



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**  
**“ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ”**

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ**  
**ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ**  
**ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ:**  
**ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΡΗΤΙΚΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ**

**ΣΥΛΒΙΑ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΑΚΗ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΟΥΝΙΟΣ 2007**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ**  
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**



## *Ευχαριστίες*

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης, στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Επιστήμες και Μηχανική Περιβάλλοντος».

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις μεγαλύτερες των ευχαριστιών μου στην επιβλέπουσα της παρούσας εργασίας, την Αναπλ. Καθηγήτρια Μαρία Κανακίδου, για την ευκαιρία που μου έδωσε καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ερευνητή του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε), Γιώργο Πετυχάκη για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα επίσης να εκφράσω στον Καθηγητή Νικόλαο Μιχαλόπουλο για την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου για την άριστη συνεργασία και τη βοήθεια και το ευχάριστο περιβάλλον που μου προσέφεραν από την πρώτη στιγμή που βρέθηκα στο εργαστήριο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την αγάπη και την έμπρακτη (υλική και ηθική) συμπαράστασή τους σε όλους τους τομείς της ζωής μου και ελπίζω η παρούσα εργασία να είναι για εκείνους, μία μικρή ανταμοιβή για όλα όσα μου προσέφεραν.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<i>Περίληψη</i> .....	1
<i>Abstract</i> .....	
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ .....	1
1.2 ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ.....	5
1.3 ΤΟ ΑΖΩΤΟ ΚΑΙ Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ .....	6
1.3.1 Το άζωτο στο νερό .....	6
1.3.2 Ο βιογεωχημικός κύκλος του N.....	6
1.4 Ο ΦΩΣΦΟΡΟΣ ΚΑΙ Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ .....	11
1.4.1 Ο φώσφορος στο νερό .....	11
1.4.2 Ο βιογεωχημικός κύκλος του φωσφόρου .....	13
1.5 Η ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ ΘΑΛΑΣΣΑ ΚΑΙ ΤΟ ΚΡΗΤΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ .....	16
1.6 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	21
<b>2. ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	
2.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	22
2.1.1 Ξηρή Εναπόθεση.....	22
2.1.1.1 Ξηρή εναπόθεση σωματιδίων .....	22
2.1.1.2 Ξηρή εναπόθεση αερίων.....	24
2.1.2 Υγρή Εναπόθεση .....	24
2.1.2.1 Σάρωση μέσα στα σύννεφα (in-cloud scavenging: σωματίδια και αέρια).....	24
2.1.2.2 Σάρωση κάτω από τα σύννεφα (below-cloud scavenging: σωματίδια) .....	25
2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ & ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΟ ΚΡΗΤΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ .....	27
2.2.1 Σταθμός ατμοσφαιρικών μετρήσεων.....	27
2.2.2 Οι ατμοσφαιρικές μετρήσεις .....	28
2.3 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	32
2.3.1 Σταθμός ωκεανογραφικών μετρήσεων, M3A (Mediterranean Moored Multi- sensor Array) .....	32
2.3.2 Οι θαλάσσιες μετρήσεις .....	36
<b>3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ</b>	
3.1 ΤΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	37
3.2 ΤΟ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....	39
3.3 ΠΕΛΑΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ .....	47
3.3.1 Πρωτογενείς παραγωγοί .....	48
3.3.2 Βιοαποικοδομητές.....	54
3.3.3 Καταναλωτές.....	57
3.3.4 Πελαγικά Θρεπτικά.....	61

<b>4. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ</b>	
4.1 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΥΤΟΠΛΑΓΚΤΟΥ .....	63
4.2 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΕΛΑΓΙΚΩΝ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ ...	69
4.3 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΖΩΟΠΛΑΓΚΤΟΥ .....	72
4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	77
<b>5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΚΡΗΤΙΚΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ</b>	
5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ .....	80
5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ.....	83
5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ.....	86
5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ .....	89
5.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ (chl-a) ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ....	93
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>97</b>
<b>ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ .....</b>	<b>99</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	
A. Υδάτινα οικοσυστήματα και θαλάσσιες περιοχές .....	102
B. Προβλήματα λειτουργίας του Μ3Α και πώς αντιμετωπίστηκαν.....	104
Γ. Λογικό Διάγραμμα Οικολογικού Θαλάσσιου Μοντέλου (ERSEM).....	106
Δ. Λογικό Διάγραμμα της υπορουτίνας Phytoplankton dynamics του οικολογικού θαλάσσιου μοντέλου (ERSEM).....	107
Ε. Συμβολισμοί και Περιγραφή των Παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο Πελαγικό Μοντέλο .....	108
Z. Τιμές των Παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο Πελαγικό Μοντέλο .....	111
Η. Χωρική και χρονική κατανομή της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος.....	113
Θ. Χωρική και χρονική κατανομή της ζωοπλαγκτονικής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος.....	114
Ι. Χωρική και χρονική κατανομή της βακτηριακής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος .....	115
Κ. Χωρική και χρονική κατανομή της χλωροφύλλης - α στο Κρητικό Πέλαγος.....	116
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>117</b>

## Περίληψη

Έχει διαπιστωθεί ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση ιχνοστοιχείων στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις συνθήκες στις ολιγοτροφικές θάλασσες όπως η Μεσόγειος και κυρίως η Ανατολική της Λεκάνη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εναπόθεση στοιχείων όπως το άζωτο (με τη μορφή νιτρικών,  $\text{NO}_3^-$ , και αμμωνιακών,  $\text{NH}_4^+$ ) και ο φώσφορος (ως φωσφορικά,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) που αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη της θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας.

Η παρούσα εργασία μελετά τη συνεισφορά της ατμόσφαιρας ως πηγή εμπλουτισμού του θαλάσσιου οικοσυστήματος του Κρητικού Πελάγους σε θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορο) και κατ' επέκταση τον ρόλο που διαδραματίζει η ατμόσφαιρα στη πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήσαμε ατμοσφαιρικά δεδομένα από επίγειες μετρήσεις στην περιοχή, τα οποία εισήχθησαν σε μονοδιάστατο θαλάσσιο φυσικο - βιογεωχημικό μοντέλο, καθώς και θαλάσσια δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τόσο ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο όσο και ως δεδομένα εκτίμησης της αξιοπιστίας του.

Καταρχήν, διερευνήσαμε την ευαισθησία του μοντέλου μελετώντας την επίδραση αλλαγής διαφόρων παραμέτρων στη βιομάζα των πελαγικών οργανισμών (φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν και βακτήρια). Έχοντας ελέγξει την ευαισθησία του μονοδιάστατου θαλάσσιου μοντέλου, μελετήσαμε την επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου στη θαλάσσια παραγωγικότητα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα προσομοιώσεων όπου λάβαμε υπόψη την ατμόσφαιρα ως πηγή εμπλουτισμού θρεπτικών για το θαλάσσιο οικοσύστημα και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων όπου θεωρήσαμε το οικοσύστημα κλειστό σε εξωτερικές πηγές θρεπτικών, υπολογίσαμε ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση αζώτου και φωσφόρου αυξάνουν κατά αύξηση της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας κατά 60% στα πρώτα 80m βάθος και της χλωροφύλλης-α κατά 90% στα πρώτα 200m βάθος.

60% την πρωτογενή παραγωγικότητα (σε βάθος 0 έως 80m) του θαλάσσιου οικοσυστήματος

90% την χλωροφύλλη-α στο Κρητικό Πέλαγος (σε βάθος 0 έως 200m).

Τα αποτελέσματα έχουν σημαντικές αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις παραμετροποιήσεις των διαφόρων διεργασιών στο μοντέλο και τις ρυθμιστικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και με τη μονοδιάσταση προσομοίωση του θαλάσσιου συστήματος.





## ***Abstract***

It has been realized that the atmospheric deposition of trace elements in the marine environment can influence considerably the conditions in oligotrophic seas as the Mediterranean and mainly her Eastern basin. Particular interest presents the deposition of elements such as nitrogen (main as nitrate,  $\text{NO}_3^-$ , and ammonium,  $\text{NH}_4^+$ ) and phosphorous (as phosphate,  $\text{PO}_4^{-3}$ ), as they are essentially nutritious components for the growth of marine flora and fauna. The present study investigates the contribution of the atmosphere as source nutritious components (nitrogen and phosphor) for the marine ecosystem of the Cretan Sea and consequently the role that the atmosphere plays in the primary marine productivity.

For this purpose, atmospheric deposition measurements of nitrogen and phosphorus over Crete Island in the East Mediterranean are coupled with the sea water observations of nutrient availability and chlorophyll-a in the Cretan Sea by the mean of a 1-dimensional ocean biogeochemical model.

Firstly, the sensitivity of model is investigated by studying the effect of changing various parameters on the biomass of the pelagic organisms (phytoplankton, zooplankton and bacteria).

Taking into account the atmospheric inputs, the 1-dimensional ecosystem model is firstly tuned to simulate the sea water observations in the Cretan sea. Then, the impact of the atmospheric inputs on the ocean productivity is evaluated, by additional sensitivity simulations to these inputs. Further analysis of the underlying biogeochemical dynamics with emphasis on primary production is performed.

This analysis demonstrates that nitrogen and phosphorus atmospheric deposition is enhancing the marine primary productivity by 60% and chlorophyll-a by 90% in the Cretan Sea. The results are subject to uncertainties related to the model parameterizations and adopted parameters and the 1-d representation of the oceanic system.

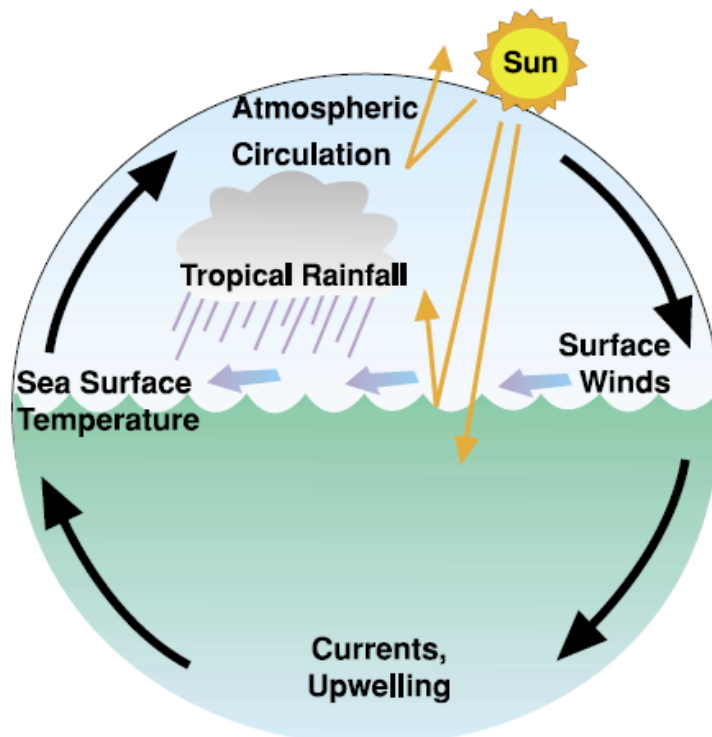


# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ

Η ατμόσφαιρα και οι ωκεανοί συνδέονται στενά μεταξύ τους τόσο μέσα από φυσικούς όσο και από χημικούς κύκλους, οι οποίοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της βιογεωχημείας και της κλιματολογίας του πλανήτη μας.

Γενικά οι ωκεανοί αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι φυσικά (Εικόνα 1.1), μέσω της ανταλλαγής θερμότητας, ύδατος, και ορμής. Οι ωκεανοί, οι οποίοι καλύπτουν περισσότερο από το 70% της επιφάνειας της γης και αποτελούν περίπου το 97% των επιφανειακών υδάτων της, αποθηκεύουν τεράστια ποσά ενέργειας με τη μορφή της θερμότητας. Καθώς η θερμότητα ανέρχεται και εκπέμπεται από τον ωκεανό, μεταβάλλει τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ανέμων, οι οποίοι με τη σειρά τους δημιουργούν τα επιφανειακά θαλάσσια ρεύματα. Επιπλέον, μεταβολές της θερμοκρασίας και της αλατότητας της υδάτινης μάζας, οδηγούν σε κατακόρυφες κινήσεις υδάτων (αναβλύσεις και καταδύσεις) δημιουργώντας ένα σύνθετο σύστημα κυκλοφορίας κατά το οποίο, τα θερμά επιφανειακά ύδατα κινούνται προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, ενώ οι ψυχρές υδάτινες μάζες παραμένουν στα μεγάλα βάθη.



Εικόνα 1.1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ωκεανών και ατμόσφαιρας – Μεταφορά ενέργειας

Μέσω αυτού του σύνθετου θαλάσσιου συστήματος κυκλοφορίας, ωκεανοί και ατμόσφαιρα μαζί, συντελούν στην κατανομή της θερμότητας και στη ρύθμιση του κλίματος του πλανήτη μας.

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι ωκεανοί με την ατμόσφαιρα είναι χημικός, καθώς οι ωκεανοί λειτουργούν τόσο ως παραγωγοί, όσο και ως δέκτες αερίων και σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Εικόνα 1.2). Από τα θερμοκηπικά αέρια, το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι το πιο σημαντικό, καθόσον η συμμετοχή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, ανέρχεται στα 52% (IPCC, 2007) και η δέσμευσή του στη θάλασσα είναι η κύρια πορεία απομάκρυνσής του από την ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας ποσότητας άνθρακα βρίσκεται στους ωκεανούς και οι διαδικασίες που οδηγούν στην ανταλλαγή του μεταξύ θάλασσας και ατμόσφαιρας και μεταξύ επιφανειακών υδάτινων μαζών και βαθιών νερών, είναι κρίσιμες για το κλίμα του πλανήτη μας. Μεταξύ των διεργασιών αυτών, σημαντικό ρόλο έχει η βιολογική διεργασία της φωτοσύνθεσης, δηλαδή η μετατροπή του ανόργανου άνθρακα σε οργανικά συστατικά. Η διαδικασία αυτή της αποθήκευσης οργανικού άνθρακα στα μεγάλα βάθη των ωκεανών είναι γνωστή ως «βιολογική αντλία». Μερικοί ερευνητές πιστεύουν ότι εάν το θαλάσσιο σύστημα κυκλοφορίας μεταβληθεί, οι ωκεανοί θα μπορούσαν να μετατραπούν από αποθήκη, σε πηγή άνθρακα, οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση των συγκεντρώσεων του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

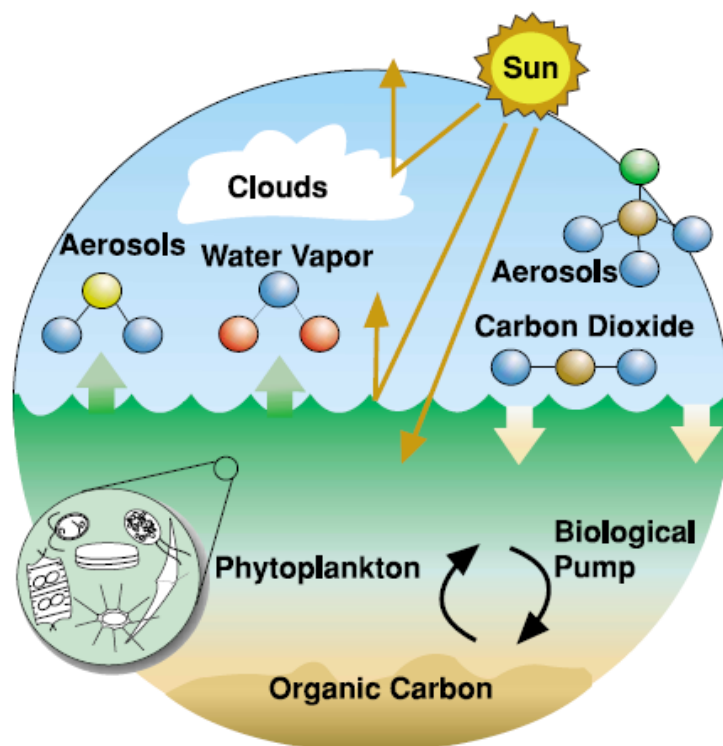
Μέσω της διαδικασίας της εναπόθεσης (τόσο της υγρής όσο και της ξηρής), μεταφέρονται από την ατμόσφαιρα στα θαλάσσια οικοσυστήματα, στοιχεία (όπως το άζωτο, ο φώσφορος, ο σίδηρος κλπ) τα οποία αποτελούν «λίπασμα» για τους θαλάσσιους οργανισμούς. Μία από τις καίριες λοιπόν ερωτήσεις που τίθενται όταν αναφερόμαστε στις κλιματικές αλλαγές, είναι πώς οι φυσικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους ωκεανούς θα αποκριθούν σε χημικές και φυσικές τροποποιήσεις της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, πώς θα μεταβληθεί η παραγωγικότητα των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών μέσα σε ένα τέτοιο περιβάλλον και πώς θα επηρεαστεί η αποδοτικότητα της βιολογικής αντλίας και κατ' επέκταση η αφαίρεση CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα, ώστε να περιοριστεί η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας.

Η πρωτογενής παραγωγικότητα στη πελαγική περιοχή (βλ. Παράρτημα Α) των ωκεανών και θαλασσών οφείλεται αποκλειστικά στη φωτοσύνθεση του φυτοπλαγκτού, στην ευφωτική ζώνη<sup>1</sup>. Η εκθετική απορρόφηση του ηλιακού φωτός μετά του βάρους και οι

---

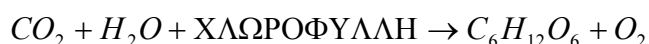
<sup>1</sup> Ως *ευφωτική ζώνη*, ορίζεται το ανώτατο θαλάσσιο στρώμα στο οποίο η ένταση του ηλιακού φωτός είναι αρκετά μεγάλη ώστε η πρωτογενής παραγωγικότητα να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αποικοδόμηση με τη λειτουργία της αναπνοής.

εποχιακές μεταβολές σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος, η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών, η ανάμειξη των υδάτινων μαζών που επηρεάζει την ανακατανομή των θρεπτικών αλάτων, η επίδραση των ανέμων και η δημιουργία επιφανειακών ή ανοδικών ρευμάτων, είναι μερικοί σημαντικοί παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την παραγωγικότητα του φυτοπλαγκτού και κατ' επέκταση την ιχθυοπαραγωγή των ωκεανών και θαλασσών.



**Εικόνα 1.2** Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ωκεανών και ατμόσφαιρας : Ανταλλαγές αερίων και σωματιδίων

Οι φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί με τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης παράγουν οργανικές ενώσεις (σάκχαρα) από διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Ο ρυθμός αυτής της παραγωγής είναι γνωστός ως *πρωτογενής παραγωγικότητα* του φυτοπλαγκτού. Η ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι απαραίτητη για την αντίδραση της φωτοσύνθεσης δεσμεύεται από τις φωτοσυνθετικές χρωστικές (χλωροφύλλη, φυκοξανθίνες κ.λπ.) του φυτοπλαγκτού. Διάφορα άλατα και ιχνοστοιχεία είναι απαραίτητα για την αύξηση των πρωτογενών αυτών παραγωγών. Η γενική αντίδραση της φωτοσύνθεσης μπορεί να αποδοθεί από τη σχέση:



Η φωτοσύνθεση δηλαδή στους φυτοπλαγκτονικούς οργανισμούς δεν διαφέρει από την φωτοσύνθεση των φυτών της ξηράς, αλλά είναι προσαρμοσμένη στις οικολογικές συνθήκες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η σπουδαιότερη φωτοσυνθετική χρωστική των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών είναι η χλωροφύλλη α (Chl-a) της οποίας η μέγιστη

απορρόφηση βρίσκεται στα μήκη κύματος 670-695 nm. Εκτός από τη Chl-a στο φυτοπλαγκτόν υπάρχουν επίσης και πολλές άλλες χρωστικές (Chl-β και γ, καροτίνη α, β, γ, και ε, φυκοξανθίνη κ.α.) που συμμετέχουν στη γενική φωτοσύνθεση της πελαγικής περιοχής. Η μεγάλη ποικιλία των φωτοσυνθετικών χρωστικών του φυτοπλαγκτού επιτρέπει την απορρόφηση των ηλιακών ακτινοβολιών σε μία μεγαλύτερη φασματική περιοχή (400-720 nm) και προσδίδει τα χαρακτηριστικά χρώματα των διαφόρων ειδών του.

Η πραγματοποίηση της φωτοσύνθεσης προϋποθέτει εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία, το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα, και την ύπαρξη στο νερό όλων των δομικών ιχνοστοιχείων του κυττάρου. Η ανάπτυξη της παραγωγικότητας μιας περιοχής εξαρτάται από την αφθονία της σε θρεπτικά συστατικά, όπως το άζωτο (ως  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{NH}_4^+$ ), τον φώσφορο (ως  $\text{PO}_4^{3-}$ ) και το πυρίτιο (ως  $\text{SiO}_2$ ). Τα περισσότερα από αυτά βρίσκονται σε πλεόνασμα στο υδάτινο περιβάλλον. Αν κάποιο από τα συστατικά αυτά δεν είναι διαθέσιμο, τότε μετατρέπεται σε ρυθμιστή της παραγωγικότητας για την περιοχή. Όμως δεν αρκεί ένα στοιχείο να αφθονεί σε μια περιοχή προκειμένου να αναπτυχθεί η παραγωγικότητα της, θα πρέπει παράλληλα το στοιχείο αυτό να βρίσκεται σε βιοαποικοδομήσιμη μορφή ώστε να καθίσταται δυνατή η πρόσληψη του από τους οργανισμούς. Το ποσοστό ενός θρεπτικού συστατικού που είναι πρακτικά διαθέσιμο στους οργανισμούς ενός οικοσυστήματος, για την επιβίωση και ανάπτυξη τους ονομάζεται βιοδιαθεσιμότητα του συγκεκριμένου συστατικού.

Μεταξύ των θρεπτικών συστατικών διακρίνονται ο φώσφορος και το άζωτο, των οποίων η συγκέντρωση στην ευφωτική ζώνη της θάλασσας είναι πολύ χαμηλή ιδιαίτερα κατά τις περιόδους έντονης φωτοσύνθεσης. Σχετικά με την περιοριστική δράση του φωσφόρου και του αζώτου επί της φυτοπλαγκτονικής παραγωγικότητας έχουν διατυπωθεί πολλές απόψεις (Krom et al., 2004, Psarra et al., 2005) και δεν υπάρχει αμφισβήτηση για το γενικότερο ρόλο τους. Σε θαλάσσιες περιοχές όπου οι συγκεντρώσεις του φωσφόρου και του αζώτου (συχνά και άλλων στοιχείων όπως ο σίδηρος ή το πυρίτιο) είναι πολύ μικρές, η παραγωγικότητα του φυτοπλαγκτού είναι πολύ μικρή.

Η ατμοσφαιρική οδός, έχει προταθεί ως μια από τις σημαντικές πηγές εμπλουτισμού των θαλάσσιων οικοσυστημάτων σε θρεπτικά συστατικά (Jickells, 1998) και η συνεισφορά αυτή γίνεται ακόμα πιο σημαντική σε ολιγοτροφικές περιοχές (Owens et al., 1992). Η ροή αυτή προς τη θάλασσα παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα κι έχει, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, δραματικά επηρεαστεί από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τις κλιματικές αλλαγές. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η ικανότητα της θάλασσας να δεσμεύει το  $\text{CO}_2$  μπορεί να επηρεαστεί από τις ανθρώπινες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων μέσω της εναπόθεσής τους στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπου δρουν ως θρεπτικά συστατικά.

## 1.2 ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ

Στα θρεπτικά στοιχεία περιλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες για την επιβίωση ουσίες που προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς. Εκτός από τον άνθρακα, το οξυγόνο και το υδρογόνο, βασικά θρεπτικά συστατικά (μακροθρεπτικά, στοιχεία απαραίτητα σε μεγάλες σχετικά ποσότητες, >1000ppm) των φυτικών οργανισμών μιας θαλάσσιας περιοχής είναι τα νιτρικά, τα νιτρώδη και τα αμμωνιακά ιόντα, τα φωσφορικά ιόντα, το πυρίτιο (απαραίτητο στα διάτομα και σε κάποια άλλα πλαγκτονικά είδη), τα κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, τα ανιόντα θείου κ.α. Μεταξύ άλλων τα κατιόντα των μετάλλων σιδήρου, μαγγανίου, χαλκού και ψευδαργύρου αποτελούν τα μικροθρεπτικά στοιχεία - ιχνοστοιχεία - καθώς είναι απαραίτητα σε μικρές σχετικά ποσότητες (<100ppm, με εξαίρεση το σίδηρο που απαιτείται σε ποσότητες μεταξύ των 100 και 1000ppm) στους οργανισμούς.

Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών στο νερό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιοτική και την ποσοτική αφθονία των οργανισμών. Για παράδειγμα, ο εποικισμός διαφόρων ειδών φυτοπλαγκτού σε ένα θαλάσσιο οικοσύστημα σχετίζεται με τη συγκέντρωση ορισμένων ιόντων ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  κ.α.), ενώ η αύξηση των πληθυσμών τους συνδέεται συνήθως με τη σχετική αφθονία κάποιων άλλων (νιτρώδη, νιτρικά, αμμωνιακά, φωσφορικά, πυριτικά ιόντα).

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, των νιτρωδών, των αμμωνιακών και των φωσφορικών ιόντων παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τροφικής κατάστασης της θαλάσσιας περιοχής και οι τιμές τους είναι ενδεικτικές για τις συνθήκες (ολιγότροφες, μεσότροφες, εύτροφες) που επικρατούν σε αυτή.

## 1.3 ΤΟ ΑΖΩΤΟ ΚΑΙ Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ

### 1.3.1 Το άζωτο στο νερό

Το άζωτο είναι ένα από τα κυριότερα συστατικά του ζωντανού πρωτοπλάσματος (αποτελεί το 1-10% του βάρους των φυτών και περισσότερο από 20-30% του βάρους των ζώων) και επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα των υδατικών οικοσυστημάτων. Το άζωτο υπάρχει στο νερό ως:

- διαλυμένο αέριο άζωτο
- άζωτο δεσμευμένο σε οργανικές ενώσεις, όπως πρωτεΐνες, αμινοξέα, ουρία κ.ά.
- αμμωνία, κυρίως ως αμμωνιακά ιόντα
- νιτρώδη ιόντα
- νιτρικά ιόντα

Εμπλουτισμός των νερών με αζωτούχες ενώσεις επέρχεται από:

- ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του νερού
- τη δέσμευση ατμοσφαιρικού αζώτου στο νερό (ηλεκτρική ή φωτοχημική δέσμευση με κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις).
- από τους μηχανισμούς διάβρωσης και απόπλυσης των εδαφών της λεκάνης απορροής, με τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά.
- παντός είδους απόβλητα που εισρέουν στη θάλασσα περιοχή

Απώλειες αζώτου από μια υδατοσυλλογή μπορεί να προέλθουν από:

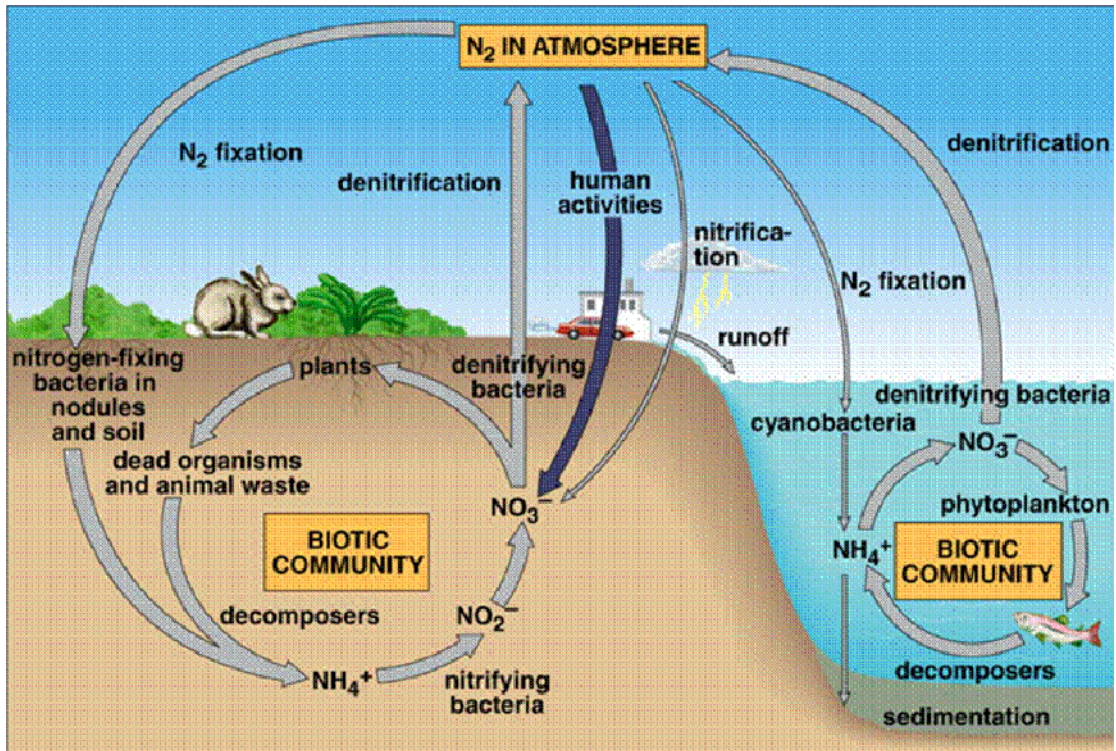
- πλημμυρική εκροή από μια υδάτινη μάζα
- αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο με βακτηριακή απονιτροποίηση και στη συνέχεια διαφυγή του αζώτου στην ατμόσφαιρα.
- μόνιμη καθίζηση στο ίζημα της υδατοσυλλογής ανόργανων και οργανικών συστατικών που περιέχουν άζωτο.

### 1.3.2 Ο βιογεωχημικός κύκλος του N

Το άζωτο (N) αποτελεί σημαντικό στοιχείο όλων των οργανισμών για τη ζωή και την ανάπτυξη τους αφού αποτελεί μέρος των δομικών συστατικών τους. Παρόλο που αποτελεί το 78% του αέρα που αναπνέουμε ( $N_2$ ), βρίσκεται σε τέτοια μορφή που δεν καθίσταται δυνατή η πρόσληψη του από τους οργανισμούς και αυτό οφείλεται στον ισχυρό τριπλό δεσμό των



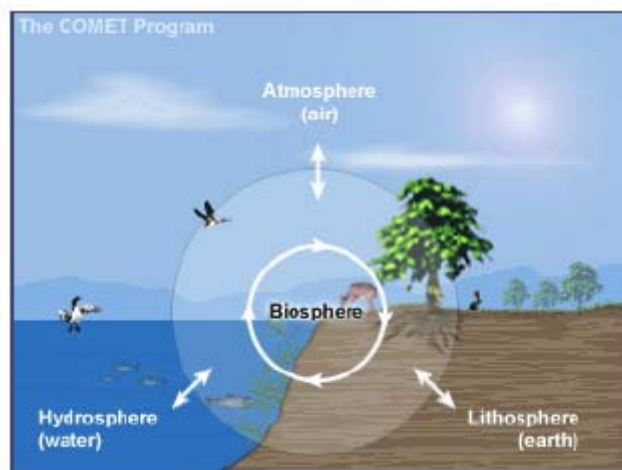
ατόμων του N στα μόρια του αέριου  $N_2$  το οποίο αποτελεί το 99.999% του ατμοσφαιρικού αζώτου. Για να μπορέσουν τα ζώα και τα φυτά να χρησιμοποιήσουν το αέριο άζωτο πρέπει να βρίσκεται σε βιοδιαθέσιμη μορφή όπως αμμωνιακά ιόντα ( $NH_4^+$ ), νιτρικά ( $NO_3^-$ ), ή οργανικό άζωτο (π.χ. ουρία -  $(NH_3)_2CO$ ).



Εικόνα 1.3: Ο κύκλος του αζώτου

Ο βιογεωχημικός κύκλος του αζώτου (N) (Εικόνα 1.3) είναι μεγάλης σημασίας τόσο για την ατμόσφαιρα όσο και για τη βίωση. Οι δραστικές μορφές αζώτου απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα, σε μεγάλο βαθμό, μέσω του σχηματισμού υδατοδιαλυτού νιτρικού οξέος ( $HNO_3$ ), νιτρικών ιόντων ( $NO_3^-$ ) και αμμωνιακών ιόντων ( $NH_4^+$ ), με επακόλουθη υγρή και ξηρή εναπόθεση στην επιφάνεια της ξηράς και της θάλασσας.

Η εναπόθεση αυτών των ενώσεων είναι μεγάλης σημασίας διότι τροφοδοτεί με θρεπτικά το θαλάσσιο οικοσύστημα οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγικότητας του οικοσυστήματος ή ακόμη και σε μείωση λόγω διαταραχής της ισορροπίας μεταξύ των θρεπτικών.

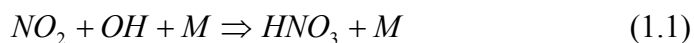


Όπως ήδη έχει αποδειχθεί από τους Duce et al. (1991) και Jickells (1998), η εισροή διαλυτού ανόργανου αζώτου (DIN με τη μορφή  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{NH}_4^+$ ) μέσω της ατμόσφαιρας είναι εξίσου σημαντική με την εισροή αζώτου από τα ποτάμια και τους υπόγειους υδροφορείς.

Προηγούμενες μελέτες που έγιναν στην δυτική και την Ανατολική Μεσόγειο (Loye-Pilot et al., 1990, Kouvarakis et al., 2001) έδειξαν ότι η εναπόθεση ατμοσφαιρικού αζώτου είναι κατά μεγάλο ποσοστό υπεύθυνη για τη νέα θαλάσσια βιογενή παραγωγή αζώτου. Η κατανόηση συνεπώς του σχηματισμού των ενώσεων αυτών στη μεσογειακή ατμόσφαιρα έχει μεγάλη σημασία.

Οι ετερογενείς αντιδράσεις του  $\text{HNO}_3$  με τα θαλάσσια σωματίδια και τα σωματίδια σκόνης, είναι ο κύριος τρόπος σχηματισμού των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) στην περιοχή (Markaki et al., 2003).

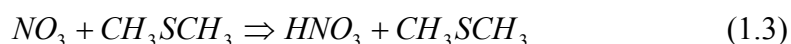
Ο κύριος τρόπος σχηματισμού  $\text{HNO}_3$ , κατά τη διάρκεια της ημέρας, είναι μέσω της αντίδρασης ριζών υδροξυλίου ( $\text{OH}$ ) με διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ).



Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι αντιδράσεις νιτρικών ριζών (δημιουργούμενες από αντίδραση όζοντος με διοξείδιο του αζώτου (Αντίδραση 1.2), είναι οι σημαντικότερες πηγές εφοδιασμού της ατμόσφαιρας με  $\text{HNO}_3$ .



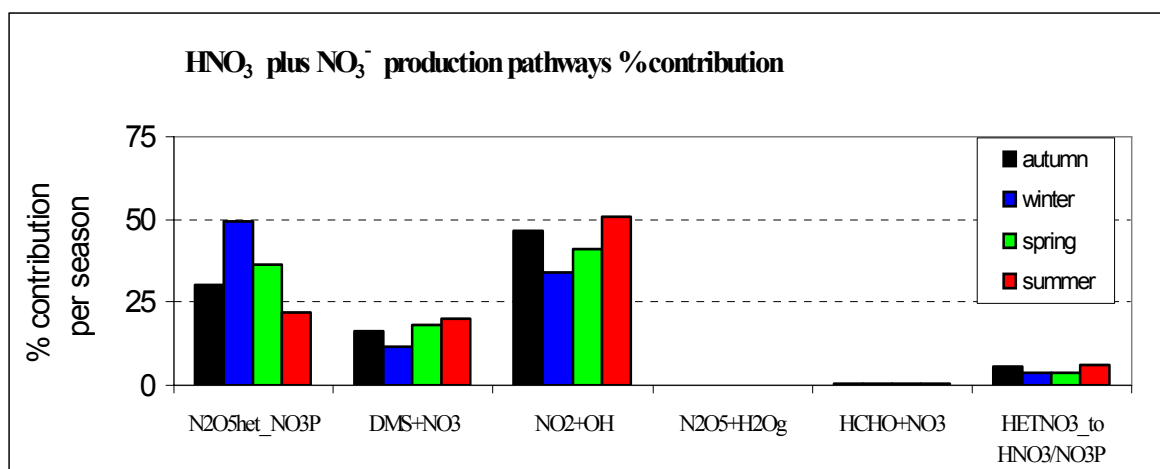
Οι νιτρικές ρίζες αποσπών ένα άτομο υδρογόνου (H) από πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) κυρίως από DMS (διμεθυλοσουλφίδια) και λιγότερο από αλδεύδες και αλκάνια, για να σχηματίσουν  $\text{HNO}_3$ .



Οι ετερογενείς αντιδράσεις των νιτρικών ριζών με τα αιωρούμενα σωματίδια οδηγούν επίσης σε σχηματισμό νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ), σε μικρότερο όμως ποσοστό. Τέλος σχηματισμός  $\text{HNO}_3$  προκύπτει από την αντίδραση πεντοξειδίου του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ) με  $\text{H}_2\text{O}$  πάνω σε σωματίδια.



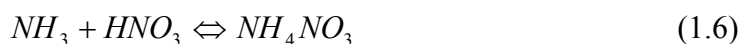
Το ποσοστό συνεισφοράς των παραπάνω αντιδράσεων στο σχηματισμό νιτρικού οξέος παρουσιάζει τόσο ημερήσια όσο και εποχιακή διακύμανση η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 1.4 για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Vrekousis et al., 2006).



**Εικόνα 1.4:** (%) Συνεισφορά της ετερογενούς και ομογενούς χημείας στην εποχιακή παραγωγή του αθροίσματος του νιτρικού οξέος και των νιτρικών ανιόντων. **N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>het\_NO<sub>3</sub>P**: Ετερογενής μετατροπή του  $\text{N}_2\text{O}_5$  σε νιτρικά ανιόντα, **DMS+NO<sub>3</sub>**: Παραγωγή  $\text{HNO}_3$  από αντίδραση του DMS με τις  $\text{NO}_3$  ρίζες **NO<sub>2</sub>+OH**: Παραγωγή  $\text{HNO}_3$  τις ρίζες OH και το  $\text{NO}_2$ , **N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>g</sub>**, **HCHO+NO<sub>3</sub>**: Παραγωγή  $\text{HNO}_3$  από αντίδραση των  $\text{NO}_3$  με HCHO, **HETNO<sub>3</sub>\_to HNO<sub>3</sub>/NO<sub>3</sub>P**: Ετερογενείς αντιδράσεις ριζών  $\text{NO}_3$  που παράγουν  $\text{HNO}_3$  και  $\text{NO}_3^-$  (2 διαφορετικές πορείες). Εικόνα από Vrekousis et al., 2006.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1, όπου παρουσιάζονται οι πηγές προέλευσης τόσο των  $\text{NO}_x$  (πρόδρομες ενώσεις του  $\text{HNO}_3$  και των  $\text{NO}_3^-$ ) και όσο και της  $\text{NH}_3$ , το 80% των εκπομπών τους προέρχεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Η αμμωνία όταν ελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, αντιδράει πολύ γρήγορα με το θειικό και το νιτρικό οξύ προς σχηματισμό αερολυμάτων



**Πίνακας 1.1:** Εκπομπές από διακριτές πηγές, οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) στην ατμόσφαιρα σε moles N γρ<sup>-1</sup> (Galloway et al., 2004)

<i>Δραστηριότητες</i>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>NH<sub>3</sub></b>
<i>Ανθρωπογενείς</i>		
Καύση Βιομάζας	0.5	0.6
Καλλιέργειες	0.2	2.8
Καύση Ορυκτών	1.5	0.01
Βιομηχανία	0.5	0.2
<i>Φυσικές</i>		
Εδάφη, βλάστηση, ζώα	0.2	0.3
Κεραυνοί	0.4	-
Φυσικές φωτιές	0.06	0.06
Εισροή από Στρατόσφαιρα	0.04	0.04
Ανταλλαγή με ωκεανούς	0.4	
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>3.4</b>	<b>4.5</b>

## 1.4 Ο ΦΩΣΦΟΡΟΣ ΚΑΙ Ο ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ

### 1.4.1 Ο φώσφορος στο νερό

Ο φώσφορος, με τη μορφή φωσφορικών κυρίως ιόντων ( $\text{PO}_4^{3-}$  και  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών οργανισμών. Φώσφορος υπάρχει στο μόριο του DNA, του ATP, στην κυτταρική μεμβράνη (φωσφολιπίδια) και αλλού.

Ο φώσφορος αποτελεί συνήθως περιοριστικό παράγοντα της πρωτογενούς παραγωγής και ως εκ τούτου έχει καθοριστική σημασία για την αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Αν και είναι ένα από τα έξι κύρια κυτταρικά στοιχεία (C, H, O, N, P, S) και η αναλογία του στη νωπή βιομάζα του κυτοπλάσματος μπορεί να ξεπερνάει το 0,5%, η παρουσία του στο φλοιό της γης είναι σπανιότερη από αυτή των άλλων πέντε στοιχείων.

Οι ενώσεις του φωσφόρου στο νερό διακρίνονται σε οργανικές ή ανόργανες, διαλυμένες ή σωματιδιακές. Φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο υδάτινο περιβάλλον μεταβάλλουν διαρκώς την αναλογία των παραπάνω μορφών.

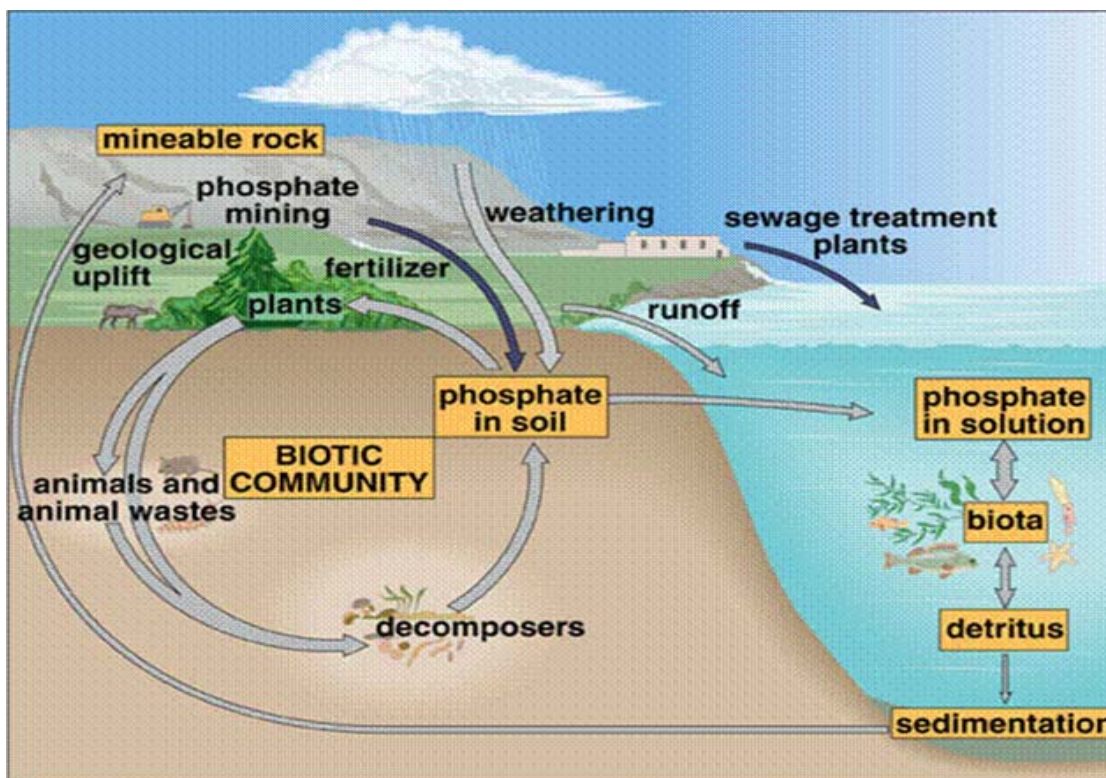
Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό είναι η θερμοκρασία, το pH και η συγκέντρωση των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς αποικοδόμησης των οργανικών ουσιών και συνεπώς την απελευθέρωση φωσφόρου. Παράλληλα βέβαια, υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν την πρόσληψη φωσφόρου από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Συνήθως όμως ο ρυθμός της πρώτης διαδικασίας (απελευθέρωση φωσφόρου) είναι μεγαλύτερος από αυτόν της δεύτερης (δέσμευση φωσφόρου), με αποτέλεσμα υψηλές θερμοκρασίες να επιφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

Το pH σχετίζεται με την εσωτερική τροφοδοσία του νερού σε φώσφορο, την επαναιώρηση δηλαδή του φωσφόρου του πυθμένα. Σε υψηλές τιμές pH συμβαίνει ανταλλαγή των ιόντων υδροξυλίου του νερού με φώσφορο από ενώσεις σιδήρου και αργιλίου του πυθμένα. Συνεπώς αύξηση του pH επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο νερό.

