

Επιστημονική Επετηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	23-30	Θεσσαλονίκη 2012
--	----------------------	-------	---------------------

ΔΥΣΜΟΡΦΙΑ ΚΟΚΚΟΛΙΘΩΝ ΣΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΚΟΚΚΟΛΙΘΟΦΟΡΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ

Δήμιζα Μ.Δ.¹, Τριανταφύλλου Μ.Β.¹, και Κρασάκοπούλου Ε.²

¹ Τομέας Ιστ. Γεωλογίας-Παλαιοντολογίας, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ, Πανεπιστημιόπολις 15784, Αθήνα, mdimiza@geol.uoa.gr, mtriant@geol.uoa.gr

² Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας, ΕΛΚΕΘΕ, 19013 Ανάβυσσος, ekras@ath.hcmr.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταβολές των παραμέτρων του ανθρακικού συστήματος και η αύξηση της οξύτητας των ωκεάνιων υδάτων μπορούν να επηρεάσουν την ασβεστοποίηση των κοκκολιθοφόρων και τη διαδικασία της κοκκολιθογένεσης, προκαλώντας τη δημιουργία δύσμορφων κοκκόλιθων. Κοκκοσφαίρες με δύσμορφους κοκκόλιθους συλλέχθηκαν σε φυσικές συγκεντρώσεις κοκκολιθοφόρων από την περιοχή του Αιγαίου. Οι περισσότερες κοκκοσφαίρες ανήκουν στο είδος *Emiliania huxleyi*, ωστόσο βρέθηκαν ελάχιστα άτομα των ειδών *Rhabdosphaera clavigera*, *Syracosphaera pulchra*, *Discosphaera tubifera* και *Calcidiscus quadriperforatus*. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η κατανομή τους, σε συσχέτιση με τα στοιχεία του ανθρακικού συστήματος.

ABSTRACT

COCCOLITH MALFORMATION IN THE AEGEAN SEA

Dimiza M.D.¹, Triantaphyllou M.V.¹, and Krasakopoulou E.²

¹ Department of Historical Geology-Paleontology, Faculty of Geology & Geoenvironment, UOA, Panepistimiopolis 15784, Athens, mdimiza@geol.uoa.gr, mtriant@geol.uoa.gr

² Institute of Oceanography, HCMR, 19013 Anavyssos, ekras@ath.hcmr.gr

Ocean acidification and the related changes in seawater chemistry may disrupt calcification by coccolithophores and departure from the normal growth process causing malformed coccoliths. Coccospheres with malformed were coccoliths collected from different locations in the Aegean Sea. Although most of these specimens in our work are restricted to *Emiliania huxleyi*, scarce coccospheres of *Rhabdosphaera clavigera*, *Syracosphaera pulchra*, *Discosphaera tubifera* and *Calcidiscus quadriperforatus* have also been detected. In this study we discuss our observations on malformed distribution in relation to seawater carbonate chemistry.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κοκκολιθοφόρα αποτελούν μία από τις κύριες ομάδες θαλάσσιων φωτοσυνθετικών οργανισμών που δημιουργούν δομές από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃). Υπολογίζεται ότι λαμβάνουν κάθε χρόνο το 80% του άνθρακα που εισέρχεται στους ωκεανούς και ως κύριοι πρωτογενείς παραγωγοί μετατρέπουν το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) σε CaCO₃. Οι έντονες εποχικές συγκεντρώσεις των κοκκολιθοφόρων και κυρίως του είδους *Emiliania huxleyi* που συνήθως καλύπτουν εκατοντάδες χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα στις υποτροπικές και υποπολικές θαλάσσιες περιοχές (Iglesias-Rodriguez et al. 2002), παράγουν έως και ένα εκατομμύριο τόνους ασβεστίτη (Holligan et al. 1993). Σήμερα, στην περιοχή του Αιγαίου, το είδος *Emiliania huxleyi* επικρατεί, τόσο στα υδάτινα οικοσυστήματα, όσο και στα επιφανειακά ιζήματα του πυθμένα (Triantaphyllou et al. 2002, 2010, Dimiza et al. 2008, Malinverno et al. 2009). Η παρούσα εργασία ασχολείται με την επισήμανση και την καταγραφή των μορφολογικών αποκλίσεων σε είδη κοκκολιθοφόρων

από την περιοχή του Αιγαίου (ανατολική Μεσόγειος), σε συσχέτιση με τα στοιχεία του ανθρακικού συστήματος του θαλάσσιου περιβάλλοντος με την προοπτική της κατανόησης των σύγχρονων περιβαλλοντικών συνθηκών, αλλά και της επίδρασης των πιθανών κλιματικών τάσεων.

2 ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

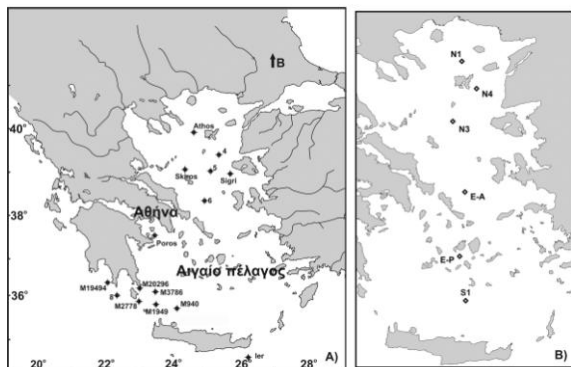
Για τη μελέτη των κοκκολιθοφόρων αξιοποιήθηκαν 43 δείγματα θαλάσσιου ύδατος (3 m έως 200 m βάθους), από 15 σταθμούς στο Αιγαίο πέλαγος (Σχ. 1α, Πίν. 1) Τα δείγματα συλλέχθηκαν κατά το χρονικό διάστημα 2007-2008. Για κάθε δείγμα διηθήθηκαν 2 l θαλασσινού νερού, με τη χρήση αντλίας κενού αέρος. Οι ηθμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου Millipore cellulose nitrate, με διάμετρο 47 mm και μέγεθος πόρων 0,45 μm.

Πίνακας 1. Στοιχεία σταθμών δειγματοληψίας κοκκολιθοφόρων από τα θαλάσσια περιβάλλοντα του Αιγαίου.

