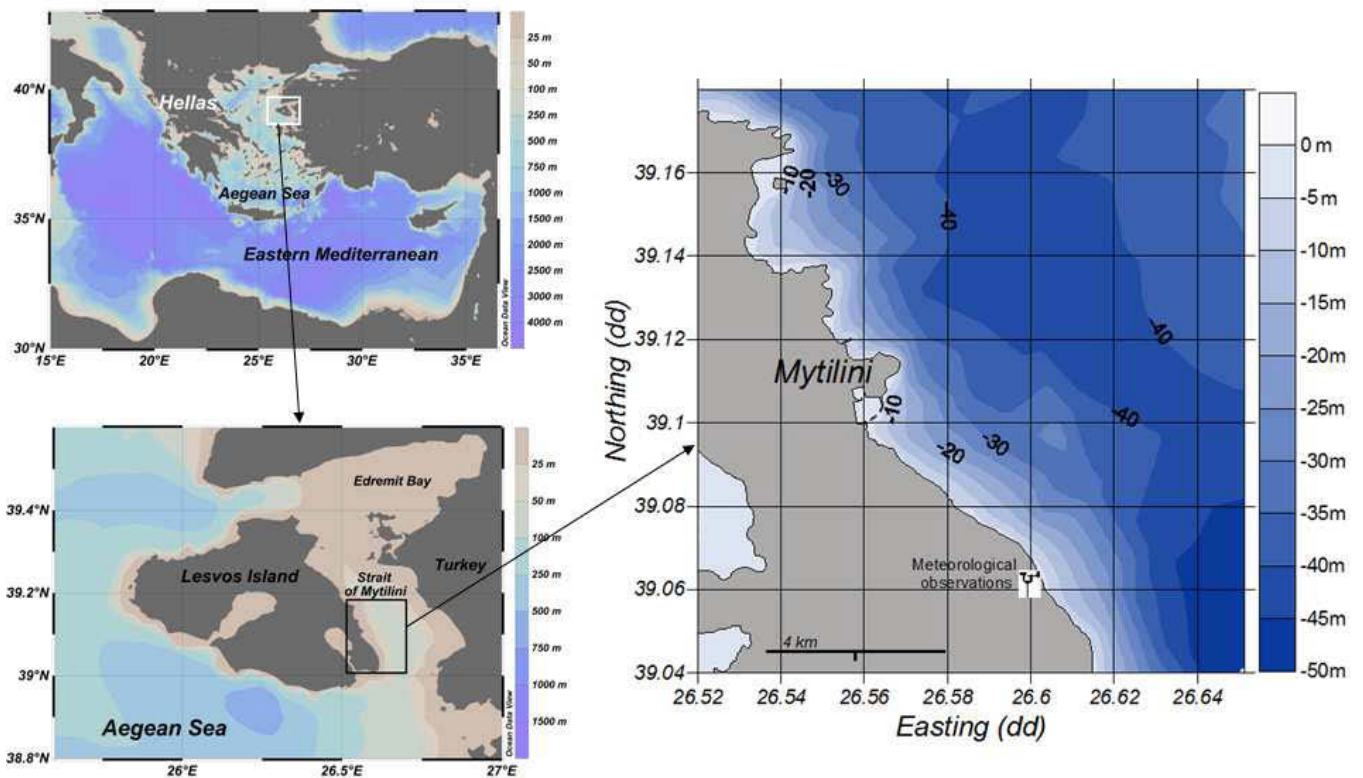
Περιοχή	Μοντέλο Κυκλοφορίας	Μοντέλο Οικολογίας	Χωρική / Χρονική κλίμακα	Σκοπός	Επαλήθευση – εκτίμηση ικανότητας	Συγγραφείς - Αναφορά
Ιβηρικές ακτές (BA Ατλαντικός)	Πρωτογενείς εξισώσεις	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , P(P1, P2), Z(Z1,Z2), D(Ds,Di),	100s Km (10 Km και 3 Km, 23 επίπεδα), εποχή	Κατανόηση αλληλεπιδράσεων, Ροές C, Παραγωγικότητα κατά την περίοδο ανάβλυσσης νερού	ποιοτική	Slagstad and Wassmann (2002)
Αραβική Θάλασσα, Ινδικός Ωκεανός	Πρωτογενείς εξισώσεις (MOM)	N, P, Z, D	1000s Km 35 z-επίπεδα, Μέσος ετήσιος κύκλος	Εποχική μεταβλητότητα οικοσυστήματος, Κατανόηση αλληλεπιδράσεων	Γραφικά	Kawamiya and Oschlies (2003)
Θάλασσα Bohai, Κίνα	Πρωτογενείς εξισώσεις (HAMSOM)	N, PO <sub>4</sub> , P, B <sub>D</sub> , (και έμμεσα Z, D, DOP)	100s Km (1/12 <sup>0</sup> x 1/12 <sup>0</sup> ) 10 z-επίπεδα), ετήσιος κύκλος	Κατανόηση αλληλεπιδράσεων, ισοζύγιο C και θρεπτικών, μελέτη ετήσιου κύκλου		Wei et al (2004)
	<b>ECOHAM1</b>					
Βαλτική	Πρωτογενείς εξισώσεις (MOM 3)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , P(P1,P2,P4), Z, D, O <sub>2</sub>	100s Km (3~9 ν.μ., 77 z-επίπεδα), Υπερ-ετήσια περίοδος	Ευτροφισμός, ανάλυση σεναρίων, διαχειριστικό εργαλείο	Γραφική	Neumann and Schernewski (2005)
Ευρύτερη Βόρεια Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις, σ-συντεταγμένες (POLCOMS)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό και βενθικό τροφικό δίκτυο (ERSEM) 52 μεταβλητές	100s Km (~7Km, 20 σ-επίπεδα), 14 μήνες	Ποσοτικοποίηση σφαλμάτων των φυσικών και οικολογικών μεταβλητών του μοντέλου	Cost function, σφάλμα RMS, Μέσο σφάλμα, Model Efficiency, Model bias, Γραφικά, στατιστική	Holt et al. (2005) Allen et al.(2007a) Allen et al.(2007b)
	<b>POL3dERSEM</b>					
Μεσόγειος Θάλασσα	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό κατώτερο τροφικό πλέγμα (ERSEM)	100s Km (1/10 <sup>0</sup> x 1/10 <sup>0</sup> ) 24 σ-επίπεδα)	Πρόγνωση φυσικών και οικολογικών μεταβλητών στήλης νερού σε επιχειρησιακό επίπεδο		ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε (2013) <a href="http://poseidon.hcmr.gr/ecological_forecast.php">http://poseidon.hcmr.gr/ecological_forecast.php</a>
Παγασητικός Κόλπος, Ν. Μαγνησίας, Αιγαίο	Πρωτογενείς εξισώσεις (POM)	NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>4</sub> , Πελαγικό κατώτερο τροφικό πλέγμα (ERSEM)	O(1-10km) (1/100 <sup>0</sup> x 1/100 <sup>0</sup> , 25 σ-επίπεδα) ετήσια περίοδος	Αφομοίωση δεδομένων  Διερεύνηση επίδρασης αποβλήτων ιχθυοκαλλιεργειών	Cost function	Korres et al. 2012  Petihakis et al. 2012

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Περιοχή μελέτης

#### 3.1. Στενό Μυτιλήνης και παράκτια περιοχή της πόλης της Μυτιλήνης.

Το Στενό της Μυτιλήνης είναι η θαλάσσια περιοχή μεταξύ των ανατολικών ακτών της Λέσβου και των απέναντι τουρκικών ακτών της Μ. Ασίας, οριοθετείται μεταξύ γεωγραφικού πλάτους  $39^{\circ}$  και  $39^{\circ} 25'$  περίπου και ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του Βόρειο-ανατολικού Αιγαίου (Σχήμα 3.1). Το μέσο πλάτος του Στενού είναι περίπου 18Km στο μεγαλύτερο μέρος του, ενώ τα μέγιστα βάθη, στο βόρειο τμήμα του, ξεπερνούν τα 60m. Ο πυθμένας εμφανίζεται γενικά ομαλός, χωρίς απότομες εξάρσεις και καλύπτεται με πληθυσμούς Ποσειδωνίας.



**Σχήμα 3.1.** Η παράκτια περιοχή της πόλης της Μυτιλήνης (περιοχή μελέτης) και το ευρύτερο γεωγραφικό πλαίσιο.

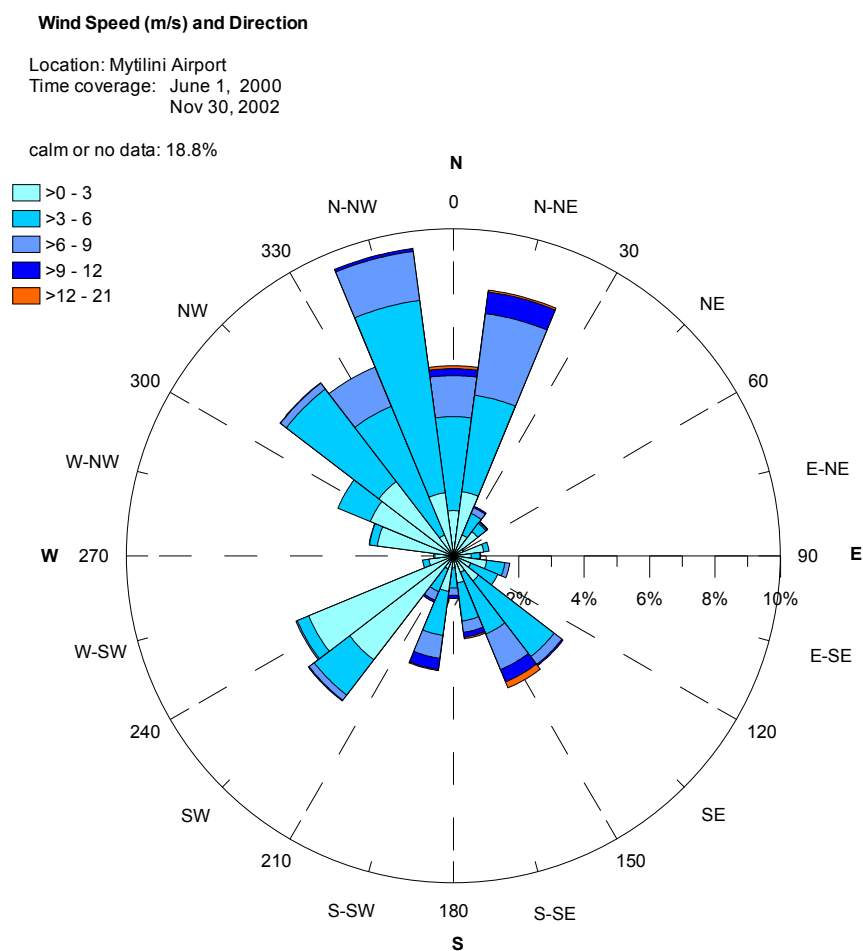
Η πόλη της Μυτιλήνης βρίσκεται στην ανατολική ακτή της νήσου Λέσβου (Σχήμα 3.1), με πληθυσμό λίγο πάνω από 27.000 κατοίκους, ενώ ο ευρύτερος δήμος Μυτιλήνης αριθμούσε περίπου 36.000 κατοίκους την περίοδο της έρευνας (πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ., απογραφή 2001), αριθμός ο οποίος αυξάνει κατά τους θερινούς μήνες λόγω τουρισμού. Ο λιμένας της Μυτιλήνης, με εμβαδόν που εκτιμάται στα  $0.66 \text{ Km}^2$ , μέσο βάθος 6m και συνολικό όγκο περίπου  $3.96 \times 10^6 \text{ m}^3$ , αποτελούσε έως τις αρχές της δεκαετίας του 2000 τον κύριο αποδέκτη μεγάλου μέρους των ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων και όμβριων υδάτων της πόλης. Από τους 25 συνολικά αγωγούς του δικτύου, 17 αποχέτευαν κατευθείαν στο ημικλειστό σύστημα του λιμένα, προκαλώντας ρύπανση, δυσοσμία και δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για ανάπτυξη ευτροφικών φαινομένων (Τσιρτσής, 1994).

Το Δεκέμβριο του 2001 τέθηκε σε λειτουργία ο Σταθμός Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων στην περιοχή Μαυροβούνι ή Καρά Τεπέ, περίπου 2 km βόρεια της Μυτιλήνης. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διάθεσης λυμάτων δέχονται και επεξεργάζονται τα λύματα της πόλης της Μυτιλήνης ενώ η τελική διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται στη παρακείμενη θαλάσσια περιοχή, στο Στενό Μυτιλήνης. Μετρήσεις δείχνουν ότι με την επεξεργασία που υφίστανται τα λύματα, το οργανικό τους φορτίο μειώνεται έως και πάνω από 95%, για τα ανόργανα θρεπτικά (αμμωνιακά, νιτρικά και νιτρώδη άλατα) η απομάκρυνση κυμαίνεται από 70% - 80%, ενώ για τα φωσφορικά το ποσοστό είναι της τάξης του 30% (Χύτα, 2003). Τα επεξεργασμένα λύματα διατίθενται στη θάλασσα μέσω υποθαλάσσιου αγωγού μήκους 450m με διαχυτήρα στην άκρη (τα τελευταία 42m), που εκβάλλει σε μέσο βάθος 14.5m, στην περιοχή του σταθμού δειγματοληψίας M4 της παρούσας εργασίας (Σχήμα 3.1). Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στη μελέτη Μαχαίρα (1995).

### **3.2. Μετεωρολογία**

Όπως προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) που προέρχονται από τον αερολιμένα Μυτιλήνης (περίπου 7km νότια της πόλης, Σχήμα 3.1) και καλύπτουν την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002, οι επικρατούσες διευθύνσεις από τις οποίες έπνεε ο άνεμος στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης (ποσοστό 39%) ήταν η βορειοδυτική, η βόρεια και η βορειοανατολική, από  $330^{\circ}$  έως  $+15^{\circ}$ .

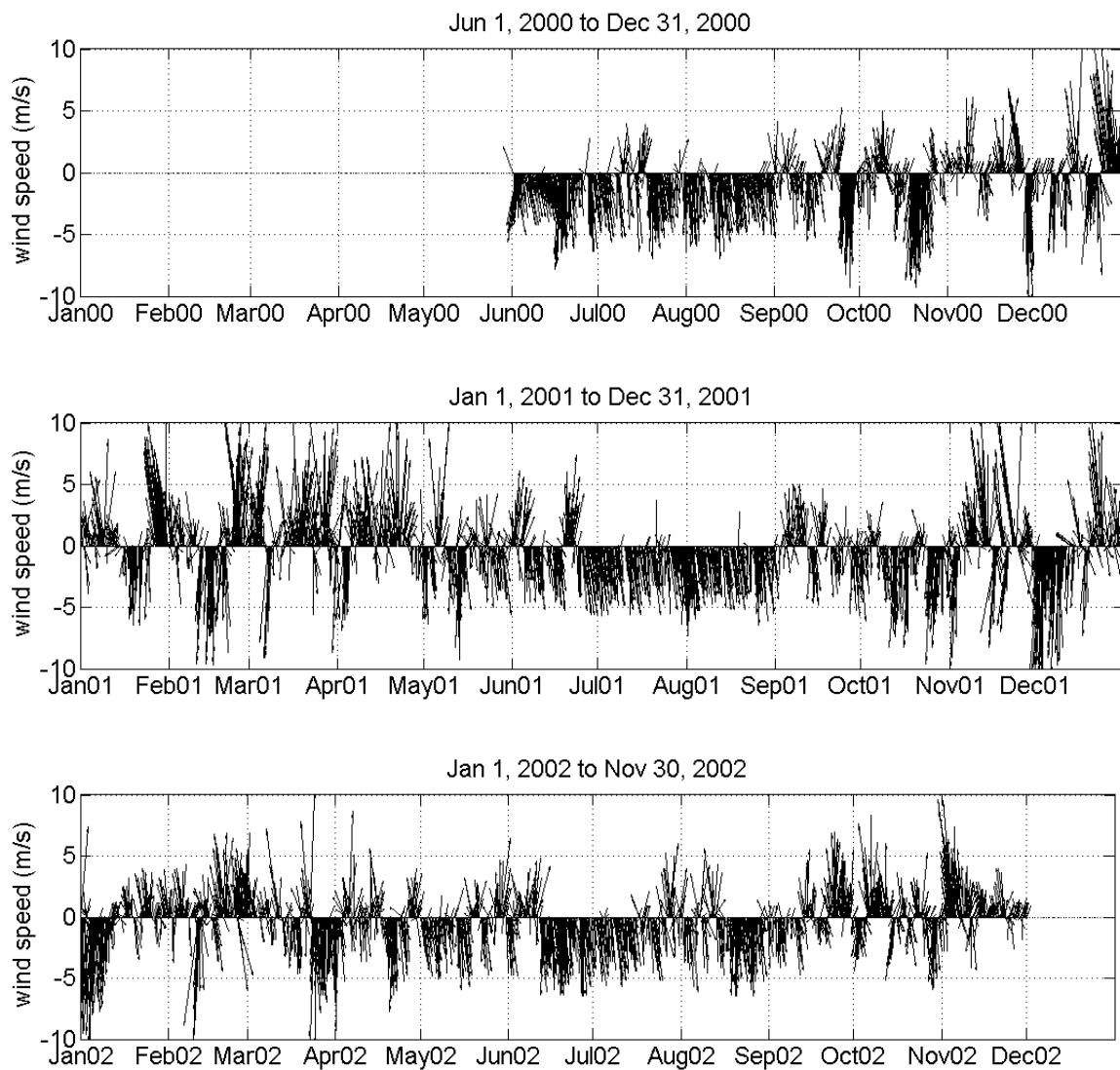
Ακολουθούν η νοτιοανατολική ( $135^{\circ}$ - $150^{\circ}$ - $165^{\circ}$ ) με ποσοστό 11% και η νοτιοδυτική διεύθυνση ( $225^{\circ}$ - $240^{\circ}$ ) με 11% (Σχήμα 3.2). Το μεγαλύτερο ποσοστό ταχυτήτων ήταν μέχρι 6 m/s, ενώ οι ισχυρότεροι άνεμοι είχαν βόρεια-βορειοανατολική και νοτιοανατολική διεύθυνση, πιθανώς λόγω γεωμορφολογίας της ευρύτερης περιοχής. Στο Σχήμα 3.3 δίνεται η μεταβολή του ανύσματος του ανέμου (διεύθυνση και μέτρο) συναρτήσει του χρόνου για την ίδια χρονική περίοδο. Είναι εμφανής η επικράτηση ανέμων από βόρειες διευθύνσεις κατά τους θερινούς μήνες.



**Σχήμα 3.2.** Ροδόγραμμα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, για την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.).

Ορισμένα βασικά μετεωρολογικά μεγέθη για την περιοχή, με τα στατιστικά τους, δίνονται στον Πίνακα 3.1. Κατά την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002, έπεσαν συνολικά

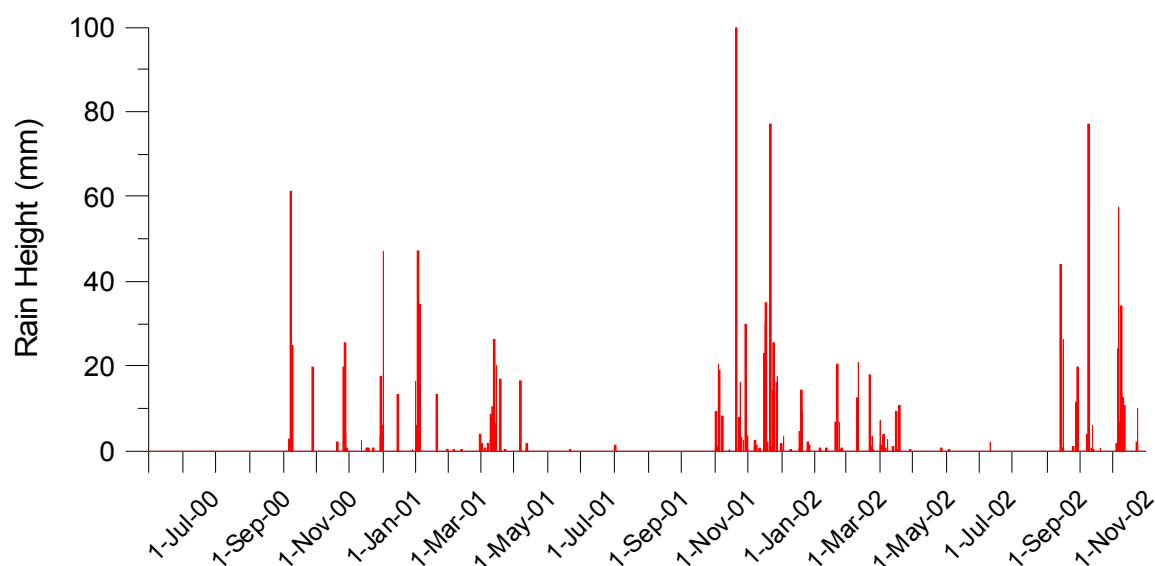
1538mm βροχής, με μέση τιμή 1.7mm/day (Σχήμα 3.4). Ήταν σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ της υγρής περιόδου, από Οκτώβριο-Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο-Μάιο, όπου έπεσε το σύνολο σχεδόν της βροχής και της ξηρής περιόδου, από Μάιο-Ιούνιο έως Σεπτέμβριο-Οκτώβριο, όπου γενικά επικράτησε ανομβρία.



**Σχήμα 3.3.** Μεταβολή συναρτήσει του χρόνου του ανύσματος του ανέμου (stick plot) για την περίοδο 1 Ιουνίου 2000 έως 30 Νοεμβρίου 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (μετρήσεις ανά 3 ώρες, πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)

**Πίνακας 3.1.** Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και εύρος θερμοκρασίας (°C), ατμοσφαιρικής πίεσης (bar) και σχετικής υγρασίας (%) για την περίοδο Ιούνιος 1, 2000 – Μάιος 31, 2002, όπως μετρήθηκε στο αεροδρόμιο Μυτιλήνης (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)

	<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Ατμοσφαιρική Πίεση (bar)</b>	<b>Σχετική υγρασία (%)</b>
Μέση τιμή	18.6	1015	68
Τυπική απόκλιση	7.3	5.9	13
εύρος	-1.0 – 39.6	991 - 1034	21 - 96



**Σχήμα 3.4.** Ύψος βροχής για την περίοδο Ιούνιος 2000 – Νοέμβριος 2002 (πηγή δεδομένων: Ε.Μ.Υ.)

### 3.3. Ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών στην περιοχή Στενού Μυτιλήνης

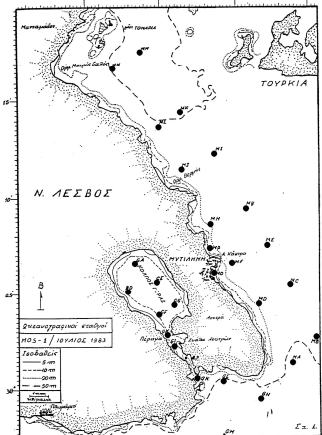

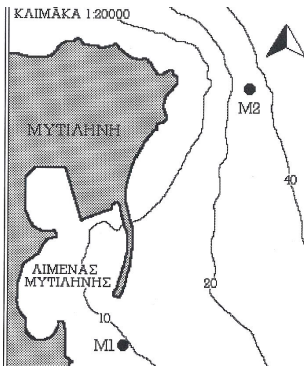
Τις τελευταίες 2 δεκαετίες περίπου, μια σειρά από έρευνες στην περιοχή του Στενού Μυτιλήνης, όπως το πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ρύπανσης στη Μεσόγειο 'MED POL' II και III και έρευνες σε επίπεδο διδακτορικής διατριβής, έδωσαν πληροφορία για αυτήν την θαλάσσια περιοχή, την ποιότητα νερών, τα τροφικά επίπεδα και την δυναμική της ως οικοσύστημα. Η ωκεανογραφική αυτή πληροφορία αφορά φυσικές μεταβλητές (θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα, διαφάνεια



νερού), χημικές μεταβλητές (συγκεντρώσεις θρεπτικών ανόργανων αλάτων – νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά, πυριτικά, φωσφορικά, διαλυμένο οξυγόνο), βιολογικές μεταβλητές (χλωροφύλλη-α, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, βακτηριοπλαγκτόν), παραμέτρους ιζήματος (κοκκομετρία, σύσταση, συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων) και βένθους (φυτοβένθος, ζωοβένθος), πετρελαιοειδή στη στήλη του νερού, ποιότητα νερών κολύμβησης (συγκεντρώσεις κολοβακτηριοειδών). Εμφανής είναι η έλλειψη δεδομένων για την ταχύτητα και την διεύθυνση του ρεύματος στο Στενό.

Στη συνέχεια γίνεται ανασκόπηση των συμπερασμάτων προηγούμενων μελετών στην περιοχή (Πίνακα 3.2). Ως πρώτη μελέτη στο Στενό αναφέρεται αυτή που διεξήχθη από Ιούλιο έως Σεπτέμβριο του 1983 από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφικών και Αλιευτικών Ερευνών (Ι.ΩΚ.Α.Ε., σημερινό ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) (Κατσική και Θεοχάρης 1983).

**Πίνακας 3.2.** Συστηματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο Στενό Μυτιλήνης (ενδεικτικά).

	<b>Κατσική και Θεοχάρης (1983)</b>	<b>Πρόγραμμα MED POL (π.χ. Angelidis 1998, Αλουρι et al. 2007)</b>	<b>Τσιρτσής (1994)</b>
<i>Περιοχή, Δίκτυο Σταθμών</i>	16 σταθμοί 	4 σταθμοί 	2 σταθμοί 
<i>Περίοδος, Συχνότητα δειγματοληψιών</i>	Σεπτέμβριος 1983, 1 πλους	1992 – 2004 (με διακοπές), εποχική	Απρ 1991 - Δεκ 1993, μηνιαία
<i>Μετρηθείσες μεταβλητές</i>	T, S, Z <sub>sd</sub> , ρεύματα, NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , DO, Chl-a, Ιζήματα: οργ. άνθρακας και μέταλλα, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, φυτοβένθος, ζωοβένθος	T, S, σ-t, Z <sub>sd</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , DO, Chl-a, πετρελαιοειδή (στήλη νερού), κοκκομετρία ιζήματος, βαρέα μέταλλα και πολυαρωματικοί υδρ/κες στο ιζήμα και στη σάρκα ψαριών	T, S, σ-t, Z <sub>sd</sub> , I <sub>d</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub> , DON, DO, Chl-a, φυτοπλαγκτόν (είδη), ολικά-ετερότροφα βακτήρια
<i>Σκοπός έρευνας</i>	Εκτίμηση ποιότητας και οικολογικής κατάστασης (για διάθεση αστικών λυμάτων στο Στενό)	Παρακολούθηση ποιότητας και επιπέδων ρύπανσης	Σχέσεις ανόργ. θρεπτικών – φυτοπλαγκτού –βακτηρίων - οργανικής ύλης σε εύτροφο παράκτιο αβαθές σύστημα που δέχεται αστικά απόβλητα

T: θερμοκρασία, S: αλατότητα, σ-t: πυκνότητα σίγμα-t, Z<sub>sd</sub> : βάθος εξαφάνισης δίσκου Secchi, I<sub>d</sub>: ένταση φωτεινής ακτινοβολίας, SS: αιωρούμενα στερεά, DON: διαλυτό οργανικό άζωτο

### 3.4. Φυσικές μεταβλητές και υδροδυναμική

Κατά την χειμερινή περίοδο και τις αρχές άνοιξης, επικρατεί καλή κατακόρυφη ανάμιξη της στήλης του νερού (Σχήμα 3.5 – πάνω). Η θερμοκρασία έχει βρεθεί να κυμαίνεται από 13.9 (27 Φεβρουαρίου 1992) έως 15.5 °C σε όλο το βάθος της στήλης. Σε ότι αφορά την αλατότητα, οι μετρήσεις πεδίου από τον Τσιρτσή (1994) έδειξαν ότι δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις ως προς το βάθος ούτε ως προς την εποχή (Πίνακας 3.3).

**Πίνακας 3.3.** Μέση τιμή και εύρος διακύμανσης αλατότητας στην παράκτια περιοχή της πόλης Μυτιλήνης (26 Απριλίου 1991 έως 7 Δεκεμβρίου 1993, μηνιαίες δειγματοληψίες, Τσιρτσής 1994).

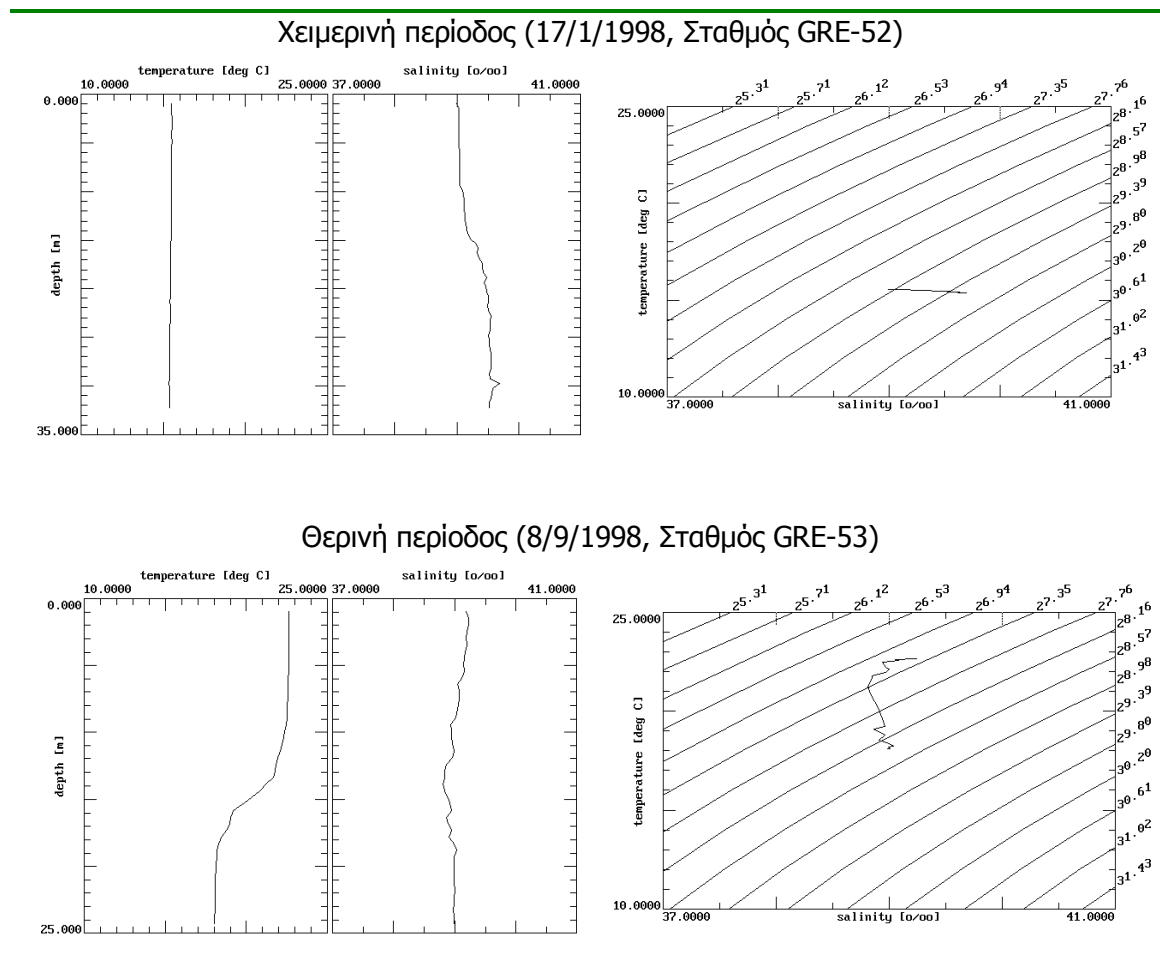
Σταθμός	Αλατότητα (μέση τιμή)
M1 (Λιμάνι)	38.97 ± 0.03‰
M2 (Κάστρο)	38.96 ± 0.04‰

Από τις διαθέσιμες μετρήσεις του προγράμματος MEDPOL, η μέση τιμή αλατότητας υπολογίστηκε 39.02 (αλατότητα εκφρασμένη στην κλίμακα Practical Salinity Scale 78). Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή αλατότητας μετρήθηκαν στον σταθμό GRE-52, στα νότια όρια του Στενού με το ανοιχτό Αιγαίο, σε βάθη άνω των 40m (Πίνακας 3.4).

**Πίνακας 3.4.** Μέση τιμή και εύρος θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας στην παράκτια περιοχή του Στενού Μυτιλήνης, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα MEDPOL για τις χρονιές 1995 - 1999 και 2004.

	Θερμοκρασία °C	Αλατότητα (Practical Salinity Scale)	Sigma-t Kg/m <sup>3</sup>
Ελάχιστη	13.5 (15/12/1995, GRE51,1m)	35.6 (20/7/2004, GRE52, 50m)	25.12 (20/7/2004, GRE52, 10m)
<b>Μέση τιμή</b>	<b>18.32</b>	<b>39.02</b>	<b>28.23</b>
Μέγιστη	23.7 (9/9/1999, GRE51,1m)	40.26 (17/1/1998, GRE52, 50m)	29.92 (15/12/1995, GRE51,1m)

Μια τυπική χειμερινή κατακόρυφη κατανομή αλατότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5 – πάνω. Υπάρχει μια σταδιακή αύξηση της αλατότητας με το βάθος, και η διαφορά του επιφανειακού στρώματος (10-20m) με το υποεπιφανειακό κυμαίνεται από 0 (μη-ανιχνεύσιμη) έως 1 psu.



**Σχήμα 3.5.** Τυπικές κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας και αντίστοιχα διαγράμματα T-S για την περιοχή του Στενού Μυτιλήνης: Πάνω – χειμερινή περίοδος (17/1/1998, Σταθμός GRE-52), κάτω – θερινή περίοδος (8/9/1998, Σταθμός GRE-53). Σταθμοί από το δίκτυο δειγματοληψίας MEDPOL. (Angelidis -1998, Angelidis -1999).

Γενικά κατά την θερινή περίοδο:

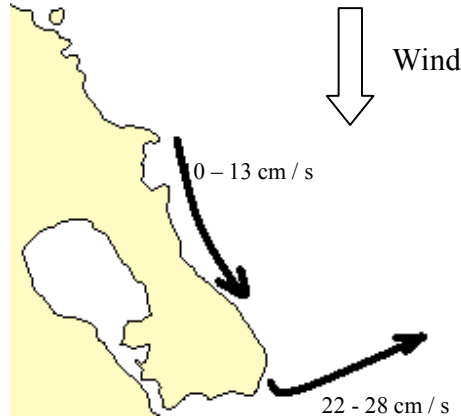
(1) αναπτύσσεται σταδιακά έντονο θερμοκλινές με την θερμοκρασία να ελαττώνεται σημαντικά συναρτήσει του βάθους (Σχήμα 3.5 – κάτω). Κατά τους θερινούς μήνες, διακρίνονται σαφώς 2 στρώματα νερού: (α) ένα επιφανειακό (0~10m) με υψηλές τιμές θερμοκρασίας (24.7~22 °C) και αλατότητας (39.2~39 ‰) και (β) το βαθύτερο στρώμα (~20m μέχρι πυθμένα) με χαμηλότερες τιμές για τις δυο μεταβλητές (θερμοκρασία ~15.5 – 18 °C και αλατότητα ~38.8 – 39.0 ‰). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφανειακού και βαθύτερου στρώματος μπορεί να φτάσει τους 9 °C.

(2) αναπτύσσεται ισχυρή στρωμάτωση με την εμφάνιση πυκνοκλινούς σε βάθη μεταξύ 10~20m, που γίνεται πιο έντονο κοντά στις ακτές. Η κατακόρυφη αυτή δομή της στήλης του νερού οφείλεται στην κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας και τις έντονες μεταβολές της συναρτήσει του βάθους. Επίσης, η πυκνότητα ελαττώνεται από Βορρά προς Νότο και από το ανοιχτό πέλαγος προς τη στεριά.

Στην ωκεανογραφική αποστολή του Ι.Ω.Κ.Α.Ε στο Στενό (Σεπτέμβριος 1983) και με τη βοήθεια ρευματομετρήσεων σε βάθη 1, 5 και 10m με ιχνηλάτες (drogues - drifters), διαπιστώθηκε η ύπαρξη ρεύματος παράλληλου προς τις ακτές, με νότια κατεύθυνση και ταχύτητες 10-13cm/s, ενώ έπνεε βόρειος άνεμος 3-5m/s. Στο νότιο-ανατολικό άκρο (Ακρωτήριο Αγρελής), στην περιοχή που συνδέεται το Στενό Μυτιλήνης με το ανοιχτό Αιγαίο, οι μετρήσεις έδειξαν ισχυρό ρεύμα 22 – 28 cm/s ανατολικής – βορειοανατολικής κατεύθυνσης (προς κόλπο Δικελή-Τουρκία), παρόλη την επίδραση βόρειου ανέμου 10 m/s (Σχήμα 3.6).

Η διαφάνεια του νερού (δίσκος Secchi) κυμαίνεται μεταξύ 15 – 32 m βάθους, χωρίς να παρατηρείται κάποια συγκεκριμένη ετήσια τάση και είναι χαρακτηριστική παράκτιων ολιγότροφων περιοχών του Αιγαίου Πελάγους (Τσιρτσής-1994) Στην περιοχή του λιμένα, η διαφάνεια είναι γενικά μικρή, καθώς ο δίσκος μπορεί να χαθεί στα 4m από την επιφάνεια (Τσιρτσής 1994, Angelidis 1999), χαρακτηριστική εύτροφων συστημάτων (Vollenweider et al. 1992) ενώ οι μικρότερες τιμές διαφάνειας μετρήθηκαν εαρινούς και θερινούς μήνες.

Η παλίρροια στην περιοχή είναι ημι-ημερήσια, με εύρος που, στο λιμάνι Μυτιλήνης, κυμαίνεται από 0.01 m έως 0.45m και μέσο εύρος 0.10m (Υδρογραφική Υπηρεσία, 1991).



**Σχήμα 3.6.** Διευθύνσεις και ταχύτητες ρεύματος επιφανειακού στρώματος (1-10m βάθος) σε περιοχές του Στενού Μυτιλήνης όπως προέκυψαν από ρευματομετρήσεις με ιχνηλάτες στις 15 – 16 Σεπτεμβρίου 1983 (Πηγή: Κατσική και Θεοχάρης 1983).

### 3.5. Χημικές και βιολογικές μεταβλητές

Γενικά, διακρίνεται εποχιακότητα στους ετήσιους κύκλους μεταβολής των ανόργανων θρεπτικών αλάτων, του διαλυμένου οργανικού αζώτου και της χλωροφύλλης-α. Εξαιρέση αποτελούν οι βακτηριακοί πληθυσμοί, ο κύκλος των οποίων παρουσιάζει έντονες διαταραχές.

Στον Πίνακα 3.5 παρατίθενται η μέση τιμή και το εύρος τιμών των ανόργανων θρεπτικών αλάτων, χλωροφύλλης-α (chl-a), διαλυμένου οργανικού (DON) αζώτου και διαλυμένου οξυγόνου (DO) για σταθμούς στο Στενό Μυτιλήνης, όπως προκύπτουν από τον Τσιρτσή (1994) και το πρόγραμμα MED POL. Τα δεδομένα Τσιρτσή (1994) παρατίθενται αυτούσια ενώ στα πρωτογενή δεδομένα MED POL (έτη 1995, 1997-1999 και 2004) έγινε απλή στατιστική επεξεργασία με αφαίρεση των ακραίων τιμών σύμφωνα με Igantiades et al. (1992): ακραίες τιμές (outliers) θεωρήθηκαν όσες βρίσκονται στη περιοχή πάνω από 1.5 φορές την απόσταση  $1^{ou}$  -  $3^{ou}$  τεταρτημορίου (quartile) των δεδομένων. Επίσης στον ίδιο πίνακα και για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης, παρατίθενται ενδεικτικά τιμές θρεπτικών από

άλλες περιοχές και άλλους τύπους νερού στην Ελλάδα (Ανατολική Μεσόγειος) και τη Βόρεια Θάλασσα.

#### *Φωσφορικά ( $PO_4^{3-}$ )*

Οι συγκεντρώσεις φωσφορικών αλάτων έχουν βρεθεί γενικά χαμηλές (Κατσίκη και Θεοχάρης 1983, Angelidis 1997, Angelidis 2000). Οι περισσότερες τιμές πλησιάζουν το αναλυτικό μηδέν της μεθόδου προσδιορισμού (0.01  $\mu\text{M P}$ ). Ακόμα και υψηλές τιμές της τάξης 0.8 – 1  $\mu\text{M P}$  που μετρήθηκαν, είναι αρκετά κάτω από υψηλές συγκεντρώσεις φωσφορικών που έχουν μετρηθεί αλλού (Πίνακας 3.4). Στην περιοχή του λιμανιού (GRE-51) ανιχνεύονται ελαφρά υψηλότερες συγκεντρώσεις από ότι στο Στενό, ενώ γενικότερα τα φωσφορικά είναι αυξημένα τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που υποδηλώνει εποχικότητα (Τσιρτσής, 1994) και κοντά στον πυθμένα. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις φωσφορικών μετρήθηκαν τον χειμώνα του 1995 (15-12-1995) στους σταθμούς GRE-51 (Λιμάνι) και GRE-53 (Κάστρο) και κυμαίνονταν από 1.14 – 2.29  $\mu\text{M P}$ .

#### *Πυριτικά ( $Si(OH)_4$ )*

Οι συγκεντρώσεις πυριτικών αλάτων που έχουν βρεθεί στο Στενό έχουν χαρακτηριστεί ως μάλλον υψηλές (Κατσίκη & Θεοχάρης -1983, Angelidis -2000), ιδίως κοντά στον πυθμένα. Αυτό μπορεί να οφείλεται κυρίως σε διεργασίες ανάδευσης του πυθμένα, λόγω του σχετικά μικρού βάθους της περιοχής, και λιγότερο σε εισροές ύλης από τη χέρσο αφού δεν υπάρχουν σημαντικές ποτάμιες παροχές. Ο Τσιρτσής (1994) παρατήρησε παρόμοια δυναμική συμπεριφορά (μεταβολή ως προς χρόνο) και έντονη εποχικότητα των πυριτικών στους σταθμούς M1 (Λιμάνι) και M2 (Κάστρο), με μέγιστες τιμές Οκτώβριο-Νοέμβριο και ελάχιστες Απρίλιο-Μάιο, γεγονός που ίσως υποδηλώνει έλεγχο των πυριτικών στη στήλη του νερού από βιολογικές διεργασίες.

#### *Αμμωνιακά ( $NH_4^+$ )*

Γενικά, οι συγκεντρώσεις αμμωνίας μπορούν να χαρακτηριστούν υψηλές (Τσιρτσής, 1994) και αποτελούν την επικρατούσα μορφή ανόργανου αζώτου στο σύστημα. Στην περιοχή του λιμανιού (M1 - GRE-51) τα αμμωνιακά είναι αυξημένα σε σχέση με τα νερά του Στενού και εμφανίζουν εποχιακότητα, με ελάχιστες τιμές τους μήνες Σεπτέμβριο – Οκτώβριο και μέγιστες τον Απρίλιο και Μάιο (Τσιρτσής 1994). Επίσης παρατηρείται μείωση της

συγκέντρωσης με το βάθος στην ίδια περιοχή. Η υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας στο λιμάνι αποδόθηκε κατά το παρελθόν στην απόρριψη των ανεπεξέργαστων λιμάτων, ενώ οι επίσης υψηλές τιμές στον Μ2 (Κάστρο) ίσως είναι αποτέλεσμα βακτηριακής αποδόμησης οργανικών αζωτούχων ενώσεων. Η χαμηλότερη μέση τιμή αμμωνίας παρατηρείται στον σταθμό GRE-52 (Αγριλιά) στα νότια όρια του Στενού με το ανοιχτό Αιγαίο.

#### *Νιτρικά ( $NO_3^-$ )*

Γενικά, οι συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση τόσο μεταξύ εποχών όσο και μεταξύ σταθμών. Ο Τσιρτσής (1994) παρατήρησε έντονη εποχικότητα στον σταθμό Μ1 (λιμάνι) με τις μικρότερες τιμές τους θερινούς/εαρινούς μήνες. Στον Μ2 (κάστρο) τα νιτρικά ήταν σε χαμηλά επίπεδα και δεν παρουσίασαν διακύμανση ως το φθινόπωρο του 1992. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο του 1993 ανιχνεύτηκε κοινή τάση αύξησης και στους 2 σταθμούς.

#### *Νιτρώδη ( $NO_2^-$ )*

Οι συγκεντρώσεις νιτρωδών αλάτων είναι γενικά χαμηλές, ενώ παρουσιάζουν εποχικότητα και στο λιμάνι και στο Στενό, με ελάχιστες τιμές τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες.

#### *Λόγος αζώτου / φωσφόρου (DIN : P)*

Ο λόγος του περιεχομένου N : P στα κύτταρα του φυτοπλαγκτού διαφέρει από είδος σε είδος αλλά κυμαίνεται γύρω από την τιμή 16 : 1 (λόγος γραμμοατόμων). Τα θρεπτικά μέσα με αυτήν την αναλογία θεωρούνται ισορροπημένα για την ανάπτυξη των φυτοπλαγκτονικών κυττάρων (Vollenweider et al., 1992). Αν ο παραπάνω λόγος ξεπερνά την τιμή 16 : 1 θεωρείται ότι ο φωσφόρος είναι ο περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού (αν οι υπόλοιποι παράγοντες όπως π.χ. το φως είναι ευνοϊκοί), ενώ στην αντίθετη περίπτωση, δηλ κάτω του 16 : 1, είναι το άζωτο. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις του MED POL προκύπτει ότι στο 35% των περιπτώσεων ο λόγος N : P βρέθηκε κάτω του 16 : 1. Επίσης, ο Τσιρτσής (1994) υπολόγισε ότι στο 33% των μετρήσεων για τον Μ1 (Λιμάνι) και το 36% των μετρήσεων στον Μ2 (Κάστρο) ο λόγος N : P ήταν κάτω του 16 : 1. Φαίνεται δηλαδή ότι στα νερά του Στενού Μυτιλήνης περιοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού είναι κυρίως ο φωσφόρος.



*Διαλυμένο οργανικό άζωτο (DON)*

Κατά την περίοδο Απρίλιος 1991 – Δεκέμβριος 1993, υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οργανικού αζώτου μετρήθηκαν από τον Τσιρτσή (1994) τόσο στην περιοχή του λιμανιού (M1) λόγω αστικών λυμάτων, όσο και στο ολιγότροφο Στενό (M2) κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες, ενώ αντίθετα χαμηλές ήταν οι συγκεντρώσεις τους χειμερινούς μήνες.

*Διαλυμένο οξυγόνο (DO)*

Οι τιμές διαλυμένου οξυγόνου (4.5 – 6.8 mg/l) και τα ποσοστά κορεσμού (90 – 116%) υποδεικνύουν ότι τα νερά του Στενού είναι καλά οξυγονωμένα. (Κατσίκη και Θεοχάρης, 1983, Karydis 1993, Τσιρτσής 1994).

*Χλωροφύλλη –a (chl-a) και σύνθεση φυτοπλαγκτονικής κοινότητας*

Οι μέσες τιμές χλωροφύλλης –a (δείκτη φυτοπλαγκτονικής βιομάζας) στην περιοχή του λιμανιού ήταν, κατά το παρελθόν, πολύ υψηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν στα νερά του Στενού, π.χ. στον σταθμό M2 (Κάστρο) (Πίνακας 3.5). Επίσης, στην περιοχή του λιμανιού, παρατηρήθηκε τάση μείωσης της συγκέντρωσης συναρτήσει του βάθους, ενώ ο ετήσιος κύκλος έδειχνε διαταραγμένος, με εξάρσεις νωρίς την άνοιξη, στα μέσα καλοκαιριού ή αργά το φθινόπωρο (Τσιρτσής, 1994). Σε κάθε περίπτωση, οι συγκεντρώσεις chl-a ήταν αρκετά κάτω από τιμές που μετρώνται ακόμα και σήμερα σε παράκτιες περιοχές με έντονα προβλήματα ευτροφισμού, όπως στη Βόρεια Θάλασσα. Στα νερά του Στενού, οι τιμές χλωροφύλλης κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (0.20-0.25 μg/l), με εξαίρεση τις εποχιακές εξάρσεις που παρατηρούνται τους μήνες Μάρτιο- Απρίλιο και αρχές-μέσα φθινοπώρου. Οι χαμηλότερες τιμές χλωροφύλλης –a έχουν μετρηθεί στο σταθμό GRE-52 στα νότια όρια του Στενού με το ανοιχτό Αιγαίο.

**Πίνακας 3.5.** Εύρος τιμών και μέση τιμή ανόργανων θρεπτικών αλάτων, διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), χλωροφύλλης-α (chl-a) και διαλυμένου οξυγόνου (DO) για σταθμούς στο Στενό Μυτιλήνης, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα MED POL 1995-1999, 2004 και Τσιρτσή (1994). Ενδεικτικές τιμές των ίδιων μεταβλητών σε άλλες περιοχές και τύπους νερού στην Ελλάδα (Ανατολική Μεσόγειος) και τη Βόρεια Θάλασσα.

Περιοχή		Νιτρικά μM	Νιτρώδη μM	Αμμωνία μM	DON μM	Φωσφορικά μM	Πυριτικά μM	DO μg/L	Chl-a μg/L	
	<i>Εύρος μετρήσεων MED POL</i>	<i>0.01 – 6.39</i>	<i>0.01 – 1.38</i>	<i>0.01 – 25.15</i>		<i>0.01 – 4.95</i>	<i>0.01 – 39.62</i>		<i>0.01 – 3.25</i>	
ΣΤΕΝΟ ΜΥΤΙΑΛΗΝΗΣ	M1 (GRE-51) λιμάνι	MED POL	0.66	0.13	1.28	0.11	6.49		0.58	
		Τσιρτσής (1994)	0.77 0.01 – 9.96	0.07 0.01 – 0.42	1.66 0.06 – 12.9	8.7 0.08 – 61.0	0.17 0.01 – 1.08	6.89 1.10 – 27.96	5.35 4.12 – 6.39	1.19 0.06 – 4.26
	M2 (GRE-53) Κάστρο	MED POL	0.64	0.11	1.09	0.07	6.09		0.25	
		Τσιρτσής (1994)	0.54 0.01 – 4.85	0.06 0.01 – 0.43	1.41 0.06 – 12.53	8.95 0.01 – 67.4	0.11 0.01 – 1.08	6.50 1.12 – 41.31	5.38 3.10 – 6.68	0.25 0.01 – 1.99
	GRE-52 Ακρ. Αγριλιά	MED POL	0.77	0.11	1.01		0.08	6.07		0.20
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΣΑΡΩΝΙΚΟΣ 1977 – 1981	Ignatiades et al (1992)	0.40 0.01 – 24.11	0.24 0.01 – 3.35	1.44 0.06 – 17.41		0.44 0.01 – 13.72				
ΡΟΔΟΣ ανοιχτά πελαγικά νερά 1983 – 1984	Ignatiades et al (1992)	0.23 0.02 – 5.06	0.03 0.01 – 0.64	0.39 0.04 – 12.27		0.03 0.01 – 4.09				
ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ		*				**	**		*	
παράκτια		> 9.7				0.3 – 1	3 – 9		> 6.1	
ανοιχτά		2.1				0.2 – 0.7	1 – 4		< 1.9	

\* [http://themes.eea.eu.int/IMS/Overviews/csi\\_key\\_messages](http://themes.eea.eu.int/IMS/Overviews/csi_key_messages) Ιστοσελίδα Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (ΕΕΑ), Μάρτιος 2006

\*\* <http://www.bsh.de/en/Marine%20data/Observations/MURSYS%20reporting%20system/mursys103.jsp> , μέσες τιμές 1-30m βάθος, 1993-1996.

Ο Πίνακας 3.6 (τροποποιημένος από Spatharis et al. 2008) συνοψίζει τις μετρήσεις του Τσιρτσή (1994) σχετικά με τη σύνθεση της φυτοπλαγκτονικής κοινότητας στους σταθμούς M1 και M2: από τα 208 είδη που αναγνωρίστηκαν, το 52% άνηκαν στα δίατομα, το 31% στα δινομαστιγωτά ενώ το υπόλοιπο 17% ήταν κυρίως κοκκολιθοφόρα.

**Πίνακας 3.6.** Αφθονία ειδών ανά κλάση φυτοπλαγκτού στους σταθμούς M1 και M2. Μετρήσεις Τσιρτσή (1994).

<b>Κλάση</b>	<b>Αριθμός ειδών</b>
Bacillariophyceae (δίατομα)	108
Chlorophyceae	2
Dictyochophyceae (σιλικονομαστιγωτά)	3
Dinophyceae (δινομαστιγωτά)	64
Euglenophyceae	1
Prymnesiophyceae (κοκκολιθοφόρα)	30
<b>Σύνολο</b>	<b>208</b>

### *Βακτήρια*

Η βακτηριακή βιομάζα υπολογίστηκε διπλάσια στην περιοχή του λιμανιού από ότι στα ανοιχτά (μέσος αριθμός ολικών βακτηρίων M1:  $1155 \times 10^3$  κύτταρα/ml και M2:  $650 \times 10^3$  κύτταρα/ml), ενώ οι ετήσιοι κύκλοι μεταβολής του αριθμού των ολικών βακτηρίων έχουν χαρακτηριστεί ως μη-κανονικοί (Τσιρτσής 1995).

Γενικά, η *θολερότητα* του νερού, οι συγκεντρώσεις νιτρικών, φωσφορικών, αμμωνίας και χλωροφύλλης, καθώς και οι πληθυσμοί φυτοπλαγκτού και βακτηρίων βρέθηκαν σημαντικά υψηλότεροι στην περιοχή του λιμανιού σε σχέση με το ανοιχτό Στενό. Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών ήταν χαρακτηριστικές εύτροφων περιοχών για το λιμάνι και oligότροφων περιοχών για το Στενό (Τσιρτσής 1994, Angelidis 1999), ενώ επιβεβαιώθηκαν και από δορυφορικές εικόνες LANDSAT-TM, που αναλύθηκαν για προσδιορισμό επιφανειακών κατανομών χλωροφύλλης και αιωρούμενων στερεών (Κίτσιου 1997).

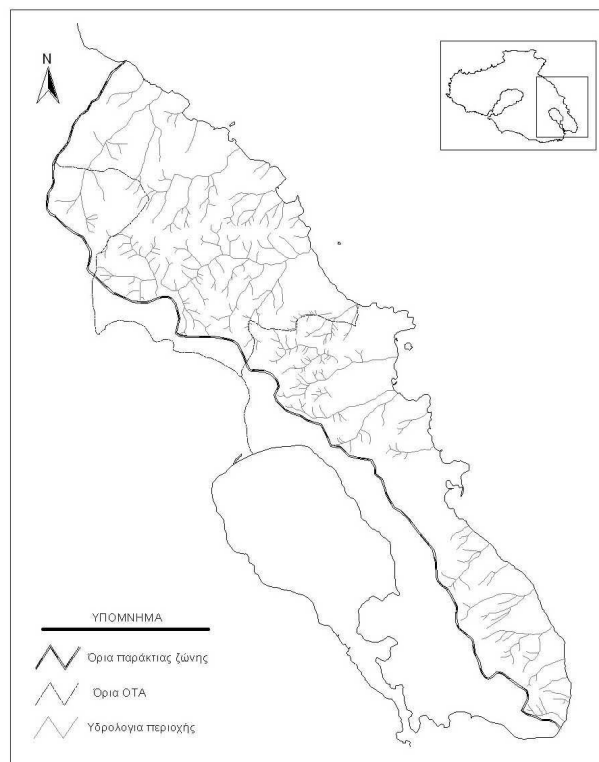
Τέλος, οι μετρήσεις φυτοπλαγκτού, ζωοπλαγκτού, φυτοβένθους και ζωοβένθους που πραγματοποιήθηκαν το καλοκαίρι του 1983 από το Ι.ΩΚ.Α.Ε. έδειξαν ότι η ευρύτερη

περιοχή του Στενού ήταν μη οικολογικά διαταραγμένη. Σε ανάλογο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Αλουρί et al. (2007), καθώς δεν βρήκαν ενδείξεις σημαντικής ρύπανσης στο θαλάσσιο περιβάλλον του Στενού (νερό, ίζημα, σάρκα ψαριών) ως προς τους ρυπαντές που διερεύνησαν στις 2 δειγματοληψίες που διενεργήθηκαν τον Ιούλιο και Οκτώβριο 2004 στο πλαίσιο του MED POL.

### 3.6. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και ιζήματα

#### Λεκάνη απορροής

Η παροχή γλυκού νερού από τη λεκάνη απορροής προς την θάλασσα (Σχήμα 3.7) είναι εποχιακή και γίνεται μέσω ποταμοχειμάρρων. Η συνεισφορά μη-σημειακών πηγών ανόργανης και οργανικής ύλης δεν έχει ποσοτικοποιηθεί.



**Σχήμα 3.7.** Λεκάνη απορροής νοτιο-ανατολικών ακτών Λέσβου και υδρογραφικό δίκτυο (πηγή: Κίτσιου Δήμητρα.).

**Μορφολογία ακτών και ανάγλυφο.**

Η μορφολογία της ακτής στην περιοχή μελέτης και τα ιζήματα του πυθμένα κοντά στην ακτή χαρακτηρίζονται από σημαντική ποικιλία (Ματαράγκας, 2002) η οποία εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, με σημαντικότερους τη γεωλογική δομή της παράκτιας ζώνης και την τεκτονική δραστηριότητα. Άλλοι παράγοντες είναι η διάβρωση και η απόθεση υλικού, οι χερσογενείς φερτές ύλες και οι προσχώσεις, οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, τα θαλάσσια ρεύματα (ανεμογενή και κυματογενή), η ηφαιστειακή δραστηριότητα κ.α. (Komar, 1998). Η παράκτια περιοχή της Μυτιλήνης παρουσιάζει γρήγορη εναλλαγή μορφολογίας και ποικιλία πετρωμάτων που τη συνθέτουν. Γενικά, το μορφολογικό ανάγλυφο είναι ήπιο με μικρές εξαιρέσεις και μόνο όπου τα συμπαγή πετρώματα φθάνουν μέχρι τη θάλασσα και δημιουργούν απότομα πρανή, εμποδίζουν τη δημιουργία παραλίας και ακόμα καλύπτουν τον πυθμένα. Το ίζημα του πυθμένα κοντά στις ακτές είναι σχεδόν ομοιόμορφο και αποτελείται από άμμο, κροκάλες και λατύπες. Οι παραλίες που έχουν αναπτυχθεί χαρακτηρίζονται σημαντικές και οφείλονται στο ήπιο ανάγλυφο της παράκτιας ζώνης, με εξαιρέσεις τα σημεία που έχουν υποστεί ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Νοτιότερα από το αεροδρόμιο και προς το ακρωτήριο Αγρελής, η ακτή χαρακτηρίζεται από έντονο μορφολογικό ανάγλυφο. Τα πρανή είναι απότομα, δεν δημιουργούνται σημαντικές παραλίες και το υλικό του πυθμένα αποτελείται κυρίως από ογκόλιθους (Ματαράγκας, 2002).

**Ιζήματα**

Η κοκκομετρική σύσταση και το % περιεχόμενο σε οργανικό άνθρακα, ανθρακικό ασβέστιο και σίδηρο στα ιζήματα των ανατολικών ακτών Λέσβου, το 2004 δίνεται στον Πίνακα 3.7. Τα ιζήματα στους σταθμούς GRE-52 (Αγριλιά), GRE-53 (Κάστρο) και GRE-54 (κόλπος Θερμής) είναι κυρίως αμμώδη, ενώ στο λιμάνι (GRE-51) το ίζημα έχει λεπτότερη σύσταση, (κυρίως ιλύς και άργιλος). Το υψηλότερο ποσοστό χονδρόκοκκου υλικού (χαλίκι -gravel) βρέθηκε στο σταθμό GRE-52, στο ακρωτήριο Αγριλιά (νότια όρια του Στενού με το ανοιχτό Αιγαίο), ενώ το χονδρόκοκκο αυτό υλικό έχει κυρίως βιογενή προέλευση (θραύσματα οστράκων), ένα εύρημα που αιτιολογεί και το υψηλό περιεχόμενο ανθρακικών στο ίδιο ίζημα. Τα ανθρακικά αποτελούν περίπου το 30% του ιζήματος στους άλλους σταθμούς, μια τιμή που συμφωνεί με προηγούμενες έρευνες που

έχουν διεξαχθεί στην ευρύτερη περιοχή των ανατολικών ακτών της Λέσβου, αλλά και άλλων παράκτιων περιοχών της Ελλάδας (Angelidis, 2004).

**Πίνακας 3.7.** Κοκκομετρική σύσταση και περιεχόμενο σε οργανικό άνθρακα, ανθρακικό ασβέστιο και σίδηρο στα ιζήματα των ανατολικών ακτών Λέσβου, το 2004 (Angelidis 2004).

Σταθμός	Κοκκομετρική σύσταση			Οργανικός άνθρακας (%)	ανθρακικό ασβέστιο (%)	Fe (%)
	Ιλύς + Άργιλος (%)	Άμμος (%)	Χαλίκι (%)			
GRE51	78.1	20.1	1.8	2.28	29.2	2.14
GRE52	22.6	48.9	28.5	0.54	50.2	1.42
GRE53	43.2	48.2	8.6	1.62	28.2	1.84
GRE54	33.9	59.5	6.6	0.82	34.1	2.15

Το υψηλότερο % περιεχόμενο σε οργανικό άνθρακα βρέθηκε στο λιμάνι Μυτιλήνης (GRE-51), στην περιοχή όπου για δεκαετίες και μέχρι το 2001 αποχετεύονταν ανεπεξέργαστα τα αστικά λύματα της πόλης στο μεγαλύτερο μέρος τους. Η λειτουργία του νέου αποχετευτικού δικτύου και του Σταθμού Επεξεργασίας Λυμάτων περιόρισε σημαντικά αυτήν την κατάσταση και η ποσότητα των ανεπεξέργαστων λυμάτων που καταλήγουν πλέον στην περιοχή έχει ελαττωθεί κατά πολύ. Οι τιμές οργανικού άνθρακα στα ιζήματα των υπολοίπων σταθμών είναι τυπικές παράκτιων ιζημάτων (Angelidis, 2004). Οι Αλουρί et al. (2007) σημειώνουν ωστόσο πως, τα ιζήματα της περιοχής εξακολουθούν να περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων ανθρωπογενούς προέλευσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Συλλογή και ανάλυση μετρήσεων πεδίου

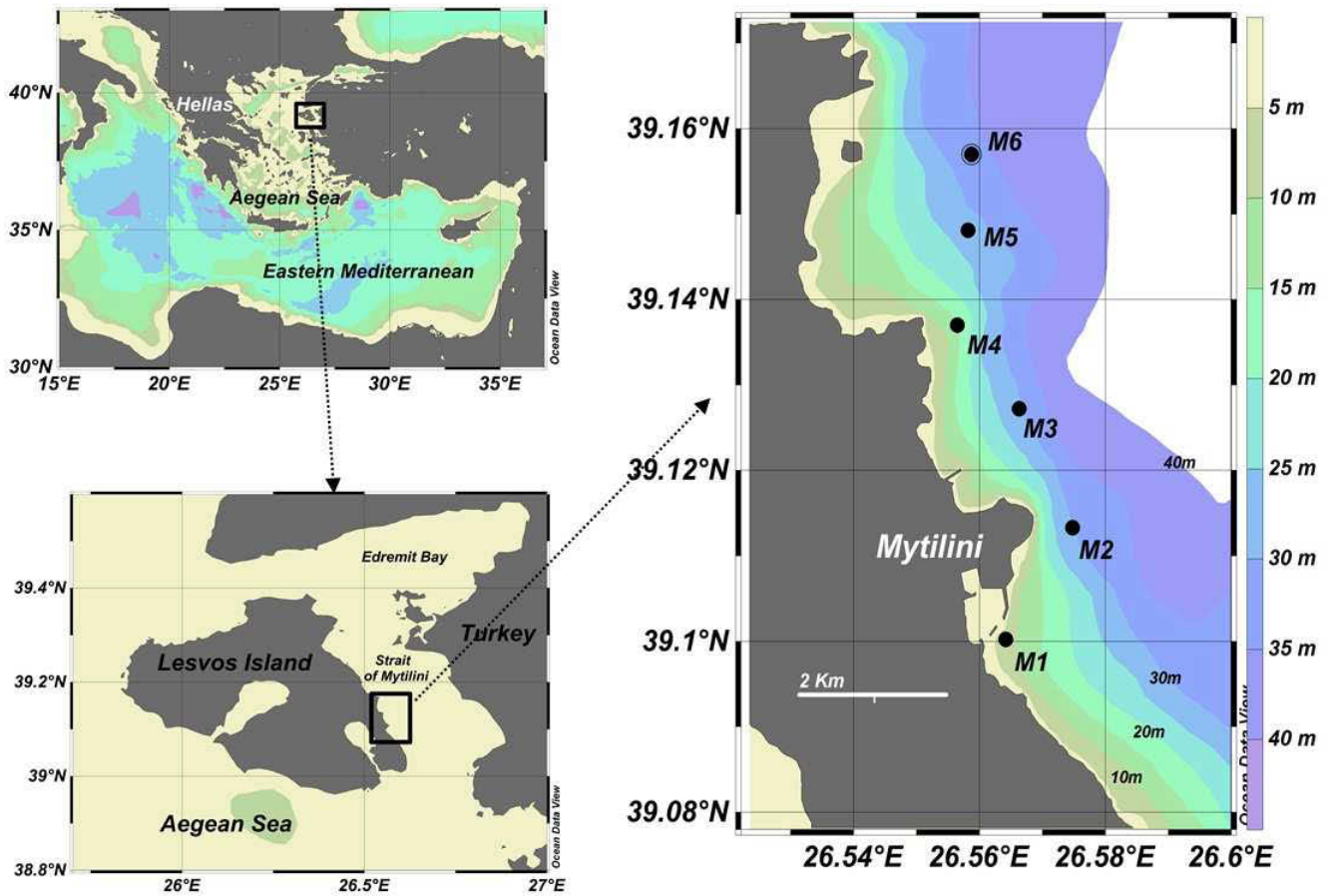
#### 4.1. Συλλογή δεδομένων πεδίου

##### 4.1.1. Δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας.

Η διάταξη των σταθμών δειγματοληψίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Για τους σταθμούς M1 και M2 υπήρχε ήδη αρκετή ωκεανογραφική πληροφορία διαθέσιμη, από έρευνες προηγούμενων ετών (Τσιρτσής 1994, MED POL). Αποφασίστηκε έτσι να συνεχιστεί η χρήση τους, καθώς θα σχηματιζόταν μια σημαντική χρονοσειρά δεδομένων. Ο M1 είναι τοποθετημένος στην περιοχή του λιμένα Μυτιλήνης σε βάθος 8m, περιοχή χαρακτηρισμένη ως εύτροφη, καθώς μέχρι πρόσφατα δεχόταν τον κύριο όγκο των ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων. Ο M2 είναι τοποθετημένος στα ανοιχτά, σε μια περιοχή με βάθος 30m, χαρακτηρισμένη ως oligότροφη. Ο σταθμός M4 τοποθετήθηκε κοντά στην εκβολή του αγωγού διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων του σταθμού επεξεργασίας, σε βάθος 15m. Στόχος ήταν να είναι δυνατή η ανίχνευση τυχόν αυξημένων συγκεντρώσεων ανόργανων θρεπτικών και οργανικής ύλης από τη λειτουργία του σταθμού και η σύγκριση των συγκεντρώσεων αυτών πριν και μετά την έναρξη λειτουργίας αλλά και σε σχέση με σταθμούς στα ανοιχτά προς βορρά και νότο όπως ο M6 (30m) και ο M2 αντίστοιχα. Μετά την έναρξη της λειτουργίας του σταθμού επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Νοέμβριος 2001), το δίκτυο των σταθμών πυκνώσε με την προσθήκη δυο ακόμα σταθμών, των M3 και M5 (βάθος 30m) για τη συλλογή επιπλέον πληροφορίας και την καλύτερη παρακολούθηση και προσομοίωση των βαθμίδων των μεταβλητών κατά μήκος της ακτής.

##### 4.1.2. Δεδομένα πεδίου

Οι εργασίες πεδίου ξεκίνησαν τον Ιούνιο του 2000 και ολοκληρώθηκαν το Νοέμβριο του 2002, καλύπτοντας σχεδόν δυο ετήσιους κύκλους - έναν πριν και έναν μετά την έναρξη λειτουργίας της ΜΕΥΑ (Πίνακας 4.1). Από τον Σεπτέμβριο του 2001, οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν με το Ω/Ε "ΑΜΦΙΤΡΙΤΗ", το πλωτό μέσο του Τμήματος Επιστημών της Θάλασσας.



**Σχήμα 4.1.** Περιοχή μελέτης και σταθμοί δειγματοληψίας.

Για τη συλλογή δειγμάτων θαλασσινού νερού χρησιμοποιήθηκε κατακόρυφος δειγματολήπτης τύπου Van Dorn όγκου τριών λίτρων. Δείγματα νερού συλλέγονται από πρότυπα βάθη σε κάθε σταθμό (Πίνακας 4.1). Τα δείγματα διηθούνταν αυθημερόν στο εργαστήριο μέσω φίλτρου Millipore με διάμετρο πόρου 0.80  $\mu\text{m}$  και διατηρήθηκαν στους  $-20^{\circ}\text{C}$  μέχρι να αναλυθούν για τις παρακάτω χημικές και βιολογικές μεταβλητές, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2: συγκέντρωση νιτρωδών, νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών και πυριτικών αλάτων, συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού αζώτου και συγκέντρωση χλωροφύλλης –α.



**Πίνακας 4.1.** Κωδικός πλόα, ημερομηνίες διεξαγωγής δειγματοληψιών, βάθη συλλογής νερού και πόντισης ρευματομέτρων για κάθε σταθμό.

Πλούς	Ημερομηνία	Σταθμός	Βάθη συλλογής νερού	Βάθη πόντισης ρευματομέτρων
VK1	30 Ιουν 2000			
VK2	22 Αυγ 2000			
VK3	5 Σεπτ 2000			
VK4	1 Νοε 2000			
VK5	14 Δεκ 2000			
VK6	24 Μαρ 2001			
VK7	30 Μαΐ 2001			
VK8	18 Ιουλ 2001	M1	1, 5, 8	5
VK9	31 Αυγ 2001	M2	1, 5, 10, 20, 30	5, 20
VK10	20 Σεπτ 2001	M3	1, 5, 10, 20, 30	5, 20
VK11	22 Νοε 2001	M4	1, 5, 10, 15	5, 10
VK12	22 Ιαν 2002	M5	1, 5, 10, 20, 30	5, 20
VK13	4 Μαρ 2002	M6	1, 5, 10, 20, 30	5, 20
VK14	3 Απρ 2002			
VK15	25 Απρ 2002			
VK16	24 Μαΐ 2002			
VK17	1 Ιουλ 2002			
VK18	30 Ιουλ 2002			
VK19	4 Οκτ 2002			
VK20	20 Νοε 2002			

Επιτόπου μετρήθηκαν οι παρακάτω φυσικές μεταβλητές:

**Θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα ( $\sigma_t$ ).** Μετρήθηκαν με τη χρήση συσκευής CTD τύπου SBE 19 SEACAT Profiler της Sea-Bird Electronics Inc.

**Ταχύτητα ρεύματος (μέτρο και διεύθυνση).** Χρησιμοποιήθηκαν ρευματομέτρα τύπου Sensordata SD4. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου είναι για το μέτρο της ταχύτητας  $\pm 1\text{cm/sec}$  και για τη διεύθυνση  $\pm 15^\circ$ . Τα βάθη πόντισης του ρευματομέτρου για κάθε σταθμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Τα βάθη αυτά παρέχουν μία αντιπροσωπευτική μέτρηση της ταχύτητας ρεύματος στο επιφανειακό στρώμα και στο στρώμα νερού κοντά στον πυθμένα.

**Ισχύς ακτινοβολίας φωτός.** Χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό φωτόμετρο τύπου KAHLSICO 268WD305 (Kahl Scientific Instrument Corporation). Η συσκευή διαθέτει

επιφανειακή μονάδα για την μέτρηση της έντασης φωτεινής ισχύος στην επιφάνεια της θάλασσας και υποβρύχια μονάδα για την καταγραφή της ελάττωσης της έντασης φωτεινής ισχύος συναρτήσει του βάθους. Οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή του ορατού και στα πρότυπα βάθη.

**Βάθος δίσκου Secchi.** Ένας άσπρος δίσκος διαμέτρου 30 cm, βυθίζεται και το βάθος που παύει να είναι ορατός χαρακτηρίζεται ως βάθος Secchi (Secchi depth,  $Z_{sd}$ ). Ο συντελεστής εξασθένησης της φωτεινής ακτινοβολίας υπολογίζεται από την σχέση  $k=1.7/Z_{sd}$ .

#### 4.2. Εργαστηριακή αναλυτική μεθοδολογία

Η αναλυτική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο για τη μέτρηση των χημικών και βιολογικών παραμέτρων περιγράφεται στη συνέχεια:

##### *Χημικές μεταβλητές*

**Συγκέντρωση νιτρικών αλάτων.** Η συγκέντρωση νιτρικών προσδιορίστηκε με αναγωγή τους σε νιτρώδη μέσω της διέλευσης από στήλη  $\text{CuSO}_4/\text{Cd}$  (Parsons *et al.* 1984). Ακολούθησε προσδιορισμός των νιτρωδών με την μέθοδο που περιγράφεται στη συνέχεια.

**Συγκέντρωση νιτρωδών αλάτων.** Το διαζωνιακό ιόν που προέκυψε από την προσθήκη σουλφαναμιίδης στο δείγμα αντέδρασε με N - (d - ναφθυλαιθυλενοδιαμίνη) και τελικά έδωσε μία άζωτο - χρωστική κόκκινη - ροζ που μετρήθηκε φασματοφωτομετρικά σε κυψελίδα 10 cm στα 543 nm (Parsons *et al.* 1984).

**Συγκέντρωση αμμωνιακών αλάτων.** Σε ποσότητα δείγματος προστέθηκε ποσότητα αντιδραστήριου φαινόλης - αλκοόλης, οξειδωτικό διάλυμα και καταλύτης. Στη συνέχεια το μίγμα τοποθετήθηκε κάτω από λάμπες υπεριώδους ακτινοβολίας για την ανάπτυξη χρώματος, για χρονικό διάστημα 40 min σε θερμοκρασία 22 - 27°C και τελικά μετρήθηκε η απορρόφηση με τη χρήση κυψελίδας 10 cm, στα 640 nm (Liddicoat *et al.* 1974).

**Συγκέντρωση φωσφορικών αλάτων.** Ο προσδιορισμός των φωσφορικών στηρίχθηκε στη δημιουργία ασθενούς συμπλόκου με αμμωνιούχο μολυβδαινίο. Στο δείγμα προστέθηκαν ποσότητα αντιδραστήριου που δημιουργήθηκε από ανάμιξη διαλυμάτων αμμωνιούχου μολυβδαινίου, θειικού οξέος και ασκορβικού οξέος. Η

απορρόφηση της παραγόμενης μπλέ ουσίας μετρήθηκε στο φασματοφωτόμετρο σε κυψελίδα 10 cm, σε μήκος κύματος 840 nm (Parsons *et al.* 1984).

**Συγκέντρωση πυριτικών αλάτων.** Ο προσδιορισμός των πυριτικών στηρίχθηκε στην δημιουργία πυριτίο - μολυβδαινικού οξέος. Σε μολυβδαινικό οξύ προστέθηκε ποσότητα του δείγματος. Στη συνέχεια προστέθηκε απότομα το αναγωγικό αντιδραστήριο που δημιουργήθηκε από ανάμιξη διαλυμάτων οξαλικού οξέος και θειικού οξέος. Το χαρακτηριστικό κυανούν χρώμα του τελικού διαλύματος μετρήθηκε φασματοφωτομετρικά σε κυψελίδες 10 cm, στα 810 nm (Parsons *et al.* 1984).

**Συγκέντρωση οργανικού αζώτου.** Σε ποσότητα δείγματος προστέθηκε ποσότητα οξειδωτικού αντιδραστηρίου (υπεροξειδίου του καλίου). Η αντίδραση οξειδωσης, κατά την οποία όλες οι μορφές οργανικού αζώτου οξειδώθηκαν προς νιτρικά ιόντα, έλαβε χώρα σε κλίβανο όπου επικρατούσαν συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Στη συνέχεια, το δείγμα οξινίστηκε σε pH 2,6 - 3,2 για την επαναδιαλυτοποίηση του ιζήματος KNO<sub>3</sub>. Τέλος, το pH του δείγματος ρυθμίστηκε στο 8 - 8,5 και ακολούθησε η διαδικασία προσδιορισμού νιτρικών που περιγράφηκε προηγουμένως (Parsons *et al.* 1984).

**Συγκέντρωση χλωροφύλλης-α.** Γνωστή ποσότητα δείγματος διηθείται διαμέσου συνθετικού φίλτρου με διάμετρο πόρου 0,80 μm, εξάγονται οι χρωστικές σε διάλυμα ακετόνης 90% και η συγκέντρωσή τους μετρείται φθορισμετρικά με τη μέθοδο των Neveux και Panouse (1987).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης

#### 5.1. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

##### 5.1.1. Αναλυτική περιγραφή του Princeton Ocean Model (POM)

Για την προσομοίωση και την ποσοτική διερεύνηση της κυκλοφορίας της θαλάσσιας μάζας στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το υδροδυναμικό μοντέλο POM (The Princeton Ocean Model, 2013). Το μοντέλο εισήχθη από τους Blumberg και Mellor (1983, 1987) και έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε πλήθος εφαρμογών διερεύνησης υδροδυναμικής κυκλοφορίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του, που περιγράφονται αναλυτικά από τον Mellor (1996, 2004) (<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>), παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Το μαθηματικό ομοίωμα επιλύει αριθμητικά ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων, τις πρωτογενείς εξισώσεις (primitive equations), οι οποίες αποτελούνται από εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του ρευστού κάτω από την επίδραση των δυνάμεων (εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστο και ομογενές υγρό που προκύπτουν από την εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα) και εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της θερμότητας και της αλατότητας.

Οι φυσικές μεταβλητές που προσδιορίζονται προγνωστικά είναι: οι συνιστώσες της ταχύτητας στους τρεις άξονες ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), η θερμοκρασία ( $T$ ), η αλατότητα ( $S$ ), η τυρβώδης κινητική ενέργεια (turbulent kinetic energy,  $TKE = \alpha^2/2$ ) και το ύψος της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας ( $\eta$ ). Αν  $x$ ,  $y$ ,  $z$  οι άξονες δεξιόστροφου Καρτεσιανού συστήματος αναφοράς και  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$  τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες αυτούς, τότε οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο για να αναπαράγει την θαλάσσια κυκλοφορία γράφονται ως εξής:

η εξίσωση συνέχειας, που εκφράζει τη διατήρηση της μάζας

$$\nabla \cdot V = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

όπου  $\mathbf{V}=\mathbf{i}u+\mathbf{j}v+\mathbf{k}w$  το άνυσμα της ταχύτητας,  $u$ ,  $v$  και  $w$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$  αντίστοιχα και  $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$  ο τελεστής Laplace που εκφράζει βάρθρωση μιας ποσότητας στο χώρο,

η εξίσωση κατάστασης

$$\rho = \rho(\Theta, S, p) \quad (5.2)$$

με την οποία εκφράζεται η συνάρτηση της πυκνότητας του θαλ. νερού  $\rho$  από την δυναμική θερμοκρασία  $\Theta$ , την αλατότητα  $S$  και την πίεση  $p$ . Η δυναμική θερμοκρασία  $\Theta$  και η θερμοκρασία πεδίου (in situ)  $T$  συνδέονται μέσω θερμοδυναμικών σχέσεων.

η εξίσωση διατήρησης άλατος

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y} - w \frac{\partial S}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5.3)$$

*Μεταφορά – Advection*

*Τυρβώδης Διάχυση*

*Turbulent Diffusion*

ή σε διανυσματική μορφή 
$$\frac{\partial S}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)S + \mathbf{D} \cdot \nabla^2 S \quad (5.3a)$$

όπου  $S$  η αλατότητα,  $D_h$  και  $D_z$  ο οριζώντιος και κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους διάχυσης (eddy diffusion coefficients) και  $\mathbf{D}=\mathbf{i}D_x+\mathbf{j}D_y+\mathbf{k}D_z$ .

η εξίσωση διατήρησης θερμότητας

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5.4)$$

ή 
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)T + \mathbf{D} \cdot \nabla^2 T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5.4a)$$

όπου  $T$  η θερμοκρασία. Ο όρος  $\partial R/\partial z$  παριστάνει τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας με το βάθος<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Διαστατική ανάλυση δείχνει ότι ο όρος  $R$  είναι κανονικοποιημένος, διαιρεμένος δηλαδή με το γινόμενο  $\rho c_p$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα και  $c_p$  η ειδική θερμότητα του νερού.

η εξίσωση κίνησης στον άξονα x

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \underbrace{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}}_{(\alpha)} + \underbrace{fv}_{(\beta)} + \underbrace{A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}_{(\gamma)} \quad (5.5)$$

η εξίσωση κίνησης στον άξονα y

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (5.6)$$

η εξίσωση κίνησης στον άξονα z

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + A_h \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (5.7)$$

όπου  $du/dt$ ,  $dv/dt$ ,  $dw/dt$  η επιτάχυνση στον αντίστοιχο άξονα (οι όροι στο δεύτερο μέρος των εξισώσεων (5.5), (5.6) και (5.7) παριστάνουν δύναμη ανά μονάδα μάζας). Ο όρος (α) είναι η δύναμη λόγω βαθμιδών πίεσης. Ο όρος (β) είναι η δύναμη Coriolis με  $f = 2\omega \sin(\varphi)$  την παράμετρο Coriolis,  $\omega$  το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Γης ( $\omega = 7.29 \cdot 10^{-5}$  rad/s) και  $\varphi = 39^\circ$  το γεωγραφικό πλάτος (στις εφαρμογές του μοντέλου το  $\gamma$  πλάτος θεωρείται σταθερό με συνέπεια το  $f$  να είναι και αυτό σταθερό –  $f$ -plane approximation). Ο όρος (γ) παριστάνει τις δυνάμεις τριβής (shearing stresses), όπου  $A_h$  και  $A_z$  ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής κινηματικού ιξώδους (eddy viscosity coefficients).

Αν η κυκλοφορία των θαλάσσιων μαζών πραγματοποιείται κυρίως στο οριζόντιο επίπεδο, όπως συμβαίνει συνήθως στα παράκτια συστήματα, και η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι πολύ μικρή σχετικά με την επιτάχυνση της βαρύτητας, η εξ.(5.7) μετασχηματίζεται στην υδροστατική εξίσωση

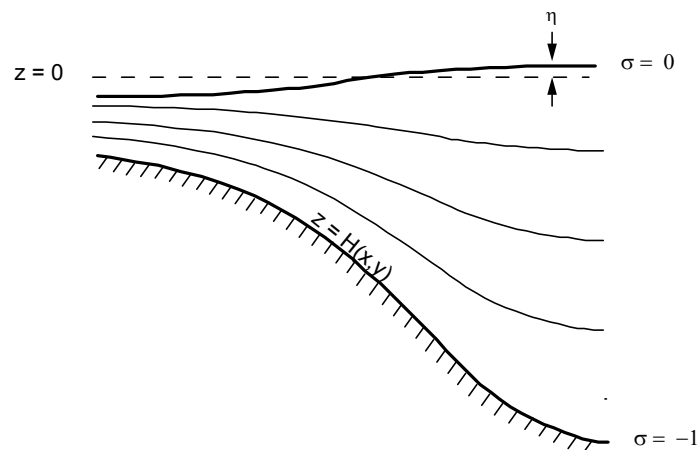
$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \Leftrightarrow \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (5.7a)$$

Το μοντέλο χρησιμοποιεί το σύστημα των σίγμα – συντεταγμένων, που ακολουθεί την τοπογραφία του πυθμένα (bottom following), καθώς η κλίμακα του κατακόρυφου άξονα καθορίζεται από το βάθος της υδάτινης στήλης (Σχήμα 5.1). Οι συντεταγμένες

$z$  και  $\sigma$  (αδιάστατο), του καρτεσιανού και σίγμα συστήματος αντίστοιχα, συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad (5.8)$$

όπου  $H(x, y)$  η βαθυμετρία και  $\eta$  το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας. Το  $\sigma$  παίρνει τιμές από 0 για  $z=\eta$  (επιφάνεια) έως  $-1$  για  $z= -H$  (πυθμένας). Η χρήση των  $\sigma$ -συν/νων θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για παράκτιες περιοχές με έντονες μεταβολές στην βαθυμετρία, καθώς αποφεύγονται τα υπολογιστικά σφάλματα που εισάγονται με τη χρήση ορθοκανονικών συστημάτων (Blumberg and Mellor 1983, Drago and Iovenitti 2000). Προσομοιώνεται έτσι ρεαλιστικά η δυναμική των στρωμάτων νερού κοντά στον πυθμένα, ο ρόλος των οποίων είναι σημαντικός σε παράκτια οικοσυστήματα, καθώς και σε οικοσυστήματα με παλιρροιογενή κίνηση των νερών.



**Σχήμα 5.1.** Το σύστημα των σίγμα συντεταγμένων (από Mellor, 1996).

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο POM ύστερα από τη μετατροπή τους στο σύστημα των  $\sigma$ -συντεταγμένων. Η μετατροπή αυτή περιγράφεται αναλυτικά από τους Blumberg and Mellor (1987). Η σχέση (5.9) είναι η εξίσωση συνέχειας, οι (5.10) και (5.11) οι εξισώσεις κίνησης στους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα, ενώ οι (5.12) και (5.13) εκφράζουν τη διατήρηση θερμοκρασίας και αλατότητας. Οι εξισώσεις (5.14) και (5.15) αποτελούν το υπομοντέλο τύρβης των Mellor – Yamada, που “κλείνει” το σύστημα των εξισώσεων (turbulence closure submodel) και εκφράζουν τη διατήρηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (TKE)  $q^2/2$ , μέσα από διεργασίες όπως η μεταφορά, η οριζόντια και κατακόρυφη διάχυση,

η παραγωγή και η κατανάλωση της ΤΚΕ. Το  $\ell$  ονομάζεται τυπική κλίμακα τύρβης (turbulent length scale) και είναι μέγεθος που εκφράζει την χωρική κλίμακα των φαινομένων.

**Πίνακας 5.1.** Οι μετασχηματισμένες, στο σύστημα των  $\sigma$ -συντεταγμένων, εξισώσεις συνέχειας, κίνησης, διατήρησης μάζας, θερμοκρασίας, αλατότητας και τυρβωδών ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται στο POM (από Mellor, 1996).

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] \\ & + \frac{2K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 \ell} + F_q \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 \ell D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 \ell D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 \ell D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 \ell}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 \ell}{\partial \sigma} \right] \\ & + E_1 \ell \left( \frac{K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \sigma} \right) \tilde{W} - \frac{Dq^3}{B_1} + F_\ell \end{aligned} \quad (5.15)$$



Το υπομοντέλο τύρβης των Mellor – Yamada (εξισώσεις 5.14 και 5.15), το οποίο υπολογίζει και τους συντελεστές κατακόρυφης ανάμιξης και διάχυσης  $K_M, K_H$  θεωρείται ότι περιγράφει ικανοποιητικά την δυναμική του επιφανειακού αναμεμιγμένου στρώματος, αν και όπως αναφέρεται από τον Mellor (1996), υπάρχουν ενδείξεις ότι μπορεί να υποεκτιμάται το βάθος του στρώματος αυτού.

Οι όροι της οριζόντιας ανάμιξης αναλύονται ως εξής:

$$\text{από την 5.10 (άξονας } x) \quad F_x \equiv \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \quad (5.16\alpha)$$

$$\text{από την 5.11 (άξονας } y) \quad F_y \equiv \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \quad (5.16\beta)$$

με τις διατμητικές τάσεις να περιγράφονται ως εξής:

$$\tau_{xx} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y}, \quad (5.17\alpha, \beta, \gamma)$$

και  $H$  το βάθος,  $A_M$  ο συντελεστής οριζόντιας ανάμιξης ορμής (βλ. παρακάτω),  $U, V$  οι οριζόντιες συνιστώσες ταχύτητας.

Αντίστοιχα, οι όροι της οριζόντιας διάχυσης για τις εξισώσεις (5.12) - (5.15):

$$F_\phi \equiv \frac{\partial}{\partial x}(Hq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Hq_y) \quad (5.18)$$

$$\text{όπου} \quad q_x \equiv A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad q_y \equiv A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (5.19\alpha, \beta)$$

με  $A_H$  τον συντελεστή οριζόντιας ανάμιξης θερμότητας, αλατότητας κ.ο.κ (βλ. παρακάτω) και το  $\phi$  να αντιστοιχεί στις μεταβλητές  $T, S, q^2, q^2 l$ .

Πρόσθετες επεξηγήσεις για τα σύμβολα του Πίνακα 5.1 (αναλυτική περιγραφή δίνεται από τον Mellor 1996):  $\eta$  είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας,  $D = H + \eta$ , με  $H(x, y)$  το βάθος και  $\omega$  η μετασηματισμένη, κατακόρυφη ταχύτητα (κάθετη στις σ-επιφάνειες). Ο όρος  $\rho'$  προκύπτει από την αφαίρεση από κάθε  $\rho(x, y)$  της μέσης τιμής της πυκνότητας  $\rho_{\text{mean}}$ . Σύμφωνα με τους Mellor et al. (1994), αυτή η διαδικασία μειώνει το υπολογιστικό σφάλμα στον υπολογισμό των βαθμίδων πίεσης στη σ-διάσταση, κυρίως σε πυθμένες με απότομη τοπογραφία.

Οι συντελεστές οριζόντιας ανάμιξης για την ορμή ( $A_M$  - viscosity) και την θερμότητα (αλλά και για οποιαδήποτε συντηρητική παράμετρο, π.χ. αλατότητα) ( $A_H$  - diffusivity) υπολογίζονται στο POM με σχήμα τύπου Smagorinsky:

$$A_M, A_H = (C_{vis}, C_{dif}) \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.20)$$

όπου  $u$  και  $v$  οι συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $\Delta x$  και  $\Delta y$  οι οριζόντιες διαστάσεις των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος. Οι συντελεστές οριζόντιας ανάμιξης συνδέονται με τη σχέση  $A_M * TPRNI = A_H$ , όπου η παράμετρος  $TPRNI$  είναι ο αντίστροφος του αριθμού Prandtl (inverse turbulence Prandtl number), που ποσοτικοποιεί τη σχετική σημασία της ανάμιξης ορμής (viscosity) με την ανάμιξη θερμότητας (diffusivity). Στην παρούσα εργασία, για τον προσδιορισμό του  $A_M$ , χρησιμοποιείται η τιμή  $C_{vis} = C_{dif} = 0.05$  για τον συγκεκριμένο αδιάστατο συντελεστή (παράμετρος HORCON του POM). Από το γινόμενο  $A_M * TPRNI$  προσδιορίζεται ο συντελεστής  $A_H$  με  $TPRNI = 0.2$  (τιμές στα εύρη που προτείνει ο Ezer 2011, part02). Από τη σχέση 5.20 είναι φανερό ότι οι συντελεστές οριζόντιας ανάμιξης είναι ανάλογοι τόσο του μεγέθους του κελιού, με αποτέλεσμα να μειώνονται όσο αυξάνεται η οριζόντια διακριτοποίηση του πλέγματος, όσο και των βαθμίδων ταχύτητας. Οι αντίστοιχοι κατακόρυφοι συντελεστές ιξώδους  $K_M$  και διάχυσης  $K_H$  παρέχονται από το τυρβώδες υπομοντέλο.

Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων διαφορών: κεντρικές πεπερασμένες διαφορές στο χώρο ενώ, το σχήμα ολοκλήρωσης στο χρόνο είναι τύπου leap-frog (π.χ.  $u_{n+1} - u_{n-1} / 2\Delta t$ ). Και τα δυο σχήματα έχουν ακρίβεια δεύτερης τάξης. Για την χρονική διακριτοποίηση, το μοντέλο POM χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά χρονικά βήματα (Σχήματα 5.2 και 5.3): ένα μικρό βήμα χρόνου DTE για την επίλυση των βαροτροπικών (κατά βάθος ολοκληρωμένων - δισδιάστατων) εξισώσεων στο τμήμα του προγράμματος που αναφέρεται ως External Mode και ένα μεγαλύτερο βήμα χρόνου DTI για την επίλυση των βαροκλιτικών (τρισδιάστατων) εξισώσεων στο τμήμα που αναφέρεται ως Internal Mode. Η τεχνική επίλυσης με διαφορετικά βήματα χρόνου ονομάζεται time ή mode splitting technique και έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, καθώς οι τρισδιάστατες, βαροκλιτικές εξισώσεις που είναι πιο σύνθετες και απαιτητικές σε

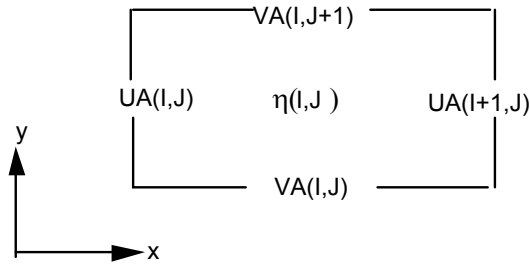
χρόνο επιλύονται με μεγάλο βήμα χρόνου. Οι υπολογισμοί στο External Mode δίνουν προγνώσεις της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και των μέσων κατά βάθος ταχυτήτων  $U_A, V_A$  ενώ στο Internal Mode υπολογίζονται προγνωστικά οι ταχύτητες  $U$  και  $V$ , η αλατότητα  $S$ , η θερμοκρασία  $T$  και οι τυρβώδεις μεταβλητές  $q^2, q^2l$ .

Όσον αφορά τα κριτήρια αριθμητικής σταθερότητας, και οι δύο λύσεις που προκύπτουν από τα δύο modes περιορίζονται από το κριτήριο Courant-Friedrichs-Levy (CFL). Έτσι, για το μικρό βήμα χρόνου DTE του External Mode ισχύει

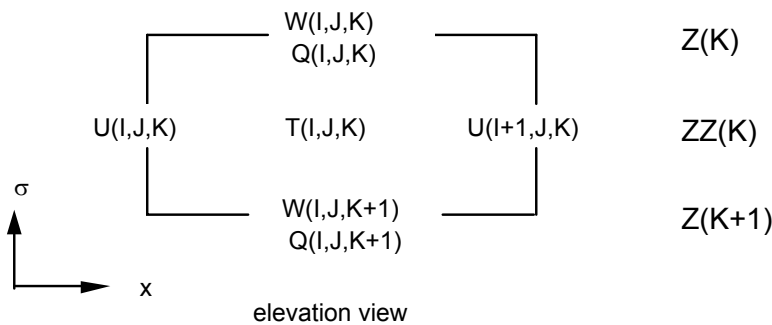
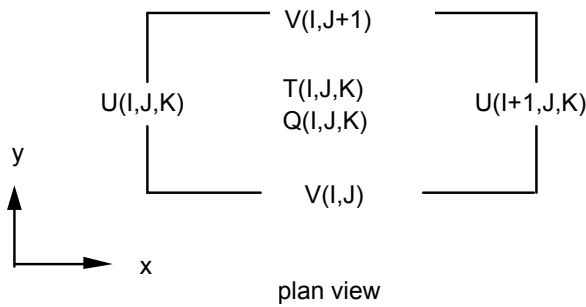
$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (5.21)$$

όπου  $C_t = 2(gH)^{1/2} + U_{\max}$  με  $U_{\max}$  την αναμενόμενη μέγιστη τιμή ταχύτητας. Συνήθως το βήμα χρόνου που χρησιμοποιείται είναι το 90% αυτής της τιμής. Με το κριτήριο CFL, το βήμα χρόνου εξαρτάται από την ταχύτητα κύματος  $(gH)^{1/2}$ : το βήμα πρέπει να είναι μικρότερο από τον χρόνο που χρειάζεται ένα κύμα να διανύσει μια στοιχειώδη απόσταση  $\delta x$  ή  $\delta y$ . Ο λόγος των δύο βημάτων  $\Delta t_I / \Delta t_E = DTI / DTE$  κυμαίνεται μεταξύ 50 – 80 ή και περισσότερο.

Για την χωρική διακριτοποίηση στην οριζόντια διεύθυνση, ο χρήστης του μοντέλου POM θα πρέπει να δημιουργήσει πλέγμα (κάνναβο) όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις του Πίνακα 5.1. Το πλέγμα μπορεί να αποτελείται από καμπυλόγραμμες ορθογώνιες συντεταγμένες (curvilinear orthogonal coordinates – grid) αλλά και ορθογώνιες καρτεσιανές συντεταγμένες (rectilinear orthogonal coordinates) με σταθερό ή μεταβλητό μέγεθος κελιού  $\Delta X, \Delta Y$ . Ο τρόπος διάταξης των μεταβλητών στο χώρο παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.2 και 5.3 και είναι γνωστός ως πλέγμα τύπου "Aracawa-C". Όπως φαίνεται, οι ταχύτητες διατάσσονται στα μέσα των πλευρών των νοητών τετραγώνων ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές στο κέντρο των τετραγώνων. Στον τρισδιάστατο χώρο, σε κάθε νοητό στοιχειώδη "κύβο", οι ταχύτητες υπολογίζονται στο κέντρο των 6 πλευρών ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές (θερμοκρασία, αλατότητα, κλπ) στο κέντρο του κύβου.



**Σχήμα 5.2.** Το αριθμητικό πλέγμα για το δισδιάστατο τμήμα του κώδικα του υδροδυναμικού υπομοντέλου (external mode).



**Σχήμα 5.3.** Το αριθμητικό πλέγμα για το τρισδιάστατο τμήμα του κώδικα του υδροδυναμικού υπομοντέλου (internal mode). Το Q αντιστοιχεί στους συντελεστές κατακόρυφης ανάμιξης και διάχυσης  $K_M, K_{th}$  και τα μεγέθη τύρβης  $q^2, q^2_l$ . Το T αντιστοιχεί στα μεγέθη T, S ή την πυκνότητα R.

Συνοψίζοντας, το Princeton Ocean Model είναι ένα τρισδιάστατο, υδροδυναμικό μοντέλο κυκλοφορίας που υπολογίζει τις χρονικά μεταβαλλόμενες κατανομές της θαλάσσιας επιφάνειας, των ρευμάτων, της θερμοκρασίας και της αλατότητας στο χώρο, όπου:

- χρησιμοποιείται το σύστημα των σίγμα-συντεταγμένων στον κατακόρυφο άξονα (sigma-coordinates), που ακολουθεί την τοπογραφία του πυθμένα,
- η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας είναι προγνωστική μεταβλητή, καθώς πρόκειται για μοντέλο ελεύθερης επιφάνειας (free surface) ,

- το μοντέλο επιλύει τις πρωτογενείς εξισώσεις (primitive equations) με σχήμα πεπερασμένων διαφορών τύπου "Aracawa C",
- χρησιμοποιείται η τεχνική διαχωρισμού των βημάτων για τον υπολογισμό του βαροτροπικού-δισδιάστατου τμήματος της δυναμικής (ανύψωση της ελεύθερης θαλάσσιας επιφάνειας και μέσες κατά βάθος οριζόντιες ταχύτητες) και του βαροκλινικού-τρισδιάστατου τμήματος της δυναμικής (κατακόρυφη δομή των ρευμάτων, θερμοκρασίας, αλατότητας) (time splitting technique),
- οι συντελεστές οριζόντιας διάχυσης υπολογίζονται με σχήμα τύπου Smagorinsky,
- χρησιμοποιούνται η υδροστατική προσέγγιση (εξίσωση 5.7a) και η προσέγγιση Boussinesq, οι διακυμάνσεις της πυκνότητας (αποκλίσεις  $\rho' = \rho - \rho_0$  γύρω από μία τιμή αναφοράς  $\rho_0$ ) θεωρούνται αμελητέες ( $\rho' \ll \rho_0$ ) ώστε να μπορούν να αγνοηθούν, εκτός όταν βρίσκονται σε όρους όπου πολλαπλασιάζονται με την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$ .<sup>2</sup>
- για τον υπολογισμό της τυρβώδους διάχυσης στον κατακόρυφο άξονα, χρησιμοποιείται το υπομοντέλο τύρβης των Mellor-Yamada.

Από το εύρος των εφαρμογών του τόσο σε ερευνητικό όσο και σε επιχειρησιακό επίπεδο και τον αριθμό των βιβλιογραφικών αναφορών μπορεί να κριθεί ως ιδιαίτερα επιτυχημένο. Ωστόσο, το POM παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες που σχετίζονται με τη χρήση των σίγμα συντεταγμένων στην κατακόρυφη διάσταση, και οι οποίες έχουν διαγνωστεί και σε αντίστοιχα μοντέλα ατμοσφαιρικών διεργασιών (Haney 1991). Συγκεκριμένα, δημιουργούνται αριθμητικά λάθη κατά τον υπολογισμό της οριζόντιας βαθμίδας της πίεσης πάνω από απότομη τοπογραφία πυθμένα, τα οποία με τη σειρά τους είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε λανθασμένα πεδία ταχυτήτων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί υπερεκτιμημένη διάπυκνη ανάμιξη. Οι Mellor et al. (1994, 1998) και Mellor (1996) ασχολήθηκαν με τα συγκεκριμένα ζήτημα και κατέληξαν σε συμπεράσματα και σε προτάσεις-συμβουλές για την μείωση αυτών των σφαλμάτων, όπως π.χ. η αύξηση της διακριτικής ικανότητας του μοντέλου. Το είδος και η φύση των σφαλμάτων αυτών είναι τέτοια που, με την εφαρμογή αυτών των προτάσεων, είτε εξαφανίζονται με την πάροδο κάποιου χρόνου προσομοίωσης είτε είναι αρκετά μικρά ώστε να μην έχουν πρακτική επίπτωση στα προσομοιωμένα πεδία πυκνότητας και ταχυτήτων.

<sup>2</sup> Οι επιπτώσεις των διακυμάνσεων  $\rho'$  στη μάζα (inertia) μπορούν να αγνοηθούν, όχι όμως και στο βάρος (buoyancy effects). Στο οριζόντιο επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μέση τιμή πυκνότητας  $\rho_0$  στις εξισώσεις κίνησης, αγνοώντας μεταβολές στην επιτάχυνση λόγω διακυμάνσεων  $\rho'$ , αλλά στον κατακόρυφο άξονα z οι διακυμάνσεις της πυκνότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη, π.χ. στον υπολογισμό της σταθερότητας στήλης ή του πεδίου πιέσεων.

### 5.1.2. Βαθυμετρία, επιλογή πλέγματος και υπολογιστικό πεδίο.

Η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης προήλθε από τον υδρογραφικό χάρτη με αριθμό 332 (Νήσος Λέσβος και έναντι ακτές Μ. Ασίας). Ο χάρτης ψηφιοποιήθηκε με τη βοήθεια Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ψηφιοποίηση με Arc Info, παραγωγή ψηφιακού μοντέλου πυθμένα με Arc View, εξαγωγή ορθοκανονικού αρχείου βαθυμετρίας) και τελικά προέκυψε ένα αρχείο κειμένου (.txt) που περιείχε τα δεδομένα της βαθυμετρίας και χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα στάδια.

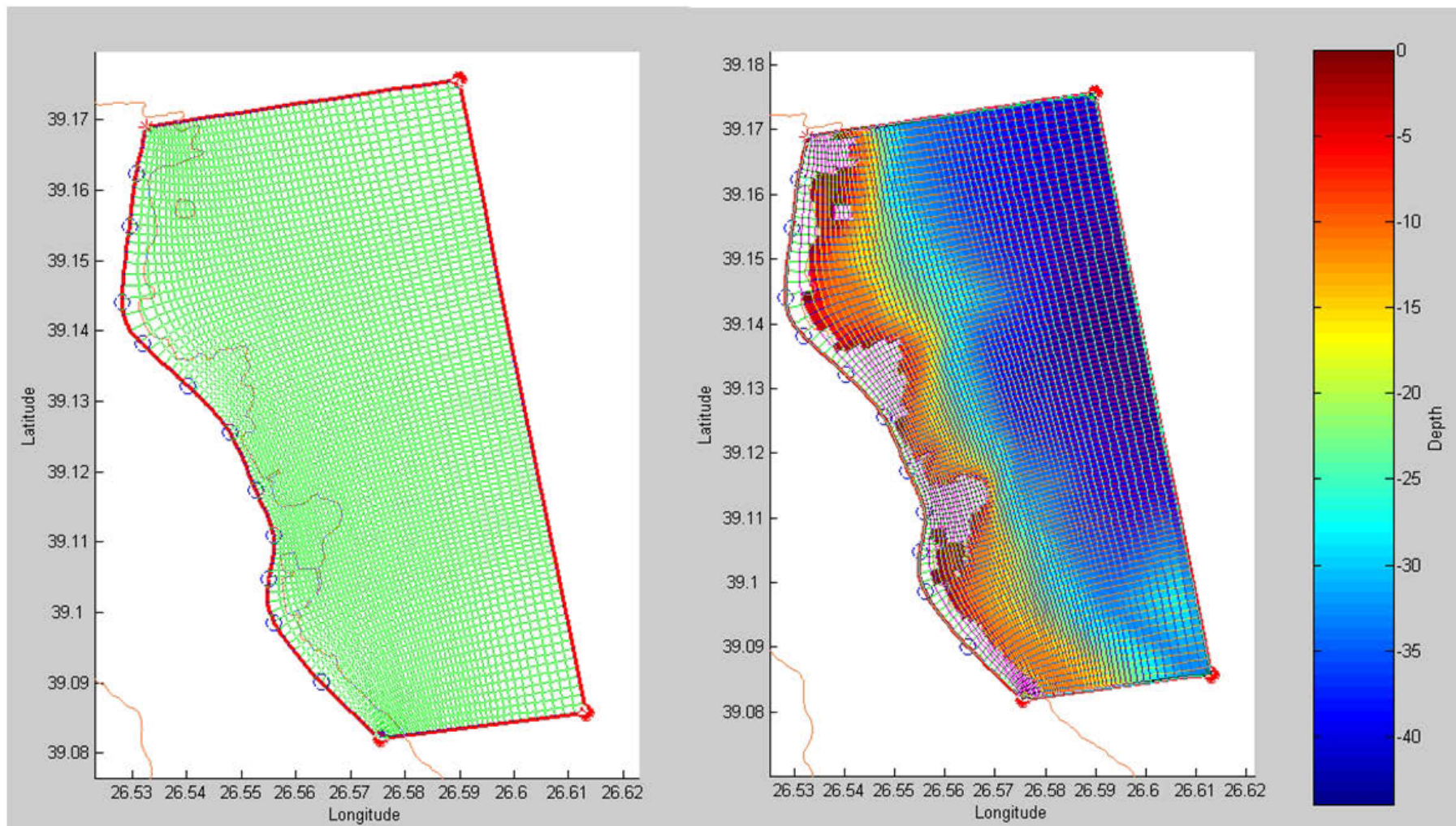
Στη συνέχεια, αναζητήθηκε κατάλληλο λογισμικό για την ανάπτυξη καμπυλόγραμμου πλέγματος. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeaGrid (<http://woodshole.er.usgs.gov/operations/modeling/seagrid/>), το οποίο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB από τους C.R. Denham και R. Signell και διατίθεται ελεύθερα.

Επιλέχθηκε η χρήση καμπυλόγραμμου πλέγματος και το συγκεκριμένο λογισμικό για δύο λόγους:

(α) το καμπυλόγραμμο πλέγμα, διαθέτοντας μεταβλητό μέγεθος κελιού, δίνει στον ερευνητή τη δυνατότητα να εστιάσει στην περιοχή ενδιαφέροντος και να μελετήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα φαινόμενα. Παρέχει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα στην περιοχή ενδιαφέροντος (στη συγκεκριμένη περίπτωση κοντά στις ακτές) και μικρότερη διακριτική ικανότητα (μεγαλύτερα κελιά) κοντά στα ανοιχτά όρια, ενώ αποφεύγεται και η στερία. Εξοικονομείται έτσι υπολογιστικός χρόνος.

(β) το SEAGRID είναι διαδραστικό λογισμικό, σχετικά εύκολο στη χρήση του, που παρέχει ελευθερία κινήσεων, επιλογών και δυνατότητα επαναλαμβανόμενων δοκιμών (βεβαίως προηγείται η προπαρασκευή δύο αρχείων εισόδου: της βαθυμετρίας και της ακτογραμμής).

Ο κάρναβος που τελικά χρησιμοποιήθηκε και οριοθετεί το υπολογιστικό πεδίο του μοντέλου, είναι ένα καμπυλόγραμμο πλέγμα  $50 \times 100$  κελιών, με μέγεθος κελιού που κυμαίνεται από 19m έως 302m (στα ανοιχτά όρια) (Σχήμα 5.4). Στο ίδιο σχήμα, παρουσιάζεται η βαθυμετρία του μοντέλου: ουσιαστικά, υπολογίζονται οι τιμές βάθους στα κελιά του καμπυλόγραμμου πλέγματος με παρεμβολή από το αρχείο βαθυμετρίας που προέκυψε από την ψηφιοποίηση. Τέλος, η βαθυμετρία που προκύπτει από το seagrid και χρησιμοποιείται ως αρχείο εισόδου στο μοντέλο έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5.



**Σχήμα 5.4.** Το καμπυλόγραμμο πλέγμα (κάνναβος) (αριστερά) και η βαθυμετρία που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο (δεξιά). Διακρίνεται η μάσκα στεριάς.

Αρχείο	Επεξεργασία	Μορφή	Προβολή	Βοήθεια					
15	93	76.71	130.90	12.65	3.60	26.544045	39.161466		
15	94	75.46	130.28	11.90	3.70	26.543818	39.162627		
15	95	74.07	129.66	11.14	3.90	26.543588	39.163782		
15	96	72.48	128.54	8.40	4.20	26.543352	39.164929		
15	97	71.21	127.69	7.63	4.90	26.543109	39.166065		
15	98	70.25	128.32	8.28	5.50	26.542853	39.167199		
15	99	69.33	128.44	7.66	6.50	26.542581	39.168334		
15	100	68.73	133.04	7.66	7.90	26.542289	39.169488		
16	1	37.52	85.48	5.94	8.10	26.580060	39.082872		
16	2	37.61	94.42	5.94	10.40	26.579781	39.083651		
16	3	38.36	99.79	6.51	13.10	26.579460	39.084489		
16	4	39.53	104.19	7.13	16.20	26.579100	39.085362		
16	5	40.83	108.79	7.90	19.00	26.578700	39.086268		
16	6	42.43	111.89	8.99	21.20	26.578265	39.087201		
16	7	44.30	115.08	10.14	23.10	26.577795	39.088154		
16	8	46.30	117.63	11.17	24.40	26.577290	39.089124		
16	9	48.51	119.72	12.22	25.70	26.576762	39.090109		
16	10	50.68	120.70	13.28	26.60	26.576216	39.091104		
16	11	52.53	121.37	14.30	26.90	26.575658	39.092103		
16	12	54.37	121.20	15.23	26.70	26.575097	39.093103		
16	13	56.28	119.26	16.08	26.60	26.574538	39.094093		
16	14	57.93	117.02	16.90	26.40	26.573992	39.095067		
16	15	59.38	113.24	17.63	25.90	26.573464	39.096018		
16	16	60.71	109.50	18.13	25.30	26.572956	39.096939		
16	17	61.91	105.60	18.05	24.80	26.572474	39.097831		
16	18	62.98	102.04	17.75	24.30	26.572018	39.098695		
16	19	63.87	98.83	17.20	23.70	26.571587	39.099534		
16	20	64.59	95.72	16.55	22.70	26.571179	39.100349		
16	21	65.20	93.06	15.93	21.80	26.570793	39.101144		
16	22	65.60	90.31	15.29	21.10	26.570427	39.101918		
16	23	65.88	88.35	14.72	20.40	26.570079	39.102674		
16	24	66.16	86.27	14.40	19.80	26.569748	39.103416		
16	25	66.33	85.24	13.89	19.10	26.569430	39.104147		
16	26	66.30	84.20	13.17	18.40	26.569125	39.104871		
16	27	66.16	83.60	12.36	18.00	26.568830	39.105590		
16	28	66.10	83.30	11.49	17.60	26.568541	39.106306		
16	29	65.85	84.04	11.03	17.20	26.568257	39.107026		
16	30	65.46	84.54	10.23	16.70	26.567976	39.107752		

**Σχήμα 5.5.** Αρχείο βαθυμετρίας όπως προκύπτει τελικά από το SeaGrid και χρησιμοποιείται στο μοντέλο: (οι στήλες από αριστερά) I (αριθμός κόμβου στον άξονα x), J (αριθμός κόμβου στον άξονα y), DX, DY (διαστάσεις κελιού), Βάθος ενώ οι δυο τελευταίες στήλες είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος των κόμβων του πλέγματος.

### 5.1.3 Οριακές συνθήκες (boundary conditions) και Συναρτήσεις Φόρτισης (forcing functions).

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου του μοντέλου και την ελεύθερη επιφάνεια (διεπιφάνεια θάλασσας – ατμόσφαιρας) και η λογική εισαγωγής τους στον κώδικα του μοντέλου. Το θεωρητικό υπόβαθρο και οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες (τις ανταλλαγές θερμότητας, νερού και ορμής μεταξύ ατμόσφαιρας-θάλασσας και με τις γειτονικές μάζες νερού εκτός υπολογιστικού πεδίου) και οι αντίστοιχες αριθμητικές εκφράσεις (numerics) περιγράφονται αναλυτικά από τον Mellor (1996, 2004).

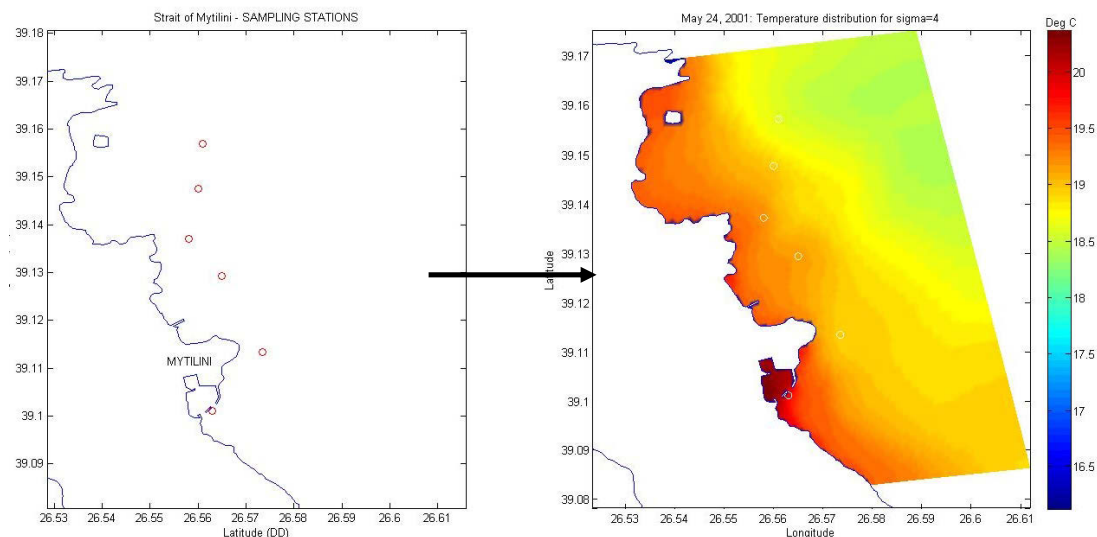


### **Ελεύθερη επιφάνεια: Θερμοκρασία και αλατότητα**

Το υδροδυναμικό μοντέλο POM δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το είδος των επιφανειακών συνθηκών που προτιμάει να χρησιμοποιήσει (Mellor, 1996) έτσι ώστε να προσομοιωθούν οι ανταλλαγές θερμότητας και νερού μεταξύ ατμόσφαιρας – θάλασσας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι *επιφανειακές κατανομές θερμοκρασίας (sea surface temperature SST)* και *αλατότητας (sea surface salinity SSS)* με την λογική ότι οι κατανομές αυτών των παραμέτρων στην επιφάνεια της θάλασσας σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή αποτυπώνουν την δυναμική ισορροπία και το επίπεδο ανταλλαγών – ροών θερμότητας και νερού από και προς την ατμόσφαιρα. Ειδικά για την αλατότητα, αποτυπώνεται και η επίδραση χερσαίων απορροών γλυκού νερού, αν υπάρχουν ποτάμια.

Για να προκύψουν μεταβλητές επιφανειακές συνθήκες (που θα μεταβάλλονται καθώς θα 'τρέχει' το μοντέλο), ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία: από τα πειραματικά δεδομένα που συλλέγονται στις δειγματοληψίες δημιουργούνται με παρεμβολή δισδιάστατα πεδία SST και SSS (Σχήμα 6.1.6). Στη συνέχεια, μεταξύ δυο διαδοχικών δειγματοληψιών παράγονται, με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, πεδία SST και SSS. Έτσι, αν ο χρήστης επιθυμεί να προσομοιώσει ένα θαλάσσιο σύστημα για 2 μήνες, έχοντας στη διάθεσή του 3 επιφανειακά πεδία SST και SSS από αντίστοιχες δειγματοληψίες, μπορεί να παράγει ενδιάμεσα επιφανειακά πεδία SST και SSS, με όποια συχνότητα επιθυμεί να εισάγονται στο μοντέλο, π.χ. κάθε μέρα. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, που παράγει τα 'τεχνητά' επιφανειακά πεδία SST και SSS. Η διαδικασία που περιγράφηκε, συνοψίζεται στο Σχήμα 5.7.

Επομένως, κάθε μέρα το μοντέλο 'οδηγείται' από διαφορετικά επιφανειακά πεδία θερμοκρασίας και αλατότητας, που στην εξέλιξη του χρόνου αποτυπώνουν, έστω και ήπια, την επίδραση της ατμόσφαιρας και λειτουργούν ως συνάρτηση φόρτισης για το μοντέλο.



**Σχήμα 5.6.** Δημιουργία δισδιάστατων επιφανειακών πεδίων θερμοκρασίας / αλατότητας με παρεμβολή σημειακών πειραματικών μετρήσεων.

### Ανοιχτά όρια: Θερμοκρασία και αλατότητα

Εκτός των επιφανειακών οριακών συνθηκών, είναι πολύ κρίσιμος ο ορισμός και των συνθηκών στα ανοιχτά όρια, τη διεπιφάνεια μεταξύ του υπολογιστικού πεδίου και των γειτονικών θαλάσσιων μαζών που δεν ανήκουν σε αυτό. Όσο πιστότερα περιγράφονται οι ανταλλαγές μάζας και ενέργειας μέσω των ανοιχτών ορίων, τόσο ακριβέστερη (με μικρότερα σφάλματα) θα είναι η προσομοίωση. Πρακτικά, πιστή περιγραφή των ανταλλαγών σημαίνει διαθέσιμα δεδομένα πεδίου στα ανοιχτά όρια (για θερμοκρασία, αλατότητα και ταχύτητα ρεύματος) και κατάλληλη μαθηματική και αριθμητική έκφραση που να περιγράφει τις ανταλλαγές.

Από μαθηματικής άποψης, η σχέση που περιγράφει τις ανταλλαγές θερμότητας και αλατότητας στα ανοιχτά όρια (και όλων των οικολογικών μεταβλητών όπως θα αναπτυχθεί σε επόμενη παράγραφο) είναι η (5.22) στον Πίνακα 5.2. Για την ταχύτητα χρησιμοποιούνται συνθήκες ελεύθερης διάβασης (ακτινοβολίας) τύπου Sommerfeld (Σχέσεις 5.23 και 5.24). Οι συγκεκριμένες οριακές συνθήκες ταχύτητας χαρακτηρίζονται και ως παθητικές οριακές συνθήκες γιατί το μοντέλο δεν χρησιμοποιεί οριακά δεδομένα για την ταχύτητα ρεύματος, δηλαδή τιμές προερχόμενες από μετρήσεις πεδίου, ή κάποιο άλλο μοντέλο (σε αντίθεση με τη θερμοκρασία και την αλατότητα) (Gan and Allen, 2005).

Η υπορουτίνα που πραγματοποιεί τους υπολογισμούς των οριακών συνθηκών είναι η BCOND ενώ τεχνικές λεπτομέρειες δίνονται από τον Mellor (1996, 2004).

Το υπολογιστικό πεδίο του μοντέλου, όπως σχεδιάστηκε, έχει τρία ανοιχτά όρια: βόρεια, ανατολικά και νότια, ενώ από τα δυτικά κλείνεται από την ακτογραμμή. Καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα πεδίου στα ανοιχτά όρια, οι οριακές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προέκυψαν όπως περιγράφεται παρακάτω:

Για να προκύψουν μεταβλητές συνθήκες στα ανοιχτά όρια (που θα μεταβάλλονται καθώς θα 'τρέχει' το μοντέλο), ακολουθήθηκε η ίδια λογική που χρησιμοποιήθηκε για τις επιφανειακές συνθήκες: από τα πειραματικά δεδομένα που συλλέγονται στις δειγματοληψίες δημιουργούνται με παρεμβολή τρισδιάστατες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας, δηλαδή υπολογίζονται τιμές στους κόμβους του πλέγματος. Οι τιμές των κόμβων που οριοθετούν τα ανοιχτά όρια διαχωρίζονται (αποθηκεύονται) σε ξεχωριστά αρχεία. Έτσι, για τη θερμοκρασία για παράδειγμα, προκύπτουν από μία δειγματοληψία τρία αρχεία δύο διαστάσεων (κάθετες τομές), ένα για κάθε όριο (βόρεια, ανατολικά και νότια).

Στη συνέχεια, μεταξύ δυο διαδοχικών οριακών αρχείων παράγονται, με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, ενδιάμεσες χρονικά, κάθετες τομές οριακών τιμών. Έτσι, αν ο χρήστης επιθυμεί να προσομοιώσει ένα θαλάσσιο σύστημα για 2 μήνες, έχοντας στη διάθεσή του τρία οριακά αρχεία θερμοκρασίας και αλατότητας από αντίστοιχες δειγματοληψίες, μπορεί να παράγει ενδιάμεσες οριακές κάθετες τομές θερμοκρασίας και αλατότητας για κάθε ανοιχτό όριο, με όποια συχνότητα επιθυμεί να χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, π.χ. κάθε μέρα (Σχήμα 5.8).

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, που παράγει τις 'τεχνητές' ενδιάμεσες οριακές κάθετες τομές. Η διαδικασία που περιγράφηκε, συνοψίζεται στο Σχήμα 5.8. Επομένως, κάθε μέρα το μοντέλο 'οδηγείται' από διαφορετικά οριακά πεδία (κάθετες τομές) θερμοκρασίας και αλατότητας, που στην εξέλιξη του χρόνου αποτυπώνουν, έστω και ήπια, τις ανταλλαγές θερμότητας, αλατότητας και ορμής και λειτουργούν ως συνάρτηση φόρτισης για το μοντέλο.

**Πίνακας 5.2.** Μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες για τις μεταβλητές του μοντέλου και περιληπτικά, η φυσική σημασία τους. Αναλυτική διατύπωσή τους δίνεται από τον Mellor (1996).

Μεταβλητή	Σχέση	Περιγραφή
Θερμοκρασία, Αλατότητα, Οικολογικές μεταβλητές	$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5.22)$ <p>όπου T: μεταβλητή U: ταχύτητα.</p>	Upstream advection Τα οριακά δεδομένα, που παράγονται όπως περιγράφεται στη συνέχεια της παραγράφου, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των οριακών τιμών μόνο όταν υπάρχει εισροή (inflow) νερού προς το εσωτερικό του υπολογιστικού πεδίου. Αποθηκεύονται στις μεταβλητές του POM TBN, TBS, TBE για θερμοκρασία και SBN, SBS, SBE για αλατότητα και βόρεια, νότια, ανατολικά όρια αντίστοιχα.
Βαροκλιτική Ταχύτητα (internal mode)	<p>για την κάθετη προς το ανοιχτό όριο ταχύτητα:</p> $\frac{\partial U}{\partial t} \pm c_i \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (5.23)$ <p>όπου U: ταχύτητα, H: βάθος, <math>c_i</math>: ταχύτητα βαροκλιτικού κύματος,</p> <p>Η παράλληλη με το ανοιχτό όριο συνιστώσα ταχύτητας τίθεται ίση με 0</p>	Συνθήκες ακτινοβολίας τύπου Sommerfeld (Radiation conditions): οι διαταραχές που δημιουργούνται μέσα στο υπολογιστικό πεδίο μεταφέρονται (ακτινοβολούνται) έξω από αυτό.
Βαροτροπική Ταχύτητα (external mode)	<p>για την κάθετη προς το ανοιχτό όριο μέση ταχύτητα:</p> $H\bar{U} \pm c_e \eta = 0 \quad (5.24)$ <p>όπου <math>\bar{U}</math>: μέση ταχύτητα, H: βάθος, <math>c_e = \sqrt{gH}</math>: ταχύτητα βαροτροπικού κύματος, <math>\eta</math>: η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας</p> <p>Η παράλληλη με το ανοιχτό όριο συνιστώσα της μέσης ταχύτητας τίθεται ίση με 0</p>	Συνθήκες ακτινοβολίας (Radiation conditions)
Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας	$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$	Μηδενική κλίση (zero gradient condition)

## Άνεμος

Η επίδραση του ανέμου στην κίνηση του νερού, με τη δημιουργία διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια αέρα-θάλασσας, παραμετροποιείται με τη χρήση της παρακάτω σχέσης (Weiyan 1992) η οποία αναλύεται στους δύο άξονες x, y:

$$\tau_{ax} = \rho_a c_d |w_a| w_x \quad (5.25)$$

$\tau_a$  : η διατμητική τάση λόγω ανέμου σε newton/m<sup>2</sup>,

$\rho_a$  : η πυκνότητα του αέρα σε kg/m<sup>3</sup> (χρησιμοποιείται σταθερή τιμή, ίση με 1.293 kg/m<sup>3</sup> που είναι η πυκνότητα αέρα στους 0 °C και πίεση 1 atm),

$c_d$  : αδιάστατος συντελεστής αντίστασης της τριβής (drag coefficient) που παρέχεται από την εμπειρική σχέση του Wilson:

$$c_d = (0.9 + 0.08w_a) \cdot 10^{-3} \quad (5.26)$$

$w_a$  : η ταχύτητα του ανέμου σε m/s,

$w_{x,y}$ : οι συνιστώσες της ταχύτητας ανέμου στους δύο άξονες, m/s.

Επειδή στο POM η επίδραση του ανέμου εκφράζεται ως επιφανειακή ροή ορμής (surface momentum fluxes) σε m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, η διατμητική τάση  $\tau_{ax,y}$  διαιρείται με μια μέση θαλάσσια πυκνότητα  $\rho=1023$  kg/m<sup>3</sup> και αντιστρέφεται το πρόσημο. Η υπορουτίνα WINDSTRES μοντελοποιεί την επίδραση του ανέμου, περιλαμβάνοντας όλα τα παραπάνω.

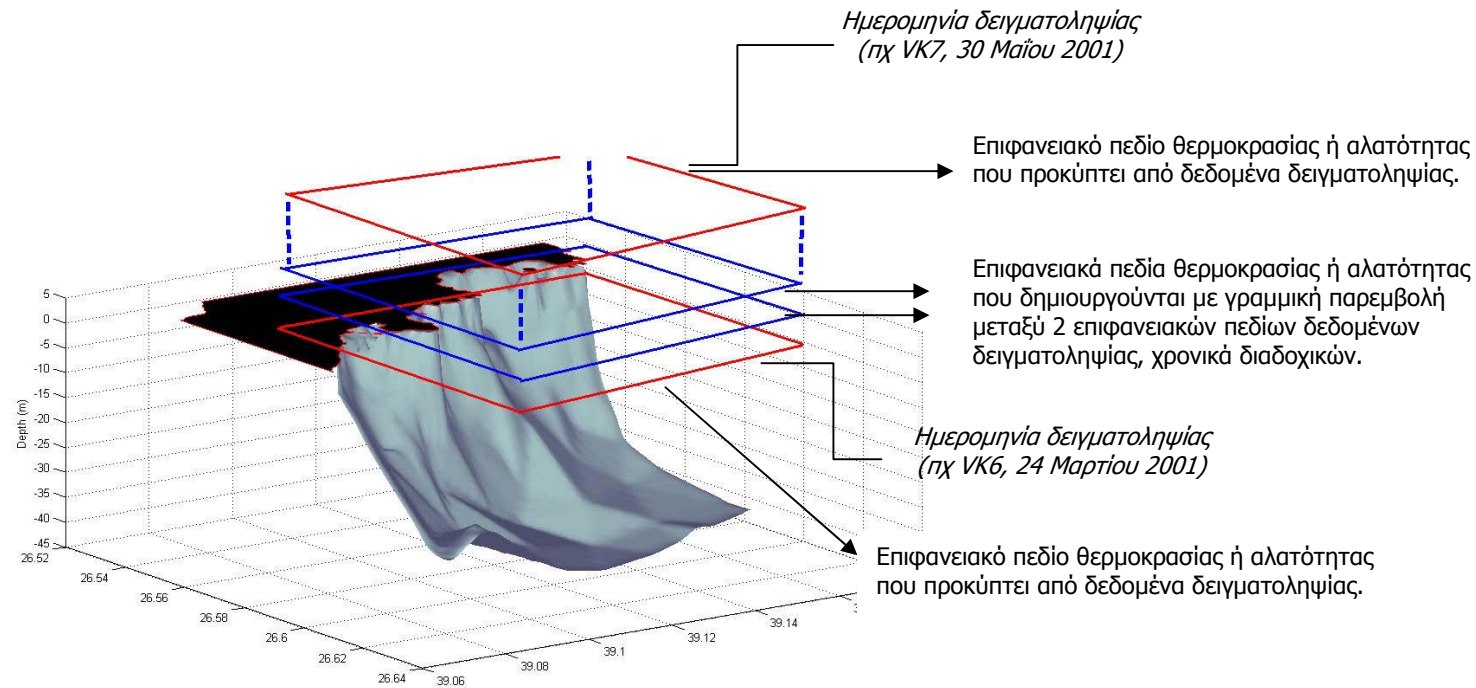
Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως αρχείο εισόδου στο μοντέλο (συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στους άξονες x και y, -  $w_x$ ,  $w_y$  κάθε τρεις ώρες) προέρχονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ), από τον Σταθμό Μυτιλήνης που βρίσκεται στο Αεροδρόμιο 'Όδυσσέας Ελύτης' (Σύμβαση 69/2005), στα νότια της πόλης της Μυτιλήνης.

### 5.1.4. Αρχικές συνθήκες

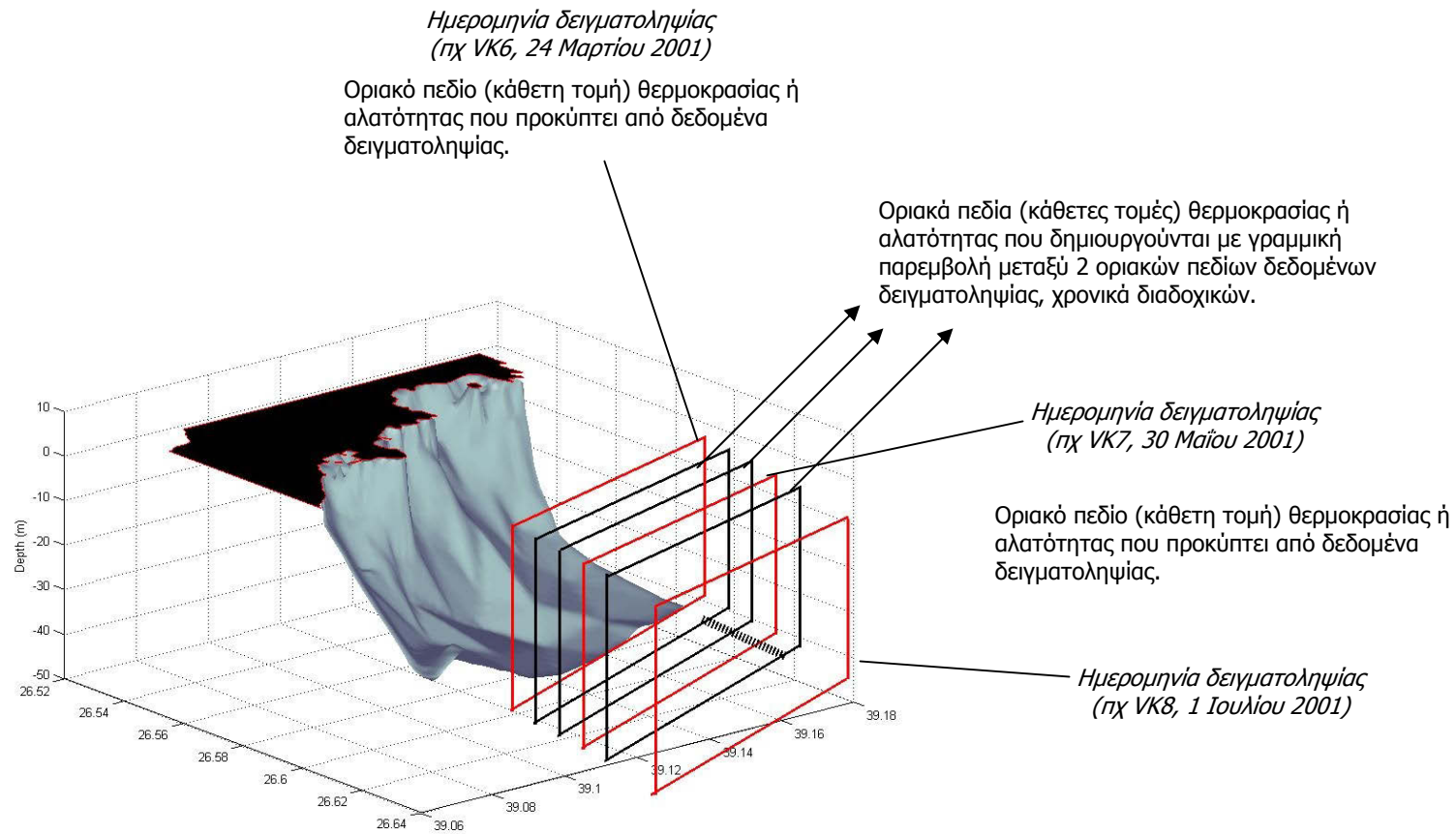
Για την ενεργοποίηση του μοντέλου απαιτείται οι μεταβλητές κατάστασης να έχουν κάποιες αρχικές τιμές. Κρίθηκε σκόπιμο, οι αρχικές αυτές τιμές να αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές τρισδιάστατες κατανομές ('θερμή' ενεργοποίηση - 'warm' start), για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για να αναπτυχθούν πλήρως τα προσομοιωμένα πεδία, τόσο τα φυσικά όσο και τα οικολογικά (spin up time).

Τα τρισδιάστατα πεδία θερμοκρασίας και αλατότητας που χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές παράγονται από μετρήσεις πεδίου: οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν στη δειγματοληψία, η ημερομηνία της οποίας χρησιμοποιείται ως χρονική αφετηρία για την προσομοίωση ( $t=0$ ), εισάγονται σε κώδικα FORTRAN που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί μία μέθοδο παρεμβολής (αντίστροφα βαρύνουσα απόσταση) για να υπολογίσει στα σημεία του τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου τιμές από τα δεδομένα πεδίου.

Οι αρχικές τιμές εισάγονται στο μοντέλο ως δεδομένα εισόδου, που χρησιμοποιεί ο κώδικας του μοντέλου κατά την έναρξή του (αρχεία με τίτλο T\_3D\_INITIAL\_MARCH.txt για την θερμοκρασία και S\_3D\_INITIAL\_MARCH.txt για την αλατότητα). Οι αρχικές τιμές για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας ρεύματος τίθενται ίσες με μηδέν.



**Σχήμα 5.7.** Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας διασδιάστατων επιφανειακών πεδίων θερμοκρασίας – αλατότητας με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, από πειραματικά δεδομένα. Διακρίνεται η στεριά (μαύρο) και ο πυθμένας (ανάγλυφο) της περιοχής μελέτης.



**Σχήμα 5.8.** Ανατολικά ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας δισδιάστατων κάθετων πεδίων (τομών) θερμοκρασίας – αλατότητας με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο, από πειραματικά δεδομένα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για βόρεια και νότια ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου. Διακρίνεται η στεριά (μαύρο) και ο πυθμένας (ανάγλυφο) της περιοχής μελέτης.



## 5.2. Οικολογικό Υπομοντέλο

### 5.2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο και μεταβλητές κατάστασης

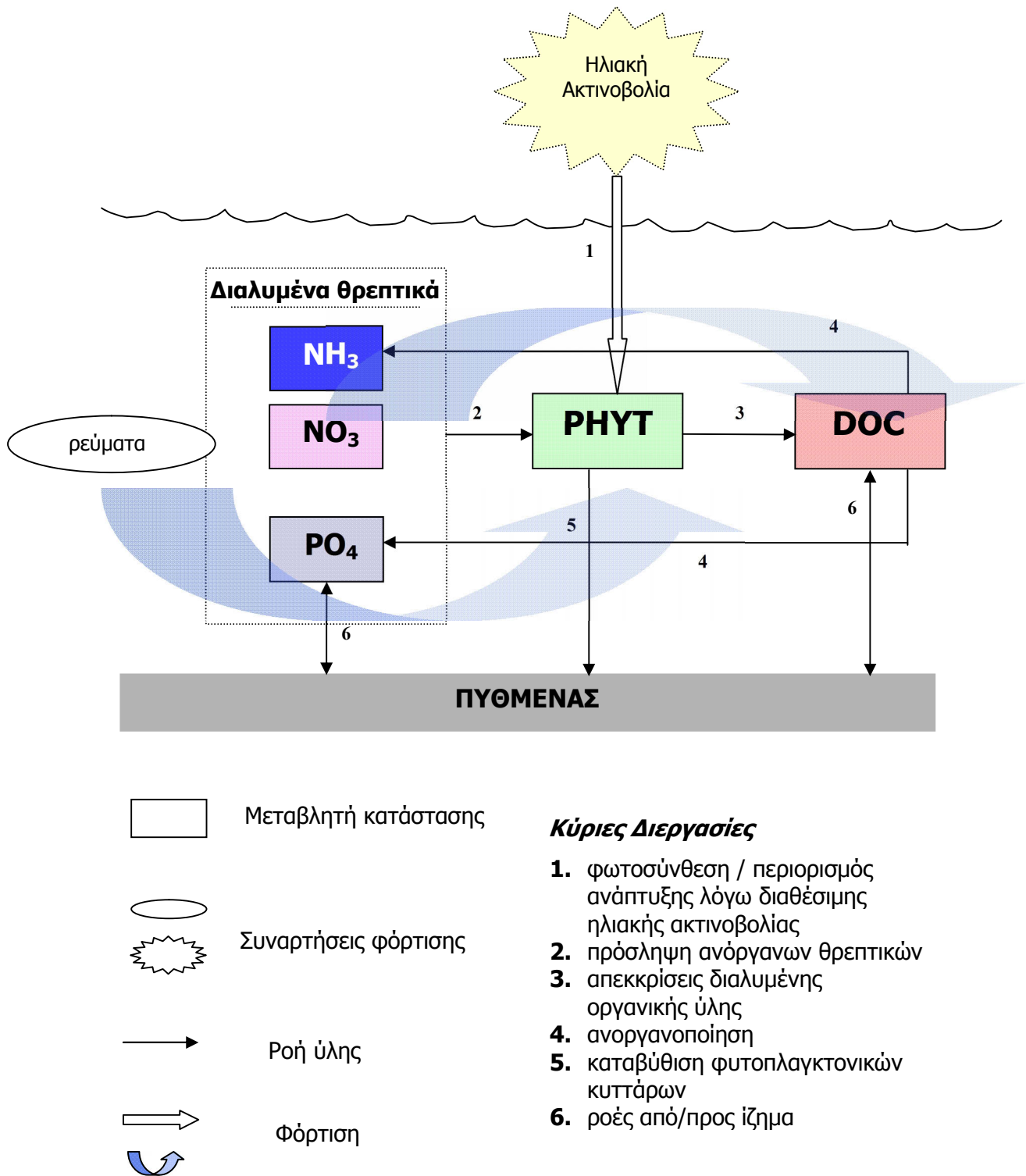
Στην παράγραφο 5.2 περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο και αναλύονται οι διαδικασίες που μοντελοποιούνται. Οι χημικές και βιολογικές μεταβλητές που περιλήφθηκαν στο οικολογικό σκέλος του συζευγμένου μοντέλου ως μεταβλητές κατάστασης είναι πέντε (5): η συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, οι συγκεντρώσεις νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών αλάτων και η συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα (Πίνακας 5.3). Είναι μη-συντηρητικές μεταβλητές, δηλαδή η μεταβολή τους στο χώρο και το χρόνο εξαρτάται, εκτός από τις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς και της τυρβώδους διάχυσης, και από περίπλοκες βιοχημικές διεργασίες, κατά τις οποίες ύλη και ενέργεια μεταφέρονται μεταξύ των τμημάτων του κατώτερου τροφικού πλέγματος.