Ανοξικές συνθήκες ευνοούν τη διάχυση του φωσφόρου από τον πυθμένα στο νερό. Αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων μειώνει το ρυθμό απελευθέρωσης του φωσφόρου από τον πυθμένα (και συνεπώς τη συγκέντρωση του φωσφόρου στο νερό) εξαιτίας της οξειδωτικής τους δράσης.

Ο φώσφορος διαλύεται σχετικά δύσκολα στο νερό και η ένωση του με σίδηρο, αργίλιο και ασβέστιο προκαλεί την καθίζησή του. Η τυπική διαδικασία ανακύκλωσης του φωσφόρου σε θαλάσσιο οικοσύστημα περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω: Ο φώσφορος απελευθερώνεται από το επιλίμνιο κατά την αποσύνθεση οργανικών ουσιών και προσλαμβάνεται από το φυτοπλαγκτόν και την υπόλοιπη υδρόβια βλάστηση. Ο θάνατος και η αποικοδόμηση των οργανισμών εμπλουτίζει το νερό με φωσφορικές ενώσεις που καθιζάνουν στον πυθμένα, ενώ παράλληλα συμβαίνει διάχυση του φωσφόρου από το ίζημα στο νερό (εσωτερική τροφοδοσία της υδάτινης στήλης σε φώσφορο).

Στα περισσότερα φυσικά νερά οι συγκεντρώσεις του ολικού φωσφόρου (το σύνολο του ανόργανου και οργανικού, διαλυμένου και σωματιδιακού φωσφόρου) κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10 και 50μg/l. Ωστόσο σε μη παραγωγικά, ολιγότροφα νερά η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου μπορεί να είναι μικρότερη από 5μg/l, ενώ σε πολύ εύτροφες συνθήκες μπορεί να υπερβαίνει τα 100 μg/l.



Εικόνα 1.5: Ο κύκλος του φωσφόρου

#### 1.4.2 Ο βιογεωχημικός κύκλος του φωσφόρου

Ο φώσφορος δεν απαντάται ελεύθερος στο περιβάλλον (Εικόνα 1.5), αλλά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και στα θαλάσσια οικοσυστήματα, μέσω ανθρωπογενών και φυσικών διεργασιών, είτε ως σωματιδιακός είτε ως διαλυτός (ανόργανος ή οργανικός) φώσφορος.

Σημαντική συμβολή στις ποσότητες σωματιδιακού φωσφόρου που απαντώνται στην ατμόσφαιρα έχουν η μεταφορά σκόνης από έρημους, η φυσική διάβρωση και αποσάθρωση των ηπειρωτικών εδαφών και πετρωμάτων, καθώς και άλλες βιογενείς πηγές (υπολείμματα φυτών, εντόμων κ.λ.π.). Επίσης οι καύσεις βιομάζας, αποτέλεσμα φυσικών ή ανθρωπογενών διεργασιών κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες τόσο διαλυτού όσο και σωματιδιακού φωσφόρου. Τέλος, πηγές φωσφορικών στα θαλάσσια οικοσυστήματα, αποτελούν οι εκροές των ποταμών και η εσωτερική ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φαινόμενα της υγρής και ξηρής εναπόθεσης, μιας και συνεισφέρουν στην αύξηση των ποσοτήτων φωσφόρου που εναποτίθενται στους ωκεανούς, ενώ αντίστοιχα συμβάλλουν στη μείωση του στην ατμόσφαιρα. Τα επιπλέοντα σωματίδια πλούσια σε φωσφορικά καθιζάνουν σταδιακά στο βυθό. Αυτή η συνεχώς επαναλαμβανόμενη διαδικασία καθίζησης οδηγεί τελικά στη μόνιμη απομάκρυνση κάποιων ποσοτήτων φωσφόρου από τη βιοκυκλοφορία<sup>2</sup>, μίας και αυτές «θάβονται» τόσο βαθιά που η επανείσοδος τους στην στήλη του υπερκείμενου ύδατος είναι σχεδόν αδύνατη (Smith, 1990). Αντίθετα ο φώσφορος που εναποτίθεται στα ανώτερα στρώματα του βυθού εξακολουθεί να είναι ενεργό κομμάτι του βιογεωχημικού κύκλου του φωσφόρου, αφού μέσω μηχανικών και χημικών διεργασιών, μπορεί να απελευθερωθεί και πάλι από τα ιζήματα.

Στις λίμνες, στα ποτάμια και στα θαλάσσια οικοσυστήματα ο φώσφορος μπορεί να βρεθεί είτε στη σωματιδιακή, είτε στη διαλυτή φάση. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει ο φώσφορος που έχει δεσμευθεί από το φυτοπλαγκτόν ή έχει απορροφηθεί πάνω σε σωματίδια. Ο ανόργανος φώσφορος (ορθοφωσφορικά), ο οργανικός ως αποτέλεσμα ζωικών εκκρίσεων και ο μακρομοριακός κολλοειδής φώσφορος, αντιπροσωπεύουν την διαλυτή φάση. Οι διάφορες μορφές υπόκεινται σε συνεχείς μετασχηματισμούς, ακολουθώντας ένα συνεχώς επαναλαμβανόμενο κύκλο.

---

<sup>2</sup> Με τον όρο βιοκυκλοφορία, αναφερόμαστε στον κύκλο του φωσφόρου μέσα από τις βιολογικές διεργασίες του θαλάσσιου οικοσυστήματος.

Στα φυσικά νερά ο φώσφορος βρίσκεται κατά κανόνα με τη μορφή φωσφορικών ιόντων, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε ορθοφωσφορικά ιόντα (κυριότερη μορφή φωσφόρου, συνήθως ως διαλυτά άλατα αλκαλίων), συμπυκνωμένα φωσφορικά ιόντα (πυρο-, μετα- και άλλα πολυφωσφορικά ιόντα) και οργανικά συνδεδεμένα ιόντα. Οι φωσφορικές αυτές ενώσεις μπορεί να είναι είτε διαλυτές (π.χ. άλατα αλκαλίων), είτε αδιάλυτες, κυρίως με τη μορφή αλάτων ασβεστίου ως αιωρούμενα στερεά (Πίνακας 1.2).

**Πίνακας 1.2:** Συχνότερες μορφές φωσφόρου απαντώμενες στη φύση

<p align="center"><b>Μονοφωσφορικά ιόντα</b> (<i>Monophosphate</i>)</p>	<p>Orthophosphoric acid, <math>H_3PO_4</math> Sodium phosphate, <math>NaH_2PO_4</math> Disodium phosphate, <math>Na_2HPO_4</math> Diammonium phosphate, <math>(NH_4)_2HPO_4</math> Trisodium phosphate, <math>Na_3PO_4</math></p>
<p align="center"><b>Πολυφωσφορικά ιόντα και φωσφορικοί εστέρες</b> (<i>Polyphosphate</i>)</p>	<p>Pyrophosphate, <math>P_2O_7^{4-}</math> Tripolyphosphate, <math>P_3O_{10}^{4-}</math> Trimetaphosphate, <math>P_3O_9^{3-}</math> Hexametaphosphate, <math>(PO_3)_6^{3-}</math></p>
<p align="center"><b>Πολυφωσφορικά που υδρολύονται σε υδατικά διαλύματα σχηματίζοντας μονοφωσφορικά ιόντα</b></p>	<p align="center"><math>P_2O_7^{4-} + H_2O \rightarrow 2HPO_4^{2-}</math></p>
<p align="center"><b>Οργανικά φωσφορικά ιόντα</b></p>	<p align="center">DNA, RNA, ATP και φωσφολιπίδια</p>

Η βιοδιαθεσιμότητα του φωσφόρου εξαρτάται από τη μορφή (ορθοφωσφορικά, οργανικά συνδεδεμένα ιόντα κτλ), αλλά και από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται, σωματιδιακή ή διαλυτή. Σημαντικοί επίσης παράγοντες για το είδος των φωσφορικών που απελευθερώνονται στο περιβάλλον είναι η προέλευση (πηγή εκπομπής), το μέγεθος των σωματιδίων, οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες στα επιφανειακά ύδατα.



Πρόσφατες μελέτες απέδειξαν ότι ο σωματιδιακός φώσφορος είναι λιγότερο βιοδιαθέσιμος σε σχέση με το διαλυτό φώσφορο, αλλά και ότι ο ανθρωπογενούς προέλευσης P είναι επίσης σημαντικότερος για τη θαλάσσια παραγωγικότητα σε σχέση με τον φυσικής προέλευσης. Οι Loye-Pilot και Martin (1996) απέδειξαν ότι βροχοπτώσεις μετά από επεισόδια σκόνης από τη Σαχάρα, εμπλουτίζουν την ατμόσφαιρα με σωματιδιακό φώσφορο, ο οποίος όμως είναι μικρής αξίας ως προς τη βιοδιαθεσιμότητα του αν λάβουμε υπόψη ότι η μέγιστη διαλυτότητα του είναι μόνο 8%. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο, προέκυψε από την μελέτη των Herut et al. (1999), οι οποίοι απέδειξαν ότι ο σωματιδιακός ανόργανος φώσφορος από σωματίδια Ευρωπαϊκής προέλευσης, άρα και με μεγαλύτερη ανθρώπινη επίδραση, είναι περισσότερο διαλυτός (45-50%) σε σχέση με το σωματιδιακό φώσφορο που προέρχεται από την Σαχάρα. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το γεγονός ότι όταν τα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια έρχονται σε επαφή με τις σταγόνες της βροχής, ένα μέρος από τον σωματιδιακό φώσφορο που περιέχουν (σε κατάλληλο pH), μετατρέπεται σε διαλυτά ορθοφωσφορικά (DIP), μεγάλης βιοδιαθεσιμότητας για το θαλάσσιο οικοσύστημα.

## 1.5 Η ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ ΘΑΛΑΣΣΑ ΚΑΙ ΤΟ ΚΡΗΤΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ

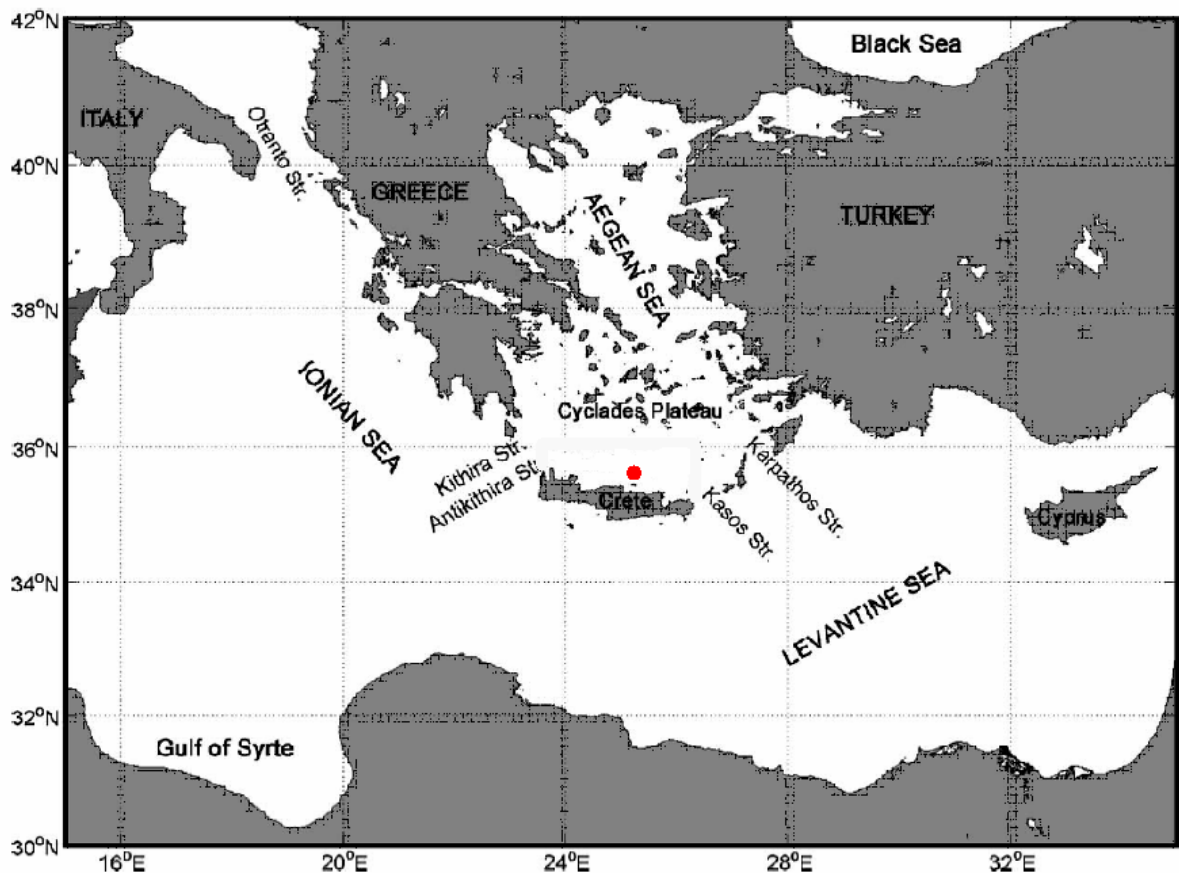
Οι θάλασσες, αποτελούν υδάτινες μάζες οι οποίες είναι, άλλες σε μικρότερο και άλλες σε μεγαλύτερο βαθμό, απομονωμένες από τους ωκεανούς με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανταλλαγή υδάτινων μαζών και κατ' επέκταση την ύπαρξη ιδιαίτερων χαρακτηριστικών.

Η Μεσόγειος θάλασσα μπορεί να θεωρηθεί σαν μία μικρογραφία ενός μεγάλου ωκεανού. Θεωρείται ταυτόχρονα, ως εκτεταμένη υδάτινη λεκάνη καθώς έχει έκταση που φθάνει τα 2.500.000km<sup>2</sup> και μήκος ακτογραμμής 46.000km (μεγαλύτερο από την περίμετρο της γης στον Ισημερινό), αλλά και ως περιορισμένη υδάτινη λεκάνη καθώς καταλαμβάνει μόνο το 0.7% της έκτασης των ωκεανών ενώ η μέγιστη απόσταση μεταξύ των χερσαίων τμημάτων της δεν ξεπερνά τα 800km.

Με βάση τα γεωμορφολογικά, κλιματολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά, η Μεσόγειος διακρίνεται σε 2 κύριες λεκάνες, την δυτική και την ανατολική. Η δυτική λεκάνη, η οποία αποτελείται από μικρότερες θάλασσες (Θάλασσα του Alboran, Θάλασσα Αλγερίας – Προβηγκίας, Τυρρηναϊκή Θάλασσα) και έχει μέγιστο βάθος 3.600 m, ταξινομείται ως μία σχετικά ευτροφική και παραγωγική λεκάνη τα χαρακτηριστικά της οποίας διατηρούνται επαρκώς σε όλη την έκταση της ώστε να θεωρείται ότι απαρτίζει μία «ενιαία λεκάνη». Η ανατολική λεκάνη της Μεσογείου, αντίθετα, η οποία περιλαμβάνει την Αδριατική Θάλασσα, το Ιόνιο Πέλαγος, το Αιγαίο Πέλαγος και τη Θάλασσα της Λεβαντίνης, είναι βαθύτερη με μέγιστο βάθος που φθάνει τα 5.121m (ΝΔ Πελοποννήσου), σε σχέση με τη δυτική, ενώ μεγάλα τμήματα της είναι σχετικά ρηχά (βάθος < 500m).

Η Μεσόγειος Θάλασσα είναι σχετικά απομονωμένη καθώς υπάρχουν μόνο δύο διάυλοι επικοινωνίας με τις γειτονικές θάλασσες: α) τα Στενά του Γιβραλτάρ (με πλάτος 17km και μέγιστο βάθος 350m) μέσω των οποίων γίνεται η επικοινωνία με τον Ατλαντικό Ωκεανό και β) η Διώρυγα του Σουέζ (με πλάτος 400m) μέσω της οποίας γίνεται η επικοινωνία με την Ερυθρά Θάλασσα. Υπάρχει βέβαια κι ένας ακόμη διάυλος επικοινωνίας με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των Στενών των Δαρδανελίων (με πλάτος 450m έως 7.4km και βάθος 55m) και το Βόσπορο, αλλά αυτή η θαλάσσια περιοχή, θεωρείται ότι αποτελεί εσωτερική θάλασσα της Μεσογείου.

Το Κρητικό Πέλαγος εκτείνεται βόρεια έως το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων (έως την ισοβαθή 400m) και νότια έως το νησιωτικό Κρητικό τόξο. Συνδέεται δε, με τη Θάλασσα της Λεβαντίνης και το Ιόνιο Πέλαγος μέσω των στενών της Κάσου και της Καρπάθου και των στενών των Κυθήρων και Αντικυθήρων αντίστοιχα (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Χάρτης της ανατολικής Μεσογείου και της περιοχής μελέτης.

Οι ιδιομορφίες της υδρογραφίας της Μεσογείου είναι υπεύθυνες για την ιδιαιτερότητα των φαινομένων που χαρακτηρίζουν το περιβάλλον της. Ο χρόνος ανανέωσης των υδάτων υπολογίζεται περίπου 100 χρόνια. Συνολικά η Μεσόγειος θεωρείται ως μια λεκάνη πυκνών υδάτινων μαζών, εφόσον η ολική εξάτμιση υπερβαίνει τη βροχόπτωση και την εισροή υδάτων από τα ποτάμια. Το έλλειμμα στο υδατικό ισοζύγιο αναπληρώνεται από την εισροή υδάτινων μαζών από τον Ατλαντικό Ωκεανό.

Μέχρι σήμερα, μία σειρά ερευνητικών προγραμμάτων που έλαβαν χώρα στην Α. Μεσόγειο (POEM, Theoharis et al., 1993, MTP-PELAGOS, Baloropoulos et al., 1996, CINCS, Georgopoulos et al., 2000, MFSPP & MFSTEP) έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στην θαλάσσια περιοχή του Κρητικού Πελάγους, η οποία αποτελεί τη νοτιότερη και μεγαλύτερη σε έκταση θαλάσσια λεκάνη του Αιγαίου Πελάγους. Τα προγράμματα αυτά μας έδωσαν σημαντικές πληροφορίες για τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της θαλάσσιας περιοχής, υποδεικνύοντας τη διαχρονική τους μεταβλητότητα και τη σημαντική συνεισφορά του Κρητικού Πελάγους

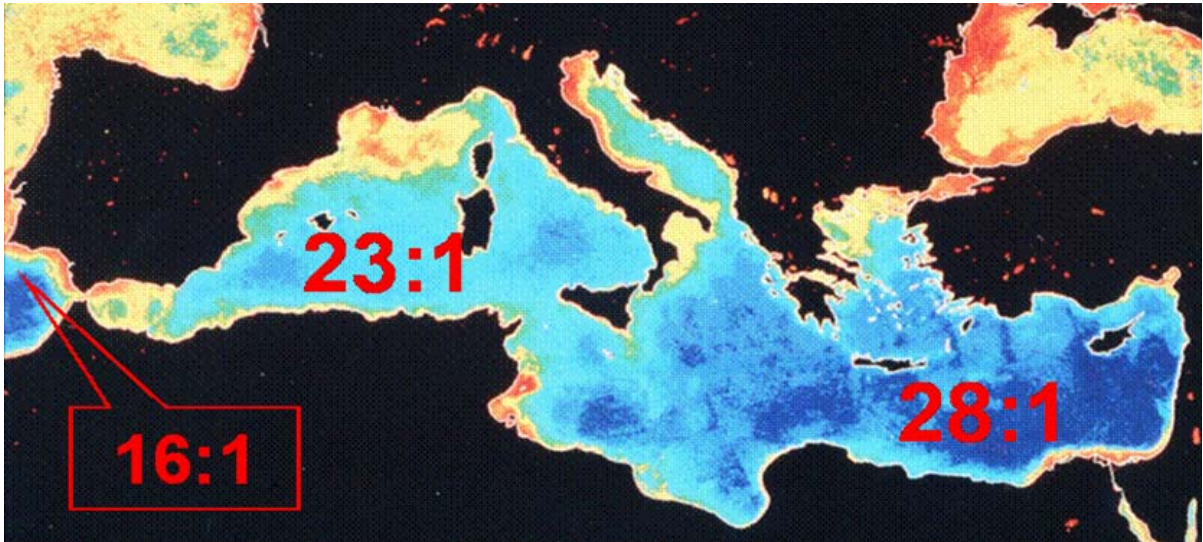
στη σύσταση των βαθιών νερών της ανατολικής Μεσογείου (Lascaratos et al., 1999, Rother, 1996).

Η Μεσόγειος θάλασσα και κυρίως η ανατολική της λεκάνη θεωρείται μία από τις περισσότερο ολιγοτροφικές περιοχές στον κόσμο, όσον αφορά την πρωτογενή παραγωγικότητα και τις συγκεντρώσεις θρεπτικών αλάτων και χλωροφύλλης-α (Krom et al., 1991, 1992, Ignatiades, 1998, Tselepides et al., 2000).

Ο ολιγοτροφικός χαρακτήρας της Ανατολικής Μεσογείου έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών (Vollenweider et al, 1996) οι οποίοι έχουν χαρακτηρίσει την περιοχή ως μία από τις λιγότερο παραγωγικές θάλασσες του κόσμου με εξαιρετικά μικρούς φυτοπλαγκτονικούς πληθυσμούς και πολύ χαμηλή παραγωγικότητα (Yacobi et al., 1995, Berthoux et al., 1998, Psarra et al., 2000).

Στην ημίκλειστη θάλασσα της Μεσογείου, τα θρεπτικά άλατα, είναι δείκτες των βιολογικών κύκλων, της παραγωγικότητας, των φυσικών και ανθρωπογενών εισροών και των διαδικασιών μεταφοράς. Η συγκέντρωση των θρεπτικών αλάτων εξαρτάται από τις εισερχόμενες υδάτινες μάζες και την περιεκτικότητα αυτών σε θρεπτικά συστατικά μέσω των Στενών του Γιβραλτάρ μαζί με τις χερσαίες και ατμοσφαιρικές εισροές. Στη λεκάνη της Μεσογείου παρατηρείται διαβάθμιση στη συγκέντρωση των θρεπτικών πηγαίνοντας προς τα ανατολικά, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη ποσότητα χλωροφύλλης- α στην ΝΑ περιοχή της Μεσογείου.

Στα περισσότερα ολιγοτροφικά οικοσυστήματα, ο θρεπτικός ρυθμιστής είναι το άζωτο. Σε αντίθεση με τα συστήματα αυτά, η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από έλλειψη φωσφόρου με αποτέλεσμα το θρεπτικό αυτό συστατικό να καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την πρωτογενή και βακτηριδιακή παραγωγή (Krom et al., 1991, 1992). Η υπόθεση αυτή ενισχύεται από την υψηλή τιμή του θαλάσσιου λόγου N:P, ίση με 28:1, που παρατηρείται στη περιοχή της ΝΑ Μεσογείου (Εικόνα 1.7). Ο αντίστοιχος λόγος, για την ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, είναι ίσος με 26.8 (Tselepides et al., 1993, CINCS, 1996), ενώ η φυσιολογική τιμή του λόγου για τα θαλάσσια οικοσυστήματα θεωρείται 16 (Codispoti, 1989), ακολουθώντας το λόγο Redfield. Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση του λόγου από τα δυτικά προς τα ανατολικά (από μια τιμή 23 σε 28), ακολουθώντας την αύξηση του ολιγοτροφικού χαρακτήρα της Μεσογείου, δίνοντας μια επιπλέον ένδειξη ότι ο φώσφορος δρα ως ο ρυθμιστικός παράγοντας της παραγωγικότητας της Ανατολικής Μεσογείου (Krom et al., 1991, 1992).



Εικόνα 1.7: Λόγος Redfield στην δυτική και ανατολική λεκάνη της Μεσογείου.

Ο Redfield είναι αυτός που πρώτος εξέτασε τη σχέση ανάμεσα στο  $\text{CO}_2$ , τα  $\text{NO}_3^-$ , τα  $\text{PO}_4^{3-}$  και το  $\text{O}_2$ , στο θαλασσινό περιβάλλον με βάση τη μέση σύσταση τους στο φυτοπλαγκτόν και υπολόγισε ότι ο λόγος των C:N:P:O πρέπει να είναι σχετικά σταθερός. Αυτό οφείλεται στο ότι τα φυτά για να αναπτυχθούν χρειάζονται τα στοιχεία αυτά να είναι σε συγκεκριμένες αναλογίες και έτσι μετά το θάνατο τους απελευθερώνονται στο θαλασσινό νερό καθορίζοντας τη σχέση μεταξύ τους. Η αντίδραση που πιστεύεται ότι είναι υπεύθυνη δίνεται παρακάτω:



Έτσι ο λόγος C:N:P:O αναμένεται να είναι 106:16:1:138. Οι λόγοι αυτοί έχουν επαληθευτεί σε αρκετά θαλάσσια οικοσυστήματα και γι' αυτό έχουν καθιερωθεί ως λόγοι Redfield.

Η τροφοδοσία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων με θρεπτικά συστατικά, εκτός από τις εσωτερικές διεργασίες ανακύκλωσης τους (αναγέννησης), γίνεται και από εξωτερικές πηγές όπου η ανθρωπογενής συμμετοχή είναι αισθητή.

Τέτοιες πηγές είναι κυρίως τα μεγάλα ποτάμια, οι παράκτιες περιοχές (κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα) και η εναπόθεση από την ατμόσφαιρα. Η συμμετοχή του κάθε παράγοντα εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της κάθε περιοχής.

Η περιοχή του Κρητικού Πελάγους δεν έχει μεγάλα ποτάμια, ούτε έχει τα μεγάλα αστικά κέντρα της δυτικής λεκάνης, με αποτέλεσμα ο ρόλος της ατμοσφαιρικής οδού, ως πηγή θρεπτικών συστατικών, να γίνεται ακόμη πιο σημαντικός (Martin et al., 1989, Herut et al., 1999). Πιστεύεται ότι περιοχές που η ατμοσφαιρική οδός είναι η κύρια πηγή των θρεπτικών συστατικών (όπως είναι η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου) μπορεί να οδηγηθούν σε έλλειψη φωσφόρου (Fanning, 1989). Αυτό αποτελεί μια ένδειξη ότι στην υπό μελέτη περιοχή πιθανόν ο ρυθμιστής να είναι ο φώσφορος. Παρ' όλη τη σπουδαιότητα αυτών των εργασιών, λίγες είναι εκείνες που έχουν γίνει για τη μελέτη της επίδρασης της ατμόσφαιρας στο θαλάσσιο οικοσύστημα τόσο στην υπό μελέτη περιοχή, όσο και στις υπόλοιπες περιοχές του κόσμου. Από αυτές διαφαίνεται ότι η ατμοσφαιρική οδός ως πηγή θρεπτικών είναι αρκετά σημαντική (Duce et al., 1991, Jickells, 1998) και σε αρκετές περιπτώσεις είναι ισοδύναμη ή και μεγαλύτερη από τη συμβολή των ποταμιών στη τροφοδοσία των θαλασσών σε θρεπτικά συστατικά (Bashkin et al., 1997, Guerzoni et al., 1999, Krom et al., 2004).

## 1.6 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η περιοχή του Κρητικού Πελάγους δεν έχει μεγάλα ποτάμια, ούτε έχει τα μεγάλα αστικά κέντρα της δυτικής λεκάνης, με αποτέλεσμα ο ρόλος της ατμοσφαιρικής οδού, ως πηγή θρεπτικών συστατικών γι' αυτό το θαλάσσιο οικοσύστημα, να γίνεται ακόμη πιο σημαντικός (Martin et al., 1989, Herut et al., 1999). Πιστεύεται ότι οι θαλάσσιες περιοχές στις οποίες η ατμοσφαιρική οδός είναι η κύρια πηγή θρεπτικών συστατικών (όπως είναι η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου), μπορεί να οδηγηθούν σε διαταραχή του λόγου N:P με αποτέλεσμα ο φώσφορος να γίνεται ο ρυθμιστής της πρωτογενούς παραγωγικότητας.

Παρ' όλη τη σπουδαιότητα της κατανόησης των παραγόντων που ρυθμίζουν την πρωτογενή παραγωγικότητα στη θάλασσα και κατά συνέπεια ενός μέρους του ρόλου της θάλασσας ως δεσμευτή του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>, λίγες μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την επίδραση της ατμόσφαιρας στο θαλάσσιο οικοσύστημα τόσο Ανατολική Μεσόγειο, όσο και στις υπόλοιπες περιοχές του κόσμου. Από αυτές διαφαίνεται ότι η ατμοσφαιρική οδός ως πηγή θρεπτικών είναι αρκετά σημαντική και σε αρκετές περιπτώσεις είναι ισοδύναμη ή και μεγαλύτερη από τη συμβολή των ποταμών στη τροφοδοσία των θαλασσών σε θρεπτικά συστατικά (Bashkin et al., 1997, Guerzoni et al., 1999, Krom et al., 2004).

Ο κυρίαρχος ρόλος της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και του φωσφόρου, στο θαλάσσιο ισοζύγιο των θρεπτικών αυτών συστατικών των θαλάσσιων οικοσυστημάτων της Ανατολικής Μεσογείου έχει εκτιμηθεί από τους Kounarakis et al. (2001), Markaki et al. (2003), και Krom et al. (2004). Απώτερος σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να εκτιμήσει την επίδραση (μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N και P) των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και της κλιματικής αλλαγής στο θαλάσσιο οικοσύστημα του Κρητικού Πελάγους μέσα από τη σύζευξη της ατμοσφαιρικής χημείας (εναπόθεση) με την ωκεανογραφία (μεταφορά στη θάλασσα) και τη θαλάσσια βιολογία (πρωτογενής παραγωγικότητα). Συγκεκριμένα θα εκτιμηθούν οι αλλαγές που επιφέρει στη χλωροφύλλη-α, η ατμοσφαιρική εναπόθεση των διαλυτών μορφών τόσο του N όσο και του P και πώς αυτή αντιδρά στις πρόσφατες χρονικές μεταβολές της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης. Για αυτό το σκοπό, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα χρησιμοποιηθούν ατμοσφαιρικά δεδομένα από επίγειες μετρήσεις στην περιοχή, τα οποία θα εισαχθούν σε μονοδιάστατο θαλάσσιο φυσικό – βιογεωχημικό μοντέλο, καθώς και θαλάσσια δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν τόσο ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο όσο και ως δεδομένα εκτίμησης της αξιοπιστίας του.

## 2. ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 2.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 2.1.1 Ξηρή Εναπόθεση

##### 2.1.1.1 Ξηρή εναπόθεση σωματιδίων

Η απομάκρυνση των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα γίνεται κυρίως λόγω της εναπόθεσης τους. Η διάχυση και η ιζηματογένεση είναι οι κύριες πορείες που οδηγούν τα σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους. Η ροή εναπόθεσης  $F$  μιας ένωσης εξαρτάται από τη ταχύτητα εναπόθεσης  $V_g$  και από τη συγκέντρωση της  $[C]$  σε κάποιο ύψος.

$$F = V_g \cdot [C] \quad (2.1)$$

Η ταχύτητα εναπόθεσης είναι δυνατό να εκφραστεί και ως το αντίστροφο της αντίστασης εναπόθεσης:

$$V_g = 1/R_t \quad (2.2)$$

όπου  $V_g$  είναι η ταχύτητα εναπόθεσης και  $R_t$  η συνολική αντίσταση εναπόθεσης.

Η διάμετρος των σωματιδίων αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα στην εναπόθεσή τους που εξαρτάται από την υφή της επιφάνειας εναπόθεσης, την ένωση, την επιφανειακή ταχύτητα ανέμου και τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας, καθόσον ανάλογα με τη διάμετρο των σωματιδίων υπάρχει διαφορετικός μηχανισμός απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα.

Έτσι:

- για σωματίδια με διάμετρο  $< 0.2\mu\text{m}$  η εναπόθεση καθορίζεται από τη διάχυση Brown<sup>3</sup>.
- για σωματίδια με διάμετρο  $2-20\mu\text{m}$  η εναπόθεση καθορίζεται από την αδρανή πρόσκρουση (inertial impaction).
- για σωματίδια με διάμετρο  $>20\mu\text{m}$  η εναπόθεση καθορίζεται από την ελκτική δύναμη της βαρύτητας.
- για σωματίδια με διάμετρο  $0.2-2\mu\text{m}$  δεν υπερισχύει κάποιος συγκεκριμένος μηχανισμός απομάκρυνσης, γι' αυτό στη περιοχή αυτή τα σωματίδια έχουν τον μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Λόγω του μεγάλου χρόνου ζωής (μερικές μέρες), τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας

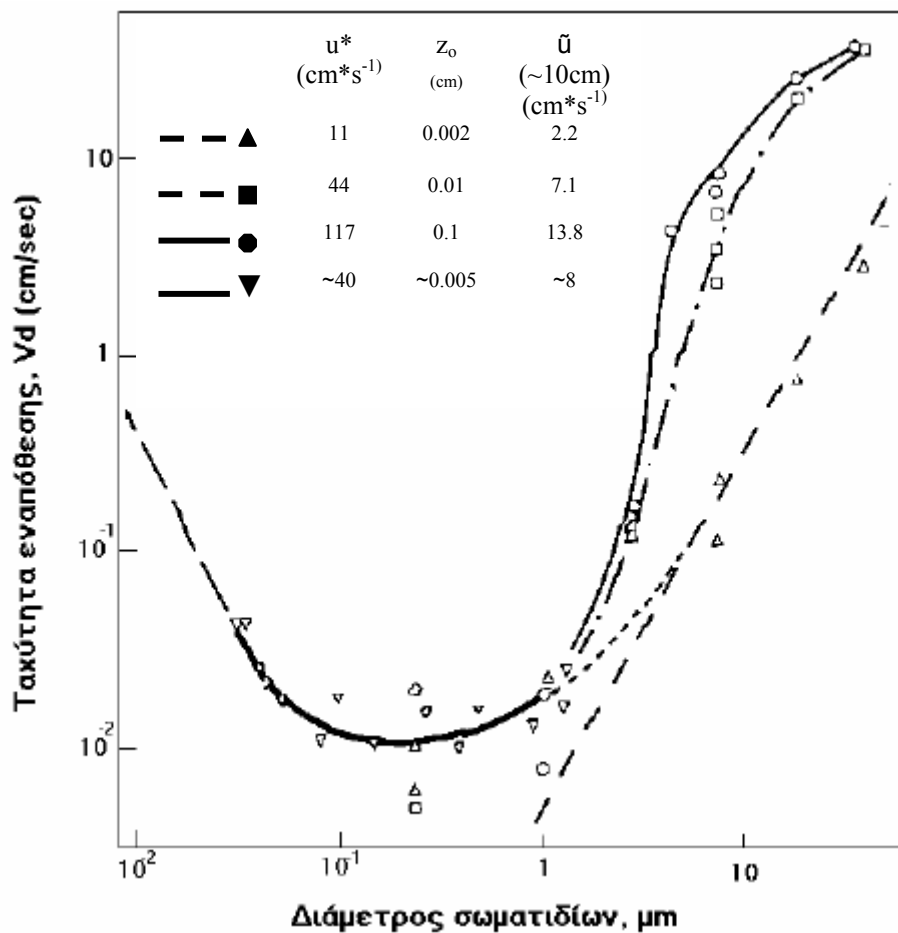
---

<sup>3</sup> Τα μικρά σωματίδια ( $d < 0.2\mu\text{m}$ ) υπόκεινται σε συγκρούσεις με μόρια αερίων. Η κίνηση αυτή ονομάζεται **διάχυση Brown**. Η ταχύτητα διάχυσης αυτών των μικρών σωματιδίων είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να συσσωματώνονται προς μεγαλύτερα σωματίδια.



συσσώρευσης είναι αυτά που επηρεάζονται περισσότερο από τα φαινόμενα μεταφοράς στην ατμόσφαιρα.

Για το λόγο αυτό για να είναι δυνατή η εκτίμηση της ταχύτητας εναπόθεσης κάθε ένωσης θα πρέπει να είναι γνωστή η κατανομή της ως προς τη διάμετρο των σωματιδίων (Εικόνα 2.1). Είναι δυνατό να γίνει μια πολύ καλή προσέγγιση της ταχύτητας αυτής με τη διάκριση των σωματιδίων στη περιοχή των λεπτών (με διάμετρο  $< 1 \mu\text{m}$ ) και στη περιοχή των χονδρών (με διάμετρο  $> 1 \mu\text{m}$ ). Θεωρώντας ότι τα λεπτά σωματίδια έχουν περίπου την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης και ότι τα χονδρά σωματίδια έχουν και αυτά την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης, η συνολική ταχύτητα εναπόθεσης κάθε ένωσης, υπολογίζεται με βάση την κατανομή της μεταξύ λεπτών και χονδρών σωματιδίων. Οι ταχύτητες εναπόθεσης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για λεπτά σωματίδια είναι  $0.075 \text{ cm s}^{-1}$ , ενώ για χονδρά σωματίδια είναι  $1.25 \text{ cm s}^{-1}$  (Kouvarakis et al., 2002a, Rendell et al., 1993, Duce et al., 1991, Sievering et al., 1989, Spokes et al., 2000)



**Εικόνα 2.1:** Ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων (cm/s) συναρτήσει της διαμέτρου τους ( $\mu\text{m}$ ), (Seinfeld and Pandis, 1998).

### 2.1.1.2 Ξηρή εναπόθεση αερίων

Τα αέρια συμπεριφέρονται παρόμοια με τα μικρά σωματίδια (στην κατηγορία των  $<0.05\mu\text{m}$ ) έτσι ο κυρίαρχος μηχανισμός για την απομάκρυνση τους είναι η διάχυση Brown.

Το μοντέλο των Hicks και Liss (1976) είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα για τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης αερίων. Το μοντέλο αυτό προτείνει ότι η ταχύτητα εναπόθεση ενός αερίου ( $V_g$ ) εξαρτάται γραμμικά από τη ταχύτητα του ανέμου ( $U$ ) και από ένα συντελεστή ( $a_i$ ) διαφορετικό για κάθε ένωση.

$$V_g = a_i \cdot U \quad (2.3)$$

Όπου  $V_g$  η ταχύτητα εναπόθεσης σε  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $U$  η ταχύτητα του ανέμου σε  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $a_i$  συντελεστής για κάθε ένωση  $i$ . Έτσι για παράδειγμα για το νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$ ) ο συντελεστής  $a_i$  ισούται με 0,13 ενώ για την αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) με 0,14.

### 2.1.2 Υγρή Εναπόθεση

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης των αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα κατά τη περίοδο των βροχοπτώσεων, είναι η υγρή εναπόθεση. Με δεδομένο ότι η υγρή περίοδος στην υπό μελέτη περιοχή διαρκεί περίπου 5 έως 6 μήνες και ότι τα ιόντα που μελετάμε είναι ευδιάλυτα στο νερό της βροχής, γίνεται κατανοητό ότι σημαντικές ποσότητες φωσφόρου και αζώτου απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα και εισέρχονται στο θαλάσσιο νερό μέσω της διαδικασίας αυτής.

#### 2.1.2.1 Σάρωση μέσα στα σύννεφα (in-cloud scavenging: σωματίδια και αέρια)

Η σάρωση μέσα στα σύννεφα αφορά τον εγκλωβισμό μέσα σε αυτά σωματιδίων ή διαλυτών ενώσεων που λαμβάνει χώρα κατά τη δημιουργία των σύννεφων ή λόγω επαφής με αυτά, υδατοδιαλυτού συστατικού της ατμόσφαιρας. Ο εγκλωβισμός αυτός δεν εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των σωματιδίων όσο από το είδος τους και την διαλυτότητα τους. Η τελική απομάκρυνση από την ατμόσφαιρα επέρχεται με τη βροχόπτωση.

Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την υγρή εναπόθεση των αερίων είναι η διαλυτότητα τους μέσα στη σταγόνα του νερού, η οποία καθορίζεται από τον συντελεστή Henry ( $H$ ).

$$H = \frac{P_o}{[C]} \quad (2.4)$$

όπου  $H$  είναι ο συντελεστής Henry της ένωσης,  $P_o$  η μερική πίεση της ένωσης στην ατμόσφαιρα και  $[C]$  η συγκέντρωση της ένωσης στη σταγόνα του νερού.

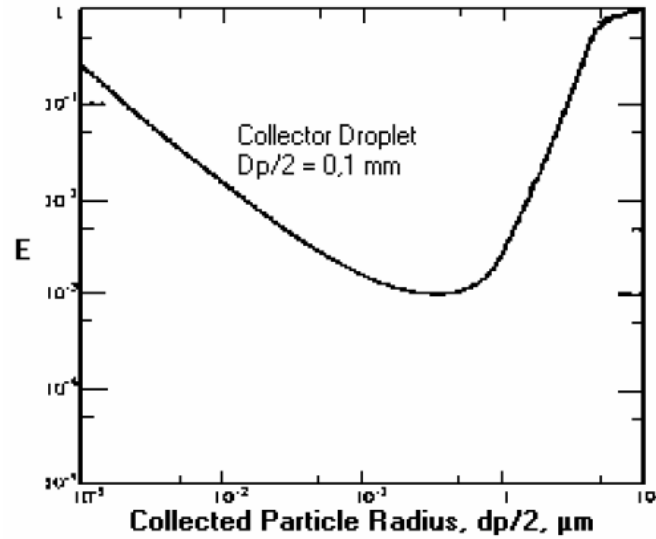
Η ποσότητα της ένωσης στην ατμόσφαιρα και στη σταγόνα του νερού, βρίσκονται σε ισορροπία που καθορίζεται από το συντελεστή  $H$  (Εξίσωση 2.4). Όταν η ένωση υφίσταται χημική μετατροπή μέσα στο διάλυμα, η ισορροπία μετατοπίζεται προς τη μεριά της υδάτινης φάσης της με αποτέλεσμα την απόκλιση από το νόμο του Henry.

#### 2.1.2.2 Σάρωση κάτω από τα σύννεφα (below-cloud scavenging: σωματίδια)

Καθώς πέφτει η σταγόνα της βροχής, παρασύρει μαζί της, ορισμένα σωματίδια που συναντά στη πορεία της. Η ικανότητα συλλογής των σωματιδίων από τη σταγόνα βροχής,  $E$ , ορίζεται ως ο λόγος της διαμέτρου του σωματιδίου ( $dp$ ) προς τη διάμετρο της σταγόνας ( $Dp$ ). Όταν η  $E$  είναι ίση με 1 τότε η σταγόνα στο πέρασμα της προς την θαλάσσια επιφάνεια, παρασύρει όλα τα σωματίδια που βρίσκονται κάτω από αυτή, επειδή όμως αυτό δεν συμβαίνει σχεδόν ποτέ ο λόγος  $E$  είναι σχεδόν πάντα μικρότερος της μονάδας ( $E \ll 1$ ).

Ο βασικός παράγοντας που καθορίζει το ποια σωματίδια θα σαρωθούν πιο εύκολα από τη σταγόνα κατά τη βροχόπτωση, είναι το μέγεθος τους. Έτσι για τα σωματίδια με διάμετρο  $< 0.2 \mu\text{m}$ , ο σημαντικότερος μηχανισμός απομάκρυνσης τους είναι η διάχυση Brown. Η τυχαία κίνηση τους θα φέρει κάποια από αυτά σε επαφή με τη σταγόνα αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα συλλογής  $E$ . Για τα μεγάλα σωματίδια ( $dp > 1 \mu\text{m}$ ) υπεύθυνη για τη συλλογή τους από τη σταγόνα είναι η αδρανής πρόσκρουση (internal impaction). Όσο αυξάνει το μέγεθος των σωματιδίων τόσο η κίνηση αυτή θα είναι πιο σημαντική και τόσο πιο εύκολα θα συλλέγονται από τη σταγόνα. Όσον αφορά τα σωματίδια με ενδιάμεση διάμετρο ( $0.2 \mu\text{m} < dp < 1 \mu\text{m}$ ), αυτά είναι αρκετά μεγάλα για να έχουν αξιόλογη διάχυση Brown και αρκετά μικρά για να έχουν ισχυρή απομάκρυνση λόγω της αδρανούς πρόσκρουσης. Έτσι θα παρατηρείται ένα ελάχιστο στην ικανότητα συλλογής,  $E$ , των σωματιδίων από τη σταγόνα για αυτή τη περιοχή. Αυτό το ελάχιστο ονομάζεται «άνοιγμα Greenfield» από το όνομα του Greenfield που πρώτος το αναγνώρισε.

Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η συσχέτιση της ικανότητας συλλογής  $E$  μιας σταγόνας με ακτίνα  $0.1 \text{ mm}$  (διάμετρος σωματιδίου/2) ως προς την ακτίνα των συλλεγόμενων σωματιδίων. Παρατηρούμε την εξάρτηση των μικρών σωματιδίων από τη διάχυση Brown και των μεγάλων από την αδρανή πρόσκρουση, επίσης και το ελάχιστο στα  $1 \mu\text{m}$ .



**Εικόνα 2.2:** Μεταβολή του λόγου E ως προς την ακτίνα των σωματιδίων, για μια σταγόνα ακτίνας 0.1 mm. (Seinfeld and Pandis, 1998)

Λόγω της συμπεριφοράς των αερίων ως μικρά σωματίδια, για το ξέπλυμα τους από την ατμόσφαιρα είναι υπεύθυνος ένας συνδυασμός της διάχυσης Brown και της διάλυσής τους στις σταγόνες (in-cloud scavenging) ανάλογα με τον συντελεστή Henry.

## 2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ & ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΟ ΚΡΗΤΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ

### 2.2.1 Σταθμός ατμοσφαιρικών μετρήσεων

Ο σταθμός συλλογής ατμοσφαιρικών δεδομένων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ο σταθμός της Φινοκαλιάς. Ο σταθμός της Φινοκαλιάς Λασιθίου Κρήτης (Εικόνα 2.6) του Ε.ΠΕ.ΧΗ.ΔΙ. (Εργαστήριο Περιβαλλοντικών και Χημικών Διεργασιών) του Πανεπιστημίου Κρήτης, βρίσκεται γεωγραφικά στο νοτιότερο άκρο της Ευρώπης (35°3' N και 25°53' E). Η θέση του είναι 70km ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου (150.253 κάτοικοι) και 25km δυτικά του Αγίου Νικολάου (19.462 κάτοικοι). Στον σταθμό αυτό, ο οποίος λειτουργεί από τον Σεπτέμβριο του 1996 μέχρι και σήμερα, εκτός από δειγματοληψίες σωματιδιακής φάσης, αέριας φάσης και υγρής εναπόθεσης ανόργανου αζώτου και φωσφόρου, πραγματοποιούνται και πλήθος άλλων μετρήσεων όπως ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, θερμοκρασίας αέρα, ατμοσφαιρικής πίεσης, ηλιακής ακτινοβολίας, συγκέντρωσης όζοντος (O<sub>3</sub>), διμεθυλοσουλφιδίων (DMS), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) κλπ.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας που χαρακτηρίζει την περιοχή, ο σταθμός αποτελεί κομβικό σημείο λόγω της εναλλαγής αέριων μαζών διαφορετικής προέλευσης. Αποτελεί έτσι ιδανικό τόπο μέτρησης αέριων μαζών διαφορετικής χημικής σύστασης. Η προέλευση των ανέμων χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες:

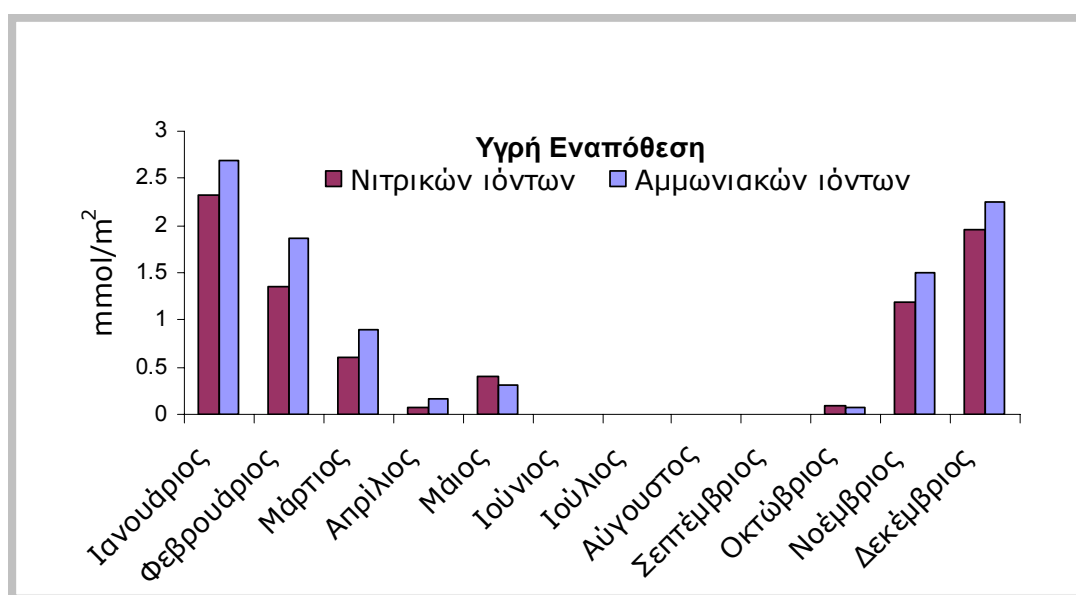
1. Στους βόρειους- βορειοδυτικούς ανέμους οι οποίοι διέρχονται από την Ελλάδα και την κεντρική Ευρώπη συνεπώς μεταφέρουν ρυπαντές όπως για παράδειγμα το διοξείδιο του αζώτου.
2. Στους νότιους-νοτιοανατολικούς και νοτιοδυτικούς ανέμους που μεταφέρουν αυξημένο φορτίο σκόνης.
3. Στους βόρειο-ανατολικούς ανέμους οι οποίοι διέρχονται από την Τουρκία και μεταφέρουν τόσο φορτία σκόνης όσο και ρυπαντών.
4. Στους δυτικούς ανέμους οι οποίοι επηρεάζονται κύρια από τη θάλασσα (Δυτική και Κεντρική Μεσόγειο).

Επιπλέον επειδή η περιοχή της Φινοκαλιάς βρίσκεται μακριά από άμεσες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ο σταθμός μπορεί να χαρακτηριστεί ως σταθμός- υπόβαθρο, ειδικότερα όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή (< 3m s<sup>-1</sup>) και επομένως η μεταφορά ρυπασμένων αέριων μαζών ελαχιστοποιείται.

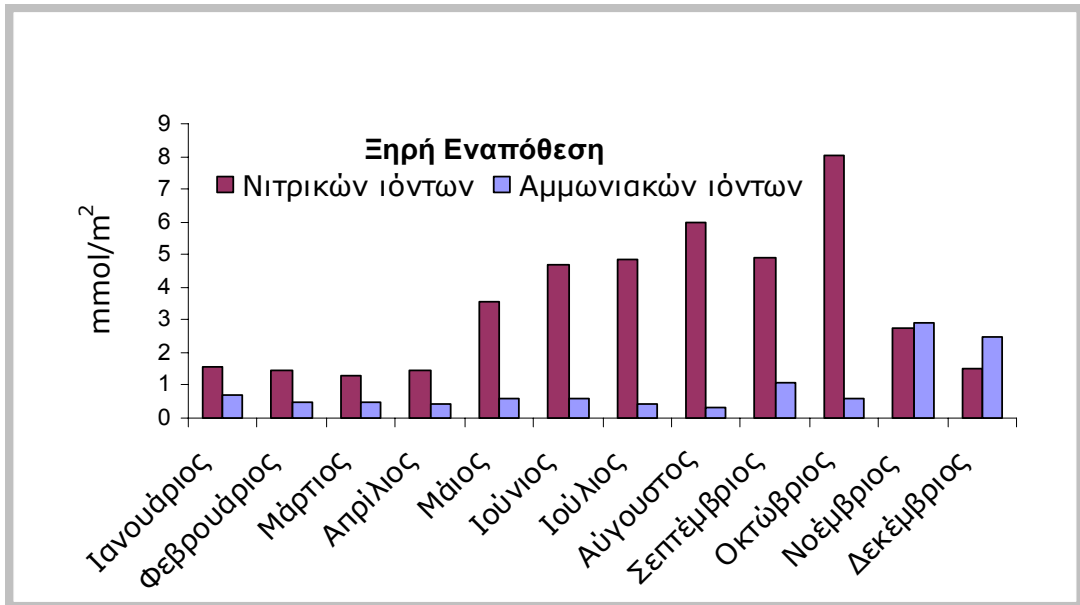
## 2.2.2 Οι ατμοσφαιρικές μετρήσεις

Προκειμένου να διερευνηθεί ο ρόλος της εναπόθεσης ανόργανου αζώτου και φωσφόρου στη θαλάσσια πρωτογενή παραγωγικότητα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ατμοσφαιρικών μετρήσεων από το σταθμό της Φινοκαλιάς, τα οποία εισήχθησαν ως δεδομένα εισόδου στο θαλάσσιο φυσικο – βιογεωχημικό μοντέλο.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μέσα μηνιαία δεδομένα ατμοσφαιρικών μετρήσεων ανόργανου αζώτου τόσο υπό τη μορφή νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ) όσο και αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ), τα οποία προκύπτουν από μετρήσεις κατά τη τριετία 1996-1999. Η συνολική μέση ετήσια συγκέντρωση αζωτούχων ιόντων για την υγρή εναπόθεση (Εικόνα 2.3) εκτιμάται στα  $17.7 \text{ mmol/m}^2$ , ενώ για την ξηρή εναπόθεση  $53.1 \text{ mmol/m}^2$  (Εικόνα 2.4). Τα δεδομένα αυτά, οι μέθοδοι δειγματοληψίας και οι μέθοδοι χημικής ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στην δημοσίευση Kouvarakis and Mihalopoulos 2001.

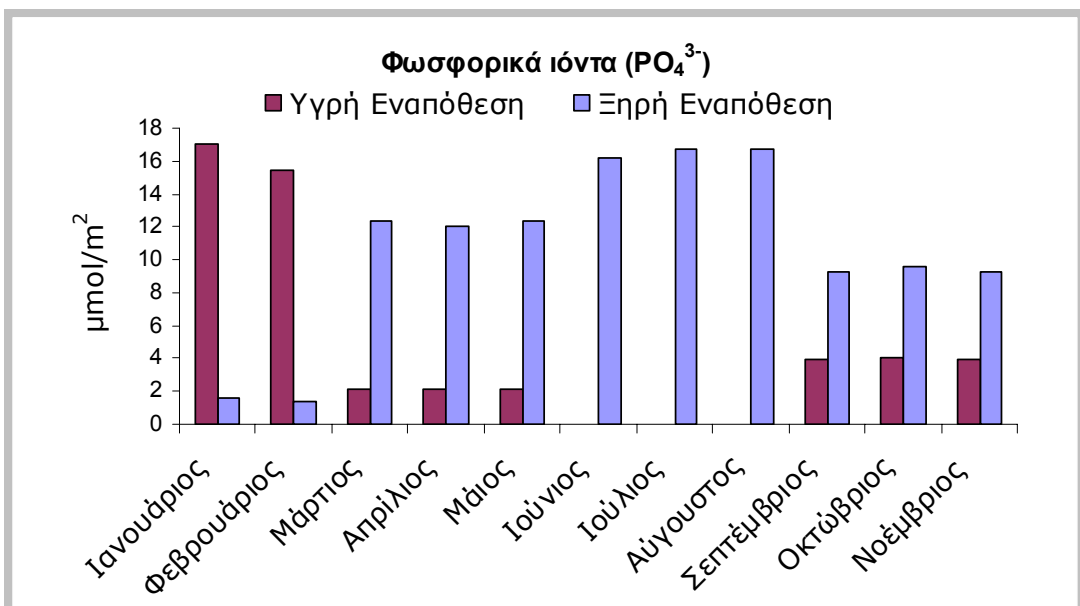


**Εικόνα 2.3:** Εποχική διακύμανση υγρής εναπόθεσης νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων (μέσες μηνιαίες τιμές).



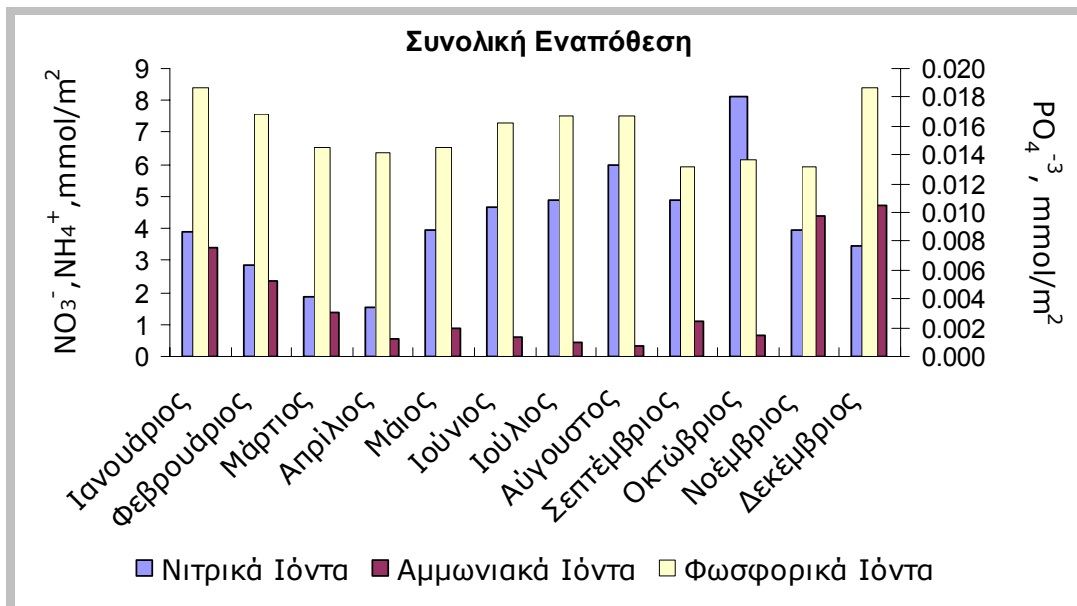
**Εικόνα 2.4:** Εποχική διακύμανση ξηρής εναπόθεσης νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων (μέσες μηνιαίες τιμές).

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν μέσα μηνιαία δεδομένα ατμοσφαιρικών μετρήσεων ανόργανου φωσφόρου από μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια Σεπτέμβριος 1999 – Σεπτέμβριος 2000. Η συνολική μέση ετήσια συγκέντρωση ανόργανου φωσφόρου (Εικόνα 2.3) στην υγρή εναπόθεση εκτιμάται στα 0.068 mmol/m<sup>2</sup>, ενώ στην ξηρή εναπόθεση 0.12 mmol/m<sup>2</sup>. Τα δεδομένα αυτά, οι μέθοδοι δειγματοληψίας καθώς και οι μέθοδοι χημικής ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στην δημοσίευση Markaki et al. 2003.



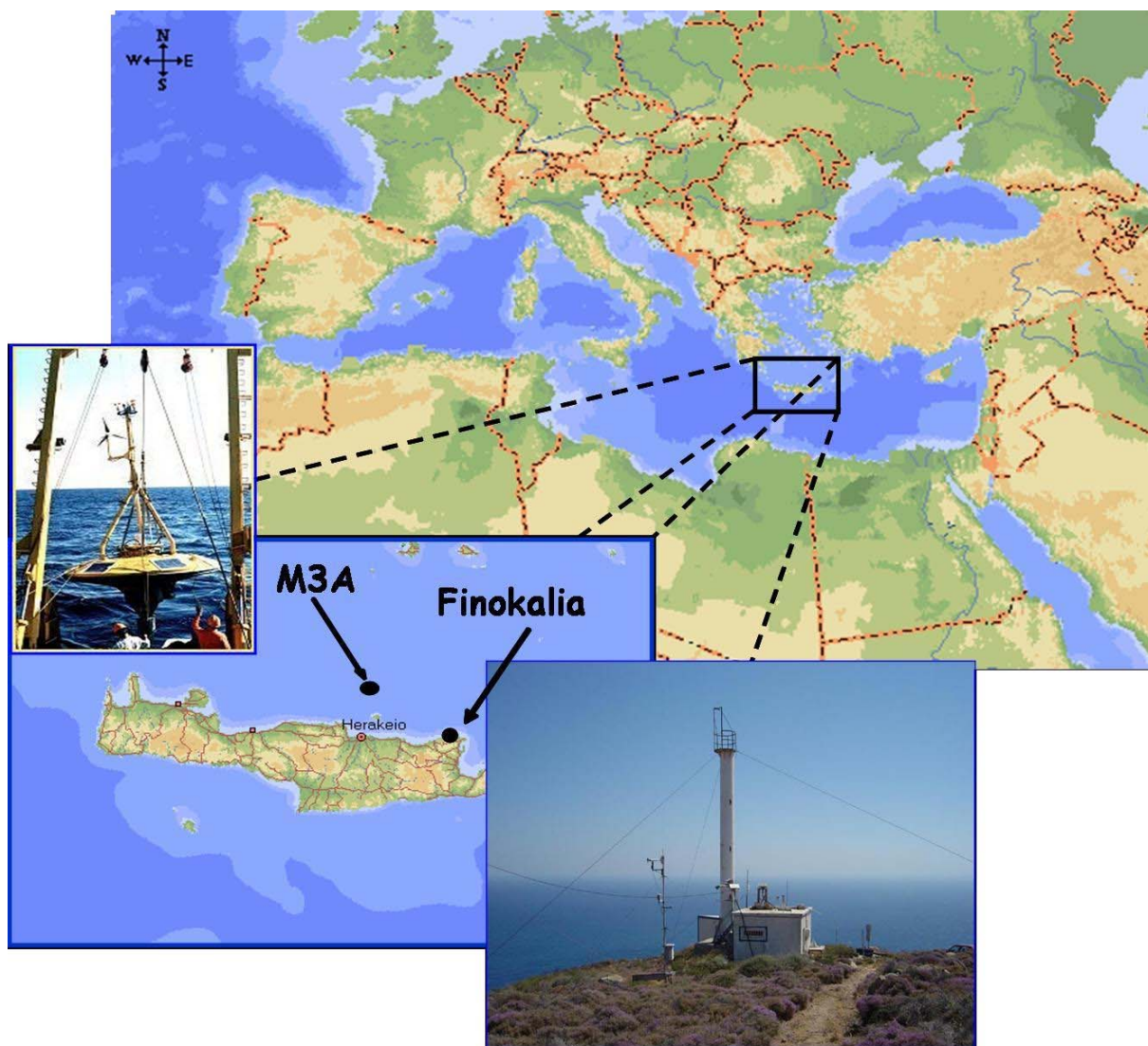
**Εικόνα 2.5:** Εποχική διακύμανση ανόργανου φωσφόρου (μέσες μηνιαίες τιμές) για την ξηρή και υγρή εναπόθεση.

Οι συνολικές μέσες μηνιαίες τιμές νιτρικών ιόντων, αμμωνιακών ιόντων και φωσφορικών ιόντων, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο θαλάσσιο μοντέλο παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.6



**Εικόνα 2.6:** Συνολική (υγρή + ξηρή) μέση μηνιαία εναπόθεση νιτρικών (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), αμμωνιακών (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) και φωσφορικών ιόντων (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>).





**Εικόνα 2.6:** Ο σταθμός ατμοσφαιρικών μετρήσεων του Ε.ΠΕ.ΧΗ.ΔΙ. στη Φινοκαλιά Λασιθίου και ο σταθμός Μ3Α του ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ.

## 2.3 ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

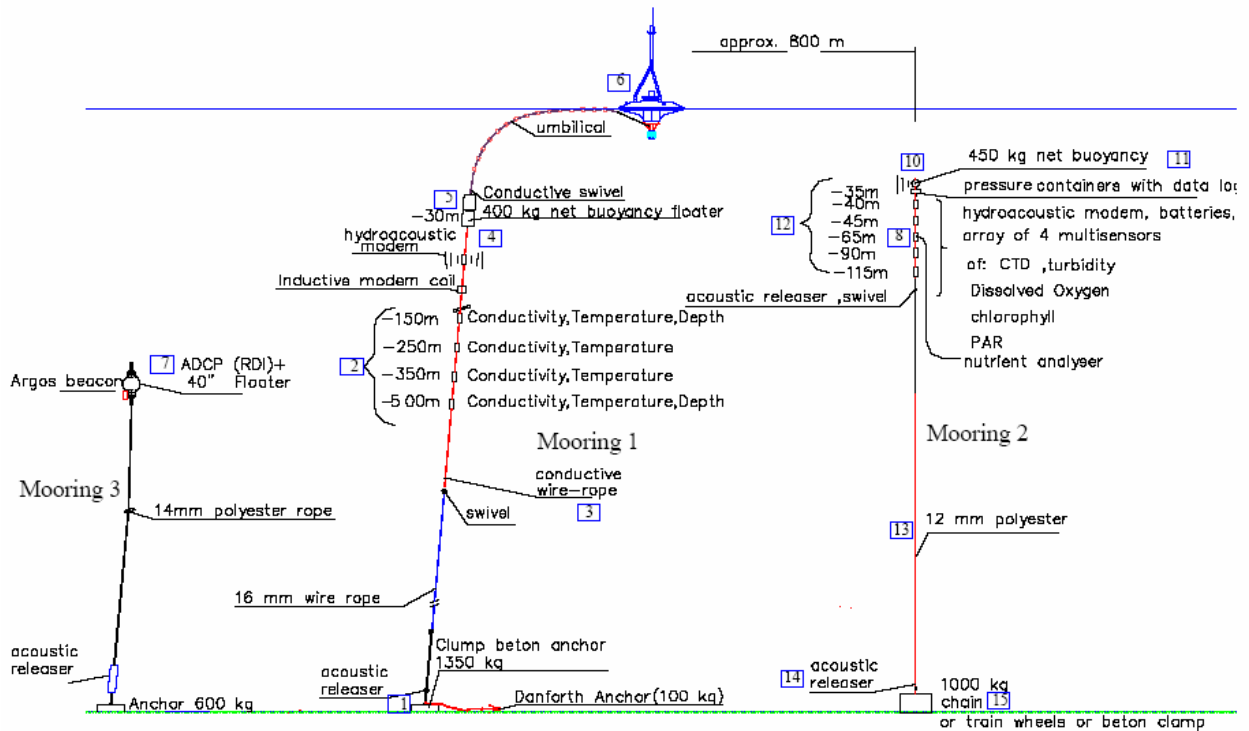
### 2.3.1 Σταθμός ωκεανογραφικών μετρήσεων, M3A (Mediterranean Moored Multi-sensor Array)

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ενός πρωτότυπου πολυ- παραμετρικού μετρητικού σταθμού Mediterranean Moored Multi-sensor Array – M3A. Ο σταθμός (Εικόνα 2.7) δημιουργήθηκε από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), το Ινστιτούτο Θαλάσσιας Βιολογίας Κρήτης (ΙΘΑΒΙΚ) και την Εταιρία Ανάπτυξης Ναυτικής Τεχνολογίας (ΕΑΝΤ), για τις ανάγκες του διεθνούς ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Mediterranean Forecasting System (MFS) (<http://www.bo.ingv.it/mfstep/>).

Σκοπός του προγράμματος, ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου λειτουργικού συστήματος παρακολούθησης και πρόγνωσης για την Μεσόγειο θάλασσα. Κατά τη διάρκεια της πιλοτικής φάσης του προγράμματος (1998- 2001), σχεδιάστηκε, αγκυροβολήθηκε και ελέγχθηκε ως προς την εγκυρότητά του ο σταθμός M3A. Αυτός αποτέλεσε τη βάση ενός μόνιμου δικτύου θαλάσσιων σταθμών, σκοπός του οποίου είναι η συνεχής καταγραφή των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων ενδιαφέροντος στη Μεσόγειο Θάλασσα. Ο M3A αγκυροβολήθηκε στο Κρητικό Πέλαγος τον Ιανουάριο 2000, σε απόσταση 24 ναυτικών μιλίων βόρεια της πόλης του Ηρακλείου, στο σημείο με συντεταγμένες 35°39'627" N και 24°59'080" E και σε βάθος 1030m (Nittis et al., 2003). Στην περιοχή αυτή παρά τη γεινίαση της με την ακτογραμμή, παρουσιάζονται συνθήκες ανοιχτής θάλασσας (δημιουργούνται πυκνά νερά με βαθιά και ενδιάμεσα χαρακτηριστικά), ενώ χαρακτηρίζεται ως άκρως ολιγοτροφική. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου (2001- 2005), ο σταθμός βελτιώθηκε και σταθεροποιήθηκε η λειτουργικότητά του, ενώ στο δίκτυο προστέθηκαν δύο ακόμη σταθμοί, ένας στην ανατολική και ένας στη δυτική Μεσόγειο Θάλασσα .

Ο πρωτότυπος πολυ-παραμετρικός μετρητικός σταθμός M3A, αποτελείται από μία κεντρική και δύο περιφερειακές ποντισμένες συστοιχίες («γραμμές») οργάνων (Εικόνα 2.4). Η κατανομή των οργάνων σε τρεις ομάδες βασίστηκε στις διαφορετικές ανάγκες συντήρησής τους. Έτσι, τα όργανα στη γραμμή 1 μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς συντήρηση για περισσότερο από 1 χρόνο, ενώ οι οπτικοί και χημικοί αισθητήρες που βρίσκονται στη γραμμή 2 απαιτούν συντήρηση κάθε 2 -3 μήνες. Τέλος το σύστημα της γραμμής 3 έχει ενεργειακή αυτονομία 6 μηνών.

Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει την αυτόνομη διαχείριση των γραμμών 2 και 3 που έχουν μεγάλη συχνότητα συντήρησης και χρειάζονται την παρουσία μικρού σκάφους σε αντίθεση με τη γραμμή 1 που έχει μικρή συχνότητα συντήρησης και απαιτεί μεγάλο σκάφος.



Εικόνα 2.7: Διάταξη του συστήματος Μ3Α.

Στην γραμμή 1 βρίσκεται ο επιφανειακός πλωτήρας και οι αισθητήρες μέτρησης φυσικών παραμέτρων σε μεγάλα βάθη (100-500m). Τέσσερις αισθητήρες (SBE 37-IM MicroCAT) είναι τοποθετημένοι σε βάθος 150, 250, 350 και 500m για την μέτρηση θερμοκρασίας, αλατότητας και πίεσης (η πίεση στα 150 και 500m μόνο). Στο βάθος των 30m βρίσκεται ένα υδρο-ακουστικό modem τύπου Orca-MATS-12 το οποίο λαμβάνει τα δεδομένα από την γραμμή 2 και τα μεταφέρει στον επιφανειακό πλωτήρα μέσω του καλωδίου πολλαπλών αγωγών. Ο επιφανειακός πλωτήρας είναι ο κυματογράφος ΜΕΛΟΥΣΑ που έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί από την ΕΑΝΤ. Στον πλωτήρα είναι εγκατεστημένοι οι υπο-επιφανειακοί αισθητήρες (θερμοκρασίας, αλατότητας, διαλυμένου οξυγόνου, θολερότητας και χλωροφύλλης-α), οι μετεωρολογικοί και κυματικοί αισθητήρες, καθώς επίσης και τα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων, τηλεπικοινωνίας και παροχής ενέργειας.

Ένας υπολογιστής αναλαμβάνει την λήψη, αποθήκευση, και μετάδοση των δεδομένων, ενώ για την μετάδοση μέσω του δορυφορικού συστήματος ARGOS, χρησιμοποιείται πομπός (τύπου IESM-PTT07) στον οποίο στέλνονται συνολικά 12 μηνύματα, δηλαδή 4 κύκλοι 3ωρων μετρήσεων.

Στην γραμμή 2, η οποία βρίσκεται στα 0,7 ναυτικά μίλια νότια της γραμμής 1, είναι τοποθετημένοι αισθητήρες (SBE-16 Seacat) στα 40, 65, 90 και 115m για μέτρηση θερμοκρασίας, αλατότητας, πίεσης, διαλυμένου οξυγόνου, θολερότητας, χλωροφύλλης-α και PAR, καθώς και μετρητής νιτρικών αλάτων (WS-OCEAN-NAS2) στα 45m. Τα πέντε όργανα είναι σε συνδεσμολογία δικτύου με πρωτόκολλο RS-485. Στα 25m βάθος, βρίσκεται ο υπολογιστής που ελέγχει την γραμμή 2 και συλλέγει τα δεδομένα και το υδρο-ακουστικό modem που τα μεταφέρει στην γραμμή 1. Στο ίδιο σημείο βρίσκεται και πομπός ασφαλείας (Orea-BASM500) ο οποίος εκπέμπει σήμα κινδύνου σε περίπτωση που η διάταξη ανέβει στην επιφάνεια της θάλασσας.

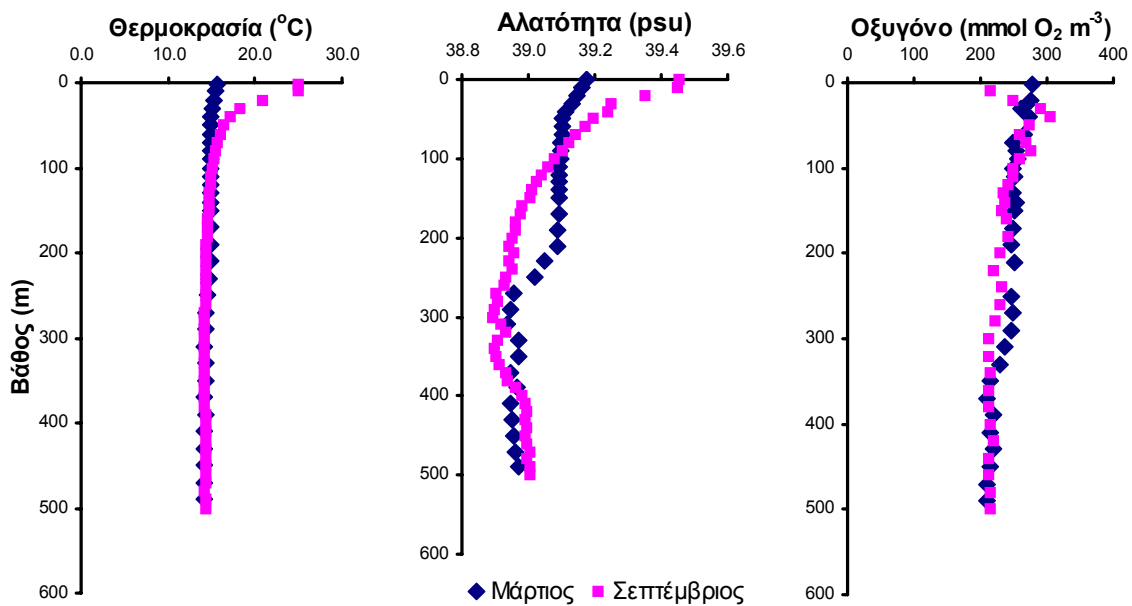
Τέλος, στην γραμμή 3, η οποία βρίσκεται σε απόσταση 1 ναυτικό μίλι της γραμμής 1, είναι εγκατεστημένος στα 500m βάθος ακουστικός τομογράφος μέτρησης ρευμάτων (0-500m). Τα δεδομένα από το όργανο αυτό είναι διαθέσιμα κάθε 6 μήνες (Πίνακας 2.1), όταν δηλαδή γίνεται η συντήρηση της συσκευής αυτής.

Πίνακας 2.1: Καταγραφόμενες χημικές, φυσικές και βιολογικές παράμετροι από τον M3A.

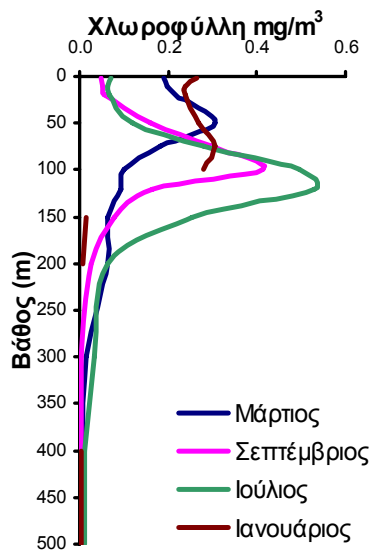
Μετρήσεις στη θαλάσσια στήλη νερού									
<i>Βάθος (m)</i>	1	40	65	90	115	150	250	350	500
<i>Θερμοκρασία</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•
<i>Αλατότητα</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•
<i>Εξασθένιση Φωτός</i>	•	•	•	•	•				
<i>Διαλυμένο Οξυγόνο</i>	•	•	•	•	•				
<i>Χλωροφύλλη – α</i>	•	•	•	•	•				
<i>PAR</i>		•	•	•	•				
<i>Θρεπτικά (Νιτρικά)</i>		•							
<i>Διεύθυνση/ Ταχύτητα Ρεύματος</i>	0 -500 m profile								
Μετρήσεις στην επιφάνεια									
<i>Θερμοκρασία Αέρα</i>	<i>Σχετική Υγρασία</i>	<i>Ατμοσφαιρική Πίεση</i>			<i>Διεύθυνση/ Ταχύτητα Ανέμου</i>			<i>Παράμετροι Κυμάτων</i>	

### 2.3.2 Οι θαλάσσιες μετρήσεις

Σε μία προσπάθεια κατανόησης της δυναμικής του Κρητικού Πελάγους, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τον σταθμό ωκεανογραφικών μετρήσεων Μ3Α. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται τόσο ως δεδομένα εισόδου του μονοδιάστατου φυσικο-βιογεωχημικού θαλάσσιου μοντέλου (Εικόνα 2.8), όσο και ως δεδομένα ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου (Εικόνα 2.9), με απώτερο στόχο την διερεύνηση των επιπτώσεων των ατμοσφαιρικών εναποθέσεων στην θαλάσσια πρωτογενή παραγωγικότητα.



**Εικόνα 2.8:** Θαλάσσιες μετρήσεις από τον σταθμό Μ3Α, θερμοκρασίας, αλατότητας και διαλυμένου οξυγόνου κατά το μήνα Μάρτιο και το μήνα Σεπτέμβριο.



**Εικόνα 2.9:** Θαλάσσιες μετρήσεις χλωροφύλλης - α κατά τους μήνες Ιανουάριο, Μάρτιο, Ιούλιο και Σεπτέμβριο.

### 3. TO MONTEΛO

#### 3.1 TO ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, για την προσομοίωση των κινήσεων των υδάτινων μαζών, χρησιμοποιήθηκε το Aegean Levantine Eddy Resolving Model (ALERMO) (Korres and Lascaratos, 2003). Το μοντέλο αυτό είναι ένα υδροδυναμικό αριθμητικό ομοίωμα, σχεδιασμένο τόσο για παράκτιες όσο και για μελέτες ανοιχτής θάλασσας, οι αρχές του οποίου βασίζονται στο Princeton Ocean Model (POM) (Blumberg and Mellor, 1978; Blumberg and Mellor, 1987). Πρόκειται για τρισδιάστατο μοντέλο, πρωτογενών εξισώσεων ελεύθερης επιφάνειας, με σ- συντεταγμένες, το οποίο χρησιμοποιεί διαφορετικό βήμα χρόνου για την επίλυση των ολοκληρωμένων ως προς το βάθος εξισώσεων και των εξισώσεων σε κάθε επίπεδο κατά την κατακόρυφο. Οι προγνωστικές μεταβλητές του μοντέλου είναι οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας, η θερμοκρασία, η αλατότητα, η τυρβώδης κινητική ενέργεια καθώς και οι κατακόρυφοι συντελεστές τυρβώδους ανάμιξης για τους οποίους χρησιμοποιείται το σχήμα Mellor and Yamada 2.5 (Mellor and Yamada, 1982) και αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα υδροδυναμικά μοντέλα.

Το μοντέλο επιλύει τις παρακάτω εξισώσεις για την ταχύτητα  $U_i = (U, V, W)$ , δυναμική θερμοκρασία  $\theta^4$  και αλατότητα  $S$ :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(U, V) + \frac{\partial}{\partial x_i}[U_i(U, V)] + f(-V, U) = \\ -\frac{1}{\rho_o} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial x}, \frac{\partial \rho}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_M \frac{\partial}{\partial z}(U, V) \right] + (F_U, F_V) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + F_T + \frac{\partial R_{SOL}}{\partial z} \quad (3.3)$$

---

<sup>4</sup> Ορίζεται σαν δυναμική θερμοκρασία  $\theta$  μίας αέριας μάζας, η θερμοκρασία την οποία θα είχε αυτή η μάζα, αν είχε εκτονωθεί (ή αντίστοιχα συμπιεστεί) αδιαβατικά από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ( $\rho, T$ ) σε μία τυπική πίεση  $\rho_o$  (συνήθως ίση με 1 bar). Δίνεται από τη σχέση:

$$\theta = T \left( \frac{\rho_o}{\rho} \right)^{R/c_p}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U_i \frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S \quad (3.4)$$

Η υδροστατική προσέγγιση γίνεται με την εξίσωση:

$$\frac{\rho}{\rho_o} = g(n-z) + \int_z^n \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} g dz \quad (3.5)$$

όπου  $R$  είναι το τμήμα της μικρού μήκους κύματος καθαρής ροής ακτινοβολίας η οποία διαπερνά την επιφάνεια της θάλασσας,  $\rho_o$  η πυκνότητα αναφοράς,  $(F_U, F_V)$ ,  $F_T$  και  $F_S$  οι όροι της οριζόντιας διάχυσης,  $K_M$  και  $K_H$  οι συντελεστές τυρβώδους ανάμιξης,  $n$  είναι το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας, και  $\rho = \rho(\theta, S, p)$  είναι η πυκνότητα υπολογιζόμενη από την εξίσωση των Mellor and Ezer (1991).

Η σύζευξη μεταξύ φυσικής και βιολογίας γίνεται μέσω της εξίσωσης συνέχειας που περιγράφει τη μεταβολή μίας μεταβλητής (συγκέντρωσης) με το χρόνο:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum BF \end{aligned} \quad (3.6)$$

όπου  $U$ ,  $V$ ,  $W$  οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας,  $A_H$  ο συντελεστής οριζόντιας τριβής και  $K_H$  ο συντελεστής κατακόρυφης ανάμιξης υπολογιζόμενος από το μοντέλο. Ο συντελεστής  $K_H$  υπολογίζεται για όλη τη βιοχημική ροή, για κάθε πελαγική ομάδα.



### 3.2 ΤΟ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Συζευγμένο με το υδροδυναμικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε ένα γενικό σύνθετο μοντέλο βασισμένο στο European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM) και συγκεκριμένα στην τελευταία έκδοση του ERSEM III και το οποίο χρησιμοποιεί την έννοια της λειτουργικής ομάδας και όχι του είδους, για την περιγραφή του οικοσυστήματος (Baretta et al., 1995; Petihakis et al., 2002). Το μοντέλο περιλαμβάνει φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Η χλωρίδα και η πανίδα ομαδοποιούνται σύμφωνα με το τροφικό τους επίπεδο, υποδιαιρούμενες ανάλογα με το μέγεθος τους ή με τη μέθοδο τροφοληψίας (παραγωγούς, καταναλωτές και αποδομητές). Παρόλο που μέσα σε κάθε τροφικό επίπεδο, οι ομάδες ακολουθούν τις ίδιες διαδικασίες, η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται με τις διαφορετικές τιμές των μεταβλητών. Οι μεταβλητές επιλέγονται έτσι ώστε το μοντέλο να διατηρείται σχετικά απλό χωρίς όμως να παραλείπονται ουσιαστικά συστατικά τα οποία είναι δυνατόν να ασκούν σημαντική επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος. Η δυναμική των διαφόρων πληθυσμών περιγράφεται τόσο από διεργασίες φυσιολογίας (απορρόφηση, αναπνοή, απεκκρίσεις, εκκρίσεις κλπ) όσο και από πληθυσμιακές διεργασίες (ανάπτυξη, μετανάστευση, θνησιμότητα κλπ) και σχετίζεται με τη ροή άνθρακα και θρεπτικών.

Ως βιολογικές μεταβλητές στο μοντέλο περιλαμβάνονται το φυτοπλαγκτόν, λειτουργικές μονάδες συνδεδεμένες με το μικροβιακό βρόγχο, το ζωοπλαγκτόν και η βενθική πανίδα. Η βιολογικά ελεγχόμενη/ κινούμενη δυναμική του άνθρακα είναι συζευγμένη με τη δυναμική του αζώτου, φωσφόρου, πυριτίου και οξυγόνου. Ο άνθρακας είναι η βασική μονάδα ανακύκλωσης στο σύστημα και ακολουθείται από τα θρεπτικά και το οξυγόνο. Κάθε βιολογική μεταβλητή στο μοντέλο ορίζεται από διαφορετικούς λόγους άνθρακα/ θρεπτικά και άνθρακα/ χλωροφύλλη. Επίσης στο μοντέλο συμπεριλαμβάνεται η διάσπαση του οργανικού υλικού η οποία είναι συζευγμένη με την αναγέννηση των θρεπτικών ουσιών στο ίζημα.

Το φυτοπλαγκτόν ταξινομείται σε τέσσερις λειτουργικές κατηγορίες με βάση τόσο το μέγεθος όσο και τις οικολογικές του ιδιότητες. Όλες οι φυτοπλαγκτονικές ομάδες περιέχουν εσωτερικά αποθέματα θρεπτικών ενώ ο λόγος C:N:P μέσα στον οργανισμό μεταβάλλεται δυναμικά. Η λήψη θρεπτικών ελέγχεται από τη διαφορά θρεπτικών μέσα στον οργανισμό και την εξωτερική διαθέσιμη συγκέντρωση.

Ο μικροβιακός βρόγχος αποτελείται από βακτήρια, ετερότροφα μαστιγωτά και μικροζωοπλαγκτόν, και ο λόγος C:N:P όπως και στο φυτοπλαγκτόν μεταβάλλεται δυναμικά.

Σύμφωνα με το τροφικό πλέγμα (Πίνακας 3.1), τα διάτομα (*P1*) αποτελούν λεία του μικροζωοπλαγκτού (*Z5*) και του παμφάγου μεσοζωοπλαγκτού (*Z4*). Το νανοφυτοπλαγκτόν (*P2*) αποτελεί λεία του μικροζωοπλαγκτού αλλά και των ετερότροφων μαστιγωτών (*Z6*). Το πικοφυτοπλαγκτόν (*P3*) αποτελεί τροφή κυρίως του μικροζωοπλαγκτού και λιγότερο του μικροζωοπλαγκτού. Τέλος τα δινομαστιγωτά (*P4*) αποτελούν λεία για το μικροζωοπλαγκτόν και το παμφάγο μεσοζωοπλαγκτόν. Τα βακτήρια (*B1*) καταναλώνουν διαλυμένη οργανική ύλη (DOC) σε άμεσα διαθέσιμη μορφή (*R1*) και ημι- διαθέσιμη (*R2*)<sup>5</sup>. Επίσης δρουν στην αποσύνθεση του νεκρού οργανικού υλικού *POC* (*R6*) και ανταγωνίζονται το φυτοπλαγκτόν στην απορρόφηση ανόργανων θρεπτικών. Οι κύριοι θηρευτές τους είναι τα ετερότροφα μαστιγωτά και σε μικρότερο ποσοστό το μικροζωοπλαγκτόν. Τα ετερότροφα μαστιγωτά με τη σειρά τους αποτελούν λεία του παμφάγου μεσοζωοπλαγκτού το οποίο καταναλώνεται από το σαρκοφάγο μεσοζωοπλαγκτόν (*Z3*) και αποτελεί την κορυφή της τροφικής αλυσίδας. Επιπλέον σε όλες τις ομάδες των καταναλωτών (*Z3*, *Z4*, *Z5* και *Z6*) υπεισέρχεται το φαινόμενο του κανιβαλισμού ως σταθεροποιητική παράμετρος.

Ο πιο περιεκτικός τρόπος να περιγραφεί ένα τροφικό πλέγμα, είναι η δημιουργία ενός πίνακα τροφής. Κάθε στοιχείο του πίνακα εκφράζει το ποσοστό διαθεσιμότητας/ προτίμησης του συγκεκριμένου τροφικού επιπέδου σε σχέση με τα υπόλοιπα. Οι τιμές στο πλέγμα είναι χαρακτηριστικές για κάθε οικοσύστημα και για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι διατροφικές σχέσεις για το πελαγικό σύστημα δίνονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Τροφικό πλέγμα.