Σταθμός	Ημερομηνία	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Βάθος (m)	Θερμοκρασία (°C)	pH	Αλατότητα (psu)	
Ier	29/1/2007	34°26,52'N	26°11,40'E	5	19,08		39,17	
				20	19,09		39,17	
				50	19,10		39,17	
				100	19,10		39,17	
				150	19,11		39,17	
				200	19,03		39,15	+π
M940	27/2/2008	35°54,73'N	24°11,71'E	3	15,34	8,17	38,93	
M1949	27/2/2008	36°00,44'N	23°36,44'E	3	15,15	8,13	38,90	
M2778	27/2/2008	36°04,54'N	23°07,04'E	3	15,25	8,08	38,85	
M3786	27/2/2008	36°18,30'N	22°35,37'E	3	15,57	8,11	38,70	+π
M19494	29/2/2008	36°29,78'N	22°12,27'E	3	16,22	8,06	38,56	+π
M20296	29/2/2008	36°22,78'N	23°08,40'E	3	16,02	8,08	38,73	
Sigri	2/3//2008	39°09,62'N	25°48,39'E	5	14,80	8,21	39,20	+π
				15	14,80	8,19	39,20	
				30	14,80	8,20	39,20	π
				50	14,79	8,20	39,20	
				75	14,79	8,18	39,21	
				100	14,80		39,22	
Athos	3/3/2008	39°58,16'N	24°43,48'E	5	12,82		37,63	π
				15	12,40		37,84	+π
				30	13,35		38,41	π
				50	14,11		38,79	π
				75	14,17		38,84	π
				100	14,20		38,87	+π
Skiros	3/3/2008	39°07,29'N	24°27,94'E	5	14,21	8,15	38,91	π
				15	14,23	8,12	38,92	π
				30	14,28	8,04	38,98	π
				50	14,35	8,14	39,04	π
				75	14,36	8,17	39,05	
				100	14,36	8,02	39,05	+π
Poros	4/3/2008	37°35,85'N	23°33,57'E	5	14,58	8,17	38,77	π
				15	14,37	8,18	38,82	π
				30	14,13	8,17	38,86	π
				50	14,02	8,16	38,86	
				75	13,99	8,17	38,86	+π
				100	13,98	8,16	38,88	
				125	14,02	8,17	38,91	+π
				150	14,37	8,16	39,02	π
				200	14,24	8,19	39,00	
				4	14/10/2007	39°27,30'N	25°27,72'E	3
5	14/10/2007	39°04,80'N	25°12,84'E	3	20,13	8,22	39,19	+π
6	14/10/2007	38°23,98'N	25°01,28'E	3	19,53	8,25	39,11	
8	18/10/2007	36°11,79'N	22°29,05'E	3	22,23	8,21	38,74	

π: σε όλες τις κοκκοσφαίρες παρατηρήθηκε σκελετική παραμόρφωση των κοκκόλιθων, +π: σε ορισμένες κοκκοσφαίρες παρατηρήθηκε σκελετική παραμόρφωση των κοκκόλιθων

Για τη μελέτη των κοκκολιθοφόρων ένα τμήμα του ηθμού τοποθετήθηκε σε ειδικό χάλκινο δειγματοφορέα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Ακολούθησε επιμετάλλωση χρυσού με τη χρήση Auto Sputter Coater, Agar. Τα παρασκευάσματα μελετήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο -Scanning Electron Microscope τύπου Jeol JSM-6360 (Τομέας Ιστορικής Γεωλογίας και Παλιοντολογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών).



Σχήμα 1. Χάρτης σταθμών δειγματοληψίας Α) κοκκολιθοφόρων Β) στοιχείων του ανθρακικού συστήματος.

Οι μετρήσεις για το διαλυμένο ανόργανο άνθρακα προέρχονται από 6 σταθμούς στη περιοχή του Αιγαίου (Σχ. 1β) κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων δειγματοληψίας στο χρονικό διάστημα 2005-2006 (βλ. Triantaphyllou et al. 2010).

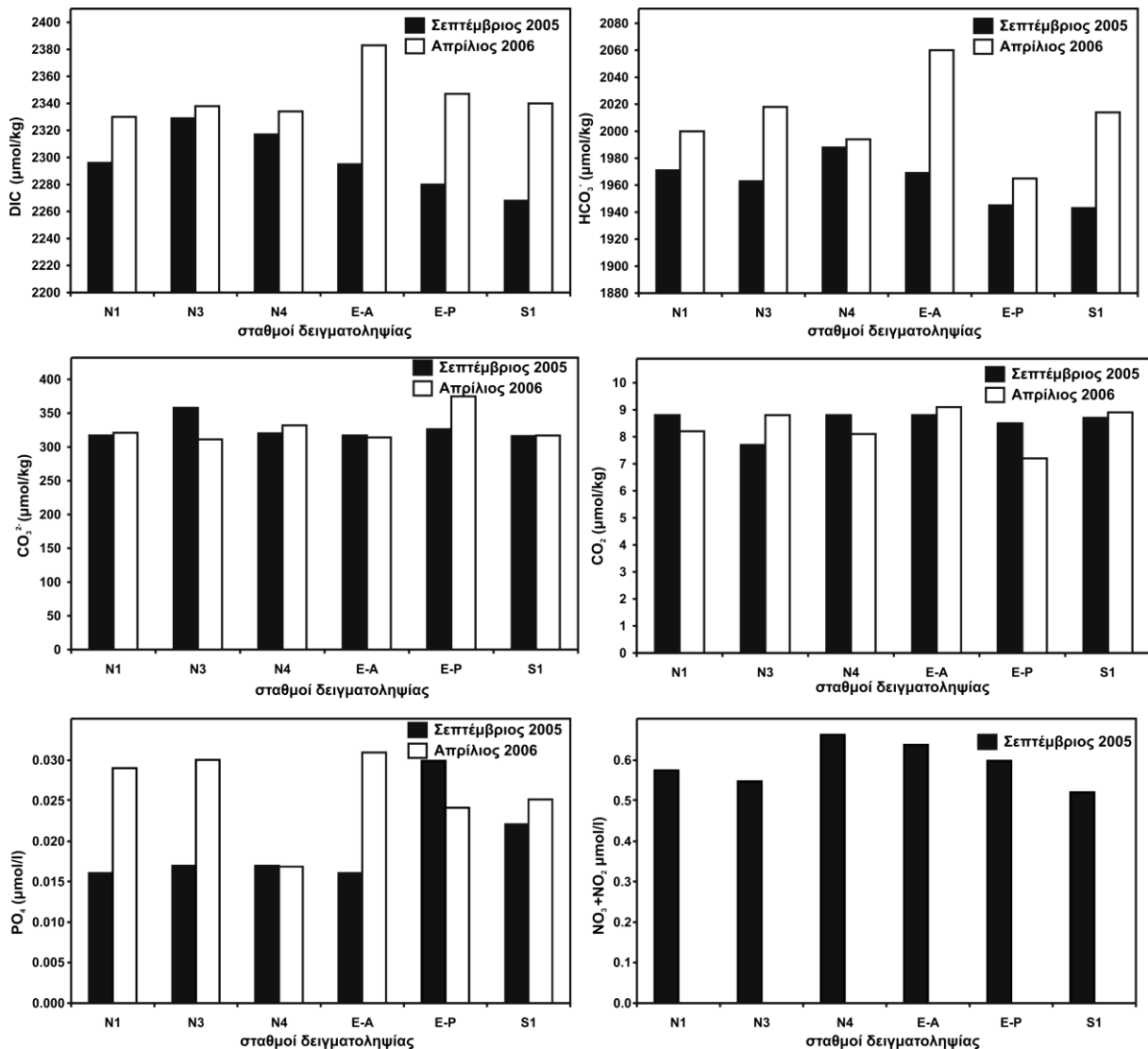
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Σύστημα ανθρακικών