Το οικολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στηρίζεται στη δουλειά των Fasham *et al.* (1990) (το λεγόμενο μοντέλο FDM) και Arhonditsis *et al.* (2000 και 2002), είναι προσαρμοσμένο στην περιοχή μελέτης και στα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου και παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5.9 (conceptual model). Υπενθυμίζεται ότι το υδροδυναμικό κομμάτι του μοντέλου 'αναλαμβάνει' να υπολογίσει τα πεδία μεταφοράς και διάχυσης των βιοχημικών μεταβλητών, δηλαδή παρέχει τις κατανομές που οφείλονται σε φυσικές διεργασίες. Το οικολογικό κομμάτι του μοντέλου περιγράφει τις βιοχημικές διεργασίες του Πίνακα 5.4 μέσω ενός συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων και παρέχει τις μεταβολές στη συγκέντρωση μιας μεταβλητής λόγω βιοχημείας.

**Πίνακας 5.3.** Μεταβλητές κατάστασης οικολογικού υπομοντέλου.

(Υπενθυμίζεται ότι Molarity (M) =  $\text{grat L}^{-3}$ )

Μεταβλητή κατάσταση	Περιγραφή	Μονάδες
PHYT	Βιομάζα φυτοπλαγκτού εκφρασμένη σε συγκέντρωση άνθρακα	$\text{mg C m}^{-3}$
NO <sub>3</sub>	Συγκέντρωση νιτρικών αλάτων στο θαλασσινό νερό	$\mu\text{M (N)}$
NH <sub>3</sub>	Συγκέντρωση αμμωνιακών αλάτων στο θαλασσινό νερό	$\mu\text{M (N)}$
PO <sub>4</sub>	Συγκέντρωση φωσφορικών αλάτων στο θαλασσινό νερό	$\mu\text{M (P)}$
DOC	Συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα στο θαλασσινό νερό	$\text{mg C m}^{-3}$



**Σχήμα 5.9.** Σχηματική παράσταση του οικολογικού υπομοντέλου: σχέσεις μεταξύ μεταβλητών κατάστασης, ροές ύλης και συναρτήσεις φόρτισης.

**Πίνακας 5.4.** Διεργασίες που περιλαμβάνονται ή παραμετροποιούνται στο βιοχημικό υπομοντέλο (ΜΕΛ: Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων).

Μεταβλητή κατάστασης	Ρόλος/θέση στην τροφική αλυσίδα	Διεργασία
Φυτοπλαγκτόν (ΡΗΥΤ)	πρωτογενής παραγωγή	<i>αύξηση βιομάζας:</i> πρόσληψη θρεπτικών, επίδραση ηλ. ακτινοβολίας κ φωτοσύνθεση
		<i>απώλεια βιομάζας:</i> απεκκρίσεις διαλ. οργ. ύλης θνησιμότητα και κυτταρική λύση αναπνοή βόσκηση από ζωοπλαγκτόν
		<i>φυσικές:</i> καταβύθιση
Νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ )	διαλυτή ανόργανη ύλη	<i>πηγή:</i> αστικά λύματα (πόλη – ΜΕΛ)
		<i>απομάκρυνση:</i> πρόσληψη από φυτοπλαγκτόν
		<i>φυσικές:</i> ανταλλαγή με ίζημα (διάχυση)
Αμμωνιακά ( $\text{NH}_4^+$ )	διαλυτή ανόργανη ύλη	<i>πηγή:</i> ανοργανοποίηση DOC αστικά λύματα (πόλη – ΜΕΛ)
		<i>απομάκρυνση:</i> πρόσληψη από φυτοπλαγκτόν
		<i>φυσικές:</i> ανταλλαγή με ίζημα (διάχυση)
Φωσφορικά ( $\text{PO}_4^{-3}$ )	διαλυτή ανόργανη ύλη	<i>πηγή:</i> ανοργανοποίηση DOC αστικά λύματα (πόλη – ΜΕΛ)
		<i>απομάκρυνση:</i> πρόσληψη από φυτοπλαγκτόν
		<i>φυσικές:</i> ανταλλαγή με ίζημα (διάχυση)
Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας (DOC)	διαλυτή οργανική ύλη	<i>πηγή:</i> απεκκρίσεις φυτοπλαγκτού θνησιμότητα φυτοπλαγκτού αστικά λύματα (πόλη – ΜΕΛ)
		<i>απομάκρυνση:</i> ανοργανοποίηση μέσω βακτηριακών διεργασιών προς $\text{NH}_4^-$ και $\text{PO}_4^{-3}$
		<i>φυσικές:</i> ανταλλαγή με ίζημα (διάχυση)

## 5.2.2. Εξισώσεις οικολογικών διεργασιών

### Εξίσωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας

Η εξίσωση περιγράφει τη μεταβολή της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας  $PHYT$  στο χρόνο. Η μεταβολή αυτή εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας στην εύφωτη ζώνη, την διαθεσιμότητα ανόργανων θρεπτικών αλάτων (αζώτου και φωσφόρου).

Ο ρυθμός ανάπτυξης της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας  $\mu$  περιγράφεται από την σχέση

$$\mu = \mu_{\max} \min[\varphi(I), f(N, P)] \quad (5.27)$$

Στη σχέση αυτή,  $\mu_{\max}$  είναι ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού κάτω από συνθήκες κορεσμού για τη φωτεινή ακτινοβολία και τα διαθέσιμα θρεπτικά ( $d^{-1}$ ), ενώ οι συναρτήσεις  $\varphi(I)$  και  $f(N, P)$  παριστάνουν αντίστοιχα τις συναρτήσεις περιορισμού για την ένταση φωτεινής ακτινοβολίας και τα θρεπτικά, τις μεταβλητές δηλαδή που δρουν περιοριστικά στην φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη. Οι συναρτήσεις αυτές περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

#### Ένταση φωτεινής ακτινοβολίας

Η επίδραση ως περιοριστικού παράγοντα της έντασης φωτεινής ακτινοβολίας περιγράφεται από το μοντέλο των Taylor and Joint (1990). Ο περιορισμός ανάπτυξης λόγω φωτός εκφράζεται από την συνάρτηση  $\varphi(I)$ :

$$\varphi(I) = \frac{\ln \left[ \frac{1 + I/I_k}{1 + Ie^{-kZ_e}/I_k} \right]}{kZ_e} \quad (5.28)$$

όπου  $I$  η ένταση φωτός στην επιφάνεια της θάλασσας ( $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ ) η οποία υπολογίζεται με τον τρόπο που αναλύεται στην παράγραφο 5.2.4,  $k$  ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας ως προς το βάθος ( $m^{-1}$ ),  $I_k$  η σταθερά ημικορεσμού για την ένταση της ακτινοβολίας ( $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ ) και  $Z_e$  το βάθος της εύφωτης ζώνης (m). Ο συντελεστής εξασθένησης της φωτεινής ακτινοβολίας ως προς το βάθος  $k$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$k = k_w + k_c C_{chl-a} \quad (5.29)$$

όπου  $k_w$  ο συντελεστής εξασθένησης της φωτεινής ακτινοβολίας που οφείλεται στα μόρια του νερού (απορρόφηση, σκεδασμός),  $k_c$  ο συντελεστής εξασθένησης της

ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης από φυτοπλαγκτονικά κύτταρα και  $C_{chl-a}$  η συγκέντρωση χλωροφύλλης -α.

### Θρεπτικά άλατα

Από τις αναλύσεις θρεπτικών αλάτων και από την αξιολόγηση μετρήσεων προηγούμενων ερευνών στην περιοχή μελέτης, αναδεικνύεται η σπουδαιότητα των φωσφορικών αλάτων ως περιοριστικό παράγοντα της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού. Στο 60% των μετρήσεων της παρούσας εργασίας και στο 66% των μετρήσεων του Τσιρτσή (1994), ο λόγος N:P στη στήλη του νερού βρέθηκε πάνω από 16, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο διαλυτός φωσφόρος είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού, και σε κάθε περίπτωση, η διαθεσιμότητά του θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη του μοντέλου.

Ο περιοριστικός ρόλος των διαθέσιμων ανόργανων θρεπτικών αλάτων στην ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού εκφράστηκε με τη χρήση της Σχέσης (5.30). Συγκεκριμένα, η έκφραση που χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει τον περιορισμό αυτό ως συνάρτηση των διαθέσιμων συγκεντρώσεων ανόργανου αζώτου  $N$  και φωσφόρου  $P$  στο θαλασσινό νερό είναι:

$$f(N, P) = \min\{N_{up}, P_{up}\} \quad (5.30)$$

όπου  $N_{up}$  και  $P_{up}$  είναι αντίστοιχα η πρόσληψη αζώτου  $N$  με τη μορφή νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων και φωσφόρου  $P$  με τη μορφή φωσφορικών ιόντων, όπως περιγράφεται παρακάτω. Με την έκφραση αυτή, το μοντέλο υπολογίζει και επιλέγει από μόνο του ποιο από τα δυο θρεπτικά συστατικά δρα περιοριστικά.

Η πρόσληψη των θρεπτικών θεωρείται ότι ακολουθεί την κινητική Michaelis-Menten:

$$NO_{3up} = UNO_{3max} \frac{NO_3}{NO_3 + NOH} \left( \frac{1 + aNH_4}{1 + bNH_4} \right) \quad (5.31)$$

$$NH_{4up} = UNH_{4max} \frac{NH_4}{NH_4 + AH} \quad (5.32)$$

$$PO_{4up} = UPO_{4max} \frac{PO_4}{PO_4 + POH} \quad (5.33)$$

όπου  $NO_3$ ,  $NH_4$ ,  $PO_4$  οι συγκεντρώσεις νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών αλάτων στο νερό,  $UNO_{3max}$ ,  $UNH_{4max}$ ,  $UPO_{4max}$  οι αντίστοιχοι μέγιστοι ρυθμοί πρόσληψης και  $NOH$ ,  $AH$ ,  $POH$  οι σταθερές ημικορεσμού για την πρόσληψη των αντίστοιχων θρεπτικών. Η προτίμηση του φυτοπλαγκτού στην πρόσληψη ιόντων αμμωνίου σε σχέση με τα νιτρικά λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο: στη σχέση (5.31), η έκφραση

$$\left( \frac{1 + aNH_4}{1 + bNH_4} \right) \quad (5.34)$$

των Sharada et al. (2005) ποσοτικοποιεί την ισχύ αυτής της εκλεκτικής προτίμησης, ή αλλιώς εκφράζει την ανάσχεση πρόσληψης νιτρικών ιόντων ( $NO_3^-$ ) παρουσία αμμωνιακών ιόντων ( $NH_4^+$ ). Οι παράμετροι  $a$  και  $b$  προσδιορίστηκαν από τους Sharada et al. (2005) με βάση πειραματικά δεδομένα (Πίνακας 5.5). Η συνολική πρόσληψη ανόργανου διαλυτού αζώτου από το φυτοπλαγκτόν είναι

$$N_{up} = NO_{3up} + NH_{4up} \quad (5.35)$$

Οι απώλειες της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας οφείλονται στις απεκκρίσεις με τη μορφή διαλυμένης οργανικής ύλης, στη θνησιμότητα και στη ζωοπλαγκτονική βόσκηση. Οι διεργασίες αυτές παραμετροποιούνται και εκφράζονται με τον ρυθμό  $m_p$ . Επιπρόσθετα, λαμβάνεται υπόψη η φυσική διεργασία της καταβύθισης των φυτοπλαγκτονικών κυττάρων και εκφράζεται με σταθερή ταχύτητα καθίζησης  $w_s = 0.5$  m/day (βλ. παράγραφο 5.2.5).

Τελικά, η εξίσωση της συγκέντρωσης της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας  $PHYT$  γράφεται με συνοπτικό τρόπο ως εξής:

$$\frac{dPHYT}{dt} = (\mu - m_p)PHYT \quad (5.36)$$

όπου

$\mu$  είναι ο ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και  $m_p$  ο ρυθμός απώλειας φυτοπλαγκτονικής βιομάζας (απεκκρίσεις, αναπνοή, θνησιμότητα και κυτταρική λύση, βόσκηση από ζωοπλακτόν).

### Εξίσωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC)

Για την προσομοίωση της δυναμικής της δεξαμενής οργανικής ύλης στη στήλη του νερού γίνονται δυο βασικές παραδοχές. Η πρώτη παραδοχή είναι ότι το σύνολο της διαλυμένης οργανικής ύλης, που υπόκειται στις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς και της τυρβώδους διάχυσης, προέρχεται από τη φυτοπλαγκτονική βιομάζα. Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι η ατομική αναλογία C:N στη διαλυμένη οργανική ύλη είναι ίση με αυτή του φυτοπλαγκτού, δηλαδή 106:16 (Redfield ratio, 1934). Έτσι, η εκτίμηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) γίνεται από τις πειραματικές τιμές συγκέντρωσης διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο προσομοιωμένο σύστημα οι ενδογενείς πηγές διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) που περιλαμβάνονται στο μοντέλο είναι οι απεκκρίσεις από τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα και η θνησιμότητά τους. Η ανοργανοποίηση μέρους του DOC μέσω βακτηριακών διεργασιών και η μετατροπή τους σε αμμωνία ( $\text{NH}_4^+$ ) και φωσφορικά ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (τροφοδοτώντας έτσι τις αντίστοιχες δεξαμενές) είναι ο μόνος μηχανισμός απομάκρυνσης DOC από το σύστημα. Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη οι ανταλλαγές με το ίζημα. Οι παράμετροι της εξίσωσης (5.37) (περιγραφή, μονάδες, τιμές) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οργανικού άνθρακα υπολογίζονται από τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις για το διαλυμένο οργανικό άζωτο, υιοθετώντας την υπόθεση του Redfield (1934) για αναλογία μαζών C:N ίση με 6.625. Η διαφορική εξίσωση για το DOC είναι:

$$\frac{dDOC}{dt} = \mu\gamma PHYT \left(1 - Fr_{phytmortNH_4} - Fr_{phytmortPO_4}\right) + k_{sedDOC} (DOC_{sed} - DOC_{bw}) \quad (5.37)$$

όπου  $\mu$  είναι ο ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας  $PHYT$ ,  $\gamma$  το κλάσμα όπως φυτοπλαγκτονικής παραγωγής που απεκκρίνεται ως DOC,  $Fr_{phytmortNH_4}$  και  $Fr_{phytmortPO_4}$  το κλάσμα όπως φυτοπλαγκτονικής θνησιμότητας που μετατρέπεται τελικά σε αμμωνιακά και φωσφορικά, αντίστοιχα.

Τέλος, η έκφραση  $k_{sedDOC}(DOC_{sed} - DOC_{bw})$  είναι ο ρυθμός ανταλλαγής DOC μεταξύ στήλης νερού και πυθμένα, όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2.6 'Όριακές συνθήκες'.

### Εξίσωση νιτρικών αλάτων

Οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο είναι η πρόσληψη νιτρικών αλάτων από το φυτοπλαγκτόν για ανάπτυξη και οι ανταλλαγές με το ίζημα:

$$\frac{dNO_3}{dt} = -\alpha_N NO_{3up} PHYT + k_{sedNO_3} (NO_{3sed} - NO_{3bw}) \quad (5.38)$$

όπου

$PHYT$  η συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας,

$NO_{3up}$  η πρόσληψη νιτρικών αλάτων (βλ σχέση 5.31) από το φυτοπλαγκτό,

$\alpha_N$  αδιάστατος συντελεστής ποσοτικοποίησης του ανόργανου αζώτου που μετατρέπεται σε φυτοπλαγκτονική βιομάζα και δίνεται από τη σχέση

$$\alpha_N = \mu_{max} (gratC / gratN) / (C / N)_{ratiophyt} \quad (5.39)$$

όπου  $\mu_{max}$  ο μέγιστος ειδικός ρυθμός φυτοπλαγκτονικής ανάπτυξης,

$(gratC/gratN)$  η αναλογία ενός γραμμοατόμου άνθρακα προς άζωτο (0.071393) και

$(C/M)_{ratiophyt}$  η μοριακή αναλογία άνθρακα προς άζωτο στο κύτταρο φυτοπλαγκτού (Redfield ratio).

Τέλος, η έκφραση  $k_{sedNO_3}(NO_{3sed} - NO_{3bw})$  είναι ο ρυθμός ανταλλαγής νιτρικών μεταξύ στήλης νερού και πυθμένα, όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2.6 'Οριακές συνθήκες'.

### Εξίσωση αμμωνιακών αλάτων

Η αμμωνία (αμμωνιακά ιόντα) απομακρύνεται από το θαλάσσιο σύστημα με την πρόσληψή της από το φυτοπλαγκτόν. Τροφοδότηση του συστήματος με αμμωνία γίνεται με τις βακτηριακές διεργασίες της ανοργανοποίησης των οργανικών αποθεμάτων (mineralization) που δεν μοντελοποιούνται απευθείας (explicitly) στην παρούσα μορφή του μοντέλου, αλλά παραμετροποιούνται. Το σύστημα κλείνει λαμβάνοντας υπόψη τις ανταλλαγές με το ίζημα. Η εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της συγκέντρωσης αμμωνίας λόγω των παραπάνω διεργασιών είναι:



$$\frac{dNH_3}{dt} = -\left(\alpha_N NH_{4up} - m_{dp} (gratC / gratN) / (C / N)_{ratiophyt} Fr_{phytmortNH_4}\right) PHYT + k_{sedNH_4} (NH_{4sed} - NH_{4bw}) \quad (5.40)$$

όπου

$PHYT$  η συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας,

$NH_{4up}$  η πρόσληψη αμμωνιακών αλάτων (βλ σχέση 5.32) από το φυτοπλαγκτό,

$\alpha_N$  αδιάστατος συντελεστής ποσοτικοποίησης του ανόργανου αζώτου που μετατρέπεται σε φυτοπλαγκτονική βιομάζα (βλ σχέση 5.39),

$m_{dp}$  η φυτοπλαγκτονική θνησιμότητα προς DOC, που υπολογίζεται από την σχέση

$$m_{dp} = m_p \times Fr_{phytmortDOC} \quad (5.40a)$$

$Fr_{phytmortNH_4}$  το κλάσμα της φυτοπλαγκτονικής θνησιμότητας που μετατρέπεται τελικά σε αμμωνιακά.

Η έκφραση  $k_{sedNH_4}(NH_{4sed} - NH_{4bw})$  είναι ο ρυθμός ανταλλαγής αμμωνιακών μεταξύ στήλης νερού και πυθμένα, όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2.6 'Όριακές συνθήκες'.

### Εξίσωση φωσφορικών αλάτων

Τα αποθέματα ανόργανου διαλυτού φωσφόρου στη στήλη του νερού ρυθμίζονται από την πρόσληψή τους από το φυτοπλαγκτόν, από το κλάσμα της φυτοπλαγκτονικής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε ανόργανο διαλυτό φώσφορο με βακτηριακές διεργασίες ανοργανοποίησης των οργανικών αποθεμάτων (mineralization) που δεν μοντελοποιούνται απευθείας (explicitly) αλλά παραμετροποιούνται και από τις ανταλλαγές με το ίζημα:

$$\frac{dPO_4}{dt} = -\left(\alpha_P PO_{4up} - m_{dp} (gratC / gratP) / (C / P)_{ratiophyt} Fr_{phytmortPO_4}\right) PHYT + k_{sedPO_4} (PO_{4sed} - PO_{4bw}) \quad (5.41)$$

όπου

$PHYT$  η συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας,  
 $PO_{4up}$  η πρόσληψη φωσφορικών αλάτων (βλ σχέση 5.33) από το φυτοπλαγκτό,  
 $a_p$  αδιάστατος συντελεστής ποσοτικοποίησης του ανόργανου φωσφόρου που μετατρέπεται σε φυτοπλαγκτονική βιομάζα και δίνεται από τη σχέση

$$a_p = \mu_{max} (gratC / gratP) / (C / P)_{ratiophyt} \quad (5.42)$$

όπου  $\mu_{max}$  ο μέγιστος ειδικός ρυθμός φυτοπλαγκτονικής ανάπτυξης,  
 $(gratC/gratP)$  η αναλογία ενός γραμμοσάτου άνθρακα προς φωσφόρο (0.032258)  
και  $(C/P)_{ratiophyt}$  η μοριακή αναλογία άνθρακα προς φώσφορα στο κύτταρο φυτοπλαγκτού (Redfield ratio),  
 $m_{dp}$  η φυτοπλαγκτονική θνησιμότητα προς DOC (σχέση 5.40α),  
 $F_{rphytmortPO4}$  το κλάσμα της φυτοπλαγκτονικής θνησιμότητας που μετατρέπεται τελικά σε φωσφορικά.

Τέλος, η έκφραση  $k_{sedPO4}(PO_{4sed} - PO_{4bw})$  είναι ο ρυθμός ανταλλαγής νιτρικών μεταξύ στήλης νερού και πυθμένα, όπως αναλύεται στην παράγραφο 5.2.6 'Όριακές συνθήκες'.

### 5.2.3. Παράμετροι μοντέλου και τιμές

Οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.5. Η μεθοδολογία προσδιορισμού τους περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.4 'Ανάπτυξη συστήματος βαθμονόμησης οικολογικού μοντέλου'.

**Πίνακας 5.5.** Παράμετροι του οικολογικού υπομοντέλου: περιγραφή, τιμή και μονάδες. Οι τιμές προέκυψαν μετά από βαθμονόμηση εκτός από αυτές που σημειώνονται με αστερίσκο (\*).

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδες
$\mu_{\max}$	Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού	4.85	day <sup>-1</sup>
$\gamma$	Κλάσμα της φυτοπλ/κής παραγωγής που απεκκρίνεται ως DOC	0.20	αδιάστατο
$m_p$	Ρυθμός απώλειας φυτοπλαγκτονικής βιομάζας	0.089	day <sup>-1</sup>
NOH	Σταθερά ημικορεσμού πρόσληψης νιτρικών από φυτοπλαγκτόν	1.0	μg-at N/l
AH	Σταθερά ημικορεσμού πρόσληψης αμμωνιακών από φυτοπλαγκτόν	2.0	μg-at N/l
POH	Σταθερά ημικορεσμού πρόσληψης φωσφορικών από φυτοπλαγκτόν	0.35	μg-at N/l
UNO <sub>3max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης νιτρικών αλάτων	0.15	μg-at N/mg. d
UNH <sub>4max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης αμμωνιακών αλάτων	0.25	μg-at N/mg. d
UPO <sub>4max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης φωσφορικών αλάτων	0.17	μg-at N/mg. d
$I_k$	Σταθερά ημικορεσμού για την ένταση της ακτινοβολίας	10	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
$k_w$	Συντελεστής απόσβεσης φωτός για νερό χωρίς χλωροφύλλη	0.16	m <sup>-1</sup>
$k_c$	Συντελεστής απόσβεσης φωτός που οφείλεται στη χλωροφύλλη	0.19	l.(μg.m) <sup>-1</sup>
a	συντελεστής ανάσχεσης αμμωνιακών στην πρόσληψη νιτρικών (Sharada et al -2005)	0.72 *	(μg-at N/l) <sup>-1</sup>
b	συντελεστής ανάσχεσης αμμωνιακών στην πρόσληψη νιτρικών (Sharada et al -2005)	2.6 *	(μg-at N/l) <sup>-1</sup>
$k_{sedNO3}$	Ρυθμός ροής νιτρικών από/προς ίζημα	40.6x10 <sup>-3</sup>	day <sup>-1</sup>
$k_{sedNH4}$	Ρυθμός ροής αμμωνιακών από/προς ίζημα	34.5x10 <sup>-3</sup>	day <sup>-1</sup>
$k_{sedPO4}$	Ρυθμός ροής φωσφορικών από/προς ίζημα	0.16x10 <sup>-3</sup>	day <sup>-1</sup>
$k_{sedDOC}$	Ρυθμός ροής οργανικού άνθρακα από/προς ίζημα	1x10 <sup>-3</sup>	day <sup>-1</sup>
(C/N) <sub>ratiophyt</sub>	Λόγος C: N για το φυτοπλαγκτόν	6.6	αδιάστατο
(C/P) <sub>ratiophyt</sub>	Λόγος C: P για το φυτοπλαγκτόν	40	αδιάστατο
Fr <sub>phytmortDOC</sub>	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε DOC	0.35	αδιάστατο
Fr <sub>phytmortNH4</sub>	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε NH <sub>4</sub>	0.15	αδιάστατο
Fr <sub>phytmortPO4</sub>	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε PO <sub>4</sub>	0.17	αδιάστατο
$m_{dp}$	Φυτοπλαγκτονική θνησιμότητα σε DOC	$m_p \times Fr_{phytmortDOC}$	h <sup>-1</sup>
$a_N$	Ανόργανο άζωτο προς φυτοπλαγκτόν	$\mu_{\max} \times (C/N)_{ratiophyt}$	αδιάστατο
$a_P$	Ανόργανος φώσφορος προς φυτοπλαγκτόν	$\mu_{\max} \times (C/P)_{ratiophyt}$	αδιάστατο

#### 5.2.4. Συναρτήσεις φόρτισης (forcing functions)

Οι μηχανισμοί που λειτουργούν ως συναρτήσεις φόρτισης (forcing functions) για τις οικολογικές διεργασίες που προσομοιώνονται στην εργασία αυτή είναι τρεις:

(1) οι διεργασίες της μεταφοράς (advection) και τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion), δηλαδή το αποτέλεσμα του συνόλου της φυσικής κυκλοφορίας της μάζας του νερού που ποσοτικοποιείται με το υδροδυναμικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.1, ενώ η δράση της φυσικής κυκλοφορίας ως συνάρτηση φόρτισης αναλύεται θεωρητικά και τεχνικά στις παραγράφους 2.3 'Συζευγμένα τρισδιάστατα υδροδυναμικά – οικολογικά μοντέλα' και 5.3 'Διαδικασία Σύζευξης των δυο μοντέλων'.

(2) η ηλιακή ακτινοβολία

Στην διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου προσομοίωσης οικολογικών διεργασιών στις οποίες συμμετέχει το φυτοπλαγκτόν, πρέπει απαραίτητα να ληφθεί υπόψη ο ρόλος της φωτεινής ακτινοβολίας. Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην εύρωτη ζώνη αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας (Kirk, 1983) και για το λόγο αυτό πρέπει να γίνει ακριβής εκτίμηση αυτής της μεταβλητής. Για τον προσδιορισμό της ποσότητας φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας και γίνεται διαθέσιμη για φωτοσύνθεση από το φυτοπλαγκτόν, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε με επιτυχία σε προηγούμενες μελέτες (Τσιρτσής, 1994, Αρχοντίσης, 1998). Αυτή συνίσταται από τα εξής στάδια:

- (α) προσδιορισμός της ετήσιας διακύμανσης της ισχύος φωτεινής ακτινοβολίας  $I_t$  στην επιφάνεια της θάλασσας το μεσημέρι. Η διακύμανση της φωτεινής ισχύος στην επιφάνεια της θάλασσας θεωρείται ότι ακολουθεί τον ετήσιο κύκλο (Kirk, 1983). Για την προσομοίωση της χρησιμοποιήθηκε συνημιτονοειδής συνάρτηση της μορφής:

$$I_t = \alpha - \beta \cos \frac{2\pi t}{365} \quad (5.43)$$

όπου  $I_t$  η ένταση της φωτεινής ισχύος στην επιφάνεια της θάλασσας το μεσημέρι ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) και  $t$  ο χρόνος σε ημέρες, θεωρώντας ως αρχή του χρόνου την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Καθώς ο χρόνος κυλά από την 1<sup>η</sup> ως την 365<sup>η</sup>

μέρα, το συνημίτονο κυμαίνεται από  $-1$  έως την τιμή  $1$  και η φωτεινή ισχύς ταλαντώνεται περί τη μέση τιμή  $a=12$  με πλάτος  $\beta=5$  (σε  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Οι τιμές των συντελεστών  $a$  και  $\beta$  καθορίστηκαν για την ευρύτερη περιοχή από τον Αρχοντίση (1998) βάσει πειραματικών μετρήσεων της ισχύος φωτεινής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας και προσαρμογή της εξίσωσης 5.43 στα δεδομένα αυτά (curve fitting).

- (β) προσδιορισμός της ετήσιας διακύμανσης της φωτοπεριόδου  $\Phi_t$ . Για την προσομοίωση της ετήσιας διακύμανσης της φωτοπεριόδου  $\Phi_t$  χρησιμοποιήθηκε η τριγωνομετρική συνάρτηση που αναπτύχθηκε από τον Τσιρτσή (1994). Η βαθμονόμηση των παραμέτρων της συνάρτησης βασίστηκε σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από την περιοχή του Στενού Μυτιλήνης και η μορφή της είναι:

$$\Phi_t = 11.5 - 2.5 \cos \frac{2\pi t}{365} \quad (5.44)$$

όπου  $\Phi_t$  η φωτοπερίοδος σε ώρες και  $t$  ο χρόνος σε ημέρες, θεωρώντας ως αρχή του χρόνου την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου. Καθώς ο χρόνος κυλά από την 1<sup>η</sup> ως την 365<sup>η</sup> μέρα, το συνημίτονο κυμαίνεται από  $-1$  έως την τιμή  $1$  και η φωτοπερίοδος ταλαντώνεται περί τη μέση τιμή  $11.5$  ωρών με πλάτος  $2.5$  ώρες.

- (γ) υπολογισμός της ετήσιας διακύμανσης της μέσης ισχύος φωτεινής ακτινοβολίας  $I_{\text{mean}}$  στην επιφάνεια της θάλασσας κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Για τον υπολογισμό της μέσης ισχύος της φωτεινής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας κατά τη διάρκεια του 24ώρου υιοθετήθηκε η παραδοχή της τριγωνικής ημερήσιας διακύμανσης (Steele, 1962): η φωτεινή ισχύς στην επιφάνεια της θάλασσας ξεκινά από την τιμή  $0$  την ώρα της ανατολής του ηλίου, αυξάνεται γραμμικά ως το μεσημέρι, στη συνέχεια μειώνεται επίσης γραμμικά ως τη δύση, οπότε και μηδενίζεται. Την τιμή αυτή διατηρεί σε όλη τη διάρκεια της νύχτας. Με βάση αυτό το μοντέλο του Steele, ο υπολογισμός της μέσης ισχύος της φωτεινής ακτινοβολίας  $I_{\text{mean}}$  που φτάνει στην επιφάνεια γίνεται με τη σχέση:

$$I_{mean} = \frac{I_t \cdot \Phi_t}{24 \cdot 2} \quad (5.44)$$

όπου  $I_t$  η ένταση της φωτεινής ισχύος στην επιφάνεια της θάλασσας ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) και  $\Phi_t$  η φωτοπερίοδος σε ώρες. Η μέση ένταση  $I_{mean}$  εισάγεται στο μοντέλο των Taylor and Joint (1990) (παράγραφος 5.2.2.1).

(3) Οι εκροές στο παράκτιο οικοσύστημα, τόσο ανεπεξέργαστων αστικών αποβλήτων στην περιοχή του νέου και του παλιού λιμένα Μυτιλήνης, όσο και επεξεργασμένων λυμάτων μέσω του αγωγού της ΜΕΥΑ (βλ Σχήμα 3.1), και η λειτουργία των εκροών αυτών ως συνάρτηση φόρτισης του οικολογικού σκέλους του μοντέλου περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.2.8.

### 5.2.5. Ταχύτητα καταβύθισης φυτοπλαγκτού

Το φυτοπλαγκτόν, όντας πυκνότερο από το θαλασσινό νερό, υπόκειται στη φυσική διεργασία της καταβύθισης, που τείνει να το απομακρύνει από την εύρωτη ζώνη. Τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα χρησιμοποιούν διάφορες 'τεχνικές' για να καθυστερήσουν την βύθισή τους προς τα βαθύτερα στρώματα και να παραμείνουν όσο το δυνατόν περισσότερο στην εύρωτη ζώνη: ορισμένα έχουν μορφολογία με αυξημένη επιφάνεια για αυξημένη αντίσταση (drag), άλλα έχουν την ικανότητα να μεταβάλουν την άνωσή τους ενώ άλλα κολυμπούν (π.χ. είδη μαστιγωτών) προκειμένου να βρεθούν σε μικροπεριβάλλον με περισσότερα θρεπτικά αλλά και να κρατηθούν σε βέλτιστη θέση στην υδάτινη στήλη (Mann and Lazier, 1996). Υπάρχουν ενδείξεις που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι οργανισμοί που μεταβάλουν την ταχύτητα βύθισής τους, το κάνουν ωθούμενοι από μεταβολές στη συγκέντρωση διαλυμένων θρεπτικών: βυθίζονται πιο γρήγορα όταν τα θρεπτικά εξαντλούνται και πιο αργά όταν η ανάπτυξή τους δεν περιορίζεται από αυτά (Luyten et al. 1999). Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά από τη βιβλιογραφία τιμές της ταχύτητας καθίζησης των κυττάρων φυτοπλαγκτού.

**Πίνακας 5.6.** Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας καταβύθισης φυτοπλαγκτού.

Συγγραφείς	Περιοχή μελέτης	Εύρος τιμών	Τιμή
Anderson and Williams (1998)	Στενό Μάγχης		0.5 m/d
Crise et al. (1999)	Μεσόγειος		1 m/d και 5 m/d
Luyten et al. (1999) COHERENS		0.5 έως 5 m/d	$W_s = (W_{s \min} - W_{s \max}) \left( \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \right) + W_{s \max}$ <p>όπου <math>W_{s \min}</math>, <math>W_{s \max}</math> η ελάχιστη και η μέγιστη ταχύτητα καταβύθισης του φυτοπλαγκτού και <math>N_{\min}</math>, <math>N_{\max}</math> η μέγιστη και η ελάχιστη ενδοκυτταρική συγκέντρωση αζώτου (minimum – maximum internal quota)</p>
Olivieti and Chavez (2000)	Κόλπος Monterey, Καλιφόρνια	Διάτομα : 1 m/d Δινομαστιγωτά και μικρά διάτομα : 0.2 – 0.4 m/d	0.5 m/d
Chen et al. (2002)	Λίμνη Michigan	$V_{\text{large}}$ : 0.5 έως 9 m/d $V_{\text{small}}$ : 0.01 έως 3 m/d	$V_{\text{large}} = 0.6$ m/d $V_{\text{small}} = 0.3$ m/d
Lancelot et al. (2002)	Μαύρη Θάλασσα		0.24 m/d
Salacinska et al. (2010)	Βόρεια Θάλασσα	0.0 έως 1 m/d	

Λαμβάνοντας υπόψη (1) τη σύνθεση της φυτοπλαγκτονικής κοινότητας στην περιοχή μελέτης, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, παράγραφος 3.4 και (2) τιμές ταχύτητας καταβύθισης από τη βιβλιογραφία, όπως αυτές του Πίνακα 5.6, αυτές που παρουσιάζουν οι Huisman and Sommeijer (2002, Table 2) και οι Salacinska et al. (2010, Table 1), υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία η σταθερή τιμή ταχύτητας καταβύθισης  $w_s = 0.5$  m/d, ενώ η διεργασία της καταβύθισης για το φυτοπλαγκτόν περιλαμβάνεται ως ξεχωριστός όρος στην εξίσωση μεταφοράς στον κατακόρυφο άξονα (βλ. και παράγραφο 5.3.1 και Πίνακα 5.10):

$$- w_s \frac{\partial PHYT}{\partial z} \quad (5.45)$$

Τέλος, διεργασίες επαναιώρησης υλικού από τον πυθμένα στη στήλη νερού δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα μορφή του μοντέλου.

### 5.2.6. Οριακές συνθήκες

#### Ροές από/προς τον πυθμένα

Οι ανταλλαγές της στήλης νερού με τον πυθμένα για τη φυτοπλαγκτονική βιομάζα συζητήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 5.2.5. Για την παραμετροποίηση των βενθικών ανταλλαγών διαλυτής ύλης εφαρμόστηκε η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε από τους Luyten et al. (1999): οι ροές διαλυτής ύλης από και προς τον πυθμένα ρυθμίζονται από μια συνάρτηση η οποία καλείται συνάρτηση χαλάρωσης<sup>3</sup> (relaxation function). Συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών ( $NO_3$ ,  $NH_4$ ,  $PO_4$ ,  $DOC$ ) στο στρώμα νερού πάνω από τον πυθμένα αφήνονται να οδηγηθούν σταδιακά προς τις τιμές χειμώνα των αντίστοιχων ουσιών. Οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών στο ίζημα δεν προέρχονται (σε αυτό το στάδιο του μοντέλου τουλάχιστον) από απευθείας μετρήσεις, αλλά γίνεται η υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις αυτές είναι σταθερές και ίσες με τις μέγιστες συγκεντρώσεις στη στήλη του νερού, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως το χειμώνα. Οι οριακές συνθήκες πυθμένα λοιπόν εκφράζονται με τη γενική σχέση:

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} = k_{sc} (C_{sed} - C_{bw}) \quad (5.46)$$

όπου  $C_{sed}$  η υποθετική συγκέντρωση ιζήματος της διαλ. ουσίας, που τίθεται ίση με τη μέγιστη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο νερό,  $C_{bw}$  η συγκέντρωση της διαλ. ουσίας στο κατώτατο στρώμα νερού, πάνω από τον πυθμένα και  $k_{sc}$  ένας συντελεστής που εκφράζει το ρυθμό ανταλλαγής ύλης (σε  $days^{-1}$ ) (Οι μεταβλητές  $K_H$  και  $D$  είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης στην κατακόρυφη διάσταση  $\sigma$  και το ολικό βάθος της στήλης νερού αντίστοιχα).

Το δεύτερο σκέλος της Σχέσης (5.46), που έχει διαστάσεις ρυθμού μεταβολής μάζας υπολογίζεται σε κάθε βήμα χρόνου για το κατώτατο στρώμα νερού. Η μεταβολή αυτή στη συγκέντρωση που οφείλεται στις ανταλλαγές με τον πυθμένα προστίθεται στη συνολική μεταβολή της διαλ. ουσίας. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες (Σχέση (5.46)) όπως διαμορφώνονται για τις μεταβλητές κατάστασης και οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στις σχέσεις.

<sup>3</sup> Μετάφραση του αγγλικού όρου 'relaxation function' με τη βοήθεια του Αγγλοελληνικού Λεξικού Μαθηματικών Όρων, των Καλογεροπούλου και συν. Εκδόσεις Τροχαλία.



Ο τρόπος αυτός παραμετροποίησης των ροών ύλης από και προς το ίζημα, και η απουσία ενός υπομοντέλου διεργασιών πυθμένα καθιστούν το μοντέλο μη-συζευγμένο στην πραγματικότητα με τον πυθμένα. Αυτή δεν είναι βέβαια η πλέον ρεαλιστική περιγραφή του συστήματος, αλλά η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ρεαλιστικής συνεισφοράς στην αναπλήρωση του προσομοιωμένου συστήματος με θρεπτικά, πέραν των ροών θρεπτικών από τα ανοιχτά όρια, ιδίως σε περιόδους έντονης κατακόρυφης ανάμιξης.

#### Ροές από/προς την ατμόσφαιρα

Ροή ύλης από την ατμόσφαιρα δεν λαμβάνεται υπόψη για καμία από τις μεταβλητές κατάστασης του βιοχημικού υπομοντέλου. Ωστόσο, είναι σχετικά εύκολο να παραμετροποιηθούν οι εισροές θρεπτικών από την ατμόσφαιρα, και να μελετηθούν σχετικά σενάρια.

#### Κλειστά και Ανοιχτά όρια

Σε ότι αφορά τις οριακές συνθήκες των μεταβλητών κατάστασης του βιοχημικού υπομοντέλου στα κλειστά (στεριά) και ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου, εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες του φυσικού υπομοντέλου για την θερμοκρασία  $T$  και την αλατότητα  $S$ . Στα όρια με τη στεριά, οι ροές ύλης είναι μηδενικές, καθώς η μεταφορά και η διάχυση είναι μηδέν:

$$uC, vC = 0 \text{ και } K_M \frac{\partial C}{\partial x}, K_M \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (5.47)$$

Στα ανοιχτά όρια (open boundaries), η γενική σχέση που περιγράφει τις οριακές συνθήκες είναι (upstream advection):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (5.48)$$

όπου  $C$  η συγκέντρωση της μεταβλητής κατάστασης και  $U$  η οριζόντια ταχύτητα. Οι οριακές συνθήκες για τα ανοιχτά όρια (Σχέση 5.48) υπολογίζονται στην υπορουτίνα *BCONDBIOCHEM*, η οποία είναι στην ουσία το τμήμα της υπορουτίνας *BCOND* του POM που αφορά την θερμοκρασία  $T$  και την αλατότητα  $S$ , τροποποιημένο έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε βαθμωτή μεταβλητή  $C$ .

### 5.2.7. Μέθοδος ολοκλήρωσης εξισώσεων οικολογικού υπομοντέλου

Το σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τις οικολογικές διεργασίες μπορεί να επιλυθεί με μια από τις παρακάτω μεθόδους ολοκλήρωσης:

- (1) Euler
- (2) Runge-Kutta δεύτερης τάξης (2<sup>nd</sup> order)
- (3) Runge-Kutta τέταρτης τάξης (4<sup>th</sup> order)

Η επιλογή της μεθόδου γίνεται από τον χρήστη στην υπορουτίνα BIOCHEM, αλλάζοντας τιμή στην μεταβλητή fortran METHOD σε 1, 2 ή 3 αντίστοιχα. Η ολοκλήρωση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων γίνεται στην υπορουτίνα INTEGR, όπου ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής METHOD, η ροή του προγράμματος περνάει από τις αντίστοιχες γραμμές κώδικα.

Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης του συστήματος των οικολογικών διαφορικών εξισώσεων είναι οι συναρτήσεις μεταβολής των μεταβλητών κατάστασης στο χρόνο σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος (gridpoint).

**Πίνακας 5.7.** Παράμετροι και συναρτήσεις οριακών συνθηκών πυθμένα για τη διαλυτή ύλη του μοντέλου.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδες
$k_{sNO3}$	Ρυθμός ροής νιτρικών από/προς ιζημα (relaxation rate)	$40.6 \times 10^{-3}$	$\text{day}^{-1}$
$k_{sNH4}$	Ρυθμός ροής αμμωνιακών από/προς ιζημα (relaxation rate)	$34.5 \times 10^{-3}$	$\text{day}^{-1}$
$k_{sPO4}$	Ρυθμός ροής φωσφορικών από/προς ιζημα (relaxation rate)	$0.16 \times 10^{-3}$	$\text{day}^{-1}$
$k_{sDOC}$	Ρυθμός ροής οργανικού άνθρακα από/προς ιζημα (relaxation rate)	$1 \times 10^{-3}$	$\text{day}^{-1}$
$NO_{3sed}$	Συγκέντρωση νιτρικών στο ιζημα, τίθεται ίση με τη μέγιστη τιμή νιτρικών στο στρώμα νερού πάνω από τον πυθμένα κατά την περίοδο προσομοίωσης	4.20	$\mu\text{M N}$
$NH_{4sed}$	Συγκέντρωση αμμωνιακών στο ιζημα, τίθεται ίση με τη μέγιστη τιμή νιτρικών στο στρώμα νερού πάνω από τον πυθμένα κατά την περίοδο προσομοίωσης	3.94	$\mu\text{M N}$
$PO_{3sed}$	Συγκέντρωση φωσφορικών στο ιζημα, τίθεται ίση με τη μέγιστη τιμή νιτρικών στο στρώμα νερού πάνω από τον πυθμένα κατά την περίοδο προσομοίωσης	0.66	$\mu\text{M P}$
$DOC_{sed}$	Συγκέντρωση οργ. άνθρακα στο ιζημα, τίθεται ίση με τη μέγιστη τιμή νιτρικών στο στρώμα νερού πάνω από τον πυθμένα κατά την περίοδο προσομοίωσης	2520	$\text{mg C} / \text{m}^3$

### Συνάρτηση

### Περιγραφή

$\frac{K_M}{D} \frac{\partial NO_3}{\partial \sigma} = k_{sNO3} (NO_{3sed} - NO_{3bw})$	Οριακές συνθήκες πυθμένα για νιτρικά
$\frac{K_M}{D} \frac{\partial NH_4}{\partial \sigma} = k_{sNH4} (NH_{4sed} - NH_{4bw})$	Οριακές συνθήκες πυθμένα για αμμωνιακά
$\frac{K_M}{D} \frac{\partial PO_4}{\partial \sigma} = k_{sPO4} (PO_{4sed} - PO_{4bw})$	Οριακές συνθήκες πυθμένα για φωσφορικά
$\frac{K_M}{D} \frac{\partial DOC}{\partial \sigma} = k_{sDOC} (DOC_{sed} - DOC_{bw})$	Οριακές συνθήκες πυθμένα για οργανικό άνθρακα

### 5.2.8. Αστικά απόβλητα

#### Ανεπεξέργαστα αστικά απόβλητα

Καθώς στη εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου χρησιμοποιούνται ως συνάρτηση φόρτισης της επιφάνειας οι επιφανειακές κατανομές αλατότητας (Sea Surface Salinity), οι απορροές αστικών λυμάτων στην ευρύτερη περιοχή του λιμανιού της Μυτιλήνης δεν μπορούν να προσομοιωθούν απευθείας ως είσοδος γλυκού νερού (αλατότητας μηδέν) στη επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, οι ποσότητες θρεπτικών αλάτων  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  και  $\text{PO}_4^{3-}$  και οργανικής ύλης ως DOC των ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων, εισάγονται απλά ως σημειακές απορροές ύλης στα σημεία εκροής του δικτύου αποχέτευσης, στο επιφανειακό κελί δίπλα στο σημείο εκροής. Οι ποσότητες αυτές, που εισάγονται με τον τρόπο αυτό στα επιφανειακά, ελαφρύτερα νερά (όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα με την είσοδο μικρών ποσοτήτων γλυκού νερού στην επιφάνεια της θάλασσας και την έστω οριακή μείωση της αλατότητας στην περιοχή εισόδου) διευθετούνται από το τοπικό υδροδυναμικό καθεστώς, όπως το υπολογίζει το μοντέλο και παράλληλα ενσωματώνονται στο τροφικό πλέγμα του οικολογικού σκέλους του μοντέλου.

Η ποιότητα των λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης έχει μελετηθεί για τη χρονική περίοδο από Ιούλιο έως Δεκέμβριο του 1992 από τους Σιγαλό και Τσιακίρη (1993). Οι μέσες τιμές των μετρηθεισών χημικών μεταβλητών των ανεπεξέργαστων λυμάτων σε 6 αγωγούς που εκβάλλουν στο λιμάνι της πόλης δίνονται στον Πίνακα 5.8 (Τσιρτσής, 1994). Οι τιμές συγκεντρώσεων θρεπτικών του πίνακα αυτού ( $C_{sewage}$ ) χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αραιωμένης συγκέντρωσης θρεπτικών ( $C_{nutr\ cell}$ ) στο επιφανειακό στρώμα του κελιού (όγκου  $VOL_{cell}$ ) δίπλα στον κάθε αγωγό εκβολής, με βάση τη σχέση:

$$C_{sewage} * VOL_{sewage} = C_{nutr\ cell} * VOL_{cell} \quad (5.49)$$

όπου  $VOL_{sewage}$  ο όγκος των λυμάτων, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

**Πίνακας 5.8.** Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μέσων τιμών των χημικών μεταβλητών ανεπεξέργαστων λυμάτων, όπως μετρήθηκαν στους αγωγούς αποχέτευσης που εκβάλλουν στο λιμάνι της Μυτιλήνης την περίοδο Ιούλιος – Δεκέμβριος 1992 (από Τσιρτσή, 1994 – σελ35).

Μεταβλητή	Νιτρικά μM	Νιτρώδη μM	Αμμωνία μM	Φωσφορικά μM	Οργ. Άζωτο μM
Μέση Τιμή	6.39	4.15	3876	2597	1730
Τυπική απόκλιση	2.86	1.86	874	1426	310

Για τον υπολογισμό της παροχής ανεπεξέργαστων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης και άρα του όγκου λυμάτων  $VOL_{sewage}$  που καταλήγουν στο λιμάνι για την περίοδο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που διατέθηκαν από την Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Μυτιλήνης (ΔΕΥΑΜ). Καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμες απευθείας μετρήσεις της παροχής ανεπεξέργαστων λυμάτων πριν την λειτουργία της ΜΕΥΑ, έγινε εκτίμηση με βάση τον μέσο όρο ημερήσιας παροχής εισόδου στην ΜΕΥΑ για την περίοδο Νοέμβριος 2001-Δεκέμβριος 2002 ( $3982 \text{ m}^3/\text{d}$ ) και του ποσοστού των ανεπεξέργαστων λυμάτων που κατέληγαν στην ΜΕΥΑ κατά την έναρξη λειτουργίας της και για την περίοδο προσομοίωσης. Αυτό το ποσοστό εκτιμάται από την ΔΕΥΑΜ στο 40% του συνολικού φορτίου της Μυτιλήνης (Βασίλαρος, προσ. επικοινων.). Με τα δεδομένα αυτά προκύπτει μια μέση παροχή  $9955 \text{ m}^3/\text{d}$ , η οποία για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρείται σταθερή και διαιρείται με τον αριθμό των αγωγών που καταλήγουν στο λιμάνι (8). Έτσι, προκύπτει μια μέση παροχή ανά ημέρα και ανά αγωγό  $1244 \text{ m}^3/\text{d}$ .

### Εκροή επεξεργασμένων λυμάτων μέσω του αγωγού διάθεσης της ΜΕΥΑ

Τα επεξεργασμένα αστικά λύματα της πόλης της Μυτιλήνης μεταφέρονται με υποθαλάσσιο αγωγό μήκους 450m και διατίθενται στη θάλασσα μέσω διαχυτήρα (τα τελευταία 42m), που εκβάλλει σε μέσο βάθος 14.5m (Μαχαίρα, 1995). Η πυκνότητα του διαλύματος των αποβλήτων σε σχέση με την πυκνότητα και την στρωματοποίηση του αποδέκτη (θαλάσσιο νερό) καθορίζουν αν τα λύματα θα επιπλέουν φτάνοντας στην επιφάνεια, θα αιωρούνται ή θα καθιζάνουν στην υδάτινη

στήλη. Παράλληλα, η διασπορά των λυμάτων καθορίζεται από τρεις φυσικούς μηχανισμούς (Fisher et al. 1979, Φερεντίνος και συν. 1994): (1) της ανωστικής δύναμης (buoyancy), θετικής ή αρνητικής, (2) της τυρβώδους-τυχαίας κίνησης των λυμάτων (turbulent diffusion) και (3) της μεταφορικής ικανότητας της υδάτινης στήλης, δηλαδή τη συμπαράσυρση των 'εν διαλύσει' ή 'εν αιωρήσει' ρύπων από το κινούμενο νερό κατά την οριζόντια διάσπαση (horizontal advection) και την κατακόρυφη διάσπαση (vertical advection – convection).

Τα λύματα, που ως υδατικό διάλυμα έχουν πυκνότητα γλυκού νερού, εξέρχονται με αρχική ταχύτητα από τις οπές του διαχυτήρα, ανυψώνονται (jets) και σχηματίζουν θύσανο (plume), ο οποίος λόγω θετικής ανωστικής δύναμης (buoyancy) έχει ανοδική πορεία μέσα στη στήλη του θαλασσινού νερού. Καθώς ανεβαίνουν τα λύματα, οι πλευρικές ανταλλαγές ορμής (lateral shear) μεταξύ της εκχυόμενης και της περιβάλλουσας θαλάσσιας μάζας (ambient seawater), δημιουργούν φαινόμενα τυρβώδους διάχυσης και προκαλούν ανάμιξη (turbulent mixing) και αραιώση της συγκέντρωσης των λυμάτων (entrainment – dilution). Ο θύσανος των λυμάτων θα εξακολουθήσει να ανεβαίνει ως το σημείο ουδέτερης πλευστότητας (neutral buoyancy) της στήλης, που καθορίζεται από την τοπική κατακόρυφη κατανομή της πυκνότητας. Εάν επικρατούν συνθήκες καλής κατακόρυφης ανάμιξης (χειμώνας), το διάλυμα των λυμάτων θα φτάσει ως την επιφάνεια της θάλασσας, σημαντικά αραιωμένο. Εάν η στήλη του νερού είναι στρωματοποιημένη (π.χ. καλοκαίρι), τα λύματα θα 'παγιδευτούν' κάτω από το πυκνοκλινές και θα αρχίσουν να διασπείρονται οριζόντια (lateral dispersion). Ταυτόχρονα, η ταχύτητα του ρεύματος, που μπορεί να μεταβάλλεται με το βάθος, μεταφέρει (advection) και διαλύει περαιτέρω το αρχικό πεδίο διασποράς λυμάτων προς την κατεύθυνση που ρέει. Αυτές οι φυσικές διεργασίες που καθορίζουν την τύχη του πεδίου καλύπτουν μεγάλο φάσμα χωρικής και χρονικής κλίμακας. Η αρχική τυρβώδης ανάμιξη μετριέται από δευτερόλεπτα έως λεπτά και από εκατοστά έως μέτρα. Παράλληλα, επενεργούν και βιογεωχημικές διεργασίες, όπως η πρόσληψη θρεπτικών από το φυτοπλαγκτόν και η πρωτογενής παραγωγή, η καθίζηση (για το σωματιδιακό φορτίο των λυμάτων) και η θνησιμότητα βακτηρίων, με χρονικές κλίμακες από ώρες έως μήνες και χωρικές κλίμακες έως δεκάδες χιλιόμετρα.

Δυο πολύ σημαντικές μεταβλητές είναι η αρχική διάλυση (initial dilution) των εκχυόμενων λυμάτων και το ύψος παγίδευσής τους (plume trap height), που

καθορίζει το ύψος στη στήλη του νερού μέχρι το οποίο γίνονται διαθέσιμα π.χ. τα θρεπτικά. Η ικανότητα ενός υδροδυναμικού μοντέλου γενικής κυκλοφορίας, όπως το POM, να παραμετροποιεί και να αναπαράγει ρεαλιστικά τις παραπάνω μεταβλητές έχει διερευνηθεί από τους Blumberg et al. (1996) και Signell et al. (2000), οι οποίοι χρησιμοποιώντας το μοντέλο ECOMsi (μια έκδοση του POM), μελέτησαν την συμπεριφορά του πεδίου διασποράς λυμάτων και πιθανές επιπτώσεις από μετακίνησή του στον κόλπο της Μασαχουσέτης. Οι Zhang and Adams (1999) χρησιμοποίησαν το ίδιο μοντέλο (ECOMsi) σε ιδεατό υπολογιστικό πεδίο για να μελετήσουν, μεταξύ άλλων, και να ποσοτικοποιήσουν τα χαρακτηριστικά του πεδίου διασποράς λυμάτων κάτω από διάφορες υδροδυναμικές συνθήκες. Η ικανότητα ρεαλιστικής προσομοίωσης του ύψους παγίδευσης των εκχυόμενων λυμάτων –ή τουλάχιστον παρόμοιας με τις προβλέψεις που δίνουν εξειδικευμένα υδραυλικά μοντέλα μικρής κλίμακας- από ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας δείχνει παράδοξη: το POM αγνοεί την κατακόρυφη επιτάχυνση (μεταβλητή-κλειδί στο φαινόμενο της κατακόρυφης ανάμιξης και διασποράς λυμάτων) και η κατακόρυφη εξίσωση της κίνησης μεταπίπτει στην εξίσωση υδροστατικής προσέγγισης. Επιπλέον, οι οριζόντιες διαστάσεις του πεδίου διασποράς είναι συνήθως μικρότερες από το μέγεθος των κελιών - τη διακριτική ικανότητα του υπολογιστικού πλέγματος (subgrid scale). Οι Zhang and Adams (1999) αποδίδουν αυτή την επιτυχία στο ότι, η ολική διάλυση των λυμάτων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ευρύτερη κυκλοφορία λόγω βαθμίδων πυκνότητας που επιλύει το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, ενώ επιπλέον, το πυκνοκλινές, που επίσης προβλέπει το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, παρέχει ένα φυσικό ανώτερο όριο – εμπόδιο για τον θύσανο των λυμάτων.

Στην παρούσα εργασία και για τις ανάγκες των πειραμάτων προσομοίωσης, η εκροή λυμάτων εισάγεται στο μοντέλο ως σημειακή πηγή γλυκού νερού, θρεπτικών  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  και  $\text{PO}_4^{3-}$  και οργανικής ύλης ως DOC στο κελί του υπολογιστικού πλέγματος που αντιστοιχεί στο σημείο διάθεσης του αγωγού. Πρόκειται για ένα κελί που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον πυθμένα, με διαστάσεις  $D_x=80\text{m}$ ,  $D_y=107\text{m}$  και ύψος περίπου  $D_z=2\text{m}$ , ενώ οι πραγματικές διαστάσεις του διαχυτήρα είναι περίπου το 1/3 της διακριτικής ικανότητας του πλέγματος στην περιοχή. Η ποσότητα νερού μηδενικής αλατότητας που εκρέει, μοντελοποιείται ως διόρθωση της αλατότητας και της κατακόρυφης ταχύτητας στο προ-τελευταίο σίγμα επίπεδο (KBM1), στις αντίστοιχες υπορουτίνες του μοντέλου. Χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία και ο κώδικας που προτείνουν οι Kourafalou et al. (1996) για την σημειακή παροχή γλυκού

νερού από ποτάμια, τροποποιημένος κατάλληλα για υποθαλάσσια σημειακή παροχή γλυκού νερού (μηδενικής αλατότητας). Παράλληλα, εισάγονται στο ίδιο κελί τα φορτία θρεπτικών και οργανικού άνθρακα, ως διορθώσεις (πρόσθεση) των συγκεντρώσεων που υπολογίζει το μοντέλο για το συγκεκριμένο κελί, και που υπόκεινται πλέον στην δυναμική που αναπτύσσεται τοπικά στην περιοχή.

Τα δεδομένα που αφορούν την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων για την περίοδο της προσομοίωσης και χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα παρείχε η Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης (ΔΕΥΑ) Μυτιλήνης και δίνονται στο Παράρτημα 2 (Πίνακα Π2).

Σε ότι αφορά το φορτίο Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα (DOC) τόσο στα ανεπεξέργαστα όσο και στα επεξεργασμένα λύματα, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της συγκεκριμένης μεταβλητής για να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο, έγινε εκτίμηση της συγκέντρωσης του DOC με βάση το σκεπτικό που αναπτύσσεται στη συνέχεια.

Το περιεχόμενο των αποβλήτων σε οργανική ύλη μετρείται συνήθως έμμεσα με τη χρήση δεικτών που ποσοτικοποιούν το οξυγόνο που χρειάζεται για την οξειδωσή της, όπως το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand, BOD<sub>5</sub>) και το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand, COD), ενώ λιγότερο συχνά προσδιορίζεται άμεσα μέσω του Ολικού Οργανικού Άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC) και ακόμα σπανιότερα στη βιβλιογραφία εμφανίζονται μετρήσεις του διαλυτού κλάσματος του TOC, του Διαλυτού Οργανικού Άνθρακα (Dissolved Organic Carbon, DOC). Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι παραπάνω μεταβλητές και οι μεταξύ τους σχέσεις (λόγοι) εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων και παρουσιάζουν για την ίδια μονάδα ετήσια ακόμα και ημερήσια διακύμανση. Μπορούν ωστόσο να καθοριστούν στατιστικά τυπικές τιμές για τους λόγους, που κυμαίνονται σε διαστήματα τιμών (Tchobanoglous et al. 2006). Οι υπηρεσίες περιβάλλοντος στη Γερμανία για παράδειγμα χρησιμοποιούν ένα συντελεστή συσχέτισης για την εκτίμηση του ολικού οργανικού άνθρακα που δίνεται από τη σχέση  $TOC / COD = 4$  (BGR, 2008).

Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται μετρήσεις των Katsoyiannis and Samara (2007) που αφορούν τα ανεπεξέργαστα και επεξεργασμένα αστικά λύματα της Θεσσαλονίκης,



ύστερα από τον 'καθαρισμό' τους στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της πόλης. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μετρήσεις ανεπεξέργαστων λυμάτων της Μυτιλήνης από τους Σιγαλό and Τσιακίρη (1993) και οι μετρήσεις ελέγχου ποιότητας επεξεργασμένων λυμάτων που παρείχε για την περίοδο προσομοίωσης η ΔΕΥΑ Μυτιλήνης. Και στις δυο περιπτώσεις, οι μονάδες περιλαμβάνουν δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

**Πίνακας 5.9.** Παράμετροι ποιότητας ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων λυμάτων πόλεων Θεσσαλονίκης και Μυτιλήνης και σχετικές αναφορές.

<b>Αναφορά / ΜΕΥΑ / περίοδος μετρήσεων</b>	<b>Μεταβλητή (μέσες τιμές)</b>	<b>Ανεπεξέργαστα λύματα</b>	<b>Επεξεργασμένα λύματα</b>
Θεσσαλονίκη Katsoyiannis and Samara (2007) Νοέ 2001 – Δεκ 2002 ημερήσιες μετρήσεις	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	650	11
	COD (mg/L)	1400	48
	Λόγος COD/ BOD <sub>5</sub>	2.15	4.36
	SS (mg/L)	1100	11
	DOC (mg/L)	72	19
Μυτιλήνη *Σιγαλός and Τσιακίρη (1993): Ιουλ 1993 – Δεκ 1993  ΔΕΥΑΜ (2008): Φεβ 2002 – Δεκ 2002	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	499*	7.1
	COD (mg/L)	1096*	27.9
	Λόγος COD/ BOD <sub>5</sub>	2.2*	3.93
	SS (mg/L)	864*	8.4
	DOC (mg/L)	-	-

Συγκρίνοντας τον λόγο COD / BOD<sub>5</sub> στα ανεπεξέργαστα λύματα (2.15 – 2.2) αλλά και τα αιωρούμενα στερεά (Suspended Solids SS: 1100 – 864 mg/L αντίστοιχα) μπορεί κανείς να υποθέσει ότι πρόκειται για δυο τύπους αστικών λυμάτων με τα ίδια περίπου χαρακτηριστικά ως προς το οργανικό φορτίο. Αντίστοιχα, οι διαδικασίες επεξεργασίας των λυμάτων στις δυο μονάδες οδηγούν σε εκροές με τα ίδια χαρακτηριστικά ως προς το οργανικό φορτίο (επεξεργασμένα λύματα: COD / BOD<sub>5</sub> 4.36 – 3.93 και αιωρούμενα στερεά 11 – 8.4 mg/L αντίστοιχα). Επομένως ο λόγος DOC / COD που προκύπτει από τις μετρήσεις των Katsoyiannis and Samara (2007) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα DOC στα

λύματα της Μυτιλήνης, τόσο στα ανεπεξέργαστα όσο και στα επεξεργασμένα (Επικ. Καθ. Δανιήλ Μαμάης, προσ. επικοινων.). Όλα τα προηγούμενα οδήγησαν στη χρήση των Σχέσεων 5.50 και 5.51 για την εκτίμηση της συγκέντρωσης του DOC στα ανεπεξέργαστα και επεξεργασμένα λύματα της πόλης της Μυτιλήνης:

Ανεπεξέργαστα λύματα :

$$\frac{DOC(mg/L)}{COD(mg/L)} = \frac{72}{1400} \Rightarrow DOC(mg/m^3) = \frac{72}{1400} * COD(mg/L) * 1000 \quad (5.50)$$

Επεξεργασμένα λύματα :

$$\frac{DOC(mg/L)}{COD(mg/L)} = \frac{19}{48} \Rightarrow DOC(mg/m^3) = \frac{19}{48} * COD(mg/L) * 1000 \quad (5.51)$$

### 5.3. Διαδικασία Σύζευξης των δύο μοντέλων

#### 5.3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η γενική εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της συγκέντρωσης οποιασδήποτε μη-συντηρητικής, βιοχημικής μεταβλητής στον τρισδιάστατο χώρο και το χρόνο περιγράφηκε ήδη στο κεφάλαιο 2.3 και είναι η (2.11):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - (w + w_s) \frac{\partial C}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left. \frac{dC}{dt} \right|_{\text{biochem}} \quad (2.11)$$

---

*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 σχέση (2.11) είναι αντίστοιχη των σχέσεων (5.3) για την αλατότητα και (5.4) 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 μια από τις εξισώσεις των οικολογικών μεταβλητών όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2.2. Επιπρόσθετα, στην εξίσωση (2.11) εμφανίζεται και η ταχύτητα καθίζησης  $w_s$ , που είναι διάφορη του μηδενός μόνο

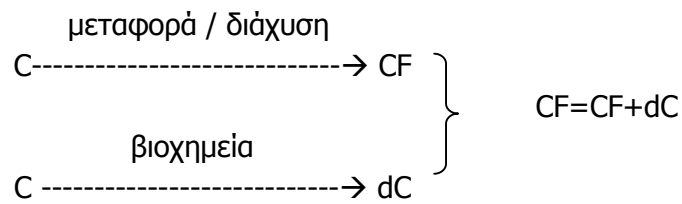
για το φυτοπλαγκτόν. Έτσι, η διεργασία της καταβύθισης για το φυτοπλαγκτόν περιλαμβάνεται ως ξεχωριστός όρος στην εξίσωση μεταφοράς στον κατακόρυφο άξονα:  $-w_s \frac{\partial PHYT}{\partial z}$ . Οι πλήρεις εξισώσεις του συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος, μία για κάθε μεταβλητή κατάστασης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

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. Στην παρούσα εργασία, η ένωση αυτή έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε τα δυο υπομοντέλα να λειτουργούν ταυτόχρονα, με τα αποτελέσματα του φυσικού μοντέλου να τροφοδοτούν άμεσα ως συναρτήσεις φόρτισης και να 'οδηγούν' το οικολογικό τμήμα. Στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου που λειτουργούν ως συναρτήσεις φόρτισης (forcing functions) του οικολογικού μοντέλου.

Η δομή του κώδικα του υδροδυναμικού μοντέλου POM χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη του κώδικα του οικολογικού, το οποίο έχει τη μορφή υπορουτινών FORTRAN. Οι υπορουτίνες αυτές καλούνται από το κυρίως πρόγραμμα του POM (Program Main) και περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα 3. Η δομή αυτή, έχει ως αποτέλεσμα τα δυο υπομοντέλα να λειτουργούν με το ίδιο βήμα χρόνου, το βήμα DTI του internal mode του POM. Η σύζευξη επομένως γίνεται σε αυτό το επίπεδο.

Αρχικά, σε κάθε βήμα χρόνου DTI υπολογίζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης C κάθε οικολογικής μεταβλητής στο χώρο που οφείλεται στις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς και της τυρβώδους διάχυσης (εξίσωση 2.11). Αυτό γίνεται με τη χρήση των υπορουτινών ADVTB και PROFT, ενώ λαμβάνονται υπόψη οι οριακές συνθήκες στα ανοιχτά όρια με την υπορουτίνα BCONDBIOCHEM. Η νέα τιμή που προκύπτει σε κάθε κόμβο από τις φυσικές διεργασίες αποθηκεύεται προσωρινά στην μεταβλητή CF (Σχήμα 5.10). Στη συνέχεια, και ενώ η φυσική διατηρείται σταθερή, το πρόγραμμα υπολογίζει με βάση την τιμή C του παρόντος χρόνου, τη μεταβολή dC στη συγκέντρωση κάθε οικολογικής μεταβλητής λόγω διεργασιών οικοσυστήματος, με τις υπορουτίνες BIOCHEM και INTEGR. Η μεταβολή αυτή προστίθεται στην ήδη υπολογισμένη λόγω φυσικών διεργασιών νέα συγκέντρωση, και έτσι προκύπτει η

συνολική νέα συγκέντρωση CF σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Η παραπάνω διαδικασία αποδίδεται στο Σχήμα 5.10.



**Σχήμα 5.10.** Σχηματική περιγραφή της ανανέωσης της συγκέντρωσης μιας οικολογικής μεταβλητής σε κάθε βήμα χρόνου ύστερα από την σύζευξη φυσικών και οικολογικών διεργασιών.

Είναι φανερό ότι η χρήση από το οικολογικό υπομοντέλο του ίδιου πλέγματος και βήματος χρόνου με το φυσικό υπομοντέλο POM επιτρέπει την πλέον λεπτομερή παρακολούθηση της εξέλιξης των βιοχημικών μεταβλητών στο χώρο και τον χρόνο.

**Πίνακας 5.11.** Συζευγμένο Μοντέλο: Συναρτήσεις Φόρτισης (forcing functions) του βιοχημικού υπομοντέλου. Εκτός από την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, όλες οι συναρτήσεις φόρτισης είναι αποτελέσματα του POM.

Συνάρτηση	Περιγραφή	Μονάδες
<b>Φόρτισης</b>		
u, v, w (x,y,z,t)	οι συνιστώσες της ταχύτητας στους τρεις άξονες x,y,z	m s <sup>-1</sup>
A (x,y,z,t)	οριζόντιος συντελεστής τυρβώδους διάχυσης	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
K (x,y,z,t)	κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους διάχυσης	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
I (t)	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>

**Πίνακας 5.10.** Η πλήρης μορφή των εξισώσεων των οικολογικών μεταβλητών του συζευγμένου μοντέλου.

$\frac{\partial PHYT}{\partial t} = -u \frac{\partial PHYT}{\partial x} - v \frac{\partial PHYT}{\partial y} - w \frac{\partial PHYT}{\partial z} + w_s \frac{\partial PHYT}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 PHYT}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 PHYT}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 PHYT}{\partial z^2} + (\mu(1-\gamma) - m_p) PHYT - G_p$
$\frac{\partial NO_3}{\partial t} = -u \frac{\partial NO_3}{\partial x} - v \frac{\partial NO_3}{\partial y} - w \frac{\partial NO_3}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 NO_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 NO_3}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 NO_3}{\partial z^2} - \alpha_N NO_{3up} N_{fb} PHYT \pm NO_{3sed}$
$\frac{\partial NH_3}{\partial t} = -u \frac{\partial NH_3}{\partial x} - v \frac{\partial NH_3}{\partial y} - w \frac{\partial NH_3}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 NH_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 NH_3}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 NH_3}{\partial z^2} - (\alpha_N NH_{4up} N_{fb} - m_{ap}) PHYT + (m_{ab} + e_b - U_2) BACT + (e_{az} + m_{az}) ZOOP \pm NH_{3sed}$
$\frac{\partial PO_4}{\partial t} = -u \frac{\partial PO_4}{\partial x} - v \frac{\partial PO_4}{\partial y} - w \frac{\partial PO_4}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 PO_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 PO_4}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 PO_4}{\partial z^2} - (\alpha_p PO_{4up} P_{fb} - m_{pp}) PHYT \pm PO_{4sed}$
$\frac{\partial DOC}{\partial t} = -u \frac{\partial DOC}{\partial x} - v \frac{\partial DOC}{\partial y} - w \frac{\partial DOC}{\partial z} + D_h \left( \frac{\partial^2 DOC}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 DOC}{\partial y^2} \right) + D_z \frac{\partial^2 DOC}{\partial z^2} + (\mu\gamma + m_{dp}) PHYT + (m_{db} - U_1) BACT + (e_{dz} + m_{dz}) ZOOP \pm DOC_{sed}$

### 5.3.2. Οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες οικολογικών μεταβλητών

Οι οριακές συνθήκες (δηλαδή οι τιμές) των οικολογικών μεταβλητών στα ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου (lateral open boundary values/conditions) επιλύονται από την υπορουτίνα BCONDBIOCHEM, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα 3.

Δεν ορίζονται ανταλλαγές με την ατμόσφαιρα για καμία οικολογική μεταβλητή. Οι τιμές των οικολογικών μεταβλητών στην διεπιφάνεια θάλασσας-ατμόσφαιρας διαμορφώνονται ελεύθερα κάτω από την επίδραση των οικολογικών διεργασιών και της φυσικής κυκλοφορίας.

Οι ανταλλαγές με το πυθμένα περιγράφονται στην παράγραφο 5.2.6.

Σε ότι αφορά τις αρχικές συνθήκες, κρίθηκε σκόπιμο, οι αρχικές τιμές των οικολογικών μεταβλητών να αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές τρισδιάστατες κατανομές ('θερμή' ενεργοποίηση – 'warm' start), για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για να αναπτυχθούν πλήρως τα προσομοιωμένα οικολογικά πεδία (spin up time). Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως για την θερμοκρασία και την αλατότητα (παράγραφος 5.1.4). Τα τρισδιάστατα πεδία των οικολογικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές παράγονται από μετρήσεις πεδίου: οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν στη δειγματοληψία, η ημερομηνία της οποίας χρησιμοποιείται ως χρονική αφετηρία για την προσομοίωση ( $t=0$ ), εισάγονται σε κώδικα FORTRAN που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί μία μέθοδο παρεμβολής (αντίστροφα βαρύνουσα απόσταση) για να υπολογίσει στα σημεία του τρισδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου τιμές από τα δεδομένα πεδίου. Οι αρχικές τιμές εισάγονται στο μοντέλο ως δεδομένα εισόδου, που χρησιμοποιεί ο κώδικας του μοντέλου κατά την έναρξή του (για παράδειγμα, για την συγκέντρωση νιτρικών, δημιουργήθηκε αρχείο με τίτλο NO3\_3D\_INITIAL\_MARCH.txt, για την συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας PHYT\_3D\_INITIAL\_MARCH.txt κ.ο.κ).

### 5.3.3. Διάγραμμα ροής μοντέλου

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται ένα γενικευμένο διάγραμμα ροής του συζευγμένου μοντέλου. Όπως προαναφέρθηκε, η δομή του κώδικα του υδροδυναμικού μοντέλου POM χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη του κώδικα του οικολογικού. Για λόγους πληρότητας και κατανόησης της δομής του συζευγμένου μοντέλου, στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται οι μεταβλητές και ορισμένες από τις υπορουτίνες του POM που εμφανίζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 5.11, καθώς και οι βασικότερες υπορουτίνες του οικολογικού σκέλους, η λειτουργία των οποίων περιγράφεται στο Παράρτημα 3.

Ύστερα από τον υπολογισμό της μεταφοράς, τυρβώδους διάχυσης και οριακών συνθηκών για τη θερμοκρασία και αλατότητα, το μοντέλο υπολογίζει την μεταφορά, την τυρβώδη διάχυση και τις οριακές συνθήκες στα ανοιχτά όρια για όλες τις οικολογικές μεταβλητές. Στη συνέχεια, επιλύονται οι οικολογικές διεργασίες με τις υπορουτίνες BIOCHEM και INTEGR, ανανεώνονται οι συγκεντρώσεις των οικολογικών μεταβλητών και το πρόγραμμα επιστρέφει στην κανονική ροή του κώδικα του POM.

Για την αποφυγή 'αφύσικων' τιμών των οικολογικών μεταβλητών υιοθετήθηκε η τεχνική μείωσης του βήματος χρόνου στην αριθμητική μέθοδο ολοκλήρωσης των οικολογικών διαφορικών εξισώσεων (time step cutting, Zavatarelli et al. 2000). Μείωση του βήματος χρόνου αποφασίζεται από τον κώδικα του μοντέλου όταν δεν πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια: όταν η ολοκλήρωση των οικολογικών μεταβλητών στο βήμα χρόνου της φυσικής (του υδροδυναμικού τμήματος του μοντέλου - DTI)

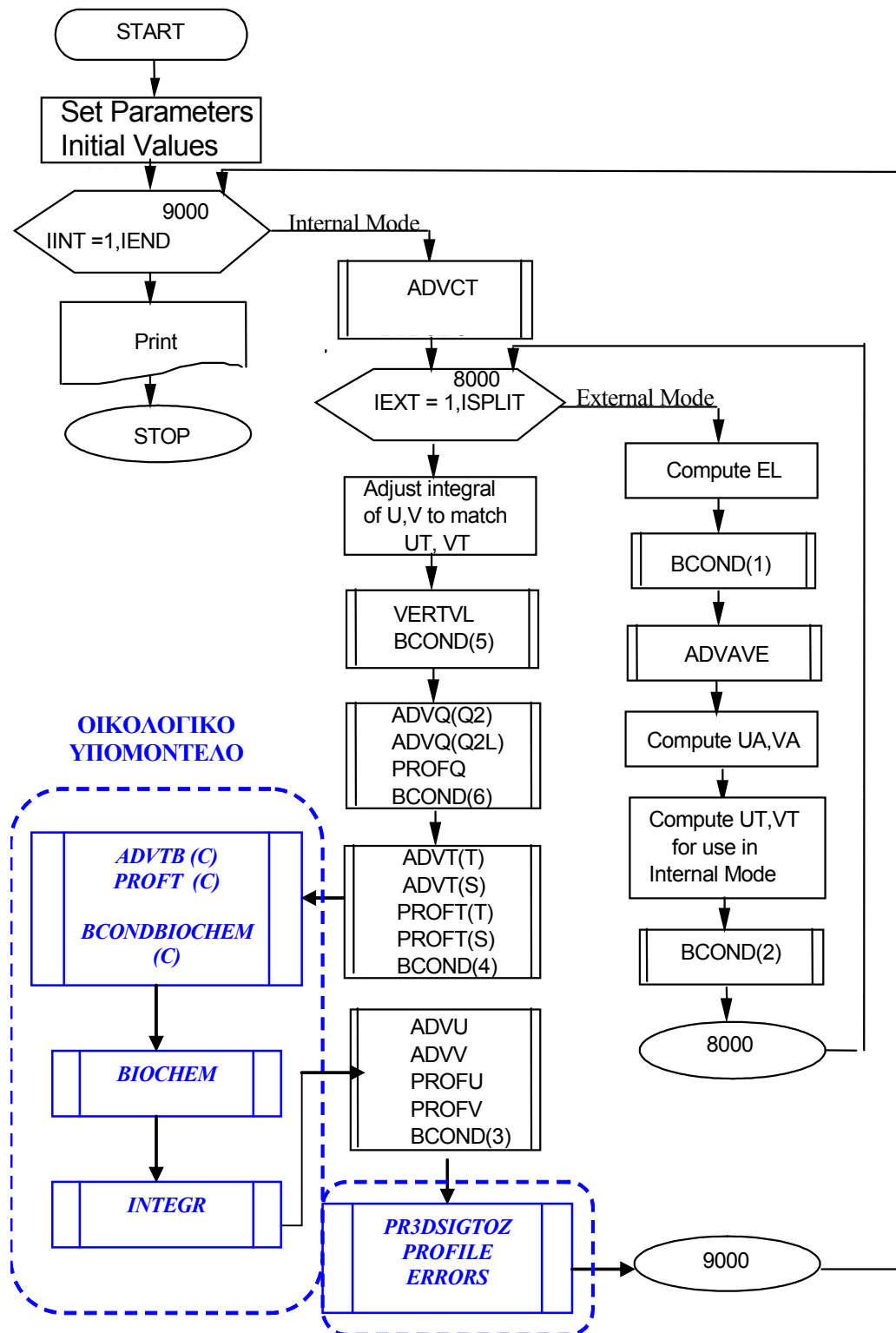
- παράγει αρνητικές τιμές συγκέντρωσης έστω και για μία μεταβλητή,
- διπλασιάζει την συγκέντρωση μιας μεταβλητής μέσα σε ένα βήμα χρόνου της φυσικής.

Εάν προκύψει μια από τις παραπάνω συνθήκες, το βήμα χρόνου διαιρείται στο μισό και επαναλαμβάνεται η αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αν χρειαστεί, ωστόσο το βήμα χρόνου γίνει ίσο με ένα προκαθορισμένο ελάχιστο βήμα χρόνου. Κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας, η φυσική παραμένει σταθερή, δηλαδή δεν γίνονται υπολογισμοί για το υδροδυναμικό κομμάτι του μοντέλου. Εάν παρόλα αυτά, εξακολουθήσουν να παράγονται αρνητικές τιμές συγκέντρωσης, αυτές διορθώνονται σε μία πολύ μικρή θετική τιμή συγκέντρωσης, για να συνεχιστεί ομαλά η ολοκλήρωση.



**Πίνακας 5.12.** Μεταβλητές και υπορουτίνες του φυσικού και του οικολογικού υπομοντέλου που εμφανίζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 5.11.

<b>Σύμβολο</b>	<b>Μεταβλητή</b>
EL	ανύψωση της ελεύθερης στάθμης της θάλασσας
UA,VA	Μέσες κατά βάθος οριζόντιες ταχύτητες στους δυο άξονες
UT,VT	Μέσες ταχύτητες UA,VA για το χρονικό διάστημα DTI (βήμα χρόνου)
U,V	Οριζόντιες ταχύτητες στους δυο άξονες
T	Θερμοκρασία
S	Αλατότητα
Q2	2 x Τυρβώδης κινητική ενέργεια
Q2L	Q2 x τυπική κλίμακα τύρβης
<b>Υπορουτίνα</b>	<b>Λειτουργία</b>
BCOND	Υπολογισμός οριακών συνθηκών στα ανοιχτά όρια
VERTVL	Υπολογισμός της κατακόρυφης ταχύτητας (κάθετη στις σίγμα επιφάνειες)
ADVQ	Υπολογισμός της μεταφοράς και της οριζόντιας τυρβώδους διάχυσης για τα μεγέθη Q2 και Q2L
PROFQ	Υπολογισμός της κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης για τα μεγέθη Q2 και Q2L και υπολογισμός των συντελεστών κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης $K_H$ και κινηματικού ιξώδους $K_M$ . Περιέχει το τυρβώδες υπομοντέλο των Mellor-Yamada.
ADVT	Υπολογισμός της μεταφοράς και της οριζόντιας τυρβώδους διάχυσης για μια βαθμωτή μεταβλητή (όπως T, S, C)
PROFT	Υπολογισμός της κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης για μια βαθμωτή μεταβλητή (όπως T, S, C)
<b>Υπορουτίνα Οικολογικού σκέλους</b>	<b>Λειτουργία</b>
ADVTB	Υπολογισμός μεταφοράς και οριζόντιας τυρβώδους διάχυσης για οικολογική (βαθμωτή) μεταβλητή. Είναι η ADVT τροποποιημένη έτσι ώστε να περιλαμβάνει τον όρο της καταβύθισης $-w_s \frac{\partial C}{\partial z}$ στην κατακόρυφη διάσταση της εξίσωσης μεταφοράς.
BIOCHEM	δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις τιμές όλων των οικολογικών μεταβλητών, καλεί την INTEGR για κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος, ανανεώνονται οι συγκεντρώσεις όλων των οικολογικών μεταβλητών
INTEGR	ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων που αποτελούν το οικολογικό τμήμα του μοντέλου και υπολογισμός της μεταβολής dC της συγκέντρωσης κάθε μεταβλητής λόγω οικολογικών διεργασιών
BCONDBIOCHEM	Υπολογισμός οριακών συνθηκών οικολογικής μεταβλητής στα ανοιχτά όρια
ERRORS	Υπολογισμός σφάλματος προσομοίωσης
PRINT2D / PR3DSIGTOZ	Δημιουργία αρχείων εξόδου για 2D και 3D μεταβλητές
PROFILE	Δημιουργία αρχείων εξόδου με κατακόρυφα προφίλ των μεταβλητών



**Σχήμα 5.11.** Γενικευμένο διάγραμμα ροής του συζευγμένου μοντέλου. Τα κουτιά με τις πλαιϊνές γραμμές περιέχουν υπορουτίνες. Οι κυριότερες υπορουτίνες του οικολογικού υπομοντέλου περικλείονται από την διακεκομμένη γραμμή.

#### **5.4. Ανάπτυξη συστήματος βαθμονόμησης οικολογικού υπομοντέλου.**

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση του οικολογικού σκέλους του συζευγμένου μοντέλου. Με τον όρο 'βαθμονόμηση' (calibration) εννοείται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό εκείνων των τιμών των παραμέτρων των εξισώσεων του οικολογικού μοντέλου που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε ένα επιλεγμένο υποσύνολο μετρήσεων πεδίου, αντιπροσωπευτικό του συστήματος του οποίου η προσομοίωση είναι το ζητούμενο. Το θεωρητικό υπόβαθρο αναπτύχθηκε στην παράγραφο 2.2.4 του κεφαλαίου 2 και συμπληρώνεται εδώ. Η διαδικασία βαθμονόμησης που περιγράφεται στη συνέχεια (ή βελτιστοποίησης - optimization) αφορά μόνο στις παραμέτρους του οικολογικού μοντέλου. Η ποσοτικοποίηση του σφάλματος του υδροδυναμικού μοντέλου (POM) έδειξε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά, χωρίς να απαιτείται αντίστοιχη 'ρύθμιση'.

Η βαθμονόμηση ενός 3D μοντέλου οικοσυστήματος είναι εξαιρετικά δύσκολη άσκηση εξαιτίας της πολυπλοκότητας ενός τέτοιου συστήματος προσομοίωσης. Η ταυτόχρονη μεταβολή των οικολογικών μεταβλητών στις 3 διαστάσεις του χώρου και στο χρόνο, ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για τις διαδοχικές εκτελέσεις του μοντέλου (καθώς πρόκειται για επαναληπτική διαδικασία) παρά την διαρκώς αυξανόμενη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, ο μεγάλος όγκος αποτελεσμάτων από τις διαδοχικές εκτελέσεις του μοντέλου και η δυσκολία διαχείρισης και αξιολόγησης όλης αυτής της πληροφορίας που προκύπτει, η σχεδόν μόνιμη έλλειψη δεδομένων πεδίου που να καλύπτουν επαρκώς την περιοχή μελέτης χωρικά και χρονικά, είναι οι δυσκολίες ενός τέτοιου εγχειρήματος.

Στην παρούσα εργασία, για να παρακαμφθούν τα ακανθώδη προβλήματα που δημιουργεί αυτή η πολυπλοκότητα, μειώθηκαν οι διαστάσεις του μοντέλου και, από τρισδιάστατο, το σύστημα προσομοίωσης θεωρήθηκε για τις ανάγκες της βαθμονόμησης μηδενικών διαστάσεων (box-model). Αφαιρέθηκε δηλαδή η έννοια της μεταβολής της συγκέντρωσης των οικολογικών μεταβλητών κατάστασης στο χώρο καθώς και η επίδραση της φυσικής κυκλοφορίας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στη μεθοδολογία της βαθμονόμησης είναι το VisSim/OptimizePRO, της Visual Solutions, Inc. Το περιβάλλον του VisSim είναι μια εύχρηστη γραφική διεπαφή χρήστη (graphical user interface) κατάλληλη για την ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης μηδενικών διαστάσεων (0-D), όπως το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 5.2. Παράλληλα, η εφαρμογή OptimizePRO δίνει την δυνατότητα βελτιστοποίησης με ή χωρίς περιορισμούς (constrained/unconstrained optimization) των παραμέτρων των εξισώσεων μέσα από μια διαδικασία επαναληπτικών τρεξιμάτων του μοντέλου: ξεκινώντας με κάποιες αρχικές τιμές παραμέτρων, το λογισμικό εκτελεί το μοντέλο, συγκρίνει τα αποτελέσματα με δεδομένα πεδίου που του παρέχει ο χρήστης και υπολογίζει μία συνάρτηση κόστους (αντικειμενική συνάρτηση). Στη συνέχεια ανανεώνει τις τιμές των παραμέτρων, εκτελεί ξανά το μοντέλο και υπολογίζει εκ νέου την συνάρτηση κόστους. Η ανανέωση των τιμών των παραμέτρων γίνεται αριθμητικά με τέτοιο τρόπο ώστε γενικά να μειώνεται η συνάρτηση κόστους και να συγκλίνει προς το ελάχιστό της. Ιδεατά, οι τελικές τιμές παραμέτρων είναι και οι βέλτιστες γιατί ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους.

Τα όρια μέσα στα οποία κινούνται οι τιμές των παραμέτρων τίθενται από τη βιβλιογραφία ενώ περιορισμοί (κατώτερες-ανώτερες τιμές) υπάρχουν και για τις μεταβλητές κατάστασης, πχ αρνητικές συγκεντρώσεις θρεπτικών ή φυτοπλαγκτού δεν έχουν φυσική σημασία. Το VisSim/OptimizePRO χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους κλίσεων (gradient methods) για την εύρεση ακροτάτων, που ανήκουν στους αλγόριθμους μη-γραμμικής βελτιστοποίησης (Ευστρατιάδης and Κουτσογιάννης, 2007). Πρόκειται για μεθόδους που χρησιμοποιούν τις παραγώγους της συνάρτησης κόστους (derivatives – gradient equations) ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου, ο προσδιορισμός των οποίων είναι το ζητούμενο. Περισσότερες λεπτομέρειες γύρω από τις τεχνικές που χρησιμοποιεί και τον τρόπο λειτουργίας τόσο του VisSim όσο και του OptimizePRO βρίσκονται στα εγχειρίδια του λογισμικού VisSim και VisSim/OptimizePRO, User's Guide Vers 3.0 (1996, 1998).

Για την ποσοτικοποίηση της καλής προσαρμογής του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητες μετρήσεις πεδίου από τον σταθμό M2, ο οποίος θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικός του τύπου νερού της περιοχής μελέτης (εκτός της περιοχής του λιμένα που αντιπροσωπεύεται από τον M1). Οι μετρήσεις προέρχονται από τον Τσιρτσή (1994) και καλύπτουν έναν ετήσιο κύκλο από 3 Ιουλίου 1992 έως 11

Ιουνίου 1993 με μηνιαία συχνότητα (Πίνακας 5.13). Με βάση αυτόν τον ετήσιο κύκλο δημιουργήθηκε ένα σύνολο δεδομένων 5 επαναλαμβανόμενων ετήσιων κύκλων, έτσι ώστε κατά τις προσομοιώσεις το μοντέλο να έχει το χρόνο να αναπτυχθεί πλήρως (spin up).

**Πίνακας 5.13.** Ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου από τον σταθμό M2 που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του οικολογικού σκέλους του μοντέλου (πηγή, Τσιρτσής, 1994).

DATE	DAY	PO4 μgt/l	NO3 μgt/l	NH3 μgt/l	DOC mg C /m3	PHYT mg C /m3	ORGN μgt/l	chl a μg/l
03-Ιουλ-92	184	0.04	0.20	0.64	330.29	20.42	4.21	0.41
21-Ιουλ-92	201	0.04	0.07	1.66	528.00	12.92	6.73	0.26
02-Σεπ-92	244	0.02	0.05	2.42	534.28	11.50	6.81	0.23
29-Σεπ-92	271	0.06	0.09	0.89	265.38	11.94	3.38	0.24
05-Νοε-92	308	0.10	0.20	0.64	426.93	8.94	5.45	0.18
13-Ιαν-93	377	0.01	0.50	0.74		27.98		0.56
18-Φεβ-93	413	0.11	1.97	0.62		17.50		0.35
24-Μαρ-93	447	0.10	0.32	1.99		45.79		0.92
23-Απρ-93	477	0.01	1.09	1.60		6.13		0.12
19-Μαϊ-93	503	0.12	0.28	0.83		17.46		0.35
11-Ιουν-93	526	0.10	2.72	2.62		2.58		0.05

Δεδομένου ότι στόχος της βαθμονόμησης είναι ο προσδιορισμός εκείνων των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου που ελαχιστοποιούν την απόσταση *μετρήσεις πεδίου – αποτελέσματα μοντέλου*, δηλαδή το σφάλμα του μοντέλου, ως συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί επιλέχθηκε το συνολικό σφάλμα του μοντέλου, εκφρασμένο ως άθροισμα των επιμέρους προτυποποιημένων σφαλμάτων των 5 μεταβλητών κατάστασης, δηλαδή των επιμέρους μέτρων καλής προσαρμογής του μοντέλου στις ανεξάρτητες μετρήσεις πεδίου:

$$\begin{aligned}
 & CostFunction = \\
 & = stndErrorNO_3^- + stndErrorNH_4^+ + stndErrorPO_4^{-3} + stndErrorPHYT + stndErrorDOC
 \end{aligned}$$

(Σχέση 5.52)

Η προτυποποίηση του σφάλματος γίνεται διαιρώντας το με την τυπική απόκλιση των μετρήσεων πεδίου της συγκεκριμένης μεταβλητής και έχει ως στόχο να αποκτήσουν

τα επιμέρους σφάλματα την ίδια βαρύτητα-συνεισφορά στον υπολογισμό της συνάρτησης κόστους (οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους κατά τάξεις μεγέθους).

Για παράδειγμα, το προτυποποιημένο σφάλμα του μοντέλου για τα νιτρικά δίνεται από την παρακάτω σχέση (προτυποποιημένο RMS σφάλμα):

$$stdErrorNO_3^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{errorNO_3^-}{stdvNO_3^-} \right)^2}{n}}$$

όπου  $stdvNO_3^-$  η τυπική απόκλιση των  $n$  διαθέσιμων μετρήσεων πεδίου νιτρικών. Αντίστοιχες σχέσεις υπολογίζουν το προτυποποιημένο σφάλμα των υπόλοιπων μεταβλητών. Στο τέλος κάθε εκτέλεσης προσδιορίζεται η συνάρτηση κόστους 5.52. Με γραφικές παραστάσεις που ανανεώνονται σε κάθε εκτέλεση (iteration), μπορεί να ελεγχθεί και οπτικά η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου. Η υλοποίηση της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται σχηματικά στο Παράρτημα 4. Με τη διαδικασία που περιγράφηκε ως τώρα, προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων που δίνονται στον Πίνακα 5.5 και εισήχθησαν στον κώδικα του πλήρους 3D συζευγμένου μοντέλου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το λογισμικό του VisSim/OptimizePRO χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους κλίσεων (gradient methods) για την εύρεση ακροτάτων, που ανήκουν στους αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης, μεθόδους που χρησιμοποιούν τις παραγώγους της συνάρτησης κόστους (derivatives – gradient equations) ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου. Πρόκειται για επαναληπτικές αριθμητικές μεθόδους που, ξεκινώντας από ένα σύνολο αρχικών τιμών παραμέτρων  $P_0$ , βελτιώνουν σταδιακά την τιμή της συνάρτησης κόστους  $f$ , μεταβαίνοντας στο επόμενο σημείο με εφαρμογή του γενικού κανόνα:

$$P_{k+1} = P_k + \Delta P_k$$

όπου  $\Delta P_k$  η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων (που εξαρτάται από τη μέθοδο), τέτοια ώστε:

$$f(P_{k+1}) < f(P_k), \text{ για κάθε μετατόπιση } k$$

Η προσδιοριστική (ντετερμινιστική) αυτή διαδικασία εγγυάται σύγκλιση στο τοπικό ελάχιστο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης  $P_0$ . Οι μέθοδοι αναζήτησης τοπικών ακροτάτων χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν ή όχι τις παραγώγους της συνάρτησης κόστους: (α) μέθοδοι κλίσης, όπως στην περίπτωση του VisSim/OptimizePRO (gradient methods) και (β) μέθοδοι άμεσης αναζήτησης (direct search methods). Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό η συνάρτηση κόστους να μην έχει ένα μόνο ελάχιστο αλλά πολλά τοπικά ακρότατα-ελάχιστα. Στην περίπτωση αυτή, καμία προσδιοριστική διαδικασία δεν μπορεί να εγγυηθεί τον εντοπισμό του ολικού ακρότατου (ολικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους και άρα βέλτιστο σύνολο τιμών παραμέτρων), εξαιτίας του κινδύνου 'εγκλωβισμού' της σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα των προσδιοριστικών μεθόδων τοπικής αναζήτησης (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2007).

## 5.5. Συνοπτική περιγραφή εφαρμογής

Σκοπός της εφαρμογής του συζευγμένου μοντέλου προσομοίωσης σε αυτό το στάδιο ήταν η διερεύνηση της ικανότητάς του να αναπαράγει κατανομές φυσικών, χημικών και βιολογικών μεταβλητών του θαλάσσιου οικοσυστήματος της περιοχής μελέτης, καθώς και την εξέλιξή τους στο χρόνο, όπως αυτές προέκυψαν από τις μετρήσεις πεδίου. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί η περίοδος 24 Μαρτίου 2001 – 1 Ιουλίου 2002 (hindcasting από τη δειγματοληψία VK6 έως και VK17), δηλαδή λίγο παραπάνω από ένας ετήσιος κύκλος. Ο επιπλέον χρόνος (πέραν των 12 μηνών) χρησιμοποιείται από το μοντέλο για να αναπτύξει πλήρως τα τρισδιάστατα πεδία των φυσικών και οικολογικών μεταβλητών (spin up time).

Οι προσομοιώσεις (τρέξιματα) έγιναν στα συστήματα SUN που διαθέτει το Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας (σύστημα με λειτουργικό UNIX (Solaris 5.10), δυο επεξεργαστών x 2.8GHz, 64bit, και σύστημα με λειτουργικό LINUX, 16 επεξεργαστών X 2.8GHz, 64bit) με χρήση του ενσωματωμένου compiler της FORTAN 90. Σε ότι αφορά τους χρόνους που απαιτούνται για την ολοκλήρωση ενός πειράματος προσομοίωσης, τα στοιχεία συνοψίζονται στον Πίνακα 5.14.

Για την αποτελεσματική διαχείριση της μεγάλης ποσότητας πληροφορίας που χρειάζεται να τροφοδοτηθεί αλλά κυρίως, που παράγει το μοντέλο προσομοίωσης

χρειάστηκε να αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό στο MATLAB, The Mathworks Inc. Λίστα με τις σχετικές ρουτίνες και τη λειτουργία τους παρατίθεται στο Παράρτημα 5.

Τέλος, στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται περιληπτικά τα χαρακτηριστικά των δυο μοντέλων, ως ενιαίου, συζευγμένου μοντέλου πλέον, συνοψίζοντας όσα αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 5 και τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

**Πίνακας 5.14.** Περίληψη των χαρακτηριστικών των επιμέρους και του συζευγμένου μοντέλου και περιγραφή της εφαρμογής.

	<b>Υδροδυναμικό μοντέλο POM</b>	<b>Οικολογικό μοντέλο</b>
<b>Αριθμητικό Σχήμα</b>	Κεντρικές πεπερασμένες διαφορές, Σχήμα τύπου Aracawa-C	
<b>Μεταφορά (Advection)</b>	Κεντρικό σχήμα (centered)	
<b>Οριζόντια διάχυση (horizontal diffusion)</b>	Τύπου Smagorinsky HORCON = 0.05	
<b>Κατακόρυφη Τυρβώδης ανάμιξη (Turbulence)</b>	$k - l$ (μοντέλο Mellor-Yamada) $k$ : κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους ανάμιξης $l$ : μήκος τυρβώδους ανάμιξης	
<b>Επιφάνεια</b>	Ελεύθερη επιφάνεια, μέθοδος διαδοχικών βημάτων (mode splitting)	
<b>Τοπογραφία πυθμένα</b>	Ψηφιοποίηση ναυτικού χάρτη στο ArcInfo και παρεμβολή στα σημεία του αριθμητικού πλέγματος μέσω SeaGrid (πρόγραμμα δημιουργίας καμπυλόγραμμου πλέγματος στο MATLAB)	
<b>Οριζόντιο πλέγμα (grid)</b>	Καμπυλόγραμμο: 50x100, Μέγεθος κελιού κυμαινόμενο από 19m - 302m	
<b>Κατακόρυφη διακριτοποίηση (Vertical Descritization)</b>	Σύστημα σίγμα-συντεταγμένων $\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}$ 11 σίγμα επίπεδα	
<b>Χρονική διακριτοποίηση (Time stepping)</b>	Μέθοδος Leapfrog Barotropic (external) mode: 1 sec Baroclinic (internal) mode: 30 sec	Χρησιμοποιείται το βήμα χρόνου του υδροδυναμικού (Baroclinic (internal) mode): 30 sec με δυνατότητα μείωσης (μέθοδος time step cutting)
<b>Μεταβλητές κατάστασης</b>	Θερμοκρασία $T$ , αλατότητα $S$ , οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας ( $U, V, W$ ), ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας $\eta$ , τυρβώδης κινητική ενέργεια $a^2/2$ και μήκος τυρβώδους ανάμιξης $l$	Φυτοπλαγκτονική βιομάζα PHYT, νιτρικά $NO_3$ , αμμωνιακά $NH_3$ , φωσφορικά $PO_4$ , διαλυμένος οργανικός άνθρακας DOC



<b>Οριακές συνθήκες στα ανοιχτά όρια</b>	<i>U, V</i> : συνθήκες ακτινοβολίας τύπου Sommerfield. <i>T-S</i> : upstream advection. Στις περιπτώσεις εισροής νερού χρησιμοποιούνται δεδομένα πεδίου ως εξής: Κάθετες τομές T-S που αλλάζουν ημερήσια και εφαρμόζονται στα βόρεια, νότια και ανατολικά ανοιχτά όρια, που παράγονται με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο από μηνιαίες μετρήσεις πεδίου	<i>PHYT, NO3, NH3, PO4, DOC</i> : upstream advection όπως T-S. Κάθετες τομές οικολογικών μεταβλητών που αλλάζουν ημερήσια και εφαρμόζονται στα βόρεια, νότια και ανατολικά ανοιχτά όρια, που παράγονται με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο από μηνιαίες μετρήσεις πεδίου
<b>Οριακές συνθήκες στην επιφάνεια</b>	<i>Ανταλλαγές θερμότητας-νερού</i> : Οριζόντιες 2D κατανομές T-S που αλλάζουν ημερήσια και εφαρμόζονται στην επιφάνεια, που παράγονται με γραμμική παρεμβολή στο χρόνο από μηνιαίες μετρήσεις πεδίου. <i>Ανταλλαγές ορμής</i> : επίδραση του ανέμου ως διατμητικές τάσεις στη επιφάνεια, που υπολογίζονται κάθε 3 ώρες από μετρήσεις πεδίου (EMY).	Δεν ορίζονται ανταλλαγές με την ατμόσφαιρα
<b>Συναρτήσεις φόρτισης</b>		οι συνιστώσες της ταχύτητας στους τρεις άξονες u, v, w, ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους διάχυσης και η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας I. Ορίζονται επίσης οι εκροές ανεπεξέργαστων και επεξεργασμένων αστικών λυμάτων.
<b>Μέθοδος επίλυσης οικολογικών εξισώσεων</b>		Δυνατότητα επιλογής μεταξύ Euler's, Runge-Kutta 2 <sup>nd</sup> , Runge-Kutta 4 <sup>th</sup>
<b>Δεδομένα: Απαιτήσεις και μορφή</b>	12 αρχεία εισόδου (.txt): βαθυμετρία, 2 αρχεία με αρχικές 3D κατανομές T-S, 2 αρχεία με επιφανειακές κατανομές T-S, 6 αρχεία με κάθετες τομές T-S στα 3 ανοιχτά όρια, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου (συνιστώσες στους x- και y- άξονες)	25 αρχεία εισόδου (.txt): 5 αρχεία με αρχικές 3D κατανομές, 15 αρχεία με κάθετες τομές στα 3 ανοιχτά όρια, 5 αρχεία με μετρήσεις πεδίου για υπολογισμό σφάλματος (από ένα για κάθε μεταβλητή)
<b>Λογισμικό γραφικών /οπτικοποίησης</b>	MATLAB	
<b>Στόχος εφαρμογής</b>	Προσομοίωση ετήσιου κύκλου φυσικών, χημικών και βιολογικών μεταβλητών και ποσοτικοποίηση σφάλματος	
<b>Υπολογιστές και χρόνοι προσομοίωσης (Typical CPU)</b>	14 μήνες πραγματικού χρόνου χρειάζονται 20.4 ώρες προσομοίωσης σε σύστημα SUN δυο επεξεργαστών (2 x 2.8GHz, 64bit, λειτουργικό σύστημα UNIX Solaris 5.10)	
	14 μήνες πραγματικού χρόνου χρειάζονται 47.02 ώρες προσομοίωσης σε σύστημα SUN δυο επεξεργαστών (2 x 2.8GHz, 64bit, λειτουργικό σύστημα UNIX Solaris 5.10)	
	14 μήνες πραγματικού χρόνου χρειάζονται περίπου 13 ώρες προσομοίωσης σε σύστημα SUN δεκαέξι επεξεργαστών (16 x 2.8GHz, 64bit, λειτουργικό σύστημα LINUX)	

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Μετρήσεις πεδίου

#### 6.1.1. Υδρογραφία: θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου σε κάθε σταθμό για την θερμοκρασία, την αλατότητα και την πυκνότητα (σίγμα-t) με τη χρήση CTD παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.1:

Ο σταθμός M1 παρουσιάζει, σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς, τη μέγιστη μέση θερμοκρασία 20.38 °C με το μέγιστο εύρος διακύμανσης αυτής όπως φαίνεται και από την τυπική απόκλιση (3.75 °C), την μικρότερη μέση πυκνότητα (27.70 kg/m<sup>3</sup>) με το μέγιστο εύρος διακύμανσης αυτής (τυπική απόκλιση 0.90 kg/m<sup>3</sup>) και τη χαμηλότερη μέση αλατότητα (39.06). Ως προς τη θερμοκρασία και πυκνότητα, αυτό είναι αναμενόμενο: η αβαθής και προστατευμένη περιοχή του λιμένα και ανοιχτά αυτού όπου βρίσκεται ο σταθμός (βάθους 8μ) υπόκειται σε εντονότερη θέρμανση και ψύξη, καθώς ανταλλάσει θερμότητα με την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια του έτους. Από τις μέσες θερμοκρασίες του Πίνακα 6.1, είναι φανερό η τάση για μείωση της μέσης θερμοκρασίας από νότο προς βορρά. Δεν διαπιστώνεται κάποια τάση για την αλατότητα και την πυκνότητα. Οι πιο ρηχοί σταθμοί (M1 και M4), όπως σχολιάστηκε προηγουμένως, είναι κατά μέσο όρο 'θερμότεροι' και 'ελαφρύτεροι'. Η ελάχιστη τιμή αλατότητας μετρήθηκε στον M4 (38.31) στις 25 Απρ 2002 και η μέγιστη στον M2 (40.59) στις 30 Ιουλ 2002.

Η εικόνα της δομής της θαλάσσιας στήλης στην περιοχή μελέτης απεικονίζεται στα Σχήματα 6.1 έως 6.4. Για την παρουσίαση των μετρήσεων πεδίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ocean Data View (Schlitzer 2009, <http://odv.awi.de>), όπου στο διάγραμμα T-S χρησιμοποιείται, αντί της in situ θερμοκρασίας, η δυναμική θερμοκρασία, ενώ η πυκνότητα σίγμα-t αναγράφεται  $\sigma_t$ . Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα από 4 δειγματοληψίες που έγιναν σε χρονικές στιγμές κατά τις οποίες επικρατούσαν «αντιπροσωπευτικές» συνθήκες για το σύστημα: καλή κατακόρυφη ανάμιξη (χειμώνας) και έντονη στρωμάτωση (καλοκαίρι) αλλά και συνθήκες ανάπτυξης και υποχώρησης του θερμοκλινούς (άνοιξη και φθινόπωρο αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών παρατίθενται ως κάθετες τομές, κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) ανά σταθμό, διαγράμματα T-S και οριζόντιες

κατανομές σε 3 βάθη. Τα αποτελέσματα όλων των υπολοίπων δειγματοληψιών παρατίθενται με τον ίδιο τρόπο στο Παράρτημα 6.

### **Κατακόρυφη ανάμιξη**

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το σύστημα της περιοχής μελέτης σε μια χρονική στιγμή της χειμερινής περιόδου σε κατάσταση καλής κατακόρυφης ανάμιξης της στήλης, όπως προκύπτει από τα δεδομένα της δειγματοληψίας VK13, που έγινε στις 4 Μαρτίου 2002. Η θερμοκρασία κατανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα σε όλη τη στήλη, κυμαινόμενη από 15.4 °C στην επιφάνεια των σταθμών M1-M3 έως 15.1 °C στον πυθμένα σε βάθος 30m. Οι θερμοκρασίες αυτές δεν είναι οι χαμηλότερες που μετρήθηκαν στην περιοχή, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1. Η αλατότητα κυμαίνεται από 38.82 στην επιφάνεια των σταθμών M1 και M2 έως 39.89 στον πυθμένα των M4 και M5, στην ευρύτερη περιοχή των οποίων είναι αυξημένη σε όλη τη στήλη. Αυτή η κατανομή αλατότητας αποτυπώνεται και στην κατανομή της πυκνότητας που κυμαίνεται από 28.83 έως 29.72 kg/m<sup>3</sup> και η οποία στις λεπτομέρειές της φαίνεται να καθορίζεται από την αλατότητα τη δεδομένη στιγμή: στους σταθμούς M4 και M5 είναι αυξημένη (>29.2 kg/m<sup>3</sup>), όπως και στα βαθύτερα στρώματα των M2 και M3 (>25m). Οι μικρότερες τιμές σίγμα-t μετρήθηκαν στα επιφανειακά νερά των M1 και M2 (<29.0 kg/m<sup>3</sup>). Στο διάγραμμα T-S φαίνεται πως παρότι η θερμοκρασία είναι σχεδόν ομοιογενής στη στήλη του νερού σε όλους τους σταθμούς, η βαθμίδα της αλατότητας δημιουργεί αντίστοιχη μικρή βαθμίδα στην πυκνότητα σε όλους τους σταθμούς, τα σημεία T-S των οποίων βρίσκονται πάνω στην ίδια καμπύλη. Αυτό δείχνει ότι η διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας με το βάθος είναι η ίδια για όλους τους σταθμούς και ουσιαστικά στην περιοχή μελέτης υπάρχει μία μάζα νερού.

Άλλες συνθήκες καλής έως πλήρους κατακόρυφης ανάμιξης βρέθηκαν στις παρακάτω ημερομηνίες, που παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6: VK4 – 1 Νοε 2000, VK5 – 14 Δεκ 2000, VK11 – 22 Νοε 2001 (έντονη οριζόντια βαθμίδα αλατότητας –πυκνότητας στον άξονα βορρά-νότου), VK12 – 22 Ιαν 2002, VK15 – 25 Απρ 2002, VK20 – 20 Νοε 2002. Ειδικά στη δειγματοληψία VK5 – 14 Δεκ 2000, η μάζα νερού στη στήλη κάθε σταθμού είναι σχεδόν ομογενής (καθόλου ή πολύ μικρή διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας με το βάθος). Αυτό σημαίνει ουσιαστικά σχεδόν ένας τύπος νερού για κάθε σταθμό και συνεπώς, αφού οι σταθμοί κείτονται ο ένας πολύ κοντά ή πάνω στον άλλον στο διάγραμμα T-S, σχεδόν μία μάζα νερού στην περιοχή μελέτης, ή έστω μάζες νερού με πολύ συγγενικά υδρογραφικά χαρακτηριστικά. Διαβαθμίσεις

αυτής της κατάστασης φαίνονται στα διαγράμματα T-S των υπόλοιπων 'χειμερινών' δειγματοληψιών που προαναφέρθηκαν.

**Πίνακας 6.1.** Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση των μετρήσεων θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως σίγμα-t (kg/m<sup>3</sup>) σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας.

Σταθμός	Θερμοκρασία (°C)	Αλατότητα (PSS-78)	Sigma – t (kg/m <sup>3</sup> )
<b>M1</b>			
Εύρος	13.71 – 27.06	38.43 – 40.11	25.35 – 29.40
Μέση τιμή	<b>20.38</b>	<b>39.06</b>	<b>27.70</b>
Τυπική απόκλιση	3.75	0.36	0.90
<b>M2</b>			
Εύρος	14.78 – 26.30	38.49 – 40.59	26.42 – 29.43
Μέση τιμή	<b>19.19</b>	<b>39.18</b>	<b>28.13</b>
Τυπική απόκλιση	3.05	0.55	0.80
<b>M3</b>			
Εύρος	13.87 – 26.19	38.82 – 41.01	26.32 – 29.73
Μέση τιμή	<b>19.00</b>	<b>39.34</b>	<b>28.30</b>
Τυπική απόκλιση	3.22	0.48	0.70
<b>M4</b>			
Εύρος	13.85 – 25.82	38.31 – 40.41	26.54 – 29.63
Μέση τιμή	<b>19.27</b>	<b>39.21</b>	<b>28.07</b>
Τυπική απόκλιση	3.40	0.31	0.85
<b>M5</b>			
Εύρος	13.88 – 25.89	38.67 – 40.48	26.66 – 29.72
Μέση τιμή	<b>18.13</b>	<b>39.33</b>	<b>28.52</b>
Τυπική απόκλιση	3.29	0.28	0.82
<b>M6</b>			
Εύρος	13.85 – 25.69	38.39 – 40.46	26.42 – 30.23
Μέση τιμή	<b>18.84</b>	<b>39.12</b>	<b>28.15</b>
Τυπική απόκλιση	2.96	0.28	0.81

### Στρωμάτωση

Μια κατάσταση έντονης και προχωρημένης χρονικά θερμικής στρωμάτωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3, όπως προκύπτει από τα δεδομένα της δειγματοληψίας VK18, που έγινε στις 30 Ιουλίου 2002, και δείχνουν οι κάθετες τομές θερμοκρασίας και σίγμα-t. Η θερμοκρασία είναι υψηλή σε όλη τη στήλη και κυμαίνεται από 27.06 °C (επιφάνεια M1) έως 18.88 °C (πυθμένας M6). Είναι χαρακτηριστικό ότι νότια του σταθμού M4, τα πρώτα 19m έχουν θερμοκρασία πάνω από 25 °C. Βορειότερα, στους σταθμούς M5 και M6 το πάχος του στρώματος αυτού μικραίνει λίγο (στα πρώτα 16m). Το θερμοκλινές –και το πυκνοκλινές– δημιουργείται μεταξύ βάθους 15-25m στους σταθμούς M5 – M6 και νοτιότερα, πιο χαμηλά στη στήλη, μεταξύ βάθους 20-25m στους σταθμούς M2 – M3. Σε βάθη άνω των 22-25m είναι εγκλωβισμένα τα λιγότερο θερμά νερά (<21 °C).

Η αλατότητα χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές και κυμαίνεται από 38.5 έως 40.75. Τα νερά με την υψηλότερη αλατότητα (>40) και ταυτόχρονα μεγαλύτερη πυκνότητα βρίσκονται στην κοιλότητα που δημιουργεί η τοπογραφία του πυθμένα μεταξύ των σταθμών M1 και M3 και σε βάθος κάτω από 10m. Τα νερά με την χαμηλότερη συγκριτικά αλατότητα (<39.6) βρίσκονται επιφανειακά, στον M1 και στα βαθύτερα στρώματα του M6. Η πυκνότητα κυμαίνεται από 25.35 kg/m<sup>3</sup> (επιφάνεια M1) έως 29.73 kg/m<sup>3</sup> (πυθμένας M3), μία διαφορά περίπου 4.38 kg/m<sup>3</sup>. Στον σταθμό M1 βρίσκονται τα θερμότερα, λιγότερο αλμυρά και -κατά συνέπεια- ελαφρύτερα νερά. Ο βαθμός στρωματοποίησης και σταθερότητας της στήλης αποτυπώνεται και στο διάγραμμα T-S: Η γραμμή που συνδέει τα σημεία παρατηρήσεων T-S για κάθε σταθμό και είναι η απεικόνιση της μάζας νερού του σταθμού, διαπερνά πολλές ισόπυκνες καμπύλες. Η γραμμή αυτή που ταυτόχρονα δείχνει τη συν-διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας συναρτήσει του βάθους ακολουθεί παρόμοια πορεία στους M2 και M3, ενώ διαφοροποιείται στους M5 και M6. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα T-S, η μάζα νερού στην επιφάνεια όλων των σταθμών σε βάθος <10m (και κοντά στον πυθμένα του M1) έχει παρόμοια υδρογραφικά χαρακτηριστικά, που διαφοροποιούνται σταδιακά με το βάθος.

Συνθήκες στρωμάτωσης βρέθηκαν στις παρακάτω ημερομηνίες, που απεικονίζονται στο Παράρτημα 6: VK2 – 22 Αυγ 2000, VK8 – 18 Ιουλ 2001, VK9 – 31 Αυγ 2001, VK17 – 1 Ιουλ 2002. Η υδρογραφική δομή της στήλης όπως μετρήθηκε στις δειγματοληψίες VK2 (22 Αυγ 00) και VK9 (31 Αυγ 2001) δείχνει να είναι τυπική

θερινής θερμικής στρωμάτωσης: το επιφανειακό στρώμα πάχους 10-14m υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής πυκνότητας, χωρίζεται από ένα απότομο θερμοκλινές / πυκνοκλινές πάχους 3-4m από το βαθύτερο στρώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας – υψηλότερης πυκνότητας. Το θερμοκλινές μπορεί να είναι τόσο έντονο, που, σε αυτά 3-4m νερού, η θερμοκρασίας πέφτει πάνω από 5 °C ενώ η πυκνότητα αυξάνεται περίπου κατά 1.5 kg/m<sup>3</sup>, καθιστώντας πολύ δύσκολη την κατακόρυφη επικοινωνία των δυο στρωμάτων. Οι δυο διαφορετικές αυτές μάζες νερού (επιφανειακή και βαθύτερη) διακρίνονται και στα αντίστοιχα διαγράμματα T-S.

### **Ανάπτυξη και υποχώρηση θερμοκλινούς**

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπως μετρήθηκαν στις 30 Μαΐου 2001 (VK7), δηλαδή σε μια χρονική στιγμή που η επιφάνεια της θάλασσας δέχεται θερμότητα τόσο απευθείας από την αυξημένη σε διάρκεια και ένταση ηλιακή ακτινοβολία όσο και από την κατώτερη ατμόσφαιρα που έχει ήδη θερμανθεί για το ίδιο λόγο. Τα προφίλ θερμοκρασίας δείχνουν αυτή τη διαδικασία θέρμανσης της επιφάνειας και της μεταφοράς της θερμότητας πιο βαθιά στη στήλη κυρίως με διεργασίες κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης: τα επιφανειακά νερά βρίσκονται στην περιοχή των 20 °C ενώ ο πυθμένα στην περιοχή των 17 °C, δηλαδή μια διαφορά 3 °C. Η θέρμανση της στήλης, που όπως φαίνεται από την κάθετη τομή της πυκνότητας ήδη δημιουργεί ελαφρύτερα επιφανειακά νερά, θα συνεχιστεί στη διάρκεια του καλοκαιριού και θα οδηγήσει στην ανάπτυξη του θερμοκλινούς και τη στρωματοποίηση της στήλης, όπως περιγράφηκε στη προηγούμενη παράγραφο.

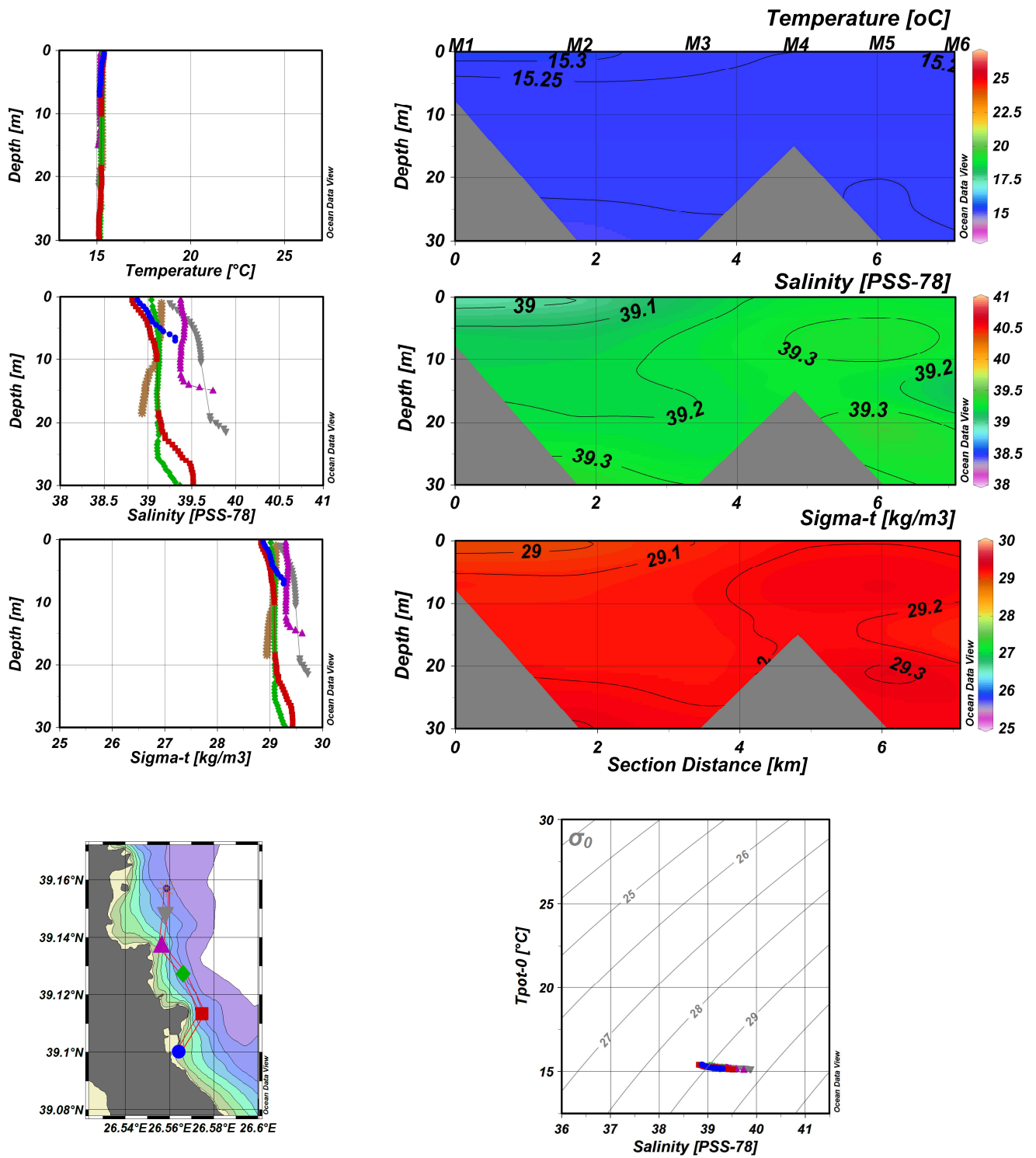
Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στους M1 και M4 η αύξηση της πυκνότητας με το βάθος και άρα η θετική σταθερότητα της στήλης οφείλεται στην αντίστοιχη αύξηση της αλατότητας με το βάθος. Στους σταθμούς M2 και M6 που βρίσκονται πιο ανοιχτά και είναι βαθύτεροι, το διάγραμμα T-S υποδεικνύει ουδέτερη σταθερότητα της στήλης μεταξύ 5-23m βάθους (ακόμα και τάση για αρνητική σταθερότητα στον M6). Τα επιφανειακά 5m δείχνουν να αποτελούν μία μάζα νερού για τους M2, M4 και M6 (διάγραμμα T-S) ενώ ο M1 διαφοροποιείται.

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπως μετρήθηκαν στις 4 Οκτωβρίου 2002 (VK19), δηλαδή σε μια μεταβατική χρονική

στιγμή μεταξύ καλοκαιρινών και χειμερινών συνθηκών όπου η θάλασσα δεν δέχεται πλέον μεγάλα ποσά θερμότητας. Το θερμοκλινές έχει χαθεί και η θερμότητα που μεταφέρθηκε στη μάζα του νερού τη θερμή περίοδο του θέρους έχει διαχυθεί σε όλη τη στήλη, όπως δείχνουν τα προφίλ και η κάθετη τομή της θερμοκρασίας: η θερμοκρασία είναι ομογενής σε όλη τη στήλη (22.1 – 22.2 °C). Στην επόμενη δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στις 20 Νοε 2002 (VK20), βρέθηκε ότι η σταδιακή απώλεια θερμότητας από τη μάζα νερού έριξε τη θερμοκρασία στους 19.2 °C, περίπου κατά 3 °C ομοιόμορφα σε όλη τη στήλη, όπως μπορεί να συναχθεί από τα υπάρχοντα δεδομένα.

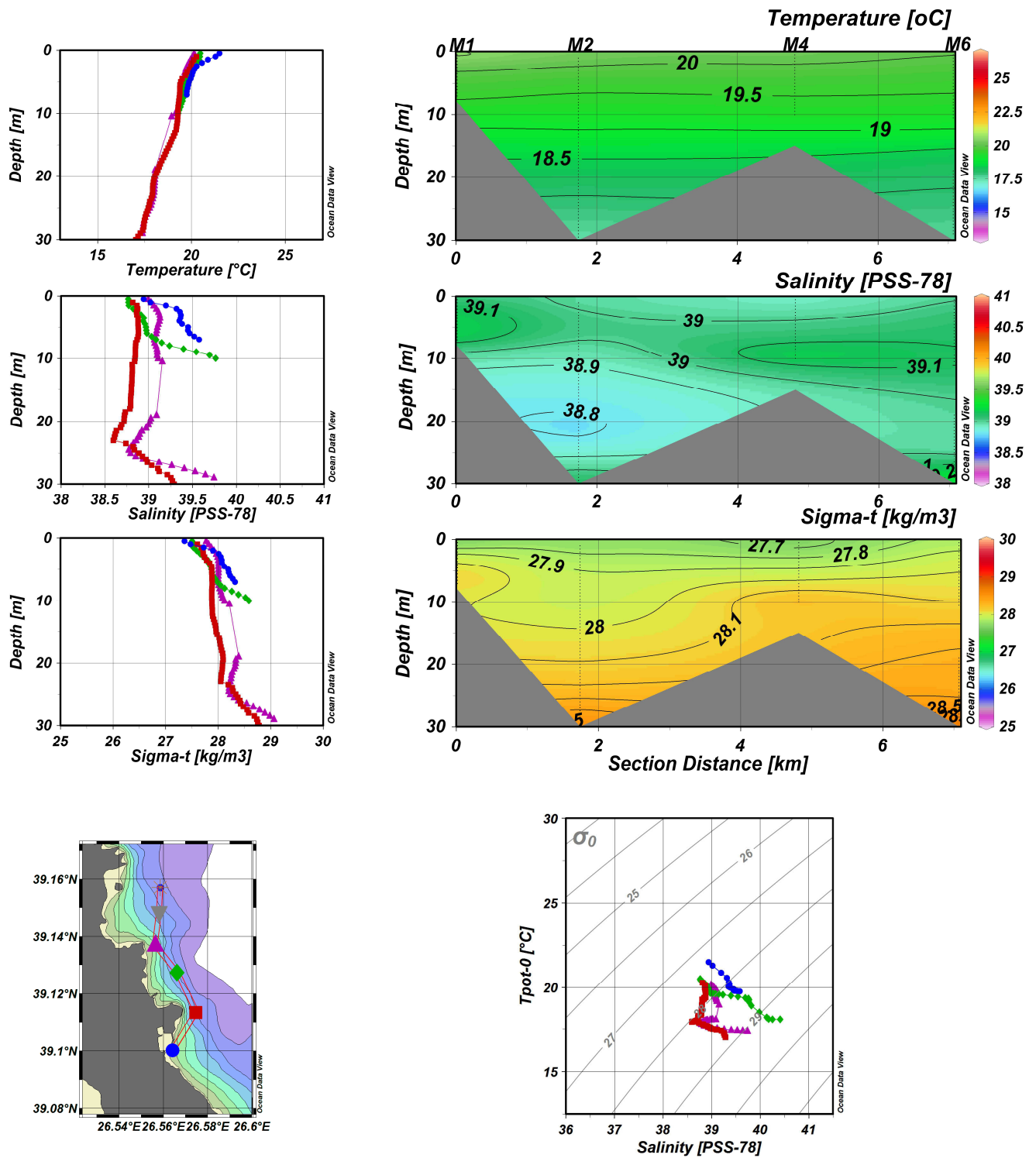
Η κατανομή της αλατότητας που βρέθηκε στην προηγούμενη δειγματοληψία VK18 - 30 Ιουλίου 2002, δηλαδή περίπου 2 μήνες πριν (και περιγράφηκε στην παράγραφο Στρωμάτωση) εμφανίζεται και σε αυτήν: υψηλές τιμές που κυμαίνονται από 38.8 έως 40.4, ενώ τα νερά με την υψηλότερη αλατότητα (>40) και ταυτόχρονα μεγαλύτερη πυκνότητα βρίσκονται στην κοιλότητα που δημιουργεί η τοπογραφία του πυθμένα μεταξύ των σταθμών M1 και M3 και σε βάθος κάτω από 10m. Τα νερά με την χαμηλότερη συγκριτικά αλατότητα (<39.5) βρίσκονται επιφανειακά, στον M1 και στον M6. Η εύρεση της ίδιας περίπου κατανομής αλατότητας στην περιοχή με αυτή που βρέθηκε περίπου 2 μήνες πριν, αλλά και στις 5 Σεπ 2000 (VK3), οδηγεί στο συμπέρασμα πως μάλλον πρόκειται για δομή που επαναλαμβάνεται συχνά σε θερινές συνθήκες και ίσως έχει διάρκεια μηνών. Το διάγραμμα T-S δείχνει ότι τα σημεία T-S από όλους τους σταθμούς βρίσκονται πάνω στην ίδια καμπύλη, δηλαδή ουσιαστικά στην περιοχή μελέτης υπάρχει μία μάζα νερού.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η βαθμίδα επιφανειακής θερμοκρασίας όπως εμφανίζεται στα Σχήματα 6.1 έως 6.4, όπου παρουσιάζονται αυξημένες τιμές θερμοκρασίας εγγύτερα στους σταθμούς M1 κυρίως αλλά και M2, να είναι ενδεχομένως 'τεχνητή' (artifact), οφειλόμενη στη διαφορετική ώρα μέτρησης κατά τη διάρκεια της μέρας. Καθώς η δειγματοληψία ξεκινούσε από το σταθμό M6 τις πρωινές ώρες και τελείωνε στον σταθμό M1 αργά το μεσημέρι – απόγευμα, η μεγιστοποίηση της θερμότητας που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας το μεσημέρι, πιθανώς να είναι υπεύθυνη για τη θερμοκρασιακή βαθμίδα στην επιφάνεια της θάλασσας που παρουσιάζεται στα σχήματα αυτά.

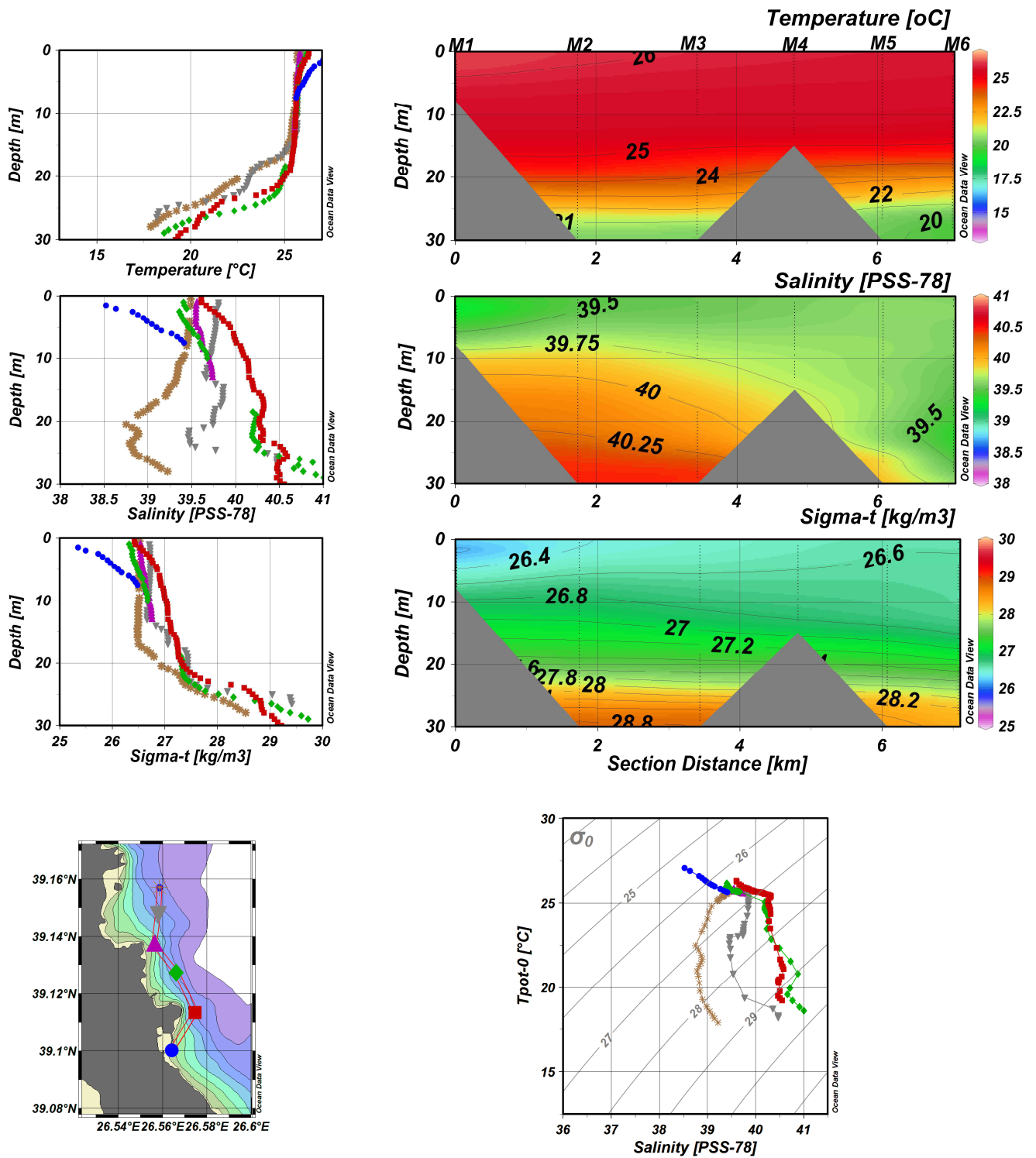


**Σχήμα 6.1.** Δειγματοληψία VK13 – 4 Μαρτίου 2002: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t (kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S – διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.

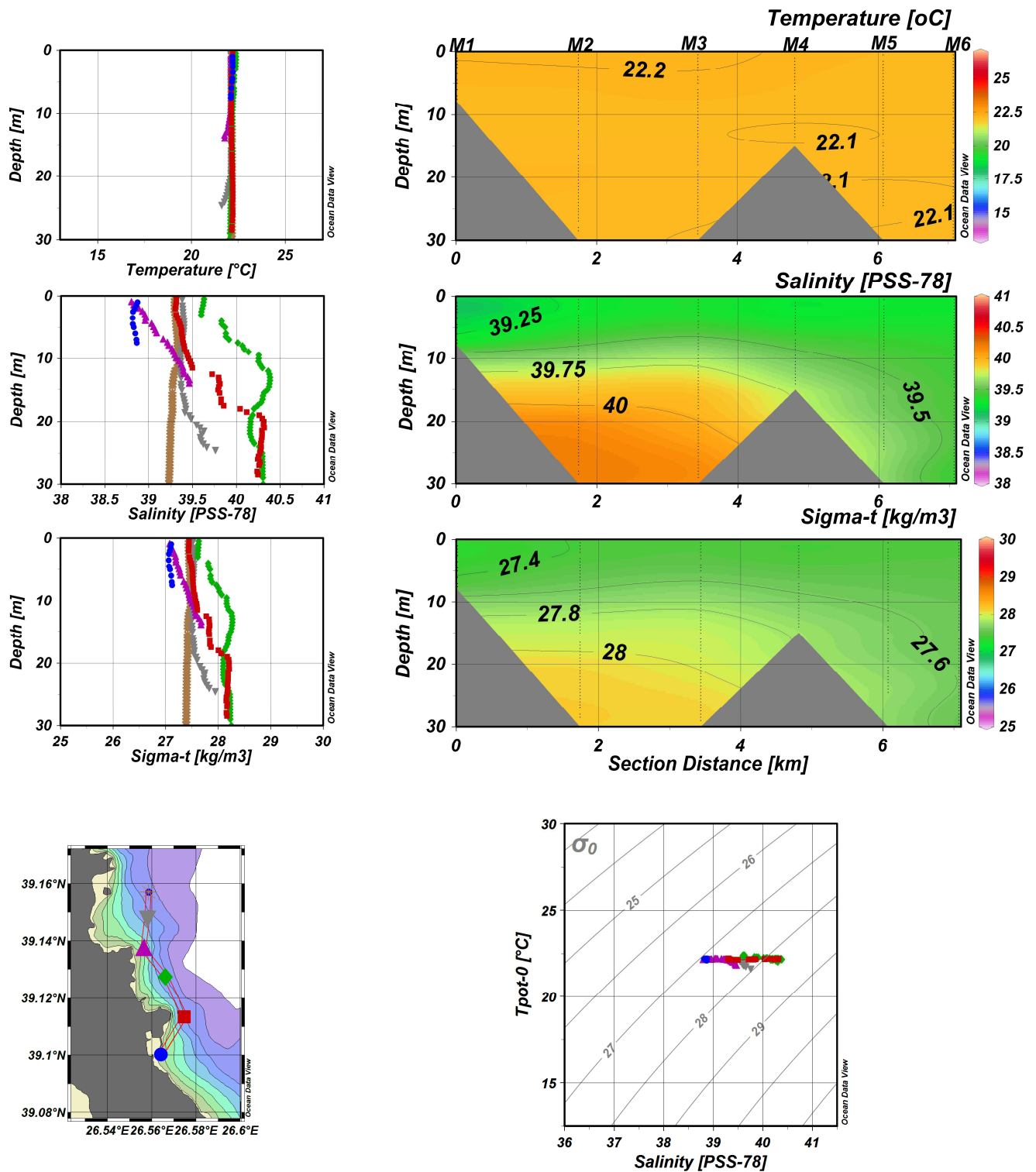




**Σχήμα 6.2.** Δειγματοληψία VK7 – 30 Μαΐου 2001: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t (kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S –διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.



**Σχήμα 6.3.** Δειγματοληψία VK18 – 30 Ιουλίου 2002: Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t (kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S – διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.



**Σχήμα 6.4.** Δειγματοληψία VK19 – 4 Οκτωβρίου 2002. Αριστερή στήλη: κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας ως sigma-t (kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς. Δεξιά στήλη: Κάθετη τομή θερμοκρασίας, αλατότητας και sigma-t κατά μήκος της γραμμής που ορίζουν οι σταθμοί από M1-M6. Κάτω δεξιά: διάγραμμα T-S – διακρίνονται τα δεδομένα ανά σταθμό.

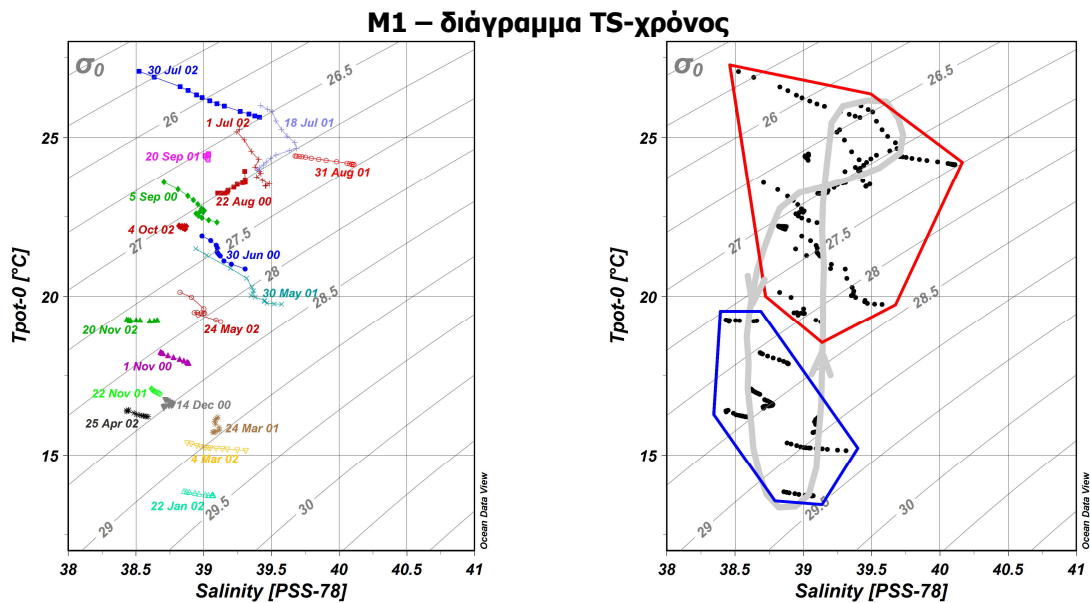
### **Συν-διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας στο χρόνο: Διαγράμματα TS-χρόνος**

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά για το σταθμό M1 το διάγραμμα T-S σε συνάρτηση με το χρόνο (TS-time diagram). Πρόκειται για διάγραμμα T-S στο οποίο, εκτός από τη σχέση θερμοκρασίας – αλατότητας με το βάθος, σχεδιάζονται τα σημεία T-S (τύποι νερού) από όλες τις δειγματοληψίες, σε μια προσπάθεια να αναδειχθεί η συν-διακύμανση των δυο αυτών υδρογραφικών μεταβλητών στο χρόνο και να οριστεί ο ετήσιος κύκλος που διαγράφουν τα υδρογραφικά δεδομένα στην περιοχή μελέτης (Tomczak, 2001). Η αλληλουχία των μετρήσεων ορίζει μια σχέση T-S με το χρόνο που αντικατοπτρίζει την εποχιακή μεταβολή των δυο υδρογραφικών ιδιοτήτων, που στον παράκτιο χώρο μπορεί να είναι αρκετά έντονη λόγω της γειτνίασης των θαλάσσιων μαζών εκτός από την ατμόσφαιρα και με τη στεριά.