Θηράματα / Θηρευτές	<i>Z6</i>	<i>Z5</i>	<i>Z4</i>	<i>Z3</i>
<i>P1</i>	0.0	1.0	1.0	0.0
<i>P2</i>	0.2	0.5	0.75	0.0
<i>P3</i>	1.0	0.1	0.0	0.0
<i>P4</i>	0.1	0.9	1.0	1.0
<i>B1</i>	1.0	0.0	0.0	0.0
<i>Z6</i>	1.0	1.0	0.0	0.0
<i>Z5</i>		1.0	1.0	0.0
<i>Z4</i>			1.0	1.0
<i>Z3</i>				1.0

<sup>5</sup> Ημιδιαθέσιμη οργανική ύλη (*R2*) είναι η ποσότητα οργανικής ύλης πτωχής σε θρεπτικά.

Η σύζευξη του βενθικού και πελαγικού συστήματος περιγράφεται από την καθίζηση του οργανικού υλικού στο βένθος και με τη διάχυση των ροών των θρεπτικών μέσα και έξω από το ίζημα κατά την ανοργανοποίηση και αναγέννηση (Εικόνα 3.2). Το βενθικό μοντέλο περιέχει μια τροφική αλυσίδα η οποία περιγράφει τον κύκλο των θρεπτικών και του άνθρακα διαμέσου των αερόβιων και αναερόβιων βακτηριδίων, της βιοαναμόχλευσης και της βιοάρδευσης καθώς και της κατακόρυφης μεταφοράς προς το ίζημα σωματιδιακού υλικού λόγω δράσης των βενθικών οργανισμών. Η δυναμική των θρεπτικών στο βένθος περιγράφεται χωριστά από το πελαγικό, ενώ η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων του οξυγόνου, των σουλφιδίων, των θρεπτικών και της επακόλουθης ροής μέσα και έξω από το ίζημα καθορίζονται αρχικά και υπολογίζονται μετέπειτα από το μοντέλο σε κάθε χρονικό βήμα.

Το οικολογικό αυτό μοντέλο, λόγω του γενικού χαρακτήρα του, έχει εφαρμοσθεί σε αρκετές μελέτες που αφορούν συστήματα ανοικτής θάλασσας, ημίκλειστης περιοχής αλλά και λιμνοθάλασσες. Παρακάτω παρουσιάζεται μία σύντομη περιγραφή της δομής του μοντέλου και δίνονται οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες αναπτύχθηκε.

(Η πλήρης περιγραφή του μοντέλου βρίσκεται στην ιστοσελίδα [http://pml.ac.uk/ecomodels/ERSEM\\_description.html](http://pml.ac.uk/ecomodels/ERSEM_description.html)).

Η γενική εξίσωση η οποία περιγράφει το ρυθμό μεταβολής μιας μεταβλητής στο χώρο και το χρόνο  $C = (\bar{x}, t)$  εφαρμόζει τη μέθοδο διαχωρισμού με το χρόνο (time splitting) κάθε βασικής διεργασίας και μπορεί να γραφεί:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_t + \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_b \quad (3.7)$$

όπου:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Rightarrow \text{συνολικός ρυθμός μεταβολής σε Μονάδες Μεταβολής/ Ημέρα}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_t \Rightarrow \text{ρυθμός μεταβολής λόγω της διαδικασίας φυσικής μεταφοράς}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_b \Rightarrow \text{ρυθμός μεταβολής ο οποίος καθορίζεται από τις βιογεωχημικές διεργασίες}$$

Οι ροές οργανικού και ανόργανου υλικού ανάμεσα στις λειτουργικές ομάδες εκφράζονται σε μονάδες άνθρακα ή σε μονάδες μακρο- θρεπτικών. Έτσι κάθε τυποποιημένος οργανισμός αποτελείται από τα στοιχεία αυτά, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω λειτουργικών σχέσεων. Κάθε λειτουργική ομάδα μπορεί να γραφεί ως διάνυσμα τεσσάρων διαστάσεων  $(V_j)$  το οποίο μεταβάλλεται στο χώρο  $(\bar{x})$  και στο χρόνο  $(t)$ :

$$\vec{V}_j(x, t), j = 1, 2, 3, 4$$

το οποίο ανήκει σε ανυσματικό χώρο όπου οι βάσεις του απεικονίζουν τις μείζον συνιστώσες των βιολογικών οντοτήτων π.χ. άνθρακας (C), άζωτο (N), φώσφορος (P) και πυρίτιο (Si). Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$V_j = (V_1, V_2, V_3, V_4) \equiv (V_C, V_N, V_P, V_S) \quad (3.8)$$

και αναφερόμενοι στην εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή στο χρόνο για κάθε ανυσματικό στοιχείο, μπορεί να ονομαστεί ως δυναμική της βιογεωχημικής συνιστώσας της ομάδας  $V$  (διάτομα, μαστιγωτά, ζωοπλαγκτόν κλπ).

Ορίζοντας το συντελεστή  $L$  ο οποίος εφαρμόζεται στο άνυσμα  $V_j$  παίρνουμε το άνυσμα:

$$L(V_j) \equiv \frac{1}{V_C} (V_C, V_N, V_P, V_S) \equiv \left( 1, \frac{V_N}{V_C}, \frac{V_P}{V_C}, \frac{V_S}{V_C} \right) \quad (3.9)$$

το οποίο υποδηλώνει την αναλογία ανάμεσα σε κάθε βιολογική συνιστώσα και στο ποσοστό άνθρακα. Οι αναλογίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τη θρεπτική κατάσταση των κυττάρων, ιδιαίτερα συγκρινόμενες με κάποιες σταθερές τιμές, όπως η αναλογία Redfield. Η αναλογία αυτή εισάγεται στις εξισώσεις του μοντέλου ως γεωμετρική κατεύθυνση στον ανυσματικό χώρο με τον παρακάτω τρόπο:

$$L(I_j) = \frac{1}{I_C} (I_C, I_N, I_P, I_S) = (1, 1.260 \cdot 10^{-2}, 7.862 \cdot 10^{-4}, 3.0 \cdot 10^{-2}) \quad (3.10)$$

Έτσι η εφαρμογή του συντελεστή  $L$  στο σταθερό άνυσμα  $I_j$  οδηγεί σε ένα νέο άνυσμα το οποίο περιέχει την αναλογία Redfield ως συνιστώσα.

Ο ρυθμός μεταβολής της γενικής μεταβλητής  $C$  (η οποία μπορεί να είναι επίσης ανυσματική συνιστώσα μιας λειτουργικής ομάδας) δίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\left[ \frac{\partial C}{\partial t} \right]_V^e \quad (3.11)$$

όπου  $e$  συντομογραφία ενδεικτική της διαδικασίας η οποία καθορίζει την μεταβλητότητα όπως οι παρακάτω συντομογραφίες και διαδικασίες:

$pp$  → πρωτογενής παραγωγικότητα

$upt$  → λήψη άνθρακα και θρεπτικών από άλλες λειτουργικές ομάδες

$prd$  → θήρευση

$out$  → έκκριση, απέκκριση

$rsp$  → αναπνοή

$rm$  → ροή ανοργανοποίησης

και  $V$  άλλες μεταβλητές ή λειτουργικές ομάδες οι οποίες εμπλέκονται στη διαδικασία που επηρεάζει το ρυθμό μεταβολής της μεταβλητής  $C$ . Αν η  $V=C$ , τότε αναφερόμαστε σε ενδοειδικές ροές όπως κανιβαλισμός, ενώ αν η  $V$  απουσιάζει από την παραπάνω σχέση, τότε η διαδικασία εξαρτάται από την μεταβλητή  $C$ .

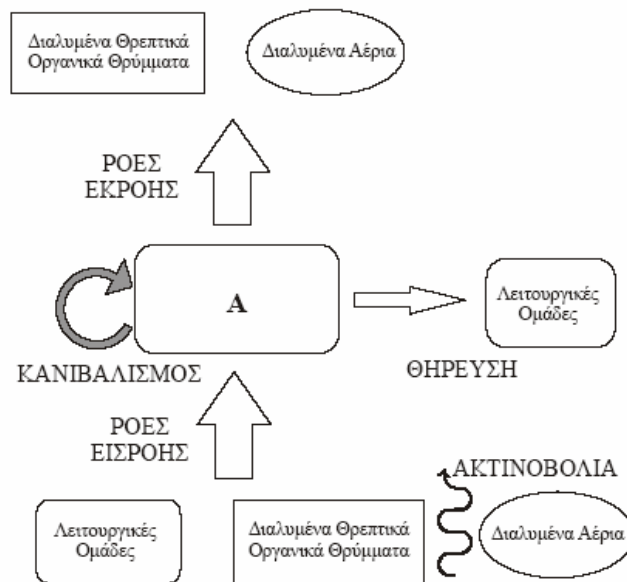
Η βασική αρχή του μοντέλου είναι ότι κάθε εξίσωση μπορεί να γραφτεί χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές διατυπώσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά επίπεδα ερμηνείας:

1. Επίπεδο ροών,
2. Επίπεδο λειτουργικών διαδικασιών.

Μία εξίσωση της μορφής «ροών» εκφράζεται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_b = \sum_{e,V} \left[ \frac{\partial C}{\partial t} \right]_V^e \quad (3.11)$$

όπου στο αριστερό μέρος της εξίσωσης δίνεται η λίστα των όρων ανταλλαγής, παρουσιάζοντας τις συνιστώσες του μοντέλου και τις διαδικασίες οι οποίες ελέγχουν την εξέλιξη στο χρόνο της βιογεωχημικής μεταβλητής  $C$ . Τέτοιες εξισώσεις μπορούν εύκολα να σχεδιαστούν χρησιμοποιώντας τη λογική διαγραμμάτων ροής δίνοντας μια συνολική εικόνα του τροφικού επιπέδου και των εμπλεκόμενων αλληλεπιδράσεων. Η γενική μορφή των διαγραμμάτων αυτών η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε λειτουργική ομάδα παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1:** Διάγραμμα ροής των κυριότερων τροφικών αλληλεπιδράσεων οι οποίες εμπεριέχονται στην παραμετροποίηση των λειτουργικών ομάδων.

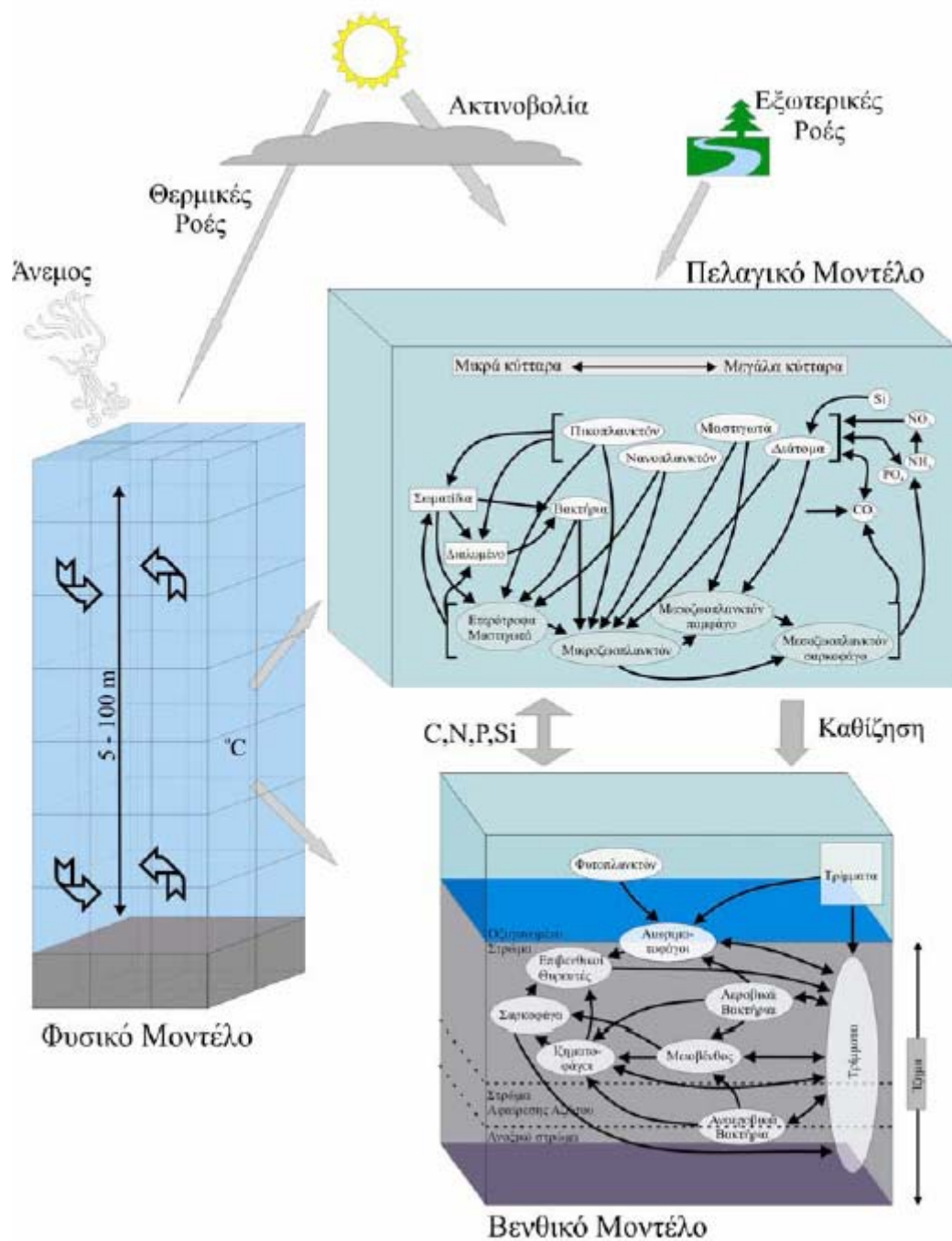
Αντίθετα μία εξίσωση της μορφής «λειτουργικών διαδικασιών» δείχνει τη ρητή διατύπωση των δυναμικών εξαρτήσεων πάνω σε άλλες μεταβλητές. Οι λίστες των μεταβλητών για τις εξισώσεις του μοντέλου δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Η μαθηματική μορφή του ορθογώνιου πίνακα στο πελαγικό μοντέλο μπορεί να γραφεί ως εξής:

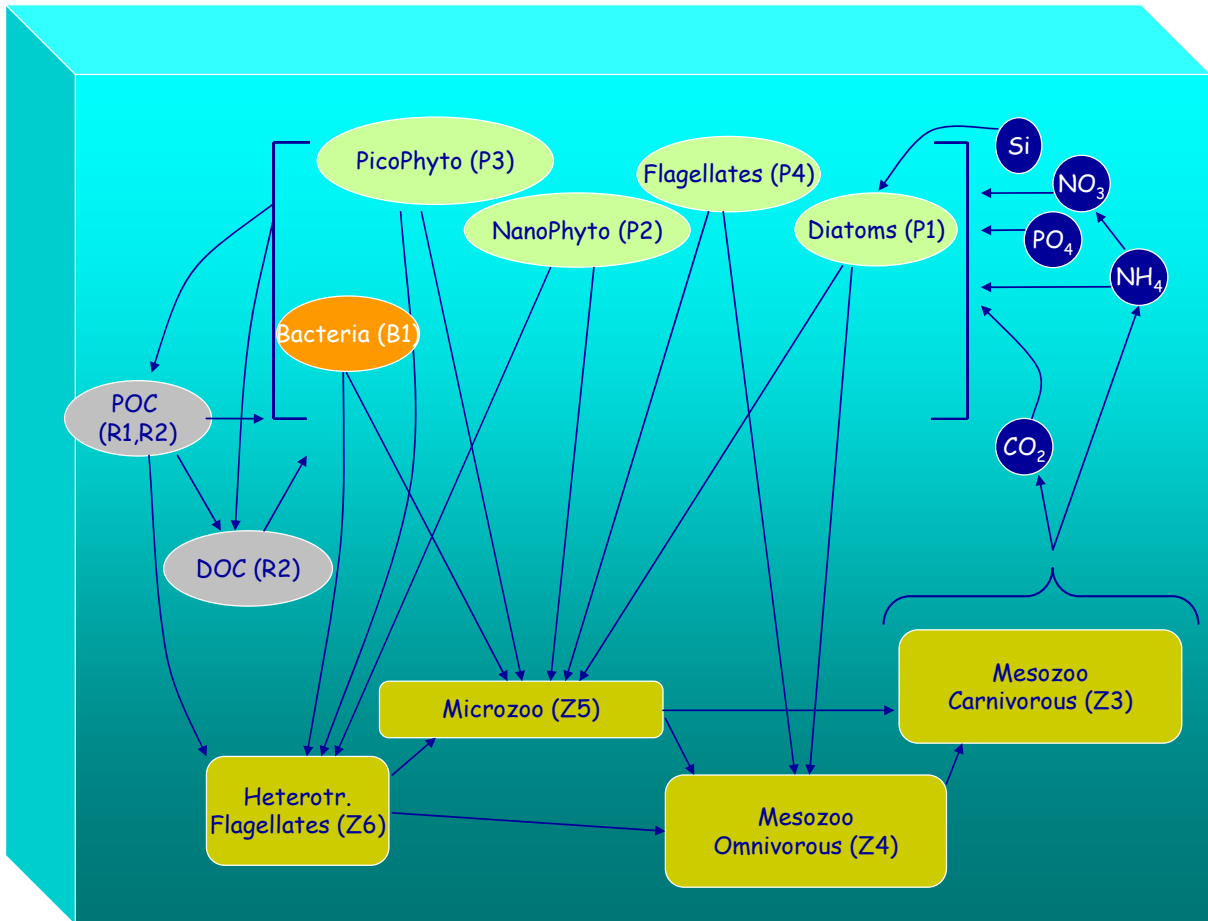
$$\delta_{ZX} = \delta_{ZX} = \begin{bmatrix} \delta_{Z3,R1} & \dots & \delta_{Z3,B1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \delta_{B1,R1} & \dots & \delta_{B1,B1} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

όπου  $Z \equiv \{Z3, Z4, Z5, Z6, B1\}$  και  $X \equiv \{R1, R6, P1, P2, P3, P4, Z3, Z4, Z5, Z6, B1\}$

Αντίστοιχη διατύπωση χρησιμοποιείται στο βενθικό μοντέλο  $\varphi_{Y,X}$ .



Εικόνα 3.2: Τα τμήματα του μοντέλου



Εικόνα 3.3: Το τροφικό πλέγμα του πελαγικού μοντέλου



### 3.3 ΠΕΛΑΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθούν οι ορισμοί (καθώς και η περιγραφή, Πίνακας 3.2) των κύριων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στο πελαγικό τμήμα του θαλάσσιου βιοχημικού μοντέλου. Οι παράμετροι (συμβολισμοί και περιγραφή) που χρησιμοποιούνται στο πελαγικό τμήμα του θαλάσσιου βιοχημικού μοντέλου δίνονται στο Παράρτημα.

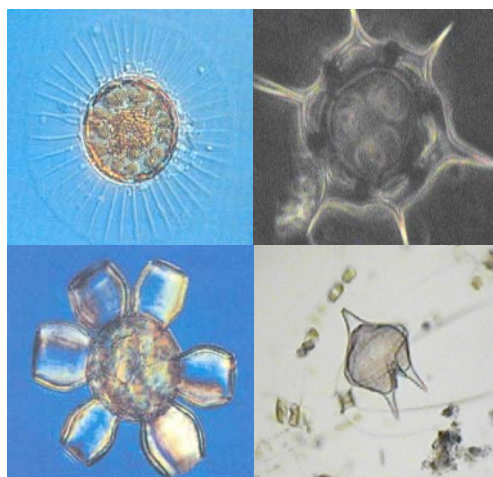
**Πίνακας 3.2:** Μεταβλητές για το πελαγικό μοντέλο.

Μεταβλητή	Συνιστώσα	Περιγραφή
<i>T</i>	-	Θερμοκρασία νερού (°C)
<i>S</i>	-	Αλατότητα (psu)
<i>K<sub>H</sub>, K<sub>M</sub></i>	-	Τυρβώδης διάχυση (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
<i>N1p</i>	P	Φωσφορικά άλατα (mmol P m <sup>-3</sup> )
<i>N3n</i>	N	Νιτρικά άλατα (mmol N m <sup>-3</sup> )
<i>N4n</i>	N	Αμμωνιακά άλατα (mmol N m <sup>-3</sup> )
<i>N5s</i>	Si	Πυριτικά άλατα (mmol Si m <sup>-3</sup> )
<i>O2o</i>	O	Διαλυμένο Οξυγόνο (mmol O <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> )
<i>O3c</i>	C	Διοξείδιο του άνθρακα (mg C m <sup>-3</sup> )
<i>P1j</i>	C, N, P, Si	Διάτομα (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>P2j</i>	C, N, P	Νανοπλαγκτό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>P3j</i>	C, N, P	Πικοπλαγκτό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>P4j</i>	C, N, P	Δινομαστιγωτά (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>B1j</i>	C, N, P	Πελαγικά βακτήρια (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>Z3j</i>	C, N, P	Σαρκοφάγο μεσοζωοπλαγκτό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>Z4j</i>	C, N, P	Παμφάγο μεσοζωοπλαγκτό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>Z5j</i>	C, N, P	Μικροζωοπλαγκτό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>Z6j</i>	C, N, P	Ετερότροφα μαστιγωτά (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>R1j</i>	C, N, P	Διαλυμένο οργανικό υλικό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>R2j</i>	C, N, P	Διαλυμένο οργανικό υλικό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )
<i>R6j</i>	C, N, P, Si	Σωματιδιακό οργανικό υλικό (mg C m <sup>-3</sup> ή mmol m <sup>-3</sup> )

### 3.3.1 Πρωτογενείς παραγωγοί

Οι πρωτογενείς παραγωγοί (φυτοπλαγκτόν, Εικόνα 3.4) περιγράφονται από τέσσερις λειτουργικές ομάδες βασισμένες τόσο στο μέγεθος (Equivalent Spherical Diameter *ESD*) όσο και στις οικολογικές ιδιότητες:

<i>Όνομασία</i>	<i>Συμβολισμός</i>	<i>Ισοδύναμη Σφαιρική Διαμετρος</i>
<i>Διάτομα</i>	<i>P1</i>	20-200 μ
<i>Νανοπλαγκτόν</i>	<i>P2</i>	2-20 μ
<i>Πικοπλαγκτόν</i>	<i>P3</i>	0.2-2 μ
<i>Μαστιγωτά</i>	<i>P4</i>	20-200 μ



**Εικόνα 3.4:** Εικόνες χαρακτηριστικών φυτοπλαγκτονικών οργανισμών. Διάτομο (επάνω αριστερά), νανοπλαγκτόν (επάνω δεξιά), πικοφυτοπλαγκτόν (κάτω αριστερά), δινόμαστιγωτό (κάτω δεξιά)

Όλες οι ομάδες μοντελοποιούνται με τον ίδιο τρόπο με εξαίρεση τα διάτομα (*P1*) στα οποία η κατανάλωση πυριτίου παραμετροποιείται με πρόσθετους λειτουργικούς όρους (διεργασίες) και εξισώσεις, και τα δινόμαστιγωτά (*P4*) τα οποία διαφοροποιούνται από τις άλλες φυτοπλαγκτονικές ομάδες λόγω της προτίμησής τους σε νιτρικά ( $NO_3$ ) και της σύνδεσής τους με την καινούργια πρωτογενή παραγωγή. Αντίθετα η μικρότερη σε μέγεθος ομάδα του πικοπλαγκτού (*P3*), δεσμεύει γρηγορότερα την αμμωνία συντελώντας στην πρωτογενή παραγωγή μέσω της αναγέννησης των θρεπτικών.

Ο ρυθμός μεταβολής για κάθε φυτοπλαγκτονική ομάδα οργανισμών (*Pi*) υπολογίζεται με βάση τις βιολογικές διεργασίες που επηρεάζουν κάθε μία από τις τέσσερις αυτές λειτουργικές ομάδες και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dP}{dt} = \text{φωτοσύνθεση} - \text{αναπνοή} - \text{απεκκρίσεις} - \text{θήρευση} \quad (3.13)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει τις λειτουργικές διεργασίες του οργανισμού σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως φως, διαθεσιμότητα τροφής κλπ. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τον πυρήνα κάθε παραμετροποίησης, που είναι διατύπωση της εξάρτησης των βιολογικών λειτουργιών των οργανισμών από τους κύριους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως πιστεύεται ότι συμβαίνει.

Η ολική φωτοσυνθετική παραγωγή ορίζεται μέσω i) του μέγιστου ρυθμού παραγωγής ( $p\_sum$ ), ii) της επίδρασης της θερμοκρασίας ( $et$ ), iii) του περιορισμού της παραγωγής από την ηλιακή ακτινοβολία ( $eiPI$ ) και iv) της υπάρχουσας βιομάζας ( $PIc$ ). Στην περίπτωση των διατόμων λαμβάνεται υπόψη και η συγκέντρωση πυριτίου ως περιοριστικός παράγοντας ανάπτυξης ( $eN5s$ ).

$$\text{φωτοσύνθεση} = p\_sum * et * eN5s * eiPI * PIc \quad (3.14)$$

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη φωτοσυνθετική παραγωγή δίνεται από μία εκθετική εξίσωση:

$$et = e^{\left[ \log(p\_q10) * \frac{ETW - BASETEMP}{BASETEMP} \right]} \quad (3.15)$$

όπου  $p\_q10$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας χαρακτηριστικός για κάθε λειτουργική ομάδα ( $Pi$ ), ο οποίος δίνει την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10°C σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς ( $BASE TEMP$ ) και  $ETW$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο περιορισμός από την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$eiPI = 1 - e^{\left( \frac{qchlPc * p\_alpha\_chl}{p\_sum * et * eN5s * Irr} \right)} \quad (3.16)$$

όπου  $qchlPc$  είναι ο λόγος χλωροφύλλης προς άνθρακα,

$p\_alpha\_chl$  η αρχική κλίση της καμπύλης Production-Irradiance ( $P-I$ ) και  $Irr$ , η φωτοσυνθετική ηλιακή ακτινοβολία.

Ο περιορισμός πυριτίου δίνεται συναρτήσει της συγκέντρωσης πυριτίου στο εξωκυτταρικό περιβάλλον ( $N5s$ ) και της σταθεράς ημικορεσμού<sup>6</sup> του πυριτίου στο νερό ( $p\_chPs$ ).

$$eN5s = \frac{N5s}{N5s + p\_chPs} \quad (3.17)$$

Η αναπνοή χωρίζεται σε δύο μέρη, την βασική αναπνοή ( $BASAL$ ) η οποία δεν επηρεάζεται από την ανάπτυξη αλλά από τη βιομάζα του φυτοπλαγκτού ( $Pi$ ), τη θερμοκρασία ( $et$ ) και τον ειδικό συντελεστή ρυθμού αναπνοής ( $p\_srs$ ) και την αναπνοή δραστηριότητας ( $ACTIVITY$ ). Η τελευταία είναι ένα σταθερό κλάσμα ( $p\_pu\_ra$ ) του αφομοιωμένου άνθρακα ο οποίος με τη σειρά του είναι συνάρτηση του συνολικού ρυθμού πρόσληψης ( $\phi\omega\tau\sigma\acute{\upsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta$ ) μείον τις απώλειες λόγω απεκκρίσεων. Στη βασική αναπνοή οφείλεται η παρατηρούμενη αρνητική πρωτογενής παραγωγή σε συνθήκες περιορισμένης ακτινοβολίας.

$$\text{αναπνοή} = \left( \frac{BASAL}{et * p\_srs * Pic} \right) + \left( \frac{ACTIVITY}{p\_pu\_ra * (\phi\omega\tau\sigma\acute{\upsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta - \text{απεκκρίσεις})} \right) \quad (3.18)$$

Όπως διακρίνεται από τη μέχρι τώρα περιγραφή του μοντέλου, η ολική ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού δεν επηρεάζεται από τη συγκέντρωση θρεπτικών στο εξωκυτταρικό περιβάλλον (με εξαίρεση την ομάδα των διατόμων, η ανάπτυξη των οποίων, όπως αναφέραμε, επηρεάζεται από την συγκέντρωση του πυριτίου), το οποίο σημαίνει ότι τα κύτταρα μπορούν να παράγουν άνθρακα ακόμη και σε περιβάλλον με χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών. Μέρος του βιολογικού κύκλου του φυτοπλαγκτού είναι και η εξαρχής απέκκριση ποσότητας του παραγόμενου από τον οργανισμό άνθρακα, ως ποσότητα διαλυμένων υδρογονανθράκων ( $R2$ ). Αυτή η ποσότητα υπολογίζεται μέσω της φωτοσυνθετικής παραγωγής και μίας παραμέτρου  $p\_pu\_ea$  η οποία καθορίζει το ποσοστό τροφής που θα απεκκριθεί:

$$\text{απεκκρίσεις}(R2) = \phi\omega\tau\sigma\acute{\upsilon}\nu\theta\epsilon\sigma\eta * p\_pu\_ea \quad (3.19)$$

Το υπόλοιπο ποσοστό μπορεί να αφομοιωθεί ή να απεκκριθεί ανάλογα με την πραγματική λήψη θρεπτικών και τον ελάχιστο ενδοκυτταρικό λόγο θρεπτικών/ άνθρακα ( $p\_qnlc$ ,  $p\_qplc$ ).

Η θήρευση του φυτοπλαγκτού από το μικροζωοπλαγκτόν και το μεσοζωοπλαγκτόν υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της μήτρας τροφής  $\delta_{Z,X}$  στον Πίνακα (τροφικό πλέγμα).

<sup>6</sup> Η συγκέντρωση θρεπτικών (στην συγκεκριμένη περίπτωση του πυριτίου) στην οποία ο ρυθμός ανάπτυξης ενός πληθυσμού, ενός είδους ή της ομάδας ειδών, είναι το μισό του μέγιστου ρυθμού. Οι σταθερές ημικορεσμού καθορίζουν τη λήψη θρεπτικών από τις διαφορετικές ομάδες φυτοπλαγκτού. Οι χαμηλές σταθερές ημικορεσμού δείχνουν τη δυνατότητα των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών να αναπτυχθούν σε συνθήκες χαμηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών.

Η συνολική απορρόφηση θρεπτικών ( $uptake_{total}$ ) υπολογίζεται μέσω i) της μέγιστης δυνατικής απορρόφησης για τη δεδομένη βιομάζα ( $uptake_{max}$ ) και ii) της απαιτούμενης απορρόφησης θρεπτικών η οποία είναι το άθροισμα της λήψης θρεπτικών λόγω της καθαρής παραγωγής ( $uptake_{netprod}$ ) και της λήψης θρεπτικών για την συντήρηση των δομικών τμημάτων του κυττάρου, δηλαδή για την επιβίωση του κυττάρου ( $uptake_{miss}$ ).

$$uptake_{total} = \min(uptake_{max}, (uptake_{netprod} + uptake_{miss})) \quad (3.20)$$

Όσον αφορά τη μέγιστη απορρόφηση θρεπτικών ( $uptake_{max}$ ), αυτή είναι συνάρτηση της εξωκυτταρικής συγκέντρωσης θρεπτικών, της βιομάζας ( $PIc$ ) και της παραμέτρου λήψης ( $p\_qun$ ) για το συγκεκριμένο θρεπτικό (Akness and Edge, 1991). Η  $uptake_{max}$  αποτελεί μονάδα εκτίμησης συγκέντρωσης θρεπτικών στο περιβάλλοντα από τον οργανισμό χώρο. Στην περίπτωση του αζώτου γίνεται επιπλέον και ένας καταμερισμός μεταξύ νιτρικών ( $N3n$ ) και αμμωνίας ( $N4n$ ).

$$uptake_{max} = \left( \overbrace{p\_qun * N3n * PIc * \left( \frac{p\_IN4}{p\_IN4 + N4n} \right)}^{uptake_{max\_N3n}} \right) + \left( \overbrace{p\_qun * N4n * PIc}^{uptake_{max\_N4n}} \right) \quad (3.21)$$

Η σταθερά ημικορεσμού ( $p\_IN4$ ) ορίζει τη λήψη νιτρικών και την προτίμηση που εμφανίζουν τα μικρά κύτταρα στην αμμωνία.

Η απορρόφηση θρεπτικών λόγω καθαρής παραγωγής ρυθμίζεται από την παραγωγικότητα ( $productivity = \text{φωτοσύνθεση} - \text{αναπνοή} - \text{απεκκρίσεις}$ ).

$$uptake_{netprod} = productivity * p\_xqn * p\_qnRc \quad (3.22)$$

όπου  $p\_qnRc$  ο λόγος αζώτου/άνθρακα σύμφωνα με τον Redfield και  $p\_xqn$  ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας για τα υψηλά ποσοστά λήψης θρεπτικών (όταν ο οργανισμός βρεθεί σε περιβάλλον πλούσιο σε θρεπτικά) σε σχέση με τον άνθρακα ( $luxury uptake$ ).

Η απορρόφηση θρεπτικών για την επιβίωση των δομικών τμημάτων του κυττάρου ( $uptake_{miss}$ ) υπολογίζεται συναρτήσει του μέγιστου λόγου θρεπτικών/άνθρακα στο κύτταρο, έχοντας αφαιρέσει το δομικό μέρος του κυττάρου ( $Pin$ ), και πολλαπλασιάζοντας τον με τον καθαρό ρυθμό ανάπτυξης, προσαρμοσμένο στις συγκεκριμένες συνθήκες ( $sadap$ ).

$$uptake_{miss} = (p\_xqn * p\_qnRc * PIc - Pin) * sadap \quad (3.23)$$

Στην περίπτωση που η λήψη θρεπτικών είναι θετική τότε το άζωτο που εισέρχεται στο κύτταρο καταμερίζεται μεταξύ νιτρικών και αμμωνίας

$$\begin{aligned}
uptake_{N3n} &= \frac{uptake_{total} * uptake_{max\_N3n}}{uptake_{max}} \\
uptake_{N4n} &= \frac{uptake_{total} * uptake_{max\_N4n}}{uptake_{max}}
\end{aligned}
\tag{3.24}$$

ενώ, εάν το ενδοκυτταρικό άζωτο έχει υπερβεί το μέγιστο εσωτερικό λόγο, τότε η λήψη θρεπτικών γίνεται αρνητική και η περίσσεια εκκρίνεται με τη μορφή αμμωνίας.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το φώσφορο και το πυρίτιο, αλλά στην περίπτωση του τελευταίου δεν υπάρχει ενδοκυτταρικό απόθεμα και για το λόγο αυτό η λήψη εξαρτάται από το λόγο του Redfield ( $p\_qsRc$ ).

Στις πρώτες εκδόσεις του μοντέλου ERSEM (I & II) η χλωροφύλλη (**Chla**) ήταν μία διαγνωστική μεταβλητή υπολογιζόμενη από την περιεκτικότητα του κυττάρου σε άνθρακα (**C**) βάσει ενός θεωρητικού σταθερού λόγου. Παρόλο που η απλουστευμένη αυτή προσέγγιση θα μπορούσε να δικαιολογηθεί, οι σημαντικές διαφορές στους λόγους C/Chl (από 23 έως 79 Parsons et al., 1973) οδήγησαν στον επαναπροσδιορισμό της στο ERSEM III με την εισαγωγή μίας νέας διάστασης της χλωροφύλλης (state variable, **phytoi**). Η σύνθεση της χλωροφύλλης ελέγχεται από i) την παραγωγικότητα (φωτοσύνθεση – αναπνοή – απεκκρίσεις), ii) το μέγιστο λόγο Chl/C (**rho\_Ch1**) και iii) τον παράγοντα ενδοκυτταρικού περιορισμού του αζώτου (**iNIn**), ενώ λαμβάνεται υπόψη κι η διαδικασία ανακύκλωσης και καταστροφής της.

$$rate\_chl = iNIn * rho\_Ch1 * παραγωγικότητα - καταστροφή \tag{3.25}$$

Ο μέγιστος λόγος Chl/C (**rho\_Ch1**) υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης:

$$rho\_Ch1 = \frac{p\_qchlc * \phiωτοσύνθεση * PIc}{p\_alpha\_chl * (phytoi + 1) * Irr} \tag{3.26}$$

όπου  $p\_qchlc$  ο μέγιστος λόγος Chl/C για κάθε λειτουργική ομάδα. Ο ενδοκυτταρικός περιοριστικός παράγοντας αζώτου παίρνει τιμές από 0 έως 1 και συνάρτηση του πραγματικού εσωτερικού λόγου  $N/C$  (**qnPc**) και του λόγου Redfield (**p\_qnRc**) έχοντας αφαιρέσει το άζωτο που βρίσκεται στο δομικό μέρος του κυττάρου:

$$iNIn = \min \left( 1.0, \max \left( 0.0, \frac{qnPc - p\_qnlc}{p\_qnRc - p\_qnlc} \right) \right) \tag{3.28}$$

Οι ενδοκυτταρικοί περιοριστικοί παράγοντες υπολογίζονται αντίστοιχα για το φώσφορο και το πυρίτιο. Ο συνολικός ενδοκυτταρικός περιοριστικός παράγοντας (**tN**) είναι συνάρτηση του ενδοκυτταρικού περιοριστικού παράγοντα αζώτου (**iNIn**), του περιοριστικού παράγοντα φωσφόρου (**iNIp**) και του περιοριστικού παράγοντα πυριτίου (**iNIs**) για τα διάτομα, δίνοντας

τρεις δυνατούς τρόπους υπολογισμού. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται ως  $tN$  ο πλέον περιοριστικός παράγοντας μεταξύ των τριών (νόμος Liebig).

Τέλος ο όρος καταβύθιση (ιζηματοπόθεση) του φυτοπλαγκτού εφαρμόζεται σε όλες τις λειτουργικές ομάδες αλλά στα μικρά κύτταρα είναι μηδενικός. Υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

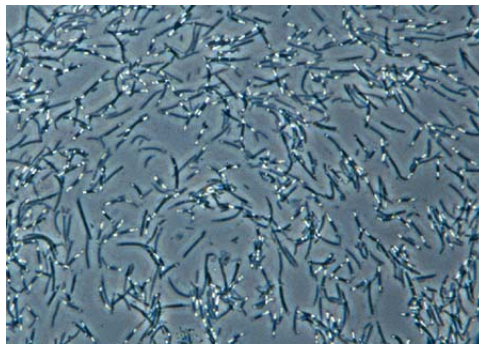
$$\text{καταβύθιση} = \overbrace{p\_rPim}^{\text{ΤιμήΥποβάθρουΚαταβύθισης}} + \overbrace{p\_res * \max(0.0, (p\_esNI - tN))}^{\text{ΠεριορισμόςΘρεπτικών}} \quad (3.29)$$

όπου  $p\_rPim$  παράμετρος καταβύθισης λόγω έλλειψης θρεπτικών σύμφωνα με μία τιμή κατωφλίου ( $p\_esNI$ ) και  $p\_res$  παράμετρος εξάρτησης της καταβύθισης από την έλλειψη σε θρεπτικά συστατικά.

Όταν το βυθιζόμενο φυτοπλαγκτόν φτάσει στο πυθμένα, ο όρος καταβύθιση μετατρέπεται σε ρυθμό εισροής θρεπτικών συστατικών στο βενθικό σύστημα.

### 3.3.2 Βιοαποικοδομιτές

Τα πελαγικά βακτήρια (*BI*, Εικόνα 3.3) αντιπροσωπεύουν μία μεγάλη ομάδα αποτελούμενη από ελεύθερα ετερότροφα βακτήρια τα οποία χρησιμοποιούν νεκρό οργανικό υλικό, είτε σωματιδιακό (*POM*, *R6j*) είτε διαλυμένο (*LOC*, *RIj*). Η λειτουργικότητα των βακτηριδίων ποικίλει προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο οξυγονωμένες και ανοξικές συνθήκες.



Εικόνα 3.5: Πελαγικά βακτήρια.

Ο ρυθμός μεταβολής των βακτηριδίων περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dB}{dt} = \text{απορρόφηση} - \text{αναπνόμε} - \text{θνησιμότητα} - \text{θήρευση} \quad (3.30)$$

Η πραγματική απορρόφηση (*uptake*), υπολογίζεται μέσω της δυνητικής λήψης τροφής (*uptake<sub>pot</sub>*) και του συνολικού υποστρώματος τροφής (*uptake<sub>sub</sub>*)

$$\text{uptake} = \min(\text{uptake}_{\text{pot}}, \text{uptake}_{\text{sub}}) \quad (3.31)$$

Η δυνητική λήψη τροφής υποδεικνύει το ποσοστό ανάπτυξης των οργανισμών κάτω από τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και είναι συνάρτηση του μέγιστου ρυθμού παραγωγικότητας (*p<sub>sum</sub>*), της θερμοκρασίας (*et*), του ενδοκυτταρικού περιορισμού θρεπτικών (*iN*) και της βιομάζας των πελαγικών βακτηρίων (*B1c*).

$$\text{uptake}_{\text{pot}} = p_{\text{sum}} * iN * et * B1c \quad (3.32)$$

Ο παράγοντας περιορισμού θρεπτικών παίρνει τιμές από 0 έως 1 και αντίθετα με το φυτοπλαγκτόν είναι συνάρτηση του πραγματικού εδοκυτταρικού λόγου N/C (*qnB1c*) και του λόγου Redfield (π.χ *p<sub>qnc</sub>* για το άζωτο), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα δομικά συστατικά.



$$iNIn = \min\left(1.0, \max\left(0.0, \frac{qnB1c}{p\_qnc}\right)\right) \quad (3.33)$$

Ο συνολικός περιοριστικός παράγοντας θρεπτικών ακολουθεί, όπως και στο φυτοπλαγκτόν, το νόμο του Liebig μεταξύ αζώτου και φωσφόρου.

Η απορρόφηση από το υπόστρωμα (sub) δίνει τη διαθέσιμη τροφή η οποία καταμερίζεται μεταξύ των διαφόρων πηγών. Τα βακτηρίδια τρέφονται τόσο από τη διαλυμένη οργανική ύλη (DOM, **R1**) όσο και από τους υδρογονάνθρακες (**R2**) σύμφωνα με έναν παράγοντα προτίμησης (**p\_suR1**, **p\_suR2** αντίστοιχα). Για τα σωματιδιακά οργανικά θρύμματα (POC, **R6**) λαμβάνεται υπόψη εκτός του παράγοντα προτίμησης των βακτηρίων σε αυτά (**p\_suR6**) και η ποιότητα τους (**suR6**).

$$uptake_{sub} = R1c * p\_suR1 + R2c * p\_suR2 + R6c * p\_suR6 * suR6 \quad (3.34)$$

ο όρος **suR6** ορίζεται ως:

$$suR6 = \min\left(\min\left(1.0, \frac{qnR6c}{p\_qnc}\right), \min\left(1.0, \frac{qpR6c}{p\_qpc}\right)\right) \quad (3.35)$$

όπου **qnR6c** και **qpR6c** οι εσωτερικοί λόγοι N/C και P/C αντίστοιχα και **p\_qnc**, **p\_qpc** οι λόγοι N/C και P/C Redfield.

Η αναπνοή χωρίζεται σε βασική αναπνοή η οποία υπολογίζεται όπως για το φυτοπλαγκτόν και την αναπνοή δραστηριότητας στην οποία εισάγονται δύο επιπλέον παράμετροι ώστε να γίνεται διαφοροποίηση μεταξύ οξυγονωμένων και ανοξικών συνθηκών.

$$αναπνοή = \left( \overbrace{et * p\_srs * B1c}^{ΒΑΣΙΚΗ} \right) + \left( \overbrace{(1.0 - p\_pu + p\_puo * (1.0 - eO2)) * uptake}^{ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ} \right) \quad (3.36)$$

όπου **p\_pu** συντελεστής προσομοίωσης των οξυγονωμένων συνθηκών και **p\_puo** συντελεστής προσομοίωσης των ανοξικών συνθηκών. Η παράμετρος **eO2** υπολογίζεται από την εξίσωση Michaelis – Menten βάσει του διαθέσιμου οξυγόνου (**O2o**) και τη συγκέντρωση οξυγόνου κάτω από την οποία διακόπτονται οι μεταβολικές δραστηριότητες (**p\_chdo**).

$$eO2 = \frac{O2o^3}{O2o^3 + p\_chdo^3} \quad (3.37)$$

Τα αναερόβια σε σχέση με τα αερόβια βακτήρια παρουσιάζουν μειωμένη βιοαποικοδομητικότητα λόγω του ότι αναπνέουν περισσότερο άνθρακα.

Τα βακτήρια θεωρείται εκκρίνουν μόνο διοξείδιου του άνθρακα λόγω αναπνοής.

Η θνησιμότητά τους, υπολογίζεται συναρτήσει ενός σταθερού ρυθμού θνησιμότητας ( $p\_sd$ ) ο οποίος εξαρτάται από το θερμοκρασιακό παράγοντα ( $et$ ). Στο μοντέλο, η νεκρή ύλη διοχετεύεται απευθείας ως διαλυμένη οργανική ύλη ( $R1$ ).

$$\theta\eta\sigma\iota\mu\acute{o}\tau\eta\tau\alpha = p\_sd * et * B1c \quad (3.38)$$

Για τα βακτήρια, κύριοι θηρευτές είναι τα ετερότροφα μαστιγωτά ( $Z6$ ) και σε μικρότερο βαθμό το μικροζωοπλαγκτόν ( $Z5$ ).

