

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΠΥΡΗΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΥΡΗΝΕΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ Β. ΕΛΛΑΔΑ

Αηδονά Ε.<sup>1</sup>, Δ. Κοντοπούλου<sup>1</sup> και Scholger R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστ. Παν/μιο Θεσ/νίκης, [aidona@lemnos.geo.auth.gr](mailto:aidona@lemnos.geo.auth.gr),  
[despi@geo.auth.gr](mailto:despi@geo.auth.gr)

<sup>2</sup>Paleomagnetic Laboratory, Institute of Geophysics, University of Leoben, Austria

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι επαναπροσανατολισμού πυρήνων γεωτρήσεων που έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως. Όπως είναι γνωστό, για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μελέτη των πυρήνων γεωτρήσεων σχετικά με τις διευθύνσεις των ιζηματογενών δομών, τη διαπερατότητα των σχηματισμών και την ανισοτροπία, είναι απαραίτητο να επαναφέρουμε όλα τα κομμάτια του πυρήνα στην αρχική τους θέση (*in situ*) σε σχέση με το Βορρά και το κατακόρυφο επίπεδο (επαναπροσανατολισμός πυρήνων).

Ιδιαίτερα αναπτύσσεται η παλαιομαγνητική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί τις συνιστώσες της μαγνήτισης των πετρωμάτων (κυρίως την ιξώδη μαγνήτιση) για να προσδιορίσει τη διεύθυνση τους ως προς το Βορρά, δηλαδή να επαναπροσανατολίσει την τιμή της απόκλισης D. Επίσης περιγράφεται αναλυτικά και η μέθοδος της ανισοτροπίας με την οποία είναι δυνατόν να καθοριστεί η προτιμητέα κατεύθυνση των κόκκων ενός πετρώματος και να διορθωθεί έτσι η τιμή της έγκλισης I.

Τέλος εφαρμόζονται οι δύο τελευταίες μέθοδοι σε μη προσανατολισμένα δείγματα πυρήνων ιζημάτων από γεωτρήσεις στην Β. Ελλάδα και φαίνεται η σημαντική συνεισφορά των μεθόδων αυτών στην παλαιομαγνητική έρευνα.

### 1 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί επί σειρά ετών με το πρόβλημα του επαναπροσανατολισμού των πυρήνων γεωτρήσεων. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μελέτη των πυρήνων σχετικά με τις διευθύνσεις των ιζηματογενών δομών, τη διαπερατότητα των σχηματισμών και την ανισοτροπία, είναι απαραίτητο να επαναφέρουμε όλα τα κομμάτια του πυρήνα στην αρχική τους θέση (*in situ*) σε σχέση με το Βορρά και το κατακόρυφο επίπεδο. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **επαναπροσανατολισμός πυρήνων γεωτρήσεων**.

Τέσσερις βασικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για τον επαναπροσανατολισμό των πυρήνων. Η πιο ευθεία μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση ενός κυλίνδρου προσανατολισμού. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο μία ειδική κάμερα μέσα στη γεώτρηση φωτογραφίζει τη θέση μίας πυξίδας η οποία συνδέεται με μία εγκοπή πάνω στον πυρήνα (Davison & Haszeldine 1984). Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ακριβή γιατί χρειάζονται εξειδικευμένα όργανα. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις η εγκοπή που αποτελεί την αναφορά δεν χαράζεται σωστά πάνω στο δείγμα με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε λάθος προσανατολισμούς. Τα προβλήματα αυτά έχουν συζητηθεί από τους Nelson et al. (1987), οι οποίοι και προσδιορίζουν ένα λάθος στον προσανατολισμό της τάξης των 11° και θεωρούν ότι μόνο το 26% των επαναπροσανατολισμένων δειγμάτων ταιριάζουν με δείγματα που έχουν προσανατολισθεί με άλλες ακριβέστερες μεθόδους.

Η δεύτερη, αρκετά διαδεδομένη, μέθοδος προσανατολισμού βασίζεται στη χρήση δεδομένων κλισιμέτρων. Αν η γεώτρηση αποκλίνει από το κατακόρυφο επίπεδο και αυτή η απόκλιση είναι γνωστή, τότε είναι πιθανόν να προβλεφτεί η διεύθυνση του Βορρά σε σχέση με τη μέγιστη φαινόμενη κλίση των στρωμάτων μέσα στον πυρήνα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο όταν η γεώτρηση αποκλίνει από την κατακόρυφο ή όταν τα στρώματα παρουσιάζουν μία σημαντική κλίση.

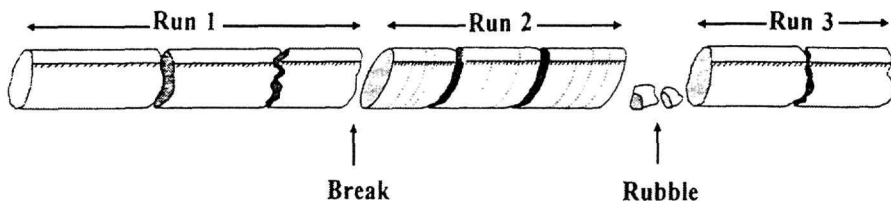
Πρόσφατα, έχει αρχίσει να αναπτύσσεται μία νέα μέθοδος που χρησιμοποιεί εργαλεία απεικόνισης (*imaging tools*) μέσα στις γεωτρήσεις. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, με τη βοήθεια συστήματος

ακουστικών διαγραφιών (sonic) απεικονίζονται όλες οι δομές (επίπεδα στρώσης, επίπεδα θραυσμού) στα τοιχώματα της γεώτρησης και με τη βοήθεια μαγνητικής πυξίδας προσανατολίζονται. Στη συνέχεια ευθυγραμμίζονται οι αντίστοιχες παρατηρούμενες δομές του πυρήνα με αυτές των τοιχωμάτων και έτσι το δείγμα προσανατολίζεται. Αυτή η τεχνική απαιτεί ιδιαίτερα ακριβό εξοπλισμό και η επιτυχία της εξαρτάται από τη σωστή αναγνώριση και συσχέτιση των δομών στη γεώτρηση και στον πυρήνα.

