

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΑΛΑΙΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΑΛΑΙΟΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟ ΝΑ-ΚΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ*

M. ΓΕΡΑΓΑ Μ¹, Σ. ΤΣΑΪΛΑ-ΜΟΝΟΠΩΛΗ², Γ. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ¹, Χ. ΙΩΑΚΕΙΜ³, Γ. ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΣ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παραγοντική ανάλυση εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα των μικροπαλαιοντολογικών αναλύσεων από ιζήματα δύο πυρήνων, οι οποίοι συλλέχθηκαν από το ΝΑ-ικό Αιγαίο. Η εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στην πλαγκτονική μικροπανίδα καθόρισε 5 παράγοντες. Δύο από τους παράγοντες αυτούς σχετίζονται με την επιφανειακή θαλάσσια θερμοκρασία και συγκρίνονται με τις τιμές του δ¹⁸O, ανέδειξαν μια σειρά κλιματικών μεταβολών μεγάλης και μικρής διάρκειας, τα τελευταία 45000χρόνια. Οι υπόλοιποι τρεις παράγοντες ανέδειξαν τα χρονικά διαστήματα, όπου η θαλάσσια παραγωγικότητα ενοείται από την άνοδο του πυκνοκλινούς στην ευφωτική ζώνη, την αύξηση των ποτάμιων εισροών και την καλή μίξη των επιφανειακών νερών. Η εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στη βενθονική μικροπανίδα καθόρισε 5 παράγοντες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν 5 στάδια εμπλουτισμού του οικοσυστήματος του πυθμένα.

ABSTRACT

Factor analysis was subjected to high resolution microfauna data. The microfauna data (planktonic and benthic foraminifera) comes from analyses of two gravity cores selected from SW Aegean Sea and concerns the last 45000yrs. The two cores contain the sapropelic sequence of S1 which appears in two layers S1a and S1b and the sapropelitic sequence of S2. The results of the analyses have been high accurate dated by the AMS method.

The application of factor analysis to planktonic forams revealed 5 factors. Two of these factors cluster planktonic species which are indicators of temperature changes such as *Gs. ruber*, *Gs. sacculifer*, *Or. universa* and *Globigerinella* which are indicative of warm and oligotrophic waters and *T. quinqueloba* and *Gr. scitula* which are indicative of cold waters. So these factors can be considered as sea surface temperature depended. The variation of their scores compared with the δ¹⁸O data showed a sequence of palaeoclimatic changes of long and short duration, which may correspond to global events such as Heinrich 1, 2, 3, 4 and Younger Dryas. The other three factors cluster planktonic species which prefer high eutrophicated waters, such as *Neogloboquadrina*, *G. inflata* and *G. bulloides*. The variation of their scores revealed the periods where the marine productivity was improved by (i) the shoaling of the pycnocline within the euphotic zone and the subsequent development of Deep Chlorophyll Maximum (DCM) layer, (ii) the increase of water outflows and (iii) the well mixed surface waters. Furthermore, factor analysis showed that the organic material of S1 is related more to the enhanced river outflows, than that of S2 which seems to be related with the development of DCM layer.

The application of the factor analysis to benthonic forams revealed 5 factors, which appear to correspond to five stages of bottom water enrichment. The 1st factor cluster epifauna species with high oxygen demands such as *H. elegans*, *Asterigerinata*, *Valvulineria*, *Rosalina*, Miliolidae, *Nonion* spp. and *Cassidulina* spp. The variation of the scores showed that the last 45kyrs SW Aegean Sea was characterized by well oxidized bottom waters except of the periods of sapropel deposition. When the trophic level of the sea bottom increases such as occurs at the deposition of S2, the dominated benthic fauna is represented by the 2nd factor with species as *Cibicides* spp., *Uvigerina* spp. and *Cassidulina* spp. Species such as *Gyroidina* spp., *Uvigerina* spp., *Bulimina* spp. and *Chilostomela* spp. are represented by the 4th factor, which indicates environments of reduced oxygen supply and/or increased organic flows, such those which developed during the interruption of the sapropelic deposition of S1.

Shallow infauna species such as *Bolivina* spp. and *B. marginata* and deep infauna species such as *Fursenkoina* spp. are represented by the 3th factor, which indicates dysoxic environments such those which developed exactly before the deposition of S1a and S1b.

* CONTRIBUTION OF FACTOR ANALYSIS TO THE STUDY OF PALAEOCLIMATIC AND PALAEOCEANOGRAPHIC VARIABILITY IN SW AEGEAN SEA, GREECE

1. Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας (Ε. Θ.Α.Γ.Ε.Φ.Ω.), τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Πατρών

2. Τομέας Γενικής Θαλάσσιας Γεωλογίας & Γεωδυναμικής, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Πατρών

3. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε)

Deep infauna species such as *Cassidulinoides* spp. and *Globobulimina* spp. are represented by the 5th factor, which shows highly dysoxic, almost anoxic conditions, such those which developed at the begging of S1a and S1b.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: παραγοντική ανάλυση, τρηματοφόρα, παλαιοωκεανογραφία, παλαιοκλιματολογία