Τα βακτήρια διαδραματίζουν μέσα στο οικοσύστημα δύο σημαντικούς ρόλους, προσροφούν και ανακυκλώνουν άνθρακα και θρεπτικά (ανοργανοποιητές) ενώ ταυτοχρόνως ανταγωνίζονται το φυτοπλαγκτόν στη λήψη τροφής ανάλογα των εσωτερικών λόγων θρεπτικών/άνθρακα.

Έτσι εάν ο λόγος θρεπτικά/άνθρακα στην διαθέσιμη τροφή (διαλυμένη και σωματιδιακή ύλη) υπερβαίνει το λόγο Redfield ( $p\_qnc$  ή  $p\_qpc$ ) εκκρίνονται αμμωνιακά  $NH_4^+$  που συμβολίζονται με  $N4n$  και φωσφορικά  $PO_4^-$  που συμβολίζονται με  $N1p$ , ανάλογα με τη βιομάζα ( $B1c$ ) και το ρυθμό καθαρής παραγωγικότητας.

$$\epsilon\kappa\kappa\rho\iota\sigma\epsilon\iota\varsigma = \rho\upsilon\theta\mu\acute{o}\varsigma\_ \text{παραγωγικότητας} * \left( \frac{ruR6n + ruR1c}{uptake} - p\_qnc \right) * B1c \quad (3.39)$$

Στην περίπτωση που η ποιότητα της τροφής είναι χαμηλή τότε λαμβάνονται ανόργανα θρεπτικά από τα βακτήρια.

Η λήψη θρεπτικών (π.χ αζώτου) διαχωρίζεται στη μέγιστη δυνατή απορρόφηση νιτρικών και στη μέγιστη δυνατή απορρόφηση αμμωνίας, οι οποίες καθορίζονται από το χαρακτηριστικό, κατά περίπτωση, παράγοντα απορρόφησης ( $p\_qun$ ), τη βιομάζα και την συγκέντρωση νιτρικών και αμμωνίας στο εξωκυτταρικό περιβάλλον.

$$uptake_{\max} = \left( \overbrace{p\_qun * N3n * B1c}^{uptake_{\max\_N3n}} * \left( \frac{p\_IN4}{p\_IN4 + N4n} \right) \right) + \left( \overbrace{p\_qun * N4n * B1c}^{uptake_{\max\_N4n}} \right) \quad (3.40)$$

### 3.3.3 Καταναλωτές

Οι καταναλωτές αντιπροσωπεύονται από δύο μεγάλες ομάδες:

➤ Μικροζωοπλαγκτόν

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μικροζωοπλαγκτονικές ομάδες στο μοντέλο με διαφορετικά τροφικά επίπεδα και παραμέτρους αλλά με παρεμφερές σχήμα παραμετροποίησης.

Z5: μικροζωοπλαγκτόν (Ισοδύναμη Σφαιρική Διάμετρος, ESD: 20 – 200 μm)

Z6: ετερότροφα μαστιγωτά (Ισοδύναμη Σφαιρική Διάμετρος, ESD: 2 – 20 μm)

➤ Μεσοζωοπλαγκτόν

Για το μεσοζωοπλαγκτόν χρησιμοποιείται μια πολύ απλή παραμετροποίηση λόγω της ποικιλομορφίας του που οφείλεται στην ιδιαιτερότητα της κάθε μονάδας και την αδυναμία περιγραφής της ομάδας από ένα γενικότερο μοντέλο. Για τον λόγο αυτό οι λειτουργικές ομάδες στο μεσοζωοπλαγκτόν περιγράφονται κύρια ως προς την επίδρασή τους στην πρωτογενή παραγωγή και το μικροβιακό βρόγχο. Το κύριο χαρακτηριστικό των ομάδων αυτών είναι ότι πρέπει να διατηρούν ένα σταθερό λόγο θρεπτικών/άνθρακα με αποτέλεσμα οι απώλειες άνθρακα να έχουν αντίστοιχες απώλειες σε θρεπτικά. Δύο διαφορετικοί τύποι μεσοζωοπλαγκτού διακρίνονται:

Z3: σαρκοφάγα

Z4: παμφάγα



**Εικόνα 3.6:** Φωτογραφίες χαρακτηριστικών ζωοπλαγκτονικών οργανισμών. Ετερότροφα μαστιγωτά (επάνω αριστερά), μικροζωοπλαγκτόν (επάνω δεξιά), παμφάγο μεσοζωοπλαγκτόν (κάτω αριστερά), σαρκοφάγο μεσοζωοπλαγκτόν (κάτω δεξιά).

Ο ρυθμός μεταβολής των καταναλωτών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dZ}{dt} = \text{απορρόφηση} - \text{αναπνοή} - \text{θνησιμότητα} - \text{απεκκρίσεις} - \text{θήρευση} \quad (3.41)$$

Η απορρόφηση είναι συνάρτηση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής ( $p\_sum$ ), του περιοριστικού παράγοντα θερμοκρασίας ( $et$ ), του διαθέσιμου ποσοστού τροφής ( $efood$ ) και του σταθερού αποθεματικού ( $ZIc$ ).

$$uptake = p\_sum * et * efood * ZIc \quad (3.42)$$

Για τον υπολογισμό του διαθέσιμου ποσοστού τροφής χρησιμοποιείται η εξίσωση των Michaelis – Menten βάσει των συνολικών διαθέσιμων πηγών τροφής ( $rumc$ ) και της παραμέτρου ημικορεσμού ( $p\_chuc$ ) όπου η λήψη τροφής είναι το ήμισυ της μέγιστης. Για το μικροζωοπλαγκτόν, η παράμετρος  $rumc$  υπολογίζεται από το διαθέσιμο αποθεματικό και τον παράγοντα προτίμησης σύμφωνα με το τροφικό πλέγμα, ενώ λαμβάνεται υπόψη και μία κατώτερη τιμή κατωφλίου ( $p\_minfood$ ) προς αποφυγή υπερεκμετάλλευσης των ομάδων των θηραμάτων.

$$efood = \frac{rumc}{rumc + p\_chuc} \quad (3.43)$$

Στην περίπτωση του μεσοζωοπλαγκτού, η εξίσωση των Michaelis – Menten τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψη την σταθερά όγκου αναζήτησης τροφής ( $p\_vum$ ), τη συνολική διαθέσιμη τροφή ( $ZIm$ ) και το μέγιστο ρυθμό παραγωγής ( $p\_sum$ ), ενώ δεν υπάρχει παράμετρος κατώτερης τιμής κατωφλίου που περιορίζει τη  $ZIm$ .

$$efood = \frac{p\_vum * ZIm}{p\_vum * ZIm + p\_sum} \quad (3.44)$$

Από την υπολογιζόμενη απορρόφηση ( $uptake$ ) εκτιμάται η συνεισφορά κάθε πηγής τροφής βάσει του λόγου απορρόφηση/συνολική διαθέσιμη τροφή ( $rumc$  ή  $ZIm$ ).

Η αναπνοή έχει δύο συνιστώσες, την βασική αναπνοή εξαρτώμενη από τον περιοριστικό παράγοντα θερμοκρασίας και την αναπνοή δραστηριότητας.

$$\text{αναπνοή} = \left( \overbrace{et * p\_srs * ZIc}^{\text{ΒΑΣΙΚΗ}} \right) + \left( \overbrace{((1.0 - p\_pu) * (1.0 - p\_pu\_ea)) * uptake}^{\text{ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ}} \right) \quad (3.45)$$

όπου  $p\_srs$  η χαρακτηριστική αναπνοή για κάθε ομάδα σε συνθήκες ηρεμίας,  $p\_pu$  ο συντελεστής αφομοίωσης της τροφής και  $p\_pu\_ea$  το ποσοστό της απορρόφησης της τροφής που επιστρέφει στο περιβάλλον με τη διεργασία της απέκκρισης.

Η θνησιμότητα υπολογίζεται διαφορετικά για τις δύο κατηγορίες καταναλωτών. Όσον αφορά το μικροζωοπλαγκτόν, η θνησιμότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση οξυγόνου. Έτσι η φυσική θνησιμότητα εμπεριέχει ένα σταθερό ημερήσιο ρυθμό ( $p\_sd$ ), καθώς και ένα ρυθμό εξαρτώμενο από τη συγκέντρωση οξυγόνου διαβαθμισμένο από το ρυθμιστικό παράγοντα οξυγόνου ( $eO2$ ) όπως περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{θνησιμότητα}_{\text{Μικροζωοπλαγκτόν}} = ((1.0 - eO2) * p\_sdo + p\_sd) * ZIc \quad (3.46)$$

Για το μεσοζωοπλαγκτόν η θνησιμότητα υπολογίζεται από τη βιομάζα του πληθυσμού, ενώ διαχωρίζεται σε φυσική και εξαρτώμενη από την πυκνότητα ( $p\_sds$ ).

$$\text{θνησιμότητα}_{\text{Μεσοζωοπλαγκτόν}} = \left( \overbrace{p\_sd * et * ZIc}^{\text{ΦΥΣΙΚΗ}} \right) + \left( \overbrace{p\_sdo * ZIc^{p\_sds}}^{\text{ΛΟΓΩ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ}} \right) \quad (3.47)$$

Οι απεκκρίσεις υπολογίζονται συναρτήσει του χαρακτηριστικού συντελεστή αφομοίωσης της τροφής ( $p\_pu$ ) κάθε λειτουργικής ομάδας και του ποσοστού απέκκρισης από την απορρόφηση ( $p\_pu\_ea$ ).

$$\text{απεκκρίσεις} = uptake * (1.0 - p\_pu) * p\_pu\_ea \quad (3.48)$$

Τα προϊόντα της θνησιμότητας και των απεκκρίσεων, στην περίπτωση του μικροζωοπλαγκτού καταμερίζονται κυρίως μεταξύ διαλυμένων ( $DOM$ ) και δευτερευόντως σωματιδιακών οργανικών υπολειμμάτων βάσει μίας παραμέτρου ( $p\_pe\_R1$ ). Για το μεσοζωοπλαγκτόν οι απεκκρίσεις είναι ένα ποσοστό της συνολικής απορρόφησης τροφής ( $p\_peI\_R6$ ), ενώ όλα τα προϊόντα οδηγούνται στη σωματιδιακή οργανική ύλη ( $POM$ ).

Οι ροές θρεπτικών από τις λειτουργικές ομάδες οι οποίες θηρεύονται από το μικροζωοπλαγκτόν και το μεσοζωοπλαγκτόν υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη το περιεχόμενο σε θρεπτικά κάθε ομάδας. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και για τις απεκκρίσεις συσχετίζοντας τα θρεπτικά με τον άνθρακα σύμφωνα με την εσωτερική αναλογία θρεπτικών/άνθρακα. Προς αποφυγή περίσσειας θρεπτικών στον οργανισμό, η πλεονασματική ποσότητα σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο λόγο θρεπτικών/άνθρακα ( $p\_qn\_mz$ ) απομακρύνεται από το κύτταρο με τη μορφή αμμωνίας και νιτρικών βάσει της παραμέτρου  $p\_stemp$ .

Ο μοναδικός θηρευτής για την ομάδα του μεσοζωοπλαγκτόν είναι το σαρκοφάγο μεσοζωοπλαγκτόν αν και υπάρχουν απώλειες λόγω κανιβαλισμού.

Συνοψίζοντας τις παραπάνω διεργασίες καταλήγουμε ότι η διαλυμένη οργανική ύλη (*RI*) παράγεται από όλες τις λειτουργικές ομάδες εκτός του μεσοζωοπλαγκτόν και καταναλώνεται από τα βακτήρια, ενώ η σωματιδιακή οργανική ύλη (*R6*) παράγεται από όλες τις λειτουργικές ομάδες εκτός των βακτηριδίων από τα οποία καταναλώνεται. Τέλος, όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη θαλάσσια στήλη νερού όπως νιτροποίηση, απονιτροποίηση, ανακύκλωση του διαλυμένου πυριτίου και επανοξείδωση ανηγμένων ισοδύναμων (reoxidation of reduction equivalents) προσομοιώνονται από το μοντέλο ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και κατάλληλων παραμέτρων.

### 3.3.4 Πελαγικά Θρεπτικά

Οι εξισώσεις για όλα τα διαλυμένα θρεπτικά απορρέουν από τις πελαγικές διαδικασίες παραγωγής/κατανάλωσης που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επίσης μοριακές ροές ανάμεσα στο νερό και το ίζημα εμπεριέχονται στις βασικές εξισώσεις. Όλες οι ροές στα όρια οι οποίες περιλαμβάνουν κάθε πιθανή επιφανειακή εισροή εμπεριέχονται ως πηγές και δεν χρησιμοποιούνται ως κανονικές οριακές συνθήκες. Προκειμένου να διαχωριστεί ένας όρος, ο οποίος εφαρμόζεται μόνο στην επιφάνεια ή μόνο στον πυθμένα, από άλλους που αναφέρονται σε ολόκληρο το πεδίο χρησιμοποιείται η συνάρτηση  $\Delta$  ως εξής:

$$\Delta_{surf} = \begin{cases} \frac{1}{\Delta z(z=0)} & z=0 \\ 0 & \forall z \neq 0 \end{cases} \quad (3.49)$$

$$\Delta_{bot} = \begin{cases} \frac{1}{\Delta z(z=-H)} & z=-H \\ 0 & \forall z \neq -H \end{cases}$$

όπου  $\Delta z$  η ξεχωριστή συνάρτηση καθορισμού του βάρους των μοντελοποιημένων επιπέδων.

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις για τα πελαγικά θρεπτικά συστατικά είναι:

$$\frac{\partial N1_p}{\partial t} \Big|_b = -\sum_{i=1}^4 \left[ \frac{\partial Pi_p}{\partial t} \right]_{N1}^{pp} + f_{B1}^p \left[ \frac{\partial B1_p}{\partial t} \right]_{N1}^{rm} + \sum_{i=5}^6 \left[ \frac{\partial Zi_p}{\partial t} \right]_{N1}^{out} + \sum_{i=3}^4 \left\{ \left[ \frac{\partial Zi_p}{\partial t} \right]_{N1}^{rsp} + \left[ \frac{\partial Zi_p}{\partial t} \right]_{N1}^{lim} \right\} + \Delta_{bot} \left[ \frac{\partial K1_p}{\partial t} \right]_{N1}^{ben} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial N3_n}{\partial t} \Big|_b = -\sum_{i=1}^4 \left[ \frac{\partial Pi_n}{\partial t} \right]_{N3}^{pp} + \left[ \frac{\partial N4_n}{\partial t} \right]_{N3}^{nit} - \left[ \frac{\partial N3_n}{\partial t} \right]_{\sin Kn}^{denit} + \Delta_{bot} \left[ \frac{\partial K3n}{\partial t} \right]_{N3}^{ben} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial N4_n}{\partial t} \Big|_b = -\sum_{i=1}^4 \left[ \frac{\partial Pi_n}{\partial t} \right]_{N4}^{pp} + f_{B1}^p \left[ \frac{\partial B1_n}{\partial t} \right]_{N4}^{rm} + \sum_{i=5}^6 \left[ \frac{\partial Zi_n}{\partial t} \right]_{N4}^{out} + \sum_{i=3}^4 \left\{ \left[ \frac{\partial Zi_n}{\partial t} \right]_{N4}^{rsp} + \left[ \frac{\partial Zi_n}{\partial t} \right]_{N4}^{lim} \right\} - \left[ \frac{\partial N3_n}{\partial t} \right]_{N4}^{nit} + \Delta_{bot} \left[ \frac{\partial K4_n}{\partial t} \right]_{N4}^{ben} \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial N5_s}{\partial t} \Big|_b = \left[ \frac{\partial Pi_s}{\partial t} \right]_{N5}^{pp} + \Delta_{bot} \left[ \frac{\partial K5_s}{\partial t} \right]_{N5}^{ben} \quad (3.53)$$

η ροή νιτροποίησης στις παραπάνω εξισώσεις δίνεται από:

$$\left[ \frac{\partial N4_n}{\partial t} \right]_{N3}^{nit} \pm \left[ \frac{\partial N3_n}{\partial t} \right]_{N4}^{nit} = \Lambda_{N4}^{nit} f_{N4}^T f_{N4}^o O_{sat} N4_n \quad (3.54)$$

όπου  $\Lambda_{N4}^{nit}$  ο ημερήσιος ρυθμός αζωτοποίησης,  $O_{sat}$  το κλάσμα κορεσμού και

$$f_{N4}^T = Q_{10N4}^{\frac{T-T_o}{10}} \quad T_o = 10^\circ C \quad (3.55)$$

$$f_{N4}^T = \frac{O2_o}{O2_o + h_{N4}^o}$$

οι περιβαλλοντικοί ρυθμιστικοί παράγοντες (θερμοκρασία και οξυγόνο) για τις βιογεωχημικές διεργασίες.

Η απονιτροποίηση εκφράζεται με τον προτελευταίο όρο της εξίσωσης 3.51:

$$\left[ \frac{\partial N3_n}{\partial t} \right]_{\sin k_n}^{denit} = \Lambda_{N3}^{denit} f_{N3}^T \frac{\Omega_c^o (1 - f_{B1}^o) \left[ \frac{\partial B1_c}{\partial t} \right]_{O3}^{rsp}}{M_o^*} N3_n \quad (3.56)$$

όπου  $\Lambda_{N3}^{denit}$  ο ρυθμός απονιτροποίησης στην ανοξική ανοργανοποίηση αναφοράς  $M_o^*$  στους  $10^\circ C$ . Ο όρος  $M_o^*$  στον παρανομαστή είναι η πραγματική ανοργανοποίηση (βακτηριακή απαίτηση οξυγόνου) η οποία καθορίζεται από τη βακτηριακή αναπνοή. Αυτή η ροή κατανάλωσης νιτρικών  $\left[ \frac{\partial N3_n}{\partial t} \right]_{\sin k_n}^{denit}$  δεν ανακατευθύνεται (ως ρυθμός παραγωγής) στη ποσότητα  $N_2$  στο νερό λόγω του ότι αυτή η μεταβλητή δεν ακολουθείται ρητά στο μοντέλο. Εναλλακτικά ορίζεται ένας άπειρος όρος εξαφάνισης (*sink<sub>n</sub>*).



## 4. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ

Πριν προχωρήσουμε στον υπολογισμό της επίδρασης της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου στη πρωτογενή παραγωγικότητα στην θάλασσα της Ανατολικής Μεσογείου (Κεφ. 5), διερευνήσαμε την ευαισθησία του μοντέλου σε διαταραχές των επιμέρους διεργασιών. Για το λόγο αυτό, εκτελέσαμε μία προσομοίωση “αναφοράς” η οποία υπολογίζει την πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα με βάση τιμές παραμέτρων οι οποίες προσομοιώνουν με τον βέλτιστο τρόπο το υπό μελέτη θαλάσσιο οικοσύστημα και την συγκρίναμε με δύο σειρές διαφορετικών σεναρίων. Στη πρώτη σειρά σεναρίων (Α), γίνεται εκ νέου προσομοίωση μειώνοντας κάθε φορά την τιμή της παραμέτρου που μελετάμε κατά 30%, ενώ στη δεύτερη σειρά σεναρίων (Β) η προσομοίωση γίνεται αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου κατά 30%, κρατώντας κάθε φορά για τις υπόλοιπες παραμέτρους τις αρχικές τιμές τους (προσομοίωση αναφοράς). Τα ποσοστά μείωσης και αύξησης στα σενάρια Α και Β, επελέγησαν ώστε να βρίσκονται μέσα στο εύρος της φυσικής μεταβλητότητας των παραμέτρων.

### 4.1 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΦΥΤΟΠΛΑΓΚΤΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.3.1, οι πρωτογενείς παραγωγοί (φυτοπλαγκτόν) περιγράφονται από λειτουργικές ομάδες βασισμένες τόσο στο μέγεθος (Ισοδύναμη Σφαιρική Διάμετρος, Equivalent Spherical Diameter: *ESD*) όσο και στις οικολογικές ιδιότητες τους. Οι λειτουργικές αυτές ομάδες είναι τα διάτομα (P1), το νανοπλαγκτόν (P2), και το πικοπλαγκτόν (P3).

Ο ρυθμός μεταβολής για κάθε φυτοπλαγκτονική ομάδα οργανισμών δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dP}{dt} = \text{φωτοσύνθεση} - \text{αναπνοή} - \text{απεκκρίσεις} - \text{θήρευση} \quad (4.1)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει τις λειτουργικές διεργασίες του οργανισμού σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως φως, διαθεσιμότητα τροφής κλπ. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τον πυρήνα κάθε παραμετροποίησης, που είναι διατύπωση της εξάρτησης των βιολογικών λειτουργιών των οργανισμών από τους κύριους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Για την εκτίμηση της επίδρασης των επιμέρους κυριότερων διεργασιών, δηλαδή της φωτοσύνθεσης και της βασικής αναπνοής, στην παραγωγή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας (*PIC*) και κατ’ επέκταση στην συνολική καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα

(*netpp=φωτοσύνθεση-αναπνοή-απεκκρίσεις-θήρευση*) συγκρίναμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναφοράς με δύο διαφορετικά σενάρια, A και B. Εκτός από την επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη φωτοσύνθεση και τη βασική αναπνοή, ελέγξαμε και την επίδραση της διεργασίας της καταβύθισης (Εξίσωση 4.4) των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών. Όπως αναφέραμε, στο σενάριο A έγινε μείωση της τιμής της παραμέτρου, της οποίας την επίδραση μελετάμε στην παραγωγή φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, κατά 30% και κάναμε εκ νέου προσομοίωση. Στο σενάριο B έγινε αύξηση της τιμής της παραμέτρου κατά 30% και κάναμε νέα προσομοίωση.

Η ολική φωτοσυνθετική παραγωγή ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\text{φωτοσύνθεση} = p\_sum * et * eiPI * PIc \quad (4.2)$$

που λαμβάνει υπόψη

- i) το μέγιστο ρυθμό παραγωγής (*p\_sum*),
- ii) την επίδραση της θερμοκρασίας (*et*) η οποία δίνεται δίνεται από μία εκθετική εξίσωση και υπολογίζεται από την θερμοκρασία αναφοράς και έναν συντελεστή χαρακτηριστικό για κάθε λειτουργική ομάδα (*p\_q10*), ο οποίος δίνει την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10°C σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς,
- iii) τον περιορισμό της παραγωγής από την ηλιακή ακτινοβολία (*eiPI*) και
- iv) την υπάρχουσα βιομάζα (*PIc*).

Η αναπνοή χωρίζεται σε δύο μέρη, την βασική αναπνοή (*BASAL*) και την αναπνοή δραστηριότητας (*ACTIVITY*). Η βασική αναπνοή δεν επηρεάζεται από την ανάπτυξη αλλά από τη βιομάζα του φυτοπλαγκτού (*Pi*), τη θερμοκρασία (*et*) και τον ειδικό συντελεστή ρυθμού αναπνοής (*p\_srs*).

$$\overbrace{\text{αναπνοή}}^{BASAL} = et * p\_srs * PIc \quad (4.3)$$

Τέλος ο όρος καταβύθιση (ιζηματοπόθεση) του φυτοπλαγκτού εφαρμόζεται μόνο στα διάτομα διότι στα μικρά κύτταρα είναι μηδενικός. Υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\text{καταβύθιση} = \overbrace{p\_rPim}^{\text{ΤιμήΥποβάθρουΚαταβύθισης}} + \overbrace{p\_res * \max(0.0, (p\_esNI - tN))}^{\text{ΠεριορισμόςΘρεπτικών}} \quad (4.4)$$

όπου *p\_rPim* παράμετρος καταβύθισης λόγω έλλειψης θρεπτικών σύμφωνα με μία ελάχιστη τιμή (*p\_esNI*) και *p\_res* παράμετρος εξάρτησης της καταβύθισης από την έλλειψη σε θρεπτικά συστατικά.

Τα αποτελέσματα παραγωγής βιομάζας των προσομοιώσεων Α και Β (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας, ετήσια ελάχιστη τιμή και ετήσια μέγιστη τιμή για τα βάθη 0-150m, παραγωγική ζώνη) καθώς και της προσομοίωσης αναφοράς δίνονται στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 για τα διάτομα, το νανοπλαγκτόν και το πικοπλαγκτόν αντίστοιχα. Τέλος, στον Πίνακα 4.4 δίνονται οι επιδράσεις αλλαγής των παραμέτρων, στην συνολική καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα.

**Πίνακας 4.1:** Διάτομα: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου Α και προσομοίωσης σεναρίου Β για την επίδραση των παραμέτρων p\_sum, p\_srs, p\_res και p\_q10 στην παραγωγή βιομάζας των διατόμων (P1) .

<b>Παράμετρος</b>	<b>Προσομοίωση Αναφοράς</b>	<b>Σενάριο Α -30%</b>	<b>Σενάριο Β +30%</b>
<b>Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (p_sum)</b>	Average 1.85 Min 0.00023 Max 17.09	Average 1.75 Min 0.0003 Max 15.25	Average 1.89 Min 0.00024 Max 17.12
<b>Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής (p_srs)</b>	Average 1.85 Min 0.00023 Max 17.09	Average 2.1 Min 0.00017 Max 17.05	Average 3.66 Min 0.00045 Max 23.65
<b>Συντελεστής καταβύθισης (p_res)</b>	Average 1.85 Min 0.00023 Max 17.09	Average 1.95 Min 0.001 Max 15.87	Average 1.77 Min 0.00009 Max 18.42
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (p_q10)</b>	Average 1.85 Min 0.00023 Max 17.09	Average 1.42 Min 0.00009 Max 14.87	Average 1.50 Min 0.0003 Max 15.89

**Πίνακας 4.2:** Νανοπλαγκτόν: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου A και προσομοίωσης σεναρίου B για την επίδραση των παραμέτρων p\_sum, p\_srs και p\_q10 στην παραγωγή βιομάζας του νανοπλαγκτού (P2).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο A -30%	Σενάριο B +30%
<b>Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (p_sum)</b>	Average 6.11 Min 0.012 Max 20.57	Average 6.65 Min 0.012 Max 24.59	Average 5.79 Min 0.012 Max 18.73
<b>Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής (p_srs)</b>	Average 6.11 Min 0.012 Max 20.57	Average 5.87 Min 0.034 Max 18.18	Average 3.58 Min 0.002 Max 10.43
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (p_q10)</b>	Average 6.11 Min 0.012 Max 20.57	Average 5.74 Min 0.0009 Max 20.36	Average 5.83 Min 0.0017 Max 20.82

**Πίνακας 4.3:** Πικοπλαγκτόν: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου A και προσομοίωσης σεναρίου B για την επίδραση των παραμέτρων p\_sum, p\_srs και p\_q10 στην παραγωγή βιομάζας του πικοπλαγκτού (P3).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο A -30%	Σενάριο B -30%
<b>Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (p_sum)</b>	Average 1.52 Min 0.0003 Max 4.76	Average 1.67 Min 0.0003 Max 5.26	Average 1.58 Min 0.008 Max 4.44
<b>Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής (p_srs)</b>	Average 1.52 Min 0.0003 Max 4.76	Average 1.59 Min 0.002 Max 4.73	Average 1.98 Min 0.22 Max 5.66
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (p_q10)</b>	Average 1.52 Min 0.0003 Max 4.76	Average 1.22 Min 0.00001 Max 4.46	Average 1.33 Min 0.00001 Max 5.11

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών προσομοιώσεων που παρατίθενται στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

Οι αλλαγές στην παράμετρο  $p\_sum$  (μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιομάζας) δεν δίνουν ίδιες τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά μεταβολές για κάθε μία φυτοπλαγκτονική ομάδα οργανισμών που μελετάμε. Στην περίπτωση των διατόμων ( $P1$ ), μείωση της τιμής της παραμέτρου κατά 30% (Σενάριο A) οδηγεί σε μείωση της βιομάζας του πληθυσμού κατά 5,4% ενώ αύξηση της παραμέτρου (Σενάριο B) οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας κατά 2,6%. Στην περίπτωση όμως των μικρότερων φυτοπλαγκτονικών οργανισμών  $P2$  και  $P3$ , μείωση της  $p\_sum$  επιφέρει αύξηση της βιομάζας της τάξεως του 8,9% και 9,7% αντίστοιχα. Παρατηρώντας όμως την επίδραση των αλλαγών αυτών στην συνολική καθαρή παραγωγικότητα (Πίνακας 4.4), βλέπουμε την αναμενόμενη μείωση στην προσομοίωση A και αντίστοιχα αύξηση στην προσομοίωση B. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των φυτοπλαγκτονικών ομάδων, οφείλονται στο γεγονός ότι ο πραγματικός ρυθμός ανάπτυξης δεν είναι πάντα ανάλογος της αύξησης ή μείωσης της παραμέτρου  $p\_sum$  διότι υπεισέρχονται και άλλοι περιοριστικοί παράγοντες, όπως η επίδραση της θερμοκρασίας, ο περιορισμός ακτινοβολίας και η υπάρχουσα φυτοπλαγκτονική βιομάζα (Εξίσωση 4.2), οι οποίοι δρουν εξισορροπητικά ως προς την αύξηση ή μείωση του πληθυσμού.

Η επίδραση των αλλαγών του ρυθμού αναπνοής σε κατάσταση ηρεμίας ( $p\_srs$ , τόσο για το Σενάριο A όσο και για το Σενάριο B) στην βιομάζα των  $P1$  και  $P3$  είναι θετική και αντιστοιχεί σε ποσοστά από 4,4% ( $P3$ , Σενάριο A) έως 98,3% ( $P1$ , Σενάριο B). Στην περίπτωση των  $P2$  αντίθετα, αλλαγές της παραμέτρου επιφέρουν μείωση της βιομάζας σε ποσοστά -4% (Σενάριο A) και -41% (Σενάριο B). Ο ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής είναι η παράμετρος με την μεγαλύτερη ποσοστιαία επίδραση στους φυτοπλαγκτονικούς οργανισμούς.

Αλλαγή του χαρακτηριστικού συντελεστή επίδρασης θερμοκρασίας ( $p\_q10$ ) τόσο για το Σενάριο A όσο και για το Σενάριο B επιφέρει στους οργανισμούς όλων των φυτοπλαγκτονικών ομάδων μείωση της παραγωγής βιομάζας. Όταν μειώνουμε την τιμή της παραμέτρου κατά 30% (σε σχέση με την τιμή της στην προσομοίωση αναφοράς) η βιομάζα των  $P1$  μειώνεται κατά 23%, των  $P2$  κατά 6% και των  $P3$  κατά 20%. Αύξηση της τιμής της παραμέτρου κατά 30% έχει και πάλι σαν αποτέλεσμα την μείωση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας αλλά σε μικρότερα ποσοστά (-19% για τα  $P1$ , -4,6% για τα  $P2$  και -12,4% για τα  $P3$ ). Η μείωση αυτή της βιομάζας που οφείλεται στην αλλαγή της παραμέτρου  $p\_q10$  εμφανίζεται, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο και στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (Πίνακας 4.4) με ποσοστά -11% για το Σενάριο A και -7,2% για το Σενάριο B.

Τέλος μείωση της παραμέτρου  $p_{res}$ , η οποία δίνει τον ρυθμό καταβύθισης των διατόμων (που είναι μηδενικός για τους μικρότερου μεγέθους φυτοπλαγκτονικούς οργανισμούς) επιφέρει αύξηση της τάξεως του 6,1% της υπολογιζόμενης από το μοντέλο βιομάζας τους για τα βάθη της θαλάσσιας στήλης που μελετάμε (0-150m), ενώ μείωση του επιφέρει και μείωση παραγωγής βιομάζας κατά 4,3%.

**Πίνακας 4.4:** Πρωτογενής παραγωγικότητα: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου A και προσομοίωσης σεναρίου B για την επίδραση των παραμέτρων  $p_{sum}$ ,  $p_{srs}$  και  $p_{q10}$  στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (netpp).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο A -30%	Σενάριο B -30%
<b>Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (<math>p_{sum}</math>)</b>	Average 1.00 Min -0.141 Max +6.57	Average 0.88 Min -0.17 Max +5.33	Average 1.08 Min -0.123 Max +7.52
<b>Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής (<math>p_{srs}</math>)</b>	Average 1.00 Min -0.141 Max +6.57	Average 1.00 Min -0.087 Max +6.35	Average 1.04 Min -0.005 Max +5.76
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (<math>p_{q10}</math>)</b>	Average 1.00 Min -0.141 Max +6.57	Average 0.89 Min -0.189 Max +9.25	Average 0.93 Min -0.194 Max +9.01

## 4.2 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΕΛΑΓΙΚΩΝ ΒΑΚΤΗΡΙΩΝ

Τα πελαγικά βακτήρια (*B1*) αντιπροσωπεύουν μία μεγάλη ομάδα αποτελούμενη από ελεύθερα ετερότροφα βακτήρια τα οποία χρησιμοποιούν νεκρό οργανικό υλικό, είτε σωματιδιακό είτε διαλυμένο.

Ο ρυθμός μεταβολής των βακτηριδίων περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dB}{dt} = \text{απορρόφηση} - \text{αναπνοή} - \text{θνησιμότητα} - \text{θήρευση} \quad (4.5)$$

Για την εκτίμηση της επίδρασης των επιμέρους κυριότερων διεργασιών, δηλαδή της απορρόφησης και της βασικής αναπνοής, στην παραγωγή βακτηριακής βιομάζας (*B1c*) συγκρίναμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναφοράς με δύο διαφορετικά σενάρια, Α και Β. Στο σενάριο Α έγινε μείωση κατά 30% της τιμής της παραμέτρου, της οποίας την επίδραση στην παραγωγή βακτηριακής βιομάζας μελετάμε. Στο σενάριο Β έγινε αύξηση της τιμής της παραμέτρου κατά 30%.

Η πραγματική λήψη (*uptake*), υπολογίζεται μέσω της δυνητικής λήψης τροφής (*uptake<sub>pot</sub>*) και του συνολικού υποστρώματος (διαθεσιμότητας) τροφής (*uptake<sub>sub</sub>*)

Η δυνητική λήψη τροφής υποδεικνύει το ποσοστό ανάπτυξης των οργανισμών κάτω από τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και είναι συνάρτηση του μέγιστου ρυθμού παραγωγικότητας (*p<sub>sum</sub>*), της επίδρασης της θερμοκρασίας (*et*) η οποία δίνεται από μία εκθετική εξίσωση, του ενδοκυτταρικού περιορισμού θρεπτικών (*iN*) και της βιομάζας των πελαγικών βακτηρίων (*B1c*). Η *et* υπολογίζεται από την θερμοκρασία αναφοράς και έναν συντελεστή χαρακτηριστικό για κάθε λειτουργική ομάδα (*p<sub>q10</sub>*), ο οποίος δίνει την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10°C σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς,

$$uptake_{pot} = p_{sum} * iN * et * B1c \quad (4.6)$$

Η βασική αναπνοή υπολογίζεται όπως και για το φυτοπλαγκτόν, από τη βιομάζα των βακτηρίων (*B1c*), την επίδραση της θερμοκρασίας (*et*) και τον ειδικό συντελεστή ρυθμού αναπνοής (*p<sub>srs</sub>*).

$$\overbrace{\text{αναπνοή}}^{BASAL} = et * p_{srs} * B1c \quad (4.7)$$

Τα αποτελέσματα παραγωγής βιομάζας των προσομοιώσεων Α και Β (ετήσιος μέσος όρος τιμών για βάθη από 0 έως 150m, παραγωγική ζώνη, ετήσια ελάχιστη τιμή για τα βάθη 0-150m και ετήσια μέγιστη τιμή για τα βάθη 0-150m) καθώς και της προσομοίωσης αναφοράς δίνονται στον Πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5:** Βακτήρια: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου Α και προσομοίωσης σεναρίου Β για την επίδραση των παραμέτρων  $p\_sum$ ,  $p\_srs$ ,  $p\_res$  και  $p\_q10$  στην βιομάζα των βακτηρίων (B1c).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο Α -30%	Σενάριο Β +30%
Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης ( $p\_sum$ )	Average 11.26 Min 2.89 Max 21.10	Average 11.26 Min 2.89 Max 21.10	Average 11.26 Min 2.89 Max 21.10
Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής ( $p\_srs$ )	Average 11.26 Min 2.89 Max 21.10	Average 11.34 Min 3.46 Max 21.07	Average 11.19 Min 2.34 Max 21.14
Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας ( $p\_q10$ )	Average 11.26 Min 2.89 Max 21.10	Average 11.24 Min 2.71 Max 21.12	Average 11.28 Min 3.02 Max 21.10

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των τριών προσομοιώσεων που παρατίθενται στον Πίνακα 4.5, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται τόσο στην αλλαγή του ειδικού συντελεστή ρυθμού αναπνοής ( $p\_srs$ ) όσο και του χαρακτηριστικού συντελεστή επίδρασης θερμοκρασίας ( $p\_q10$ ), με τον αναμενόμενο τρόπο. Μείωση της παραμέτρου  $p\_srs$  κατά 30% οδηγεί σε μείωση της βασικής αναπνοής (Εξίσωση 4.5) και άρα σε αύξηση της παραγωγής βακτηριακής βιομάζας **B1c** κατά 0,65%. Αντίστοιχα, αύξηση της παραμέτρου  $p\_srs$  οδηγεί σε αύξηση της βασικής αναπνοής και κατά συνέπεια μείωση του ρυθμού μεταβολής των βακτηριδίων και μείωση της βιομάζας τους κατά 0,68%. Και στην περίπτωση της αλλαγής της παραμέτρου  $p\_q10$  τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα: Αύξηση του συντελεστή επίδρασης της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής βακτηριακής βιομάζας (+0,15%), ενώ αντίστοιχα μείωση του συντελεστή σε μείωση της βιομάζας των βακτηρίων (-0,2%). Τέλος αλλαγές στην παράμετρο  $p\_sum$  (μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιομάζας) δεν δίνουν καμία μεταβολή στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παράμετρος  $p\_sum$  αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό παραγωγής ο οποίος όμως δεν είναι ανάλογος της ανάπτυξης των βακτηρίων διότι υπάρχουν οι παράγοντες περιορισμού λόγω έλλειψης θρεπτικών (Παράγραφος 3.3.2), οι οποίες δρουν περιοριστικά στην δυνητική ανάπτυξη των οργανισμών.



Η τιμή της παραμέτρου που δίνεται στην προσομοίωση αναφοράς αποδεικνύεται ότι είναι η βέλτιστη τιμή για την προσομοίωση του ρυθμού μεταβολής του πελαγικού βακτηριακού πληθυσμού. Μεταξύ των τριών παραμέτρων που εξετάσαμε σημαντική επίδραση στη βιομάζα των βακτηρίων έχει η αλλαγή του ειδικού συντελεστή ρυθμού αναπνοής ( $p\_srs$ ), μείωση του οποίου οδηγεί σε αύξηση της βακτηριακής βιομάζας κατά 0,65%, ενώ αύξησή του οδηγεί σε μείωση της βιομάζας *B1c* κατά 0,68%.

### 4.3 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΖΩΟΠΛΑΓΚΤΟΥ

Οι καταναλωτές αντιπροσωπεύονται από δύο μεγάλες λειτουργικές ομάδες (Παράγραφος 3.3.3), το μικροζωοπλαγκτόν, το οποίο με τη σειρά του κατηγοριοποιείται σε δύο μικρότερες ομάδες σύμφωνα με τα τροφικά τους επίπεδα και τη διάμετρο τους (στο μικροζωοπλαγκτόν (Z5) με Ισοδύναμη Σφαιρική Διάμετρο, ESD: 20 – 200 μm και στα ετερότροφα μαστιγωτά (Z6) με Ισοδύναμη Σφαιρική Διάμετρο, ESD: 2 – 20 μm) και το μεσοζωοπλαγκτόν (Z4).

Ο ρυθμός μεταβολής των καταναλωτών περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dZ}{dt} = \text{απορρόφηση} - \text{αναπνοή} - \text{θνησιμότητα} - \text{απεκκρίσεις} - \text{θήρευση} \quad (4.8)$$

Για την εκτίμηση της επίδρασης των κυριότερων διεργασιών, δηλαδή της απορρόφησης και της βασικής αναπνοής, στην παραγωγή ζωοπλαγκτονικής βιομάζας (ZIC) συγκρίναμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναφοράς με τα δύο διαφορετικά σενάρια, Α και Β.

Η απορρόφηση (*uptake*) είναι συνάρτηση του μέγιστου ρυθμού παραγωγής (*p\_sum*), του περιοριστικού παράγοντα θερμοκρασίας (*et*) και κατ' επέκταση, όπως και στους πρωτογενείς παραγωγούς, εξαρτάται από τον χαρακτηριστικό συντελεστή για κάθε λειτουργική ομάδα (*p\_q10*). Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10°C σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, του διαθέσιμου ποσοστού τροφής (*efood*) και του σταθερού αποθεματικού (ZIC).

$$\text{uptake} = p\_sum * et * efood * ZIC \quad (4.9)$$

Για τον υπολογισμό του διαθέσιμου ποσοστού τροφής (*efood*) χρησιμοποιείται η εξίσωση των Michaelis – Menten βάσει των συνολικών διαθέσιμων πηγών τροφής (*rumc*) και της παραμέτρου ημικορεσμού (*p\_chuc*) που δίνει τη λήψη τροφής ίση με το ήμισυ της μέγιστης. Για το μικροζωοπλαγκτόν (Z5 και Z6), η παράμετρος *rumc* υπολογίζεται από το διαθέσιμο αποθεματικό και τον παράγοντα προτίμησης σύμφωνα με το τροφικό πλέγμα (Εικόνα 3.3), ενώ περιορίζεται από μία τιμή κατωφλίου (*p\_minfood*) που δεν επιτρέπεται να ξεπεραστεί, προς αποφυγή υπερεκμετάλλευσης των ομάδων των θηραμάτων.

$$efood = \frac{rumc}{rumc + p\_chuc} \quad (4.10)$$

Στην περίπτωση του μεσοζωοπλαγκτού (Z4), η εξίσωση των Michaelis – Menten τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψη την σταθερά όγκου της περιοχής αναζήτησης τροφής (*p\_vum*), τη συνολική διαθέσιμη τροφή (ZIm) και το μέγιστο ρυθμό παραγωγής (*p\_sum*), ενώ δεν υπάρχει παράμετρος τιμής κατωφλίου που περιορίζει τη ZIm.

$$efood = \frac{p\_vum * ZIm}{p\_vum * ZIm + p\_sum} \quad (4.11)$$

Τέλος, η βασική αναπνοή εξαρτάται από τον περιοριστικό παράγοντα θερμοκρασίας και την παράμετρο  $p\_srs$  η οποία δίνει τη χαρακτηριστική αναπνοή για κάθε ομάδα σε συνθήκες ηρεμίας.

$$\overbrace{\text{αναπνοή}}^{BASAL} = et * p\_srs * ZIc \quad (4.12)$$

Τα αποτελέσματα παραγωγής βιομάζας των προσομοιώσεων A και B (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας, ετήσια ελάχιστη τιμή και ετήσια μέγιστη τιμή για τα βάθη 0-150m, παραγωγική ζώνη) καθώς και της προσομοίωσης αναφοράς δίνονται στους Πίνακες 4.6, 4.7 και 4.8 για τα ετερότροφα μαστιγωτά ( $Z6$ ), το μικροζωοπλαγκτόν ( $Z5$ ) και το μεσοζωοπλαγκτόν ( $Z4$ ) αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.6:** Ετερότροφα μαστιγωτά: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου A και προσομοίωσης σεναρίου B για την επίδραση των παραμέτρων  $p\_sum$ ,  $p\_srs$ , και  $p\_q10$  στην παραγωγή βιομάζας των ετερότροφων μαστιγωτών ( $Z6$ ).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο A -30%	Σενάριο B +30%
<b>Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (<math>p\_sum</math>)</b>	Average 5.63 Min 0.23 Max 11.68	Average 6.23 Min 0.21 Max 12.41	Average 5.18 Min 0.235 Max 10.88
<b>Ειδικός συντελεστής ρυθμού αναπνοής (<math>p\_srs</math>)</b>	Average 5.63 Min 0.23 Max 11.68	Average 5.77 Min 0.37 Max 11.76	Average 5.51 Min 0.142 Max 11.6
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (<math>p\_q10</math>)</b>	Average 5.63 Min 0.23 Max 11.68	Average 5.51 Min 0.20 Max 11.39	Average 5.72 Min 0.25 Max 11.87

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον πίνακα 4.6, μείωση της παραμέτρου  $p\_srs$  οδηγεί σε μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για την βασική αναπνοή (Εξίσωση 4.8) και άρα σε αύξηση της παραγωγής ζωοπλαγκτονικής βιομάζας  $Z6c$  κατά 2,4%.