Η τέταρτη τεχνική είναι ο παλαιομαγνητικός προσανατολισμός. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι σχεδόν όλα τα πετρώματα μεταφέρουν μία ή περισσότερες συνιστώσες της μαγνήτισης, οι οποίες ευθυγραμμίζονται με τη διεύθυνση του πεδίου κατά το χρόνο της απόκτησής τους. Οι συνιστώσες αυτές παρέχουν μία καταγραφή της διεύθυνσης του γεωγραφικού Βορρά σε σχέση με τη γραμμή αναφοράς του πυρήνα (reference line), είτε σε πρόσφατους χρόνους είτε κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος. Έτσι, με την απομόνωση αυτής της σταθερής διεύθυνσης στα δείγματα με τη βοήθεια των παλαιομαγνητικών τεχνικών είναι δυνατόν να επαναπροσανατολισθεί ο πυρήνας σε σχέση με το γεωγραφικό Βορρά. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι μετρήσεις γίνονται στον ίδιο τον πυρήνα και με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται τα λάθη που δημιουργούνται κατά τη γεώτρηση. Επιπλέον δεν απαιτείται η γεώτρηση να αποκλίνει ή τα στρώματα να παρουσιάζουν κλίση, όπως συμβαίνει στη μέθοδο του κλισιόμετρου.

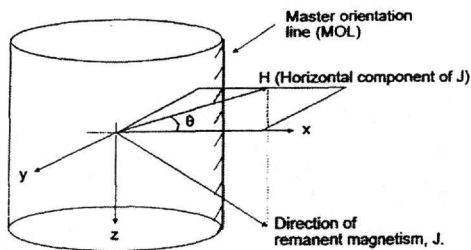
## 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΠΑΛΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΠΥΡΗΝΩΝ

Η πρώτη αναφορά αυτής της μεθόδου έγινε από τον Lunton το 1938. Στη συνέχεια μελετήθηκε από τον Fuller (1969), παρόλο που τα μέσα που διέθετε εκείνη την εποχή τον περιόρισαν στη μελέτη μόνο των ισχυρά μαγνητισμένων πυριγενών πετρωμάτων. Πιο πρόσφατες εφαρμογές αυτής της μεθόδου τόσο σε πυριγενή όσο και σε ιζηματογενή πετρώματα περιγράφονται από τους Van der Voo & Watts 1978, Kodama 1984, Shibuya et al. 1991.



Σχήμα 1. Επανατοποθέτηση των διαφόρων κομματιών του πυρήνα για τον παλαιομαγνητικό προσανατολισμό.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι να ταιριάξουν μεταξύ τους τα διάφορα κομμάτια από τον πυρήνα όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Στη συνέχεια, χαράσσεται μία κοινή γραμμή αναφοράς. Έτσι η μέση διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης καθορίζεται σε σχέση με αυτή τη γραμμή αναφοράς. Η οριζόντια συνιστώσα του διανύσματος της μέσης παραμένουσας μαγνήτισης καθορίζει το μαγνητικό Βορρά, και η γωνία θ προσδιορίζει το γεωγραφικό αξιμούθιο (Σχ. 2).



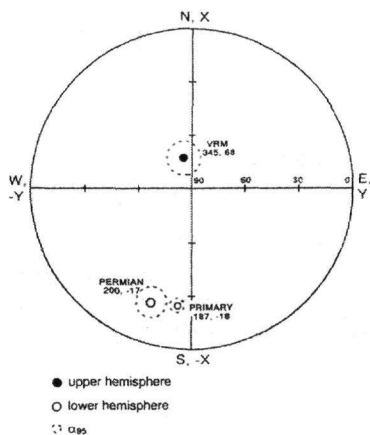
Σχήμα 2. Βασικά στοιχεία παλαιομαγνητικών πυρήνων απαραίτητα για την εφαρμογή της μεθόδου επαναπροσανατολισμού σε κατακόρυφη γεώτρηση (Hailwood and Ding, 1995).

Τα περισσότερα πετρώματα φέρουν διάφορες συνιστώσες μαγνήτισης που αποκτήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ιστορίας τους. Για τον προσανατολισμό των πυρήνων, η πιο χρήσιμη από τις συνιστώσες αυτές είναι η ιξώδης μαγνήτιση, η οποία αναπτύσσεται σταδιακά στη διεύθυνση του σημεινικού πεδίου. Το διπολικό μέρος του γήινου μαγνητικού πεδίου μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται σε ένα μαγνητικό δίπολο στο κέντρο της Γης με τον άξονα του να αποκλίνει  $11^\circ$  από το γεωγραφικό άξονα.

Λόγω της αιώνιας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, αυτή η γωνία μεταβάλλεται με το χρόνο (Hailwood 1989) και κάθε 10000 χρόνια το μαγνητικό δίπολο συμπίπτει με το γεωγραφικό άξονα. Έτσι ο μαγνητικός Βορράς ταυτίζεται με το γεωγραφικό. Η ιξώδης μαγνήτιση αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου από την τελευταία αντιστροφή της πολικότητας (~ 730.000 χρόνια). Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι η ιξώδης μαγνήτιση δεν έχει επηρεαστεί από 'ύποπτες' μαγνήτισεις που είναι δυνατόν να αποκτηθούν κατά τη διάρκεια της γεώτρησης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για να καθορίσει το σημερινό γεωγραφικό Βορρά (Hailwood & Ding 1995).

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον επαναπροσανατολισμό της διεύθυνσης της κύριας μαγνήτισης ενός πυρήνα γνωστής ηλικίας (Rolph et al. 1995). Αυτή η διεύθυνση μπορεί να συγκριθεί με την αναμενόμενη διεύθυνση για τη συγκεκριμένη ηλικία. Στο σχήμα 3 απεικονίζονται οι μέσες τιμές της ιξώδους και της κύριας μαγνήτισης από έναν πυρήνα ηλικίας Περμίου από τη Β. Θάλασσα. Επίσης στην ίδια στερεογραφική προβολή φαίνεται η αναμενόμενη διεύθυνση για το Μέσο Πέρμιο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3, η ιξώδης μαγνήτιση πρέπει να περιστραφεί δεξιόστροφα κατά 15° για να ταυτιστεί με το Βορρά. Έτσι και η διεύθυνση της κύριας μαγνήτισης θα έρθει σε συμφωνία με την αναμενόμενη διεύθυνση, μέσα στα επιτρεπόμενα όρια του σφάλματος (Rolph et al. 1995).