KEY WORDS: factor analysis, foraminifera, palaeoceanography, palaeoclimatology

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που αφορούν στην εξέλιξη των παλαιοκλιματικών και παλαιοωκεανογραφικών συνθηκών, που αναπτύχθηκαν στην Αν. Μεσόγειο τα τελευταία 45000 χρόνια, έτσι όπως αυτά προέκυψαν με την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης σε μικροπαλαιοντολογικά δεδομένα. Τα μικροπαλαιοντολογικά δεδομένα χαρακτηρίζονται από μικρό χρονικό βήμα (200 έως 500 χρόνια), αφορούν πλαγκτονικά και βενθονικά τρηματοφόρα και προέρχονται από ιζήματα δύο πυρήνων, Π40 και Π69, που συλλέχθηκαν στο ΝΔικό Αιγαίο. Με τη στατιστική ανάλυση επιτυγχάνεται αφενός ομαδοποίηση των ειδών (και γενών) των τρηματοφόρων βάσει των χαρακτηριστικών διαβίωσης τους και αφετέρου ο εντοπισμός παλαιοκλιματικών και παλαιοωκεανογραφικών μεταβολών με μαθηματικό τρόπο.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η εργασία βασίζεται στη μελέτη του πυρήνα Π40, μήκους 2m που συλλέχθηκε από το Μυρτώο Πέλαγος (36° 56,122, 24° 04,688) σε βάθος 850m και στη μελέτη του Π69 μήκους 2m, που συλλέχθηκε από το Δυτικό Κρητικό πέλαγος (36° 32,769, 24° 12,782), σε βάθος 630m. Η μελέτη των πυρήνων περιλαμβάνει: (i) μακροσκοπική περιγραφή, (ii) ανάλυση ιζηματογενών δομών, (iii) μετρήσεις του ποσοστού οργανικού άνθρακα (Corg), (iv) ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των πλαγκτονικών τρηματοφόρων σε 54 δείγματα ιζήματος του Π40 και σε 101 δείγματα του Π69, καθώς και ποσοτικό προσδιορισμό βενθονικών τρηματοφόρων σε 44 δείγματα του Π69 (v) μετρήσεις του δ¹⁸O στα κελύφη του πλαγκτονικού τρηματοφόρου *Globigerinoides ruber* σε 34 δείγματα του Π40 και σε 45 δείγματα του Π69. Η χρονολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκε σε 5 ραδιοχρονολογήσεις: τρεις στα ιζήματα του Π40 και 2 στα ιζήματα του Π69 (Πίνακας 1), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο της Beta Analytic INC με τη μέθοδο AMS.

Στα αποτελέσματα των μικροπαλαιοντολογικών αναλύσεων εφαρμόστηκε παραγοντική ανάλυση R-τύπου (Davis, 1986). Η παραγοντική ανάλυση εφαρμόστηκε σε δύο αρχικούς πίνακες δεδομένων: (α) στον πίνακα των ποσοστών των κυριότερων πλαγκτονικών ειδών, όπως αυτός προέκυψε από τις μικροπαλαιοντολογικές αναλύσεις των πυρήνων Π40 και Π69, συνοδευόμενος με το αντίστοιχο ποσοστό του οργανικού άνθρακα για κάθε δείγμα και (β) στον πίνακα των ποσοστών των κυριότερων βενθονικών ειδών και γενών, όπως αυτός προέκυψε από τις μικροπαλαιοντολογικές αναλύσεις του πυρήνα Π69, συνοδευόμενος με το αντίστοιχο ποσοστό οργανικού άνθρακα για κάθε δείγμα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

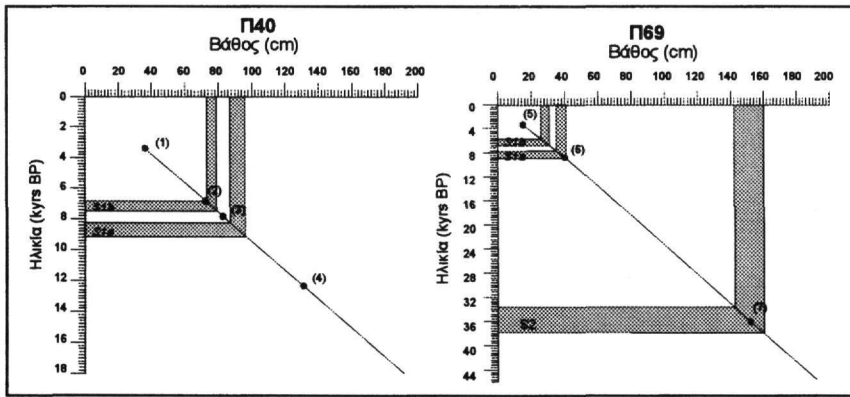
Ο πυρήνας Π40 αποτελείται από 5 λιθοφάσεις ημιπελαγικής ιλύος, εκ των οποίων η μία αντιπροσωπεύει τη σαπροπηλική ακολουθία του S1 (Geraga et al., 2000). Ο πυρήνας Π69 αποτελείται από 6 λιθοφάσεις κυρίως ιλύος εκ των οποίων η μία αντιπροσωπεύει τη σαπροπηλική ακολουθία του S1 και μία άλλη τη σαπροπηλική ακολουθία του S2 (Γεραγά κ.α., 2000). Η σαπροπηλική ιζηματογένεση του S1 αποτελείται και στους δύο πυρήνες από δύο στρώματα S1a και S1b. Βάσει των ραδιοχρονολογήσεων ο μέσος ρυθμός ιζηματογένεσης του Π40 υπολογίζεται στα 10,3cm/kyr ενώ του Π69 στα 4,3cm/kyr (Εικ. 1). Η βάση του Π40 χρονολογείται στα 18,3kyr ενώ του Π69 στα 45,5Kyr.

Πίνακας 1

| | A/α | Βάθος (cm) | Ηλικία (kyrs BP) |
|-----|------|------------|------------------|
| Π40 | (1)* | 36 | 3370 |
| | (2)* | 72,5 | 6830 |
| | (3)* | 82,5 | 7830 |
| | (4)* | 131 | 12350 |
| Π69 | (5)* | 15 | 3370 |
| | (6)* | 40 | 8750 |
| | (7)* | 152 | 36070 |

•Ηφαιστειακή τέφρα Z2

*AMS χρονολόγηση



Εικ. 1: Διαγράμματα, στα οποία παρουσιάζεται ο ρυθμός ιζηματογένεσης του Π40 και Π69 βάσει των ηλικιών του Πίνακα 1

Fig. 1: Sedimentation rates of P40 and P69, based on the radiochronological data showed at table 1

Στα ιζήματα των Π40 και Π69 εντοπίστηκαν τα εξής κύρια είδη πλαγκτονικών τρηματοφόρων: *Globigerinoides ruber*, *Gs. obliquus*, *Gs. sacculifer*, *Gs., trilobus*, *Gs. tenellus*, *Orbulina universa*, *Globigerinella aequilateralis*, *G. calida*, *Globigerina bulloides*, *G. falconensis*, *Globigerinita glutinata*, *Turborotalita quinqueloba*, *Globorotalia inflata*, *Gr. scitula*, *Gr.truncatulinoidea*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *N. pachyderma*.