Αντίστοιχα, αύξηση της παραμέτρου  $p\_srs$  οδηγεί σε αύξηση της βασικής αναπνοής και κατά συνέπεια μείωση του ρυθμού μεταβολής των ετερότροφων μαστιγωτών (μείωση της

βιομάζας κατά 2,2%). Κατά τον ίδιο τρόπο, η αύξηση του συντελεστή θερμοκρασίας  $p\_q10$  (κατά 30%) όπως και σε όλες τις λειτουργικές ομάδες (Z4, Z5 και Z6) οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας των οργανισμών (για τα ετερότροφα μαστιγωτά, Z6, η αύξηση είναι της τάξεως του 1,5%). Τέλος μείωση της παραμέτρου  $p\_sum$  (κατά 30%) οδηγεί σε αύξηση της ζωοπλαγκτονικής βιομάζας (10,6%) διότι, όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, αντιστοιχεί στον μέγιστο ρυθμό παραγωγής ο οποίος δεν είναι ανάλογος με τον πραγματικό ρυθμό ανάπτυξης του υπό μελέτη πληθυσμού λόγω της επίδρασης της αναπνοής, της θνησιμότητας, των απεκκρίσεων και της θήρευσης (Εξίσωση 4.8). Ο πραγματικός ρυθμός ανάπτυξης, στην συγκεκριμένη περίπτωση, των ετερότροφων μαστιγωτών, δεν εξαρτάται μόνο από τον μέγιστο ρυθμό παραγωγής και τον παράγοντα θερμοκρασίας, αλλά και από το διαθέσιμο ποσοστό τροφής. Αυτό σημαίνει ότι το διαθέσιμο ποσοστό τροφής είναι καθοριστικός παράγοντας στην αύξηση ή μείωση της βιομάζας του πληθυσμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κατά περίπτωση αύξηση (Σενάριο B) ή μείωση (Σενάριο A) μιας παραμέτρου δεν οδηγεί σε ανάλογες διαφοροποιήσεις στον πληθυσμό των ετερότροφων μαστιγωτών. Για την παραγωγή ζωοπλαγκτονικής βιομάζας (Z6c) σημαντικότερη επίδραση έχει η αλλαγή της τιμής του μέγιστου ρυθμού παραγωγής ( $p\_sum$ ), με μείωση της βιομάζας κατά 8% (Σενάριο B) και αύξηση κατά 10,6% (Σενάριο A). Την μικρότερη επίδραση στην παραγωγή ζωοπλαγκτονικής βιομάζας παρατηρούμε κατά την αλλαγή του συντελεστή θερμοκρασίας ( $p\_q10$ ) με αύξηση 1,5% (Σενάριο B) και μείωση 2,1% (Σενάριο A).

**Πίνακας 4.7:** Μικροζωοπλαγκτόν: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου Α και προσομοίωσης σεναρίου Β για την επίδραση των παραμέτρων  $p_{minfood}$ ,  $p_{chuc}$ , και  $p_{q10}$  στην παραγωγή βιομάζας του μικροζωοπλαγκτού (Z5).

Παράμετρος	Προσομοίωση Αναφοράς	Σενάριο Α -30%	Σενάριο Β +30%
Τιμή κατωφλίου για την απορρόφηση τροφής ( $p_{minfood}$ )	Average 1.86 Min 0.004 Max 9.99	Average 2.26 Min 0.0052 Max 8.93	Average 1.52 Min 0.003 Max 10.87
Παράμετρος ημικορεσμού ( $p_{chuc}$ )	Average 1.86 Min 0.004 Max 9.99	Average 2.39 Min 0.0055 Max 8.71	Average 1.43 Min 0.003 Max 11.01
Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας( $p_{q10}$ )	Average 1.86 Min 0.004 Max 9.99	Average 1.83 Min 0.0038 Max 10.65	Average 1.88 Min 0.0041 Max 9.52

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (Πίνακας 4.7) για την επίδραση των παραμέτρων  $p_{minfood}$ ,  $p_{chuc}$  και  $p_{q10}$  στην βιομάζα των μικροζωοπλαγκτονικών οργανισμών (Z5C) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται με τον αναμενόμενο τρόπο στις αλλαγές αυτές. Συγκεκριμένα, αύξηση της παραμέτρου  $p_{minfood}$ , η οποία δηλώνει την τιμή κατωφλίου κάτω από την οποία το μικροζωοπλαγκτόν δεν μπορεί να τραφεί από μία πηγή τροφής (για παράδειγμα από τα διάτομα) προς αποφυγή υπερεκμετάλλευσης του πληθυσμού-θηράματος, οδηγεί σε μείωση της διαθέσιμης προς το μικροζωοπλαγκτόν τροφής και κατά συνέπεια μείωση της βιομάζας του (-18%). Αντίστοιχα αποτελέσματα παίρνουμε και στην περίπτωση αλλαγής της παραμέτρου  $p_{chuc}$  (-23%), η οποία είναι η παράμετρος ημικορεσμού. Όσο μεγαλύτερη είναι η παράμετρος αυτή τόσο μικρότερο ποσοστό τροφής λαμβάνει ο οργανισμός με αποτέλεσμα τη παραγωγή μικρότερης ποσότητας βιομάζας Z5c. Τέλος στην περίπτωση αύξησης της παραμέτρου σταθεράς όγκου της περιοχής αναζήτησης τροφής ( $p_{vum}$ ) στην ομάδα του μεσοζωοπλαγκτού Z4c (Πίνακας 4.8), παρατηρείται μείωση της βιομάζας τους (-5,3%). Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η λήψη τροφής από το μεσοζωοπλαγκτόν δεν εξαρτάται μόνο από τον όγκο μέσα στον οποίο θηρεύει αλλά και από τη διαθέσιμη τροφή μέσα στον όγκο αυτό. Η διαθέσιμη αυτή, ποσότητα τροφής, είναι η οποία τελικά καθορίζει την τελική πραγματική λήψη τροφής και κατ' επέκταση αύξηση ή μείωση του μεσοζωοπλαγκτονικού πληθυσμού.

**Πίνακας 4.8:** Μεσοζωοπλαγκτόν: Αποτελέσματα (ετήσια μέση παραγωγή βιομάζας (average), ελάχιστη τιμή (min), μέγιστη τιμή (max) για βάθη 0-150m) προσομοίωσης αναφοράς, προσομοίωσης σεναρίου A και προσομοίωσης σεναρίου B για την επίδραση των παραμέτρων  $p_{vum}$  και  $p_{q10}$  στην παραγωγή βιομάζας του μεσοζωοπλαγκτού (Z4).

<b>Παράμετρος</b>	<b>Προσομοίωση Αναφοράς</b>	<b>Σενάριο A</b>	<b>Σενάριο B</b>
	<b><math>p_{vum} = 0.016</math></b>	<b>-30%</b>	<b>+30%</b>
<b>Σταθερά όγκου της περιοχής αναζήτησης τροφής (<math>p_{vum}</math>)</b>	Average 1.71 Min 0.02 Max 5.16	Average 1.73 Min 0.02 Max 4.98	Average 1.62 Min 0.02 Max 5.12
	<b><math>p_{q10} = 2.0</math></b>		
<b>Ειδικός συντελεστής θερμοκρασίας (<math>p_{q10}</math>)</b>	Average 1.71 Min 0.02 Max 5.16	Average 1.63 Min 0.02 Max 5.04	Average 1.77 Min 0.03 Max 5.23

#### 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για να μελετήσουμε την επίδραση αλλαγής διαφόρων παραμέτρων στη βιομάζα των πελαγικών οργανισμών (φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν και βακτήρια), εκτελέσαμε μία προσομοίωση “αναφοράς” με τιμές παραμέτρων οι οποίες προσομοιώνουν με τον βέλτιστο τρόπο το υπό μελέτη θαλάσσιο οικοσύστημα και την συγκρίναμε με δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο (Σενάριο A) μειώσαμε την τιμή κάθε υπό μελέτη παραμέτρου κατά 30%, ενώ στο δεύτερο αυξήσαμε την τιμή της κατά 30%. Από αυτές τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματά τους που παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πληθυσμός κάθε λειτουργικής ομάδας είναι εξαρτημένος, σε διαφορετικό ποσοστό, από μία σειρά παραμέτρων οι οποίες συνδέουν τις λειτουργικές διεργασίες των οργανισμών αυτών με ρυθμιστικούς περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες.

Η επίδραση των αλλαγών των υπό μελέτη παραμέτρων είναι διαφορετική για κάθε λειτουργική ομάδα τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Εξετάζοντας τις αλλαγές που επιφέρει η μείωση (Σενάριο A) ή/και η αύξηση (Σενάριο B) της τιμής του μέγιστου ρυθμού παραγωγής ( $p\_sum$ ), παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη επίδραση (ως απόλυτη ποσοστιαία τιμή) παρουσιάζεται στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα και είναι ίση με -11,7% (Σενάριο A), ακολουθεί στη ζωοπλαγκτονική βιομάζα (ετερότροφα μαστιγωτά) με ποσοστό επίδρασης +10,6% (Σενάριο A) και τέλος στη βακτηριακή βιομάζα στην οποία η επίδρασή της  $p\_sum$  είναι σχεδόν μηδενική.

Όσον αφορά την επίδραση των αλλαγών του ειδικού συντελεστή ρυθμού αναπνοής ( $p\_srs$ ), συμπεραίνουμε ότι η μεγαλύτερη επίδραση (ως απόλυτη ποσοστιαία τιμή) παρουσιάζεται στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα με ποσοστό επίδρασης +4,2% (Σενάριο B), ακολουθεί η επίδραση στη ζωοπλαγκτονική βιομάζα όπου το ποσοστό επίδραση είναι ίσο με +2,4% και τέλος στη βακτηριακή βιομάζα με αμελητέο ποσοστό επίδρασης.

Ανάλογη επίδραση, ως προς τη σειρά ευαισθησίας, έχουν και οι αλλαγές του συντελεστή που σχετίζεται με τη θερμοκρασία ( $p\_q10$ ) οι οποίες επιφέρουν μείωση της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε ποσοστό -11% (Σενάριο A), ακολουθεί η επίδραση στη ζωοπλαγκτονική βιομάζα με ποσοστό μείωσης -2,1% (Σενάριο A), ενώ ακόμη μικρότερη επίδραση έχει στη βιομάζα των πελαγικών βακτηρίων με ποσοστά -0,2% (Σενάριο A).

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις μπορούμε επίσης να συμπεράνουμε ότι η φυτοπλαγκτονική βιομάζα και συγκεκριμένα η βιομάζα των διατόμων παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία με ποσοστό +98,3% (το οποίο βέβαια αντικατοπτρίζεται στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα) στις υπό μελέτη αλλαγές των παραμέτρων και πιο ειδικά στην αλλαγή του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης. Το ζωοπλαγκτόν παρουσιάζεται λιγότερο ευαίσθητο καθόσον η βιομάζα του μεταβάλλεται το πολύ κατά +10,6% για -30% μεταβολή του μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης. Τέλος έπονται τα βακτήρια, με μεταβολές της τάξεως του +0,65% και -0,67% στην περίπτωση αλλαγής του ειδικού συντελεστή αναπνοής (στο Σενάριο Α και Σενάριο Β αντίστοιχα).

Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι η αύξηση ή η μείωση της βιομάζας των πελαγικών οργανισμών (*P1*, *P2*, *P3*, *B1*, *Z6*, *Z5* και *Z4*) δεν είναι αποτέλεσμα αλλαγής μίας και μόνο παραμέτρου που συνδέεται με κάποια συγκεκριμένη βιολογική διεργασία, αλλά συνδυασμός πληθώρας παραμέτρων που εμπλέκονται με καθοριστικό τρόπο σε όλες τις βιολογικές διεργασίες των οργανισμών, δηλαδή λήψη τροφής, αναπνοή, θνησιμότητα, απεκκρίσεις και θήρευση.

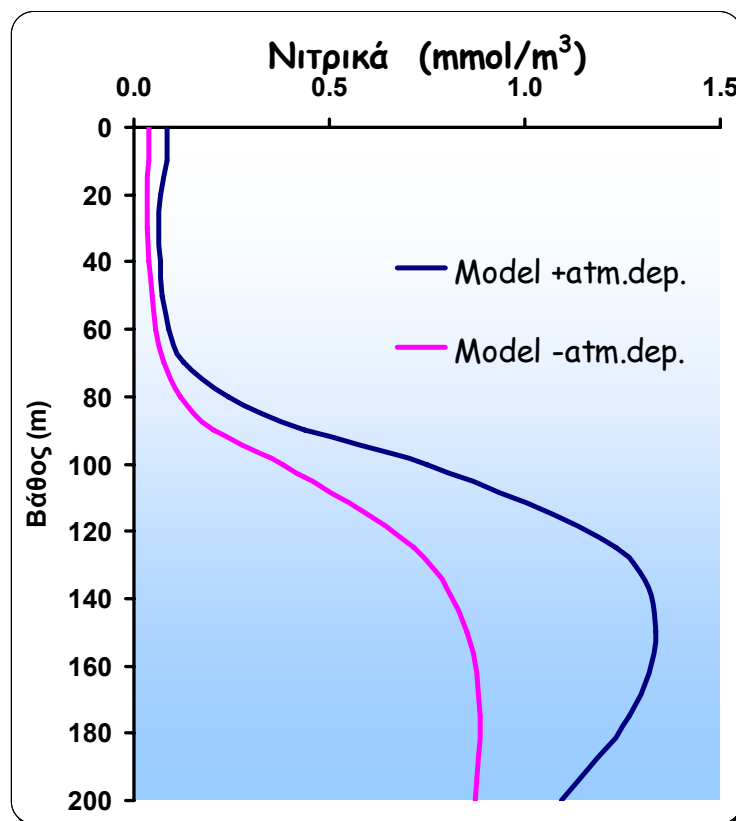


## **5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΚΡΗΤΙΚΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ**

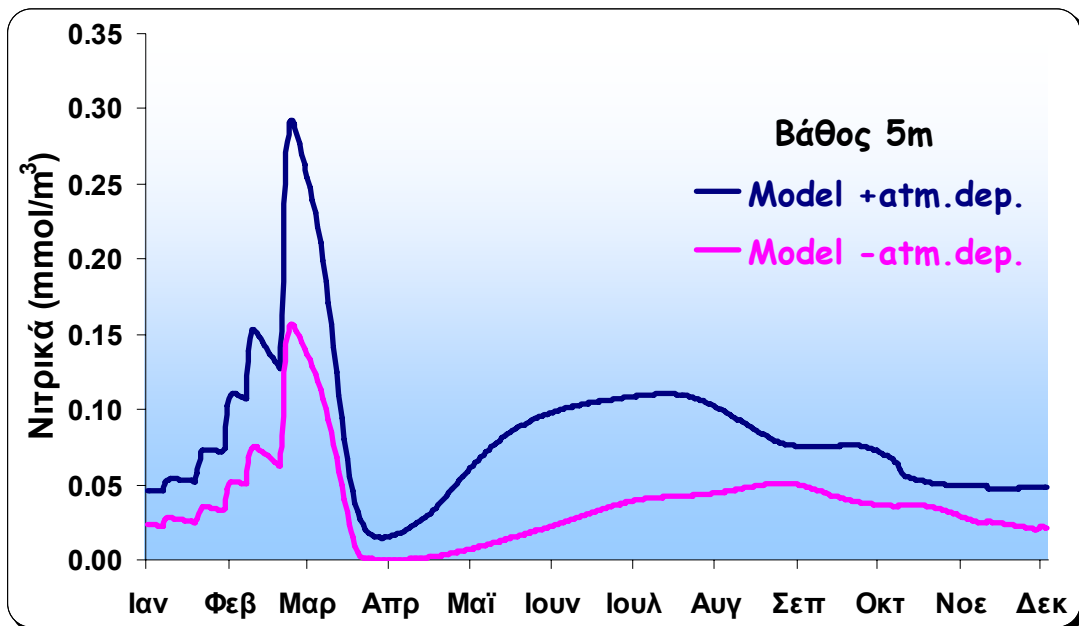
Για να μελετήσουμε την συνεισφορά της ατμόσφαιρας ως πηγή εμπλουτισμού του θαλάσσιου οικοσυστήματος του Κρητικού Πελάγους σε θρεπτικά συστατικά και κατ' επέκταση τον ρόλο που διαδραματίζει η ατμόσφαιρα στη πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα, πραγματοποιήσαμε δύο διαφορετικές προσομοιώσεις με τη βοήθεια του 1-διάστατου θαλάσσιου φυσικο – βιογεωχημικού μοντέλου. Κατά την πρώτη προσομοίωση (Model +atm.dep.), εισάγονται στο μοντέλο ως δεδομένα εισόδου η συνολική εναπόθεση (ξηρή και υγρή μαζί) των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), των αμμωνιακών ( $\text{NH}_4^+$ ) και των φωσφορικών ιόντων ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Κατά τη δεύτερη προσομοίωση (Model -atm.dep.), δεν λαμβάνουμε υπόψη την εισαγωγή θρεπτικών μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης και προσομοιώνουμε το οικοσύστημα θεωρώντας ότι δεν έχει καμία εξωτερική πηγή θρεπτικών. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών προσομοιώσεων για τη συγκέντρωση νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών ιόντων στη θαλάσσια στήλη νερού, καθώς επίσης η μεταβολή της πρωτογενούς παραγωγικότητας και η συγκέντρωση της χλωροφύλλης –α ως προς το χρόνο και το βάθος της στήλης, παρουσιάζονται και συγκρίνονται στις επόμενες παραγράφους. Επιπλέον, στο παράρτημα δίνονται οι χρονικές και χωρικές μεταβολές του φυτοπλαγκτού, του ζωοπλαγκτού των βακτηρίων και της χλωροφύλλης-α για τις δύο αυτές προσομοιώσεις.

## 5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων όσον αφορά την μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων ως προς το βάθος της θαλάσσιας στήλης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1, παρατηρούμε μία συνολική αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων (0-200m), ίση με 53%, όταν λαμβάνεται υπόψη η ατμοσφαιρική εναπόθεση. Το εύρος των μέσων ετήσιων τιμών συγκέντρωσης νιτρικών στην θαλάσσια κολώνα, όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση, κυμαίνεται από 0,063 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 30m) έως 1,334 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 150m), ενώ όταν θεωρούμε το σύστημα κλειστό από 0,035 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 20m) έως 0,884 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 175m). Η αύξηση των συγκεντρώσεων παρατηρείται τόσο στα επιφανειακά ύδατα (Εικόνα 5.2) όσο και στις βαθύτερες υδάτινες μάζες (Εικόνα 5.3).

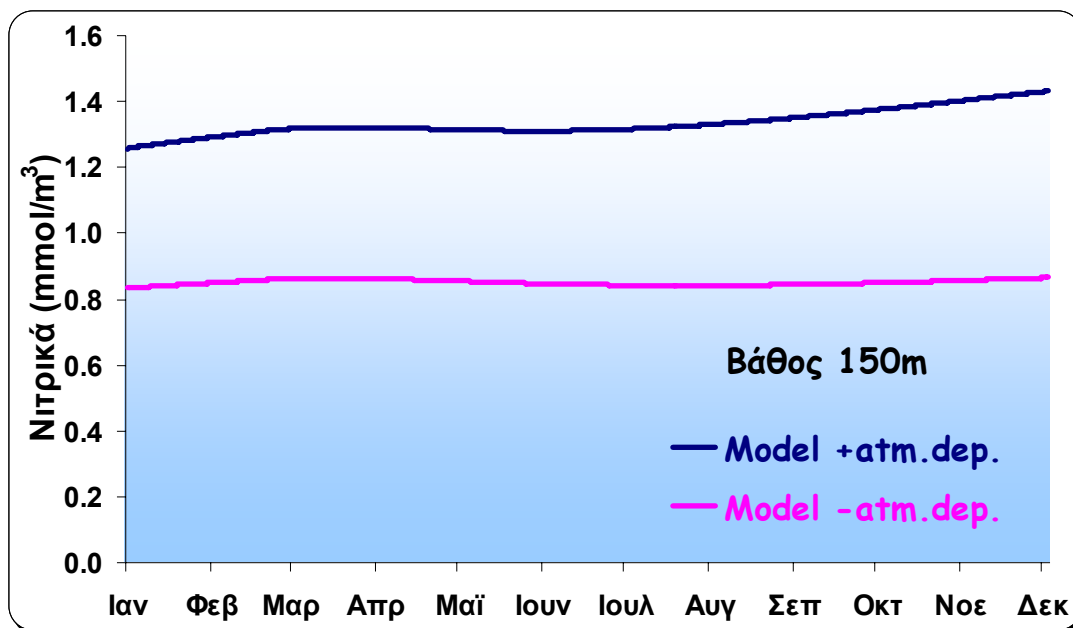


**Εικόνα 5.1:** Μέση ετήσια χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) σε mmol/m<sup>3</sup> για τα βάθη 0-200m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).



**Εικόνα 5.2:** Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 5m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

Στην επιφάνεια της θαλάσσιας στήλης παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων είναι της τάξεως του 130%. Η μέγιστη τιμή των νιτρικών εμφανίζεται και στις δύο προσομοιώσεις κατά το μήνα Μάρτιο. Τον μήνα αυτό παρουσιάζεται η φυτοπλαγκτονική άνθηση με συνέπεια την αύξηση της συνολικής παραγωγικότητας (βακτηριακή και ζωοπλαγκτονική παραγωγή) και άρα της ποσότητας των νιτρικών, που απελευθερώνονται στο περιβάλλον μέσω της αποσύνθεσης οργανικής ύλης από τα βακτήρια και των απεκκρίσεων από τους οργανισμούς στη θαλάσσια στήλη. Μία ακόμη περίοδος που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι από τον μήνα Μάιο έως και τον Αύγουστο, όπου παρουσιάζεται αύξηση των επιπέδων των νιτρικών, η οποία είναι ιδιαίτερα μεγάλη στην περίπτωση που λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική συνεισφορά θρεπτικών στο οικοσύστημα. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη καθόσον την περίοδο αυτή η ξηρή εναπόθεση νιτρικών είναι ιδιαίτερα υψηλή (Παράγραφος 2.2.2).

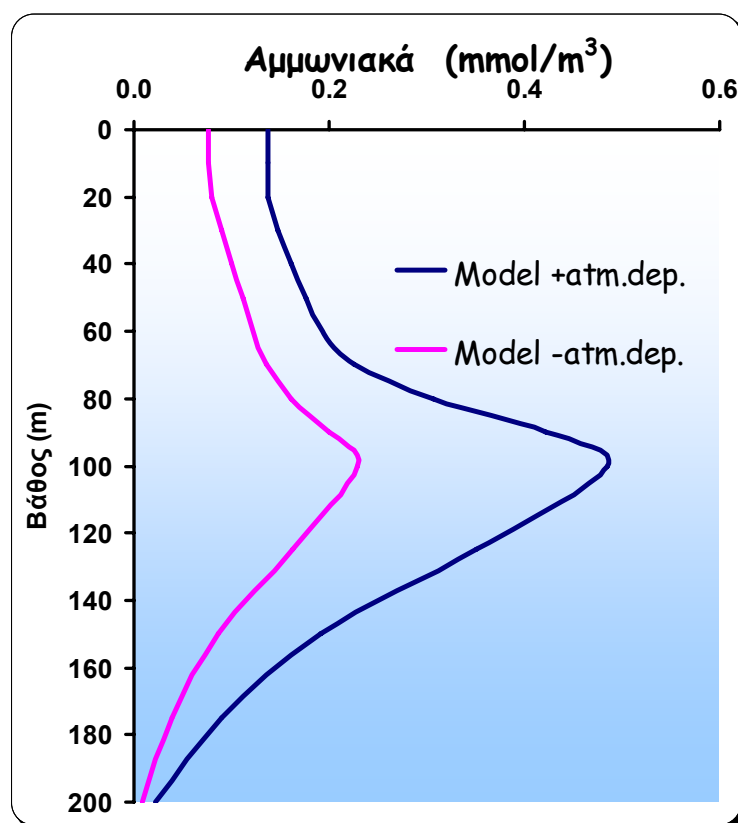


**Εικόνα 5.3:** Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 150m για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model atm.dep.).

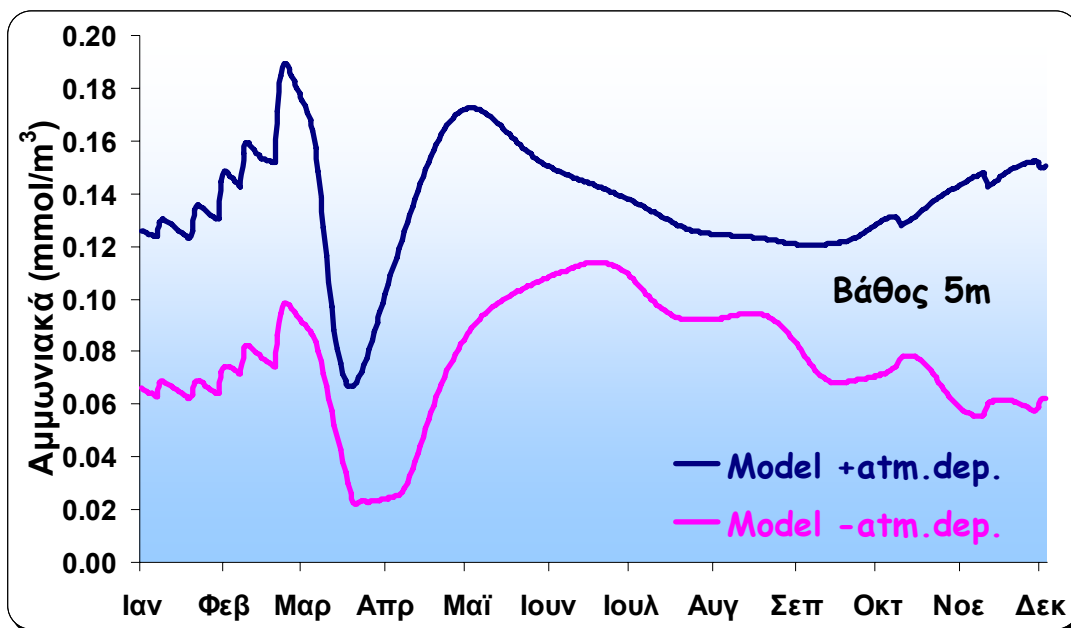
Αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών παρατηρούμε και σε βάθος 150m (όπου εμφανίζεται το μέγιστο της συγκέντρωσης τους) κι ιδιαίτερα στην προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική πηγή αζώτου (αύξηση ίση με 176%). Στο βάθος αυτό παρατηρείται μία σχεδόν σταθερή συγκέντρωση νιτρικών, <1% για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρική εναπόθεση και <3% όταν λαμβάνεται υπόψη η ατμοσφαιρική εναπόθεση. Τονίζουμε ότι η πρωτογενής παραγωγή περιορίζεται στην ευφωτική ζώνη που φθάνει το πολύ τα 120m βάθος. Η ευφωτική ζώνη μέσω μεταφοράς τροφοδοτεί τα κατώτερα στρώματα με θρεπτικά συστατικά αλλά και οργανισμούς που μέσω βιολογικών διεργασιών παράγουν (ανακυκλώνουν) θρεπτικά. Αυτή η διεργασία μεταφοράς και ανακύκλωσης των θρεπτικών συμβαίνει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, όπως άλλωστε φαίνεται από τη σχετική σταθερότητα των συγκεντρώσεων των  $\text{NO}_3^-$  στα 150m.

## 5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΜΜΩΝΙΑΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων όσον αφορά την μέση ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων ως προς το βάθος της θαλάσσιας στήλης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.4, παρατηρούμε μία συνολική αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών στη θαλάσσια στήλη νερού (0-200m), η οποία είναι ίση με 96,5%. Το εύρος των μέσων ετήσιων τιμών συγκέντρωσης θρεπτικών στην θαλάσσια κολώνα, όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση κυμαίνεται από 0,022 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 200m) έως 0,485 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 100m), ενώ όταν θεωρούμε το σύστημα κλειστό από 0,009 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 200m) έως 0,229 mmol/m<sup>3</sup> (σε βάθος 100m). Η αύξηση των συγκεντρώσεων παρατηρείται τόσο στα επιφανειακά ύδατα (Εικόνα 5.5) όσο και στις βαθύτερες υδάτινες μάζες (Εικόνα 5.6).

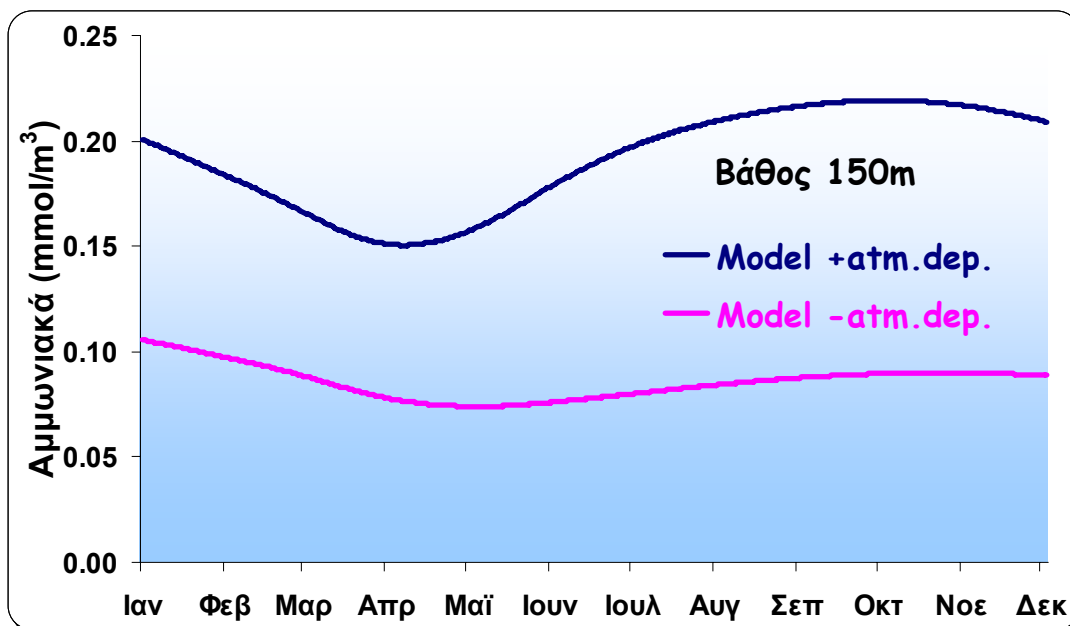


**Εικόνα 5.4:** Μέση ετήσια χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) σε mmol/m<sup>3</sup> για τα βάθη 0-200m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).



**Εικόνα 5.5:** Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 5m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

Στην επιφάνεια της θαλάσσιας στήλης παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια αύξηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων είναι της τάξεως του 77%. Η μέγιστη τιμή των αμμωνιακών εμφανίζεται και στις δύο προσομοιώσεις νωρίτερα από ότι εμφανίζεται η μέγιστη τιμή των νιτρικών ιόντων στη θαλάσσια στήλη λόγω της μετατροπής των αμμωνιακών σε νιτρικά. Η διεργασία αυτή της νιτροποίησης εμπλέκει τα βακτήρια που λαμβάνουν  $\text{NH}_4^+$  κι απεκκρίνουν  $\text{NO}_3^-$ . Στο κλειστό σύστημα, το ελάχιστο της συγκέντρωσης των αμμωνιακών παρατηρείται κατά τον μήνα Απρίλιο όπου έχουμε τη φυτοπαγκτονική άνθηση με συνέπεια την μείωση τους. Στο ανοικτό σύστημα η ατμοσφαιρική εναπόθεση έχει ως αποτέλεσμα τη γρηγορότερη ανάκαμψη των  $\text{NH}_4^+$  κατά την άνοιξη και τους χειμερινούς μήνες που δεν παρατηρείται στις προσομοιώσεις χωρίς ατμοσφαιρική εναπόθεση.

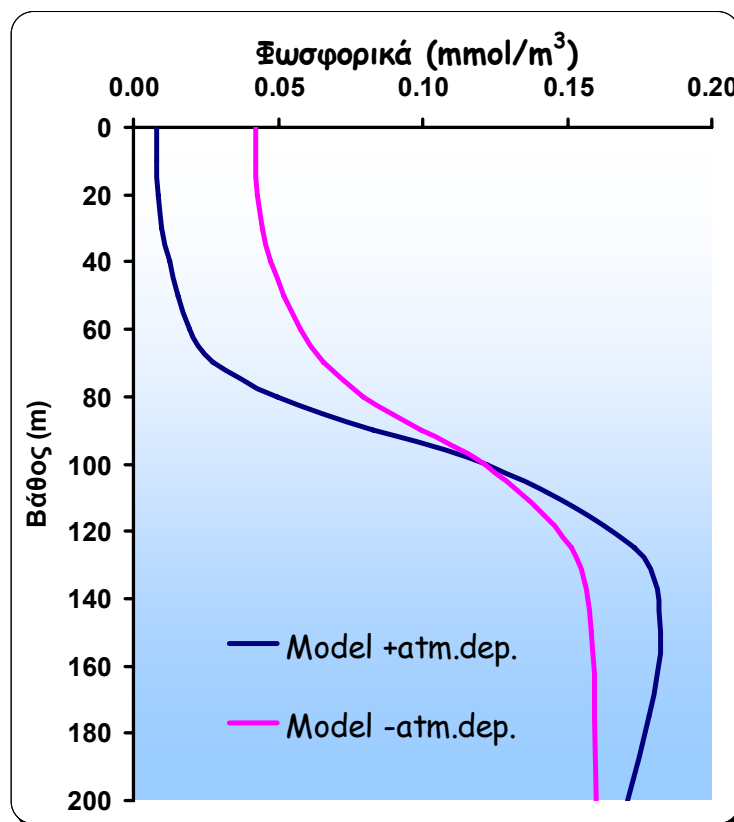


Εικόνα 5.6: Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 150m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

Το μέγιστο της συγκέντρωσης των  $\text{NH}_4^+$  υπολογίζεται στα 100m. Αυξημένη παρόλα αυτά, σχετικά με την επιφάνεια, συγκέντρωση αμμωνιακών παρατηρούμε και σε βάθος 150m κι ιδιαίτερα στην προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική πηγή αζώτου (αύξηση ίση με 123%). Στο βάθος αυτό παρατηρείται μία σχεδόν σταθερή συγκέντρωση αμμωνιακών αν δεν ληφθεί υπόψη η ατμοσφαιρική εναπόθεση. Όταν η εισροή φωσφόρου από την ατμόσφαιρα λαμβάνεται υπόψη, τα  $\text{NH}_4^+$  στα 150m παρουσιάζουν μεγαλύτερη εποχική διακύμανση, με χαμηλότερες συγκεντρώσεις τον Απρίλιο λόγω δέσμευσης από τα βακτήρια και ψηλότερες τον Αύγουστο έως το Νοέμβριο πιθανόν λόγω των ζωπλαγκτονικών απεκκρίσεων.

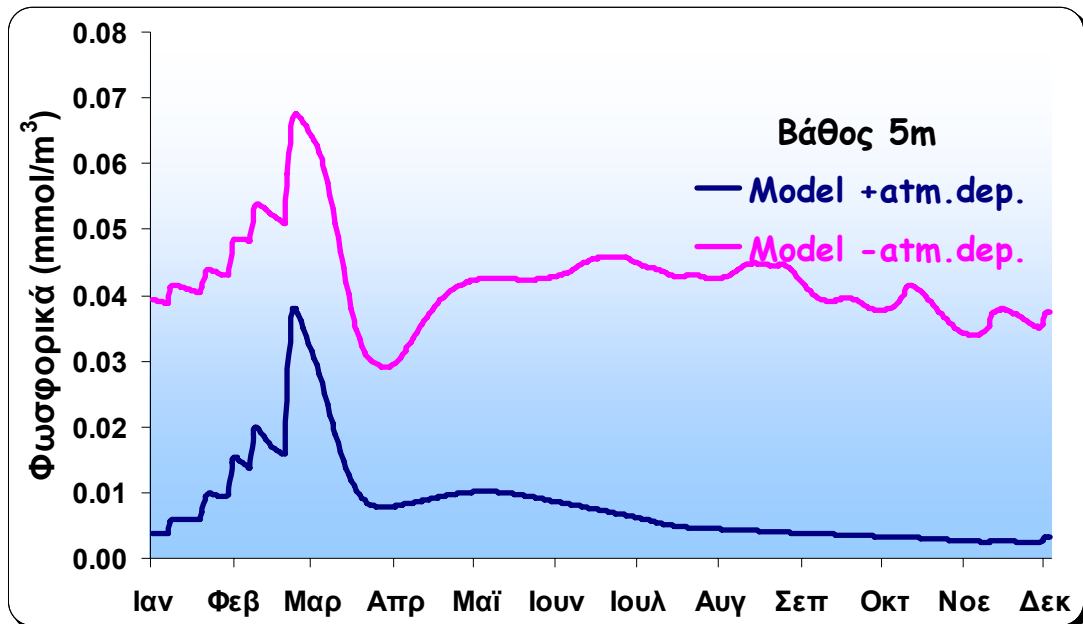
### 5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων όσον αφορά την μέση ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων ως προς το βάθος της θαλάσσιας στήλης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.7, παρατηρούμε (σε αντίθεση με τα νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα) μία συνολική μείωση της συγκέντρωσης των φωσφορικών στη θαλάσσια στήλη νερού (0-200m), η οποία είναι της τάξεως του 5%. Αυτή οφείλεται σε μείωση των  $\text{PO}_4^-$  στα πρώτα 100m βάθος όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση και σε αύξηση τους μεταξύ 100 και 200m. Το εύρος των μέσων ετήσιων τιμών συγκέντρωσης θρεπτικών στην θαλάσσια κολώνα, όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση κυμαίνεται από  $0,008 \text{ mmol/m}^3$  (σε βάθος 10m) έως  $0,182 \text{ mmol/m}^3$  (σε βάθος 150m), ενώ όταν θεωρούμε το σύστημα κλειστό από  $0,042 \text{ mmol/m}^3$  (σε βάθος 5m) έως  $0,160 \text{ mmol/m}^3$  (σε βάθος 200m). Η μείωση αυτή των συγκεντρώσεων παρατηρείται μετά τα 100m (Εικόνα 5.7) και οφείλεται στην αύξηση του βακτηριακού πληθυσμού και στην γρήγορη δέσμευση των φωσφορικών ιόντων από αυτά.



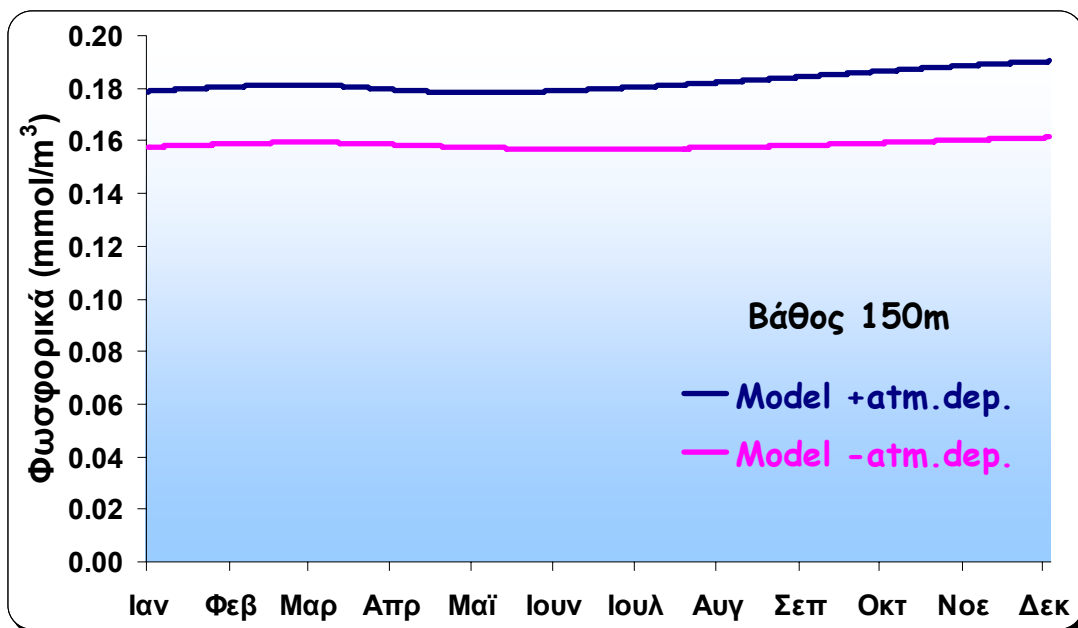
**Εικόνα 5.7:** Μέση ετήσια χωρική μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων ( $\text{PO}_4^-$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  για τα βάθη 0-200m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).





**Εικόνα 5.8:** Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 5m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

Στην επιφάνεια της θαλάσσιας στήλης παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια μείωση της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων είναι της τάξεως του 400%, το οποίο είναι αναμενόμενο σε ένα οικοσύστημα όπου ο κύριος περιοριστικός παράγοντας ανάπτυξης είναι η έλλειψη φωσφόρου. Η μέγιστη τιμή των φωσφορικών παρατηρείται κατά τον μήνα Μάρτιο όπου έχουμε και τη φυτοπλαγκτονική άνθηση με συνέπεια την απότομη μείωση τους τον μήνα Απρίλιο. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις φωσφορικών ιόντων στην προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος όταν λαμβάνουμε υπόψη τις εισροές από την ατμόσφαιρα οφείλονται στο γεγονός ότι το σύστημα μας είναι φτωχό σε φώσφορο το οποίο σημαίνει ότι όταν εισάγεται φώσφορος στο σύστημα (μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης) απορροφάται απευθείας από τους οργανισμούς και μετατρέπεται σε βιομάζα.