Στο Σχήμα 6.5, αριστερά είναι όλα τα δεδομένα του σταθμού ανά ημερομηνία δειγματοληψίας (με διαφορετικό χρώμα) και δεξιά, με βάση τα ίδια δεδομένα που ομαδοποιούνται σε δυο περιόδους χειμερινή-ψυχρή (Νοέμβριος έως Απρίλιος – μπλε περιοχή) και θερινή-θερμή (Μάιος έως Οκτώβριος – κόκκινη περιοχή), η πορεία που, σε γενικές γραμμές, φαίνεται να διαγράφει η σχέση θερμοκρασίας-αλατότητας σε έναν ετήσιο κύκλο. Υποδεικνύεται ότι η σχέση θερμοκρασίας-αλατότητας στην περιοχή μελέτης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, όχι τυχαία, αλλά με συγκεκριμένο τρόπο, κοινό σε γενικές γραμμές για όλους τους σταθμούς και βάθη. Ο ετήσιος κύκλος φαίνεται να έχει σχήμα τύπου '8' και σκιαγραφείται από την γκρι καμπύλη ενώ σημειώνεται η φορά: από τις χειμερινές δειγματοληψίες Ιανουαρίου – Μαρτίου κάτω αριστερά στο διάγραμμα, η καμπύλη T-S κινείται ανοδικά προς μεγαλύτερες θερμοκρασίες, σταδιακά επεκτείνεται σε μήκος και διαπερνά περισσότερες ισόπυκνες τους εαρινούς-θερινούς μήνες και επιστρέφει από πάνω-δεξιά αργά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο (Σεπ-Οκτ), οπότε οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν φτάσει βαθιά στη στήλη του νερού, σε ολόένα χαμηλότερες θερμοκρασίες και αλατότητες αργά το φθινόπωρο (Νοε) – χειμώνα (και πάλι κάτω αριστερά στο διάγραμμα).

Το πρότυπο αυτό ανιχνεύεται σε όλους τους σταθμούς, αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ του επιφανειακού και υποεπιφανειακού στρώματος, που οφείλονται κυρίως στη χρονική υστέρηση μεταφοράς της θερμότητας στα βαθύτερα στρώματα που δεν βρίσκονται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, αλλά και στο γεγονός ότι τα βαθύτερα

νερά έχουν γενικά και υψηλότερες αλατότητες. Τονίζεται ότι για να σχηματιστεί μια πληρέστερη εικόνα του ετήσιου κύκλου της συν-διακύμανσης των υδρογραφικών, συντηρητικών μεταβλητών T-S, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί κλιματολογικός ετήσιος κύκλος για τη περιοχή, θα πρέπει να μελετηθούν μετρήσεις πολλών ετών. Για παράδειγμα, έτσι θα γίνει πιο σαφής η θέση κάθε μήνα στο διάγραμμα T-S, οι διασπορές που παρουσιάζουν οι μετρήσεις και τελικά η πορεία του ετήσιου κύκλου.



**Σχήμα 6.5.** (αριστερά) Διάγραμμα T-S σε συνάρτηση με το χρόνο για τον σταθμό M1 και (δεξιά) η συν-διακύμανση θερμοκρασίας-αλατότητας (γκρι καμπύλη) κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου πάνω στο ίδιο διάγραμμα. Τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε δυο περιόδους: χειμερινή (Νοε έως Απρ – μπλε) και θερινή (Μαϊ έως Οκτ - κόκκινο).

### 6.1.2. Κυκλοφορία νερού: Ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος

Όλες οι ρευματομετρήσεις που έγιναν σε κάθε σταθμό και κάθε βάθος παρουσιάζονται σε μορφή ροδογραμμάτων στο Σχήμα 6.6. Τα διαγράμματα αυτά αναδεικνύουν:

- την κυκλική κατανομή των διευθύνσεων και του μέτρου της ταχύτητας,
- τη συχνότητα εμφάνισης μιας διεύθυνσης αλλά και μιας ομάδας ταχυτήτων (μέτρο) σε μορφή ποσοστού.

Από το σύνολο των ρευματομετρήσεων που έγιναν σε κάθε σταθμό και κάθε βάθος υπολογίστηκαν ορισμένα κύρια στατιστικά μεγέθη, που συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου είναι για το μέτρο της ταχύτητας  $\pm 1\text{cm/s}$  και για τη διεύθυνση  $\pm 15^\circ$ .

**Πίνακας 6.2.** Ρευματομετρήσεις: εύρος (min-max), μέση τιμή (avg) και τυπική απόκλιση (stdv) του μέτρου της ταχύτητας ρεύματος (cm/s) στο δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας. Παρατίθεται και ο αριθμός παρατηρήσεων (No Obs).

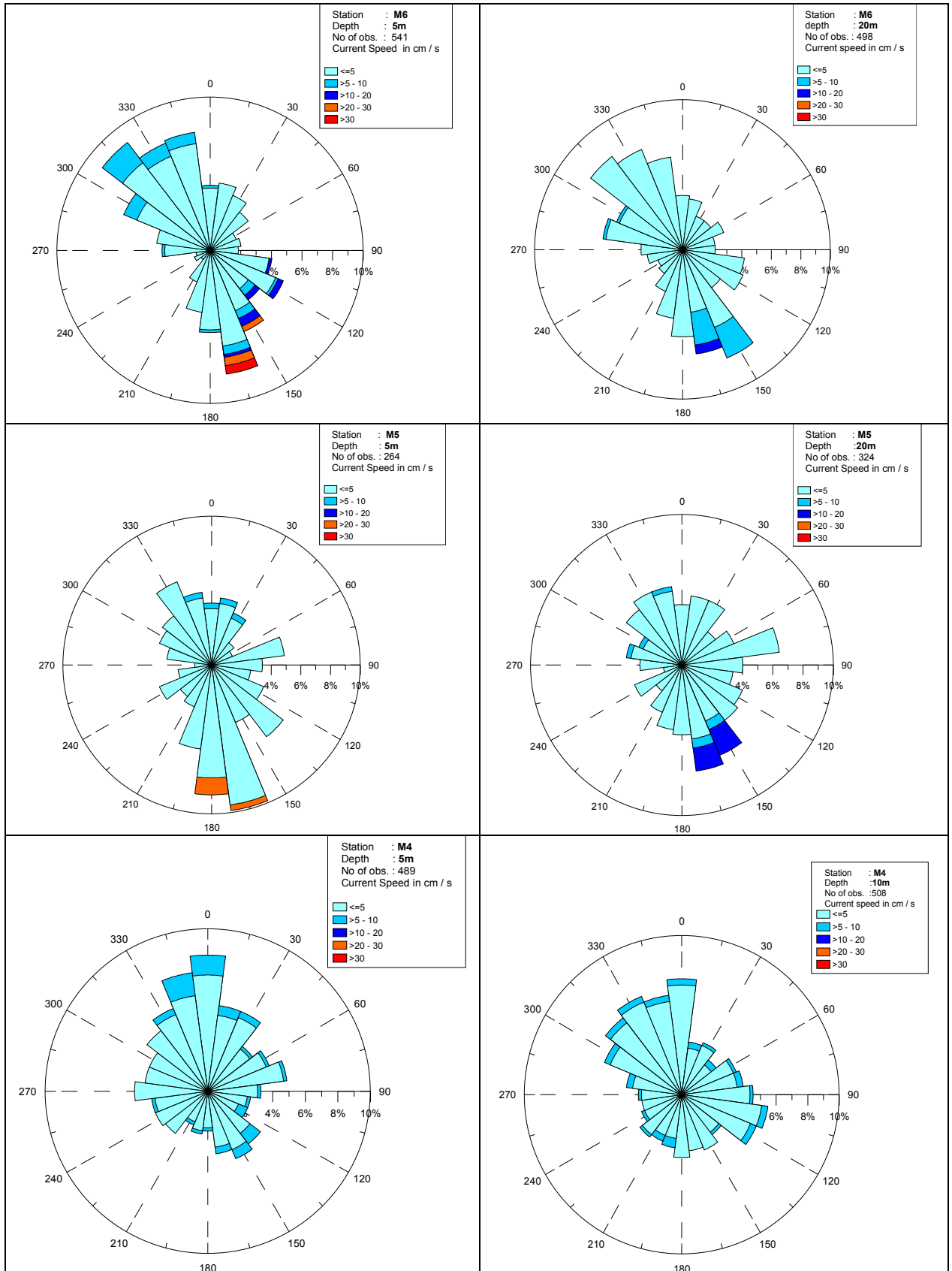
Station	Depth	No Obs	min	max	avg	stdv
M6	5m	541	1	36	3	4
	20m	498	1	13	3	2
M5	5m	264	1	26	3	3
	20m	324	1	15	2	2
M4	5m	489	1	10	3	2
	10m	508	1	10	2	2
M3	5m	271	1	26	4	4
	20m	314	1	18	3	2
M2	5m	473	1	32	4	4
	20m	561	1	16	3	3
M1	5m	233	1	8	3	2

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα ροδογράμματα σε συνδυασμό με τα στατιστικά του παραπάνω πίνακα είναι τα εξής:

- ✓ στον σταθμό **M6**, υπάρχει έντονη συγκέντρωση των διευθύνσεων του ρεύματος γύρω από ένα νοητό άξονα με προσανατολισμό Βορειοδυτικό – Νοτιοανατολικό, τόσο στο επιφανειακό στρώμα (5m) όσο και στο

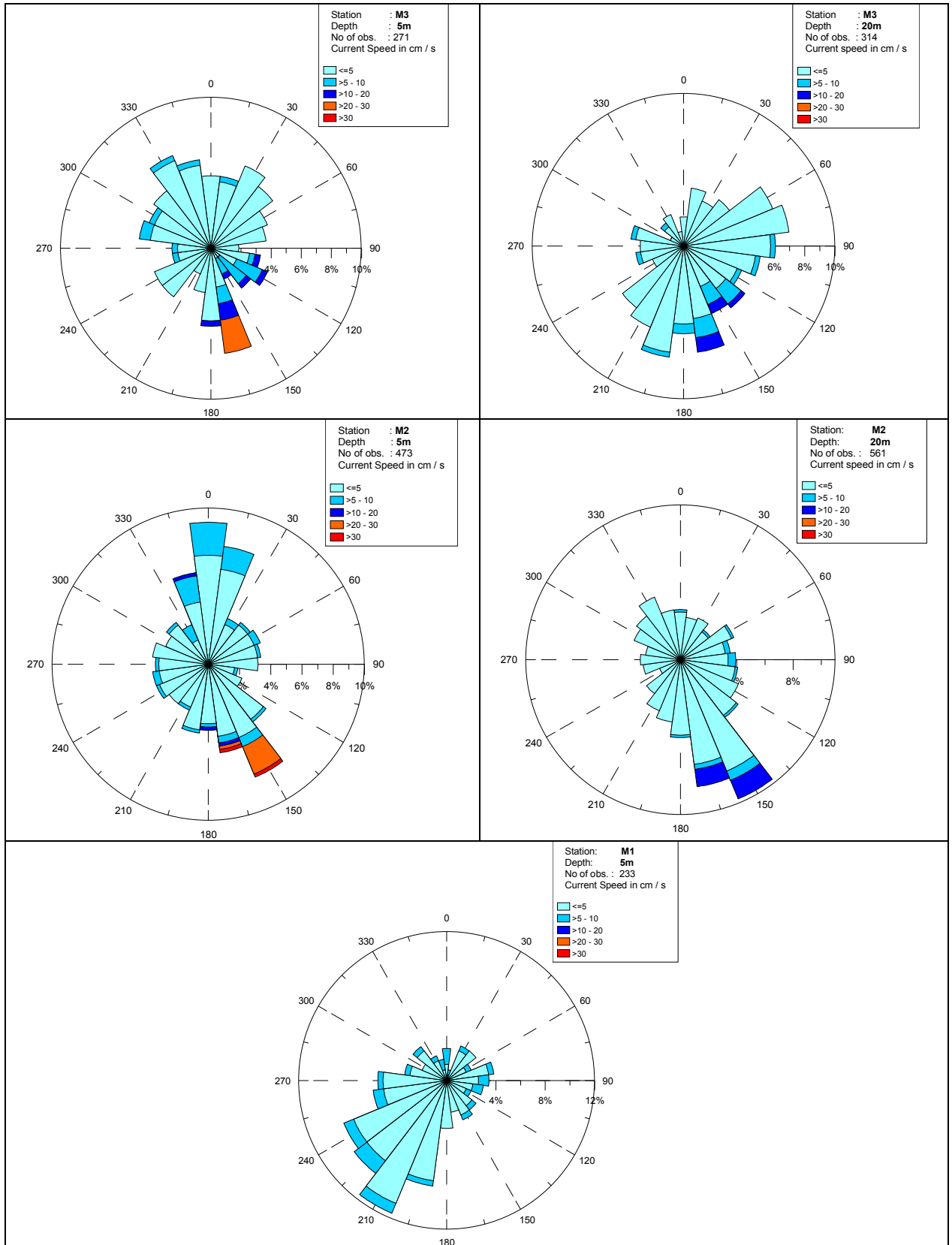
υποεπιφανειακό στρώμα των 20m. Δηλαδή, το ρεύμα στο σημείο αυτό κινείται με διεύθυνση παράλληλη προς την ακτή, τόσο προς Βορειοδυτικά όσο και προς Νοτιοανατολικά, σε όλη την στήλη του νερού. Στο επιφανειακό στρώμα οι ταχύτητες ρεύματος είναι μεγαλύτερες (μέση τιμή 3 cm/s) από το στρώμα των 20m (μέση τιμή 2 cm/s), ενώ η μεγάλη πλειοψηφία των ταχυτήτων ήταν έως 5 cm/s. Ωστόσο, μετρήθηκαν και ταχύτητες άνω των 20 και 30 cm/s. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες είχαν κατεύθυνση νοτιοανατολική.

- ✓ Το ίδιο πρότυπο διευθύνσεων τείνει να εμφανίζεται και στο επιφανειακό στρώμα του σταθμού **M5**. Η βορειοδυτική συνιστώσα είναι λιγότερο έντονη, ενώ μεγαλύτερη συχνότητα (σε ποσοστό περισσότερο από 18% για τα 5m και 15% για τα 20m) παρουσιάζει η νότια – νοτιοανατολική κατεύθυνση, όπου μετρήθηκαν και οι υψηλότερες ταχύτητες – άνω των 20cm/s για τα 5m και άνω των 10cm/s για τα 20m. Η μεγάλη πλειοψηφία των ταχυτήτων ήταν έως 5 cm/s. Επίσης ανιχνεύτηκε αξιοσημείωτη ανατολική – βορειοανατολική κατεύθυνση.
  
- ✓ Στην περιοχή του σταθμού **M4**, το καθεστώς κυκλοφορίας φαίνεται να διαφοροποιείται. Οι διευθύνσεις του ρεύματος είναι μοιρασμένες προς όλες τις κατευθύνσεις σε όλη τη στήλη του νερού (5 και 10m βάθος, με μέσες ταχύτητες που δεν διαφέρουν σημαντικά, 3 και 2 cm/s αντίστοιχα). Στο επιφανειακό στρώμα (5m), το 30% περίπου των μετρήσεων είχαν κατεύθυνση βόρεια-βορειοδυτική-βορειοανατολική (μεταξύ  $330^{\circ}$  και  $30^{\circ}$ ), υποδεικνύοντας μια έντονη συνιστώσα της ταχύτητας προς αυτές τις κατευθύνσεις. Ακολούθως, ξεχωρίζει η νότιο-νοτιοανατολική κατεύθυνση (γύρω από τις  $150^{\circ}$ ). Στο υπο-επιφανειακό στρώμα (10m), η κατεύθυνση που ξεχωρίζει είναι βόρεια-βορειοδυτική (μεταξύ  $300^{\circ}$  και  $0^{\circ}$ ) και ακολούθως η ανατολική-νοτιοανατολική ( $105^{\circ}$ - $120^{\circ}$ ). Οι ταχύτητες που μετρήθηκαν ήταν έως 10 cm/s, με τη μεγάλη πλειοψηφία, έως 5 cm/s. Η σχετική ομοιότητα των δυο στρωμάτων και η διαφοροποίηση του σταθμού αυτού με τους προηγούμενους (αλλά και τους επόμενους σταθμούς που περιγράφονται στη συνέχεια) υποδηλώνουν την ύπαρξη τοπικού συστήματος κυκλοφορίας που μπορεί να αναπτύσσεται στην περιοχή του M4.



**Σχήμα 6.6.** Ροδογράμματα ταχύτητας ρεύματος (διεύθυνση προς την οποία πηγαινει το ρεύμα) όπως προκύπτουν από όλες τις ρευματομετρήσεις που διεξήχθησαν σε κάθε σταθμό για δύο βάθη.





**Σχήμα 6.6 (συνέχεια).** Ροδογράμματα ταχύτητας ρεύματος (διεύθυνση προς την οποία πηγαινει το ρεύμα) όπως προκύπτουν από όλες τις ρευματομετρήσεις που διεξήχθησαν σε κάθε σταθμό για δύο βάθη.

- ✓ στο επιφανειακό στρώμα (5m) του σταθμού **M3**, το 55% περίπου των μετρήσεων είχαν διεύθυνση από δυτική-βορειοδυτική μέχρι ανατολική-βορειοανατολική ( $285^{\circ} - 75^{\circ}$ ). Ξεχωρίζουν η βορειοδυτική συνιστώσα  $330^{\circ}$ - $345^{\circ}$  αλλά και η νοτιοανατολική συνιστώσα των  $165^{\circ}$ , γεγονός που προσδίδει στον M3 ομοιότητα με τους σταθμούς M6, M5 και M2. Οι υψηλότερες ταχύτητες (10-20 cm/s και άνω) μετρήθηκαν προς τα νότια και νοτιοανατολικά ( $105^{\circ}$ - $180^{\circ}$  και κυρίως  $165^{\circ}$ ), ενώ η μέση ταχύτητα του στρώματος ήταν 3.7cm/s, η δεύτερη υψηλότερη μετά τον σταθμό M2. Στο υποεπιφανειακό στρώμα (20m), το ροδόγραμμα έχει τη μορφή βεντάλιας, με τη μεγάλη πλειοψηφία των ρευμάτων (έως 5 cm/s) να μετριέται μεταξύ  $60^{\circ}$  και  $225^{\circ}$ , δηλαδή προς διευθύνσεις ανατολικές-βορειοανατολικές μέχρι νοτιοδυτικές. Οι υψηλότερες ταχύτητες (10-20 cm/s) μετρήθηκαν προς νοτιοανατολικά ( $165^{\circ}$ - $150^{\circ}$ - $135^{\circ}$ ), ενώ η μέση ταχύτητα του στρώματος ήταν 3 cm/s.
- ✓ Οι μετρήσεις στο επιφανειακό στρώμα (5m) του σταθμού **M2** αναδεικνύουν δύο διευθύνσεις ως επικρατούσες, και πάλι κατά μήκος νοητού άξονα παράλληλου προς την ακτή: προς βορρά ( $0^{\circ} - 15^{\circ} - 345^{\circ}$ ) σε ποσοστό περίπου 20% και προς νότια-νοτιοανατολικά, κυρίως προς  $150^{\circ}$  και  $165^{\circ}$ , όπου μετρήθηκαν και οι υψηλότερες ταχύτητες, άνω των 20 και 30 cm/s. Ταχύτητες μεταξύ 5-10 cm/s μετρήθηκαν και προς άλλες κατευθύνσεις. Η μέση ταχύτητα του στρώματος αυτού είναι 4 cm/s, η υψηλότερη από κάθε σταθμό του δικτύου. Στο υποεπιφανειακό στρώμα (20m) απουσιάζει η βορινή συνιστώσα, καθώς απουσιάζει η έντονη επίδραση του ανέμου, και το μεγαλύτερο ποσοστό των διευθύνσεων ήταν προς νότια-νοτιοανατολικά (κυρίως  $150^{\circ}$  και  $165^{\circ}$ ), όπου μετρήθηκαν και οι υψηλότερες ταχύτητες αυτού του στρώματος, μεταξύ 10 και 20 cm/s. Στο στρώμα αυτό η μέση ταχύτητα υπολογίστηκε στα 3 cm/s.
- ✓ Στον σταθμό **M1**, στην περιοχή μπροστά από τον κυματοθραύστη του λιμένα Μυτιλήνης, η επικρατούσα κατεύθυνση του ρεύματος είναι νότια-νοτιοδυτική έως δυτική (από  $195^{\circ}$  έως  $270^{\circ}$ ), με χαμηλές ταχύτητες έως 5 cm/s και μέγιστη τιμή 8 cm/s. Η μέση ταχύτητα ρεύματος υπολογίστηκε στα 3 cm/s.

Στο Παράρτημα 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των ρευματομετρήσεων που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου (22 Αυγούστου 2000 – 20 Νοεμβρίου 2002). Το διάνυσμα που σημειώνεται στους χάρτες παριστάνει την μέση ταχύτητα  $\bar{u}$ , και δείχνει την κατεύθυνση προς την οποία κινείται η στήλη του νερού στο αντίστοιχο βάθος, ύστερα από την διανυσματική άθροιση των ταχυτήτων που μετρήθηκαν. Υπολογίστηκε επίσης και παρουσιάζεται η μέση απόλυτη ταχύτητα, δηλαδή το μέσο μέτρο  $\bar{u}$ .

Από τη μελέτη των επιμέρους γραφημάτων που αποτυπώνουν τα αποτελέσματα των ρευματομετρήσεων για κάθε δειγματοληψία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Σε 13 από τις 19 ρευματομετρήσεις (ποσοστό 68%) ανιχνεύτηκε σαφώς η ύπαρξη παράκτιου ρεύματος, που διατρέχει τις ακτές γενικά παράλληλα με αυτές, με κατεύθυνση τόσο προς νότο (νοτιοανατολικά) όσο και προς βορρά (βορειοδυτικά). Το μέτρο της ταχύτητας του ρεύματος είναι συνήθως μικρό, της τάξης των 1-5 cm/s, αλλά μπορεί να ξεπεράσει και τα 25-30 cm/s (π.χ. στις 30 Ιουλίου 2002 - VK18). Η κατεύθυνση του ρεύματος αυτού είναι μεταβλητή: σε 6 δειγματοληψίες μετρήθηκε νότιο ρεύμα (προς νότο) ενώ σε 7 δειγματοληψίες μετρήθηκε βόρειο ρεύμα (προς βορρά) (Πίνακας 6.3). Στις περισσότερες περιπτώσεις του πίνακα το ρεύμα μετρήθηκε και στα δυο στρώματα (5 και 20m). Παρατηρείται δηλαδή ότι συνήθως όλη η στήλη του νερού στην οποία έγιναν οι μετρήσεις (περίπου έως 20m βάθος) κινείται γενικά προς την ίδια κατεύθυνση.

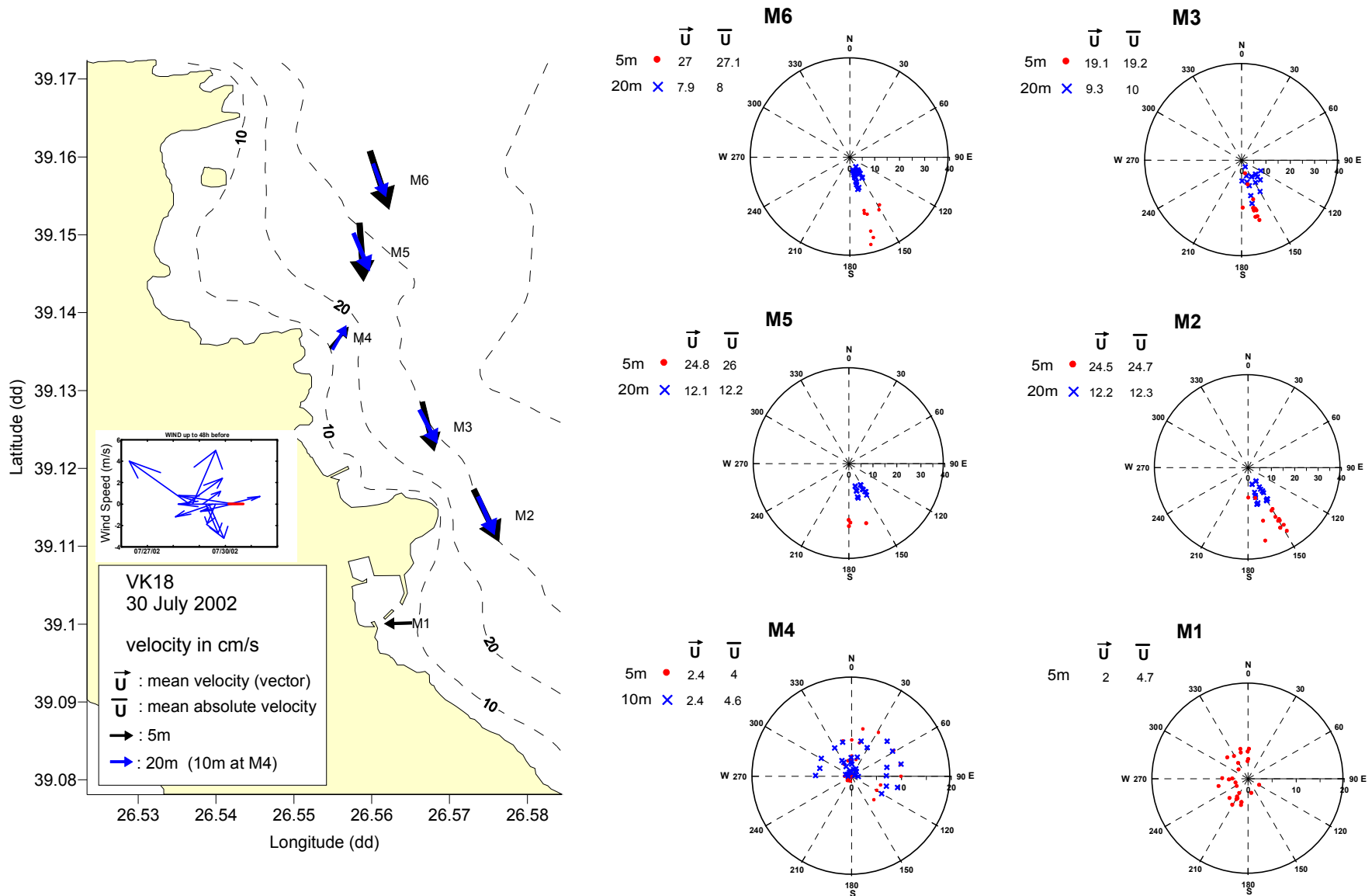
**Πίνακας 6.3.** Ημερομηνίες παρατήρησης παράκτιου ρεύματος. Με πλάγια γράμματα, οι ρευματομετρήσεις που έγιναν από τέλη Απριλίου έως Οκτώβριο.

<b>Νότιο ρεύμα (προς νότο)</b>				<b>Βόρειο ρεύμα (προς βορρά)</b>			
VK9	31 Αυγούστου	2001	5m κυρίως	VK3	5 Σεπτεμβρίου	2000	
VK15	25 Απριλίου	2002		VK6	24 Μαρτίου	2001	10,20m κυρίως
VK16	24 Μαΐου	2002	5m μόνο	VK8	18 Ιουλίου	2001	
VK17	1 Ιουλίου	2002		VK11	22 Νοεμβρίου	2001	5m μόνο
VK18	30 Ιουλίου	2002		VK12	22 Ιανουαρίου	2002	
VK20	20 Νοεμβρίου	2002		VK13	4 Μαρτίου	2002	
				VK14	3 Απριλίου	2002	
				VK19	4 Οκτωβρίου	2002	

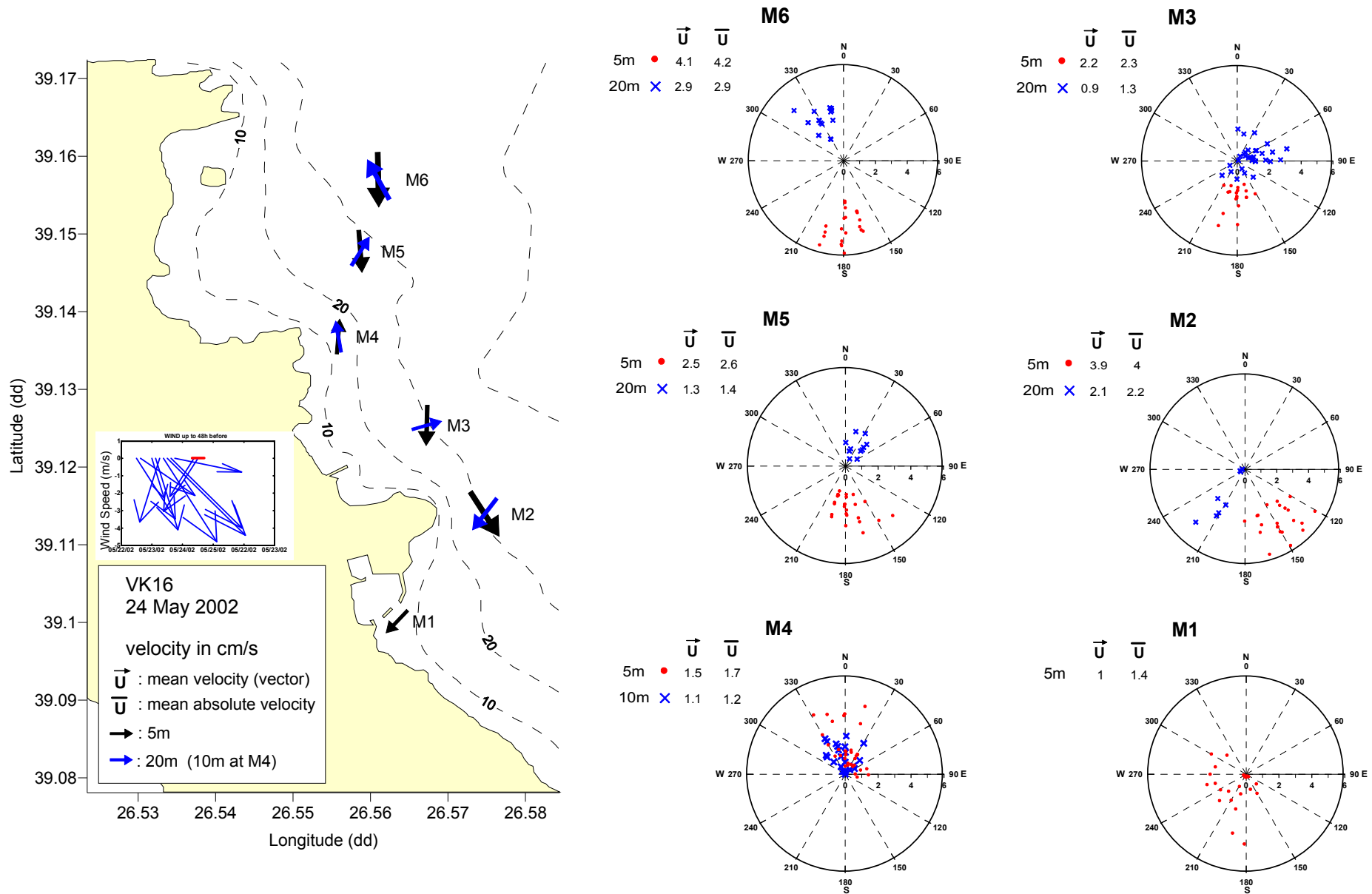
Τα Σχήματα 6.7 έως 6.10 αποτυπώνουν περιπτώσεις αυτού του παράκτιου ρεύματος: προς νότο οι VK16 (5m μόνο) και VK18 και προς βορρά οι VK13 και VK19. Άλλες περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6.

Αν και οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι σποραδικές στο χρόνο και δεν επαρκούν για να διαπιστωθεί με ασφάλεια εάν υπάρχει κάποια εποχικότητα στη διεύθυνση του ρεύματος, εντούτοις στον Πίνακα 6.3 φαίνεται πως βόρειο ρεύμα μετρήθηκε πιο συχνά την 'ψυχρή' περίοδο (από Νοέμβριο έως αρχές Απριλίου, πχ VK11-VK14), ενώ νότιο ρεύμα μετρήθηκε πιο συχνά την 'θερμή' περίοδο (από τέλη Απριλίου έως Οκτώβριο, πχ VK15-VK18). Διαπιστώνεται ότι σε γενικές γραμμές υπάρχει θετική συσχέτιση με το άνυσμα του ανέμου, όπως παρατίθεται στο Σχήμα 3.3 του κεφαλαίου 3, όπου για παράδειγμα τους θερμούς θερινούς μήνες επικρατούν άνεμοι από βόρειες διευθύνσεις.

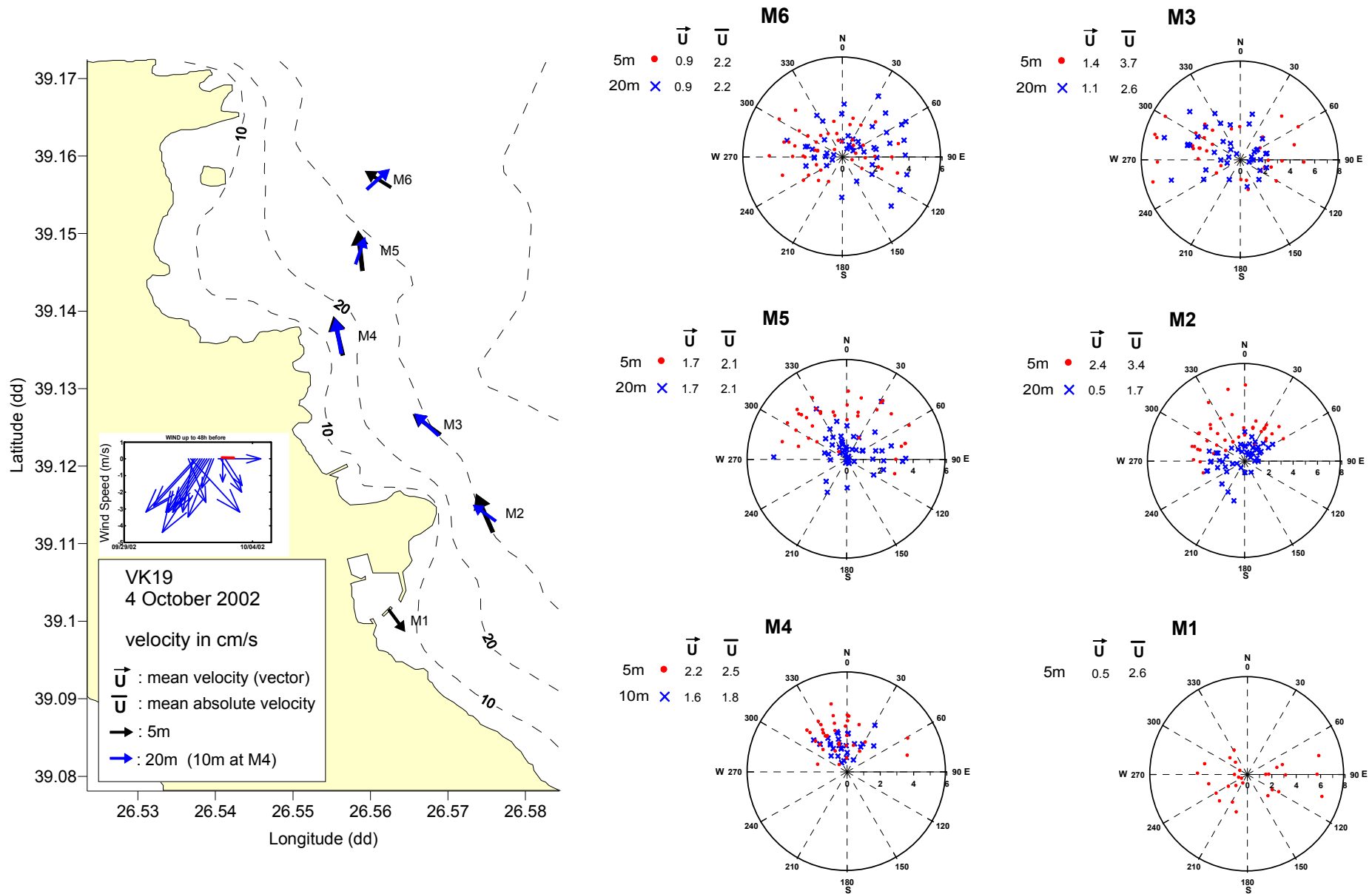
Σε ότι αφορά τη συσχέτιση διεύθυνσης ανέμου – διεύθυνσης ρεύματος και την απόκριση της υδάτινης στήλης στην επίδραση του ανέμου, διαπιστώθηκε ότι σε 9 από τις 19 ρευματομετρήσεις (47% των μετρήσεων) υπήρχε σε γενικές γραμμές συμφωνία μεταξύ της διεύθυνσης προς την οποία πνέει ο άνεμος και της διεύθυνσης προς την οποία κινείται η υδάτινη στήλη (π.χ. Σχήμα 6.10). Σε 4 δειγματοληψίες (21% των μετρήσεων) διαπιστώθηκε ότι το παράκτιο ρεύμα είχε αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν προς την οποία έπνεε ο άνεμος (π.χ. Σχήμα 6.9). Συγκεκριμένα, στις VK8, VK14 και VK19 και ενώ ο άνεμος στην ευρύτερη περιοχή έπνεε προς νοτιοδυτικά-νότια-νοτιοανατολικά έως και 48 ώρες πριν τη ρευματομέτρηση, το παράκτιο ρεύμα είχε βόρεια-βορειοδυτική κατεύθυνση στους σταθμούς. Τα αντίθετο διαπιστώθηκε στην δειγματοληψία VK20, όπου έπνεαν νοτιοδυτικοί – νοτιοανατολικοί άνεμοι στην ευρύτερη περιοχή ενώ το ρεύμα ήταν γενικά προς νότο.



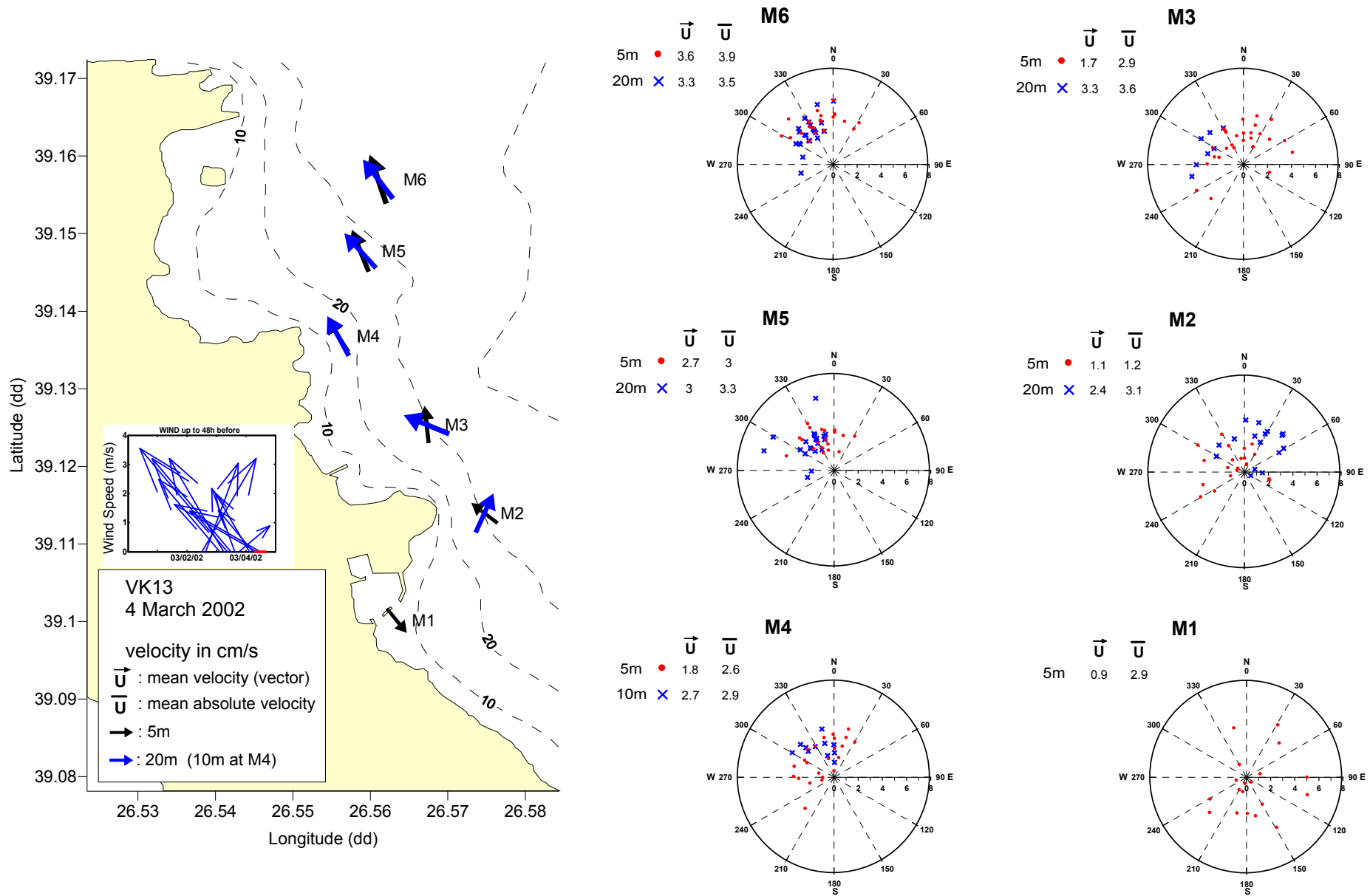
**Σχήμα 6.7.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **30 Ιουλίου 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος (deg) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα 6.8.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **24 Μαΐου 2002**: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος (deg) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα 6.9.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **4 Οκτωβρίου: 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος (deg) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα 6.10.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **4 Μαρτίου 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος (deg) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



### 6.1.3. Ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας: ελάττωση συναρτήσει του βάθους και διαφάνεια νερού

Στον πίνακα 6.4 δίνονται αποτελέσματα από τις μετρήσεις ισχύος φωτεινής ακτινοβολίας στην περιοχή μελέτης (το πλήρες αρχείο των αποτελεσμάτων όπου δίνονται οι μετρήσεις ισχύος σε όλη τη στήλη νερού -στα πρότυπα βάθη- παρέχεται στο ηλεκτρονικό παράρτημα). Για όσες δειγματοληψίες χρησιμοποιήθηκε το φωτόμετρο (βλ. κεφ. 4), παρουσιάζεται η ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) στην επιφάνεια της θάλασσας (surface,  $I_o$ ), η ελαττωμένη λόγω απόσβεσης του φωτός ισχύς λίγα μέτρα πάνω από τον πυθμένα κάθε σταθμού (underwater,  $I_D$ ), το βάθος της μέτρησης αυτής  $D$ , όπως και σε τι % ποσοστό της επιφανειακής ισχύος αντιστοιχεί αυτή η υποθαλάσσια ισχύς. Επιπλέον, δίνεται ο συντελεστής απόσβεσης  $k$  (extinction coefficient), όπως υπολογίστηκε από τη σχέση που περιγράφει την εκθετική μείωση της έντασης φωτός στη στήλη του νερού (νόμος Beer–Lambert):

$$I_D = I_o \exp(-kD) \Leftrightarrow k = -\frac{\ln\left(\frac{I_D}{I_o}\right)}{D} \quad (6.0)$$

Το κατώτερο όριο της εύφωτης ζώνης, του επιφανειακού τμήματος της στήλης δηλαδή όπου υπάρχει επάρκεια φωτεινής ενέργειας για φωτοσύνθεση από τους αυτότροφους οργανισμούς και ο ρυθμός φωτοσύνθεσης είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό αναπνοής, σηματοδοτείται από το βάθος στο οποίο η φωτεινή ισχύς είναι το 1% της προσπίπτουσας στην επιφάνεια φωτεινής ισχύος (Kirk, 1994), το οποίο λέγεται βάθος ισοστάθμισης (compensation depth, Lalli and Parsons 1997, Nybakken 2005 σελ 61). Από τα δεδομένα του πίνακα 6.4 προκύπτει ότι η φωτεινή ισχύς ως ποσοστό της προσπίπτουσας ισχύος στην επιφάνεια είναι πάντα πάνω από 1% κοντά στον πυθμένα, ακόμα και τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Επισημαίνεται ότι, η ισχύς φωτός στο βάθος ισοστάθμισης είναι 1.5 – 1.7  $W/m^2$  για ορισμένα από τα πιο κοινά διάτομα (Mann and Lazier 1996, σελ. 76) και γενικά κυμαίνεται στο εύρος 0.24 – 2.4  $W/m^2$  για τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα (Lalli and Parsons 1997, σελ 21). Ο πίνακας 6.4 δείχνει ότι τιμές φωτεινής ισχύος σε αυτό το φάσμα εμφανίζονται κοντά στον πυθμένα τόσο τη χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι στα βαθύτερα στρώματα και κοντά στον πυθμένα πιθανώς δημιουργούνται συνθήκες όπου ο ρυθμός φωτοσύνθεσης εξισώνεται με τον ρυθμό αναπνοής ενώ στην υπόλοιπη στήλη υπάρχει διαθέσιμη ακτινοβολία για φωτοσύνθεση και αύξηση της βιομάζας.

Επιπρόσθετα, στον πίνακα 6.5 δίνονται αποτελέσματα από τις μετρήσεις βάθους δίσκου Secchi, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της διαφάνειας του νερού στις δειγματοληψίες στις οποίες λόγω βλάβης της συσκευής φωτόμετρου δεν ήταν εφικτή η συλλογή δεδομένων ισχύος φωτός. Το σύνολο των μετρήσεων βάθους δίσκου Secchi και των λοιπών μεγεθών του πίνακα 6.5 παρέχεται στο ηλεκτρονικό παράρτημα. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά για έναν ετήσιο κύκλο ανά δυο μήνες περίπου το βάθος εξαφάνισης δίσκου Secchi ( $D_{secchi}$  m), ο συντελεστής απόσβεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $k$  ( $m^{-1}$ ) εκτιμώμενος από την εμπειρική σχέση η οποία εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως:

$$k = 1.7/D_{secchi} \quad (6.0a)$$

και το βάθος εύφωτης ζώνης (m) εκτιμώμενο από τη σχέση (Aksnes and Ohman 2009):

$$0.01 = \exp(-kD_{euphotic}) \quad \text{ή} \quad D_{euphotic} = 4.6052/k \quad (6.0b)$$

που προκύπτει αν στη σχέση 6.0 θέσουμε  $I_D = 0.01I_0$  (1% της προσπίπτουσας στην επιφάνεια φωτεινής ισχύος). Και με την προσέγγιση αυτή, φαίνεται πως ότι η εύφωτη ζώνη εκτείνεται συνήθως σε ολόκληρη τη στήλη νερού στην περιοχή μελέτης, αφού το εμπειρικά προσδιοριζόμενο βάθος της εύφωτης ζώνης είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο βάθος των σταθμών.

Από τα παραπάνω φαίνεται πως στην περιοχή μελέτης αλλά και στη ευρύτερη περιοχή τείνει να υπάρχει επαρκής ποσότητα φωτεινής ενέργειας για φωτοσύνθεση στη στήλη του νερού ακόμα και τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες.

**Πίνακας 6.4.** Ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας (ροή ενέργειας,  $W/m^2$ ) στην επιφάνεια της θάλασσας (surface) και λίγα μέτρα πάνω από τον πυθμένα κάθε σταθμού (underwater). Αναγράφεται η ημερομηνία δειγματοληψίας. Στη στήλη % dIFF σημειώνεται η υποθαλάσσια φωτεινή ισχύς στο αντίστοιχο βάθος ως ποσοστό της επιφανειακής ισχύος. Επίσης παρουσιάζεται ο συντελεστής απόσβεσης ( $m^{-1}$ ).

Cruise/Date	Station	Light Energy Flux ( $W/m^2$ )		Depth of underwater measurement (m)	% dIFF	Attenuation Coefficient k ( $m^{-1}$ )
		SURFACE	UNDERWATER			
<b>VK1</b>						
<b>30/6/2000</b>	<b>M6</b>	108.96	4.32	25	<b>4.0</b>	0.13
	<b>M4</b>	63.60	4.56	15	<b>7.2</b>	0.18
	<b>M2</b>	28.32	0.72	25	<b>2.5</b>	0.15
	<b>M1</b>	5.76	0.48	7	<b>8.3</b>	0.35
<b>VK2</b>						
<b>22/8/2000</b>	<b>M6</b>	215.52	11.04	25	<b>5.1</b>	0.12
	<b>M4</b>	197.28	18.72	15	<b>9.5</b>	0.16
	<b>M2</b>	166.32	6.48	25	<b>3.9</b>	0.13
	<b>M1</b>	124.08	10.56	7	<b>8.5</b>	0.35
<b>VK3</b>						
<b>5/9/2000</b>	<b>M6</b>	131.52	4.80	25	<b>3.6</b>	0.13
	<b>M4</b>	102.48	6.72	15	<b>6.6</b>	0.18
	<b>M2</b>	10.97	0.72	15	<b>6.6</b>	0.18
	<b>M1</b>	3.98	0.26	8	<b>6.6</b>	0.34
<b>VK4</b>						
<b>1/11/2000</b>	<b>M6</b>	148.08	4.54	25	<b>3.1</b>	0.14
	<b>M4</b>	113.28	10.92	15	<b>9.6</b>	0.16
	<b>M2</b>	82.32	1.85	25	<b>2.2</b>	0.15
	<b>M1</b>	50.88	1.32	8	<b>2.6</b>	0.46
<b>VK5</b>						
<b>14/12/2000</b>	<b>M6</b>	31.20	0.65	25	<b>2.1</b>	0.15
	<b>M4</b>	76.08	2.95	15	<b>3.9</b>	0.22
	<b>M2</b>	101.76	2.09	25	<b>2.1</b>	0.16
	<b>M1</b>	114.00	16.75	7	<b>14.7</b>	0.27
<b>VK16</b>						
<b>24/5/2001</b>	<b>M6</b>	151.92	10.08	20	<b>6.6</b>	0.14
	<b>M5</b>	219.84	12.48	20	<b>5.7</b>	0.14
	<b>M4</b>	239.52	8.88	15	<b>3.7</b>	0.22
	<b>M3</b>	258.96	11.52	20	<b>4.4</b>	0.16
	<b>M2</b>	254.64	17.76	20	<b>7.0</b>	0.13
	<b>M1</b>	253.92	13.44	8	<b>5.3</b>	0.37
<b>VK17</b>						
<b>1/7/2001</b>	<b>M6</b>	196.80	18.38	20	<b>9.3</b>	0.12
	<b>M5</b>	189.60	18.00	20	<b>9.5</b>	0.12
	<b>M4</b>	180.72	34.08	15	<b>18.9</b>	0.11
	<b>M3</b>	174.48	20.88	20	<b>12.0</b>	0.11
	<b>M2</b>	169.44	19.20	20	<b>11.3</b>	0.11
	<b>M1</b>	132.00	15.94	8	<b>12.1</b>	0.26

**Πίνακας 6.5.** Βάθος εξαφάνισης δίσκου Secchi ( $D_{Secchi}$ , m), συντελεστής απόσβεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $k$  ( $m^{-1}$ ) εκτιμώμενος από τη σχέση  $k = 1.7/D_{Secchi}$  και βάθος εύφωτης ζώνης (m), εκτιμώμενο από τη σχέση  $D_{euphotic} = 4.6052/k$ .

cruise/date	Station	Secchi depth $D_{Secchi}$ (m)	Light Attenuation Coefficient $k$ ( $m^{-1}$ )	Euphotic Zone Depth (m)
VK11:22/11/2001	M6	20	0.085	54
	M5	17	0.100	46
	M4	>15	0.113	>40
	M3	17	0.100	46
	M1	>8	0.213	>22
VK12:22/1/2002	M6	20	0.085	54
	M5	21	0.081	57
	M4	>16	0.106	>43
	M3	21	0.081	57
	M1	8	0.213	22
VK13:4/3/2002	M6	15	0.113	41
	M5	14	0.121	38
	M4	13.5	0.126	37
	M3	16	0.106	43
	M2	16	0.106	43
	M1	4.5	0.378	12
VK15:25/4/2002	M6	22.5	0.076	61
	M5	22.5	0.076	61
	M4	>16	0.106	43
	M3	19	0.089	51
	M2	19	0.089	51
	M1	6	0.283	16
VK18:30/7/2002	M6	28	0.061	76
	M5	27	0.063	73
	M4	>14	0.121	>38
	M3	30	0.057	81
	M1	8	0.213	22
VK19:4/10/2002	M6	18	0.094	49
	M5	18	0.094	49
	M4	>15	0.113	>41
	M3	18	0.094	49
	M1	>8	0.213	>22
VK20:20/11/2002	M6	19	0.089	51
	M5	21	0.081	57
	M4	>15	0.113	>41
	M3	23	0.074	62
	M2	20	0.085	54
	M1	8	0.213	22

#### 6.1.4. Συζήτηση

Αν και οι ρευματομετρήσεις που έγιναν είναι αποσπασματικές και αποδίδουν στην ουσία στιγμιότυπα της κυκλοφορίας, μπορούν να βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το υδροδυναμικό καθεστώς, σε συνδυασμό με την κατανομή θερμοκρασίας και αλατότητας και τα ανεμολογικά δεδομένα, έστω τις δεδομένες στιγμές.

Η κυκλοφορία του νερού στην περιοχή μελέτης είναι κάθε στιγμή αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης πολλών παραγόντων. Το πεδίο ταχυτήτων αναπτύσσεται και μεταβάλλεται διαρκώς, καθώς η μάζα του νερού βρίσκεται συνέχεια κάτω από την επίδραση της δύναμης οριζόντιας βαθμίδας υδροστατικής πίεσης, της δύναμης τριβής και της δύναμης Coriolis, δυνάμεων που προσδίδουν συνολική επιτάχυνση στη μάζα του νερού.

Οι *οριζόντιες βαθμίδες υδροστατικής πίεσης*, αν και πολύ μικρότερες από την κατακόρυφη μεταβολή της υδροστατικής πίεσης, οδηγούν στην ανάπτυξη των γεωστροφικών ρευμάτων, η ταχύτητα  $U_G$  των οποίων αποτελείται από δύο όρους: την ταχύτητα  $U_{\text{slope}}$  εξαιτίας της *κλίσης στην επιφάνεια της θάλασσας* και την ταχύτητα  $U_{\text{density}}$  εξαιτίας *οριζόντιων βαθμίδων πυκνότητας*, που λέγεται και σχετική ταχύτητα, δηλαδή  $U_G = U_{\text{density}} + U_{\text{slope}}$  (Stewart, 2004). Όταν η θάλασσα είναι ομογενής και η πυκνότητα είναι σταθερή, πρακτικά δηλαδή σε βαροτροπικές συνθήκες, ο όρος  $U_{\text{density}}$  είναι μηδέν. Όταν η θάλασσα είναι στρωματοποιημένη και υπάρχουν οριζόντιες βαθμίδες πυκνότητας, δηλαδή σε βαροκλινικές συνθήκες, και οι δύο όροι συνεισφέρουν στη συνολική γεωστροφική ταχύτητα. Η ταχύτητα λόγω οριζόντιων βαθμίδων πυκνότητας μπορεί να υπολογιστεί από υδρογραφικά δεδομένα (κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας) και η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται παρακάτω.

Η δύναμη της *τριβής* γίνεται σημαντική στις περιπτώσεις κινήσεων κοντά σε όρια, όπως στη διεπιφάνεια ατμόσφαιρας-θάλασσας και θάλασσας-πυθμένα, καθώς αποκτά τιμές συγκρίσιμες με τις άλλες δυνάμεις π.χ. Coriolis. Στη διεπιφάνεια ατμόσφαιρας-θάλασσας, η ροή του ανέμου μεταφέρει ορμή και ενέργεια μέσω των διατμητικών τάσεων (wind stresses) στα ανώτερα στρώματα της θάλασσας, με τον μηχανισμό των επιφανειακών κυμάτων, και θέτει σε κίνηση την επιφανειακή μάζα του νερού με τον τρόπο που περιγράφει η θεωρία Ekman. Επιγραμματικά, δημιουργείται

επιφανειακό ρεύμα μέτρου  $V_0$  που κυμαίνεται περίπου μεταξύ 1%-2.5% της ταχύτητας του ανέμου ενώ η διεύθυνσή του σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τη διεύθυνση του ανέμου προς τα δεξιά για το βόρειο ημισφαίριο. Το μέτρο της ταχύτητας του ρεύματος μειώνεται εκθετικά με το βάθος, ενώ το άνυσμα εκτρέπεται διαρκώς προς τα δεξιά (στο βόρειο ημισφαίριο) με το βάθος, σχηματίζοντας τη λεγόμενη σπείρα Ekman. Το σημείο στη στήλη όπου η διεύθυνση του ρεύματος γίνεται αντίθετη του επιφανειακού ρεύματος  $V_0$  λέγεται βάθος Ekman  $D_E$  (σχέση 6.1, Pond and Pickard 1996, σελ 109) και σηματοδοτεί το μέγιστο βάθος όπου γίνεται αισθητή η επίδραση της τριβής του ανέμου:

$$D_E = \frac{4.3}{\sqrt{|\sin\phi|}} U_{10} \quad (6.1)$$

όπου  $U_{10}$  η ταχύτητα του ανέμου 10m από την επιφάνεια (m/s) και  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος ( $\phi > 10^\circ$ ). Το στρώμα νερού από την επιφάνεια μέχρι το βάθος Ekman λέγεται στρώμα Ekman και η μεταφορά μάζας συνολικά στο στρώμα αυτό είναι κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου και προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο.

Η κυκλοφορία στην περιοχή μελέτης είναι λοιπόν αποτέλεσμα του συνδυασμού γεωστροφικού ρεύματος, ανεμογενούς ρεύματος όπως προβλέπει η θεωρία Ekman, με αντίστοιχο στρώμα Ekman πάνω από τον πυθμένα λόγω της επίδρασης του βυθού στη ροή της στήλης, στους περιορισμούς που επιβάλλουν στη ροή η ακτογραμμή και η τοπογραφία του πυθμένα. Η επίδραση της παλίρροιας, λόγω του μικρού της εύρους (0.45m), δεν έχει ληφθεί υπόψη, ενώ διαταραχές έξω από τη περιοχή μελέτης που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την κλίση της επιφάνειας της θάλασσας δεν είναι γνωστές και δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας, η ανάλυση του συστήματος κυκλοφορίας στις συνιστώσες που το δημιουργούν/αποτελούν είναι δύσκολη, ειδικά όταν και οι συνιστώσες αυτές μεταβάλλονται στο χρόνο.

Ωστόσο, σε ορισμένες από τις δειγματοληψίες έγινε προσπάθεια να εκτιμηθεί και, έστω αδρά, να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση και η συνεισφορά της οριζόντιας βαθμίδας πυκνότητας στο ρεύμα που μετρήθηκε στο πεδίο. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, που περιγράφεται στη συνέχεια, συνοψίζονται στο Σχήμα 6.11, ενώ οι ρευματομετρήσεις των συγκεκριμένων ημερομηνιών έχουν ήδη παρουσιαστεί αναλυτικά στα Σχήματα 6.7 έως 6.10. Παράλληλα, από τα διαθέσιμα δεδομένα ανέμου και με τη βοήθεια της σχέσης 6.1 υπολογίστηκε το βάθος Ekman (το βάθος

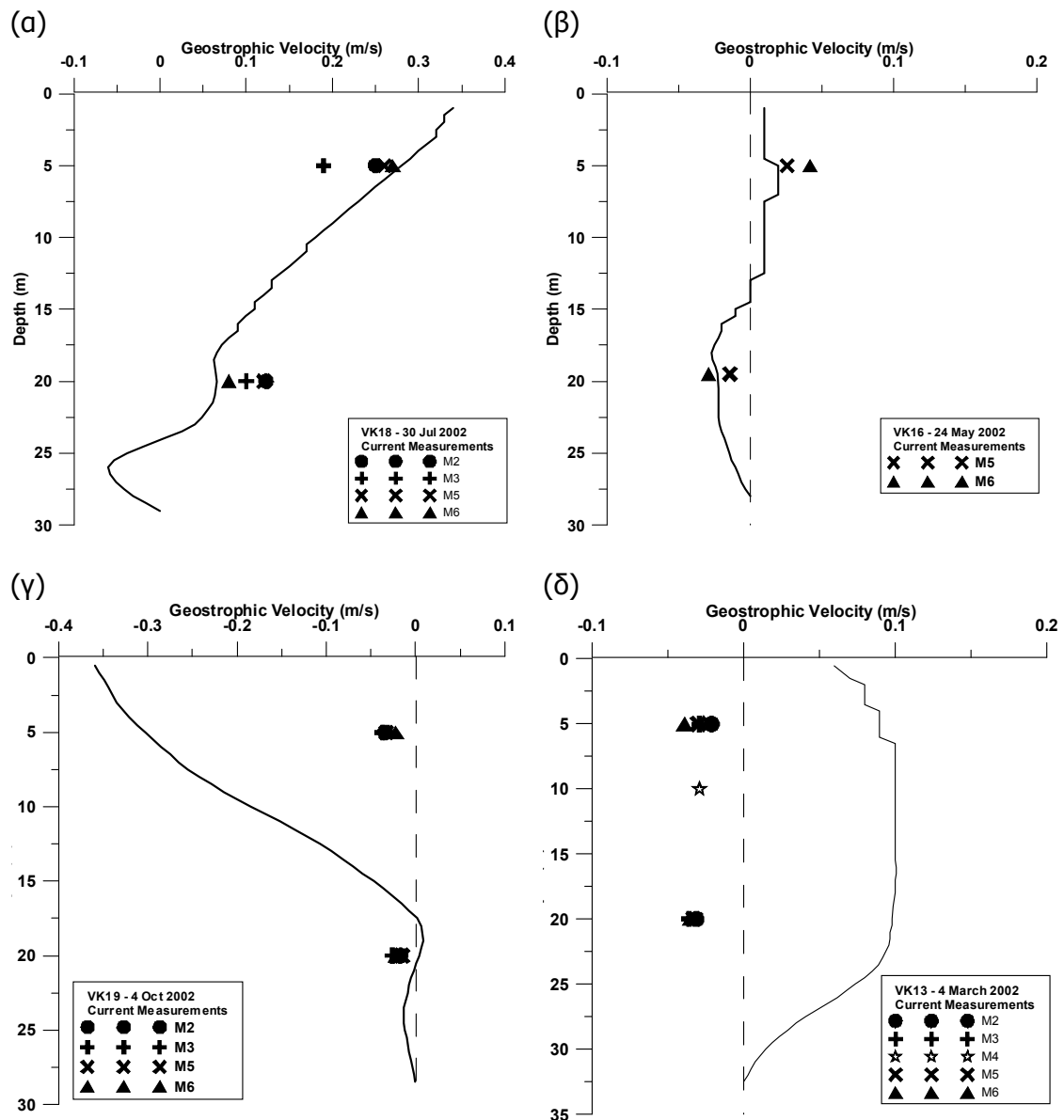
που θεωρητικά θα μπορούσε να φτάσει η επίδραση της τριβής ανέμου) για τις 4 ημερομηνίες δειγματοληψίας του σχήματος 6.11 και για το σύνολο της περιόδου μελέτης, και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 6.6.

Για τον υπολογισμό του γεωστροφικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή εφαρμογή που ανέπτυξε ο Tomczak (2001) (<http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/Utilities/geostrophy/index.html>). Η εφαρμογή υπολογίζει το γεωστροφικό ρεύμα (και την μεταφορά όγκου σε Sv) ανάμεσα από δύο σταθμούς, από τις κατακόρυφες κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας στους δυο σταθμούς, ακολουθώντας τη μέθοδο που περιγράφουν οι Pond & Pickard (Introductory Dynamical Oceanography, 1983). Τονίζεται ότι με τη μέθοδο αυτή: (1) το γεωστροφικό ρεύμα που υπολογίζεται είναι κάθετο στην τομή που σχηματίζουν οι δυο σταθμοί. Όμως η γεωμετρία της περιοχής μελέτης οδηγεί το ρεύμα παράλληλα με το όριο της ακτής. (2) Υπολογίζεται το γεωστροφικό ρεύμα που οφείλεται μόνο στην κατανομή της πυκνότητας και όχι αυτό που οφείλεται σε τυχόν απόκλιση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας από το οριζόντιο επίπεδο.

Στόχος ήταν να εκτιμηθεί το μέτρο της ταχύτητας του γεωστροφικού ρεύματος, με τη βοήθεια της συγκεκριμένης εφαρμογής, και να συγκριθεί με το μέτρο του ρεύματος που μετρήθηκε στο πεδίο. Στο παρακάτω σχήμα, το ρεύμα προς νότο έχει θετικό πρόσημο ενώ το ρεύμα προς βορρά αρνητικό (αυθαίρετη σύμβαση).

Στο Σχήμα 6.11(a) παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή του γεωστροφικού ρεύματος όπως υπολογίστηκε από τα προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας στους σταθμούς M2 και M3 στις 30 Ιουλίου 2002 (VK18). Οι υδρογραφικές συνθήκες περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 6.1 και στο Σχήμα 6.3, ενώ οι ρευματομετρήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7. Σε αυτές τις συνθήκες προχωρημένης θερμικής στρωμάτωσης, μετρήθηκε σχετικά δυνατό παράκτιο ρεύμα προς νότο και στα δυο βάθη (5 και 20m). Η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή τις προηγούμενες μέρες (έως 5 m/s δηλαδή έως 3 μποφόρ) και το βάθος επίδρασης του (βάθος Ekman) είναι μικρό και κυμαίνεται από 0 έως 25 m, με μέση τιμή 10 m. Παράλληλα, οι μεταβλητές διευθύνσεις του ανέμου φαίνεται ότι δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη σταθερού στρώματος Ekman. Το Σχήμα 6.11(a), με την καλή προσαρμογή πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμένου ρεύματος, μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι το ρεύμα που μετρήθηκε τη δεδομένη στιγμή είναι γεωστροφικό,

αποτέλεσμα της οριζόντιας βαθμίδας πυκνότητας. Υπονοεί μάλιστα ότι σε βάθος από 24-25 m έως πυθμένα, δηλαδή στο κατώτερο στρώμα της στήλης κάτω από το θερμοκλινές (χαμηλότερη θερμοκρασία – υψηλότερη πυκνότητα, Σχήμα 6.3), η διεύθυνση ρεύματος αντιστρέφεται. (Η αλλαγή πρόσημου στα παραπάνω σχήματα δείχνει απλώς αλλαγή στη γενική κατεύθυνση προς την οποία κινείται η στήλη νερού όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Η ακριβής διεύθυνση φαίνεται στα σχήματα των ρευματομετρήσεων).



**Σχήμα 6.11.** Κατακόρυφη κατανομή γεωστροφικού ρεύματος (συνεχής γραμμή), όπως υπολογίστηκε από προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας στους σταθμούς M2-M3 σε τέσσερις δειγματοληψίες: (α) VK18 – 30 Ιουλίου 02, (β) VK16 – 24 Μαΐου 02 (προφίλ T-S στους σταθμούς M5-M6), (γ) VK19 – 4 Οκτ 02 και (δ) VK13 - 4 Μαρ 02. Σημειώνονται οι ρευματομετρήσεις σε όλους τους σταθμούς (σημεία) στα αντίστοιχα βάθη. Αναλυτική περιγραφή δίνεται στο κείμενο.



Στο Σχήμα 6.11(β) παρουσιάζεται το προφίλ του γεωστροφικού ρεύματος όπως υπολογίστηκε από τις κατανομές θερμοκρασίας και αλατότητας στους σταθμούς M5 και M6 στις 24 Μαΐου 2002 (VK16). Σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου (Σχήμα 6.8), στην περιοχή των σταθμών M5-M6, το επιφανειακό τμήμα της στήλης κινείται προς νότο ενώ το βαθύτερο στρώμα κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση, προς βορρά. Η καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμένου ρεύματος, τόσο ως προς το μέτρο αλλά και ως προς την αλλαγή διεύθυνσης περίπου στα μισά της στήλης υποδηλώνει ότι ρεύμα είναι γεωστροφικό και ότι η κατανομή της πυκνότητας και οι βαθμίδες που σχηματίζει είναι ο κύριος παράγοντας διαμόρφωσης της κυκλοφορίας στην περιοχή τη δεδομένη στιγμή.

Στα Σχήματα 6.11(γ) και 6.11(δ) παρουσιάζονται περιπτώσεις όπου φαίνεται πως το ρεύμα που αναπτύσσεται δεν οφείλεται μόνο στις οριζόντιες βαθμίδες πυκνότητας και για να εξηγηθεί πρέπει να συνυπολογιστούν και άλλοι παράγοντες. Στο Σχήμα 6.11(γ), η συνεχής γραμμή είναι το προφίλ του μέτρου του ρεύματος αν αυτό καθοριζόταν μόνο από την κατανομή της πυκνότητας (υπολογίστηκε από τα προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας στους σταθμούς M2 και M3 στις 4 Οκτωβρίου 2002 - VK19). Ενώ ο υπολογισμός αυτός προβλέπει ταχύτητα περίπου 30 cm/s προς βορρά σε βάθος 5m, το ρεύμα που μετρήθηκε ήταν περίπου 3 cm/s προς βορρά σε όλη την περιοχή. Πιθανώς σε αυτό συνεισφέρει ο άνεμος, που έπνεε σταθερά τις δυο προηγούμενες μέρες από ΒΔ-ΒΑ, δηλαδή αντίθετα από τη κατεύθυνση του ρεύματος τείνοντας να επιβραδύνει τη ροή προς βορρά.

Ομοίως, στο Σχήμα 6.11(δ), ενώ ο υπολογισμός ρεύματος από προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας προβλέπει ρεύμα προς νότο με ταχύτητα  $\sim 0.1$  m/s στο μεγαλύτερο μέρος της στήλης, οι μετρήσεις πεδίου δείχνουν ρεύμα προς βορρά. Είναι σαφές ότι μόνο η κατανομή της πυκνότητας δεν εξηγεί τη δομή του πεδίου ταχυτήτων τη δεδομένη στιγμή. Η μάζα του νερού κινείται με ταχύτητα που διαμορφώνεται στη γεωμορφολογία της περιοχής (ακτογραμμή - τοπογραφία πυθμένα) από την ισορροπία των δυνάμεων της τριβής του ανέμου (που πνέει σταθερά από ΝΑ-ΝΔ δημιουργώντας επιφανειακό ρεύμα προς βορρά που επιδρά σχεδόν σε όλη τη στήλη και κυρίως έως  $\sim 16$ m - Πίνακας 6.6), της τριβής πυθμένα, της Coriolis και της δύναμης βαθμίδας πίεσης που οφείλεται στην κατανομή της θερμοκρασίας-αλατότητας (δηλ πυκνότητας) και πιθανώς σε κλίση της επιφάνειας της θάλασσας, που δεν μπορεί να ανιχνευτεί και να ποσοτικοποιηθεί από τα υπάρχοντα δεδομένα.

**Πίνακας 6.6.** Θεωρητικό βάθος Ekman (εύρος και μέση τιμή), όπως υπολογίζεται από τα ανεμολογικά δεδομένα και τη σχέση 6.1 για 4 ημερομηνίες δειγματοληψίας έως και 48h πριν αλλά και για το σύνολο της περιόδου 1 Ιουν 2000 - 30 Νοε 2002.

Ημερομηνία	Θεωρητικό Βάθος Ekman $D_E$ (m) Εύρος – μέση τιμή	Βάθος πυκνοκλινοῦς (m)	σχόλιο
VK13 4 Μαρ 02	0 – 28 <b>16</b>	-	Καλή κατακόρυφη ανάμιξη στήλης
VK16 24 Μαΐ 02	0 - 30 <b>15</b>	<b>10</b>	διεύθυνση ανέμου ΒΔ-ΒΑ
VK18 30 Ιουλ 02	0 - 30 <b>12.5</b>	<b>20</b>	Μεταβλητή διεύθυνση ανέμου
VK19 4 Οκτ 02	0 - 30 <b>18</b>	<b>~10</b>	Ασθενές πυκνοκλινές στους M2-M3 λόγω S, διεύθυνση ανέμου ΒΔ-ΒΑ
<i>περίοδος 1 Ιουν 2000 - 30 Νοε 2002</i>	<i>0 – 109 <b>17</b></i>		

Κατά την περίοδο μελέτης, ο άνεμος επηρεάζει κατά μέσο όρο τη στήλη έως τα 17m βάθος (Πίνακας 6.6), δηλαδή λίγο πάνω από το μισό της στήλης στους βαθύτερους σταθμούς (30m) ενώ όταν πνέει άνεμος ταχύτητας  $>12\text{m/s}$  η επίδραση μπορεί να γίνει αισθητή μέχρι τον πυθμένα όχι μόνο της περιοχής μελέτης, που έχει μέγιστο βάθος περίπου 40m αλλά όλου του Στενού Μυτιλήνης όπου το μέγιστο βάθος είναι 50-60m. Σε περιπτώσεις δυνατού ανέμου, τα οριακά στρώματα της επιφάνειας και του πυθμένα αποτελούν σημαντικό ποσοστό της στήλης του νερού. Σε καλοκαιρινές συνθήκες στρωμάτωσης, η παρουσία του θερμοκλινοῦς που δρα ως εμπόδιο σε οποιαδήποτε κατακόρυφη κίνηση, περιορίζει την μεταφορά της επίδρασης του ανέμου στα βαθύτερα στρώματα και άρα την ανάπτυξη του στρώματος Ekman στη στήλη, που φτάνει έως το βάθος που εμφανίζεται το θερμοκλινές, ακόμα και κάτω από συνθήκες δυνατού ανέμου (Tomczak, 2001).

Στις περιπτώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω, η επίδραση του ανέμου στη δημιουργία ρεύματος είναι μάλλον περιορισμένη. Όλες οι δειγματοληψίες έγιναν κάτω από ήπιες μετεωρολογικές συνθήκες χαμηλής ταχύτητας ανέμου και έτσι, δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις ρευμάτων κατά τη διάρκεια δυνατού ανέμου. Η κατακόρυφη βαθμίδα της πυκνότητας που αναπτύσσεται στην περιοχή σε συνδυασμό με τη

μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει του βάθους είναι ενδεικτική των βαροκλιτικών συνθηκών που επικρατούν συνήθως. Τους χειμερινούς, ψυχρούς μήνες, οπότε επικρατούν συνθήκες καλής κατακόρυφης ανάμιξης, και με άνεμο χαμηλής ταχύτητας, μεγάλο μέρος της στήλης μπορεί να συμπεριφέρεται βαροτροπικά, π.χ όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, στις 4 Μαρ 2002 (VK13) στην περιοχή των σταθμών M4 - M6.

## 6.2. Θρεπτικά ανόργανα άλατα, διαλυμένο οργανικό άζωτο και χλωροφύλλη-α

### 6.2.1. Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου για τη συγκέντρωση των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), νιτρωδών ( $\text{NO}_2^-$ ) και αμμωνιακών αλάτων ( $\text{NH}_4^+$ ), του διαλυτού ανόργανου αζώτου (DIN), του διαλυτού οργανικού αζώτου (DON), των φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) και πυριτικών αλάτων ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) και της χλωροφύλλης α (chl-a) σε κάθε σταθμό και για όλη την περίοδο μετρήσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.7. Καθώς γίνεται σύγκριση μεταξύ σταθμών δειγματοληψίας διαφορετικού ύψους στήλης νερού, αντί της μέσης τιμής της μεταβλητής, χρησιμοποιείται η *μέση κατά βάθος ολοκληρωμένη τιμή* της μεταβλητής (mean depth integrated value): πραγματοποιείται ολοκλήρωση των τιμών της μεταβλητής στο ύψος της στήλης του νερού, λαμβάνοντας υπόψη τα βάθη στα οποία λήφθηκαν δείγματα, και στη συνέχεια το άθροισμα των μερικών ολοκληρώσεων διαιρείται με το ύψος της στήλης του νερού. Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζεται η μέση τιμή των μέσων ολοκληρωμένων τιμών που προκύπτουν για κάθε μεταβλητή σε κάθε δειγματοληψία χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εξαιρετικά ακραίες τιμές<sup>1</sup> (οι οποίες ωστόσο περιλαμβάνονται στο εύρος τιμών) ενώ στα διαγράμματα χρονικής διακύμανσης 6.12 – 6.20 παρουσιάζονται οι μέσες ολοκληρωμένες τιμές. Τέλος, στο Παράρτημα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δειγματοληψιών ως κάθετες τομές, ενώ στο Παράρτημα 7 παρατίθεται ο πίνακας IV.1 των Pavlidou et al. (2005), με συγκεντρώσεις θρεπτικών προερχόμενες από μετρήσεις σε πλήθος ελληνικών παράκτιων περιοχών, παρέχοντας ένα μέτρο σύγκρισης των τιμών που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία.

Η μέση τιμή των **νιτρικών** ήταν υψηλότερη στο σταθμό M1 (0.51  $\mu\text{M}$ ), σε σύγκριση με τους υπόλοιπους σταθμούς της περιοχής μελέτης, με το εύρος των τιμών να κυμαίνεται από 0.05 έως 13.0  $\mu\text{M}$ . Στους υπόλοιπους σταθμούς, η μέση τιμή κυμάνθηκε σε παραπλήσια χαμηλότερα επίπεδα, με υψηλότερη τιμή στον M4 (0.43  $\mu\text{M}$ ) και χαμηλότερη στον M2 (0.33  $\mu\text{M}$ ). Οι μέσες τιμές νιτρικών για τους M1 και M2 είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές του Τσιρτσή (1994) και του προγράμματος MEDPOL για τους σταθμούς αυτούς (Πίνακας 3.4, κεφ. 3), πιθανότατα λόγω του μη συνυπολογισμού των εξαιρετικά ακραίων τιμών. Κατά τη σύγκριση με

<sup>1</sup> Εξαιρετικά ακραίες τιμές θεωρούνται όσες είναι μεγαλύτερες από την τιμή  $Q3+3IQ$ , όπου  $Q3$  το 3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο και  $IQ$  η απόσταση μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> τεταρτημορίου

άλλες περιοχές (Πίνακας 6.8, πίνακας παραρτήματος 7) προκύπτει ότι η τιμή για την ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι στο χαμηλό άκρο του εύρους τιμών που έχουν μετρηθεί σε ανοικτές αλλά και παράκτιες θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου.

Ομοίως με τα νιτρικά, η υψηλότερη μέση τιμή των **νιτρωδών** παρατηρήθηκε στο σταθμό M1 ( $0.11 \pm 0.07 \mu\text{M}$ ) με εύρος τιμών από  $0.01 - 1.19 \mu\text{M}$ , στο σταθμό M4 ( $0.09 \pm 0.09 \mu\text{M}$ ) με εύρος τιμών από  $0.01 - 1.93 \mu\text{M}$  ενώ στους υπόλοιπους σταθμούς η μέση τιμή κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, από  $0.06$  έως  $0.08 \mu\text{M}$ . Η μέση τιμή των νιτρωδών για την παράκτια περιοχή μελέτης είναι μεγαλύτερη ανοικτών περιοχών του Αιγαίου και μικρότερη αντίστοιχων τιμών ημίκλειστων-παράκτιων περιοχών (Πίνακας 6.8, πίνακας παραρτήματος 7). Οι μέσες τιμές νιτρωδών για τους M1 και M2 είναι αντίστοιχες με τις μετρήσεις Τσιρτσή (1994) και τα αποτελέσματα του MEDPOL για τους σταθμούς αυτούς (Πίνακας 3.4).

Για τα **αμμωνιακά** η υψηλότερη μέση τιμή καταγράφεται στο σταθμό M6 ( $0.71 \pm 0.68 \mu\text{M}$ ), όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση. Με παραπλήσιες χαμηλότερες μέσες τιμές ακολουθούν οι σταθμοί M4 ( $0.48 \pm 0.44 \mu\text{M}$ ), M5 ( $0.41 \mu\text{M}$ ) και M1 ( $0.40 \pm 0.35 \mu\text{M}$ ). Οι χαμηλότερες μέσες τιμές αμμωνιακών μετρήθηκαν στην περιοχή των M2 ( $0.34 \pm 0.30 \mu\text{M}$ ) και M3 ( $0.28 \pm 0.35 \mu\text{M}$ ). Το εύρος μέσα στο οποίο κυμάνθηκαν οι τιμές αμμωνιακών ήταν μεγάλο σε όλους τους σταθμούς. Η μέση τιμή των αμμωνιακών για την παράκτια περιοχή μελέτης είναι λίγο μεγαλύτερη ανοικτών περιοχών του Αιγαίου. Επίσης εμφανίζεται μικρότερη αντίστοιχων τιμών περιοχών κλειστών κόλπων, αλλά και νησιωτικών περιοχών, όπως η Ρόδος και οι Βόρειες Σποράδες (Πίνακας 6.8, πίνακας παραρτήματος 7). Οι μέσες τιμές αμμωνιακών για τους M1 και M2 είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές του Τσιρτσή (1994) και του MEDPOL για τους σταθμούς αυτούς (Πίνακας 3.4).

Υψηλότερη μέση τιμή **διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON)** εμφανίζει ο σταθμός M3 ( $9.47 \pm 3.16 \mu\text{M}$ ), και ακολουθούν οι σταθμοί M1 ( $7.88 \pm 5.23 \mu\text{M}$ ), M4 ( $7.76 \pm 4.51 \mu\text{M}$ ) και M5 ( $7.72 \pm 4.38 \mu\text{M}$ ). Χαμηλότερες τιμές μετρήθηκαν στους M2 ( $6.63 \pm 3.99 \mu\text{M}$ ) και M6 ( $6.45 \pm 4.14 \mu\text{M}$ ). Η μέση τιμή διαλυτού οργανικού αζώτου για την παράκτια περιοχή μελέτης του Στενού Μυτιλήνης είναι  $7.65 \mu\text{M}$  (Πίνακας 6.8), ενώ οι μέσες τιμές DON για τους M1 και M2 είναι λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές του Τσιρτσή (1994) (Πίνακας 3.4).

**Πίνακας 6.7.** Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), νιτρωδών ( $\text{NO}_2^-$ ) και αμμωνιακών αλάτων ( $\text{NH}_4^+$ ), διαλυτού οργανικού αζώτου (DON), φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), πυριτικών αλάτων ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), χλωροφύλλης -α (chl-a) και λόγου N : P σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας.

Σταθμός	N - $\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{M}$ )	N - $\text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ )	N - $\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{M}$ )	N - DON ( $\mu\text{M}$ )	P - $\text{PO}_4^{3-}$ ( $\mu\text{M}$ )	Si - $\text{SiO}_4^{4-}$ ( $\mu\text{M}$ )	Chl-a ( $\mu\text{g/L}$ )	N : P
<b>M1</b>								
Εύρος	0.05 – 13.0	0.01 – 1.19	0.01 – 4.24	0.45 – 30.72	0.02 – 0.42	1.01 – 52.57	0.07 – 2.91	1.8 – 354
Μέση τιμή	<b>0.51</b>	<b>0.11</b>	<b>0.40</b>	<b>7.88</b>	<b>0.07</b>	<b>8.42</b>	<b>1.08</b>	<b>25.2</b>
Τυπική απόκλιση	0.59	0.07	0.35	5.23	0.05	7.46	0.74	23.7
<b>M2</b>								
Εύρος	0.02– 7.02	0.01– 0.55	0.01– 6.56	0.02– 35.89	0.02 – 2.43	0.07 – 51.61	0.01 – 0.34	0.13-231
Μέση τιμή	<b>0.33</b>	<b>0.08</b>	<b>0.34</b>	<b>6.63</b>	<b>0.05</b>	<b>8.98</b>	<b>0.14</b>	<b>29.8</b>
Τυπική απόκλιση	0.37	0.05	0.30	3.99	0.04	8.72	0.09	27.6
<b>M3</b>								
Εύρος	0.01– 6.91	0.01– 0.19	0.01– 1.41	1.53– 35.98	0.02 – 0.20	1.20 – 44.35	0.01 – 0.48	1.1 – 154
Μέση τιμή	<b>0.37</b>	<b>0.07</b>	<b>0.28</b>	<b>9.47</b>	<b>0.05</b>	<b>11.57</b>	<b>0.18</b>	<b>28.6</b>
Τυπική απόκλιση	0.40	0.04	0.35	3.16	0.04	8.14	0.11	30.3
<b>M4</b>								
Εύρος	0.01– 5.56	0.01– 1.93	0.01– 4.32	0.33 – 32.04	0.02 – 0.27	0.96 – 37.21	0.01 – 0.39	0.63 – 235
Μέση τιμή	<b>0.43</b>	<b>0.09</b>	<b>0.48</b>	<b>7.76</b>	<b>0.05</b>	<b>9.34</b>	<b>0.14</b>	<b>36</b>
Τυπική απόκλιση	0.54	0.08	0.44	4.51	0.04	8.41	0.09	41
<b>M5</b>								
Εύρος	0.01 – 12.9	0.01– 0.26	0.01– 3.14	0.05 – 18.52	0.02 – 0.23	2.12 – 32.71	0.01 – 0.90	2 – 121.6
Μέση τιμή	<b>0.34</b>	<b>0.06</b>	<b>0.41</b>	<b>7.72</b>	<b>0.06</b>	<b>10.4</b>	<b>0.17</b>	<b>31</b>
Τυπική απόκλιση	0.35	0.04	0.46	4.38	0.06	6.80	0.09	27.8
<b>M6</b>								
Εύρος	0.04– 3.48	0.01– 0.30	0.01– 13.3	0.84– 19.2	0.02 – 0.37	1.27 – 36.98	0.01– 0.56	2.3 – 350
Μέση τιμή	<b>0.41</b>	<b>0.06</b>	<b>0.71</b>	<b>6.45</b>	<b>0.04</b>	<b>9.48</b>	<b>0.14</b>	<b>40.4</b>
Τυπική απόκλιση	0.41	0.06	0.68	4.14	0.03	7.82	0.11	35.4

Οι μέσες τιμές των **φωσφορικών** ήταν παραπλήσιες σε όλους τους σταθμούς με τη μεγαλύτερη να καταγράφεται στο M1 ( $0.07 \pm 0.05 \mu\text{M}$ ) και τη μικρότερη στον M6 ( $0.04 \pm 0.03 \mu\text{M}$ ). Η μέση τιμή φωσφορικών για την περιοχή μελέτης ήταν  $0.05 \mu\text{M}$ , χαμηλή και συγκρίσιμη με τις τιμές ανοικτών περιοχών του Αιγαίου (Πίνακας 6.8, πίνακας παραρτήματος 7), ενώ οι μέσες τιμές φωσφορικών για τους σταθμούς M1 και M2 είναι λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές του Τσιρτσή (1994) και παραπλήσιες με τις συγκεντρώσεις του προγράμματος MEDPOL (Πίνακας 3.4).

Η χαμηλότερη μέση τιμή **πυριτικών** παρατηρείται στο σταθμό M1 ( $8.42 \pm 7.46 \mu\text{M}$ ) με το μεγαλύτερο όμως εύρος τιμών, από  $1.01$  έως  $52.57 \mu\text{M}$ . Γενικά στην περιοχή μελέτης, τα πυριτικά εμφανίζουν παραπλήσιες μέσες τιμές σε όλους τους σταθμούς με μέση τιμή  $9.70 \mu\text{M}$ , και σύμφωνα με τον πίνακα 6.8 και τις τιμές του παραρτήματος 7 υπερβαίνει τις τιμές ανοικτών θαλάσσιων περιοχών και ημίκλειστων κόλπων, κυμαινόμενες στο άνω άκρο του εύρους τιμών που έχουν μετρηθεί σε ανοικτές αλλά και παράκτιες θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου. Επίσης, οι μέσες τιμές πυριτικών των σταθμών M1 και M2 είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του Τσιρτσή (1994) και του MEDPOL (Πίνακας 3.4).

Η μέση τιμή του **λόγου N : P (DIN:P)** υπολογίστηκε υψηλότερη της τιμής 16 σε όλους τους σταθμούς, ενδεικτικό της σημασίας του φωσφόρου ως περιοριστικού παράγοντα στην ανάπτυξη της φυτοπλακτονικής βιομάζας. Η χαμηλότερη μέση τιμή υπολογίστηκε στον M1 (25.2) ενώ παρατηρήθηκε τάση αύξησης της μέσης τιμής του λόγου προς βορρά (Πίνακας 6.7). Αντίστοιχα υψηλές τιμές του λόγου N : P έχουν μετρηθεί σε παράκτιες περιοχές του νότιου (Κρήτη) και νοτιο-ανατολικού Αιγαίου (Ρόδος) (Παράρτημα 7).

Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων της **χλωροφύλλης-α** παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές στους σταθμούς M2 ( $0.14 \pm 0.09 \mu\text{g/L}$ ), M3 ( $0.18 \pm 0.11 \mu\text{g/L}$ ), M4 ( $0.14 \pm 0.09 \mu\text{g/L}$ ), M5 ( $0.17 \pm 0.09 \mu\text{g/L}$ ) και M6 ( $0.14 \pm 0.11 \mu\text{g/L}$ ), με σχετικά μικρό εύρος τιμών και μικρές τιμές τυπικών αποκλίσεων. Αντίθετα στο σταθμό M1 ( $1.08 \pm 0.74 \mu\text{g/L}$ ), καταγράφεται η υψηλότερη μέση τιμή χλωροφύλλης α, με μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων ( $0.07 - 2.91 \mu\text{g/L}$ ) συγκριτικά με τους υπόλοιπους σταθμούς. Η τιμή αυτή είναι αντίστοιχη της μέσης τιμής του Τσιρτσή (1994) για τον M1. Η μέση τιμή χλωροφύλλη-α στην υπόλοιπη περιοχή του Στενού ήταν  $0.15 \mu\text{g/L}$ , λίγο χαμηλότερη από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 6.8.** Μέσες τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών (μM) σε θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου (πηγή: Ladakis et al., 2003).

Περιοχή	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup>	Πηγή
Μεσόγειος Θάλασσα	0.42	0.16	0.36	0.12	1.22	Friligos, 1987
Παγασητικός Κόλπος (1990)	0.72	0.18	0.36	0.22	2.10	Papaevagelou, 1993
Σαρωνικός Κόλπος (εξωτ.)	0.42	0.18	0.78	0.09	1.52	Psilidou <i>et al.</i> , 1995
Βόρειο Αιγαίο (1992-94)	0.84	0.04	0.34	0.07	1.65	Kucukszgin, 1995
Νότιο Αιγαίο (1992-94)	0.78	0.03	0.28	0.06	1.83	Kucukszgin, 1995
Σαρωνικός Κόλπος	1.46	0.13	1.23	0.24	3.45	NCMR (MedPol report, 1996)
Κεντρ. Ευβοϊκός Κόλπος (1998)	5.81	0.18	2.71	0.22	8.14	Dassenakis <i>et al.</i> , 1999
Ρόδος (Αύγουστος 1998)	0.96	0.03	1.49	0.31	-	Corsini-Foka <i>et al.</i> , 2000
Βόρειες Σποράδες (Ιούλιος 1997)	1.25	0.03	1.11	0.12	0.90	Ladakis, 2003
<i>Στενό Μυτιλήνης</i>	<i>0.40</i>	<i>0.08</i>	<i>0.44</i>	<i>0.05</i>	<i>9.70</i>	<i>Παρούσα εργασία (2000-2002) Μέση τιμή Πίνακα 6.7</i>

Εκτός από τον πίνακα 6.8 και τον πίνακα του παραρτήματος 7 (μέσες τιμές θρεπτικών σε παράκτιες περιοχές των ελληνικών θαλασσών, Pavlidou et al. 2005), και με στόχο να σχηματιστεί σαφέστερη εικόνα για την ποιότητα των νερών της περιοχής μελέτης ως προς τα επίπεδα συγκέντρωσης θρεπτικών αλάτων και χλωροφύλλης –α, παρατίθεται ο Πίνακας 6.9. Οι κλίμακες χαρακτηρισμού της ποιότητας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.9 προέκυψαν από μετρήσεις που διεξήχθησαν σε ευρύ φάσμα περιοχών και χρονικών περιόδων στις ελληνικές θάλασσες, καλύπτοντας διαφορετικούς τύπους νερού και φάσεις του ετήσιου κύκλου (Pavlidou et al. 2005, Ignatiades 2005). Σύμφωνα με τον πίνακα αυτό, τα νερά στην περιοχή του λιμένα χαρακτηρίζονται ως εύτροφα με μεσοτροφικές τάσεις, ενώ στους υπόλοιπους σταθμούς στην παράκτια περιοχή του Στενού στα ανοιχτά των ανατολικών ακτών της Λέσβου, τα νερά χαρακτηρίζονται ολιγότροφα. Τα ανόργανα άλατα αζώτου και φωσφόρου κυμαίνονται γενικά σε χαμηλά επίπεδα. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως μη-ρυπασμένη ως προς τα νιτρικά (είναι χαρακτηριστικό ότι χωρίς την αφαίρεση των εξαιρετικά ακραίων τιμών νιτρικών, το επίπεδο ρύπανσης στους M1, M3 και M5 χαρακτηρίζεται μέτριο). Ως προς τα αμμωνιακά, η περιοχή χαρακτηρίζεται μη-ρυπασμένη, με χαμηλό επίπεδο ρύπανσης στο σταθμό M6. Μη-ρυπασμένη θεωρείται και ως προς τα φωσφορικά, εκτός από το σταθμό M1 στο λιμένα, όπου το επίπεδο ρύπανσης χαρακτηρίζεται χαμηλό.



**Πίνακας 6.9.** Χαρακτηρισμός επιπέδου ρύπανσης και ποιότητας παράκτιων νερών βάσει (1) εποχιακών συγκεντρώσεων θρεπτικών αλάτων (χειμερινές και θερινές συγκεντρώσεις φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών), από Pavlidou et al. 2005 και (2) συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α, από Ignatiades 2005. Οι κλίμακες προτείνονται βάσει μετρήσεων από διάφορες περιοχές των ελληνικών θαλασσών.

<b>Νιτρικά (μM)</b>	<b>Αμμωνιακά (μM)</b>	<b>Φωσφορικά (μM)</b>	<b>Επίπεδο ρύπανσης</b>	<b>Χλωροφύλλη -α (μg/L)</b>	<b>Τροφικό επίπεδο</b>
< 0.62	< 0.55	< 0.07	Μη-ρυπασμένη περιοχή (unpolluted)	<0.5	Ολιγότροφο (open oligotrophic)
0.62 – 0.65	0.55 – 1.05	0.07 – 0.14	Χαμηλό (low polluted)	0.5 – 1.0	Μεσότροφο (offshore mesotrophic)
0.65 – 1.09	1.05 – 2.20	0.14 – 0.68	Μέτριο (moderately polluted)	>1.0	Εύτροφο (inshore eutrophic)
>1.19	> 2.20	> 0.68	Υψηλό (highly polluted)		

### 6.2.2. Διακύμανση των οικολογικών μεταβλητών στο χρόνο.

Στα Σχήματα 6.12 έως 6.20 παρουσιάζεται η μεταβολή στο χρόνο των συγκεντρώσεων των μεταβλητών οικοσυστήματος του Πίνακα 6.7, εκφρασμένες ως μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης, σε όλους τους σταθμούς, όπως μετρήθηκαν στο πεδίο την περίοδο από 30 Ιουν 2000 (VK1) έως 20 Νοε 2002 (VK20).

Η διακύμανση στο χρόνο των **νιτρικών** δίνεται στο Σχήμα 6.12. Οι σταθμοί M2 και M4, με εξαίρεση τη χειμερινή περίοδο Δεκ 2001-Μαρ 2002 οπότε μετρήθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών σε όλους τους σταθμούς, παρουσιάζουν εποχιακότητα σε γενικές γραμμές σύμφωνα με το πρότυπο «αναγέννηση μετά το φθινόπωρο και υψηλές συγκεντρώσεις το χειμώνα – κατανάλωση από φυτοπλαγκτόν την άνοιξη – μειωμένες συγκεντρώσεις το θέρος». Στον M1 μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις τους καλοκαιρινούς μήνες και χαμηλές συγκεντρώσεις τους χειμερινούς, αντίθετα με το παραπάνω πρότυπο και τα ευρήματα του Τσιρτσή (1994), ένδειξη διαταραγμένου ετήσιου κύκλου. Τα φθινόπωρο του 2002 (VK20) μετρήθηκε τάση για αύξηση και υψηλές τιμές σε όλους τους σταθμούς.

Η μεταβολή στο χρόνο των **νιτρωδών** (Σχήμα 6.13) παρουσιάζει γενικά τις ίδιες τάσεις σε όλους τους σταθμούς. Τις χαμηλές συγκεντρώσεις του φθινοπώρου 2000 και χειμώνα 2000-1 ακολούθησαν δύο εξάρσεις, τέλος Μαΐου-αρχές Ιουνίου 2001 και αρχές Σεπτεμβρίου 2001. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε και την επόμενη χρονιά: φθίνουσες συγκεντρώσεις το φθινόπωρο 2001 και χειμώνα 2001-2 και δύο τάσεις για αύξηση αλλά περίπου ένα μήνα νωρίτερα, δηλ. τέλος Απριλίου-αρχές Μαΐου 2002 και αρχές Αυγούστου 2002. Η εποχικότητα αυτή είναι γενικά αντίθετη από αυτή που παρατηρήθηκε από τον Τσιρτσή (1994). Τη χρονιά 2001-2, οι γενικές τάσεις των νιτρικών και των νιτρωδών φαίνονται πιο 'ευθυγραμμισμένες' μεταξύ τους.

Και για τα **αμμωνιακά** άλατα (Σχήμα 6.14), η διακύμανση της συγκέντρωσης στο χρόνο παρουσιάζει γενικά τις ίδιες τάσεις σε όλους τους σταθμούς και εποχιακότητα ίδια με αυτή που περιγράφει ο Τσιρτσής (1994): μέγιστες τιμές από τέλη Μαρτίου έως αρχές Ιουνίου που φθίνουν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χαμηλές τιμές το φθινόπωρο και τον χειμώνα. Οι γενικές αυτές τάσεις διακόπτονται από μικρές αυξήσεις της συγκέντρωσης που μετρήθηκαν κατά τις περιόδους τέλος άνοιξης-αρχές θέρους (30 Μαΐ 01, 24 Μαΐ 02) και τέλος θέρους-αρχές φθινοπώρου (29 Αυγ 00 – 5 Σεπ 00, 20 Σεπ 01) και αποδίδονται στις ζωοπλαγκτονικές απεκκρίσεις και τη

βακτηριακή αποσύνθεση νεκρών οργανισμών και αποδόμηση οργανικής ύλης. Αυτή την τροφοδότηση της στήλης σε αμμωνία που συντηρεί την παραγωγή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, ακολουθεί μείωση των αποθεμάτων  $\text{NH}_4^+$ , όπως φαίνεται από το σχήμα. Επίσης, ξεχωρίζουν οι υψηλές τιμές που μετρήθηκαν στον σταθμό M6 στις 31 Αυγ 2001, 22 Νοε 2001 και 24 Μαΐ 2002, σαν να υπερτονίζουν την γενική τάση του παράκτιου συστήματος για αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών.

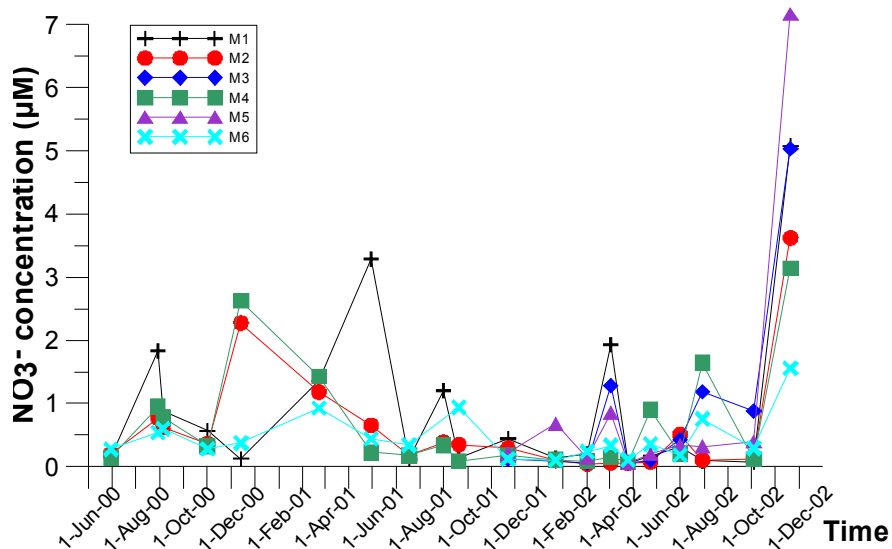
Η μεταβολή στη στήλη του νερού του διαθέσιμου **διαλυμένου ανόργανου αζώτου DIN** είναι προφανώς αποτέλεσμα της συμμεταβολής στο χρόνο των επιμέρους μορφών ανόργανου αζώτου, δηλαδή αμμωνιακά+νιτρικά+νιτρώδη ιόντα, και δίνεται στο Σχήμα 6.15. Είναι εμφανείς οι ομοιότητες μεταξύ της διακύμανσης του DIN και της αμμωνίας, αλλά και η συνεισφορά των νιτρικών, π.χ. στις 29 Αυγ 00, 3 Απρ 02, 20 Νοε 02. Σε γενικές γραμμές, η παράκτια περιοχή της Μυτιλήνης παρουσίασε αυξημένες τιμές DIN την περίοδο Δεκ 00 – Ιουν 01, χαμηλότερες τιμές την αντίστοιχη περίοδο Δεκ 01 – Μαΐ 02, τάσεις για αύξηση κατά τις περιόδους τέλος άνοιξης-αρχές θέρους (30 Μαΐ 01, 24 Μαΐ 02) και τέλος θέρους-αρχές φθινοπώρου (29 Αυγ 00 – 5 Σεπ 00, 20 Σεπ 01) και καθαρή αυξητική τάση, λόγω αύξησης των νιτρικών την περίοδο Οκτ 02 – Νοε 02. Η δυναμική του DIN αναλύεται περαιτέρω στη συνέχεια, μέσω της ανάλυσης της διακύμανσης του λόγου N:P.

Η συγκέντρωση του **διαλυμένου οργανικού αζώτου DON** ακολουθεί σε γενικές γραμμές την ίδια διακύμανση και κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα σε όλους τους σταθμούς (Σχήμα 6.16), όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.7. και περιέγραψε και ο Τσιρτσής (1994) για τους σταθμούς M1 και M2. Ως δείκτης της διαλυμένης οργανικής ύλης και με κύριες πηγές τις απεκκρίσεις φυτοπλαγκτού, ζωοπλαγκτού και την αποσύνθεση της νεκρής σωματιδιακής οργανικής ύλης, αναμένεται να σχετίζεται με τον κύκλο και τις διακυμάνσεις του φυτοπλαγκτού. Στο Σχήμα 6.16 φαίνεται πως την περίοδο που υπάρχει αυξητική τάση ή υψηλές τιμές στη συγκέντρωση chl-a, δηλ φυτοπλαγκτονικής βιομάζας ακολουθείται από αντίστοιχη αυξητική τάση ή υψηλές τιμές DON: από 5 Σεπ 00 έως 1 Νοε 00 (φθινόπωρο), 18 Ιουλ 01 έως 20 Σεπ 01 (μέσα – τέλος καλοκαιριού), από 1 Ιουλ 02 έως 30 Ιουλ 02 (καλοκαίρι) και οι υψηλές συγκεντρώσεις στις 30 Μαΐ 01 που οφείλονται στην εαρινή φυτοπλαγκτονική αύξηση και την ακόλουθη αύξηση της ζωοπλαγκτονικής βιομάζας. Την άνοιξη του επόμενου έτους (4 Μαρ 02 – 3 Απρ 02), οι τάσεις φαίνονται πιο καθαρά στον σταθμό M1.

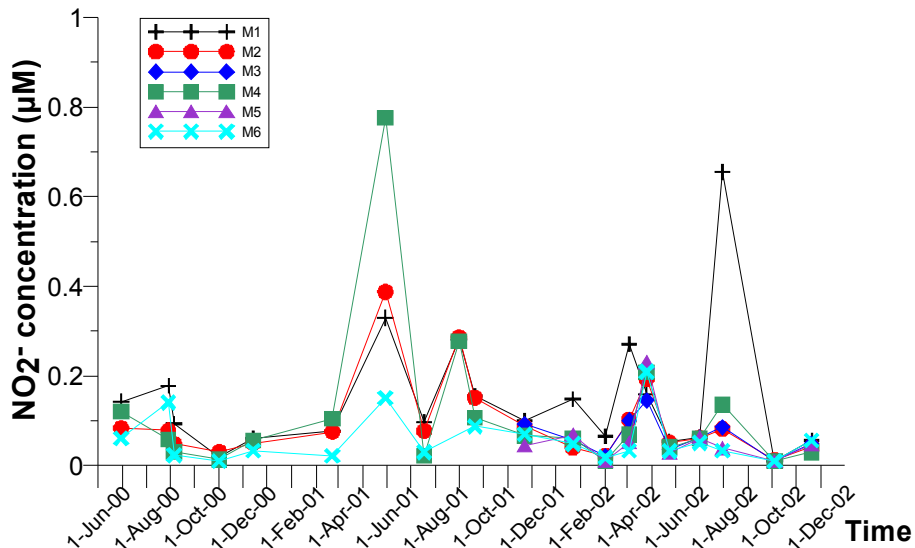
Αντίστοιχα, όταν υπάρχει τάση για μείωση ή χαμηλές τιμές στη συγκέντρωση chl-a, δηλαδή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας ακολουθεί φθίνουσα τάση ή χαμηλές τιμές του DON: 14 Δεκ 00, 22 Νοε 01, 20 Νοε 02 (τέλος φθινοπώρου με αρχές χειμώνα, δηλ αρχές της ψυχρής περιόδου ανάμιξης) και 18 Ιουλίου 01, 24 Μαΐου 02 (τέλος της άνοιξης έως μέσα καλοκαιριού).

Η διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **φωσφορικών** αλάτων δίνεται στο Σχήμα 6.17. Οι χαμηλότερες τιμές μετρήθηκαν καλοκαιρινούς μήνες (εκτός του M2 στις 30 Μαΐ 2001), ενώ σε χαμηλά επίπεδα κυμάνθηκαν και τις χειμερινές περιόδους. Μικρές τάσεις για αύξηση της συγκέντρωσης βρέθηκαν τους φθινοπωρινούς μήνες (1 Νοε 2000 και 20 Σεπ 2001) και τους εαρινούς μήνες του 2001 (25 Απρ 2001). Επίσης παρατηρήθηκε αυξητική τάση σε όλους τους σταθμούς το φθινόπωρο προς χειμώνα του 2002, κάτι που φαίνεται αδρά και για το προηγούμενο έτος. Σε αρκετές περιπτώσεις η συγκέντρωση στον M1 είναι υψηλότερη σε σχέση με τους άλλους σταθμούς αλλά σε γενικές γραμμές ακολουθεί την ίδια διακύμανση.

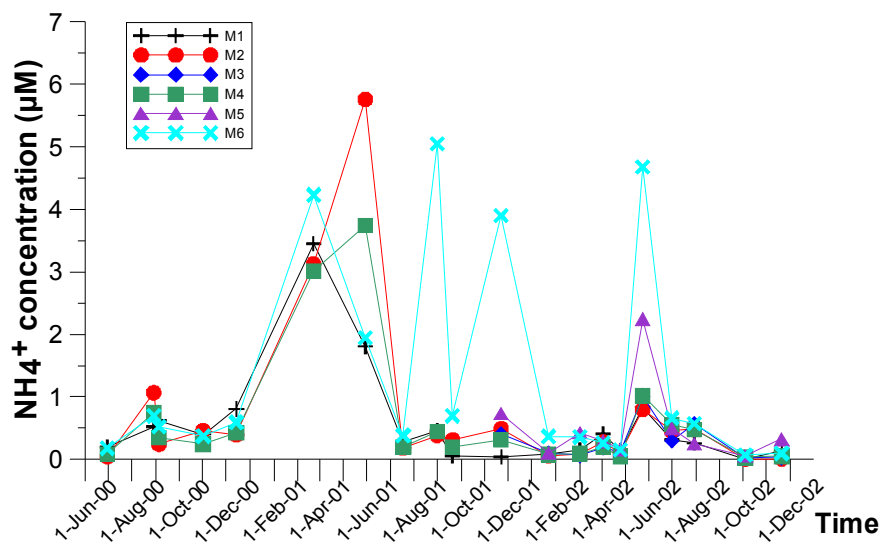
Σε ότι αφορά το **λόγο ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο** ( $DIN:PO_4^{-3}$ ), η διακύμανσή του στην περιοχή μελέτης καταγράφεται στο Σχήμα 6.18. Σύμφωνα με τους Redfield et al. (1963), ο λόγος C:N:P που περιέχεται στα κύτταρα του φυτοπλαγκτού διαφέρει από είδος σε είδος αλλά κυμαίνεται γύρω από την τιμή 106:16:1, εκφρασμένη σε λόγο γραμμοατόμων. Αυτό σημαίνει ότι, καθώς τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα χρησιμοποιούν για την θρέψη τους το διαθέσιμο άζωτο και φωσφόρο του περιβάλλοντός τους, το θαλασσινό νερό με αυτήν την αναλογία N:P, δηλ 16:1, θεωρείται ισορροπημένο για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού (Vollenweider et al. 1992). Όταν ο λόγος αυτός ξεπερνά την τιμή 16:1, θεωρείται ότι μεταξύ των δυο θρεπτικών, ο φωσφόρος είναι ο περιοριστικός παράγοντας για την φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη, ενώ όταν ο λόγος είναι μικρότερος της τιμής 16:1, περιοριστικός παράγοντας είναι το άζωτο.



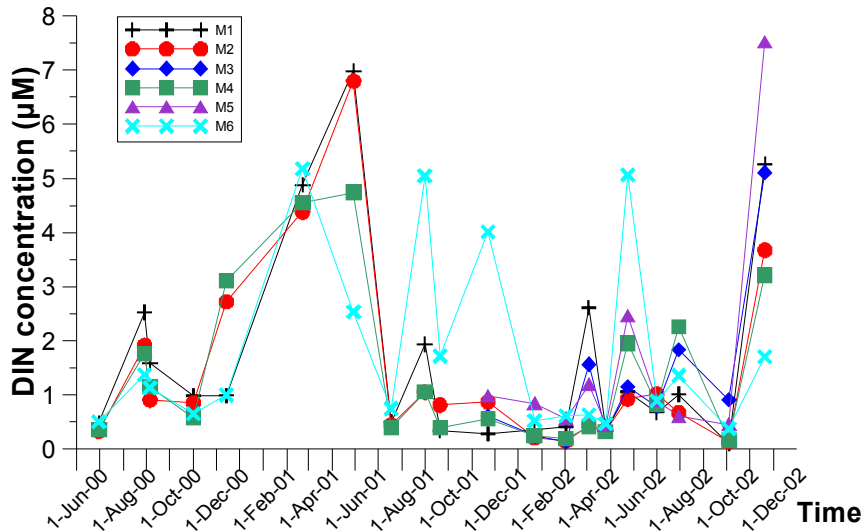
**Σχήμα 6.12.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **νιτρικών** αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µM) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



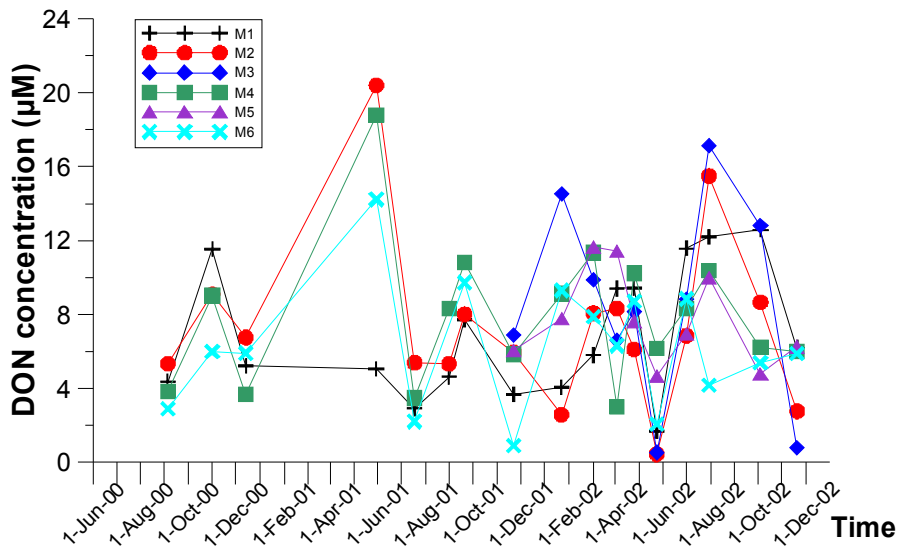
**Σχήμα 6.13.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **νιτρωδών** αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µM) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



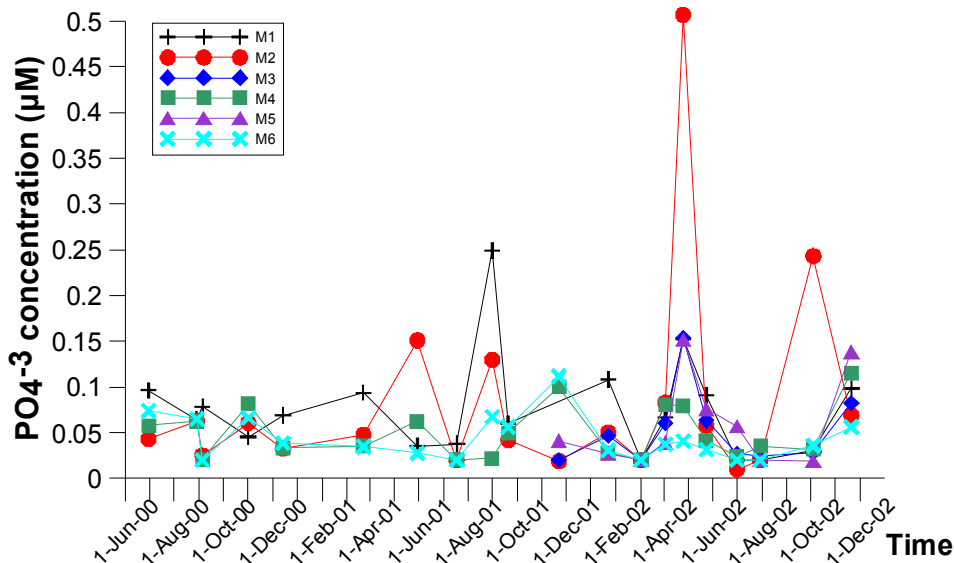
**Σχήμα 6.14.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **αμμωνιακών** αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µM) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



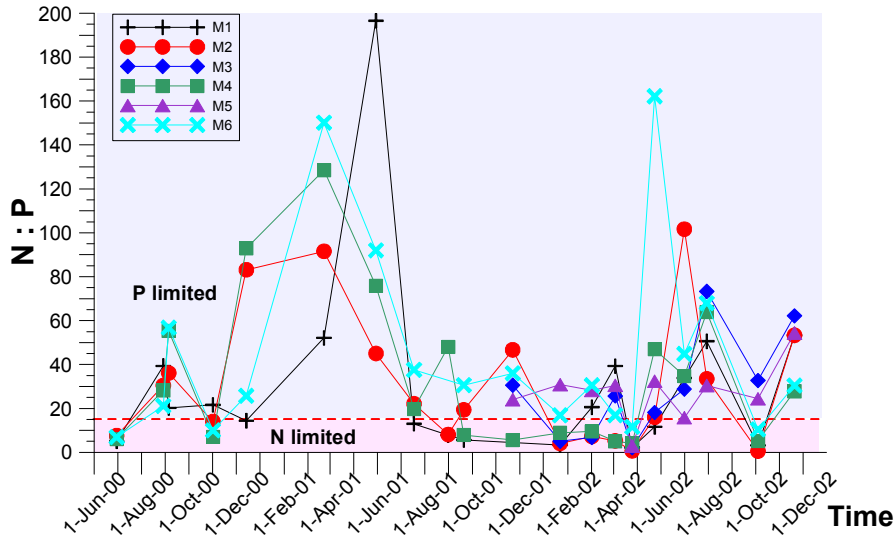
**Σχήμα 6.15.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **Διαλυμένου Ανόργανου Αζώτου DIN** (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



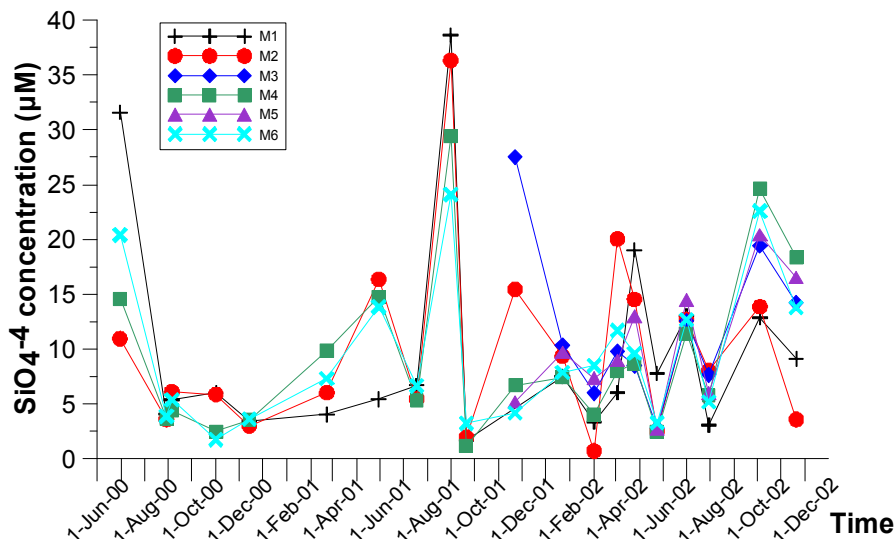
**Σχήμα 6.16.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **Διαλυμένου Οργανικού Αζώτου DON** (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



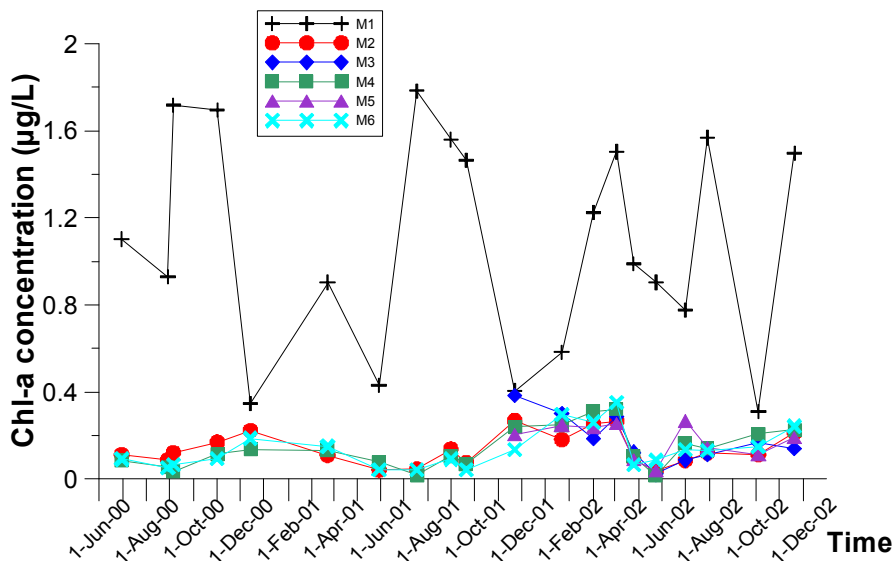
**Σχήμα 6.17.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης **φωσφορικών** αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µM) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



**Σχήμα 6.18.** Διακύμανση στο χρόνο του λόγου αζώτου προς φωσφόρο ( $DIN:PO_4^{-3}$ ) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



**Σχήμα 6.19.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης πυριτικών αλάτων (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µM) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.



**Σχήμα 6.20.** Διακύμανση στο χρόνο της συγκέντρωσης χλωροφύλλης α (μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης σε µg/L) στους σταθμούς δειγματοληψίας από 30 Ιουν 2000 έως 20 Νοε 2002.

Αν και διαφοροποιούνται επιμέρους, οι γενικές τάσεις μεταβολής είναι παρόμοιες σε όλους τους σταθμούς. Τιμές του λόγου κάτω από 16 μετρήθηκαν το καλοκαίρι (Ιούν), το φθινόπωρο (Οκτ-Νοε), και σε ορισμένους σταθμούς την περίοδο από Ιούνιος 2001 – Απρίλιος 2002 (25 Απρ 2002, όλοι οι σταθμοί). Τάση για αύξηση του λόγου σε όλους τους σταθμούς παρατηρήθηκαν τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο και κατά την περίοδο Δεκ 2000 – Ιούν 2001. Ο λόγος N:P, ακολουθώντας την διακύμανση του DIN, κυμάνθηκε σε υψηλότερες τιμές την περίοδο Δεκ 2000 – Ιουν 2001 από την αντίστοιχη περίοδο Δεκ 2001 – Ιουν 2002.

Και για τα **πυριτικά** άλατα (Σχήμα 6.19), η διακύμανση της συγκέντρωσης στο χρόνο δεν παρουσιάζει την ευδιάκριτη εποχιακότητα που ανιχνεύτηκε από τον Τσιρτσή (1994). Γενικά, η ίδια τάση μεταβολής εμφανίζεται σε όλους τους σταθμούς. Κορυφώσεις στις τιμές μετρήθηκαν σε αρκετές περιπτώσεις κατά την περίοδο από μέσα άνοιξης -και ιδίως το καλοκαίρι- έως και τα μέσα φθινοπώρου. Χαμηλές τιμές μετρήθηκαν τόσο σε χειμερινούς όσο και σε εαρινούς μήνες.

Στο Σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η μεταβολή στο χρόνο της συγκέντρωσης **χλωροφύλλης-α** (δείκτη της φυτοπλακτονικής βιομάζας), εκφρασμένη ως μέση ολοκληρωμένη τιμή στήλης, σε όλους τους σταθμούς, όπως μετρήθηκε στο πεδίο την περίοδο από 30 Ιουν 2000 (VK1) έως 20 Νοε 2002 (VK20). Γίνεται αμέσως αντιληπτή η διαφοροποίηση των τροφικών επιπέδων της περιοχής του σταθμού M1 (λιμάνι) από τους υπόλοιπους σταθμούς που βρίσκονται ανοιχτά στο στενό. Στον σταθμό M1, οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α είναι σαφώς μεγαλύτερες σε όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ ο ετήσιος κύκλος παρουσιάζεται διαταραγμένος με μεγάλες εξάρσεις στα μέσα του καλοκαιριού, το φθινόπωρο αλλά και τον Νοε 2002, εκτός από τις εαρινές εξάρσεις. Στους υπόλοιπους σταθμούς, η ετήσια διακύμανση της συγκέντρωσης είναι όμοια: σε χαμηλά επίπεδα συγκριτικά με τον M1, ετήσιος κύκλος που χαρακτηρίζεται από εποχιακή έξαρση που παρατηρήθηκε τους μήνες Μάρτιο-Απρίλιο 2002 (το 2001 δεν ανιχνεύτηκε εαρινή φυτοπλακτονική έξαρση πιθανότατα λόγω χαμηλής συχνότητας δειγματοληψιών), μείωση της συγκέντρωσης αργά την άνοιξη και αρχές καλοκαιριού και τάσεις αύξησης το φθινόπωρο.



### 6.2.3. Συζήτηση.

Μολονότι η συχνότητα των δειγματοληψιών δεν επιτρέπει την καταγραφή του ετήσιου κύκλου των μεταβλητών του οικοσυστήματος με μεγάλη ακρίβεια, εντούτοις μπορούν να γίνουν ορισμένες επισημάνσεις –ήδη από την προηγούμενη παράγραφο– και να εξαχθούν συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου δίνουν μια εικόνα της τροφικής κατάστασης της περιοχής μελέτης για την περίοδο 2000-2002 σε γενικές γραμμές όμοια με αυτήν που περιγράφει ο Τσιρτσής (1994): στο σταθμό M1 βρέθηκαν συγκριτικά με το Στενό υψηλές τιμές ανόργανων μορφών αζώτου (νιτρικών, νιτρωδών και αμμωνιακών αλάτων) και φωσφορικών αλάτων, ενώ οι πολύ υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης-α επιβεβαίωσαν το χαρακτηρισμό 'εύτροφη' της περιοχής του λιμένα και 'ολιγότροφη' της περιοχής στα ανοιχτά του Στενού, που καλύπτουν οι υπόλοιποι σταθμοί. Οι σταθμοί M2 και M3 εμφάνισαν διακυμάνσεις στις τιμές των νιτρικών, των νιτρωδών και των αμμωνιακών, οι οποίες ως ολικό ανόργανο άζωτο κυμαίνονται σε παραπλήσια επίπεδα. Συγκριτικά υψηλές τιμές διαλυτού ανόργανου αζώτου μετρήθηκαν και στο σταθμό M4 (ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή εκβολής των επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης). Στον σταθμό M6 μετρήθηκαν σχετικά μικρές τιμές νιτρικών και νιτρωδών, όμως η μέση τιμή των αμμωνιακών έδωσε υψηλή μέση τιμή DIN στην περιοχή.

### Λόγος N : P

Κατά τους χειμερινούς μήνες στο τέλος του 2001 και αρχές 2002, οι τιμές N:P ήταν κάτω του 16 σε αρκετούς σταθμούς (M1, M3, M4). Μετά την εαρινή αύξηση του φυτοπλαγκτού (π.χ. 3 Απρ 2002), μαζί με την μείωση της φυτοπλαγκτονικής συγκέντρωσης που ακολούθησε, παρουσιάστηκε μείωση και της συγκέντρωσης πυριτικών και του λόγου N:P, ο οποίος βρέθηκε κάτω από 16 σε όλους τους σταθμούς (25 Απρ 2002). Μεγάλο μέρος των αποθεμάτων ανόργανου διαλυτού αζώτου και πυριτικών δηλαδή αφομοιώθηκαν από το φυτοπλαγκτόν. Όμως η αύξηση των αμμωνιακών αλάτων, που οφείλεται στις απεκκρίσεις του ζωοπλαγκτού και τη βακτηριακή αποσύνθεση νεκρών οργανισμών, συνεχίζει να τροφοδοτεί το σύστημα με άζωτο, κυρίως πάνω από το θερμοκλινές (όπως φαίνεται στα Σχήματα Π9.7 - 30 Μαΐ 01 και Π9.17 - 1 Ιουλ 02), αυξάνει τον λόγο N:P (ο οποίος συνεχίζει να αυξάνει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού 2002), και συντηρεί την μειωμένη πλέον παραγωγή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας.

Συνδυάζοντας και τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του Τσιρτσή (1994) προκύπτει ότι το παράκτιο σύστημα πριν την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση (που εκδηλώνεται κάποια στιγμή τον Μάρτιο) τείνει να έχει επάρκεια ανόργανων μορφών αζώτου, καθώς οι μικροβιακές διεργασίες ανοργανοποίησης έχουν εφοδιάσει την 'δεξαμενή' κατά τη χειμερινή περίοδο, και η ανάπτυξη των κυττάρων φυτοπλαγκτού περιορίζεται από τη συγκέντρωση φωσφορικών (N:P>16, P limited). Μετά την εαρινή αύξηση του φυτοπλαγκτού, οι τιμές του λόγου N:P είναι γενικά φθίνουσες, και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ωστόσο, παρατηρούνται και αυξήσεις του N:P που οφείλονται κύρια στις απεκκρίσεις αμμωνίας από το ζωοπλαγκτόν, τον καταναλωτή του φυτοπλαγκτού και την αποσύνθεση νεκρών οργανισμών και της διαλυτής και σωματιδιακής οργανικής ύλης από βακτήρια. Στην συνέχεια επικρατούν χαμηλές τιμές (<16) αργά το φθινόπωρο και νωρίς τον χειμώνα (Νοέ – Δεκ, ορισμένες φορές Οκτ και Ιαν). Ο κύκλος κλείνει με την αύξηση του λόγου (>16) στο τέλος χειμώνα – αρχές άνοιξης, οπότε εκδηλώνεται η φυτοπλακτονική έξαρση. Τα γενικά αυτά χαρακτηριστικά εμφανίζονται και στον σταθμό M1.

Στον Πίνακα 6.10 δίνεται το ποσοστό των μετρήσεων σε κάθε σταθμό όπου ο λόγος N:P βρέθηκε πάνω από 16:1. Το ποσοστό αυτό που κυμαίνεται από 57% - 65% και συμφωνεί με τα αποτελέσματα του Τσιρτσή (1994) και του προγράμματος MEDPOL (κεφ. 3), αναδεικνύει το ρόλο των ορθοφωσφορικών αλάτων ως κύριο, θρεπτικό, περιοριστικό παράγοντα για την αύξηση του φυτοπλαγκτού στην περιοχή μελέτης. Φαίνεται μάλιστα πως σχηματίζεται βαθμίδα στην οποία ο λόγος N:P τείνει να μειώνεται από βορρά προς νότο.

**Πίνακας 6.10.** Ποσοστό των μετρήσεων στο οποίο ο λόγος N:P βρέθηκε πάνω από 16:1 (P-limited) για κάθε σταθμό.

Station	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>N : P &gt; 16 Percentage of measurements</b>	57%	58%	58%	64%	60%	65%

Δόθηκε έμφαση στη συμπεριφορά του λόγου N:P γιατί συνδέει την διακύμανση των διαθέσιμων ανόργανων μορφών αζώτου με τη διακύμανση των φωσφορικών και της χλωροφύλλης-α, δηλαδή της φυτοπλακτονικής ανάπτυξης. Αξίζει σχολιασμού μια προσεκτική παρατήρηση των σχημάτων την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2002: ενώ οι συγκεντρώσεις DIN είναι παρόμοιες σε όλους τους σταθμούς, στον σταθμό M5 όπου τα φωσφορικά

είναι αυξημένα σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς δίνοντας N:P=16, η συγκέντρωση χλωροφύλλης-α είναι επίσης αυξημένη.

### **σχέση διαλυτού ανόργανου αζώτου (DIN) – διαλυτού οργανικού αζώτου (DON) και χλωροφύλλης-α**

Οι τιμές του διαλυτού οργανικού αζώτου κυμάνθηκαν σε παραπλήσια επίπεδα για όλους τους σταθμούς, με μέσο όρο λίγο μικρότερο από αυτόν που μετρήθηκε από τον Τσιρτσή (1994) και, όπως είναι αναμενόμενο, ήταν υψηλότερες σε σχέση με το διαλυτό ανόργανο άζωτο DIN. Το διαλυτό οργανικό άζωτο (DON) στο σύνολο των σταθμών αποτελεί ποσοστό περίπου ίσο ή μεγαλύτερο του 60% του ολικού διαλυτού αζώτου (Total Dissolved Nitrogen) στην πλειοψηφία των μετρήσεων (Αλευρά, 2005). Στη συγκεκριμένη εργασία, όπου με τα δεδομένα πεδίου που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο διερευνήθηκε η συσχέτιση DIN – DON - Chl-a, επισημαίνεται η εμφάνιση εποχικότητας της συγκέντρωσης του DON όπως σχολιάστηκε και παραπάνω: όταν ομαδοποιήθηκαν οι μετρήσεις ανά εποχή καταγράφηκαν μεγαλύτερες τιμές DON κατά την εαρινή και τη θερινή περίοδο στους περισσότερους σταθμούς, ενώ κατά τη φθινοπωρινή περίοδο παρατηρήθηκε η ίδια κατά προσέγγιση τιμή DON σχεδόν σε όλους τους σταθμούς.

Η στενή σχέση μεταξύ των μεταβολών της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και του διαλυμένου οργανικού αζώτου φαίνεται στις κατακόρυφες κατανομές των δυο μεταβλητών: όταν κατά την εαρινή και θερινή περίοδο κυρίως εμφανίζονται επιφανειακά υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, παρατηρούνται κατά κανόνα αντίστοιχα υψηλές συγκεντρώσεις DON (Παράρτημα 6, σχήματα Π6.14 – 3 Απρ 02, Π6.8 – 18 Ιουλ 01, Π6.17 – 1 Ιουλ 02, Π6.18 – 30 Ιουλ 02 αλλά και Π6.4 – 1 Νοε 00).

Οι κατακόρυφες κατανομές DON και DIN ακολούθησαν πολύ συχνά μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογες μεταβολές συναρτήσεως του βάθους: μειωμένες συγκεντρώσεις DIN – αυξημένες συγκεντρώσεις DON και αντίστροφα. Η σχέση αυτή μεταξύ των δυο μεταβλητών παρουσιάζεται στο Παράρτημα 6 σε αρκετές κάθετες τομές (π.χ. Π6.8 – καλοκαίρι, Π6.3 και Π6.19 – νωρίς φθινόπωρο, Π6.11 και Π6.20 – αργά φθινόπωρο, Π6.5 και Π6.12 – χειμώνας). Τείνει να μην παρουσιάζει εποχικότητα, δηλαδή εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αν και δεν ήταν ευδιάκριτη από τα μέσα ως το τέλος της άνοιξης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Επαλήθευση αποτελεσμάτων μοντέλου και εκτίμηση ικανότητας προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζονται ποιοτικές/διαγραμματικές τεχνικές επαλήθευσης του μοντέλου και υπολογίζονται μέτρα ποσοτικοποίησης του σφάλματος των φυσικών και οικολογικών προσομοιωμένων μεταβλητών, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.2.4, σε μια προσπάθεια εκτίμησης της ικανότητας του μοντέλου προσομοίωσης να αναπαράγει τη δυναμική του παράκτιου οικοσυστήματος την περίοδο μελέτης. Παρουσιάζονται επιλεκτικά ορισμένα διαγράμματα ενώ τα υπόλοιπα σχήματα που προέκυψαν από τη διαδικασία παρατίθενται στο παράρτημα 8.

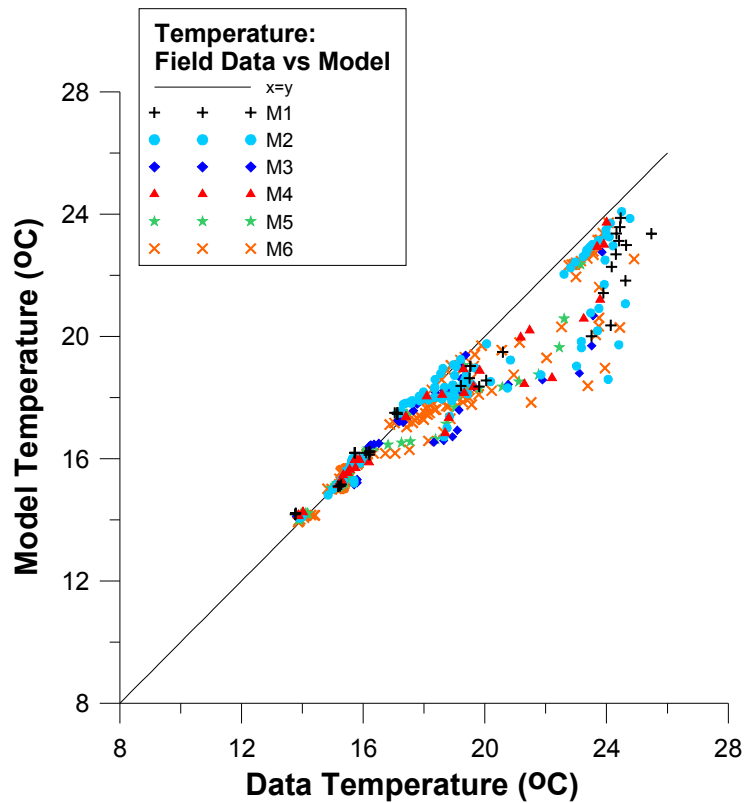
#### 7.1. Επαλήθευση και ποσοτικοποίηση σφαλμάτων φυσικών μεταβλητών.

##### 7.1.1. Θερμοκρασία

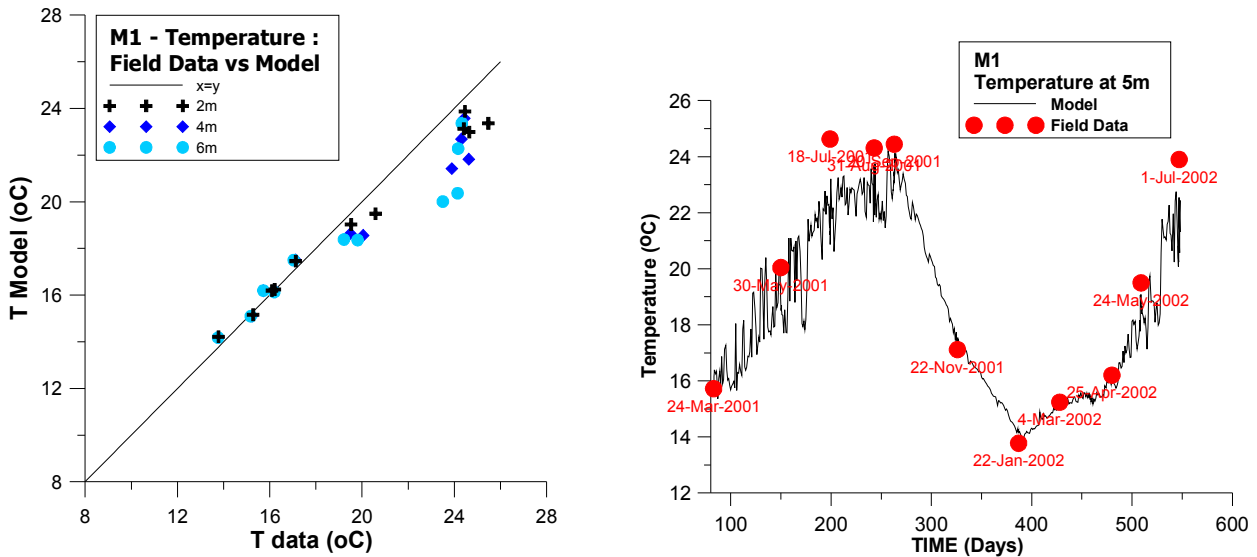
Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που υπολογίζει το μοντέλο προς τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται ότι η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση, επομένως όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερα το μοντέλο προσομοιώνει τη μεταβλητή. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η συνολική επίδοση του μοντέλου στην προσομοίωση της θερμοκρασίας είναι πολύ καλή, ειδικά στις θερμοκρασίες από 14 έως 20 °C. Είναι εμφανής η απόκλιση από την ευθεία  $x = y$  που παρουσιάζουν οι θερμοκρασίες πεδίου που κυμαίνονται περίπου από 20 έως 24 °C, τις οποίες το μοντέλο τείνει να υποεκτιμά. Στα Σχήματα 7.2 και 7.3 παρουσιάζονται για τους σταθμούς M1 και M2 παρόμοια διαγράμματα διασποράς (αποτελέσματα μοντέλου vs μετρήσεις πεδίου), που εμφανίζουν την ίδια κατανομή σημείων ως προς τον άξονα  $x=y$  για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας. Παράλληλα, δίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο όπως την υπολογίζει το μοντέλο, μαζί με τις μετρήσεις πεδίου, για δύο βάθη – ένα κοντά στην επιφάνεια (5m) και ένα βαθύτερα (20m). Η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου δείχνει πολύ καλή.

Διαπιστώνεται μικρή αδυναμία του μοντέλου να αναπαράγει με ακρίβεια την ανάπτυξη του θερμοκλινοϋς: στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται η διακύμανση του μέσου σφάλματος ως προς το χρόνο και ως προς το βάθος για τους σταθμούς M1 και M2

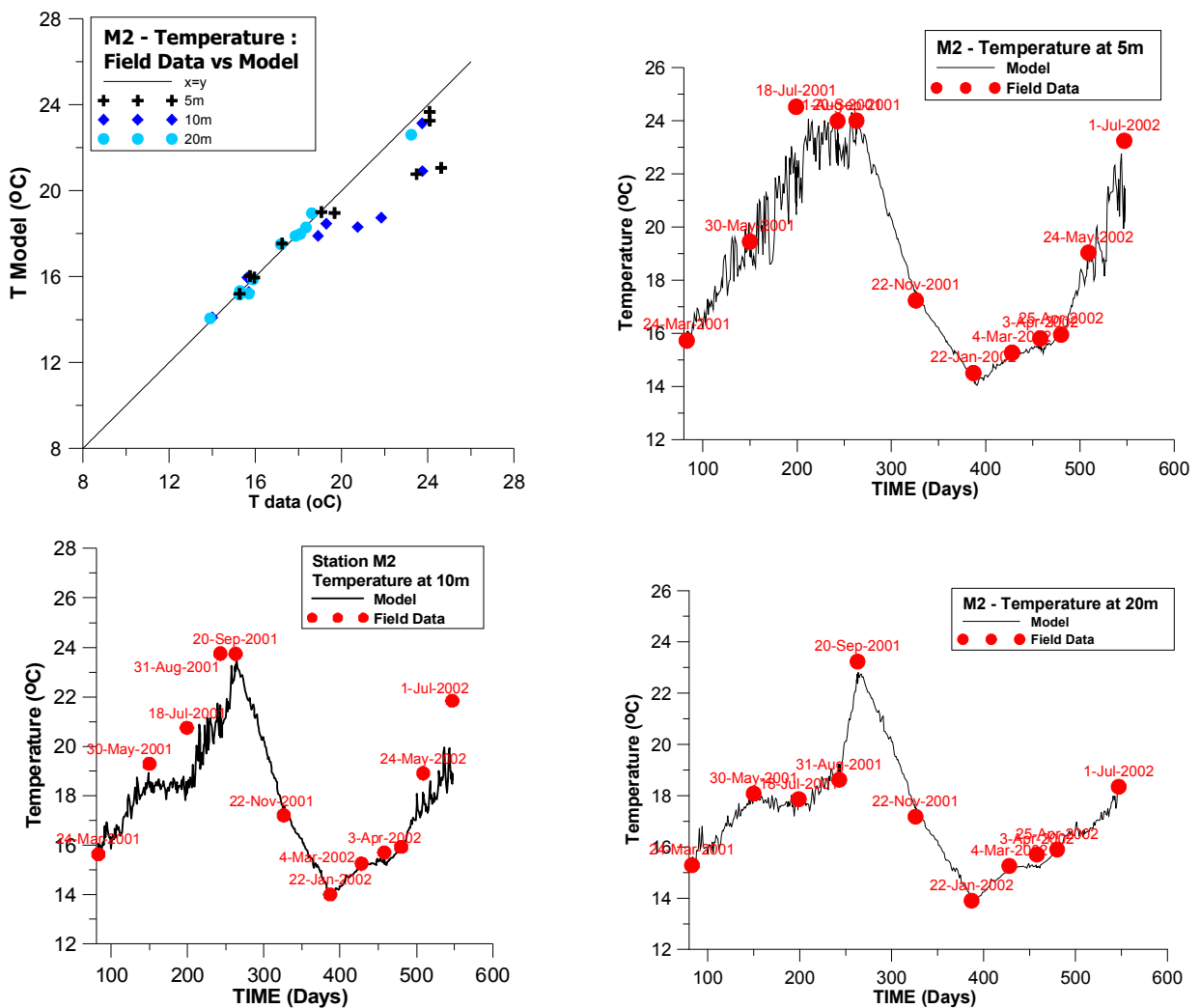
(τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς παρατίθενται στο παράρτημα 8). Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι το σφάλμα μεγιστοποιείται την περίοδο δημιουργίας του θερμοκλινούς (εαρινοί και θερινοί μήνες), ενώ επίσης μεγιστοποιείται σε βάθη μεταξύ 5m και 18m περίπου. Παρόλα αυτά, το σφάλμα είναι μικρό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και για όλο το βάθος της στήλης νερού.