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή είναι η εμφάνιση παρασιτικών μαγνήτισεων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της γεώτρησης. Οι ιδιότητες αυτών των μαγνητίσεων έχουν μελετηθεί κατά το παρελθόν και έτσι σήμερα γνωρίζουμε ότι είναι παράλληλες ή αντιπαράλληλες με τον άξονα της γεώτρησης και χαρακτηρίζονται από μία ένταση μαγνήτισης η οποία είναι κατά αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (Audunsson & Levi 1989, Li et al. 1991). Η παρουσία αυτής της συνιστώσας της μαγνήτισης δημιουργεί διάφορες δυσκολίες στον καθορισμό των άλλων φυσικών συνιστωσών. Πιο συγκεκριμένα, καλύπτει την ιξώδη μαγνήτιση χωρίς την οποία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ο επαναπροσανατολισμός των πυρήνων. Επίσης, αυτή η παρασιτική μαγνήτιση είναι δυνατόν να επισκιάσει ή να τροποποιήσει την κύρια συνιστώσα της μαγνήτισης, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η χρήση των δεδομένων για μαγνητοστρωματογραφικούς και άλλους σκοπούς.



Σχήμα 3. Μέσες τιμές της ιξώδους μαγνήτισης (VRM) και της κύριας διεύθυνσης από δείγματα του Περμίου. Η περιστροφή της ιξώδους συνιστώσας προς το Βορρά μετακινεί και την κύρια συνιστώσα με αποτελέσματα να συμπίπτει με την αναμενόμενη τιμή για το Πέρμιο (Rolph et al. 1995).

Διάφοροι μηχανισμοί έχουν προταθεί σχετικά με την προέλευση αυτής της μαγνήτισης. Σύμφωνα με τους ερευνητές, μπορεί να οφείλεται σε μερική θερμική παραμένουσα μαγνήτιση (Sallomy & Briden 1975), σε πιεζοπαραμένουσα (Kodama 1984) και σε ισόθερμη παραμένουσα (Audunsson & Levi 1989). Οι Shi & Tarling (1999) έδειξαν ότι μηχανικές ταλαντώσεις και χτυπήματα (shocks) πάνω στα δείγματα κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης, είναι δυνατόν να διεγείρουν ένα μηχανισμό σύμφωνα με τον οποίο ο πυρήνας μπορεί να αποκτήσει μία μαγνήτιση μέ-

σα σε ένα αυξημένο μαγνητικό πεδίο στην άκρη του στελέχους του τρυπανιού. Έτσι, με εργαστηριακές επαναλαμβανόμενες δονήσεις σε θαλάσσια δείγματα ψαμίτη, αποδείχθηκε ότι η παρασιτική μαγνήτιση από τη γεώτρηση προκαλεί αύξηση της χαμηλής τους μαγνητικής επιδεκτικότητας και αύξηση της ικανότητάς τους να αποκτήσουν ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (Shi & Tarling 1999).

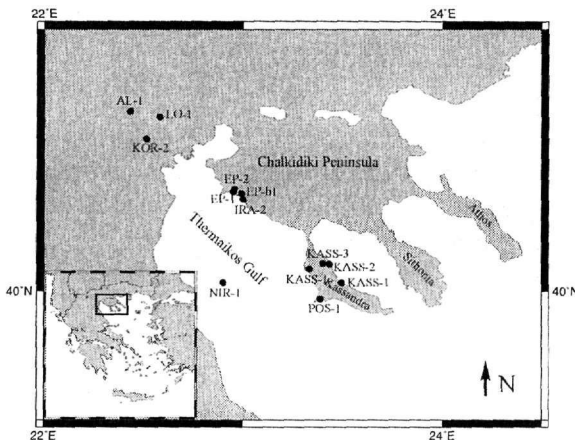
## 2.1 Προσανατολισμός πυρήνων με τη μέθοδο της ανισοτροπίας

Η μαγνητική ανισοτροπία είναι μία καλά εδραιωμένη προσέγγιση για τον καθορισμό του προσανατολισμού των ιζηματογενών κόκκων στις τρεις διαστάσεις (Hamilton & Rees 1970, Sayre & Hailwood 1985, Folami & Hailwood 1991, Tarling & Hrouda 1993). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ανεξαρτησία της ανισοτροπίας της μαγνητικής επιδεκτικότητας ως προς την ευθυγράμμιση του

μεγάλου και του μικρού άξονα των μαγνητικών κόκκων μέσα στο ίζημα. Για ένα σύνολο μαγνητικών κόκκων μέσα σε ένα ίζημα, η ανισοτροπία της μαγνητικής επιδεκτικότητας του δείγματος αντανακλά την προτιμητέα ευθυγράμμιση του πληθυσμού των μαγνητικών κόκκων. Έτσι, ο  $k_{max}$  αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση της προτιμητέας κατεύθυνσης του μεγάλου άξονα και ο  $k_{min}$  τη διεύθυνση του μικρού άξονα του ιζήματος. Η μέτρηση λοιπόν της ανισοτροπίας ενός δείγματος παρέχει μία γρήγορη και μη καταστροφική για το δείγμα μέθοδο για τον καθορισμό την προτιμητέας κατεύθυνσης των κόκκων.

Εργαστηριακές μελέτες της μαγνητικής ανισοτροπίας ιζηματογενών αποθέσεων προσδιόρισαν χαρακτηριστικούς τύπους ιζημάτων σε διαφορετικά περιβάλλοντα απόθεσης (Hamilton & Rees 1970). Έτσι, σε ιζήματα που αποτέθηκαν σε ήρεμα περιβάλλοντα, έχουμε μία συγκέντρωση των  $k_{min}$  αξόνων κοντά στο κατακόρυφο επίπεδο, το οποίο αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη διεύθυνση του μικρού άξονα των κόκκων. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα οριζόντιο επίπεδο απόθεσης. Οι  $k_{max}$  άξονες κατατέμονται σχεδόν στο οριζόντιο επίπεδο, δείχνοντας έτσι την απουσία κάθε συστηματικής δύναμης ευθυγράμμισης των μαγνητικών κόκκων σε αυτό το επίπεδο. Αντίθετα, αν η απόθεση των ιζημάτων γίνεται σε κάποια κοίτη ποταμού (περιβάλλον υψηλής ενέργειας), τότε η προτιμητέα διεύθυνση των κόκκων θα είναι παράλληλη με αυτή της κοίτης του ποταμού.