Σύμφωνα με τα στοιχεία του ανθρακικού συστήματος (Σχ. 2), ο διαλυμένος ανόργανος άνθρακας (DIC) παρουσιάζει υψηλότερες περιεκτικότητες κατά τη δειγματοληψία της εαρινής περιόδου. Η αύξηση αυτή οφείλεται κατ' εξοχήν στις υψηλότερες περιεκτικότητες διπτανθρακικών ιόντων (HCO_3^-), καθώς για τα ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}) και το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) των δύο διαφορετικών περιόδων παρατηρούνται συγκρίσιμες τιμές (Σχ. 2). Η αναλογία των τριών μορφών διαλυμένου ανόργανου άνθρακα είναι σχετικά σταθερή με μέση τιμή $\text{HCO}_3^- = 85.5\%$, $\text{CO}_3^{2-} = 14.1\%$ και $\text{CO}_2 = 0.4\%$. Επίσης, ιδιαίτερα υψηλές μπό-

ρούν να χαρακτηριστούν οι τιμές κορεσμού του ασβεστίτη (μέση τιμή Ω calc.= 7.5) και του αραγωνίτη (μέση τιμή Ω arag.4.9).

ειδών και πολύ χαμηλές περιεκτικότητες $<1 \times 10^3$ cells/l (Πιν. 1). Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών παρουσίαζε κοκκόλιθους με μορφολογικές αποκλίσεις, που είναι



Σχήμα 2. Ραβδογράμματα με τις περιεκτικότητες των DIC, HCO₃⁻, CO₃²⁻ και του διαλυμένου CO₂ (Σεπτέμβριος/2005, Απρίλιος/2006).

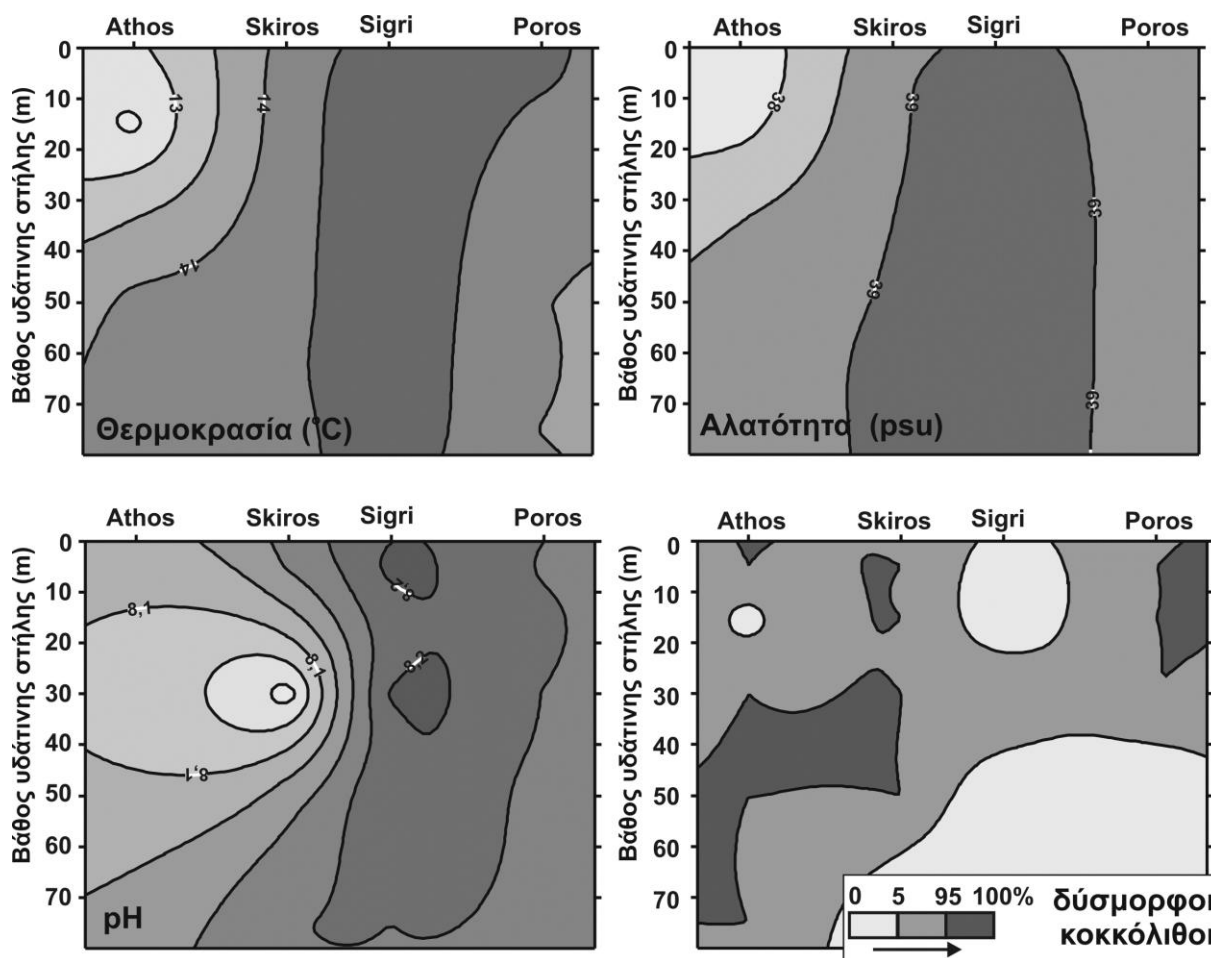
3.2 Σύνθεση και κατανομή των κοκκολιθοφόρων