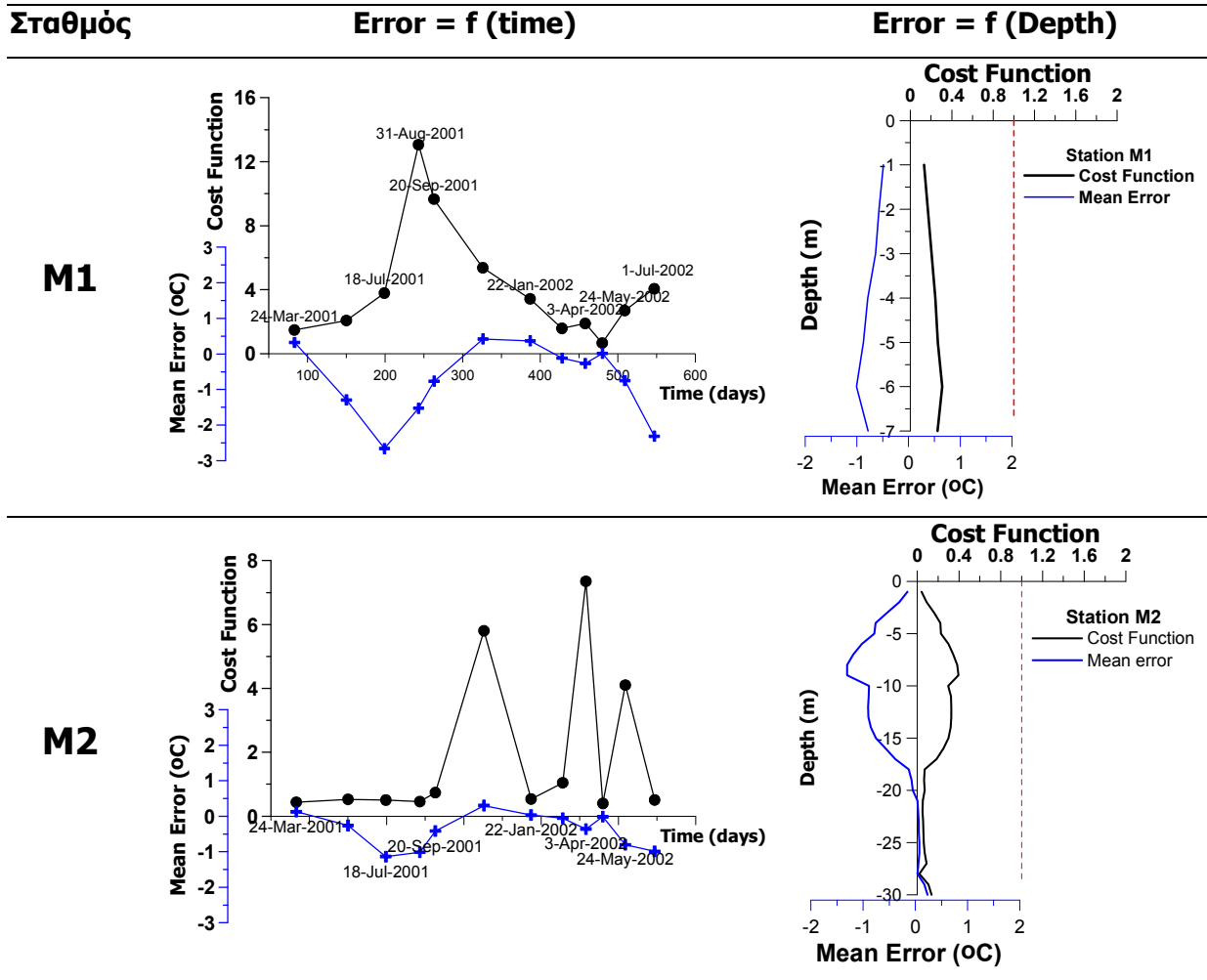
**Σχήμα 7.1.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για θερμοκρασία για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) κατά την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).



**Σχήμα 7.2.** Σταθμός **M1**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την **θερμοκρασία** για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά).



**Σχήμα 7.3.** Σταθμός **M2**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την **θερμοκρασία** για όλη την περίοδο προσομοίωσης (πάνω αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω), σε βάθος 10m (κάτω αριστερά) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



**Σχήμα 7.4.** Διακύμανση σφάλματος θερμοκρασίας ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

Αυτό το συμπέρασμα που προκύπτει από τις ποιοτικές μεθόδους των διαγραμμάτων, επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό των ποσοτικών μέτρων καλής προσαρμογής του Πίνακα 2.2, και τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.1. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους είναι για όλους τους σταθμούς κάτω από 1 (πολύ καλή προσαρμογή). Το μέσο σφάλμα είναι περίπου ή κάτω από  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (με εξαίρεση τον σταθμό M1) και αρνητικό, ένδειξη μικρής υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο, όπως δείχνει και η % σύγκλιση, με τιμές από 97% έως 99%. Σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα και την ικανότητα μοντέλου, η προσαρμογή είναι εξαιρετική σε όλους τους σταθμούς.

**Πίνακας 7.1.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης θερμοκρασίας στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	0.23	0.18	0.23	0.19	0.15	0.20
<b>Μέσο Σφάλμα (°C) (Mean error ή Bias)</b>	-0.74	-0.43	-0.39	-0.55	-0.23	-0.52
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	3.8	2.6	2.6	3.0	1.6	2.9
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	97.0	98.2	98.1	97.6	99.0	97.6
<b>RMS σφάλμα (°C)</b>	1.28	0.90	0.81	1.01	0.56	0.88
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	0.93	0.87	0.78	0.88	0.90	0.88

#### Συζήτηση για το σφάλμα της προσομοιωμένης θερμοκρασίας

Η υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο, όπως διαπιστώνεται από τα Σχήματα 7.1, 7.3 (κάτω αριστερά) και 7.4 (κάτω δεξιά), εντοπίζεται στην περιοχή της στήλης νερού που αναπτύσσεται το θερμοκλινές κατά την αντίστοιχη χρονική περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι η προσομοιωμένη τυρβώδης ανάμιξη είναι πιο ασθενής από την πραγματική, που οδηγεί σε μια χρονική υστέρηση της ανάπτυξης του προσομοιωμένου θερμοκλινούς. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αυτό αποδίδεται στο υπομοντέλο των Mellor – Yamada που χρησιμοποιεί το POM για τον υπολογισμό των συντελεστών κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης ( $K_M$  για την ορμή,  $K_H$  για την θερμοκρασία – αλατότητα, βλ. εξισώσεις 5.14 και 5.15 του κεφαλαίου 5), το οποίο τείνει να υποεκτιμάει την κατακόρυφη τυρβώδη ανάμιξη στο επιφανειακό στρώμα σε περιόδους στρωμάτωσης (Ezer 2000, Mellor 2001, Robertson 2006, Huang et al 2011). Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αντιληπτό ότι για να προσομοιωθεί ακριβέστερα το επιφανειακό στρώμα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο ρόλος των επιφανειακών κυμάτων και να συνυπολογιστεί η συνεισφορά τους στην επιφανειακή τυρβώδη κινητική ενέργεια (ΤΚΕ), που καθορίζει τη δομή και τη δυναμική της ανάμιξης κοντά στην επιφάνεια. Για το λόγο αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης του μοντέλου Mellor – Yamada προσθέτοντας όρους που παραμετροποιούν την προσθήκη ΤΚΕ στο επιφανειακό θαλάσσιο στρώμα ( $\alpha$ ) από τη θραύση των επιφανειακών κυμάτων (wave breaking, Mellor and Blumberg 2004) και κυρίως ( $\beta$ ) από την αλληλεπίδραση κυμάτων – ρευμάτων – τύρβης (non-breaking waves – current – turbulence interaction, Qiao et al. 2010, Huang et al. 2011). Η δεύτερη διεργασία έχει βρεθεί ότι επηρεάζει την κατακόρυφη ανάμιξη πολύ περισσότερο και σε μεγαλύτερα βάθη από την πρώτη. Με τις παραπάνω τροποποιήσεις, που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο

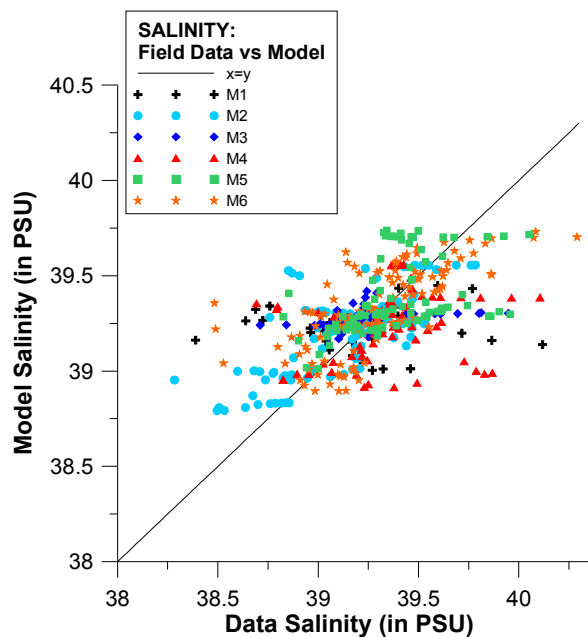


που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η ακρίβεια του υπομοντέλου παραμετροποίησης τύρβης των Mellor – Yamada βελτιώνεται κατά πολύ (Huang et al. 2011), και η προσομοίωση της ανάμιξης κοντά στην επιφάνεια τόσο της ορμής όσο και της θερμοκρασίας/αλατότητας γίνεται πιο ακριβής.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο χαρακτηρισμός της προσαρμογής των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι ο καλύτερος δυνατός, παρόλη την τάση για μικρή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας. Οι λιγότερο καλές επιδόσεις παρουσιάζονται στον σταθμό M1 και αμέσως μετά τον M4, δηλαδή στα σημεία όπου ολόκληρη η στήλη νερού επηρεάζεται από τον ετήσιο κύκλο δημιουργίας - υποχώρησης του θερμοκλινούς.

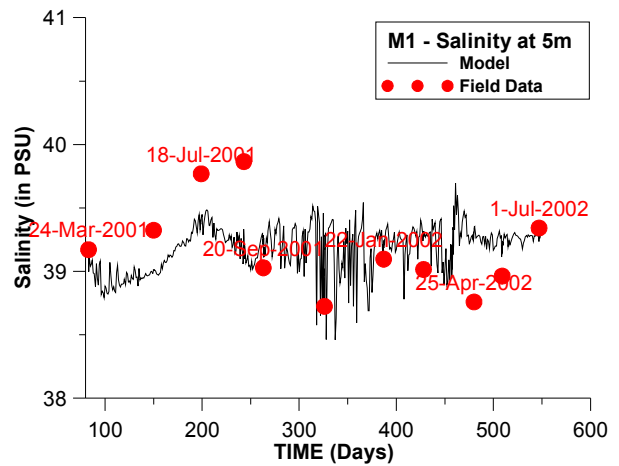
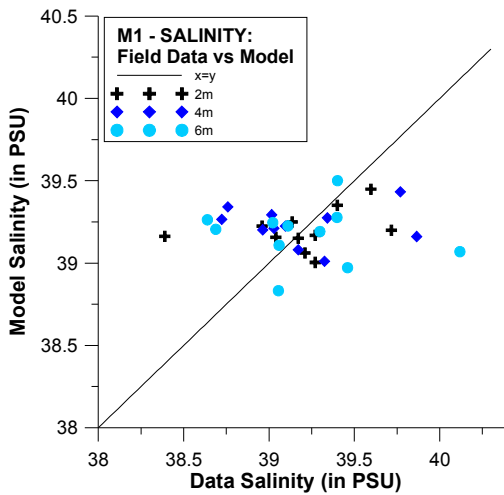
### 7.1.2. Αλατότητα

Στο διάγραμμα διασποράς του Σχήματος 7.5 παρουσιάζεται η αλατότητα που υπολογίζει το μοντέλο προς την αλατότητα που μετρήθηκε στο πεδίο για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Η συνολική επίδοση του μοντέλου στην προσομοίωση της αλατότητας φαίνεται αρκετά καλή, ειδικά στις τιμές πεδίου από 38.7 έως 39.7 περίπου, όπου βρίσκεται και ο κύριος όγκος των μετρήσεων. Από το σχήμα φαίνεται πως το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμάει τις χαμηλότερες αλατότητες (γύρω στο 38.5) ενώ αντίθετα να υποεκτιμάει τις υψηλότερες αλατότητες (πάνω από 39.8).

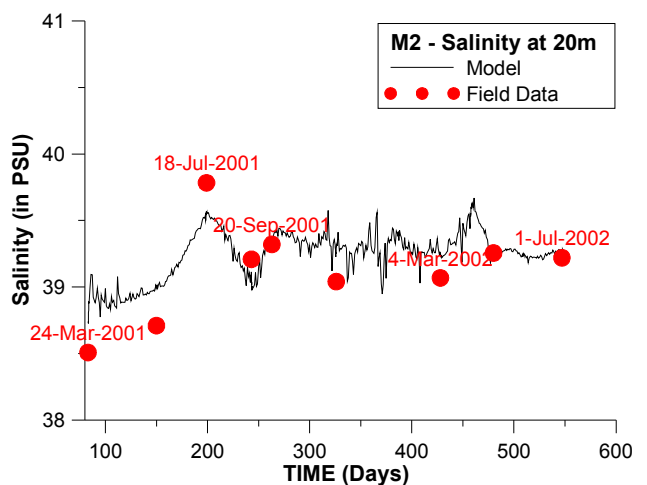
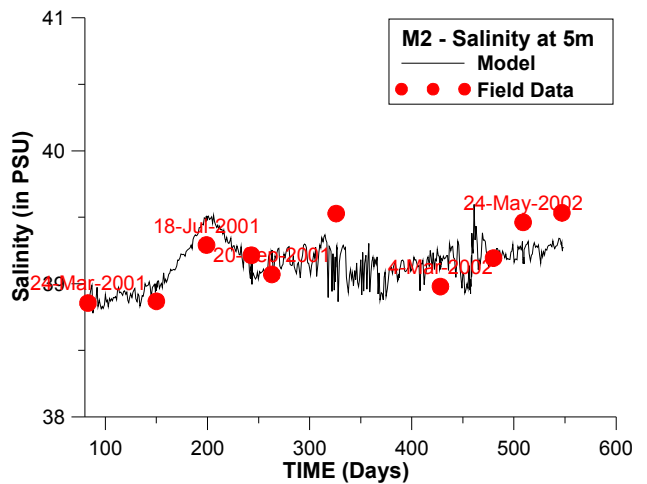
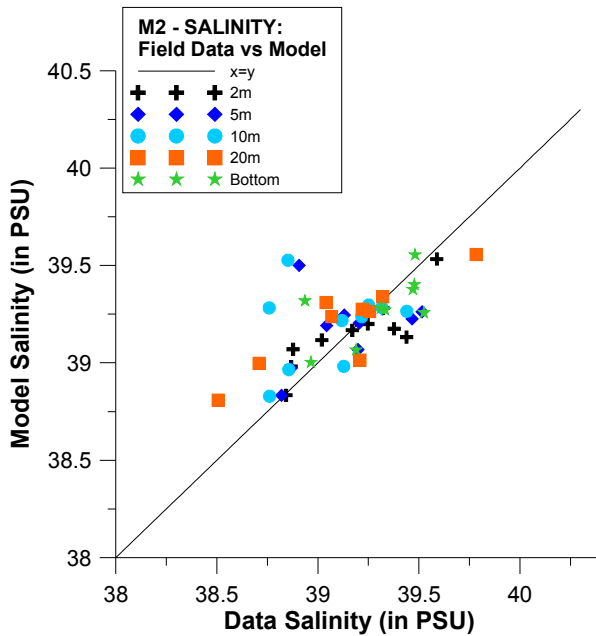


**Σχήμα 7.5.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για αλατότητα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

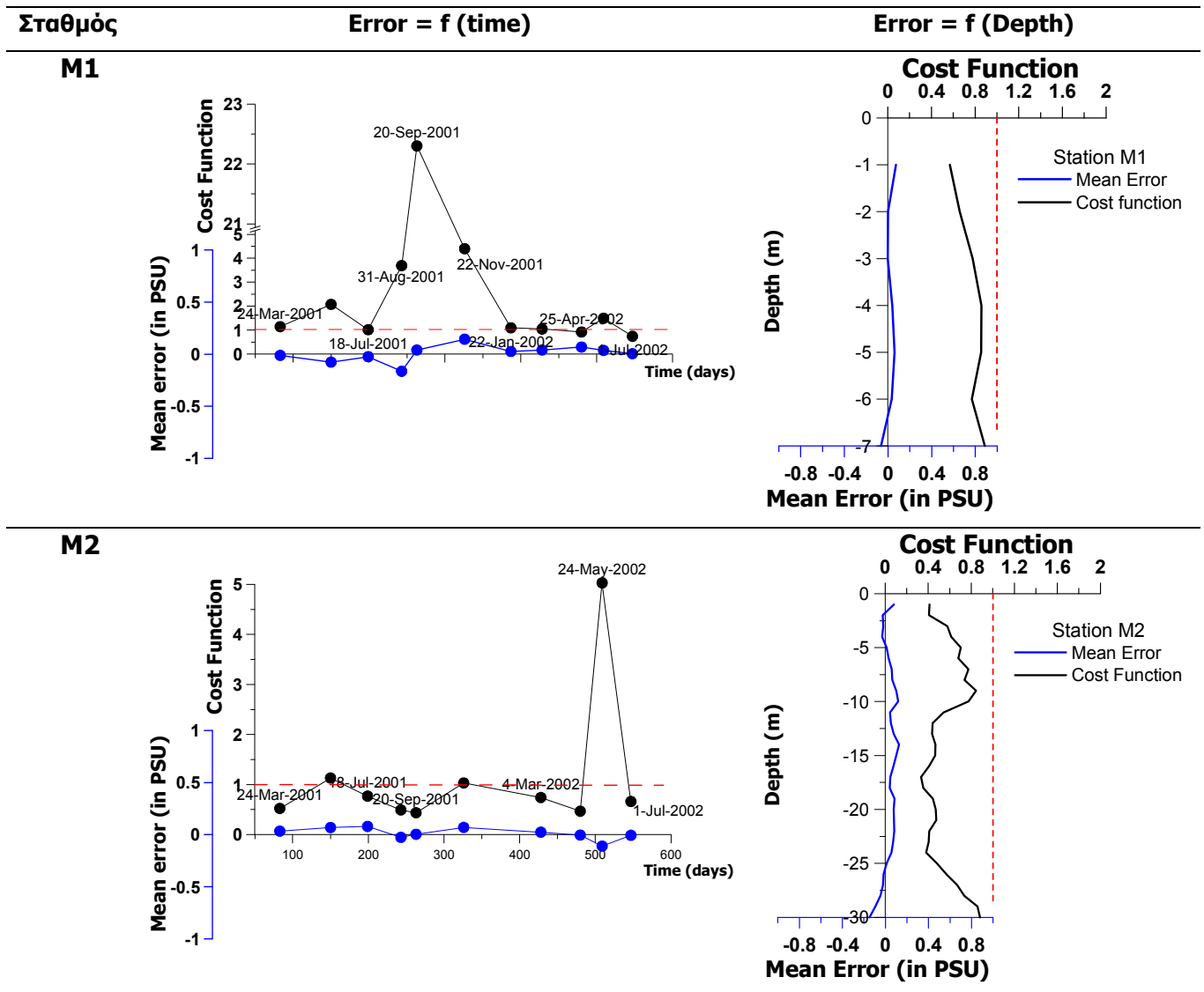
Στα Σχήματα 7.6 και 7.7 παρουσιάζονται για τους σταθμούς M1 και M2 διαγράμματα διασποράς (αποτελέσματα μοντέλου vs μετρήσεις πεδίου). Παράλληλα, δίνεται η μεταβολή της αλατότητας ως προς τον χρόνο όπως την υπολογίζει το μοντέλο, μαζί με τις μετρήσεις πεδίου, για δύο βάθη – ένα κοντά στην επιφάνεια (5m) και ένα βαθύτερα (20m). Η προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις πεδίου παρουσιάζεται αρκετά καλή για όλους τους σταθμούς. Μεγαλύτερη διασπορά σημείων γύρω από τον άξονα  $x=y$  παρουσίασαν οι σταθμοί M1 και M4 (σχήμα στο παράρτημα 8). Επίσης στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η διακύμανση του μέσου σφάλματος ως προς το χρόνο και ως προς το βάθος για τους σταθμούς M1 και M2 (τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς παρατίθενται στο παράρτημα 8).



**Σχήμα 7.6.** Σταθμός **M1**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά).



**Σχήμα 7.7.** Σταθμός **M2**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



**Σχήμα 7.8.** Διακύμανση σφάλματος αλατότητας ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

Τα ποσοτικά μέτρα καλής προσαρμογής συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2. Η προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα χαρακτηρίζεται για όλους τους σταθμούς ως «καλή», σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους και ως «εξαιρετική» σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, ενώ σε συνδυασμό με το RMS σφάλμα, επιβεβαιώνεται ποσοτικά ότι το μεγαλύτερο σφάλμα του μοντέλου παρουσιάζεται στους σταθμούς M1 και M4. Στο σταθμό M4, το σφάλμα είναι αρνητικό και αυξάνεται με το βάθος (Σχήμα 7.16 M4 δεξιά), κάτι που μπορεί να

οφείλεται στην προσομοίωση της εισροής γλυκού νερού από τον αγωγό εκβολής της ΜΕΥΑ, που γειτνιάζει με τον σταθμό. Το μέσο σφάλμα κυμαίνεται από -0.11 έως 0.06 (σε PSU), ενώ –εκτός του M4- το σφάλμα στους υπόλοιπους σταθμούς είναι γενικά θετικό. Το ποσοτικό μέτρο της % σύγκλισης δείχνει επίσης πολύ καλή προσαρμογή, ενώ είναι χαρακτηριστικό ότι η ικανότητα μοντέλου – το ποσοτικό κριτήριο που είναι το πλέον δύσκολο να ικανοποιηθεί- αποτυγχάνει, σύμφωνα με τις τιμές της βιβλιογραφίας. Σε όλους τους σταθμούς η συνάρτηση κόστους μεγιστοποιείται κοντά στον πυθμένα.

**Πίνακας 7.2.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης αλατότητας στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	1.76	1.13	1.37	1.31	1.03	1.30
<b>Μέσο Σφάλμα (in PSU) (Mean error ή Bias)</b>	0.03	0.03	0.06	-0.11	-0.01	0.05
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	4.4	6.0	9.8	7.9	8.9	5.7
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	100.1	100.1	100.2	99.7	100.0	100.1
<b>RMS σφάλμα (in PSU)</b>	0.30	0.19	0.19	0.31	0.22	0.19
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-4.90	-2.57	-1.95	-4.25	-0.67	-3.21

### 7.1.3. Μέτρο ταχύτητας και διεύθυνση ρεύματος

Τα στατιστικά μέτρα καλής προσαρμογής του Πίνακα 2.2 υπολογίστηκαν και για το μέτρο της ταχύτητας ρεύματος και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

**Πίνακας 7.3.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης για το μέτρο της ταχύτητας ρεύματος στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέσες τιμές για τα δύο βάθη μετρήσεων).

	M1	M2		M3		M4		M5		M6	
	5m	5m	20m	5m	20m	5m	10m	5m	20m	5m	20m
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	1.19	1.65	0.91	1.45	0.81	2.12	2.52	3.70	2.21	1.19	1.33
<b>Μέσο Σφάλμα (m/s) (Mean error ή Bias)</b>	-0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01
<b>Μέσο Σφάλμα % (Perc Model Bias)</b>	26.2	38.4	39.3	68.4	41.2	95.7	128.4	143.3	122.2	69.5	45.9
<b>% σύγκλιση (Perc Bias score)</b>	93.6	181.6	221.2	198.3	169.0	258.9	255.7	248.9	225.1	191.7	192.0
<b>RMS σφάλμα (m/s)</b>	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-0.52	-5.21	-0.53	-2.75	-0.70	-5.60	-9.36	-126.1	-11.53	-2.79	-4.66

Αναλύοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.3, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Γενικά, το μέτρο ταχύτητας ρεύματος μοντελοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο βαθύτερο στρώμα (~20m) από ότι στο περισσότερο τυρβώδες επιφανειακό στρώμα (~5m).
- Οι επιδόσεις του υδροδυναμικού μοντέλου στην περιοχή των σταθμών M4 και M5 είναι οι λιγότερο καλές, σύμφωνα με όλα τα μέτρα του Πίνακα 7.3, ενώ είναι καλύτερες στην περιοχή των σταθμών M1 και M2.
- Το μέσο σφάλμα κυμαίνεται από 0.01 έως 0.04 m/s, είναι μικρότερο στους M1 και M2 και μεγαλύτερο στους σταθμούς M5, M4 και M6, δηλαδή στους σταθμούς που απέχουν περισσότερο από τον μετεωρολογικό σταθμό όπου έγιναν οι μετρήσεις ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.
- Σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους, η προσομοίωση του μέτρου ταχύτητας ρεύματος είναι «πολύ καλή» στους M2 και M3 στα 20m, «καλή» στα υπόλοιπα σημεία και «μέτρια» στους M4 και M5.

- Σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, η προσομοίωση του μέτρου ταχύτητας ρεύματος είναι «καλή» στην περιοχή των σταθμών M1 και M2 και «κακή» στα υπόλοιπα σημεία, ειδικά στην περιοχή των σταθμών M4 και M5.
- Διαπιστώνεται υπερεκτίμηση της ταχύτητας ρεύματος (θετικό μέσο σφάλμα και %σύγκλιση >100), με εξαίρεση τον M1.
- Μολονότι μικρό σε απόλυτες τιμές το σφάλμα, η υπερεκτίμηση της ταχύτητας κυμαίνεται από 70% έως 150% περίπου (%σύγκλιση=169% στα 20m του M3 και (%σύγκλιση~250% στον M4).
- Όπως συμβαίνει και με την αλατότητα, η ικανότητα μοντέλου – το ποσοτικό κριτήριο που είναι το πλέον δύσκολο να ικανοποιηθεί- αποτυγχάνει, σύμφωνα με τις τιμές της βιβλιογραφίας.

Για την εκτίμηση της ικανότητας του μοντέλου να αναπαράγει τη διεύθυνση του ρεύματος στις ημερομηνίες δειγματοληψίας, εκτός από την ποιοτική σύγκριση των ρευματομετρήσεων με το πεδίο ρευμάτων που παράγει το μοντέλο και παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα 8, εφαρμόστηκε η ποσοτική μέθοδος που χρησιμοποίησαν οι Nittis et al. (2001) για να επαληθεύσουν τις προγνώσεις διεύθυνσης ανέμου του μετεωρολογικού σκέλους του επιχειρησιακού μοντέλου 'Ποσειδών', η οποία περιγράφεται στη συνέχεια. Μια προσομοιωμένη διεύθυνση ρεύματος  $D_M$  θεωρείται σωστή όταν βρίσκεται μέσα σε ένα διάστημα τιμών που ορίζεται από τη σχέση (7.1):

$$D_F - R \leq D_M \leq D_F + R \quad (7.1)$$

όπου  $D_F$  η διεύθυνση ρεύματος που μετρήθηκε στο πεδίο και  $R$  οι μοίρες που ορίζουν το διάστημα μέσα στο οποίο η προσομοιωμένη διεύθυνση ρεύματος  $D_M$  επιτρέπεται να αποκλίνει και να εξακολουθεί να θεωρείται σωστή. Η παράμετρος  $R$  παίρνει δυο τιμές ( $R = 22.5^\circ$  και  $R = 45^\circ$ ), θέτοντας δυο επίπεδα ακρίβειας για τις διευθύνσεις του μοντέλου: για  $R = 22.5^\circ$  το άνυσμα της προσομοιωμένης ταχύτητας στο σταθμό δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκεται στο τεταρτημόριο που ορίζει η σχέση (7.1) (μεγαλύτερη ακρίβεια – καλύτερη επαλήθευση) και για  $R = 45^\circ$ , στο αντίστοιχο ημικύκλιο (χαμηλότερη ακρίβεια του μοντέλου).

Το στατιστικό μέτρο που τελικά χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την ικανότητα προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος δίνεται από τη σχέση (7.2):

$$DirSkill = 100 \times \left( \frac{S}{N} \right) \quad (7.2)$$

όπου  $S$  είναι ο αριθμός των σωστών προσομοιώσεων διεύθυνσης ρεύματος και  $N$  ο συνολικός αριθμός μετρήσεων διεύθυνσης ρεύματος στο πεδίο στο ίδιο σημείο. Στον Πίνακα 7.4 συνοψίζονται οι τιμές του στατιστικού *DirSkill* για τους 6 σταθμούς δειγματοληψίας, στα βάθη που έγιναν ρευματομετρήσεις κατά την περίοδο προσομοίωσης.

**Πίνακας 7.4.** Ποσοστό % επιτυχίας της προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος στους σταθμούς δειγματοληψίας, όπως ποσοτικοποιείται από τη σχέση 7.2.

		<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>
<b>R=22.5°</b>	5m	83.3	58.3	71.4	66.7	71.4	58.3
	20m		75.0	71.4	66.7 (10m)	57.1	41.7
<b>R=45°</b>	5m	100.0	58.3	85.7	75.0	71.4	83.3
	20m		91.7	71.4	75.0 (10m)	57.1	50.0

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα είναι τα εξής:

- Γενικά, τα ποσοστά επιτυχούς προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος που μετρήθηκε στο πεδίο κυμαίνονται από υψηλά έως πολύ υψηλά (~60% - 100%). Πιο χαμηλή επιτυχία προσομοίωσης εμφανίζεται στα 20m του σταθμού M6.
- Παρατηρείται βαθμιαία αύξηση της επιτυχίας προσομοίωσης των διευθύνσεων πεδίου από βορρά προς νότο (από τον σταθμό M6 προς τον M1), και στα δυο βάθη μετρήσεων.
- Ο σταθμός M1 (στην περιοχή κοντά στον λιμένα) έχει τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος, (83% στο τεταρτημόριο και 100% στο ημικύκλιο που ορίζει η διεύθυνση πεδίου αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται και στην μορφολογία και τοπογραφία της περιοχής, που επιτρέπει την κυκλοφορία του νερού κυρίως στον άξονα βορειοανατολικά - νοτιοδυτικά.
- Γενικά, η επιφάνεια (5m) προσομοιώνεται πιστότερα από το βαθύτερο στρώμα (20m) (υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας), κάτι που πιθανόν οφείλεται στην επίδραση του ανέμου ως συνάρτηση φόρτισης που είναι εντονότερη και δρα αποτελεσματικά στον καθορισμό της διεύθυνσης του νερού. Αυτό δεν συμβαίνει στον M2, όπου οι διευθύνσεις στο επιφανειακό στρώμα αναπαράγονται με μικρότερη επιτυχία από ότι στο βαθύτερο στρώμα. Στον



σταθμό M4, οι διευθύνσεις μοντελοποιούνται με το ίδιο ποσοστό επιτυχίας στα 5 και 10m βάθος.

- Όπως είναι φυσικό, όσο ανοίγει το εύρος μέσα στο οποίο μια διεύθυνση μοντέλου θεωρείται σωστή (αύξηση του R), τόσο αυξάνονται τα ποσοστά επιτυχούς αναπαραγωγής των διευθύνσεων πεδίου από το μοντέλο. Αυτό δεν συμβαίνει στο σταθμό M5, στα 5m του M2 και στα 20m του M3.

Τονίζεται ότι τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου με δεδομένα πεδίου που είναι σημειακά στο χρόνο (δειγματοληψίες σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές) και αποτελούν καλές πρώτες ενδείξεις της ικανότητας του μοντέλου να αναπαράγει την ταχύτητα ρεύματος κάτω από τις δεδομένες συνθήκες. Για την πληρέστερη αξιολόγηση της λειτουργίας του μοντέλου απαιτούνται συνεχείς χρονικά σειρές δεδομένων πεδίου (χρονοσειρές μετρήσεων), όπως προκύπτουν π.χ. από έναν σταθερό πλωτήρα με ποντισμένους αισθητήρες, με τα οποία θα συγκριθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου.

#### Συζήτηση για το σφάλμα της προσομοιωμένης ταχύτητας ρεύματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σφάλμα του μέτρου ταχύτητας είναι μεγαλύτερο στο επιφανειακό στρώμα και είναι κυρίως θετικό, δηλαδή το μοντέλο υπερεκτιμάει το μέτρο του ρεύματος, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.3. Αυτό οφείλεται στην ατελή περιγραφή των μηχανισμών ανταλλαγής ενέργειας και συνακόλουθα των διεργασιών ανάμιξης σε αυτό το τμήμα της στήλης του νερού, όπως παρουσιάστηκε και στην παράγραφο 7.1.1 για τη θερμοκρασία. Αποδίδεται δε κατά κύριο λόγο στον μη – συνυπολογισμό κατά την προσομοίωση της δράσης των επιφανειακών κυμάτων και των διεργασιών που διέπουν τη δυναμική τους, καθώς είναι γνωστό ότι προκαλούν την ανάπτυξη ρευμάτων και αυξάνουν την ανάμιξη της στήλης του νερού κοντά στην επιφάνεια (Zhang et al. 2009).

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ανέμου, κυμάτων και ρεύματος καθορίζουν τις επιφανειακές ροές και την ανταλλαγή ορμής και ενέργειας μεταξύ ατμόσφαιρας και θάλασσας. Στην παρούσα εφαρμογή, η επιφανειακή διατμητική τάση του ανέμου, βασικός μηχανισμός διέγερσης που οδηγεί στην ανάπτυξη ανεμογενών ρευμάτων, παραμετροποιείται από τη σχέση 5.25 (κεφάλαιο 5), είναι συνάρτηση μόνο της ταχύτητας ανέμου, καθορίζεται από τον συντελεστή αντίστασης της τριβής ( $C_{dr}$ , surface drag coefficient) και δεν λαμβάνει υπόψη τα επιφανειακά κύματα. Ωστόσο, η δράση του ανέμου, με την μεταφορά ορμής από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα, οδηγεί στην ανάπτυξη και επιφανειακών κυμάτων. Δηλαδή στην πραγματικότητα,

μέρος της ορμής αυτής 'δεσμεύεται' για την ανάπτυξη επιφανειακών κυμάτων (Moon 2005, Bolaños et al. 2011), τα οποία με τη σειρά τους μεταβάλλουν τις παραμέτρους που καθορίζουν τη διατμητική τάση (τριβή) στην επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, πιθανώς υπερεκτιμάται η ορμή που διατίθεται για την ανάπτυξη του ανεμογενούς ρεύματος (μέσω του συντελεστή αντίστασης της τριβής  $C_d$  της σχέσης 5.25) και το μοντέλο παράγει προσομοιωμένες τιμές μέτρου ρεύματος μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο. Ο συνυπολογισμός των κυμάτων μέσω ενός διορθωμένου-αυξημένου συντελεστή αντίστασης τριβής ανέμου, που αντικατοπτρίζει την ενισχυμένη τραχύτητα (roughness) της επιφάνειας της θάλασσας λόγω αύξησης του ύψους κύματος (wave height), δείχνει να βελτιώνει την προσομοίωση του επιφανειακού ρεύματος (Zhang et al. 2009). Παράλληλα, τα επιφανειακά κύματα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά και το ρεύμα πάνω από τον πυθμένα, κυρίως σε περιοχές μικρού βάθους, καθώς τροποποιούν και τον συντελεστή αντίστασης της τριβής πυθμένα (bottom drag coefficient), αυξάνοντας την τριβή πυθμένα (Zhang et al. 2009).

Επιπρόσθετα, κατά την προσομοίωση δεν λαμβάνεται υπόψη μια σειρά από διεργασίες που σχετίζονται με την κυματική δράση και που παίζουν ρόλο στη συνδιαμόρφωση του πεδίου ταχυτήτων και της ανάμιξης. Ενδεικτικά αναφέρονται (Mellor et al. 2008, Gnanadesikan and Weller 1995) η μετατόπιση τύπου Stokes (Stokes drift), η μεταφορά ορμής από τα κύματα στα βαθύτερα στρώματα και στο επιφανειακό ρεύμα τόσο μέσω των τάσεων ακτινοβολίας (radiation stresses) όσο και μέσω μεταφοράς πίεσης (pressure transfer), η κυκλοφορία τύπου Langmuir, η απόσβεση κυματισμού (wave dissipation) που αποτελεί πηγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 7.1.1 για τη θερμοκρασία.

Εκτιμάται ότι η ικανότητα προσομοίωσης του επιφανειακού στρώματος από το μοντέλο θα αυξηθεί, περιορίζοντας το σφάλμα στην ταχύτητας ρεύματος, υλοποιώντας των παρακάτω:

(1) με την υιοθέτηση ενός βελτιωμένου μοντέλου τύρβης Mellor – Yamada που θα περιλαμβάνει την προσθήκη τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο επιφανειακό θαλάσσιο στρώμα από τη θραύση των επιφανειακών κυμάτων (Mellor and Blumberg 2004) και κυριότερα από την αλληλεπίδραση κυμάτων – ρευμάτων – τύρβης (Qiao et al. 2010, Huang et al. 2011), όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 7.1.1 για τη θερμοκρασία.

(2) με την προσθήκη – σύζευξη ενός κυματικού μοντέλου με το υδροδυναμικό μοντέλο (Mellor et al. 2008, Zhang et al. 2009, Bolaños et al. 2011). Το κυματικό

μοντέλο, υπολογίζοντας το ύψος κύματος, θα χρησιμεύει στον προσδιορισμό 'διορθωμένου' συντελεστή επιφανειακής αντίστασης τριβής (surface drag coefficient  $C_d$ ) αλλά και διορθωμένου συντελεστή αντίστασης τριβής πυθμένα (bottom drag coefficient). Παράλληλα, παραμετροποιώντας όσο το δυνατό περισσότερες από τις διεργασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, θα αυξήσει την ικανότητα περιγραφής του πεδίου ταχυτήτων και της ανάμιξης ιχνηλατών, σωματιδίων, ρυπαντών κλπ.

Τέλος, εκτιμάται ότι το λεγόμενο σφάλμα οριζόντιας βαθμίδας πίεσης (horizontal pressure gradient error), που είναι εγγενές χαρακτηριστικό των μοντέλων που χρησιμοποιούν το σύστημα των σίγμα-συντεταγμένων (terrain-following models) και μπορεί να δημιουργήσει ψευδή πεδία ταχυτήτων (artifacts, velocity errors), είναι αμελητέο και δεν συνεισφέρει στο σφάλμα του μέτρου ταχύτητας που παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3. Και αυτό γιατί ισχύουν εκείνες οι προϋποθέσεις που εφαρμόζονται ως απλές λύσεις για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος οριζόντιας βαθμίδας πίεσης (Mellor et al. 1994, 1998):

- (α) η διακριτική ικανότητα (resolution – discretization) του πλέγματος είναι πολύ υψηλή, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διάσταση,
- (β) κατά την εκτέλεση του κώδικα, πριν τον υπολογισμό του βαροκλιτικού σκέλους στον όρο της οριζόντιας βαθμίδας πίεσης, αφαιρείται η αρχική κατανομή πυκνότητας, μια τεχνική που μειώνει κατά πολύ το συγκεκριμένο σφάλμα,
- (γ) το ανάγλυφο του πυθμένα είναι ήπιο, χωρίς εξάρσεις και μεγάλες διαφορές βαθυμετρίας μεταξύ γειτονικών κελιών που αυξάνουν το συγκεκριμένο σφάλμα.
- (δ) Επιπλέον, το σφάλμα οριζόντιας βαθμίδας πίεσης εξαρτάται από το ιξώδες του μοντέλου: μεγαλύτερος συντελεστής ιξώδους ( $A_M$  – viscosity) και μικρότερος συντελεστής διάχυσης ( $A_H$  – diffusivity) μειώνουν το συγκεκριμένο σφάλμα. Στην παρούσα εργασία, οι δυο συντελεστές συνδέονται με τη σχέση  $A_H/A_M=0.2$  (Ezer 2011, [http://www.fio.org.cn/english/training\\_center/training\\_courses/ppts/Ezer\\_Training\\_Part01.pdf](http://www.fio.org.cn/english/training_center/training_courses/ppts/Ezer_Training_Part01.pdf) ).

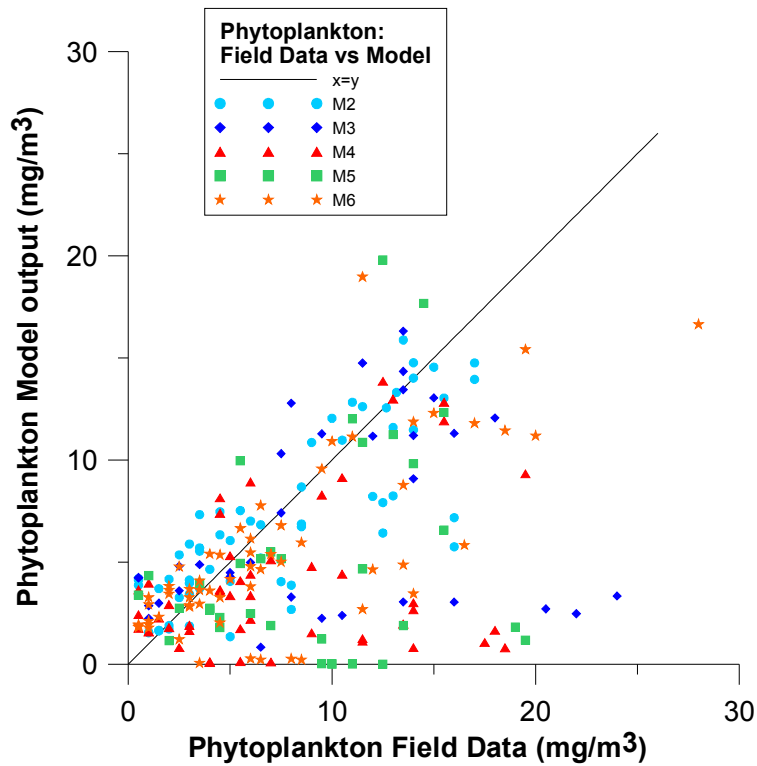
## 7.2. Επαλήθευση και ποσοτικοποίηση σφαλμάτων οικολογικών μεταβλητών.

### 7.2.1. Φυτοπλαγκτονικός άνθρακας

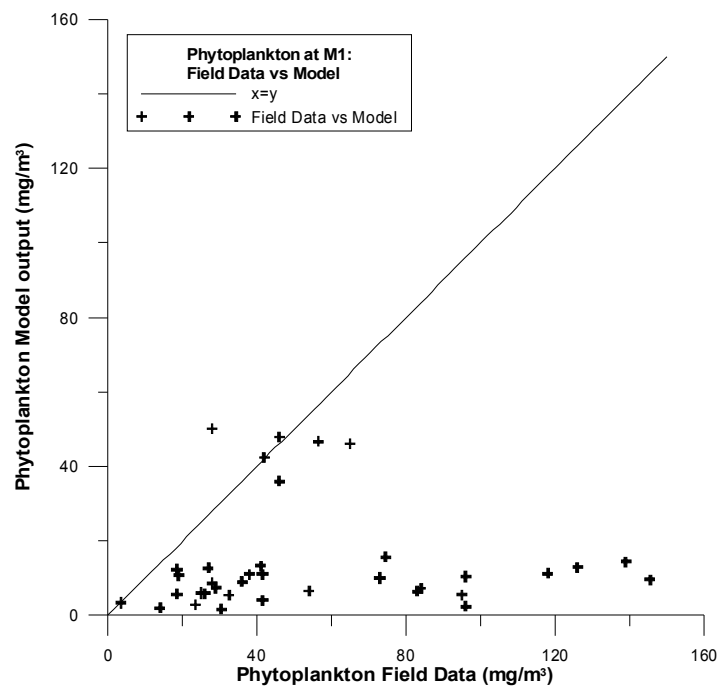
Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτονικής βιομάζας ως άνθρακα που υπολογίζει το μοντέλο προς τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των σημείων βρίσκεται κατά μήκος της ευθείας  $x = y$  και εκατέρωθεν αυτής, υποδηλώνοντας γενικά καλή λειτουργία του μοντέλου. Υπάρχουν ωστόσο και αρκετά σημεία, που αντιστοιχούν σε μετρήσεις πεδίου από όλους τους σταθμούς και από ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων, τα οποία βρίσκονται αρκετά κάτω από την ευθεία  $x=y$ . Αυτό φανερώνει ότι το μοντέλο σε αρκετές περιπτώσεις υποεκτιμάει τη συγκέντρωση φυτοπλαγκτού, όπως δείχνουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα στο σχήμα Π11.16 στο τέλος του παραρτήματος 8, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μοντέλου μαζί με τα δεδομένα πεδίου συναρτήσε του χρόνου για όλους τους σταθμούς και τα βάθη, και επιβεβαιώνουν τα ποσοτικά μέτρα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μοντέλου μαζί με τα δεδομένα πεδίου συναρτήσε του χρόνου για τους σταθμούς M1, M2 και M6 σε βάθος 5m, 10m και κοντά στον πυθμένα στα 30m.

**Πίνακας 7.5.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης φυτοπλαγκτονικού άνθρακα στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

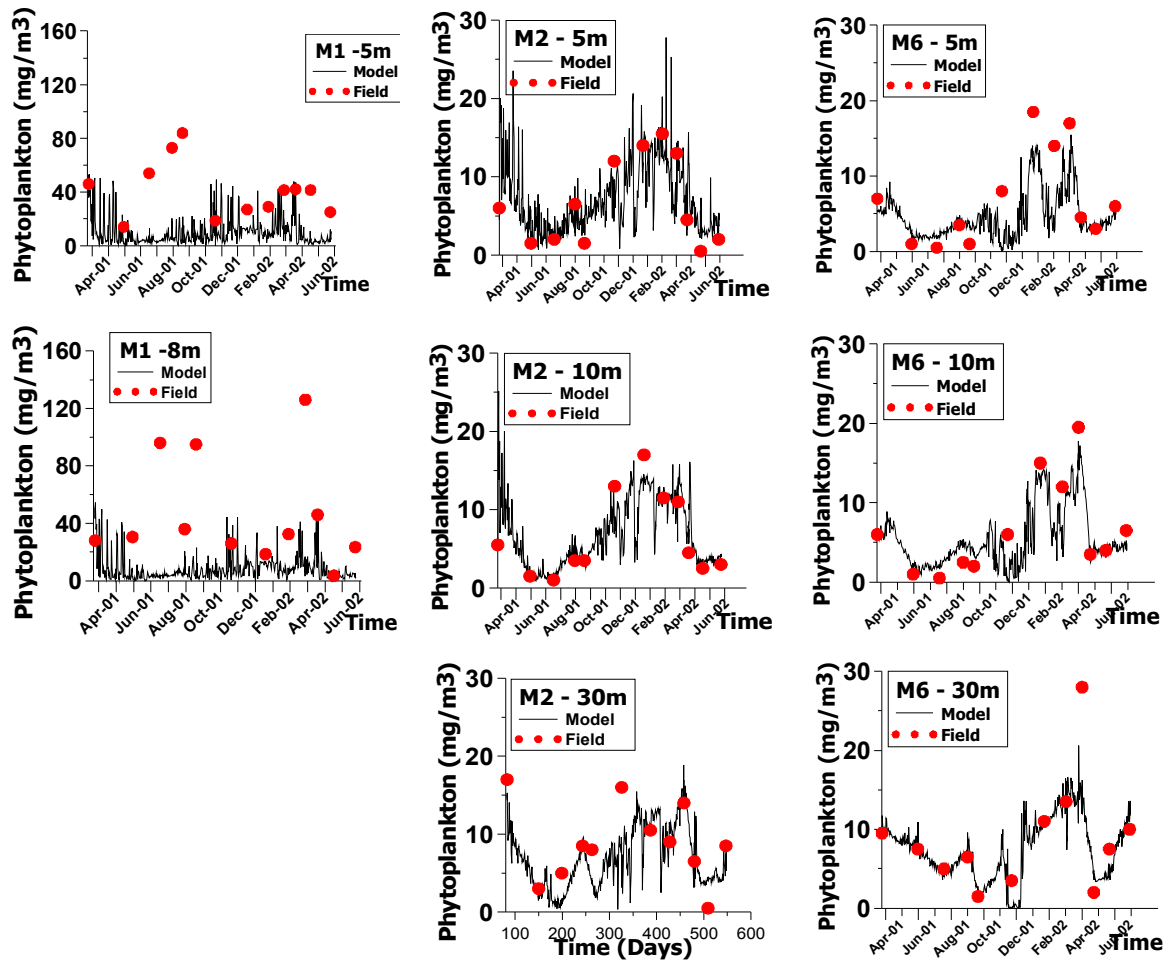
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	1.38	0.49	2.05	2.45	2.67	1.72
<b>Μέσο Σφάλμα (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>) (Mean error ή Bias)</b>	-34.0	-0.9	-3.1	-4.2	-5.2	-2.1
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	56.4	16.1	58.4	59.6	53.2	38.5
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	48	129	141	96	82	112
<b>RMS σφάλμα (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b>	41.2	3.1	5.7	5.5	8.3	4.0
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-3.5	0.5	-8.1	-11.1	-19.0	-8.1



**Σχήμα 7.9.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για τον φυτοπλαγκτονικό άνθρακα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) -εκτός του M1- και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).



**Σχήμα 7.9α.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για τον φυτοπλαγκτονικό άνθρακα για τον σταθμό M1 την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).



**Σχήμα 7.10.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση φυτοπλαγκτού στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

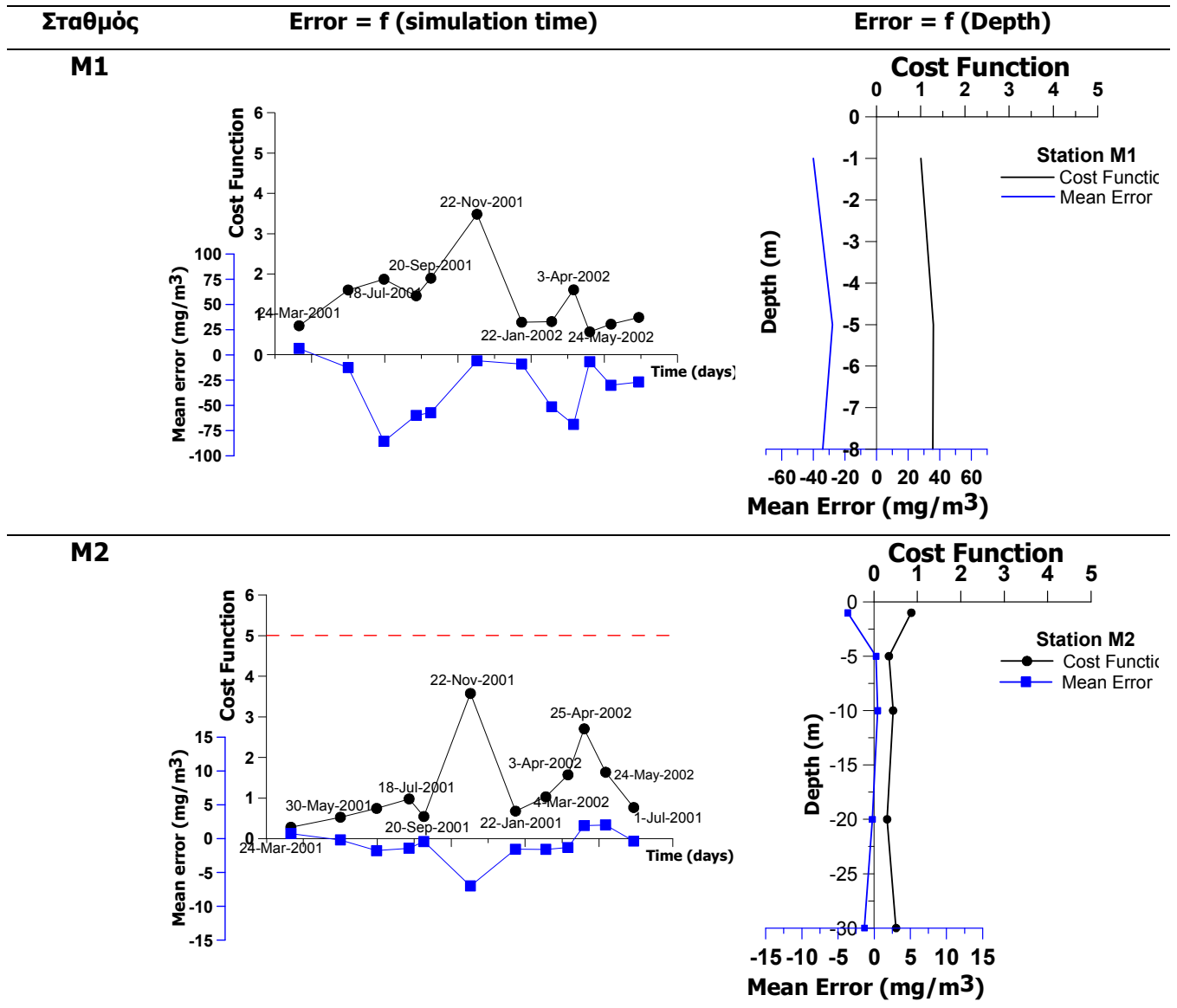
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διαγραμμάτων και ποσοτικών μέτρων είναι τα εξής:

- Η ικανότητα προσομοίωσης του ετήσιου κύκλου της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στην περιοχή μελέτης από το μοντέλο κυμαίνεται από πολύ καλή (πχ M2) έως καλή – μέτρια (πχ M5). Στην εύτροφη περιοχή του M1, το μοντέλο δείχνει να μην αποδίδει καλά (Σχήμα 7.9α και Σχήμα 7.10).
- Μια προσεκτική εξέταση των αποτελεσμάτων του πίνακα 7.5 σε συνδυασμό με τα διαγράμματα στο Σχήμα 7.10 για τον M1 δείχνει ότι η χρήση ενός μόνο στατιστικού για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης ενός μοντέλου μπορεί να είναι παραπλανητική: ενώ σύμφωνα με την συνάρτηση κόστους η προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα φυτοπλαγκτού πεδίου είναι «καλή», το Σχήμα 7.10 δείχνουν ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Τα υπόλοιπα μέτρα απλώς επιβεβαιώνουν ποσοτικά την 'κακή' προσαρμογή: μέσο

σφάλμα, % μέσο σφάλμα και RMS σφάλμα πολύ μεγαλύτερα από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς και η χαμηλότερη % σύγκλιση.

- Οι επιδόσεις του μοντέλου στο σταθμό M1, που έχει χαρακτηριστεί εύτροφος, είναι οι λιγότερο καλές. Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από  $-85.7$  έως  $6.4 \text{ mg/m}^3$  (Σχήμα 7.11 αριστερή στήλη) με μέση τιμή  $-34 \text{ mg/m}^3$ . Φαίνεται πως το οικολογικό σκέλος του μοντέλου, που βαθμονομήθηκε με δεδομένα προερχόμενα από ολιγότροφα νερά, αδυνατεί να αναπαράγει την δυναμική της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας σε τροφικά επίπεδα αρκετά υψηλότερα από τα ολιγότροφα. Ιδιαίτερα, το μοντέλο αποτυγχάνει να προσομοιώσει συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού πάνω από  $60 \text{ mg/m}^3$ , όπως αυτές που μετρήθηκαν στον M1 τη θερινή περίοδο του 2001 και την εαρινή-θερινή περίοδο του 2002 (Σχήμα 7.10 και Σχήμα Π11.16).
- Οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου σημειώνονται στον σταθμό M2, από τον οποίον χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα για την βαθμονόμηση του μοντέλου: συνάρτηση κόστους «πολύ καλή», το μικρότερο μέσο και RMS σφάλμα και μέσο σφάλμα % «εξαιρετικό» (Σχήμα 7.10 και 7.11). Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από  $-7$  έως  $2 \text{ mg/m}^3$  (Σχήμα 7.11) με μέση τιμή  $-0.9 \text{ mg/m}^3$ .
- Ακολουθεί ο M6 με καλή προσαρμογή μοντέλου στα δεδομένα πεδίου σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους και το μέσο % σφάλμα. Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από  $-7.2$  έως  $1 \text{ mg/m}^3$  (Σχήμα 7.11 δεξιά) με μέση τιμή  $-2.1 \text{ mg/m}^3$ . Από το Σχήμα Π11.16 φαίνεται ότι τα βάθη των 10, 20 και 30m προσομοιώνονται καλύτερα από την επιφάνεια (1 και 5m). Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 7.11, όπου παρουσιάζεται γραφικά το προφίλ του μέσου σφάλματος.
- Έπονται οι M3, M4 και M5 με συνάρτηση κόστους 'καλή -μέτρια', ενώ σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα και την ικανότητα μοντέλου η προσαρμογή χαρακτηρίζεται κακή. Στους σταθμούς αυτούς, υπάρχει αρκετά μεγάλη απόκλιση μεταξύ μοντέλου – δεδομένων πεδίου στις 22 Νοε 2001, οπότε το μοντέλο παρουσιάζει διαφορετική τάση από αυτή που υποδεικνύουν οι μετρήσεις πεδίου. Για τον M4 (και την επιφάνεια του M5), το ίδιο συμβαίνει κατά την χρονική περίοδο γύρω στις 4 Μαρ 2002: ενώ οι τιμές πεδίου υποδεικνύουν φυτοπλαγκτονική έξαρση, το μοντέλο δεν την αναπαράγει, αντίθετα υπολογίζει χαμηλές τιμές φυτοπλαγκτονικών συγκεντρώσεων. Στο παράρτημα 8, στα διαγράμματα μέσου σφάλματος συναρτήσεως του βάθους,

φαίνεται ότι το σφάλμα του μοντέλου είναι μεγαλύτερο στο 1m και κοντά στον πυθμένα. Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται και για τους τρεις αυτούς σταθμούς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -16 έως  $2.6 \text{ mg/m}^3$ .



**Σχήμα 7.11.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης φυτοπλακτονικού άνθρακα ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

- Σύμφωνα με το μέτρο της %σύγκλισης, η συγκέντρωση φυτοπλακτικού συνολικά υπερεκτιμάται λίγο από το μοντέλο στους σταθμούς M2, M3 και M6 ενώ τείνει συνολικά να υποεκτιμάται στους σταθμούς M4 και M5.



- Το μέτρο «ικανότητα μοντέλου» παίρνει τιμές που δεν θεωρούνται ικανοποιητικές από τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση τον σταθμό M2, όπου η ικανότητα χαρακτηρίζεται «καλή-πολύ καλή».

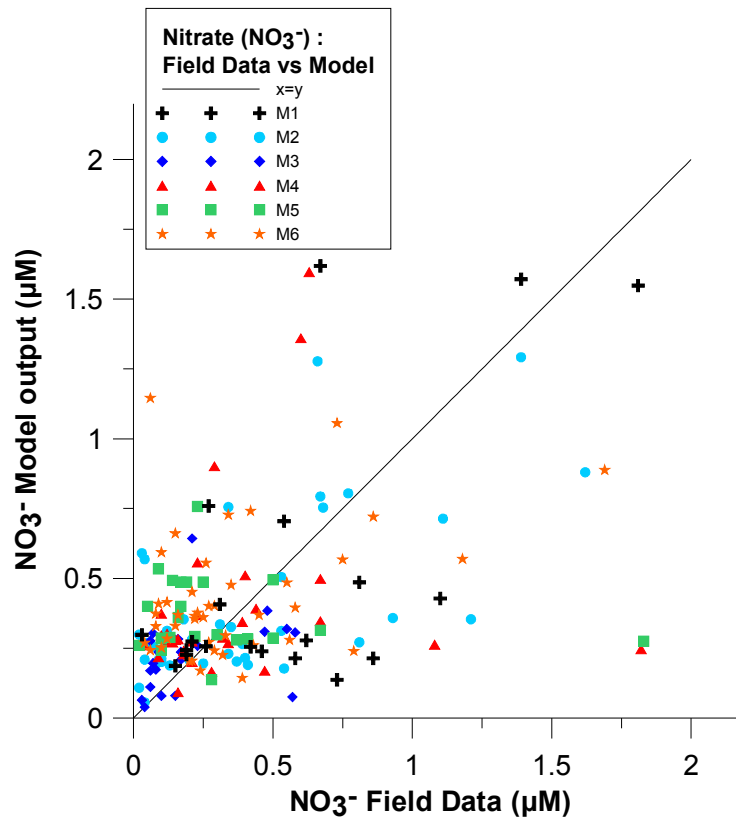
### 7.2.2. Νιτρικά άλατα

Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων που υπολογίζει το μοντέλο προς τη συγκέντρωση νιτρικών αλάτων που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Η μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων αντιστοιχεί σε συγκεντρώσεις νιτρικών κάτω των 0.75  $\mu\text{M}$  και βρίσκεται εκατέρωθεν της ευθείας  $x=y$ . Στις χαμηλότερες συγκεντρώσεις, ( $<0.25 \mu\text{M}$ ), το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμάει των μετρήσεων πεδίου. Για υψηλότερες συγκεντρώσεις νιτρικών (πάνω από 1  $\mu\text{M}$ ), το νέφος των σημείων παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά. Το διάγραμμα έχει γενικά σχήμα κώνου, δηλαδή όσο αυξάνεται η συγκέντρωση που καλείται να αναπαράγει το μοντέλο τόσο μικρότερη είναι η ακρίβειά του.

Τα ποσοτικά μέτρα του σφάλματος δίνονται στον Πίνακα 7.6 ενώ, στο Σχήμα 7.13 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μοντέλου μαζί με τα δεδομένα πεδίου συναρτήσει του χρόνου για τους σταθμούς M1, M2 και M6 σε βάθη 5m, 10m και κοντά στον πυθμένα στα 30m. Τα σχετικά διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς και βάθη παρατίθενται στο παράρτημα 8.

Από την ανάλυση διαγραμμάτων και ποσοτικών μέτρων για τις επιδόσεις του μοντέλου στην προσομοίωση των νιτρικών αλάτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

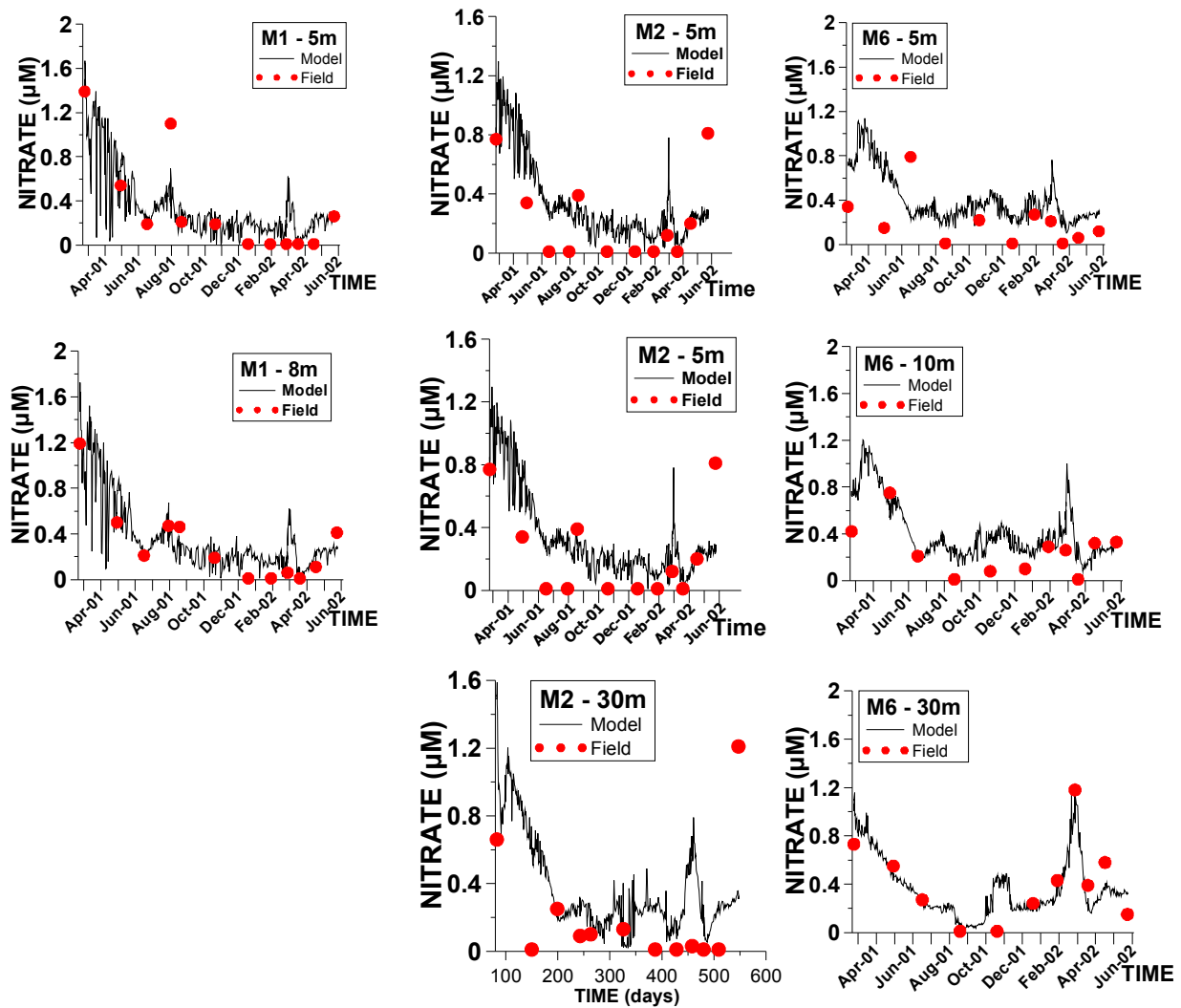
- Στο Σχήμα 7.13 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου ακολουθούν τις γενικές τάσεις των μετρήσεων πεδίου. Σε ορισμένους σταθμούς η προσομοίωση της διακύμανσης των νιτρικών βελτιώνεται με το βάθος: στους M1, M3, M5 και M6, τα βαθύτερα στρώματα τείνουν να προσομοιώνονται καλύτερα από τα επιφανειακά.



**Σχήμα 7.12.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση νιτρικών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

**Πίνακας 7.6.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

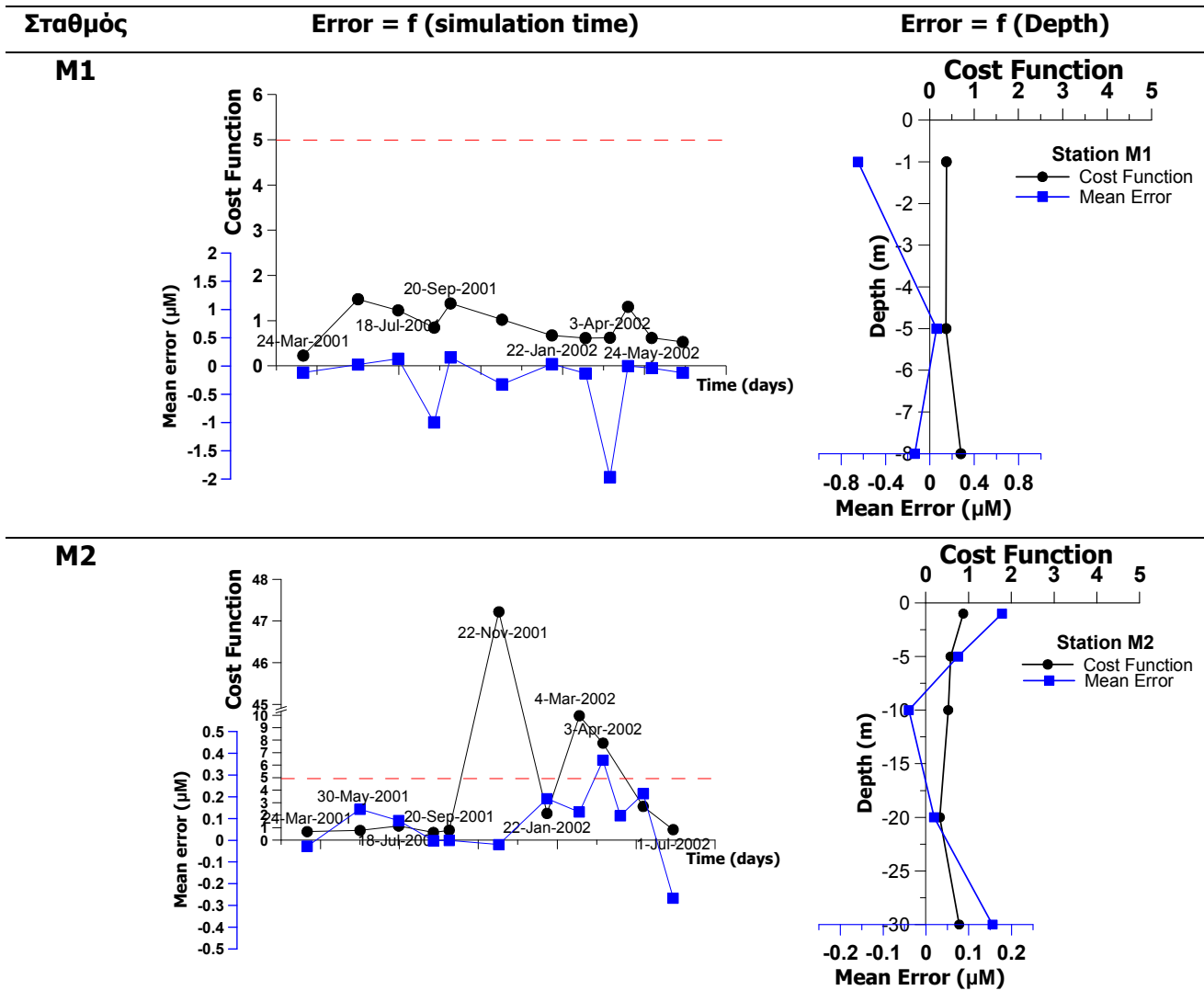
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	0.88	2.74	1.48	1.46	1.77	1.18
<b>Μέσο Σφάλμα (μM) (Mean error ή Bias)</b>	-0.24	0.08	-0.06	0.09	0.19	0.12
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	39.0	41.4	40.9	39.0	77.0	71.8
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	85	154	155	153	191	193
<b>RMS σφάλμα (μM)</b>	0.97	0.29	0.34	0.37	0.29	0.28
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	0.12	-11.54	-4.57	-3.46	-4.44	-1.74



**Σχήμα 7.13.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση νιτρικών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

- Παρατηρούνται αστοχίες του μοντέλου, όπως η αύξηση των νιτρικών που υπολογίζεται γύρω από την 3<sup>η</sup> Απρ 2002 στους M1 και M2. Ενώ η αύξηση αυτή δεν επαληθεύεται από τα δεδομένα πεδίου των δύο αυτών σταθμών, εντούτοις είναι εμφανής στα δεδομένα πεδίου των υπολοίπων σταθμών, ιδιαίτερα των βαθύτερων στρωμάτων.
- Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται από τις τιμές της συνάρτησης κόστους ως «πολύ καλή» για το σταθμό M1, «καλή» για τους σταθμούς M3, M4, M5 και M6, ενώ ως «μέτρια» για τον M2. Σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, η προσομοίωση στους σταθμούς M1, M2, M3 και M4 χαρακτηρίζεται οριακά καλή.

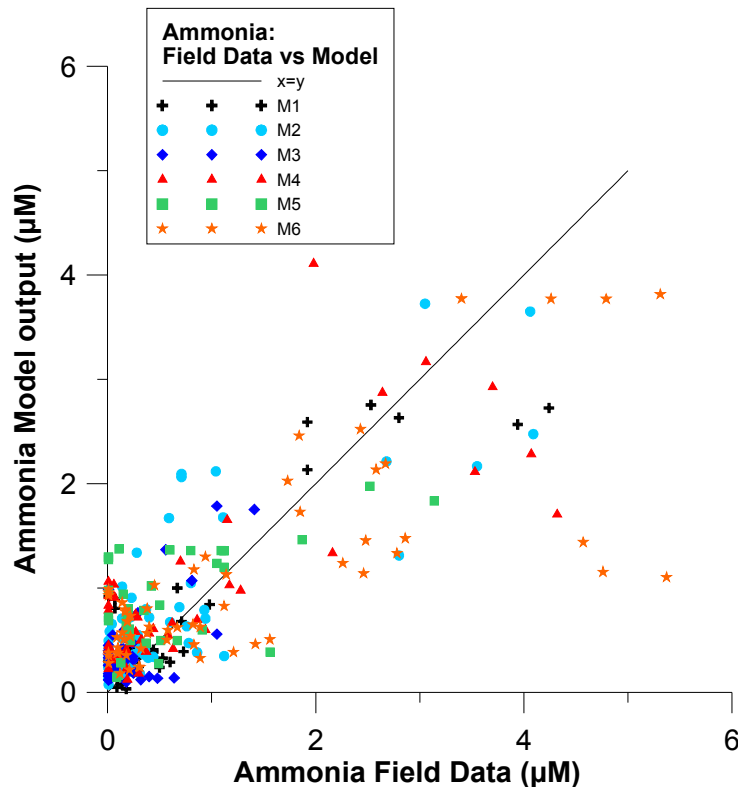
- Για τον M1, η χρήση ενός μόνο στατιστικού για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης του μοντέλου δεν είναι αρκετή, όπως προαναφέρθηκε και για την προσομοίωση του φυτοπλαγκτού: ενώ σύμφωνα με την συνάρτηση κόστους η προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα νιτρικών πεδίου είναι «πολύ καλή», το μέσο σφάλμα και το RMS σφάλμα είναι τα μεγαλύτερα σε σχέση με τους άλλους σταθμούς, ενώ σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, η προσαρμογή οριακά χαρακτηρίζεται καλή. Ο M1 είναι ο μοναδικός σταθμός στον οποίον το μοντέλο τείνει να υποεκτιμά τα δεδομένα πεδίου (% σύγκλιση και Σχήμα 7.14). Όπως και με την προσομοίωση των συγκεντρώσεων αμμωνίας που παρουσιάζεται παρακάτω, οι συγκεντρώσεις νιτρικών που υπολογίζει το μοντέλο παρουσιάζουν έντονη διακύμανση κατά τους 2 πρώτους μήνες της προσομοίωσης. Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -1.97 έως 0.15  $\mu\text{M}$  (Σχήμα 7.14 δεξιά), με μέση τιμή -0.24  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.6). Το μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται στην επιφάνεια.
- Στο σταθμό M2, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -0.27 έως 0.37  $\mu\text{M}$  (Σχήμα 7.14 δεξιά), με μέση τιμή 0.08  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.6). Το μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται στην επιφάνεια και κοντά στον πυθμένα.
- Στο σταθμό M3, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -0.40 έως 0.14  $\mu\text{M}$ , με μέση τιμή -0.06  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.6). Το μεγαλύτερο (αρνητικό) σφάλμα παρατηρείται στην επιφάνεια ενώ στην υπόλοιπη στήλη το μοντέλο υπερεκτιμάει τα νιτρικά.
- Τέλος, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -0.54 έως 0.32  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.09  $\mu\text{M}$  για τον M4, από -0.31 έως 0.27  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.19  $\mu\text{M}$  για τον M5 και από -0.08 έως 0.28  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.12  $\mu\text{M}$  για τον M6. Το μοντέλο υπερεκτιμάει τις συγκεντρώσεις νιτρικών στους σταθμούς αυτούς, περισσότερο στον M5 και M6, στους οποίους δείχνει να έχει παρόμοια συμπεριφορά.



**Σχήμα 7.14.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης νιτρικών αλάτων ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

### 7.2.3. Αμμωνιακά άλατα

Στο Σχήμα 7.15 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις αμμωνιακών αλάτων που υπολογίζει το μοντέλο προς τα αμμωνιακά που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.



**Σχήμα 7.15.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση αμμωνιακών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

Η μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων αντιστοιχεί σε συγκεντρώσεις κάτω του 1  $\mu\text{M}$  και βρίσκεται εκατέρωθεν της ευθείας  $x=y$ , ενώ διακρίνεται μικρή τάση για υπερεκτίμηση από το μοντέλο των συγκεντρώσεων αυτού του επιπέδου. Για υψηλότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακών (πάνω από 1.5  $\mu\text{M}$ ), το νέφος των σημείων παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά (άρα μικρότερη ακρίβεια του μοντέλου), σχετικά παράλληλη με την ευθεία  $x=y$ , εκατέρωθεν αυτής αλλά με τάση για υποεκτίμηση, ενώ το αρνητικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο σε απόλυτες τιμές από το θετικό.

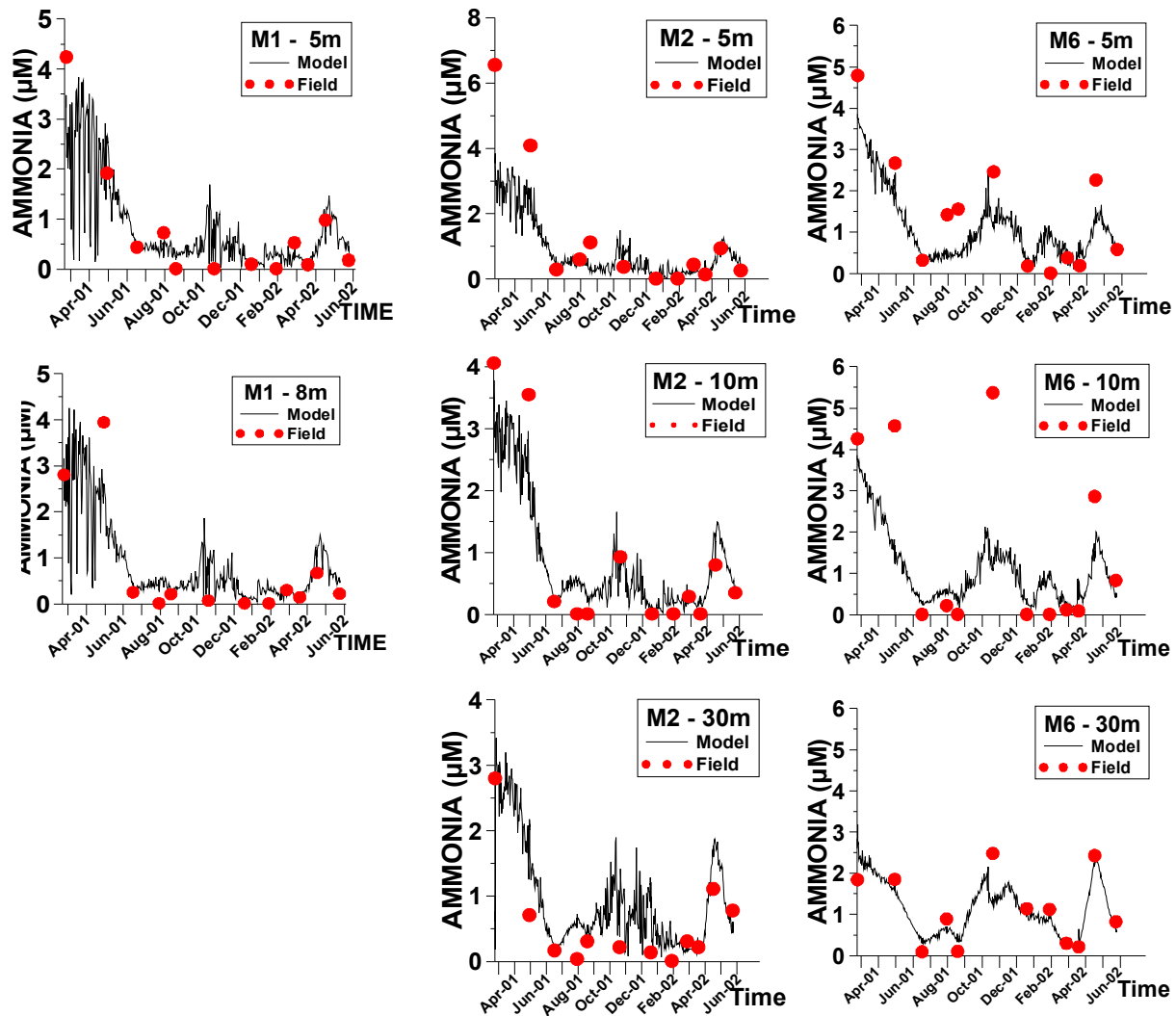
Τα ποσοτικά μέτρα του σφάλματος προσομοίωσης των νιτρικών δίνονται στον Πίνακα 7.7 ενώ, στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα μοντέλου μαζί με τα δεδομένα πεδίου ως συνάρτηση του χρόνου για τους σταθμούς M1, M2 και M6 σε βάθη 5m, 10m και κοντά στον πυθμένα στα 30m. Τα σχετικά διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς και βάθη παρατίθενται στο παράρτημα 8.

**Πίνακας 7.7.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης αμμωνιακών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	2.61	2.14	1.91	2.56	1.29	1.38
<b>Μέσο Σφάλμα (μM) (Mean error ή Bias)</b>	0.01	0.20	0.22	0.23	0.25	-0.22
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	46	115	56	183	67	53
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	127	215	164	253	195	172
<b>RMS σφάλμα (μM)</b>	0.38	0.75	0.3	0.81	0.66	0.91
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-2.4	-19.11	-5.82	-16.26	-2.27	-4.77

Επιπλέον συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διαγραμμάτων και ποσοτικών μέτρων για τις επιδόσεις του μοντέλου στην προσομοίωση των αμμωνιακών αλάτων είναι τα εξής:

- Η προσομοίωση της ετήσιας διακύμανσης δείχνει αρκετά καλή στο Σχήμα 7.16, στο οποίο φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου ακολουθούν τις γενικές τάσεις των μετρήσεων πεδίου.
- Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται «καλή» από τις τιμές της συνάρτησης κόστους για τους σταθμούς M3, M5 και M6, ενώ ως «μέτρια» για τους σταθμούς M1, M2 και M4. Σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, η συνάρτηση κόστους βρίσκεται κάτω από το μέγιστο αποδεκτό όριο της τιμής '5', με εξαίρεση την 22<sup>η</sup> Νοε 2001 για τον M1 και την 4<sup>η</sup> Μαρ 2002 για τον M4 (Σχήμα 7.17).



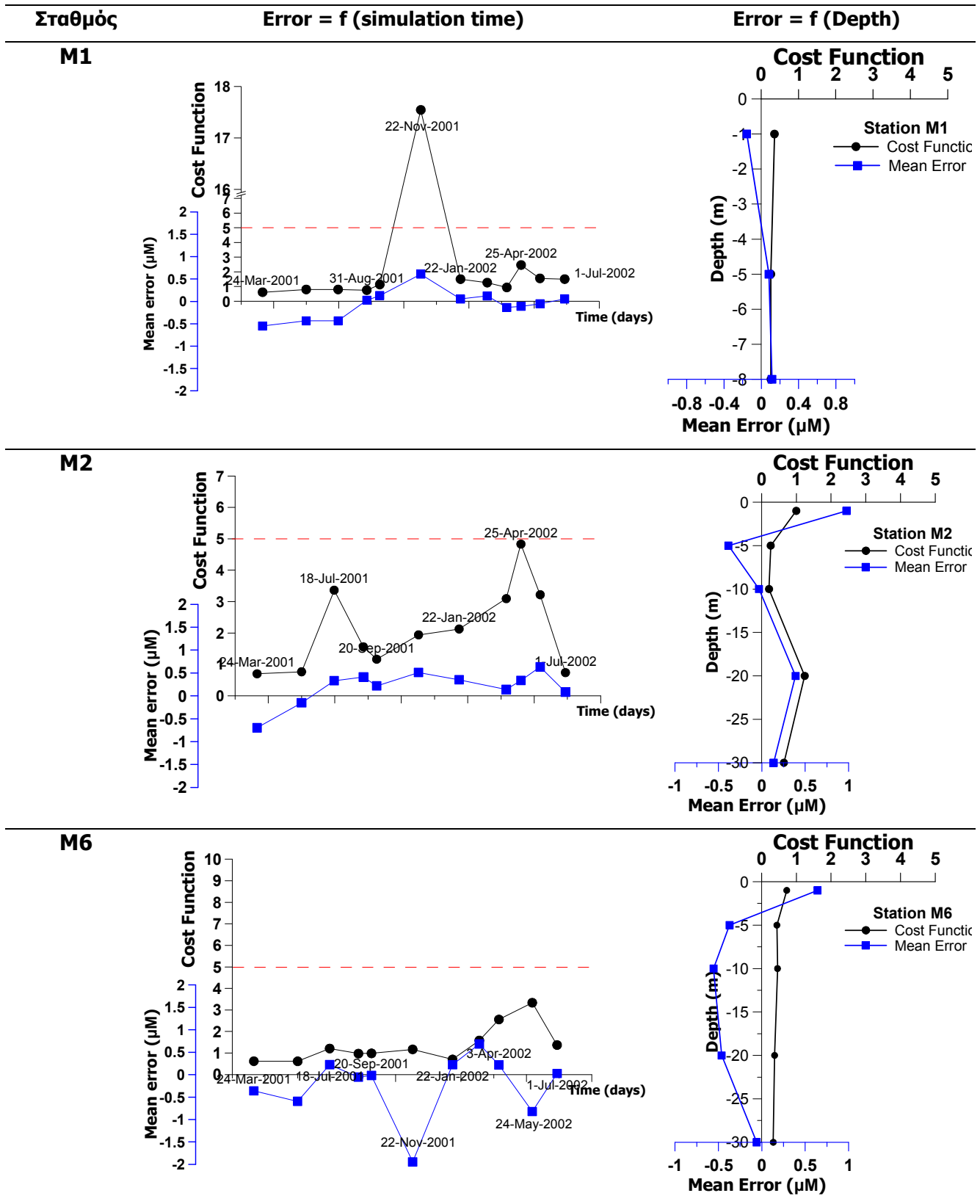
**Σχήμα 7.16.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση αμμωνιακών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

- Συνολικά, οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στους σταθμούς M1, M3, M5 και M6. Ακολουθεί ο M2 ενώ οι λιγότερο καλές στον M4.
- Το μοντέλο υπερεκτιμάει τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών με θετικό μέσο σφάλμα που κυμαίνεται από 0.2 έως 0.25 $\mu\text{M}$  στους σταθμούς M2, M3, M4 και M5 (Πίνακας 7.7). Τα προφίλ σφάλματος του Σχήματος 7.17 αλλά η % σύγκλιση το επιβεβαιώνουν.
- Στο σταθμό M1, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -0.55 έως 0.61  $\mu\text{M}$  (Σχήμα 7.17 δεξιά) δίνοντας πολύ μικρή μέση τιμή 0.01  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7). Οι συγκεντρώσεις αμμωνίας που υπολογίζει το μοντέλο παρουσιάζουν έντονη διακύμανση κατά τους 2 πρώτους μήνες της προσομοίωσης, κάτι που δεν παρατηρείται στους



υπόλοιπους σταθμούς. Επίσης, το μοντέλο υποδεικνύει αύξηση της αμμωνίας την περίοδο γύρω από τις 22 Νοε 2001. Ενώ οι μετρήσεις πεδίου δεν το επαληθεύουν, η τάση για μικρή αύξηση της αμμωνίας την περίοδο αυτή είναι εμφανής σε διάφορα βάθη των άλλων σταθμών (πχ M2 10m, M3, M5, M6). Υπενθυμίζεται ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με δεδομένα προερχόμενα από ολιγότροφο σταθμό.

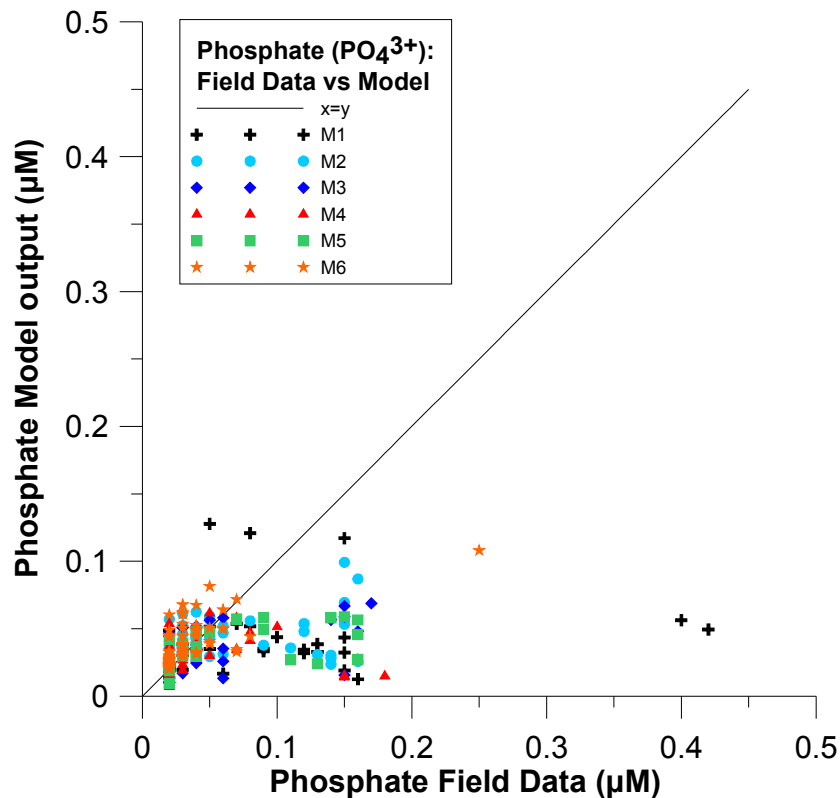
- Στο σταθμό M2, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης από -0.70 έως 0.63  $\mu\text{M}$  (Σχήμα 7.17 δεξιά), με μέση τιμή 0.20  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7). Το μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται στην επιφάνεια (1m) ενώ η καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου είναι στα 10m βάθος. Η υπερεκτίμηση της αμμωνίας σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά σημαντική, όπως δείχνουν και το % μέσο σφάλμα και η % σύγκλιση.
- Στο σταθμό M3, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περίπου από -0.28 έως 0.27  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.22  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7). Το σφάλμα τείνει να αυξάνεται με το βάθος.
- Στο σταθμό M4, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περίπου από -1.76 έως 0.71  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.23  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7). Το σφάλμα τείνει να αυξάνεται με το βάθος. Πρόκειται για το σταθμό τον οποίον το μοντέλο προσομοιώνει λιγότερο καλά.
- Στο σταθμό M5, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περίπου από -0.36 έως 0.62  $\mu\text{M}$  με μέση τιμή 0.25  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7), ενώ το σφάλμα τείνει να μειώνεται με το βάθος.
- Στο σταθμό M6, το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περίπου από -1.95 έως 0.68  $\mu\text{M}$  (Σχήμα 7.17 δεξιά), με μέση τιμή -0.22  $\mu\text{M}$  (Πίνακας 7.7). Είναι ο μόνος σταθμός όπου το μοντέλο υποεκτιμά τις μετρήσεις πεδίου αμμωνίας, εκτός από την επιφάνεια.



**Σχήμα 7.17.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **αμμωνιακών αλάτων** ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1, M2 και M6 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

#### 7.2.4. Φωσφορικά άλατα

Στο Σχήμα 7.18 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις φωσφορικών αλάτων που υπολογίζει το μοντέλο προς τα φωσφορικά που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.



**Σχήμα 7.18.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση φωσφορικών αλάτων για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

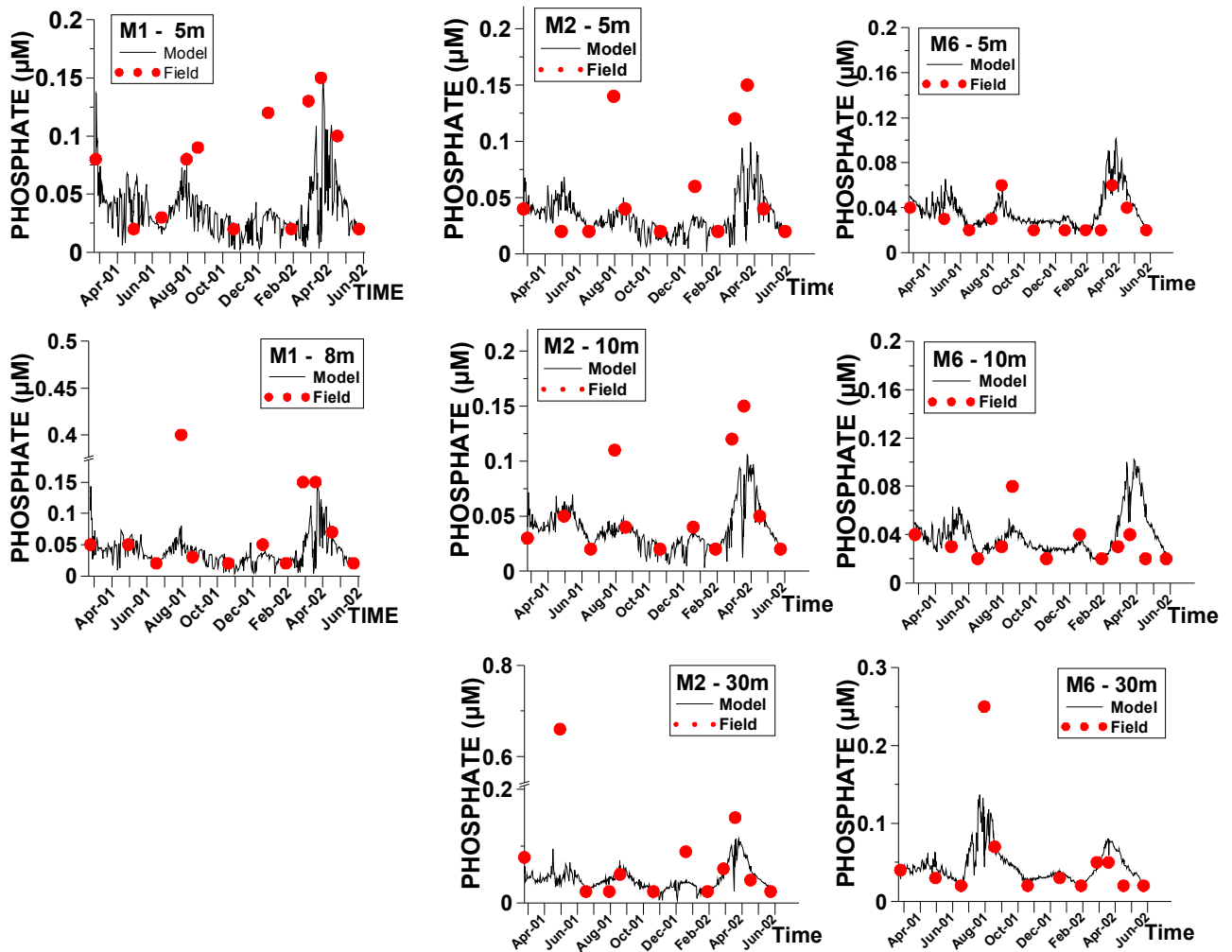
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι οι χαμηλές συγκεντρώσεις φωσφορικών έως περίπου  $0.07 \mu\text{M}$  προσομοιώνονται καλά, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις πεδίου υποεκτιμώνται από το μοντέλο, καθώς βρίσκονται κάτω από την ευθεία  $x=y$ . Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από τα ποσοτικά μέτρα του Πίνακα 7.8 (μέσο σφάλμα αρνητικό και %σύγκλιση  $< 100$  εκτός από τον M6) όσο και από τις κατακόρυφες κατανομές σφάλματος στους σταθμούς του Σχήματος 7.24. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διαγραμμάτων και ποσοτικών μέτρων για τις επιδόσεις του μοντέλου στην προσομοίωση φωσφορικών δίνονται στη συνέχεια.

Τα ποσοτικά μέτρα του σφάλματος προσομοίωσης των φωσφορικών δίνονται στον Πίνακα 7.8. Στο Σχήμα 7.19 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου ως συνάρτηση του χρόνου, ενδεικτικά για τους σταθμούς M1, M2 και M6 σε βάθη 5m, 10m και κοντά στον πυθμένα στα 30m. Παρόμοια διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς και βάθη παρατίθενται στο παράρτημα 8.

**Πίνακας 7.8.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης φωσφορικών αλάτων στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	1.85	1.75	1.31	1.88	1.85	0.97
<b>Μέσο Σφάλμα (μM) (Mean error ή Bias)</b>	-0.04	-0.03	-0.01	-0.02	-0.03	0.004
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	40.8	29.0	31.3	25.3	30.2	24.7
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	72	95	81	96	92	128
<b>RMS σφάλμα (μM)</b>	0.06	0.05	0.02	0.03	0.04	0.02
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-9.83	-18.59	-2.35	-11.43	-10.90	-1.24

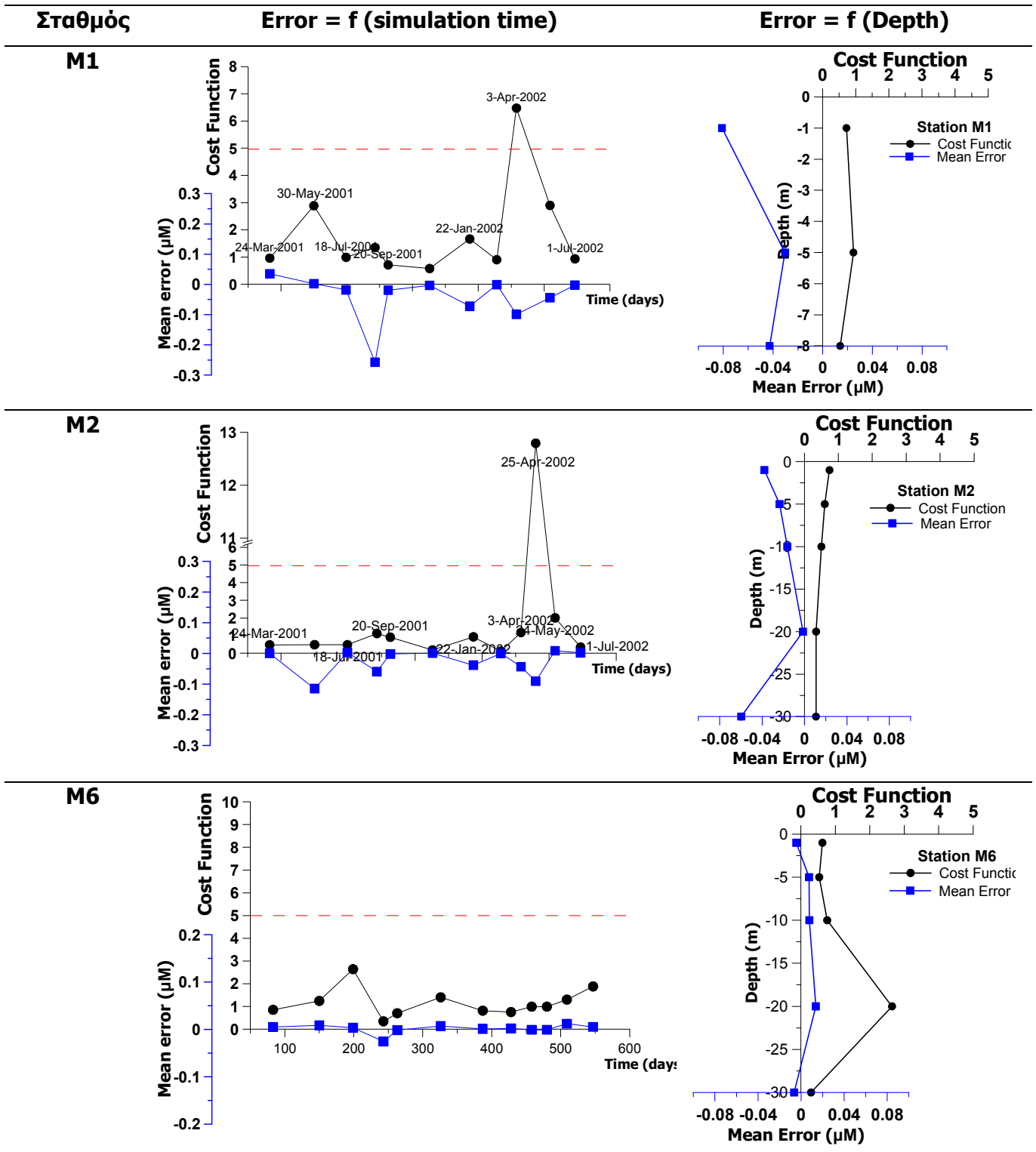
- Η προσομοίωση της ετήσιας διακύμανσης δείχνει αρκετά πετυχημένη στο Σχήμα 7.17 και συνολικά στο Σχήμα Π8.16 του παραρτήματος 8 όπου τα αποτελέσματα του μοντέλου ακολουθούν τις τάσεις που υποδεικνύουν οι μετρήσεις πεδίου, ενώ γενικά, βελτιώνεται με το βάθος: τα βαθύτερα στρώματα προσομοιώνονται καλύτερα από τα επιφανειακά. Υψηλές συγκριτικά τιμές σφάλματος κοντά στον πυθμένα που εμφανίζονται στα προφίλ ορισμένων σταθμών (πχ M2, – Σχήμα 7.20) οφείλονται σε μεμονωμένες υψηλές τιμές πεδίου που ανεβάζουν τις μέσες τιμές σφάλματος (πχ στις 30 Μαΐου 2001 στον M2).
- Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται «καλή» από τις τιμές της συνάρτησης κόστους και του μέσου % σφάλματος σε όλους τους σταθμούς, ενώ οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στον σταθμό M6, με πολύ μικρό θετικό σφάλμα, και οι λιγότερο καλές στον M1.



**Σχήμα 7.19.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση φωσφορικών στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

- Το μοντέλο τείνει να υποεκτιμάει τις συγκεντρώσεις των φωσφορικών με μέσο σφάλμα αρνητικό που κυμαίνεται από -0.01 έως -0.04  $\mu\text{M}$ , %σύγκλιση < 100 εκτός από τον M6 και μέσο % σφάλμα που κυμαίνεται από ~25% έως ~41%.
- Σε όλους τους σταθμούς εκτός του M6, το σφάλμα μεγιστοποιείται στις 25 Απρ 2002 (Σχήμα 7.20), οπότε μετρήθηκαν υψηλές συγκεντρώσεις πεδίου, τις οποίες όμως το μοντέλο τείνει να αναπαράγει (Σχήματα 7.19).
- Το μέσο σφάλμα και το εύρος στο οποίο κυμαίνεται για κάθε σταθμό έχει ως εξής: στον M1 από -0.26 έως 0.04  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή -0.04  $\mu\text{M}$ , στον M2 από -0.11 έως 0.01  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή -0.03  $\mu\text{M}$ , στον M3 από -0.09 έως 0.01  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή -0.01  $\mu\text{M}$ , στον M4 από -0.14 έως 0.01  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή -0.02  $\mu\text{M}$ , στον M5 από -0.10 έως 0.01  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή -0.03  $\mu\text{M}$ , στον M6 από -0.03 έως 0.01  $\mu\text{M}$  και μέση τιμή 0.004  $\mu\text{M}$ .

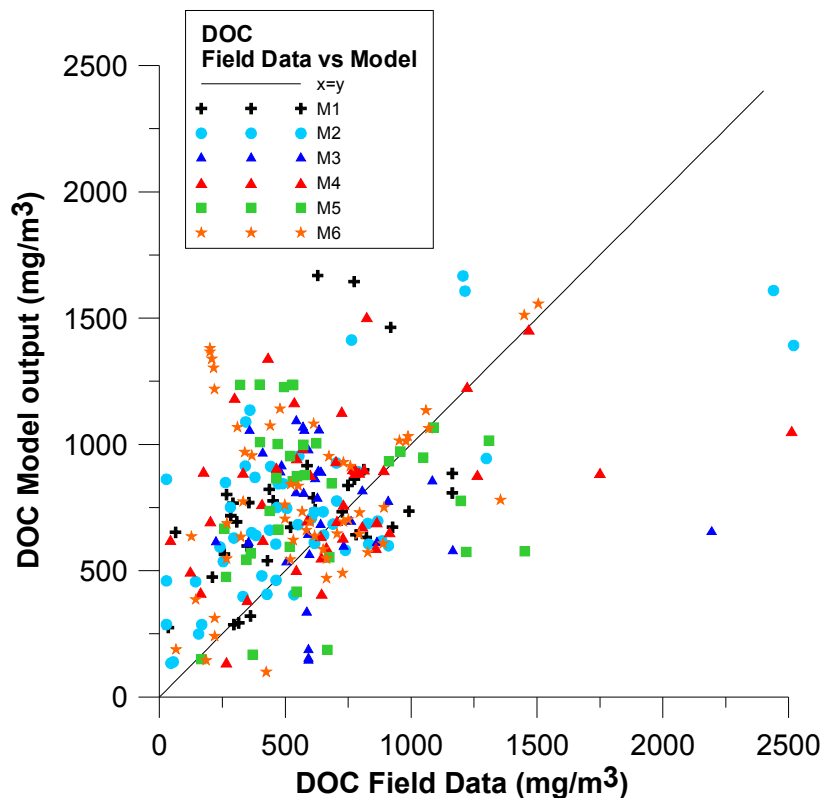
- Η αρκετά καλή αναπαραγωγή της κατανομής και διακύμανσης φωσφορικών αλάτων, που όπως έχει αναφερθεί αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα της φυτοπλαγκτονικής ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης, βοηθάει στην αρκετά καλή προσομοίωση της δυναμικής της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας που περιγράφηκε στη σχετική ενότητα.



**Σχήμα 7.20.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **φωσφορικών αλάτων** ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

### 7.2.5. Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας

Στο Σχήμα 7.21 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) που υπολογίζει το μοντέλο προς τις συγκεντρώσεις DOC που μετρήθηκαν στο πεδίο (διάγραμμα διασποράς) για όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας (για τα πρότυπα βάθη) και για όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Η πλειοψηφία των μετρήσεων πεδίου είναι κάτω από  $1000 \text{ mg/m}^3$ , ενώ το νέφος διασπείρεται εκατέρωθεν της ευθείας  $x = y$ , με τάση για υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης σε όλους τους σταθμούς (το θετικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο σε απόλυτες τιμές από το αρνητικό). Από το σχήμα του νέφους και την μεγάλη διασπορά των σημείων ως προς την ευθεία  $x = y$  φαίνεται ότι η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συγκέντρωσης DOC αποδίδει μέτρια.



**Σχήμα 7.21.** Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα για όλους τους σταθμούς (πρότυπα βάθη) και την περίοδο προσομοίωσης. Η ευθεία  $x = y$  υποδηλώνει απόλυτη ταύτιση (όσο πιο κοντά στην ευθεία είναι το νέφος των σημείων τόσο καλύτερη η προσομοίωση).

Τα ποσοτικά μέτρα του σφάλματος προσομοίωσης δίνονται στον Πίνακα 7.9. Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου



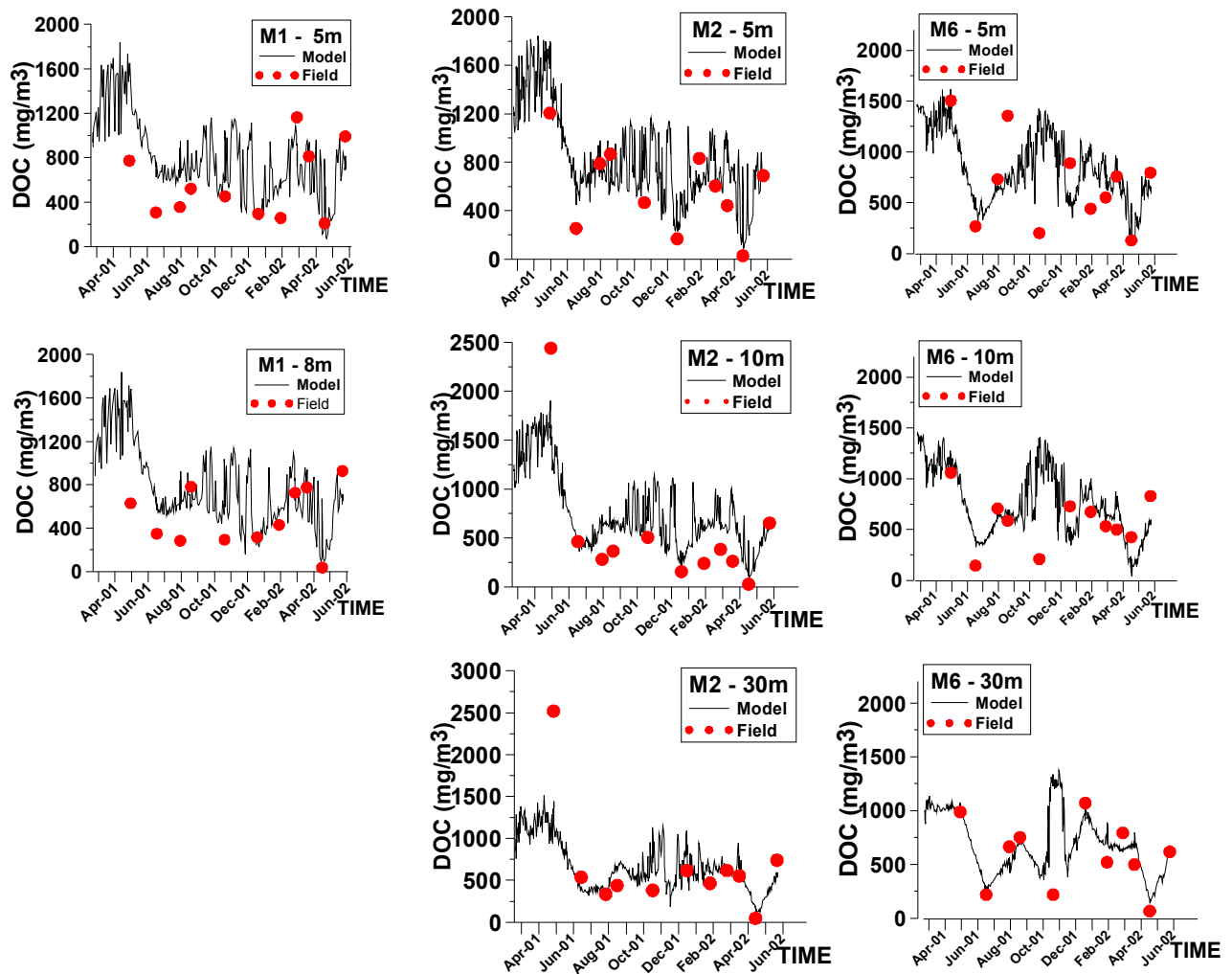
ως συνάρτηση του χρόνου, ενδεικτικά για τους σταθμούς M1, M2 και M6 σε βάθη 5m, 10m και κοντά στον πυθμένα στα 30m. Παρόμοια διαγράμματα για τους υπόλοιπους σταθμούς και βάθη παρατίθενται στο παράρτημα 8.

**Πίνακας 7.9.** Μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος προσομοίωσης της συγκέντρωσης διαλυμένου οργανικού άνθρακα στους σταθμούς δειγματοληψίας (μέση τιμή για όλη τη στήλη και τον χρόνο προσομοίωσης).

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>
<b>Συνάρτηση κόστους (cost function)</b>	3.2	4.4	2.5	1.6	2.7	1.7
<b>Μέσο Σφάλμα (mg/m<sup>3</sup>) (Mean error ή Bias)</b>	214.4	182.2	117.4	111.3	194.2	136.9
<b>Μέσο Σφάλμα % (Percentage Model Bias)</b>	40	34	53	56	48	32
<b>% σύγκλιση (Percentage Bias score)</b>	167	162	129	148	155	145
<b>RMS σφάλμα (mg/m<sup>3</sup>)</b>	333.8	373.6	145.2	364.5	430.1	351.8
<b>Ικανότητα μοντέλου (Model Efficiency)</b>	-32	0.05	-2.1	-5.0	-18.6	-10.0

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διαγραμμάτων και ποσοτικών μέτρων για τις επιδόσεις του μοντέλου στην προσομοίωση της δυναμικής του διαλυμένου οργανικού άνθρακα είναι:

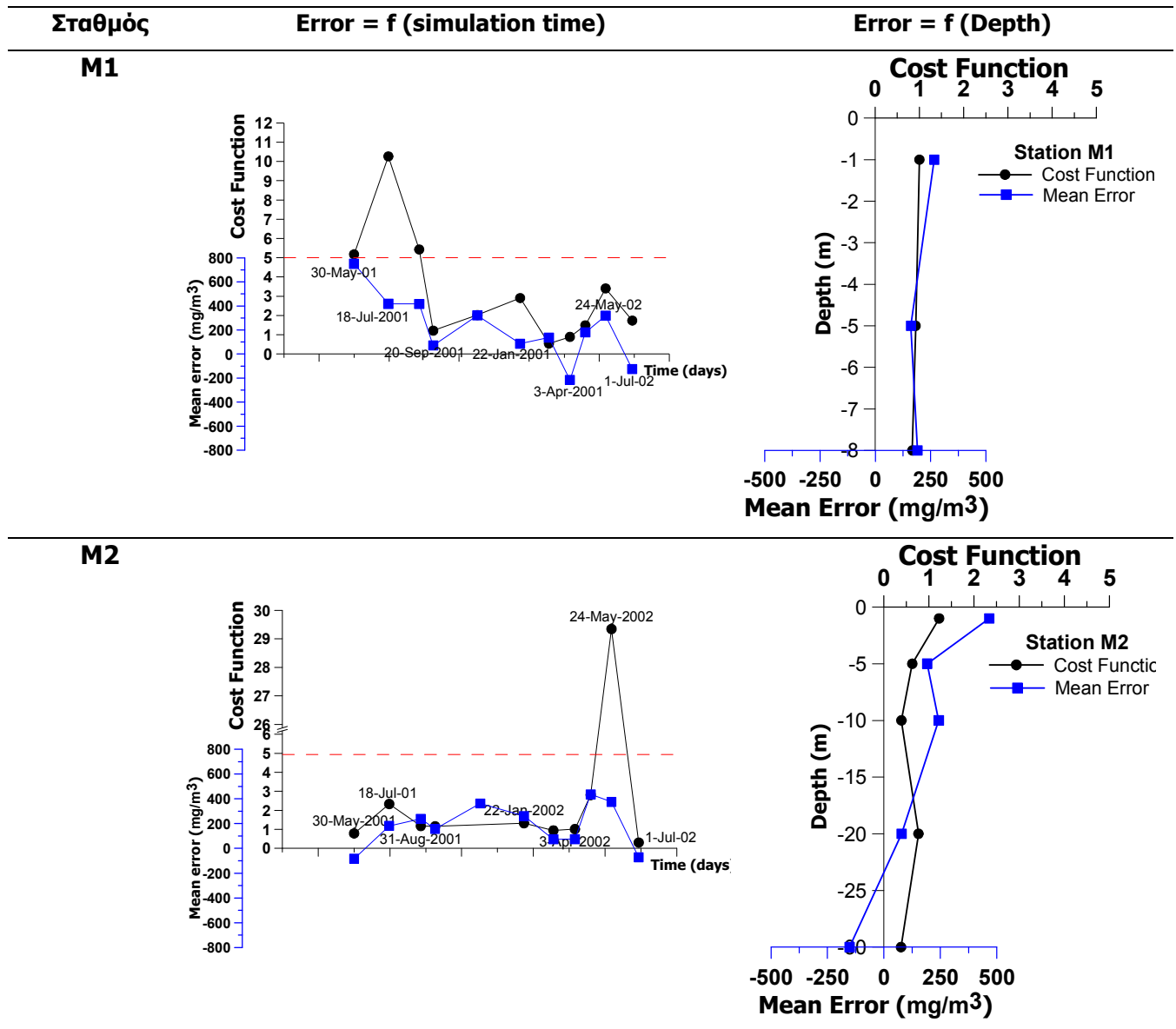
- Ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας είναι η μεταβλητή που αναπαράγεται λιγότερο καλά σε σχέση με τις άλλες μεταβλητές του οικολογικού μοντέλου. Η σχετικά απλή εξίσωση που επιλέχθηκε, δεν φαίνεται να περιγράφει επαρκώς και με ιδιαίτερη ακρίβεια την περίπλοκη δυναμική του DOC, η ετήσια διακύμανση του οποίου εξαρτάται από πληθώρα βιολογικών, χημικών και φυσικών διεργασιών. Παρόλα αυτά, οι γενικές τάσεις μεταβολής όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου, είναι αναγνωρίσιμες στα αποτελέσματα του μοντέλου (Σχήμα 7.22).
- Συνολικά οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου στην προσομοίωση του DOC σημειώνονται στους σταθμούς M3, M4 και M6, έπειτα στους M1 και M2 και τέλος στον M5 (Πίνακα 7.9).
- Σύμφωνα με την συνάρτηση κόστους, η προσομοίωση του DOC είναι «καλή» στους σταθμούς M4 και M6, ενώ στους υπόλοιπους χαρακτηρίζεται «μέτρια».



**Σχήμα 7.22.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου για τη συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα στα 5m, 10m και 30m βάθος στους σταθμούς M1, M2 και M6 για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002).

- Σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, η προσομοίωση του DOC είναι «καλή» στους σταθμούς M2 και M6, οριακά «καλή» στον M1 και κακή στους άλλους σταθμούς.
- Η τάση για υπερεκτίμηση του DOC από το μοντέλο διακρίνεται στο Σχήμα 7.22 και ποσοτικά επιβεβαιώνεται από το μέτρο της % σύγκλισης (σε όλους τους σταθμούς είναι μεγαλύτερη του 100) και τη μεταβολή του σφάλματος συναρτήσει του χρόνου και του βάθους (Σχήμα 7.23). Όπως και με την διακύμανση της συγκέντρωσης αμμωνίας, κατά την περίοδο γύρω από τις 22 Νοε 2001, το μοντέλο υποδεικνύει αύξηση DOC, κυρίως στους M3, M4, M5 και M6, κάτι που οι μετρήσεις πεδίου δεν επαληθεύουν.
- Τα προφίλ σφάλματος (Σχήμα 7.23 δεξιά) δείχνουν ότι η ικανότητα προσομοίωσης του μοντέλου τείνει να βελτιώνεται με το βάθος: το σφάλμα είναι μεγαλύτερο στην επιφάνεια σε σχέση με τον πυθμένα.

- Όπως είναι αναμενόμενο, η ικανότητα μοντέλου παίρνει τιμές που δεν θεωρούνται ικανοποιητικές από τη βιβλιογραφία.



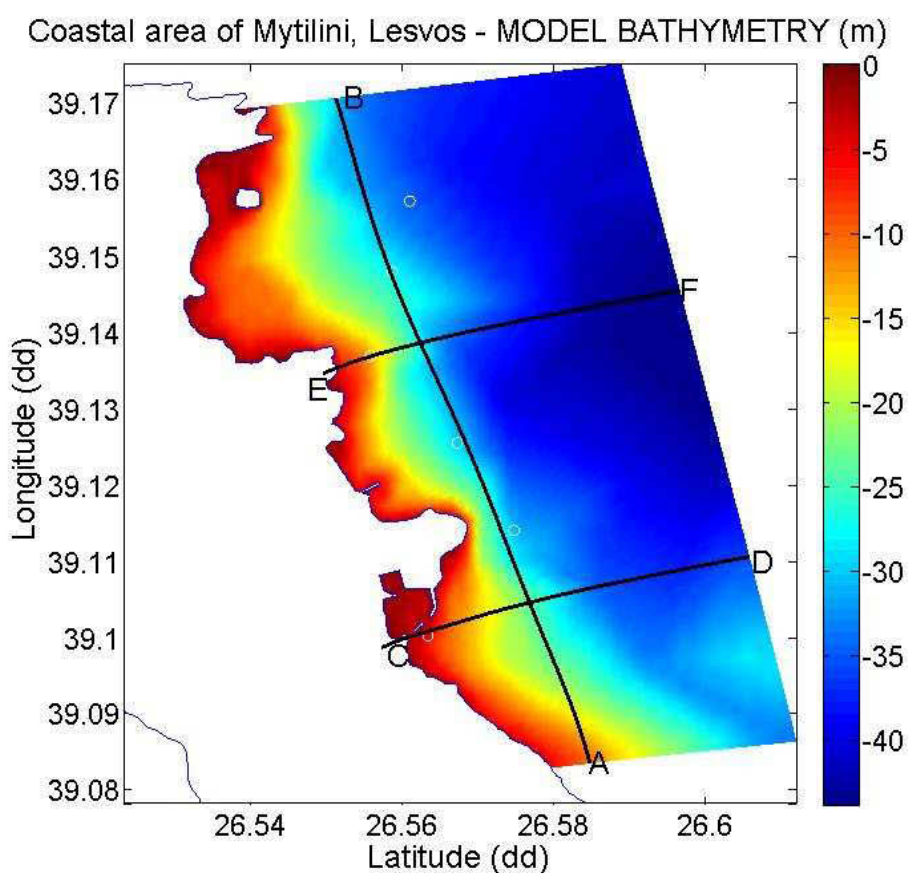
**Σχήμα 7.23.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα** ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς M1 και M2 - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στη στήλη νερού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### Προσομοιώσεις

#### 8.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα του μοντέλου από την προσομοίωση της δυναμικής της περιοχής μελέτης (Σχήμα 8.1) για την περίοδο 24 Μαρτίου 2001 – 1 Ιουλίου 2002 και εξάγονται βασικά συμπεράσματα για τη δομή και λειτουργία του συστήματος.



**Σχήμα 8.1.** Βαθυμετρία περιοχής μελέτης και οι καμπύλες A-B (παράλληλα με την ακτή), C-D και E-F (κάθετα προς την ακτή) κατά μήκος των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια κατακόρυφες κατανομές (τομές) των προσομοιωμένων μεταβλητών. Διακρίνονται επίσης οι σταθμοί δειγματοληψίας.

#### 8.2. Φυσικές μεταβλητές και πεδίο ταχυτήτων.

##### 8.2.1. Θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα

Οι προσομοιωμένες φυσικές μεταβλητές εξετάζονται με δύο τρόπους:

α. Παράλληλα με την ακτή

Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται προσομοιωμένες κατακόρυφες τομές της θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας (ως σίγμα-t) παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της γραμμής A-B (Σχήμα 8.1). Πρόκειται για 4 στιγμιότυπα με εποχιακή συχνότητα που δίνουν μια απεικόνιση (α) της δομής της στήλης νερού αντιπροσωπευτική των συνθηκών που επικρατούν τη συγκεκριμένη περίοδο και (β) των μεταβολών που υφίσταται το σύστημα κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου.

#### B. Κάθετα προς την ακτή

Το Σχήμα 8.3 παρουσιάζει προσομοιωμένες κατακόρυφες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας (ως σίγμα-t) στα αντίστοιχα 4 εποχιακά στιγμιότυπα κάθετα προς την ακτή σε δύο τομές:

- κατά μήκος της καμπύλης C-D που ξεκινάει από την περιοχή του λιμανιού της πόλης της Μυτιλήνης και
- κατά μήκος της καμπύλης E-F που ξεκινάει από την περιοχή εκβολής του αγωγού επεξεργασμένων λυμάτων του Σταθμού Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (Σχήμα 8.1).

Παράλληλα, παρουσιάζεται ως κατακόρυφη κατανομή και η συνιστώσα  $V$  της ταχύτητας του ρεύματος, δηλαδή η συνιστώσα του άξονα βορρά-νότου, κατά μήκος του οποίου κινείται κατά κύριο λόγο η μάζα του νερού λόγω της γεωμορφολογίας της ευρύτερης περιοχής. Στο Σχήμα 8.3, θετικές τιμές της συνιστώσας  $V$  της ταχύτητας ρεύματος (κόκκινο χρώμα) σημαίνουν κίνηση προς βορρά (από τον αναγνώστη προς τη σελίδα) ενώ αρνητικές τιμές (μπλε χρώμα), σημαίνουν κίνηση προς νότο (από τη σελίδα προς τον αναγνώστη).

---

Η προσομοίωση δείχνει ότι κυρίαρχο χαρακτηριστικό είναι η εποχικότητα που εκδηλώνεται με την ανάπτυξη θερμικής στρωμάτωσης κατά τους θερινούς, θερινούς μήνες (Σχήματα 8.2 και 8.3): η στήλη του νερού παρουσιάζει πλήρη κατακόρυφη ανάμιξη τους χειμερινούς, ψυχρούς μήνες (Ιανουάριο – Φεβρουάριο με θερμοκρασίες γύρω στους 14°C). Σταδιακά κατά τους εαρινούς μήνες, με την αύξηση της διάρκειας και έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας, αλλά και ευρύτερα με τη θέρμανση της ατμόσφαιρας, θερμότητα μεταφέρεται αρχικά σε όλη τη στήλη λόγω καλής κατακόρυφης ανάμιξης (πχ σχήμα 8.2 και 8.3, 4<sup>η</sup> Απρ 2001). Τον Μάιο και κυρίως τον Ιούνιο, καθώς τα επιφανειακά στρώματα θερμαίνονται έντονα πλέον και η διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας – βαθύτερου στρώματος αρχίζει να ξεπερνάει τους 4-5 °C, σταδιακά εξασθενεί η κατακόρυφη ανάμιξη οδηγώντας στο σχηματισμό του θερμοκλινούς και του αντίστοιχου πυκνοκλινούς. Η θερμική

στρωμάτωση είναι εντονότερη τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και στις αρχές Σεπτεμβρίου. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ επιφάνειας και πυθμένα παρατηρείται τον Ιούλιο, οπότε η επιφάνεια (25°C) μπορεί να είναι έως και 8 °C θερμότερη από τον πυθμένα (17 °C). Αντίστοιχα η πυκνότητα μεταξύ επιφάνειας (<27 Kg/m<sup>3</sup>) και πυθμένα (~29.2 Kg/m<sup>3</sup>) μπορεί να διαφέρει πάνω από 2.2 Kg/m<sup>3</sup>.

Η αντίδραση της παράκτιας θαλάσσιας μάζας στη φόρτιση από ανέμους που πνέουν παράλληλα με την ακτή περιλαμβάνει διεργασίες ανάδυσης και καταβύθισης (upwelling-downwelling), οι οποίες κατά τη θερμή περίοδο στρωμάτωσης γίνονται αντιληπτές ως μετατόπιση του θερμοκλινούς στον κατακόρυφο άξονα κοντά στο όριο της ακτής (Csanady, 1997). Οι τομές θερμοκρασίας και πυκνότητας κάθετα προς την ακτή που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.3 απεικονίζουν αυτό το φαινόμενο, δηλαδή την κλίση που μπορεί να σχηματιστεί στο θερμοκλινές/πυκνοκλινές.

Όταν στην ευρύτερη περιοχή πνέουν άνεμοι από βόρειες διευθύνσεις το επιφανειακό νερό κινείται συνολικά προς τα δεξιά της διεύθυνσης του ανέμου (όπως προβλέπει η θεωρία Ekman) και η συσσώρευση νερού κοντά στην ακτή πιέζει τις επιφανειακές μάζες να βυθιστούν βαθύτερα στη στήλη (καταβύθιση των επιφανειακών μαζών - downwelling). Το καλοκαίρι που το επιφανειακό νερό είναι θερμότερο, η βύθιση αυτή δημιουργεί κλίση του θερμοκλινούς, ανάλογη αυτής που φαίνεται στα Σχήματα 8.3 και 8.4β. Μακριά από την ακτή, στα ανοιχτά, το θερμοκλινές βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια και είναι πιο απότομο (ασθενέστερη κατακόρυφη ανάμιξη), ενώ προς την ακτή και όσο μικραίνει το ύψος της στήλης νερού, το θερμοκλινές βαθαίνει, καταλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της στήλης του νερού και η κατακόρυφη θερμοκρασιακή βαθμίδα είναι λιγότερο απότομη (εντονότερη κατακόρυφη ανάμιξη). Για παράδειγμα, την 1<sup>η</sup> Αυγ 2001 (Σχήμα 8.3), στα ανοιχτά (σε βάθη πυθμένα άνω των 35m), όπου το θερμοκλινές είναι πιο κοντά στην επιφάνεια, η θερμοκρασία πέφτει κατά 5°C στα πρώτα 5m βάθος (από τους 25°C στην επιφάνεια στους 20°C περίπου σε βάθος 5m). Κοντά στην ακτή (σε βάθη πυθμένα μικρότερα από 20m), η αντίστοιχη κατακόρυφη θερμοκρασιακή μεταβολή συμβαίνει στα πρώτα 10m και το θερμοκλινές εκτείνεται σε μεγαλύτερο βάθος στη στήλη.

Οι τυρβώδεις διεργασίες που επικρατούν στη στήλη του νερού σε μικρά βάθη και λαμβάνονται υπόψη από το υδροδυναμικό μοντέλο μέσω του υπομοντέλου τύρβης Mellor - Yamada συνεισφέρουν στη δημιουργία της παραπάνω δομής του θερμοκλινούς κοντά στην ακτή, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Σε παράκτιες περιοχές με μικρό βάθος, η ορμή μεταφέρεται κατακόρυφα (από πάνω προς τα κάτω μέσω των

διατμητικών τάσεων που ασκεί ο άνεμος στην επιφάνεια) πολλές φορές μέχρι τον πυθμένα, χωρίς να χάνεται μεγάλο μέρος της κινητικής ενέργειας, αναμιγνύοντας αποτελεσματικά τη στήλη του νερού (Haidvogel et al. 2000, Hearn 2008 p. 114). Όσο πιο μικρό το βάθος, τόσο πιο αποτελεσματική η ανάμιξη σε όλη τη στήλη. Αφετέρου, ο ρόλος του οριακού στρώματος του πυθμένα (bottom boundary layer) είναι σημαντικός (Dyke 2001, Mellor 2004, Hearn 2008) καθώς επιβραδύνει μεγάλο μέρος της στήλης νερού μέσω των διατμητικών τάσεων (τριβής) που αναπτύσσονται από την κίνηση του νερού πάνω από τον πυθμένα. Οι παραπάνω διεργασίες ανταλλαγή ορμής οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων βαθμίδων ταχύτητας (velocity shears) που αποτελούν πηγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας, και εν τέλει λειτουργούν ενάντια στη στρωματοποίηση διευκολύνοντας την κατακόρυφη ανάμιξη και την τυρβώδη διάχυση σε βαθύτερα στρώματα της θερμότητας, αλατότητας, θρεπτικών, σωματιδιακής ύλης, ρυπαντών κλπ.

Οι Wijesekera et al. (2003) μελετώντας με τη χρήση του POM την επίδραση που έχει η επιλογή του σχήματος κλεισίματος της τύρβης (turbulence closure scheme) στην προσομοιωμένη ανεμογενή κυκλοφορία στην υφαλοκρηπίδα, ποσοτικοποίησαν την κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και την κατακόρυφη ανάμιξη στον παράκτιο χώρο. Χρησιμοποιώντας μια δισδιάστατη έκδοση του POM (κατακόρυφη τομή κάθετη προς την ακτή, όπως σχήμα 8.3) και τρία μοντέλα κλεισίματος τύρβης (μεταξύ των οποίων και το σχήμα Mellor – Yamada) κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

(α) όταν επικρατούν άνεμοι που ευνοούν την ανάδυση νερού (upwelling) το μεγαλύτερο μέρος της τυρβώδους ανάμιξης εντοπίζεται στο επιφανειακό στρώμα, στο οριακό στρώμα πυθμένα και στην περιοχή που αναπτύσσεται παράκτιο ρεύμα παράλληλα με την ακτή (coastal jet, βλ. παράγραφο 8.2.2 παρακάτω) και κυρίως προς τη μεριά της ακτής,

(β) όταν επικρατούν άνεμοι που ευνοούν την καταβύθιση νερού (downwelling) το μεγαλύτερο μέρος της τυρβώδους ανάμιξης εντοπίζεται στην περιοχή βύθισης του θερμοκλινούς/πυκνοκλινούς (μέτωπο) και κυρίως από τη μεριά της ακτής. Τα μεγαλύτερα ποσά τυρβώδους κινητικής ενέργειας και απόσβεσής της (dissipation) συγκεντρώνονται στην περιοχή όπου το μέτωπο συναντάει τον πυθμένα. Και στις δυο περιπτώσεις (ανάδυση – καταβύθιση), κύρια πηγή τυρβώδους ανάμιξης είναι η ανάπτυξη μεγάλων βαθμίδων ταχύτητας (shear-production), μηχανισμός ο οποίος παραμετροποιείται με συγκεκριμένο όρο στο μοντέλο τύρβης Mellor – Yamada (εξίσωση 5.14, δεξί σκέλος, δεύτερος όρος, Ezer 2000, Wijesekera et al. 2003). Τα συμπεράσματα της εργασίας των Wijesekera et al. (2003) σε συνδυασμό με την παραπάνω συζήτηση εξηγούν το σχήμα και τη δομή του θερμοκλινούς όπως

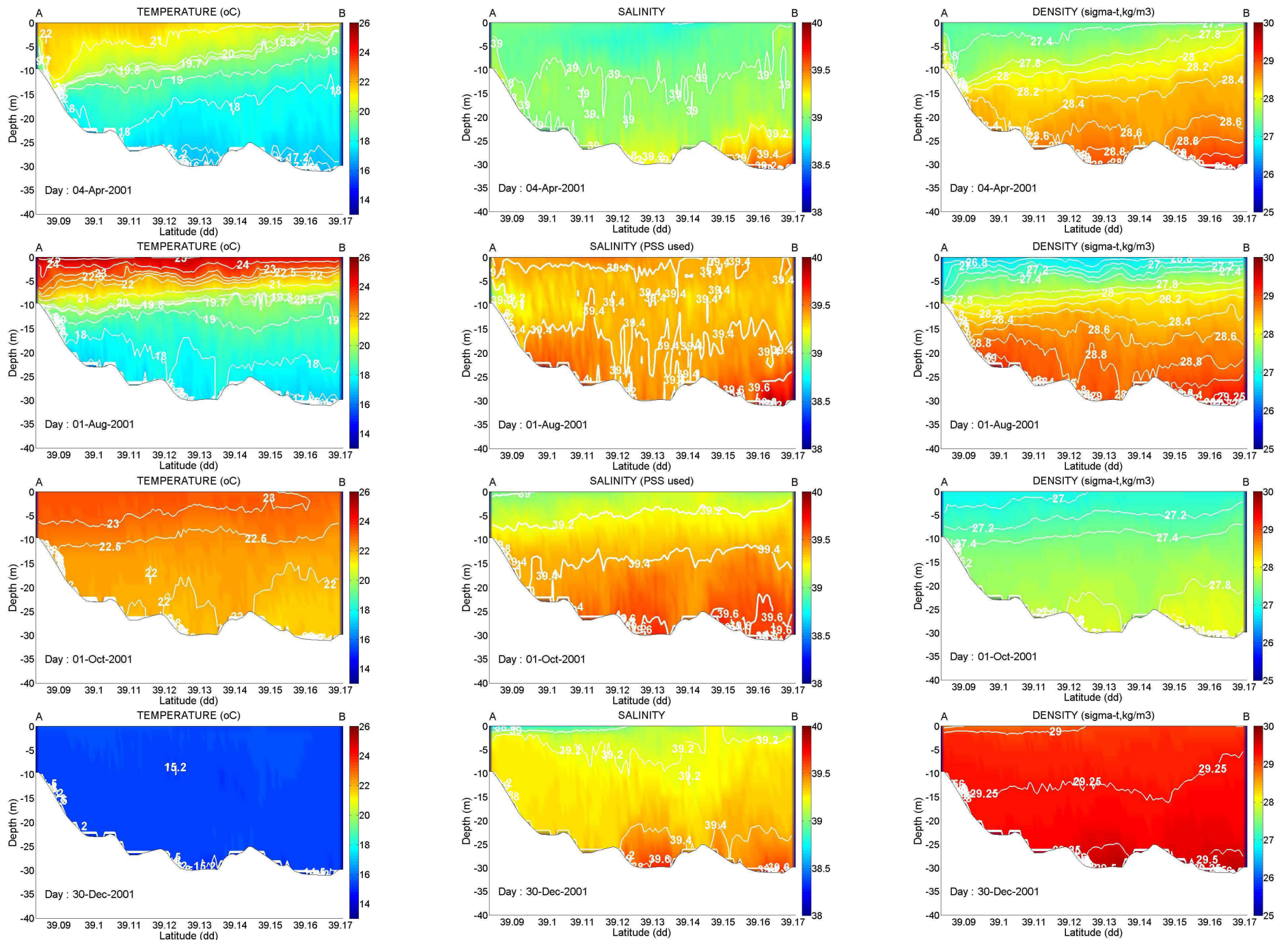
περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους και παρουσιάζεται στα σχήματα 8.2 και 8.3.

Δυναμική καταβύθιση για την περίοδο ανάμιξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.4 γ-δ, όπου νερό χαμηλότερης αλατότητας και λίγο μεγαλύτερης θερμοκρασίας βυθίζεται στις 24-25 Μαρτίου 2002, όταν η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται από νότια (προκαλώντας ανάδυση νερού) σε βόρεια (που προκαλεί καταβύθιση νερού), βυθίζοντας και τις ισόπυκνες καμπύλες κοντά στην ακτή.

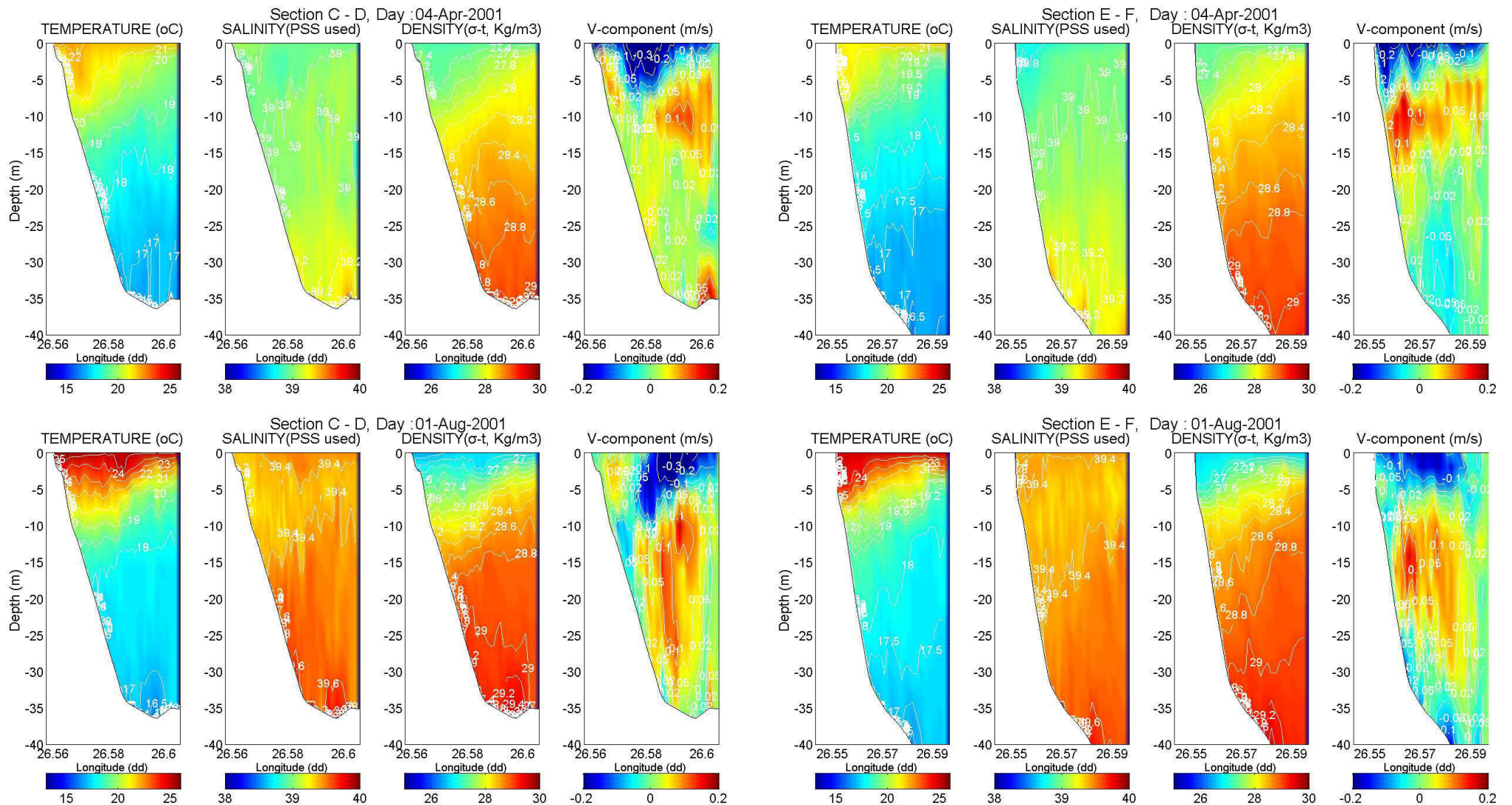
Το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή ανάδυση νερού, συμβαίνει όταν ο άνεμος πνέει από νότιες διευθύνσεις (Σχήμα 8.4α και γ): όπως περιγράφει η θεωρία Ekman, το επιφανειακό νερό κινείται συνολικά προς τα δεξιά της διεύθυνσης του ανέμου δηλαδή τείνει να απομακρύνεται από την ακτή και να αναπληρώνεται από μάζες νερού προερχόμενες από βαθύτερα στρώματα κοντά στην ακτή. Έτσι, το καλοκαίρι που το νερό που αναδύεται στη στήλη είναι ψυχρότερο από το επιφανειακό, κοντά στην ακτή, το θερμοκλινές ανέρχεται και βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια, όπως δείχνει η αρχική κατάσταση στο σχήμα Σχήμα 8.4α (ο άνεμος που δημιούργησε τη συγκεκριμένη κατάσταση έχει σταματήσει να πνέει και δεν φαίνεται στο στιγμιότυπο).

