

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΧΙΝΗΣ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΥΣ  
ΚΛΙΒΑΝΟΥΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ(ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΜΕΤΡΟ)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2016

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΧΙΝΗΣ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΥΣ ΚΛΙΒΑΝΟΥΣ ΤΟΥ  
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ(ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΜΕΤΡΟ)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος  
Σπουδών 'Γεωλογία και Γεωπεριβάλλον' Τομέας Γεωφυσικής Ημερομηνία  
Προφορικής Εξέτασης:18 /11/2015

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

Καθηγήτρια Δ. Κοντοπούλου, Επιβλέπων

Αν. Καθηγητής Κ. Ευθυμιάδης, Τμήμα Φυσικής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής  
Επιτροπής

Λέκτορας Ε. Αηδονά, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Δημήτριος Π. Χίνης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΒΥΖΑΝΤΙΝΟΥΣ ΚΛΙΒΑΝΟΥΣ ΤΟΥ  
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ(ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΜΕΤΡΟ)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

# Περιεχόμενα

- 1. Μαγνητικό πεδίο της γης**
  - 1.1 Ιστορικά στοιχεία
  - 1.2 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη
  - 1.3 Σχετικά με το γήινο μαγνητικό πεδίο
  - 1.4 Τρόπος περιγραφής του μαγνητικού πεδίου γης της στο χώρο
  - 1.5 Χρονική μεταβολή του γεωμαγνητικού πεδίου –καμπύλες αιώνιας μεταβολής
  
- 2. Επίδραση του μαγνητικού πεδίου στην ύλη. Μαγνήτιση των υλικών.**
  - 2.1 Διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά
  - 2.2 Σιδηρομαγνητικά υλικά
  - 2.3 Είδη σιδηρομαγνητικών υλικών
  - 2.4 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών
  
- 3. Η παραμένουσα μαγνήτιση**
  - 3.1 Τα μαγνητικά ορυκτά
  - 3.2 Ο χρόνος ηρεμίας
  - 3.3 Η θερμοκρασία Curie και η θερμοκρασία φραγμού
  - 3.4 Τα είδη της παραμένουσας μαγνήτισης
  
- 4. Η μέθοδος της αρχαιομαγνητικής έρευνας.**
  - 4.1 Πυροτεχνολογία στην αρχαιότητα
  - 4.2 Τρόπος καταγραφής του γήινου μαγνητικού πεδίου στις καμένες αργίλους και αρχαιομαγνητική χρονολόγηση
  - 4.3 Σύγκριση με άλλες μεθόδους και ακρίβεια της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης
  - 4.4 Συλλογή αρχαιομαγνητικών δειγμάτων
    - 4.4.1 Δειγματοληψία-προσανατολισμός
    - 4.4.2 Επεξεργασία των δειγμάτων πριν τις μετρήσεις
  
  - 4.5 Μετρήσεις εργαστηρίου
    - 4.5.1 Μετρήσεις της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης (NRM)
    - 4.5.2 Μαγνητική ορυκτολογία
    - 4.5.3 Καθορισμός θερμοκρασίας Curie
    - 4.5.4 Απόκτηση ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης(IRM)
    - 4.5.5 Πείραμα Lowrie και Fuller
    - 4.5.6 Τεχνικές απομαγνήτισης και μαγνητικός καθαρισμός
    - 4.5.7 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων απομαγνήτισης
  
- 5. Αρχαιομαγνητική μελέτη των κλιβάνων της ανασκαφής στο νέο σιδηροδρομικό σταθμό Θεσσαλονίκης**
  - 5.1 Γενικές πληροφορίες για τα υλικά και τις δομές μελέτης. Ο πηλός στην αρχαιομαγνητική έρευνα.
  - 5.2 Οι κεραμικοί κλιβανοί στην ανασκαφή του ΜΕΤΡΟ « Νέος σιδηροδρομικός σταθμός » -αρχαιολογικές πληροφορίες.
  - 5.3 Αποτελέσματα αρχαιομαγνητικής μελέτης. Υπολογισμός της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης
  - 5.4 Σταδιακή απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο και θέρμανση
    - 5.4.1 Θερμική απομαγνήτιση

- 5.4.2 Απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο (AF)
- 5.4.3 Υπολογισμός της αρχαιοδιεύθυνσης από τα δεδομένα

#### 5.5 Πειράματα Μαγνητικής ορυκτολογίας

- 5.5.1 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM)
- 5.5.2 Πειράματα Lowrie-Fuller
- 5.5.3 Θερμομαγνητικές καμπύλες
- 5.5.4 Καμπύλες υστέρησης

### 6. Αρχαιομαγνητική χρονολόγηση των κλιβάνων OSE-1 και OSE-2

### 7. Αποτελέσματα

## Πρόλογος

Η εργασία που εκπονείται στο κύριο μέρος του συγγράμματος, αφορά στην μελέτη των δυο κεραμικών κλιβάνων που αποκαλύφθηκαν το 2012 κατά τις εργασίες κατασκευής του ΜΕΤΡΟ στην περιοχή του νέου σιδηροδρομικού σταθμού Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα οι ανασκαφές άρχισαν το 2006 από την τότε ΙΣΤ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων-νύν Εφορία Πόλεως Θεσσαλονίκης- και είχαν σαν αποτέλεσμα ένα σύνολο ευρημάτων, κυρίως ταφικών, που μέσα σε αυτά συμπεριλαμβάνονταν και δύο ομάδες κεραμικών κλιβάνων.

Η έρευνα των ιδιοτήτων των μαγνητικών ορυκτών που βρίσκονται κατανεμημένα στο σύνολο του υλικού του κάθε κλιβάνου, η ικανότητα απόκτησης και διατήρησης της μαγνήτισης από αυτά κατά την τελευταία καύση τους, ώστε να γίνει και δυνατή η καταγραφή της, είναι τα θέματα των οποίων η μελέτη πραγματοποιείται στη συνέχεια.

Ο Αρχαιομαγνητισμός ως ένα μέρος της γενικότερης έννοιας του Παλαιομαγνητισμού, ασχολείται με την καταγραφή του μαγνητικού πεδίου της γης στην ψημένη άργιλο κατά τους προϊστορικούς και ιστορικούς χρόνους και ενώ είναι κλάδος θετικών επιστημών (γεωφυσική), λειτουργεί και παρουσιάζει αποτέλεσμα με την απαραίτητη συμβολή της αρχαιολογίας. Η χρονολόγηση της παύσης λειτουργίας των αρχαιολογικών δομών που εξετάζονται με αρχαιομαγνητικές μεθόδους από την άλλη μεριά, μπορεί να προσφέρει πληροφορίες και να συνδέει γεγονότα που είναι δυνατόν να συμβαίνουν στην περιοχή ή τον οικισμό που τις φιλοξενεί τη συγκεκριμένη εποχή. Σε αυτή τη περίπτωση μπορεί τελικά να τερματίζεται για κάποιο λόγο και η λειτουργία του οικισμού και αυτός να εγκαταλείπεται από τους κατοίκους του.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες μεθόδους χρονολόγησης που διαθέτει η αρχαιομαγνητική μέθοδος, είναι η βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της με την αύξηση των δεδομένων της σε καμένα υλικά και νέες δομές που σταδιακά ανακαλύπτονται και αποκτώνται.

Στο **1ο κεφάλαιο** παρέχονται οι έννοιες της θεωρίας του γήινου μαγνητικού πεδίου, τη χρονική και γεωγραφική του μεταβολή, καθώς και ορισμένα ιστορικά στοιχεία πάνω στην εξέλιξη της μελέτης του μαγνητισμού.

Στο **2ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι βασικές πληροφορίες πάνω στις ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών ορυκτών καθώς και η συμπεριφορά τους κατά περίπτωση, με την εισαγωγή τους σε μαγνητικό πεδίο.

Στο **3ο κεφάλαιο** δίνεται μια περιγραφή των σιδηρομαγνητικών ορυκτών που θα μας απασχολήσουν και του τρόπου με τον οποίο αποκτάται από αυτά η παραμένουσα μαγνήτιση. Εξετάζεται ο ρόλος της θερμοκρασίας, η έννοια του χρόνου ηρεμίας, η ικανότητα και ο χρόνος διατήρησης της καταγεγραμμένης μαγνήτισης. Τέλος αναλύονται οι κατηγορίες παραμένουσας μαγνήτισης που εμφανίζονται στη φύση.

Στο **4ο κεφάλαιο** γίνεται μια παρουσίαση της μεθόδου της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης και μια σύντομη σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Παρατίθεται ο τρόπος και η διαδικασία της δειγματοληψίας καθώς και οι απαραίτητες ενέργειες για την επεξεργασία των δειγμάτων πριν τις μετρήσεις. Αναφέρονται τα όργανα με τα οποία γίνονται οι μετρήσεις αυτές και τα απαραίτητα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που προηγούνται.

Στο **5ο κεφάλαιο** παραθέτονται τα αποτελέσματα της αρχαιομαγνητικής έρευνας στους δύο κλιβάνους της τελευταίας χρονικά ανακαλυφθείσας ομάδας κατά τις ανασκαφές του ΜΕΤΡΟ στην περιοχή του νέου σιδηροδρομικού σταθμού Θεσσαλονίκης. Αυτά προέρχονται από μετρήσεις της μαγνήτισης των υλικών, απομαγνητίσεις αυτών και πειράματα προσδιορισμού της μαγνητικής ορυκτολογίας. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και προσδιορίζεται ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάζονται.

Αναλύονται επίσης τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση και τα συμπεράσματα που οδήγησαν.

Στο **6ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση των δύο κλιβάνων ξεχωριστά αλλά και σε συνδυασμό μεταξύ τους, με βάση τα δεδομένα που προήλθαν από τον εντοπισμό της αρχαιοδιεύθυνσης σε κάθε περίπτωση και σαν αποτέλεσμα της απαραίτητης στατιστικής επεξεργασίας.

Στο **7ο κεφάλαιο** γίνεται μια αποτίμηση των αποτελεσμάτων της παρούσης εργασίας, εκτιμούνται τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που πραγματοποιήθηκαν και συνδυάζονται πληροφορίες από άλλες πηγές χρονολόγησης. Τελικά αναφέρονται τα συμπεράσματα της διατριβής.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία και το παράρτημα, όπου βρίσκεται το σύνολο των δεδομένων και διαγραμμάτων εκτός αυτών που παρουσιάζονται στο κείμενο.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα Καθηγήτρια κ. Δ. Κοντοπούλου και την Λέκτορα κ. Ε. Αηδονά για την σε βάθος χρόνου απαραίτητη βοήθεια που μου παρείχαν στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων κατά την ολοκλήρωση της εργασίας μου, καθώς και στην εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων που προήλθαν από αυτή. Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος φυσικής του Α.Π.Θ. κ. Κ. Ευθυμιάδη για

την συμβολή του στα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας και τις εύστοχες παρατηρήσεις του σε θέματα της ειδικότητας του. Τον Δρ. Γ. Πολυμέρη για την παραχώρηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου της θερμοφωταύγειας που πραγματοποίησε. Την πρώην Διευθύντρια της αρμόδιας εφορίας αρχαιοτήτων, αρχαιολόγο Δρ. Λ. Αχειλαρά καθώς και τον αρχαιολόγο κ. Νικάκη, για την συνεργασία της και τη βοήθεια του ως προς το απαραίτητο θεωρητικό-ιστορικό μέρος της έρευνας που πρέπει να συνδυάζεται σε κάθε περίπτωση με εκείνη της γεωφυσικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Τομέα Γεωφυσικής για την συμβολή τους στην πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής μου επιμόρφωσης και ιδιαίτερα τους συναδέλφους-συμφοιτητές μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Αρχαιομαγνητισμός είναι μια από τις προσφορές των θετικών επιστημών στην αρχαιολογία, στην προσπάθεια της να μελετήσει και να χρονολογήσει προϊστορικές και ιστορικές καμένες δομές. Για την γεωφυσική έρευνα συνίσταται στη μελέτη της καταγραφής της <απολιθωμένης> μαγνήτισης από την ψημένη άργιλο και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την πορεία των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της κατά το χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει η μελέτη.

Στην εργασία που ακολουθεί πραγματοποιείται η αρχαιομαγνητική μελέτη δύο κλιβάνων που αποκαλύφθηκαν το 2010 κατά τις ανασκαφές του ΜΕΤΡΟ στην περιοχή του νέου σιδηροδρομικού σταθμού Θεσσαλονίκης. Στο αρχικό κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση της διαχρονικής προσπάθειας κατανόησης των ιδιοτήτων του μαγνητικού πεδίου της γης και μια παρουσίαση των βασικών εννοιών για το γήινο μαγνητικό πεδίο. Στη συνέχεια εξετάζονται οι κατηγορίες και οι ιδιότητες των χαρακτηριστικών ορυκτών της ψημένης αργίλου χάρη στα οποία είναι δυνατή η εφαρμογή της αρχαιομαγνητικής μεθόδου. Έπειτα μελετάται ο τρόπος που αποτυπώνεται και παραμένει η μαγνήτιση που επικρατεί στο γήινο πεδίο κατά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε αυτά τα ορυκτά. Εξετάζεται επίσης ο ρόλος της θερμοκρασίας λόγω της μεγάλης σημασίας του στις ιδιότητες αυτών των ορυκτών. Η παρουσίαση του τρόπου που γίνεται η αρχαιομαγνητική έρευνα δίνεται στη συνέχεια. Περιγράφεται η διαδικασία συλλογής αρχαιομαγνητικών δειγμάτων, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο προσανατολισμός τους και η επεξεργασία τους πριν τις μετρήσεις. Στη συνέχεια αναφέρονται τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που πρέπει να γίνουν πριν τις απομαγνητίσεις των δειγμάτων, για τον καθορισμό των μαγνητικών ορυκτών που βρίσκονται στο υλικό, των ιδιοτήτων τους και της ικανότητας τους να καταγράψουν τη μαγνήτιση.

Το κύριο μέρος της εργασίας είναι η αρχαιομαγνητική μελέτη των δυο κλιβάνων OSE-1 και OSE-2. Παρέχονται αρχικά οι αρχαιολογικές πληροφορίες για το περιβάλλον και τις συνθήκες που αποκαλύφθηκαν καθώς και η χρονολόγησή τους με φωταύγεια για την τελική σύγκριση. Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή της αρχαιομαγνητικής μεθόδου και περιγραφή με ακρίβεια των απαιτούμενων βημάτων για το τελικό αποτέλεσμα. Απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο και θερμική απομαγνήτιση χρησιμοποιούνται για τον μαγνητικό καθαρισμό. Τα δείγματα εμφανίζουν διαφορετική ανταπόκριση στις δύο μεθόδους και εμφανίζονται στοιχεία ύπαρξης μαγνητικά «σκληρών» φάσεων μαζί με τις

«μαλακές» σε αρκετές περιπτώσεις. Έπειτα αναφέρονται τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που πραγματοποιήθηκαν και σχολιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία επιβεβαιώνουν την παρουσία δύο μαγνητικών φάσεων. Για τον υπολογισμό της τελικής τιμής αρχαιοδιεύθυνσης απορρίπτονται όσα δείγματα αποκλίνουν σημαντικά από την μέση κατανομή. Με βάση τα αποτελέσματα της αρχαιοδιεύθυνσης γίνεται η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση η οποία τοποθετεί την τελευταία χρήση των δύο κλιβάνων στα μέσα της δεύτερης χιλιετίας μ.Χ.

Τέλος γίνεται μια αποτίμηση των αποτελεσμάτων, συσχετίζονται με την χρονολόγηση με φωταύγεια η οποία συγκλίνει με την αρχαιομαγνητική χρονολόγηση και εξάγονται συμπεράσματα καταλληλότητα του υλικού για αρχαιομαγνητική μελέτη, καθώς και την ηλικία των κεραμικών εργαστηρίων της ευρύτερης περιοχής που λειτούργησαν κατά την δεύτερη χιλιετία μ.Χ.

## ABSTRACT

Archaeomagnetism is one of the contributions of exact sciences to archaeology in its effort to study and date prehistoric and historic fired structures. For the geophysical research, it aims to the study of the “fossilized” magnetization recorded by the baked clays and the derived conclusions on the evolution of the geomagnetic field elements with time.

In the present dissertation the archaeomagnetic study of two ceramic kilns unearthed in 2010, during the excavations for the new subway (METRO) in the area of the main railway station of Thessaloniki, is presented. In the initial chapter a historical review on the efforts to understand the geomagnetic field properties diachronically is exposed. Following to this, the main categories and properties of the characteristic minerals within the baked clays are examined, together with the procedures that make the acquisition of magnetization possible. The presentation of the archaeomagnetic protocol followed is presented in the next chapters. This includes sampling procedure, preparation of samples in the laboratory and measurements of the remanence, including those of magnetic mineralogy necessary in order to define the magnetic minerals present in the examined material and their potential to record a reliable magnetization.

The main part of the dissertation is the archaeomagnetic study of the two kilns, OSE1 and OSE2. After the archaeological information about their emplacement within the site, their dating with thermoluminescence is given. The next step is the application of the method giving in detail all followed steps, e.g demagnetization through alternating field and thermally. The samples display, in several cases, two coexisting magnetic phases, one “soft” and one “hard”. The magnetic mineralogy experiments confirm the existence of these phases while for the calculation of the mean archaeodirection a selection based on the elimination of divergent results is done.

The final mean value is used in order to date the two kilns using archaeomagnetic reference curves and place their last firing within the second half of the second millennium AD.

Finally, an evaluation of the obtained results, their comparison with the luminescence dating and other archaeological information are given.

The conclusion refers to the suitability of the material in the area for such a study and reinforces the end of ceramic production in the broader area in the afore mentioned period, that is after 1500 AD.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

### 1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι προσπάθειες για την χρονολογική ταξινόμηση των διαφόρων γεγονότων που συνέβησαν κατά τους προϊστορικούς και ιστορικούς χρόνους, είχαν σαν σημαντική βοήθεια τα παρατηρούμενα αποτελέσματα του μαγνητικού πεδίου της γης στα γήινα πετρώματα.