Σύμφωνα με την ανάλυση της νανοχλωρίδας, υψηλές τιμές περιεκτικότητας των κοκκολιθοφόρων, ($>20 \times 10^3$ cells/l) παρατηρήθηκαν στα ανώτερα τμήματα της υδάτινης στήλης, κατά τη χειμερινή-αρχές της εαρινής περιόδου, ενώ μικρότερες τιμές ($<10 \times 10^3$ cells/l) καταγράφηκαν κατά τη θερινή-αρχές της φθινοπωρινής περιόδου (βλ. επίσης Triantaphyllou et al. 2010). Οι υψηλές τιμές περιεκτικότητας οφείλονται κατά κύριο λόγο στο είδος *Emiliania huxleyi*, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει ποσοστά συμμετοχής πάνω από 90%. Σημαντική, επίσης, ήταν η συμμετοχή των ολοκοκκολιθοφόρων, αντιπροσώπων της οικογένειας Rhabdosphaeraceae και του γένους *Syracosphaera*.

Κατά την ανάλυση του υλικού, στα δείγματα Sigri-30m, Athos-5-30-50-75m, Skiros-5-15-30-50 m και Poros-5-15-30-150m παρατηρήθηκε μικρός αριθμός

γνωστοί ως δύσμορφοι (malformed). Μικρός αριθμός κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους παρατηρήθηκε στα δείγματα 5-3m, Ier-200m, M19494 και M3786, Sigri-5m, Athos-15-100m, Skiros-100m και Poros-75-125m (Πιν. 1).

Προκειμένου να μελετηθεί η πιθανή επίδραση των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη μορφολογία των κοκκόλιθων κατασκευάστηκαν διαγράμματα σε χωρική κατανομή που απεικονίζουν τις παραμέτρους θερμοκρασία, αλατότητα, pH και του ποσοστού των κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους (Σχ. 3). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τη δειγματοληψία σε διάφορα βάθη της υδάτινης στήλης στους σταθμούς Sigri, Athos, Skiros και Poros (Μάρτιος/2008). Σύμφωνα με τις γραφικές απεικονίσεις παρατηρείται μία αντίστροφη σχέση μεταξύ των κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους με τις τιμές του pH.



Σχήμα 3. Διαγράμματα κατανομής θερμοκρασίας, αλατότητας, pH και του ποσοστού των κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους (Μάρτιος/2008).

3.3 Περιγραφή δυσμορφίας σε είδη κοκκόλιθων

Οι περισσότερες κοκκοσφαίρες με δύσμορφους κοκκόλιθους ανήκουν στο είδος *E. huxleyi*, ωστόσο βρέθηκαν ελάχιστα άτομα των ειδών *R. clavigera*, *S. pulchra*, *Discosphaera tubifera*, *Calcidiscus quadriperforatus*.

Οι κοκκόλιθοι του είδους *E. huxleyi* φέρουν απώτερη ασπίδα μερικώς ανυψωμένη με κρυσταλλικά στοιχεία σχήματος T και χαρακτηρίζονται από την παρουσία πλέγματος στην κεντρική περιοχή (Σχ. 4, εικ. 1, 2). Ο βαθμός ασβεστοποίησης των κρυσταλλικών στοιχείων του αγωγού της κεντρικής περιοχής ποικίλλει (Malinverno et al. 2008, Triantaphyllou et al. 2010). Τα άτομα με δύσμορφους κοκκόλιθους χαρακτηρίζονται από έντονη παραμόρφωση των στοιχείων T της απώτερης ασπίδας. Τα στοιχεία έχουν χάσει τη συμμετρία τους, ενώ συχνά δεν αλληλοσυνδέονται στην περιφέρεια της ασπίδας (Σχ. 4, εικ. 3, 4).

Οι κοκκόλιθοι του είδους *R. clavigera* φέρουν στενό περιθώριο. Η κεντρική περιοχή αποτελείται από αλληλεπικαλυπτόμενα ραβδοειδή κρυσταλλικά στοιχεία, ακανόνιστα διευθετημένα. Στους κοκκόλιθους της εξωθήκης καταλήγουν σε χαμηλό οξύληκτο κεντρικό άκρο, ενώ στους κοκκόλιθους της ενδοθήκης αναπτύσσονται διατάσσονται σπειροειδώς και καταλήγουν σε μια ελατόμορφη προεξοχή (Σχ. 4, εικ. 5). Στους δύσμορφους κοκκόλιθους τόσο τα κρυσταλλικά στοιχεία του περιθωρίου, όσο και τα κρυσταλλικά στοιχεία της

κεντρικής περιοχής έχουν χάσει τη συνοχή τους και δεν αλληλεπικαλύπτονται επαρκώς, αφήνοντας σε πολλές περιπτώσεις μικρά κενά στην επιφάνεια του κοκκόλιθου (Σχ. 4, εικ. 6, 7).