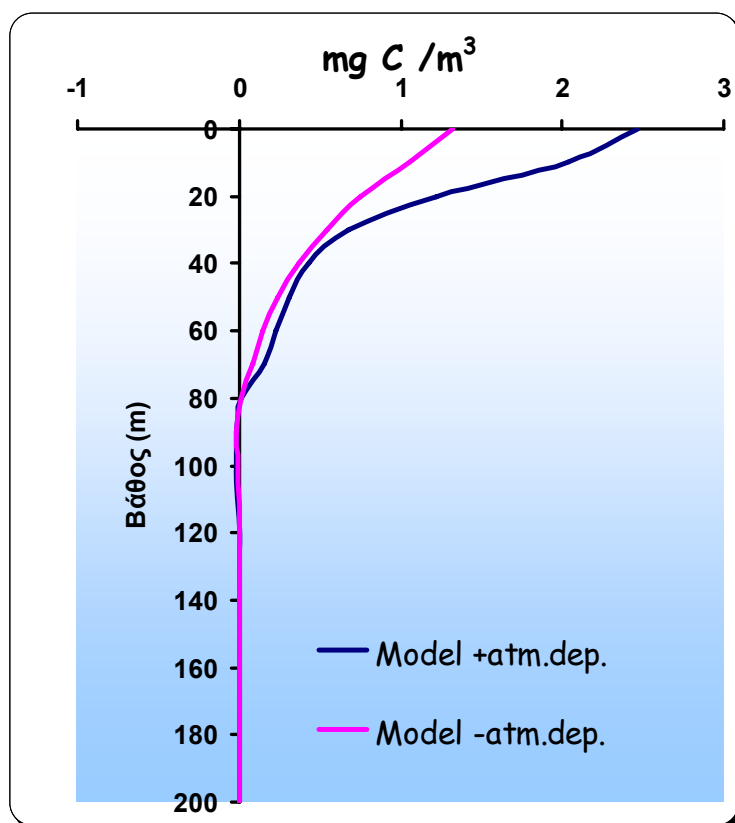


**Εικόνα 5.9:** Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) σε  $\text{mmol/m}^3$  και σε βάθος 150m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

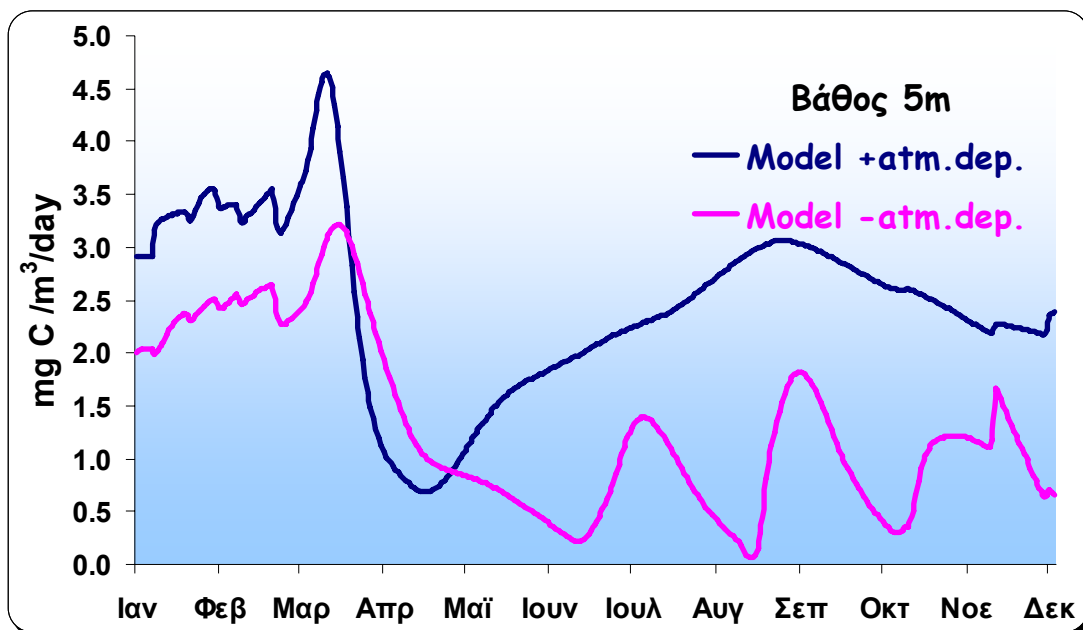
Στα 150m βάθος η συγκέντρωση των  $\text{PO}_4^{-3}$  είναι 2,5 έως 15 φορές μεγαλύτερη από αυτή στην επιφάνεια. Επίσης, σε βάθος 150m, αντίθετα με τα επιφανειακά ύδατα, η συγκέντρωση των φωσφορικών ιόντων εμφανίζεται αυξημένη στην προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική πηγή φωσφόρου (αύξηση ίση με 13%). Η αύξηση αυτή τεκμηριώνει την εξήγηση που δίνουμε για το αντίθετο φαινόμενο που παρατηρείται στα επιφανειακά ύδατα. Η επιπλέον συγκέντρωση φωσφορικών που εισάγεται στο μοντέλο λόγω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, οδηγεί σε αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας του συστήματος. Η αύξηση της παραγωγικότητας με τη σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την σύνθεση νέας βιομάζας, αύξησης των απεκκρίσεων και γενικά αύξηση της συγκέντρωσης των φωσφορικών ιόντων που περνάνε από τις επιφανειακές στις βαθύτερες υδάτινες μάζες. Επίσης στο βάθος αυτό, παρατηρείται μία σχεδόν σταθερή συγκέντρωση φωσφορικών η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει πρωτογενής παραγωγή αλλά μόνο μεταφορά ύλης.

#### 5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων όσον αφορά την μέση ετήσια μεταβολή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας ως προς το βάθος της θαλάσσιας στήλης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.10, παρατηρούμε μία συνολική αύξηση της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας στη θαλάσσια στήλη νερού (0-80m), η οποία είναι της τάξεως του 59%. Το εύρος των μέσων ετήσιων τιμών καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας στην θαλάσσια κολώνα, όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση κυμαίνεται από 0,01 mgC/m<sup>3</sup>/day (σε βάθος 80m) έως 2,5 mgC/m<sup>3</sup>/day (σε βάθος 5m), ενώ όταν θεωρούμε το σύστημα κλειστό από 0,016 mgC/m<sup>3</sup>/day (σε βάθος 80m) έως 1,32 mgC/m<sup>3</sup>/day (σε βάθος 5m).

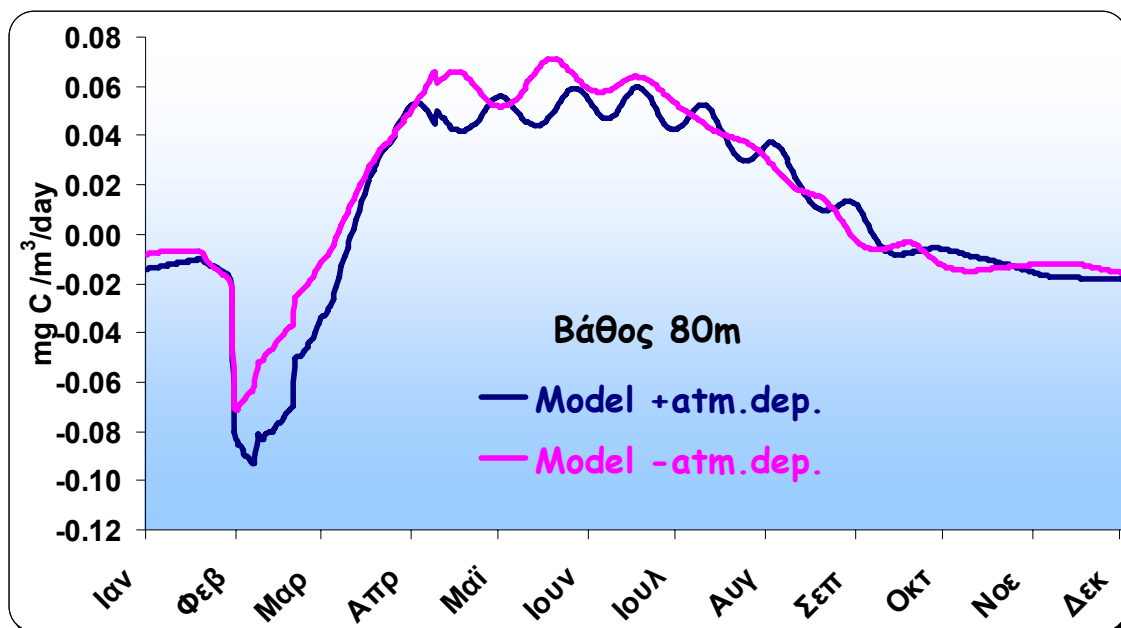


**Εικόνα 5.10:** Μέση ετήσια χωρική μεταβολή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε mgC/m<sup>3</sup> για τα βάθη 0-200m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).



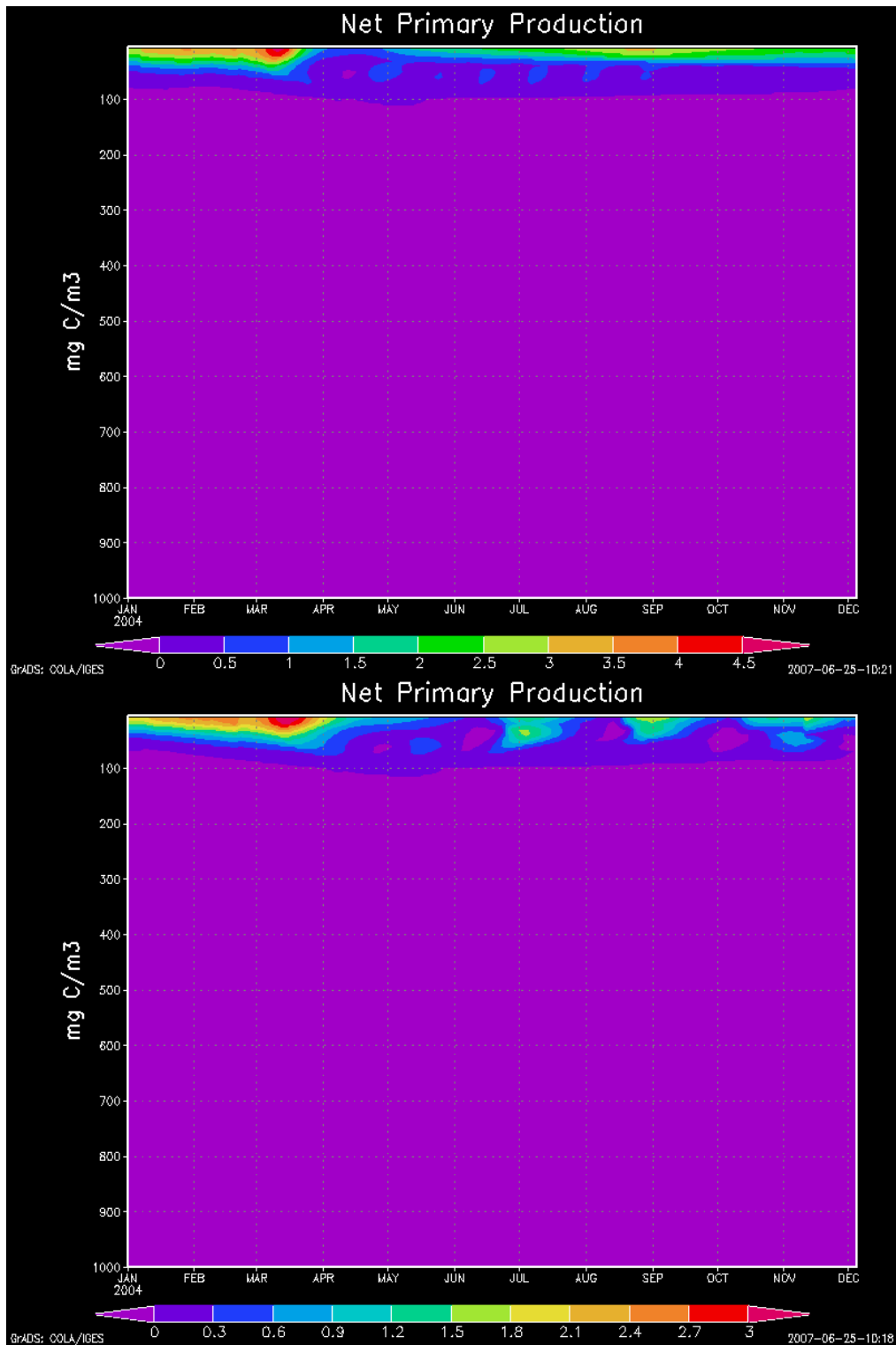
**Εικόνα 5.11:** Χρονική μεταβολή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε  $\text{mgC}/\text{m}^3$  και σε βάθος 5m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

Στην επιφάνεια της θαλάσσιας στήλης (Εικόνα 5.11) παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια αύξηση της τάξεως του 46,6%. Η μέγιστη τιμή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας παρατηρείται τον Μάρτιο για τα επιφανειακά νερά το οποίο οφείλεται στην κατακόρυφη ανάμειξη των υδάτινων μαζών. Η άνοδος βαθιών νερών πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας ευνοούν την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος δίνοντας το μέγιστο της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας τον Μάρτιο. Απουσία ατμοσφαιρικών εναποθέσεων, η πρωτογενής παραγωγικότητα περιορίζεται έντονα από την παρουσία θρεπτικών και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της κατά την καλοκαιρινή και φθινοπωρινή (Ιούνιος-Δεκέμβριος). Αυτός ο περιορισμός εξαλείφεται με την εισροή θρεπτικών από την ατμόσφαιρα.



**Εικόνα 5.12:** Χρονική μεταβολή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε  $\text{mgC}/\text{m}^3$  και σε βάθος 80m για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep.).

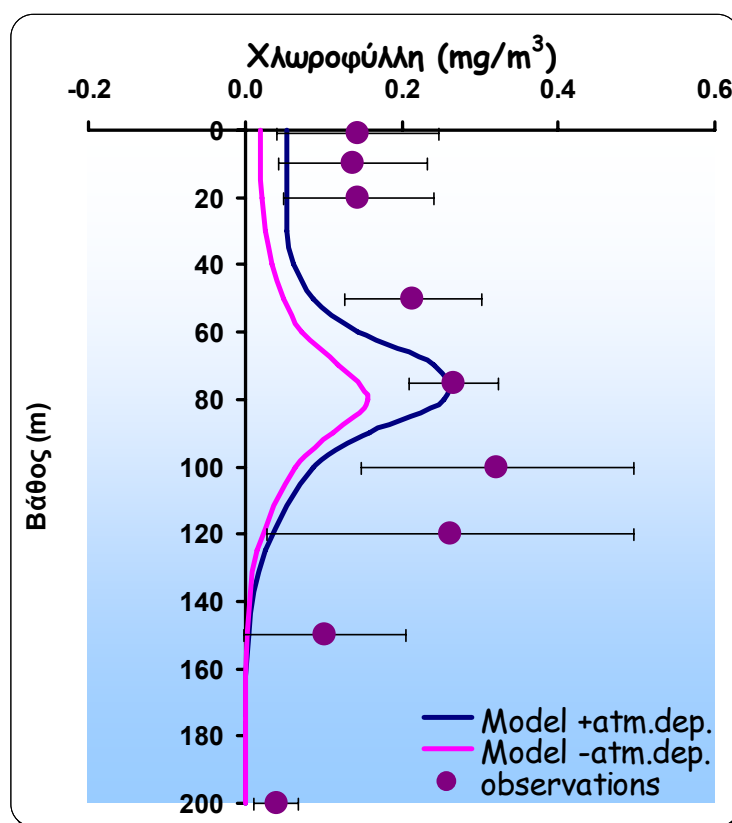
Λόγω της μεταφοράς θρεπτικών από τα βαθιά προς τα επιφανειακά νερά, έλλειμμα στα 80m κατά τους μήνες Φεβρουάριο έως Μάρτιο. Κατά συνέπεια η καθαρή πρωτογενής παραγωγικότητα στα 80m εμφανίζεται μειωμένη στην προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική πηγή θρεπτικών (μείωση ίση με 61%).



**Εικόνα 5.13:** Χρονική και χωρική μεταβολή της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας σε  $\text{mgC/m}^3$  στη θαλάσσια στήλη, για την προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model +atm.dep., επάνω) και για την προσομοίωση όπου δεν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση (Model -atm.dep., κάτω).

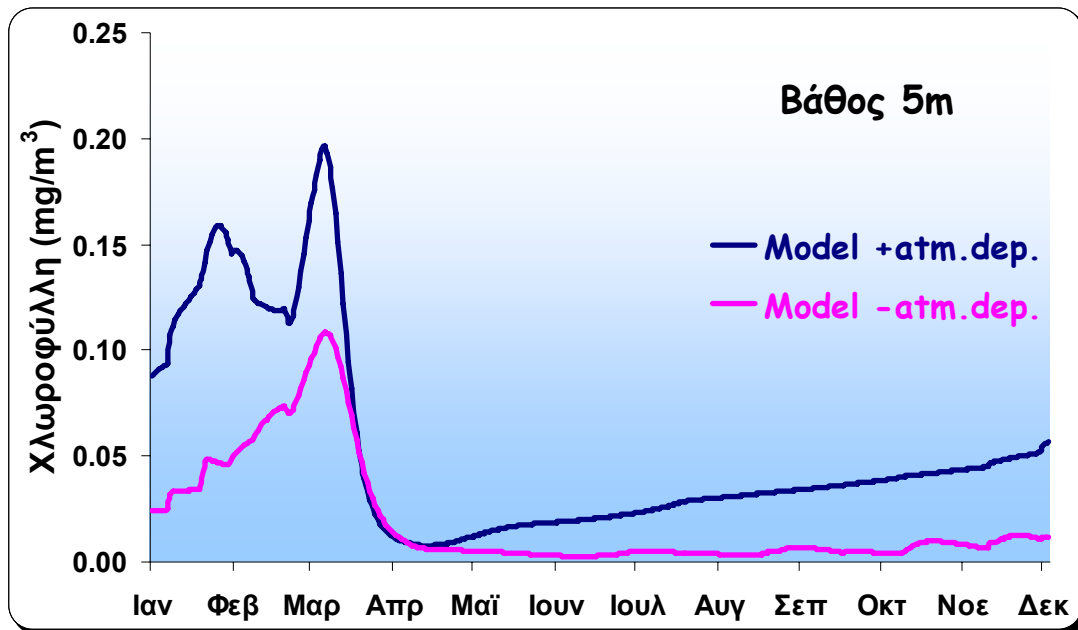
## 5.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ (chl-a) ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΗΛΗ

Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου, για να μελετήσουμε την επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου (χωρικά και χρονικά), στη μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στο θαλάσσιο οικοσύστημα του Κρητικού Πελάγους, εκτελούμε δύο προσομοιώσεις. Κατά την πρώτη προσομοίωση (Model +atm.dep.) εισάγουμε στο μονοδιάστατο θαλάσσιο φυσικο-βιογεωχημικό μοντέλο τη ροή νιτρικών, αμμωνιακών και φωσφορικών ιόντων (με ημερήσιο βήμα χρόνου), ενώ στη δεύτερη προσομοίωση (Model -atm.dep.), θεωρούμε ότι το θαλάσσιο οικοσύστημα είναι κλειστό στις εξωτερικές πηγές. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών προσομοιώσεων όσον αφορά την μέση ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης καθώς επίσης και τα μέσα ετήσια δεδομένα χλωροφύλλης ως προς το βάθος της θαλάσσιας στήλης όπως αυτά καταγράφησαν στον ωκεανογραφικό σταθμό Μ3Α, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.14.



**Εικόνα 5.14:** Χρονική μεταβολή της χλωροφύλλης-α σε mg/m<sup>3</sup> για τα βάθη 0-200m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.) και σύγκρισή της με τα μέσα ετήσια δεδομένα χλωροφύλλης όπως αυτά καταγράφηκαν από τον ωκεανογραφικό σταθμό Μ3Α.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο γράφημα 5.14, παρατηρούμε μία συνολική αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στη θαλάσσια στήλη νερού (0-80m), λόγω της επίδρασης της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης θρεπτικών, η οποία είναι της τάξεως του 77% με αποτέλεσμα οι προσομοιωμένες τιμές της χλωροφύλλης να είναι πλησιέστερες στις θαλάσσιες μετρήσεις του σταθμού Μ3Α. Το εύρος των μέσων ετήσιων τιμών συγκέντρωσης χλωροφύλλης-α στην θαλάσσια κολώνα, όταν λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική εναπόθεση κυμαίνεται από 0,052 mg/m<sup>3</sup> (σε βάθος 30m) έως 0,253 mg/m<sup>3</sup> (σε βάθος 80m), ενώ όταν θεωρούμε το σύστημα κλειστό από 0,019 mg/m<sup>3</sup> (σε βάθος 5m) έως 0,158 mg/m<sup>3</sup> (σε βάθος 80m). Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγιστο της χλωροφύλλης υπολογίζεται από το μοντέλο στα 80m ενώ οι μετρήσεις το εμφανίζουν στα 100m.

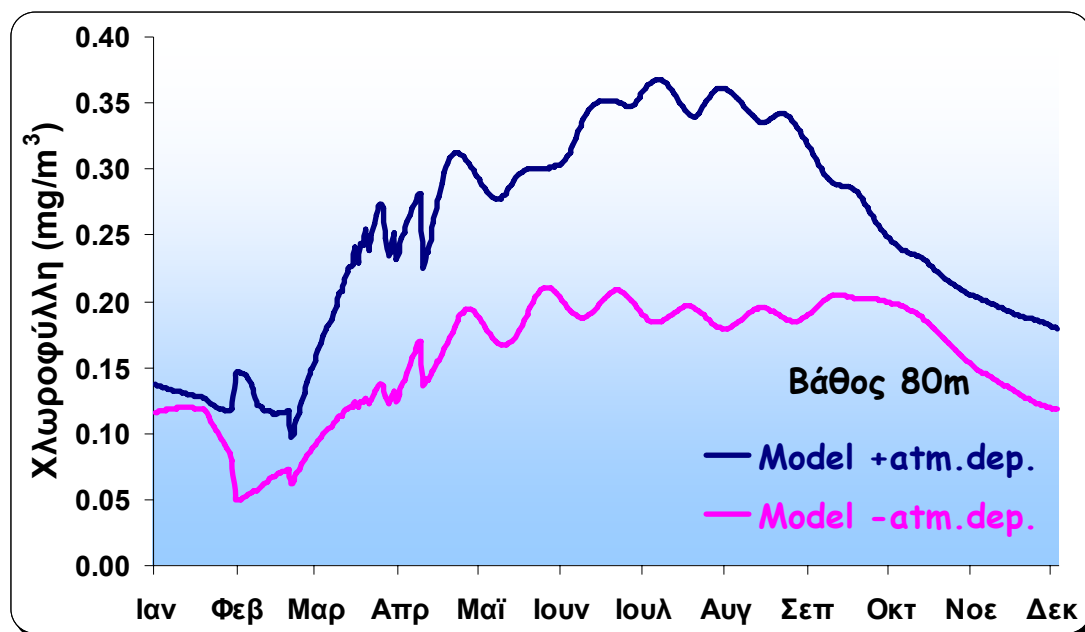


**Εικόνα 5.15:** Χρονική μεταβολή της χλωροφύλλης-α σε mg/m<sup>3</sup> για το βάθος των 5m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).

Στην επιφάνεια της θαλάσσιας στήλης (Εικόνα 5.15) παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια αύξηση της τάξεως του 63%. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης, για τα επιφανειακά νερά, παρατηρείται τον μήνα Μάρτιο και οφείλεται στην κατακόρυφη ανάμειξη των υδάτινων μαζών. Η άνοδος βαθιών νερών πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας ευνοούν την πρωτογενή παραγωγικότητα του οικοσυστήματος δίνοντας το μέγιστο της συγκέντρωσης της



chl-a. Πριν από τον Μάρτιο, τέλος Ιανουαρίου – αρχές Φεβρουάριου, παρατηρείται επίσης μία αύξηση της χλωροφύλλης η οποία παρουσιάζεται μόνο στην μία προσομοίωση (Model +atm.dep.) και οφείλεται αποκλειστικά στην εναπόθεση θρεπτικών από την ατμόσφαιρα. Η απότομη μείωση της χλωροφύλλης τον Απρίλιο δεν σημαίνει ότι η χλωροφύλλη χάνεται, αλλά ότι βυθίζεται στα μεγαλύτερα βάθη, όπως άλλωστε αποδεικνύεται από την Εικόνα 5.16 (χλωροφύλλη στα 80m).



**Εικόνα 5.16:** Χρονική μεταβολή της χλωροφύλλης-α σε  $\text{mg/m}^3$  για το βάθος των 80m, για την προσομοίωση με ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model +atm.dep.) και για την προσομοίωση χωρίς ατμοσφαιρικά δεδομένα (Model -atm.dep.).

Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης σε βάθος 80m παρουσιάζεται αυξημένη και περισσότερο ομαλοποιημένη κατά τη διάρκεια του έτους καθόσον οφείλεται στην καταβύθιση των θρεπτικών από τα επιφανειακά ύδατα αλλά και από τη μεταφορά θρεπτικών από τα βαθιά νερά. Όπως είναι αναμενόμενο η συγκέντρωσή της, στην προσομοίωση όπου λαμβάνουμε υπόψη τα ατμοσφαιρικά δεδομένα, είναι μεγαλύτερη, αλλά κατ' ουσία δεν είναι «φρέσκια» παραγωγή όπως στην περίπτωση των επιφανειακών υδάτων αλλά «αναγεννημένη» καθώς συντίθεται από τους οργανισμούς μέσα από λήψη ανακυκλωμένων θρεπτικών συστατικών.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήσαμε την συνεισφορά της ατμόσφαιρας ως πηγή εμπλουτισμού του θαλάσσιου οικοσυστήματος του Κρητικού Πελάγους σε θρεπτικά συστατικά και κατ' επέκταση τον ρόλο που διαδραματίζει η ατμόσφαιρα στη πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήσαμε ατμοσφαιρικά δεδομένα από επίγειες μετρήσεις στην περιοχή, τα οποία εισήχθησαν σε μονοδιάστατο θαλάσσιο φυσικο – βιογεωχημικό μοντέλο, καθώς και θαλάσσια δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τόσο ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο όσο και ως δεδομένα εκτίμησης της αξιοπιστίας του.

Πριν προχωρήσουμε στον υπολογισμό της επίδρασης της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου στη πρωτογενή παραγωγικότητα στην θάλασσα της Ανατολικής Μεσογείου, διερευνήσαμε την ευαισθησία του μοντέλου σε διαταραχές των επιμέρους διεργασιών. Συγκεκριμένα μελετήσαμε την επίδραση αλλαγής διαφόρων παραμέτρων στη βιομάζα των πελαγικών οργανισμών (φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν και βακτήρια), εκτελέσαμε μία προσομοίωση “αναφοράς” με τιμές παραμέτρων οι οποίες προσομοιώνουν με τον βέλτιστο τρόπο το υπό μελέτη θαλάσσιο οικοσύστημα και την συγκρίναμε με δύο διαφορετικά σενάρια, μειώνοντας και αυξάνοντας την τιμή κάθε υπό μελέτη παραμέτρου κατά 30%. Από αυτές τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματά τους που παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πληθυσμός κάθε λειτουργικής ομάδας είναι εξαρτημένος, σε διαφορετικό ποσοστό, από μία σειρά παραμέτρων οι οποίες συνδέουν τις λειτουργικές διεργασίες των οργανισμών αυτών με ρυθμιστικούς περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες.

Δείξαμε ότι η αύξηση ή η μείωση της βιομάζας των πελαγικών οργανισμών (φυτοπλαγκτόν, βακτηρίων και ζωοπλαγκτόν) δεν είναι αποτέλεσμα αλλαγής μίας και μόνο παραμέτρου που συνδέεται με κάποια συγκεκριμένη βιολογική διεργασία, αλλά συνδυασμός πληθώρας παραμέτρων που εμπλέκονται με καθοριστικό τρόπο σε όλες τις βιολογικές διεργασίες των οργανισμών, δηλαδή λήψη τροφής, αναπνοή, θνησιμότητα, απεκκρίσεις και θήρευση.

Τέλος η επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου στη πρωτογενή παραγωγικότητα στην θάλασσα της Ανατολικής Μεσογείου, εκτιμήθηκε με τη χρήση των

ατμοσφαιρικών δεδομένων εναπόθεσης αζώτου και φωσφόρου και βάση προσομοιώσεις που λαμβάνουν υπόψη και που παραλείπουν αυτή την εισροή θρεπτικών συστατικών στη θάλασσα. Συγκεκριμένα δείξαμε ότι:

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων στη θαλάσσια στήλη νερού. Κατά συνέπεια έχουμε μέση ετήσια αύξηση της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας κατά 60% στα πρώτα 80m βάθος και της χλωροφύλλης-α κατά 90% στα πρώτα 200m βάθος.

Η ατμοσφαιρική εναπόθεση δίνει μέση ετήσια μείωση των φωσφορικών κατά 45% για τα επιφανειακά ύδατα (0-100m) λόγω αύξησης της καθαρής πρωτογενούς παραγωγικότητας και της βακτηριακής δραστηριότητας. Επίσης παρατηρείται αύξηση κατά 12% των φωσφορικών στα βαθύτερα νερά (100-200m) λόγω περισσότερων απεκκρίσεων και βακτηριακής αποικοδόμησης της οργανικής ύλης. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι μείωση των φωσφορικών κατά 5% στη κολώνα της υδάτινης μάζας από 0 έως 200m.

Η προσομοίωση του οικοσυστήματος λαμβάνοντας υπόψη τις ατμοσφαιρικές εναποθέσεις, συμφωνεί με την κατανομή της χλωροφύλλης-α όπως μετρήθηκε στον θαλάσσιο σταθμό M3A. Παρόλα αυτά η μέγιστη τιμή της χλωροφύλλης, σύμφωνα με την προσομοίωση δίνεται στα 80m ενώ σύμφωνα με τις θαλάσσιες μετρήσεις στα 100m. Η διαφορά αυτή πιστεύουμε ότι οφείλεται κυρίως στη μονοδιάστατη προσέγγιση του θαλάσσιου οικοσυστήματος, που αγνοεί τις οριζόντιες μετακινήσεις ύλης και οργανισμών.

## ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ

Έχει διαπιστωθεί ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση ιχνοστοιχείων στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις συνθήκες στις oligοτροφικές θάλασσες όπως η Μεσόγειος και κυρίως η Ανατολική της λεκάνη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εναπόθεση στοιχείων όπως το άζωτο (κύρια ως  $\text{NO}_3^-$  και  $\text{NH}_4^+$ ) και ο φώσφορος (ως  $\text{PO}_4^{3-}$ ) μιας και αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη της θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δείξαμε με τη χρήση ενός μονοδιάστατου φυσικο – βιογεωχημικού θαλάσσιου μοντέλου, ότι η ατμοσφαιρική εναπόθεση είναι εξίσου σημαντική με την εσωτερική ανακύκλωση θρεπτικών για την πρωτογενή παραγωγικότητα στο Κρητικό Πέλαγος, ένα μικρό μέρος της Μεσογειακής λεκάνης. Η ακριβέστερη προσομοίωση του θαλάσσιου οικοσυστήματος απαιτεί να λάβουμε υπόψη τη ροή ύλης και οργανισμών και στις τρεις διαστάσεις.

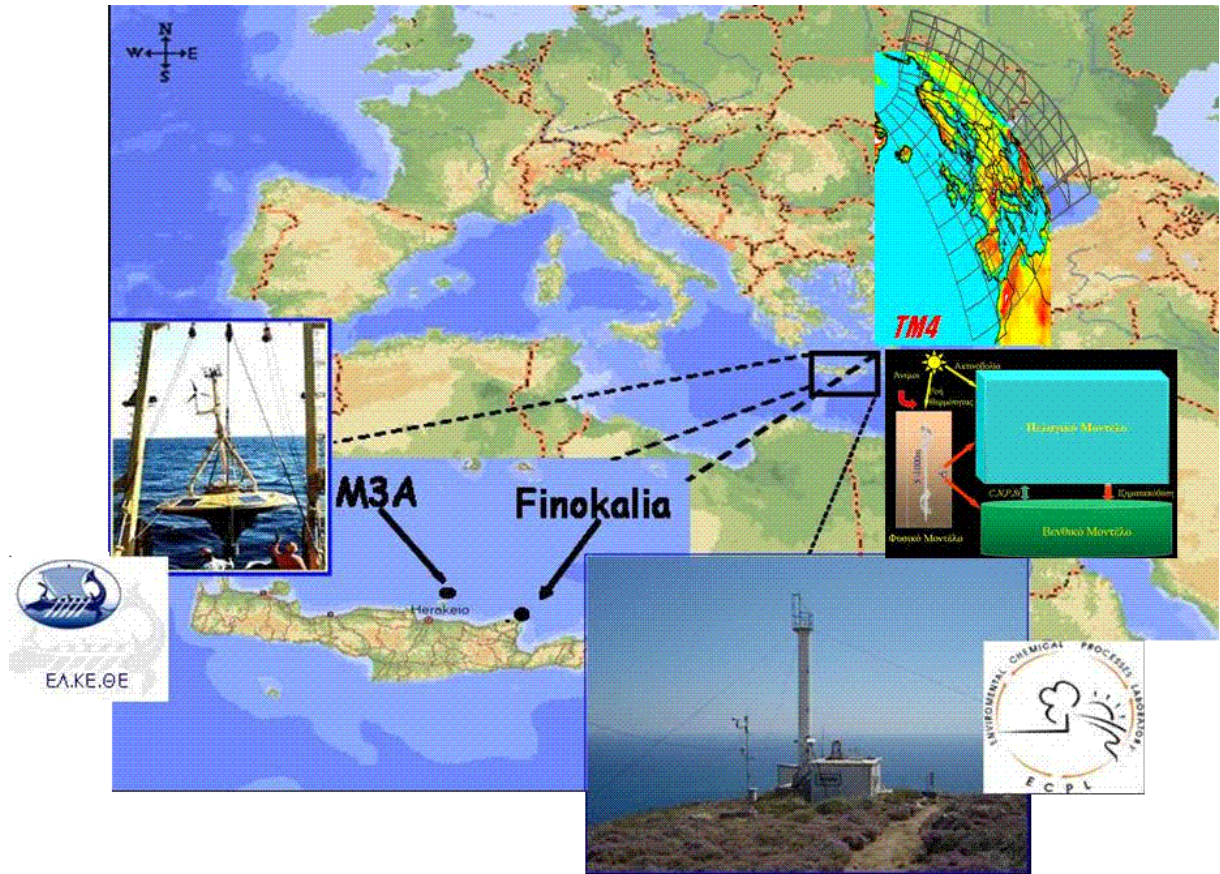
Σκοπός της προτεινόμενης εργασίας είναι επομένως, να υπολογισθεί η επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N και P) και της κλιματικής αλλαγής στα θαλάσσια οικοσυστήματα της Μεσογειακής λεκάνης. Αυτό θα επιτευχθεί μελετώντας την αντίδραση του θαλάσσιου οικοσυστήματος στις χρονικές μεταβολές (παρελθόν, παρόν, μέλλον) της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N και P μέσα από τη σύζευξη των μελετών της ατμοσφαιρικής χημείας και μεταφοράς με της ωκεανογραφίας και της θαλάσσιας βιολογίας.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης των διαλυτών μορφών N και P καθώς και οι αλλαγές που επιφέρουν στο θαλάσσιο οικοσύστημα θα χρησιμοποιηθούν:

- 1) Ατμοσφαιρικά δεδομένα από επίγειες μετρήσεις στη Μεσόγειο που θα προέλθουν από τη βάση δεδομένων, που θα δημιουργηθεί από το Πανεπιστήμιο Κρήτης στα πλαίσια του προγράμματος SESAME.
- 2) Το 3-D ατμοσφαιρικό μοντέλο μεταφοράς και χημείας (TM4, Μυριοκεφαλιτάκης Σ., Ε.ΠΕ.ΧΗ.ΔΙ. Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2006) για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης πάνω από τη Μεσόγειο και της μεταβολής της λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.
- 3) Θαλάσσια δεδομένα από σταθμούς μέτρησης και ωκεανογραφικές αποστολές στη Μεσόγειο. Κατ' αρχάς θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα στο

ΕΛΚΕΘΕ κι έπειτα η βάση δεδομένων που θα δημιουργηθεί στα πλαίσια του SESAME.

- 4) Το 3-D θαλάσσιο Φυσικο – Βιογεωχημικό Μοντέλο (Baretta et al., 1995, Triantafyllou 2002, ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ).



Με συνδυασμό των δύο αυτών μοντέλων και των ατμοσφαιρικών και θαλάσσιων δεδομένων θα προσομοιωθούν και θα διερευνηθούν:

- ☑ Η χωρική κατανομή της πρωτογενούς παραγωγικότητας και κατά συνέπεια της χλωροφύλλης-α, στη Μεσόγειο Θάλασσα.
- ☑ Η επίδραση της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης αζώτου στην πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα και την χωρική και χρονική κατανομή της στη Μεσόγειο.
- ☑ Οι αλλαγές που επιφέρει η ατμοσφαιρική εναπόθεση φωσφόρου στην πρωτογενή θαλάσσια παραγωγικότητα και ο ρόλος των βακτηρίων στο θαλάσσιο οικοσύστημα της Μεσογείου.
- ☑ Η αντίδραση του θαλάσσιου οικοσυστήματος στις χρονικές μεταβολές (παρελθόν, παρόν και μέλλον) ατμοσφαιρικής εναπόθεσης N και P.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## A. Υδάτινα οικοσυστήματα και θαλάσσιες περιοχές

Τα υδάτινα οικοσυστήματα διαφέρουν από τα χερσαία λόγω των διαφορετικών συνθηκών ζωής που παρέχουν στους οργανισμούς και αυτό διότι, το νερό που αποτελεί το μέσο στο οποίο ζουν οι υδρόβιοι οργανισμοί, δημιουργεί ένα περιβάλλον λιγότερο ανομοιογενές συγκριτικά με τη ξηρά. Η κατανομή των θαλάσσιων οργανισμών, ο βιολογικός τους κύκλος και οι ποικίλες φυσιολογικές λειτουργίες τους, ρυθμίζονται από οικολογικούς, φυσικούς και χημικούς παράγοντες. Οι ίδιοι παράγοντες καθορίζουν και την παραγωγικότητα των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Με βάση κυρίως οικολογικά κριτήρια, οι θαλάσσιοι οργανισμοί διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: το *βένθος*, το *νηκτόν* και το *πλαγκτόν*. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από οργανισμούς οι οποίοι στερεώνονται, έρπουν ή ανοίγουν στοές και σήραγγες στο υπόστρωμα του βυθού. Η δεύτερη κατηγορία εμπεριέχει όλους εκείνους τους οργανισμούς με μεγάλη κολυμβητική ικανότητα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα κεφαλόποδα, τα ψάρια και τα κητώδη θηλαστικά. Τέλος στην κατηγορία των πλαγκτονικών οργανισμών ανήκουν όλα εκείνα τα φυτά και ζώα με περιορισμένη κολυμβητική ικανότητα και τα οποία παρασύρονται και μεταφέρονται από κύματα, ρεύματα ή παλίρροιες.

Η οικολογική ταξινόμηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε ζώνες, βιοτόπους κλπ. γίνεται σε συσχετισμό με τους οικολογικούς παράγοντες που χαρακτηρίζουν τις διάφορες περιοχές του θαλάσσιου χώρου. Στις θαλάσσιες αυτές ζώνες ζουν χαρακτηριστικοί πληθυσμοί και βιοκοινωνίες που διαφέρουν σημαντικά από τις βιοκοινωνίες και τους πληθυσμούς άλλων περιοχών. Τα όρια, τα οποία καθορίζουν τους διάφορους βιοτόπους και τις θαλάσσιες ζώνες δεν είναι ευκρινείς γραμμές ή επιφάνειες αλλά μεταβατικές περιοχές μικρότερης ή μεγαλύτερης έκτασης. Η διάκριση του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε *πελαγική* (ανοικτές θάλασσες και ωκεανούς) και *βενθική* περιοχή (θαλάσσιος βυθός) είναι ανεπαρκής όταν μελετάμε το θαλάσσιο οικοσύστημα σε λεπτομέρεια.

Μία περισσότερο λεπτομερής κάθετη ταξινόμηση της πελαγικής περιοχής που βασίζεται κυρίως στην ένταση του ηλιακού φωτός, την διακρίνει στις ακόλουθες ζώνες: α) την ευφωτική ζώνη, β) τη δυσφωτική ζώνη και γ) την αφωτική ζώνη. Ως *ευφωτική* ζώνη, ορίζεται το ανώτατο θαλάσσιο στρώμα στο οποίο η ένταση του ηλιακού φωτός είναι αρκετά μεγάλη ώστε η πρωτογενής παραγωγικότητα να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αποικοδόμηση με τη λειτουργία της αναπνοής. Το ανώτατο όριο της ευφωτικής ζώνης είναι η επιφάνεια του



νερού, ενώ το κατώτατο βρίσκεται στο βάθος του σημείου αντιστάθμισης, δηλαδή στο βάθος εκείνο όπου η καθαρή πρωτογενής παραγωγικότητα (NPP) είναι ίση με την ολική αναπνοή (R). Φυσικά η διείσδυση του ηλιακού φωτός στη θαλάσσια στήλη νερού επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (για παράδειγμα διαύγεια νερού, γεωγραφικό πλάτος, νεφοκάλυψη, βαθμός ηρεμίας του νερού κλπ.) και για το λόγο αυτό, η ευφωτική ζώνη, αποτελεί μία μεταβατική ζώνη που δεν καθορίζεται εύκολα αλλά και που συνήθως δεν υπερβαίνει τα 200 μέτρα.

## **B. Προβλήματα λειτουργίας του M3A και πώς αντιμετωπίστηκαν**

Το σύστημα λειτούργησε στην πιλοτική φάση του προγράμματος για δύο περίπου χρόνια (2000-2001) στο Κρητικό Πέλαγος. Κατά την περίοδο αυτή εμφανίστηκαν προβλήματα τα οποία επηρέασαν σημαντικά την ποιότητα των δεδομένων του σταθμού. Όπως ήδη αναφέρθηκε, πρωταρχικός στόχος του ερευνητικού προγράμματος ήταν ο σχεδιασμός μίας μονάδας που θα επέτρεπε διαφορετικές περιόδους συντήρησης μεταξύ των διαφόρων επιμέρους συστημάτων της, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος συντήρησης στο ελάχιστο. Παρόλο που η χρήση μεμονωμένων μονάδων οι οποίες επικοινωνούν υποθαλάσσια μεταξύ τους είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, στην περίπτωση του M3A υπήρξαν προβλήματα σχετικά με την επικοινωνία των γραμμών.

Εκτός της υποθαλάσσιας επικοινωνίας, το σύστημα Argos, αποδείχθηκε μη αποτελεσματικό στη μεταφορά δεδομένων στο ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ. (60% ανάκτηση), κυρίως λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων, σε αντίθεση με τη μεταφορά δεδομένων μέσω του ψηφιακού δικτύου<sup>7</sup> (80% ανάκτηση) (Global System for Mobile Communication: GSM), το οποίο όμως δεν ενδείκνυται για συνθήκες ανοικτής θάλασσας (απόσταση από την ακτή).

Ένα επίσης ενδιαφέρον φαινόμενο ήταν η οριζόντια μετακίνηση των οργάνων λόγω των ισχυρών ρευμάτων που καταγράφηκαν από τους αισθητήρες πίεσης και τον ακουστικό τομογράφο μέτρησης ρευμάτων (ADCP). Παρόλο που η επίδραση της μετατόπισης των οργάνων ήταν ορατή σε όλες τις χρονοσειρές όλων των παραμέτρων (εκτός χλωροφύλλης και διαλυμένου οξυγόνου), η διόρθωση έγινε εύκολα χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου και γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στην αγκυροβόληση και την ανάκτηση.

Μία ακόμη σημαντική πηγή προβλημάτων παρουσίασαν οι οπτικοί αισθητήρες (πχ για μετρήσεις θολερότητας μέσω της εξασθένησης και χλωροφύλλης μέσω του φθορισμού) οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στην βίο-επίστρωση (bio-fouling) δηλαδή στην απόθεση φυτοπλαγκτού και στην ανάπτυξη οργανισμών όταν βρίσκονται για μεγάλο διάστημα στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Κατά τη δεύτερη περίοδο λειτουργίας του σταθμού (2001 – 2005) και έχοντας αποκτήσει σημαντική εμπειρία, σημαντικές ενέργειες έγιναν για την επίλυση των τριών κύριων προβλημάτων που εμφανίστηκαν στη πιλοτική φάση λειτουργίας του σταθμού. Ο πρώτος από τους τρεις κύριους στόχους που ετέθησαν, ήταν η τελειοποίηση τόσο των υποθαλάσσιων όσο και των εναέριων συστημάτων μεταφοράς δεδομένων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν

---

<sup>7</sup> Global System for Mobile Communication (GSM)

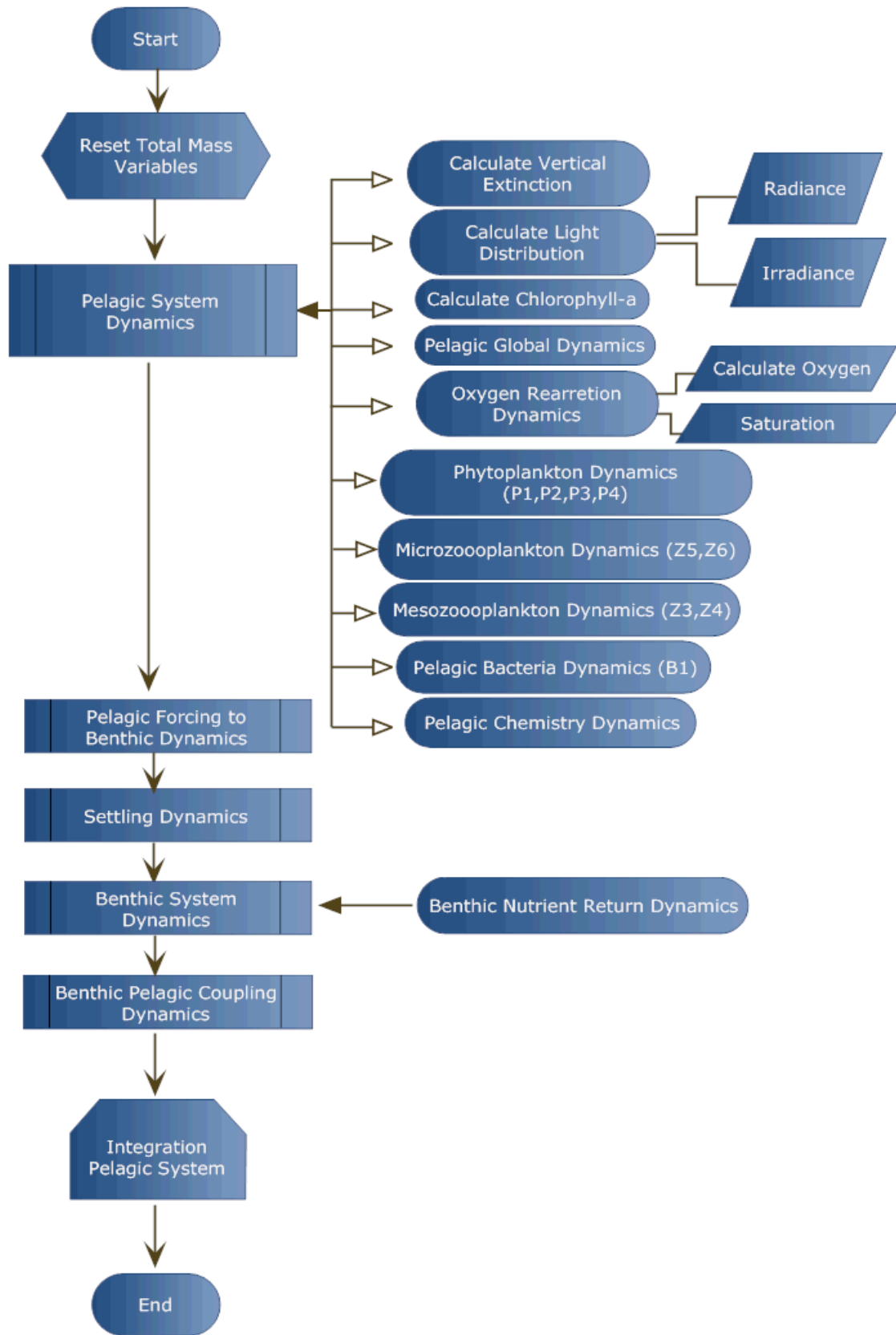
ακουστικά διπλής κατεύθυνσης και ICM modems, ενώ το υποθαλάσσιο δίκτυο ενσωματώθηκε στον πλωτήρα και συνδέθηκε στην αγκυροβολημένη γραμμή. Για την επίλυση του προβλήματος επικοινωνίας μεταξύ των δύο γραμμών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όπου σχηματίζεται το θερμοκλινές, υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων εφαρμόστηκαν (έως και 4800 Bits/s). Για την εναέρια μεταφορά δεδομένων επιλέχθηκε μία τεχνολογία, ήδη ελεγμένη σε 11 Seawatch πλωτήρες στο Αιγαίο Πέλαγος, στα πλαίσια του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (<http://www.poseidon.ncmr.gr/>), κατά την οποία τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του δορυφόρου Inmarsat-C. Μολονότι σημαντικό μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι το υψηλό κόστος, υπάρχει ταυτόχρονα η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας αποφεύγοντας ένα μεγάλο αριθμό επισκέψεων.