Πεδίο δυνάμεων γενικά ονομάζεται ένας χώρος μέσα στον οποίον αν τοποθετηθεί το κατάλληλο υπόθεμα εφαρμόζεται σε αυτό μια δύναμη. Όταν αναφερόμαστε σε μαγνητικό πεδίο το συγκεκριμένο υπόθεμα πρέπει να είναι ένα από αυτά που ονομάζουμε μαγνητικά υλικά εφόσον μόνο σε αυτή τη περίπτωση επιδρούν μαγνητικές δυνάμεις.

Από πολύ παλιά ήταν γνωστή η ιδιότητα ορισμένων ορυκτών (φυσικοί μαγνήτες) να έλκουν ρινίσματα σιδήρου. Οι πρώτες αναφορές σχετικά με το φαινόμενο αυτό έρχονται από τους αρχαίους Έλληνες με πιο πιθανή μάλιστα την προέλευση του όρου 'μαγνητισμός' από την τότε Ελληνική επαρχία Μαγνησία στην Μικρά Ασία.

Η ανακάλυψη κατά τον 3<sup>ο</sup> π.Χ. και η ευρεία χρήση κατά τον 1<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα της μαγνητικής πυξίδας έγινε από τους Κινέζους (Needham 1962). Αυτή αποτελούνταν από το ορυκτό μαγνητίτη (φυσικός μαγνήτης) είχε σχήμα κουταλιού και ήταν τοποθετημένη σε τετράγωνη βάση πάνω στην οποία είχε τη δυνατότητα να περιστραφεί. (Σχήμα 1.1) (Needham, 1962; Merrill et al., 1996.)



*Σχήμα 1.1. Η πρώτη γνωστή μορφή μαγνητικής πυξίδας που επινοήθηκε από τον Wang Chen Το. Επανακατασκευάστηκε από τον Needham το 1962 με την έγκριση του πανεπιστημίου του Cambridge (Needham, 1962; Merrill et al., 1996).*

Η εξάπλωση της στην Ευρώπη και η εφαρμογή των ιδιοτήτων της στη ναυσιπλοΐα συνέβη κατά τον 12<sup>ο</sup> και 13<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα, γεγονός σημαντικό για την εποχή εφόσον επέφερε την οικονομική ανάπτυξη αφ' ενός και την καθιέρωση και εξέλιξη του μαγνητισμού ως επιστήμη αφ' ετέρου.

Κατά τον δεύτερο από τους ανωτέρω αιώνες διατυπώθηκε η πρόταση κατά την οποία η μαγνητική βελόνα επηρεάζεται από τις μάζες των φυσικών μαγνητών που υπάρχουν στη γη και άρα εφ' όσον αυτή προσανατολίζεται κατά την διεύθυνση B-N θα πρέπει να υπάρχουν βουνά από φυσικούς μαγνήτες στις πολικές περιοχές, πράγμα που τοποθέτησε μέσα στη γη την έρευνα για την προέλευση του φαινομένου και όχι έξω από αυτήν όπως αρχικά είχε αρχικά ειπωθεί.

Γεννήθηκε όμως το ερώτημα από τον Petrus Peregrinus αργότερα, γιατί πάντα ο προσανατολισμός της μαγνητικής βελόνας να είναι ο συγκεκριμένος, ενώ κοιτάσματα φυσικών μαγνητών υπάρχουν σε όλη τη γη και θα μπορούσε παραδείγματος χάριν να κατευθύνεται προς το ισχυρότερο από αυτά.

Μέσα μάλιστα από μια σειρά πειραμάτων με σφαιρικά τεμάχια φυσικού μαγνήτη (Smith, 1970) κατάφερε να ορίσει την έννοια της πολικότητας, να ανακαλύψει τους μαγνητικούς μεσημβρινούς και να δείξει τρόπους καθορισμού των θέσεων των πόλων αυτών των μαγνητών. Κατάφερε να αποκαλύψει την διπολική φύση του μαγνήτη και επίσης ότι η μαγνητική δύναμη παρουσιάζεται ισχυρότερη και κατακόρυφη στους πόλους. Διατύπωσε πρώτος τον νόμο της έλξης των ανόμοιων πόλων και της άωσης των ομοίων.

Τα πρώτα όργανα μέτρησης της μαγνητικής απόκλισης (αποκλισιόμετρα) κατασκευάστηκαν το 1400 μ.Χ. (Chapman and Bartels, 1940, 1962) ενώ η μαγνητική

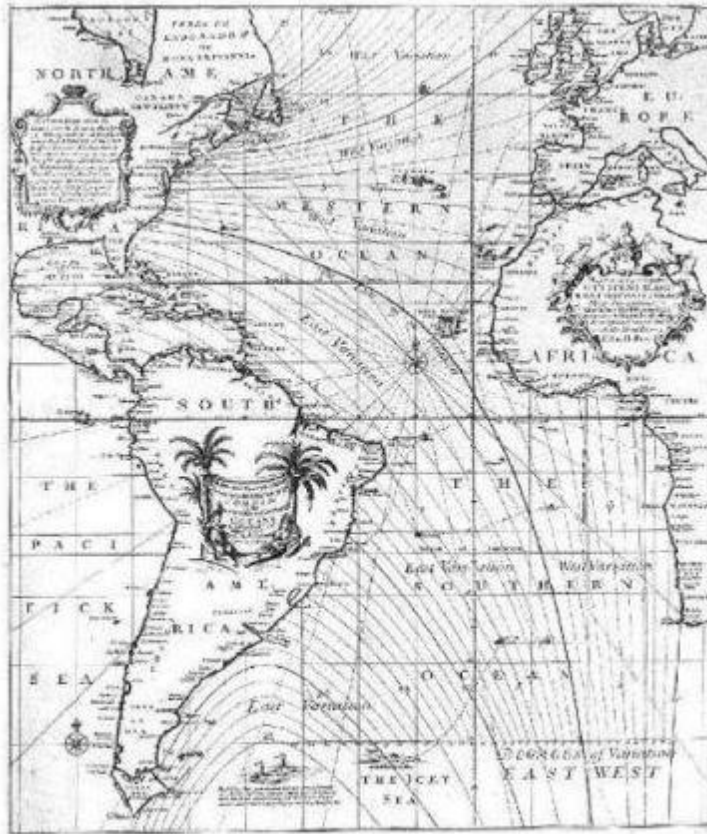
έγκλιση ανακαλύφθηκε από τον Georg Hartmann το 1544 .

Το 1600 ο William Gilbert μετά από έρευνες πάνω στον μαγνητισμό στο έργο του με τίτλο «De Magnetibus» καταλήγει στο συμπέρασμα πως όλη η υδρόγειος παρουσιάζει από μόνη της τις ιδιότητες ενός τεράστιου μαγνήτη ο οποίος περικυκλώνεται από αόρατες γραμμές ,αυτές του μαγνητικού της πεδίου.

Με την ανωτέρω εργασία επιβεβαιώθηκε και η διπολικότητα του γήινου μαγνητικού πεδίου μετά από αιώνες προσπαθειών, σκέψεων και πειραμάτων για την ερμηνεία του. Ήταν η πρώτη ιδιότητα μάλιστα που αποδόθηκε στη γη ολόκληρη, σαν ένα σώμα μετά από εκείνη για το σφαιρικό σχήμα της .

Ο πρώτος χάρτης της μεταβολής της μαγνητικής απόκλισης που κάλυπτε τον Ατλαντικό ωκεανό δόθηκε από τον Edmund Halley το 1700 (σχήμα 1.2). Το 1834 και το 1839 ο C. F. Gauss εφάρμοσε την ανάλυση των σφαιρικών αρμονικών που αρχικά εισήχθησαν από τους Laplace και Legendre για να περιγράψουν βαρυτικά προβλήματα στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Μετά και την μελέτη χαρτών απόκλισης και έγκλισης του Βορείου και Νοτίου Ατλαντικού κατάφερε να προσδιορίσει τη διπολικότητα και την εσωτερική προέλευση του γεωμαγνητικού πεδίου.

Οι πρώτοι που παρατήρησαν ότι η μαγνήτιση ορισμένων πετρωμάτων διατάσσεται παράλληλα με το γεωμαγνητικό πεδίο ήταν οι Delesse και Melloni γύρω στο 1850.



*Σχήμα 1.2. Χάρτης μεταβολών της μαγνητικής απόκλισης (Halley, 1701).*

Πριν από τις εργασίες του Gauss για την απόλυτη μέθοδο μέτρησης της έντασης του πεδίου και την δημιουργία παρατηρητηρίων οι πρώτες γεωμαγνητικές παρατηρήσεις γίνονταν κατά τον 16<sup>ο</sup> αιώνα από ναυτικούς σε εμπορικά ή πολεμικά πλοία. Αυτές αφορούσαν την απόκλιση και από τις αρχές του 17<sup>ου</sup> αιώνα τα δεδομένα κάλυπταν την παγκόσμια κλίμακα. Μαγνητικές παρατηρήσεις του συνολικού διανύσματος της μαγνήτισης άρχισαν από το 1840.

Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα (1819) κατά τη διάρκεια ενός σχολικού πειράματος στη τάξη του ο Δανός δάσκαλος Hans Christian Oersted παρατήρησε ότι η μαγνητική πυξίδα επηρεάζονταν (απέκλινε από τη θέση ισορροπίας της) όταν βρισκόνταν πλησίον ρευματοφόρου αγωγού. Η απόκλιση αυτή ήταν μάλιστα ανάλογη της έντασης του διερχόμενου ρεύματος. Εκείνη την εποχή οι γνώσεις για το φαινόμενο περιορίζονταν στην ύπαρξη μόνιμων μαγνητών και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

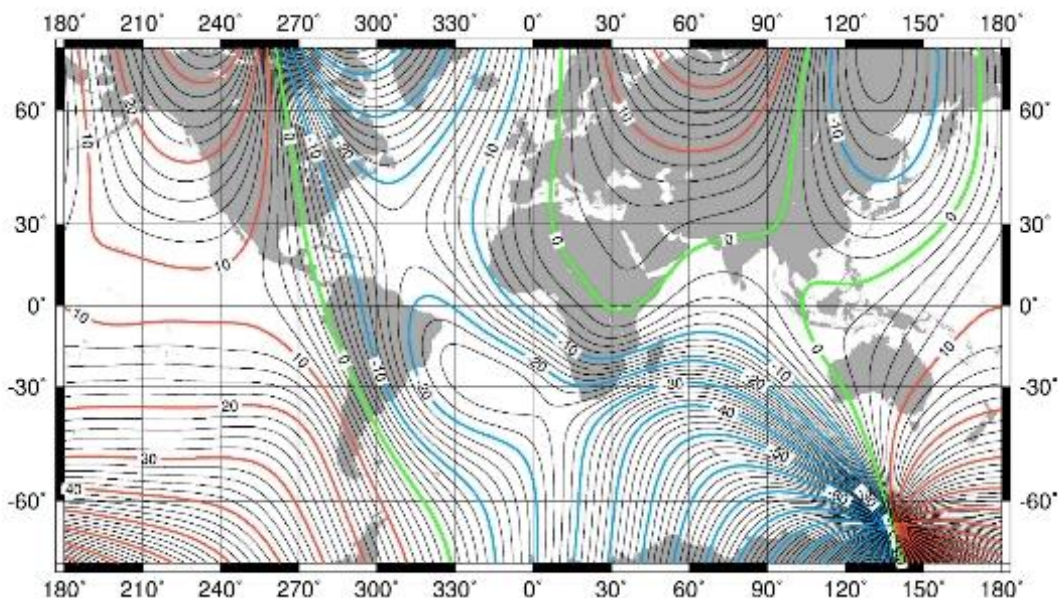
Το παραπάνω πείραμα απέδειξε και την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος στους μαγνήτες πράγμα που αποτέλεσε τότε πρωτοποριακή ανακάλυψη.

Λίγο καιρό αργότερα, ο Γάλλος φυσικός Ampere εξέφρασε την άποψη πως το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η μοναδική αιτία των φαινομένων του μαγνητισμού.

Πολύ αργότερα το 1905 η θεωρία της σχετικότητας έδωσε την εξήγηση της σχέσης ανάμεσα στο κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο και τον μαγνητισμό.

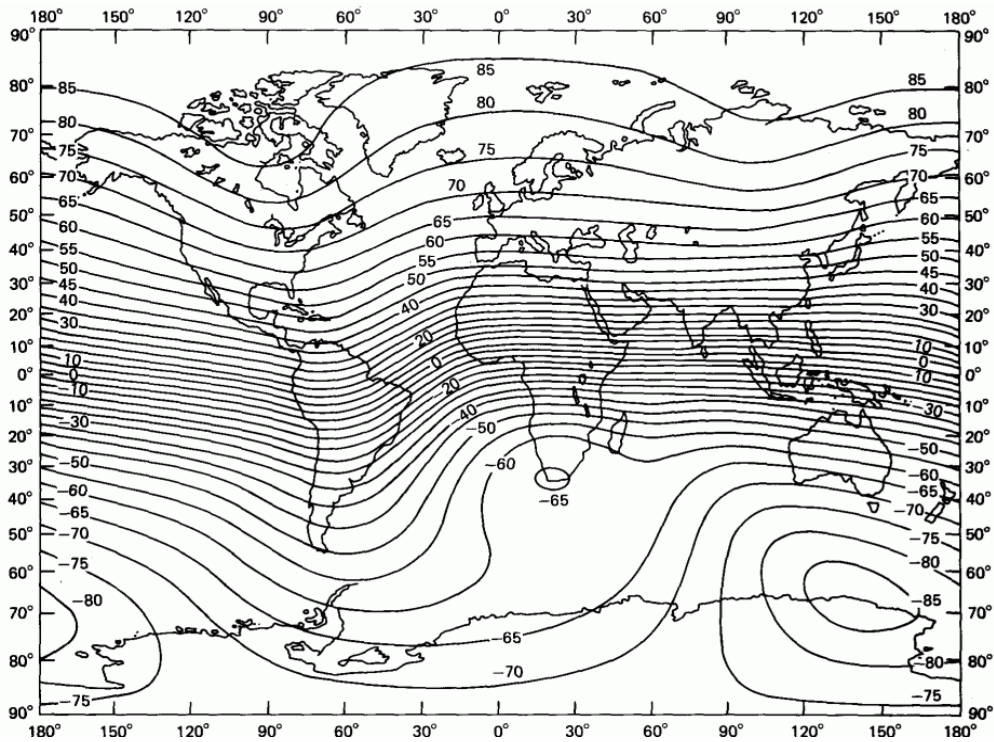
Από τα μέσα του τελευταίου αιώνα η γεωμαγνητική έρευνα εντάθηκε ιδιαίτερα και πρόσφατα μάλιστα έγινε και η ανακάλυψη πως και άλλα σώματα του ηλιακού μας συστήματος, εκτός της γης, διαθέτουν μαγνητικό πεδίο. Οι χάρτες που κατασκευάζονται τη σύγχρονη εποχή για την μαγνητική απόκλιση (Σχήμα 1.3) και για την μαγνητική έγκλιση (Σχήμα 1.4) παρατίθενται παρακάτω ,ενώ στο σχήμα 1.5 παρατηρούνται οι γεωμαγνητικές συντεταγμένες του μαγνητικού πεδίου της γης .

### US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Declination - Main Field (D)



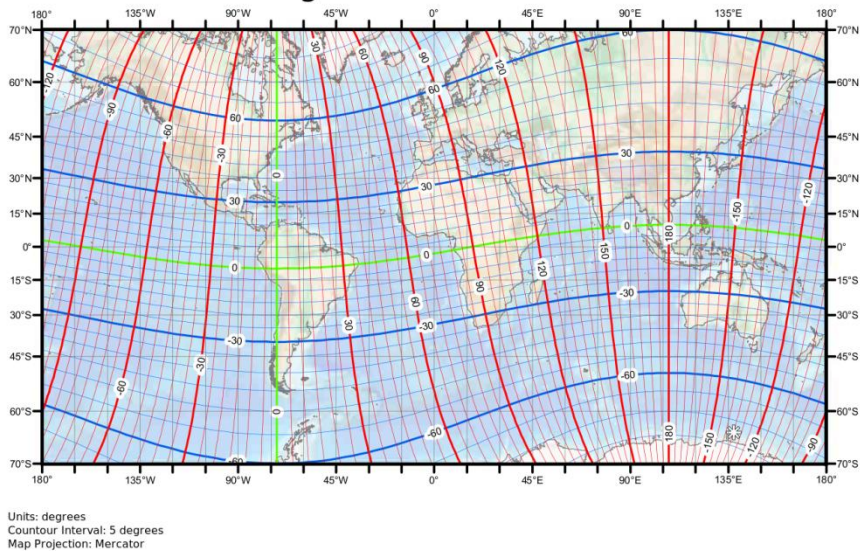
**Σχήμα 1.3.** Παγκόσμιος χάρτης απόκλισης του μαγνητικού πεδίου της Γης , έτος 2000.(  
[http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/services.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/services.html))





**Σχήμα1.4.** Παγκόσμιος χάρτης έγκλισης του μαγνητικού πεδίου της Γης.  
 ([http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/services.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/services.html))

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2010  
 Geomagnetic Coordinates



**Σχήμα1.5.** Γεωμαγνητικές συντεταγμένες του μαγνητικού πεδίου της Γης (2010).  
 ([http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/services.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/services.html))

## 1.2 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα μαγνητικά υλικά, κυρίως ενώσεις του σιδήρου δηλ. μαγνητίτης,(σχήμα 1.6) αιματίτης κ.τ.λ. είναι αυτά στα οποία εξασκούνται δυνάμεις όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη που θα εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο σώμα και από ένα συγκεκριμένο πεδίο είναι ανάλογη μιας <ποσότητας μαγνητισμού> που είναι ένα υποθετικό μέγεθος μέτρησης για κάθε ένα από τα ανωτέρω υλικά.