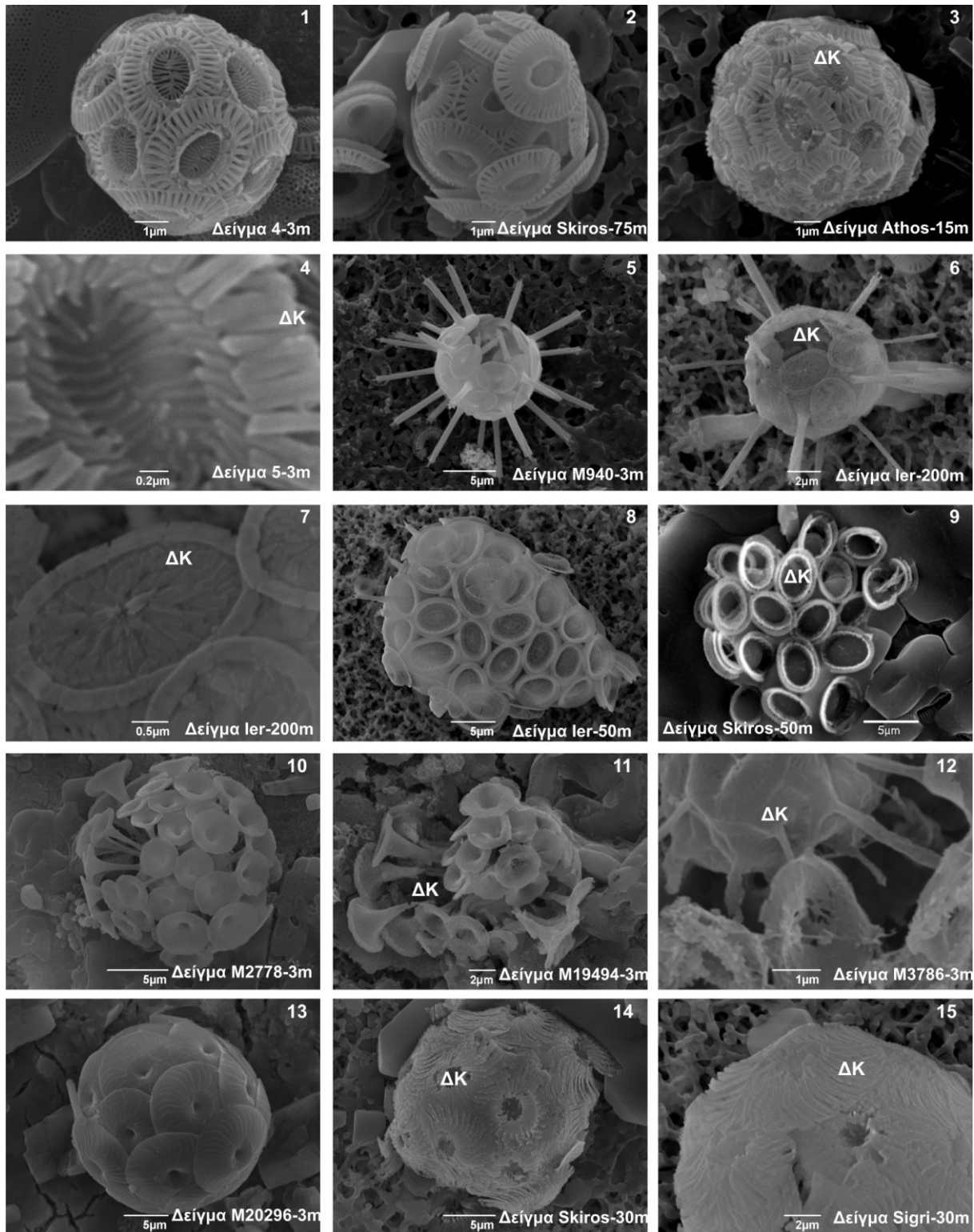
Οι κύριοι κοκκόλιθοι του είδους *S. pulchra* φέρουν τρεις ανεπτυγμένες στεφάνες. Η κεντρική περιοχή καλύπτεται από τρεις κύκλους ακτινωτά διευθετημένων ραβδοειδών κρυσταλλικών στοιχείων, τα οποία δεν εφάπτονται μεταξύ τους (Σχ. 4, εικ. 8). Στους δύσμορφους κοκκόλιθους τα κρυσταλλικά στοιχεία της απώτερης στεφάνης έχουν χάσει τη συνοχή τους και στη σύνδεσή τους με το περιθώριο του κοκκόλιθου παρατηρούνται μικρά κενά. Στους περισσότερους κοκκόλιθους τα στοιχεία της κεντρικής περιοχής απουσιάζουν, ενώ όπου παρατηρούνται στερούνται συμμετρίας και διάταξης (Σχ. 4, εικ. 9).

Το περιθώριο στους κοκκόλιθους του είδους *D. tubifera* συνίσταται από δύο κύκλους ραβδοειδών κρυσταλλικών στοιχείων. Η κεντρική περιοχή αποτελείται από ένα κύκλο ακτινωτά διευθετημένων κρυσταλλικών στοιχείων και ένα κύκλο ελασματοειδούς διάταξης με αλληλεπικαλυπτόμενα ραβδοειδή πεπλατυσμένα κρυσταλλικά στοιχεία που σχηματίζουν μια σαλπυγοειδή προεξοχή (Σχ. 4, εικ. 10). Οι δύσμορφοι κοκκόλιθοι παρουσιάζουν έντονη παραμόρφωση των κρυσταλλικών στοιχείων του κύκλου ελασματοειδούς διάταξης. Σε πολλές περιπτώσεις έχουν χάσει τη συνοχή τους με αποτέλεσμα το προεξέχον χείλος της

σαλπικοειδούς προεξοχής να εμφανίζεται διευρυμένο προς την απώτερη όψη (Σχ. 4, εικ. 11, 12).

Το είδος *C. quadriperforatus* φέρει μεγάλο μεγέθους (διάμετρος απώτερης ασπίδας 7-11 μm) κοκκόλιθους με δεξιόστροφη διάταξη των αλληλεπικαλυπτόμενων πεταλοειδών κρυσταλλικών στοιχείων της απώτερης ασπίδας. Στην απώτερη όψη, η κεντρική σπή

χαρακτηρίζεται από πεταλοειδή κρυσταλλικά στοιχεία, που τοποθετούνται περιφερειακά με κλίση προς το κέντρο (Σχ. 4, εικ. 13). Οι δύσμορφοι κοκκόλιθοι έχουν χάσει τα πεταλοειδή κρυσταλλικά στοιχεία της κεντρικής περιοχής. Τα κρυσταλλικά στοιχεία της απώτερης ασπίδας δεν παρουσιάζουν συνοχή και στα άκρα τους παρατηρείται έντονη διάβρωση (Σχ. 4, εικ. 14, 15).