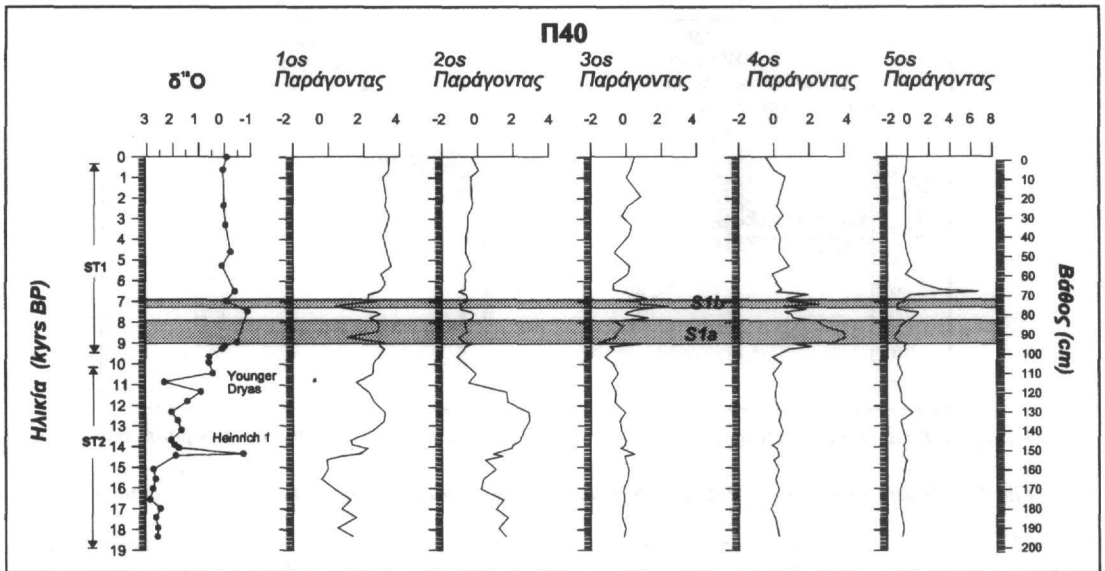
Στα ιζήματα του Π69 εντοπίστηκαν τα εξής κύρια είδη (και γένη) βενθονικών τρηματοφόρων *Articulina tubulosa*, *Asterigerinata* sp., *Bolivina spathulata*, *B. dilatata*, *B.alata*, *Bulimina costata*, *B. marginata*, *Cassidulina crassa*, *C.laevigata*, *C.subglobosa*, *Cassidulinoides bradyi*, *Chilostomella* sp., *Cibicides* spp., *Dentalina* sp., *Discorbis* spp., *Fursenkoina* sp., *Globobulimina* spp., *Gravelinopsis* sp., *Gyroidina* spp., *Elphidium* spp., *Hanzawaia* sp., *Hyalinea balthica*, *Hoegludina* sp., *Miliolidae*, *Nonion* sp., *Nonionella* sp., *Ophthalmidium acutumargo*, *Osangularia* sp., *Patellina* sp., *Planulina* sp., *Pullenia* sp., *Rosalina* sp., *Spirillina* sp., *Textularia* spp., *Trifarina* sp., *Uvigerina peregrina*, *Uv. aculeata*, *Uv. mediterranea*, και *Uv.auberiana*, *Vaginulina* spp.και *Valvulineria* sp.

Εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα πλαγκτονικά τρηματοφόρα

Ο πρώτος και στατιστικά σημαντικότερος παράγοντας εκφράζει το 35% της ολικής διακύμανσης και είναι διπολικού χαρακτήρα καθώς παρουσιάζει υψηλές θετικές στα *T. quinqueloba* και *Gr. scitula* (0,919 και 0,648 αντίστοιχα) και υψηλές αρνητικές φορτίσεις στα *Gs. ruber* (-0,687). Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει το 11,7% της ολικής διακύμανσης και παρουσιάζει συγχρόνως υψηλές θετικές φορτίσεις στα *N. dutertrei* (0,871) και *N. pachyderma* (0,832). Ο τρίτος παράγοντας εκφράζει το 10,3% της ολικής διακύμανσης και ομαδοποιεί με υψηλά θετικές φορτίσεις τα *Or. universa* (0,672), *Gs. sacculifer* (0,788) και *Globigerinella* spp (0,657). Ο τέταρτος παράγοντας εκφράζει το 9,0% της ολικής διακύμανσης και έχει διπολικό χαρακτήρα καθώς παρουσιάζει υψηλές θετικές φορτίσεις στα *G. bulloides* και *Corg* (0,625 και 0,761 αντίστοιχα) και αρνητικές στα *G. glutinata* (-0,667). Ο πέμπτος παράγοντας εκφράζει το 8,5% της ολικής διακύμανσης και παρουσιάζει υψηλές φορτίσεις μόνο στη *G. inflata* (0,931). Οι κατακόρυφες κατανομές των παραγοντικών τιμών παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3.