**Σχήμα 1.6.** Μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  επιτεταρτοξείδιο του σιδήρου χημικά)

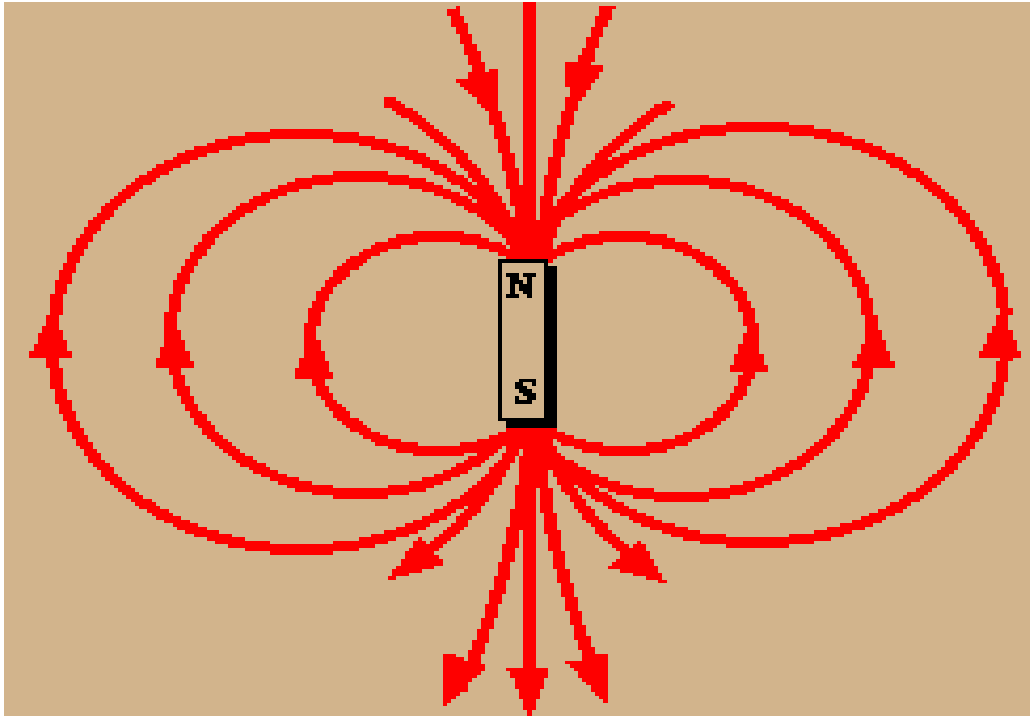
Το διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει το μαγνητικό πεδίο στο κενό (ή τον αέρα) είναι η ένταση  $H$  και μετράται σε  $\text{A/m}$  στο SI. (Οε στο emu). Όταν όμως τοποθετηθεί ένα σώμα μέσα σε αυτό τότε θα δημιουργηθεί πρόσθετο μαγνητικό πεδίο και η τελική ένταση θα ονομάζεται μαγνητική επαγωγή  $B$  και η μονάδα μέτρησης της θα είναι το Tesla στο SI .

Τα ζεύγη αντίθετα φορτισμένων πόλων που συναντώνται στη φύση καλούνται μαγνητικά δίπολα (Σχήμα 1.7.) και χαρακτηρίζονται από ένα διανυσματικό μέγεθος που καλείται μαγνητική ροπή, με φορά από τον αρνητικό στο θετικό πόλο και μέτρο που δίνεται από τη σχέση :

$$M=P*L$$

Όπου  $P$  η ποσότητα μαγνητισμού (υποθετικό μέγεθος) και  $L$  η μεταξύ τους απόσταση.(Εισαγωγή στη Γεωφυσική Κ. Παπαζάχος-Β. Παπαζάχος).

Ένα στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο είναι το ίδιο το άτομο ενός στοιχείου που η περιστροφή ενός ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του καθώς και γύρω από τον εαυτό του (ιδιοπεριστροφή) δημιουργεί μαγνητική ροπή



**Σχήμα1.7** Μαγνητικό δίπολο(<http://physiclessons.blogspot.gr/2013/04/>)

Κατά την μελέτη ενός μαγνητισμένου σώματος υποθέτουμε ότι αυτό αποτελείται από στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα, τα οποία τείνουν να αποκτήσουν τη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όταν το σώμα τεθεί μέσα στο πεδίο. Εάν η συνολική μαγνητική ροπή του σώματος αυτού είναι  $M^*$  και ο όγκος του είναι  $V$  τότε ονομάζουμε μαγνήτιση  $J$  του σώματος αυτού ένα διανυσματικό μέγεθος με διεύθυνση και φορά ίδια με αυτήν της μαγνητικής ροπής και μέτρο που δίνεται από τη σχέση :

$$J=M^*/V$$

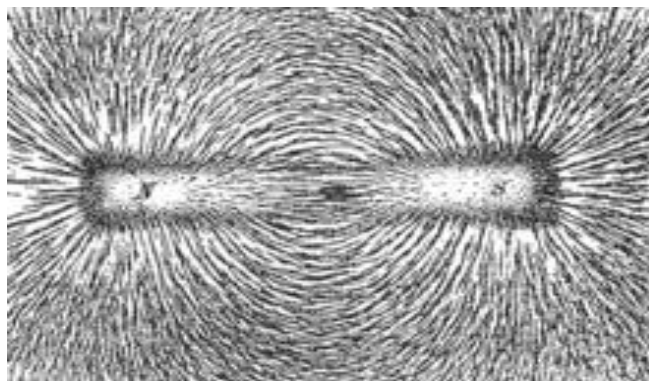
Η μαγνήτιση έχει τις ίδιες μονάδες με την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Στην περίπτωση που τοποθετείται ένα μαγνητικό σώμα μέσα σε ένα όχι ισχυρό μαγνητικό πεδίο η μαγνήτιση που αποκτά συνδέεται με την ένταση του πεδίου με τη σχέση :

$$\mathbf{J} = \kappa \cdot \mathbf{H}$$

Όπου  $\langle \kappa \rangle$  είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα, ένα αδιάστατο μέγεθος που εξαρτάται από το υλικό του μαγνητικού σώματος και τις ιδιότητες του. Αυτή μας δείχνει το πόσο εύκολα η δύσκολα μαγνητίζεται ένα υλικό και συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα με τη σχέση:

$$\mu = 1 + 4 \cdot \pi \cdot \kappa$$



**Σχήμα 1.8.** Μαγνητικές δυναμικές γραμμές σε ραβδόμορφο μαγνήτη όπως φαίνονται με ρινίσματα σιδήρου πάνω σε χαρτί (<https://el.wikipedia.org/wiki>)

### 1.3 Σχετικά με το γήινο μαγνητικό πεδίο

Η ακριβής προέλευση του και ο τρόπος που δημιουργήθηκε το μαγνητικό πεδίο της γης αποτέλεσαν αντικείμενο πολλών θεωριών. Η θεωρία που έχει επικρατήσει για το σημαντικά μεγαλύτερο μέρος του είναι αυτή της αυτοδιεγερόμενης ηλεκτρικής γεννήτριας. Προϋποθέσεις που γίνονται δεκτές σε αυτή τη θεωρία είναι η ύπαρξη ενός αρχικού ασθενούς μαγνητικού πεδίου, και ο εξωτερικός πυρήνας να είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και να πραγματοποιεί συνεχή περιστροφή. Γεωφυσικά και σεισμικά δεδομένα συνηγορούν στην ορθότητα των παραπάνω υποθέσεων. Η ενέργεια που απαιτείται για την συνεχή περιστροφή του εξωτερικού πυρήνα προέρχεται από την αργή περιστροφή του άξονα της γης γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδο περιφοράς της γης γύρω από τον Ήλιο (μετάπτωση).

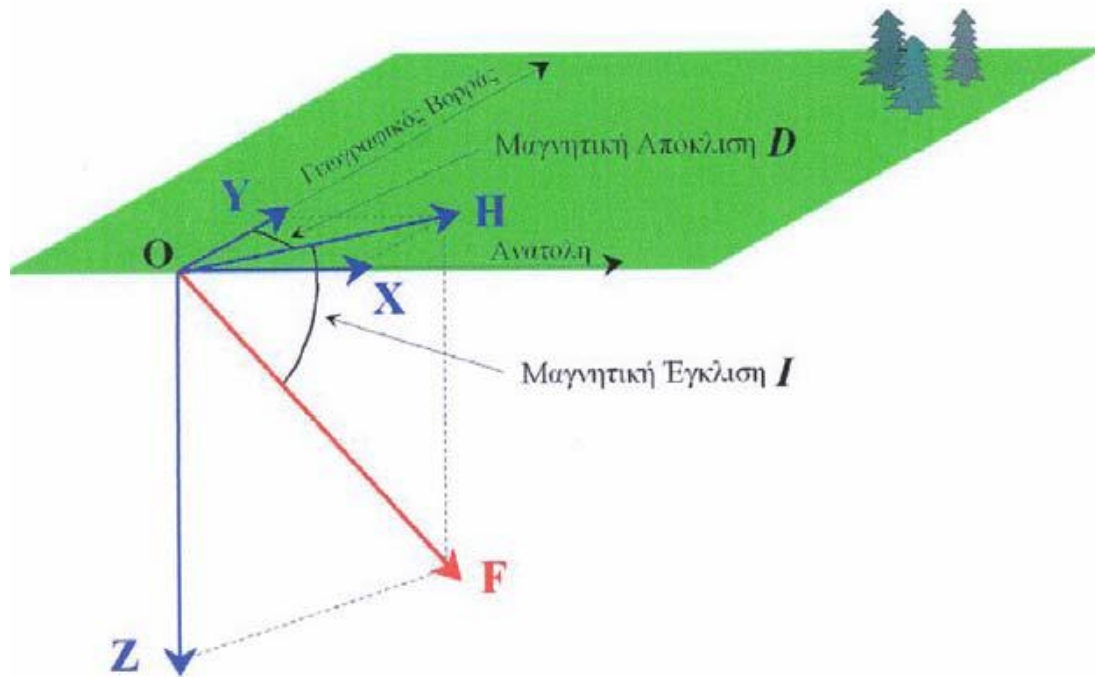
Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στον εξωτερικό πυρήνα.

Το μαγνητικό πεδίο της μοιάζει πολύ με αυτό που θα δημιουργούσε ένας ραβδόμορφος μαγνήτης αν τοποθετούνταν στο κέντρο της ( γεωκεντρικό αξονικό δίπολο) ο οποίος όμως θα σχημάτιζε μια γωνία  $11.5^\circ$  περίπου μοιρών σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν συμπίπτουν οι γεωγραφικοί πόλοι με τους μαγνητικούς και η διεύθυνση της πυξίδας σε ένα σημείο της επιφάνειας της γης διαφέρει από την διεύθυνση του γεωγραφικού (αληθινού) βορρά.

#### **1.4 Τρόπος περιγραφής του μαγνητικού πεδίου της γης στον χώρο**

Το διάνυσμα της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου διαφέρει από σημείο σε σημείο κατά διεύθυνση, φορά και μέτρο πάνω στην επιφάνεια της γης. Έτσι περιγράφει την μεταβολή του πεδίου και ανταποκρίνεται σε αυτήν.

Τρεις κάθετα τεμνόμενοι μεταξύ τους άξονες, αποτελούν ένα τρισσορθογώνιο σύστημα πάνω στο οποίο απεικονίζονται οι συνιστώσες του διανύσματος της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης (Σχήμα 1.9). Η γωνία που ορίζεται από την οριζόντια συνιστώσα και την μεσημβρινή συνιστώσα (γωνία μεταξύ μαγνητικού και γεωγραφικού μεσημβρινού) ονομάζεται μαγνητική απόκλιση ενώ η γωνία μεταξύ της ολικής έντασης του πεδίου και της οριζόντιας συνιστώσας της ονομάζεται μαγνητική έγκλιση. ( Εισαγωγή στη γεωφυσική Κ. Παπαζάχος-Β. Παπαζάχος ).

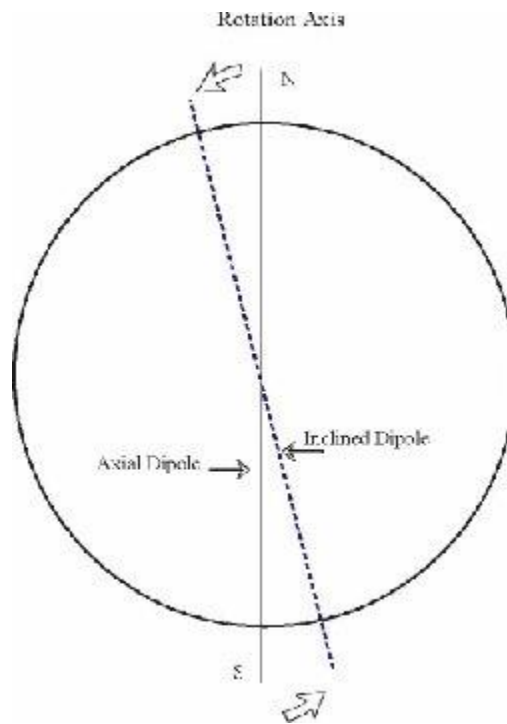


**Σχήμα 1.9.** Σε κάθε σημείο πάνω στη Γη, το διάνυσμα της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου  $F$  έχει συγκεκριμένο μέγεθος και συγκεκριμένη διεύθυνση. Για το λόγο αυτό το διάνυσμα  $F$  πρέπει να προσδιορίζεται ως προς ορισμένο σύστημα αναφοράς για να είναι δυνατός ο καθορισμός των μεταβολών της έντασης

Το μαγνητικό πεδίο όπως έχει αναφερθεί, στην επιφάνεια της γης είναι κυρίως διπολικό (ομοιότητα με ραβδόμορφο μαγνήτη). Η πραγματικότητα όμως είναι αρκετά πιο περίπλοκη. Παρατηρούνται δηλαδή επιπρόσθετες μη διπολικές συνιστώσες, ανομοιογενώς κατανομημένες στην γήινη επιφάνεια που συγκεντρώνονται σε έξι η επτά τμήματα ηπειρωτικών περιοχών. Αυτές, όπου υπάρχουν, προστίθενται στο διπολικό πεδίο και προκύπτει έτσι το συνολικό εξωτερικό πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται διαταραχές στην απόκλιση, την έγκλιση και την ένταση που θα αναμένονταν εάν το πεδίο ήταν αποκλειστικά διπολικό.

Τελικά το μαγνητικό πεδίο που μετρείται σε κάθε σημείο της επιφάνειας της γης είναι ένας συνδυασμός μαγνητικών πεδίων που προέρχονται από διάφορες πηγές, εσωτερικές και εξωτερικές που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το Κύριο Πεδίο που δημιουργείται στον εξωτερικό πυρήνα συνεισφέρει πάνω από το 90% και μοιάζει με το μαγνητικό πεδίο που θα παρήγαγε μια διπολική μαγνητική πηγή που βρίσκεται στο κέντρο της γης και έχει κλίση  $\sim 11^\circ$  ως προς τον άξονα περιστροφής της (έκκεντρο δίπολο. Σχήμα 1.10).

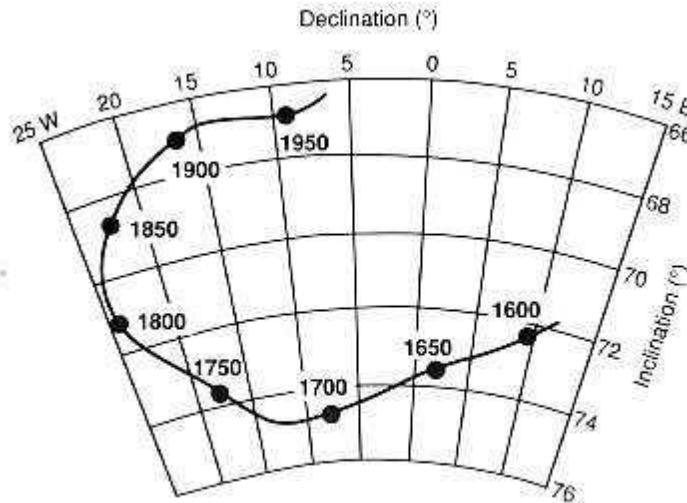




**Σχήμα 1.10.** Η προβολή του έκκεντρου δίπολου στον άξονα περιστροφής της Γής

### 1.5 Χρονική μεταβολή του γεωμαγνητικού πεδίου – καμπύλες αιώνιας μεταβολής

Έχει ήδη αναφερθεί ότι εκτός από τοπικά το γεωμαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται και χρονικά. Εκτός από τις παροδικές, που χαρακτηρίζονται ως γρήγορες μεταβολές, υπάρχουν αυτές που είναι και οι σπουδαιότερες καθώς ενδιαφέρουν τον παλαιομαγνητισμό/αρχαιομαγνητισμό, λέγονται αιώνιες μεταβολές και συμβαίνουν αργά σε χρονικές περιόδους από ένα μέχρι και  $10^5$  έτη. Οι καμπύλες που περιγράφουν αυτού του είδους τις μεταβολές λέγονται καμπύλες αιώνιας μεταβολής (SVC) και μπορούν να αποτυπωθούν για διάφορες περιοχές όπου υπάρχουν τα ιστορικά δεδομένα (παρατηρήσεις). Σχήμα 1.11.



**Σχήμα 1.11.** Καμπύλη αιώνας μεταβολής για το Greenwich (<http://docplayer.gr/163606-Aristoteleio-panepistimio-thessalonikis>)

Συμπεράσματα που προέκυψαν από διάφορες μελέτες δείχνουν ότι η αιώνας μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της γης οφείλεται κατά κύριο λόγο σε χρονική μεταβολή του μη διπολικού πεδίου, το οποίο έχει διαπιστωθεί ότι παρουσιάζει προς τη Δύση μετάθεση της τάξης των  $0.2^\circ$  μοιρών ανά έτος. Ένα μέρος της όμως οφείλεται και στη μεταβολή του διπολικού πεδίου που μετατίθεται επίσης προς τα Δυτικά όπως έχει παρατηρηθεί με ρυθμό  $0.05^\circ$  ανά έτος.