Σχήμα 4. 1-4 *E. huxleyi* 5-7 *R. clavigera* 8-9 *S. pulchra* 10-12 *D. tubifera* 13-15 *C. quadriperforatus*. ΔΚ= κοκκοσφαίρες με δύσμορφους κοκκόλιθους.

4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία, κατά τη μελέτη φυσικών συγκεντρώσεων κοκκολιθοφόρων από την περιοχή του Αιγαίου καταγράφηκε σημαντικός αριθμός δειγμάτων στα οποία παρατηρήθηκε υψηλό ποσοστό κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους. Οι κοκκόλιθοι αυτοί είναι ανώμαλου σχηματισμού και δημιουργούνται εξαιτίας δυσλειτουργιών κατά τη διαδικασία της κοκκολιθογένεσης (Young & Westbroek 1991).

Η παρουσία ατόμων με δύσμορφους κοκκόλιθους είναι συχνό φαινόμενο σε τεχνητούς, αλλά και σε φυσικούς πληθυσμούς από τον Ινδικό, τον Ειρηνικό, τον Ατλαντικό ωκεανό και τη Μεσόγειο θάλασσα (Okada & Honjo 1975, Woellner et al. 1988, Kleijne 1990, Young & Westbroek 1991, Girardeau et al. 1993, Riebesell et al. 2000, Triantaphyllou et al. 2002, Dimiza et al. 2003, Rost & Riebesell 2004, Yang et al. 2004, Kahn & Aubry 2006, Langer et al. 2006). Στους φυσικούς πληθυσμούς, κοκκοσφαίρες με δύσμορφους κοκκόλιθους απαντώνται κυρίως στην ανώτερη ευφωτική ζώνη και σε σχετικά παράκτιες περιοχές. Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί σε μεγάλο αριθμό ειδών, όπως στα *E. huxleyi*, *Helicosphaera wallischi*, *H. carteri*, *Florisphaera profunda*, *Gephyrocapsa oceanica*, *R. glavigera*, *D. tubifera*, *Umbellosphaera irregularis*, *Umbilicosphaera sibogae*, *U. hulburtiana*, *Calcidiscus leptoporus* και με την παρούσα εργασία επισημάνθηκαν επιπλέον στα είδη *C. quadripforatus* και *S. pulchra*.

Παλαιότερα πολλοί ερευνητές (Okada & Honjo 1975, Kleijne 1990, Young & Westbroek 1991) είχαν συνδέσει το φαινόμενο της δυσμορφίας με έλλειψη των θρεπτικών συστατικών στοιχείων στα υδάτινα περιβάλλοντα. Ωστόσο, οι Riebesell et al. (2000) και Rost & Riebesell (2004) εξετάζοντας τεχνητούς πληθυσμούς, αλλά και φυσικές φυτοπλαγκτονικές συγκεντρώσεις του Ειρηνικού Ωκεανού, παρατήρησαν αύξηση του ποσοστού των δύσμορφων κοκκόλιθων στα είδη *E. huxleyi* και *G. oceanica* σε συνάρτηση με την αύξηση στα επίπεδα του CO₂. Η μελέτη τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση στα επίπεδα του ατμοσφαιρικού CO₂ προκαλεί σημαντικές αλλαγές στη χημεία των ανθρακικών στα επιφανειακά ύδατα των ωκεανών, επηρεάζοντας το pH. Οι αλλαγές αυτές επιδρούν στους μηχανισμούς εσωτερικά του κυττάρου, οι οποίοι ελέγχουν την παραγωγή των κοκκόλιθων κατά τη διαδικασία της κοκκολιθογένεσης και έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη δύσμορφων κοκκόλιθων. Πρόσφατα, στην ίδια κατεύθυνση οι Langer et al. (2006) με πειράματα σε κλώνους κοκκολιθοφόρων πιστοποίησαν ότι με τη μακροπρόθεσμη αύξηση του CO₂ δεν επηρεάζεται η ασβεστοποίηση στο είδος *C. pelagicus*, ενώ μείωση του ποσοστού ασβεστοποίησης με σημαντική αύξηση της παρουσίας ατόμων με δύσμορφους κοκκόλιθους παρατηρείται στο είδος *C. leptoporus*.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της παρούσας μελέτης, στην περιοχή του Αιγαίου οι τιμές κορεσμού του ασβεστίτη και του αραγωνίτη χαρακτηρίζονται ως υψηλές, ενώ και οι περιεκτικότητες των τριών μορφών διαλυμένου ανόργανου άνθρακα καταγράφονται στα φυσιολογικά επίπεδα. Οι περισσότερες κοκκοσφαίρες με δύσμορφους κοκκόλιθους πιστοποιήθηκαν στις περιοχές των μικρότερων τιμών του pH. Είναι ήδη γνωστό

ότι, οι μεταβολές στο θαλάσσιο pH επιδρούν σε μία σειρά φυσιολογικών παραμέτρων των μονοκύτταρων οργανισμών όπως στο ενδοκυτταρικό pH (Nimer et al. 1994), στην πρόσληψη των νιτρικών (Thoresen et al. 1984) και στο δυναμικό της κυτταρικής μεμβράνης (Felle 1994). Η σταθερότητα στο δυναμικό της κυτταρικής μεμβράνης είναι αποτέλεσμα ενός περίπλοκου ιοντικού μηχανισμού ισορροπίας. Αιφνίδιες μεταβολές του θαλασσινού pH είναι πιθανόν να ανατρέψουν αυτήν την ιοντική ισορροπία και συνεπώς να μεταβάλουν την ιοντική σύνθεση και τη δυναμική του κυττάρου. Επιπροσθέτως, η ενδοκυτταρική ιοντική δυναμική λαμβάνει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των κοκκόλιθων (Henriksen et al. 2004) και πιθανόν να είναι η κύρια υπεύθυνη για τα φαινόμενα μορφολογικών ανωμαλιών και ειδικότερα την εμφάνιση δύσμορφων κοκκόλιθων (Langer et al. 2006).