Από τα μέσα έως τα τέλη Σεπτεμβρίου, οι υψηλές θερμοκρασίες διατηρούνται στην επιφάνεια αλλά η θερμότητα μεταφέρεται όλο και πιο βαθιά στη στήλη, με αποτέλεσμα τα βαθύτερα στρώματα να γίνονται θερμότερα (και ελαφρύτερα, π.χ. 1<sup>η</sup> Οκτ 2001, σχήματα 8.2 και 8.3). Σε συνδυασμό με την ελάττωση της θερμικής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας, η στρωμάτωση της στήλης και κατά συνέπεια και το θερμοκλινές, σταδιακά εξασθενούν. Κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου, το θερμοκλινές εξαφανίζεται και η στήλη τείνει να ομογενοποιηθεί θερμικά. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια περίοδος απώλειας θερμότητας από τη μάζα νερού, αύξησης της πυκνότητας και σταδιακής αποκατάστασης της κατακόρυφης ανάμιξης στη στήλη (π.χ. 30 Δεκ 2001).

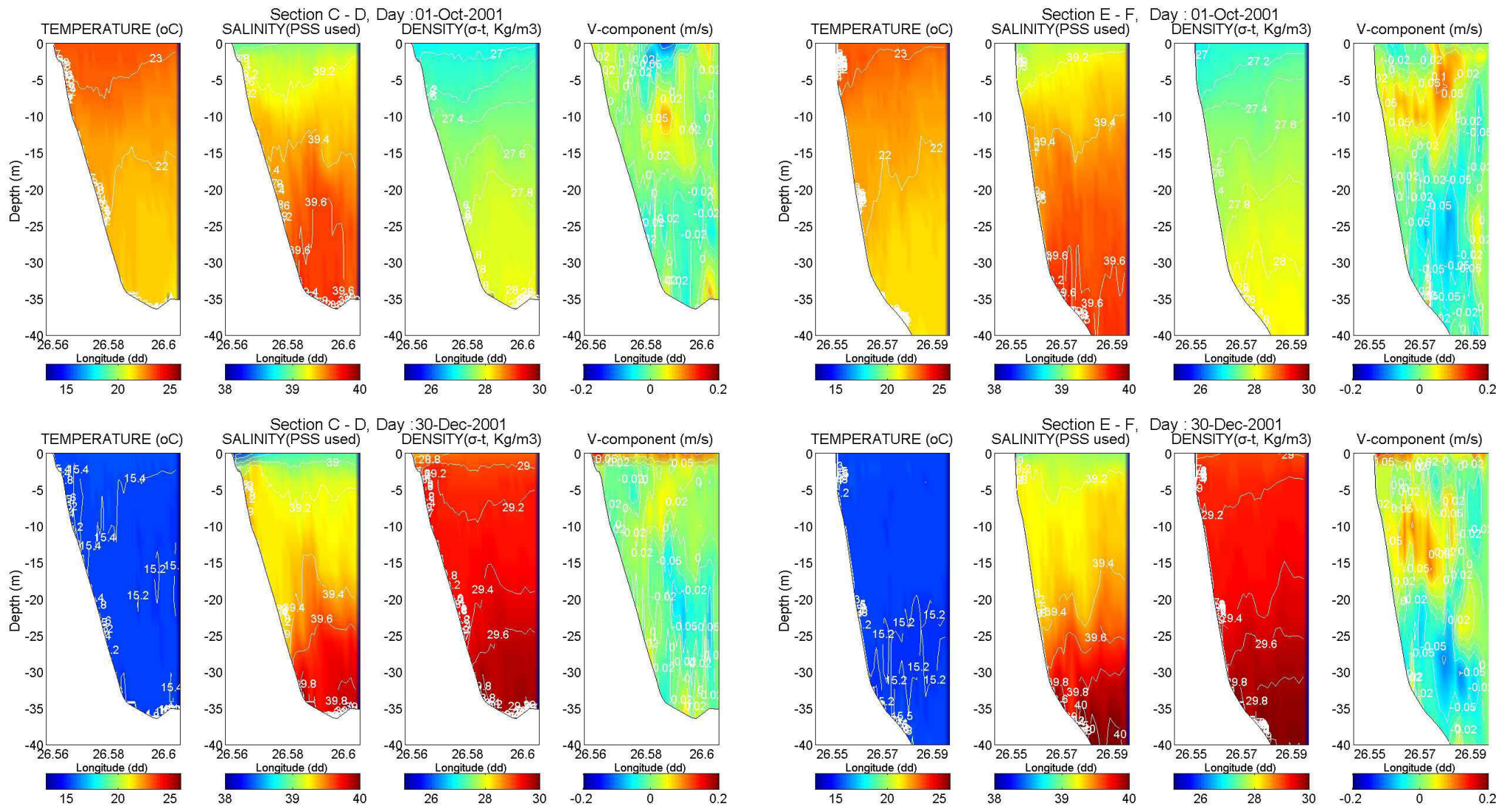




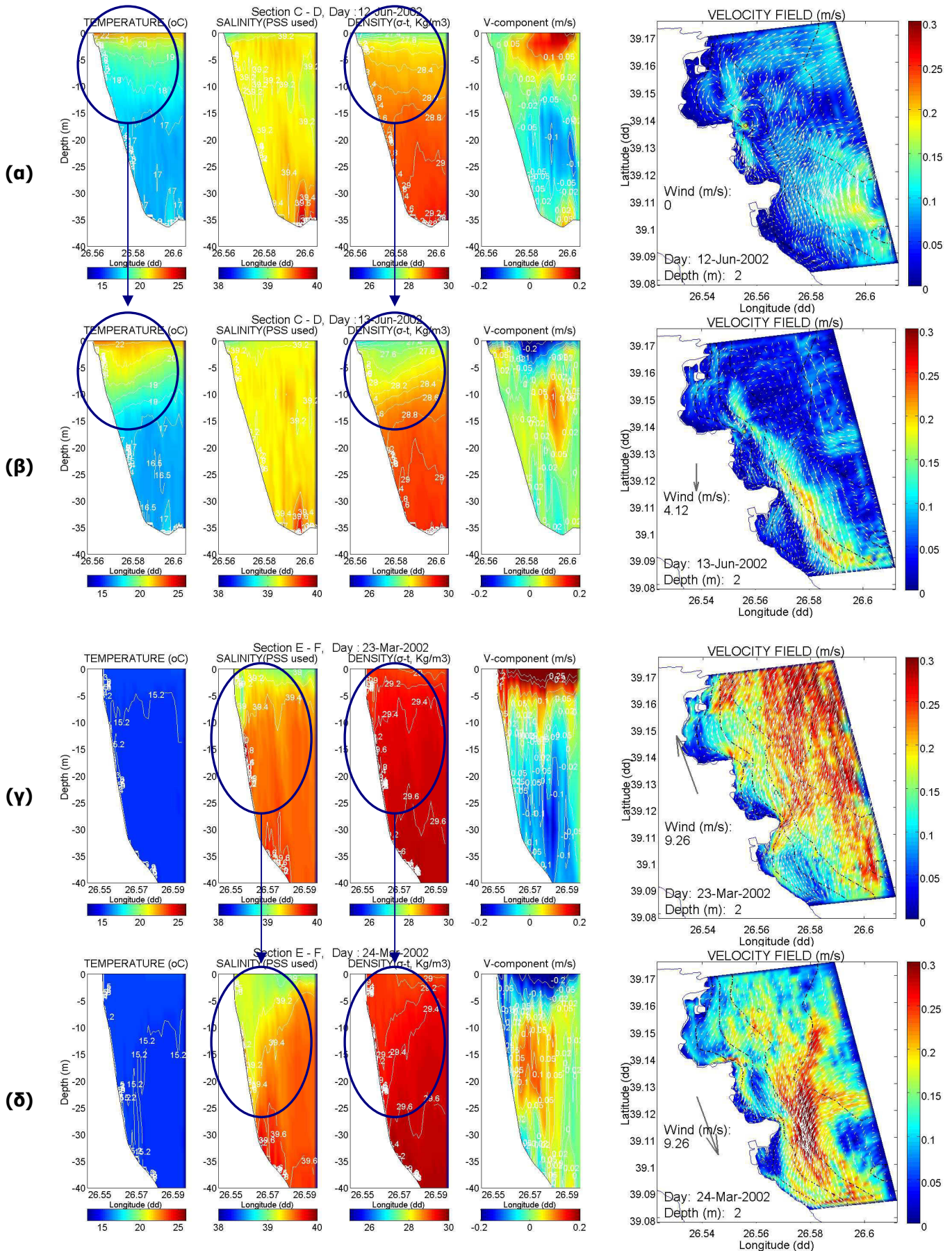
**Σχήμα 8.2.** Προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος φυσικών μεταβλητών: Κατακόρυφες κατανομές (τομές) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της γραμμής A-B (Σχήμα 8.1) σε 4 χαρακτηριστικά εποχιακά στιγμιότυπα.



**Σχήμα 8.3.** Προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος φυσικών μεταβλητών: Κατακόρυφες κατανομές (τομές) θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας, πυκνότητας ( $\sigma-t$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) και της συνιστώσας V της ταχύτητας ( $\text{m/s}$ ) όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των γραμμών C-D (αριστερή στήλη) και E-F (δεξιά στήλη) (βλ. σχήμα 8.1) σε 4 χαρακτηριστικά εποχιακά στιγμιότυπα.

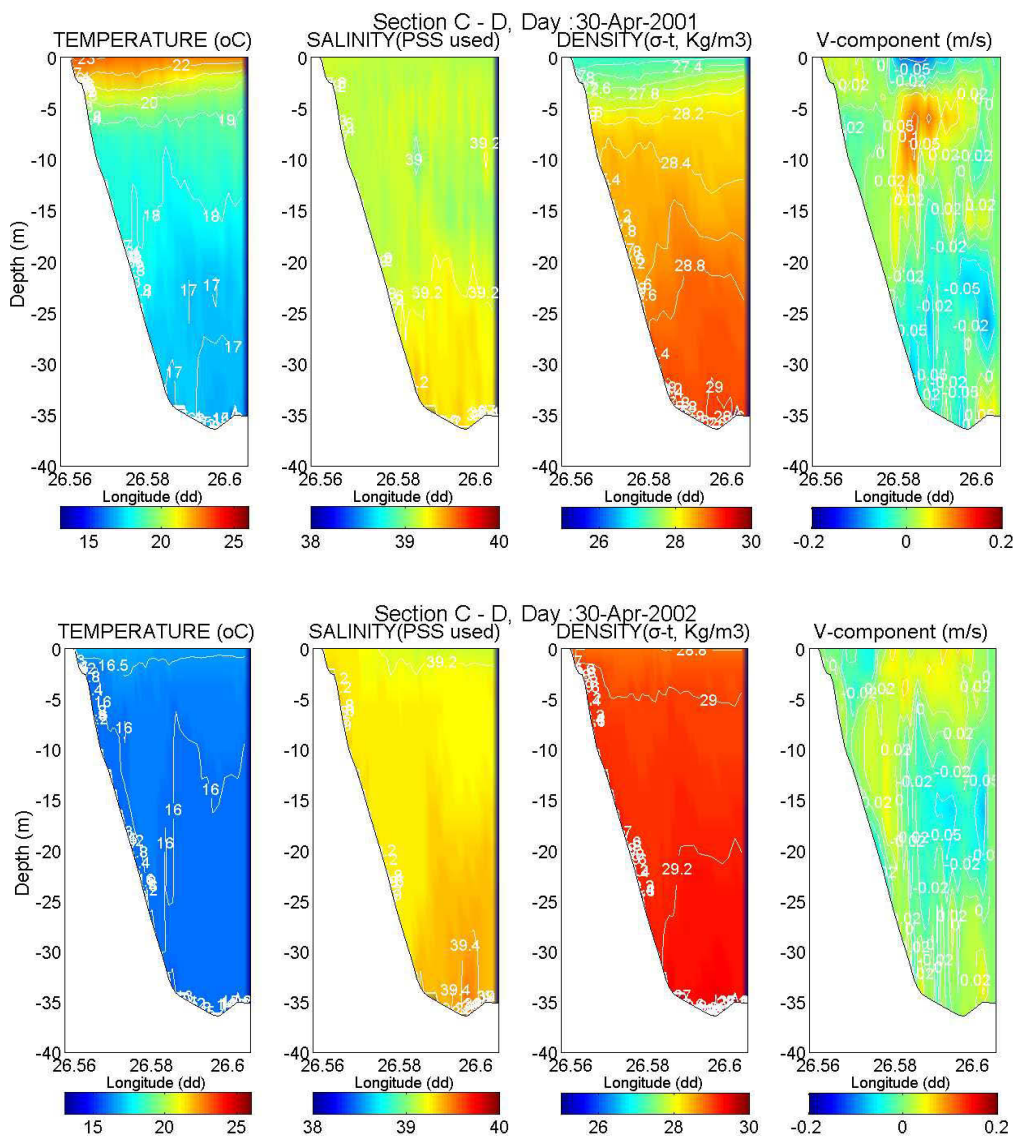


**Σχήμα 8.3 συνέχεια.** Προσομοιωμένος ετήσιος κύκλος φυσικών μεταβλητών: Κατακόρυφες κατανομές (τομές) θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), αλατότητας, πυκνότητας ( $\sigma\text{-t}$ ,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) και της συνιστώσας  $V$  της ταχύτητας ( $\text{m}/\text{s}$ ) όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των γραμμών C-D (αριστερή στήλη) και E-F (δεξιά στήλη) (βλ. σχήμα 8.1) σε 4 χαρακτηριστικά εποχιακά στιγμιότυπα.



**Σχήμα 8.4.** Ανάδυση και καταβύθιση μαζών νερού λόγω ανεμογενούς κυκλοφορίας, όπως αποτυπώνεται ως κατακόρυφη μετατόπιση του θερμοκλινούς και του πυκνοκλινούς (α – β, τομή C-D, 12-13 Ιουνίου 2002) και του ασθενούς αλοκλινούς και των ισόπυκνων καμπυλών (γ – δ, τομή E-F, 23-24 Μαρτίου 2002). Παρουσιάζεται και το οριζόντιο πεδίο ταχυτήτων σε 2m βάθος στην ευρύτερη περιοχή και η διεύθυνση-ταχύτητα ανέμου (δεξιά).

Στο Σχήμα 8.5 αποτυπώνονται στιγμιότυπα της δομής της στήλης την ίδια ημέρα του μήνα με διαφορά ενός έτους. Παρουσιάζεται η κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, πυκνότητας και V-συνιστώσας της ταχύτητας ρεύματος (άξονας βορράς-νότος) την 30<sup>η</sup> Απρ 2001, που έχει ξεκινήσει ο σχηματισμός του θερμοκλινούς και η στρωματοποίηση της στήλης, και ακριβώς ένα χρόνο μετά, την 30<sup>η</sup> Απρ 2002 που ακόμα επικρατούν συνθήκες καλής κατακόρυφης ανάμιξης. Το παράδειγμα αυτό, όπου με τη βοήθεια του μοντέλου παρουσιάζονται ποσοτικά οι διαφορές της στήλης την ίδια μέρα αλλά διαφορετική χρονιά, αναδεικνύει τον ρόλο που παίζει η διακύμανση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στον καθορισμό και την διακύμανση της κατάστασης της υδάτινης στήλης σε χρονική κλίμακα πέραν του ετήσιου κύκλου.



**Σχήμα 8.5.** Σύγκριση και διαφορές στην κατακόρυφη κατανομή θερμοκρασίας, αλατότητας, πυκνότητας και ταχύτητας ρεύματος (συνιστώσα V, άξονας βορράς-νότος) μεταξύ 30<sup>ης</sup> Απρ 2001 και 30<sup>ης</sup> Απρ 2002, δηλ ένα χρόνο μετά.

Η **αλατότητα** κυμαίνεται σε μικρό εύρος (μεταξύ 38.7 και 40.5) όπως καθορίζουν οι διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου. Αν και η επίδρασή της στις μεταβολές της πυκνότητας και σταθερότητας της στήλης είναι μάλλον περιορισμένη συγκριτικά με τη θερμοκρασία, εντούτοις σε πολλές περιπτώσεις καθορίζει τις λεπτομέρειες. Η προσομοίωση δείχνει ότι κατά τη διάρκεια του έτους δημιουργούνται χωρικές βαθμίδες της αλατότητας: συναρτήσεως του βάθους, στον άξονα βορρά-νότου και σε ορισμένες περιπτώσεις, από την ακτή προς τα ανοικτά (Σχήματα 8.2 – 8.5).

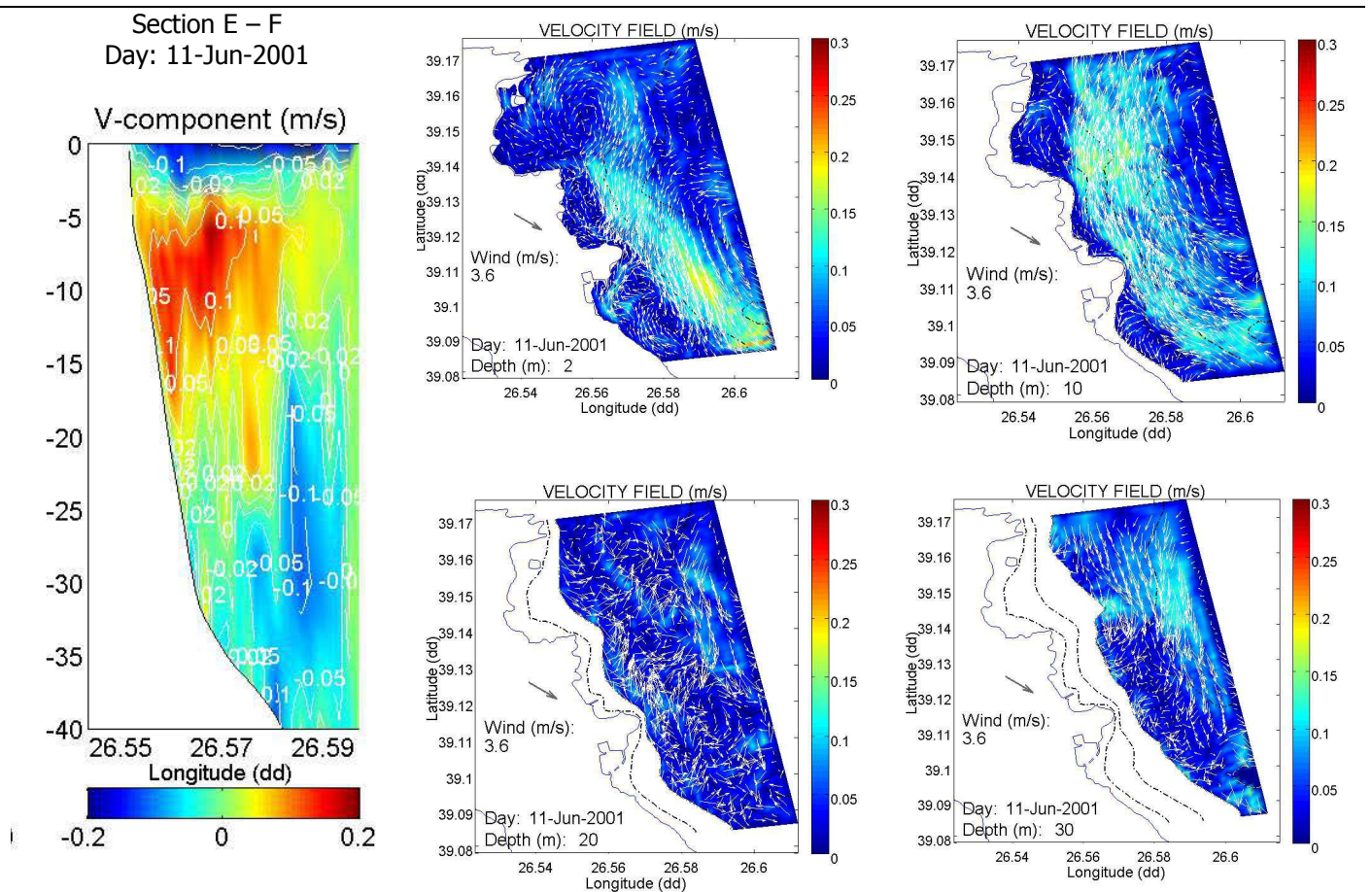
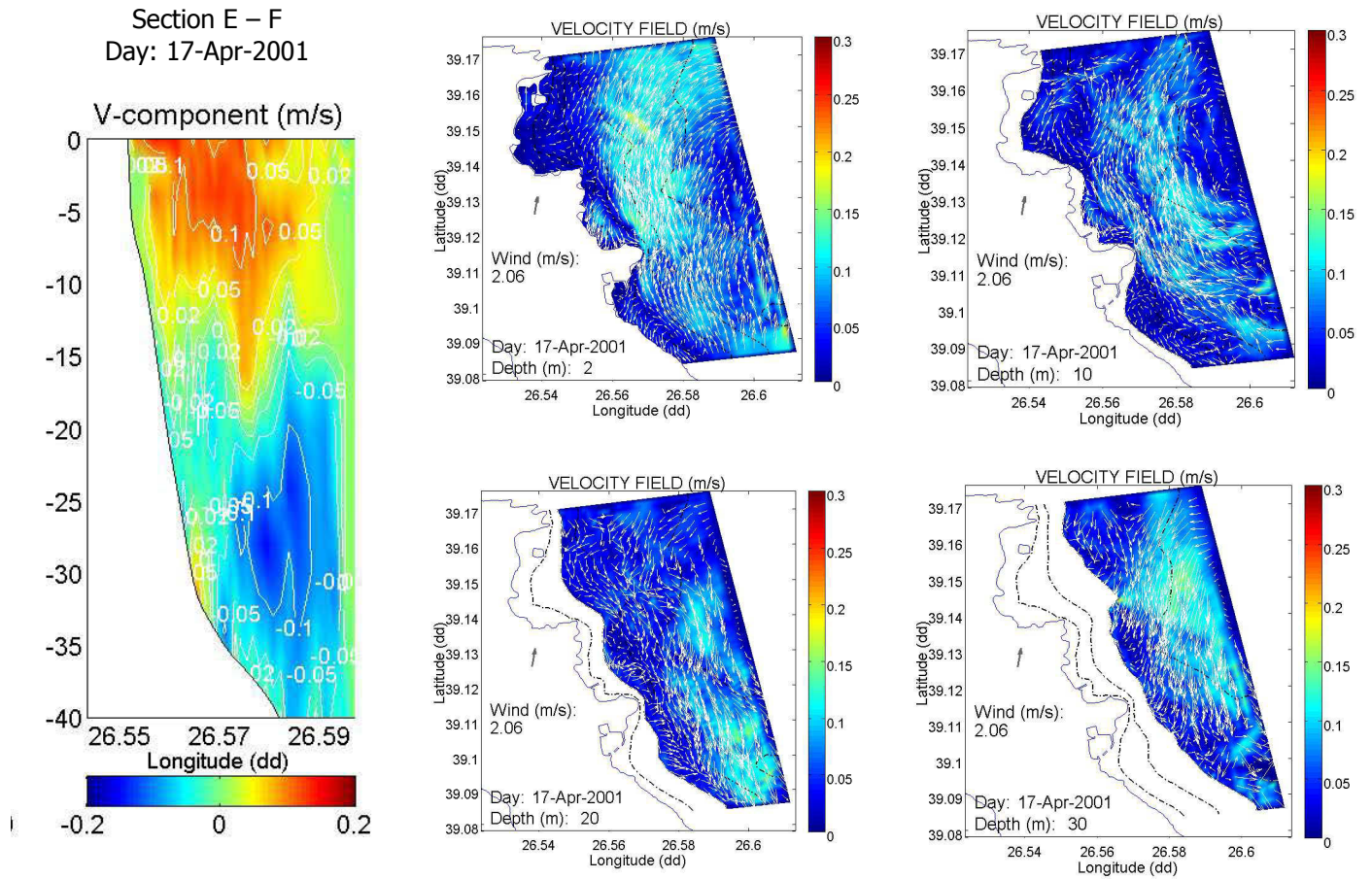
Κατά τη μετάβαση από τον Μάρτιο του 2001 προς το καλοκαίρι του 2001 η αλατότητα τείνει να ομογενοποιείται κατακόρυφα και να αυξάνεται συνολικά στη στήλη. Από το τέλος Σεπτεμβρίου 2001, νερό υψηλής αλατότητας (>39.6) συγκεντρώνεται σε βάθη μεγαλύτερα των 25m, οπότε αναπτύσσεται κατακόρυφη βαθμίδα όπου η αλατότητα τείνει να αυξάνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Τους ψυχρούς χειμερινούς μήνες που ακολουθούν (Ιανουάριος – Φεβρουάριος – Μάρτιος 2002) η διαφορά αυτή μπορεί να ξεπερνάει το 1 psu, καθώς ενώ στην επιφάνεια η αλατότητα είναι γύρω στο 39, σε βάθη άνω των 25m συσσωρεύεται νερό υψηλής αλατότητας (>39.6). Παράλληλα, αναπτύσσεται βαθμίδα αλατότητας στον άξονα βορρά-νότου τέτοια ώστε να αυξάνεται από νότο προς βορρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2 (κάτω γραμμή, 30 Δεκ 2001). Η κατανομή αυτή της αλατότητας, με τις βαθμίδες που περιγράφηκαν, αρχίζει να σχηματίζεται από τον Νοέμβριο 2001 και επικρατεί κυρίως από τον Δεκέμβριο 2001 έως τα μέσα Απριλίου 2002.

Η κατανομή και η δυναμική της **πυκνότητας** ακολουθεί αυτή της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 8.2 και 8.3, καθώς όπως προαναφέρθηκε, η στρωμάτωση και η καλή ανάμιξη που εναλλάσσονται εποχικά στην περιοχή οφείλονται πρωτίστως στην κατανομή της θερμότητας στη στήλη. Η προσομοίωση δείχνει ότι η υδάτινη μάζα στην περιοχή μελέτης είναι συνολικά ελαφρύτερη τον Σεπτέμβριο – αρχές Οκτωβρίου του 2001 (επιφάνεια <27 Kg/m<sup>3</sup> και από τα 25m βάθος και κάτω μεταξύ 27.8 - 28 Kg/m<sup>3</sup>) και βαρύτερη τέλη Ιανουαρίου - αρχές Φεβρουαρίου 2002 (επιφάνεια ~29.2 Kg/m<sup>3</sup>, από τα 25m βάθος και κάτω >30 Kg/m<sup>3</sup>). Επίσης, αναπαράγεται η οριζόντια βαθμίδα στον άξονα βορρά-νότου που διαπιστώθηκε από τις μετρήσεις πεδίου στο κεφάλαιο 5 και θέλει τους θερμούς μήνες κυρίως, τα ελαφρύτερα νερά να βρίσκονται νοτιότερα, κοντά στην επιφάνεια και κοντά στην ακτή.

### 8.2.2. Ανάπτυξη συστήματος κυκλοφορίας δύο στρωμάτων

Οι μέγιστες ταχύτητες του ρεύματος στην επιφάνεια μπορούν να φτάσουν τα 0.6 – 0.7 m/s, για ταχύτητες ανέμου 7 μποφόρ (~15m/s) και άνω (για παράδειγμα, προσομοιωμένα αποτελέσματα για 3 Δεκ 2001). Το μοντέλο υποδεικνύει ότι στην περιοχή μελέτης αναπτύσσεται επιφανειακό, ανεμογενές ρεύμα παράλληλα με την ακτή (coastal jet) σε συνδυασμό με ένα υποεπιφανειακό στρώμα πάνω από τον πυθμένα που κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση (subsurface countercurrent). Σχηματίζεται έτσι συχνά στη στήλη νερού ένα σύστημα κυκλοφορίας δύο στρωμάτων (ή και τριών στρωμάτων σε ορισμένες περιπτώσεις, π.χ. Σχήμα 8.6 κάτω), αντίθετα κινούμενων (Σχήμα 8.3, 8.4, 8.6). Η κατακόρυφη αυτή κατανομή του ρεύματος, που αναπτύσσεται συχνά σε παράκτιες περιοχές (π.χ. Csanady 1997, Chen and Xie 1997, Davies and Xing 2003, Petrenko et al. 2005), είναι ενδεικτική της σημασίας των βαροκλιτικών συνθηκών για την περιοχή και βρέθηκε στο πεδίο (ρευματομετρήσεις) τόσο σε συνθήκες καλής ανάμιξης όσο και στρωμάτωσης (π.χ. 14 Δεκ 2000 και 24 Μαΐου 2002 αντίστοιχα, παράρτημα 8).

Η δομή που κυρίως εμφανίζεται στην περιοχή κατά την περίοδο της προσομοίωσης είναι σε γενικές γραμμές αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3 (κάτω) την 30<sup>η</sup> Δεκ 2001, στο Σχήμα 8.4a την 12<sup>η</sup> Ιουν 2002 και στο Σχήμα 8.6a την 17<sup>η</sup> Απρ 2001: το επιφανειακό στρώμα με βάθος που μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 25m κινείται με κατεύθυνση προς βορρά ενώ η υπόλοιπη στήλη (ένα υποεπιφανειακό στρώμα πάνω από τον πυθμένα και προς τα ανοιχτά) κινείται αντίθετα, προς νότο, με χαμηλότερες ταχύτητες. Επικρατεί από την αρχή της προσομοίωσης δηλαδή τέλος Μαρτίου 2001 έως περίπου μέσα Ιουνίου 2001 και από το τέλος Σεπτεμβρίου 2001 έως αρχές Ιουνίου 2002. Κατά τους θερμούς, θερινούς μήνες (Ιούλιος 2001, κυρίως Αύγουστος 2001 έως μέσα Σεπτέμβρη 2001), κάτω από τη δράση και του ανέμου που πνέει σταθερά από βόρειες διευθύνσεις αυτήν την περίοδο, η κατακόρυφη κατανομή ταχυτήτων στην περιοχή μελέτης αντιστρέφεται (Σχήμα 8.3, 1<sup>η</sup> Αυγ 2001): το επιφανειακό στρώμα μέχρι βάθους 5-15m κινείται προς νότο ενώ η υπόλοιπη στήλη από βάθος περίπου 15m και κάτω έχει κατεύθυνση κυρίως προς βορρά. Σε συνθήκες στρωμάτωσης, το θερμοκλινές είναι γενικά η ζώνη της στήλης νερού που χωρίζει τα στρώματα που κινούνται προς αντίθετη κατεύθυνση και άρα εκεί αναπτύσσονται έντονες βαθμίδες της ταχύτητας (shears). Η παραπάνω περιγραφή της χρονικής διακύμανσης της διεύθυνσης του επιφανειακού παράκτιου ρεύματος είναι γενικά σε θετική συσχέτιση με τη χρονική διακύμανση του ανύσματος του ανέμου στην περιοχή όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.6 του κεφαλαίου 3.



**Σχήμα 8.6.** Κατακόρυφη κατανομή κάθετα στην ακτή της V-συστήσας της ταχύτητας (m/s) και οριζόντια κατανομή πεδίου ταχυτήτων σε 4 βάρη (2, 10, 20 και 30m) σε 2 στιγμιότυπα.



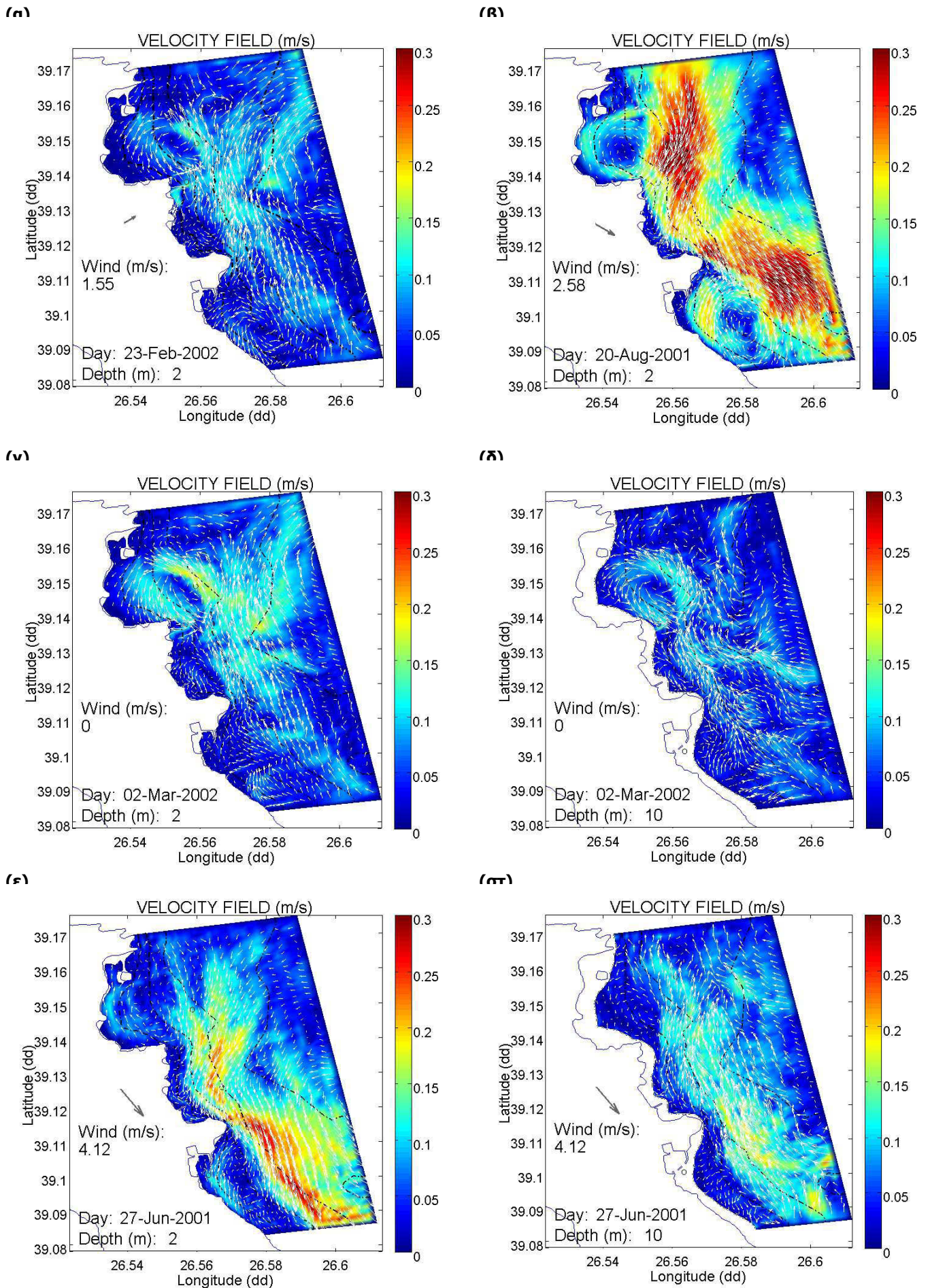
Αντιστροφές της διεύθυνσης του ανέμου οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές στη διεύθυνση του ρεύματος των αντίθετα κινούμενων στρωμάτων (Σχήμα 8.4). Αυτή η προσαρμογή της παράκτιας κυκλοφορίας στη διακύμανση της φόρτισης από τον άνεμο γίνεται γρήγορα. Καθώς τα άμεσα αποτελέσματα της διατμητικής τάσης του ανέμου περιορίζονται κυρίως κοντά στην επιφάνεια, η ροή του υποκείμενου στρώματος τείνει να πάρει αντίθετη κατεύθυνση, προκειμένου να εξισορροπήσει τη ροή του επιφανειακού στρώματος, με δεδομένο ότι το όριο της ακτογραμμής εμποδίζει την κυκλοφορία προς άλλες κατευθύνσεις (no flux condition, Chen and Xie 1997).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των ρευματομετρήσεων πεδίου και διατυπώθηκαν στην παράγραφο 6.2 (κεφάλαιο 6 'Αποτελέσματα Μετρήσεων Πεδίου') συμφωνούν με τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι οι ρευματομετρήσεις έγιναν στα 5, 10 και 20m βάθος και, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.3, σε αυτό το βάθος της στήλης νερού, τις περισσότερες φορές μετρήθηκε ρεύμα προς βορρά. Αντίθετα, ρεύμα προς νότο μετρήθηκε κυρίως τους θερμούς μήνες, όπως δείχνει και η προσομοίωση.

### **8.2.3. Στροβιλώδης κυκλοφορία στους κόλπους της ακτογραμμής**

Το υδροδυναμικό μοντέλο υποδεικνύει ότι στους κόλπους της παράκτιας περιοχής Μυτιλήνης αναπτύσσεται δευτερογενής στροβιλώδης κυκλοφορία της θαλάσσιας μάζας (rotational flow). Ορισμένες από τις δομές που δημιουργούνται παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.7.

Οι στροβιλώδεις αυτές κινήσεις του νερού (vortices, eddies), που δείχνουν να σχηματίζονται όταν η ταχύτητα ρεύματος στα ανοιχτά προσεγγίζει τα 0.1 m/s, ανάλογα με την διεύθυνση του ρεύματος στα ανοιχτά μπορεί να έχουν κυκλωνική - αριστερόστροφη φορά με βόρειο ρεύμα (Σχήμα 8.7α) ή αντικυκλωνική - δεξιόστροφη φορά με νότιο ρεύμα (Σχήμα 8.7β). Μπορεί να περιορίζονται στην επιφάνεια ή να εκτείνονται σε βάθος στη στήλη του νερού έως και 20m: Ενδεικτικά στα Σχήματα 8.7 (γ)-(δ), στην περιοχή του όρμου Παναγιούδας στις αρχές Μαρτίου 2002, και ενώ επικρατεί άπνοια ή πνέει άνεμος πολύ χαμηλής ταχύτητας από ΝΔ-Ν-ΝΑ διευθύνσεις και το ρεύμα στα ανοιχτά είναι βόρειο, αναπτύσσεται ένας κυκλωνικός στρόβιλος, σε όλο το βάθος της στήλης, με μέγιστες ταχύτητες περίπου 18 cm/s και χρονική διάρκεια από 1 έως 11 Μαρτίου 2002. Ειδικά στην περιοχή του όρμου Παναγιούδας, το μοντέλο δείχνει ότι η στροβιλώδης κίνηση του νερού είναι πολύ συχνό φαινόμενο.



**Σχήμα 8.7.** Ανάπτυξη στροβιλώδους κυκλοφορίας στην περιοχή μελέτης: στιγμιότυπα από διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας, εποχές και βάθη. Διακρίνονται ισοβαθείς των 10, 20, 30 και 40 m.

Η διάρκεια των στροβίλων είναι της τάξης των 1 - 10 ημερών, ακολουθώντας τη χρονική κλίμακα των μετεωρολογικών φαινομένων που εισάγουν ενέργεια στα παράκτια συστήματα σε αυτό το εύρος περιόδων (Haidvogel et al. 2000). Ως επί το πλείστον, η διάρκειά τους καθορίζεται από την εναλλαγή των διευθύνσεων του ανέμου. Το καλοκαίρι του 2001 (τέλος Ιουνίου - Ιούλιος – Αύγουστος 2001), κάτω από την επίδραση ανέμων που πνέουν σταθερά από βόρειες – βορειοδυτικές διευθύνσεις, οι αντικυκλωνικοί στρόβιλοι είναι σχεδόν μόνιμο χαρακτηριστικό στην επιφάνεια. Ωστόσο, λίγα μέτρα βαθύτερα περίπου στα 10m, όπου η διεύθυνση του ρεύματος είναι γενικά προς βορρά (αντίθετη με την επιφάνεια) οι στρόβιλοι που τείνουν να σχηματιστούν έχουν αντίθετη φορά, δηλαδή κινούνται με μικρότερες ταχύτητες κυκλωνακά (αντίθετα από τη φορά του ρολογιού), (Σχήμα 8.7 (ε) και (στ) αντίστοιχα).

Ο σχηματισμός αυτών των στροβίλων είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ακτογραμμής επάνω στην παράκτια ροή: τα ποικίλα ακρωτήρια (headlands, promontories) δρουν ως εμπόδια στην ροή. Στο φυσικό περιβάλλον, πολύπλοκες διεργασίες που περιλαμβάνουν *επιβράδυνση της ροής* μέσω των μηχανισμών της αντίστασης τριβής (skin drag: επαπτομενικές τάσεις στην επιφάνεια επαφής – τριβή της ροής με την κεκλιμένη τοπογραφία του πυθμένα) και της αντίστασης λόγω σχήματος (form drag: διαφορές πίεσης κατά μήκος ενός εμποδίου στη ροή) και *διαχωρισμό-αποχωρισμό της ροής* (current separation) (Magaldi et al. 2008, Warner and MacCready 2009) οδηγούν στην ανάπτυξη οριζόντιων και κατακόρυφων βαθμίδων ταχύτητας (velocity shears) και τελικά στροβιλότητας (vorticity), που εκδηλώνεται ως περιστροφική κίνηση του νερού.

Αυτή η μορφή διαταραχής της ροής και η παρουσία αυτών των στροβίλων σχετίζεται με μια σειρά σημαντικών διεργασιών για τα παράκτια οικοσυστήματα, όπως:

- ενισχυμένη ανάμιξη, διασπορά και αραίωση ύλης αλλά και εγκλωβισμό και κατακράτηση (retention) ρυπαντών και οργανισμών, λειτουργώντας θετικά ή αρνητικά ανάλογα με τις υδροδυναμικές συνθήκες (Doglioli et al. 2004, Pritchard et al. 2007),
- δυναμική ιζημάτων, μεταφορά υλικού και σχηματισμό υποθαλάσσιων γεωμορφών (π.χ. Pingree 1978, Bastos et al. 2003),
- αυξημένη βιολογική δραστηριότητα (Mann and Lazier 1996, σελ208),
- προσθήκη θρεπτικών στη στήλη του νερού μέσω ανάδευσης και ανάμιξης (ST John and Pond, 1992) και επακόλουθη φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη και διασπορά (Aristegui et al. 1997),

- ζωοπλανγκτονική κατακράτηση και ανακυκλοφορία (Chiswell and Roemmich 1998, Roughton et al. 2005),
- ανάδυση και καταβύθιση νερού (upwelling-downwelling) ακόμα και για στροβίλους μικρής κλίμακας, διαμέτρου λίγων εκατοντάδων μέτρων. Οι Li and Weeks (2009) ανίχνευσαν με χρήση ADCP ζώνες έντονης ανάδυσης και καταβύθισης σε δεξιόστροφο στρόβιλο διαμέτρου περίπου 300m σε μικρό κόλπο με βάθη από 5 έως 20m στις Η.Π.Α. Διεξήγαγαν τις μετρήσεις τους αρχές Σεπτεμβρίου σε καλές καιρικές συνθήκες με ταχύτητα παλιρροιακού ρεύματος στα ανοιχτά περίπου 1m/s και μέγιστες οριζόντιες ταχύτητες στροβίλου 1m/s. Ανάδυση νερού διαπίστωσαν όταν η ροή συναντούσε ανωφέρεια και καταβύθιση συνέβαινε όταν το νερό έρεε πάνω από κατωφέρεια, ενώ οι κατακόρυφες ταχύτητες έφταναν 0.3m/s. Σε τόσο μικρές κλίμακες, αυτού του τύπου η επίδραση των στροβίλων στα παράκτια οικοσυστήματα δεν έχει μελετηθεί και αξιολογηθεί.

### 8.3. Οικολογικές μεταβλητές

Η ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει τις εποχικές διακυμάνσεις και τον ετήσιο κύκλο τμημάτων του οικοσυστήματος (αυτότροφο μέρος, ανόργανα θρεπτικά, οργανική ύλη), οδηγούμενο από τις διακυμάνσεις των συναρτήσεων φόρτισης και των οριακών συνθηκών αναλύθηκε στην παράγραφο 7.2 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στην παράγραφο 8.3 γίνεται περιγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τις οικολογικές μεταβλητές και εξάγονται συμπεράσματα για τη δομή και λειτουργία του οικοσυστήματος της παράκτιας περιοχής της πόλης της Μυτιλήνης κατά την περίοδο προσομοίωσης. Η κατανομή στο χώρο και η δυναμική των οικολογικών μεταβλητών περιγράφεται ταυτόχρονα για όλες μαζί, σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το προσομοιωμένο οικοσύστημα ως ενιαίο σύνολο.

Η ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα σχήματα του τύπου 7.10, 7.13 κ.ο.κ (ή του σχήματος Π11.16 στο παράρτημα 11) όπου παρουσιάζεται το σφάλμα των μεταβλητών (απόκλιση από τις μετρήσεις πεδίου) στη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρέχεται με τον τρόπο αυτό ένα μέτρο της ακρίβειας του μοντέλου κάθε στιγμή. Στα Σχήματα 8.9 έως 8.16 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα οριζόντιας και κατακόρυφης κατανομής των 5 οικολογικών μεταβλητών κατά το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (από 24 Μαρτίου 2001 έως 1 Ιουλ 2002), περίπου ένα ανά εποχή. Στην παρουσίαση των

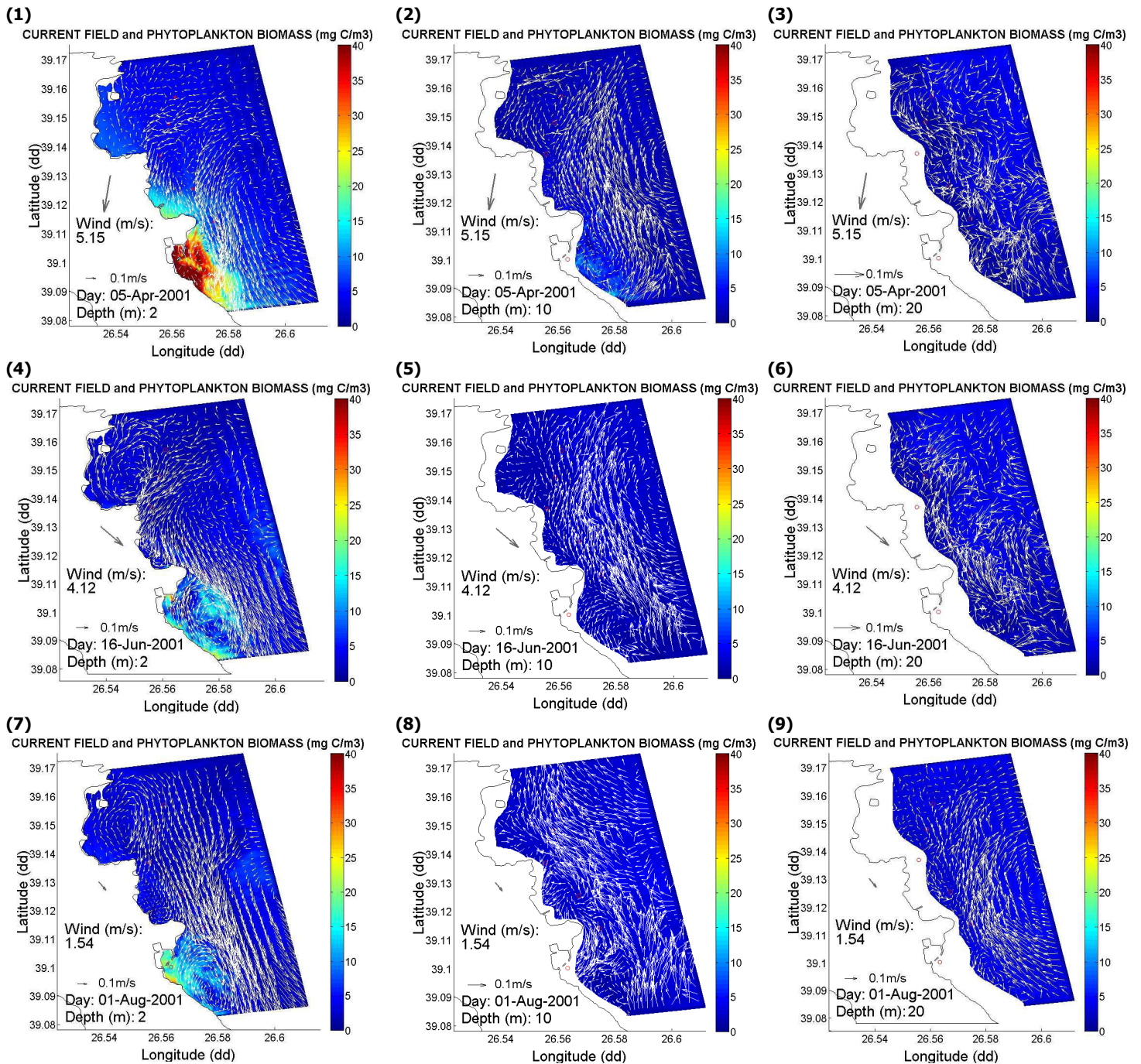
αποτελεσμάτων, λήφθηκε μέριμνα ώστε να παρέχεται με συνοπτικό τρόπο η μέγιστη δυνατή πληροφορία που μπορεί να δώσει το μοντέλο για την αλληλεπίδραση και συμμεταβολή των οικολογικών μεταβλητών στον χώρο. Τα πλήρη αποτελέσματα του μοντέλου για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης δίνονται σε μορφή βίντεο τύπου .avi για όλες τις οικολογικές μεταβλητές στο ηλεκτρονικό παράρτημα που επισυνάπτεται με την εργασία.

### **8.3.1. Ετήσιος κύκλος φυτοπλαγκτού, θρεπτικών και διαλυμένου οργανικού άνθρακα.**

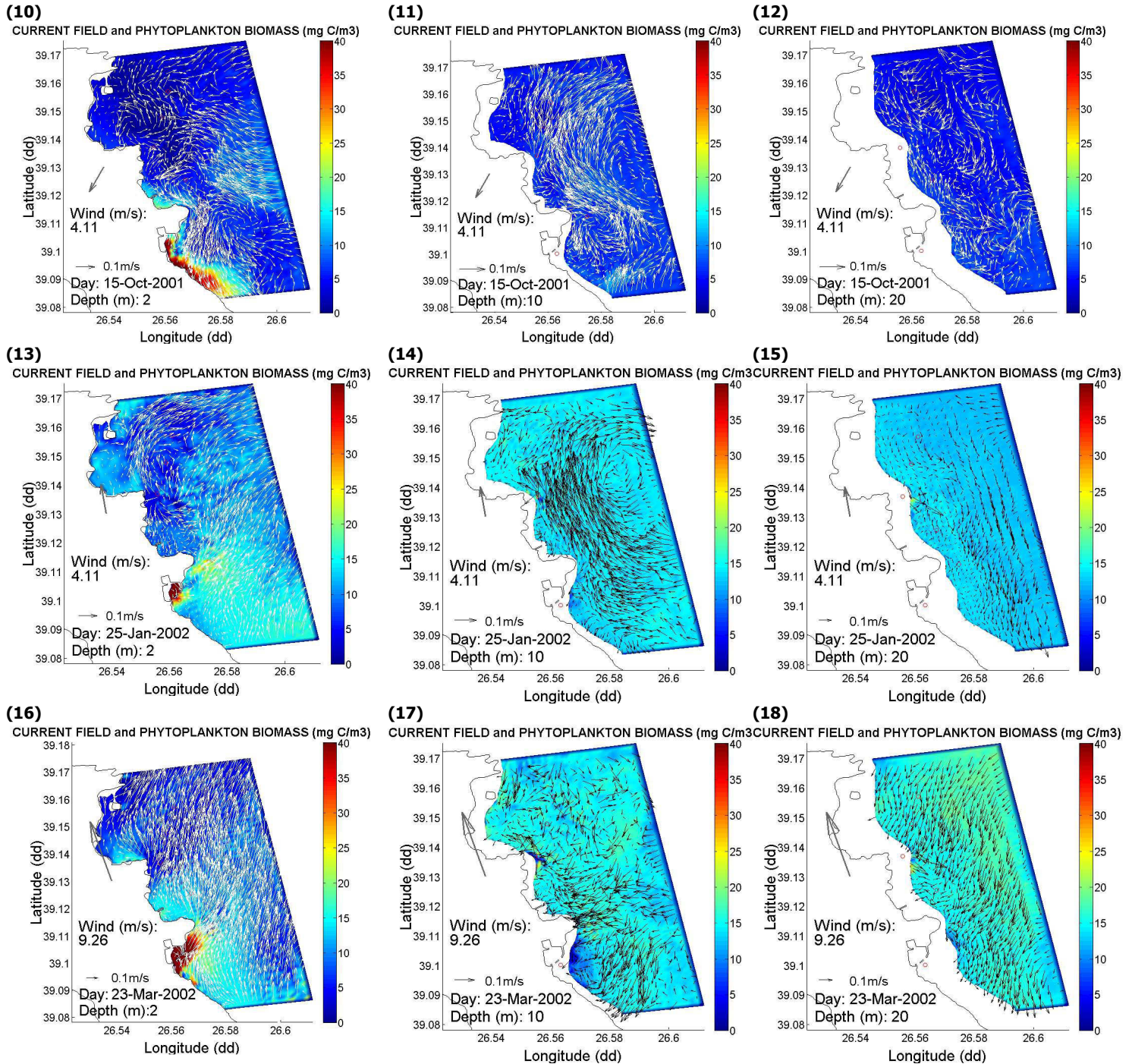
Το μοντέλο αναπαράγει την μείωση της φυτοπλαγκτονικής συγκέντρωσης κατά τη μετάβαση από τους εαρινούς μήνες προς το καλοκαίρι του 2001 και τα χαμηλά επίπεδα στα οποία κυμαίνεται η φυτοπλαγκτονική βιομάζα τους θερινούς μήνες του 2001 (κάτω από  $5 \text{ mg C/m}^3$ , εκτός του σταθμού M1 στο Λιμάνι, π.χ. σχήμα 8.9 και 8.10 – δεύτερη γραμμή), όπως υποδεικνύουν οι μετρήσεις πεδίου. Την περίοδο αυτή, η συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) μειώνεται σταδιακά από τιμές γύρω στα  $1200 \text{ mg C/m}^3$  μετά την εαρινή αύξηση του φυτοπλαγκτού σε τιμές γύρω στα  $500 \text{ mg C/m}^3$  στα μέσα του καλοκαιριού 2001 (σχήμα 8.12). Μείωση υπολογίζει το μοντέλο και για τα νιτρικά και την αμμωνία, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των οποίων απαντώνται στο τμήμα της στήλης κοντά στην επιφάνεια, καθώς φαίνεται πως στα βαθύτερα στρώματα η απομάκρυνση μέσω πρόσληψης από τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα είναι εντονότερη (σχήμα 8.11). Τα φωσφορικά, μετά την εαρινή φυτοπλαγκτονική αύξηση, σημειώνουν μικρή αύξηση (τέλος Μαΐου-αρχές Ιουνίου 2001) ενώ κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα τον Ιούλιο – Αύγουστο 2001 ( $0.02 - 0.04 \text{ } \mu\text{M P}$ , σχήμα 8.12(3)), μια διακύμανση που αναπαράγεται και την ίδια περίοδο την επόμενη χρονιά και σχολιάζεται παρακάτω.

Από τα μέσα Αυγούστου 2001, η συγκέντρωση του φυτοπλαγκτού παρουσιάζει μικρή αύξηση (περίπου στα  $8 \text{ mg C/m}^3$  και κυρίως σε βάθη άνω των  $10 \text{ m}$ ) που διαρκεί περίπου έως τα μέσα Οκτωβρίου 2001 (σχήμα 8.9, 8.10). Καθώς την περίοδο αυτή δεν είναι ξεκάθαρο από τις μετρήσεις πεδίου αν ο ανόργανος φωσφόρος ή το άζωτο περιορίζει την πρωτογενή παραγωγή στο σύστημα (Σχήμα 6.20 – διακύμανση λόγου N/P), φαίνεται πως η μικρή αυτή αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας υποστηρίζεται από αντίστοιχη μικρή αύξηση τόσο των αμμωνιακών, που φτάνουν έως  $0.5 - 1 \text{ } \mu\text{M N}$ , όσο και των φωσφορικών, που κυμαίνονται μεταξύ  $0.05$  και  $0.1 \text{ } \mu\text{M P}$  (σχήμα 8.11, 8.12). Το μοντέλο υπολογίζει και αντίστοιχη μικρή αύξηση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα ( $600 - 800 \text{ mg C/m}^3$ ), ως προϊόν απεκκρίσεων από

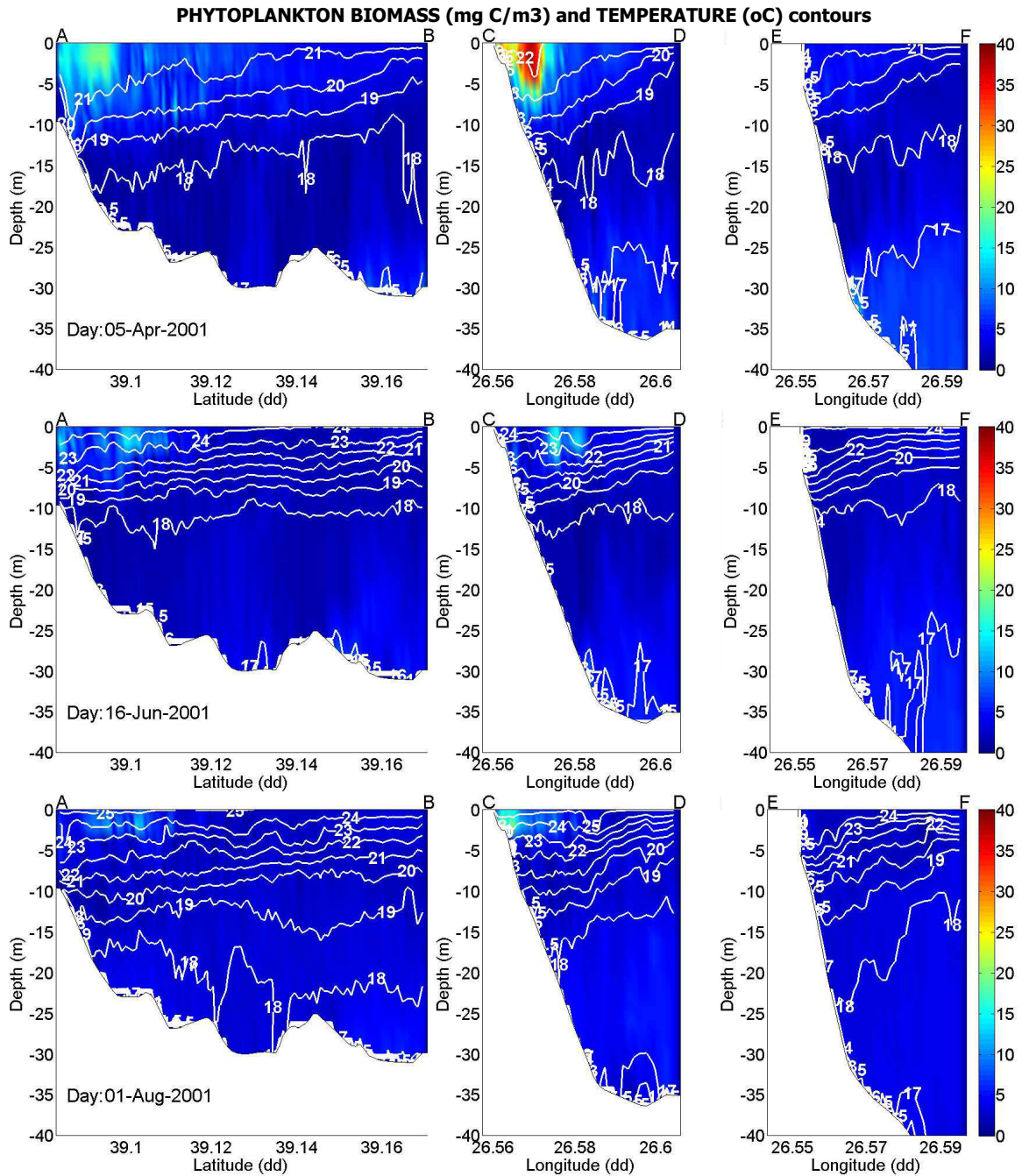
τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα. Το δεύτερο μισό του φθινόπωρου 2001 υπολογίζεται κάμψη της φυτοπλαγκτονικής συγκέντρωσης, ενώ στη συνέχεια και σταδιακά, η βιομάζα τείνει να αυξάνει και φτάνει σε επίπεδα της τάξης 15 – 20 mg C/m<sup>3</sup> στα μέσα Ιανουαρίου 2002 (σχήματα 8.9, 8.10).



**Σχήμα 8.9.** Οριζόντια κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και πεδίο ταχυτήτων ρεύματος όπως υπολογίζονται από το μοντέλο σε 3 βάθη (2, 10 και 20m) σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.

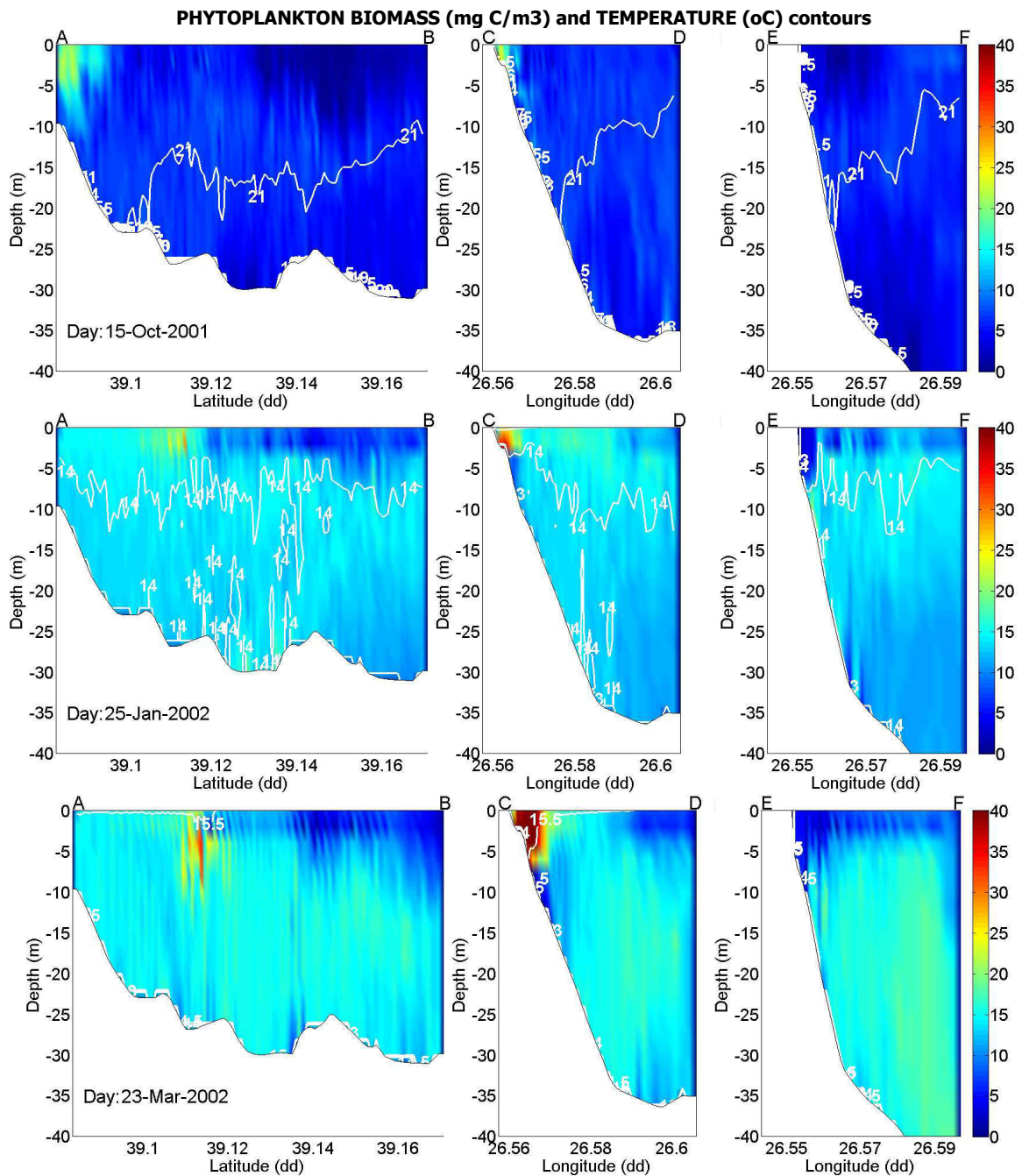


**Σχήμα 8.9 (συνέχεια).** Οριζόντια κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και πεδίο ταχυτήτων ρεύματος όπως υπολογίζονται από το μοντέλο σε 3 βάθη (2, 10 και 20m) σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.

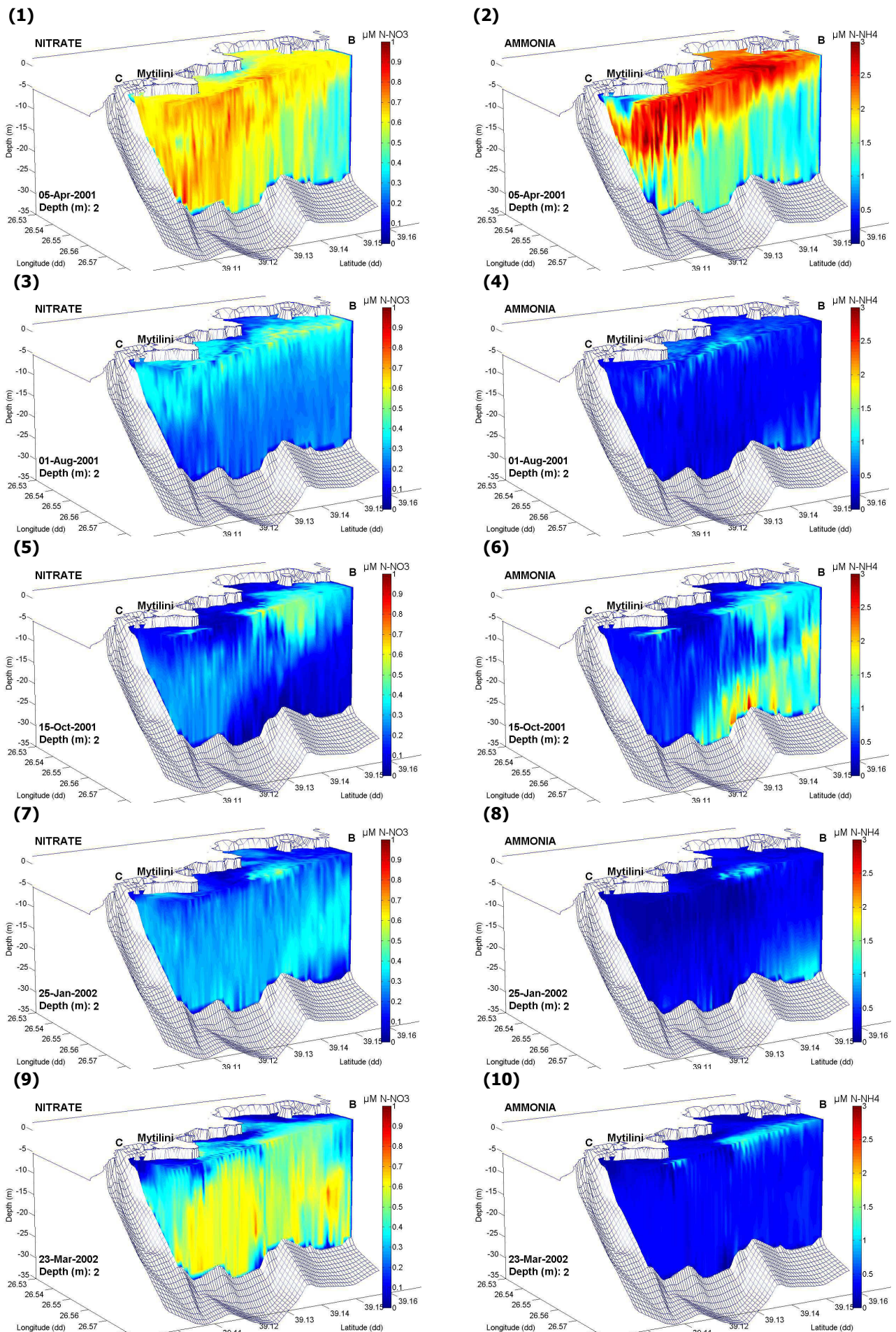


**Σχήμα 8.10.** Κατακόρυφες κατανομές (τομές) φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και ισόθερμες καμπύλες, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της καμπύλης A-B και κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των καμπυλών C-D και E-F (βλ. Σχήμα 8.1) σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.

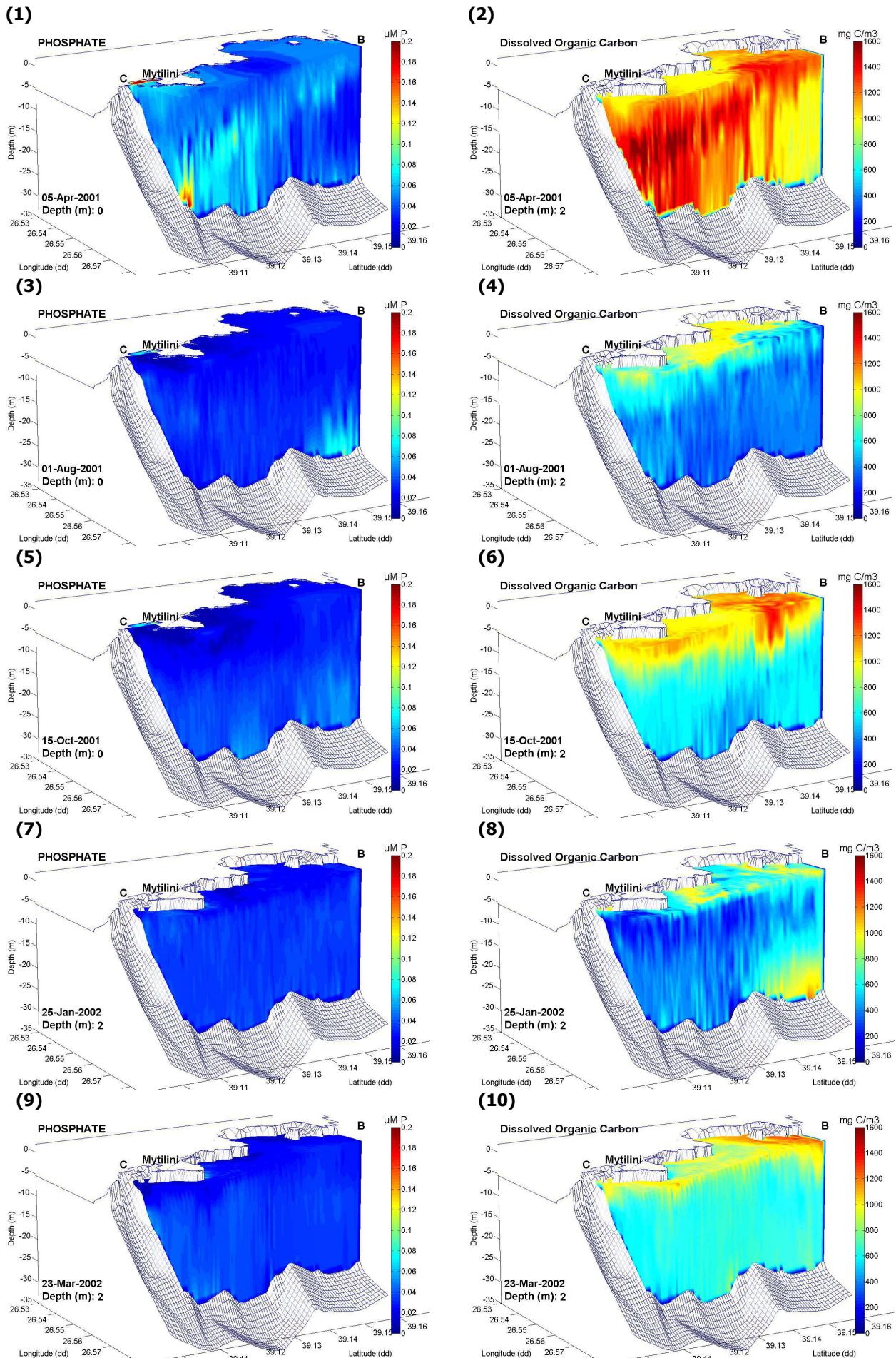




**Σχήμα 8.10 (συνέχεια).** Κατακόρυφες κατανομές (τομές) φυτοπλακτονικής βιομάζας και ισόθερμες καμπύλες, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο, παράλληλα με την ακτή κατά μήκος της καμπύλης A-B και κάθετα προς την ακτή κατά μήκος των καμπυλών C-D και E-F (βλ. Σχήμα 8.1) σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.



**Σχήμα 8.11.** Νιτρικά και αμμωνιακά άλατα: οριζόντια κατανομή σε βάθος 2m και κατακόρυφη κατανομή κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.



**Σχήμα 8.12.** Φωσφορικά άλατα και διαλυμένος οργανικός άνθρακας: οριζόντια κατανομή (επιφάνεια ή βάθος 2m) και κατακόρυφη κατανομή κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D σε αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα από την προσομοίωση του ετήσιου κύκλου.

Οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτονικής βιομάζας τους χειμερινούς μήνες, που διαφοροποιούν κάπως τον ετήσιο κύκλο από τον τυπικό ετήσιο κύκλο του φυτοπλαγκτού στην ανοιχτή θάλασσα σε παράκτια εύκρατη περιοχή, είναι ένδειξη ότι την χειμερινή περίοδο οι δυο περιοριστικοί παράγοντες (α) των διαθέσιμων ανόργανων, θρεπτικών αλάτων αζώτου και φωσφόρου και (β) της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στη στήλη του νερού, κυμαίνονται σε επίπεδα που επιτρέπουν αυξημένη πρωτογενή παραγωγή. Από τη μια λοιπόν χαμηλές αλλά επαρκείς ποσότητες νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών αλάτων και από την άλλη επαρκής ηλιακή ακτινοβολία στη στήλη, αποτέλεσα τόσο της ποσότητας φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας και χαρακτηρίζεται υψηλή ακόμα και τους χειμερινούς μήνες (Arhonditsis 2000), όσο και από τη διαύγεια του νερού στην περιοχή, όπως υποδεικνύουν οι μετρήσεις πεδίου (Τσιρτσής 1993, παρούσα έρευνα – παράγραφος 6.1.3) υποστηρίζουν την αύξηση της βιομάζας των αυτότροφων μικροοργανισμών στα μέσα της χειμερινής περιόδου, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο και επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα πεδίου. Παρόμοιες συνθήκες με αυτές έχουν αναφερθεί κατά το παρελθόν στη βιβλιογραφία (Mann and Lazier 1996, σελ. 75). Είναι χαρακτηριστικό ότι την χειμερινή περίοδο της προσομοίωσης από Νοέμβριο 2001 έως Ιανουάριο 2002, που η θεωρία προβλέπει υψηλές συγκεντρώσεις ανόργανων θρεπτικών στη στήλη λόγω διεργασιών ανοργανοποίησης και αναγέννησης (mineralization – regeneration), οι συγκεντρώσεις των νιτρικών και φωσφορικών διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα (νιτρικά <math><0.4 \mu\text{M}</math>, φωσφορικά <math><0.05 \mu\text{M P}</math>), λόγω της απομάκρυνσής τους από τη στήλη από την αυξημένη πρωτογενή παραγωγή, ειδικά τον Ιανουάριο 2002 (ενδεικτικά, σχήματα 8.11(7) και 8.12(7)).

Ακολουθεί η εαρινή αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, η οποία δεν προσομοιώνεται από το μοντέλο ως συγκεκριμένη και εντοπισμένη χρονικά έξαρση αλλά ως μια σταδιακή αύξηση της βιομάζας από τα μέσα της χειμερινής περιόδου έως τα μέσα της άνοιξης του 2002 (ενδεικτικά, σχήματα 8.9 και 8.10, 25 Ιαν - 23 Μαρ 2002, σχήμα 8.13). Συγκριτικά υψηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού αναπαράγονται από το μοντέλο την περίοδο από μέσα Μαρτίου 2002 έως μέσα Απριλίου 2002. Την περίοδο αυτή, η φυτοπλαγκτονική συγκέντρωση στη στήλη κυμαίνεται μεταξύ 12 – 25 mg C/m<sup>3</sup>, ενώ στις αρχές Απριλίου 2002 και στα βαθύτερα στρώματα, κάτω από τα 10μ βάθος (όπου το μοντέλο έχει μεγαλύτερη ακρίβεια) φτάνει να κυμαίνεται μεταξύ 20 – 25 mg C/m<sup>3</sup>. Μολονότι το μοντέλο υποεκτιμάει τη συγκέντρωση φυτοπλαγκτονικού άνθρακα στην περιοχή του λιμένα (εσωτερικά του λιμανιού και γύρω από τον σταθμό M1) την περίοδο αυτή (όπως και το καλοκαίρι του 2001),

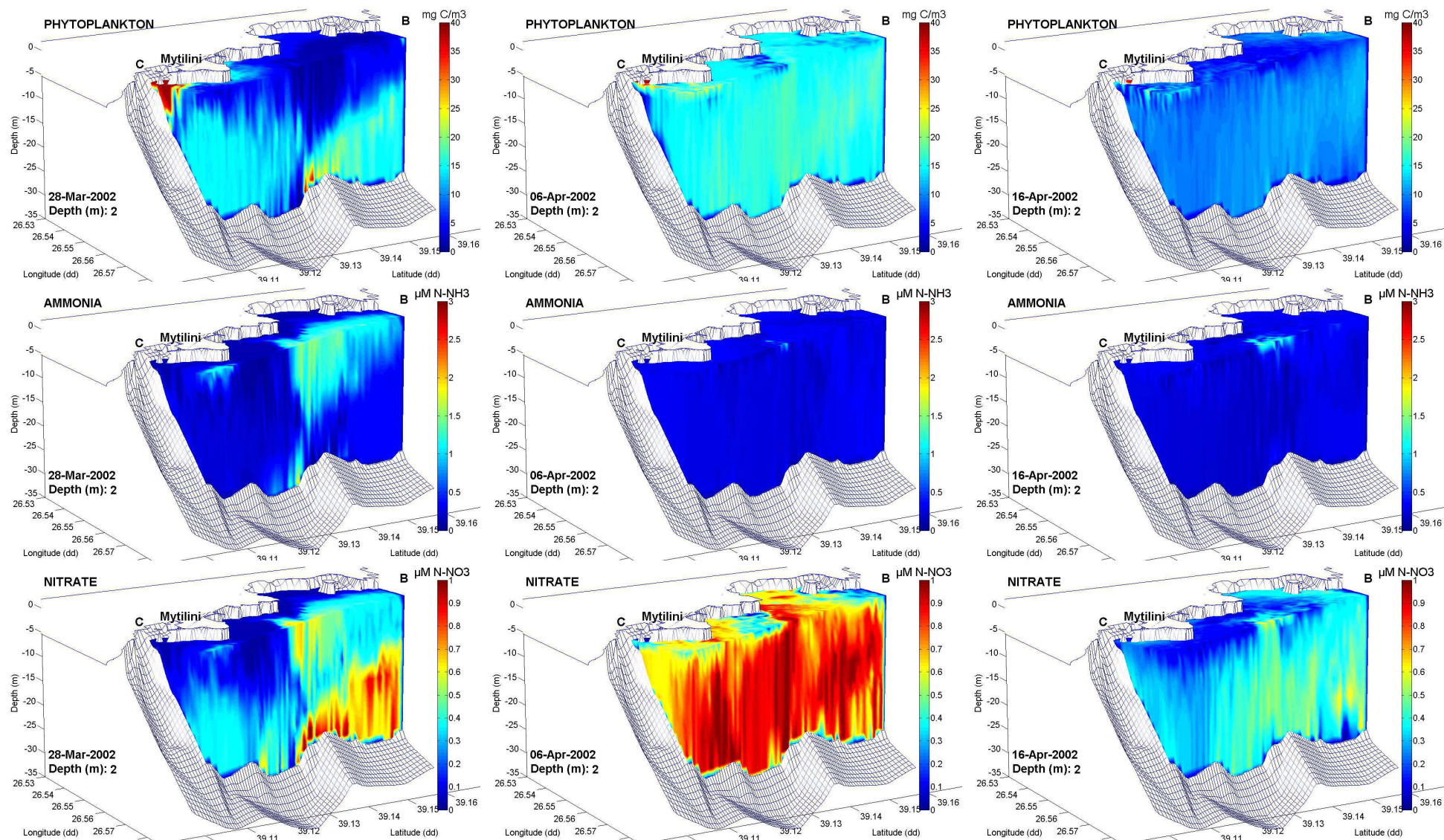
εντούτοις υπολογίζει επιτυχώς τις υψηλότερες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτονικής βιομάζας (συνήθως ξεπερνούν τα  $40 \text{ mg C/m}^3$ ) συγκριτικά με την υπόλοιπη περιοχή μελέτης. Στο σχήμα 8.14 παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού στην περιοχή ανοιχτά του λιμένα σε διαδοχικά στιγμιότυπα ημερήσιας συχνότητας κατά το χρονικό διάστημα 20-28 Απρ 2002, μιας περιόδου όπου στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης η φυτοπλαγκτονική συγκέντρωση παρουσιάζει κάμψη σηματοδοτώντας το πέρας της εαρινής αύξησης. Η δυναμική της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας όπως προσομοιώνεται από το μοντέλο παραπέμπει σε επεισοδιακό γεγονός, καθώς υπολογίζεται τοπικά απότομη αύξηση σε σύντομο χρονικό διάστημα της τάξης 1-10 ημερών.

Η εκλεκτική προτίμηση των κυττάρων φυτοπλαγκτού στην πρόσληψη αμμωνιακών έναντι νιτρικών αλάτων για την κάλυψη των αναγκών τους σε άζωτο (μηχανισμός που λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο με τη σχέση 5.34), είναι εμφανής στους προσομοιωμένους κύκλους: η αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας την εαρινή περίοδο του 2002 (π.χ. σχήματα 8.9 και 8.10, 23 Μαρ 2002) συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της συγκέντρωσης αμμωνιακών ( $<0.5 \mu\text{M N-NH}_4^+$ ), ενώ ταυτόχρονα η συγκέντρωση νιτρικών διατηρείται σε επίπεδα άνω των  $0.5 \mu\text{M N-NO}_3^-$  (σχήμα 8.11 - κάτω σειρά, σχήμα 8.13). Τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα προσλαμβάνουν αμμωνιακά ιόντα μειώνοντας τα αποθέματά τους στη στήλη και στη συνέχεια χρησιμοποιούν τα αποθέματα νιτρικών, τα οποία τείνουν να εξαντληθούν έως το τέλος Απριλίου 2002, οπότε η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού περιορίζεται πλέον από τη διαθεσιμότητα αζώτου. Έως το τέλος Απριλίου 2002, οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού υποχωρούν σε επίπεδα κάτω των  $10 \text{ mg C/m}^3$ , εκτός από την περιοχή του λιμένα, όπου διατηρούνται σε υψηλότερες τιμές, άνω των  $25 \text{ mg C/m}^3$ . Η περίοδος που ακολουθεί (Μάιος – Ιούνιος 2002) χαρακτηρίζεται από μικρές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού, περίπου γύρω στα  $5 \text{ mg C/m}^3$  ή και χαμηλότερες.

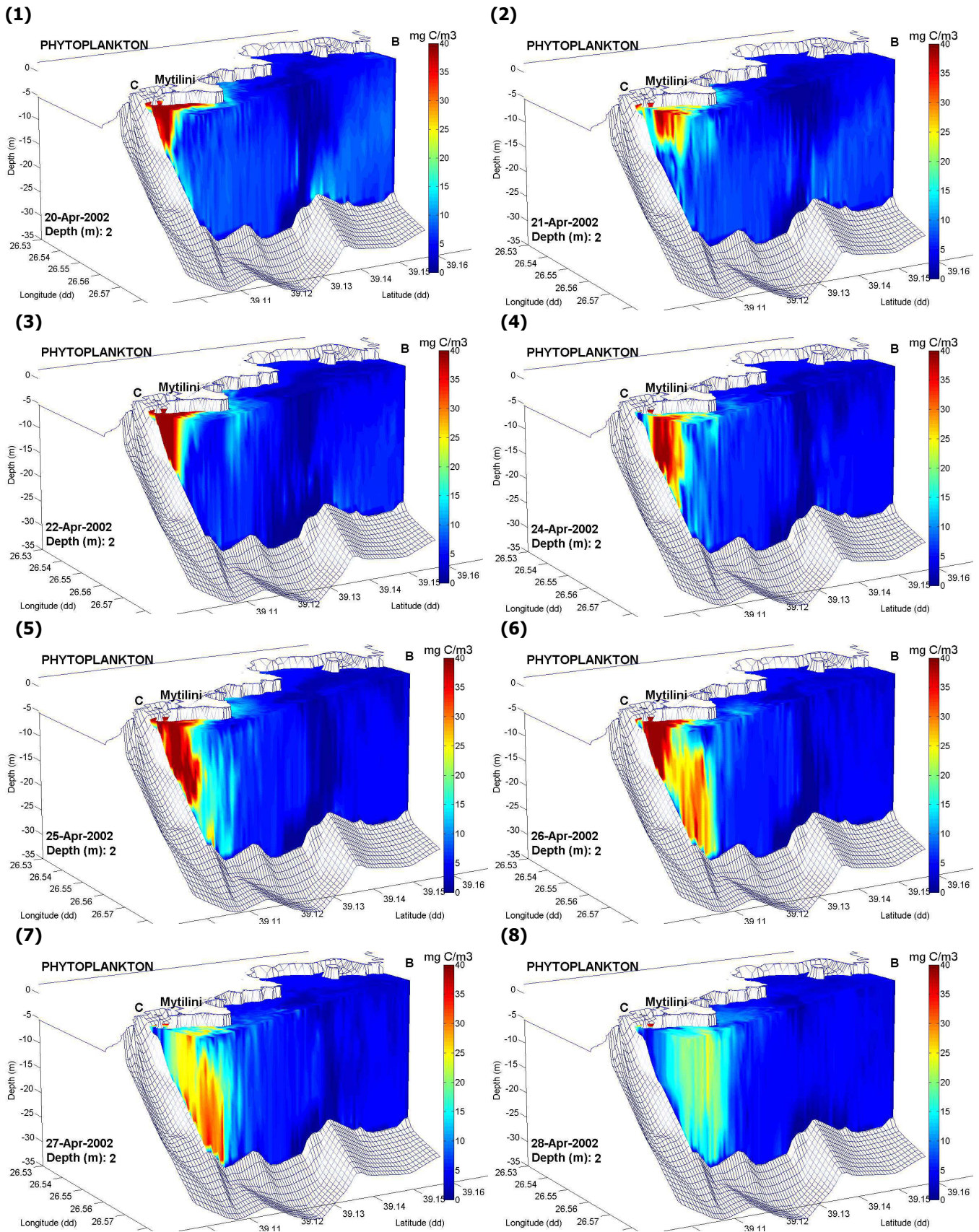
Η αύξηση των συγκεντρώσεων ανόργανων αλάτων αζώτου και φωσφόρου, που υπολογίζει το μοντέλο και επιβεβαιώνουν τα δεδομένα πεδίου και χαρακτηρίζει την περίοδο μετά την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση έως περίπου τα μέσα Ιουνίου 2002, αποδίδεται στην αυξημένη βιολογική δραστηριότητα ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης. Στο πραγματικό σύστημα, η θνησιμότητα και οι απεκκρίσεις των αυξημένων ποσοτήτων φυτοπλαγκτονικών κυττάρων τροφοδοτούν τη στήλη νερού απευθείας με αμμωνία αλλά κυρίως με οργανική ύλη (όπως δείχνουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις διαλυμένου οργανικού άνθρακα, κυμαινόμενες μεταξύ 700-1200 mg

C/m<sup>3</sup>), που χρησιμοποιείται από τα ετερότροφα βακτήρια ως πηγή τροφής. Βακτηριακές διεργασίες του μικροβιακού κύκλου (microbial loop), που δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα μορφή του μοντέλου αλλά παραμετροποιούνται, είναι υπεύθυνες για την αναγέννηση φωσφορικών και αμμωνιακών αλάτων και τον εμπλουτισμό της στήλης του νερού με άζωτο και φωσφόρο στην ανόργανη μορφή τους, ταυτόχρονα με τις διεργασίες διάχυσης από το ίζημα και της μεταφοράς από γειτονικές μάζες νερού μέσω της φυσικής κυκλοφορίας.

Η παραπάνω αύξηση των συγκεντρώσεων δεν είναι ταυτόχρονη για τα θρεπτικά. Προηγούνται τα φωσφορικά, η κορύφωση των οποίων ξεκινάει μετά την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση (γύρω στις 10 Απρ 2002), ενώ οι υψηλές συγκριτικά συγκεντρώσεις (0.1 – 0.15 μM P) διατηρούνται για ένα διάστημα 40 ημερών έως περίπου τις 20 Μαΐου 2002. Για τα αμμωνιακά, η αύξηση της συγκέντρωσης παρατηρείται περίπου ένα μήνα αργότερα, στο διάστημα από 10 Μαΐου έως μέσα Ιουνίου 2002, με κορύφωση τιμών γύρω στο τέλος Μαΐου, μεταξύ 2.5 – 3 μM N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Αυτή η αναγεννημένη ποσότητα ανόργανου διαλυτού αζώτου με τη μορφή αμμωνίας είναι που συντηρεί την λεγόμενη 'δευτερογενή' φυτοπλαγκτονική παραγωγή αργά την άνοιξη και νωρίς το καλοκαίρι, σε χαμηλά επίπεδα παραγωγικότητας όμως, όπως δείχνουν τα χαμηλά αποθέματα φυτοπλαγκτονικής βιομάζας του προσομοιωμένου οικοσυστήματος. Επιπλέον, αυτή η διαφορά φάσης στην αύξηση των αποθεμάτων θρεπτικών στη στήλη νερού ενδεχομένως εξηγεί τις χαμηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού, καθώς άζωτο και φωσφόρος πιθανώς εναλλάσσονται στο ρόλο του περιοριστικού παράγοντα. Η διακύμανση της συγκέντρωσης του DOC είναι αντίστροφη αυτή της αμμωνίας την περίοδο αυτή: όταν η αμμωνία σημειώνει αύξηση και φτάνει τις υψηλότερες τιμές, η συγκέντρωση της οργανικής ύλης ως διαλυμένος οργανικός άνθρακας μειώνεται, κυμαινόμενη μεταξύ 200 - 500 mg C/m<sup>3</sup> ή και χαμηλότερα. Σημειώνεται ότι ο προσομοιωμένος κύκλος του DOC όπως περιγράφηκε είναι γενικά σύμφωνος με ευρήματα από μετρήσεις DOC πεδίου στη Μεσόγειο (π.χ. Ribes et al. 1999, Vila-Reixach et al. 2012) και ως προς τα επίπεδα τιμών και ως προς τις γενικές τάσεις (π.χ. τιμές χειμώνα που τείνουν να αυξάνουν προς στο τέλος χειμώνα – αρχές άνοιξης λόγω φυτοπλαγκτονικής αύξησης, κάμψη στο πρώτο μισό του θέρους, αύξηση στο τέλος θέρους και κατά το φθινόπωρο) παρόλο που συχνά στο πεδίο δεν διακρίνεται σαφής εποχικότητα ενώ αναφέρεται και έντονη υπερετήσια μεταβλητότητα.



**Σχήμα 8.13.** Εξέλιξη εαρινής αύξησης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας (άνοιξη 2002, τρία στιγμιότυπα ανά 10 μέρες περίπου) και αντίστοιχη μεταβολή αποθεμάτων αμμωνιακών και νιτρικών αλάτων στη στήλη του νερού. Οριζόντιες κατανομές σε βάθος 2m και κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D.

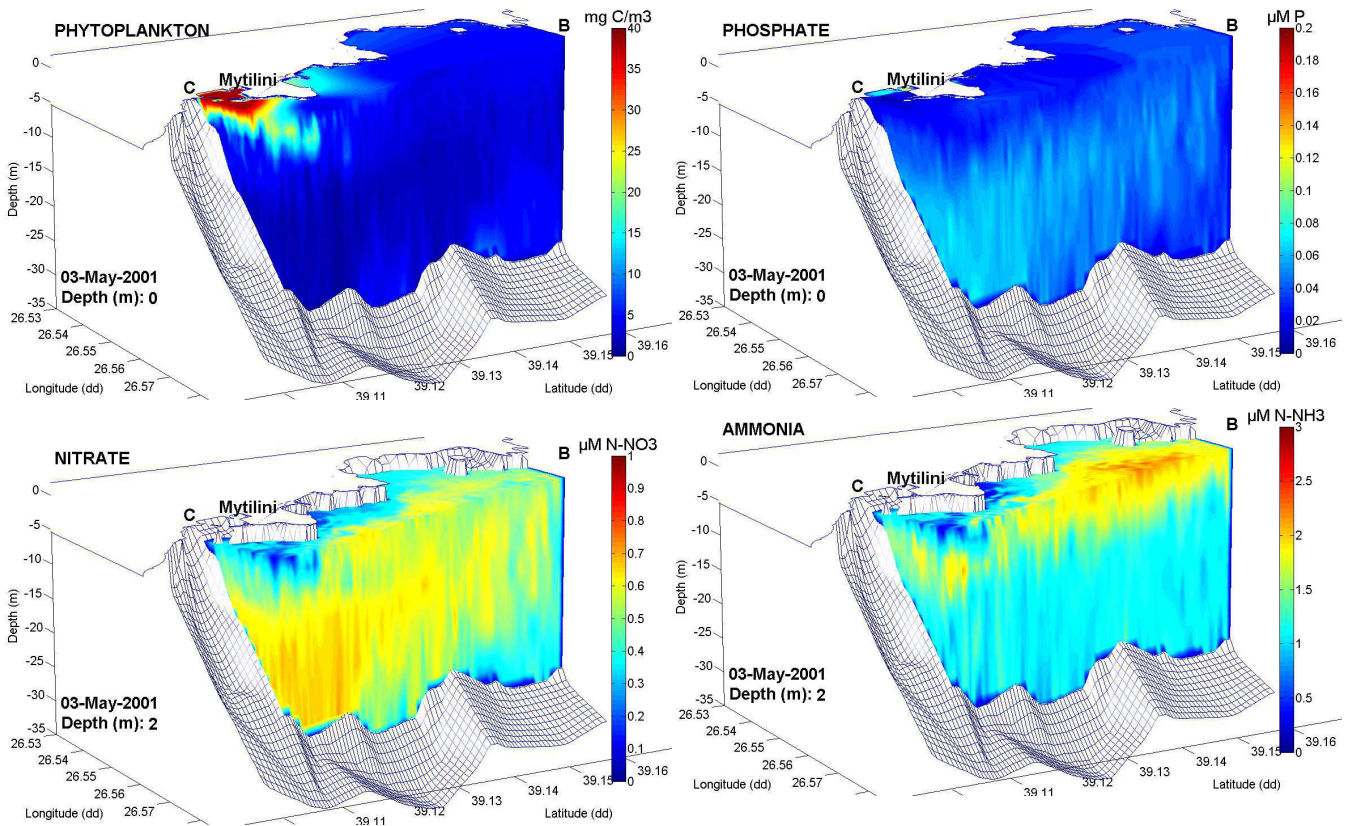


**Σχήμα 8.14.** Κατανομή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στη περιοχή ανοιχτά του λιμένα σε διαδοχικά στιγμιότυπα ημερήσιας συχνότητας την περίοδο 20-28 Απρ 2002. Οριζόντια κατανομή σε βάθος 2m και κατακόρυφες κατανομές κατά μήκος τμήματος των καμπυλών A-B και C-D.



### 8.3.2. Χωρική διακύμανση φυτοπλαγκτού, θρεπτικών και διαλυμένου οργανικού άνθρακα: οριζόντιες και κατακόρυφες κατανομές

Σημαντικές οριζόντιες βαθμίδες συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού αναπτύσσονται επιφανειακά καθόλη τη διάρκεια του έτους στην περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης, στην περιοχή του παλιού λιμένα (βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης) και γενικά στον άξονα δύση-ανατολή, με μείωση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας από την ακτή προς τα ανοιχτά, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.9 αλλά και στα υπόλοιπα σχήματα οριζόντιων κατανομών που ακολουθούν. Η οριζόντια αυτή κατανομή συνοδεύεται πολλές φορές από αντίστροφες οριζόντιες βαθμίδες των ανόργανων θρεπτικών: νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά τείνουν να εξαντλούνται κοντά στην ακτή, καθώς προσλαμβάνονται από το φυτοπλαγκτόν, ενώ η συγκέντρωσή τους αυξάνεται στα ανοιχτά. Η διαφορά συγκέντρωσης σε λίγες δεκάδες μέτρα απόσταση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 0.5  $\mu\text{M}$  N για τα νιτρικά, 1.5  $\mu\text{M}$  N για τα αμμωνιακά και 0.05  $\mu\text{M}$  P για τα φωσφορικά (π.χ. σχήμα 8.15, 3 Μαΐου 2001).



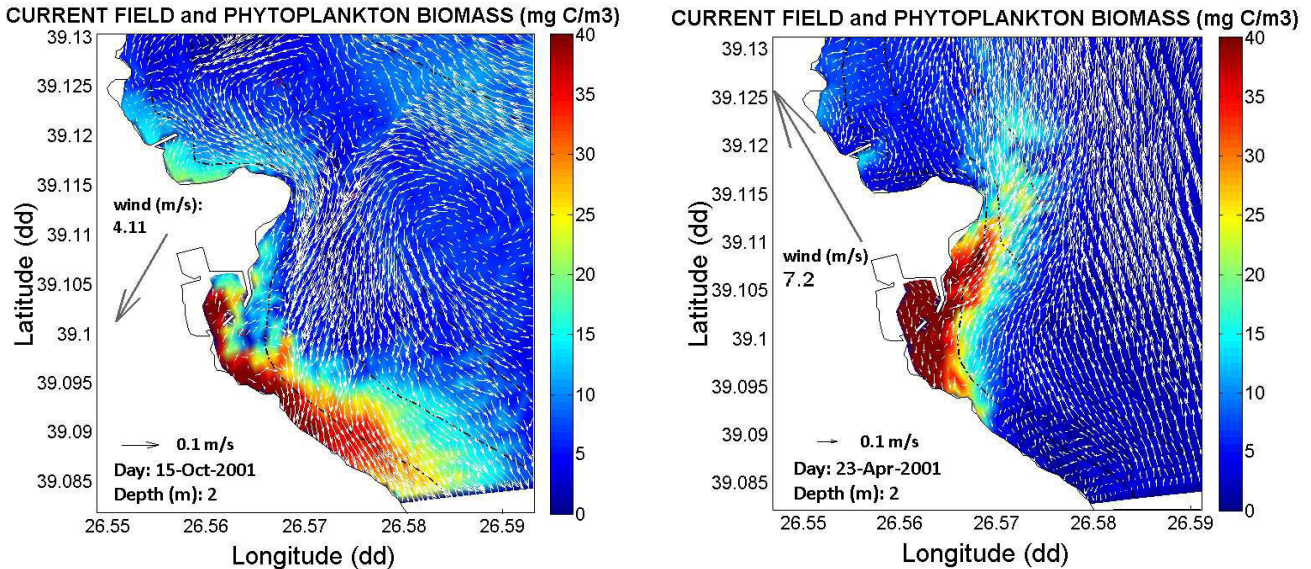
**Σχήμα 8.15.** Παράδειγμα ανάπτυξης οριζόντιας και κατακόρυφης βαθμίδας συγκέντρωσης φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, φωσφορικών, νιτρικών και αμμωνιακών αλάτων.

Επίσης, σημαντικές κατακόρυφες βαθμίδες συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού αναπτύσσονται σε όλη τη διάρκεια του έτους στη στήλη του νερού στην περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης (κοντά στο σημείο C), και γενικά στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, ανοιχτά της πόλης της Μυτιλήνης (προς το σημείο A στις τομές A-B), με αυξημένες συγκεντρώσεις στην επιφάνεια και μείωση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας με το βάθος, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα σχήματα 8.9, 8.10, 8.14, 8.14. Οι διαφορές συγκέντρωσης επιφάνειας-πυθμένα μπορούν να κυμαίνονται από 20 mg C/m<sup>3</sup> στα ανοιχτά έως και πάνω από 40 mg C/m<sup>3</sup> όσο πλησίον του λιμένα (π.χ. σχήματα 8.10, 8.14).

Ο ρόλος των φυσικών διεργασιών της μεταφοράς (advection) και τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion) είναι πολύ σημαντικός: η κυκλοφορία του νερού, κυρίως μέσω του παράκτιου ρεύματος (coastal jets) και των στροβιλωδών κινήσεων που αναπτύσσονται, αναλαμβάνει να διευθετήσει και να διασπείρει ανοιχτά από την περιοχή του λιμένα την φυτοπλαγκτονική βιομάζα που αναπτύσσεται εντός αυτού, όπως δείχνουν στις κατακόρυφες τομές και τις οριζόντιες κατανομές σε βάθος 2m, οι σχεδόν σταθερά υψηλότερες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού στην περιοχή (σχήματα 8.9, 8.10, 8.16). Το ίδιο ισχύει και για τις αυξημένες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτονικού άνθρακα που υπολογίζει συχνά το μοντέλο και στην περιοχή του παλιού λιμένα, βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης. Υπενθυμίζεται ότι κατά την περίοδο της προσομοίωσης, οι δυο περιοχές ήταν αποδέκτες ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων κάτι που λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση (κεφάλαιο 5, παράγραφος 5.2.8). Ο εμπλουτισμός με θρεπτικά και οργανική ύλη από την διάθεση ανεπεξέργαστων λυμάτων στον λιμένα Μυτιλήνης και στο παλιό λιμάνι, διακρίνεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (π.χ. σχήμα 8.12, φωσφορικά στην επιφάνεια εντός του λιμένα) και τροφοδοτεί αυτά τα τοπικά φαινόμενα ευτροφισμού που αναπαράγονται επιτυχώς από το μοντέλο, μολονότι σε αρκετές περιόδους του έτους υποεκτιμούνται τα ποσά φυτοπλαγκτονικής βιομάζας που αναπτύσσονται.

Στον άξονα βορρά-νότου, στα πρώτα 10m της στήλης και κυρίως κοντά στην επιφάνεια, όταν αναπτύσσεται βαθμίδα συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού, η βιομάζα τείνει να αυξάνει από βορρά προς νότο (σχήματα 8.9, 8.10). Η διαφορά στις συγκεντρώσεις μεταξύ βορρά και νότου μπορεί να κυμαίνεται από 3-4 mg C/m<sup>3</sup> (π.χ. τέλος Απριλίου 2001) έως και περίπου 20 mg C/m<sup>3</sup> (π.χ. τέλος Απριλίου 2002). Στα βαθύτερα στρώματα, π.χ. στα 20m βάθος, οι βαθμίδες που αναπτύσσονται την άνοιξη έως και τον Ιούλιο (και τα δυο έτη, 2001-2002) δείχνουν ότι στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης παράγεται ελαφρώς μεγαλύτερη ποσότητα

φυτοπλαγκτονικής βιομάζας από ότι στο νότιο (σχήματα 8.9, 8.10), με μικρές διαφορές της τάξης των  $3-4 \text{ mg C/m}^3$ .



**Σχήμα 8.16.** Μεταφορά και διασπορά φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στην ευρύτερη περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης από την κυκλοφορία του νερού υπό την επίδραση ανέμου από επικρατούσες διευθύνσεις (στιγμιότυπα). Αριστερά, βόρειο-ανατολικός άνεμος – φθινόπωρο, δεξιά, νότιο-ανατολικός άνεμος – άνοιξη. Διακρίνονται οι ισοβαθείς των 10, 20, 30, 40m αντίστοιχα από την ακτή.

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα του μοντέλου, διαπιστώνεται ότι η στήλη του νερού έχει παρόμοια κατακόρυφη κατανομή φυτοπλαγκτού από τα μέσα άνοιξης έως και τον Ιούνιο του έτους 2001 και περίπου την ίδια περίοδο το 2002. Μετά την εαρινή αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα λόγω της μείωσης των ανόργανων θρεπτικών και βόσκησης του (η τελευταία διεργασία παραμετροποιείται στο μοντέλο), περίπου μεταξύ  $5-10 \text{ mg C/m}^3$  ή και χαμηλότερα, εκτός της περιοχής κοντά στο Λιμάνι. Το κοινό χαρακτηριστικό και στις δυο περιόδους είναι πως, κάτω από το θερμοκλινές που σταδιακά αρχίζει να αναπτύσσεται και να δημιουργείται έτσι η εποχική θερμική στρωμάτωση, δηλαδή σε βάθη άνω των 15m, η συγκέντρωση φυτοπλαγκτού τείνει να είναι  $3-4 \text{ mg C/m}^3$  υψηλότερη από ότι κοντά στην επιφάνεια (π.χ. σχήμα 8.10 - 16 Ιουν 2001). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στα βαθύτερα στρώματα από ότι στη μάζα νερού κοντά στην επιφάνεια σχετίζονται με την αντίστοιχη κατακόρυφη κατανομή φωσφορικών αλάτων (υψηλότερες συγκεντρώσεις στα βαθύτερα στρώματα από ότι κοντά στην επιφάνεια), που είναι και ο περιοριστικός παράγοντας θρέψης τις περιόδους αυτές (βλ. Σχήμα 6.20).

Αυτή η κατακόρυφη κατανομή της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας διατηρείται, σε γενικές γραμμές, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού 2001 και διαρκεί περίπου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου 2001. Η μικρή αύξηση της συγκέντρωσης περίπου στα 8 mg C/m<sup>3</sup> και κυρίως σε βάθη άνω των 10m από αρχές Αυγούστου 2001 (π.χ. σχήμα 8.10 – 1 Αυγ 2001) θα μπορούσε να αποδοθεί στην αντίστοιχη αύξηση της συγκέντρωσης φωσφορικών σε αυτά τα βάθη, ιδιαίτερα στο βόρειο τμήμα της περιοχής (τομή E - F), από χαμηλές τιμές (κοντά στο όριο ανίχνευσης ~0.02 μM P) σε τιμές της τάξης 0.1-0.15 μM P.

Οι μετρήσεις πεδίου δείχνουν ότι την περίοδο που ακολουθεί από περίπου μέσα Σεπτεμβρίου έως Νοέμβριο, η φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη στο οικοσύστημα τείνει να περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα αζωτούχων ανόργανων θρεπτικών (N - limited) (βλ. Σχήμα 6.20). Από τα μέσα Σεπτεμβρίου και τον Οκτώβριο του 2001, η φυτοπλαγκτονική συγκέντρωση εξακολουθεί να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα αλλά η κατακόρυφη κατανομή τείνει να αντιστραφεί: οι μικρότερες τιμές υπολογίζονται στα βαθύτερα στρώματα και οι μεγαλύτερες κοντά στην επιφάνεια (π.χ. σχήμα 8.10 – 15 Οκτ 2001). Την ίδια κατανομή έχουν και τα νιτρικά άλατα, που φαίνεται πως αυτά συντηρούν κυρίως πλέον την φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη, ενώ τα αμμωνιακά άλατα έχουν αντίστροφη κατανομή: μικρότερες συγκεντρώσεις αμμωνιακών όπου υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση φυτοπλαγκτού, καθώς φαίνεται πως εξαντλούνται από την πρόσληψή τους από το αυτότροφο τμήμα του μοντέλου. Στα βαθύτερα στρώματα, η φυτοπλαγκτονική βιομάζα τείνει πλέον να αυξάνει από νότο προς βορρά, όπως συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια. Μολονότι το μοντέλο υποεκτιμάει τις συγκεντρώσεις τη δεδομένη χρονική στιγμή (Σχήμα Π11.16), η γενική αυτή τάση στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο επαληθεύεται από τα δεδομένα πεδίου (βλ. τιμές πεδίου φυτοπλαγκτού 22 Νοε 2001).

Προς τα τέλη Οκτωβρίου, τον Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2001, οι τιμές βιομάζας είναι γενικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με το καλοκαίρι. Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, την περίοδο αυτή η φυτοπλαγκτονική βιομάζα τείνει να αυξάνει σταδιακά και για ένα χρονικό διάστημα περίπου ενός μηνός (από 10 Ιαν έως 10 Φεβ 2002) φτάνει σε επίπεδα της τάξης 15 – 20 mg C/m<sup>3</sup>. Καθώς η θερμική ομογενοποίηση μέσω της ψύξης της στήλης δημιουργεί συνθήκες καλής κατακόρυφης ανάμιξης, οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα στη στήλη, με τις υψηλότερες τιμές κοντά στην επιφάνεια και προς το νότο (σχήματα 8.9 και 8.10).

Κατά την εαρινή φυτοπλαγκτονική αύξηση, η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο την περίοδο από μέσα Μαρτίου 2002 έως μέσα Απριλίου 2002, οι φυτοπλαγκτονικοί πληθυσμοί ανταποκρινόμενοι στην επάρκεια φωτός και ανόργανων θρεπτικών, αυξάνουν την βιομάζα τους πρώτα στα βαθύτερα στρώματα κυρίως του βόρειου τμήματος της περιοχής μελέτης, στα ανοιχτά του κόλπου Θερμής (σχήματα 8.9, 8.10, 8.13). Η διαφορά τιμών μεταξύ νερού κοντά στην επιφάνεια (χαμηλότερες συγκεντρώσεις) – βαθύτερων στρωμάτων (άνω των 15m – υψηλότερες συγκεντρώσεις) μπορεί να ξεπερνάει για λίγες μέρες τα 10 mg C/m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια, η αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας γενικεύεται σε ολόκληρη τη μάζα νερού και διευθετείται από την κυκλοφορία του νερού, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.9 (23 Μαρ 2002): οι αυξημένες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού μεταφέρονται από το πεδίο ρευμάτων νοτιότερα από το νότιο ρεύμα που επικρατεί σε βάθος 20m, σε όλη την περιοχή. Λίγες μέρες αργότερα (π.χ. στις 2 Απρ 2002, δεν παρουσιάζεται εδώ), οπότε η διεύθυνση του ρεύματος σε αυτό το βάθος έχει αντιστραφεί προς βορρά, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού (>20 mg C/m<sup>3</sup>) περιορίζονται στο βόρειο τμήμα του υπολογιστικού πεδίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, και για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, υλοποιήθηκε ο παρακάτω σχεδιασμός:

- Πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση υδροδυναμικών, οικολογικών και συζευγμένων μοντέλων από την διεθνή βιβλιογραφία, των θεωριών και των τάσεων που επικρατούν στην επιστημονική κοινότητα.
- Επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο υδροδυναμικό μοντέλο από τη διεθνή βιβλιογραφία (Princeton Ocean Model). Η επιλογή του μοντέλου αυτού έγινε με κύρια κριτήρια την ικανότητά του να περιγράφει ικανοποιητικά τη δυναμική παράκτιων περιοχών όπως η περιοχή μελέτης, και την αποδοχή του από την επιστημονική κοινότητα ως έγκυρου εργαλείου προσομοίωσης.
- Έγινε ανασκόπηση ερευνών που έχουν διεξαχθεί στην ευρύτερη περιοχή του Στενού Μυτιλήνης, στην οποία περιγράφονται τα κυριότερα ευρήματα που προέκυψαν από αυτές.
- Εκπονήθηκε πρόγραμμα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων πεδίου (φυσικές, χημικές και βιολογικές μεταβλητές της στήλης νερού) από την παράκτια ζώνη της πόλης της Μυτιλήνης (Νήσος Λέσβος) στο χρονικό διάστημα από τον Ιούνιο του 2000 μέχρι το Νοέμβριο του 2002. Πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες με μηνιαία κατά το δυνατόν συχνότητα σε δίκτυο 4 σταθμών πριν την λειτουργία του Σταθμού Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων, ενώ το δίκτυο πύκνωσε με την προσθήκη άλλων 2 σταθμών μετά την έναρξη λειτουργίας του Σταθμού.
- Παράλληλα με την εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου, αναπτύχθηκε το οικολογικό σκέλος του ομοιώματος, αποτελούμενο από σύστημα εξισώσεων που περιγράφει τη δυναμική.
- Η ενσωμάτωση του οικολογικού σκέλους στο υδροδυναμικό μοντέλο έγινε ύστερα από βαθμονόμησή του με ανεξάρτητες μετρήσεις πεδίου.
- Το πλήρες, τρισδιάστατο, συζευγμένο μοντέλο εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης και, μετά από ποσοτικοποίηση του σφάλματος του μοντέλου, έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και περιγραφή των ευρημάτων.

## 9.1. Δυναμική του παράκτιου οικοσυστήματος της περιοχής μελέτης

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα για τη δυναμική του οικοσυστήματος της περιοχής μελέτης, όπως αναδεικνύονται από την σύνθεση της πληροφορίας που προκύπτει από τις μετρήσεις πεδίου και τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

### 9.1.1. Φυσικές μεταβλητές: Θερμοκρασία, αλατότητα, πυκνότητα, ταχύτητα ρεύματος, ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας

#### Εποχικότητα, θερμική στρωμάτωση, κατακόρυφη ανάμιξη

Τόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι κυρίαρχο χαρακτηριστικό είναι η εποχικότητα που εκδηλώνεται με την ανάπτυξη θερμικής στρωμάτωσης κατά τους θερμούς, θερινούς μήνες: η στήλη του νερού παρουσιάζει πλήρη κατακόρυφη ανάμιξη τους χειμερινούς, ψυχρούς μήνες (Ιανουάριο – Φεβρουάριο με θερμοκρασίες γύρω στους 14°C). Σταδιακά, τον Μάιο και κυρίως τον Ιούνιο, η θερμότητα που έχει απορροφήσει η επιφάνεια, οδηγεί στο σχηματισμό του θερμοκλινούς και του αντίστοιχου πυκνοκλινούς. Η στρωμάτωση είναι εντονότερη τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και στις αρχές Σεπτεμβρίου. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ επιφάνειας και πυθμένα παρατηρείται τον Ιούλιο, οπότε η επιφάνεια (25°C) μπορεί να είναι έως και 8 °C θερμότερη από τον πυθμένα (17 °C). Αντίστοιχα η πυκνότητα μεταξύ επιφάνειας (<27 Kg/m<sup>3</sup>) και πυθμένα (~29.2 Kg/m<sup>3</sup>) μπορεί να διαφέρει πάνω από 2.2 Kg/m<sup>3</sup>. Από τα μέσα έως τα τέλη Σεπτεμβρίου, οι υψηλές θερμοκρασίες διατηρούνται στην επιφάνεια αλλά η θερμότητα μεταφέρεται όλο και πιο βαθιά στη στήλη, με αποτέλεσμα τα βαθύτερα στρώματα να γίνονται θερμότερα και ελαφρύτερα. Σε συνδυασμό με την ελάττωση της θερμικής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας, η στρωμάτωση της στήλης και κατά συνέπεια και το θερμοκλινές, σταδιακά εξασθενούν. Κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου, το θερμοκλινές εξαφανίζεται και η στήλη τείνει να ομογενοποιηθεί θερμικά. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια περίοδος απώλειας θερμότητας από τη μάζα νερού, αύξησης της πυκνότητας και σταδιακής αποκατάστασης της κατακόρυφης ανάμιξης στη στήλη. Όπως προέκυψε από τα διαγράμματα T-S, κατά τις περιόδους πλήρους κατακόρυφης ανάμιξης, η περιοχή μελέτης αποτελείται από σχεδόν μία μάζα νερού ή έστω μάζες νερού με πολύ συγγενικά υδρογραφικά χαρακτηριστικά. Κατά τις περιόδους έντονης στρωματοποίησης, τείνουν να αναπτύσσονται δυο διαφορετικές μάζες νερού, μία

επιφανειακή και μία στα βαθύτερα στρώματα, που διαχωρίζονται από το έντονο θερμοκλινές.

Η αλατότητα κυμαίνεται σε ένα στενό εύρος υψηλών τιμών (38.31 – 41.01 κατά την περίοδο μελέτης, εκφρασμένη στην κλίμακα PSS-78), χωρίς να αναπτύσσονται έντονες οριζόντιες ή κατακόρυφες βαθμίδες, κάτι που οφείλεται στην έλλειψη πηγών γλυκού νερού στην περιοχή, πέραν των εποχικών χερσαίων μη σημειακών απορροών. Αν και η επίδρασή της στη δομή της πυκνότητας και σταθερότητας της στήλης είναι μάλλον περιορισμένη συγκριτικά με τη θερμοκρασία, εντούτοις σε πολλές περιπτώσεις καθορίζει τις λεπτομέρειες. Η προσομοίωση έδειξε ότι κατά τη διάρκεια του έτους δημιουργούνται χωρικές βαθμίδες της αλατότητας συναρτήσει του βάθους, στον άξονα βορρά-νότου και σε ορισμένες περιπτώσεις, από την ακτή προς τα ανοικτά. Τους ψυχρούς χειμερινούς μήνες, η κατακόρυφη βαθμίδα αλατότητας που αναπτύσσεται μπορεί να ξεπερνάει τη 1 μονάδα (psu) μεταξύ επιφάνειας (~39) και βαθύτερων στρωμάτων (>39.6).

Η αντίδραση της παράκτιας θαλάσσιας μάζας στη φόρτιση από ανέμους που πνέουν παράλληλα με την ακτή περιλαμβάνει διεργασίες ανάδυσης και καταβύθισης (upwelling-downwelling), οι οποίες κατά τη θερμή περίοδο στρωμάτωσης γίνονται αντιληπτές ως μετατόπιση του θερμοκλινούς στον κατακόρυφο άξονα κοντά στο όριο της ακτής. Όταν στην ευρύτερη περιοχή πνέουν άνεμοι από βόρειες διευθύνσεις το επιφανειακό νερό κινείται συνολικά προς τα δεξιά της διεύθυνσης του ανέμου (όπως προβλέπει η θεωρία Ekman) και η συσσώρευση νερού κοντά στην ακτή πιέζει τις επιφανειακές μάζες να βυθιστούν βαθύτερα στη στήλη (καταβύθιση των επιφανειακών μαζών - downwelling). Το θέρος που το επιφανειακό νερό είναι θερμότερο, η βύθιση αυτή δημιουργεί κλίση του θερμοκλινούς. Μακριά από την ακτή, το θερμοκλινές βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια και είναι πιο απότομο, ενώ όσο ρηχάινει ο πυθμένας, το θερμοκλινές βαθαίνει, καταλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της στήλης του νερού και η κατακόρυφη θερμοκρασιακή βαθμίδα είναι λιγότερο απότομη. Επιπλέον, οι τυρβώδεις διεργασίες που επικρατούν στη στήλη του νερού σε μικρά βάθη (και λαμβάνονται υπόψη από το υδροδυναμικό μοντέλο) εκτιμάται ότι συνεισφέρουν στη δημιουργία της παραπάνω δομής του θερμοκλινούς κοντά στην ακτή: αφενός ο άνεμος αναδεύει το νερό μέσω των επιφανειακών διατμητικών τάσεων, η επίδραση των οποίων γίνεται πολλές φορές αισθητή μέχρι τον πυθμένα, αφετέρου η τριβή που αναπτύσσεται από την κίνηση του νερού πάνω από τον



πυθμένα, είναι διεργασίες που δουλεύουν ενάντια στη στρωματοποίηση, αυξάνουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια και διευκολύνουν την κατακόρυφη ανάμιξη της θερμότητας και την τυρβώδη διάχυσή της σε βαθύτερα στρώματα.

Το αντίθετο φαινόμενο, δηλαδή ανάδυση νερού, συμβαίνει όταν ο άνεμος πνέει από νότιες διευθύνσεις: το επιφανειακό νερό κινείται συνολικά προς τα δεξιά της διεύθυνσης του ανέμου δηλαδή τείνει να απομακρύνεται από την ακτή και να αναπληρώνεται από μάζες νερού προερχόμενες από βαθύτερα στρώματα κοντά στην ακτή. Έτσι, το θέρους που το νερό που αναδύεται στη στήλη είναι ψυχρότερο από το επιφανειακό, κοντά στην ακτή, το θερμοκλινές ανέρχεται και βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια.

#### Ταχύτητα ρεύματος και ανάπτυξη συστήματος κυκλοφορίας δύο στρωμάτων

Αν και οι ρευματομετρήσεις που έγιναν είναι αποσπασματικές και αποτελούν στην ουσία στιγμιότυπα της κυκλοφορίας, βοήθησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το υδροδυναμικό καθεστώς, σε συνδυασμό με την κατανομή θερμοκρασίας - αλατότητας και τα ανεμολογικά δεδομένα, έστω τις δεδομένες στιγμές. Σε 13 από τις 19 ρευματομετρήσεις (ποσοστό 68%) ανιχνεύτηκε σαφώς η ύπαρξη παράκτιου ρεύματος, που διατρέχει τις ακτές γενικά παράλληλα με αυτές, με κατεύθυνση τόσο προς νότο (νοτιοανατολικά) όσο και προς βορρά (βορειοδυτικά). Το μέτρο της ταχύτητας του ρεύματος ήταν συνήθως μικρό, της τάξης των 1-5 cm/s, αλλά μπορεί να ξεπεράσει και τα 25-30cm/s. Η προσομοίωση ωστόσο έδειξε ότι οι μέγιστες ταχύτητες του ρεύματος στην επιφάνεια μπορούν να φτάσουν τα 0.6 – 0.7 m/s, για ταχύτητες ανέμου 7 μποφόρ (~15m/s) και άνω.

Το μοντέλο υποδεικνύει ότι αναπτύσσεται επιφανειακό, ανεμογενές ρεύμα παράλληλα με την ακτή (coastal jet) σε συνδυασμό με ένα υποεπιφανειακό στρώμα πάνω από τον πυθμένα που κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση (subsurface countercurrent). Σχηματίζεται έτσι συχνά στη στήλη νερού ένα σύστημα κυκλοφορίας δύο στρωμάτων (ή και τριών στρωμάτων σε ορισμένες περιπτώσεις), αντίθετα κινούμενων. Η κατακόρυφη αυτή κατανομή του ρεύματος, που αναπτύσσεται συχνά σε παράκτιες περιοχές, είναι ενδεικτική της σημασίας των βαροκλιτικών συνθηκών για την περιοχή και βρέθηκε στο πεδίο (ρευματομετρήσεις) τόσο σε συνθήκες καλής ανάμιξης όσο και στρωμάτωσης, γενικά σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου.

Η δομή που κυρίως εμφανίζεται στην περιοχή κατά την περίοδο της προσομοίωσης (24/3/2001 – 1/7/2002) είναι η εξής: το επιφανειακό στρώμα με βάθος που μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 25m κινείται με κατεύθυνση προς βορρά ενώ η υπόλοιπη στήλη (ένα υποεπιφανειακό στρώμα πάνω από τον πυθμένα και προς τα ανοιχτά) κινείται αντίθετα, προς νότο, με χαμηλότερες ταχύτητες. Επικρατεί από την αρχή της προσομοίωσης έως περίπου μέσα Ιουνίου 2001 και από το τέλος Σεπτεμβρίου 2001 έως αρχές Ιουνίου 2002. Κατά τους θερμούς, θερινούς μήνες (Ιούλιος 2001, κυρίως Αύγουστος 2001 έως μέσα Σεπτέμβρη 2001), κάτω από τη δράση και του ανέμου που πνέει σταθερά από βόρειες διευθύνσεις αυτήν την περίοδο, η κατακόρυφη κατανομή ταχυτήτων στην περιοχή μελέτης αντιστρέφεται: το επιφανειακό στρώμα μέχρι βάθους 5-15m κινείται προς νότο ενώ η υπόλοιπη στήλη από βάθος περίπου 15m και κάτω έχει κατεύθυνση κυρίως προς βορρά. Σε συνθήκες στρωμάτωσης, το θερμοκλινές είναι γενικά η ζώνη της στήλης νερού που χωρίζει τα στρώματα που κινούνται προς αντίθετη κατεύθυνση και άρα εκεί αναπτύσσονται έντονες βαθμίδες της ταχύτητας (shears). Η παραπάνω περιγραφή της χρονικής διακύμανσης της διεύθυνσης του επιφανειακού παράκτιου ρεύματος είναι γενικά σε θετική συσχέτιση με τη χρονική διακύμανση του ανύσματος του ανέμου στην περιοχή.

Αντιστροφές της διεύθυνσης του ανέμου οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές στη διεύθυνση του ρεύματος των αντίθετα κινούμενων στρωμάτων. Αυτή η προσαρμογή της παράκτιας κυκλοφορίας στη διακύμανση της φόρτισης από τον άνεμο γίνεται γρήγορα. Καθώς τα άμεσα αποτελέσματα της διατμητικής τάσης του ανέμου περιορίζονται κυρίως κοντά στην επιφάνεια, η ροή του υποκείμενου στρώματος τείνει να πάρει αντίθετη κατεύθυνση, προκειμένου να εξισορροπήσει τη ροή του επιφανειακού στρώματος, με δεδομένο ότι το όριο της ακτογραμμής εμποδίζει την κυκλοφορία προς άλλες κατευθύνσεις.

#### Στροβιλώδης κυκλοφορία νερού στην ακτογραμμή

Στις εγκοιλώσεις της ακτογραμμής αναπτύσσονται πολύ συχνά περιστροφικές κινήσεις του νερού (vortices, eddies) όταν η ταχύτητα ρεύματος στα ανοιχτά προσεγγίζει τα 0.1m/s. Η φορά περιστροφής των στροβιλωδών αυτών σχηματισμών εξαρτάται από την διεύθυνση του ρεύματος στα ανοιχτά: με βόρειο ρεύμα έχουν κυκλωνική - αριστερόστροφη φορά (θετική στροβιλότητα) ενώ με νότιο ρεύμα αντικυκλωνική - δεξιόστροφη φορά (αρνητική στροβιλότητα). Μπορεί να

περιορίζονται στην επιφάνεια ή να εκτείνονται σε βάθος στη στήλη του νερού έως και 20m, ακόμα και να έχουν διαφορετική φορά περιστροφής ανάλογα με το βάθος. Η χρονική κλίμακα των σχηματισμών αυτών καθορίζεται από τη διάρκεια και τις εναλλαγές των διευθύνσεων του ανέμου και μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 10 μέρες περίπου ή και περισσότερο, όπως λ.χ. κατά τη διάρκεια του θέρους του 2001, όπου κάτω από την επίδραση ανέμων που έπνεαν σταθερά από βόρειες – βορειοδυτικές διευθύνσεις, οι αντικυκλωνικοί στρόβιλοι ήταν σχεδόν μόνιμο χαρακτηριστικό στην επιφάνεια. Ειδικά στην περιοχή του όρμου Παναγιούδας, το μοντέλο δείχνει ότι η στροβιλώδης κίνηση του νερού είναι πολύ συχνό φαινόμενο.

Ο σχηματισμός αυτών των στροβίλων είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των μορφολογικών χαρακτηριστικών της ακτογραμμής επάνω στην παράκτια ροή: τα ποικίλα ακρωτήρια δρουν ως εμπόδια στην ροή. Πολύπλοκες διεργασίες που περιλαμβάνουν (α) επιβράδυνση της ροής μέσω των μηχανισμών της αντίστασης τριβής (skin drag: τριβή της ροής με την κεκλιμένη τοπογραφία του πυθμένα) και της αντίστασης λόγω σχήματος (form drag: διαφορές πίεσης κατά μήκος ενός εμποδίου στη ροή) και (β) διαχωρισμό της ροής (current separation), οδηγούν στην ανάπτυξη οριζόντιων και κατακόρυφων βαθμίδων ταχύτητας (velocity shears) και τελικά στροβιλότητας (vorticity), που εκδηλώνεται ως περιστροφική κίνηση του νερού. Η σημασία αυτών των στροβίλων εκτιμάται ότι είναι μεγάλη καθώς από τη βιβλιογραφία σχετίζεται με μια σειρά σημαντικών διεργασιών για τα παράκτια οικοσυστήματα, όπως: ενισχυμένη ανάμιξη, διασπορά και αραίωση ύλης αλλά και εγκλωβισμό, κατακράτηση και ανακυκλοφορία ρυπαντών και οργανισμών λειτουργώντας θετικά ή αρνητικά ανάλογα με τις υδροδυναμικές συνθήκες, προσθήκη θρεπτικών στη στήλη του νερού μέσω ανάδευσης και ανάμιξης, αυξημένη βιολογική δραστηριότητα, δυναμική ιζημάτων, ανάδυση και καταβύθιση νερού (upwelling-downwelling) ακόμα και για στρόβιλους μικρής κλίμακας διαμέτρου λίγων εκατοντάδων μέτρων.

#### Ισχύς φωτεινής ακτινοβολίας συναρτήσεως του βάθους

Από την ανάλυση των δεδομένων ισχύος φωτεινής ακτινοβολίας, την ελάττωσή της συναρτήσεως του βάθους, τη διακύμανση συναρτήσεως της εποχής και τη διαφάνειας της στήλης προέκυψαν τα παρακάτω:

(1) Το ποσοστό της επιφανειακής φωτεινής ισχύος που φτάνει κοντά στον πυθμένα είναι πάνω από 1%, ακόμα και τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες. Το βάθος στο οποίο η φωτεινή ισχύς είναι το 1% της επιφανειακής φωτεινής ισχύος (βάθος

ισοστάθμισης) σηματοδοτεί το κατώτερο όριο της εύφωτης ζώνης, του επιφανειακού τμήματος της στήλης όπου υπάρχει επάρκεια φωτεινής ενέργειας για φωτοσύνθεση από τους αυτότροφους οργανισμούς και ο ρυθμός φωτοσύνθεσης είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό απώλειας βιομάζας λόγω αναπνοής στο φυτοπλαγκτονικά κύτταρα. Η φωτεινή ισχύς κοντά στον πυθμένα είναι μεγαλύτερη ή κυμαίνεται σε εύρη που η βιβλιογραφία περιγράφει ως ισχύς φωτός στο βάθος ισοστάθμισης για τα φυτοπλαγκτονικά κύτταρα (γενικά  $0.24 - 2.4 \text{ W/m}^2$  και  $1.5 - 1.7 \text{ W/m}^2$  για ορισμένα από τα πιο κοινά διάτομα).

(2) ότι η εύφωτη ζώνη εκτείνεται συνήθως σε ολόκληρη τη στήλη νερού στην περιοχή μελέτης, αφού το εμπειρικά προσδιοριζόμενο βάθος της (με τη βοήθεια του δίσκου Secchi) είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο βάθος των σταθμών.

Φαίνεται λοιπόν πως στην περιοχή μελέτης αλλά και στη ευρύτερη περιοχή τείνει να υπάρχει επαρκής ποσότητα φωτεινής ενέργειας για φωτοσύνθεση στη στήλη του νερού ακόμα και τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες.

### 9.1.2. Οικολογικές μεταβλητές

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου δίνουν μια εικόνα της τροφικής κατάστασης της περιοχής μελέτης για την περίοδο 2000-2002 όμοια με αυτήν που περιγράφει ο Τσιρτσής (1994): στην περιοχή του λιμένα (σταθμός M1) βρέθηκαν, συγκριτικά με το Στενό, υψηλές τιμές ανόργανων μορφών αζώτου (νιτρικών και νιτρωδών αλάτων) και φωσφορικών αλάτων, ενώ οι πολύ υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης-α επιβεβαίωσαν το εύτροφο της περιοχής του λιμένα και το oligότροφο της περιοχής στα ανοιχτά του Στενού, που καλύπτουν οι υπόλοιποι σταθμοί. Οι σταθμοί M2, M3 και M4 (ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή εκβολής των επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης) εμφάνισαν διακυμάνσεις στις τιμές των νιτρικών, των νιτρωδών και των αμμωνιακών, οι οποίες ως ολικό ανόργανο άζωτο κυμαίνονται σε παραπλήσια επίπεδα. Στον σταθμό M6 μετρήθηκαν σχετικά μικρές τιμές νιτρικών και νιτρωδών, όμως η μέση τιμή των αμμωνιακών έδωσε υψηλή μέση τιμή DIN στην περιοχή.

#### Λόγος αζώτου:φωσφόρο (N:P) και διακύμανση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας

Δόθηκε έμφαση στη δυναμική του λόγου N:P γιατί συνδέει την διακύμανση των διαθέσιμων ανόργανων μορφών αζώτου με τη διακύμανση των φωσφορικών και της χλωροφύλλης-α που αποτελεί δείκτη φυτοπλαγκτονικής ανάπτυξης. Το ποσοστό των

μετρήσεων όπου ο λόγος N:P βρέθηκε πάνω από 16:1 κυμαίνεται μεταξύ 57% και 65%, είναι σε συμφωνία με μετρήσεις προηγούμενων μελετών (Τσιρτής 1994, προγράμμα MEDPOL) και αναδεικνύει το ρόλο των ορθοφωσφορικών αλάτων ως κύριο, θρεπτικό, περιοριστικό παράγοντα για την αύξηση του φυτοπλαγκτού στην περιοχή μελέτης. Φαίνεται μάλιστα πως σχηματίζεται βαθμίδα στην οποία ο λόγος N:P τείνει να μειώνεται από βορρά προς νότο. Ο φωσφόρος (φωσφορικά άλατα) υποδεικνύεται ως ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της πρωτογενούς παραγωγής, ωστόσο, υπάρχει έντονη εναλλαγή του με το άζωτο κατά τη διάρκεια του έτους, ακόμα και μεταξύ σταθμών την ίδια χρονική στιγμή.

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις πεδίου της παρούσας εργασίας με τις μετρήσεις του Τσιρτή (1994) προκύπτει ότι το παράκτιο σύστημα πριν την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση (που εκδηλώνεται κάποια στιγμή αργά τον Μάρτιο) τείνει να έχει επάρκεια ανόργανων μορφών αζώτου, καθώς οι μικροβιακές διεργασίες ανοργανοποίησης έχουν εφοδιάσει την 'δεξαμενή' κατά τη χειμερινή περίοδο, και η ανάπτυξη των κυττάρων φυτοπλαγκτού περιορίζεται από τη συγκέντρωση φωσφορικών (N:P>16, P limited). Οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτονικής βιομάζας τους χειμερινούς μήνες, που διαφοροποιούν κάπως τον ετήσιο κύκλο από τον τυπικό ετήσιο κύκλο του φυτοπλαγκτού στην ανοιχτή θάλασσα σε παράκτια εύκρατη περιοχή, είναι σαφής ένδειξη ότι την χειμερινή περίοδο οι δυο περιοριστικοί παράγοντες (α) των διαθέσιμων ανόργανων, θρεπτικών αλάτων αζώτου και φωσφόρου και (β) της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στη στήλη του νερού, κυμαίνονται σε επίπεδα που επιτρέπουν αυξημένη πρωτογενή παραγωγή. Από τη μια λοιπόν χαμηλές αλλά επαρκείς ποσότητες νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών αλάτων και από την άλλη επαρκής ηλιακή ακτινοβολία στη στήλη, αποτέλεσμα τόσο της ποσότητας φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας και χαρακτηρίζεται υψηλή ακόμα και τους χειμερινούς μήνες, όσο και από τη διαύγεια του νερού στην περιοχή, υποστηρίζουν την αύξηση της βιομάζας των αυτότροφων μικροοργανισμών στα μέσα της χειμερινής περιόδου, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο και επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα πεδίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι την χειμερινή περίοδο της προσομοίωσης από Νοέμβριο 2001 έως Ιανουάριο 2002, που η θεωρία προβλέπει υψηλές συγκεντρώσεις ανόργανων θρεπτικών στη στήλη λόγω διεργασιών ανοργανοποίησης και αναγέννησης, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών και φωσφορικών διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα (νιτρικά<0.4μM, φωσφορικά<0.05μM P), λόγω της

απομάκρυνσής τους από τη στήλη από την αυξημένη πρωτογενή παραγωγή, ειδικά τον Ιανουάριο 2002.

Μετά την εαρινή αύξηση του φυτοπλαγκτού (π.χ. 3/4/2002), μαζί με την μείωση της φυτοπλαγκτονικής συγκέντρωσης που ακολουθεί, παρουσιάζεται μείωση και της συγκέντρωσης πυριτικών και του λόγου N:P, ο οποίος για παράδειγμα στις 25/4/2002 βρέθηκε κάτω από 16 σε όλους τους σταθμούς. Μεγάλο μέρος των αποθεμάτων ανόργανου διαλυτού αζώτου και πυριτικών δηλαδή αφομοιώνεται από το φυτοπλαγκτόν. Όμως η αύξηση των αμμωνιακών αλάτων, που οφείλεται στις απεκκρίσεις και τη βακτηριακή αποσύνθεση νεκρών οργανισμών, συνεχίζει να τροφοδοτεί το σύστημα με άζωτο, κυρίως πάνω από το θερμοκλινές, αυξάνει τον λόγο N:P, ο οποίος συνεχίζει να αυξάνει κατά τη διάρκεια του θέρους 2002. Στην συνέχεια ο λόγος παρουσιάζει χαμηλές τιμές (<16) αργά το φθινόπωρο και νωρίς τον χειμώνα (Νοέ – Δεκ). Ο κύκλος κλείνει με την αύξηση του λόγου (>16) στο τέλος χειμώνα – αρχές άνοιξης, οπότε εκδηλώνεται η φυτοπλακτονική έξαρση. Τα γενικά αυτά χαρακτηριστικά εμφανίζονται και στον σταθμό M1.

#### Βαθμίδες φυτοπλακτονικής βιομάζας και ο ρόλος των φυσικών διεργασιών της μεταφοράς, διάχυσης και κατακόρυφης ανάμιξης

Αξιοσημείωτες οριζόντιες βαθμίδες συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού αναπτύσσονται επιφανειακά και σε όλη τη διάρκεια του έτους στην περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης, στην περιοχή του παλιού λιμένα («Επάνω Σκάλα», βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης) και γενικά στον άξονα δύση-ανατολή, με μείωση της φυτοπλακτονικής βιομάζας από την ακτή προς τα ανοιχτά. Η οριζόντια αυτή κατανομή συνοδεύεται συνήθως από αντίστοιχες οριζόντιες βαθμίδες των ανόργανων θρεπτικών: νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά τείνουν να εξαντλούνται κοντά στην ακτή, καθώς προσλαμβάνονται από το φυτοπλαγκτόν, ενώ η συγκέντρωσή τους αυξάνεται στα ανοιχτά. Ο ρόλος των φυσικών διεργασιών της μεταφοράς (advection) και τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion) είναι πολύ σημαντικός: η κυκλοφορία του νερού, με τις φυσικές διεργασίες της μεταφοράς και τυρβώδους διάχυσης και μέσω κυρίως των στροβιλωδών κινήσεων που αναπτύσσονται, αναλαμβάνει να διευθετήσει και να διασπείρει ανοιχτά από την περιοχή του λιμένα την φυτοπλακτονική βιομάζα που αναπτύσσεται εντός αυτού, όπως δείχνουν στις κατακόρυφες τομές και τις οριζόντιες κατανομές στα 2μ βάθος οι, σχεδόν σταθερά, υψηλότερες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού στην περιοχή. Το ίδιο ισχύει και για τις αυξημένες συγκεντρώσεις

φυτοπλαγκτονικού άνθρακα που υπολογίζει συχνά το μοντέλο και στην περιοχή του παλιού λιμένα, βόρεια της πόλης της Μυτιλήνης. Υπενθυμίζεται ότι κατά την περίοδο της προσομοίωσης, η περιοχή ήταν αποδέκτης ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων. Ο εμπλουτισμός με θρεπτικά και οργανική ύλη από την διάθεση ανεπεξέργαστων λυμάτων στον λιμένα Μυτιλήνης και στο παλιό λιμάνι, διακρίνεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τροφοδοτεί αυτά τα τοπικά φαινόμενα ευτροφισμού που αναπαράγονται επιτυχώς από το μοντέλο, μολονότι σε αρκετές περιόδους του έτους υποεκτιμάται η φυτοπλαγκτονική βιομάζα που αναπτύσσεται.