Γενικά για να δημιουργηθεί ένα μοντέλο αιώνας μεταβολής (σε ένα τόπο π.χ) είναι απαραίτητο κάποιο εύρος χρόνου μετρήσεων που είναι πιο μεγάλο από το διαθέσιμο από τις ιστορικές καταγραφές. Για το διάστημα πριν τον 17<sup>ο</sup> αιώνα μόνο έμμεσες παρατηρήσεις του μαγνητικού πεδίου της γης θα ήταν δυνατόν να προκύψουν από αρχαιομαγνητικές μετρήσεις αρχαιολογικών δομών, παλαιομαγνητικές μετρήσεις λιμναίων αποθέσεων ή λαβών η και συνδυασμό των παραπάνω. Όσον αφορά τα παγκόσμια μοντέλα καταγραφής του πεδίου που βασίζονται σε μαγνητικές παρατηρήσεις γενικά, λαμβάνουν υπόψη όλα τα αρχαιομαγνητικά και παλαιομαγνητικά δεδομένα σε παγκόσμια η και τοπική κλίμακα (Hongre et al., 1998; Korte and Constable, 2005, 2009). Έτσι λοιπόν τα μοντέλα που θα προκύψουν έχουν άμεση εξάρτηση από την ποσότητα των δεδομένων που διατίθενται καθώς και από την κατανομή τους στον χώρο. Η πλειοψηφία των περιοχών όπου έχουν αποκτηθεί αρχαίο – και παλαιομαγνητικά αποτελέσματα βρίσκονται στο Βόρειο ημισφαίριο. Σχετικά με την αρχαιογένταση, η πλειοψηφία των δεδομένων προέρχεται από την Ευρώπη και παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή διασπορά. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι έχει μεγάλη σημασία η



εξαγωγή καλά προσδιορισμένων δεδομένων διεύθυνσης και έντασης για να μπορέσει να αποκτηθεί όσον το δυνατόν πληρέστερη γνώση για τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου κατά το παρελθόν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΗΝ ΥΛΗ. ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Η προέλευση των μαγνητικών πεδίων είναι η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Μέσα στα άτομα η κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα και γύρω από τον άξονα τους γίνεται η αιτία της εμφάνισης μαγνητικού πεδίου το οποίο χαρακτηρίζεται από μαγνητική ροπή.

Μακροσκοπικά αν εξετάσουμε τα πετρώματα διαπιστώνουμε πως περιέχουν μαγνητικούς κόκκους οι οποίοι συμπεριφέρονται σαν μικρά δίπολα.

Τα φυσικά υλικά ανάλογα με τις μαγνητικές τους ιδιότητες, το πώς αντιδρούν δηλαδή όταν βρεθούν μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Στις δύο πρώτες που θα εξεταστούν αμέσως παρακάτω, με την αφαίρεση του μαγνητικού πεδίου στο οποίο αρχικά θα ενταχθούν σώματα που ανήκουν σε αυτές (διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά), δεν διατηρείται η μαγνήτιση τους ενώ αντίθετα στη τρίτη κατηγορία που θα εξεταστεί μετά (σιδηρομαγνητικά), παρατηρείται μια παραμένουσα μαγνήτιση έπειτα από την απομάκρυνση του πεδίου.

#### 2.1 Διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά.

A) Διαμαγνητικά υλικά: Τα υλικά αυτά έχουν μικρή αρνητική τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας η οποία είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Αποτελούνται από άτομα που δεν έχουν συνισταμένη μαγνητική ροπή. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουν συμπληρωμένες τις εξωτερικές τους ενεργειακές στοιβάδες η διαφορετικά η συνολική τροχιακή στροφορμή και ιδιοστροφορμή των ηλεκτρονίων τους είναι μηδέν.

B) Παραμαγνητικά υλικά : Τα άτομα των υλικών αυτών παρουσιάζουν μια συνισταμένη μαγνητική ροπή (χωρίς να υπάρχει όμως αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών μαγνητικών ροπών). Τα στοιχεία και οι ενώσεις αυτής της κατηγορίας δεν έχουν συμπληρωμένες τις εξωτερικές τους στοιβάδες. Με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου συμβαίνει να παραλληλίζονται οι στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές (παραμαγνητισμός). Η μαγνητική επιδεκτικότητα σε αυτή τη περίπτωση έχει μικρή θετική τιμή και ελαττώνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία.

## 2.2 Σιδηρομαγνητικά υλικά

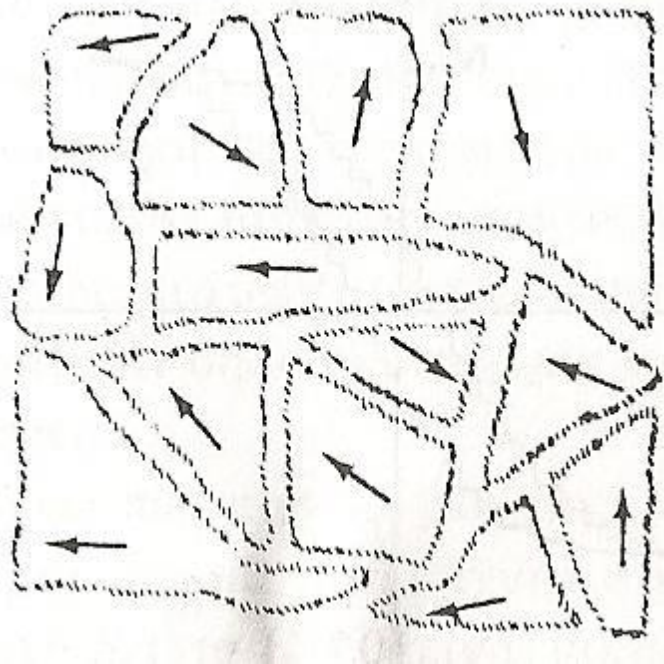
Η πραγματικότητα εδώ είναι πως εξετάζουμε μια ειδική περίπτωση παραμαγνητισμού, όπου έχουμε αυθόρμητο προσανατολισμό μαγνητικών ροπών λόγω της ύπαρξης και κατά συνέπεια επίδρασης ενός ενδογενούς μαγνητικού πεδίου.

Τα υλικά που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία παρουσιάζουν την ικανότητα να αναπτύσσουν μαγνήτιση χωρίς την παρουσία εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου.

Η τιμή της μάλιστα είναι αρκετά μεγάλη και μπορεί να διατηρηθεί επίσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή ονομάζεται παραμένουσα ή αυτοφυής και το φαινόμενο σιδηρομαγνητισμός. Τα άτομα των σιδηρομαγνητικών σωμάτων διαθέτουν μαγνητικές ροπές που αλληλεπιδρούν έντονα με τις γειτονικές τους ροπές.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα σε αυτή τη περίπτωση έχει μεγάλη θετική τιμή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι το ότι η μαγνήτιση τους μπορεί να επηρεαστεί από πολύ μικρά μαγνητικά πεδία όπως αυτό της γης. Η μαγνητική συμπεριφορά τους οφείλεται στο ότι αποτελούνται από πολύ μικρά τμήματα (domains ή περιοχές Weiss) που στο κάθε ένα αναπτύσσεται μια τοπική μαγνήτιση, δηλαδή οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι διατεταγμένες παράλληλα και ομόρροπα μεταξύ τους (εξαιτίας της ισχυρής σύζευξης ανάμεσά τους) όταν δεν επιδρά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Οι περιοχές αυτές είναι μικρές αλλά αρκετά μεγαλύτερες από τις ατομικές αποστάσεις. Κάθε μαγνητική περιοχή συνήθως αποτελείται από δισεκατομμύρια ατομικά δίπολα, τα οποία έχουν κοινό προσανατολισμό. (Σχήμα 2.1)



**Σχήμα 2.1.** Σιδηρομαγνητικές περιοχές Weiss. Κάθε μια είναι μαγνητικά κορεσμένη και με ανεξάρτητο προσανατολισμό, εκτός εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Οικονόμου, 1980).

Κάθε περιοχή εμφανίζεται μαγνητικά κορεσμένη. Μακροσκοπικά τα σιδηρομαγνητικά υλικά δεν παρουσιάζουν μαγνήτιση χωρίς την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου γιατί οι διευθύνσεις μαγνητικού προσανατολισμού κάθε μαγνητικής περιοχής (domain) κατανέμονται τυχαία στο χώρο και αλληλοαναιρούνται. Όταν όμως επιδράσει εξωτερικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών προσανατολίζονται σταδιακά στη διεύθυνση του πεδίου και αν αυτό είναι ισχυρό το υλικό φτάνει σε κατάσταση κορεσμού, όπου οι μαγνητικές ροπές όλων των περιοχών καταλήγουν να προσανατολιστούν πλήρως προς τη διεύθυνση του πεδίου.

Η διάταξη σε περιοχές προσανατολισμένων μαγνητικών ροπών των σιδηρομαγνητικών υλικών, είναι μια κατάσταση τάξης που σε αυτήν αντιτίθεται η εντροπία του συστήματος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και αυτή η αντίθεση λόγω του ότι μεγαλώνει το ποσό ενέργειας που περιέχει το σώμα. Φτάνει τελικά μια θερμοκρασία που υπερσχύει η αταξία μέσα στις ανεξάρτητες περιοχές Weiss και το υλικό σταματάει να συμπεριφέρεται ως σιδηρομαγνητικό και μεταπίπτει στη κατηγορία των παραμαγνητικών υλικών. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **Curie-Weiss ( $T_c$ )**.

### 2.3 Είδη σιδηρομαγνητικών υλικών

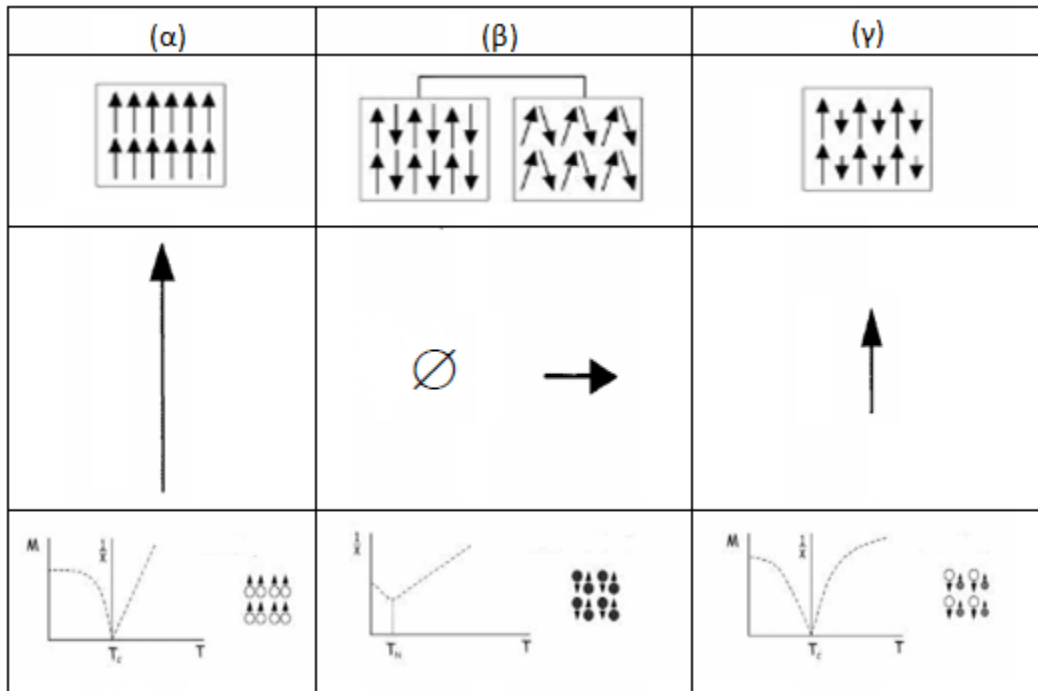
Ο λόγος της ύπαρξης των ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών (π.χ. παραμένουσα μαγνήτιση, υψηλή τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας) είναι η ζεύξη-ευθυγράμμιση των ατομικών μαγνητικών ροπών ( spins) μέσα σε μεγάλες περιοχές στους κρυστάλλους των ορυκτών των διαφόρων τέτοιων υλικών. Ο σιδηρομαγνητισμός σαν γενικός όρος περιγράφει όλα τα υλικά στα οποία παρατηρείται σύζευξη ατομικών μαγνητικών ροπών. Διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες αυθόρμητης ευθυγράμμισης spins που γίνεται η κατάταξη των σιδηρομαγνητικών υλικών, σε αναλογία με τον τρόπο της σχετικής διάταξης των ατομικών μαγνητικών ροπών.

α) Κλασσικός σιδηρομαγνητισμός (pure ferromagnetism): Αυτή ή περίπτωση αναφέρεται συγκεκριμένα στην παράλληλη και ομόρροπη διάταξη των ανωτέρω διανυσμάτων μέσα σε μεγάλες περιοχές του υλικού (περιοχές Weiss).

β) Αντισιδηρομαγνητισμός (antiferromagnetism): Περίπτωση που εμφανίζεται ισχυρή αντιπαράλληλη σύζευξη μεταξύ ίσων σε μέτρο διανυσμάτων μαγνητικών ροπών. Ο προσανατολισμός είναι τέτοιος ώστε να υπάρχουν δύο αντιπαράλληλα σιδηρομαγνητικά υποπλέγματα ίσα όμως κατά μέτρο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα αντισιδηρομαγνητικά spins δεν είναι τελείως ευθυγραμμισμένα στην αντιπαράλληλη διεύθυνση αλλά αποκλίνουν υπό ορισμένη γωνία μεταξύ τους. Ένα χαρακτηριστικό των αντισιδηρομαγνητικών υλικών είναι η θερμοκρασία **Neel**, «**T<sub>s</sub>**», πάνω από την οποία η ατομική σειρά καταστρέφεται και το υλικό συμπεριφέρεται ως παραμαγνητικό. Η αυθόρμητη μαγνήτιση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών είναι μηδέν

γ) Σιδηριμαγνητισμός (ferrimagnetism): Όπως και στη προηγούμενη κατηγορία έχουμε ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς διανύσματα μαγνητικών ροπών, μόνο που τώρα διαφέρουν (οι δυο ομάδες που παρατηρούνται) κατά μέτρο. Υπάρχουν και εδώ δηλαδή δυο αντιπαράλληλα σιδηρομαγνητικά υποπλέγματα (όπως και στα αντισιδηρομαγνητικά) που οι μαγνητικές τους ροπές δεν έχουν ίδιο μέτρο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζεται στα υλικά αυτής της κατηγορίας αυθόρμητη μαγνήτιση η οποία όμως είναι μικρότερη από αυτήν που παρατηρείται στα κλασσικά σιδηρομαγνητικά υλικά. Τα υλικά με τις παραπάνω ιδιότητες ονομάζονται σιδηριμαγνητικά και πολλά από τα σημαντικά σιδηρομαγνητικά ορυκτά είναι στη πραγματικότητα σιδηριμαγνητικά όπως ο μαγνητίτης (Σχήμα 2.2)

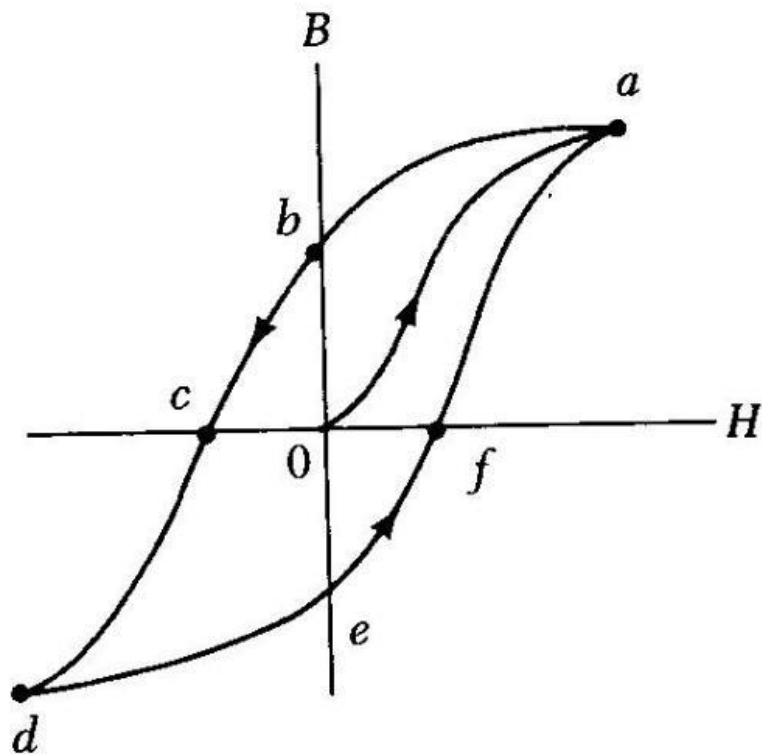


**Σχήμα 2.2.** Τύποι ευθυγράμμισης των spin στο σιδηρομαγνητισμό και συμπεριφορά της μαγνήτισης «M» και της επιδεκτικότητας «χ» με τη θερμοκρασία «T» για τρεις τύπους σιδηρομαγνητικών ορυκτών. (α) Σιδηρομαγνητισμός με παράλληλη σύζευξη, (β) Αντισιδηρομαγνητισμός με αντιπαράλληλη (αριστερά) και αντιπαράλληλη υπό γωνία σύζευξη (δεξιά), (γ) Σιδηρομαγνητισμός με αντιπαράλληλη σύζευξη και επίπεδα άνιση μαγνήτιση. Κάτω από το κάθε σχήμα φαίνεται και η συνιστάμενη διεύθυνση της μαγνήτισης για κάθε περίπτωση ξεχωριστά (Από Tauxe, 2003).

#### 2.4 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών

Η παράμετρος  $\langle k \rangle$  δηλαδή η μαγνητική επιδεκτικότητα, δείχνει το πόσο εύκολα μπορεί να μαγνητιστεί ένα υλικό όταν εισαχθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο. Η απλή γραμμική σχέση  $J = k \cdot H$  που συνδέει τη μαγνήτιση του υλικού με την ένταση του μαγνητικού πεδίου και υποδηλώνει την παραλληλία των δύο διανυσματικών μεγεθών δεν ισχύει στη περίπτωση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε πως λόγω των μεγάλων τιμών μαγνήτισης που επιτυγχάνονται σε αυτές τις περιπτώσεις, η μαγνήτιση είναι περίπου ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής B. Για αυτό και χρησιμοποιείται η μία αντί για την άλλη κατά περίπτωση. Αν σε ένα τέτοιο υλικό που αρχικά βρεθεί σε μη μαγνητική κατάσταση επιδράσει ένα επαρκές εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H τότε η σχέση  $B = f(H)$  ή ακόμα και η  $J = g(H)$

περιγράφονται όπως στο παρακάτω σχήμα :



**Σχήμα 2.3.** Βρόχος υστέρησης. Η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής  $B$  με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό.