### 3 ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΑΣ



Σχήμα 4. Σχηματικός χάρτης της περιοχής μελέτης όπου φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων.

Η παλαιομαγνητική μέθοδος όπως περιγράφηκε παραπάνω, εφαρμόστηκε σε δείγματα από πυρήνες 13 γεωτρήσεων από την Β. Ελλάδα (Αηδονά 2002). Οι θέσεις των γεωτρήσεων φαίνονται στο σχήμα 4 και μπορούν να χωριστούν σε τρεις ζώνες: α) γεωτρήσεις Κασσάνδρας, β) γεωτρήσεις Επανομής και γ) γεωτρήσεις Αξιού. Οι πυρήνες αποτελούνται από μία κλαστική σειρά ιζημάτων ηλικίας Ηωκαίνου – Μειοκαίνου που επικαθάνονται στο Μεσοζωικό υπόβαθρο. Το βάθος των πυρήνων κυμαίνεται από 2Km και φτάνει στην γεώτρηση του Ποσειδίου (Κασσάνδρα) τα 4Km.

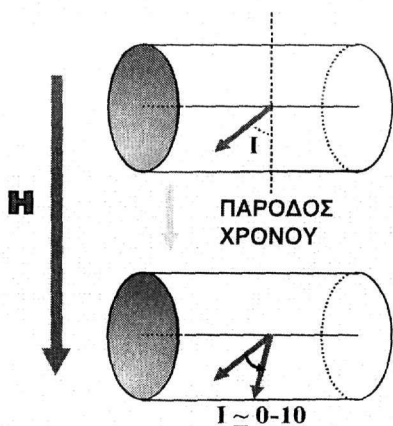
Στα δείγματα που υποβλήθηκαν σε μαγνητικό καθαρισμό, απομονώθηκε η ιξώδης μαγνήτιση και υπολογίστηκε η διεύθυνσή της. Η διεύθυνση αυτή πρέπει να αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση του σημερινού γεωμαγνητικού πεδίου, δηλαδή θα πρέπει η τιμή της απόκλισης να κυμαίνεται γύρω στις  $0^\circ$  και της έγκλισης γύρω στις  $55^\circ - 65^\circ$ .

Στον πίνακα 1 παραθέτονται αντιπροσωπευτικές τιμές των υπολογισθέντων διευθύνσεων της ιξώδους μαγνήτισης από όλα τα εξετασθέντα δείγματα.

Πίνακας 1. Υπολογιζόμενες τιμές ιξώδους μαγνήτισης (TH: Θερμική Απομαγνήτιση, AF: Απομαγνήτιση εναλλασσόμενου πεδίου).

Δείγμα	Απόκλιση (D)	Έγκλιση (I)	Μέθοδος Απομαγν.
KASS - 1			
1117,2b	236,7	10,3	TH (NRM-100°)
1118,5b	181	-6	AF (NRM- 10 mT)
1118,6b	167,5	-9,5	AF (NRM- 10 mT)
1119,7a	217,4	3,4	TH (NRM-100°)
1119,7b	205,6	-23,8	AF (NRM- 10 mT)
KASS - 2			
1133,3b	173,3	-31,5	AF (NRM-10 mT)
1134,3	216	16,2	TH (NRM-100°)

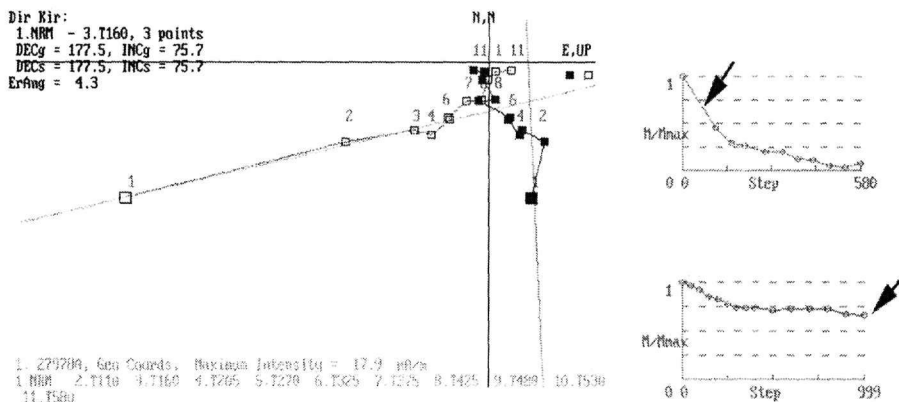
1134,8b	173,6	-3,6	TH (NRM-150°)
1135,8a	203,4	-18,5	TH (NRM-100°)
1135,8b	216,8	-17,9	AF (NRM-10 mT)
1136,9b	172,7	-18,8	AF (NRM-10 mT)
1197,8b	174,8	9,6	AF (NRM-10 mT)
1198,9	200,7	-26,9	TH (NRM-180°)
1202,4b	171,5	-15,3	AF (NRM-10 mT)
1202,5	199,6	-10,7	AF (NRM-10 mT)
1205b	154,3	-22,4	TH (NRM-150°)
1205c	158,7	-32,1	AF (NRM-10 mT)
1464,2b	167,2	-18,7	AF (NRM-15 mT)
<b>KASS - 3</b>			
1686,2a	299,1	8,3	TH (NRM-100°)
1687,9a	193,4	9,1	TH (NRM-180°)
1687,9b	190,6	-13,5	AF (NRM-20 mT)
1688,9a	176,3	3,1	TH (NRM-150°)
1688,9c	230,1	3,7	AF (NRM-10 mT)
1689,2a	130,1	6,1	TH (NRM-180°)
1689,6a	117,4	-14,2	AF (NRM-10 mT)
1690b	171,4	11,2	TH (NRM-75°)
1690c	177,7	-15,8	AF (NRM-10 mT)
1691,3b	173,5	-11,7	AF (NRM-10 mT)
1691,7a	169,8	11,5	TH (NRM-150°)
1691,7b	172,6	-24,7	AF (NRM-10 mT)
1692,8b	173,7	16,4	TH (NRM-75°)
<b>KASS - 4</b>			
1863,2	159,3	-3,9	AF (NRM-15 mT)
1863,5	169,7	-8,9	AF (NRM-10 mT)
1864,3	160	-3,9	TH (NRM-180°)
1864,8	243,5	-3,7	TH (NRM-100°)
1865,6a	198,8	0,7	TH (NRM-150°)
1865,6b	171,7	12,3	TH (NRM-120°)
1867,2b	186,6	-4,4	AF (NRM-15 mT)
1867,6a	190,4	14,3	AF (NRM-10 mT)
1867,6b	178,9	10,9	TH (NRM-200°)
2329,8	171,9	19,5	AF (NRM-15 mT)
2330,3a	58,7	68,4	TH (NRM-200°)
2330,3b	47,1	60,9	AF (NRM-10 mT)
2331,1	117,5	63,2	TH (NRM-200°)
2331,8	344,8	50,5	TH (NRM-100°)
2333,8	355,1	67,2	TH (NRM-120°)
2334,7	97,5	76,8	TH (NRM-200°)
2335,8	85,4	50,7	TH (NRM-75°)
2650,9a	126,3	65,2	TH (NRM-150°)
2651,3a	182,1	68,3	TH (NRM-200°)
2654	89,3	64	TH (100°-200°)
2796a	301,5	4,7	TH (NRM-100°)
2799,3	150,8	9,7	AF (NRM-10 mT)
2799,8	168,6	0,5	TH (100°-150°)
2803,3	319,2	3,3	TH (NRM-100°)
2803,6	190,4	5,0	AF (NRM-5 mT)
2902,8	173,7	-34,6	AF (NRM-10 mT)
2903,2	276,9	-28,6	TH (NRM-100°)
2903,7	183,5	23,4	AF (NRM-5 mT)
2907,3	242,1	15,8	TH (NRM-100°)
2908,2	160	46,1	AF (NRM-5 mT)
3040,4a	108,7	77,6	TH (NRM-150°)
3040,4b	158	59,9	AF (NRM-10 mT)
3042,5a	138,6	80,5	TH (NRM-180°)
3043,5a	125	51,9	AF (5-15 mT)
3043,5b	118,2	38,3	TH (100°-200°)
<b>POS-1</b>			
2646,2b	192,4	5,9	AF (NRM-15 mT)
2647,3a	351,2	-19	AF (NRM-10 mT)
3028,4a	198,4	-5,0	TH (NRM-200°)
3028,4b	187,8	-2,9	AF (NRM-15 mT)
3029,9a	177,6	3,5	TH (NRM-200°)
3029,9b	167,7	6,2	AF (NRM-10 mT)
3031,4a	177,4	-5,2	TH (NRM-150°)
3031,4b	177,3	-16,3	AF (NRM-5 mT)
3469,9a	231,9	25,8	AF (NRM-10 mT)
3472b	191,4	-31,2	AF (NRM-10 mT)
4115,4	276,5	-16,4	TH (NRM-150°)
4116,7a	101,8	-1,6	TH (NRM-150°)
4118,9	167,3	11,4	TH (100°-150°)



Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα οι τιμές της έγκλισης στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι αρνητικές και πολύ χαμηλότερες από την αναμενόμενη τιμή ( $55^{\circ}$  -  $65^{\circ}$ ). Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι αδύνατη η χρήση αυτών των διευθύνσεων για τον επαναπροσδιορισμό της απόκλισης D. Φαίνεται ότι η ιξώδης μαγνήτιση έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από μία παρασιτική μαγνήτιση που είχε δημιουργηθεί στο χώρο αποθήκευσης των δειγμάτων. Έτσι, η πολυετής αποθήκευση των δειγμάτων σε οριζόντια θέση μέσα στους χώρους αυτούς οδήγησε στην καταστροφή της ιξώδους μαγνήτισης.

Σχήμα 5. Η παρασιτική μαγνήτιση H που επέδρασε στα δείγματα που ήταν αποθηκευμένα με συνείπεια τη μείωση της έγκλισης I.

Οι τόσο χαμηλές τιμές έγκλισης δικαιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη την οριζόντια θέση που είχαν οι πυρήνες των γεωτρήσεων μέσα στους χώρους αποθήκευσης (Σχ. 5). Η μοναδική εξαίρεση παρουσιάζεται στη γεωτρηση KASS-4 όπου στους πυρήνες που βρίσκονται σε βάθη 2330-2335, 2650-2651 και 3040-3043 οι τιμές της έγκλισης είναι θετικές και πολύ κοντά στην αναμενόμενη τιμή του σημερινού πεδίου. Για τις περιπτώσεις αυτές (γραμμοσκιασμένες περιοχές στον πίνακα 1) διορθώθηκε η τιμή της απόκλισης σε κάθε μία περίπτωση χωριστά.



Σχήμα 6. Παρουσία του γκαϊπίτη όπως φαίνεται από τη μείωση της καμπύλης της έντασης της μαγνήτισης κατά τη θερμική απομαγνήτιση (πάνω διάγραμμα) και επιβεβαιώνεται από το αντίστοιχο διάγραμμα της απομαγνήτισης με εναλλασσόμενο πεδίο (κάτω διάγραμμα) όπου φαίνεται ότι δεν έχει απομαγνητισθεί εντελώς το δείγμα.

Παράλληλα με τη διερεύνηση της ιξώδους μαγνήτισης επιχειρήθηκε και ο εντοπισμός του ορυκτού γκαϊπίτη. Το ορυκτό αυτό βρίσκεται στη φύση και είναι το μόνο που έχει τη δυνατότητα να 'μεταφέρει' μία παραμένουσα μαγνήτιση. Η θερμοκρασία φραγμού του καθορίζεται στους  $100^{\circ}\text{C}$  -  $120^{\circ}\text{C}$  με αποτέλεσμα να απομαγνητίζεται στα πρώτα στάδια της θερμικής απομαγνήτισης. Αντίθετα, κατά την απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο, ο γκαϊπίτης παρουσιάζεται σταθερός και δεν απομαγνητίζεται μέχρι τα 100mT. Λόγω της ιδιότητας του να 'κρατά' τη μαγνήτιση, η διεύθυνση που προκύπτει κατά την απομαγνήτισή του συμπίπτει με τη διεύθυνση του σημερινού γεωμαγνητικού πεδίου (Collinson 1983).