Δεύτερος στόχος ήταν ο επανασχεδιασμός του επιφανειακού πλωτήρα ώστε να αυξηθεί η προσαρμοστικότητα του και η ελαστικότητα του ενώ ταυτόχρονα να μειωθεί η πολυπλοκότητα του και οι μεγάλες απαιτήσεις συντήρησης. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλωτήρα ώστε πλέον να μπορεί να αντιστέκεται ακόμη και σε κύματα ύψους 12 m.

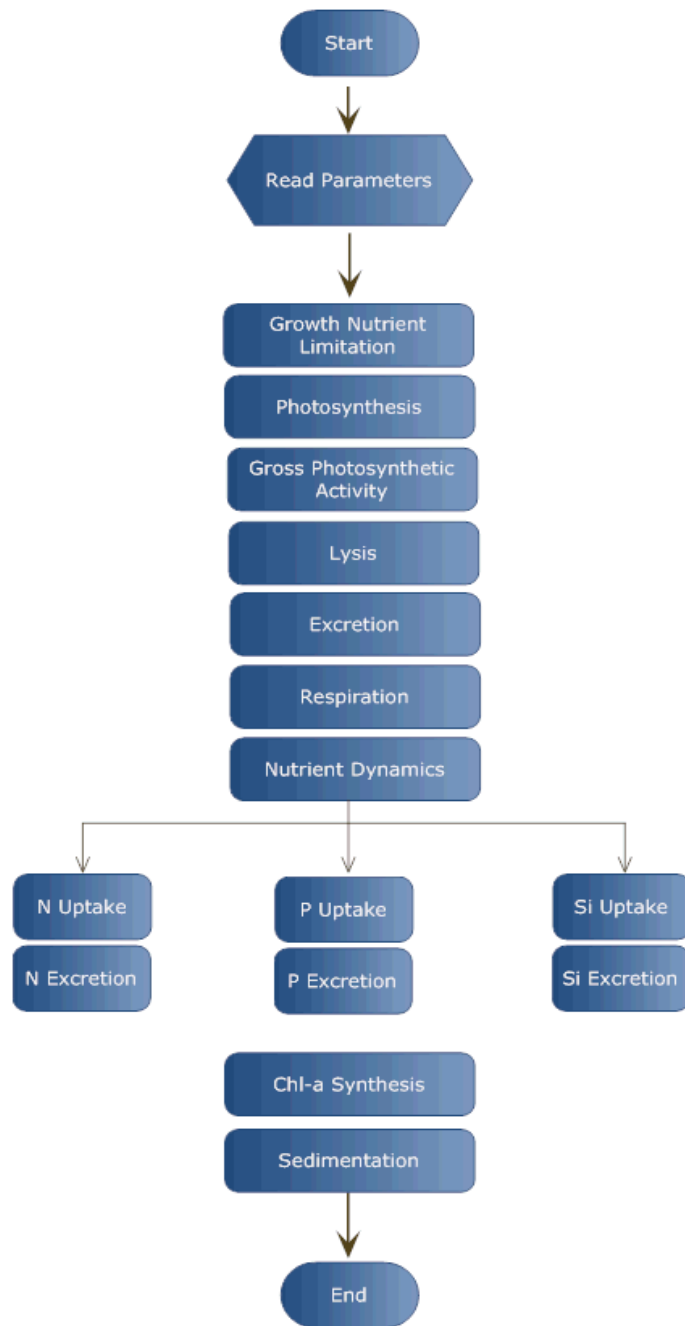
Ο τελευταίος στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση της βιο- επίστρωσης, ιδιαίτερα στους οπτικούς αισθητήρες. Διάφορες τεχνικές εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου, όπως διαλύματα βρωμίου ή κλείστρα χαλκού (bromine solutions, copper shutters) που είχαν ως σκοπό της δημιουργία ενός τοξικού περιβάλλοντος για τους θαλάσσιους οργανισμούς κοντά στην επιφάνεια των αισθητήρων και οι οποίες έδωσαν λύση στο πρόβλημα.

Τα παραπάνω προβλήματα, τα οποία αντιμετωπίστηκαν με μία σειρά από τροποποιήσεις και αναβαθμίσεις έδωσαν τελικά τη δυνατότητα συλλογής ενός μοναδικού σετ φυσικών και βιο-χημικών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται από οικολογικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την περιοχή αλλά και για μελέτες της δυναμικής κατάστασης του Κρητικού Πελάγους (Nittis et al. 2002, Cardin et al. 2002).

### Γ. Λογικό Διάγραμμα Οικολογικού Θαλάσσιου Μοντέλου (ERSEM)



**Δ. Λογικό Διάγραμμα της υπορουτίνας Phytoplankton dynamics του οικολογικού θαλάσσιου μοντέλου (ERSEM)**



**Ε. Συμβολισμοί και Περιγραφή των Παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο Πελαγικό Μοντέλο**

<i><b>ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ</b></i>	<i><b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</b></i>
<i>et</i>	Ρυθμιστικός παράγοντας θερμοκρασίας
<i>eO2</i>	Ρυθμιστικός παράγοντας οξυγόνου
<i>eiPI</i>	Ρυθμιστικός παράγοντας ηλιακής ακτινοβολίας
<i>eN5s</i>	Ρυθμιστικός παράγοντας πυριτίου
<i>efood</i>	Διαθέσιμο ποσοστό τροφής (μεσοζωοπλαγκτόν)
<i>Irr</i>	Φωτοσυνθετική ακτινοβολία
<i>iNIn</i>	Περιοριστικός παράγοντας αζώτου
<i>iNIp</i>	Περιοριστικός παράγοντας φωσφόρου
<i>iNIs</i>	Περιοριστικός παράγοντας πυριτίου
<i>iN</i>	Συνολικός ενδοκυτταρικός περιοριστικός παράγοντας θρεπτικών (βακτήρια)
<i>p_sum</i>	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης
<i>p_q10</i>	Συντελεστής θερμοκρασίας χαρακτηριστικός για κάθε λειτουργική ομάδα
<i>p_chlPc</i>	Λόγος χλωροφύλλης/άνθρακα
<i>p_alpha_chla</i>	Αρχική κλίση της καμπύλης Production-Irradiance
<i>p_chPs</i>	Σταθερά ημικορεσμού πυριτίου
<i>p_srs</i>	Ρυθμός αναπνοής σε κατάσταση ηρεμίας
<i>p_ru_ra</i>	Συντελεστής αναπνοής δραστηριότητας
<i>p_ru_ea</i>	Ποσοστό τροφής που απεκκρίνεται στο περιβάλλον
<i>p_qnlc</i>	Ελάχιστος ενδοκυτταρικός λόγος αζώτου/άνθρακα
<i>p_qplc</i>	Ελάχιστος ενδοκυτταρικός λόγος φωσφόρου/άνθρακα
<i>p_qun</i>	Παράμετρος λήψης για το άζωτο
<i>p_qup</i>	Παράμετρος λήψης για τον φώσφορο
<i>p_lN4</i>	Σταθερά ημικορεσμού αμμωνίας
<i>p_xqn</i>	Παράγοντας για luxury uptake
<i>p_qchlc</i>	Μέγιστος λόγος χλωροφύλλης/άνθρακα για κάθε λειτουργική ομάδα
<i>p_qnRc</i>	Λόγος N/C σύμφωνα με τον Redfield

<i>p_qsRc</i>	Λόγος Si/C σύμφωνα με τον Redfield
<i>p_qnc</i>	Εσωτερικός λόγος N/C σύμφωνα με τον Redfield
<i>p_qpc</i>	Εσωτερικός λόγος P/C σύμφωνα με τον Redfield
<i>p_suR1</i>	Παράγοντας προτίμησης τροφής για την διαθέσιμη διαλυμένη οργανική ύλη (βακτήρια)
<i>p_suR2</i>	Παράγοντας προτίμησης τροφής για την ημι-διαθέσιμη διαλυμένη οργανική ύλη (βακτήρια)
<i>p_suR6</i>	Παράγοντας προτίμησης τροφής για την σωματιδιακή οργανική ύλη (βακτήρια)
<i>p_pu</i>	Συντελεστής αφομοίωσης τροφής (για τα βακτήρια σε οξικές συνθήκες)
<i>p_puo</i>	Συντελεστής προσομοίωσης ανοξικών συνθηκών (βακτήρια)
<i>p_chdo</i>	Συγκέντρωση ημικορεσμού για O <sub>2</sub>
<i>p_sd</i>	Φυσική θνησιμότητα
<i>p_sds</i>	Θνησιμότητα λόγω πυκνότητας πληθυσμού
<i>p_rPim</i>	Παράμετρος καταβύθισης λόγω έλλειψης θρεπτικών
<i>p_esNI</i>	Τιμή κατωφλίου για την διεργασία της καταβύθισης λόγω έλλειψης θρεπτικών
<i>p_res</i>	Παράμετρος από την οποία εξαρτάται η καταβύθιση των οργανισμών
<i>p_qun</i>	Παράμετρος λήψης θρεπτικών
<i>p_pe_R1</i>	Ποσοστό απεκκρίσεων που απομακρύνεται ως διαλυμένη οργανική ύλη
<i>p_pe_IR6</i>	Ποσοστό απεκκρίσεων που απομακρύνεται ως σωματιδιακή οργανική ύλη
<i>p_qn_mz</i>	Μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος θρεπτικών/άνθρακα στους ζωοπλακτονικούς οργανισμούς
<i>p_stemp</i>	Παράμετρος απομάκρυνσης περίσσειας αζώτου από τους ζωοπλακτονικούς οργανισμούς με τη μορφή νιτρικών ή αμμωνίας
<i>p_chuc</i>	Παράμετρος ημικορεσμού συνολικών διαθέσιμων πηγών τροφής
<i>p_minfood</i>	Διαθέσιμο ποσοστό τροφής (μικοζωοπλακτόν)
<i>p_vum</i>	Σταθερά όγκου αναζήτησης τροφής
<i>qnPc</i>	Πραγματικός εσωτερικός λόγος N/C
<i>qnB1c</i>	Πραγματικός ενδοκυτταρικός λόγος N/C
<i>qnR6c</i>	Εσωτερικός λόγος N/C (βακτήρια)
<i>qpR6c</i>	Εσωτερικός λόγος P/C (βακτήρια)
<i>rho_Ch1</i>	Μέγιστος λόγος χλωροφύλλης/άνθρακα

<b><i>rate_chl</i></b>	Ρυθμός σύνθεσης χλωροφύλλης
<b><i>rume</i></b>	Παράμετρος συνολικών διαθέσιμων πηγών τροφής
<b><i>sinkn</i></b>	Παράμετρος απομάκρυνσης νιτρικών
<b><i>suR6</i></b>	Παράμετρος ποιότητας σωματιδιακής οργανικής ύλης (βακτήρια)
<b><i>tN</i></b>	Συνολικός ενδοκυτταρικός περιοριστικός παράγοντας θρεπτικών
<b><i>uptake<sub>total</sub></i></b>	Συνολική απορρόφηση θρεπτικών
<b><i>uptake<sub>max</sub></i></b>	Δυνητική απορρόφηση θρεπτικών για δεδομένη βιομάζα
<b><i>uptake<sub>netprod</sub></i></b>	Απορρόφηση θρεπτικών για την καθαρή παραγωγή του οργανισμού
<b><i>uptake<sub>miss</sub></i></b>	Απορρόφηση θρεπτικών για την επιβίωση του οργανισμού
<b><i>uptake<sub>pot</sub></i></b>	Δυνητική απορρόφηση θρεπτικών για δεδομένη βιομάζα (βακτήρια)
<b><i>uptake<sub>sub</sub></i></b>	Απορρόφηση θρεπτικών βάσει του υποστρώματος τροφής (βακτήρια)



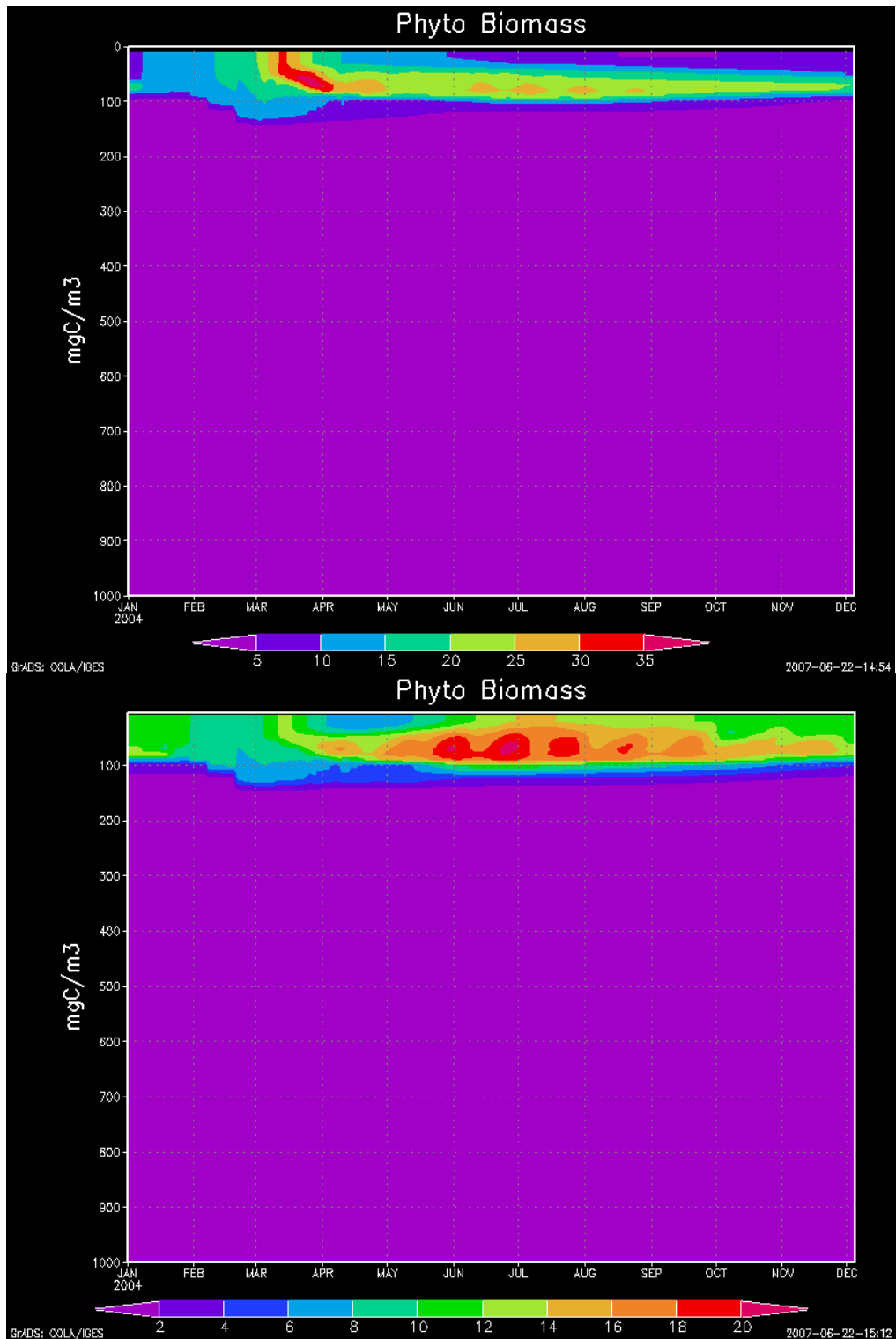
## Z. Τιμές των Παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο Πελαγικό Μοντέλο

<i>Συμβολισμός</i>	<i>Διάτομα</i>	<i>Νανοπλαγκτόν</i>	<i>Πικοπλαγκτόν</i>
p_q10	2.0	2.0	3.0
p_sum(day <sup>-1</sup> )	2.5	2.7	3.3
p_srs(day <sup>-1</sup> )	0.1	0.05	0.1
p_pu_ra	0.1	0.1	0.2
p_pu_ea	0.05	0.1	0.1
p_qnRc(mmol N/mgC)	0.0126	0.0126	0.0126
p_qpRc(mmol P/mgC)	0.786e-3	0.786e-3	0.786e-3
p_qsRc(mmol Si/mgC)	0.01	0.0	0.0
p_xqn	2.0	2.0	2.0
p_xqp	2.0	2.0	2.0
p_qnlc(mmol N/mgC)	0.00687	0.00687	0.00687
p_qplc(mmol P/mgC)	0.4288e-3	0.4288e-3	0.4288e-3
p_qslc(mmol Si/mgC)	0.007	0.0	0.0
p_qun(m <sup>3</sup> /mgC day)	0.0025	0.0025	0.0025
p_qup(m <sup>3</sup> /mgC day)	0.0025	0.0025	0.0025
p_qus(m <sup>3</sup> /mgC day)	0.0025	0.0	0.0
p_esNI	0.70	0.75	0.75
p_rPim(m/day)	0.25	0.0	0.0
p_res(m/day)	1.0	0.0	0.0
p_chPs(mmol Si/m <sup>3</sup> )	1.0	0.0	0.0
p_IN4(mmol N/m <sup>3</sup> )	1.0	0.5	0.1
p_qchlC(mgChl/mgC)	0.05	0.03	0.07
p_alpha_chl(W m <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	1.38e <sup>-5</sup>	1.52e <sup>-5</sup>	1.52e <sup>-5</sup>

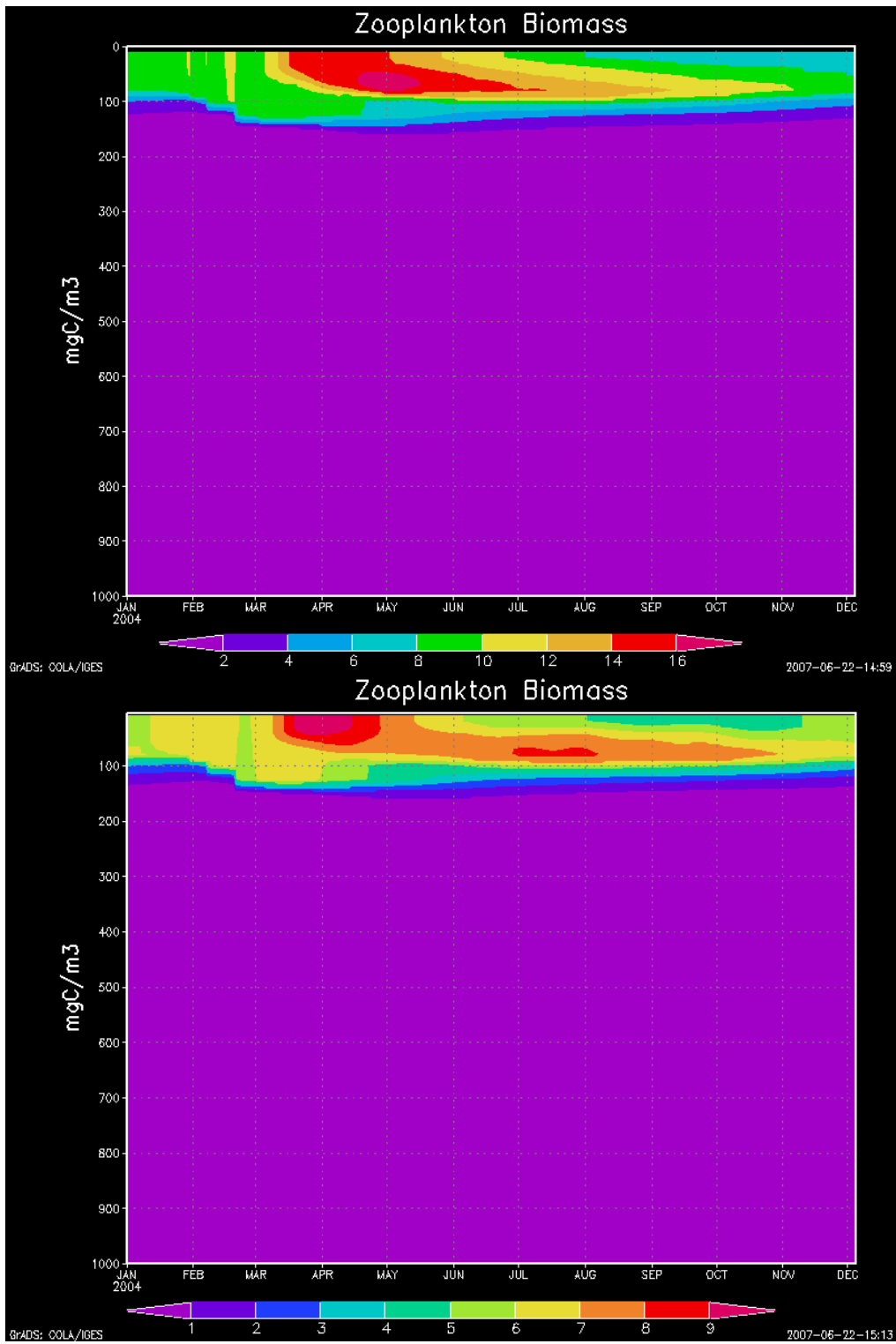
<i>Συμβολισμός</i>	<i>Βακτήρια</i>
p_q10	3.835
p_chdo(mmol/ m <sup>3</sup> )	30.0
p_sum(day <sup>-1</sup> )	10.894
p_srs(day <sup>-1</sup> )	0.01
p_puo	0.2
p_pu	0.4
p_sd	0.0
p_qnc(mmol N/mgC)	0.017
p_qpc(mmol P/mgC)	0.0019
p_qlnc(mmol N/mgC)	0.0085
p_qlpc(mmol P/mgC)	0.95 e-3
p_qun(m <sup>3</sup> /mgC day)	0.05
p_qup(m <sup>3</sup> /mgC day)	0.05
p_IN4	0.05
p_suR1(day <sup>-1</sup> )	0.5
p_suR2(day <sup>-1</sup> )	0.025
p_suR6(day <sup>-1</sup> )	0.1

<i>Συμβολισμός</i>	<i>Ετερότροφα Μαστιγωτά (Z6)</i>	<i>Μικροζωοπλαγκτόν (Z5)</i>	<i>Μεσοζωοπλαγκτόν (Z4)</i>
p_q10	2.0	2.0	2.6
p_sum(day <sup>-1</sup> )	5.0	2.0	0.5
p_srs(day <sup>-1</sup> )	0.02	0.02	0.02
p_pu	0.3	0.5	-
p_pu_ea	0.5	0.5	-
p_sd(day <sup>-1</sup> )	-	-	0.01
p_sds(day <sup>-1</sup> )	0.05	0.05	2.0
p_qn_mz (mmol N/mgC)	0.0167	0.0167	-
p_qp_mz(mmol P/mgC)	0.185 e-3	0.185 e-3	-
p_qnc(mmol N/mgC)	-	-	0.015
p_qpc(mmol P/mgC)	-	-	0.167 e-2
p_stemp(day <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	-
p_chuc(mgC/ m <sup>3</sup> )	50.0	50.0	-
p_minfood(mgC/ m <sup>3</sup> )	30.0	30.0	-
p_vum(m <sup>3</sup> )	0.016	0.032	-

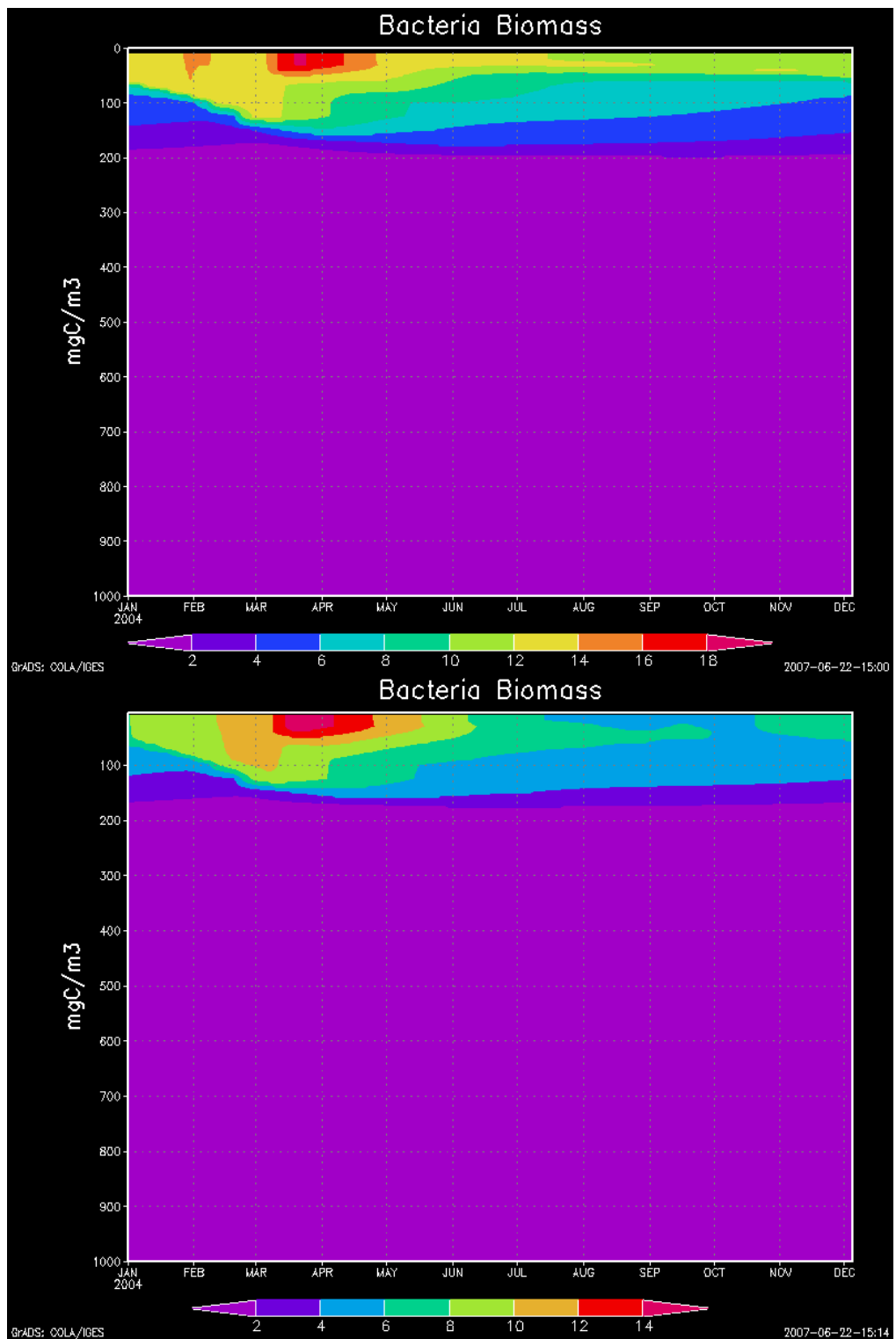
## Η. Χωρική και χρονική κατανομή της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος



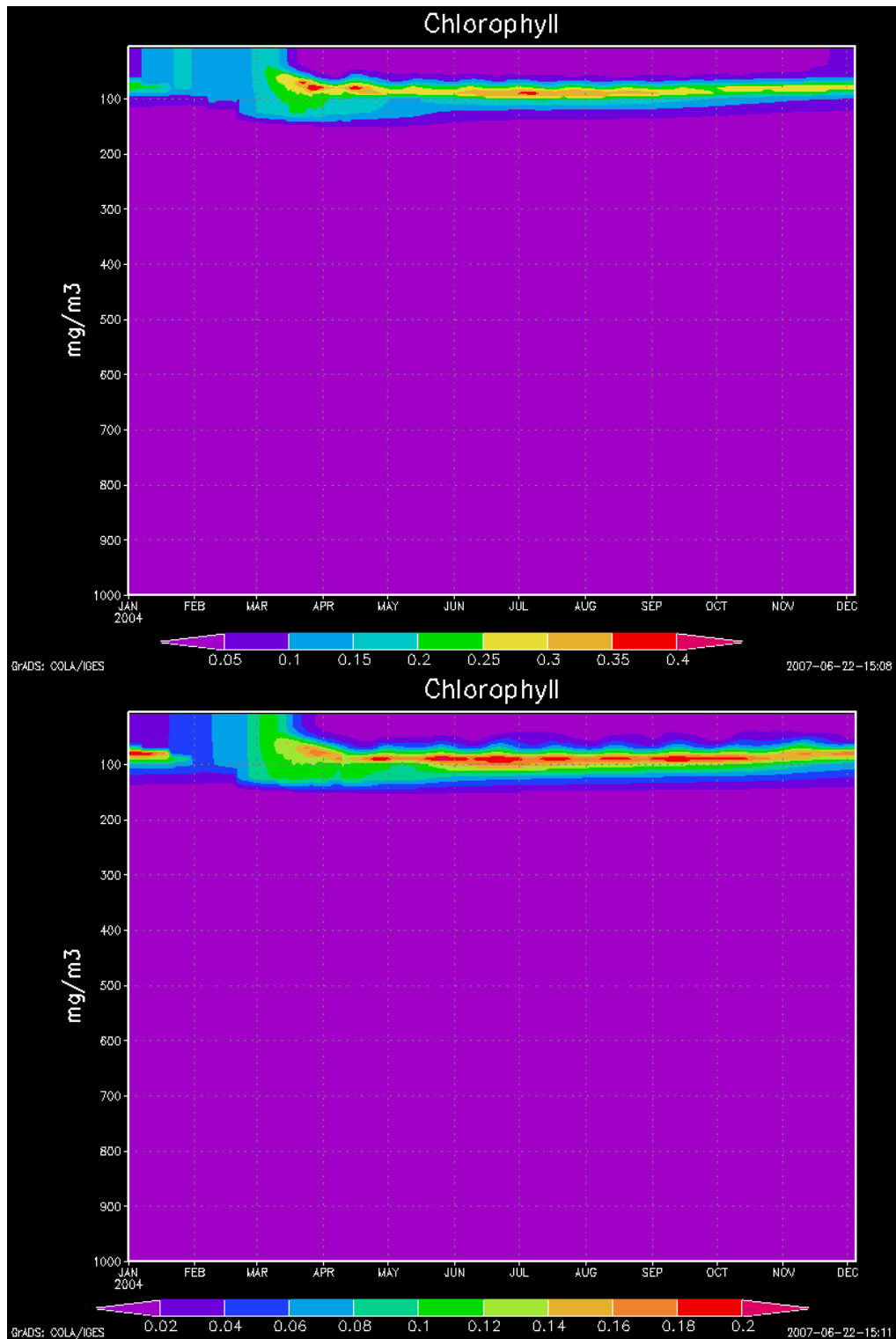
Θ. Χωρική και χρονική κατανομή της ζωοπλαγκτονικής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος



# I. Χωρική και χρονική κατανομή της βακτηριακής βιομάζας στο Κρητικό Πέλαγος



## Κ. Χωρική και χρονική κατανομή της χλωροφύλλης - α στο Κρητικό Πέλαγος



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Balopoulos, E.T., (1996), PELAGOS. MAS2-CT93-0059, NCMR, Athens, pp 25.
- Bashkin, V. N., L.K. Erdman, A.Yu Abramychev, M.A. Sofiev, I.V. Priputina, and A.V.Gusev, (1997), The input of anthropogenic airborne nitrogen to the Mediterranean Sea through its watershed, MAP Technical Reports Series, Vol. 118, UNEP, Athens (95 pp).
- Baretta-Bekker, J.G., Baretta, J.W. and Rasmussen, E., (1995), The microbial foodweb in the European regional Seas Ecosystem Model. *Netherlands Journal of Sea Research*, 33: 363-379.
- Berthoux, J.P., P. Morin, C. Chaumery, O. Connan, B. Gentili, and D. Ruiz-Pino, (1998), Nutrients in the Mediterranean Sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change, *Mar. Chem.*, 63, 155-169.
- Blumberg, A.F. and Mellor, G.L., (1983). Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight. *Journal of Geophysical Research*, 88: 4579-4592.
- Blumberg, A.F. and Mellor, G.L., (1987), A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Editor), *Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Models*. Coastal Estuarine Science. AGU, Washington, D.C., pp. 1-16.
- CINCS, (1996), Pelagic Benthic Coupling IN the oligotrophic Cretan Sea, final report.
- Codispoti, L.A., (1989), Phosphorus vs. nitrogen limitation of new and export production. In *Productivity of the ocean: Present and past*, W.H. Berger et al., (eds), pp. 377-408, Dahlem Conference, Wiley.
- Duce, R.A., P.S. Liss, J.T. Merrill, E.L. Atlas, P. Buat-Menard, B.B. Hicks, J.M. Miller, J.M. Prospero, R. Arimoto, T.M. Church, W. Ellis, J.N. Galloway, L. Hansen, T.D. Jickells, A.H. Knap, K.H. Reinhardt, B. Schneider, A. Soudine, J.J. Tokos, S. Tsunogai, R. Wollast, and M. Zhou, (1991), The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 5, 193-259.
- Fanning, K.A., (1989), Influence of atmospheric pollution on nutrient limitation in the ocean, *Nature*, 339, 460-463.
- Galloway, J.,N.,, Dentener, F.,J. D.,G., Capone,E.,W., Boyer, R.,W., Howarth, S.,P., Seintzinger, G.,P., Asner, C.,C., Cleveland, P.,A., Grenn, E.,A., Holland, D.,M., Karl, A.,F., Michaels, J.,H., Potrer, A.,R., Townsend and C.,J., Vorosmarty, (2004), Nitrogen cycles: past, present, and future, *Biogeochemistry* 70: 153–226.
- Georgopoulos, D., Chronis, G., Zervakis, V., Lykousis, V., Poulos, S. and Iona, A., 2000. Hydrology and circulation in the Southern Cretan Sea during the CINCS experiment (May 1994 - September 1995). *Progress in Oceanography*, 46: 89-112.

- Guerzoni, S., R. Chester, F. Dulac, B. Herut, M.D. Loye-Pilot, C. Measures, C. Migon, E. Molinaroli, C. Moulin, P. Rossini, C. Saydam, A. Soudine, and P. Ziveri, (1999), The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea, *Progress in Oceanography*, 44, 147-190.
- Herut, B., M.D. Krom, G. Pan, and R. Mortimer, (1999), Atmospheric input of nitrogen and phosphorus to the Southeast Mediterranean: Sources, fluxes, and possible impact, *Limnol. Oceanogr.*, 44, 1683-1692.
- Herut, B., A. Starinsky, A. Katz, and D. Rosenfeld, (2000), Relationship between the acidity and chemical composition of rainwater and climatological conditions along a transition zone between large deserts and Mediterranean climate, Israel, *Atmos. Environ*, 34, 1281-1292.
- Hicks, B.B., and P.S. Liss, (1976), Transfer of SO<sub>2</sub> and other reactive gases across the air-sea interface, *Tellus*, 28, 348-354.
- Ignatiades, L., (1998), The productive and optical status of the oligotrophic waters of the Southern Aegean Sea (Cretan Sea), Eastern Mediterranean, *J. Plankton Res.*, 20, 985-995.
- Jickells, T.D., (1998), Nutrient biogeochemistry of the coastal zone, *Science*, 284, 217-222.
- Korres, G. and Lascaratos, A., (2003), An eddy resolving model of the Aegean and Levantine basins for the Mediterranean Forecasting System Pilot Project (MFSPP) : Implementation and climatological runs. *Annals Geophysicae*, 21: 205-220.
- Kouvarakis, G., N. Mihalopoulos, T. Tselepidis, and S. Stavrakakis, (2001), On the importance of atmospheric inputs of inorganic nitrogen species on the productivity of the Eastern Mediterranean Sea, *Global Biogeochemical cycles*, 15, No. 4 , 805-818.
- Kouvarakis, G., H. Bardouki, and N. Mihalopoulos, (2002a), Sulfur budget above the Eastern Mediterranean: Relative contribution of anthropogenic and biogenic sources, *Tellus*, 54, 201-213.
- Krom, M.D., N. Kress, S. Brenner, and L.I. Gordon, (1991), Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea, *Limnol. and Oceanogr.*, 36, 424-432.
- Krom, M.D., S. Brenner, N. Kress, A. Neori and L.I. Gordon, (1992), Nutrient dynamics and new production in a warm-core eddy from the Eastern Mediterranean Sea, *Deep-Sea Research*, 39, 467-480.
- Krom, M., D.B., Herut, R. F. C., Mantoura, (2004), ' Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: Implications for phosphorus limitation, *Limnology Oceanography*, 49, pp. 1582-1592
- Lascaratos, A. and Nittis, K., (1998), A high-resolution three-dimensional study of intermediate water formation in the Levantine Sea. *Journal of Geophysical Research*, 103(C9): 18497-18511.
- Loye-Pilot, M. D., and Martin, J. M., (1996), Saharan dust input to the western Mediterranean: An eleven year record in Corsica, pp. 191–199. In S. Guerzoni and R. Chester [eds.], *The impact of desert dust across the Mediterranean*. Kluwer.



- Loye-Pilot, M.D., J.M. Martin, and J. Morelli, (1990), Atmospheric input of inorganic nitrogen to the Western Mediterranean, *Biogeochemistry*, 9, 117-134.
- Markaki, Z., C. Economou, M. Kocak, G. Kouvarakis, A. Chaniotaki, N. Kubilay and N. Mihalopoulos, (2003), Atmospheric deposition of inorganic phosphorus in the Eastern Mediterranean: Spatial, temporal variability and its role on the productivity of the Eastern Mediterranean Sea, *Limnology and Oceanography*, submitted.
- Martin, J.H., F. Elbaz-Poulichet, C. Guieu, M.D. Loye-Pilot, and G. Han, (1989), River versus atmospheric input of material to the Mediterranean: an overview, *Mar. Chem.*, 28, 159- 182.
- Mellor, G.L. and Ezer, T., (1991), A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme. *Journal of Geophysical Research*, 96: 8779-8795.
- Mellor, G.L. and Yamada, T., (1982), Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Review Geophysics and Space Physics*, 20: 851-875.
- Myriokefalitakis, S (2006), Development of a chemical code and its application to the study of the global distribution of glyoxal I and formaldehyde by using a 3-d global model MsC Thesis, Unuversity of Crete, Greece
- Nittis, K, C., Tziavos, Thanos, P., Drakopoulos, V., Cardin, M., Gacic, G., Petihakis, and R., Basana, (2003), The Mediterranean Moored Multi-sensor Array (M3A): system development and initial results, *Annales Geophysicae*, 21: 75–87.
- Owens, N.J.P., J.N. Galloway, and R.A. Duce, (1992), Episodic atmospheric nitrogen deposition to the oligotrophic oceans, *Nature*, 357, 397-399.
- Psarra, S., T., Zoharyb, M., Krom, F., Mantourad, T., Polychronakia, N., Stamblere, T., Tanakaf, A., Tselepides, F., Thingstadg, (2005), *Deep-Sea Research II*, 52, pp. 2944–2960
- Psarra, S., A. Tselepides, and L. Ignatiades, (2000), Primary productivity in the oligotrophic Cretan Sea (NE Mediterranean): seasonal and interannual variability, *Progress in Oceanography*, 46, 187-204.
- Petihakis, G., Triantafyllou, G., Allen, J.I., Hoteit, I. and Dounas, C., (2002a.) Modelling the Spatial and Temporal Variability of the Cretan Sea Ecosystem. *Journal of Marine Systems*, 36(3-4): 173-196.
- Rendell, A.R., C.J. Ottley, T.D. Jickells, and R.M. Harrison, (1993), The atmospheric input of nitrogen species to the North Sea, *Tellus*, 45B, 53-63.
- Roether, W., Manca, B.B., Klein, B., Bregant, D., Georgopoulos, D., Beitzel, V., Kovacevic, V. and Luchetta, A., 1996. Recent changes in Eastern Mediterranean deep waters. *Science*, 271: 333-335.
- Sievering, H., J. Boatman, M. Luria, and C.C. Van Valin, (1989), Sulfur dry deposition over the western North Atlantic: the role of coarse aerosol particles, *Tellus*, 41B, 338-343.
- Smith, R. L., (1990), *Ecology and field biology*. 4th ed. Harper Collins Publishers, New York, NY.

- Spokes, L.J., S.G. Yeatman, S.E. Corneli, and T.D. Jickells, (2000), Nitrogen deposition to the eastern Atlantic Ocean. The importance of south-easterly flow, *Tellus*, 52B, 37-49.
- Theocharis, A., D., Georgopoulos, A., Lascaratos and K., Nittis, (1993), Water masses and circulation in the central region of the Eastern Mediterranean: Eastern Ionian, South Aegean and Northwest Levantine, 1986-1987, *Deep-Sea Research II*, 40, No. 6, pp. 1121-1142.
- Triantafyllou, G., Hoteit, I., Petihakis, G., Valavanis, V. and Pollani, A., (2002), Assimilating Ocean Color Data in a 3D Complex Marine Ecosystem Model by the Use of Reduced-Base Kalman Filter, Sixth International Marine Environmental Modeling Seminar proceedings, Trondheim Norway.
- Tselepides, A., S. Zivanovic and E. Dafnomili, (1993), Vertical distribution of chloroplastic pigments and nutrients along a transect in the Cretan Sea: ecological implications. In Proc. Of the 4th National Symposium on Oceanography and Fisheries, Rhodes isl., Greece, 26-29 April pp. 77-80.
- Tselepides, A., V. Zervakis, T. Polychronaki, R. Danovaro, and G. Chronis, (2000), Distribution of nutrients and particulate organic matter in relation to the prevailing hydrographic features of the Cretan Sea (NE Mediterranean), *Progress in Oceanography*, 46, 113-142.
- Vollenweider, R. A., Rinaldi, A., Viviani, and Todini, E., (1996), Assessment of the state of eutrophication in the Mediterranean Sea. Mediterranean action plan technical reports series, No. 106.
- Vrekoussis, M., E., Liakakou, N., Mihalopoulos, M., Kanakidou, P., J., Crutzen, and J., Lelieveld, (2006), Formation of HNO<sub>3</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the anthropogenically-influenced eastern Mediterranean marine boundary layer, *Geophysical Research Letters*, 33, L05811
- Yacobi, Y.Z., T. Zohari, N. Kress, A. Hecht, R.D. Robarts, M. Waiser, A.M. Wood and W.K.W. Li, (1995), Chlorophyll distribution throughout the southeastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass, *Journal of Marine Systems*, 6, 179-189.