Κατακόρυφες βαθμίδες συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού αναπτύσσονται σε όλη τη διάρκεια του έτους στη στήλη του νερού στην περιοχή ανοιχτά του λιμένα Μυτιλήνης και γενικά στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, ανοιχτά της πόλης της Μυτιλήνης, με αυξημένες συγκεντρώσεις στην επιφάνεια και μείωση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας με το βάθος. Οι διαφορές συγκέντρωσης επιφάνειας-πυθμένα όταν αναπτύσσονται μπορούν να κυμαίνονται από 20 mg C/m<sup>3</sup> στα ανοιχτά έως και πάνω από 40 mg C/m<sup>3</sup> όσο προσεγγίζει κάποιος το λιμάνι. Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα του μοντέλου, διαπιστώνεται ότι η στήλη του νερού στην περιοχή μελέτης έχει παρόμοια κατακόρυφη κατανομή φυτοπλαγκτού από τα μέσα άνοιξης έως και τον Ιούνιο του έτους 2001 και περίπου την ίδια περίοδο το 2002. Συγκεκριμένα, τους μήνες Απρίλιο-Μάιο-Ιούνιο 2001 και Μάιο-Ιούνιο 2002, μετά την εαρινή αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα λόγω της εξάντλησης των ανόργανων θρεπτικών και βόσκησης του, περίπου μεταξύ 5-10 mg C/m<sup>3</sup> ή και χαμηλότερα, εκτός της περιοχής κοντά στο Λιμάνι. Το κοινό χαρακτηριστικό της κατανομής και στις δυο περιόδους είναι πως, κάτω από το θερμοκλινές που σταδιακά αρχίζει να αναπτύσσεται και να δημιουργείται έτσι η εποχική θερμική στρωμάτωση, δηλ σε βάθη άνω των 15μ, η συγκέντρωση φυτοπλαγκτού τείνει να είναι 3-4 mg C/m<sup>3</sup> υψηλότερη από ότι κοντά στην επιφάνεια (π.χ. 12-14 Ιουν 2002). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στα βαθύτερα στρώματα από ότι στη μάζα νερού κοντά στην επιφάνεια σχετίζονται με την αντίστοιχη κατακόρυφη κατανομή φωσφορικών αλάτων (υψηλότερες συγκεντρώσεις στα βαθύτερα στρώματα από ότι κοντά στην επιφάνεια), που είναι και ο περιοριστικός παράγοντας θρέψης τις περιόδους αυτές. Αυτή η κατακόρυφη κατανομή της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στη στήλη διατηρείται, σε γενικές γραμμές, κατά τη διάρκεια του θέρους 2001 και διαρκεί περίπου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου 2001.

Στη συνέχεια, οι μετρήσεις πεδίου δείχνουν ότι την περίοδο από περίπου μέσα Σεπτεμβρίου έως Νοέμβριο, η φυτοπλαγκτονική ανάπτυξη στο οικοσύστημα τείνει να περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα αζωτούχων ανόργανων θρεπτικών (N - limited). Προς τα τέλη Οκτωβρίου, τον Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2001, οι τιμές βιομάζας είναι γενικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με το θέρος και μεταβάλλονται στη στήλη χωρίς να αναπτύσσεται συγκεκριμένη κατακόρυφη βαθμίδα. Την περίοδο αυτή, σταδιακά, η φυτοπλαγκτονική βιομάζα τείνει να αυξάνει, και για ένα χρονικό διάστημα περίπου ενός μηνός (από 10/1/2002 έως 10/2/2002) φτάνει σε επίπεδα της τάξης 15 – 20 mg C/m<sup>3</sup>. Καθώς η θερμική ομογενοποίηση μέσω της ψύξης της στήλης δημιουργεί συνθήκες καλής κατακόρυφης ανάμιξης, οι συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα στη στήλη, με τις υψηλότερες τιμές κοντά στην επιφάνεια και προς το νότο. Οι επόμενες αξιοσημείωτες κατακόρυφες βαθμίδες φυτοπλαγκτού αναπτύσσονται κατά την εαρινή φυτοπλαγκτονική έξαρση, η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο την περίοδο από μέσα Μαρτίου 2002 έως μέσα Απριλίου 2002: η διαφορά τιμών μεταξύ νερού κοντά στην επιφάνεια (χαμηλότερες συγκεντρώσεις) – βαθύτερων στρωμάτων (άνω των 15μ – υψηλότερες συγκεντρώσεις) μπορεί να ξεπερνάει για λίγες μέρες τα 10 mg C/m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια, η αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας εξαπλώνεται σε ολόκληρη τη μάζα νερού και διευθετείται από την κυκλοφορία, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 8.3.2.

#### Σχέση διαλυτού ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυτού οργανικού αζώτου (DON) και χλωροφύλλης -a (Chl-a)

Οι τιμές διαλυτού οργανικού αζώτου (DON), που αντικατοπτρίζουν τη διαλυμένη οργανική ύλη, κυμάνθηκαν σε παραπλήσια επίπεδα για όλους τους σταθμούς, με μέσο όρο λίγο μικρότερο από αυτόν που μετρήθηκε από τον Τσιρτσή (1994) και, όπως είναι αναμενόμενο, ήταν υψηλότερες σε σχέση με το διαλυτό ανόργανο άζωτο (DIN) (στο σύνολο των σταθμών αποτελεί ποσοστό περίπου ίσο ή μεγαλύτερο του 60% του ολικού διαλυτού αζώτου στην πλειοψηφία των μετρήσεων). Επισημαίνεται η εμφάνιση εποχικότητας της συγκέντρωσης του DON: όταν ομαδοποιηθούν οι μετρήσεις ανά εποχή, καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές DON κατά την εαρινή και τη θερινή περίοδο στους περισσότερους σταθμούς, ενώ κατά τη φθινοπωρινή περίοδο παρατηρείται η ίδια κατά προσέγγιση τιμή DON σχεδόν σε όλους τους σταθμούς. Άλλη μια ένδειξη της στενής σχέσης μεταξύ των μεταβολών της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας και του διαλυμένου οργανικού αζώτου φαίνεται στις κατακόρυφες κατανομές των δυο μεταβλητών: όταν κατά την εαρινή και θερινή περίοδο κυρίως



εμφανίζονται επιφανειακά υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, παρατηρούνται κατά κανόνα αντίστοιχα υψηλές συγκεντρώσεις DON.

## **9.2. Αξιολόγηση των επιδόσεων του συζευγμένου μοντέλου οικοσυστήματος: επιτυχίες, μειονεκτήματα και κριτική**

### **9.2.1. Φυσικές μεταβλητές (θερμοκρασία, αλατότητα, ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος)**

Η συνολική επίδοση του υδροδυναμικού μοντέλου στην προσομοίωση της **θερμοκρασίας** είναι πολύ καλή, ειδικά στις θερμοκρασίες από 14 έως 18-19 °C και άνω των 22 °C, ενώ τείνει να υποεκτιμά θερμοκρασίες πεδίου που κυμαίνονται περίπου από 19 έως 22 °C. Διαπιστώνεται έτσι μια αδυναμία του μοντέλου να αναπαράγει με μεγάλη ακρίβεια την ανάπτυξη του θερμοκλινούς: το σφάλμα (υποεκτίμηση της θερμοκρασίας) μεγιστοποιείται την περίοδο ανάπτυξης του θερμοκλινούς, ενώ επίσης μεγιστοποιείται σε βάθη μεταξύ 5m και 18m περίπου, δηλαδή στο τμήμα της στήλης όπου αναπτύσσεται το θερμοκλινές. Αυτό το συμπέρασμα, που προκύπτει από τις διαγραμματικές, ποιοτικές μεθόδους επαλήθευσης, επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό των ποσοτικών μέτρων καλής προσαρμογής (Πίνακες 2.2 και 7.1).

Αυτό σημαίνει ότι η προσομοιωμένη τυρβώδης ανάμιξη είναι πιο ασθενής από την πραγματική, που οδηγεί σε μια χρονική υστέρηση της ανάπτυξης του προσομοιωμένου θερμοκλινούς. Αποδίδεται δε στο υπομοντέλο των Mellor – Yamada που χρησιμοποιεί το POM για τον υπολογισμό των συντελεστών κατακόρυφης τυρβώδους ανάμιξης ( $K_M$  για την ορμή,  $K_H$  για την θερμοκρασία – αλατότητα), το οποίο τείνει να υποεκτιμάει την κατακόρυφη τυρβώδη ανάμιξη στο επιφανειακό στρώμα σε περιόδους στρωμάτωσης (Ezer 2000, Mellor 2001, Robertson 2006, Huang et al 2011). Για να προσομοιωθεί ακριβέστερα το επιφανειακό στρώμα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο ρόλος των επιφανειακών κυμάτων και να συνυπολογιστεί η συνεισφορά τους στην επιφανειακή τυρβώδη κινητική ενέργεια (TKE), που καθορίζει τη δομή και τη δυναμική της ανάμιξης κοντά στην επιφάνεια. Για το λόγο αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης του μοντέλου Mellor – Yamada προσθέτοντας όρους που παραμετροποιούν την προσθήκη TKE στο επιφανειακό θαλάσσιο στρώμα ( $\alpha$ ) από τη θραύση των επιφανειακών κυμάτων (wave breaking,

Mellor and Blumberg 2004) και κυριότερα ( $\beta$ ) από την αλληλεπίδραση κυμάτων – ρευμάτων – τύρβης (non-breaking waves – current – turbulence interaction, Qiao et al. 2010, Huang et al. 2011). Με τις παραπάνω τροποποιήσεις, που δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς και με ενδεχόμενη αύξηση της διακριτοποίησης στο κατακόρυφο άξονα με αύξηση του αριθμού των σίγμα επιπέδων, η ακρίβεια του υπομοντέλου παραμετροποίησης τύρβης των Mellor – Yamada βελτιώνεται κατά πολύ (Huang et al. 2011), και η προσομοίωση της ανάμιξης κοντά στην επιφάνεια τόσο της ορμής όσο και της θερμοκρασίας/αλατότητας γίνεται πιο ακριβής.

Παρόλα αυτά, το σφάλμα είναι μικρό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και για όλο το βάθος της στήλης νερού. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους είναι για όλους τους σταθμούς κάτω από 1 (πολύ καλή προσαρμογή). Το μέσο σφάλμα είναι περίπου ή κάτω από 0.5 °C (με εξαίρεση τον σταθμό M1) και αρνητικό, ένδειξη μικρής υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από το μοντέλο, όπως δείχνει και η % σύγκλιση, με τιμές από 97% έως 99%. Σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα και την ικανότητα μοντέλου, η προσαρμογή είναι εξαιρετική σε όλους τους σταθμούς. Αν και το μοντέλο παρουσιάζει τάση για πολύ μικρή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας, σε όλες τις περιπτώσεις, ο χαρακτηρισμός της προσαρμογής των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι ο καλύτερος δυνατός. Οι λιγότερο καλές επιδόσεις παρουσιάζονται στον σταθμό M1 και αμέσως μετά τον M4, δηλαδή στα σημεία όπου ολόκληρη η στήλη νερού επηρεάζεται από τον ετήσιο κύκλο δημιουργίας - υποχώρησης του θερμοκλινούς.

Σε ότι αφορά στην προσομοίωση της **αλατότητας**, η συνολική επίδοση του μοντέλου είναι καλή, ειδικά στις τιμές πεδίου από 38.7 έως 39.7 περίπου, όπου βρίσκεται και ο κύριος όγκος των μετρήσεων. Οι διαγραμματικές, ποιοτικές τεχνικές επαλήθευσης δείχνουν πως το μοντέλο τείνει να υπερεκτιμάει τις χαμηλότερες αλατότητες (γύρω στο 38.5) ενώ αντίθετα να υποεκτιμάει τις υψηλότερες αλατότητες (πάνω από 39.8). Τα ποσοτικά μέτρα, που συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2. χαρακτηρίζουν την προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου, για όλους τους σταθμούς ως «καλή», σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους και ως «εξαιρετική» σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα, ενώ σε συνδυασμό με το RMS σφάλμα, επιβεβαιώνεται ποσοτικά ότι το μεγαλύτερο σφάλμα του μοντέλου παρουσιάζεται στους σταθμούς M1 και M4. Στο σταθμό M4, το σφάλμα είναι

αρνητικό και αυξάνεται με το βάθος, κάτι που μπορεί να οφείλεται στην προσομοίωση της εισροής γλυκού νερού από τον αγωγό εκβολής της ΜΕΥΑ, που γειτνιάζει με τον σταθμό. Το μέσο σφάλμα κυμαίνεται από -0.11 έως 0.06 (σε PSU), ενώ –εκτός του Μ4– το σφάλμα στους υπόλοιπους σταθμούς είναι γενικά θετικό. Το ποσοτικό μέτρο της % σύγκλισης δείχνει επίσης πολύ καλή προσαρμογή, ενώ είναι χαρακτηριστικό ότι η ικανότητα μοντέλου – το ποσοτικό κριτήριο που είναι το πλέον δύσκολο να ικανοποιηθεί– αποτυγχάνει, σύμφωνα με τις τιμές της βιβλιογραφίας.

Αναφορικά με την ικανότητα του υδροδυναμικού μοντέλου (σε συνδυασμό πάντα με την μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη φόρτισή του και τον ορισμό των οριακών συνθηκών) να προσομοιώνει το **πεδίο ταχύτητας του ρεύματος** τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω:

1. Το μέτρο ταχύτητας ρεύματος μοντελοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο βαθύτερο στρώμα (~20m) από ότι στο περισσότερο τυρβώδες επιφανειακό στρώμα (~5m), με εξαίρεση τον σταθμό Μ6. Αντίθετα, η διεύθυνση του ρεύματος προσομοιώνεται γενικά πιστότερα στην επιφάνεια (υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας) από ότι στο βαθύτερο στρώμα (~20m), κάτι που πιθανόν οφείλεται στην επίδραση του ανέμου ως συνάρτηση φόρτισης που είναι έντονη και δρα αποτελεσματικά στον καθορισμό της διεύθυνσης του νερού.
2. Το μέτρο της ταχύτητας ρεύματος τείνει να υπερεκτιμάται από το μοντέλο (θετικό μέσο σφάλμα και %σύγκλιση >100), με εξαίρεση τον Μ1. Μολονότι μικρό σε απόλυτες τιμές το σφάλμα, η υπερεκτίμηση της ταχύτητας κυμαίνεται από 70% έως 150% περίπου. Όπως συμβαίνει και με την αλατότητα, η ικανότητα μοντέλου – το ποσοτικό κριτήριο που είναι το πλέον δύσκολο να ικανοποιηθεί– αποτυγχάνει, σύμφωνα με τις τιμές της βιβλιογραφίας.
3. Γενικά, τα ποσοστά επιτυχούς προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος που μετρήθηκε στο πεδίο κυμαίνονται από υψηλά έως πολύ υψηλά (~60% - 100%). Πιο χαμηλή επιτυχία προσομοίωσης εμφανίζεται στα 20m του σταθμού Μ6 και πιο υψηλή στον σταθμό Μ1 (λιμάνι).
4. Παρατηρείται βαθμιαία αύξηση της επιτυχίας προσομοίωσης από βορρά προς νότο (από τον σταθμό Μ6 προς τον Μ1), τόσο των διευθύνσεων (και στα δυο βάθη μετρήσεων), όσο και του μέτρου της ταχύτητας: το μέσο σφάλμα για παράδειγμα, που κυμαίνεται από 0.01 έως 0.04 m/s, είναι μεγαλύτερο στους σταθμούς Μ5, Μ4 και Μ6 και μικρότερο στους Μ1 και Μ2.

5. Στην περιοχή εκβολής του αγωγού επεξεργασμένων λυμάτων της ΜΕΥΑ (σταθμός Μ4), όπου η στήλη έχει βάθος ~15m, οι διευθύνσεις ρεύματος μοντελοποιούνται με το ίδιο σχετικά υψηλό ποσοστό επιτυχίας για όλη τη στήλη (5 και 10m βάθος) (βλ Πίνακες 7.3 και 7.4). Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο για το προσομοιωμένο μέτρο της ταχύτητας: οι επιδόσεις του υδροδυναμικού μοντέλου στην περιοχή των σταθμών Μ4 και Μ5 είναι οι λιγότερο καλές, σύμφωνα με όλα τα μέτρα του Πίνακα 7.3.

6. Η περιοχή κοντά στον λιμένα (σταθμός Μ1) έχει τα υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς προσομοίωσης της διεύθυνσης ρεύματος, (83% στο τεταρτημόριο και 100% στο ημικύκλιο που ορίζει η διεύθυνση πεδίου αντίστοιχα), που οφείλεται στην μορφολογία και τοπογραφία της περιοχής, που επιτρέπει την κυκλοφορία του νερού κυρίως στον άξονα βορειοανατολικά – νοτιοδυτικά, αλλά και το μικρότερο σφάλμα ως προς το μέτρο της ταχύτητας.

Το **σφάλμα του μέτρου ταχύτητας** είναι μεγαλύτερο στο επιφανειακό στρώμα και είναι κυρίως θετικό, δηλαδή το μοντέλο υπερεκτιμάει το μέτρο του ρεύματος. Αυτό οφείλεται στην ατελή περιγραφή των μηχανισμών ανταλλαγής ενέργειας και συνακόλουθα των διεργασιών ανάμιξης σε αυτό το τμήμα της στήλης του νερού, όπως αναλύθηκε και για τη θερμοκρασία (κεφάλαιο 7). Αποδίδεται δε κατά κύριο λόγο στον μη – συνυπολογισμό κατά την προσομοίωση της δράσης των επιφανειακών κυμάτων και των διεργασιών που διέπουν τη δυναμική τους, καθώς είναι γνωστό ότι προκαλούν την ανάπτυξη ρευμάτων και αυξάνουν την ανάμιξη της στήλης του νερού κοντά στην επιφάνεια (Zhang et al. 2009).

Στην παρούσα εφαρμογή, η επιφανειακή διατμητική τάση του ανέμου, βασικός μηχανισμός διέγερσης που οδηγεί στην ανάπτυξη ανεμογενών ρευμάτων, παραμετροποιείται από τη σχέση 5.25 (κεφάλαιο 5), είναι συνάρτηση μόνο της ταχύτητας ανέμου, καθορίζεται από τον συντελεστή αντίστασης της τριβής ( $C_d$ , surface drag coefficient) και δεν λαμβάνει υπόψη τα επιφανειακά κύματα. Ωστόσο, η δράση του ανέμου, με την μεταφορά ορμής από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα, οδηγεί στην ανάπτυξη και επιφανειακών κυμάτων. Δηλαδή στην πραγματικότητα, μέρος της ορμής αυτής 'δεσμεύεται' για την ανάπτυξη επιφανειακών κυμάτων (Moon 2005, Bolaños et al. 2011), τα οποία με τη σειρά τους μεταβάλλουν τις παραμέτρους που καθορίζουν τη διατμητική τάση (τριβή) στην επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, πιθανώς υπερεκτιμάται η ορμή που διατίθεται για την ανάπτυξη του ανεμογενούς ρεύματος (μέσω του συντελεστή αντίστασης της τριβής  $C_d$  της σχέσης

5.25) και το μοντέλο παράγει προσομοιωμένες τιμές μέτρου ρεύματος μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στο πεδίο. Ο συνυπολογισμός των κυμάτων μέσω ενός διορθωμένου-αυξημένου συντελεστή αντίστασης τριβής ανέμου, που αντικατοπτρίζει την ενισχυμένη τραχύτητα (roughness) της επιφάνειας της θάλασσας λόγω αύξησης του ύψους κύματος (wave height), βελτιώνει την προσομοίωση του επιφανειακού ρεύματος (Zhang et al. 2009). Παράλληλα, τα επιφανειακά κύματα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά και το ρεύμα πάνω από τον πυθμένα, κυρίως σε περιοχές μικρού βάθους, καθώς τροποποιούν και τον συντελεστή αντίστασης της τριβής πυθμένα (bottom drag coefficient), αυξάνοντας την τριβή πυθμένα (Zhang et al. 2009).

Εκτιμάται ότι η ικανότητα προσομοίωσης του επιφανειακού στρώματος από το μοντέλο θα αυξηθεί, περιορίζοντας τόσο το σφάλμα στην ταχύτητα ρεύματος, όσο και της θερμοκρασίας / αλατότητας, με την υλοποίηση των παρακάτω:

(1) την υιοθέτηση ενός βελτιωμένου μοντέλου τύρβης Mellor – Yamada που θα περιλαμβάνει την προσθήκη τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο επιφανειακό θαλάσσιο στρώμα από τη θραύση των επιφανειακών κυμάτων (Mellor and Blumberg 2004) και κυριότερα από την αλληλεπίδραση κυμάτων – ρευμάτων – τύρβης (Qiao et al. 2010, Huang et al. 2011),

(2) με την προσθήκη – σύζευξη ενός κυματικού μοντέλου με το υδροδυναμικό μοντέλο (Mellor et al. 2008, Zhang et al. 2009, Bolaños et al. 2011). Το κυματικό μοντέλο, υπολογίζοντας το ύψος κύματος, θα χρησιμεύει στον προσδιορισμό 'διορθωμένου' συντελεστή επιφανειακής αντίστασης τριβής (surface drag coefficient  $C_d$ ) αλλά και διορθωμένου συντελεστή αντίστασης τριβής πυθμένα (bottom drag coefficient). Παράλληλα, παραμετροποιώντας διεργασίες όπως η μετατόπιση τύπου Stokes (Stokes drift), η μεταφορά ορμής από τα κύματα στα βαθύτερα στρώματα και στο επιφανειακό ρεύμα τόσο μέσω των τάσεων ακτινοβολίας (radiation stresses) όσο και μέσω μεταφοράς πίεσης (pressure transfer), η κυκλοφορία τύπου Langmuir, θα αυξήσει την ικανότητα περιγραφής του πεδίου ταχυτήτων και της ανάμιξης ιχνηλατών, σωματιδίων, ρυπαντών κλπ.,

(3) λεπτομερέστερη περιγραφή της στήλης νερού με αύξηση της διακριτοποίησης της κατακόρυφης διάστασης, δηλαδή αύξηση του αριθμού των σίγμα επιπέδων (περισσότερα από 11  $\sigma$ -layers που χρησιμοποιεί το μοντέλο).

Τέλος, το λεγόμενο σφάλμα οριζόντιας βαθμίδας πίεσης (horizontal pressure gradient error), που είναι εγγενές χαρακτηριστικό των μοντέλων που χρησιμοποιούν το σύστημα των σίγμα-συντεταγμένων (terrain-following models) και μπορεί να δημιουργήσει ψευδή πεδία ταχυτήτων (artifacts, velocity errors), εκτιμάται ότι είναι αμελητέο και δεν συνεισφέρει στο σφάλμα του μέτρου ταχύτητας. Και αυτό γιατί ισχύουν εκείνες οι προϋποθέσεις ελαχιστοποίησης του σφάλματος οριζόντιας βαθμίδας πίεσης (Mellor et al. 1994, 1998):

- (α) η διακριτική ικανότητα (resolution – discretization) του πλέγματος είναι πολύ υψηλή, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διάσταση,
- (β) κατά την εκτέλεση του κώδικα, πριν τον υπολογισμό του βαροκλιτικού σκέλους στον όρο της οριζόντιας βαθμίδας πίεσης, αφαιρείται η αρχική κατανομή πυκνότητας, μια τεχνική που μειώνει κατά πολύ το συγκεκριμένο σφάλμα,
- (γ) το ανάγλυφο του πυθμένα είναι ήπιο, χωρίς εξάρσεις και μεγάλες διαφορές βαθυμετρίας μεταξύ γειτονικών κελιών που αυξάνουν το συγκεκριμένο σφάλμα.
- (δ) Επιπλέον, το σφάλμα οριζόντιας βαθμίδας πίεσης εξαρτάται από το ιξώδες του μοντέλου: μεγαλύτερος συντελεστής ιξώδους ( $A_M$  – viscosity) και μικρότερος συντελεστής διάχυσης ( $A_H$  – diffusivity) μειώνουν το συγκεκριμένο σφάλμα. Στην παρούσα εργασία, οι δυο συντελεστές συνδέονται με τη σχέση  $A_H/A_M=0.2$  (Ezer 2011).

### 9.2.2. Οικολογικές μεταβλητές

Η συνολική πρώτη εικόνα που προκύπτει από τις διαγραμματικές, ποιοτικές τεχνικές επαλήθευσης (Σχήμα 7.27 όπου προβάλλονται τα αποτελέσματα του μοντέλου μαζί με τα δεδομένα πεδίου συναρτήσεως του χρόνου, τα επιμέρους διαγράμματα διασποράς π.χ. 7.17) είναι ότι το συζευγμένο μοντέλο οικοσυστήματος πετυχαίνει τον πρωταρχικό του στόχο, να προσομοιώσει δηλαδή ικανοποιητικά, σε γενικές γραμμές, τις οικολογικές μεταβλητές. Επιμερίζοντας στη συνέχεια και ποσοτικοποιώντας με στατιστικά μέτρα το βαθμό επιτυχίας ανά μεταβλητή, σταθμό και χρονική στιγμή, προκύπτουν τα συμπεράσματα που συνοψίζονται στη συνέχεια.

Η ικανότητα προσομοίωσης του ετήσιου κύκλου της **φυτοπλαγκτονικής βιομάζας** από το μοντέλο κυμαίνεται από πολύ καλή (πχ M2) έως καλή – μέτρια (πχ M5). Στην εύτροφη περιοχή του M1, το μοντέλο δείχνει να μην αποδίδει καλά. Οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου σημειώνονται στον σταθμό M2, από τον οποίον χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα για την βαθμονόμηση του οικολογικού σκέλους

του μοντέλου: συνάρτηση κόστους «πολύ καλή», το μικρότερο μέσο και RMS σφάλμα και μέσο % σφάλμα «εξαιρετικό». Ακολουθεί ο M6 με καλή προσαρμογή μοντέλου στα δεδομένα πεδίου σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους και το μέσο % σφάλμα. Έπονται οι M3, M4 και M5 με συνάρτηση κόστους 'καλή -μέτρια', ενώ σύμφωνα με το μέσο % σφάλμα και την ικανότητα μοντέλου η προσαρμογή χαρακτηρίζεται κακή. Συνολικά, το μέτρο «ικανότητα μοντέλου» παίρνει τιμές που δεν θεωρούνται ικανοποιητικές από τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση τον σταθμό M2, όπου η ικανότητα χαρακτηρίζεται «καλή-πολύ καλή».

Σε ότι αφορά την προσομοίωση των **νιτρικών αλάτων**, τα αποτελέσματα του μοντέλου ακολουθούν τις γενικές τάσεις των μετρήσεων πεδίου. Στους περισσότερους σταθμούς η προσομοίωση της διακύμανσης βελτιώνεται με το βάθος: στους M1, M3, M5 και M6, τα βαθύτερα στρώματα τείνουν να προσομοιώνονται καλύτερα από τα επιφανειακά. Αντίθετα με το φυτοπλαγκτό, στο σταθμό M1 η προσομοίωση χαρακτηρίζεται από τις τιμές της συνάρτησης κόστους ως «πολύ καλή», ενώ ως «μέτρια» για τον M2.

Και για τα **αμμωνιακά άλατα**, το μοντέλο επιτυγχάνει να αναπαράγει τις γενικές τάσεις των μετρήσεων πεδίου. Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται «καλή» από τις τιμές της συνάρτησης κόστους για τους σταθμούς M3, M5 και M6, ενώ ως «μέτρια» για τους σταθμούς M1, M2 και M4. Συνολικά, οι καλύτερες επιδόσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στους σταθμούς M1, M3, M5 και M6. Ακολουθεί ο M2 ενώ οι λιγότερο καλές επιδόσεις παρουσιάζονται στον M4.

Τα **φωσφορικά** είναι τα άλατα των οποίων η ετήσια διακύμανση προσομοιώνεται με τη μεγαλύτερη επιτυχία από το μοντέλο, σε σχέση με τα άλλα δύο ανόργανα άλατα του αζώτου. Όπως και με τα νιτρικά και τα αμμωνιακά, η προσομοίωση βελτιώνεται με το βάθος: τα βαθύτερα στρώματα προσομοιώνονται καλύτερα από τα επιφανειακά. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις φωσφορικών έως περίπου 0.07μM προσομοιώνονται καλά, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις πεδίου υποεκτιμώνται από το μοντέλο. Η προσομοίωση χαρακτηρίζεται «καλή» από τις τιμές της συνάρτησης κόστους και του μέσου % σφάλματος σε όλους τους σταθμούς. Η καλή αναπαραγωγή της κατανομής και διακύμανσης φωσφορικών αλάτων, τα οποία όπως επισημάνθηκε αποτελούν βασικό περιοριστικό παράγοντα της φυτοπλακτονικής ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης και η διαθεσιμότητά τους παίζει καθοριστικό ρόλο

σε αυτήν, θεωρείται ότι συνεισφέρει στην αρκετά επιτυχημένη προσομοίωση της δυναμικής της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας.

Οι κύριες **αστοχίες** του μοντέλου προσομοίωσης στην αναπαραγωγή του ετήσιου κύκλου των οικολογικών μεταβλητών, εστιάζονται στις εξής περιοχές και διεργασίες:

Για τη φυτοπλαγκτονική βιομάζα:

1. στην εύτροφη περιοχή του λιμένα (σταθμός M1), όπου οι επιδόσεις του μοντέλου είναι οι λιγότερο καλές. Το μέσο σφάλμα για όλο το βάθος στήλης κυμαίνεται από -85.7 έως 6.4 mg/m<sup>3</sup> με μέση τιμή -34 mg/m<sup>3</sup>. Το μοντέλο δεν υπολογίζει τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού το θέρος του 2001 και την άνοιξη – θέρος του 2002 στα επιφανειακά 5μ, και γενικά τείνει να υποεκτιμά τις τιμές φυτοπλαγκτονικής βιομάζας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους παρουσιάζοντας έντονες διακυμάνσεις ημερήσιας συχνότητας. Φαίνεται πως το οικολογικό σκέλος του μοντέλου, που βαθμονομήθηκε με δεδομένα προερχόμενα από ολιγότροφα νερά, αδυνατεί να αναπαράγει την δυναμική της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας σε τροφικά επίπεδα αρκετά υψηλότερα από τα ολιγότροφα. Ιδιαίτερα, το μοντέλο αποτυγχάνει να προσομοιώσει συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού πάνω από 60 mg/m<sup>3</sup>, όπως αυτές που μετρήθηκαν στον M1 τη θερινή περίοδο του 2001 και την εαρινή-θερινή περίοδο του 2002.

2. στα πρώτα 10m της στήλης νερού στην περιοχή των σταθμών M4 και M5 για την περίοδο Νοέμβριος 2001 – τέλη Μαρτίου 2002 (και ειδικά Φεβ-Μαρ 2002): η δυναμική της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας την περίοδο αυτή δεν αναπαράγεται ρεαλιστικά (υποεκτίμηση της συκέντρωσης) στα πρώτα 10m της στήλης νερού στην περιοχή των σταθμών M4 και M5, δηλαδή στην περιοχή της εκβολής του αγωγού επεξεργασμένων λυμάτων και ανοιχτά του όρμου Θερμής, στο νότιο τμήμα του. Ειδικότερα, δεν αναπαράγονται οι υψηλές συγκεντρώσεις της εαρινής φυτοπλαγκτονικής έξαρσης του 2002. Στους σταθμούς M4 και M5, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυξάνεται με το βάθος.

3. η γενικά μειωμένη ακρίβεια του μοντέλου κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα, όπου η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αυξάνεται.

4. Την περίοδο τέλος Νοε 2001 – αρχές Δεκ 2001, το μοντέλο υπολογίζει πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού από τις ήδη χαμηλές, όπως δείχνουν οι μετρήσεις πεδίου (με εξαίρεση τον σταθμό M2 και άρα την ευρύτερη περιοχή, η οποία προσομοιώνεται σωστά). Αυτή η απώλεια της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας μεταφράζεται μέσα από τις διεργασίες που περιλαμβάνει το μοντέλο, σε αρκετούς



σταθμούς και βάθη, (α) εσφαλμένα σε αύξηση της συγκέντρωσης DOC και (β) σε αύξηση της συγκέντρωσης αμμωνιακών και νιτρικών, καθώς δεν απομακρύνονται από τη στήλη νερού λόγω πρόσληψης, ενώ για τα αμμωνιακά, μια πρόσθετη πηγή είναι η ανοργανοποίηση του αυξημένου DOC. Οι μετρήσεις πεδίου DOC κυμαίνονται από 200 έως 1000 mg C/m<sup>3</sup> χαμηλότερα από ότι υπολογίζει το μοντέλο, που σημαίνει ότι διεργασίες ετερότροφης θρέψης (πρόσληψη DOC από βακτήρια και πρωτόζωα) διατηρούν τη διαλυμένη οργανική ύλη σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από τα προσομοιωμένα.

#### Για τα νιτρικά, αμμωνιακά και φωσφορικά άλατα:

Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση που καλείται να αναπαράγει το μοντέλο τόσο μικρότερη είναι η ακρίβειά του. Για τα φωσφορικά, είναι φανερή η τάση του μοντέλου να υποεκτιμά συγκεντρώσεις πεδίου μεγαλύτερες από περίπου 0.07μM. Ειδικά για τα αμμωνιακά, παρατηρείται τάση του μοντέλου να υπερεκτιμάει τις συγκεντρώσεις των αμμωνιακών στους περισσότερους σταθμούς (M2, M3, M4 και M5), με θετικό μέσο σφάλμα που κυμαίνεται από 0.2 έως 0.25μM. Παράλληλα, όπως και με τη φυτοπλαγκτονική βιομάζα, το σφάλμα είναι γενικά μεγαλύτερο στην επιφάνεια και τείνει να μειώνεται συναρτήσει του βάθους. Στην περιοχή εκβολής του αγωγού επεξεργασμένων λυμάτων της ΜΕΥΑ (σταθμός M4), οι οικολογικές αυτές μεταβλητές γενικά μοντελοποιούνται με σχετικά χαμηλή ακρίβεια. Γενικά, όσο αυξάνεται το βάθος, τόσο αυξάνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

#### Για τον διαλυμένο οργανικό άνθρακα (DOC):

Η διακύμανση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οργανικού άνθρακα, μιας οικολογικής μεταβλητής η οποία εξαρτάται από πληθώρα βιοχημικών μηχανισμών από όλα τα ιεραρχικά επίπεδα οργάνωσης του παράκτιου οικοσυστήματος, επιχειρείται να προσομοιωθεί με μια πολύ απλή εξίσωση βασικών διεργασιών. Αυτό μοιραία έχει ως συνέπεια την αδυναμία αναπαραγωγής του DOC με σχετική ακρίβεια.

Μια προσεκτική εξέταση των αποτελεσμάτων των πινάκων που συνοψίζουν τα μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος (π.χ. πίνακας 7.5 για φυτοπλαγκτό, πίνακας 7.6 για νιτρικά) σε συνδυασμό με τα διαγράμματα στο Σχήμα 7.27, δείχνει ότι η χρήση ενός μόνο στατιστικού για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης ενός μοντέλου μπορεί να είναι παραπλανητική. Για παράδειγμα, για το σταθμό M1, στη προσομοίωση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, ενώ σύμφωνα με την συνάρτηση κόστους η

προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα δεδομένα φυτοπλαγκτού πεδίου είναι «καλή», τα Σχήματα 7.27 δείχνουν ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Τα υπόλοιπα μέτρα απλώς επιβεβαιώνουν ποσοτικά την 'κακή' προσαρμογή: μέσο σφάλμα, % μέσο σφάλμα και RMS σφάλμα πολύ μεγαλύτερα από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς και η χαμηλότερη % σύγκλιση.

### **9.2.3. Μεθοδολογία βελτιστοποίησης παραμέτρων οικολογικού υπομοντέλου**

Το σύστημα βαθμονόμησης που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4, αποδείχθηκε εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια προσδιορισμού κατάλληλων τιμών παραμέτρων του 3D μοντέλου οικοσυστήματος, απλοποιώντας κατά πολύ την πολυπλοκότητα που επιβάλλει η προσπάθεια βαθμονόμησης ενός τέτοιου συστήματος. Εντούτοις, εξαιτίας των εγγενών χαρακτηριστικών των μεθόδων που χρησιμοποιεί και των μειονεκτημάτων τους όπως περιγράφηκαν στην ίδια παράγραφο, δεν λειτούργησε με τον αναμενόμενο τρόπο: ως ένα αυτοματοποιημένο σύστημα προσδιορισμού του βέλτιστου συνόλου τιμών των παραμέτρων του 0D οικολογικού μοντέλου που μεγιστοποιεί την καλή προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις πεδίου. Απαιτήθηκε αρκετός χειρισμός και δοκιμές με αρχικές τιμές παραμέτρων (διαφορετικά σημεία εκκίνησης της διαδικασίας αναζήτησης ακρότατου). Η προσπάθεια αυτή έδωσε τιμές παραμέτρων με μικρή συνάρτηση κόστους, οπτικά καλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου η οποία ήταν και ποσοτικά καλή, όπως απέδειξε η ποσοτικοποίηση του σφάλματος του 3D μοντέλου οικοσυστήματος (παράγραφος 7.2).

Γίνεται φανερό ότι, μετά από αυτήν την πρώτη προσέγγιση στο ζήτημα της βαθμονόμησης όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4, υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη ενός διαφορετικού, πιο ολοκληρωμένου συστήματος βαθμονόμησης που θα εξασφαλίζει μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης της όλης διαδικασίας και βεβαιότητα εύρεσης του ολικού ακρότατου της συνάρτησης κόστους. Η μεθοδολογία μπορεί να αναζητηθεί προς διάφορες κατευθύνσεις, που έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον στο ανοιχτό ερευνητικό πεδίο της βαθμονόμησης μοντέλων θαλάσσιου οικοσυστήματος:

- στις τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation), που έχουν ευρεία εφαρμογή στους τομείς της μετεωρολογίας και της φυσικής ωκεανογραφίας στην

ανάπτυξη επιχειρησιακών συστημάτων πρόβλεψης (Triantafyllou et al., 2003) και γενικά διακρίνονται σε

(α) μεθόδους μεταβολών (variational methods) με κυριότερη τη συζυγή μέθοδο (adjoint method): οι Fennel et al. (2001), Schartau et al. (2001), Spitz et al. (2001) εφάρμοσαν τη συζυγή μέθοδο στην αφομοίωση δεδομένων σε οικολογικά μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (0D) τριών έως οκτώ μεταβλητών κατάστασης με διάφορους βαθμούς επιτυχίας στον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων. Οι Zhao & Lu (2008) εφάρμοσαν τη συζυγή μέθοδο αφομοίωσης δεδομένων σε ένα συζευγμένο 3D υδροδυναμικό – οικολογικό μοντέλο αποτελούμενο από 5 μεταβλητές βιογεωχημικές μεταβλητές.

(β) ακολουθιακές μεθόδους (sequential methods) που βασίζονται στο φίλτρο Kalman: οι Triantafyllou et al. (2003) χρησιμοποίησαν ένα τροποποιημένο φίλτρο Kalman (singular evolutive interpolated Kalman filter) για να αφομοιώσουν ψευδο-παρατηρήσεις πεδίου σε ένα συζευγμένο 3D υδροδυναμικό – οικολογικό μοντέλο (POM-ERSEM). Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής αξιολογήθηκε πολύ θετικά στην ανάπτυξη μεθοδολογίας προσδιορισμού τιμών παραμέτρων για σύνθετα 3D μοντέλα οικοσυστήματος, εν όψει λειτουργίας τους σε επιχειρησιακό επίπεδο, δηλαδή αφομοίωσης πραγματικών δεδομένων πεδίου σε πραγματικό χρόνο.

- στις στοχαστικές τεχνικές, στις οποίες ανήκουν οι εξελικτικοί και οι γενετικοί αλγόριθμοι, που έχουν ως θεμελιώδη αρχή την τυχαιότητα, η οποία εμποδίζει τον 'εγκλωβισμό' της διαδικασίας σε κάποιο τοπικό ακρότατο, κάτι που αποτελεί σοβαρό πλεονέκτημα (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2007). Για παράδειγμα οι Matear (1995) και Hurtt & Armstrong (1996, 1999) χρησιμοποίησαν προσομοιωμένη ανόπτηση (simulated annealing) για να βαθμονομήσουν με επιτυχία σχετικά απλά, 0D μοντέλα με χρήση μετρήσεων πεδίου. Ωστόσο, η διαδικασία αποδείχτηκε υπολογιστικά δαπανηρή και αργή σε σχέση με τις προσδιοριστικές - αιτιοκρατικές μεθόδους κλίσεων (π.χ. συζυγής) που χρησιμοποιούν την παράγωγο της συνάρτησης κόστους ως προς τις παραμέτρους, χαρακτηριστικό μειονέκτημα των στοχαστικών τεχνικών.

Ένα άλλο ζήτημα που θέτουν και διερευνούν οι Hemmings et al. (2004) είναι η υπόθεση ότι οι τιμές των παραμέτρων δεν μπορεί να είναι σταθερές όταν ένα μοντέλο εφαρμόζεται σε μια ευρύτερη περιοχή με διαφορετικούς τύπους οικοσυστημάτων. Εφαρμόζοντας μια τεχνική διαχωρισμού της περιοχής μελέτης (Βόρειος Ατλαντικός)

κατέληξαν σε δυο τομείς (split-domain), βαθμονόμησαν και επαλήθευσαν ένα απλό 0D μοντέλο 3 μεταβλητών κατάστασης με διαφορετικό σύνολο παραμέτρων για κάθε τομέα, δηλαδή προέκυψαν δύο σύνολα τιμών παραμέτρων που βελτιστοποιούν την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου κάθε περιοχής. Η προοπτική αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί καθώς, όπως αναλύεται στην παράγραφο 7.2, η προσαρμογή της προσομοιωμένης συγκέντρωσης φυτοπλαγκτού στις μετρήσεις πεδίου στον εύτροφο σταθμό M1 δεν είναι ικανοποιητική, και μέρος αυτής της αστοχίας θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι η βαθμονόμηση του οικολογικού μοντέλου έγινε με δεδομένα προερχόμενα από τον ολιγότροφο M2. Δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων ποσοτικοποιούν διεργασίες ενός τροφικού επιπέδου διαφορετικού από την περιοχή του λιμένα.

### **9.3. Επόμενα βήματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και προοπτικές**

Έγινε μια εκτενής προσπάθεια εκτίμησης της ικανότητας του μοντέλου, με ποσοτικοποίηση του σφάλματος και της ακρίβειας των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων, και η διαδικασία αυτή ανέδειξε, πέρα από τις επιτυχίες, και περιορισμούς. Οι δυσλειτουργίες του μοντέλου και οι προσπάθειες άμβλυνσης ή και άρσης τους πρέπει να αναζητηθούν στις διάφορες πηγές που εισάγουν σφάλμα σε μια προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης:

- στην ίδια τη δομή του μοντέλου, με τις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις και τις διεργασίες που περιλαμβάνει ή δεν περιλαμβάνει. Για παράδειγμα, το οικολογικό σκέλος του μοντέλου στη παρούσα εργασία, η ανάπτυξη του οποίου δανείστηκε από τη φιλοσοφία της βέλτιστης πολυπλοκότητας (optimum model complexity – η βέλτιστη εκείνη μορφοποίηση που ενσωματώνει όση λιγότερη πολυπλοκότητα είναι απαραίτητη για την ακριβή περιγραφή, αναπαραγωγή και πρόγνωση των φαινομένων ενδιαφέροντος), κάνει χρήση της μεταβλητής 'φυτοπλαγκτό', που συναθροίζει έναν μεγάλο αριθμό οργανισμών, διαφορετικών μεγεθών, φυσιολογιών, λειτουργιών και αλληλεπιδράσεων με το υπόλοιπο οικοσύστημα, ενώ παράλληλα, διεργασίες του μικροβιακού κύκλου δεν μοντελοποιούνται απευθείας αλλά παραμετροποιούνται. Κρατώντας τις επιτυχίες αυτής της προσέγγισης, ενδεχομένως μια αύξηση της τροφικής διακριτικής ικανότητας του μοντέλου, με διάκριση του φυτοπλαγκτού σε επιμέρους λειτουργικές ομάδες, και συμπερίληψη της βακτηριακής και ζωοπλαγκτονικής βιομάζας ως μεταβλητές

κατάστασης, να οδηγήσει σε αύξηση της ακρίβειας των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων και διεύρυνση της ικανότητας του μοντέλου να περιγράψει τη δυναμική παράκτιων διεργασιών.

- στις τιμές των παραμέτρων, όπως προσδιορίστηκαν από τη διαδικασία βαθμονόμησης – βελτιστοποίησης, με όλους τους εγγενείς περιορισμούς της τεχνικής που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε.
- στις τιμές στα ανοιχτά όρια και την επιφάνεια και κυρίως στην έλλειψη αυτών. Η διαθεσιμότητα επαρκών και ρεαλιστικών δεδομένων πεδίου για την τροφοδότηση αλλά και για τη βαθμονόμηση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μοντέλων προσομοίωσης είναι κρίσιμο ζήτημα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μοντέλων οικοσυστήματος και η έλλειψή τους αποτελεί πάγιο πρόβλημα στις επιστήμες του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Στην τελευταία αυτή παράγραφο, περιγράφονται τα επόμενα βήματα και τα σημεία εκείνα στα οποία πρέπει να δοθεί έμφαση, ώστε η προτεινόμενη μεθοδολογία να ενισχυθεί, να εξελιχθεί και να αναβαθμιστεί σε αποτελεσματικό εργαλείο παρακολούθησης, διερεύνησης, ακόμα και πρόγνωσης παράκτιων διεργασιών προς την κατεύθυνση της επιχειρησιακής ωκεανογραφίας. Η προσπάθεια που χρειάζεται να επενδυθεί, εστιάζεται στα πεδία που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

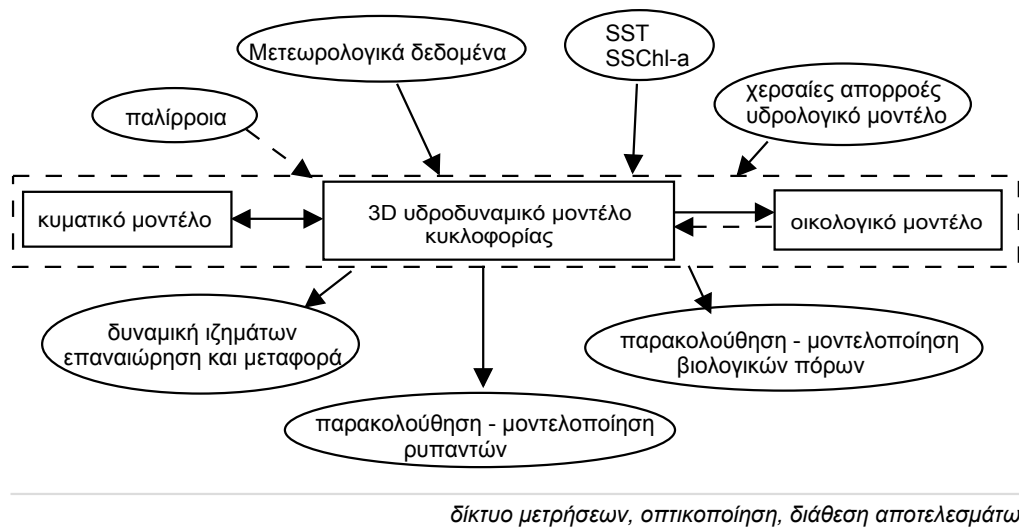
- Σε ότι αφορά τις διεργασίες που περιλαμβάνει και τον τρόπο που περιγράφει το παράκτιο οικοσύστημα το οικολογικό σκέλος του μοντέλου, θα πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα αύξησης της τροφικής διακριτικής ικανότητας: για παράδειγμα, η διάκριση του φυτοπλαγκτού σε επιμέρους λειτουργικές ομάδες (διάτομα, μαστιγωτά, κλπ), η συμπερίληψη της βακτηριακής και ζωοπλαγκτονικής βιομάζας και της σωματιδιακής ύλης (detritus) ως μεταβλητές κατάστασης για την απευθείας μοντελοποίηση του μικροβιακού κύκλου. Επίσης, μπορεί να ληφθεί δυναμικά υπόψη ο ρόλος του ιζήματος, με σύνδεση (coupling) με ένα υπομοντέλο διεργασιών πυθμένα και ανταλλαγής ύλης-ενέργειας του πυθμένα με τη στήλη νερού, παρόλο που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κοντά στον πυθμένα δείχνουν ως τα πλέον ακριβή σε σχέση με την υπόλοιπη στήλη, υποδεικνύοντας ότι η παραμετροποίηση που χρησιμοποιήθηκε για τις ανταλλαγές θρεπτικών ιζήματος-στήλης είναι επιτυχημένη παρά την απλότητά της.

- Στην αύξηση της διακριτοποίησης της κατακόρυφης διάστασης με χρήση περισσότερων σίγμα επιπέδων (επιπλέον των  $KB=11$  που χρησιμοποιούνται στην εργασία). Μια τέτοια αύξηση της ανάλυσης του μοντέλου θα επιτρέψει λεπτομερέστερη περιγραφή του επιφανειακού στρώματος και βελτιωμένη προσομοίωση διεργασιών ανάμιξης ορμής, θερμότητας και ύλης, περιορίζοντας τόσο το σφάλμα στην ταχύτητας ρεύματος, όσο και της θερμοκρασίας / αλατότητας.
- Στον επιπλέον έλεγχο της συμπεριφοράς του συστήματος προσομοίωσης, με εφαρμογή του σε άλλες χρονικές περιόδους και σε άλλες παράκτιες περιοχές. Η αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να είναι διαρκής και να καλύπτει όλους τους τύπους επαλήθευσης (replicative, predictive, structural validation, model transferability – Arhonditsis and Brett -2004).
- Στην ανάπτυξη ενός πιο ολοκληρωμένου συστήματος βαθμονόμησης - βελτιστοποίησης των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, που θα εξασφαλίζει μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης της όλης διαδικασίας. Η μεθοδολογία μπορεί να αναζητηθεί προς διάφορες κατευθύνσεις, που έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον στο ανοιχτό ερευνητικό πεδίο της βαθμονόμησης μοντέλων θαλάσσιου οικοσυστήματος, όπως οι τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων και οι στοχαστικές τεχνικές, στις οποίες ανήκουν οι εξελικτικοί και οι γενετικοί αλγόριθμοι, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.4.
- Τα παραπάνω βεβαίως, εκτός των αυξημένων αναγκών για δεδομένα πεδίου, οδηγούν σε αύξηση της πολυπλοκότητας και του φόρτου διαχείρισης της πληθώρας πληροφορίας που, αφενός απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος προσομοίωσης και αφετέρου παράγεται και που πρέπει να αξιολογηθεί, να ταξινομηθεί και να παρουσιαστεί με αποτελεσματικό τρόπο. Για το λόγο αυτό, χρειάζεται περαιτέρω απλοποίηση και περισσότερος αυτοματισμός διαδικασιών στο μοντέλο, όπως βελτίωση της μεθόδου εισαγωγής δεδομένων, ρουτίνες υπολογισμού και ποσοτικοποίησης σφάλματος, ανάπτυξη ενός διαδραστικού λογισμικού οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων με βάση τις ρουτίνες MATLAB που αναπτύχθηκαν.

Παράλληλα, η μεθοδολογία είναι αρκετά ώριμη, ώστε να συνδεθεί με άλλους τομείς των θαλάσσιων επιστημών, όπως:

- η μετεωρολογία και οι αλληλεπιδράσεις ατμόσφαιρας – θάλασσας, ώστε το υδροδυναμικό σκέλος να φορτίζεται απευθείας με μετεωρολογικά δεδομένα,
- η δυναμική ιζημάτων για μελέτες επαναιώρησης και μεταφοράς υλικού,
- η επίδραση του κυματισμού, μέσω ενός κυματικού μοντέλου,
- η τηλεπισκόπηση, για την παροχή επιφανειακών πεδίων θερμοκρασίας και χλωροφύλλης –α με μεγάλη συχνότητα, τόσο για τη φόρτιση όσο και για την επαλήθευση του συστήματος προσομοίωσης,
- η επίδραση χερσαίων απορροών, σημειακών και μη σημειακών, για την παρακολούθηση και ποσοτικοποίηση της εισροής θρεπτικών, οργανικής ύλης και ρυπαντών στο παράκτιο οικοσύστημα μέσω υδρολογικών μοντέλων,
- η παρακολούθηση της τύχης ρυπαντών μέσω μοντέλου ιχνηλασίας (particle tracking),

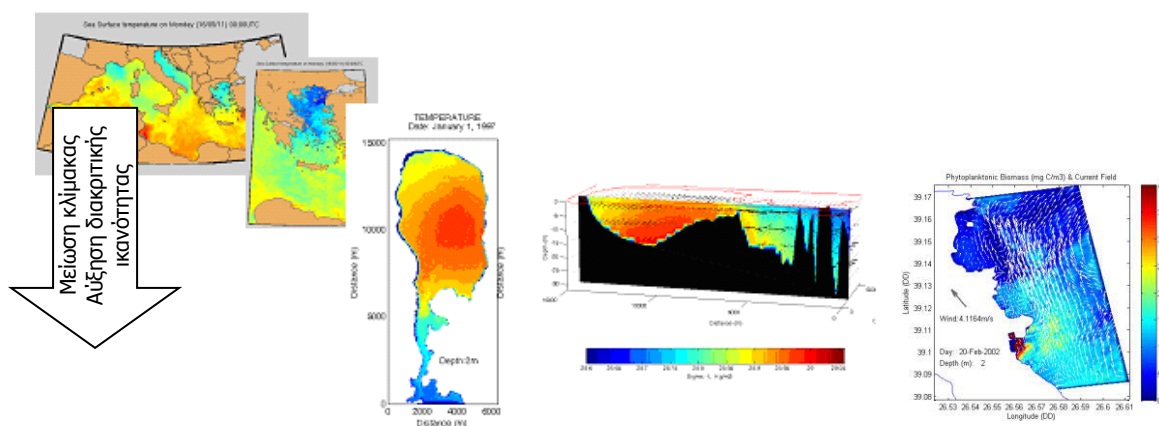
Καθώς τα παράκτια οικοσυστήματα, όπως όλα τα οικοσυστήματα, στηρίζουν την λειτουργία της κοινωνίας μέσα από τα αγαθά που παρέχουν και τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν, η παρακολούθηση και η πρόγνωση των λειτουργιών και των μεταβολών τους, και η προστασία και η συνετή διαχείρισή τους είναι ζητήματα κρίσιμα για την ευημερία της κοινωνίας. Η διατήρηση υγείων και παραγωγικών οικοσυστημάτων και η αποκατάσταση των υποβαθμισμένων, βασίζεται στην ικανότητα κατανόησης και πρόβλεψης, με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια, των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας και των φυσικών διαδικασιών στα συστήματα αυτά, και της πρόγνωσης των οικολογικών μεταβολών (Huthnance et al. 1993, Green et al, 2009). Υπό το πρίσμα αυτό, ως μεσοπρόθεσμος στόχος, αλλά και πρόκληση, μπορεί να τεθεί η σύνδεση του υδροδυναμικού – οικολογικού μοντέλου με συνιστώσες – ερευνητικά πεδία όπως αυτά που αναφέρονται παραπάνω, και η ανάπτυξη ενός ενιαίου, ολοκληρωμένου επιχειρησιακού συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης παράκτιων θαλάσσιων διεργασιών **τοπικής κλίμακας** (Σχήμα 9.1). Θα υλοποιηθεί έτσι ένας από τους στόχους της επιχειρησιακής ωκεανογραφίας που έχει τεθεί για το εγγύς μέλλον: η μείωση της κλίμακας των επιχειρησιακών εφαρμογών (downscaling - Nittis et al. 2006, Green et al. 2009) και η δυνατότητα παροχής πληροφορίας σε τοπικό επίπεδο για χρήση από τις διαχειριστικές αρχές ή οποιονδήποτε τελικό χρήστη μπορεί να ενδιαφέρεται.



**Σχήμα 9.1.** Παράδειγμα συνιστωσών ενός συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης διεργασιών παράκτιων οικοσυστημάτων, που θα μπορούσε να αναπτυχθεί για περιοχή περιορισμένης χωρικής κλίμακας (local scale), στα πρότυπα συστημάτων επιχειρησιακής ωκεανογραφίας ευρύτερων περιοχών.

Επιπλέον, μια επιχειρησιακή εφαρμογή τοπικής κλίμακας, όπως αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, θα μπορεί να συνδεθεί με επιχειρησιακά συστήματα που καλύπτουν ευρύτερες περιοχές με μικρότερη διακριτική ικανότητα, όπως είναι το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε που έχει ως πεδίο εφαρμογής ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο και μέρος της Ανατολικής Μεσογείου. Με τη σύνδεση και την παράλληλη εκτέλεση συστημάτων που καλύπτουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες, δημιουργείται ένα αναβαθμισμένο ενιαίο σύστημα, που θα παρέχει πληροφορία σε επιχειρησιακό επίπεδο την ίδια στιγμή σε ένα εύρος χωρικής κλίμακας από τη Μεσόγειο Θάλασσα έως μια μικρή παράκτια περιοχή ή έναν ημίκλειστο κόλπο (Σχήμα 9.2).





**Σχήμα 9.2.** Παράλληλη εκτέλεση μοντέλων που καλύπτουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες και μείωση της κλίμακας των επιχειρησιακών εφαρμογών (downscaling). (Τα δυο πρώτα σχήματα από την ιστοσελίδα του συστήματος Ποσειδών του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., προσαρμογή συνολικού σχήματος από Prandle et al., 2005).

Περιοχές που θα επιλεγούν για την πιλοτική εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να πληρούν κριτήρια όπως το να μπορούν να οριστούν και να ελεγχθούν σχετικά εύκολα, να είναι αρκετά μελετημένες ώστε να υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για τη φαινομενολογία τους, να παρουσιάζουν σημαντική κοινωνικο-οικονομική δραστηριότητα. Για την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, προϋπόθεση είναι η εγκατάσταση ενός δικτύου αυτόνομων μετρητικών συσκευών, όπως είναι οι σταθεροί πλωτήρες με ποντισμένους αισθητήρες, για την καταγραφή και μετάδοση δεδομένων πεδίου σε πραγματικό χρόνο και την εισαγωγή τους στο σύστημα προσομοίωσης με μεθόδους αφομοίωσης (data assimilation).

Πρέπει να τονιστεί ότι τα οφέλη, κοινωνικά και οικονομικά, που θα προκύψουν μακροπρόθεσμα από την προσπάθεια ανάπτυξης και την εφαρμογή ενός τέτοιου επιχειρησιακού εργαλείου, που μπορεί να μετουσιώσει την επιστημονική γνώση σε πρακτικές διαχείρισης των πιεστικών περιβαλλοντικών προβλημάτων, θα είναι πολλά και σημαντικά, ενώ ταυτόχρονα, θα τροφοδοτηθεί η επιστημονική έρευνα και θα ενισχυθεί η διεπιστημονική προσέγγιση και η συνεργασία στα ζητήματα περιβάλλοντος, με στόχο τη διαθεσιμότητα και χρήση οικολογικών προγνώσεων σε επίπεδο ρουτίνας, όπως χρησιμοποιείται σήμερα η πρόγνωση καιρού, κυματισμού και άλλων φυσικών μεταβλητών.

**A. Ξενόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές**

- Ainsworth, C.H., H.N. Morzaria-Luna, I.C. Kaplan, P.S. Levin and E.A. Fulton (2012). Full compliance with harvest regulations yields ecological benefits: Northern Gulf of California case study. *Journal of Applied Ecology*, 49: 63–72.
- Aksnes D.L., K.B. Ulvestad, B.M. Balino, J. Berntsen, J.K. Egge and E. Svendsen, (1995). Ecological modeling in coastal areas: towards predictive physical-chemical-biological simulation models. *Ophelia*, 41: 5–36.
- Aksnes, D.L. and M. D. Ohman (2009). Multi-decadal shoaling of the euphotic zone in the southern sector of the California Current System. *Limnol. Oceanogr.*, 54(4): 1272–1281.
- Allen, J.I. (1997). A modeling study of ecosystem dynamics and nutrient cycling in the Humber plume, UK. *Journal of Sea Research*, 38: 333 - 359.
- Allen, J. I., J. Blackford, J. Holt, R. Proctor, M. Ashworth and J. Siddorn (2001). A highly spatially resolved ecosystem model for the North West European Continental Shelf. *Sarsia*, 86: 423–440.
- Allen, J.I., P.J. Somerfield and J. Siddorn (2002). Primary and bacterial production in the Mediterranean Sea: a modelling study. *Journal of Marine Systems*, 33– 34: 473– 495.
- Allen, J.I., P.J. Somerfield and F.J. Gilbert (2007). Quantifying uncertainty in high resolution coupled hydrodynamic – ecosystem models. *Journal of Marine Systems*, 64: 3 – 14.
- Allen, J.I., J.T. Holt, J. Blackford and R. Proctor (2007). Error quantification of a high-resolution coupled hydrodynamic – ecosystem coastal-ocean model: Part 2. Chlorophyll-a, nutrients and SPM. *Journal of Marine Systems (2007)*, article in press.
- Anderson, L.A., A.R. Robinson and C.J. Lozano (2000). Physical and biological modeling in the Gulf Stream region: I. Data assimilation methodology. *Deep-Sea Research I*, 47: 1787-1827.
- Anderson, T.R. (2005). Plankton functional type modelling: running before we can walk? *Journal of Plankton Research* 27: 1073–1081.
- Anderson, T.R. (2010). Progress in marine ecosystem modelling and the unreasonable effectiveness of mathematics". *Journal of Marine Systems*, 81: 4–11.
- Androulidakis, Y. S. and V. H. Kourafalou (2011). Evolution of a buoyant outflow in the presence of complex topography: The Dardanelles plume (North Aegean Sea), *J. Geophys. Res.*, 116, C04019, doi:10.1029/2010JC006316
- Angelidis, M.O. (ed) (1998). *Marine monitoring along the coastal area of the island of Lesvos and monitoring of land-based pollution sources*. MED POL Monitoring project, End of the year report (1997), University of the Aegean.
- Angelidis, M.O. (ed) (1999). *Marine monitoring along the coastal area of the island of Lesvos and monitoring of land-based pollution sources*. MED POL Monitoring project, End of the year report (1998), University of the Aegean.
- Angelidis, M.O. (ed) (2000). *Marine monitoring along the coastal area of the island of Lesvos and monitoring of land-based pollution sources*. MED POL Monitoring project, End of the year report (1999), University of the Aegean.

- Angelidis, M.O. (ed) (2004). *Marine monitoring along the coastal area of the island of Lesvos*. MED POL III Monitoring project, End of the year report (2004), University of the Aegean.
- Arhonditsis G., G.Tsirtsis, M.O. Angelidis and M. Karydis (2000). Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: applications to a semi-enclosed gulf in in the Meriterranean Sea. *Ecological Modelling*, 129: 209-227.
- Arhonditsis, G., Tsirtsis G. and Karydis, M. (2002). The effects of episodic rainfall events to the dynamics of coastal marine ecosystems: applications to a semi-enclosed gulf in the Meriterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 35: 183 – 205.
- Arhonditsis, G.B. and M.T. Brett (2004). Evaluation of the current state of mechanistic aquatic biogeochemical modeling. *Marine Ecology Progress Series*, 271: 13 – 26.
- Arhonditsis, G.B., B.A. Adams-Vanharn, L. Nielsen, C.A. Stow and K.H. Reckhow (2006). Evaluation of the Current State of Mechanistic Aquatic Biogeochemical Modeling: Citation Analysis and Future Perspectives. *Environ. Sci. Technol.*, 40: 6547-6554.
- Aristegui, J., Tett, P., Hernandez-Guerra, A., Basterretxea, G., Montero, M.F., Wild, K., Sangra, P., Hernandez-Leon, S., Canton, M., Garcia-Braun, J.A., Pacheco, M., Barton, E.D. (1997). The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Research I*, 44(1): 71–96.
- Arndt, S., G. Lacroix, N. Gypens, P. Regnier and C. Lancelot (2011). Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary–coastal zone continuum: A model study. *Journal of Marine Systems*, 84: 49 – 66.
- Aumont O., S. Belviso , P. Monfray (2002). Dimethylsulfoniopropionate (DMSP) and dimethylsulfide (DMS) sea surface distributions simulated from a global three-dimensional ocean carbon cycle model. *J Geophys Res C* (107):3029
- Bacastow, R. and E. Maier-Reimer (1990). Ocean-circulation model of the carbon cycle. *Climate Dynam.*, 4(2): 95-125.
- Backhaus, J.O. (1985). A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 38, 165-187.
- Baretta, J.W., Ebenhoh W. and Ruardij, P. (1995). The European Regional Seas Ecological Model, a complex marine ecosystem model. *Netherlands J. Sea Research*, 33(3/4): 233-246.
- Baretta, J.W. and H.J.G. Baretta-Bekker (1998). Observational requirements for validation of marine ecosystem models in the Mediterranean. In, *35<sup>th</sup> CIESM Congress Proceedings*, Vol. 35(1), Dubrovnik (Croatia), 1998.
- Bastos, A., Collins, M., Kenyon, N. (2003). Water and sediment movement around a coastal headland: Portland Bill, southern UK. *Ocean Dynamics*, 53: 309–321.
- Beckers, J.-M. (1991). Application of a 3D model to the Western Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, 1: 241 – 268.
- Beckers, J.-M., M. Rixen, P.Brasseur, J.-M. Brankart, A. El moussaoui, M. Crepon, Ch. Herbaut, F. Martel, F. Van den Berghe, L. Mortier, A. Lascaratos, P. Drakopoulos, G. Korres, K. Nittis, N. Pinardi, E. Masetti, S. Castellari, P. Carini, J. Tintore, A. Alvarez, S. Monserrat, D. Parilla, R. Vautard and S. Speich (2002).

- Model intercomparison in the Mediterranean : MEDMEX simulations of the seasonal cycle. *Journal of Marine Systems*, 33-34: 215-251.
- BGR , Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (2008). *Decentralised Sanitation and Wastewater Treatment*. Revised 2<sup>nd</sup> edition, Hanover, Germany, <http://www.bgr.bund.de/decentralised-sanitation-pdf>
- Blackford, J.C. and P.J. Radford (1995). A structure and methodology for marine ecosystem modelling. *Netherlands J. Sea Research*, 33(3/4): 247-260.
- Blackford, J.C. (2010). Predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems* 81: 12–18.
- Blackford J., J. I. Allen, T.R. Anderson and K.A. Rose (2010). Challenges for a new generation of marine ecosystem models: Overview of the Advances in Marine Ecosystem Modelling Research (AMEMR) Symposium, 23–26 June 2008, Plymouth UK. *Journal of Marine Systems*, 81: 1–3
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor (1983). Diagnostic and prognostic numerical studies of the South Atlantic Bight. *Journal of Geophysical Research*, 88(C8): 4579-4592.
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor (1987, 1996). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-dimensional Coastal Ocean Models*, Vol4, ed. N.Heaps, American Geophysical Union.
- Blumberg, A.F. and Zhen-Gang Ji and C. Kirk Ziegler (1996). Modeling outfall plume behavior using far field circulation model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122 (11), 610-616.
- Bolañosa, P., P. Osunab, J. Wolfa, J. Monbaliuc and A. Sanchez-Arcillad (2011). Development of the POLCOMS–WAM current–wave model. *Ocean Modelling*, 36(1-2): 102 – 115.
- Boyd P.W. and S.C. Doney (2002). Modeling regional responses by marine pelagic ecosystems to global climate change. *Geophys Res Lett* 29(16):53-1–53-4.
- Bryan, K. (1969). A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J. Computational Physics*, 4,347-359.
- Bryan, K. and M.D. Cox (1972). The circulation of the world ocean: a numerical study 1. A homogenous model. *J. Physical Oceanography*, 2: 319-335.
- Chapelle, A., P. Lazure and A. Menesguen (1994). Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39(6): 529-548.
- Chapelle, A., A. Menesguen, J-M. Deslous-Paoli, P. Souchu, N. Mazouni, A. Vaquer and B. Millet (2000). Modelling nitrogen, primary production and oxygen in a Mediterranean lagoon. Impact of oysters farming and inputs from the watershed. *Ecological Modelling*, 127: 161-181.
- Chau K.W. and H.H. Jin (2002). Two-layered, 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system. *Marine Pollution Bulletin*, 45: 300 – 310.
- Chen, C. and Xie, L. (1997). A numerical study of wind-induced, near inertial oscillations over the Texas-Louisiana shelf. *Journal of Geophysical Research* 102(C7), 15583-15593.
- Chen, C., Wiesenburg, D.A. and Xie, L. (1997). Influence of river discharge on biological production in the inner shelf: A coupled biological and physical model of the Louisiana-Texas Shelf. *Journal of Marine Research*, 55: 293-320.

- Chiswell, S.M. and Roemmich, D. (1998). The East Cape Current and two eddies: A mechanism for larval retention? *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 32: 385-397.
- Costanza, R. and F.H. Sklar (1985). Articulation, accuracy and effectiveness of mathematical models: a review of freshwater wetland applications. *Ecological Modeling* 27: 45-68.
- Crispi, G., A. Crise and E. Mauri (1999). A seasonal three-dimensional study of the nitrogen cycle in the Mediterranean Sea: Part I. Model implementation and numerical results. *Journal of Marine Systems*, 18: 287-312.
- Crispi, G., A. Crise and E. Mauri (1999). A seasonal three-dimensional study of the nitrogen cycle in the Mediterranean Sea: Part II. Verification of the energy constrained trophic model. *Journal of Marine Systems*, 20: 357-379.
- Csanady, G.T. (1997). On the Theories that Underlie Our Understanding of Continental Shelf Circulation. *Journal of Oceanography* 53, 207-229.
- Dadou, I., F. Lamy, C. Rabouille, D. Ruiz-Pino, V. Andersen, M. Bianchi and V. Garçon (2001). An integrated biological pump model from the euphotic zone to the sediment: a 1-D application in the Northeast tropical Atlantic. *Deep Sea Research II*, 48: 2345 – 2381.
- Dadou, I., G. Evans and V. Garçon (2004). Using JGOFS *in situ* and ocean color data to compare biogeochemical models and estimate their parameters in the subtropical North Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research*, 62: 565-594.
- Davies, A.M. and Xing, J. (2003). Processes influencing wind-induced current profiles in near coastal stratified regions. *Continental Shelf Research* 23, 1379-1400.
- Dee, D.P. (1995). A pragmatic approach to model validation, pp.1-13 in, *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*, (ed.D.R.Lynch & A.M.Davies). Washington, DC: American Geophysical Union. 510p.
- Delhez, E.J.M. (1998). Macroscale ecohydrodynamic modeling on the Northwest European Continental Shelf. *Journal of Marine Systems*, 16: 171-190.
- Dippner, J.W. (2006). Future aspects in marine ecosystem modeling. *Journal of Marine Systems*, 61: 246 – 267.
- Doglioli, A.M., Magaldi, M.G., Vezzulli, L., Tucci, S. (2004). Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean). *Aquaculture*, 231: 215-235.
- Doney, S. C., Glover, D. M., Najjar, R. G. (1996). A new coupled, one dimensional biological-physical model for the upper ocean: Applications to the JGOFS Bermuda Atlantic time-series study (BATS) site. *Deep-Sea Res. Part II*, 43: 591-624.
- Drago, M., B. Cescon and L. Iovenitti (2001). A three-dimensional numerical model for eutrophication and pollutant transport. *Ecological Modelling*, 145: 17 – 34.
- Drakopoulos, P.G. and A. Lascaratos (1999). Modelling the Mediterranean Sea: climatological forcing. *Journal of Marine Systems*, 20: 157 - 173.
- Dugdale, R.C. and Goering, J.J. (1967). Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography*, 12: 196-206.
- Dyke, P.P.G. (2001). *Coastal and Shelf Sea Modelling*. Topics in Environmental Fluid Mechanics, Kluwer Academic Publishers, pp257.
- Ebenhoh, W. J.G. Baretta-Bekker and J.W. Baretta (1997). The primary production module in the marine ecosystem model ERSEM II, with emphasis on the light forcing. *Journal of Sea Research*, 38: 173 – 193.

- Emery, W. J. and R. E. Thomson (1997). *Data analysis methods in physical oceanography*. Pergamon, 634p.
- Evans, G.T. and V. Garçon (1997). *One-dimensional models of water column biogeochemistry*. JGOFS report No 23, France, November-December 1995.
- Ezer, T. (2000). On the seasonal mixed layer simulated by a basin-scale ocean model and the Mellor-Yamada turbulence scheme. *Journal of Geophysical Research*, 105 (C7): 16843-16855.
- Ezer, T., H. Arango, and A. F. Shchepetkin (2002). Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects. *Ocean Modelling*, 4: 249-267.
- Ezer T. (2011). *IOC/WESTPAC Training Course on Ocean Models*. Ανακτήθηκε από [http://www.fio.org.cn/english/training\\_center/training\\_courses/ppts/Ezer\\_Training\\_Part01.pdf](http://www.fio.org.cn/english/training_center/training_courses/ppts/Ezer_Training_Part01.pdf) ΚΩΙ  
[http://www.fio.org.cn/english/training\\_center/training\\_courses/ppts/Ezer\\_Training\\_Part02.pdf](http://www.fio.org.cn/english/training_center/training_courses/ppts/Ezer_Training_Part02.pdf)
- Falconer, R.A. (1991). Review of modelling flow and pollutant transport processes in hydraulic basins. In *Water Pollution: Modelling Measuring and Prediction*. Eds. L.C. Wrobel and C.A. Brebbia. Computational Mechanics Publication, Elsevier Applied Science.
- Fasham, M.J.R., H.W. Ducklow and S.M. McKelvie (1990). A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, 48: 591-639.
- Fennel K., M. Losch, J. Schroter, M. Wenzel (2001). Testing a marine ecosystem model: sensitivity analysis and parameter optimization. *Journal of Marine Systems*, 28, 45–63.
- Fennel, W. and T. Neumann (2004). *Introduction to the Modelling of Marine Ecosystems*. Elsevier Oceanography Series 72, Elsevier, pp297.
- Fennel, W. (2010). A nutrient to fish model for the example of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 81(1-2): 184 – 195.
- Fisher, H., I. List, R. Koh, I. Imberger and N. Brooks (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.
- Franks, P.J.S and C. Chen (2001). A 3-D prognostic numerical model study of the Georges Bank ecosystem. Part II: biological-physical model. *Deep-Sea Research II*, 48: 457-482.
- Franks, P.J.S. (2002). NPZ models of plankton dynamics: their construction, coupling to physics, and application. *Journal of Oceanography*, 58: 379 – 387.
- Friedrichs, M. A. M. and E. E. Hofmann (2001). Physical control of biological processes in the central equatorial Pacific, *Deep Sea Res. I*, 48 (4): 1023–1069.
- Friedrichs, M.A.M., R.R. Hood and J.D. Wiggert (2006). Ecosystem model complexity versus physical forcing: quantification of their relative impact with assimilated Arabian Sea data. *Deep-Sea Research II*, 53: 576–600.
- Friedrichs, M. A. M., J. A. Dusenberry, L. A. Anderson, R. A. Armstrong, F. Chai, J. R. Christian, S. C. Doney, J. Dunne, M. Fujii, R. Hood, D. J. McGillicuddy Jr., J. K. Moore, M. Schartau, Y. H. Spitz and J. D. Wiggert (2007). Assessment of skill and portability in regional marine biogeochemical models: Role of multiple planktonic groups, *J. Geophys. Res.*, 112, C08001, doi:10.1029/2006JC003852.
- Fry, J.C. (1990). Direct methods and biomass estimation. *Methods in microbiology*, 22: 41-81.

- Fulton, E. A. (2010). Approaches to end-to-end ecosystem models. *Journal of Marine Systems*, 81: 171-183.
- Fulton E. A., J. S. Link, I. C. Kaplan, M. Savina-Rolland, P. Johnson, C. Ainsworth, P. Horne, R. Gorton, R. J. Gamble, A.D. M. Smithand & D. C. Smith (2011). Lessons in modelling and management of marine ecosystems: the Atlantis experience. *Fish and Fisheries*, 12: 171–188.
- Gan, J. and J.S. Allen (2005). On open boundary conditions for a limited-area coastal model off Oregon. Part I: Responses to idealized wind forcing. *Ocean Modelling*, 8: 115 – 133.
- Gardner, R.H., R.V. O'Neill, J.B. Mankin and J.H. Carney (1981). A comparison of sensitivity analysis and error analysis based on a stream ecosystem model. *Ecological Modelling*, 12: 173–190.
- Garreau, P., V. Garnier and A. Schaeffer (2011). Eddy resolving modelling of the Gulf of Lions and Catalan Sea. *Ocean Dynamics* 61, doi:10.1007/s10236-011-0399-2
- Gnanadesikan, A and R. A. Weller (1995). Structure and instability of the Ekman spiral in the presence of surface waves. *Journal of Physical Oceanography*, 25: 3148 – 3171.
- Green, D., Uccellini, L., Colton, M., Turner, E., Scheurer, D., Valette-Silver, N., Matlock, G., Brown, C., Wilson, D. (2009). Toward a marine ecological forecasting system. *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, vol., no., pp.1-6, 26-29 Oct. 2009  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5422264&isnumber=5422059>
- Gregoire, M., J.M. Beckers, J.C.J. Nihoul and E. Stanev, (1998). Reconnaissance of the main Black Sea's ecohydrodynamics by means of a 3D interdisciplinary model. *Journal of Marine Systems*, 16: 85-105.
- Gregoire, M. and G. Lacroix (2001). Study of the oxygen budget of the Black Sea waters using a 3D coupled hydrodynamical-biogeochemical model. *Journal of Marine Systems*, 31: 175-202
- Griebel, M. T. Dornseifer and T. Neunhoffer, (1998). *Numerical Simulations in Fluid Dynamics. A practical introduction*. Siam, pp217.
- Griffies, S.M., C. Boning, F.O. Bryan, E.P. Chassignet, R. Gerdes, H. Hasumi, A. Hirstg, A.-M. Treguier, D. Webb (2000). Developments in ocean climate modelling. *Ocean Modelling*, 2: 123 – 192.
- Griffies, S. & Co-Authors (2010). Problems and Prospects in Large-Scale Ocean Circulation Models in *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2)*, Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs09.cwp.38
- Hackett, B. and L.P. Roed (1994). Numerical modeling of the Halten Bank area: a validation study. *Tellus*, 46A(2):113-133.
- Haidvogel, D.B., J.L. Wilkin and R.E. Young (1991). A semi-spectral primitive equation ocean circulation model using vertical sigma and orthogonal curvilinear horizontal coordinates. *J. Comput. Phys.*, 94: 151-185.
- Haidvogel, D.B. and A. Beckmann (1999). *Numerical Ocean Circulation Modeling*. Series on Environmental Science and Management, Imperial College Press, pp320.
- Haidvogel, D.B., J. Blanton, J. C. Kindle and D. R. Lynch (2000). Coastal ocean modelling: Processes and real-time systems. *Oceanography*, 13(1): 35 – 46.

- Hannah, C., A. Vezina, M. St. John (2010). The case for marine ecosystem models of intermediate complexity. *Progress in Oceanography*, 84: 121–128.
- Hardman-Mountford, N.J., J.I. Allen, M.T. Frost, S.J. Hawkins, M.A. Kendall, N. Meiszkowska, K.A. Richardson and P.J. Sommerfield (2005). Diagnostic monitoring of a changing environment: an alternative U.K. perspective. *Marine Pollution Bulletin*, 50: 1463 – 1471.
- Hearn, C. J. (2008). *The dynamics of coastal models*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 488 pp.
- Hemmings, J.C.P., M.A. Srokosz, P. Challenor and M.J.R. Fasham (2004). Split-domain calibration of an ecosystem model using satellite ocean colour data. *Journal of Marine Systems*, 50 (3-4), 141-179.
- Hjøllo, S. S., M. D. Skogen and Svendsen (2009). Exploring currents and heat within the North Sea using a numerical model. *Journal of Marine Systems* 78(1): 180 – 192.
- Hoch, T. and P. Garreau (1998). Phytoplankton dynamics in the English Channel: a simplified three-dimensional approach. *Journal of Marine Systems*, 16: 133-150.
- Hofmann, E.E. (1988). Plankton dynamics on the outer southeastern U.S. continental shelf. Part III. A coupled physical-biological model. *Journal of Marine Research*, 6(4): 919-956.
- Hofmann, E.E. and J. W. Ambler (1988). Plankton dynamics on the outer southeastern U.S. continental shelf. Part II. A time-dependent biological model. *Journal of Marine Research*, 46(4): 883-917.
- Hofmann, E. E., and C. M. Lascara (1998). Overview of interdisciplinary modeling for marine ecosystems. In K. H. Brink, & A. R. Robinson (Eds.), *The Sea. The global coastal ocean*. New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 507–540.
- Holt, M. (2004). *Coastal Ocean forecast modelling at the Met Office*. Παρουσίαση Powerpoint, ανακτήθηκε από <http://research.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/mosac/ppt-2004-7.pdf>
- Holt, J.T., J.I. Allen, R. Proctor and F. Gilbert (2005). Error quantification of a high-resolution coupled hydrodynamic – ecosystem coastal-ocean model: Part 1. Model overview and assessment of the hydrodynamics. *Journal of Marine Systems*, 57: 167-188.
- Hood R.R., N.R. Bates, D.G. Capone and D.B. Olson (2001). Modeling the effect of nitrogen fixation on carbon and nitrogen fluxes at BATS. *Deep-Sea Res II* 48:1609–1648.
- Hoop, B. J. de, P. M, J. Herman, H. Scholten and K. Soetaert (1992). *SENECA 1.5. A simulation environment for ecological applications*. User manual. Netherlands Institute of Ecology, Centre for Estuarine and Coastal Ecology, Yerseke.
- Huang, C. J., F. Qiao, Z. Song, and T. Ezer (2011). Improving simulations of the upper ocean by inclusion of surface waves in the Mellor - Yamada turbulence scheme, *J. Geophys. Res.*, 116, C01007, doi:10.1029/2010JC006320.
- Huisman, J. and B.P. Sommerijer (2002). Population dynamics of sinking phytoplankton in stratified waters. REPORT MAS-R0204, National Research Institute for Mathematics and Computer Science CWI, Amsterdam, 27 pp.
- Hurtt, G.C., Armstrong, R.A., 1996. A pelagic ecosystem model calibrated with BATS data. *Deep-Sea Research II*, 43, 653-683.



- Hurtt, G.C., Armstrong, R.A., 1999. A pelagic ecosystem model calibrated with BATS and OWSI data. *Deep-Sea Research I*, 46, 27-61.
- Huthnance, J.M., J.I. Allen, A.M. Davies, D.J. Hydes, I.D. James, J.I. Jones, G.E. Millward, D. Prandle, R. Proctor, D.A. Purdie, P.J. Statham, P.B. Tett, S.Thomson and R.G. Wood (1993). Towards water quality models. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 343*: 569-584.
- Ianson D. and S.E. Allen (2002). A two-dimensional nitrogen and carbon flux model in a coastal upwelling region. *Global Biogeochem Cycles* 16: Art. no. 1011.
- Ignatiades L. (2005). Scaling of the trophic status of the Aegean Sea, eastern Mediterranean. *Journal of Sea Research*, 54: 51-57.
- Jakeman, A.J., R.A. Letcher and J.P. Norton (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21:602 – 614.
- James, I.D. (2002). Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review. *Environmental Modelling and Software*, 17: 363 – 385.
- Jorgensen, S.E. (1999). State-of-the-art of ecological modelling with emphasis on development of structural dynamic models. *Ecological Modelling*, 120: 75 – 96.
- Karydis, M. (1993). *Monitoring of the water quality along the coastal area of Rhodes and Mytilene*, MED POL Project. End of the year report. Department of Environmental Studies, University of the Aegean.
- Katsoyiannis, A. and C. Samara (2007). Ecotoxicological evaluation of the wastewater treatment processe of the sewage treatment plant of Thessaloniki, Greece. *Journal of Hazardous Materials*,141: 614 – 621.
- Kawamiya, M. and A. Oschlies (2003). An eddy-permitting, coupled ecosystem-circulation model of the Arabian Sea: comparison with observations. *Journal of Marine Systems*, 38: 221– 257
- Kämpf, J. (2010). *Advanced Ocean Modelling. Using open-source software*. Springer-Verlag, pp. 181.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Kishi, M. J. and S. Ikeda (1986). Population dynamics of "red tide" organisms in eutrophicated coastal waters—numerical experiment of phytoplankton bloom in the East Seto Inland Sea. *Ecological Modelling*, 31: 145–174.
- Knauss, J.A. (1997). *Introduction to Physical Oceanography*. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice-Hall, Inc, pp309.
- Kolovoyiannis, V. and G. Tsirtsis (2005). Implementation of a high resolution, 3 dimensional hydrodynamic model to a shallow, semi-enclosed water body, gulf of Gera, Lesvos. *Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, 791-797.
- Korres, G., Triantafyllou, G., Petihakis, G., Raitzos, D.E., Hoteit, I., Pollani, A., Colella, S., Tsiaras. K. (2012). A data assimilation tool for the Pagasitikos Gulf ecosystem dynamics: Methods and benefits. *Journal of Marine Systems*, 94: 102–117.
- Kourafalou, V.H., L.-Y. Oey, J.D. Wang and T.N. Lee (1996). The fate of river discharge on the continental shelf. Part I: modeling the river plume and the inner-shelf coastal current. *J. Geophys. Res*, 101(C2), 3415-3434.

- Kourafalou, V.H., Y.G. Savvidis, Y.N. Krestenitis and C.G. Koutitas (2004). Modelling studies on the processes that influence matter transfer on the Gulf of Thermaikos. *Continental Shelf Research*, 24: 203-222
- Kullenberg, G. (1982). *Pollutant Transfer and Transport in the Sea, Vol 1*, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp 227.
- Ladakis, M., Skoullou, M., Dassenakis, M. (2003). Water quality in a mediterranean marine protected area (North Sporades islands, Greece). *Chemistry and Ecology*, Vol. 19(1), pp. 47-57.
- Lalli C. M. and T. R. Parsons (1997). *Biological oceanography, an introduction*. The Open University, 2<sup>nd</sup> edition. Thomson Litho Ltd, Scotland, pp 314.
- Lam, D.C.L., C.R. Murthy and R.B. Simpson (1984). *Effluent Transport and diffusion Models for the Coastal Zone*. Lectures on Coastal and Estuarine Studies, Springer-Verlag, pp167.
- Lascaratos, A. and K. Nittis (1998). A high-resolution three-dimensional numerical study of intermediate water formation in the Levantine Sea. *Journal of Geophysical Research*, 103(C9): 18497-18511.
- Lee, S.H. and J.A. Fuhrman (1987). Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.* 53, 1298-1303.
- Lenhart, H.J., Radach, G., Backhaus, J.O., Pohlmann, T. (1995). Simulations of the North Sea circulation, its variability and its implementation as hydrodynamical forcing in ERSEM. *Netherlands J. Sea Research*, 33: 271-299.
- Lenhart, H.J., Pohlmann, T. (1997). The ICES box approach in relation to results of a North Sea circulation model. *Tellus (49A)*: 139-160.
- Lenhart, H.J., G. Radach and P. Ruardij (1997). The effects of river input on the ecosystem dynamics in the continental coastal zone of the North Sea using ERSEM. *Journal of Sea Research*, 38: 249 – 274.
- Le Pape O. and A. Menesguen (1997). Hydrodynamic prevention of eutrophication in the Bay of Brest (France), a modeling approach. *Journal of Marine Systems*, 12:171–186
- Le Quéré, C., Harrison, S.P., Prentice, I.C., et al. (2005). Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Global Change Biol.* 11: 2016–2040.
- Le Quéré, C. (2006). Reply to Horizons Article 'Plankton functional type modelling: running before we can walk? Anderson (2005): I. Abrupt changes in marine ecosystems? *Journal of Plankton Research* 28(9): 871 – 872.
- Li, C. and Weeks, E. (2009). Measurements of a small scale eddy at a tidal inlet using an unmanned automated boat. *Journal of Marine Systems*, 75: 150–162.
- Liddicoat, M.T., S. Tibbits, and E.T. Butler (1974). The determination of ammonia in seawater. *Limnology and Oceanography* 20: 131-132.
- Loehle, C. (1987). Errors in construction, evaluation and inference: a classification of sources of error in ecological models. *Ecological Modelling*, 36: 297 – 314.
- Longhurst, A.R. (2006). *Ecological Geography of the Sea*, 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press.
- Luyten, P.J, J.E. Jones, R. Proctor, A. Tabor, P.Tett and K. Wild-Allen (1999). *COHERENS, a coupled hydrodynamical-ecological model for regional and shelf seas*. User Documentation, Release 8.4, EU Marine Science and Technology Programme, September 1999.

- Lynch D.R. and A.M. Davies (1995). *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*. Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, American Geophysical Union, Washington D.C., 510pp.
- Macías, D., P.J.S. Franks, M.D. Ohmana, and M.R. Landry (2012). Modeling the effects of coastal wind- and wind–stress curl-driven upwellings on plankton dynamics in the Southern California current system. *Journal of Marine Systems*, 94: 107–119.
- Magaldi, M.G., Ozgokmen, T.M., Griffa, A., Chassignet, E.P., Iskandarani, M., Peters, H. (2008). Turbulent flow regimes behind a coastal cape in a stratified and rotating environment. *Ocean Modelling*, 25: 65 – 82.
- Malačič, V., B. Petelin and M. Vodopivec (2012). Topographic control of wind-driven circulation in the northern Adriatic. *J. Geophys. Res.*, 117, C06032, doi:10.1029/2012JC008063.
- Mann, K.H. and J.R.N. Lazier (1996). *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Oceans*. 2<sup>nd</sup> Edition. Blackwell Science, pp394.
- Matear, R.J., 1995. Parameter optimization and analysis of ecosystem models using simulated annealing: a case study at Station P. *Journal of Marine Research*, 53, 571-607.
- Mathews, John H. (1992). *Numerical Methods for Mathematics, Science and Engineering*. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice-Hall International Editions, pp646.
- Mayer, D.G. and D.G. Butler (1993). Statistical validation. *Ecological Modelling*, 68: 21 – 32.
- McGillicuddy, D.J., McCarthy, J.J. and Robinson, A.R. (1995a). Coupled physical and biological modeling of the spring bloom in the North Atlantic (I): Model formulation and one dimensional bloom processes. *Deep-Sea Research*, 42(8): 1313-1357.
- McGillicuddy, D.J., Robinson, A.R. and McCarthy, J.J. (1995b). Coupled physical and biological modeling of the spring bloom in the North Atlantic (II): Three dimensional bloom and post-bloom processes. *Deep-Sea Research*, 42(8): 1359-1398.
- MEECE (2013). *Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment*, ανακτήθηκε 28 Αυγ 2013, από <http://www.meece.eu/>
- Mellor, G.L and T. Yamada (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 20, 851-875.
- Mellor, G.L., Ezer, T., Oey, L.-Y. (1994). The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models. *J. Atmos. Ocean Tech.* 11, 1126–1134.
- Mellor, G.L., Oey, L.-Y., Ezer, T. (1998). Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem. *J. Atmos. Ocean Tech.* 15, 1122–1131.
- Mellor, G.L. (1996). *A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Users guide, Princeton University, Princeton.
- Mellor, G.L. (2001). One-Dimensional, Ocean Surface Layer Modeling: A problem and a Solution. *J. Phys. Oceanogr.*, 31: 790 – 809.
- Mellor, G., and A. Blumberg (2004). Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 693–698, doi:10.1175/2517.1.
- Mellor, G. L., M. A. Donelan, L –Y. Oey (2008). A Surface Wave Model for Coupling with Numerical Ocean Circulation Models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25: 1785 – 1806.

- Moll, A. (1997c). Phosphate and plankton dynamics during a drift experiment in the German Bight: simulation of phosphorus-related plankton production. *Marine Ecology-Progress Series*, 156: 289-297.
- Moll, A. (1998). Regional distribution of primary production in the North Sea simulated by a three-dimensional model. *Journal of Marine Systems*, 16: 151 – 170.
- Moll, A. (2000). Assessment of three-dimensional physical-biological ECOHAM1 simulations by quantified validation for the North Sea with ICES and ERSEM data. *ICES Journal of Marine Science*, 57(4): 1060-1068.
- Moll, A. and G. Radach (2001). *Review of three-dimensional ecological modeling related to the North Sea shelf system*. Synthesis and New Conception of North Sea Research. Zentrum fur Meeres und Klimaforschung (in English), pp 225.
- Moll, A. and G. Radach (2003). Review of three-dimensional ecological modelling related to the North Sea shelf system Part 1: models and their results. *Progress in Oceanography*, 57: 175–217.
- Moloney, C. L., J. G. Field, M.I. Lucas (1991). The sized-based dynamics of plankton food webs. 2. Simulations of three contrasting southern Benguela food webs. *Journal of Plankton Research*, 13(5): 1039-1092.
- Moon, Il -Ju (2005). Impact of a coupled ocean wave–tide–circulation system on coastal modelling. *Ocean Modelling*, 8: 203 – 236.
- Moore J.K., S.C. Doney, J.A. Kleypas, D.M. Glover, and I.Y. Fung (2002). An intermediate complexity marine ecosystem model for the global domain. *Deep-Sea Res II* 49:403–462.
- Moore, K.J., Doney, S.C., Lindsay, K. (2004). Upper ocean ecosystem dynamics and iron cycling in a global three-dimensional model. *Global Biogeochem. Cycles* 18, 4028. doi:10.1029/2004GB002220.
- Neveux J. and M. Panouse (1987). Spectrofluorometric determination of chlorophylls and pheophytins. *Arch. Hydrobiol.*, 104(4)
- Neumann, T. (2010). Climate-change effects on the Baltic Sea ecosystem: A model study. *Journal of Marine Systems* 81: 213–224.
- Nihoul, J.C.J and B.M. Jamart (1987). *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, Vol. 45, 624pp.
- Nihoul, J.C.J., P. Adam, P. Brasseur, E. Deleersnijder, S. Djenidi and J. Haus, (1990). Three-dimensional general circulation model of the northern Bering Sea's summer ecohydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 13(5/6): 509-542.
- Nihoul, J.C.J. (1998). Optimum complexity in ecohydrodynamic modeling: an ecosystem dynamics standpoint. *Journal of Marine Systems*, 16: 3-5.
- Nihoul, J.C.J. (1999). Seasonal variability of general circulation fields in the Western Mediterranean. Precis of the GHER mathematical visualization scheme. *Journal of Marine Systems*, 20: 415-421.
- Nittis, K., V. Zervakis, L. Perivoliotis, A. Papadoroulos and G. Chronis, (2001). Operational monitoring and forecasting in the Aegean Sea: System limitations and forecasting skill evaluation. *Marine Pollution Bulletin*, 43: 154-163.
- Nittis, K., L. Perivoliotis, G. Korres, C. Tziavos, I. Thanos (2006). Operational monitoring and forecasting for marine environmental applications in the Aegean Sea. *Environmental Modelling and Software*, 21: 243-257.

- Numerical Ocean Modeling (2013), ανακτήθηκε από Navy Operational Ocean Circulation and Tide Models, Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, <http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/>
- Ocean Models (2013), ανακτήθηκε από Oak Ridge National Laboratory, Physics Division, US Department of Energy, <http://www.phy.ornl.gov/csep/CSEP/OM/OM.html>
- Oey, L-Y and P.Chen (1992). A model simulation of circulation in the Northeast Atlantic Shelves and Seas. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, C12, 20,087-20,115.
- Oguz, T., H. W. Ducklow, P. Malanotte-Rizzoli, J. W. Murray, E.A. Shushkina, V.I. Vedernikov and U. Unluata (1999). A physical-biochemical model of plankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea. *Deep-Sea Research I*, 46: 597-636.
- O'Neill, R.V. and R.H. Gardner (1979). Sources of uncertainty in ecological models. In: *Methodology in system modelling and simulation*. Ed: B.P. Zeigler, M.S. Elzas, G.J. Clit and T.I. Oren, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 447-463.
- Oregon State University (2013), ανακτήθηκε από <http://www-po.coas.oregonstate.edu/ocean/>
- Oreskes, N., K. Shrader-Frechette and K. Belitz (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147): 641-646.
- OSPAR Commission (2008). *Overview of the state-of-the-art of models and their use in OSPAR predictive eutrophication assessments*. Eutrophication Series, pp14.
- Parsons T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli (1984). *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press.
- Pastres, R. and Solidoro, C., (2012). Monitoring and modeling for investigating driver/pressure state/impact relationships in coastal ecosystems: Examples from the Lagoon of Venice. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96: 22-30.
- Pavlidou A., Psyllidou-Giouranovits R. and Sylaios G.K. (2005) Nutrients and dissolved oxygen in Hellenic coastal waters, in *State of the Hellenic Marine Environment*, Papathanassiou, E. and Zenetos, A. (Eds.), HCMR Publ., 360 pp.
- Petihakis G., K. Tsiaras, G. Triantafyllou, G. Korres, T.M. Tsagaraki, M. Tsapakis, P. Vavillis, A. Pollani, C. Frangoulis (2012). Application of a complex ecosystem model to evaluate effects of finfish culture in Pagasitikos Gulf, Greece. *Journal of Marine Systems*, 94: 65-77.
- Petrenko, A., Lereddea, Y., Marsaleix, P., 2005. Circulation in a stratified and wind-forced Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea: in situ and modeling data. *Continental Shelf Research* 25, 7-27.
- Pinardi N. and G. Coppini (2010). Operational oceanography in the Mediterranean Sea: the second stage of development. *Ocean Science*, 6: 263-267.
- Pinazo, C., P. Marsaleix, B. Millet, C. Estournel, and R. Vehil (1996). Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass in upwelling areas of the northwestern Mediterranean: a coupled physical and biogeochemical approach. *Journal of Marine Systems*, 7: 161-191.
- Pingree, R.D. (1978). The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the seas. *J. Mar. Biol. Ass.*, 58: 211-226.

- Pohlmann, T. (1996a). Predicting the thermocline in a circulation model of the North Sea. Part 1: Model description, calibration and verification. *Continental Shelf Research*, 16: 131-146.
- Pohlmann, T. (1996b). Calculating the annual cycle of the vertical eddy viscosity in the North Sea with a three dimensional, baroclinic, shelf sea circulation model. *Continental Shelf Research*, 16: 147-161.
- Pohlmann, T. (1996c). Calculating the development of the thermal vertical stratification in the North Sea with a three dimensional, baroclinic, circulation model. *Continental Shelf Research*, 16: 162-194.
- Pond, S. and G.L. Pickard (1983). *Introductory Dynamical Oceanography*. 2<sup>nd</sup> Edition. Butterworth-Heinemann, pp329.
- Popova, E.E. and T.R Anderson (2002). Impact of including dissolved organic matter in a global ocean box model on simulated distributions and fluxes of carbon and nitrogen. *Geophysics Research Letters* 29(12)
- Power, M. (1993). The predictive validation of ecological and environmental models. *Ecological Modelling*, 68: 33 – 50.
- Prandle D., H. Los, T. Pohlmann, Y.-H. de Roeck, T. Stipa (eds) (2005). *Modelling in Coastal and Shelf Seas – European Challenges*. ESF Marine Board Position Paper 7, European Scientific Foundation, pp29.
- Pritchard, T., Holden, C., Lee, R., Black, K., Healy, T. (2007). Dynamics and dispersion in the coastal boundary layer off Coffs Harbour in Eastern Australia. *Journal of Coastal Research*, 50: 848-857.
- Prokopkin, I. G., W. M. Mooij, J. H. Janse and A. G. Degermendzhy (2010). A general one-dimensional vertical ecosystem model of Lake Shira (Russia, Khakasia): description, parametrization and analysis. *Aquat Ecol.*, 44: 585 – 618, DOI 10.1007/s10452-010-9326-8.
- Pugh, D. T. (1996). *Tides, surges and mean-sea level. A handbook for engineers and scientists*. John Wiley and Sons, p472.
- Qiao, F., Y. Yuan, T. Ezer, C. Xia, Y. Yang, X. Lü, and Z. Song (2010). A three - dimensional surface wave - ocean circulation coupled model and its initial testing, *Ocean Dyn.*, 60, 1339–1355, doi:10.1007/s10236-010-0326-y.
- Radach, G. and A. Moll (1993). Estimation of the variability of production by simulating annual cycles of phytoplankton in the central North Sea. *Progress in Oceanography*, 31(4): 339-419.
- Radach, G. and J. Patsch (1997). Climatological annual cycles of nutrients and chlorophyll in the North Sea. *Journal of Sea Research*, 38: 231 – 248.
- Radford, P.J. and P. Ruardij (1987). The validation of ecosystem models of turbid estuaries. *Continental Shelf Research*, 7(11/12): 1483-1487.
- Rajar, R., and M. Cetina, (1997a). Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological Modelling*, 101: 195-207.
- Rajar, R., and M. Cetina, (1997b). Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. *Ecological Modelling*, 101: 209-228.
- Redfield, A. C., B. A. Ketchum and F. A. Richards, (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water. In *The Sea, Vol II*, ed. M. N. Hill, Wiley, London.
- Ribes, M., R. Coma, J-M. Gili (1999). Seasonal variation of particular organic carbon, dissolved organic carbon and the contribution of microbial communities to the

- live particular organic carbon in a shallow near-bottom ecosystem at the North-western Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research*, 21(6): 1077–1100.
- Riley, G. A. (1946). Factors controlling phytoplankton populations on Georges Bank. *Journal of Marine Research*, 6: 54-73.
- Riley, G. A. (1947). A theoretical analysis of the zooplankton population of Georges Bank. *Journal of Marine Research*, 7(2): 104-113.
- Robertson, R. (2006). Modeling internal tides over Fieberling Guyot: resolution, parameterization, performance. Ocean Dynamics, DOI 10.1007/s10236-006-0062-5.
- Robinson, A.R., J.J. McCarthy and B.J. Rothschild (1999). Interdisciplinary ocean science is evolving and a systems approach is essential. *Journal of Marine Systems*, 22: 231 – 239.
- Roughan, M., Mace, A. J., Largier, J. L., Morgan, S. G., Fisher, J. L., Carter, M. L. (2005). Subsurface recirculation and larval retention in the lee of a small headland: A variation on the upwelling shadow theme, *J. Geophys. Res.* 110, C10027, doi:10.1029/2005JC002898
- Ruardij, P., J.W. Baretta and J.G. Baretta-Bekker (1995). SESAME, a software environment for simulation and analysis of marine ecosystems. *Netherlands J. Sea Research*, 33(3/4): 261-270.
- Ruardij, P., H. Van Haren and H. Ridderinkhof (1997). The impact of thermal stratification on phytoplankton and nutrient dynamics in shelf seas: a model study. *Journal of Sea Research*, 38: 311 – 331.
- Rykiel, E. J. Jr. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90: 229 – 244.
- Salacinska, K, G.Y. El Serafy, F.J. Los and A. Blauw (2010). Sensitivity analysis of the two dimensional application of the Generic Ecological Model (GEM) to algal bloom prediction in the North Sea. *Ecological Modelling*, 221: 178 – 190.
- Saltelli, A., S. Tarantolla, F. Campolongo and M. Ratto (2004). *Sensitivity Analysis in Practice. A guide to assessing Scientific Models*. Publ., John Wiley & Sons, Ltd, England, pp219.
- Sarmiento, J. L., Slater, R. D., Fasham, M. J. R. et al. (1993). A seasonal three-dimensional ecosystem model of nitrogen cycling in the North Atlantic euphotic zone. *Global Biogeochem. Cycles*, 7: 417–450.
- Saunders, P. M., A. C. Coward, and B. A. de Cuevas (1999), Circulation of the Pacific Ocean seen in a global ocean model: Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling project (OCCAM), *J. Geophys. Res.*, 104(C8), 18,281–18,299, doi:10.1029/1999JC900091.
- Savvidis, Y.G., Patoucheas, D.P., Nikolaidis, G., Koutitas, C.G., (2011). Modelling the dispersion of Harmful Algal Bloom (HAB) in the Thermaikos Gulf (NW Aegean Sea). *Global NEST Journal*, 13(2): 119-129.
- Scavia, D., W.F. Powers, R.P. Canale and J.L. Moody (1981). Comparison of first order error analysis and Monte Carlo simulation in time-dependent eutrophication models. *Water Resour. Res.*, 17(4): 1051 – 1069.
- Schartau M., A. Oschlies, J. Willebrand (2001). Parameter estimates of a zero-dimensional ecosystem model applying the adjoint method. *Deep-Sea Research II*, 48, 1769-1800.

- Schartau, M. and A. Oschlies (2003). Simultaneous data-based optimization of a 1D-ecosystem model at three locations in the North Atlantic: part II – Standing stocks and nitrogen fluxes, *J. Marine Research*, 61: 795– 821.
- Schlitzer, R. (2009). *Ocean Data View*, ανακτήθηκε από <http://odv.awi.de>
- Sharada, M.K., K.S. Yajnik and P.S. Swathi (2005). Evaluation of six relations of the kinetics of uptake by phytoplankton in multi-nutrient environment using JGOFS experimental results. *Deep-Sea Research II*, 52: 1892–1909
- Sharples, J. (1999). Investigating the seasonal vertical structure of phytoplankton in shelf seas. *Marine Models*, 1: 3 – 38.
- Shigemitsu, M., T. Okunishi, J. Nishioka, H. Sumata, T. Hashioka, M. N. Aita, S. L. Smith, N. Yoshie, N. Okada, and Y. Yamanaka (2012). Development of a one-dimensional ecosystem model including the iron cycle applied to the Oyashio region, western subarctic Pacific, *J. Geophys. Res.*, 117, C06021, doi:10.1029/2011JC007689
- Siddorn J.R., J. I. Allen, J. C. Blackford, F. J. Gilbert, J. T. Holt, M.W. Holt, J. P. Osborne, R. Proctor, D.K. Mills (2007). Modelling the hydrodynamics and ecosystem of the North-West European continental shelf for operational oceanography. *Journal of Marine Systems* 65: 417–429
- Signell, R.P, H.L. Jenter and A.F. Blumberg (2000). Predicting the physical effects of relocating Boston’s sewage outfall. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50: 59-72.
- Six, K. D. and Maier-Reimer, E. (1996). Effects of plankton dynamics on seasonal carbon fluxes in an ocean general circulation model. *Global Biogeochem. Cycles*, 10: 559–583.
- Skliris, N., S. Sofianos and A. Lascaratos (2007). Hydrological changes in the Mediterranean Sea in relation to changes in the freshwater budget: A numerical modelling study. *Journal of Marine Systems*, 65: 400–416
- Skogen, M.D., E. Svendsen, J. Berntsen, D. Aksnes, K.B. Ulvestad (1995). Modelling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional physical-chemical-biological ocean model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41(5): 545-565.
- Skogen, M.D and A. Moll (2000). Interannual variability of the North Sea primary production: comparison of two model studies. *Continental Shelf Research* 20: 129 – 151.
- Soiland, H. and M.D. Skogen (2000). Validation of a three-dimensional biophysical model using nutrient observations in the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 57(4): 816-823.
- Spitz, Y.H., J.R. Moisan, M.R. Abbott (2001). Configuring an ecosystem model using data from the Bermuda Atlantic Time Series (BATS). *Deep-Sea Research II*, 48, 1733-1768.
- ST John, M.A. and Pond, S. (1992). Tidal plume generation around a promontory: effects on nutrient concentrations and primary productivity. *Continental Shelf Research*, 12(2/3): 339–354.
- Steele, J.H. (1962). Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology and Oceanography*, 7(2): 137-150.
- Steele, J. H. (1974). *The Structure of Marine Ecosystems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.



- Steele, J.H. and Mullin, M.M. (1977). Zooplankton Dynamics. In: E.D. Goldberg, I.N. McCave, J.J. O'Brien and J.H. Steele (Editors), *The Sea, Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. J. Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp. 857-890.
- Stewart, R. H. (2004). *Introduction to Physical Oceanography*. Ανακτήθηκε από [http://oceanworld.tamu.edu/home/course\\_book.htm](http://oceanworld.tamu.edu/home/course_book.htm)
- Stow, C. A, J. Jolliff, D. J. McGillicuddy Jr., S.C. Doney, J. I. Allen, M.A.M. Friedrichs, K. A. Rose and P. Wallhead (2009). Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems. *Journal of Marine Systems*, 76: 4–15.
- Taylor, A.H. and I. Joint (1990). A steady-state analysis of the microbial loop in stratified systems. *Marine Ecology Progress Series*, 59: 1 – 17.
- Tchobanoglous, G., F.L. Burton and H.D. Stencel (2006). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Metcalf & Eddy, Inc., 4th edition.
- Tett, P.B. and A. Walne (1995). Observations and simulations of hydrography, nutrients and plankton in the southern North Sea. *Ophelia*, 42: 371-416.
- The Princeton Ocean Model (2013), ανακτήθηκε από <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/Forecasting.htm>, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>
- Tomczak, M. (2001), *Shelf and Coastal Oceanography*, ανακτήθηκε από <http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/ShelfCoast/index.html>
- Triantafyllou G., G. Petihakis, D. Costas and A. Theodorou (2001). Assessing marine ecosystem response to nutrients inputs. *Marine Pollution Bulletin*, 43: 175 – 186.
- Triantafyllou G., I. Hoteit and G. Petihakis (2003). A singular evolutive interpolated Kalman filter for efficient data assimilation in a 3-D complex physical-biogeochemical model of the Cretan Sea. *Journal of Marine Systems*, 40-41: 213 - 231.
- Tsirsis, G.E. (1995). A simulation model for the description of a eutrophic system with emphasis on the microbial processes. *Water Science and Technology*, 32(9-10): 189 – 196.
- Tusseau-Vuillemin, M., L. Mortier and C. Herbaut, (1998). Modeling nitrate fluxes in an open coastal environment (Gulf of Lions): Transport versus biogeochemical processes. *Journal of Geophysical Research*, 103(C4): 7693-7708.
- University Corporation for Atmospheric Research (2013), ανακτήθηκε από <http://www2.ucar.edu/climate/faq/aren-t-computer-models-used-predict-climate-really-simplistic>
- van de Kramer, J.P.G. (1983). Monte Carlo simulation and first order error analysis: two possible methods to cope with uncertainties in water quality modelling. *IIASA, WP*, 83-89.
- van den Berg, A.J., H. Ridderinkhof, R. Riegman, P. Ruardij and H. Lenhart (1996). Influence of variability in water transport on phytoplankton biomass and composition in the southern North Sea: a modeling approach (FYFY). *Continental Shelf Research*, 16(7): 907-931.
- Vested H.J., J.W. Baretta, L.C. Ekebjærg and A. Labrosse (1996). Coupling of hydro dynamical transport and ecological models for 2D horizontal flow. *Journal of Marine Systems*, 8: 255 - 267.

- Vichi, M. (2009). Assessment of Ocean Biogeochemical Models, 01 – Theory. *Lecture Notes (in English)*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici.
- Vila-Reixach G, Gasol JM, Cardelús C, Vidal M (2012). Seasonal dynamics and net production of dissolved organic carbon in an oligotrophic coastal environment. *Mar Ecol Prog Ser*, 456: 7-19
- Visual Solutions, Inc (2010). VisSim/OptimizePRO, User's Guide, version 8.0, p38.
- Vollenweider, R. A., A. Rinaldi and G. Montanari, (1992). Eutrophication, structure and dynamics of a marine coastal system: results of a ten-year monitoring along the Emilia-Romagna coast (Northwest Adriatic Coast). In *Marine Coastal Eutrophication*, (eds) R. A. Vollenweider, R. Marchetti and R. Viviani, Elsevier Science Publications.
- Walsh, J. J. (1975). A spatial simulation model of the Peru upwelling ecosystem. *Deep-Sea Research*, 22: 201-236.
- Walsh, J. J., D. A. Dieterle and M. B. Meyers (1988). A simulation analysis of the fate of phytoplankton within the Mid-Atlantic Bight. *Continental Shelf Research*, 8(5-7): 757–787.
- Walters, C. (1986). *Adaptive management of renewable resources*. MacMillan Publ. Co., New York.
- Warner, S.J. and P. MacCready (2009). Dissecting the pressure field in a tidal flow past a headland: when is the form drag 'real'? *Journal of Physical Oceanography*, 39: 2971-2984.
- Webb, D.J., B. A. de Cuevas and A. C. Coward (1998). *The first main run of the OCCAM Global Ocean Model*. Southampton Oceanography Center, Internal document no 34., pp43, [ftp://ftp.soc.soton.ac.uk/pub/occam/papers/occam\\_tech1.pdf](ftp://ftp.soc.soton.ac.uk/pub/occam/papers/occam_tech1.pdf)
- Wei, H, J. Sun, A. Moll and L. Zhao (2004). Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea – observations and modelling. *Journal of Marine Systems*, 44: 233 – 251.
- Wijesekera, H. W., J. S. Allen, and P. A. Newberger (2003). Modeling study of turbulent mixing over the continental shelf: Comparison of turbulent closure schemes, *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3103, doi:10.1029/2001JC001234
- Wild-Allen, K., M. Herzfeld, P.A. Thompson, U. Rosebrock, J. Parslow and J. K. Volkman (2010). Applied coastal biogeochemical modelling to quantify the environmental impact of fish farm nutrients and inform managers, *Journal of Marine Systems*, 81(1-2): 134 – 147.
- Wroblewski, J.S. (1977). A model of phytoplankton plume formation during variable Oregon upwelling. *Journal of Marine Research*, 35(2): 357-394.
- Zavatarelli, M. and G. Mellor (1995). A numerical study of the Mediterranean Sea circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 25: 1384-1414.
- Zavatarelli, M., J.W. Baretta, J.G. Baretta-Bekker and N. Pinardi (2000). The dynamics of the Adriatic Sea ecosystem. An idealized model study. *Deep-Sea Research I*, 47: 937 – 970.
- Zhang, X.-Y. and E.E. Adams (1999). Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(3): 233-241.
- Zhang, H., S. A. Sannasiraj and Eng Soon Chan (2009). Wind Wave Effects on Hydrodynamic Modeling of Ocean Circulation in the South China Sea. *The Open Civil Engineering Journal*, 3: 48 – 61.

Zhao, Q. and X. Lu (2008). Parameter estimation in a three-dimensional marine ecosystem model using the adjoint technique. *Journal of Marine Systems*, 74(1-2): 443-452.

### **B. Ελληνόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές**

- Αρχοντίσης, Γ. (1998). *Ποσοτική εκτίμηση της επίδραση μη-σημειακών πηγών ρύπανσης στον θαλάσσιο ευτροφισμό*. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.
- Ευστρατιάδης, Α και Δ. Κουτσογιάννης (2007). *Μη-γραμμικές μέθοδοι βελτιστοποίησης – Εξελικτικοί και γενετικοί αλγόριθμοι*. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος 'Βελτιστοποίηση Συστημάτων υδατικών Πόρων', Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καλογεροπούλου, Α., Μ. Γκίκας, Δ. Καραγιαννάκης και Μ. Λάμπρου. *Αγγλοελληνικό Λεξικό Μαθηματικών Όρων*. Εκδόσεις Τροχαλία.
- Κίτσιου, Δ. (1997). *Αξιολόγηση μεθόδων χωρικής ανάλυσης για την ποσοτική εκτίμηση του θαλάσσιου ευτροφισμού*. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.
- Μαχαίρας Α.Γ (1995). *Μελέτη έργων επεξεργασίας και διάθεσης λυμάτων Δήμου Μυτιλήνης*, Αθήνα
- Nybakken, J.W. (2005). *Θαλάσσια βιολογία, μια οικολογική προσέγγιση*. Εκδόσεις ΙΩΝ, σσ519. Ελληνική έκδοση, αρχικός τίτλος: Marine Biology, an ecological approach, Addison Wesley Longmann.
- Σιγαλός Γ. και Τσιακίρη Ο. (1993). *Μελέτη ποιότητας των λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης*. Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.
- Τσιρτσής, Γ. (1994). *Δυναμική εύτροφων συστημάτων*. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη.
- Υδρογραφική Υπηρεσία (1991). *Στοιχεία Παλίρροιας Ελληνικών Λιμένων*. Δ' Έκδοση, Αθήνα.
- Φερεντίνος, Γ., Ι. Ζαχαριάς και Ν. Κάστανος (1994). *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ωκεανογραφικές διεργασίες οι οποίες ελέγχουν τη διασπορά και μεταφορά των οικιακών και βιομηχανικών αποβλήτων στο θαλάσσιο χώρο*. Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Χύτα, Ε. Σ. (2003). *Εκτίμηση της ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης μετά από δευτεροβάθμια επεξεργασία*. Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη.

**ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ****Σε επιστημονικά περιοδικά**

1. Kolovoyiannis, V. N. and G. E. Tsirtsis (2013). Downscaling the marine modelling effort: Development, application and assessment of a 3D ecosystem model implemented in a small coastal area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 126: 44-60.
2. Nikolaou, A., S. Golfinoopoulos, G. Arhonditsis, V. Kolovoyiannis and T. Lekkas (2004). Modeling the formation of chlorination by-products in river waters with different quality, *Chemosphere*, 55: 409-420.

**Σε επιστημονικά συνέδρια**

1. Κολοβογιάννης, Β. και Γ. Τσιρτσής (2006). Διερεύνηση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας ενός παράκτιου οικοσυστήματος με χρήση τρισδιάστατου αριθμητικού ομοιώματος: Εφαρμογή του POM στο κόλπο Γέρας Λέσβου. 8ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας και Αλιείας, 4-8 Ιουνίου 2006, Θεσσαλονίκη, ΕΛΚΕΘΕ.
2. Kolovoyiannis, V. and G. Tsirtsis (2005). Implementation of a high resolution, 3 dimensional hydrodynamic model to a shallow, semi-enclosed water body, gulf of Gera, Lesvos. *Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, A791-797.
3. Kolovoyiannis, V., G. Arhonditsis and G. Tsirtsis (2003). Development of a coupled 3D hydrodynamic-ecological-terrestrial model and application to a semi-enclosed gulf in the Eastern Mediterranean. In Murray, C.N., J.M. Zaldivar, G. Giordani and P. Viaroli (eds) *Proceedings of the International Conference on Southern European coastal lagoons: The influence of river basin-coastal zone interactions*, 73.
4. Κολοβογιάννης, Β. και Γ. Τσιρτσής (2003). Ανάπτυξη τρισδιάστατου συζευγμένου μοντέλου προσομοίωσης για την μελέτη οικολογικών και υδροδυναμικών διεργασιών σε παράκτια ύδατα: Εφαρμογή και αξιολόγηση σε παράκτια περιοχή του Αιγαίου. 6ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας και Αλιείας, 6-9 Μαΐου 2003, Χερσόνησος Κρήτης, ΕΚΘΕ.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1**

***- Ορολογία***

***- Παράδειγμα υπολογισμού της επιτυχίας προσαρμογής***

## Ορολογία

### Μεταβλητές κατάστασης (state variables).

Το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης. Είναι εκείνες οι ποσότητες ενός οικοσυστήματος που θεωρούνται σημαντικές και στόχος είναι η μελέτη της μεταβολής τους στον χρόνο και το χώρο. Η δυναμική των μεταβλητών κατάστασης περιγράφεται με τη χρήση διαφορικών εξισώσεων, μία διαφορική εξίσωση για κάθε μεταβλητή. Η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης δεν είναι μονοσήμαντη, δεν εξαρτάται από το οικολογικό σύστημα αυτό καθαυτό, αλλά από τον τρόπο που αυτό προσεγγίζεται και από τις επιμέρους διεργασίες που συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον.

### Παραμετροποίηση διεργασιών (parameterization) και παράμετροι.

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις διεργασίες που περιλαμβάνονται σε ένα μοντέλο συνήθως προκύπτουν από πειράματα. Παραμετροποίηση είναι η έκφραση με μαθηματικό τρόπο της σχέσης που συνδέει δυο μεγέθη, από παρατηρήσεις πεδίου, εργαστηριακά πειράματα και στατιστικές αναλύσεις. Η έκφραση αυτή μπορεί να είναι ένας απλός αλγεβρικός τύπος, όπως για παράδειγμα η σχέση (Π1.1) που παραμετροποιεί την επίδραση του ανέμου στην κίνηση του νερού, με τη δημιουργία διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια αέρα-θάλασσας,

$$\tau = \rho_a c_d |w_a| w_x \quad (\text{Π1.1})$$

Η διατμητική τάση λόγω ανέμου  $\tau_a$  συνδέεται με την ταχύτητα του ανέμου  $w_a$  μέσω μιας απλής αλγεβρικής σχέσης. Μπορεί επίσης να είναι μια σύνθετη, μη γραμμική σχέση, όπως η (2.2), που περιγράφει την επίδραση της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας  $I$ , ως περιοριστικού παράγοντα για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού  $\Phi(I)$  (μοντέλο των Taylor and Joint -1990):

$$\Phi(I) = \ln\left\{\left(1 + I / I_k\right) / \left[1 + I \exp(-kz_e) / I_k\right]\right\} / (kz_e) \quad (\text{Π1.2})$$

Όσο καλύτερα περιγράφει τον μηχανισμό που συνδέει δυο μεγέθη, δηλαδή όσο περισσότερη γνώση του φαινομένου υπάρχει, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η παραμετροποίηση μιας διεργασίας. Στις σχέσεις (Π1.1) και (Π1.2), εκτός από τις μεταβλητές άμεσου ενδιαφέροντος, όπως η ένταση ακτινοβολίας  $I$  και ο περιορισμός ανάπτυξης  $\Phi(I)$ , υπάρχουν και άλλα μεγέθη που λέγονται *παράμετροι*, όπως ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας  $k$  και η σταθερά ημικορεσμού για την ένταση της ακτινοβολίας  $I_k$ . Οι τιμές των παραμέτρων είναι κρίσιμες για την επιτυχία μιας προσομοίωσης: λαμβάνονται αρχικά από την βιβλιογραφία αλλά συνήθως επαναπροσδιορίζονται κατά την διαδικασία βαθμονόμησης και είναι συνήθως σταθερές σε μια εφαρμογή του μοντέλου. Οι παράμετροι μπορούν να 'περικλείουν' στις τιμές τους ολόκληρους οικολογικούς μηχανισμούς για τους οποίους δεν υπάρχει γνώση να περιγραφούν αναλυτικά ή ενδιαφέρον, ή στόχος είναι η απλοποίησή τους.

**Μηχανισμοί διέγερσης ή συναρτήσεις φόρτισης (forcing functions, driving forces).**

Ένα μοντέλο αποτελείται αφενός από το πλέγμα των μεταβλητών κατάστασης και των μεταξύ τους διεργασιών και αφετέρου από τους εξωτερικούς μηχανισμούς ή δυνάμεις που διεγείρουν (‘οδηγούν’) το προσομοιωμένο οικοσύστημα. Οι μηχανισμοί διέγερσης είναι κυρίως φυσικοί: η κίνηση του νερού (μεταφορά και τυρβώδης διάχυση), η ηλιακή ακτινοβολία και οι διακυμάνσεις της, η θερμοκρασία του νερού. Μπορεί να είναι και χημικοί, όπως για παράδειγμα η εισροή ανόργανων θρεπτικών ουσιών στο παράκτιο οικοσύστημα από τη στεριά, από σημειακές (ποτάμια, αγωγοί λυμάτων) ή μη σημειακές πηγές. Η σχέση μεταξύ των μηχανισμών διέγερσης και των μεγεθών που μελετά ένα μοντέλο είναι συνήθως μονόδρομη: οι μηχανισμοί διέγερσης είναι ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν τις μεταβλητές κατάστασης χωρίς να επηρεάζονται από αυτές, δηλαδή η εξέλιξή τους είναι ανεξάρτητη της προσομοίωσης. Υπάρχουν ωστόσο περιπτώσεις όπου η σχέση μπορεί να γίνει αμφίδρομη, όπως για παράδειγμα όταν περιορίζεται η διείσδυση του ηλιακού φωτός στη στήλη νερού από μεγάλες συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού (φαινόμενο της φωτοσκίασης).

**Τροφική διακριτική ικανότητα (trophic resolution).**

Ο όρος αυτός αναφέρεται στην πολυπλοκότητα με την οποία το μοντέλο περιγράφει το τροφικό πλέγμα ενός οικοσυστήματος. Μέτρα αυτής της πολυπλοκότητας μπορούν να είναι ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης και ο αριθμός των οικολογικών διεργασιών και μηχανισμών που μοντελοποιούνται. Όσο πιο μεγάλη η τροφική διακριτική ικανότητα, τόσο πιο περίπλοκο το μοντέλο, και θεωρητικά τόσο πιο πιστά περιγράφεται και αναπαράγεται ένα οικοσύστημα.

**Χωρική διακριτική ικανότητα.**

Ο όρος αναφέρεται στις διαστάσεις του χώρου που επιλύει το μοντέλο ή καλύτερα, πως αντιμετωπίζεται ένα οικοσύστημα ως χωρική ενότητα. Υπάρχουν μοντέλα μηδενικών, μίας, δύο και τριών διαστάσεων (0-, 1-, 2- και 3-D). Επίσης, η περιοχή μελέτης μπορεί να χωριστεί σε έναν αριθμό υπο-περιοχών με κοινά οικολογικά χαρακτηριστικά (box models, π.χ. Lenhart et al. 1995, Arhonditsis et al. 2000), ενώ το ίδιο μπορεί να γίνει και για τη στήλη νερού (μοντέλα στρωμάτων - layer models).

### Παράδειγμα υπολογισμού της επιτυχίας προσαρμογής

Σύμφωνα με την μέθοδο των Hoop *et al.* (1992), η εκτίμηση της προσαρμογής γίνεται κατ' αρχήν για την κάθε μεταβλητή κατάσταση χωριστά και κατόπιν εκτιμάται η προσαρμογή του μοντέλου συνολικά. Για τον υπολογισμό της προσαρμογής της κάθε μεταβλητής κατάστασης, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

(α) Υπολογίζονται τα προτυποποιημένα σφάλματα (normalized residuals), με τον τύπο

$$CF_{i,t} = \left| \frac{M_{i,t} - D_{i,t}}{s_i} \right| \quad (\text{Π1.3})$$

όπου  $M_{i,t}$  η προσομοιωμένη τιμή της  $i$  μεταβλητής την χρονική στιγμή  $t$ ,  $D_{i,t}$  η αντίστοιχη πειραματική τιμή και  $s_i$  η τυπική απόκλιση των πειραματικών τιμών της μεταβλητής. Από τον τύπο γίνεται φανερό ότι πρόκειται για μία *συνάρτηση κόστους*. Ο αριθμός των προτυποποιημένων σφαλμάτων – συναρτήσεων κόστους είναι ίσος με τον αριθμό των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων για την κάθε μεταβλητή. Η κάθε διαφορά διαιρείται με την τυπική απόκλιση με στόχο να προτυποποιηθούν οι τιμές των υπολοίπων, να γίνουν δηλαδή ανεξάρτητες της χρησιμοποιούμενης μονάδας και να αποκτήσουν το ίδιο βάρος για όλες τις μεταβλητές.

(β) Για την ποσοτική εκτίμηση της προσαρμογής της κάθε μεταβλητής προτείνονται τρεις μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί την μέση τιμή των προτυποποιημένων σφαλμάτων. Η προσαρμογή της  $i$  μεταβλητής ( $GoFV_i$ ) με την μέθοδο αυτή δίνεται από την σχέση

$$GoFV_i^{\text{mean}} = \frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} CF_{i,t} \quad (\text{Π1.4})$$

όπου  $n_i$  είναι το πλήθος πειραματικών τιμών που είναι διαθέσιμες για την μεταβλητή  $i$ . Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης της προσαρμογής της  $i$  μεταβλητής χρησιμοποιεί μόνον το μεγαλύτερο προτυποποιημένο σφάλμα, είναι γνωστή ως  $L_\infty$ -norm και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην ύπαρξη έστω και μίας ακραίας τιμής μεταξύ των προτυποποιημένων σφαλμάτων. Δίνεται από την σχέση

$$GoFV_i^{\text{max}} = \max(CF_{i1}, CF_{i2}, \dots, CF_{in}) \quad (\text{Π1.5})$$

Όπου  $CF_{in}$  τα προτυποποιημένα σφάλματα για τις  $n$  διαθέσιμες πειραματικές τιμές. Τέλος η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιεί την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των τυποποιημένων υπολοίπων, είναι σχετικά ευαίσθητη στην ύπαρξη ακραίων τιμών και λαμβάνει υπ' όψη την προσαρμογή στο σύνολο των πειραματικών τιμών, όπως και η πρώτη μέθοδος. Δίνεται από την σχέση

$$GoFV_i^{\text{quadr}} = \sqrt{\sum_{t=1}^{n_i} \frac{CF_{i,t}^2}{n_i}} \quad (\text{Holt } et al. 2005) \quad (\text{Π1.6})$$

Αφού εκτιμηθεί η προσαρμογή της κάθε μεταβλητής κατάσταση χωριστά, υπολογίζεται στην συνέχεια η προσαρμογή ολόκληρου του μοντέλου προσομοίωσης. Η κάθε μεταβλητή κατάσταση συμμετέχει στην προσαρμογή του μοντέλου με την τιμή της επιτυχίας προσαρμογής της  $GoFV_i$ , που υπολογίστηκε με τις μεθόδους που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή βαρύτητας  $w_i$  με τιμή μεταξύ 0 και 1. Με την χρήση του συντελεστή βαρύτητας δίνεται η δυνατότητα η επιτυχία προσαρμογής της κάθε μεταβλητής να



βαρύνει διαφορετικά στην επιτυχία προσαρμογής του μοντέλου. Για παράδειγμα μία μεταβλητή για την οποία εκτιμάται ότι τα σφάλματα μέτρησης των τιμών της είναι αυξημένα, είναι δυνατόν να συμμετάσχει με μειωμένο συντελεστή βαρύτητας στην επιτυχία προσαρμογής του μοντέλου.

Παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο μέθοδοι ποσοτικής εκτίμησης της προσαρμογής του μοντέλου. Η πρώτη λαμβάνει υπ' όψη την μέση τιμή των προσαρμογών των επιμέρους μεταβλητών και δίνεται από την σχέση

$$GoFM^{mean} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v w_i \cdot GoFV_i \quad (\text{Π1.7})$$

όπου  $GoFM$  η επιτυχία προσαρμογής του μοντέλου,  $v$  το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης,  $GoFV_i$  η επιτυχία προσαρμογής της  $i$  μεταβλητής και  $w_i$  ο αντίστοιχος συντελεστής βαρύτητας. Η δεύτερη μέθοδος λαμβάνει υπ' όψη μόνον την μέγιστη των επιτυχιών προσαρμογής των  $i$  μεταβλητών, δηλαδή

$$GoFM^{max} = \max(w_1 \cdot GoFV_1, w_2 \cdot GoFV_2, \dots, w_v \cdot GoFV_v) \quad (\text{Π1.8})$$

Για τις δύο παραπάνω μεθόδους πρέπει και πάλι να σημειωθεί ότι η ποσότητα που τελικά προκύπτει ως μέτρο προσαρμογής είναι στην πραγματικότητα μέτρο απόκλισης μεταξύ των τιμών της προσομοίωσης και των πειραματικών τιμών. Δηλαδή η προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα είναι τόσο καλύτερη, όσο μικρότερη είναι η ποσότητα  $GoFM$ .

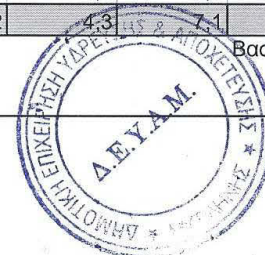
Όπως προαναφέρθηκε, αν και ο αριθμός των αριθμητικών εφαρμογών στα θαλάσσια οικοσυστήματα αυξάνεται και τα μοντέλα εξελίσσονται και γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα στην προσπάθειά τους να δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα, οι Arhonditsis & Brett (2004) και Allen *et al.* (2007b) υπογραμμίζουν ότι δεν δίνεται αντίστοιχα αρκετή προσοχή στην επαρκή και ποσοτική επαλήθευσή τους και στην μελέτη των σφαλμάτων και της αβεβαιότητάς τους. Βεβαίως, η διαχείριση του τεράστιου όγκου αποτελεσμάτων που παράγουν τα σύγχρονα 3D μοντέλα οικοσυστήματος, κατά συνέπεια και η μελέτη των σφαλμάτων, δεν είναι εύκολη υπόθεση και απαιτεί συστηματικότητα και μεθοδολογία. Πρόσφατες προσπάθειες εκτενούς επαλήθευσης ενός σύνθετου 3D υδροδυναμικού-οικολογικού μοντέλου που εφαρμόζεται πιλοτικά στη Βόρεια Θάλασσα (POLCOMS – ERSEM) (Holt *et al.* 2005, Allen *et al.* 2007a, Allen *et al.* 2007b) καταδεικνύουν μεταξύ άλλων: (α) τη δυσκολία διαχείρισης της ποσότητας πληροφορίας που 'γεννάει' το μοντέλο αλλά και τα δεδομένα πεδίου και (β) την ανάγκη ανάπτυξης ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την επαλήθευση και τον χαρακτηρισμό των επιδόσεων ενός μοντέλου. Οι παραπάνω ερευνητές τονίζουν ότι δεν αρκεί η χρήση ενός μόνο μέτρου ποσοτικοποίησης σφάλματος, όπως μια συνάρτηση κόστους, αλλά χρειάζονται μεθοδολογικά βήματα και συνδυασμός τεχνικών και ποσοτικών μέτρων, όπως αυτά που περιγράφηκαν στην παρούσα παράγραφο και αναλυτικότερα στις δημοσιεύσεις που αναφέρονται. Επιπλέον, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ευρέως αποδεκτές κλίμακες τιμών για τα μέτρα ποσοτικοποίησης σφάλματος (performance levels), για όσο το δυνατό πιο αντικειμενικό χαρακτηρισμό των επιδόσεων ενός μοντέλου.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2**

**Ποιότητα επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης**

**Πίνακας Π2.** Ποιότητα επεξεργασμένων λυμάτων της πόλης της Μυτιλήνης (μηνιαίες μέσες τιμές στην εκροή) για την περίοδο προσομοίωσης.

ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ Εργαστήριο Ελέγχου Νερών-Λυμάτων		Ποιότητα Επεξεργασμένων λυμάτων πόλεως Μυτιλήνης Μέσες Μηνιαίες Συγκεντρώσεις Εκροής για το χρονικό διάστημα από την αρχή της λειτουργίας μέχρι τον Δεκέμβριο 2002											
		Εκροή Μ.Ε.Λ. Μυτιλήνης											
Ημ/νία	Μέση ημερήσια παροχή μγνός εισόδου/	T	pH	D.O.	Cond.	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	T-KN	PO <sub>4</sub> -P	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	Καθιζάνοντα 2 ώρες
		°C		mg/l	μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ml σε κώνο imhoht
Νοε-01	3.010												
Δεκ-01	4.483												
Ιαν-02	4.143												
Φεβ-02	4.062	16,4	7,29	8,4						10,8	31,0	20,0	<0,3
Μαρ-02	4.327	18,0	7,24	7,7	2,3	1,2	0,410			11,0	24,8	16,5	<0,3
Απρ-02	4.287	18,0	7,35	7,6	4,2	1,1	0,406			5,7	30,7	14,5	<0,3
Μαϊ-02	4.024	24,4	7,59	7,7	5,2	1,0	0,720	2,5	2,6	5,6	27,1	3,0	<0,3
Ιουν-02	3.550	24,7	7,46	7,4	5,2	1,1	0,677		2,0	6,0	25,7	2,1	<0,3
Ιουλ-02	3.439	26,1	7,48	8,0	5,1	1,9	0,710		0,6	7,1	60,8	4,1	<0,3
Αυγ-02	3.361	26,1	7,28	7,3	5,3	1,3	0,834	1,7	8,1	6,9	22,3	6,6	<0,3
Σεπ-02	3.787	24,2	7,47	7,4	5,5	1,1	1,241	2,9	5,4	6,7	23,8	7,7	<0,3
Οκτ-02	3.798	22,2	7,31	7,0	5,5	0,8	0,898		5,2	7,0	24,2	4,2	<0,3
Νοε-02	4.490	21,3	7,20	7,4	5,5	1,5	0,590	2,0	5,9	6,2	20,6	7,5	<0,3
Δεκ-02	4.993	21,2	7,32	7,5	5,7	0,8	0,862	1,9	4,9	5,6	15,7	5,9	<0,3
Μέσος 2002		22,0	7,36	7,6	4,9	1,2	0,735	2,2	4,3	7,1	27,9	8,4	<0,3



Βασίλαρος Σωτήρης  
Χημικός

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3**

**Αναλυτική περιγραφή των υπορουτίνων του οικολογικού  
υπομοντέλου**

### Υπορουτίνα **ADVTB**

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει την μεταφορά στις τρεις διαστάσεις και την οριζόντια διάχυση για ένα μονόμετρο μέγεθος (βλέπε π.χ. εξίσωση 5.3 της παραγράφου 5.1). Καλείται σε κάθε βήμα χρόνου από το κυρίως πρόγραμμα για κάθε οικολογική μεταβλητή, υπολογίζοντας τα αντίστοιχα πεδία διασποράς. Είναι η υπορουτίνα ADVT του υδροδυναμικού POM (Mellor, 1996 και 2004), τροποποιημένη έτσι ώστε να περιλαμβάνει τον όρο της καταβύθισης  $-w_s \frac{\partial C}{\partial z}$  στην κατακόρυφη διάσταση της

εξίσωσης μεταφοράς. Ο όρος αυτός είναι διάφορος του μηδενός μόνο για το φυτοπλαγκτόν *PHYT* σε αυτήν την έκδοση του μοντέλου, αλλά η όλη δομή μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε μεταβλητή υφίσταται καθίζηση, π.χ. αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη. Η δομή της υπορουτίνας:

- δέχεται ως δεδομένα εισόδου την τιμή της μεταβλητής του προηγούμενου χρονικού βήματος FB και του τωρινού F και την ταχύτητα καθίζησης  $w_s$
- υπολογίζει την οριζόντια ροή ύλης λόγω μεταφοράς
- προσθέτει την οριζόντια ροή ύλης λόγω διάχυσης
- υπολογίζει και προσθέτει την κατακόρυφη μεταφορά (vertical advection) (λαμβάνοντας υπόψη τυχόν καταβύθιση)
- προκύπτει η νέα τιμή της μεταβλητής FF σε κάθε κόμβο του τρισδιάστατου πλέγματος.

### Υπορουτίνα **PROFT**

Είναι η υπορουτίνα PROFT του υδροδυναμικού POM (Mellor, 1996, 2004). Υπολογίζει την κατακόρυφη τυρβώδη διάχυση των μεταβλητών του οικολογικού μοντέλου, με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται για την θερμοκρασία και την αλατότητα. Για τις επιφανειακές οριακές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες στον πυθμένα ισχύουν όσα αναλύονται στην παράγραφο 5.2.6.

### Υπορουτίνα **BCONDBIOCHEM**

Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει τις οριακές συνθήκες (δηλαδή τις τιμές) των οικολογικών μεταβλητών στα ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου (lateral open boundary values/conditions). Καλείται σε κάθε βήμα χρόνου, αμέσως μετά τις *ADVTB* και *PROFT*, για κάθε οικολογική μεταβλητή. Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1.3.2, οι συνθήκες αυτές είναι οι ίδιες που εφαρμόζονται από το POM για την θερμοκρασία και την αλατότητα (upstream advection). Εκφράζονται από τη σχέση (5.22),

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

όπου  $C$  η συγκέντρωση της μεταβλητής κατάστασης και  $U$  η οριζόντια ταχύτητα. Πρακτικά, η *BCONDBIOCHEM* αποτελείται από το τμήμα της υπορουτίνας *BCOND* του POM που αφορά την θερμοκρασία  $T$  και την αλατότητα  $S$ , τροποποιημένο έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε βαθμωτή μεταβλητή  $C$ . Η δομή της:

- δέχεται ως δεδομένα εισόδου (1) την παρούσα τιμή της προσομοιωμένης μεταβλητής (του τωρινού βήματος χρόνου) και (2) πειραματικές τιμές της μεταβλητής στα ανοιχτά όρια που προέρχονται από μετρήσεις, από βάσεις δεδομένων που αφορούν την περιοχή μελέτης, ή δυναμικά από

κάποιο άλλο μοντέλο της ευρύτερης περιοχής. Τα οριακά αυτά δεδομένα, που στην υπορουτίνα παριστάνονται από τις μεταβλητές VARBN, VARBS, VARBE, VARBW για τα βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά ανοιχτά όρια αντίστοιχα, πρέπει να καθοριστούν για κάθε μεταβλητή (φυτοπλαγκτόν, νιτρικά, κ.ο.κ) από τον χρήστη. Η μεθοδολογία παραγωγής των οικολογικών οριακών δεδομένων είναι η ίδια που ακολουθήθηκε για τη θερμοκρασία/αλατότητα και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.1.3.2.

- εφαρμόζεται η σχέση (5.22) στους κόμβους που αποτελούν τα ανοιχτά όρια του υπολογιστικού πεδίου.
- υπολογίζεται έτσι η νέα προσομοιωμένη τιμή της μεταβλητής στους κόμβους του πλέγματος που αποτελούν τα ανοιχτά όρια.

Υπενθυμίζεται ότι τα οριακά δεδομένα που παρέχει ο χρήστης χρησιμοποιούνται από το μοντέλο για τον υπολογισμό των οριακών προσομοιωμένων τιμών μόνο όταν υπάρχει εισροή (inflow) νερού προς το εσωτερικό του υπολογιστικού πεδίου. Περισσότερες λεπτομέρειες για την αριθμητική μέθοδο επίλυσης των οριακών συνθηκών παρέχονται από τον Mellor (1996, 2004) στο οδηγό χρήσης του POM.

### **Υπορουτίνα BIOCHEM**

Η υπορουτίνα BIOCHEM μαζί με την INTEGR αποτελούν τον πυρήνα του οικολογικού υπομοντέλου. Η δομή της υπορουτίνας, που καλείται σε κάθε βήμα χρόνου, έχει ως εξής:

- δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις παρούσες τιμές (του τωρινού βήματος χρόνου) όλων των οικολογικών μεταβλητών και τον πραγματικό, ημερολογιακό χρόνο.
- Επιλέγεται η μέθοδος ολοκλήρωσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.7.
- Καλείται η υπορουτίνα INTEGR για κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος ενώ λαμβάνεται υπόψη η βαθυμετρία.
- Ανανεώνονται οι συγκεντρώσεις όλων των οικολογικών μεταβλητών.