Διερευνήθηκε η πιθανότητα ύπαρξης γκαϊπίτη σε όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε θερμικό μαγνητικό καθαρισμό. Στην περίπτωση του πυρήνα KOR-1 είναι ευδιάκριτη η παρουσία του γκαϊπίτη



τη όπως φαίνεται και στο σχήμα 6. Δυστυχώς μόνο σε λίγες περιπτώσεις διαπιστώθηκε η ύπαρξή του (αφού επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα της απομαγνήτισης με εναλλασσόμενο πεδίο) και προχωρήσαμε έτσι στον επαναπροσανατολισμό της απόκλισης D. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές της απόκλισης και της έγκλισης της ιζήδους μαγνήτισης των δειγμάτων που περιέχουν ποσότητες γκαϊίτη.

Πίνακας 2. Υπολογιζόμενες τιμές ιζήδους μαγνήτισης.

KOR-2 Δείγμα	Απόκλιση (D)	Έγκλιση (I)	Μέθοδος Απομαγν.
853,8	153,1	67,4	TH (100°-150°)
2705,2	79,2	64,5	TH (100°-150°)
2742,2a	20,2	83,5	TH (100°-150°)
2744,1a	61,9	58	TH (100°-150°)
2797,8a	177,5	75,5	TH (100°-150°)
2798,2a	108,2	69,4	TH (100°-150°)
AL-1			
1626a	243,2	66,7	TH (100°-150°)
1700,5a	139,8	57,6	TH (NRM-100°)
1701,5	245,1	81,1	TH (NRM-100°)
1702,7a	225,8	74,3	TH (NRM-100°)
1702,7b	302,5	73,9	TH (NRM-100°)

Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στην πλειοψηφία τους τα δείγματα από τις γεωτρήσεις KOR-2, AL-1 παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά κατά την απομαγνήτιση συγκριτικά με τις υπόλοιπες γεωτρήσεις. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2 παρουσιάζουν στα πρώτα στάδια απομαγνήτισης οι πολύ χαμηλές τιμές της έγκλισης δίνοντας μας έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τις τιμές αυτές για τον προσανατολισμό των τιμών της απόκλισης. Φαίνεται λοιπόν ότι τα δείγματα αυτών των γεωτρήσεων δεν έχουν επηρεαστεί από την παρασιτική μαγνήτιση που έχει επιδράσει στα υπόλοιπα δείγματα. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι τα δείγματα αυτά φυλάσσονταν στις αποθήκες των Ελληνικών Πετρελαίων στη Καβάλα και όχι στην Αθήνα από όπου συλλέχθηκαν τα υπόλοιπα δείγματα. Έτσι λοιπόν επιβεβαιώνεται η άποψή μας σχετικά με την καταστροφική επίδραση του χώρου αποθήκευσης στα δείγματα, όπως έχει αναφερθεί στην αρχή αυτού του κεφαλαίου.

Το δεύτερο στάδιο της προσπάθειας επαναπροσανατολισμού των πυρήνων μας ήταν ο έλεγχος της ορθότητας της τιμής της έγκλισης I. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η μέθοδος της ανισοτροπίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.1, μετρώντας την ανισοτροπία της μαγνητικής επιδεκτικότητας των δειγμάτων, μπορούμε να έχουμε με ακρίβεια την εκτίμηση της προτιμητέας διεύθυνσης των κόκκων.

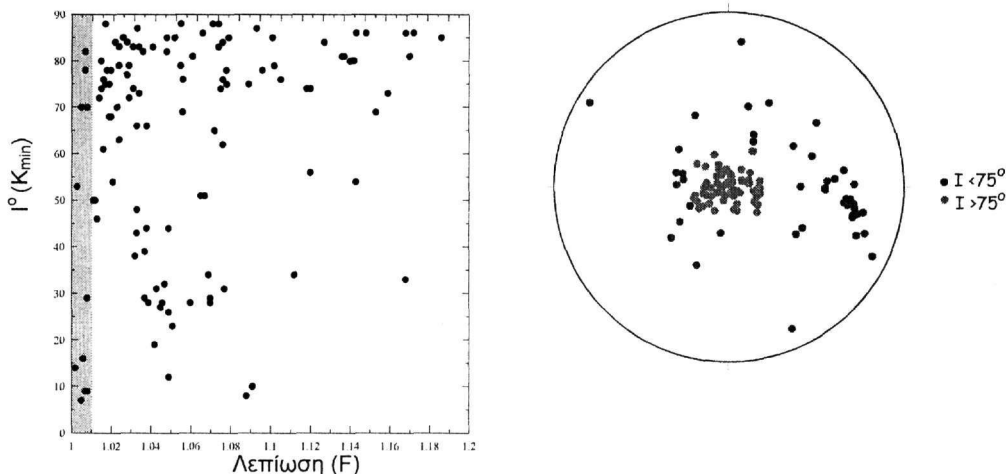
Η ανισοτροπία της μαγνητικής επιδεκτικότητας μετρήθηκε σε αντιπροσωπευτικά δείγματα από κάθε πυρήνα γεώτρησης. Από τη μέτρηση αυτή προέκυψαν οι άξονες  $K_{min}$  και χαρτογραφήθηκαν σε στερεογραφικές προβολές.

Πριν προχωρήσουμε στη διόρθωση της κλίσης των στρωμάτων θα έπρεπε να βεβαιωθούμε ότι οι τιμές του  $K_{min}$  είναι αξιόπιστες. Ένας τρόπος για να το ελέγξουμε ήταν να συσχετίσουμε τις τιμές του  $K_{min}$  με τις τιμές της μαγνητικής λεπίωσης F. Η μαγνητική λεπίωση F ορίζεται σαν το λόγο του ενδιάμεσου άξονα  $K_2$  προς τον μικρό άξονα  $K_3$  του ελλειψοειδούς της μαγνητικής επιδεκτικότητας και εκφράζει την εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς. Για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα θα πρέπει οι τιμές της λεπίωσης να είναι μεγαλύτερες από 1.010. Δείγματα που παρουσιάζουν τιμές της λεπίωσης μικρότερες από 1.010 δεν θεωρούνται ανισότροπα οπότε δεν μπορούμε να εμπιστευτούμε την τιμή του άξονα  $K_{min}$  (Tarling & Hrouda 1993).

Όπως φαίνεται στα σχήμα 7 στην πλειοψηφία τους οι  $K_{min}$  άξονες είναι κατακόρυφοι, δηλαδή το επίπεδο στρώσης είναι οριζόντιο. Στα δείγματα που παρουσιάζουν τιμές έγκλισης του  $K_{min}$  (μπλε κύκλοι στο σχήμα) μικρότερες από 75° βρέθηκε καταρχήν το επίπεδο στρώσης και στη συνέχεια ακολούθησε η διόρθωση της κλίσης.