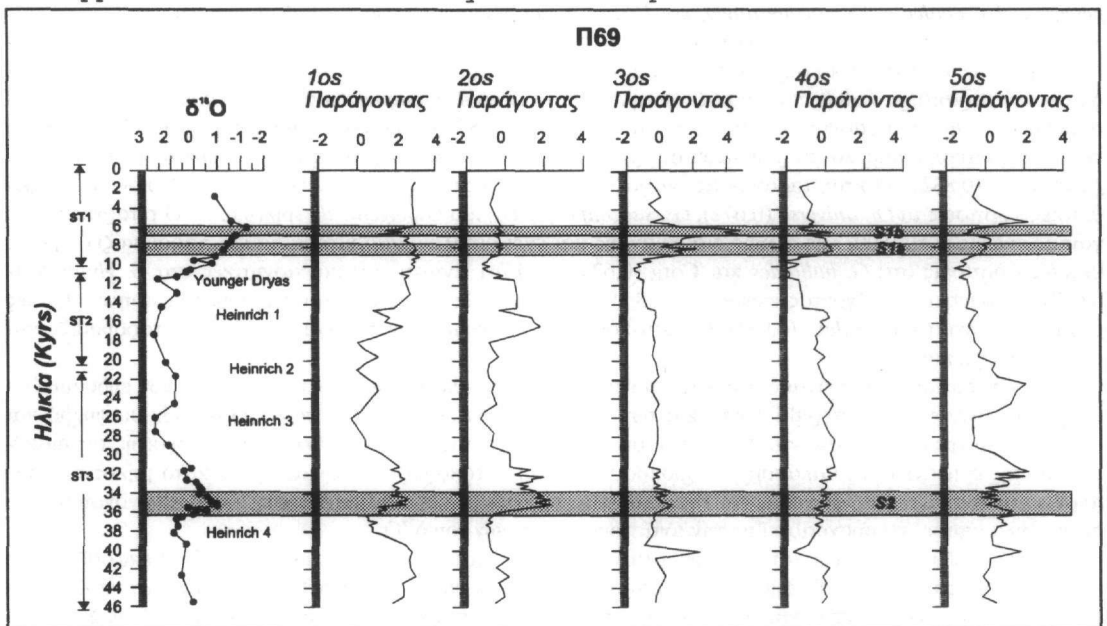
Ο πρώτος παράγοντας είναι διπολικός και εκφράζει την αντιπάθεια μεταξύ του *Gs. ruber* που ευδοκίμει σε θερμά και ολιγοτροφικά περιβάλλοντα και των *T. quinqueloba* και *G. scitula* που ευδοκίμουν σε ψυχρά και σχετικά ευτροφικά περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου ο $1^{ος}$ παράγοντας μπορεί να θεωρηθεί ως δείκτης της διακύμανσης της επιφανειακής θαλάσσιας θερμοκρασίας και η κατακόρυφη διακύμανση του κατά μήκος των δύο πυρήνων φαίνεται να συμφωνεί με την εγκαθίδρυση και την εξέλιξη μιας σειράς παγκόσμιων γεγονότων, ενώ παράλληλα μπορεί να συσχετιστεί με την αντίστοιχη των τιμών του $\delta^{18}O$.

Μεταξύ 18ka και 14ka η κατακόρυφη κατανομή του $1^{ου}$ παράγοντα κατά μήκος του Π40 εκφράζεται με γενικά χαμηλές τιμές. Το διάστημα αυτό αντιπροσωπεύεται με υψηλές τιμές $\delta^{18}O$ και φαίνεται να υποδηλώνει σχετικά ψυχρές κλιματικές συνθήκες λόγω της επικράτησης της τελευταίας παγετώδους περιόδου. Σταδιακή τάση αύξησης των τιμών του $1^{ου}$ παράγοντα και σύγχρονη μείωση των τιμών του $\delta^{18}O$ παρουσιάζεται μεταξύ 14ka και 10ka, γεγονός που αντιπροσωπεύει τη βελτίωση των κλιματικών συνθηκών στα τελευταία στάδια της τελευταίας παγετώδους περιόδου (Late Glacial). Εξάιρεση αποτελούν οι χαμηλές παραγοντικές τιμές στα 13,8ka και 11ka, οι οποίες συνοδεύονται με αυξήσεις των τιμών $\delta^{18}O$ και συμπίπτουν χρονικά με την επικράτηση των ψυχρών γεγονότων Heinrich 1 και Younger Dryas αντίστοιχα (Bond and Lotti, 1995).



Εικ. 2: Κατακόρυφες κατανομές των τιμών $\delta^{18}\text{O}$ και των παραγοντικών τιμών των αναλύσεων στα πλαγκτονικά τρηματοφόρα του Π40.

Fig. 2: Downcore variation of $\delta^{18}\text{O}$ values and factor scores, as they revealed after the application of factor analysis at the planktonic data of P40



Εικ. 3: Κατακόρυφες κατανομές των τιμών $\delta^{18}\text{O}$ και των παραγοντικών τιμών των αναλύσεων στα πλαγκτονικά τρηματοφόρα του Π69.

Fig. 3: Downcore variation of $\delta^{18}\text{O}$ values and factor scores, as they revealed after the application of factor analysis at the planktonic data of P69.

Τα τελευταία 10 χιλιάδες χρόνια οι υψηλές παραγοντικές τιμές υποδηλώνουν την επικράτηση των θερμών κλιματικών συνθηκών του Ολοκαίνου. Εξαιρέση αποτελούν οι μειωμένες τιμές του παράγοντα στα 8.9ka και 7.1ka, οι οποίες πιθανώς δικαιολογούνται από τις υψηλές συγκεντρώσεις των *T. quinqueloba*. Το είδος αυτό ευδοκμεί σε ψυχρά αλλά και σε νερά χαμηλής αλατότητας (Laugens, 1994), όπως αυτά που φαίνεται να αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια απόθεσης των S1a και S1b.

Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται επίσης και για την κατανομή των παραγοντικών τιμών του 1^{ου} παράγοντα και στον πυρήνα Π69. Μεταξύ 45 έως 21ka, ο 1^{ος} παράγοντας εκφράζεται από σχετικά υψηλές τιμές, οι οποίες συνοδεύονται από τις σχετικές χαμηλές τιμές του δ¹⁸O, του ισοτοπικού επιπέδου 3 (ST3). Οι παραγοντικές τιμές παρουσιάζονται μειωμένες στα 36-38ka, 26-28ka και 21ka. Τα διαστήματα αυτά, τα οποία συνοδεύονται από αυξήσεις των τιμών του δ¹⁸O, υποδηλώνουν την επικράτηση ψυχρότερων κλιματικών συνθηκών, οι οποίες συμπίπτουν χρονικά με τα γεγονότα Heinrich 4, 3 και 2 αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια του ST2, το οποίο σύμφωνα με τις τιμές του δ¹⁸O εντοπίζεται μεταξύ 21 έως 10ka, οι χαμηλότερες παραγοντικές τιμές παρουσιάζονται στα 18 και 13,8ka και συμπίπτουν χρονικά με την επικράτηση των (α) μέγιστου της τελευταίας παγετώδους περιόδου (Last Glacial Maximum) και (β) Heinrich 1 γεγονότων.