### **Υπορουτίνα INTEGR**

Η υπορουτίνα INTEGR καλείται για κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος από την υπορουτίνα BIOCHEM και βασικός της προορισμός είναι η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων που αποτελούν το οικολογικό τμήμα του μοντέλου. Είναι το σημείο του κώδικα όπου ο χρήστης θέτει τιμές στις παραμέτρους του οικολογικού μοντέλου (Πίνακας 5.5). Περιέχει το μοντέλο φωτός των Taylor & Joint (1990), που χρησιμοποιείται ως περιοριστικός παράγοντας της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού. Η δομή της έχει ως εξής:

- δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις παρούσες τιμές (του τωρινού βήματος χρόνου) όλων των οικολογικών μεταβλητών για έναν κόμβο,
- Ολοκληρώνει το σύστημα των οικολογικών διαφορικών εξισώσεων, ανάλογα με τη μέθοδο που έχει επιλεγεί,
- υπολογίζει τις ανταλλαγές στήλης νερού – πυθμένα,
- Ελέγχει αν τα αποτελέσματα είναι μη-ρεαλιστικά (αν παράγονται αρνητικές τιμές συγκέντρωσης ή αν διπλασιάζεται η συγκέντρωση μιας μεταβλητής μέσα σε ένα βήμα χρόνου) και αν ναι, μειώνει το βήμα χρόνου (time step cutting) και επαναλαμβάνει την ολοκλήρωση. Η διαδικασία μείωσης του

βήματος χρόνου επαναλαμβάνεται ωσότου πάψουν να ισχύουν οι απαγορευτικές συνθήκες που προαναφέρθηκαν.

- Υπολογίζει τη μεταβολή  $dC$  της συγκέντρωσης κάθε μεταβλητής λόγω διεργασιών που περιλαμβάνει το οικολογικό μοντέλο. Η ποσότητα αυτή μεταφέρεται στην υπορουτίνα BIOCHEM, για να προστεθεί στη συγκέντρωση που υπολογίστηκε από τις φυσικές διεργασίες μεταφοράς και τυρβώδους διάχυσης και να προκύψει η συνολική νέα συγκέντρωση.

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι κοινές υπορουτίνες εκτυπώσεων και υπολογισμού των σφαλμάτων ERRORS.

### **Υπορουτίνα ERRORS**

Η υπορουτίνα ERRORS υπολογίζει την διαφορά μεταξύ προσομοιωμένης τιμής μοντέλου  $M$  και δεδομένων πεδίου  $D$  ( $M - D$ ), για κάθε σταθμό δειγματοληψίας και κάθε βάθος στο οποίο διατίθενται μετρήσεις πεδίου, όταν ο χρόνος προσομοίωσης γίνει ίσος με τον πραγματικό χρόνο που διενεργήθηκε δειγματοληψία. Επίσης υπολογίζει τον λόγο προσομοιωμένης τιμής μοντέλου  $M$  προς δεδομένα πεδίου  $D$  ( $M/D$ ). Οι δυο αυτές ποσότητες επιτρέπουν τον υπολογισμό των στατιστικών-ποσοτικών μέτρων καλής προσαρμογής του Πίνακα 2.2 του Κεφαλαίου 2 που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του σφάλματος του μοντέλου. Η υπορουτίνα ERRORS καλείται μέσα από την υπορουτίνα PROFILE κάθε φορά που ο χρόνος προσομοίωσης γίνει ίσος με τον ημερολογιακό χρόνο που πραγματοποιήθηκε μια δειγματοληψία. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία για περαιτέρω επεξεργασία, ένα για κάθε μεταβλητή, που περιέχουν τα σφάλματα για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

### **Υπορουτίνες PRINT2D / PR3DSIGTOZ**

Η υπορουτίνα PRINT2D μεταφέρει σε αρχεία εξόδου (.txt) τις δισδιάστατες μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου (συνιστώσες της μέσης κατά βάθος ταχύτητας  $UA$ ,  $VA$  και ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας  $\eta$ ). Η υπορουτίνα PR3DSIT0Z μεταφέρει σε αρχεία εξόδου (.txt) τις τρισδιάστατες μεταβλητές του υδροδυναμικού και του οικολογικού μοντέλου, σε σίγμα επιφάνειες (sigma layers) ή σε οριζόντια επίπεδα (z-levels), ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Ο υπολογισμός των οριζόντιων επιπέδων από τις σίγμα επιφάνειες γίνεται με γραμμική παρεμβολή στον κατακόρυφο άξονα.

### **Υπορουτίνα PROFILE**

Η υπορουτίνα PROFILE μεταφέρει σε αρχεία εξόδου (.txt) κατακόρυφα προφίλ μεταβλητών σε επιλεγμένα σημεία του υπολογιστικού πλέγματος (π.χ. οι σταθμοί δειγματοληψίας), σε σύστημα σίγμα ή οριζόντιων συντεταγμένων, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Προηγουμένως, και για κάθε επίπεδο, υπολογίζει τη μέση τιμή της μεταβλητής λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές από τα 8 γειτονικά σημεία του πλέγματος.

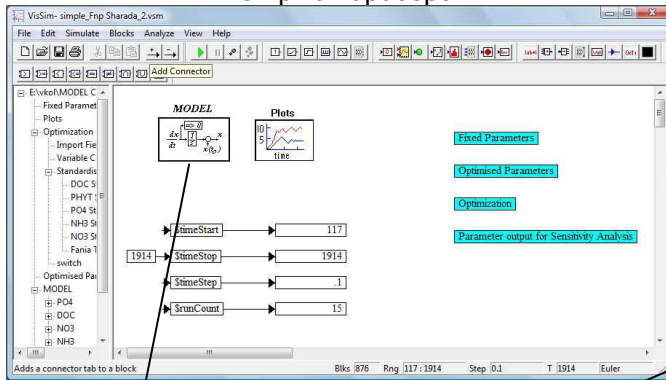
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4**

**Ανάπτυξη συστήματος βελτιστοποίησης τιμών παραμέτρων  
οικολογικού υπομοντέλου μηδενικών διαστάσεων με χρήση του  
λογισμικού VisSim/OptimizePRO, Visual Solutions**

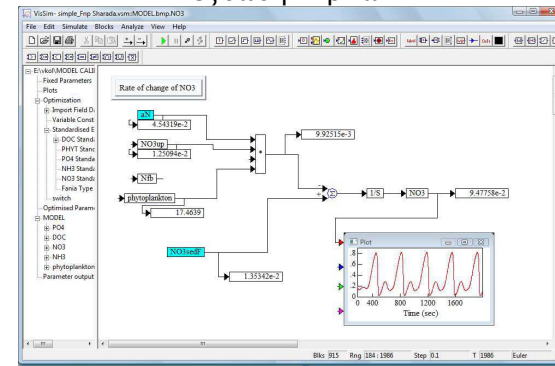
**Σχήματα**



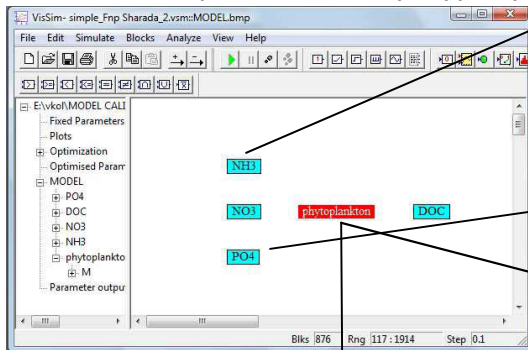
Κεντρικό παράθυρο



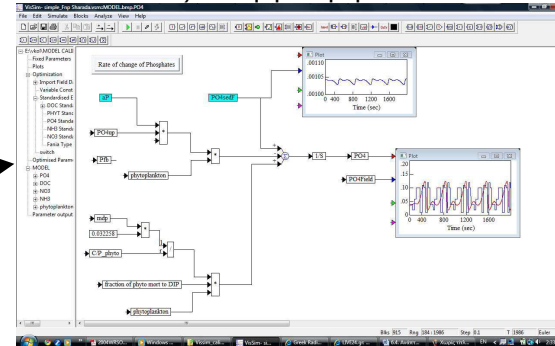
εξίσωση νιτρικών



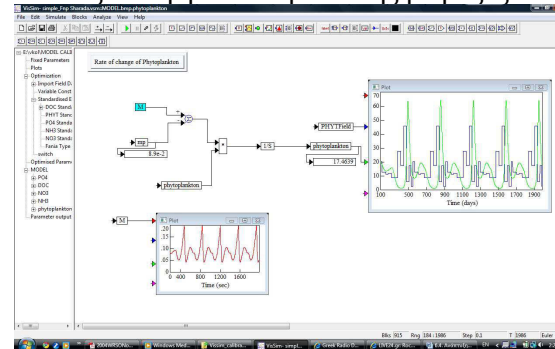
0-D μοντέλο: Οικολογικές μεταβλητές κατάστασης



εξίσωση φωσφορικών



εξίσωση φυτοπλαγκτονικής βιομάζας



$$\text{φυτοπλαγκτόν } \frac{dPHYT}{dt} = (\mu - m_p) PHYT, \text{ όπου}$$

$$\mu = \mu_{max} \min\left[f(U), f(N, P)\right], f(U) = \frac{\ln\left(\frac{1 + I/U_s}{1 + I_0/U_s}\right)}{K_Z}, f(N, P) = \min\left\{\frac{N}{N_s}, \frac{P}{P_s}\right\}$$

$$NO_{3,sp} = UNO_{3,sp} \frac{NO_3}{NO_3 + NOH} \left(\frac{1 + \alpha NH_4}{1 + \delta NH_4}\right), NH_{4,sp} = UNH_{4,sp} \frac{NH_4}{NH_4 + AH}, PO_{4,sp} = UPO_{4,sp} \frac{PO_4}{PO_4 + POH}$$

$$\text{νιτρικά } \frac{dNO_3}{dt} = -\alpha_{N_2} NO_{3,sp} PHYT + k_{sed} NO_{3,sed} - NO_{3,sv}$$

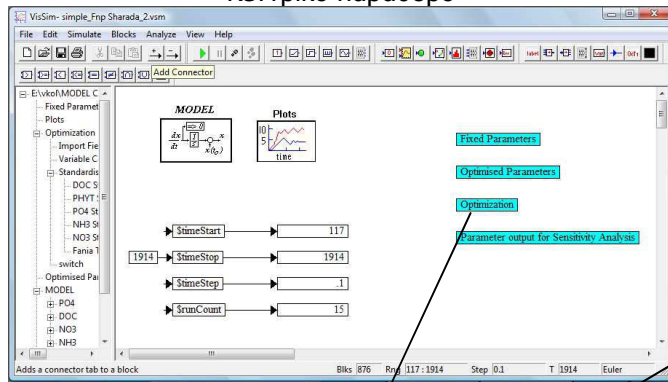
$$\text{αμμωνιακά } \frac{dNH_4}{dt} = -(\alpha_N NH_{4,sp} - m_{sp} (gratC / gratN) / (C/N)_{ratio}) F_{r,phytoplankton} PHYT + k_{sed} NH_4 (NH_{4,sed} - NH_{4,sv})$$

$$\text{φωσφορικά } \frac{dPO_4}{dt} = -(\alpha_P PO_{4,sp} - m_{sp} (gratC / gratP) / (C/P)_{ratio}) F_{r,phytoplankton} PHYT + k_{sed} PO_4 (PO_{4,sed} - PO_{4,sv})$$

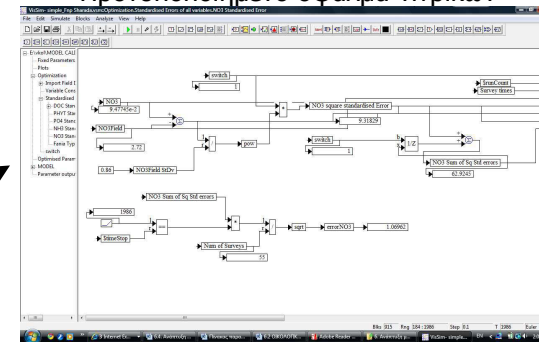
$$\text{διαλυμένος οργανικός άνθρακας } \frac{dDOC}{dt} = \mu \gamma PHYT (1 - F_{r,phytoplankton} NH_3 - F_{r,phytoplankton} PO_4) + k_{sed} DOC (DOC_{sed} - DOC_{sv})$$

Σχήμα Π4.1. Επίλυση εξισώσεων 0-D οικολογικού σκέλους του μοντέλου.

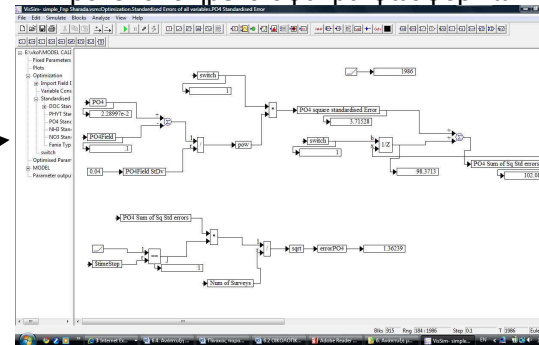
Κεντρικό παράθυρο



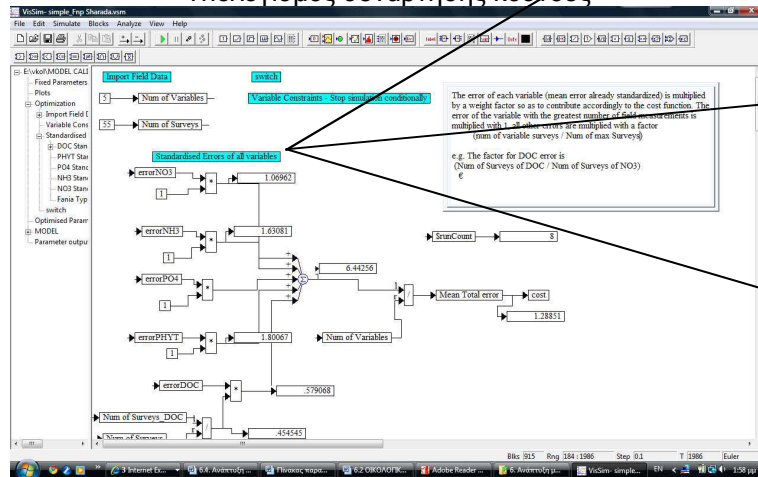
Προτυποποιημένο σφάλμα νιτρικών



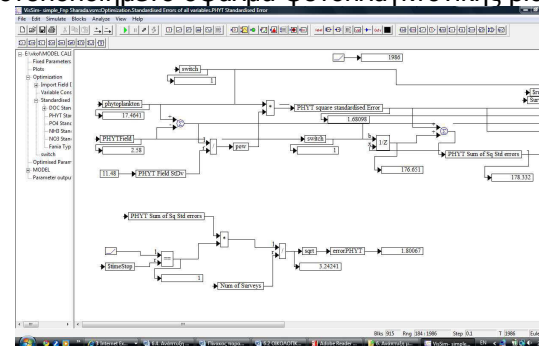
Προτυποποιημένο σφάλμα φωσφορικών



Υπολογισμός συνάρτησης κόστους

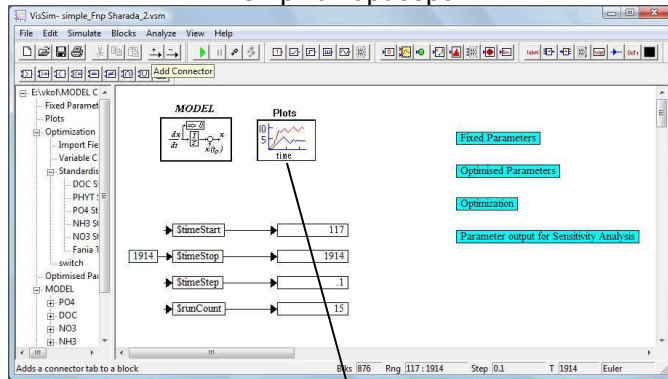


Προτυποποιημένο σφάλμα φυτοπλαγκτονικής βιομάζας

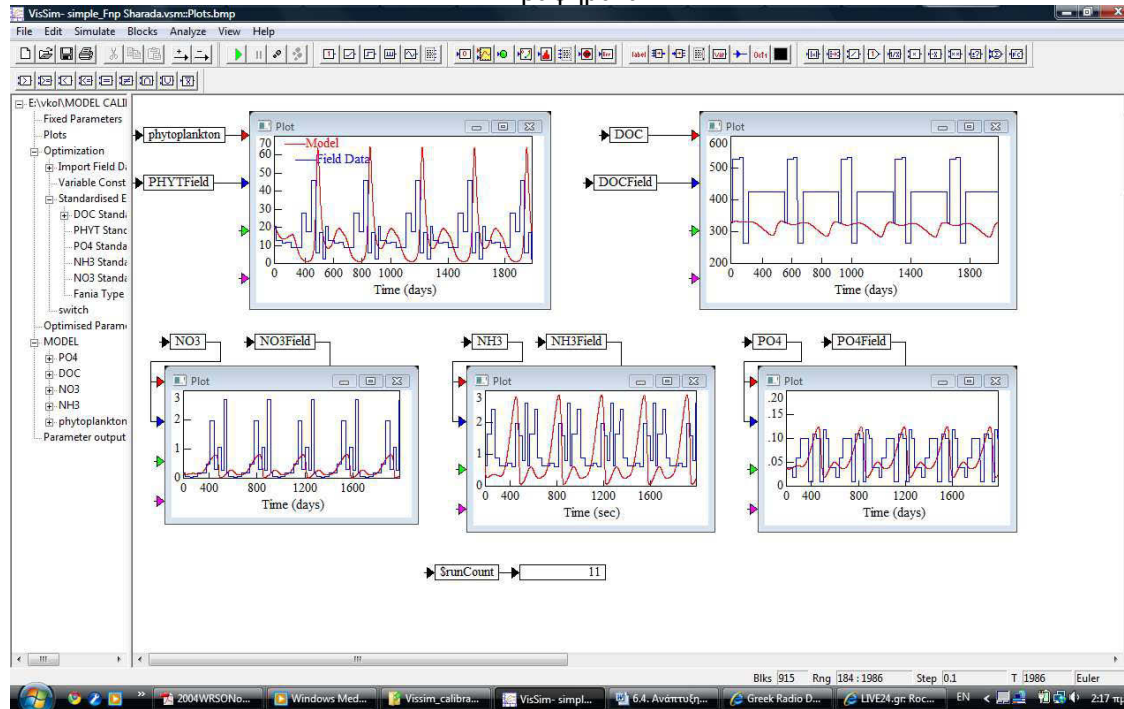


Σχήμα Π4.2. Βελτιστοποίηση: υπολογισμός προτυποποιημένων σφαλμάτων μοντέλου και συνάρτησης κόστους.

Κεντρικό παράθυρο

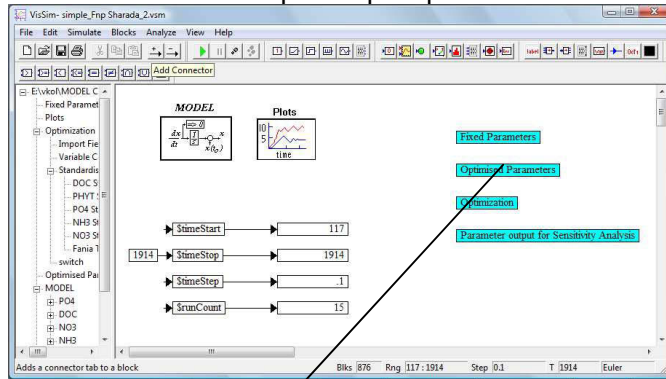


Γραφήματα

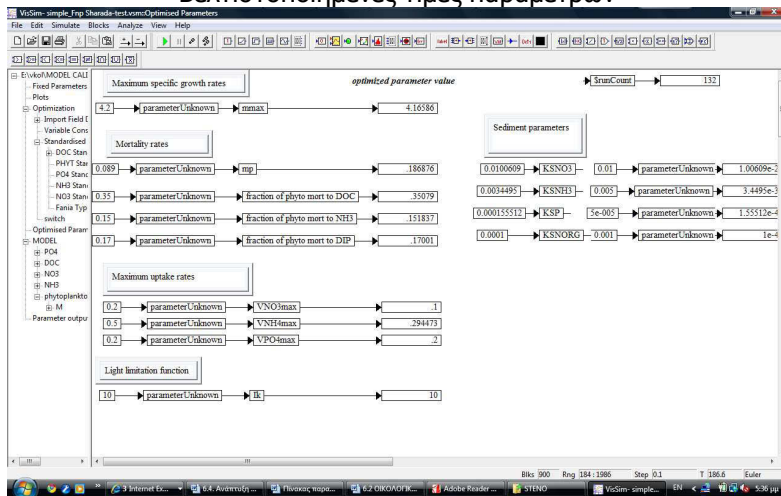


Σχήμα Π4.3. Γραφικές παραστάσεις αποτελεσμάτων μοντέλου και δεδομένων πεδίου.

Κεντρικό παράθυρο



Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων



Πίνακας 5.5. Παράμετροι του οικολογικού υπομοντέλου: περιγραφή, τιμή και μονάδες. Οι τιμές προέκυψαν μετά από βαθμονόμηση εκτός από αυτές που σημειώνονται με αστερίσκο (\*).

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδες
$\mu_{max}$	Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης φυτοπλαγκτού	4.85	day <sup>-1</sup>
$\gamma$	Κλάσμα της φυτοπλ/κής παραγωγής που απεκκρίνεται ως DOC	0.20	αδιάστατο
$m_D$	Ρυθμός απώλειας φυτοπλαγκτονικής βιομάζας	0.089	day <sup>-1</sup>
NOH	Σταθερά ημικορεασμού πρόσληψης νιτρικών από φυτοπλαγκτόν	1.0	μg-at N/l
AH	Σταθερά ημικορεασμού πρόσληψης αμμωνιακών από φυτοπλαγκτόν	2.0	μg-at N/l
POH	Σταθερά ημικορεασμού πρόσληψης φωσφορικών από φυτοπλαγκτόν	0.35	μg-at N/l
UNO <sub>3max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης νιτρικών αλάτων	0.15	μg-at N/mg. d
UNH <sub>4max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης αμμωνιακών αλάτων	0.25	μg-at N/mg. d
UPO <sub>4max</sub>	Μέγιστος ρυθμός πρόσληψης φωσφορικών αλάτων	0.17	μg-at N/mg. d
$I_{0.5}$	Σταθερά ημικορεασμού για την ένταση της ακτινοβολίας	10	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
$k_{0.5}$	Συντελεστής απόσβεσης φωτός για νερό χωρίς χλωροφύλλη	0.16	m <sup>-1</sup>
$k_c$	Συντελεστής απόσβεσης φωτός που οφείλεται στη χλωροφύλλη	0.19	l.(μg.m) <sup>-1</sup>
a	συντελεστής ανάσχεσης αμμωνιακών στην πρόσληψη νιτρικών (Sharada et al -2005)	0.72 *	(μg-at N/l) <sup>-1</sup>
b	συντελεστής ανάσχεσης αμμωνιακών στην πρόσληψη νιτρικών (Sharada et al -2005)	2.6 *	(μg-at N/l) <sup>-1</sup>
$k_{sedNH3}$	Ρυθμός ροής νιτρικών από/προς ιζημα	$40.6 \times 10^{-3}$	day <sup>-1</sup>
$k_{sedNH4}$	Ρυθμός ροής αμμωνιακών από/προς ιζημα	$34.5 \times 10^{-3}$	day <sup>-1</sup>
$k_{sedPO4}$	Ρυθμός ροής φωσφορικών από/προς ιζημα	$0.16 \times 10^{-3}$	day <sup>-1</sup>
$k_{sedDOC}$	Ρυθμός ροής οργανικού άνθρακα από/προς ιζημα	$1 \times 10^{-3}$	day <sup>-1</sup>
$(C/N)_{ratioPhyt}$	Λόγος C: N για το φυτοπλαγκτόν	6.6	αδιάστατο
$(C/P)_{ratioPhyt}$	Λόγος C: P για το φυτοπλαγκτόν	40	αδιάστατο
$FG_{phytoDOC}$	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε DOC	0.35	αδιάστατο
$FG_{phytoNH4}$	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε NH <sub>4</sub>	0.15	αδιάστατο
$FG_{phytoPO4}$	Κλάσμα φυτοπλ/κής θνησιμότητας που μετατρέπεται σε PO <sub>4</sub>	0.17	αδιάστατο
$m_{dp}$	Φυτοπλαγκτονική θνησιμότητα σε DOC	$m_D \times FG_{phytoDOC}$	h <sup>-1</sup>
$\sigma_N$	Ανόργανο άζωτο προς φυτοπλαγκτόν	$\mu_{max} \times (C/N)_{ratioPhyt}$	αδιάστατο
$\sigma_P$	Ανόργανος φώσφορος προς φυτοπλαγκτόν	$\mu_{max} \times (C/P)_{ratioPhyt}$	αδιάστατο

Σχήμα Π4.4. Αριστερά, το υπομενού προσδιορισμού βέλτιστων τιμών παραμέτρων και δεξιά, το τελικό αποτέλεσμα (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο Πίνακας 5.5)



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5**

**Ανάπτυξη λογισμικού γραφικών/οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων  
του μοντέλου (MATLAB)**

Η οπτικοποίηση – απεικόνιση των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη συνιστώσα ενός συστήματος προσομοίωσης, καθώς φέρνει σε άμεση επαφή τον ερευνητή ή τον οποιονδήποτε τελικό χρήστη με τα προϊόντα της προσομοίωσης. Για την αποτελεσματική διαχείριση της μεγάλης ποσότητας πληροφορίας που χρειάζεται να τροφοδοτηθεί αλλά κυρίως, που παράγει το μοντέλο προσομοίωσης αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό στο MATLAB, The Mathworks Inc.

Εκτός από τις ρουτίνες γραφικών/οπτικοποίησης, που δέχονται ως δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα του μοντέλου και τα απεικονίζουν, αναπτύχθηκε και αριθμός αρχείων .m (.m files) για τον έλεγχο και την επεξεργασία δεδομένων σε διάφορα στάδια ανάπτυξης ενός μοντέλου. Λίστα με τις ρουτίνες αυτές και τη λειτουργία τους παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί. Στην παρούσα φάση, τα αρχεία .m καλούνται από τη γραμμή εντολών του MATLAB, με πληκτρολόγηση του ονόματος του αρχείου .m από τον χρήστη. Επιπλέον, σε πολλές από τις ρουτίνες του Παραρτήματος 6 υπάρχει η δυνατότητα προβολής αλληλουχίας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη δημιουργία ταινιών τύπου .avi.

<b>Όνομα αρχείου</b>	<b>Περιγραφή</b>
coast.m	Σχεδιασμός ακτογραμμής. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου το αρχείο ακτογραμμής.
Land_mask.m	Σχεδιασμός βαθυμετρίας. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου το αρχείο ακτογραμμής και τη βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.
bottom.m	Σχεδιάζει τρισδιάστατη απεικόνιση του πυθμένα. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου τα αρχεία βαθυμετρίας της περιοχής και της ακτογραμμής.
<i>2D κατανομές</i>	
current2D.m	Κατανομή της μέσης κατά βάθος ταχύτητας (depth averaged velocity). Δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις δυο συνιστώσες της μέσης κατά βάθος ταχύτητας στους άξονες x (UA) και y (VA) (ως δυο δισδιάστατα αρχεία) και συνθέτει το άνυσμα της μέσης ταχύτητας σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πλέγματος.
current3D.m	Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις δυο συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες x (U) και y (V) (ως δυο τρισδιάστατα αρχεία) και συνθέτει το άνυσμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πλέγματος, στο βάθος που επιθυμεί ο χρήστης.
elev.m	Κατανομή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας.
scalar.m	Οριζόντια κατανομή μονόμετρης μεταβλητής. Σχεδιάζει τη θερμοκρασία, την αλατότητα και τις οικολογικές μεταβλητές στο βάθος που επιθυμεί ο χρήστης.
superposition.m	Σχεδιάζει την οριζόντια κατανομή μιας μονόμετρης μεταβλητής (θερμοκρασία, φυτοπλαγκτόν, νιτρικά κ.λ.π.) μαζί με το πεδίο ταχύτητας ρευμάτων

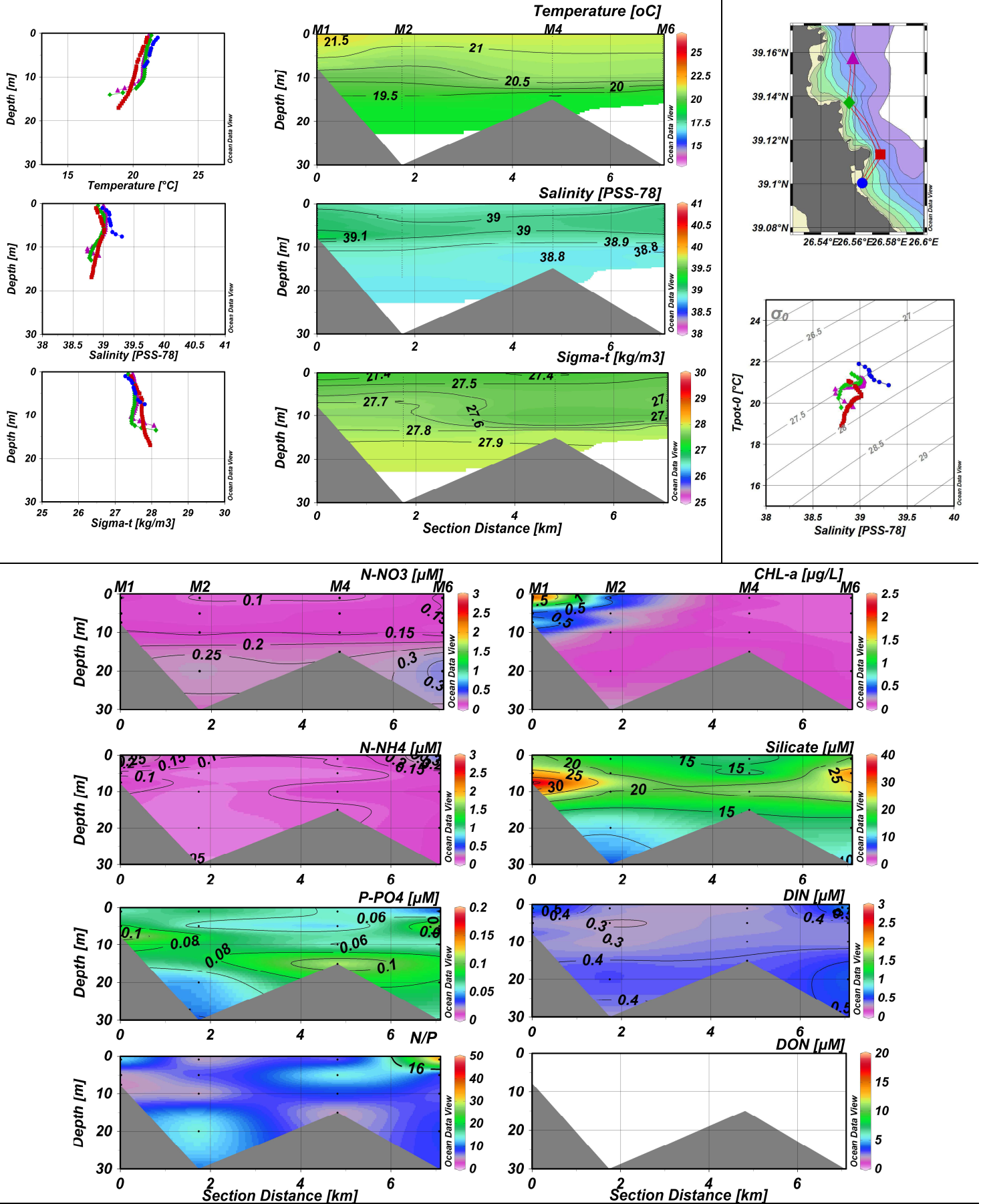
	(superposition).
scalar_multiple_variables_currentfield.m	Σχεδιάζει τις οριζόντιες κατανομές πολλών μονόμετρων μεταβλητών (θερμοκρασία, φυτοπλαγκτόν, νιτρικά κ.λ.π.) μαζί με το πεδίο ταχύτητας ρευμάτων σε μία από αυτές.
<i>Κατακόρυφες τομές</i>	
slice2d.m	Σχεδιάζει κατακόρυφη τομή μιας μονόμετρης μεταβλητής (θερμοκρασία, αλατότητα, φυτοπλαγκτόν, νιτρικά κ.λ.π.) κατά μήκος της διάστασης I ή J του μοντέλου που επιθυμεί ο χρήστης. Υπάρχει η δυνατότητα προβολής ισόποσων καμπυλών (contours) της ίδιας ή άλλης μεταβλητής.
slice3d.m	Σχεδιάζει κατακόρυφες τομές μιας μονόμετρης μεταβλητής (θερμοκρασία, αλατότητα, φυτοπλαγκτόν, νιτρικά κ.λ.π.) κατά μήκος των διαστάσεων I και J του και ταυτόχρονα οριζόντια κατανομή σε βάθος που ορίζεται από τον χρήστη
slice1variable.m	Σχεδιάζει κατακόρυφες τομές μιας μονόμετρης μεταβλητής (θερμοκρασία, αλατότητα, φυτοπλαγκτόν, νιτρικά κ.λ.π.) κατά μήκος πολλαπλών διαστάσεων I και/ή J του μοντέλου που επιθυμεί ο χρήστης. Υπάρχει η δυνατότητα προβολής ισόποσων καμπυλών (contours) της ίδιας ή άλλης μεταβλητής (slice1variable_contour.m).
slice4variables.m	Σχεδιάζει κατακόρυφες τομές τεσσάρων μεταβλητών (θερμοκρασία, αλατότητα, συνιστώσα ταχύτητας, φυτοπλαγκτόν, κ.λ.π.) κατά μήκος της διάστασης I ή J του μοντέλου, με προβολή ισόποσων καμπυλών (contours).
<i>Ρουτίνες ελέγχου</i>	
readgrid.m	Ρουτίνα ελέγχου του αρχείου βαθυμετρίας και του καμπυλόγραμμου πλέγματος που προκύπτει από το λογισμικό δημιουργίας καμπυλόγραμμου πλέγματος SeaGrid
check.m	Ρουτίνα ελέγχου των αρχείων τιμών που προκύπτουν με παρεμβολή μετρήσεων πεδίου και χρησιμοποιούνται ως αρχικές και οριακές τιμές



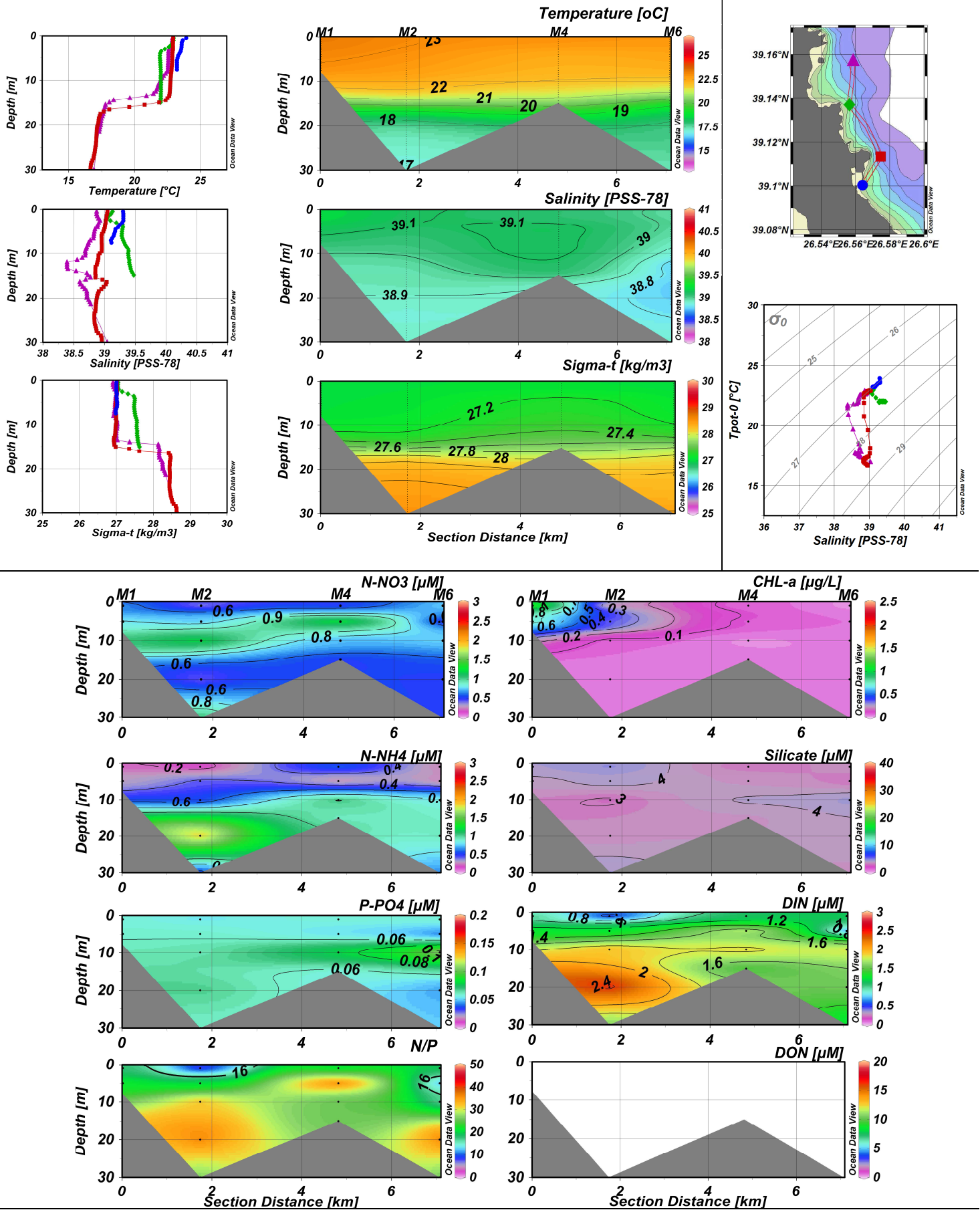
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6**

### **Παρουσίαση μετρήσεων πεδίου – σχήματα φυσικών και οικολογικών μεταβλητών και ρευματομετρήσεων:**

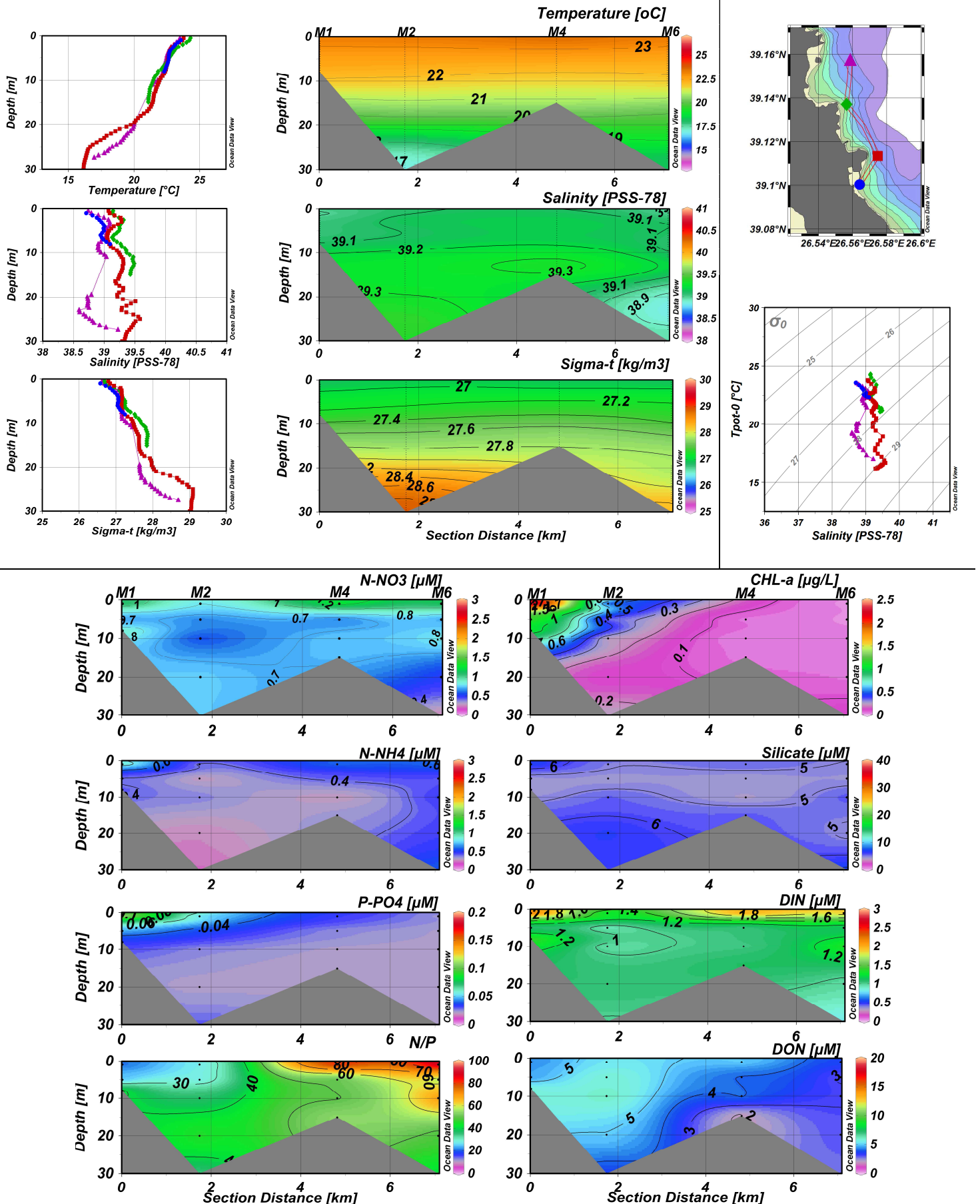
- κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) και κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας
- διαγράμματα T-S
- ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος και κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων
- κάθετες τομές συγκεντρώσεων θρεπτικών αλάτων, διαλυτού ανόργανου αζώτου, διαλυτού οργανικού αζώτου, λόγου N/P και χλωροφύλλης-a.



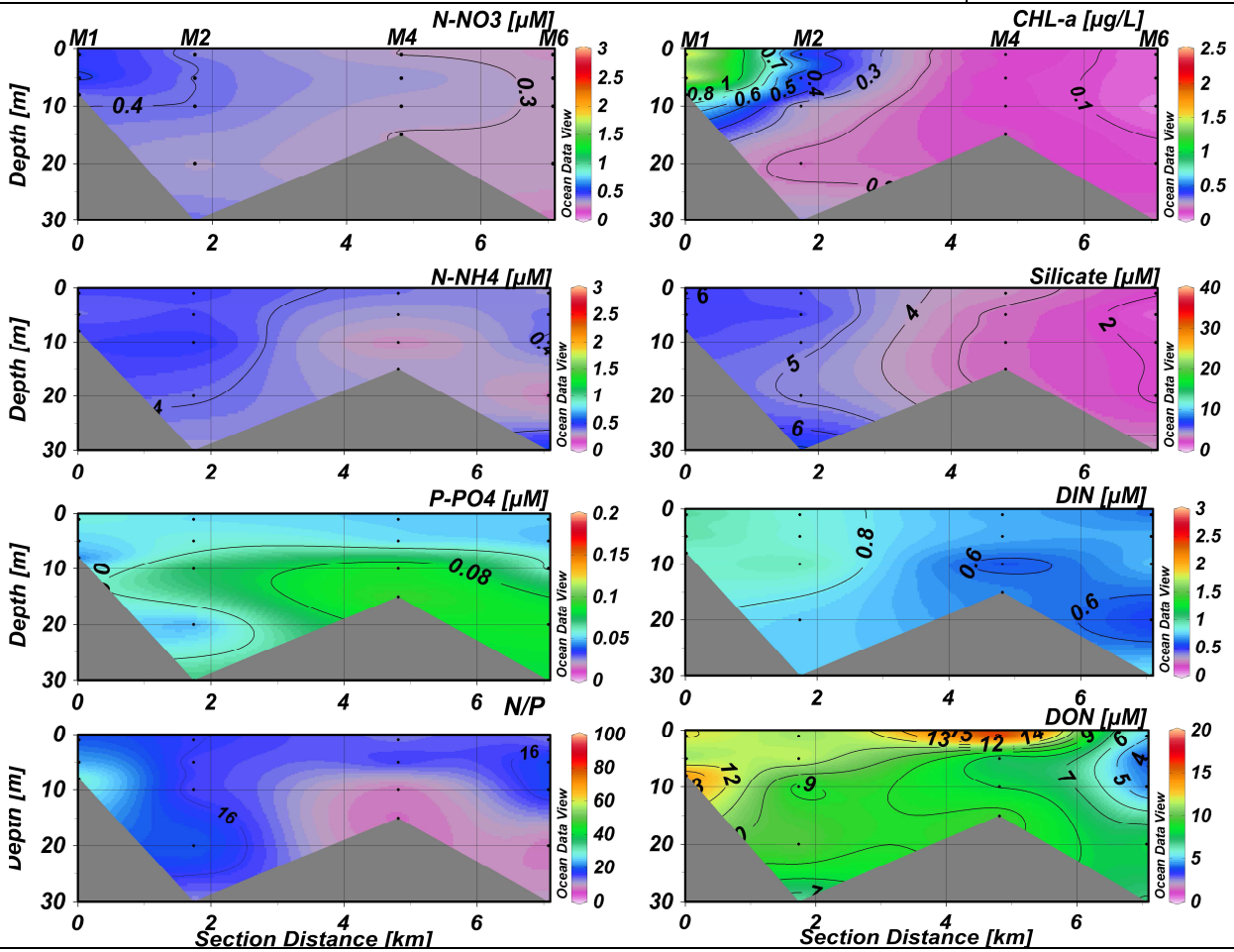
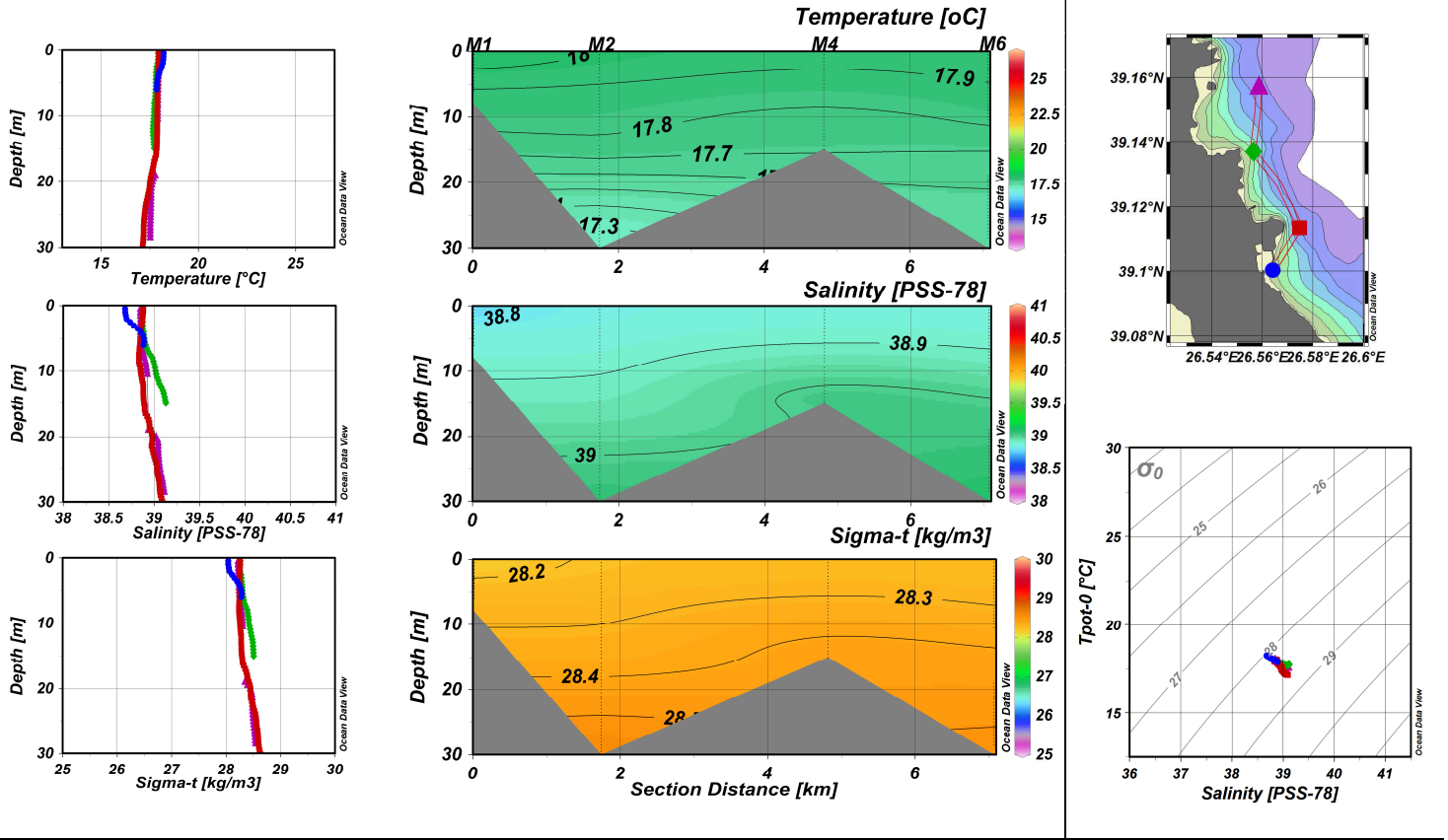
**Σχήμα Π6.1.** Δειγματοληψία **VK1 – 30 Ιουνίου 2000**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



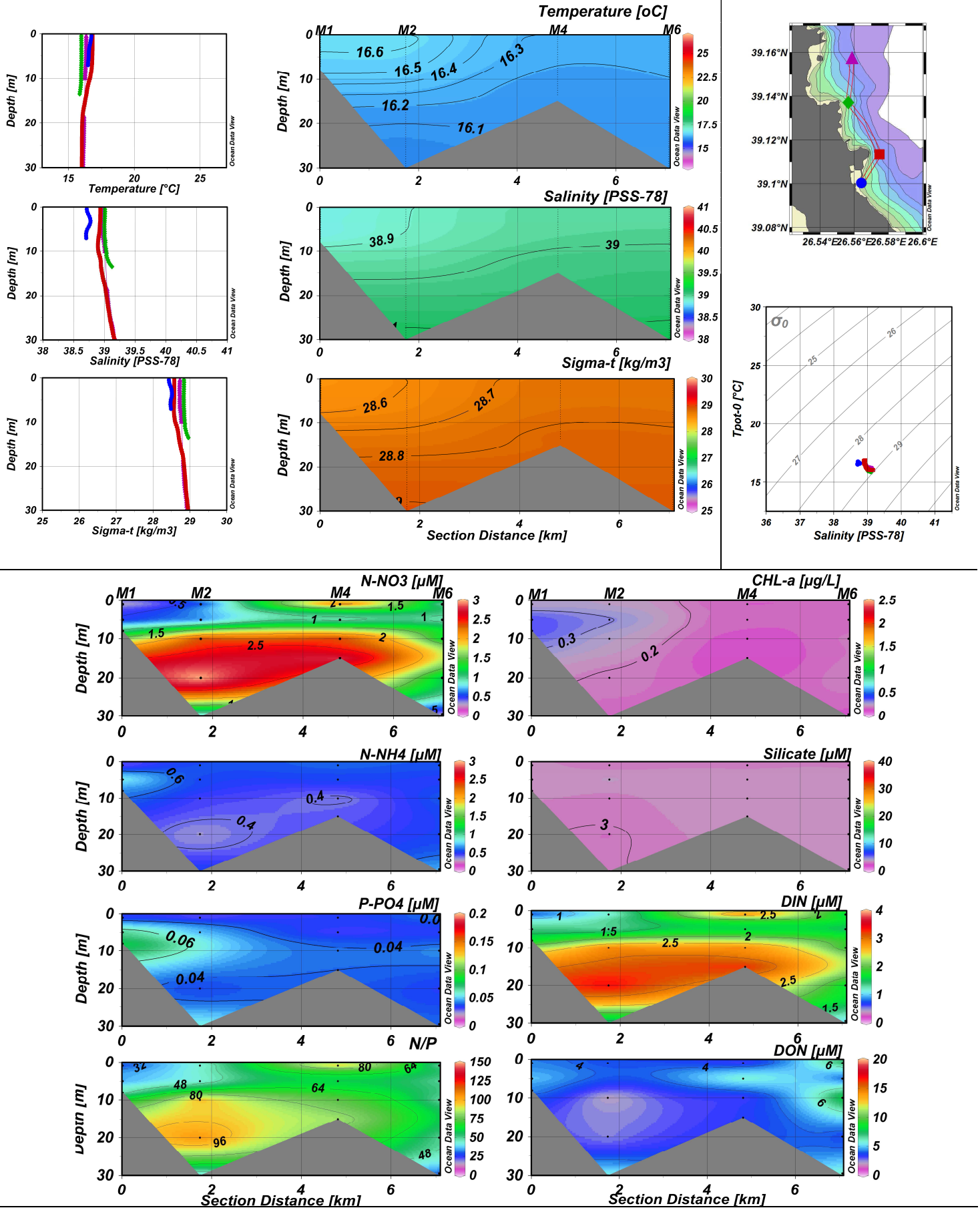
**Σχήμα Π6.2.** Δειγματοληψία **VK2-22 Αυγούστου 2000:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



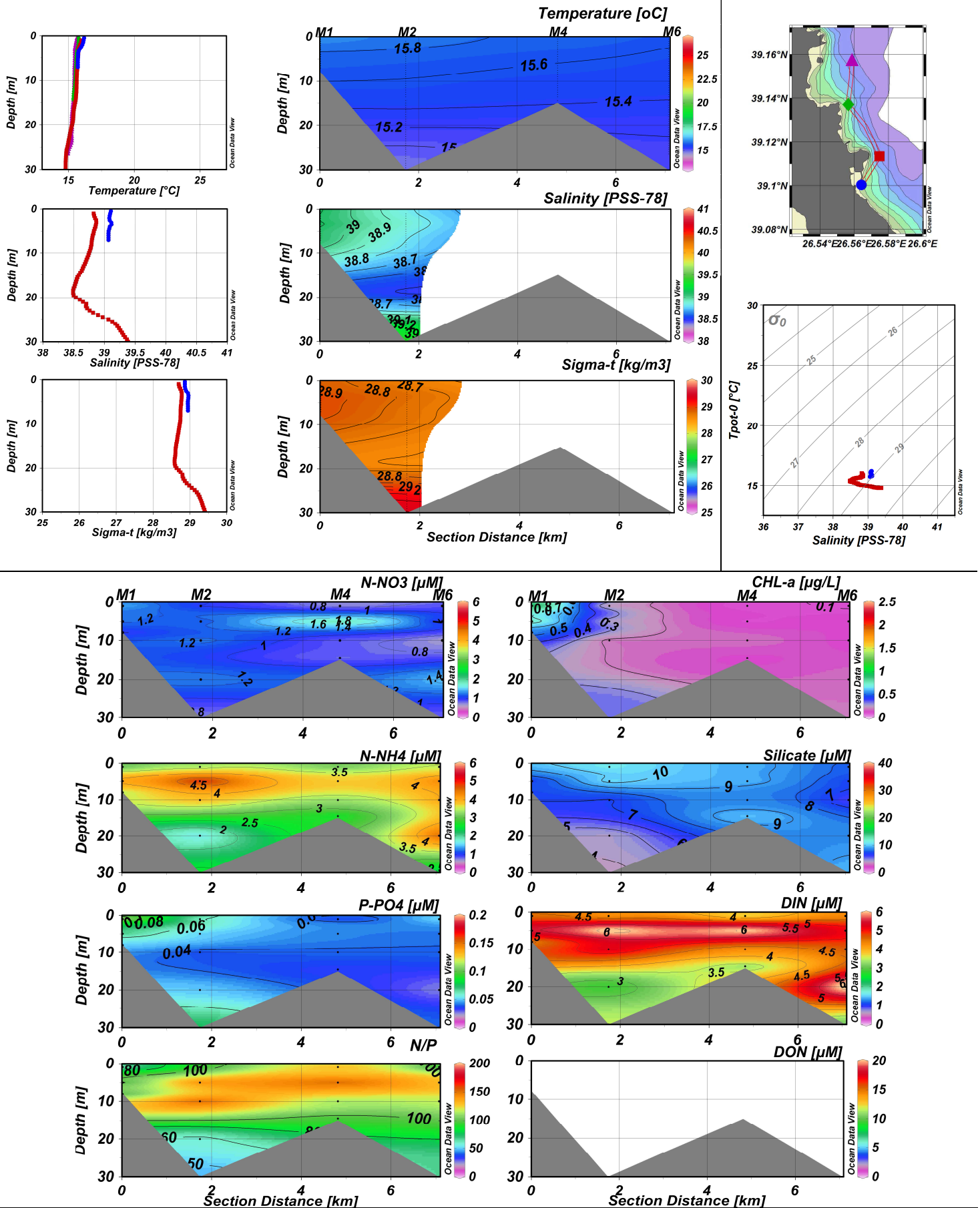
**Σχήμα Π6.3.** Δειγματοληψία **VK3 – 5 Σεπτεμβρίου 2000**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



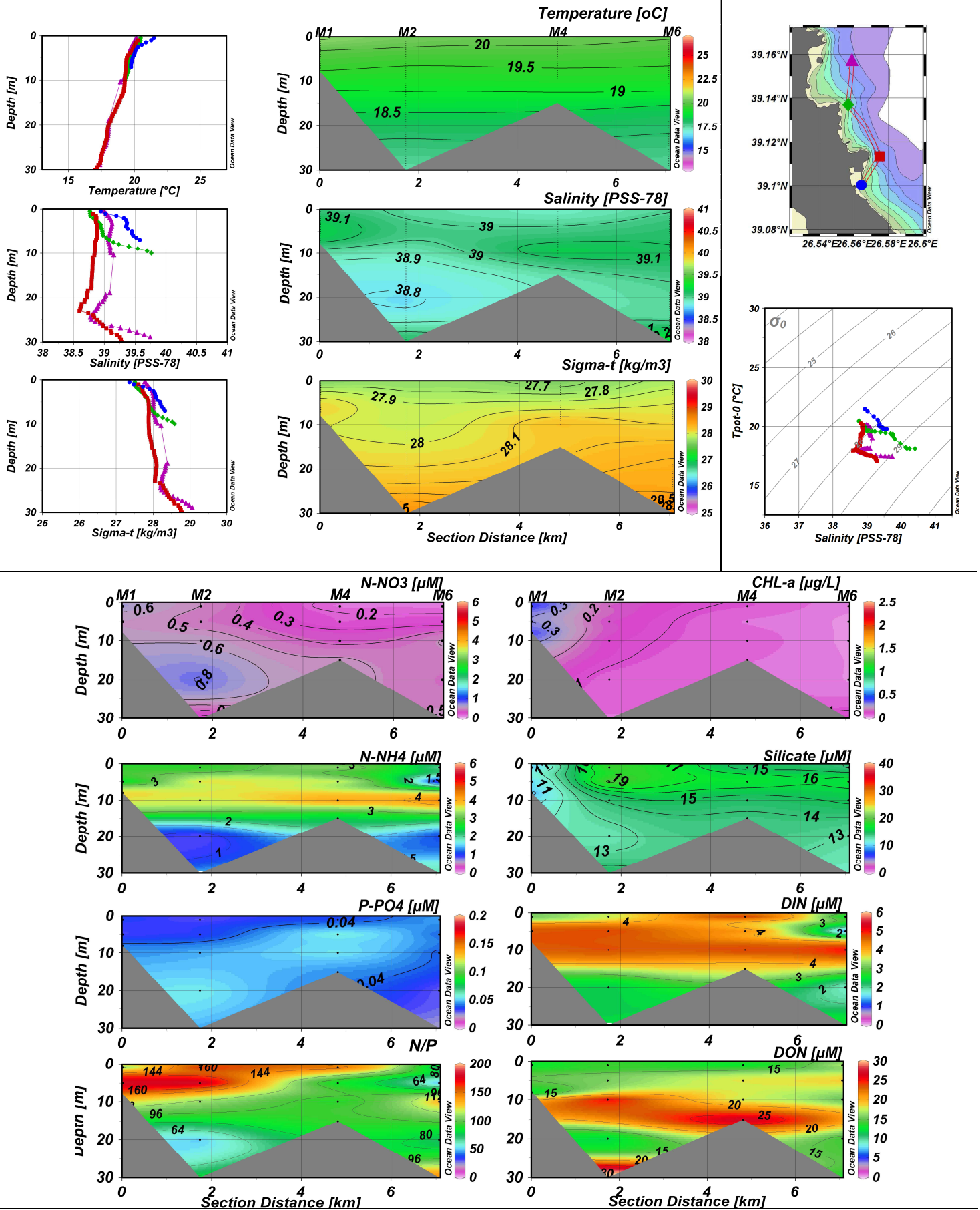
**Σχήμα Π6.4.** Δειγματοληψία **VK4 – 1 Νοεμβρίου 2000**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



**Σχήμα Π6.5.** Δειγματοληψία **VK5 – 14 Δεκεμβρίου 2000**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).

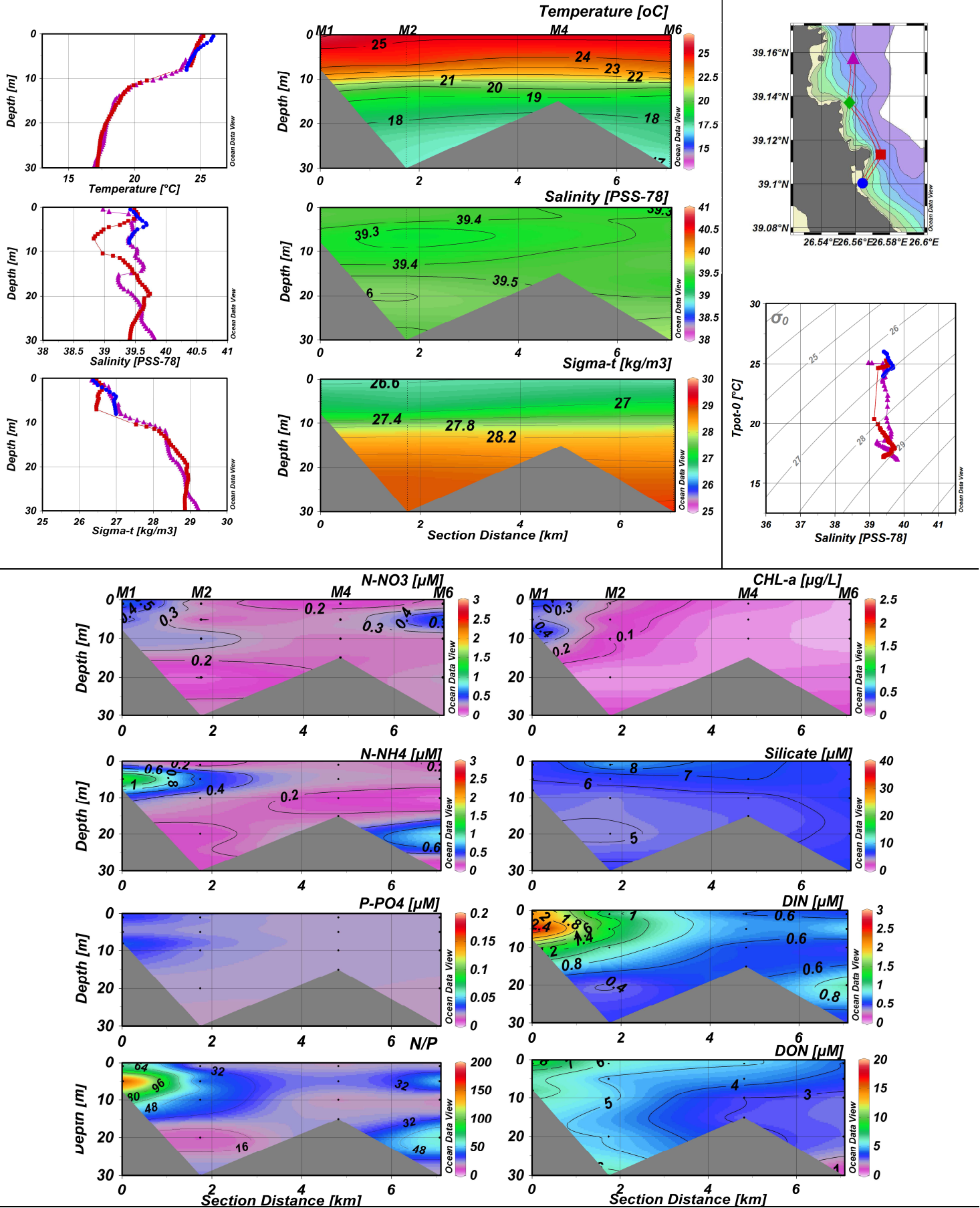


**Σχήμα Π6.6.** Δειγματοληψία **VK6 – 24 Μαρτίου 2001:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).

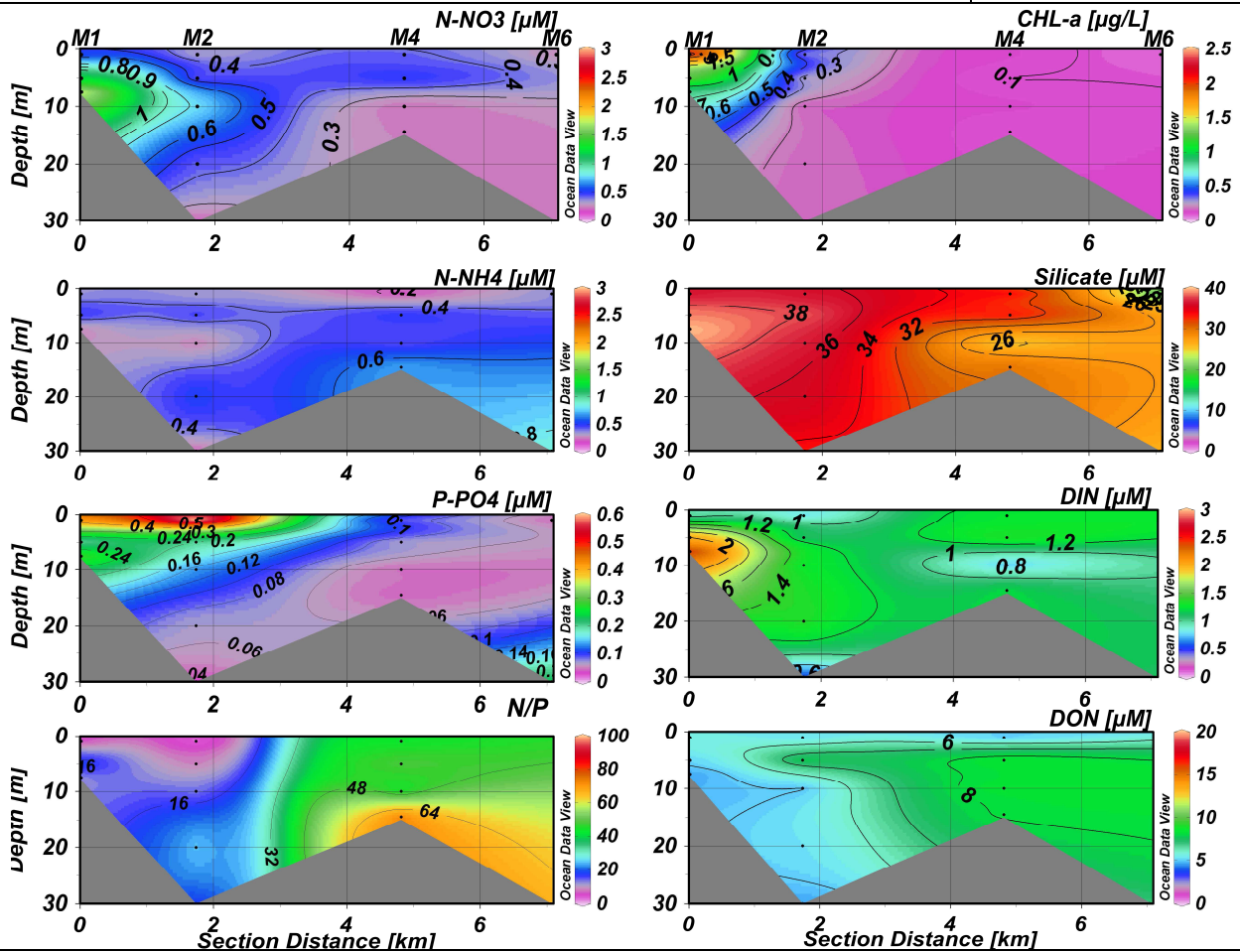
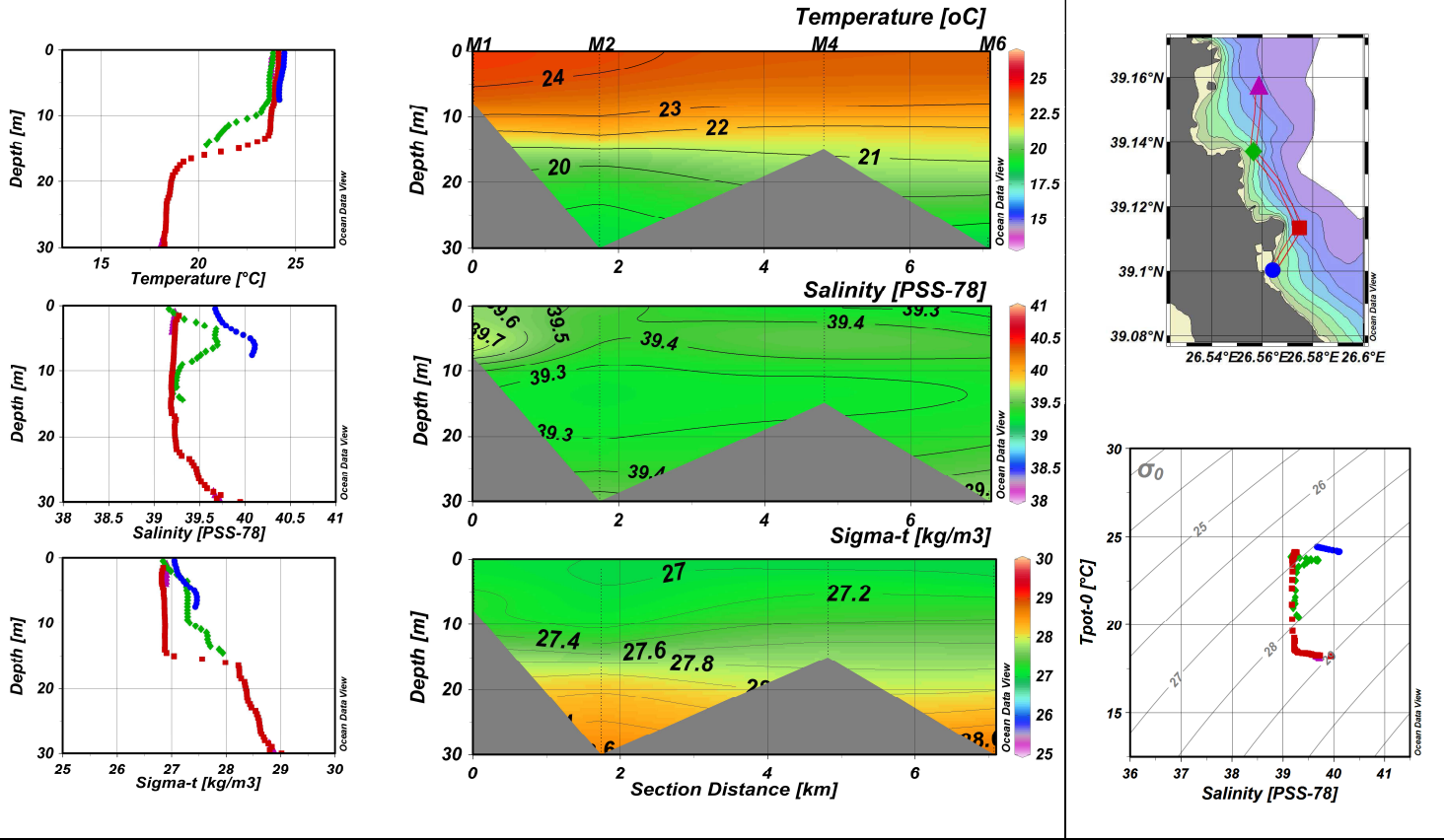


**Σχήμα Π6.7.** Δειγματοληψία **VK7 – 30 Μαΐου 2001:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).

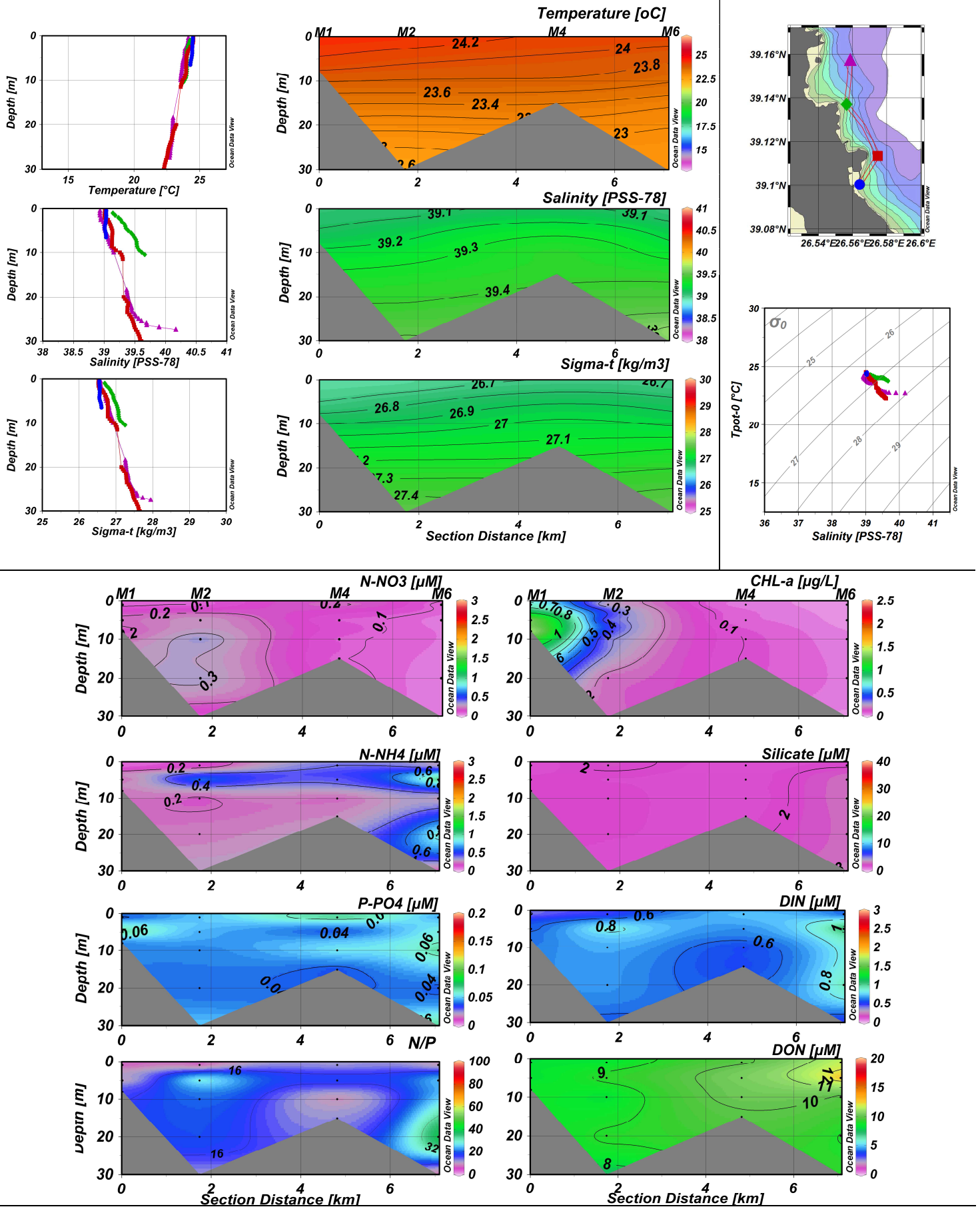




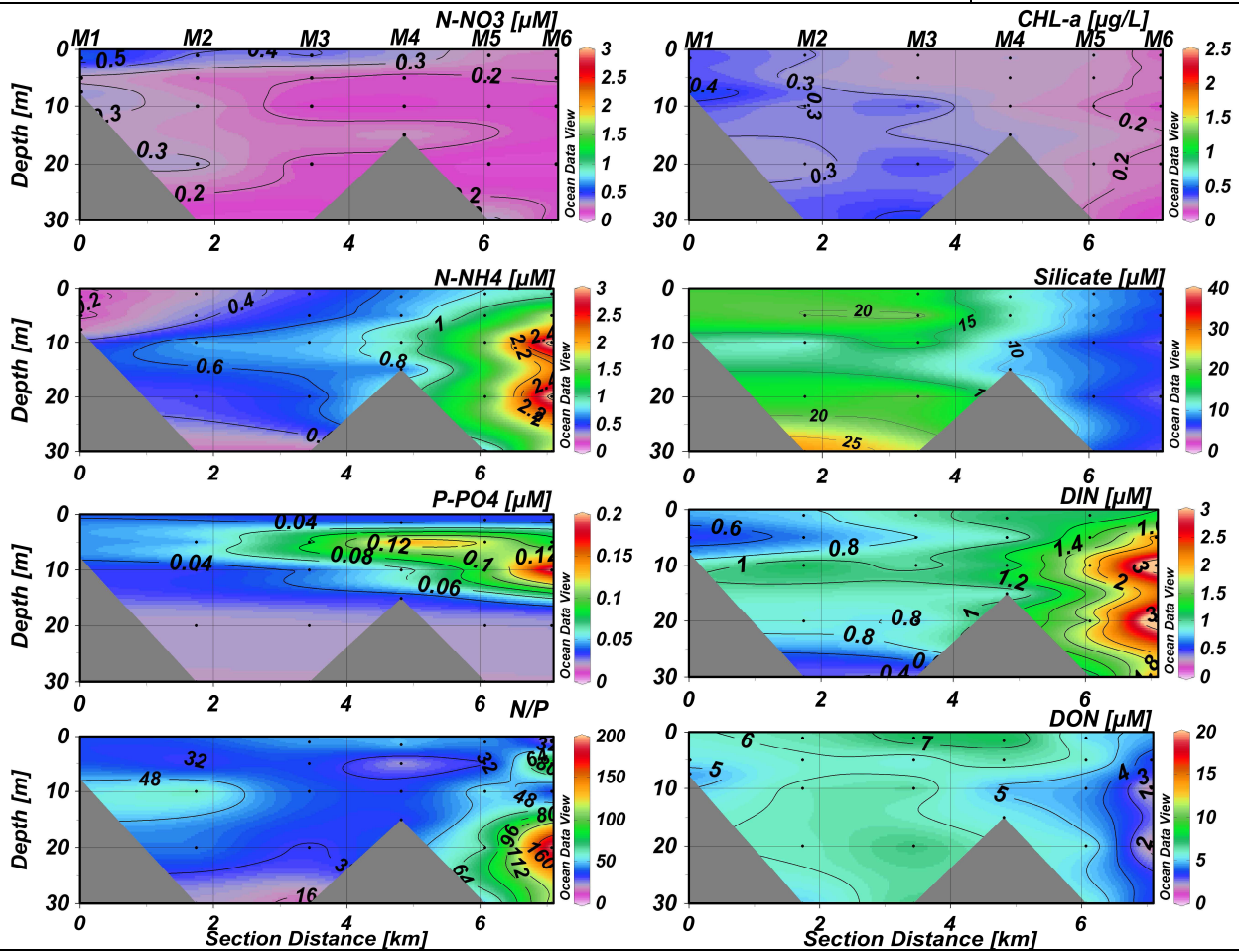
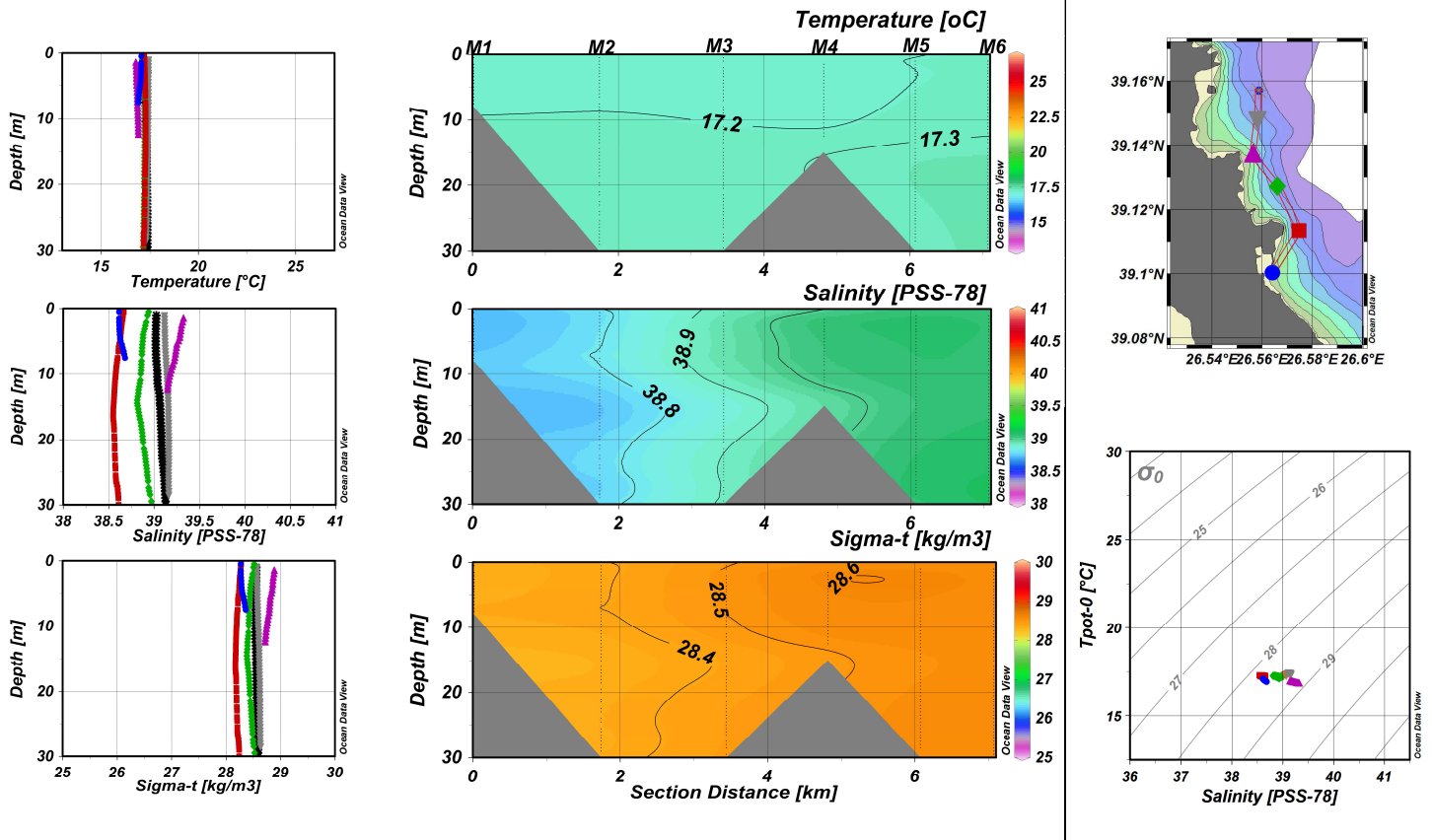
**Σχήμα Π6.8.** Δειγματοληψία **VK8 – 18 Ιουλίου 2001**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



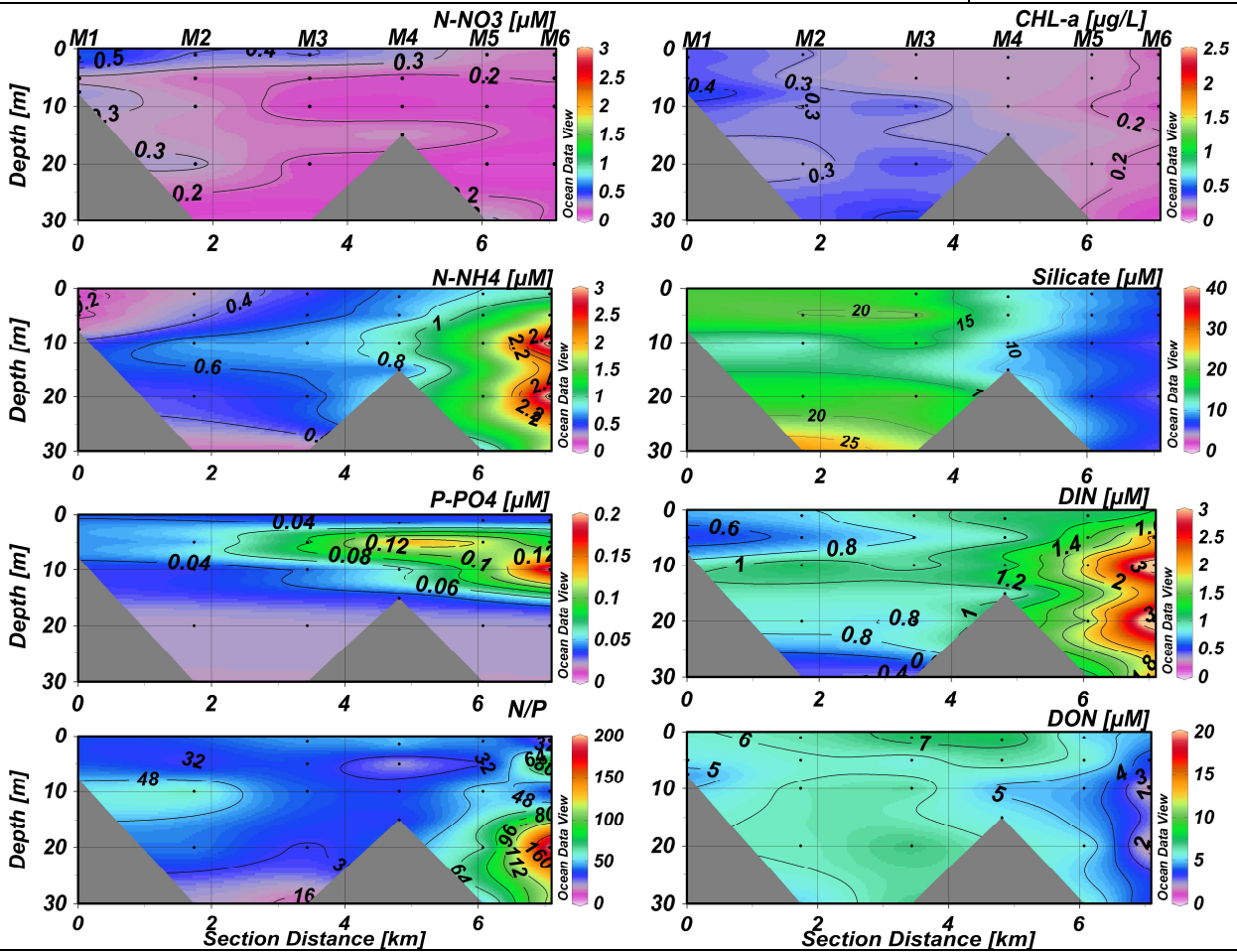
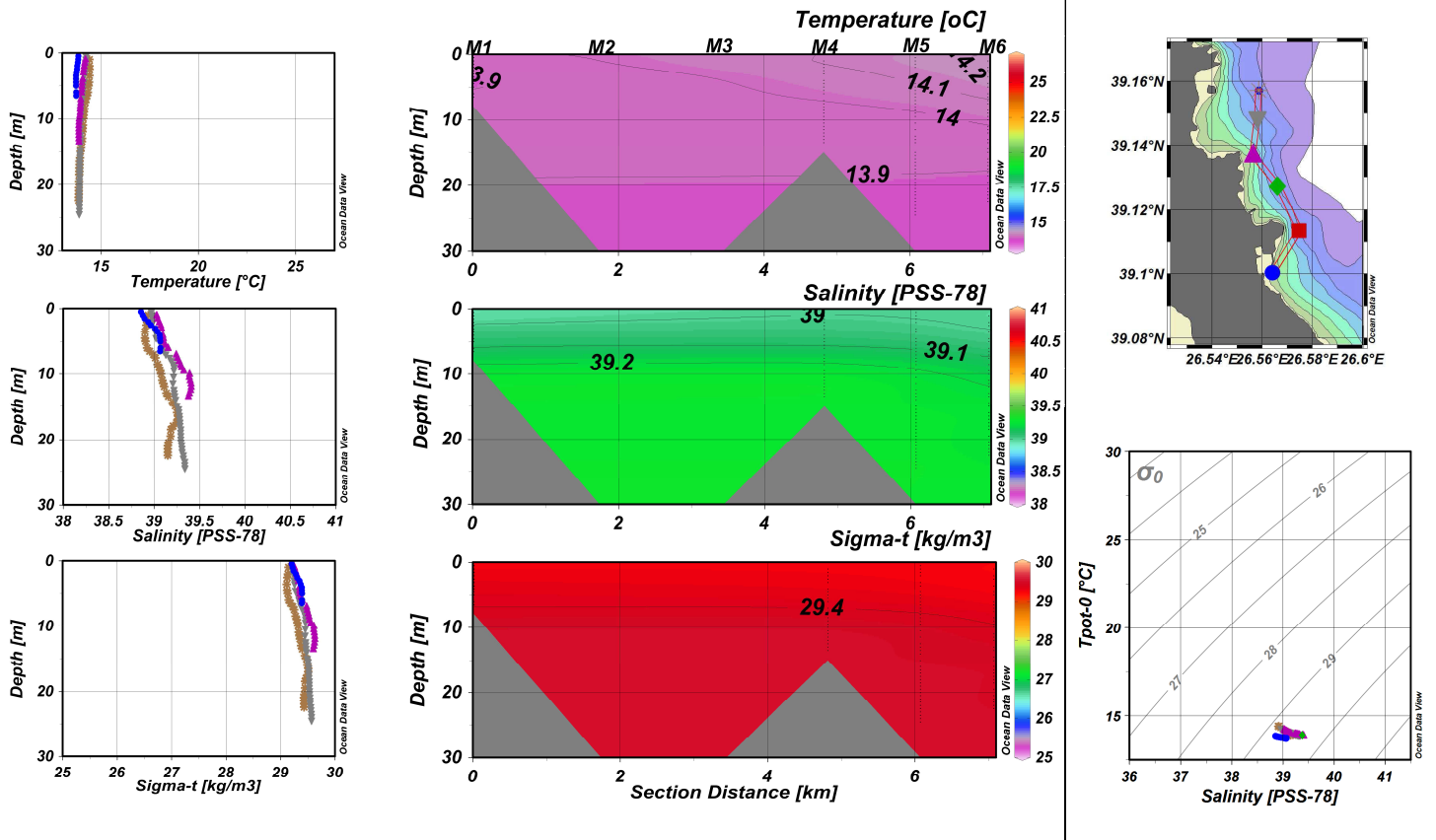
**Σχήμα Π6.9.** Δειγματοληψία **VK9 – 31 Αυγούστου 2001:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



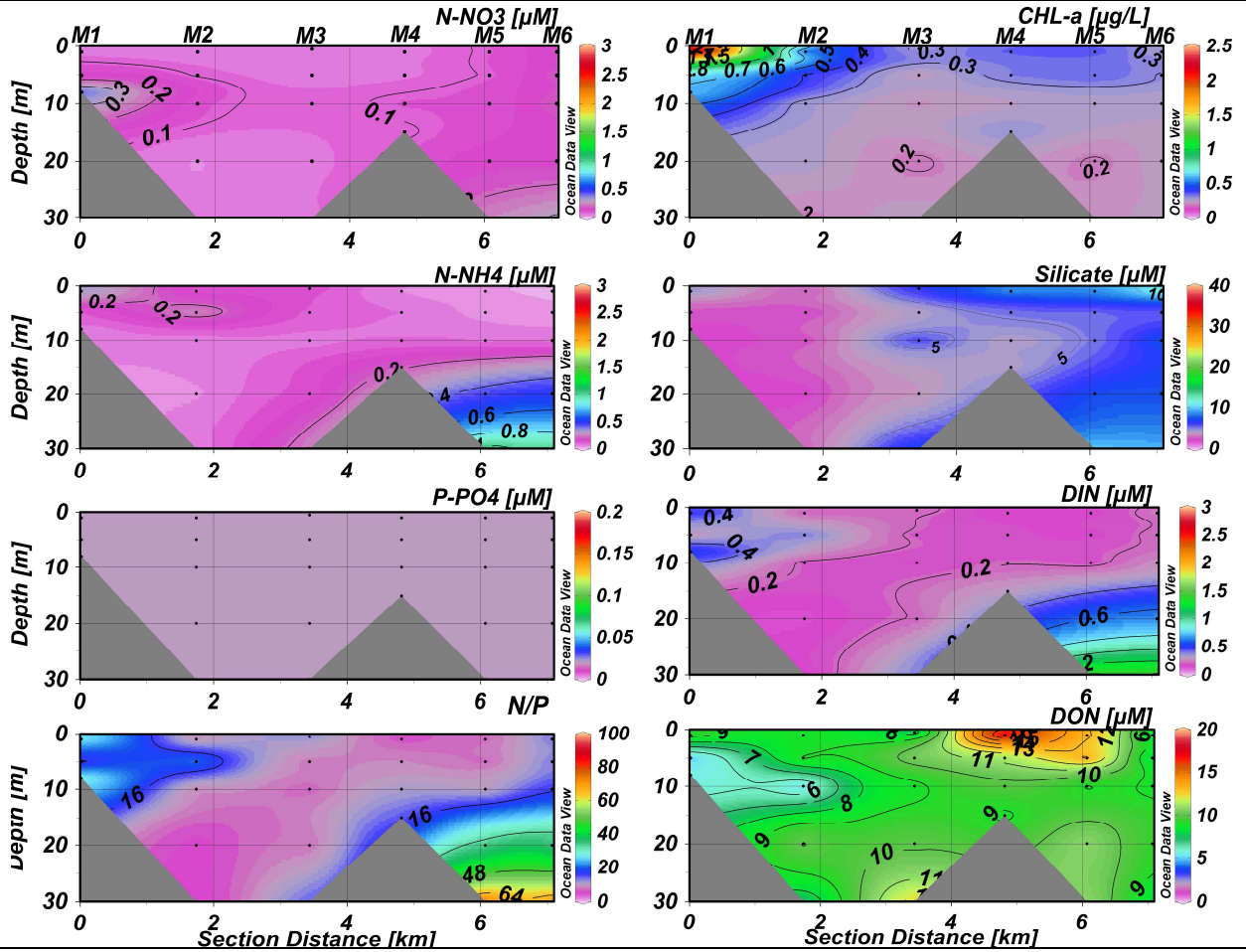
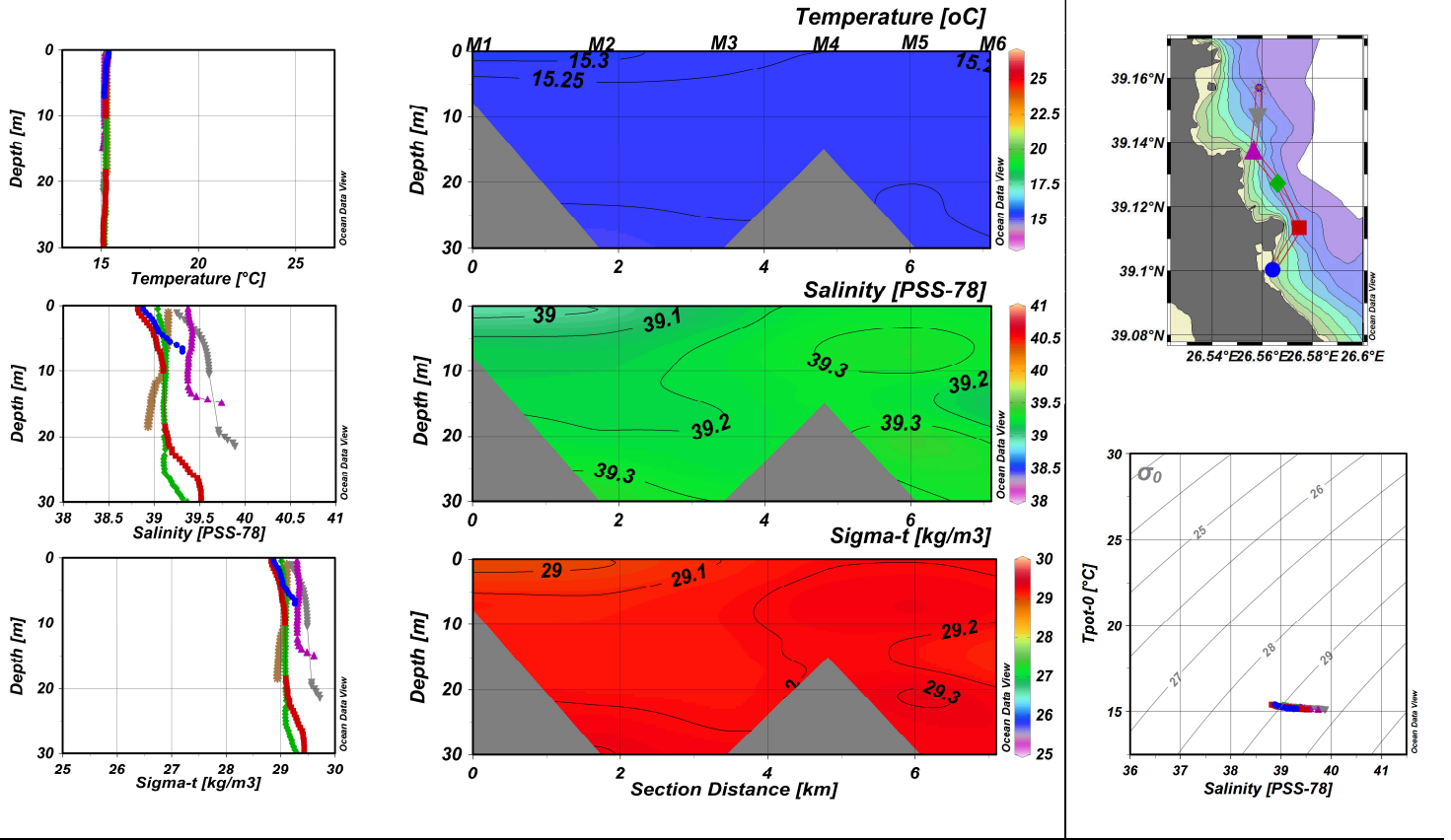
**Σχήμα Π6.10.** Δειγματοληψία **VK10 – 20 Σεπτεμβρίου 2001:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



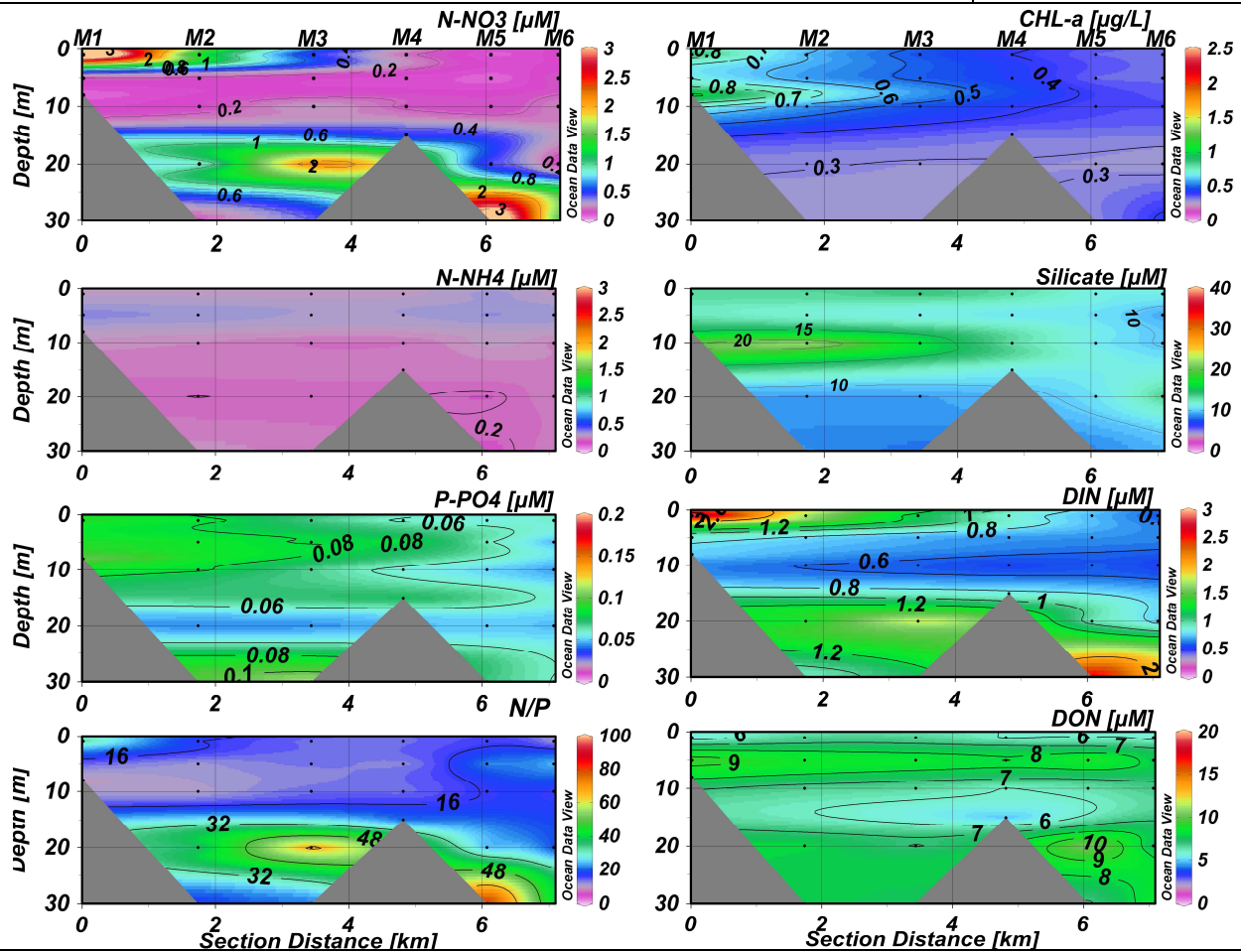
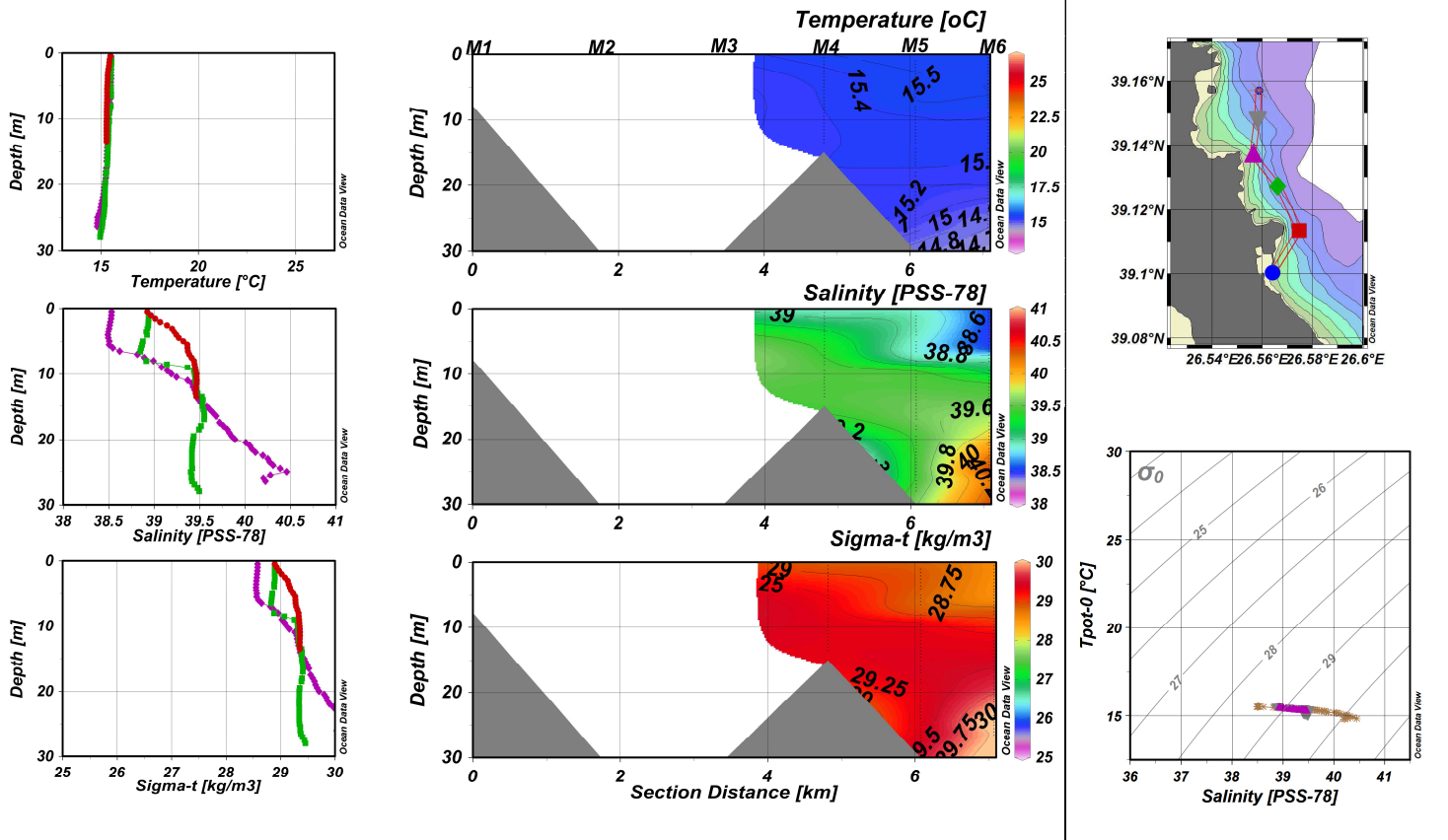
**Σχήμα Π6.11.** Δειγματοληψία **VK11 – 22 Νοεμβρίου 2001:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



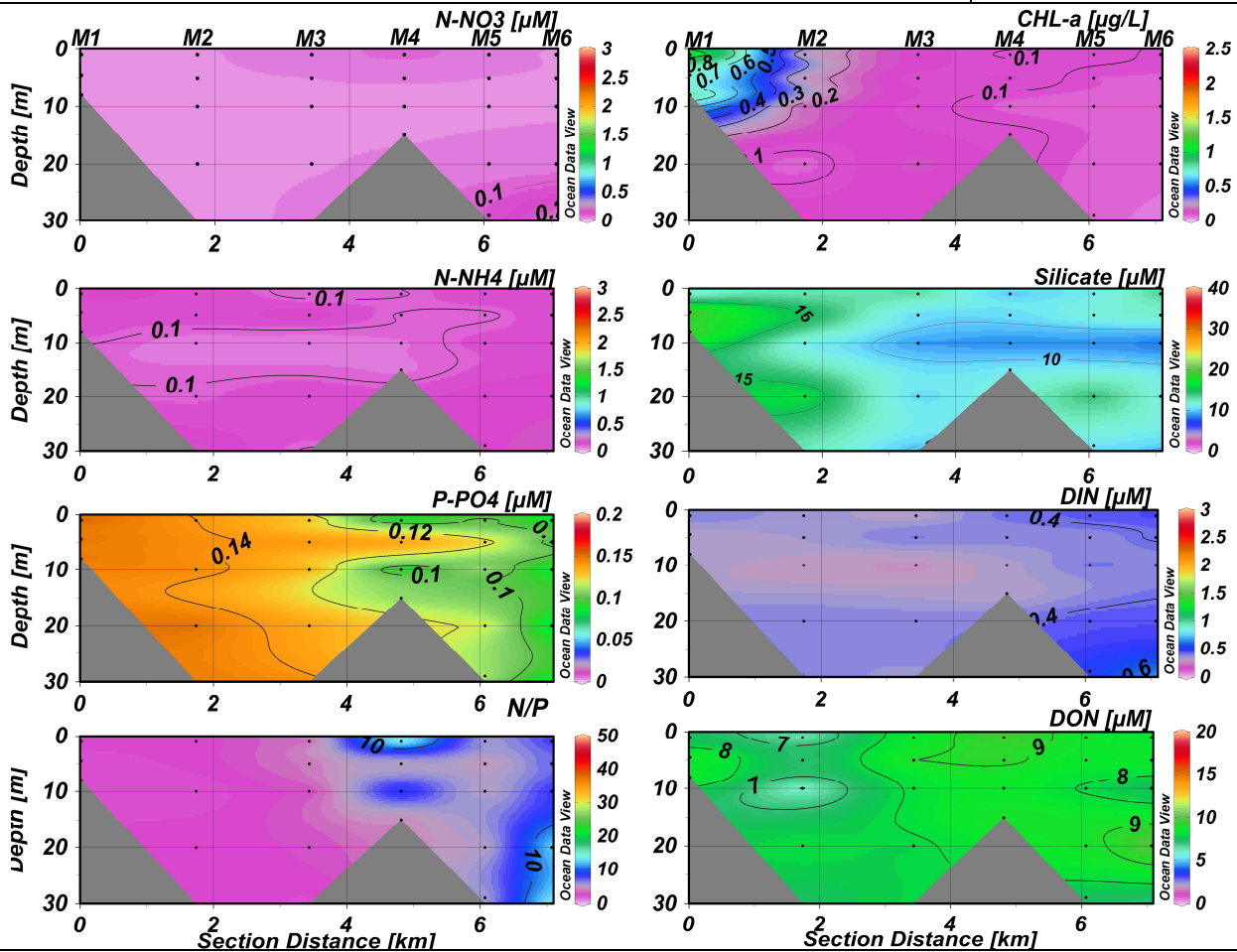
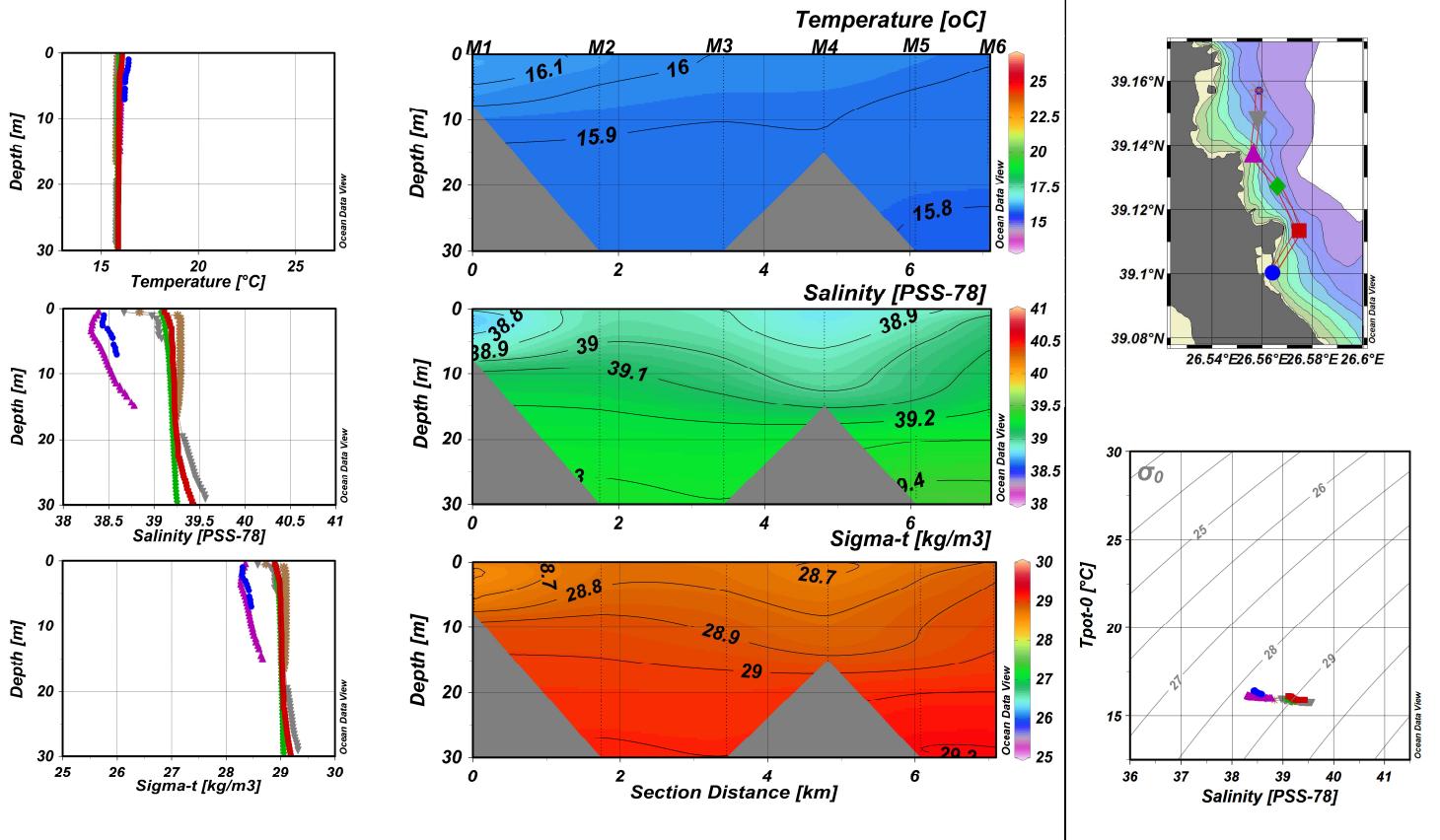
**Σχήμα Π6.12.** Δειγματοληψία **VK12 – 22 Ιανουαρίου 2002:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



**Σχήμα Π6.13.** Δειγματοληψία **VK13 – 4 Μαρτίου 2002**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).

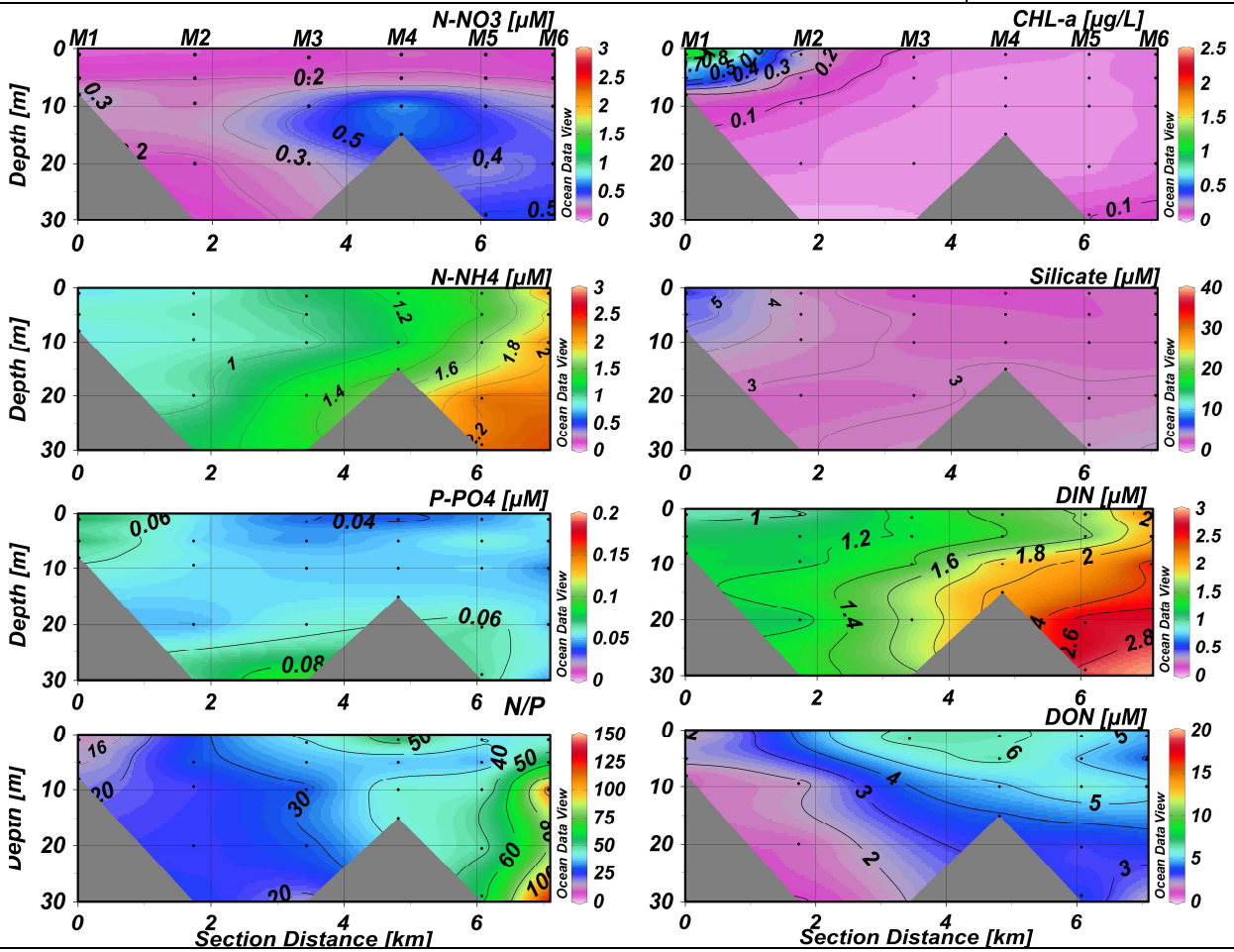
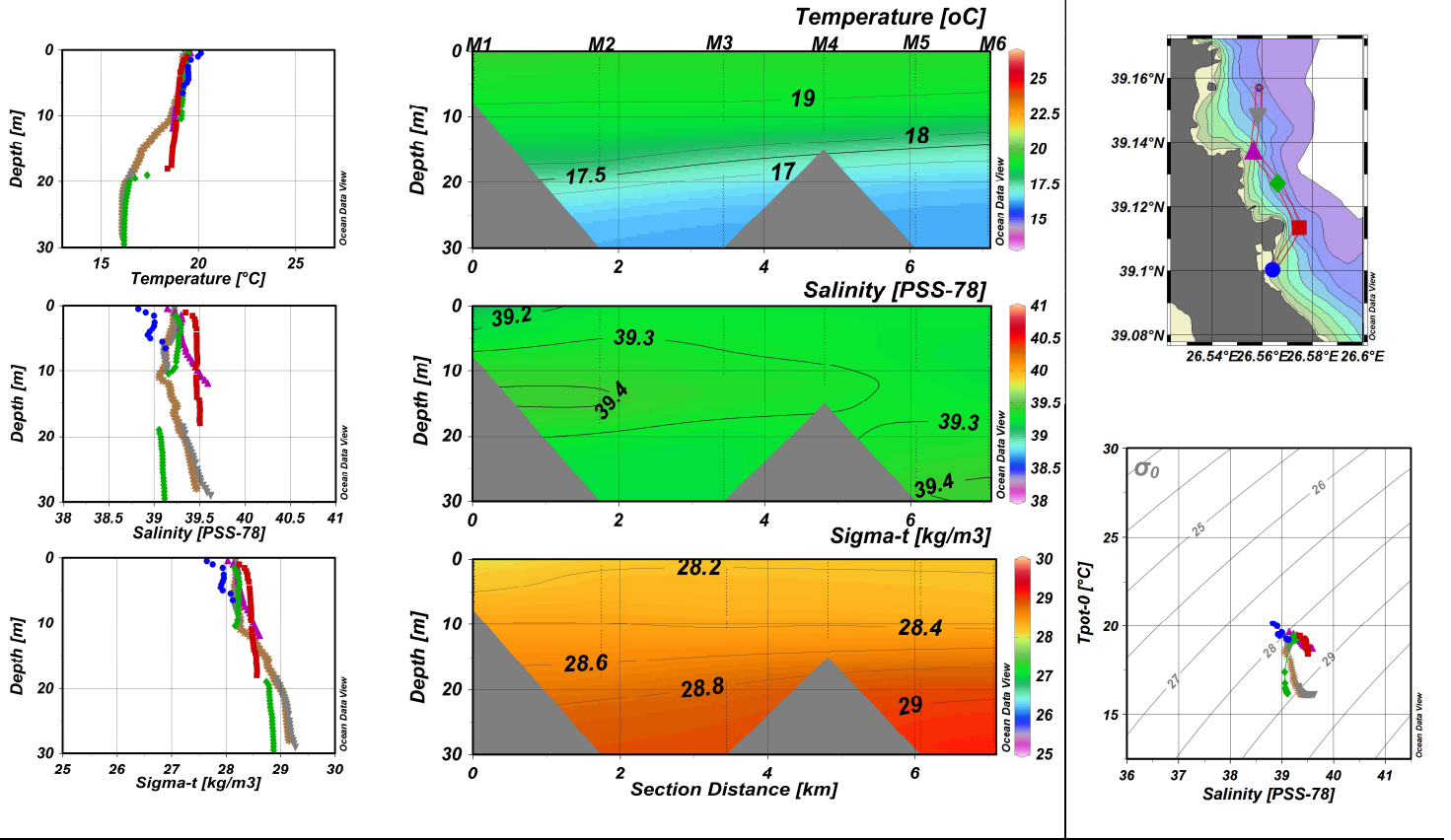


**Σχήμα Π6.14.** Δειγματοληψία **VK14 – 3 Απριλίου 2002**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).

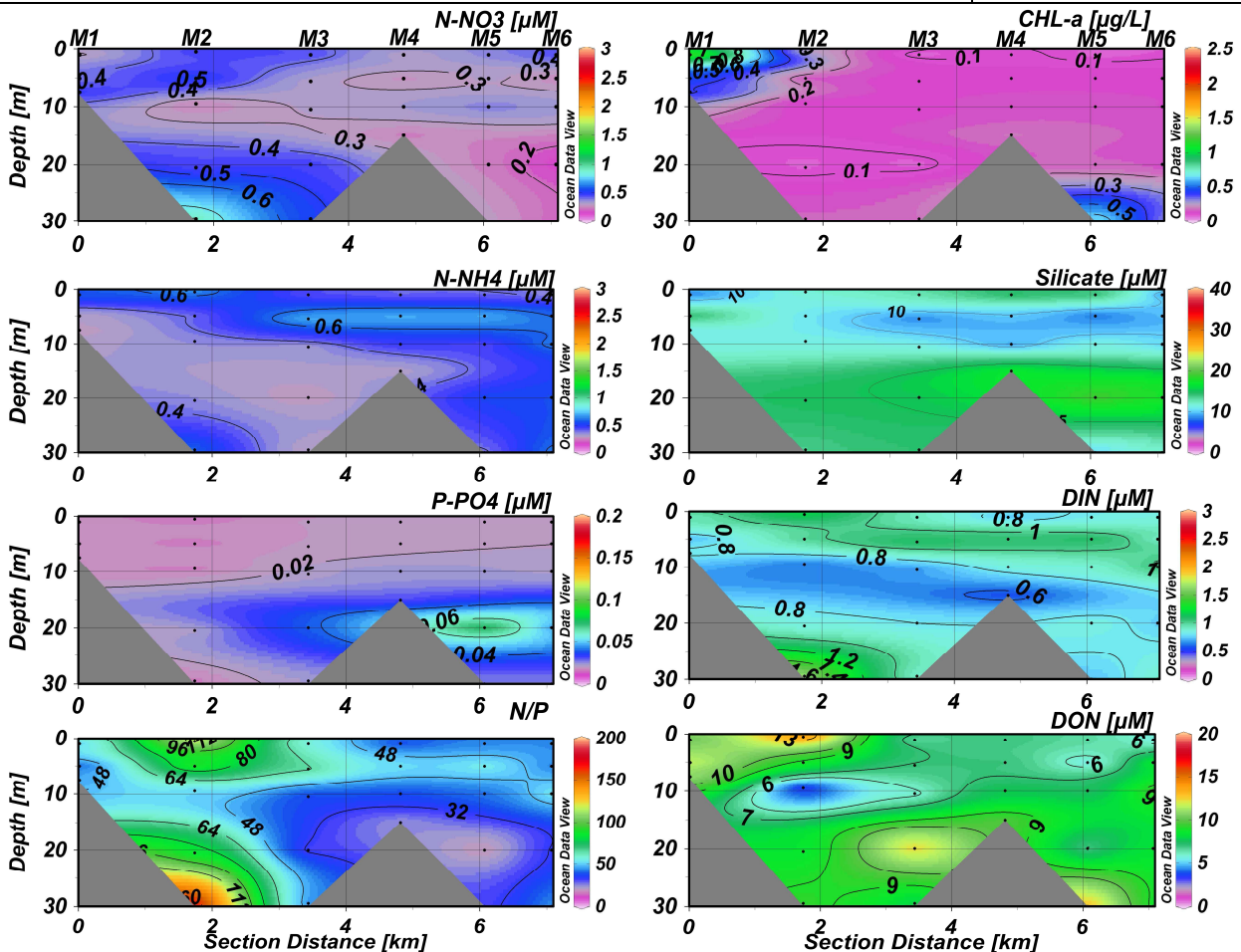
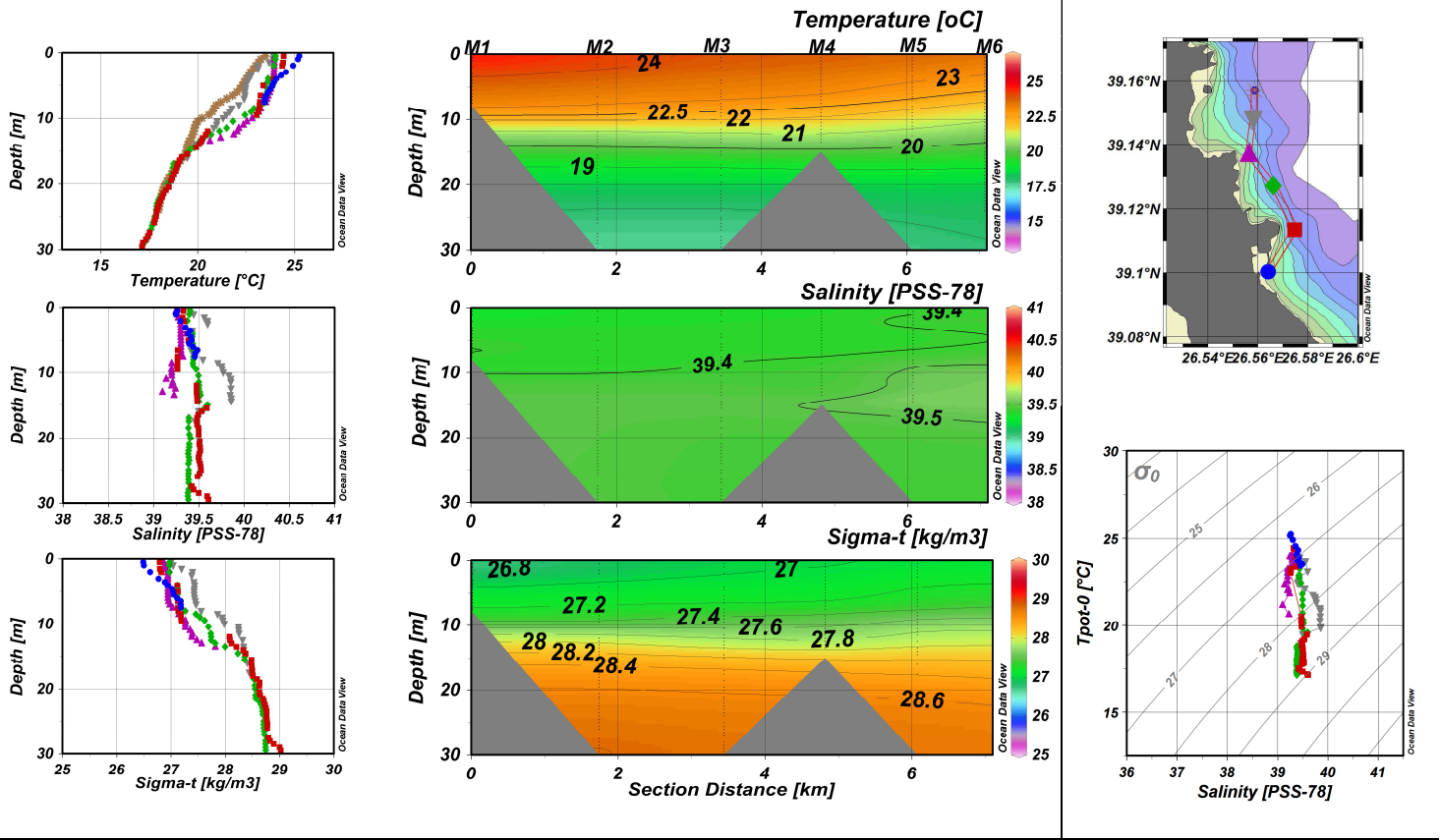


**Σχήμα Π6.15.** Δειγματοληψία **VK15 – 25 Απριλίου 2002:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).

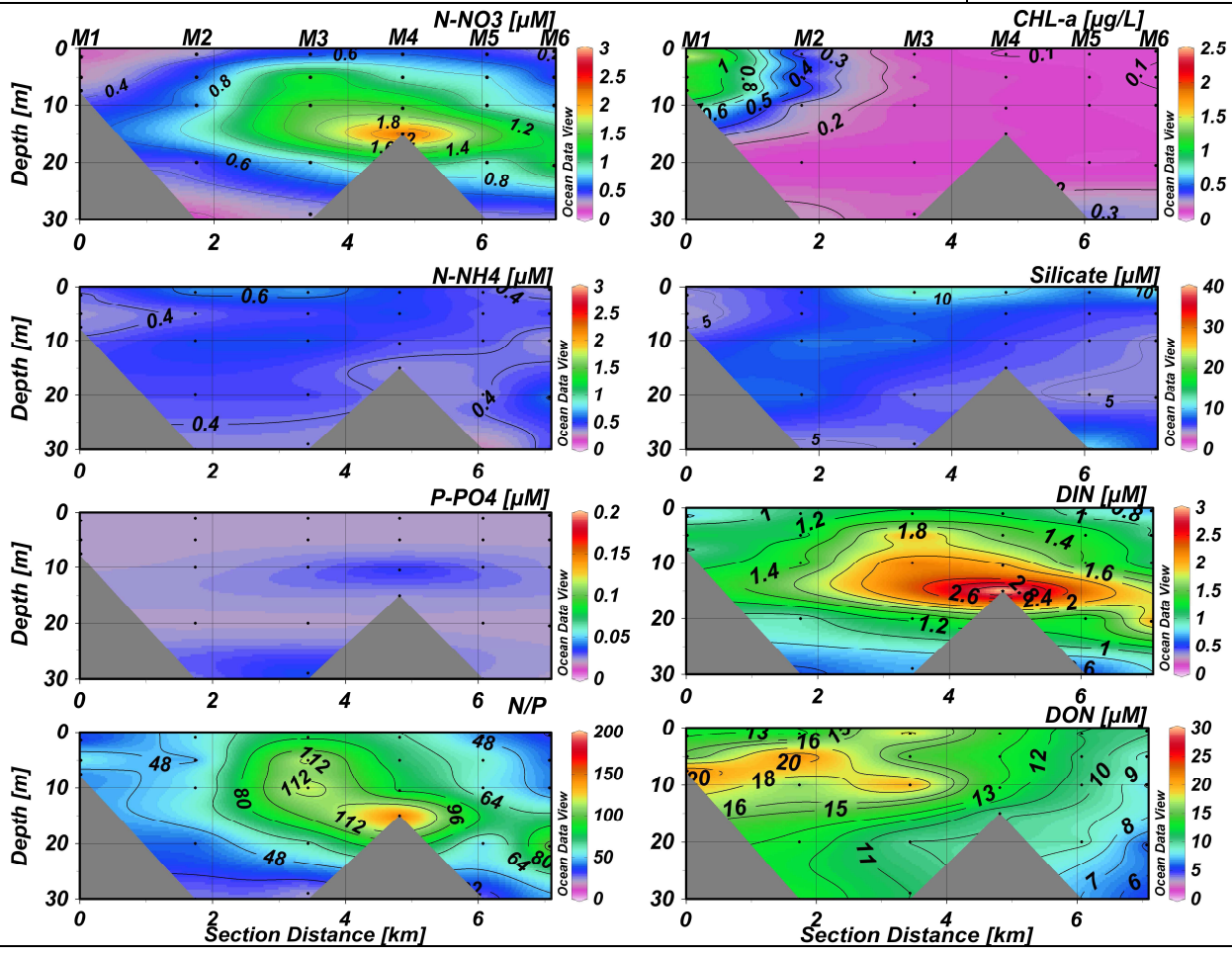
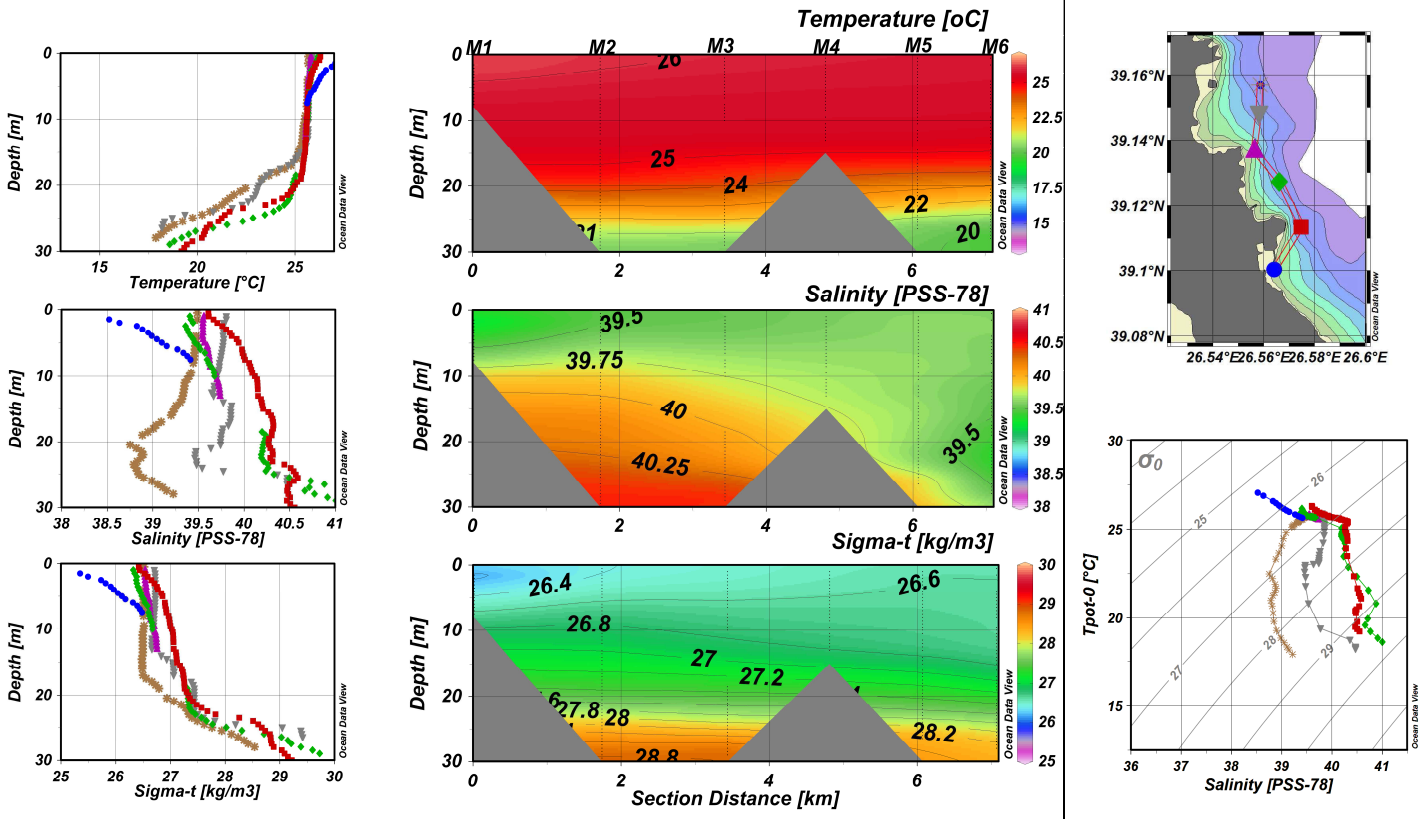




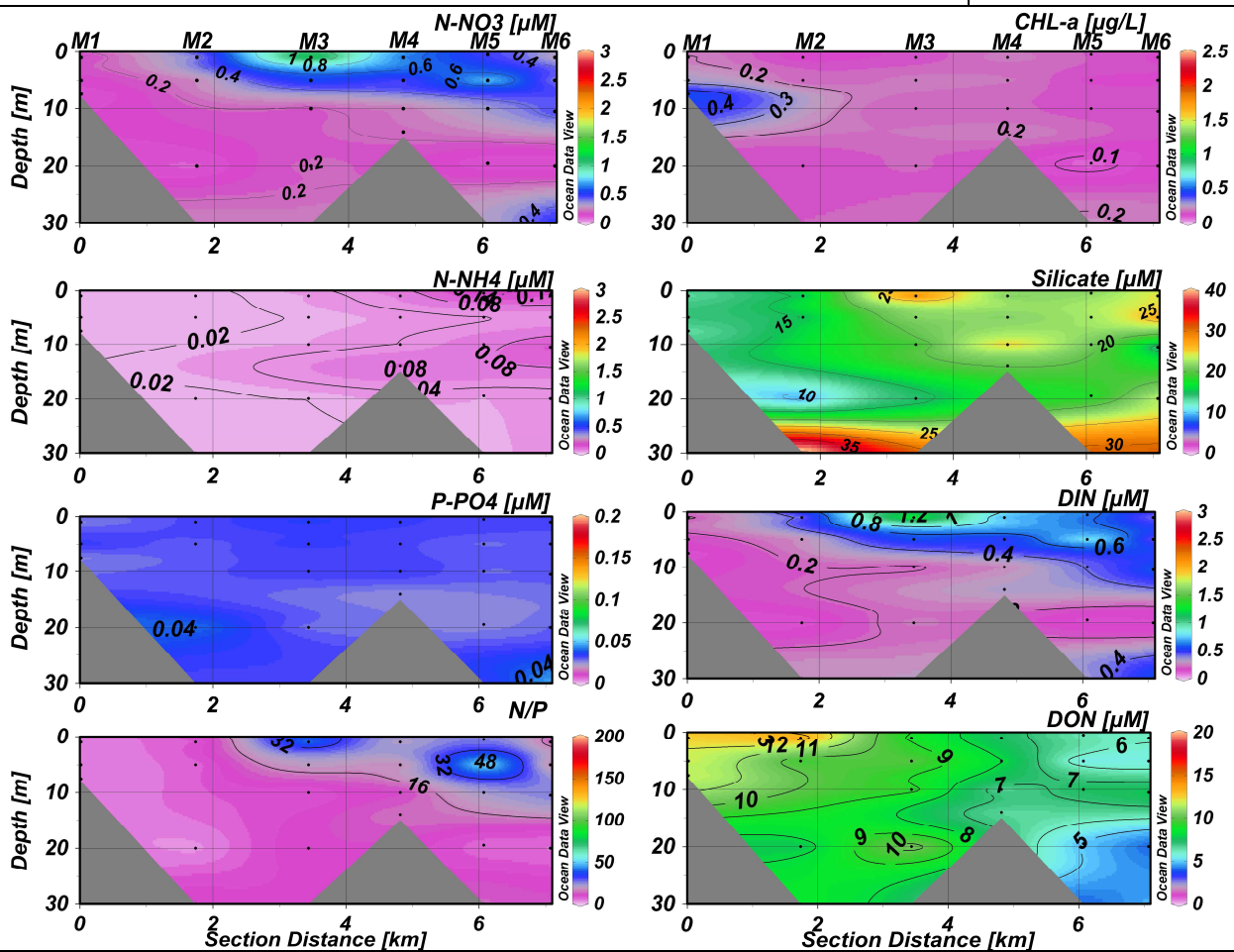
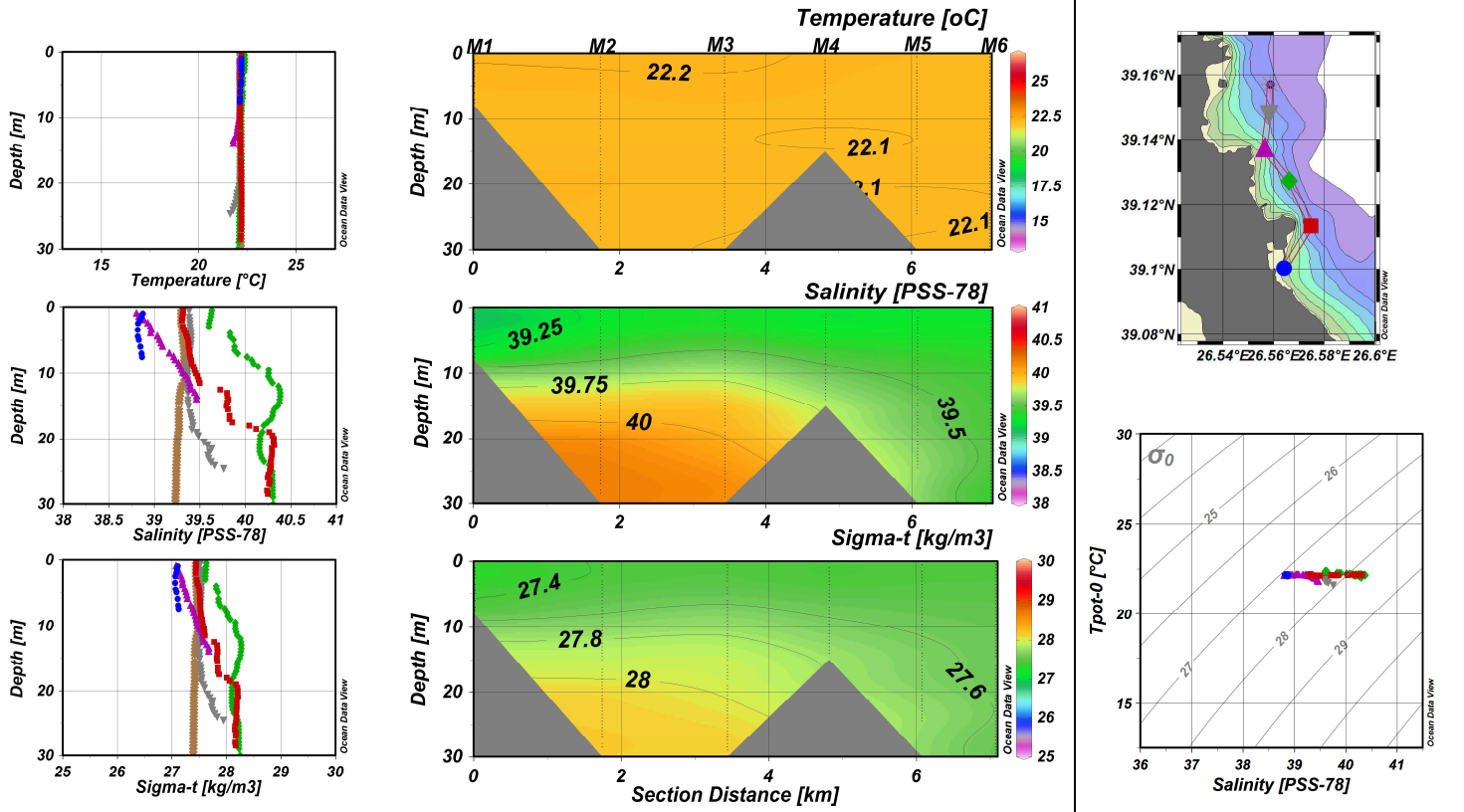
**Σχήμα Π6.16.** Δειγματοληψία **VK16 – 24 Μαΐου 2002:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



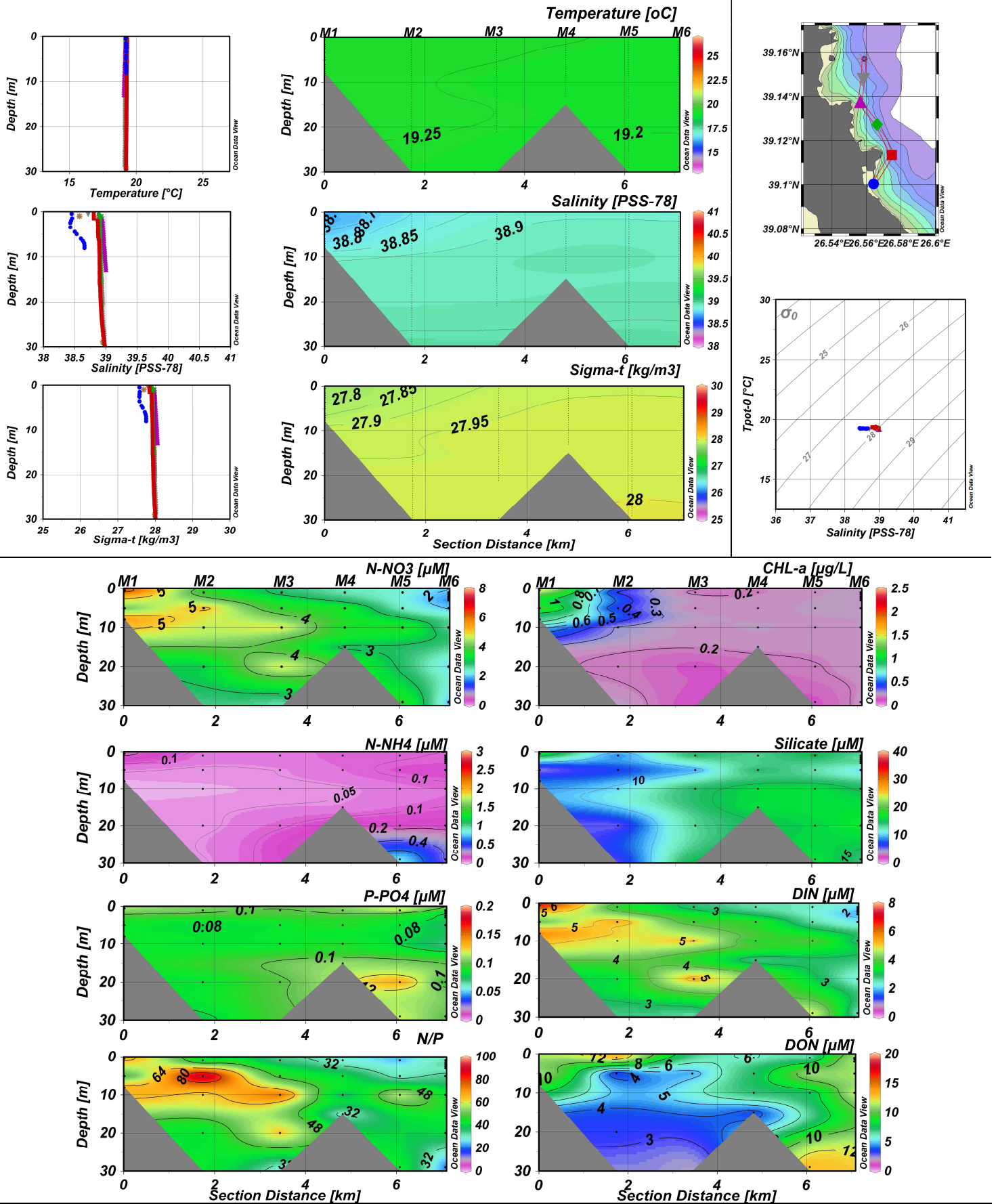
**Σχήμα Π6.17.** Δειγματοληψία **VK17 – 1** Ιουλίου 2002: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε μM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (μg/L).