Στο μέλλον εικάζεται ότι, οι χημικές μεταβολές στους ωκεανούς που θα προκληθούν από την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO₂ θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH (προκαλώντας την αύξηση της οξύτητας των υδάτων), την αύξηση στο διαλυμένο CO₂, τη μείωση της συγκέντρωσης των CO₃²⁻ και την αύξηση στα HCO₃⁻ (Caldeira & Wickett 2003). Οι μεταβολές αυτές αναμένεται να επιφέρουν αλλαγές στην ασβεστοποίηση των κοκκολιθοφόρων (Triantaphyllou et al. 2010, Irie et al., 2010) που συνδέονται με μεταβολές στη μορφολογία των κοκκόλιθων και στην ανάπτυξη της δυσμορφίας. Η αλήθεια είναι ότι, στο παρελθόν υπήρξαν περίοδοι όπου το CO₂ παρουσίασε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα, όπως για παράδειγμα στο ανώτερο Κρητιδικό και στο όριο Ηώκαινου/Παλαιόκαινου. Σύμφωνα με στοιχεία των κοκκολιθοφόρων σε αυτές τις περιόδους οι κοκκόλιθοι ήταν μεγάλου μεγέθους και υψηλής ασβεστοποίησης (Perch-Nielsen 1985a,b). Δύσμορφοι κοκκόλιθοι δεν έχουν καταγραφεί ούτε κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο όπου τα επίπεδα του CO₂ ανήλθαν σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα. Η έλλειψη των δύσμορφων κοκκόλιθων δεν θα μπορούσε να αποδοθεί στην επιλεκτική διάλυση τους στην υδάτινη στήλη –παρόλο που είναι πιο ευάλωτοι- δεδομένου ότι η διάλυση είναι μια συνεχής διαδικασία και συνεπώς επηρεάζει εξίσου δύσμορφους και κανονικούς κοκκόλιθους (Langer et al. 2006). Άλλωστε και η μελέτη της Kleijne (1990) σε δείγματα ιζηματοπαγίδων υποστηρίζει ότι οι δύσμορφοι και οι κανονικοί κοκκόλιθοι υπόκειντο εξίσου στη διάλυση. Οπότε, η απουσία ανιχνεύσιμης μεταβολής στη μορφολογία των κοκκόλιθων υποστηρίζει ότι η προσαρμογή στα μεταβαλλόμενα επίπεδα του CO₂ έλαβε χώρα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εντούτοις, η ουσιαστική διαφορά των προηγούμενων περιπτώσεων με τη σημερινή εποχή σημειώνεται στο ρυθμό μεταβολής του CO₂. Στο παρελθόν οι μεταβολές έλαβαν χώρα σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου το σύστημα του άνθρακα στους ωκεανούς είχε το χρόνο να αλληλεπιδράσει με τα ιζήματα και να παραμείνει σε ισορροπία. Αντίθετα, από τη βιομηχανική επανάσταση έως σήμερα ο ρυθμός αύξησης του CO₂ είναι 10 και ενδεχομένως 100 φορές υψηλότερος από οποιοδήποτε περίοδο στα προηγούμενα 420.000 έτη (Falkowski et al. 2000). Οπότε σημαντικό στοιχείο στη σύγχρονη έρευ-

να των κοκκολιθοφόρων παραμένει η εξέταση της δυνατότητας προσαρμογής και εξέλιξης, σύμφωνα με τη γενετική τους σύνθεση, στις επερχόμενες κλιματικές αλλαγές.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τη μελέτη φυσικών συγκεντρώσεων κοκκολιθοφόρων από την περιοχή του Αιγαίου καταγράφηκε σημαντικός αριθμός δειγμάτων υψηλού ποσοστού κοκκοσφαιρών με δύσμορφους κοκκόλιθους που αποτελεί ένδειξη της επιρροής των διακυμάνσεων του ανθρακικού συστήματος στη μορφολογία των κοκκόλιθων. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας σε συνδυασμό με προηγούμενες μελέτες στην περιοχή (Triantaphyllou et al. 2002, Dimiza et al. 2003) καταγράφουν και επισημαίνουν τη συστηματική παρουσία, για τα τελευταία χρόνια, της δυσμορφίας σε κοκκολιθοφόρα είδη φυσικών συγκεντρώσεων στην περιοχή του Αιγαίου. Η συστηματική και λεπτομερής περαιτέρω έρευνα του ανθρακικού συστήματος σε συνδυασμό με τη μορφολογία των κοκκολιθοφόρων στην περιοχή αναμένεται να συντελέσει σε μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά την έκταση και την εξέλιξη του φαινομένου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος MedEcos: Decadal scale variability of the **Mediterranean Ecosystem**, EraNet, MarinERA, European marine RTD programme. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των κοκκολιθοφόρων συλλέχθηκε κατά τη διάρκεια ερευνητικών πλύων στα πλαίσια των προγραμμάτων PENED01/100, POSEIDON και SESAME και κατά τη διάρκεια του πλόα METEOR M71-3 (Ιανουάριος/07). Τα δεδομένα του ανθρακικού συστήματος του Αιγαίου πελάγους συλλέχθηκαν στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων Eu Mater και Eur-Oceans.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Caldeira, K. & Wickett, M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425, 365.

Caldeira, K. & Wickett, M.E., 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J Geophys Res*, 110, C09S04, doi:10.1029/2004JC002671.

Dimiza, M.D., Triantaphyllou, M.V. & Dermitzakis, M.D., 2003. *Emiliania huxleyi* dynamics in the summer coccolithophore assemblages of Andros island (Middle Aegean Sea) coastal environments: First results. "Coccolithophores 2003" INA Workshop on extant Coccolithophorid research, *GAIA*, 11, 47-50.

Dimiza, M.D., Triantaphyllou, M.V. & Dermitzakis, M.D., 2008. Seasonality and ecology of living coccolithophores in E. Mediterranean coastal environments (Andros Island, Middle Aegean Sea). *Micropaleontology*, 54, 159-175.