Η καμπύλη  $Oa$  είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης. (Εργαστήριο φυσικής Α.Π.Θ.)

Αρχικά με την εφαρμογή του πεδίου, η  $B$  σε σχέση με την  $H$  ακολουθεί την πορεία  $(Oa)$  και φτάνει στο σημείο κόρου  $(a)$  όπου όσο και να αυξηθεί το πεδίο παραμένει σταθερή. Έπειτα με τον μηδενισμό του πεδίου η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται αλλά διατηρεί μια τιμή  $(b)$ . Αυτή ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και η αντίστοιχη τιμή της μαγνήτισης παραμένουσα μαγνήτιση. Το όλο φαινόμενο λέγεται υστέρηση και οι προαναφερθείσες τιμές εξαρτώνται από το είδος του υλικού. Αντιστρέφουμε τη φορά του πεδίου και στο σημείο  $(c)$  μηδενίζεται η μαγνήτιση (πορεία  $bc$ ). Η τιμή της  $H$  στο σημείο  $(c)$  που συμβαίνει αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο. Στη συνέχεια αυξάνοντας την ένταση του πεδίου κατά την ίδια φορά (αντίθετη της αρχικής) φτάνουμε ξανά σε σημείο κόρου  $(d)$  έχοντας τις μαγνητικές ροπές προσανατολισμένες αντίστροφα σε σχέση με τη θέση που είχαν στο σημείο  $(a)$ . Μειώνουμε (κατά απόλυτη τιμή) το πεδίο μέχρι να μηδενιστεί και έχουμε ξανά παραμένουσα μαγνήτιση στη θέση  $(e)$ . Εφαρμόζοντας ξανά θετικό πεδίο έπειτα φτάνουμε στη θέση  $(f)$  για να μηδενιστεί η παραμένουσα και τελικά στην θέση  $(a)$  του

κόρου.

Η κλειστή καμπύλη (α b c d f α) λέγεται βρόχος υστέρησης και περιγράφει τη μαγνητική συμπεριφορά του εκάστοτε σιδηρομαγνητικού υλικού.

Τα μαγνητικά υλικά με μικρό συνεκτικό πεδίο χαρακτηρίζονται ως μαλακά ενώ αυτά με μεγάλο ως σκληρά (απομαγνητίζονται δύσκολα) και το κάθε είδος χρησιμοποιείται για τις αντίστοιχα κατάλληλες εφαρμογές.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

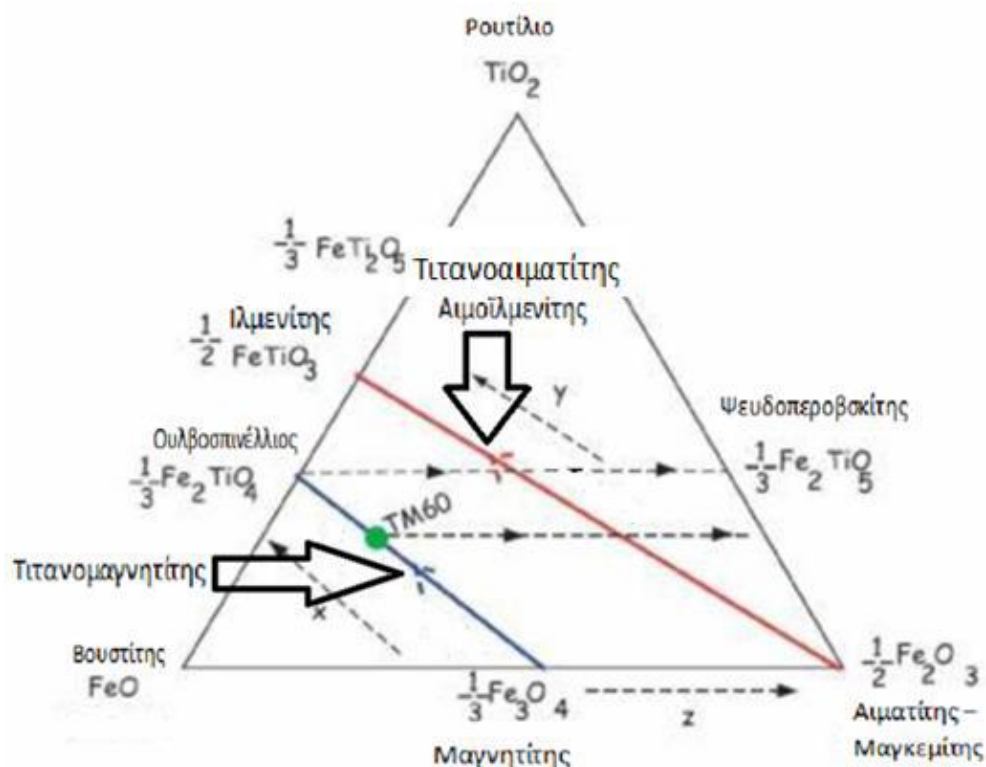
### Η ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

#### 3.1 Τα μαγνητικά ορυκτά

Το χημικό στοιχείο που έχει πρωταρχικό ρόλο στη σύσταση των μαγνητικών ορυκτών είναι ο σίδηρος. Αυτός είναι από τα πιο κοινά συστατικά των γήινων πετρωμάτων και εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή οξειδίων ή υδροξειδίων.

Η θερμοκρασία τήξης των οξειδίων του σιδήρου κυμαίνεται μεταξύ 1400-1600<sup>o</sup> C και οι κρύσταλλοι τους είναι από τους πρώτους που στερεοποιούνται από το μάγμα. Με την πτώση της θερμοκρασίας κάτω από 1200<sup>o</sup> C η και χαμηλότερα γύρω στους 900<sup>o</sup> C τα οξείδια που κρυσταλλώνονται θα περιέχουν και τιτάνιο οπότε δημιουργούνται σειρές ορυκτών με συνεχή σύσταση. Τα πιο σημαντικά μαγνητικά ορυκτά που συνεισφέρουν στην παραμένουσα μαγνήτιση των ψημένων αργίλων, οι οποίες και αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, είναι τα οξείδια του σιδήρου με πιο σημαντικό το μαγνητίτη ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), έπειτα το μαγκεμίτη ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) και τέλος τον αιματίτη ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) (Thompson and Oldfield, 1986).

Τα λεπτόκοκκα οξείδια του σιδήρου είναι υπεύθυνα για το κόκκινο χρώμα των ψημένων αργίλων όταν θερμαίνονται σε οξειδωτικό περιβάλλον ή για το γκριζόμαυρο χρώμα όταν θερμαίνονται σε αναγωγικό περιβάλλον, οι συνθέσεις των οποίων φαίνονται στο τριγωνικό διάγραμμα (Σχήμα 3.1)  $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}$ .



**Σχήμα 3.1.** Ορυκτολογική σύνθεση των σιδηρομαγνητικών ορυκτών: τριαδικό διάγραμμα των οξειδίων του σιδήρου. Οι συνθέσεις των πιο σημαντικών FeTi-οξειδίων αναγράφονται στο διάγραμμα. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τη διεύθυνση της αύξησης οξείδωσης. Οι συνεχείς γραμμές είναι οι σειρές του τιτανομαγνητίτη και τιτανοαιματίτη (Από Tauche, 2003).

Οι θερμοκρασίες Curie/Neel είναι 320°C για τον γκρεγκίτη, ~333°C για τον πυρροτίτη, από ~150°C έως ~580°C για τον τιτανομαγνητίτη, ~580°C για το μαγνητίτη και 675°C για τον αιματίτη. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 250°C ο μαγκεμίτης μετατρέπεται σε αιματίτη και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 300°C τα σουλφίδια του σιδήρου οξειδώνονται σε μαγνητίτη. Οι δυνάμεις συνοχής αυτών των ορυκτών εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων και από το ποσοστό του τιτανίου. Γενικά, η συνοχή του τιτανομαγνητίτη είναι μικρότερη από αυτή μαγνητίτη, του μαγνητίτη περίπου ίση με αυτή του μαγκεμίτη και του γκρεγκίτη, οι οποίες είναι μικρότερες από αυτή του πυρροτίτη. Τέλος, ο αιματίτης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συνοχή.

### 3.2 Ο χρόνος ηρεμίας

Για να γίνουν κατανοητές οι βασικές αρχές της αρχαιομαγνητικής μεθόδου και τα αποτελέσματα που θα ληφθούν στη τελική φάση της παρούσης εργασίας, πρέπει να γίνει μια σύντομη επεξήγηση των διαφόρων μηχανισμών της απόκτησης και της διατήρησης της μαγνήτισης.

Ο Neel το 1955 έθεσε την θεωρητική βάση για το πώς μπορεί να διατηρηθεί στο χρόνο ένα αρχαίο μαγνητικό πεδίο. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία του Neel, ο μηχανισμός που ελέγχει τη διαδικασία της μαγνητικής ισορροπίας είναι ο χρόνος ηρεμίας «τ». Αν ένα υλικό με αρχική μαγνήτιση « $J_0$ » βρεθεί σε περιβάλλον με απουσία μαγνητικού πεδίου, τότε αυτό έχει μια ανισότροπη ενέργεια που τείνει να διατηρήσει κάθε μαγνητική ροπή στη αρχική της διεύθυνση. Επίσης, είναι δυνατόν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η μαγνητική ροπή να έχει αρκετή θερμική ενέργεια για να μπορέσει να υπερπηδήσει το ενεργειακό όριο και η μαγνήτιση από έναν άξονα εύκολης μαγνήτισης να πάει σε άλλον. ( Η θερμική ενέργεια  $\langle E \rangle$  δίνεται από τη σχέση  $E = k \cdot T$  όπου  $k$  είναι η σταθερά Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία)

Με τη πάροδο του χρόνου οι μαγνητικές ροπές θα αποκτήσουν τυχαίο προσανατολισμό.

Έτσι λοιπόν αν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που αποτελείται από κόκκους **μιας μαγνητικής περιοχής** βρεθεί μέσα σε χώρο, χωρίς την παρουσία μαγνητικού πεδίου θα παρατηρηθεί με την πάροδο του χρόνου απώλεια της μαγνήτισης του (θεωρούμενο ως θερμοδυναμικό σύστημα που χαρακτηρίζεται από τις ανωτέρω ιδιότητες) που δίνεται από τη σχέση :

$$J(t) = J_0 \exp(-t/\tau)$$

όπου  $J_0$  η αρχική μαγνήτιση,  $t$  ο χρόνος και  $\tau$  ο χρόνος ηρεμίας (ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η παραμένουσα μαγνήτιση στο  $1/e$  της  $J_0$ ). Ο χρόνος ηρεμίας,  $\tau$ , συνδέεται με τη θερμοκρασία και τον όγκο του κόκκου σύμφωνα με την εξίσωση του Neel:

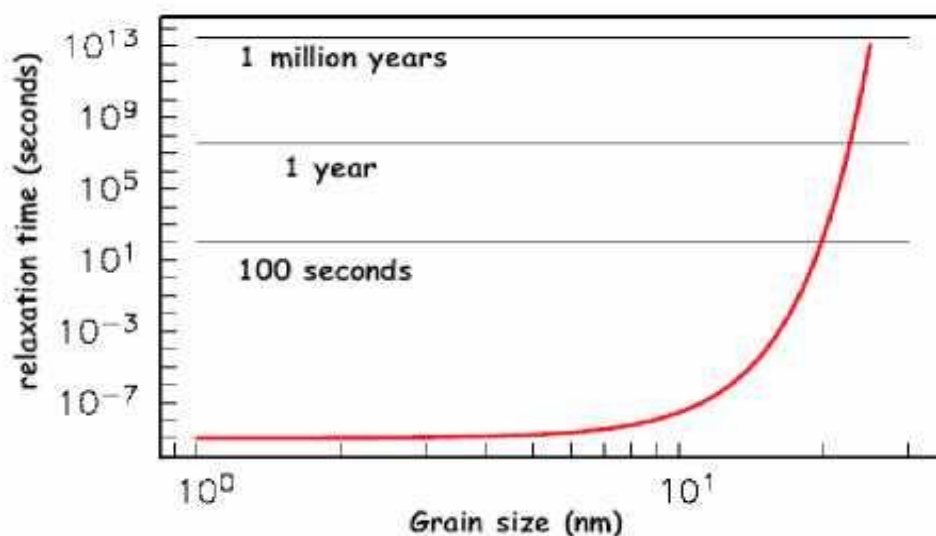
$$\tau = (1/C) \exp(K \cdot V / k \cdot T)$$

όπου  $V$  ο όγκος,  $T$  η θερμοκρασία,  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $K$  η μαγνητική ανισότροπη ενέργεια ανά μονάδα όγκου. Η σταθερά  $C$  είναι παράγοντας συχνότητας και δίνει την πιθανότητα ένας κόκκος να έχει αρκετή θερμική ενέργεια για να ξεπεράσει τη μαγνητική « $KV$ » και να αλλάξει τη μαγνητική ροπή χάρη στη θερμική ενέργεια  $kT$ . Η τιμή

του  $\langle \tau \rangle$  καθορίζεται από τον ανταγωνισμό ανάμεσα στη μαγνητική «KV» και την θερμική  $\langle kT \rangle$  ενέργεια.

Τα παραπάνω ισχύουν στη περίπτωση που δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο όπως έχει προαναφερθεί, οπότε ο χρόνος ηρεμίας του υλικού δεν επηρεάζεται από εξωτερικό παράγοντα. Στην αντίθετη περίπτωση όμως, δηλαδή με την τοποθέτηση του υλικού μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, η ενέργεια που θα χρειαστεί ένας μαγνητικός κόκκος για να ακολουθήσει τη διεύθυνση αυτού του πεδίου, είναι μικρότερη από αυτή που θα χρειαζόταν για να βρεθεί σε κάποια άλλη διεύθυνση.

Τότε λοιπόν ο χρόνος ηρεμίας θα είναι συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Τέλος, η επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου στο χρόνο ηρεμίας είναι αμελητέα (διότι το πεδίο αυτό είναι αρκετά ασθενές) επομένως δεν ασχολούμαστε με τη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή, με την ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου



**Σχήμα 3.2.** Χρόνος ηρεμίας σε συνάρτηση με το μέγεθος των κόκκων για κόκκους Μαγνητίτη (Tauxe, 2005)

Ο χρόνος ηρεμίας  $\langle \tau \rangle$  επηρεάζεται σημαντικά από μικρές μεταβολές του μεγέθους των κόκκων. Το παραπάνω σχήμα (3.2) δείχνει ότι η σχέση αυτή είναι εκθετική.

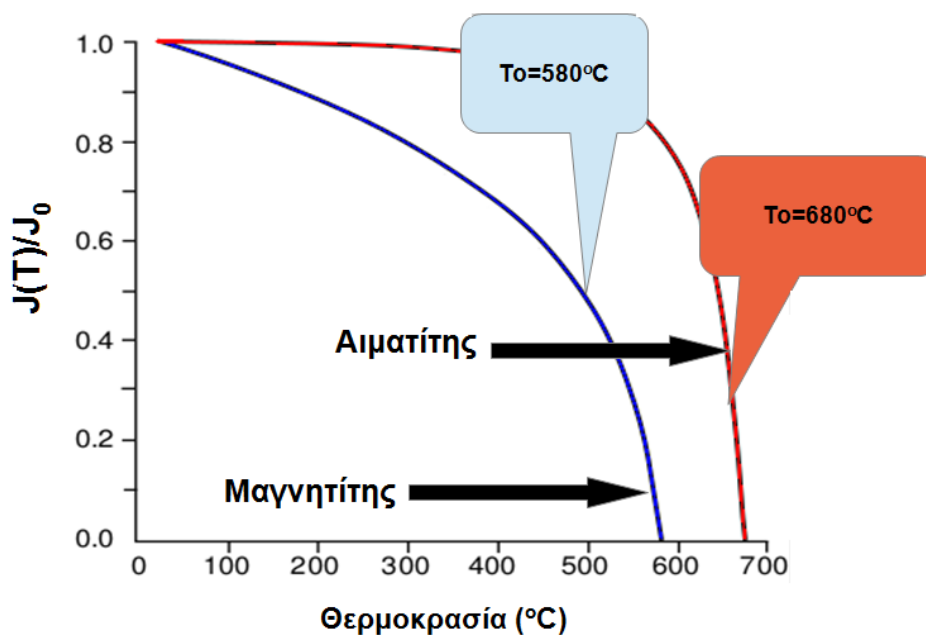
### 3.3 Η θερμοκρασία Curie και η θερμοκρασία φραγμού

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την παραπάνω σχέση (εξίσωση Neel) ο χρόνος ηρεμίας μεταβάλλεται και εξαρτάται σημαντικά από τις μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας  $T$ .

Επίσης η μαγνήτιση κορεσμού ( $M_S$ ) του μαγνητισμένου σώματος είναι και αυτή συνάρτηση της θερμοκρασίας σε μεγάλο βαθμό καθώς με την αύξηση της ( $T$ ) μεγαλώνουν και οι αποστάσεις μεταξύ των δομικών σωματιδίων του υλικού. Το αποτέλεσμα είναι να παρατηρείται μια μείωση της μαγνήτισης ενώ αυξάνεται η θερμοκρασία και τελικά να φτάνει στο σημείο να μηδενίζεται (μαγνήτιση) τη στιγμή που η  $T$  λαμβάνει μια χαρακτηριστική τιμή για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό που ονομάζεται  $T_c$  (θερμοκρασία Curie)

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο μαγνητίτης στους  $580^\circ\text{C}$  και ο αιματίτης στους  $680^\circ\text{C}$ , όπως φαίνεται από την πορεία της απομαγνήτισής τους στο σχήμα 3.3 σε σχέση με τη θερμοκρασία. Επιπλέον και η δύναμη συνοχής « $H_c$ » εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αφού είναι ανάλογη της μαγνήτισης κορεσμού.