Το σύνολο των δειγμάτων που τελικά επαναπροσανατολίστηκαν φαίνονται στο σχήμα 8 και στο πίνακα 3. Στο σχήμα 8α φαίνονται οι αρχικές τιμές της απόκλισης και της έγκλισης ενώ στο σχήμα 8β φαίνονται οι διορθωμένες διευθύνσεις των ίδιων δειγμάτων. Παρατηρούμε λοιπόν ότι αρχικά τα δείγματα παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, ενώ μετά τη διόρθωση φαίνεται ότι συγκεντρώνονται

καλύτερα ενώ η μέση τιμή που υπολογίσθηκε για το σύνολο των δειγμάτων αυτών ( $D = 27.5^\circ$ ,  $I = 58.2^\circ$ ) βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με την αναμενόμενη διεύθυνση για την περιοχή και την συγκεκριμένη ηλικία.



Σχήμα 7. Διάγραμμα των τιμών της έγκλισης  $I$  του  $K_{min}$  σε σχέση με τη λεπίωση και στερεογραφική προβολή του  $K_{min}$  για όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν.

Πίνακας 3. Τιμές της απόκλισης ( $D$ ) και της έγκλισης ( $I$ ) πριν και μετά τον επαναπροσανατολισμό των δειγμάτων

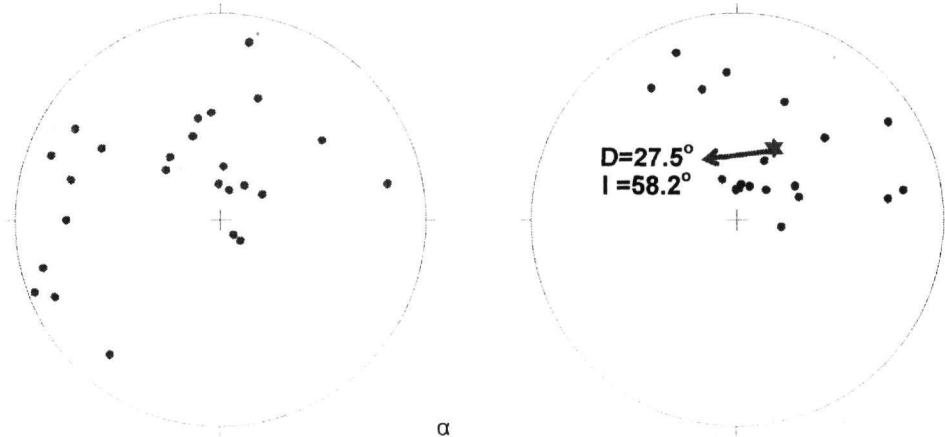
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗ		ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗ	
Απόκλιση ( $D^\circ$ )	Έγκλιση ( $I^\circ$ )	Απόκλιση ( $D^\circ$ )	Έγκλιση ( $I^\circ$ )
177	14	27.5	58.2
167.4	41.6	345	35.1
132.4	29.2	4.1	77.7
238.6	19.4	340	73.2
110.7	77	100	72.3
189	76	70	63.9
318.2	7.7	358	78.2
197	12.2	57	14
315.5	11.1	47	41.6
68.8	86.5	356	29.2
161.5	35.1	80	19.4
65.1	77.7	21	76
39.5	73.2	7	76
122	72.3	327	25
90	63.9	22	38.6
75	78.2	340	15
104.9	64.3	60	63.6
183.5	21	82	27
258	71.9	45	73.6
197.2	51.5	25	64.3

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον επαναπροσανατολισμό πυρήνων γεωτρήσεων. Ειδικότερα η παλαιομαγνητική μέθοδος εφαρμόζεται σε πυρήνες γεωτρήσεων από τον Β. Ελλαδικό χώρο. Η πλειοψηφία των δειγμάτων που μελετήθηκαν φαίνεται ότι έχει επηρεαστεί από μια παρασιτική μαγνήτιση που επέδρασε κατά την πολύχρονη φύλαξη των δειγμάτων με συνέπεια τη καταστροφή της ιξώδους μαγνήτισής τους. Στα δείγματα που δεν έχουν επηρεαστεί από αυτή τη μαγνήτιση, ήταν δυνατόν να διορθώσουμε τόσο την απόκλιση όσο και την έγκλιση και όπως φαίνεται από το σχήμα 8 μετά τον επαναπροσανατολισμό τους παρατηρείται καλύτερη συγκέντρωση των τελικών διευθύνσεων. Ο μέσος όρος βρίσκεται σε πολύ κα-



λή συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών σε επιφανειακούς σχηματισμούς της ίδιας περιοχής (Πίνακας 4). Φαίνεται λοιπόν ότι ο επαναπροσανατολισμός των πυρήνων γεωτρήσεων είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία για την εξαγωγή αξιόπιστων παλαιομαγνητικών αποτελεσμάτων.



β

Σχήμα 8. (α) Αρχικές διευθύνσεις των δειγμάτων που επαναπροσανατολίσθηκαν, (β) Τελικές τιμές διευθύνσεων όπως προκύπτουν μετά τη διόρθωση για την απόκλιση και την έγκλιση. Με τον αστερίσκο φαίνεται η μέση τιμή της διεύθυνσης.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα πλουτωνικών και ιζηματογενών σχηματισμών από την ίδια περιοχή

Περιοχή	Σχηματισμός	Ηλικία	D	I	Συγγραφείς
1. Χαλκιδική (Κασσάνδρα)	Ιζήματα	Μειο - Πλειόκαινο	24.7	54.2	Haubold et al., 1999
Αξίός	Ιζήματα	Μειόκαινο	20	46	Sen et al., 2000
3. Στρυμονικός	Πλουτωνικά	Ολιγόκαινο – Μειόκαινο	26	47	Westphal et al. (1991)
6. Αξίός (Ωραιόκαστρο)	Πλουτωνικά	Ήώκαινο	29.5	39	Feinberg et al. (1994)
Αναμενόμενες τιμές της έγκλισης για την περιοχή					
Κασσάνδρα		Ήώκαινο	10.4	50.8	Westphal et al. (1986)
Κασσάνδρα		Ολιγόκαινο	8.2	56.4	Westphal et al. (1986)