Falkowski, P., Scholes, R.J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Höglberg, P., Linder, S., Mackenzie, F.T., Moore III, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V. & Steffen, W., 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system. *Science*, 290, 291-296.

Felle, H.H., 1994. The H⁺/Cl⁻ symporter in root-hair cells of *Sinapis alba* (an electrophysiological study using ionselective microelectrodes). *Plant Physiology*, 106, 1131-1136.

Giraudeau, J., Monteiro, P.M.S. & Nikodemus, K., 1993. Distribution and malformation of living coccolithophores in the northern Benguela upwelling system off Namibia. *Mar Micropal*, 22, 93-110.

Henriksen, K., Stipp, S.L.S., Young, J. & Marsh, M.E., 2004. Biological control on calcite crystallization: AFM investigation of coccolith polysaccharide function. *Am Mineral*, 89, 1586-1596.

Holligan, P.M., Fernández, E., Aiken, J., Balch, W.M., Boyd, P., Burkill, P.H., Finc, M., Groom, S.B., Malin, G. Müller, K., Purdie, D.A., Robinson, C., Trees, C.C., Turner, S.M. & Van Der Wal, P., 1993. A biogeochemical study of the coccolithophore, *Emiliania huxleyi*, in the North Atlantic. *Glob Biogeochem Cycles*, 7, 879-900.

Iglesias-Rodríguez, M.D., Saez, A.G., Groben, R., Edwards, K.J., Batley, J., Medlin, L. & Hayes, P., 2002. Polymorphic microsatellite in global populations of the marine coccolithophorid *Emiliania huxleyi*. *Mol Ecol*, 2, 495-497.

Irie, T., Bessho, K., Findlay, H.S. & Calosi, P., 2010. Increasing Costs Due to Ocean Acidification Drives Phytoplankton to Be More Heavily Calcified: Optimal Growth Strategy of Coccolithophores. *PLoS ONE*, 5(10), e13436, doi:10.1371/journal.pone.0013436.

Jordan, R.W. & Winter, A., 2000. Living microplankton assemblages off the coast of Puerto Rico during January-May 1995. *Mar Micropal*, 39, 113-130.

Kahn, A. & Aubry, M.-P., 2006. Intraspecific morphotypic variability in the Family Rhabdosphaeraceae. *Micropaleontology*, 52(4), 317-342.

Kleijne, A., 1990. Distribution and malformation of extant calcareous nannoplankton in the Indonesian Seas. *Mar Micropal*, 16, 293-316.

Langer, G., Geisen, M., Baumann, K.-H., Kläs, J., Riebesell, U., Thoms, S. & Young, J.R., 2006. Species-specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry. *Geochim Geophys Geosys*, 7, Q09006, doi:10.1029/2005GC00122.

Malinverno, E., Dimiza, M.D., Triantaphyllou, M.V., Dermitzakis, M.D. & Corselli, C., 2008. Coccolithophores of the Eastern Mediterranean sea: A look into the marine microworld. ION editions, 188pp.

Malinverno, E., Triantaphyllou, M.V., Stavrakakis, S., Ziveri, P. & Lykousis, V., 2009. Seasonal and spatial variability of coccolithophore export production at the South-Western margin of Crete (Eastern Mediterranean). *Mar Micropal*, 71, 131-147.

Nimer, N.A., Brownlee, C. & Merrett, M.J., 1994. Carbon dioxide availability, intracellular pH and growth rate of the coccolithophore *Emiliania huxleyi*. *Mar Ecol Prog Ser*, 109, 257-262.

Okada, H. & Honjo, S., 1975. The distribution of oceanic coccolithophorids in marginal seas along the western Pacific Ocean and in the Red Sea. *Mar Biol*, 31, 271-285.

Perch-Nielsen, K., 1985a. Mesozoic calcareous nannofossils. In: *Plankton Stratigraphy*, H.M. Bolli, J.B. Saunders & K. Perch-Nielsen, eds, Cambridge University Press, 329-426.

Perch-Nielsen, K., 1985b. Cenozoic calcareous nannofossils. In: *Plankton Stratigraphy*, H.M. Bolli, J.B. Saunders & K. Perch-Nielsen, eds, Cambridge University Press, 427-555.

Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebe, R.E. & Morel, F.M., 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 407(6802), 364-367.

Rost, B. & Riebesell, U., 2004. Coccolithophores and the bio-

- logical pump: responses to environmental changes. In: Coccolithophores – From Molecular Processes to Global Impact, Thierstein, H.R., Young, J.R., eds, Heidelberg, Springer-Verlag, 99-125.
- Thoresen, S.S., Clayton Jr., J.R. & Ahmed, S.I., 1984. The effect of short-term fluctuations in pH on NO₃ uptake and intracellular constituents in *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve. *J Exp Mar Biol Ecol*, 83, 149–157.
- Triantaphyllou, M.V., Dermitzakis, M.D. & Dimiza, M.D., 2002. Holo- and Heterococcolithophorids (Calcareous Nannoplankton) in the Gulf of Korthi (Andros island, Aegean Sea, Greece) during late summer 2001. *Rev Paleobiol*, 21(1), 353-369.
- Triantaphyllou, M.V., Dimiza, M.D., Krasakopoulou, E., Malinverno, E., Lianou, V. & Souvermezoglou, E., 2010. Seasonal control on *Emiliania huxleyi* coccolith morphology and calcification in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean). *Geobios*, 45, 99–110.
- Woellner, R.N., Blackwelder, P.L., Peterson, L.C. & Lynn, M.J., 1988. Monsoonal upwelling in the NW Indian Ocean: Modern and Late Quaternary coccolithophorid assemblages. *Abstracts with Programs-Geological Society of America* 20, 252, Boulder.
- Yang, T.-N., Wei, K.-Y., Chen, M.-P., Ji, S.-J., Gong, G.-C., Lin, F.-J. & Lee, T.-Q., 2004. Summer and winter distribution of coccolithophores in East China Sea. *Micropaleontology*, 50(suppl.1), 157-170.
- Young J.R. & Westbroek P., 1991. Genotypic variation in the Coccolithophorid species *Emiliania huxleyi*. *Mar. Micropal*, 18, 5-23.