Αντίστοιχα, η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για διαφορετικούς κόκκους μαγνητίτη φαίνεται στο σχήμα 3.4



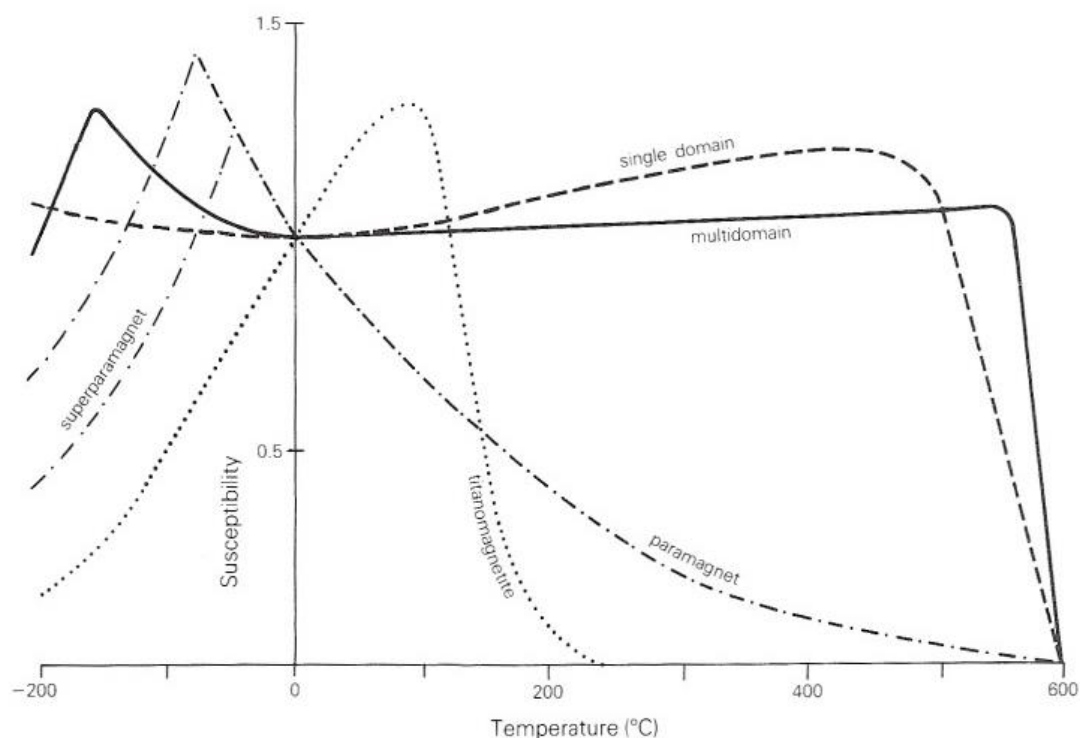
**Σχήμα 3.3.** Κανονικοποιημένη μαγνήτιση κορεσμού με τη θερμοκρασία για το μαγνητίτη και τον αιματίτη, όπου  $J_s0$  η μαγνήτιση κορεσμού σε θερμοκρασία δωματίου (2 Gauss για τον αιματίτη και 480 Gauss για το μαγνητίτη) (Από Butler, 1992, electronic edition, 2004).

Αν τώρα ξεπερασθεί αυτή η θερμοκρασία ( διαφέρει από υλικό σε υλικό όπως προαναφέρθηκε) τότε σταματάει να υπάρχει η παραμένουσα μαγνήτιση [βλέπε παρακάτω]. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει προσφερθεί ικανό ποσό θερμικής ενέργειας στο σύστημα έτσι ώστε να έχουν αυξηθεί οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων του και τελικά οι ζεύξεις των ατομικών μαγνητικών ροπών να καταστραφούν και το υλικό να χάσει τη μαγνήτιση του και να γίνει παραμαγνητικό. Το σημαντικό εδώ όμως είναι ότι η διαδικασία αυτή είναι γενικά αντιστρέψιμη. Δηλαδή όταν υπάρξει ψύξη κάτω από την θερμοκρασία Curie παρουσιάζεται σε αυτό η παραμένουσα μαγνήτιση.

Για παράδειγμα η  $T_c$  του μαγνητίτη είναι  $580^{\circ}\text{C}$  ενώ του αιματίτη  $680^{\circ}\text{C}$ .

Εξετάζοντας με λεπτομέρεια το πώς ακριβώς μεταβάλλεται ο χρόνος ηρεμίας με τη θερμοκρασία σε ένα στοιχειώδες τμήμα μαγνητικού ορυκτού (π.χ. σε κόκκο μαγνητίτη) παρατηρούμε ότι σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας αυτός είναι πάρα πολύ μεγάλος ενώ ο κόκκος γίνεται υπερπαραμαγνητικός (πολύ μικρός χρόνος ηρεμίας) σε λίγες εκατοντάδες βαθμούς. Υπάρχει μια θερμοκρασία που διαχωρίζει τις καταστάσεις, βρίσκεται κάτω από την  $T_c$ , και στην οποία ο  $\tau$  είναι μικρός, περίπου  $10^2$ - $10^3$  δευτερόλεπτα και καθορίζεται ως θερμοκρασία φραγμού  $T_b$ .

Μεταξύ  $T_c$  και  $T_b$  όπως προαναφέρθηκε ο κόκκος έχει υπερπαραμαγνητικές ιδιότητες ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες της  $T_b$  αυξάνεται πολύ γρήγορα (με την μείωση της θερμοκρασίας) ο χρόνος ηρεμίας με αποτέλεσμα να κλειδώσει η μαγνητική του ροπή του έτσι ώστε περαιτέρω μεταβολές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου να μην προκαλούν καμία αλλαγή στη μαγνήτιση του. Η  $T_b$  είναι στη πραγματικότητα και η θερμοκρασία στην οποία αποκτάται η παραμένουσα μαγνήτιση. Σε πολλά πετρώματα η παραμένουσα μαγνήτιση εκδηλώνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών φραγμού το οποίο αντανακλά και τις διαφορετικές ιδιότητες των υλικών που φέρουν τη μαγνήτιση. **Αυτό εκδηλώνεται με την εξασθένηση της παραμένουσας μαγνήτισης καθώς το πέτρωμα θερμαίνεται διαδοχικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες.** Αν η θερμοκρασία φραγμού είναι περίπου ίδια με τη θερμοκρασία Curie τότε η θερμοπαραμένουσα θα χαθεί και θα επαναποκτηθεί σε ένα στενό θερμοκρασιακό διάστημα ακριβώς κάτω από το σημείο Curie.



**Σχήμα 3.4.** Καμπύλες μαγνητικής επιδεκτικότητας (ασθενές εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο) σε σχέση με την θερμοκρασία για διαφορετικού μεγέθους και σύστασης κρυστάλλους μαγνητίτη: Τιτανομαγνητίτης (στικτή), μικρού μεγέθους κόκκοι <20μm (διακεκομμένη), μεγάλου μεγέθους κόκκοι >20μm (συμπαγής), υπερ-μαγνητικοί κόκκοι (διακεκομμένη με τελείες) (Thompson and Oldfield 1986),

Σαν συμπέρασμα από τα παραπάνω παρατηρείται η άμεση εξάρτηση του χρόνου ηρεμίας από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα μάλιστα είναι πολύ σημαντικός ο διαχωρισμός της συμπεριφοράς των κόκκων πάνω από την  $T_b$  ως παραμαγνητικοί, σε σχέση με αυτή τη σταθερή μιας μαγνητικής περιοχής κάτω από την  $T_b$  για την κατανόηση της διαδικασίας της απόκτησης της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

### 3.4 Τα είδη της παραμένουσας μαγνήτισης

Η παλαιομαγνητική έρευνα στηρίζεται στο γεγονός της απόκτησης από τα πετρώματα μιας μαγνήτισης κατά το χρόνο της δημιουργίας τους (η και πολύ κοντά του). Αυτή είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου στην περιοχή που γίνεται μια δειγματοληψία κατά το χρόνο δημιουργίας του πετρώματος. (Αν και η άμεση καταγραφή της μαγνήτισης στο δείγμα συμπεριλαμβάνει και παρασιτικές τιμές που αποκτήθηκαν μεταγενέστερα με διάφορους μηχανισμούς και πρέπει να απομακρυνθούν εφ' όσον

θεωρούνται <θόρυβος> ). Έτσι εμμέσως λαμβάνεται η ταυτότητα του παλαιού πεδίου που επικρατούσε στην περιοχή στο συγκεκριμένο χρόνο και τόπο αναφοράς (δειγματοληψίας) με την καταγραφή της διεύθυνσης και της έντασης του.

Το είδος της μαγνήτισης που αποκτάται με τον παραπάνω τρόπο ονομάζεται κύρια μαγνήτιση. Επίσης όλων των ειδών οι παραμένουσες μαγνητίσεις ( βλέπε παρακάτω) που αποκτώνται από τη φύση χαρακτηρίζονται ως **φυσικές**.

Από τη στιγμή τώρα του σχηματισμού του πετρώματος έως και την δειγματοληψία του αυτό υπέστη διάφορες γεωλογικές διεργασίες που ενδεχομένως κάποιες να το επιφόρτισαν με επιπρόσθετες μαγνητίσεις οι οποίες σε αυτή τη περίπτωση καλούνται δευτερεύουσες μαγνητίσεις. **Το διανυσματικό άθροισμα της κύριας και των δευτερευουσών μαγνητίσεων (που αποτυπώνονται σταδιακά μέσα στο χρόνο) στο πέτρωμα, ονομάζεται φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (NRM).** Έτσι :

$$\text{NRM} = \text{κύρια NRM} + \text{δευτερεύουσες NRM}$$

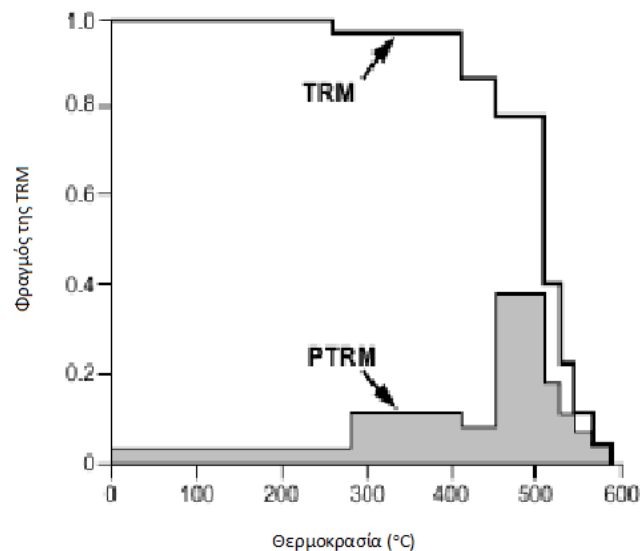
Επειδή συνήθως ενδιαφερόμαστε για κύρια NRM είναι αναγκαίο να απομακρύνεται κάθε δευτερεύουσα παραμένουσα μαγνήτιση που έχει επικαθίσει στο δείγμα κατά τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας του. Η διαδικασία αυτή της μερικής απομαγνήτισης ονομάζεται μαγνητικός καθαρισμός (magnetic cleaning). Ο λόγος που μπορεί να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι το ότι η μαγνητική σταθερότητα της δευτερεύουσας μαγνήτισης τις περισσότερες φορές δεν είναι τόσο μεγάλη όσο της κύριας φυσικής παραμένουσας συνιστώσας. Ο μαγνητικός καθαρισμός γίνεται με θέρμανση ή με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στα πυριγενή πετρώματα και με τη προσθήκη χημικών διαδικασιών στα ιζήματα.

Η κύρια φυσική παραμένουσα μαγνήτιση διαχωρίζεται κατά κανόνα σε τρεις τύπους ανάλογα με το πώς αυτή έχει αποκτηθεί από τα πετρώματα.

**α) Θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM):** Όταν τα πυριγενή πετρώματα που ψύχονται ( σύμφωνα με τις διαδικασίες δημιουργίας τους που είναι γνωστές ) για την κρυστάλλωσή τους , βρίσκονται κάποια στιγμή κοντά στη θερμοκρασία Curie των μαγνητικών ορυκτών που περιέχουν και με τη παρουσία μαγνητικού πεδίου (γήινο αν μιλάμε για φυσική η και εφαρμοζόμενο στο εργαστήριο σε διαφορετική περίπτωση ) παρουσιάζεται να εμφανίζουν μια μαγνήτιση καταλήγοντας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα το δείγμα εμφανίζει αυθόρμητη μαγνήτιση στη θερμοκρασία Curie, η οποία καλείται και **μαγνήτιση ισορροπίας**. Ένα πέτρωμα στη φύση αποτελείται από διάφορα μεγέθη κόκκων, το καθένα εκ των οποίων έχει και τη δική του θερμοκρασία φραγμού  $T_b$ . Καθώς λοιπόν η θερμοκρασία



συνεχίζει να μειώνεται φτάνει κάποτε κάτω από τις θερμοκρασίες φραγμού  $T_b$  των κόκκων οπότε ο χρόνος ηρεμίας αυξάνεται απότομα και η μαγνήτιση που έχει αποκτηθεί έως τότε <παγώνει> και το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο αποτυπώνεται στο πέτρωμα (δείγμα). Αυτή είναι η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM). Για να γίνει πιο κατανοητό, κάθε σιδηρομαγνητικός κόκκος έχει χρόνο ηρεμίας της τάξης των αρκετών δευτερολέπτων πάνω από τη θερμοκρασία φραγμού, λειτουργεί πλήρως ως παραμαγνητικός πάνω από τη θερμοκρασία Curie, και κάτω από τη θερμοκρασία φραγμού λειτουργεί ως σιδηρομαγνητικός με τεράστιο χρόνο ηρεμίας (εκατοντάδες εκατομμύρια έτη τουλάχιστον). Επομένως, μόνο κάτω από τη θερμοκρασία φραγμού μπορεί ένας σιδηρομαγνητικός κόκκος να καταγράψει με τη μορφή TRM τα στοιχεία ενός εξωτερικού πεδίου που επικρατεί τη στιγμή της συγκεκριμένης πτώσης της θερμοκρασίας. (Σχήμα 3.5)



**Σχήμα 3.5.** Κατανομή των θερμοκρασιών φραγμού σε Ηωκαινικό δείγμα βασάλτη. Η συμπαγής τεθλασμένη γραμμή της TRM δηλώνει το ποσοστό της TRM που απομένει έπειτα από τη σταδιακή θέρμανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Το ιστόγραμμα με την ονομασία PTRM δείχνει το ποσοστό της TRM μεταξύ των διαστημάτων των θερμοκρασιών φραγμού (Από Butler, 1992; electronic edition, 2004).

Η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM) έχει μεγάλη σταθερότητα και μπορεί να παραμείνει αμετάβλητη για εκατομμύρια χρόνια. Η ένταση της είναι κατά κανόνα ανάλογη της έντασης του εφαρμοζόμενου πεδίου. Πρέπει να σημειωθεί πάντως εδώ πως πολλά φυσικά υλικά

παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος των κόκκων των μαγνητικών ορυκτών που περιέχουν με συνέπεια την παρουσία μεγάλου εύρους στις θερμοκρασίες φραγμού που εμφανίζονται.

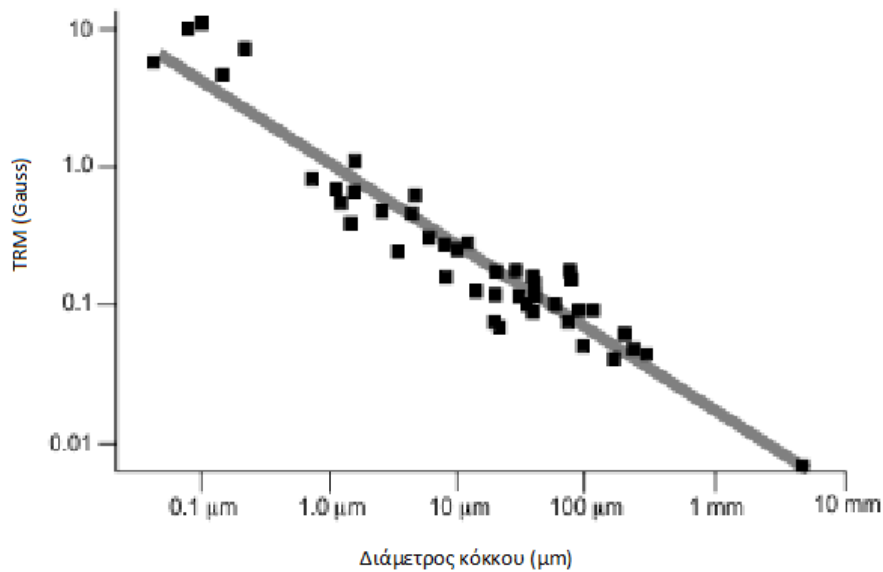
Ο E. Thellier το 1938 παρουσίασε τους νόμους που αφορούν τη μαγνήτιση που αποκτάται από κεραμικά υλικά κατά τη διάρκεια της επανάψυξής τους μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο (θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση).

**Πρώτος νόμος της μαγνητικής μνήμης:** Η μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία κατά την οποία αποκτήθηκε. Συγκεκριμένα η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση δημιουργείται με την επίδραση ενός πεδίου κατά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μεταξύ δυο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών (μερική θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση). Αυτή δεν επηρεάζεται αν συμβούν αναθερμάνσεις σε θερμοκρασίες μικρότερες από τη χαμηλότερη των παραπάνω δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών. Όταν όμως η αναθέρμανση πλησιάζει την υψηλότερη από τις δυο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες τότε εξαφανίζεται.

**Δεύτερος νόμος της πρόσθεσης των μερικών θερμοπαραμενουσών μαγνητίσεων:**

Το άθροισμα των μερικών θερμοπαραμενουσών μαγνητίσεων που αποκτήθηκαν διαδοχικά σε διάφορα όρια χαρακτηριστικών θερμοκρασιών ισούται με εκείνη τη μαγνήτιση που θα αποκτηθεί μόνο μια φορά μέσα στο διάστημα των δύο ακραίων τιμών της θερμοκρασίας (μέγιστη και ελάχιστη).