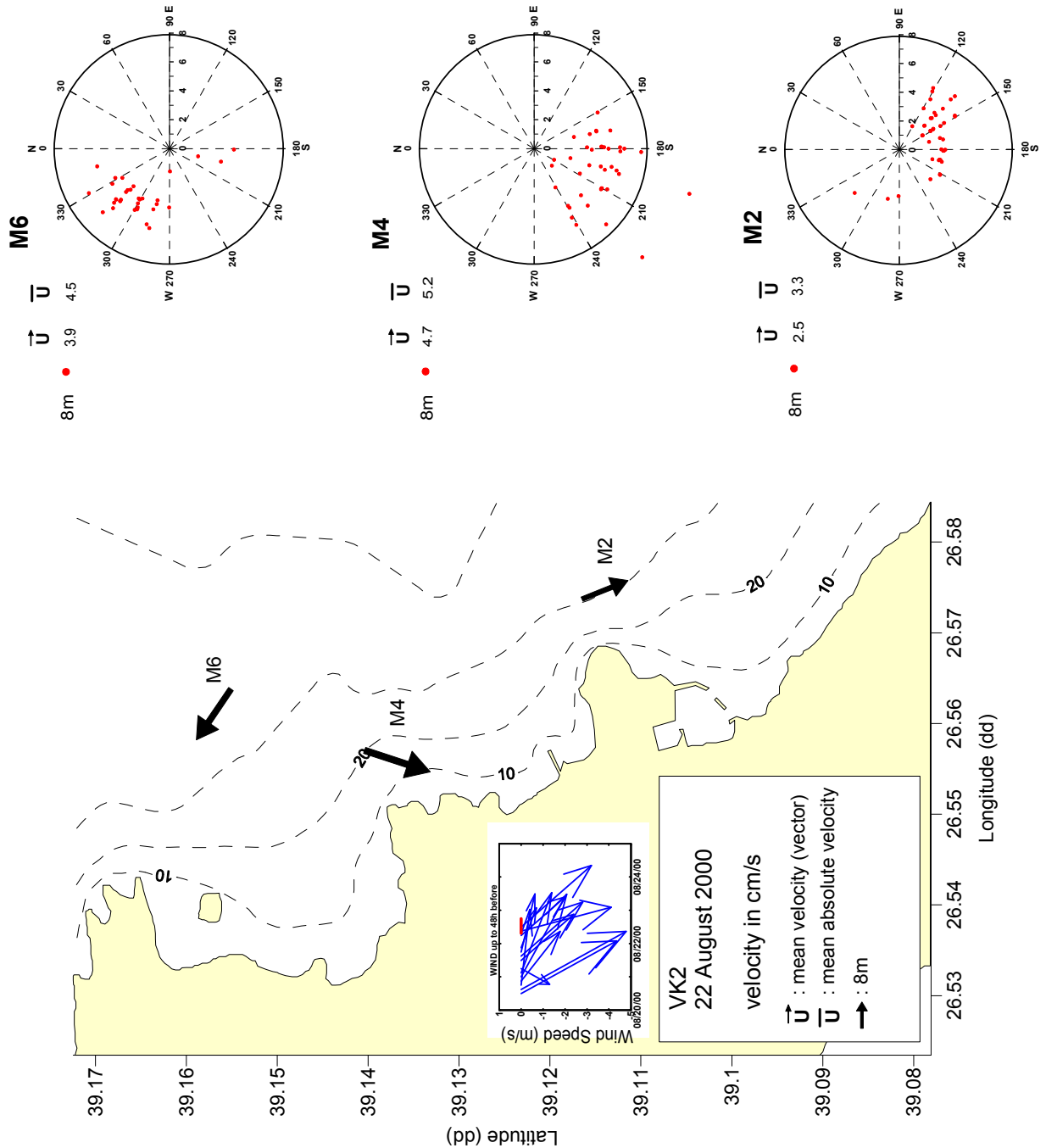
**Σχήμα Π6.18.** Δειγματοληψία **VK18 – 30 Ιουλίου 2002**: κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



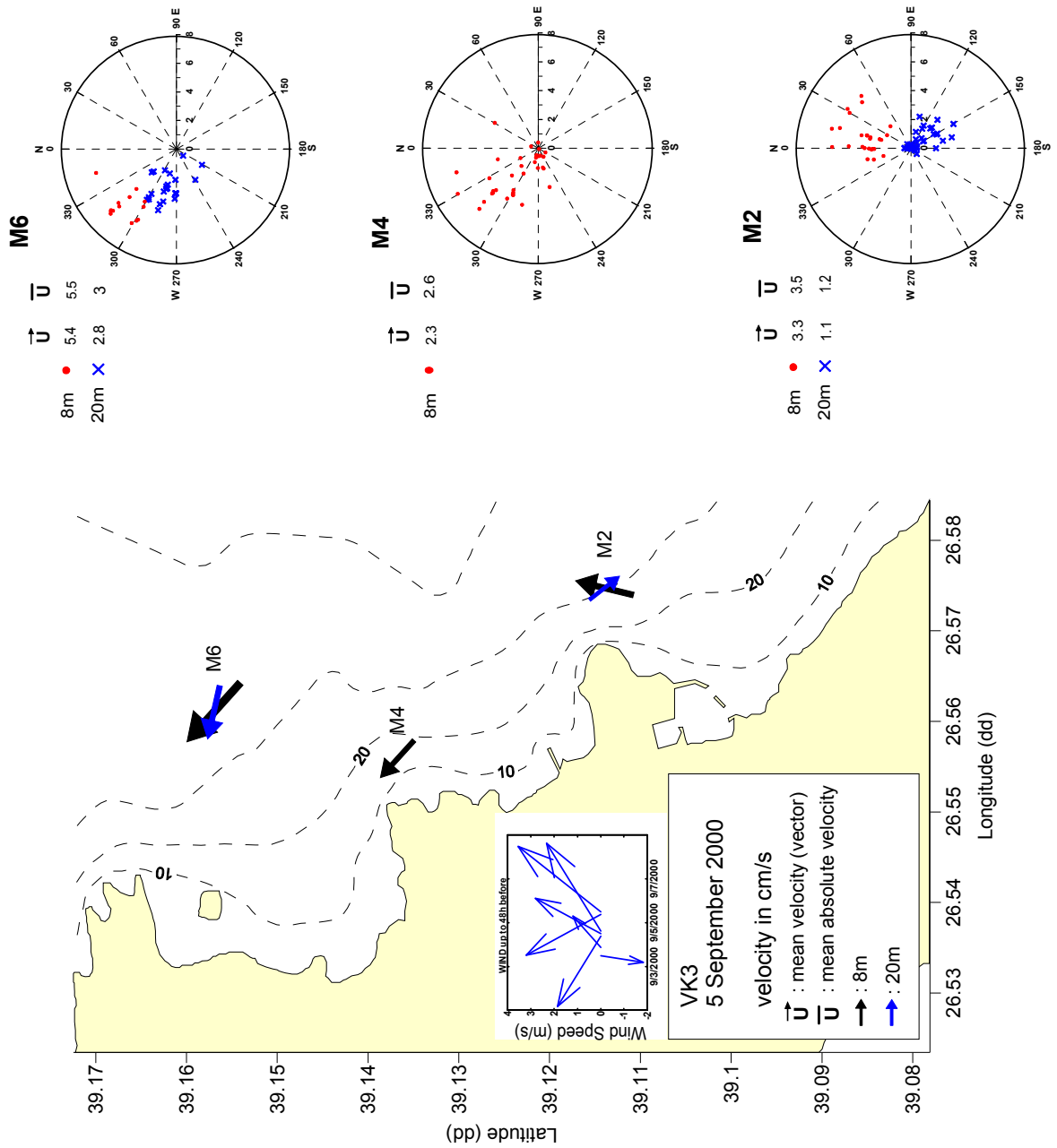
**Σχήμα Π6.19.** Δειγματοληψία **VK19 – 4 Οκτωβρίου 2002:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



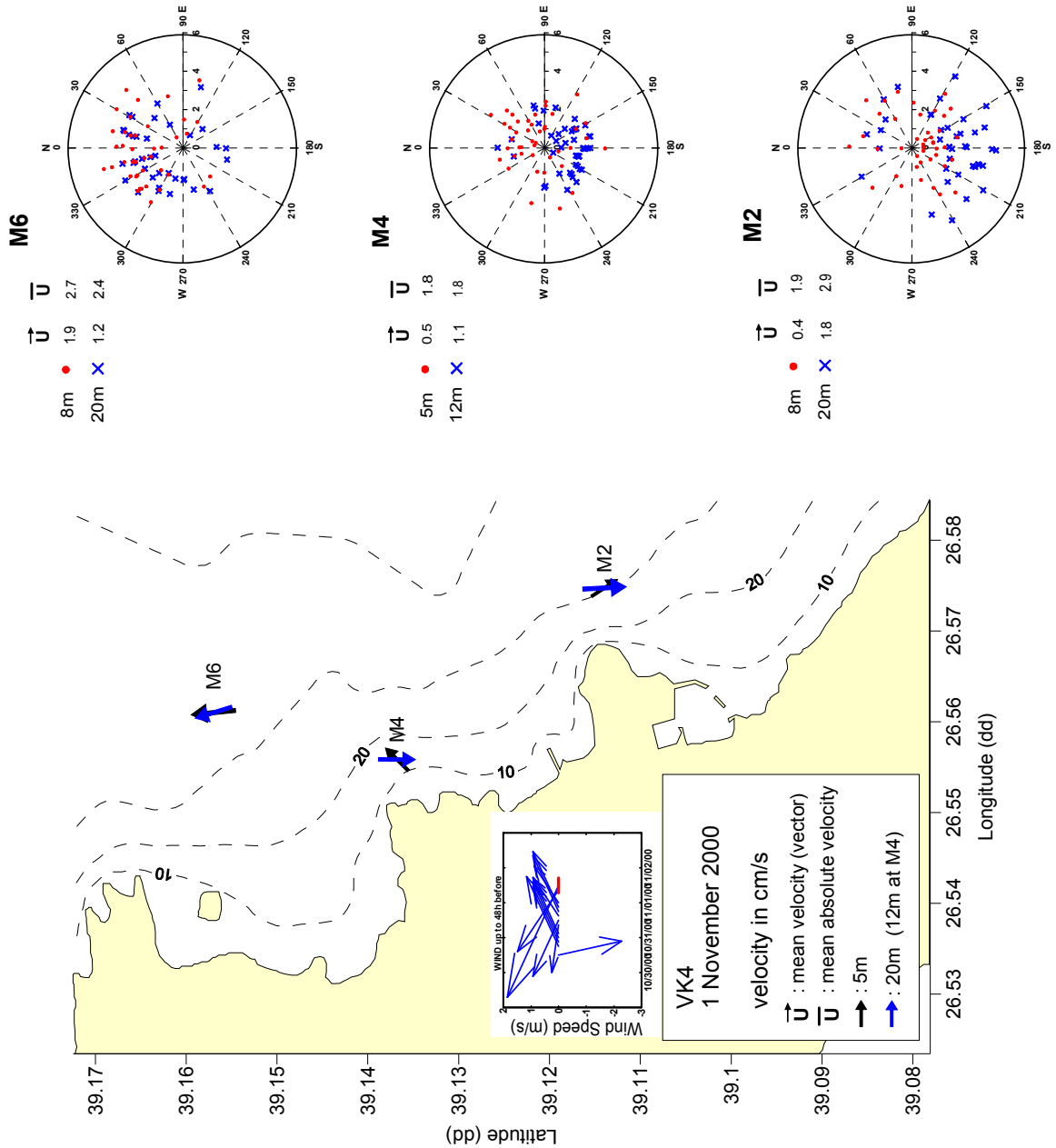
**Σχήμα Π6.20.** Δειγματοληψία **VK20 – 20 Νοεμβρίου 2002:** κατακόρυφες κατανομές (προφίλ) θερμοκρασίας (°C), αλατότητας (PSS-78) και πυκνότητας (sigma-t, kg/m<sup>3</sup>) στους σταθμούς δειγματοληψίας και αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Κατά μήκος της καμπύλης που ορίζουν οι σταθμοί M1-M6 παρουσιάζονται κάθετες τομές θερμοκρασίας, αλατότητας, sigma-t, συγκεντρώσεων (σε µM) νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών, πυριτικών αλάτων, διαλυμένου ανόργανου αζώτου (DIN), διαλυμένου οργανικού αζώτου (DON), λόγου ανόργανου αζώτου προς φωσφόρο (N/P) και χλωροφύλλης -a (µg/L).



**Σχήμα Π6.21.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **22 Αυγούστου 2000:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

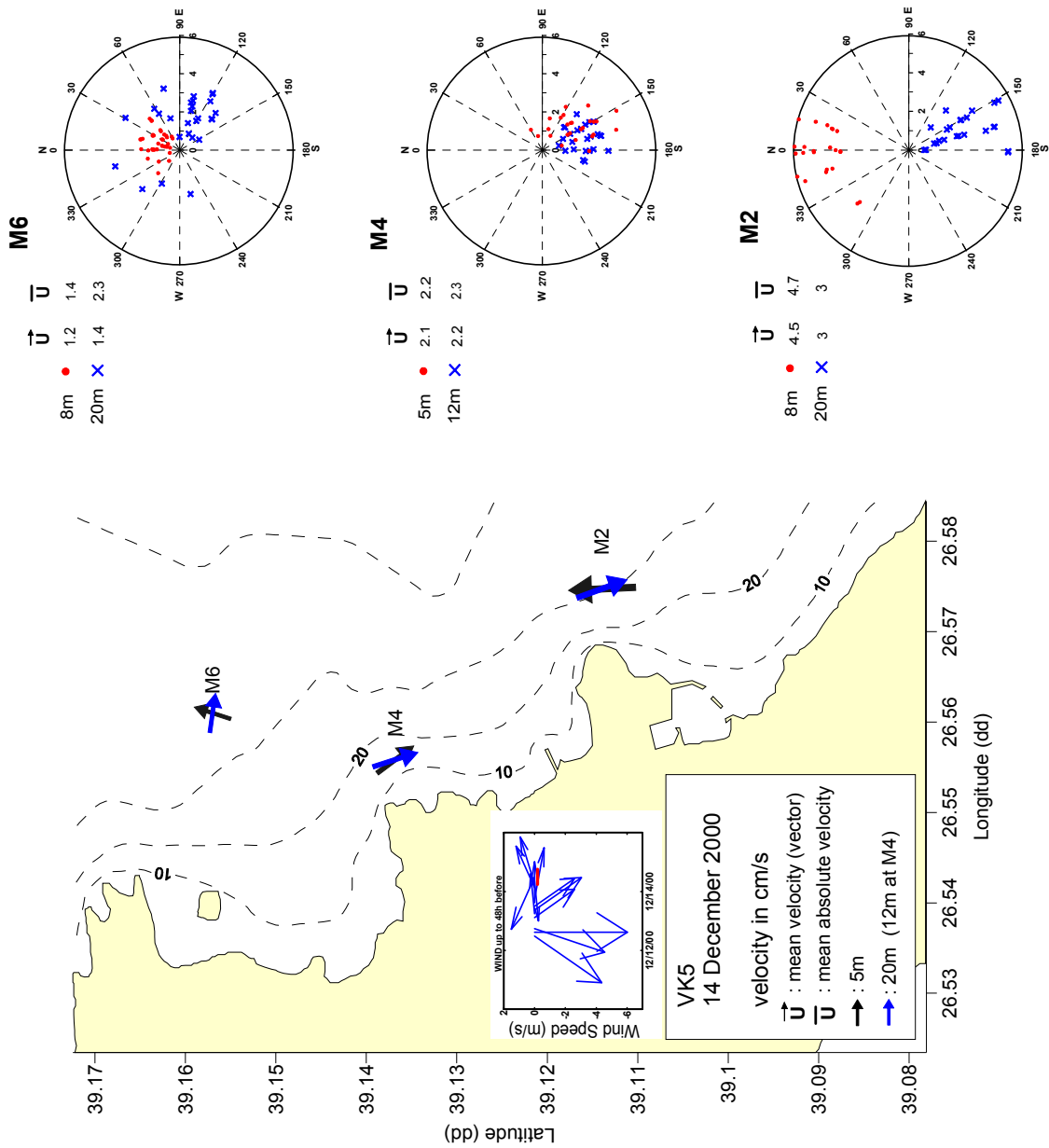


**Σχήμα Π6.22.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 5 Σεπτεμβρίου 2000: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

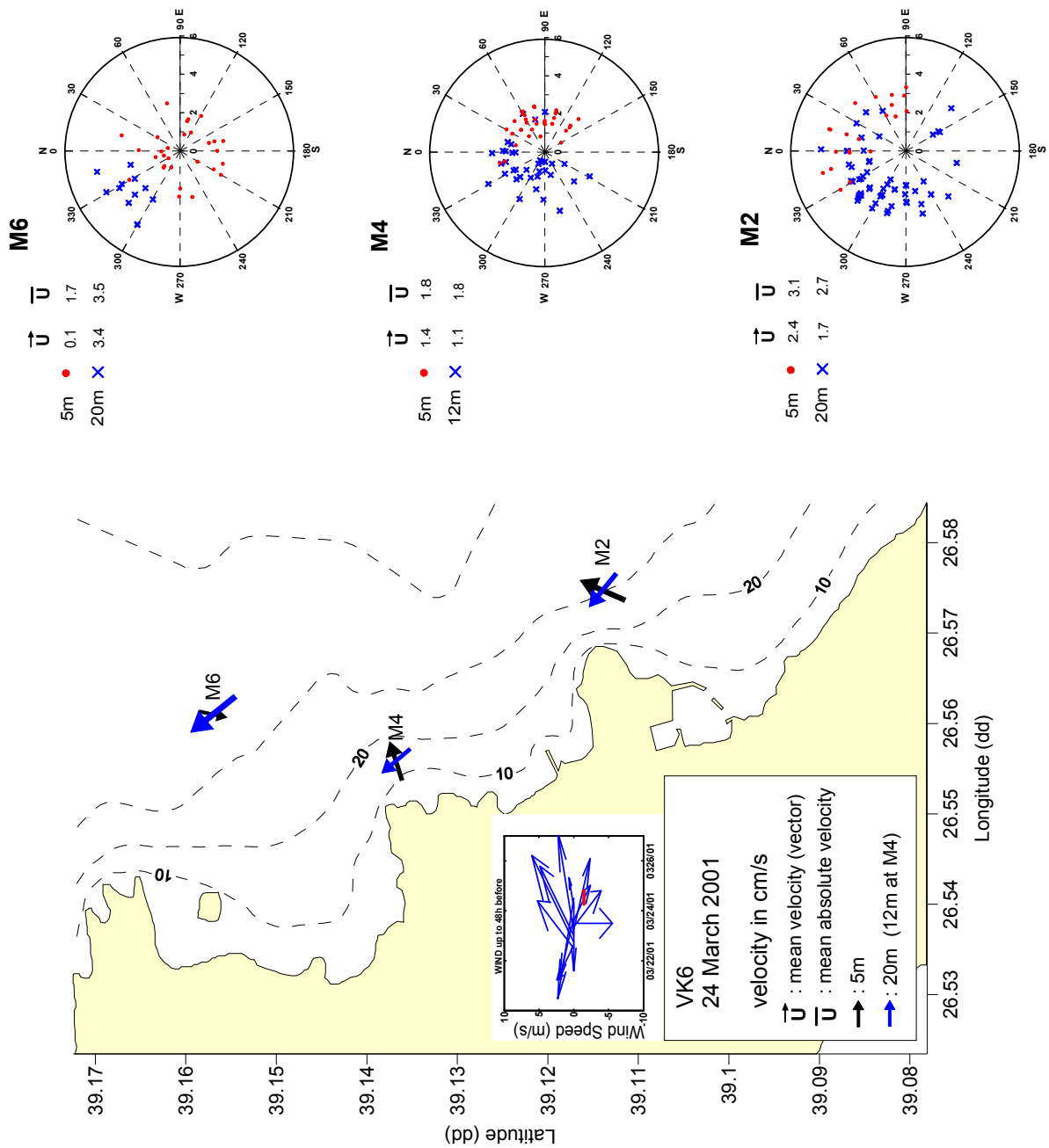


**Σχήμα Π6.23.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **1 Νοεμβρίου 2000:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

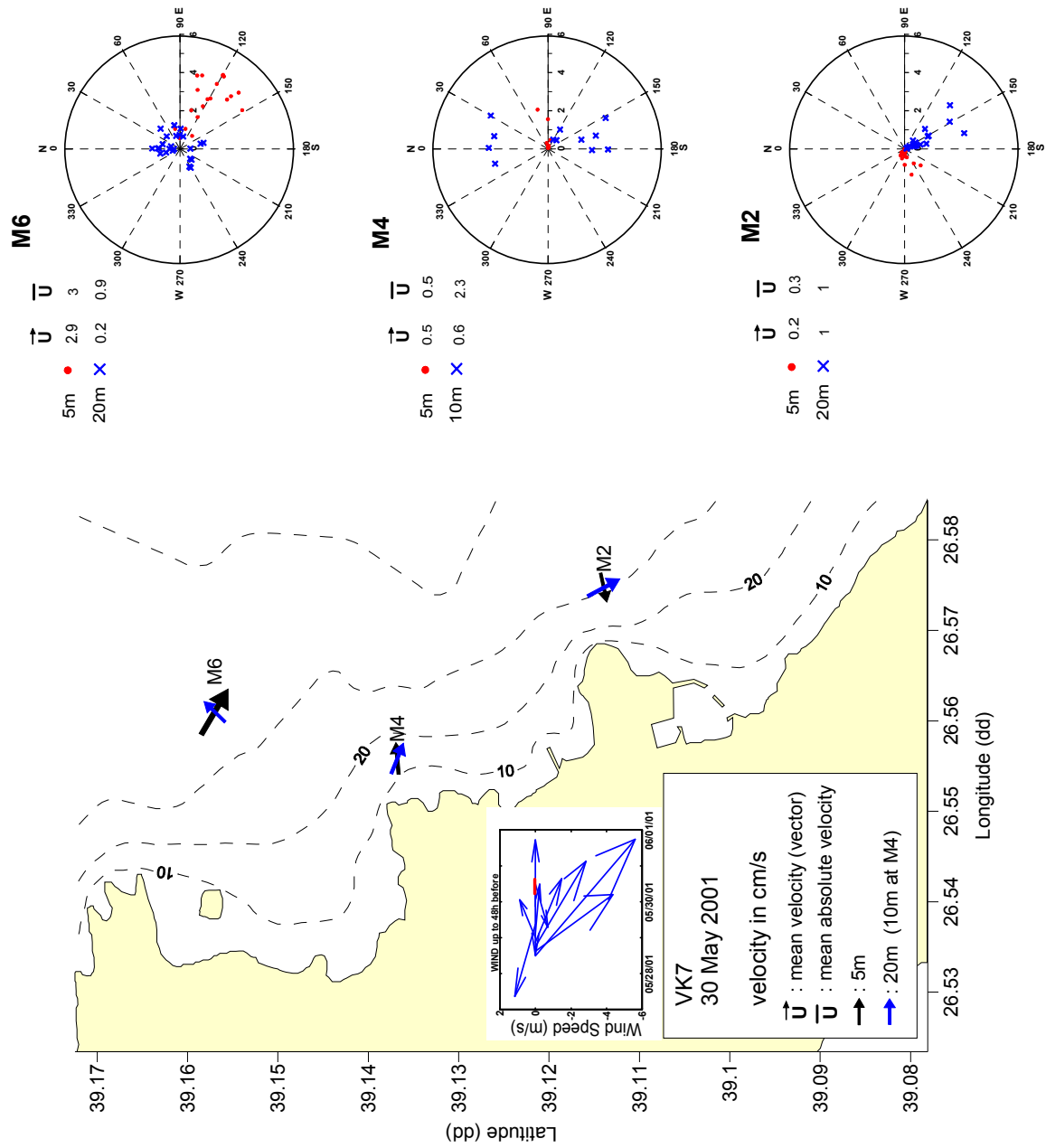




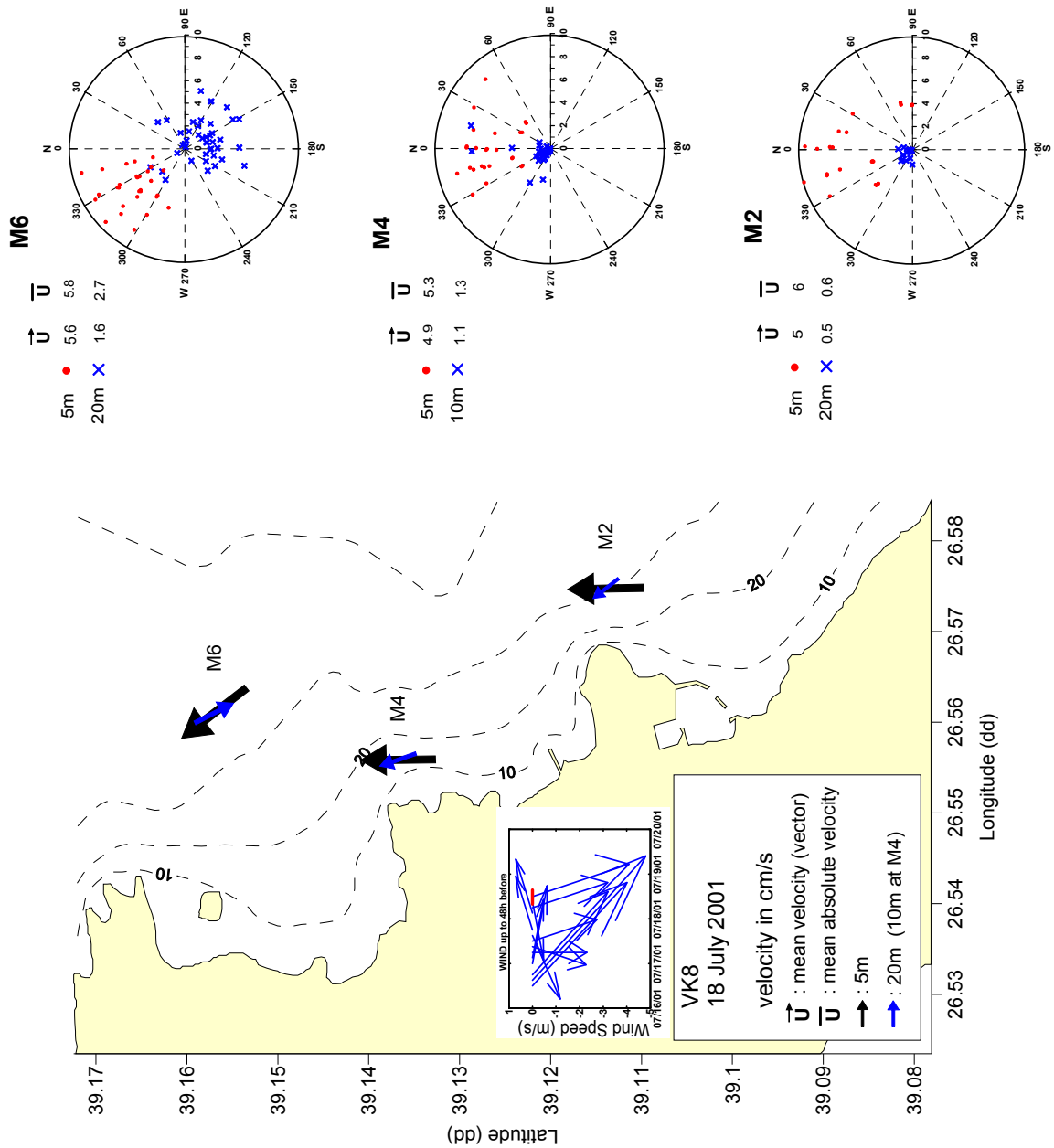
**Σχήμα Π6.24** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **14 Δεκεμβρίου 2000**: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



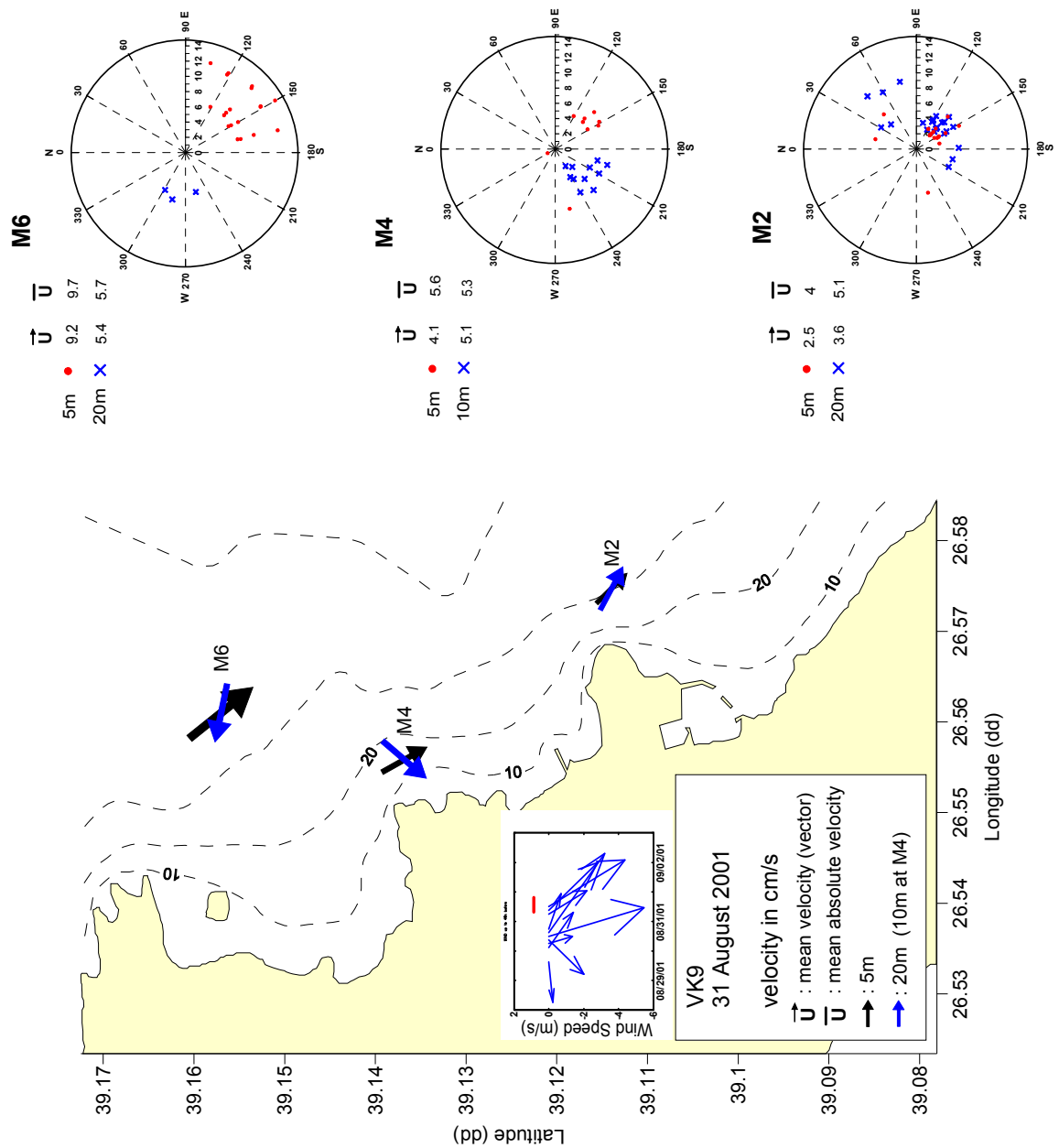
**Σχήμα Π6.25.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **24 Μαρτίου 2001:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



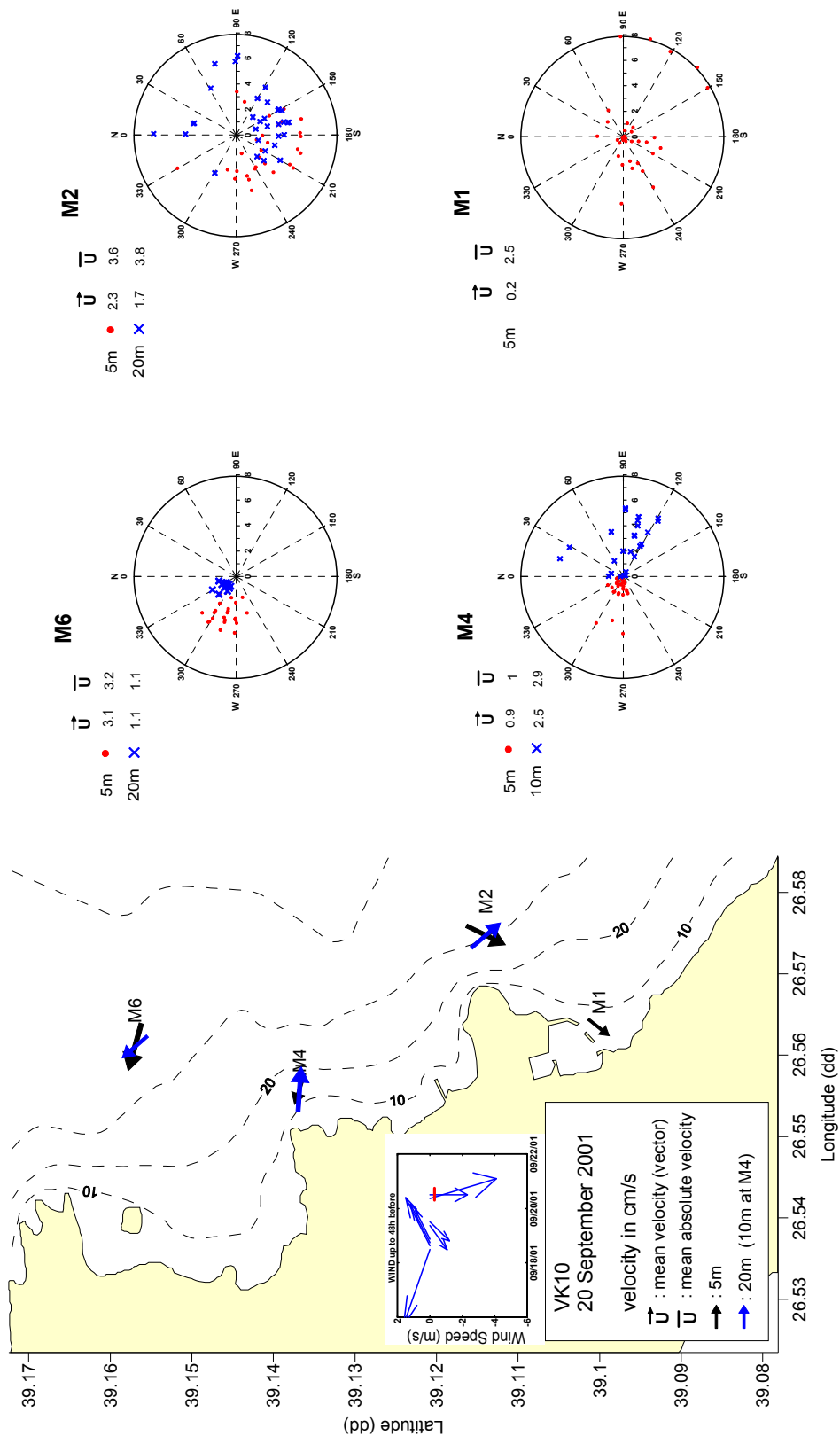
**Σχήμα Π6.26.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **30 Μαΐου 2001:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



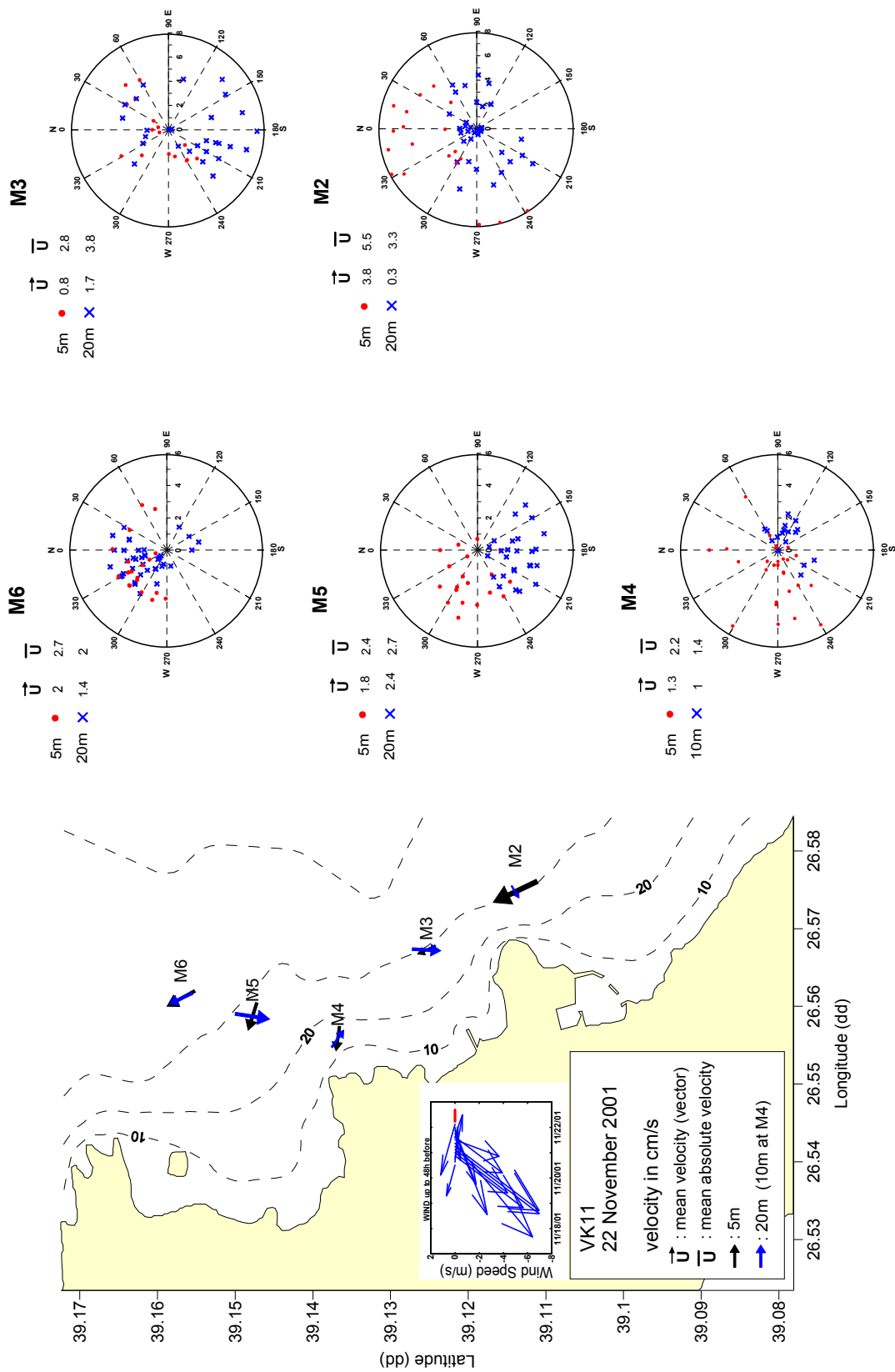
**Σχήμα Π6.27.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **18 Ιουλίου 2001:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



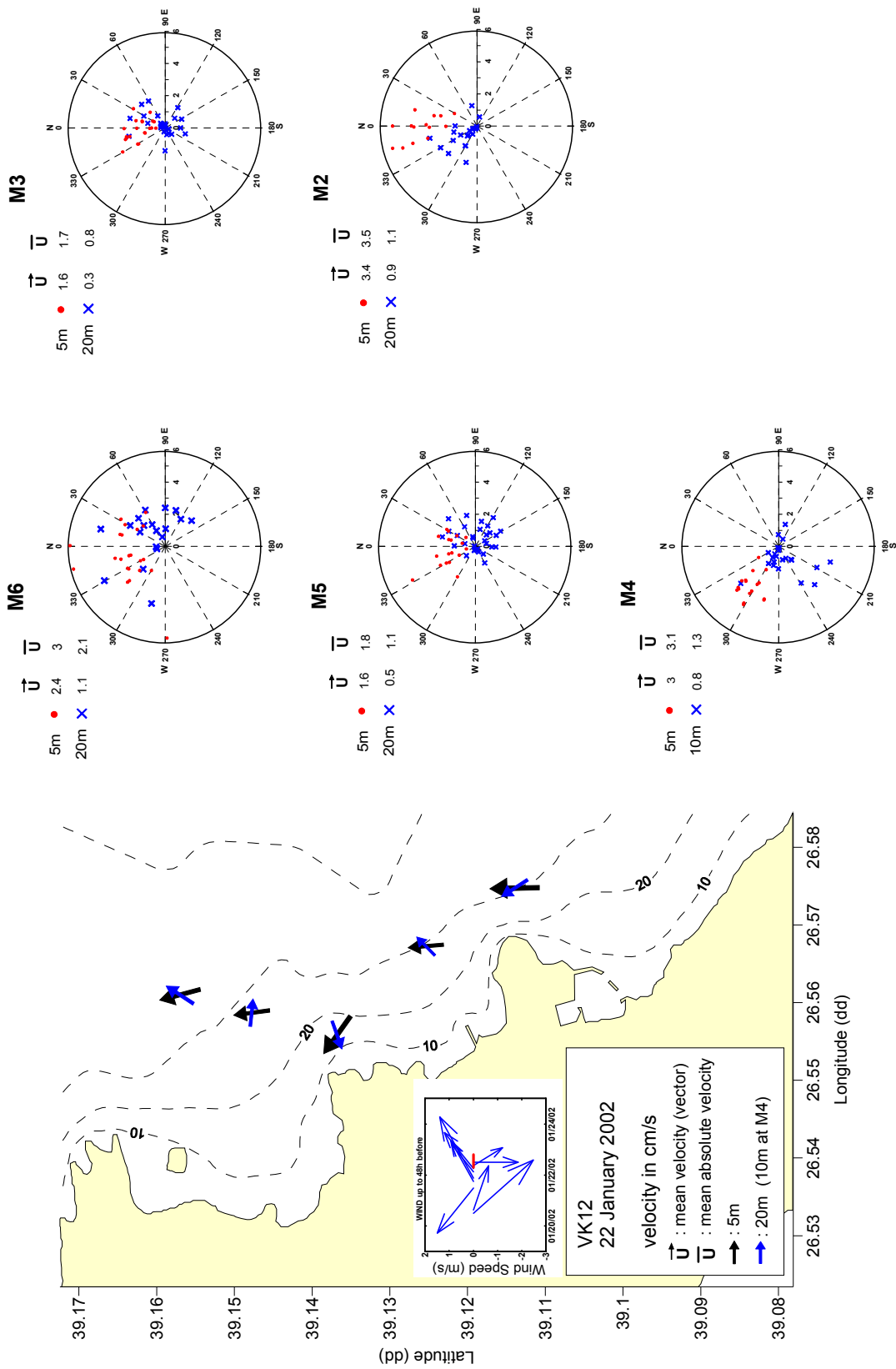
**Σχήμα Π6.28.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **31 Αυγούστου 2001:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα Π6.29.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 20 Σεπτεμβρίου 2001: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

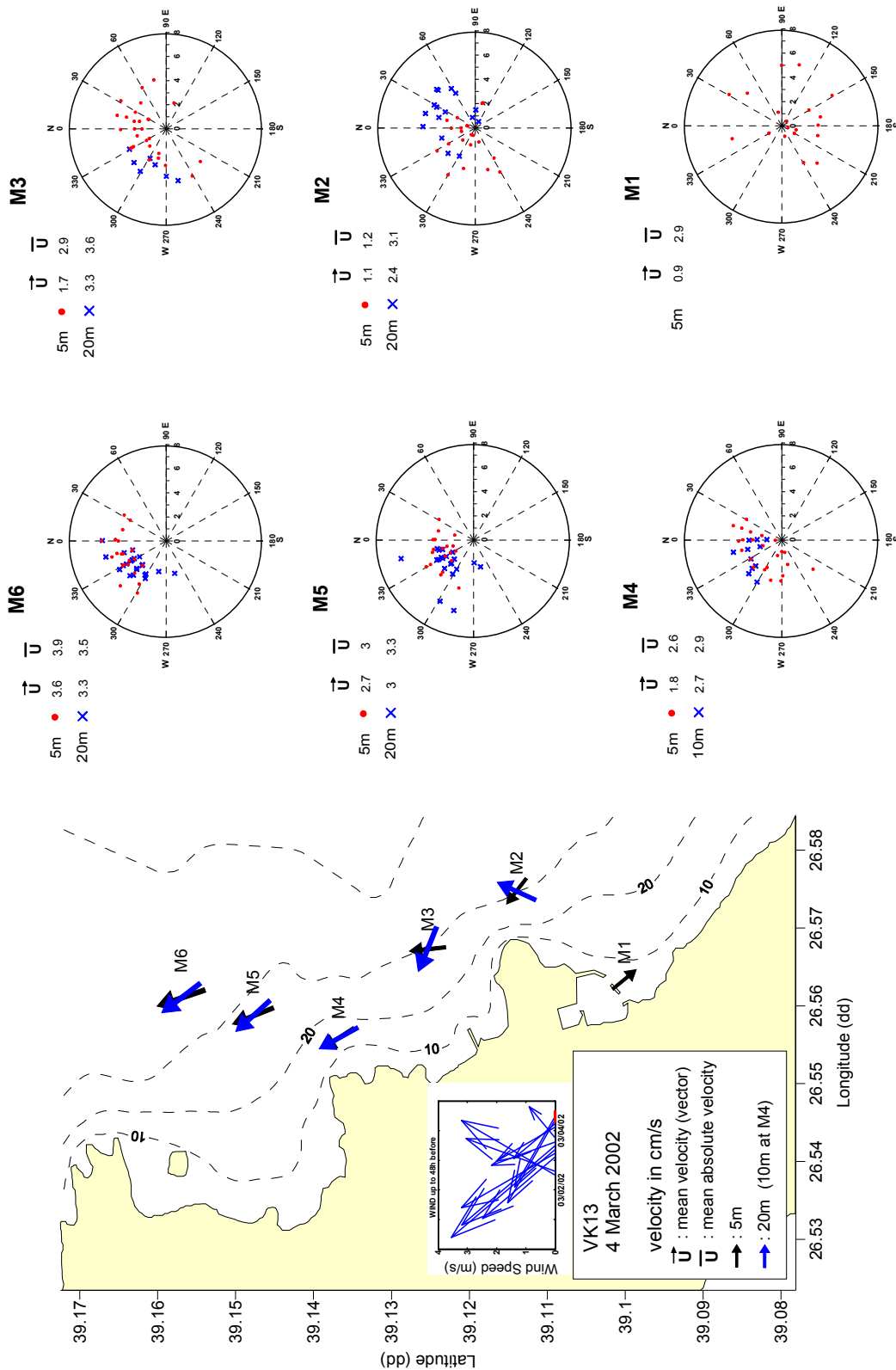


**Σχήμα Π6.30.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 22 Νοεμβρίου 2001: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

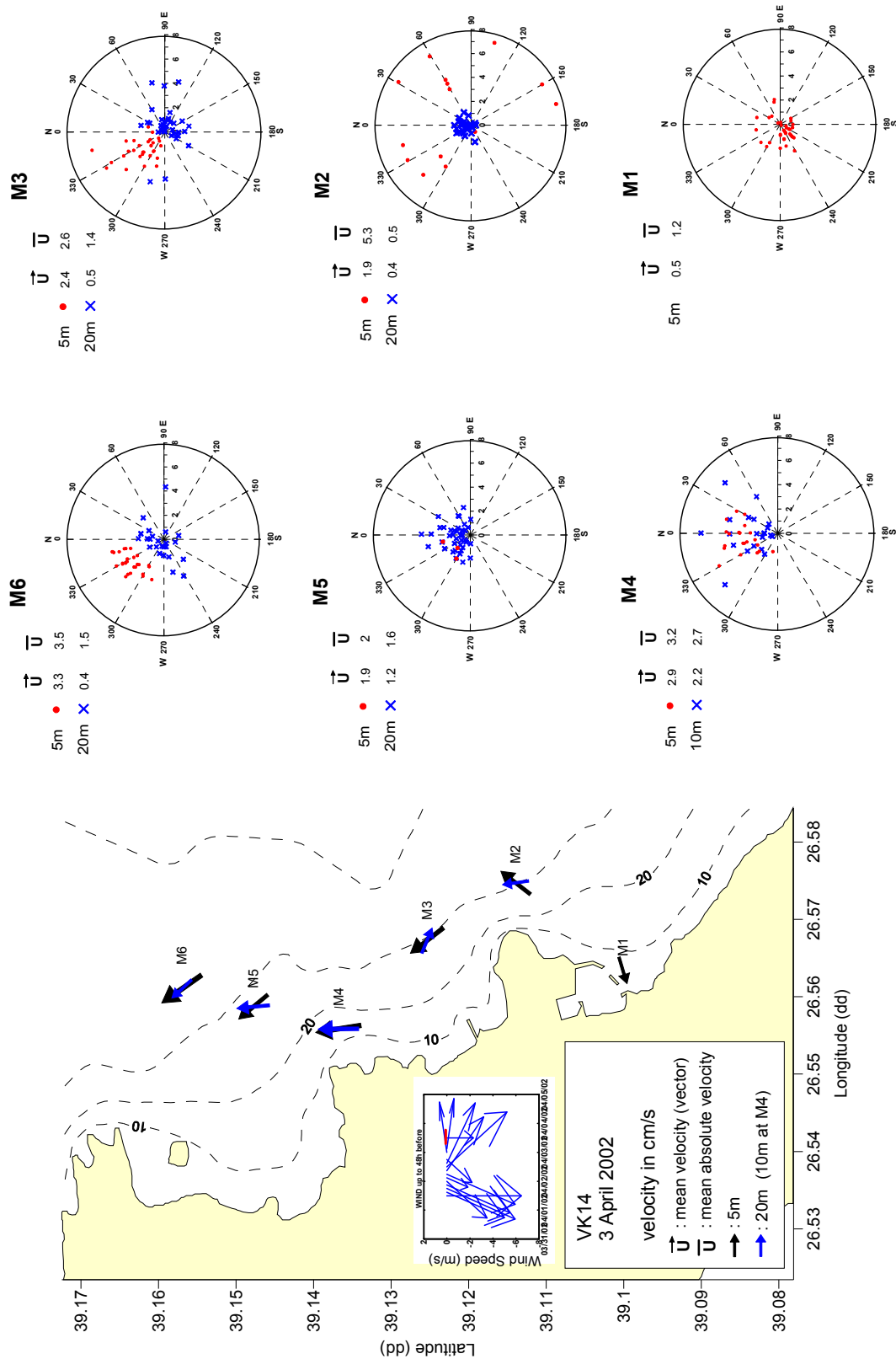


**Σχήμα Π6.31.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 22 Ιανουαρίου 2002: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.

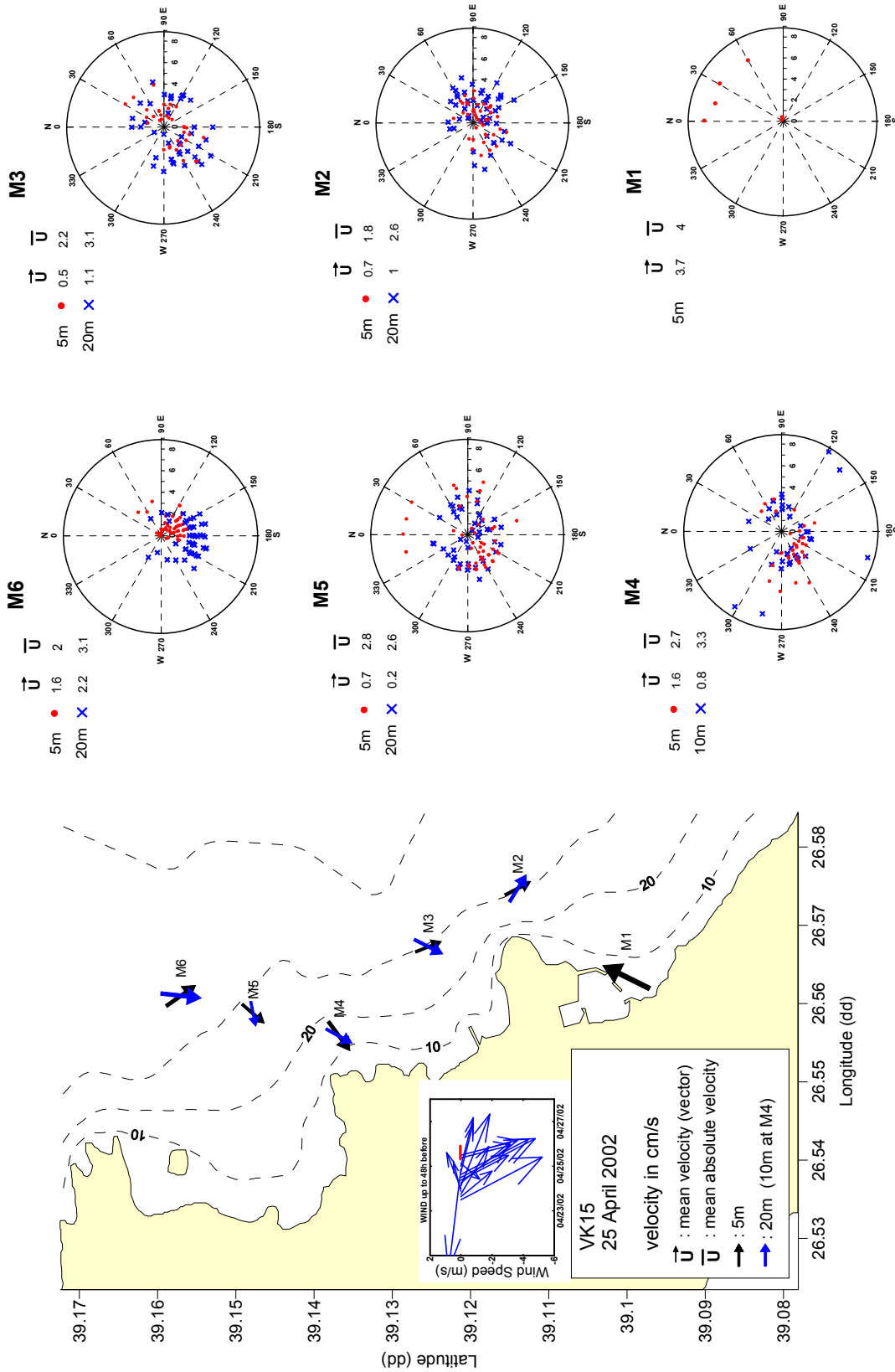




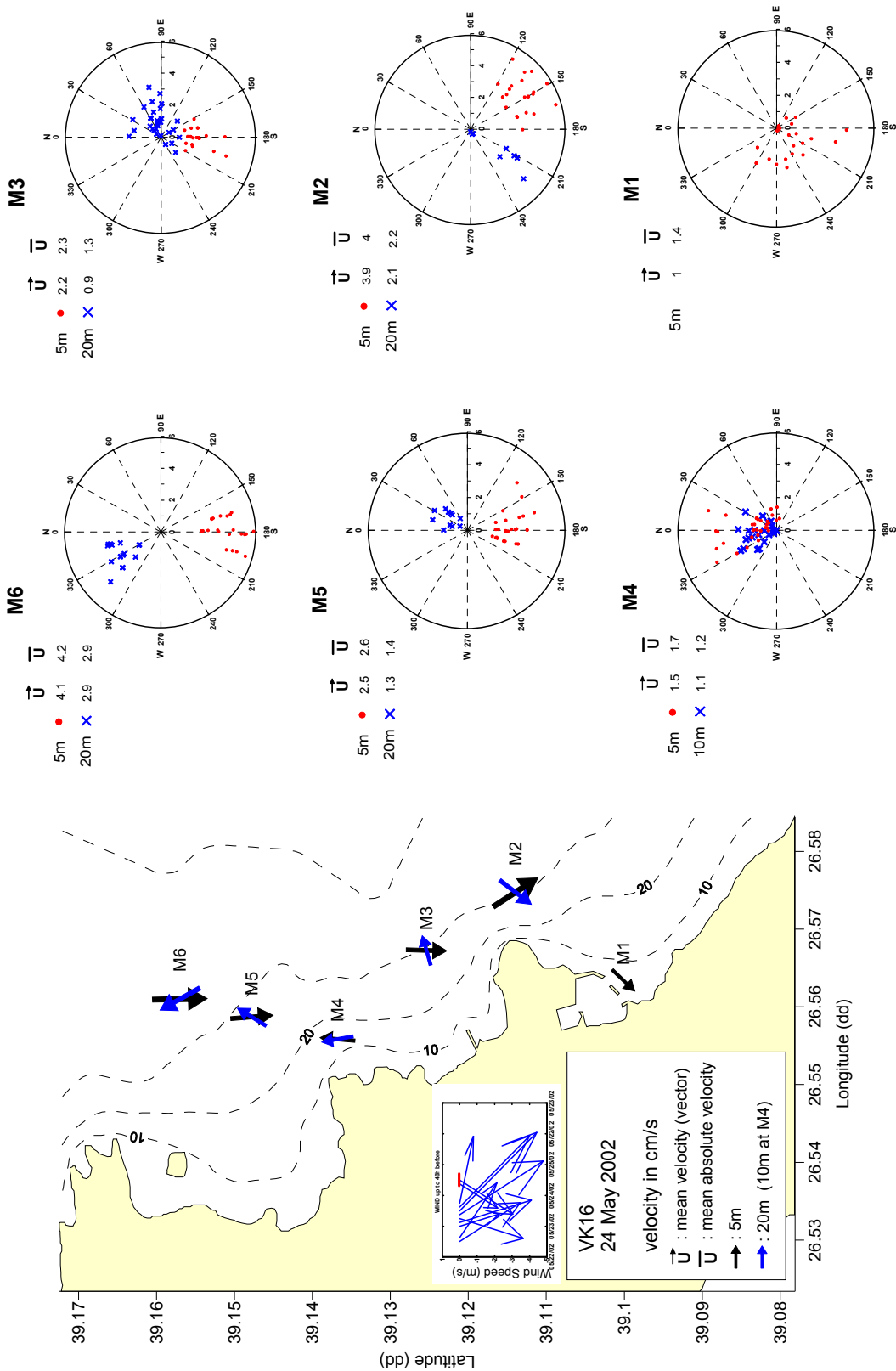
**Σχήμα Π6.32.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 4 Μαρτίου 2002: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



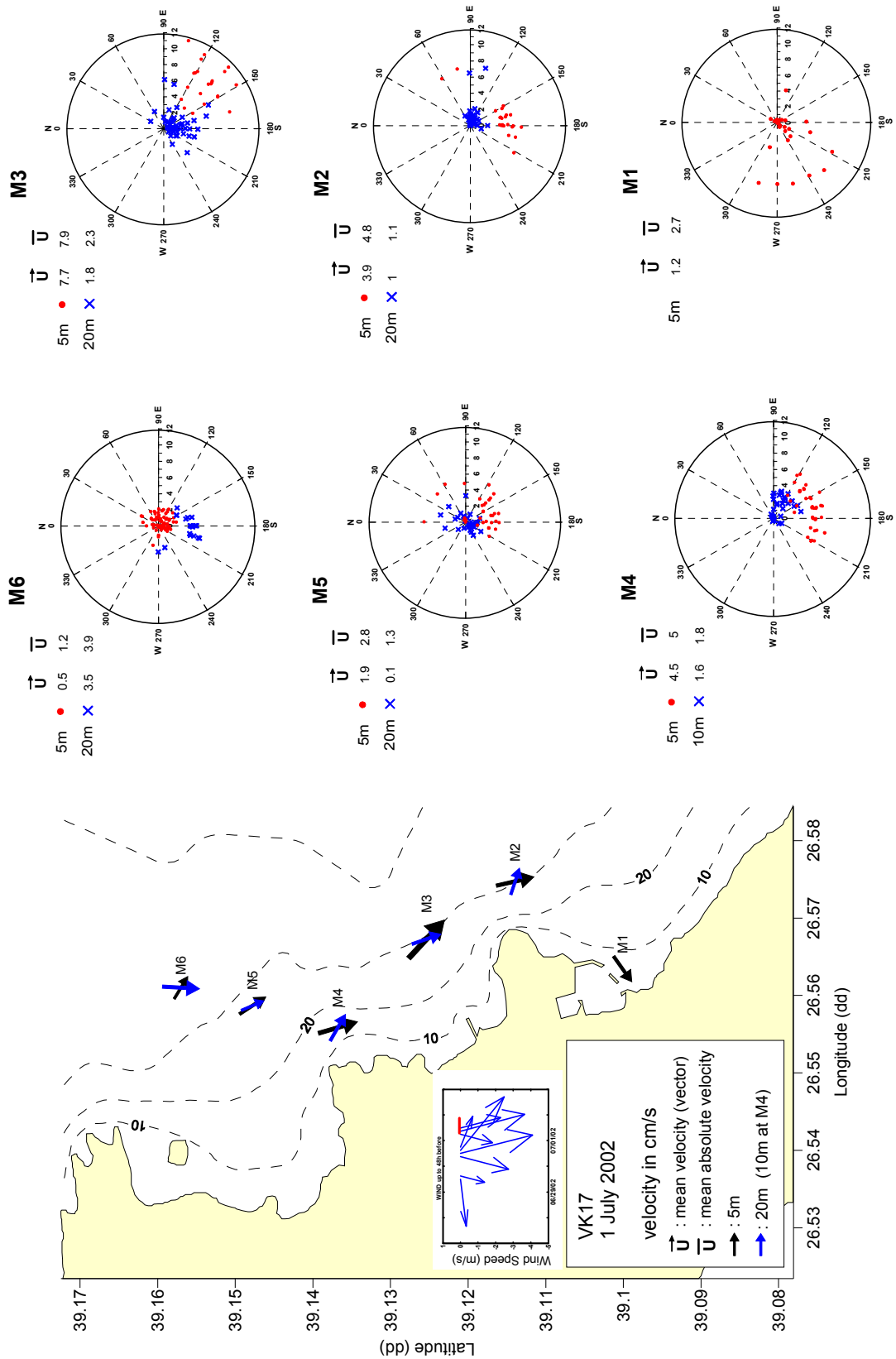
**Σχήμα Π6.33.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 3 Απριλίου 2002: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



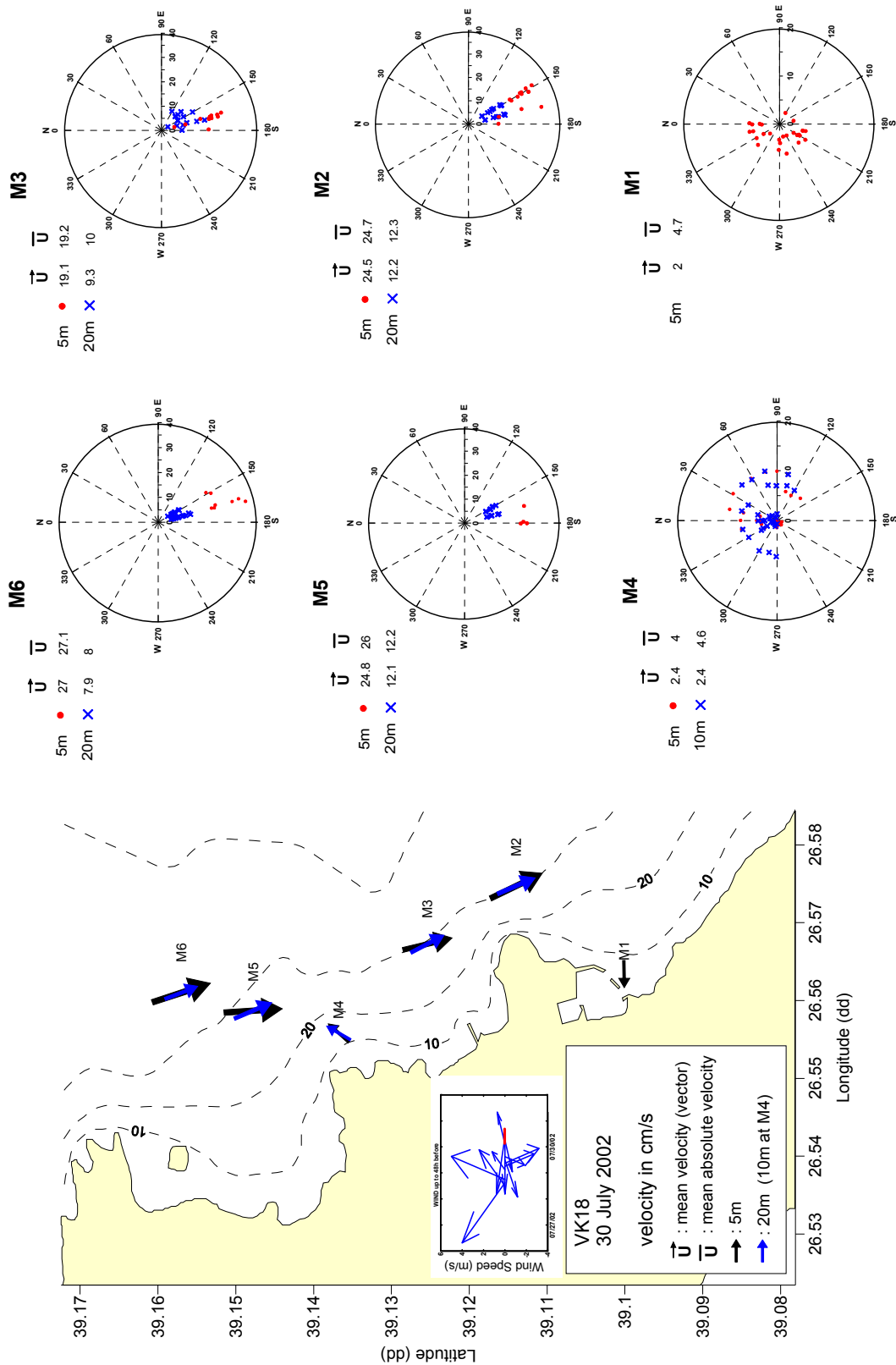
**Σχήμα Π6.34.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **25 Απριλίου 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



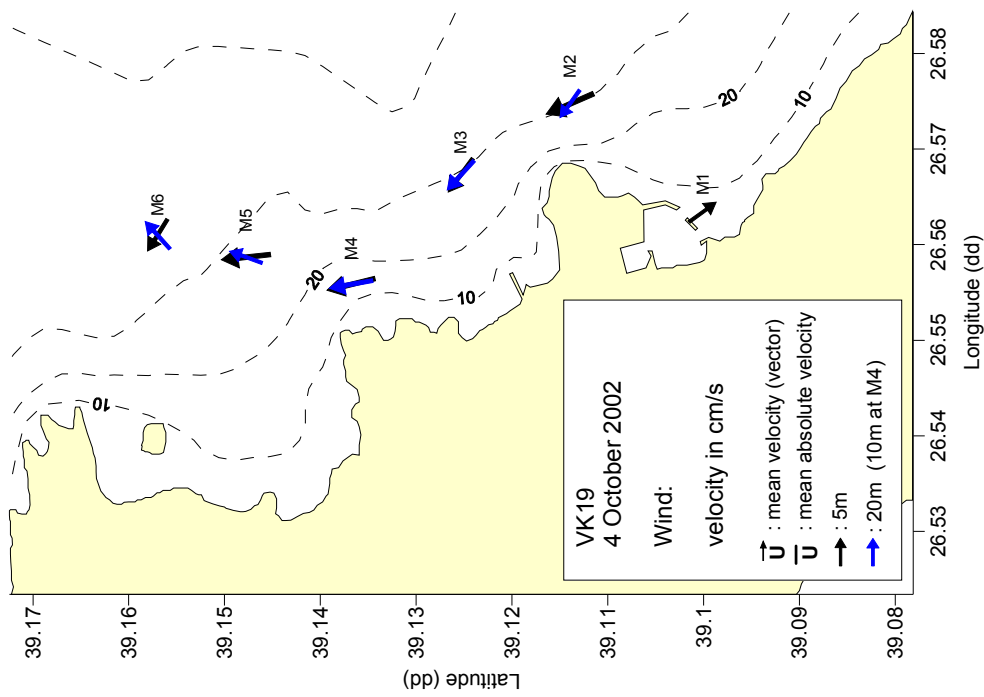
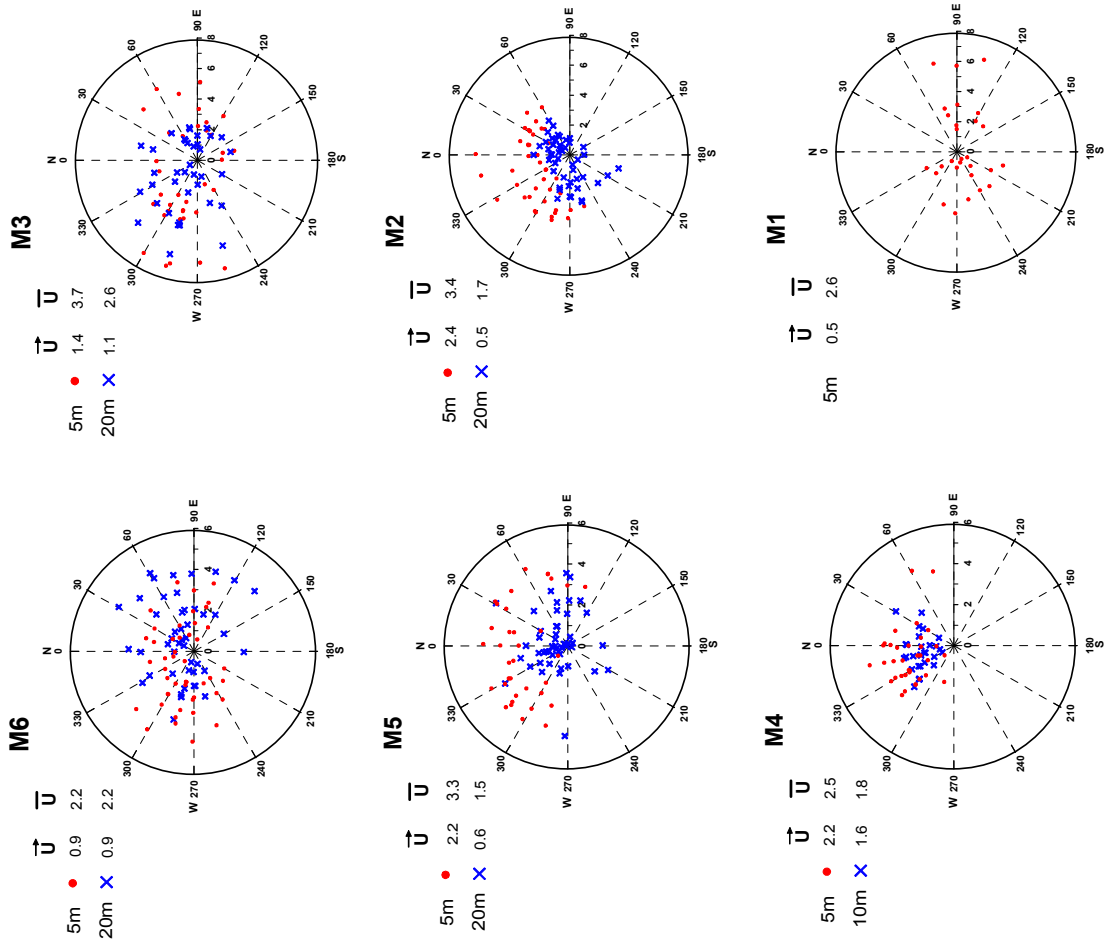
**Σχήμα Π6.35.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 24 Μαΐου 2002: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



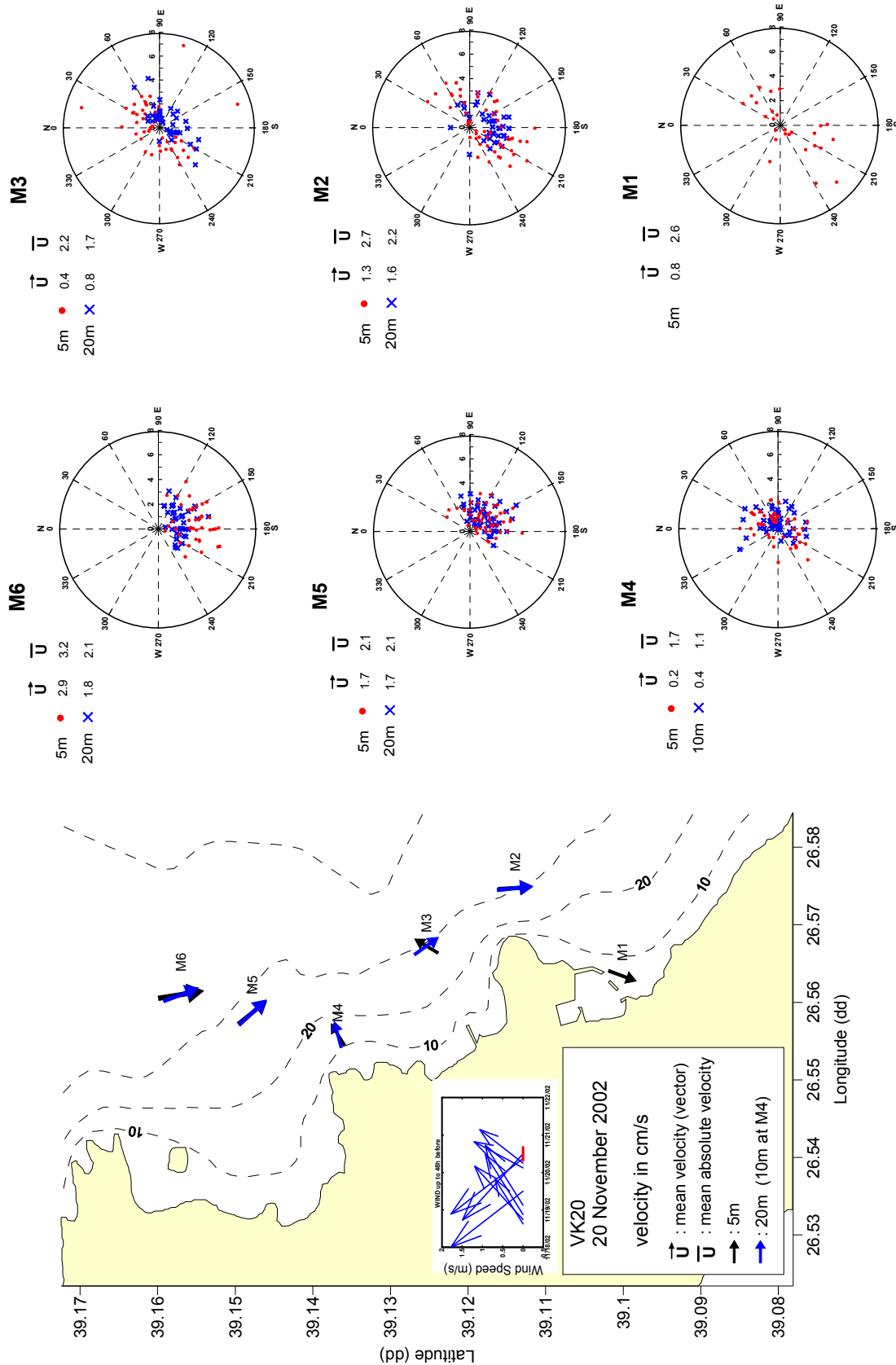
**Σχήμα Π6.36.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **1 Ιουλίου 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα Π6.37.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 30 Ιουλίου 2002: Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα Π6.38.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – 4 Οκτωβρίου:2002 Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος ( $^{\circ}$ ) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



**Σχήμα Π6.39.** Ρευματομετρήσεις στην παράκτια περιοχή Μυτιλήνης – **20 Νοεμβρίου 2002:** Ταχύτητα (cm/s) και διεύθυνση ρεύματος (°) σε 2 βάθη για κάθε σταθμό και αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα διασποράς ταχυτήτων για κάθε σταθμό. Παρατίθεται και το άνυσμα του ανέμου έως και 2 μέρες πριν την ρευματομέτρηση.



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7**

**Μέσες τιμές συγκεντρώσεων θρεπτικών σε παράκτιες περιοχές των ελληνικών θαλασσών**

**Πίνακας Π7.** Μέσες τιμές συγκέντρωσης θρεπτικών σε παράκτιες περιοχές των ελληνικών θαλασσών. Από Pavlidou et al. (2005) (Πίνακας IV.1, σελ 133).

Area	DO (mL/L)		P-PO <sub>4</sub> (µg-at/L)		Si-SiO <sub>4</sub> (µg-at/L)		N-NO <sub>2</sub> (µg-at/L)		N-NO <sub>3</sub> (µg-at/L)		N-NH <sub>4</sub> (µg-at/L)		N:P	
	winter	summer	winter	summer	winter	summer	winter	summer	winter	summer	winter	summer	winter	summer
Saronikos Gulf-Psytalia Outfall <sup>1</sup>	5.23	4.72	0.35	0.53	2.20	2.07	0.48	0.21	1.06	0.78	0.86	1.48	7.12	5.37
Inner Saronikos Gulf <sup>1</sup>	5.27	4.91	0.24	0.25	2.15	1.91	0.32	0.14	1.19	0.90	0.57	0.52	9.35	6.94
Outer Saronikos Gulf <sup>1</sup>	5.35	5.24	0.08	0.19	2.21	2.15	0.13	0.09	1.08	1.03	0.20	0.21	16.0	19.2
Eleisis Bay <sup>1</sup>	5.55	3.64	0.27	0.43	3.94	7.37	0.23	0.35	1.98	1.45	0.57	0.70	13.9	8.69
Thessaloniki Bay <sup>2</sup>	5.59	4.52	0.42	0.54	3.44	4.37	0.30	0.31	1.21	0.93	0.99	2.03	5.42	5.31
Inner Thermaikos Gulf <sup>2</sup>	5.66	4.91	0.35	0.29	3.54	3.06	0.28	0.14	1.31	0.83	0.96	1.04	8.25	9.04
Strymonikos Gulf <sup>3</sup>	6.03		0.09		4.34		0.21		2.58		0.23		34	
Nestos R. Estuary <sup>3</sup>	6.51		0.10		4.69		0.07		0.98		1.21		24	
Kavala Bay <sup>3</sup>	5.60		0.80		5.50		0.20		2.95		1.53		5.85	
S. Evvoikos Gulf <sup>4</sup>	5.70	4.98	0.05	0.16	1.68	0.71	0.07	0.05	0.39	0.49			11.58	8.49
Pagasitikos Gulf – Sewage Outfall <sup>5</sup>	4.99	5.66	0.12	0.08	3.87	4.13	0.20	0.10	0.67	0.66	0.56	0.72	11.9	18.5
Inner Pagasitikos Gulf <sup>5</sup>	5.32	5.74	0.20	0.16	5.08	5.13	0.22	0.08	1.74	1.01	0.75	0.69	13.6	11.1
Central Pagasitikos Gulf <sup>5</sup>	5.33	5.73	0.09	0.08	3.63	3.74	0.21	0.05	0.73	0.62	0.47	0.36	15.7	12.9
Amvrakikos Gulf <sup>6</sup>			0.53	0.40	15.2	16.6	0.12	0.08	1.62	1.66	0.43	0.40	3.2	5.3
Maliakos Gulf <sup>7</sup>			0.06		6.95		0.11		0.52		0.17		13.3	
Kalamitsi Preveza <sup>8</sup>	5.56	5.19	0.05	0.05	1.66	1.46	0.07	0.05	0.41	0.29	0.25	0.19	13.8	10.4
Sea of Kerkyra <sup>9</sup>	5.33	5.70	0.05	0.05	1.57	1.35	0.11	0.07	0.31	0.30	0.26	0.20	12.6	9.57
Argolikos Gulf <sup>10</sup>			0.27		9.72		0.12		0.82		0.53		5.44	
Lakonikos Gulf <sup>11</sup>		4.86		0.06		1.30		0.06		0.42		0.27		12.5
Rodos Island <sup>12</sup>	4.84		0.04		1.57		0.01		0.22		0.59		20.5	
Gulf of Gera – Lesvos <sup>13</sup>			0.19		7.54		0.09		0.62		0.84		8.16	
Gulf of Kalloni <sup>14</sup>	4.45		0.25		12.0		0.09		1.19		0.50		7.12	
Irakleio Bay <sup>15</sup>			0.08		0.97		1.81		1.31		1.19		54	
Rethymno Bay <sup>15</sup>			0.05		1.18		1.32		0.59		0.99		58	
Chania Bay <sup>15</sup>			0.06		0.87		1.74		0.59		0.78		52	
North Evvoikos <sup>16</sup>			0.08		5.53		0.14		1.07		0.23		17.7	
Messiniakos Gulf <sup>17</sup>	5.42	5.20	0.09	0.09	2.41	1.94			2.13	0.62				
Patraikos Gulf <sup>18</sup>			0.30				0.10		2.37					

<sup>1</sup> Data for the period 1998-2002. NCMR, 2000a, NCMR, 2002

<sup>2</sup> Data for the period 1995-2002. HCMR 2003a

<sup>3</sup> Data for the period 1997-1999. PAVLIDOU *et al.*, 2002b.

<sup>4</sup> Data of 1996. NCMR, 1997

<sup>5</sup> Data for the period 1998-1999. KOLLIOU, A., 2000.

<sup>6</sup> Data for the period 1987.NCMR, 1989

<sup>7</sup> Data for the period 1991, 1994.NCMR 1992a & NCMR 1994

<sup>8</sup> Data for the period 1990-1991. NCMR 1992b

<sup>9</sup> Data for the period 1991-1992. NCMR, 1991

<sup>10</sup> Data for the period 1996-1999. ARCHODITISIS *et al.*, 2001

<sup>11</sup> Data for the period 1992. NCMR, 1992c

<sup>12</sup> Data for the period 1999-2001. Data from MED/POL Monitoring Program.

<sup>13</sup> Data for the period 1996-1997. TSIRTISIS, *et al.*, 2002.

<sup>14</sup> Data for the period 2000-2001. TSIRTISIS, *et al.*, 2002.

<sup>15</sup> Data for the period 1995-1999. Data from MED/POL Monitoring Program.

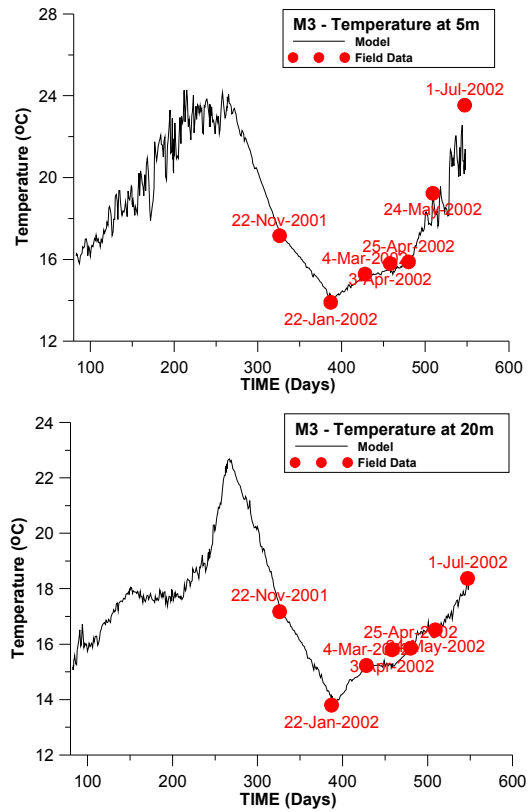
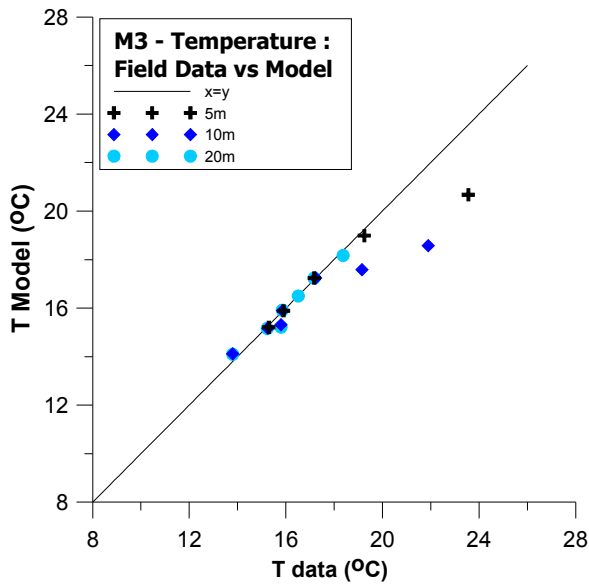
<sup>16</sup> Data for the period 1991. NCMR 1992a

<sup>17</sup> Data for the period 1998-1999. NCMR, 1999

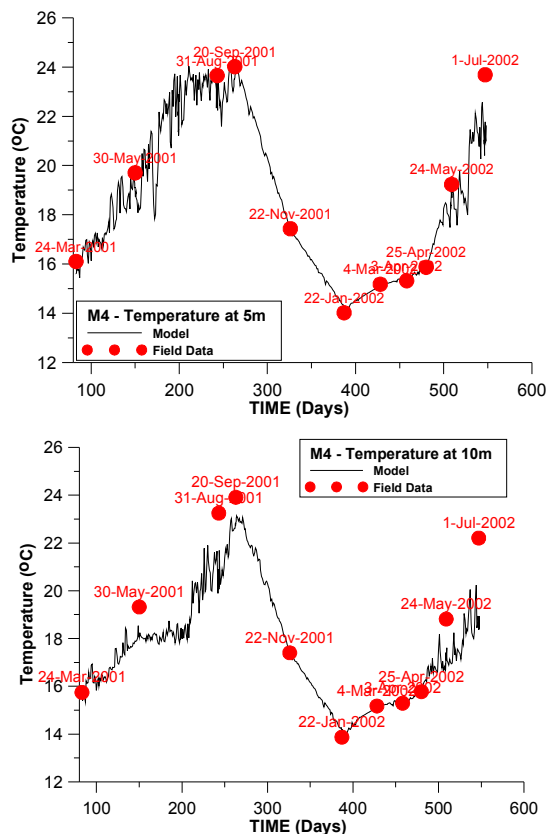
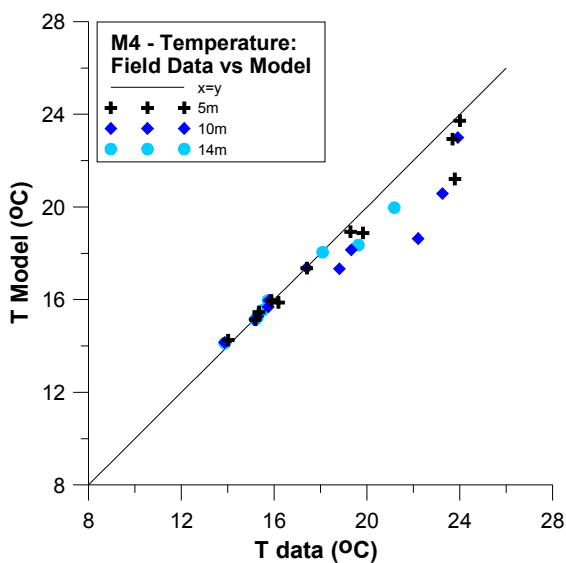
<sup>18</sup> Data for the period 1995-1996. Data from MED/POL Monitoring Program.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 8**

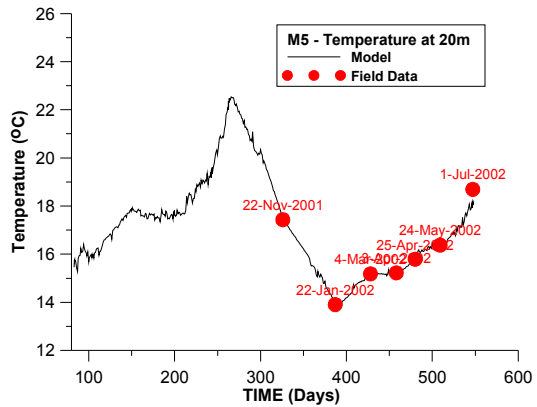
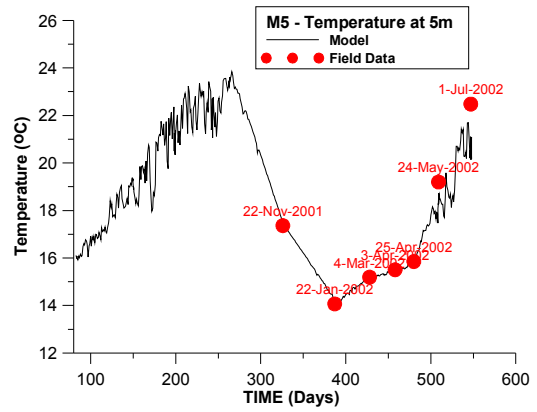
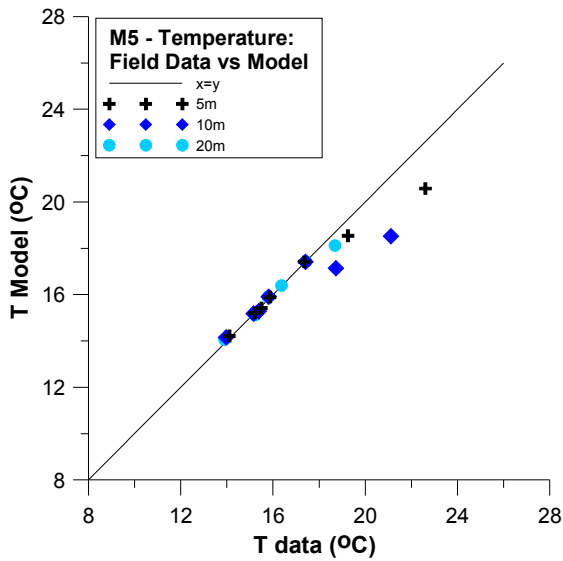
**Επαλήθευση και εκτίμηση ικανότητας μοντέλου  
προσομοίωσης: ποιοτικές/διαγραμματικές τεχνικές  
επαλήθευσης του μοντέλου**



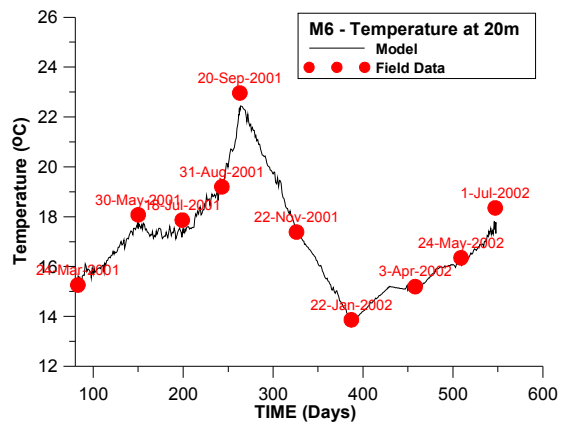
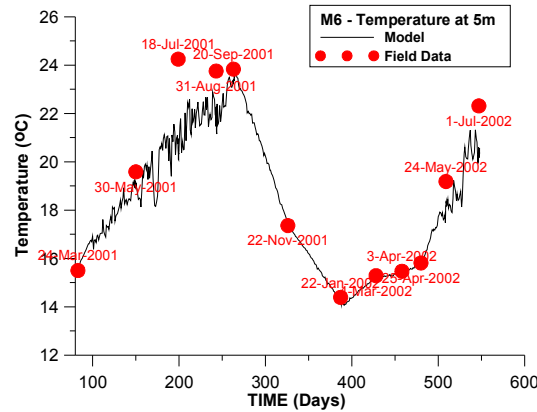
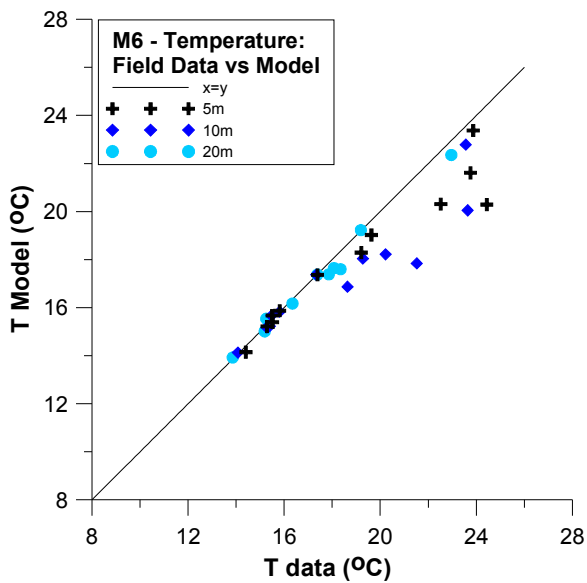
**Σχήμα Π8.1.** Σταθμός **M3**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την θερμοκρασία για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



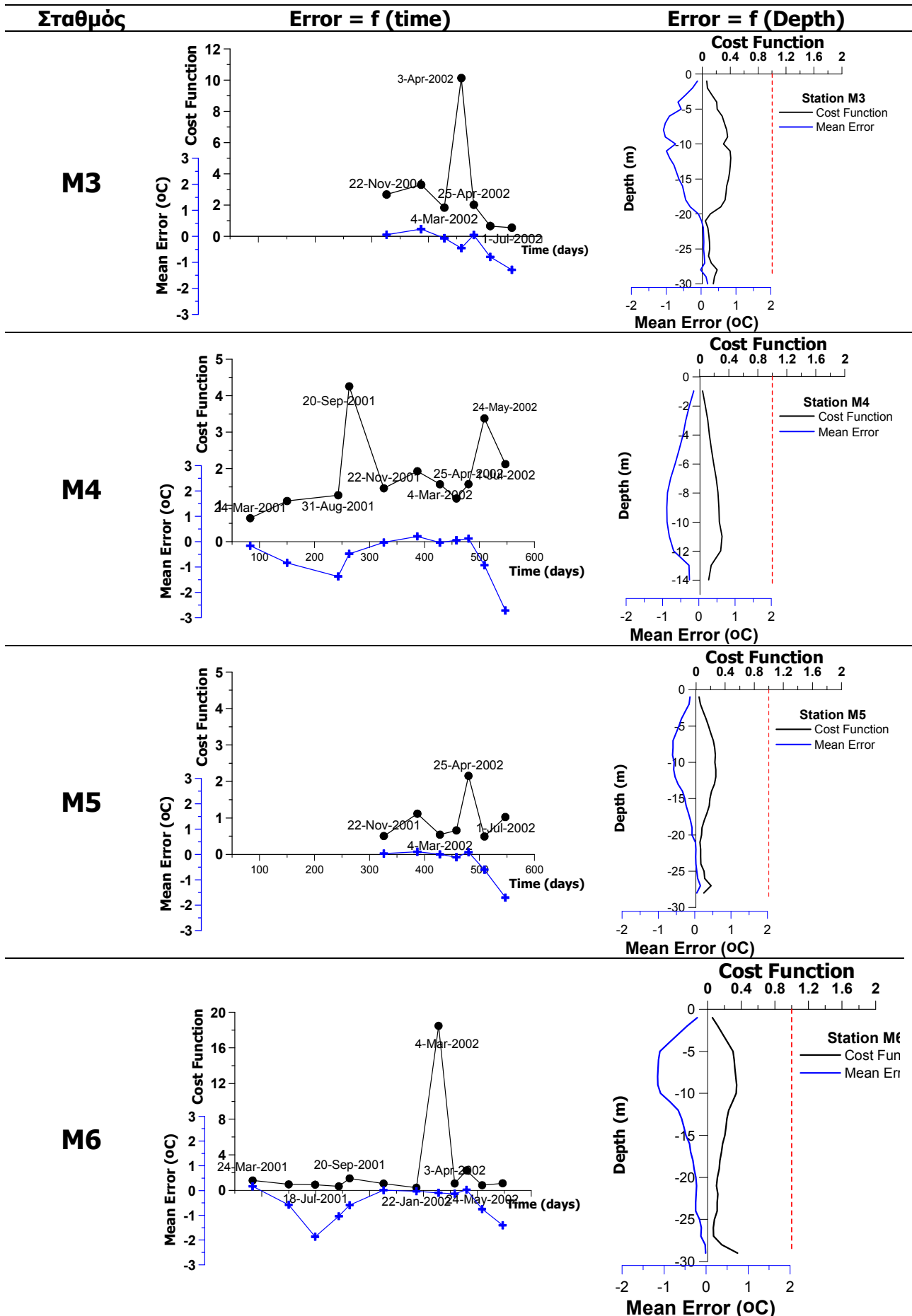
**Σχήμα Π8.2.** Σταθμός **M4**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την θερμοκρασία για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 10m (δεξιά κάτω).



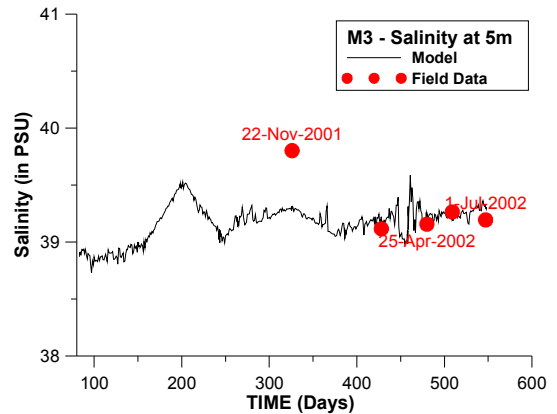
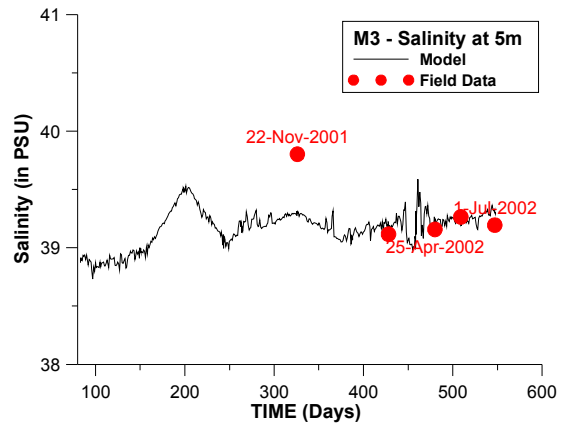
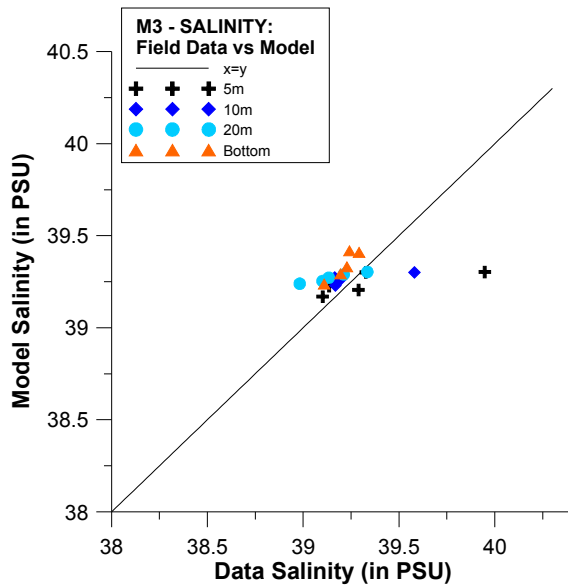
**Σχήμα Π8.3.** Σταθμός **M5**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την **θερμοκρασία** για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



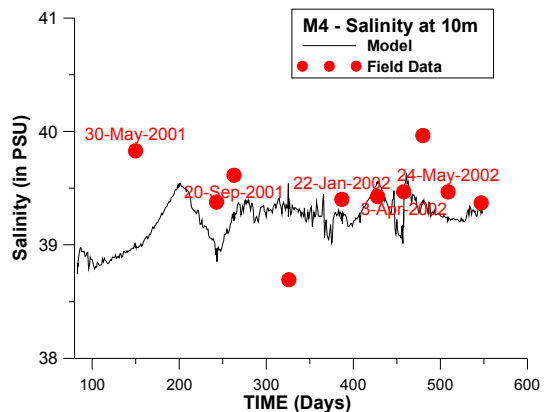
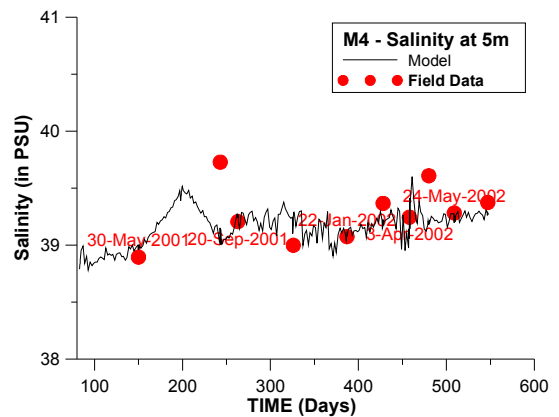
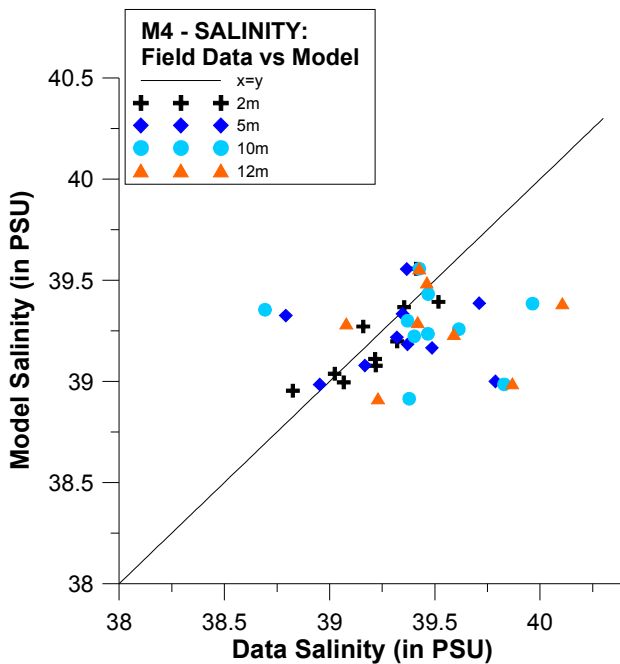
**Σχήμα Π8.4.** Σταθμός **M6**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την **θερμοκρασία** για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



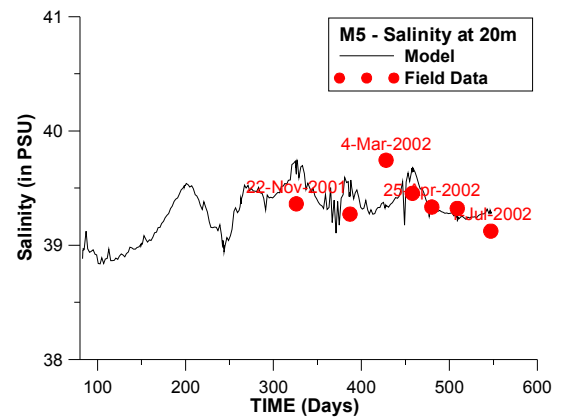
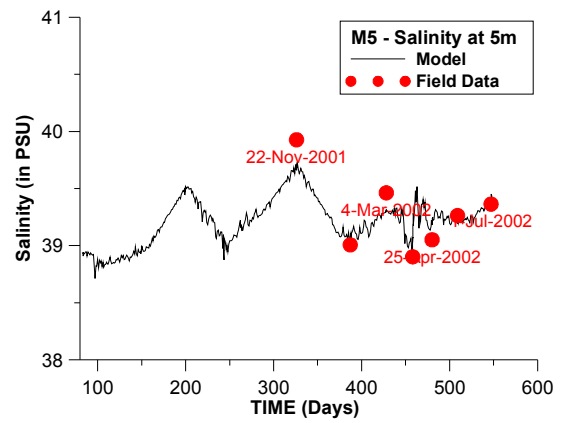
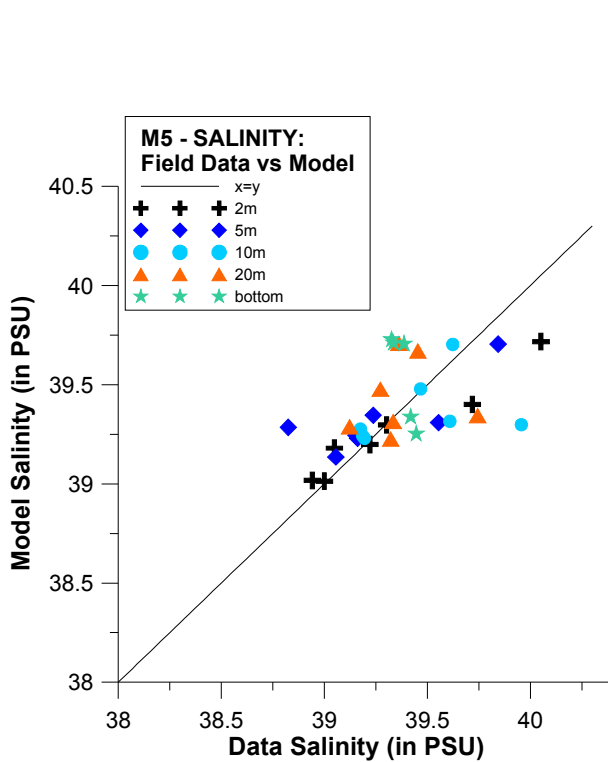
**Σχήμα Π8.5.** Διακύμανση σφάλματος θερμοκρασίας - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



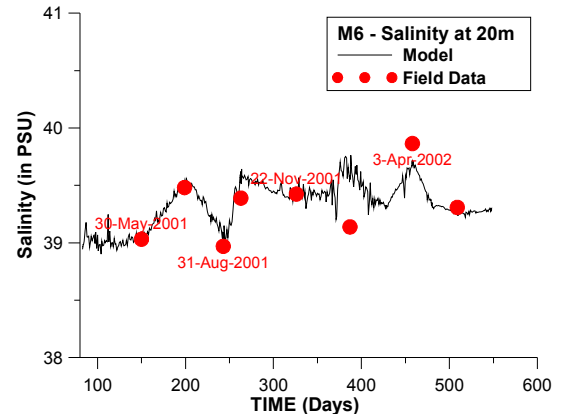
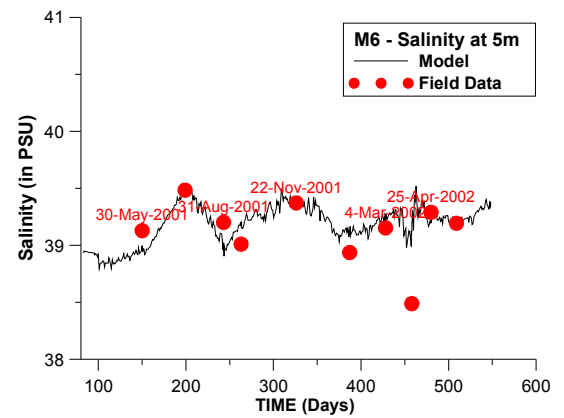
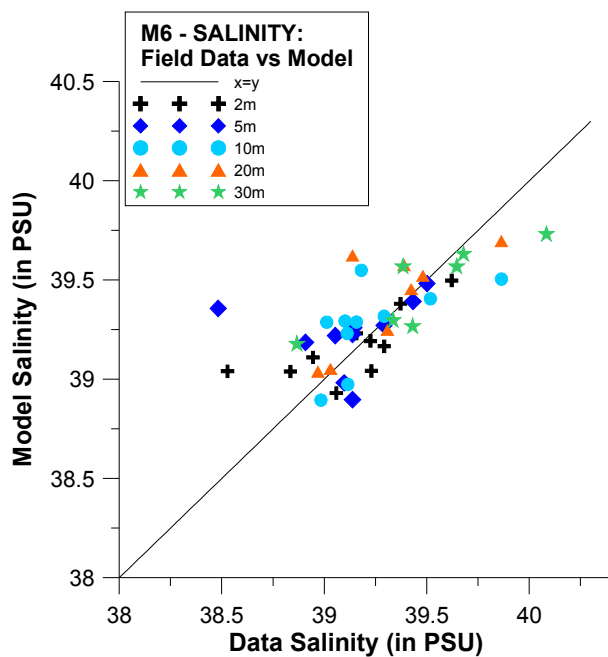
**Σχήμα Π8.6.** Σταθμός **M3**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).



**Σχήμα Π8.7.** Σταθμός **M4**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 10m (δεξιά κάτω).

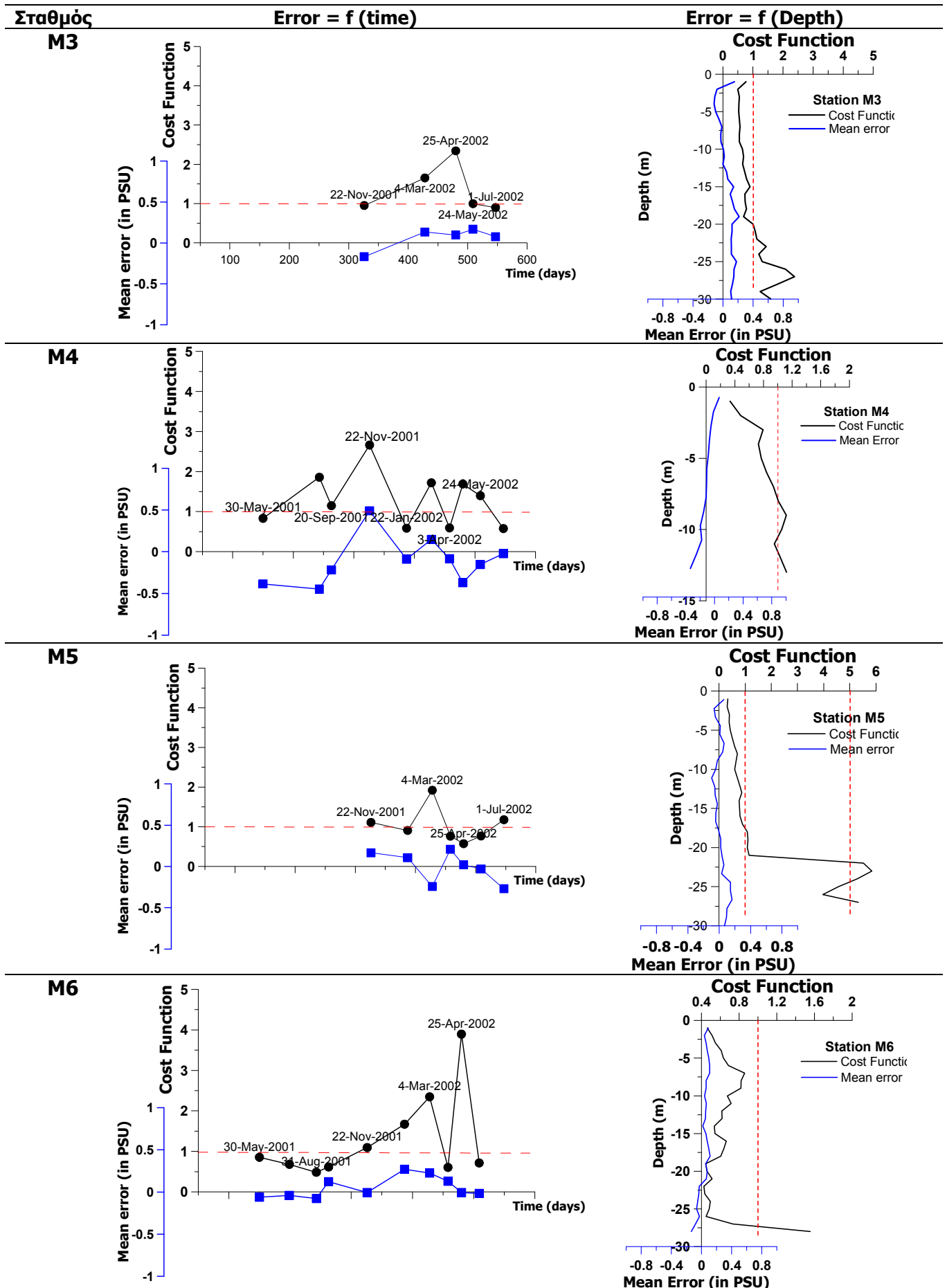


**Σχήμα Π8.8.** Σταθμός **M5**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).

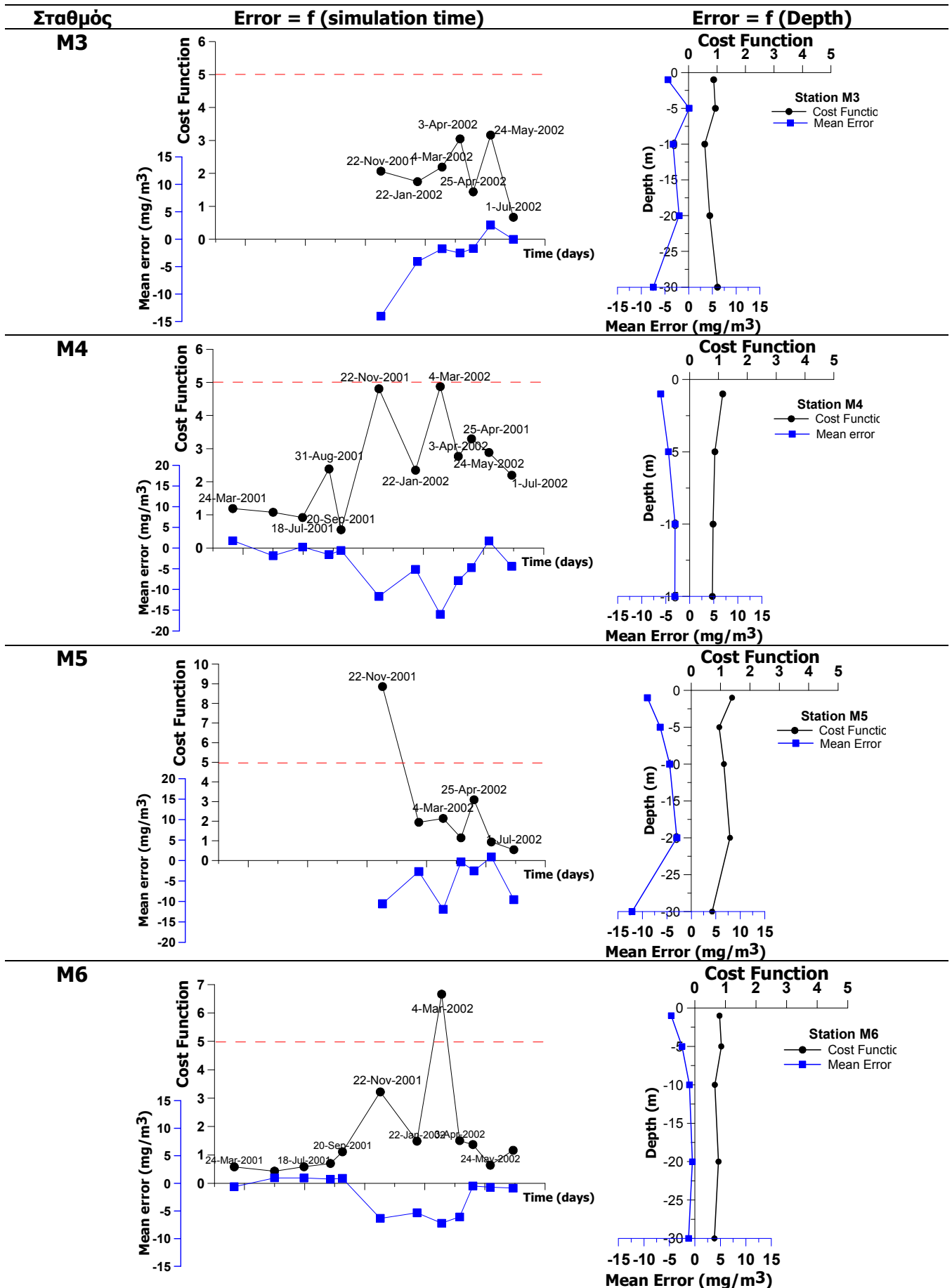


**Σχήμα Π8.9.** Σταθμός **M6**: Αποτελέσματα μοντέλου προς δεδομένα πεδίου για την αλατότητα για όλη την περίοδο προσομοίωσης (αριστερά) και αποτελέσματα μοντέλου (γραμμή) και δεδομένα πεδίου (σημεία) σε συνάρτηση με τον χρόνο σε βάθος 5m (δεξιά πάνω) και βάθος 20m (δεξιά κάτω).

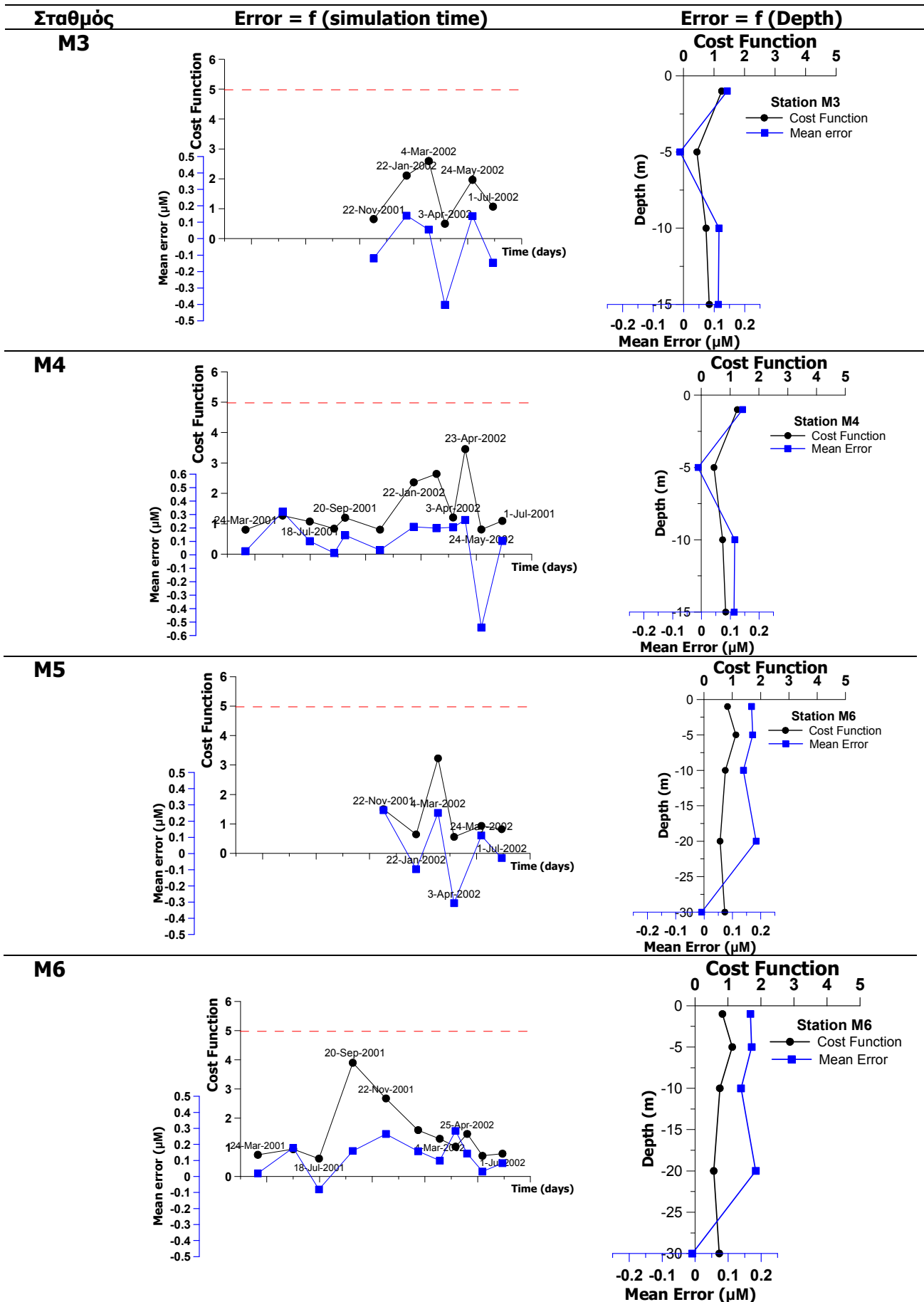




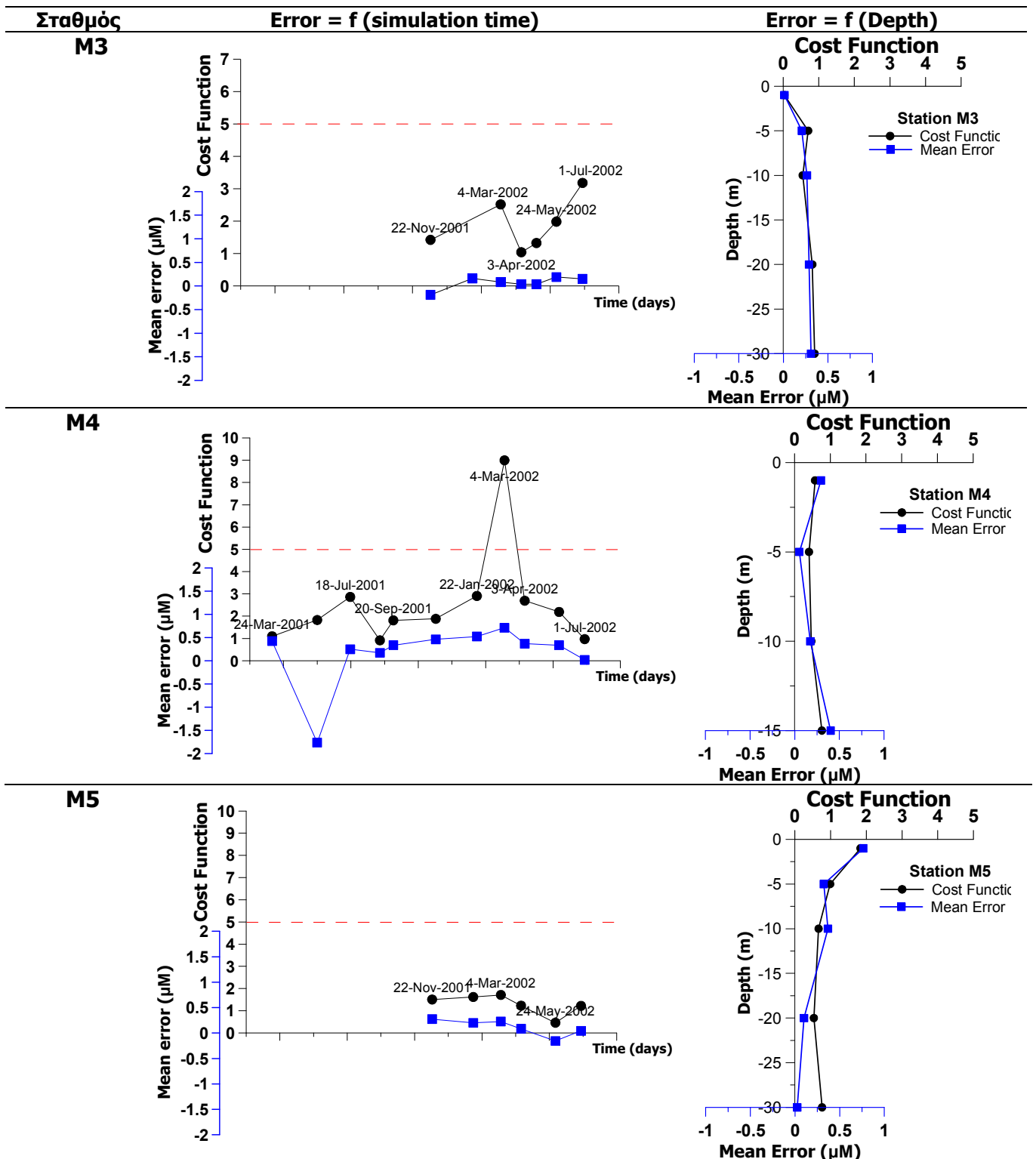
**Σχήμα Π8.10.** Διακύμανση σφάλματος αλατότητας - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



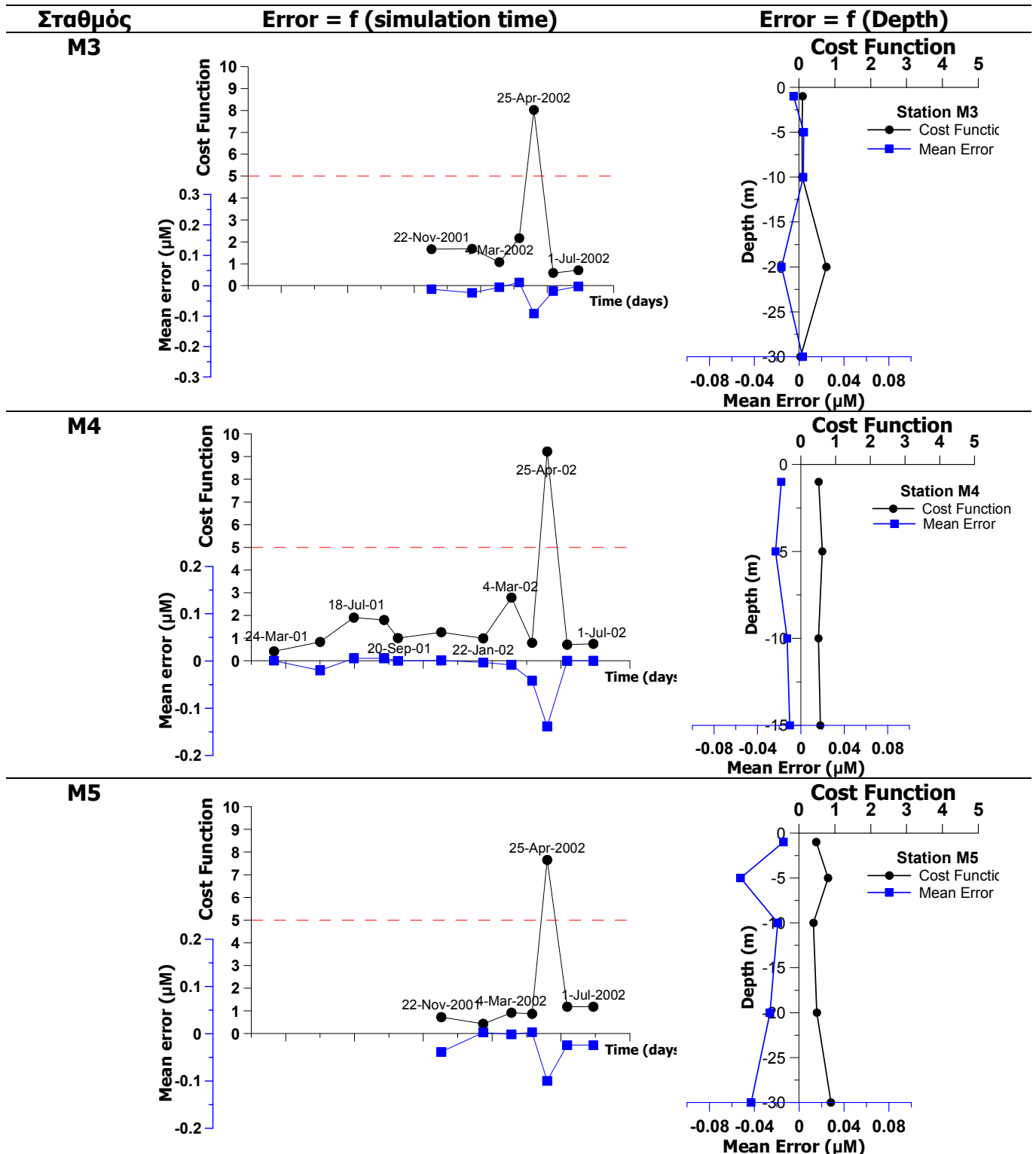
**Σχήμα Π8.11.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης φυτοπλαγκτονικού άνθρακα-  
 Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο  
 εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για  
 κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του  
 μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη  
 γραμμή) για κάθε σταθμό.



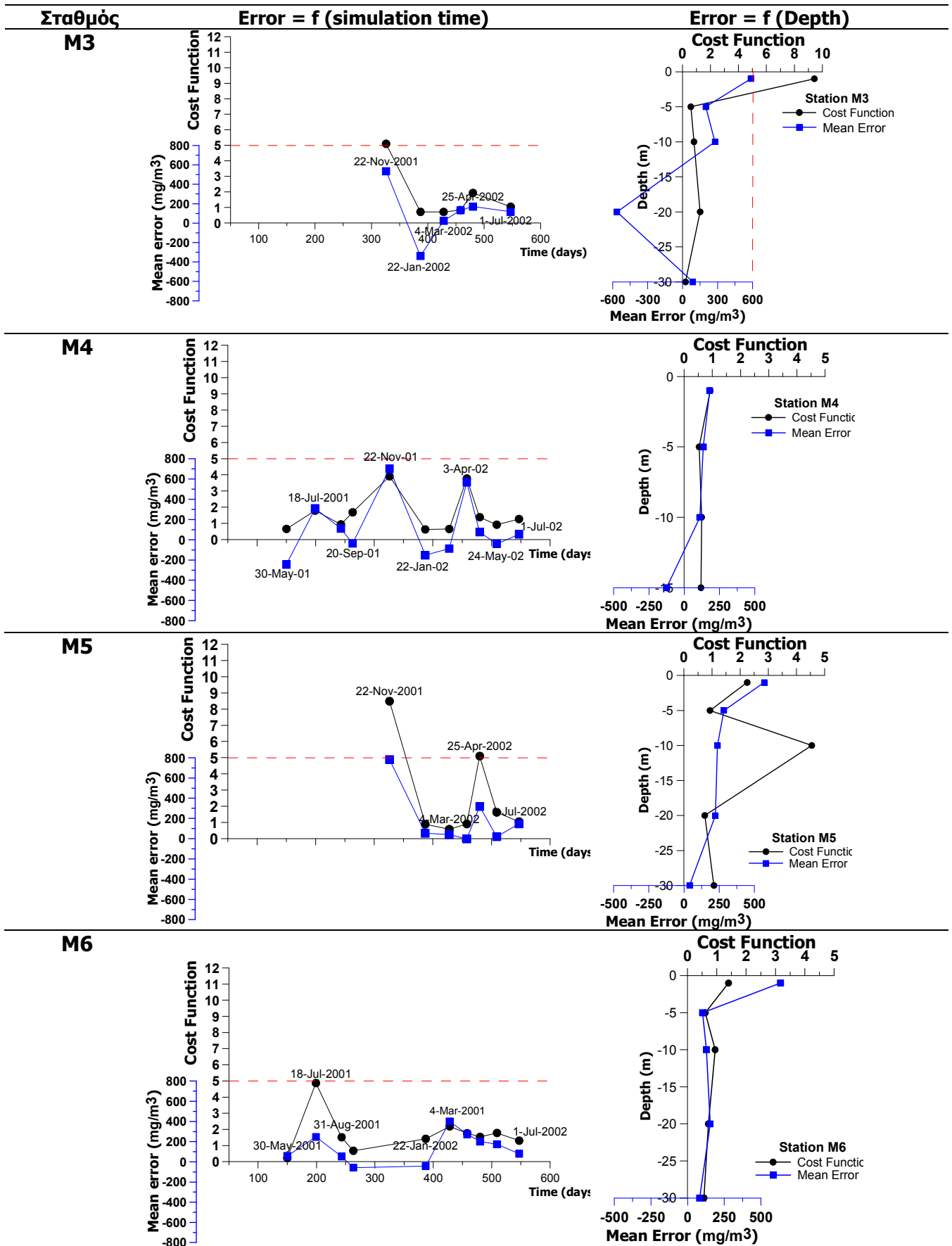
**Σχήμα Π8.12.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **νιτρικών αλάτων** - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



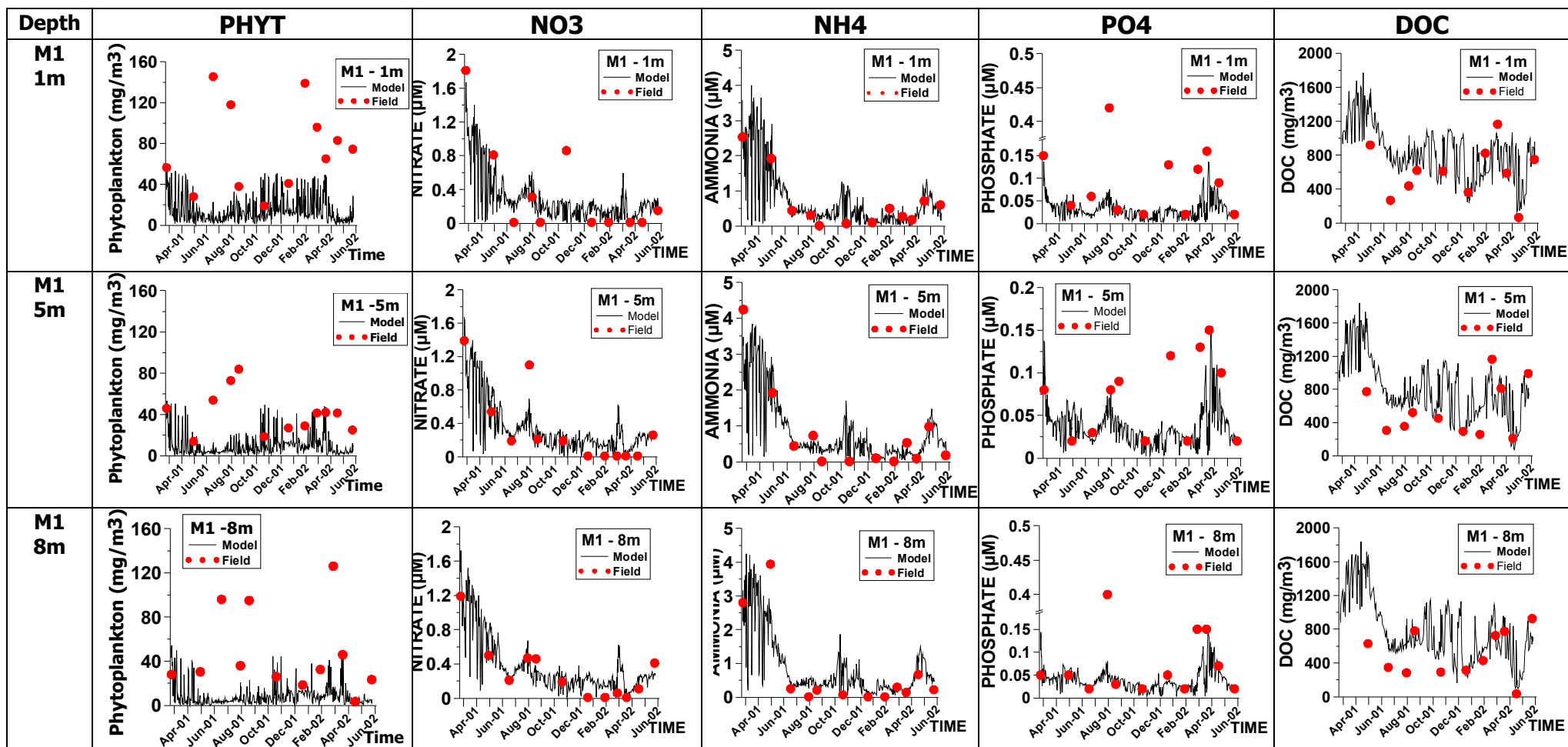
**Σχήμα Π8.13.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **αμμωνιακών αλάτων** - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



**Σχήμα Π8.14.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **φωσφορικών αλάτων** - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



**Σχήμα Π8.15.** Διακύμανση σφάλματος προσομοίωσης **Διαλυμένου Οργανικού Άνθρακα** - Αριστερή στήλη: διακύμανση του συνολικού σφάλματος του μοντέλου στο χρόνο εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό. Δεξιά στήλη: κατακόρυφη κατανομή (προφίλ) του συνολικού σφάλματος του μοντέλου εκφρασμένο ως μέσο σφάλμα (μπλε γραμμή) και συνάρτηση κόστους (μαύρη γραμμή) για κάθε σταθμό.



**Σχήμα Π8.16.** Αποτελέσματα μοντέλου μαζί με δεδομένα πεδίου στα βάθη δειγματοληψίας για όλες τις οικολογικές μεταβλητές κατάστασης – συγκέντρωση φυτοπλαγκτού, νιτρικών, αμμωνιακών, φωσφορικών αλάτων και διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) - για την περίοδο προσομοίωσης (24 Μαρ 2001 – 1 Ιουλ 2002). Σταθμός δειγματοληψίας ανά σελίδα.