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αηδονά Ε. 2002. Παλαιομαγνητικές και μαγνητικές ιδιότητες ιζημάτων και υποβάθρου σε πυρήνες γεωτρήσεων από τον Β. Ελλαδικό χώρο: Συμβολή στη διερεύνηση των συνθηκών διαγένεσης, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 235σ.
- Audunsson H., & Levi S. 1989. Drilling-induced remanent magnetization in basalt drill cores. *Geophys. J. Int.*, 98, 613-622.
- Collinson D. W. 1983. *Methods in rock magnetism and Palaeomagnetism, Techniques and Instrumentation*, Chapman and Hall, London.
- Davison I. & Haszeldine R. S. 1984. *Orienting conventional cores for geological purposes: a review of methods*. *Journal of Petroleum Geology*, 7, 461-466.
- Feinberg H., Kondopoulou D., Michard A. & Mountrakis D. 1994. Paleomagnetism of some northern Greece ophiolites and associated sediments. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 30, 359-370.
- Folami S. & Hailwood E.A. 1991. Magnetic fabric results from DSDP holes 380A (Black Sea) and 524 (South America) sediment cores: a case study for the comparison between low-and high-field torque magnetometer measurements. *Marine Geophysical Researches*, 13, 239-253.
- Fuller M. 1969. *Magnetic orientation of borehole core*. *Geophysics*, 34, 772-774.
- Hailwood E. A. & Ding F. 1995. Palaeomagnetic reorientation of cores and the magnetic fabric of hydrocarbon reservoir sands. *In*: Turner, P. and Turner, A. (eds) *Palaeomagnetic Applications in Hydrocarbon Exploration*. Geological Society, London, Special Publications, 98, 245-258.
- Hailwood E. A. 1989. *Magnetostratigraphy* Geological Society, London Special Report, 19, 84pp.

- Hamilton N. & Rees A. I. 1970. The use of magnetic fabric in paleocurrent estimation. *In*: Runcorn, S.K. (eds) *Palaeogeophysics*, Academic Press, London, 445-464.
- Haubold, H., Kondopoulou D., Scholger R. & Mauritsch H. J. 1999. Further palaeomagnetic evidence for the structural unroofing of the Rhodope metamorphic core complex. Abstract in EGS99.
- Kodama K. P. 1984. Palaeomagnetism of granite intrusives from the Precambrian basement under eastern Kansas: orienting drill cores using secondary magnetization components. *Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society*, 76, 273-287
- Li Z. X., Powell C. M. & Morris D. G. 1991. Syndeformational and drilling-induced remanent magnetizations from diamond drill cores of the Mt Eclipse Sandstone, central Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38, 473-484.
- Lunton E. D. 1938. Recent developments in laboratory orientation of cores by their magnetic polarity. *Geophysics*, 3, 122-129.
- Nelson R. A., Lenox L. C. & Ward B. J. 1987. Oriented core: its use, error and uncertainty. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71, 357-367.
- Rolph, T. C., Shaw, J., Happer T. R. & Hagan J. T. 1995. Viscous remanent magnetization: a tool for orientation of drill cores. *In*: Turner, P. and Turner, A. (eds) *Palaeomagnetic Applications in Hydrocarbon Exploration*. Geological Society, London, Special Publications, 98, 239-243.
- Sallomy J. T. & Briden J. C. 1975. Palaeomagnetic studies of Lower Jurassic rocks in England and Wales. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24, 369-376.
- Sayre W. O. & Hailwood E. A. 1985. The magnetic fabric of early Tertiary sediments from the Rockall Plateau, northeast Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 75, 289-296.
- Sen, S., Koufos, G., Kondopoulou D. & de Bonis, L. 2000. Magnetostratigraphy of Late Miocene continental deposits of the Lower Axios valley, Macedonia, Greece. *Geological Soc. of Greece, Special Publ.* 9, 197-206.
- Shi H. & Tarling D. H. 1999. The origin of bore-core remanences: mechanical-shock-imposed irreversible magnetizations. *Geophys. J. Int.* 137, 831-838.
- Shibuya H., Merrill D. L., Hsu V. & Leg 124 Shipboard Scientific party. 1991. Paleogene counterclockwise rotation of the Celebes Sea- orientation of ODP cores utilizing the secondary magnetization. *In*: Silver, E. A., Rangin, C., von Breyman, M. T. (eds) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 124.
- Tarling D. H. & Hrouda F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*, Chapman and Hall.
- Van der Voo R. & Watts D. R. 1978. Paleomagnetic results from igneous and sedimentary rocks from Michigan Basin borehole. *Journal of Geophysical Research*, 83, 5844-5848.
- Westphal M., Bazhenov M., Lauer J. P., Pechersky M., & Sibuet J. C. 1986. Palaeomagnetic implications on the evolution of the Tethys belt from the Atlantic Ocean to the Pamir since the Triassic. *Tectonophysics*, 123, 37-82.
- Westphal, M., Kondopoulou, D., Edel, J. B. & Pavlides, S. 1991. Paleomagnetism of late Tertiary and Plio-Pleistocene formations from N. Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 25, 239-250.

## ABSTRACT

### RE-ORIENTATION METHODS OF CORE SAMPLES: IMPLICATIONS TO SEDIMENT CORES FROM N. GREECE

Aidona E.<sup>1</sup>, Kondopoulou D.<sup>1</sup>, and Scholger R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Geophysics, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 546 21, Thessaloniki, aidona@lemnos.geo.auth.gr, despi@geo.auth.gr*

<sup>2</sup>*Paleomagnetic Laboratory, Institute of Geophysics, University of Leoben, Austria*

The different methods of re-orientation of core samples are discussed in the present study. In order to obtain results from core samples concerning the direction of the formation, their permeability and their anisotropy, it is essential first to bring all the pieces of the core into their initial position with regard to the North and to the horizontal (in-situ).

In this study we emphasize particularly to the palaeomagnetic technique. This re-orientation method uses the magnetic components of the rocks (especially the viscous component) in order to determine the direction with regard to the North (declination). Also, the anisotropy method which helps us to correct the angle to the horizontal (inclination) is described here.

Finally we applied the last two methods in non-oriented core samples from N. Greece and the significant importance of the re-orientation techniques to the palaeomagnetic studies is shown.