Οι υψηλές παραγοντικές τιμές κατά τη διάρκεια των τελευταίων 10 χιλιάδων χρόνων δείχνουν την επικράτηση των θερμών κλιματικών του Ολοκαίνου. Εξαιρέση αποτελεί το διάστημα 6-7ka, όπου οι χαμηλές παραγοντικές τιμές δικαιολογούνται, όπως και στην περίπτωση του Π40, από την επικράτηση χαμηλής αλατότητας νερών και την ακόλουθη αύξηση των *T. quinqueloba*, κατά τη διάρκεια απόθεσης του S1b

Ο 2^{ος} παράγοντας ομαδοποιεί τα *N. dutertrei* και *N. pachyderma*, τα οποία είναι δείκτες ανάπτυξης του DCM στρώματος, το οποίο δημιουργείται με την άνοδο του πυκνοκλινούς στην ευφορική ζώνη. Έτσι οι υψηλά θετικές παραγοντικές τιμές του παράγοντα αυτού εκφράζουν ανάπτυξη ευτροφικών συνθηκών με την αύξηση της θαλάσσιας πρωτογενούς παραγωγικότητας. Τέτοιες συνθήκες εντοπίζονται κατά μήκος του Π40 μεταξύ 11-18ka και κατά μήκος του Π69 μεταξύ 31-35ka και 11-18ka με μια μικρή διακοπή περίπου στα 14ka. Μάλιστα, η απότομη αύξηση των *Neogloboquadrina* στα 35ka φαίνεται πως συντέλεσε στην αύξηση παροχής οργανικού υλικού στον πυθμένα και στην απόθεση του S2 σαπροπηλού.

Ο 3^{ος} παράγοντας ομαδοποιεί τα θερμά είδη *Or. universa*, *Gs. sacculifer* και *Globigerinella* spp. και οι υψηλές θετικές παραγοντικές τιμές του δηλώνουν υψηλές θαλάσσιες επιφανειακές θερμοκρασίες. Η διακύμανση των παραγοντικών τιμών του θα πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με την αντίστοιχη του 1^{ου} παράγοντα.

Οι παραγοντικές τιμές του 3^{ου} παράγοντα στον πυρήνα Π40 παρουσιάζονται αρκετά αυξημένες λίγο πριν την έναρξη των S1a και S1b εκφράζοντας έτσι τη σπουδαιότητα της αύξησης της θαλάσσιας θερμοκρασίας στην απόθεση του S1. Στον πυρήνα Π69 ο 3^{ος} παράγοντας παρουσιάζει υψηλές τιμές καθόλη τη διάρκεια των S1a και S1b και όχι μόνο στην έναρξη των στρωμάτων αυτών. Το γεγονός αυτό πιθανώς δικαιολογείται από τις χαμηλές συγκεντρώσεις των *T. quinqueloba* στον Π69 σε σχέση με τις αντίστοιχες στον Π40. Επιπλέον υψηλές παραγοντικές τιμές εντοπίζονται στον Π69 περίπου στα 40ka. Το γεγονός αυτό πιθανώς να αντιστοιχεί στην επικράτηση κάποιου θερμού σύντομου γεγονότος (interstadial) των κύκλων Dansgaard, λίγο πριν την εγκαθίδρυση του γεγονότος Heinrich 4 (Bond and Lotti, 1995).

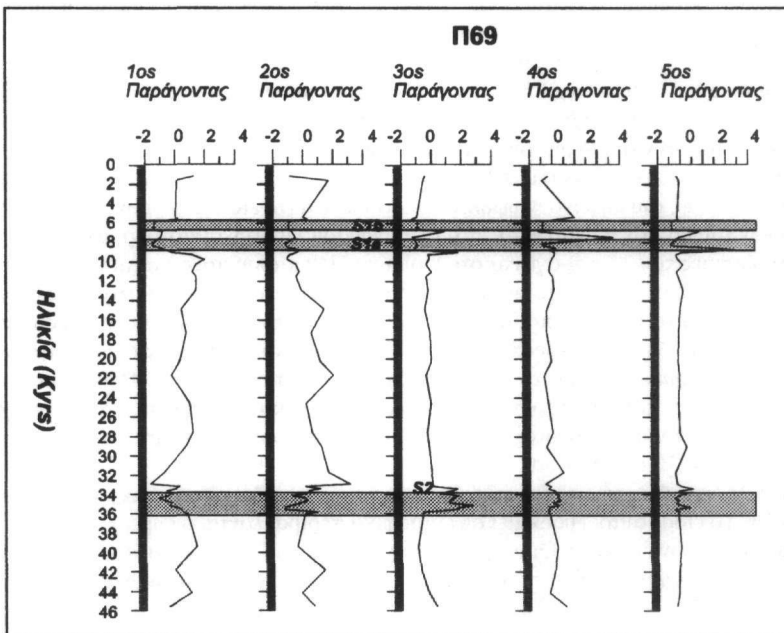
Ο 4^{ος} παράγοντας εκφράζει την υψηλή συσχέτιση που παρουσιάζει το οργανικό υλικό (Corg) με το ποσοστό των *G. bulloides*. Το είδος αυτό, ευδοκμεί σε ευτροφικά περιβάλλοντα, όπως π.χ. αυτά που αναπτύσσονται με την αύξηση των ποτάμιων εισροών. Οι υψηλές παραγοντικές τιμές κατά τη διάρκεια απόθεσης των S1a και S1b, στους Π40 και Π69 δείχνει ότι η σαπροπηλική ιζηματογένεση του S1 ευνοήθηκε με την αυξημένη είσοδο θρεπτικών συστατικών στην υδάτινη στήλη από τις υψηλές ποτάμιες εισροές της περιόδου εκείνης. Ο παράγοντας αυτός δεν παρουσιάζει ανάλογη αύξηση κατά την απόθεση του S2, δείχνοντας ότι ο μηχανισμός αύξησης της παραγωγικότητας στην υδάτινη στήλη και ακολούθως της παροχής οργανικού υλικού στον πυθμένα, κατά τη διάρκεια του S2, δεν συνδεόταν μόνο με την είσοδο θρεπτικών συστατικών στην υδάτινη στήλη από ποτάμιες εισροές, όπως στην περίπτωση του S1. Οι ελάχιστες τιμές του 4^{ου} παράγοντα εντοπίζονται στον πυρήνα Π69 περίπου στα 40ka και μεταξύ 10-14ka δηλώνοντας την επικράτηση των *G. glutinata*, ενός είδους που αν και έχει κοσμοπολίτικο χαρακτήρα εμφανίζει αντιθετικές τάσεις ως προς τα *G. bulloides* και Corg σε αυτόν τον παράγοντα.