Γενικά, ο Thellier απέδειξε ότι ένα πέτρωμα καταγράφει, καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας του τη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου της εποχής κατά την οποία επικρατούσε μια μικρή αναθέρμανση, δίχως να απαληφθεί εξ ολοκλήρου η αρχική του μαγνήτιση.



**Σχήμα 3.6.** Εξάρτηση της έντασης της TRM με τη διάμετρο των κόκκων μαγνητίτη, διεσπαρμένων σε διαμαγνητικό – παραμαγνητικό υλικό πλήρωσης. Η ένταση της TRM καθορίζεται ανά μονάδα όγκου του μαγνητίτη ώστε να επιτραπεί η σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων στα οποία χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συγκεντρώσεις διεσπαρμένου μαγνητίτη σε μαγνητικό πεδίο 10e (Τροποποιημένο από Dunlop, 1981).

**β) Χημική παραμένουσα μαγνήτιση(CRM)** : Αυτή συναντάται στα ιζηματογενή πετρώματα συνήθως (όπως και η της επόμενης κατηγορίας ) και είναι το αποτέλεσμα χημικών μεταβολών από τις οποίες παράγονται σιδηρομαγνητικά ορυκτά. Μπορεί να γίνει με τη δημιουργία μιας νέας σιδηρομαγνητικής φάσης, όπως είναι ο σχηματισμός τμημάτων αιματίτη σε ιζήματα ή με τη μεταβολή μιας προϋπάρχουσας φάσης, όπως είναι η οξείδωση του μαγνητίτη σε αιματίτη. Οι διαδικασίες που αναφέρονται παραπάνω συμβαίνουν πάντως κάτω από τη θερμοκρασία Curie.

**γ) Αποθετική παραμένουσα μαγνήτιση (DRM)** : Κατά την απόθεση των ιζημάτων (σε ένα ποτάμι ή μια λίμνη για παράδειγμα) στο υλικό τους μέσα περιέχονται συνήθως και κόκκοι μαγνητίτη. Καθώς οι δυνάμεις βαρύτητας καταβυθίζουν τους κόκκους σχηματίζεται ένα μαγνητισμένο στρώμα σύμφωνο με το τότε γήινο πεδίο. Όσο πιο πολύ ίζημα συγκεντρώνεται καθώς κατακάθονται τα σωματίδια, αυξάνεται το βάρος και οι κόκκοι κλειδώνουν στη συγκεκριμένη θέση μη έχοντας πια τη δυνατότητα να περιστραφούν σε άλλη διεύθυνση. Οι CRM και DRM μαζί με τη θερμική TRM παραμένουσα μαγνήτιση είναι οι σημαντικότερες κύριες NRM.

Οι δευτερεύουσες μαγνητίσεις που όπως προαναφέρθηκε επικάθονται στο πέτρωμα κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας μπορεί να προέρχονται από διάφορες αιτίες. Επίσης σε αυτές εντάσσονται και εκείνες που αποκτώνται από το δείγμα στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των διεργασιών της απομαγνήτισης.

Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία δέχονται την επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου, αποκτούν μια **ιξώδη παραμένουσα μαγνήτιση (VRM)**, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, τη σύσταση του υλικού και τη διάρκεια και ισχύ του γεωμαγνητικού πεδίου. Είναι φανερό, ότι για παλαιομαγνητικές και αρχαιομαγνητικές μετρήσεις αυτή η μαγνήτιση είναι παρασιτική, δηλ. εμποδίζει τον προσδιορισμό του αρχικού διανύσματος του αρχαίου γεωμαγνητικού πεδίου και πρέπει να απομακρυνθεί.

**Η ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM)** αποκτάται με την επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου κάτω από σταθερή θερμοκρασία ( μπορεί να συμβεί στο εργαστήριο ή με φυσικές διαδικασίες, επίδραση κεραυνών) επειδή με την εφαρμογή του στο υλικό- δείγμα όλες οι περιοχές ( domains) δεν είναι ικανές να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση εξ αιτίας των ενεργειακών εμποδίων.

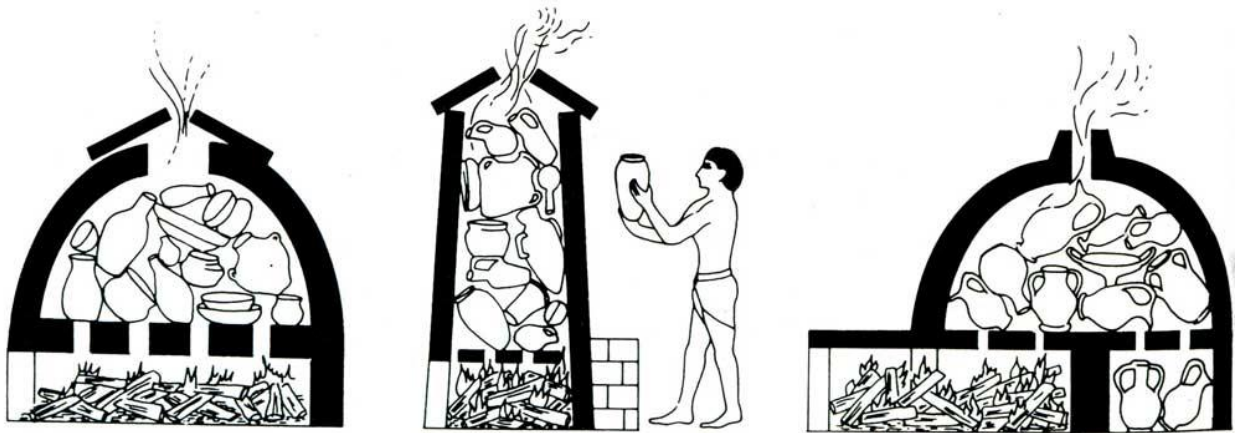
Ως δευτερεύουσες μπορούν να θεωρηθούν και οι επαγόμενες μαγνητίσεις που προκαλούνται στο εργαστήριο. Οι τυχαία επαγόμενες μαγνητίσεις είναι συνήθως σοβαρές. Οι **ανυστερητικές, περιστροφικές και γυρομαγνητικές** μαγνητίσεις μπορεί να προκληθούν κατά τη διάρκεια απομαγνητίσεων με εναλλασσόμενο πεδίο. Οι πιο σημαντικές από την κατηγορία των δευτερευουσών μαγνητίσεων είναι η **Ισόθερμη (IRM)** και η **Ιξώδης (VRM)** παραμένουσα μαγνήτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

#### 4.1 Πυροτεχνολογία στην αρχαιότητα

Γενικά ο όρος πυροτεχνολογία αναφέρεται σε δομές ή και κατασκευές που έχουν υποστεί θέρμανση του υλικού τους σε κάποιο στάδιο της ζωής τους. Από τα πολύ παλιά χρόνια για την επεξεργασία των πρώτων υλών όπως τα μέταλλα, το γυαλί, η άργιλος, χρησιμοποιήθηκαν διάφορων ειδών κλίβανοι όπως επίσης για τη θέρμανση λουτρών αλλά και άλλες ανάλογες δομές όπως οι φούρνοι ψησίματος και οι ασβεστοκάμνοι. Πολλά είναι τα ευρήματα κατά τις αρχαιολογικές ανασκαφές τα σχετικά με τις παραπάνω δραστηριότητες, εφ' όσον τα κεραμικά και τα αγγεία ήταν απαραίτητα στη καθημερινή ζωή την αρχαιότητα. Επίσης μεγάλη χρήση είχαν και οι μεταλλουργικοί κλίβανοι αφού τα μέταλλα χρειαζόνταν για οικιακά σκεύη, νομίσματα, πλοία, στην κατασκευή αγαλμάτων και το στρατό. (Σχήμα 4.1, 4.2)



Σχήμα 4.1. Σχηματική παράσταση αρχαίων κλιβάνων



**Σχήμα 4.2.** Πραγματικές εναπομείνουσες δομές αρχαίων κλιβάνων

#### **4.2 Τρόπος καταγραφής του γήινου μαγνητικού πεδίου στις καμένες αργίλους και αρχαιομαγνητική χρονολόγηση**

Οι κλίβανοι, οι φούρνοι και γενικά τα πυροτεχνολογικά αρχαία ευρήματα που αναφέρονται παραπάνω (καμένες αρχαιολογικές δομές) αποτελούνται κατά κύριο λόγο από άργιλο, κεραμίδια η τούβλα και μέσα σε όλα αυτά απαντώνται μαγνητικά ορυκτά. Κατά την περίοδο που βρίσκονταν σε λειτουργία, είναι σημαντικό το ότι ξεπερνούσαν σε θερμοκρασία τους  $700^{\circ}\text{C}$ . Υπερέβαιναν δηλαδή τις θερμοκρασίες

Curie όλων των μαγνητικών ορυκτών. Λόγω λοιπόν των ιδιοτήτων που εμφανίζουν αυτά τα ορυκτά (και που έχουν περιγραφεί παραπάνω) γίνεται δυνατή η εφαρμογή της αρχαιομαγνητικής έρευνας μέσα από την αποτύπωση του μαγνητικού πεδίου της γης κατά την εποχή της τελευταίας ψύξης τους. Γενικά οι δομές που θα μελετηθούν δεν πρέπει να έχουν διαταραχθεί με το πέρασμα του χρόνου από τότε που απέκτησαν την τελευταία τους μαγνήτιση (in situ). Μόνο γνωρίζοντας την αρχική τους θέση μπορούμε να βγάλουμε τα πλήρη συμπεράσματα για τη διεύθυνση και την ένταση του διανύσματος του τότε γεωμαγνητικού πεδίου. Εκτός από κλίβανους και φούρνους μπορούν να μελετηθούν για τον ίδιο σκοπό και πρόσφατες ροές λάβας καθώς και ηφαιστειακές αποθέσεις.

Η μαγνήτιση που θα μετρηθεί τελικά στο εργαστήριο είναι αυτή που απέκτησε το υλικό κατά την τελευταία καύση του. Μπορεί να αντικατοπτρίζει ένα σημαντικό πολιτισμικό γεγονός που συνέβη την εποχή στην οποία αναφέρεται. Για παράδειγμα την εγκατάλειψη ενός οικισμού ή την εκδήλωση πυρκαγιάς. Επίσης είναι δυνατόν να συνδέεται με κάποιο σημαντικό ιστορικό συμβάν (μια επιδρομή για παράδειγμα) ή με κάποια φυσική καταστροφή (πλημμύρα, σεισμός κ.τ.λ.). Αν όμως η τελευταία καύση του υλικού έχει συμβεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τις προηγούμενες φορές τότε καταγραφές θα αποτυπωθούν

και από τις δύο καύσεις. Τα υλικά τα οποία βρίσκονται στην αρχική τους θέση (in situ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση των τριών στοιχείων του ΓΜΠ, δηλ. της απόκλισης, της έγκλισης και της έντασης. Αντίθετα, όσα έχουν μετακινηθεί όπως τμήματα αγγείων, κεραμίδια και τούβλα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τον υπολογισμό της παλαιοέντασης και με την προϋπόθεση να είναι γνωστός ο τόπος παραγωγής τους. Αν τώρα περιοριστούμε σε μια συγκεκριμένη περιοχή και εξετάσουμε τα υλικά που βρίσκονται σε αυτήν και μαγνητίστηκαν την ίδια χρονική περίοδο θα πρέπει να παρουσιάζουν την ίδια διεύθυνση και ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Με την μελέτη και ανάλυση πολλών θέσεων της περιοχής διαπιστώνεται και η μεταβολή του πεδίου κατά το παρελθόν σε εκείνη την περιοχή.

Εφόσον κατορθώνουμε τελικά να σχηματίσουμε μια σαφή εικόνα της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου σε μια περιοχή μπορούμε να την αξιοποιήσουμε με πολλούς τρόπους. Εάν το αντικείμενο που μελετήσαμε έχει γνωστή ηλικία τότε το αποτέλεσμα μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συμπλήρωση των καμπύλων αναφοράς. Αν η ηλικία δεν είναι καλά ορισμένη, μπορούμε να υπολογίσουμε, υπό προϋποθέσεις την χρονολόγηση της τελευταίας καύσης των καμένων δομών που βρίσκονται σε αυτήν. Πραγματοποιείται αντιπαραβολή της διεύθυνσης και της έντασης ενός δείγματος που δεν είναι γνωστή η ηλικία του, με άλλες τιμές αυτών που προέρχονται από καλά χρονολογημένες δομές. Οι τελευταίες έχουν καθοριστεί με σχετικές ή και απόλυτες μεθόδους χρονολόγησης ( $^{14}\text{C}$ , δενδροχρονολόγηση, θερμοφωταύγεια) μερικές φορές αλλά σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται καθαρά αρχαιολογικά κριτήρια (Ιστορικές πηγές, νομίσματα, εικονογραφία, χρονολόγηση κειμένων, στρωματογραφία).

Αυτή είναι και η διαδικασία της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης η οποία μπορεί να προσφέρει σημαντική βοήθεια στην αρχαιολογική έρευνα.

Η δημιουργία μιας ακριβούς καμπύλης αναφοράς των μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου για μια συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τους αρχαιολόγους, όχι μόνο για τη χρονολόγηση της τελευταίας καύσης της δομής αλλά και για τη συσχέτιση των ηλικιών ανεξάρτητων δομών ή θέσεων όπου η χρονολόγηση δεν είναι ακριβής (Evans, 1994; Abrahamsen et al., 1998; Tarling et al., 2004). Τα αποτελέσματα της χρονολόγησης, στη συνέχεια, υπόκεινται σε στατιστική επεξεργασία (Le Goff et al., 2002; Lanos et al., 2005) ώστε να ελεγχθεί ο βαθμός συμβατότητας ανάμεσα σε διαφορετικές μέσες τιμές της διεύθυνσης από μια αρχαιολογική δομή και στην καμπύλη αναφοράς της αιώνιας μεταβολής (SVC).

Αν γίνει η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών που έχουν ληφθεί για την διεύθυνση του πεδίου

με αυτές της έντασης, μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πως τα δεδομένα και ο αριθμός των αναλύσεων που έχουν βρεθεί και επιτευχθεί για τις δεύτερες υπερτερούν σε σχέση με τις πρώτες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις της έντασης παρουσιάζουν το πλεονέκτημα να μπορούν να γίνουν και σε υλικά που δεν βρίσκονται σε θέσεις in situ όπως τα θραύσματα αγγείων τα τούβλα και τα κεραμίδια.

#### **4.3 Σύγκριση με άλλες μεθόδους και ακρίβεια της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης**

Αν θελήσουμε να παραβάλουμε την αρχαιομαγνητική μέθοδο με τις διάφορες άλλες μεθόδους γεωχρονολόγησης θα διαπιστωθεί ότι παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα. Αρχικά αυτό που χρονολογείται είναι η τελευταία καύση για τους κλιβάνους και τα προϊόντα τους καθώς και η απόθεση για τους ηφαιστειακούς σχηματισμούς. Όσο λοιπόν αυξάνει η βάση των δεδομένων τόσο αυξάνει και η ακρίβεια της μεθόδου (τόσο πιο αξιόπιστη είναι η χρονολόγηση), πράγμα που την κάνει μοναδική σε σχέση με τις υπόλοιπες εφόσον δεν συμβαίνει και με αυτές κάτι παρόμοιο. Αυτό είναι και το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε σχέση με άλλες μεθόδους γεωχρονολόγησης.

Όσον αφορά τώρα την ακρίβεια της, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και παραμένει ακόμα δύσκολο να εκτιμηθεί. Οι πιο σημαντικοί είναι: α) Η ακρίβεια της μέσης τιμής της διεύθυνσης και της έντασης της δομής που μελετάται β) Η αξιοπιστία με την οποία έχουν μελετηθεί προηγούμενες δομές και η ορθότητα των καμπύλων αναφοράς. Αυτή εξετάζεται γιατί τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των καμπύλων είναι δυνατόν να παρουσιάζουν έναν βαθμό αβεβαιότητας κατά τις ανεξάρτητες χρονολογήσεις που έγιναν σε αυτά. Για αυτό το λόγο η ποσότητα και η ποιότητα των διαθέσιμων για τη βαθμολόγηση δεδομένων θέτουν κανόνες από τους οποίους εξαρτάται η ακρίβεια με την οποία μπορεί μια δομή να χρονολογηθεί. Στις πιο πολλές περιπτώσεις πάντως η αβεβαιότητα στις ηλικίες ποικίλει από λίγες δεκαετίες έως και λίγους αιώνες ανάλογα με την περιοχή και την εκεί ακρίβεια των αρχαιολογικών δεδομένων.

γ) Ο ρυθμός μεταβολής της διεύθυνσης του γεωμαγνητικού πεδίου δεν είναι σταθερός αλλά αλλάζει με διαφορετικό ρυθμό. Σε περιόδους γρήγορων μεταβολών, οι διάφορες δομές μπορούν να χρονολογηθούν σε μικρότερα χρονικά παράθυρα απ ότι σε περιόδους όπου οι μεταβολές είναι πιο αργές. Είναι δυνατόν ακόμη, με τη συνεχή αλλαγή του, το πεδίο να παρουσιάσει παρόμοιες τιμές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε αυτή τη περίπτωση η καμπύλη αναφοράς ακολουθεί περιοδική διαδρομή με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ασάφεια στη χρονολόγηση των δειγμάτων.



Ο πιο σημαντικός λόγος για τον οποίο καθυστέρησε η ανάπτυξη του αρχαιομαγνητισμού σαν μέθοδο χρονολόγησης είναι οι απαιτήσεις και οι δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τη δημιουργία των καμπύλων αναφοράς.

#### **4.4 Συλλογή αρχαιομαγνητικών δειγμάτων**

##### **4.4.1 Δειγματοληψία -προσανατολισμός**

Η πραγματοποίηση της δειγματοληψίας από την περιοχή που μελετάται γίνεται πάντα μετά την έγκριση του υπεύθυνου για την ανασκαφή αρχαιολόγου .