Ο 5^{ος} παράγοντας τονίζει την κατανομή της *G. inflata* στους δύο πυρήνες. Το είδος αυτό συνδέεται με ψυχρά και ευτροφικά περιβάλλοντα. Ο ευτροφισμός σε αυτήν την περίπτωση συνδέεται με καλή ανάμιξη της υδάτινης στήλης. Έτσι οι υψηλές παραγοντικές τιμές του 5^{ου} παράγοντα αντιπροσωπεύουν περιόδους χαμηλής θερμοκρασίας και αυξημένης παραγωγικότητας, της οποίας ο μηχανισμός γένεσης είναι διαφορετικός από αυτούς που προτείνονται με τους παράγοντες 2 και 4 και γι' αυτό το λόγο οι διακυμάνσεις των παραγοντικών τιμών τους σχεδόν πουθενά δεν ταυτίζονται. Υψηλές θετικές παραγοντικές τιμές του 5^{ου} παράγοντα εντοπίζο-

νται και στους δύο πυρήνες Π40 και Π69 κατά τη διακοπή και ακριβώς μετά τη λήξη της σαπροπηλικής ζήματογένεσης του S1, γεγονός που δείχνει την επικράτηση καλά αναμειγνυμένων νερών. Επιπλέον στον Π69 υψηλές θετικές παραγοντικές τιμές εντοπίζονται μετά τη λήξη απόθεσης του S2 (30-32 ka), καθώς και μεταξύ 22-25ka και στα 40ka.

Εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα βενθονικά τρηματοφόρα

Ο πρώτος παράγοντας είναι ο σημαντικότερος στατιστικά, καθώς αυτός εκφράζει το 30,4% της ολικής διακύμανσης. Ο παράγοντας αυτός έχει διπολικό χαρακτήρα, καθώς παρουσιάζει υψηλές θετικές τιμές στα *H. elegans* (0,761), *Asterigerinata*, *Valvulineria*, *Rosalina* (0,844), *Miliolidae* (0,768), στα *Nonion* spp. (0,732) και στα *Cassidulina* spp. (0,509) και αρνητικές φορτίσεις στο ποσοστό του οργανικού άνθρακα (Corg) (-0,619). Ο δεύτερος παράγοντας εκφράζει το 17% της ολικής διακύμανσης και είναι επίσης διπολικού χαρακτήρα διαχωρίζοντας με υψηλά θετικές τιμές τα *Cibicides* spp. (0,862), *Uvigerina* spp. (0,567) και *Cassidulina* spp. (0,543) και με αρνητικές τιμές το ποσοστό του οργανικού άνθρακα (Corg) (-0,633). Ο τρίτος παράγοντας εκφράζει το 12% της ολικής διακύμανσης και ομαδοποιεί με υψηλά θετικές φορτίσεις τα *Bolivina* spp. (0,696), *B. marginata* (0,870) και *Fursenkoina* spp. (0,621). Ο τέταρτος παράγοντας εκφράζει το 8,7% της ολικής διακύμανσης και ομαδοποιεί με υψηλές θετικές φορτίσεις τα *Bulimina* spp. (0,770), *Chilostomella* sp. (0,650), *Gyroidina* spp. (0,809) και *Uvigerina* spp. (0,550). Ο πέμπτος παράγοντας εκφράζει το 7,2% της ολικής διακύμανσης και ομαδοποιεί με υψηλές θετικές φορτίσεις τα *Cassidulinoides* spp. (0,891) και *Globobulimina* spp. (0,871). Οι κατακόρυφες κατανομές των παραγοντικών τιμών παρουσιάζονται στην Εικ. 4.



Εικόνα 4: Κατακόρυφες κατανομές παραγοντικών τιμών των αναλύσεων στα βενθονικά τρηματοφόρα του Π69
 Figure 4: Downcore variation of $\delta^{18}O$ values and factor scores, as they revealed after the application of factor analysis at the benthonic data of P69

Στον 1^ο παράγοντα τα είδη που παρουσιάζουν θετικές φορτίσεις είναι κυρίως επιφανειακά είδη με υψηλές απαιτήσεις στις συγκεντρώσεις του O_2 στον πυθμένα. Ως εκ τούτου οι υψηλές θετικές παραγοντικές τιμές του παράγοντα θα πρέπει να θεωρούνται δείκτες υψηλών συγκεντρώσεων O_2 στον πυθμένα της λεκάνης. Η ισχυρή αντιπαθεία που επιδεικνύουν ως προς το ποσοστό του οργανικού άνθρακα (Corg) υποδηλώνει την αντιπαθεία τους σε δυσοξικά ή ανοξικά περιβάλλοντα, έτσι όπως αυτά φαίνεται να αναπτύσσονται, κατά τις αποθέσεις των σαπροπηλικών ακολουθιών. Οι τιμές του παράγοντα αυτού κατά μήκος του πυρήνα Π69, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές κατά την απόθεση των S1 και S2 και είναι υψηλές σε όλο το υπόλοιπο μήκος του πυρήνα. Η κατακόρυφη κατανομή τους δηλώνει, ότι η τροφοδοσία του πυθμένα με O_2 ήταν επαρκής για να καλύψει τις

ανάγκες του πυθμένα τα τελευταία 46ka με εξαίρεση τα χρονικά διαστήματα απόθεσης των S1 και S2.

Τα είδη που ομαδοποιεί με θετικές φορτίσεις ο 2^{ος} παράγοντας ευδοκούν στην επιφάνεια του πυθμένα με εξαίρεση τα *Uvigerina* spp. που παρουσιάζουν και τάσεις διαβίωσης και εντός των ιζημάτων του πυθμένα (Murray, 1991). Ως εκ τούτου η αντιπάθεια που επιδεικνύουν τα είδη αυτά ως προς το ποσοστό του οργανικού άνθρακα (Corg), υποδηλώνει την αντιπάθειά τους σε δυσοξικά ή ανοξικά περιβάλλοντα. Έτσι ο 2^{ος} παράγοντας επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ως δείκτης ανάπτυξης καλά οξυγονομένων νερών πυθμένα και για το λόγο αυτό οι παραγοντικές τιμές παρουσιάζονται μειωμένες κατά τη διάρκεια απόθεσης των S1 και S2 και σχετικά υψηλότερες στο υπόλοιπο μήκος του πυρήνα P69.

Παρόλο που και στους δύο παράγοντες (1 και 2) οι υψηλές θετικές παραγοντικές φορτίσεις εκφράζουν τις περιόδους επικράτησης υψηλών συγκεντρώσεων O₂ στον πυθμένα της λεκάνης και οι αρνητικές τις περιόδους επικράτησης χαμηλών συγκεντρώσεων O₂, οι διακυμάνσεις των κατακόρυφων κατανομών των παραγοντικών τιμών τους διαφέρουν μεταξύ τους στα εξής: (α) κατά τη διάρκεια απόθεσης του S2 οι παραγοντικές τιμές του 1^{ου} παράγοντα παρουσιάζουν συνεχή τάση μείωσης σε αντίθεση με τις αντίστοιχες του 2^{ου} παράγοντα, οι οποίες αν και μειωμένες παρουσιάζουν σχετικές αυξήσεις λίγο μετά την έναρξη του S2, καθώς και στα 34,5ka, (β) αν και οι παραγοντικές τιμές τόσο του 1^{ου}, όσο και του 2^{ου} παράγοντα παρουσιάζουν σχετική αύξηση μετά τη λήξη απόθεσης του S2, οι παραγοντικές τιμές του 2^{ου} παράγοντα επιδεικνύουν σαφώς υψηλότερη και πιο γρήγορη ανάπτυξη, (γ) οι παραγοντικές τιμές του 1^{ου} παράγοντα παρουσιάζουν σχετική αύξηση πριν την έναρξη του S1, ενώ οι παραγοντικές τιμές του 2^{ου} παράγοντα κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων απόθεσης του S1 και (δ) σε όλο το μήκος του πυρήνα P69, εκτός από τα βάθη απόθεσης των σαπροπηλικών ακολουθιών, οι παραγοντικές τιμές των παραγόντων 1 και 2 παρουσιάζουν τάση «ειδύλου-αντικειμένου».

Από τα παραπάνω μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα είδη που ομαδοποιεί με υψηλές θετικές φορτίσεις ο 2^{ος} παράγοντας στον πυρήνα P69, φαίνεται να είναι ανθεκτικότερα σε μειώσεις των συγκεντρώσεων του O₂ στον πυθμένα, σε σχέση με τα αντίστοιχα του 1^{ου} παράγοντα ενώ επιπλέον φαίνεται ότι τα είδη του 2^{ου} παράγοντα εκμεταλλεύονται την προσφορά οργανικού υλικού και αναπτύσσονται γρηγορότερα σε ευτροφικά περιβάλλοντα όπως αυτά επικρατούσαν κατά τη διάρκεια και μετά τη λήξη απόθεσης του S2, καθώς και στα αρχικά στάδια του S1.

Τα είδη που ομαδοποιεί με θετικές φορτίσεις ο 3^{ος} παράγοντας σε κανονικές συνθήκες O₂ διαβιούν συνήθως εντός των ιζημάτων είτε σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του πυθμένα (*Bolivina* spp. και *B. marginata*) είτε σε αρκετό βάθος κάτω από αυτή (*Fursenkoina* spp.) και ανέρχονται πάνω στην επιφάνεια του πυθμένα σε συνθήκες μειωμένης συγκέντρωσης O₂ ή/και αυξημένης τροφοδοσίας οργανικού υλικού. Έτσι, οι υψηλές θετικές παραγοντικές τιμές του 3^{ου} παράγοντα μπορεί να θεωρηθούν ως δείκτες περιόδων δυσοξικών περιβαλλόντων ή /και περιόδων αυξημένου ευτροφισμού στον πυθμένα. Σύμφωνα με την κατακόρυφη κατανομή των παραγοντικών τιμών στον πυρήνα P69, τέτοιες συνθήκες αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια απόθεσης του S2, καθώς και λίγο πριν την έναρξη απόθεσης των S1a και S1b, καθώς στα διαστήματα αυτά εντοπίζονται οι υψηλότερες παραγοντικές τιμές κατά μήκος του πυρήνα. Επιπλέον κατά τη διάρκεια απόθεσης του S2 η διακύμανση των παραγοντικών τιμών του 3^{ου} παράγοντα δείχνει επίσης μια διακύμανση όσο αναφορά τις συνθήκες O₂, καθώς ή/και την προσφορά του οργανικού υλικού.

Τα είδη που ομαδοποιεί με θετικές φορτίσεις ο 4^{ος} παράγοντας, σε κανονικές συνθήκες O₂ διαβιούν συνήθως (i) πάνω στην επιφάνεια του πυθμένα (*Gyroidina* spp. και *Uvigerina* spp.), (ii) πάνω στην επιφάνεια του πυθμένα ή εντός των ιζημάτων, αλλά σε μικρό βάθος από τον πυθμένα (*Bulimina* spp. και *Uvigerina* spp.) και (iii) σε αρκετό βάθος κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα (*Chilostomella* sp.). Γενικά, η ομάδα αυτή των τρηματοφόρων παρουσιάζει σχετική ανθεκτικότητα σε συνθήκες μείωσης O₂, ενώ ταυτόχρονα φαίνεται ότι εκμεταλλεύεται την αυξημένη προσφορά οργανικού υλικού. Οι υψηλότερες παραγοντικές τιμές, οι οποίες εκφράζουν αυτές τις συνθήκες διαπιστώνονται κατά τη διάρκεια διακοπής της σαπροπηλικής ιζηματογένεσης του S1 (7,8-6,9ka) καθώς και ακριβώς μετά τη λήξη απόθεσης του S1. Κατά τη διάρκεια απόθεσης του S2, οι παραγοντικές τιμές παρουσιάζουν σχετική αύξηση, χωρίς όμως αυτή να είναι ανάλογη με την αύξηση των τιμών που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια απόθεσης της σαπροπηλικής ακολουθίας του S1.

Τα είδη που ομαδοποιεί με θετικές φορτίσεις ο 5^{ος} παράγοντας διαβιούν (σε κανονικές συνθήκες O₂) εντός των ιζημάτων και σε αρκετό βάθος από την επιφάνεια του πυθμένα. Η συμμετοχή των ειδών αυτών στη βενθονική πανίδα αυξάνεται σε συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης O₂, καθώς και σε αυξημένη τροφοδοσία οργανικού υλικού. Οι περίοδοι ανάπτυξης τέτοιων συνθηκών εντοπίζονται με τις υψηλές παραγοντικές τιμές του 5^{ου} παράγοντα κατά τα αρχικά στάδια απόθεσης των S1a και S1b, καθώς και στο κεντρικό τμήμα απόθεσης του S2.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι η εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα ποσοστά των πλαγκτονικών τρηματοφόρων ανέδειξε πέντε παράγοντες, από τους οποίους οι δύο σχετίζονται με την επιφανειακή θαλάσσια θερμοκρασία και οι υπόλοιποι τρεις με διεργασίες αύξησης της θαλάσσιας παραγωγικότητας. Οι κατακόρυφες κατανομές των παραγόντων που σχετίζονται με την επιφανειακή θαλάσσια θερμοκρασία συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες των τιμών δ¹⁸O ανέδειξαν μια σειρά κλιματικών μεταβολών μεγάλης και μικρής διάρκειας, όπως τα Younger Dryas, Heinrich 1, 2, 3 και 4.

Οι μηχανισμοί αύξησης της θαλάσσιας παραγωγικότητας, όπως προκύπτουν από τα πλαγκτονικά τρηματοφόρα είναι: (α) η αυξημένη τροφοδοσία των θρεπτικών συστατικών στα επιφανειακά νερά λόγω αύξησης των ποτάμιων εισροών (4^{ος} παράγοντας), (β) η αυξημένη πρωτογενής παραγωγικότητα λόγω ανόδου του πυκνοκλινούς στην ευφωτική ζώνη (2^{ος} παράγοντας) και (γ) η ανάπτυξη ευτροφισμού στα επιφανειακά νερά λόγω καλής ανάμιξης των υδάτινων μαζών (5^{ος} παράγοντας). Η αύξηση ευτροφισμού στον πυθμένα και των δύο λεκανών, κατά τη διάρκεια απόθεσης του S1 φαίνεται να είναι το αποτέλεσμα του πρώτου τύπου αύξησης της παραγωγικότητας, ενώ η αύξηση της παροχής οργανικού υλικού στον πυθμένα, κατά τη διάρκεια απόθεσης του S2, φαίνεται να συνδέεται κυρίως με το δεύτερο τύπο αύξησης της παραγωγικότητας.

Η εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης στα ποσοστά των βενθονικών ειδών ομαδοποίησε τα βενθονικά είδη, ώστε αυτά να εκφράζουν 5 σαφείς τάσεις. Υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου χαρακτηρίζαν τον πυθμένα του ΝΔικού Αιγαίου τα τελευταία 46000 χρόνια, με εξαίρεση τα διαστήματα απόθεσης των σαπροηλικών ακολουθιών S1 και S2, σύμφωνα με τον 1^ο παράγοντα. Κατά τη διάρκεια απόθεσης των S1a, S1b και S2 η σταδιακή μείωση της τροφοδοσίας του O₂ ή/και η σταδιακή αύξηση οργανικών ροών στον πυθμένα αντιπροσωπεύεται αρχικά με τη σταδιακή αντικατάσταση των επιφανειακών βενθονικών ειδών από ρηχά ενδοπανιδικά (2^{ος}, και 4^{ος} παράγοντας) και στη συνέχεια των ρηχών ενδοπανιδικών ειδών από βαθειά ενδοπανιδικά είδη (3^{ος} και 5^{ος} παράγοντας). Έντονα δισοξικές έως και ανοξικές συνθήκες αναπτύχθηκαν μόνο κατά την απόθεση των S1a και S1b.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΓΕΡΑΓΑ Μ, ΓΙΑΝΝΟΥΛΗ ΑΝ., ΠΕΤΡΑΚΗ Γ., ΤΣΑΪΛΑ-ΜΟΝΟΠΩΛΗ ΣΤ., ΙΩΑΚΕΙΜ Χ., ΦΕΡΕΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΙ ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ Γ. (2000): Παλαιοωκεανογραφικές και παλαιοκλιματολογικές συνθήκες στο Κρητικό Πέλαγος κατά το Ολόκαινο-Αν. Πλειστόκαινο. Προκαταρκτικά αποτελέσματα. *Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συμποσίου Ωκεανογραφίας και Αλιείας*, Χίος 23-26 Μαΐου 2000, 237-242.
- GERAGA M., TSAILA-MONOPOLI ST., IOAKIM C., PAPATHEODOROU G., AND FERENTINOS G. (2000): An evaluation of paleoenvironmental changes during the last 18000yrs BP in the Myrtoon Basin, SW Aegean Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 156: 1-17.
- BOND G.C. AND LOTTI R. (1995): Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 267: 1005-1010.
- DAVIS J.C. (1986): Statistics and data analysis in geology (2nd ed.). *J. Willey & Sons*, New York, pp646.
- LOURENS L.J. (1994): Astronomical forcing of Mediterranean Climate during the Last 5.3 Million Years. *Ph.D. Universiteit Utrecht*, pp 247.