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του χώρου μελέτης (μετρημένες με GPS για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια) καθώς και το σχέδιο των δομών που υπάρχουν σε αυτόν είναι οι πρώτες πληροφορίες που πρέπει να συλλεχθούν από τους επιφορτισμένους με την παραπάνω εργασία. Κατόπι, λαμβάνονται φωτογραφίες των δομών καύσης, και γενικά του αρχαιολογικού χώρου και σχεδιάζονται οι καμένες αρχαιολογικές δομές. Το επόμενο βήμα είναι η εξέταση της φύσης των υλικών κατασκευής των δομών αυτών, ο βαθμός που ψήθηκαν, καθώς και αν έχουν μετακινηθεί ή αν υπήρξαν οποιεσδήποτε διαταραχές.

Θα πρέπει γενικά να υπάρχει προστασία για τις καμένες αργίλους από τη βροχή που τις κάνει πιο μαλακές και από τον ήλιο και τον παγετό που μπορεί να τους δημιουργήσει ρωγμές και να διαχωρίσει τα μαλακά από τα σκληρά τμήματά τους.

Είναι αναγκαίο η ομάδα των ερευνητών να ενημερώνεται για υλικά που τυχόν αντικαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια της ανασκαφής ή και συντηρήθηκαν καθώς και το αν μετακινήθηκαν οι δομές μετά τη χρήση τους. Τέλος τα δείγματα που θα συλλεχθούν θα πρέπει να κατανέμονται σε ολόκληρη τη δομή έτσι ώστε στατιστικά να αντιπροσωπεύουν όλα τα υλικά που υπάρχουν σε αυτήν και από μέρη του κλιβάνου που δεν είναι εμφανώς μετακινημένα, βρίσκονται δηλαδή *in situ* (να διατηρούν τη θέση της τελευταίας καύσης τους).

Όλες οι ενέργειες γίνονται πάντα με τη σύμφωνη γνώμη και μέσα στα όρια που έχει θέσει ο αρχαιολόγος με τον οποίο οι ερευνητές πρέπει να έχουν αναπτύξει υψηλό βαθμό επικοινωνίας εφόσον από αυτό εξαρτάται το αποτέλεσμα της αρχαιομαγνητικής έρευνας.

Η δειγματοληψία πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά και με μεγάλη ακρίβεια έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα που συμβαίνουν ενδεχομένως και να καθορίζεται η αξιοπιστία του υλικού. Όσο πιο μεγάλος ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα που παίρνονται. Η στατιστική επεξεργασία απαιτεί

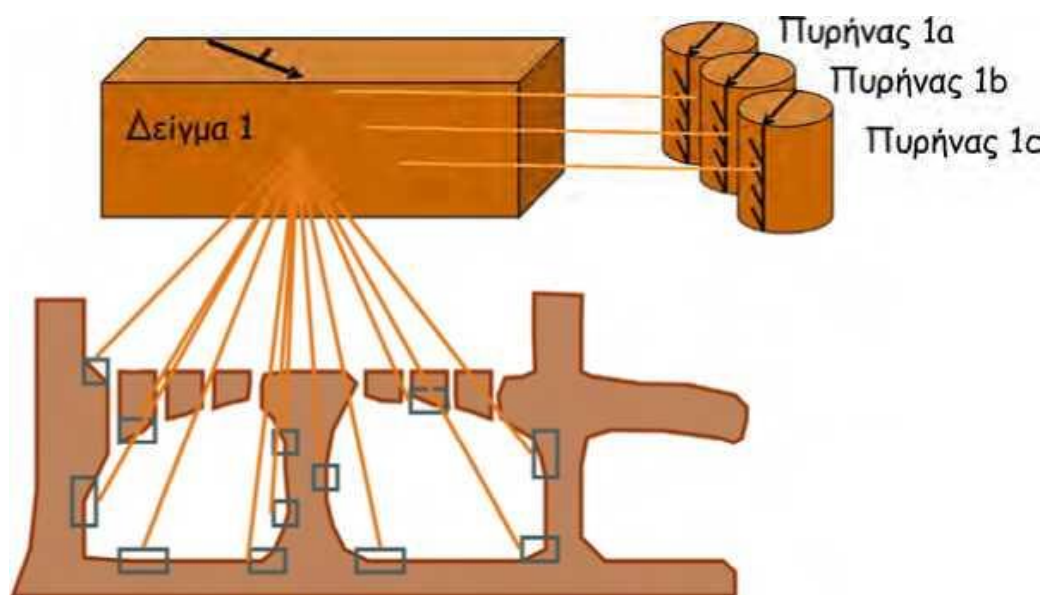
τουλάχιστον 7-8 δείγματα για τον υπολογισμό της μέσης μαγνήτισης της δομής. Επομένως, αν είναι δυνατό, θα πρέπει να συλλέγονται 10-12 δείγματα από κάθε δομή για να αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όταν η δομή δεν πρόκειται να διατηρηθεί ή όταν η έρευνα πρέπει να συνεχιστεί σε μεγαλύτερα βάθη είναι δυνατόν να ληφθούν περισσότερα δείγματα. Αν όμως σχεδιάζεται από τον υπεύθυνο αρχαιολόγο η διατήρηση του χώρου, τότε προτείνεται περιορισμένη δειγματοληψία.

Δύο είναι οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για τη πραγματοποίηση της ανωτέρω περιγραφόμενης διαδικασίας.

1<sup>ος</sup> τρόπος είναι η δειγματοληψία τμημάτων (κομματιών) πετρωμάτων, κατ' ελάχιστον 8X8 cm. Ακολουθείται έπειτα συγκεκριμένη διαδικασία στο εργαστήριο (γύψωμα, οριζοντίωση κ.α.) έτσι ώστε από αυτά να παραλαμβάνονται πυρήνες, οι οποίοι κόβονται στο κατάλληλο μέγεθος και προκύπτουν τα δείγματα (specimens) που είναι δυνατό να μετρηθούν. Τα τμήματα αυτά έχουν γενικά συγκεκριμένες διαστάσεις και πρέπει να συλλέγονται όσο είναι δυνατόν άθικτα από το πέτρωμα.(Σχήμα 4.3)

2<sup>ος</sup> τρόπος είναι η άμεση λήψη πυρήνων με τη χρήση φορητών τρυπανιών. Οι πυρήνες που συλλέγονται με αυτό τον τρόπο έχουν μήκος 8- 10 cm. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ πιο γρήγορη (απαιτούνται συνήθως 4-5 λεπτά για κάθε πυρηνοληψία) αλλά και πιο ακριβής από την προηγούμενη εφόσον ο προσανατολισμός γίνεται στον ίδιο τον πυρήνα κι όχι σε δείγματα που θέλουν επιπλέον επεξεργασία στο εργαστήριο. Δυστυχώς η χρήση πυρηνολήπτη είναι σχεδόν πάντα απαγορευμένη σε αρχαιολογικούς χώρους στην Ελλάδα.

Για την αποφυγή των συστηματικών σφαλμάτων στις μετρήσεις της έγκλισης δεν παίρνουμε δείγματα με το τρυπάνι που να ακολουθούν τον κατακόρυφο άξονα. Επίσης δεν πρέπει να χρησιμοποιούμε εργαλεία που παρουσιάζουν ισχυρή παραμένουσα μαγνήτιση. Τα specimens που θα δημιουργηθούν από τους πυρήνες επιβάλλεται να έχουν το κατάλληλο σχήμα και μέγεθος για να ταιριάζουν στα μαγνητόμετρα, στις συσκευές απομαγνήτισης και σε όποιο άλλο όργανο χρειαστεί.



**Σχήμα 4.3.** Σκαρίφημα συλλογής δειγμάτων από έναν κεραμικό κλίβανο. 10 με 12 δείγματα έχουν ληφθεί από όλη τη δομή. Με τη χρήση της πυξίδας και του κλισώμετρου γίνονται οι μετρήσεις του αζιμούθιου (γωνία από το βορρά) και της κλίσης και σχεδιάζονται πάνω σε κάθε δείγμα. Στο εργαστήριο από κάθε δείγμα (sample) κόβονται πυρήνες (specimen) συγκεκριμένων διαστάσεων.

Τα πιο συνηθισμένα από τα ανωτέρω αναφερόμενα σχήματα είναι το κυβικό (που είναι το περισσότερο παραπλήσιο στο ιδανικό σφαιρικό σχήμα και πραγματοποιείται μόνο κατά τις αρχαιομαγνητικές έρευνες) και το κυλινδρικό. Για τα κυλινδρικά σχήματα ο λόγος ύψους /διάμετρο πρέπει να είναι μεταξύ 0.92 και 0.85. Τις πιο πολλές φορές έχουμε να κάνουμε με κυλίνδρους με διάμετρο 2.5 cm και ύψος 2.2 cm.

Σύμφωνα με την θεωρία απόκτησης της η κύρια παραμένουσα μαγνήτιση όλων των δειγμάτων που κόπηκαν από τους πυρήνες και που ανήκουν σε κοινή θέση δειγματοληψίας, πρέπει να παρουσιάζει τις ίδιες μαγνητικές παραμέτρους για το κάθε ένα.

Κατά κανόνα όμως είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται στατιστικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό των μέσων διευθύνσεων και εντάσεων στην ίδια θέση δειγματοληψίας. Αυτός είναι ο λόγος που πρέπει να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός δειγμάτων που είναι απαραίτητο να συλλεχθεί και να μελετηθεί σε κάθε περιοχή.

Η παραμένουσα μαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος που πρέπει να μετρηθεί στο εργαστήριο, είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που καθορίζεται πλήρως από το μέτρο του

και την κατεύθυνση του στο χώρο. Η τελευταία ορίζεται από την απόκλιση  $D$  και την έγκλιση  $I$  ως προς το σύστημα των γεωγραφικών συντεταγμένων. Για να γίνει δυνατόν να υπολογιστούν οι ανωτέρω αναφερόμενες τιμές, είναι αναγκαίος ο ακριβής προσανατολισμός του υλικού που συλλέγεται.

Αν μάλιστα ληφθεί υπ όψιν το ότι η αιώνια μεταβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι της τάξης κάποιων μοιρών μέσα σε μερικές δεκαετίες, είναι αναγκαίο αυτή η ακρίβεια να μην υπερβαίνει τις 1-2 μοίρες.

Ο προσανατολισμός των δειγμάτων γίνεται σε σχέση με το τοπικό οριζόντιο επίπεδο (κλίση) καθώς και σε σχέση με τον γεωγραφικό Βορρά (αζιμούθιο) και χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές (Σχήμα 4.4). Η κλίση μετρείται με το κλισιόμετρο φυσαλίδας και το αζιμούθιο είτε με την μαγνητική πυξίδα είτε με θεοδόλιχο είτε με ηλιακή πυξίδα (προτιμάται η ηλιακή πυξίδα). Η τοπική μαγνητική απόκλιση είναι γνωστή ή υπολογίζεται από το πεδίο αναφοράς (π.χ. IGRF).

Η ηλιακή πυξίδα αποτελείται από μια κατακόρυφη βελόνα (γνώμονας) που τοποθετείται σε οριζόντιο δίσκο. Το αζιμούθιο που μετράται είναι η ανάγνωση της δεξιόστροφης γωνίας «α» που δημιουργείται από την σκιά του ήλιου στον γνώμονα με την διεύθυνση του μαγνητικού βορρά (όταν λαμβάνουμε κομμάτι δείγματος) ή με τη διεύθυνση του τρυπανιού (όταν λαμβάνουμε πυρήνες). Στη συνέχεια, σημειώνεται και η ακριβής ώρα της δειγματοληψίας και η θέση της περιοχής. Με όλη την πιο πάνω διαδικασία και την χρήση του Αστρονομικού Ημερολογίου ή την χρήση ενός απλού αλγορίθμου (Tauxe, 1998), είναι δυνατό να υπολογιστεί η διεύθυνση με σχετικά καλή ακρίβεια (ουσιαστικά, το μεγαλύτερο λάθος προκύπτει από την ανάγνωση της γωνίας). Έπειτα, λαμβάνονται προσανατολισμένα δείγματα από την δομή για μελέτη στο εργαστήριο.

Είναι δυνατόν να αποφευχθεί η μέτρηση της κλίσης με τη δημιουργία ενός τεχνητού οριζοντίου επιπέδου επάνω στο δείγμα, μηδενίζοντας με αυτό τον τρόπο τη γωνία κλίσης. Αυτή η οριζόντια επιφάνεια δημιουργείται είτε με την τοποθέτηση ενός πλακιδίου από plexiglass, είτε καλύπτοντας το άνω μέρος του δείγματος με γύψο. (Γίνεται οριζοντίωση και στις δυο περιπτώσεις).

Το δείγμα έπειτα απομακρύνεται μέσα σε πλαστικό κουτί για την ασφαλή μεταφορά του και οδηγείται στο εργαστήριο για την περαιτέρω επεξεργασία του.



**Σχήμα 4.4.** Διαφορετικές τεχνικές προσανατολισμού δειγμάτων.

Μέτρηση κλίσης και αζιμούθιου: (a) πλαστικές ή ξύλινες πλακέτες κολλιούνται σε διάφορα σημεία της δομής (b) η κλίση μετρείται με κλισιόμετρο φυσαλίδας και το αζιμούθιο μπορεί να μετρηθεί (c) με μαγνητική πυξίδα, (d) από τη ζενιθιακή απόσταση με ηλιακή πυξίδα, ή (e-f) με τη μέτρηση της σκιάς του ήλιου σε συγκεκριμένη ώρα.

Μέτρηση του αζιμουθίου μετά την οριζοντίωση του δείγματος: (g1-3) μικρές πλακέτες από plexiglass κολλιούνται με πλαστελίνη στην επιφάνεια του δείγματος και με τη βοήθεια μικρής στάθμης γίνεται οριζόντια. Όταν η κόλλα στεγνώσει καθορίζεται το αζιμούθιο με ένα από τα παραπάνω όργανα προσανατολισμού (c, d, e, f). (h1-4) Φτιάχνουμε γύψο και καλύπτουμε το δείγμα. Πριν ο γύψος στεγνώσει τον οριζοντιώνουμε με μία πλακέτα από plexiglas χρησιμοποιώντας μία στάθμη. Χρησιμοποιούμε τη μαγνητική πυξίδα για να σχεδιάσουμε τη διεύθυνση του Βορρά πάνω στο γύψο και μετά την ηλιακή. Στο εργαστήριο δημιουργούμε



κυλινδρικούς πυρήνες δειγμάτων πάντα λαμβάνοντας υπόψη την γραμμή προσανατολισμού.

#### 4.4.2 Επεξεργασία των δειγμάτων πριν τις μετρήσεις

Έχει ήδη γίνει αναφορά παραπάνω σχετικά με τις διαστάσεις των δειγμάτων που πρόκειται τελικά να μετρηθούν. Τα αρχικά τεμάχια που λαμβάνονται από την ύπαιθρο επιβάλλεται να κοπούν σε κύβους ή κυλίνδρους που έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις. Είναι αναγκαίο βέβαια εδώ να διατηρηθεί και ο αρχικός προσανατολισμός πάνω στα τελικά δείγματα που θα προκύψουν από αυτή τη διαδικασία. Μη καμένα μέρη του δείγματος ή ξένα σώματα (θραύσματα αγγείων, κομμάτια σιδήρου, εγκλείσματα χαλαζία κλπ.) τα οποία βρίσκονται μέσα στο δείγμα πρέπει να απομακρύνονται.

Στα λιγότερο συμπαγή δείγματα εφαρμόζεται η διαδικασία της συμπαγοποίησης πριν από το κόψιμο για την λήψη των πυρήνων (Σχήμα 4.5).

Τα δείγματα που είναι εύθραυστα εισάγονται μέσα σε συμπαγοποιητικό υγρό για 48 ώρες. Χρησιμοποιείται συνήθως ένα διάλυμα πυριτικού νατρίου και μόνο σε περιπτώσεις πολύ πορώδους υλικού διάλυμα αιθυλικού πυριτίου. Το πόσο πορώδες είναι το δείγμα παίζει και ρόλο στο χρόνο που θα χρειαστεί για να επιτευχθεί τελικά και η συμπαγοποίηση. Σε δύσκολες περιπτώσεις χρησιμοποιείται 50% διάλυμα με 50% νερό.

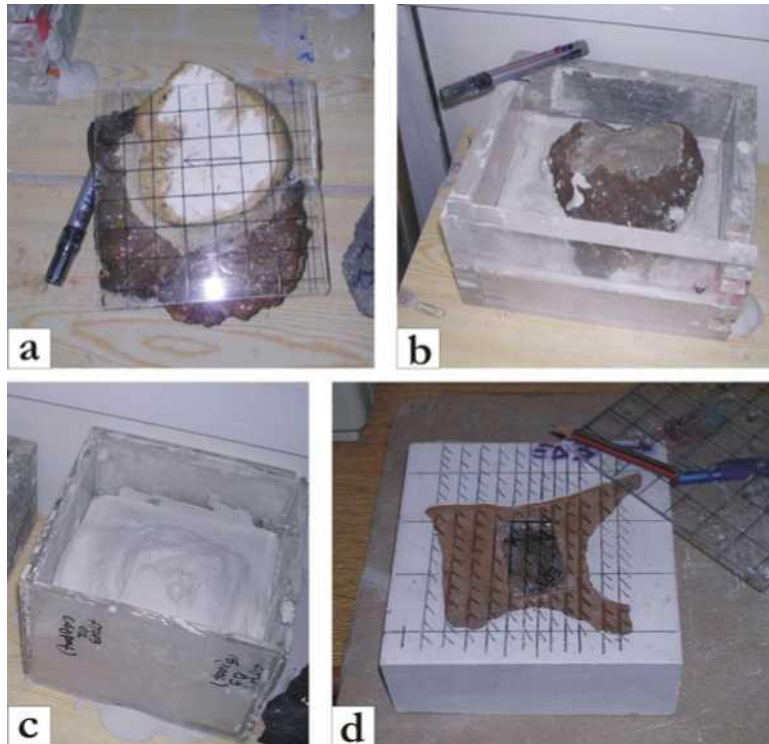


**Σχήμα 4.5.** Η διαδικασία της συμπαγοποίησης. (a) Τα δείγματα εισάγονται στο διάλυμα (b) Στη συνέχεια τα δείγματα μένουν να στεγνώσουν. (de Marco, 2007)

Έπειτα το δείγμα θα στεγνώσει για 2-3 (αναλόγως την περίπτωση) μέρες στον αέρα και σε

θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετά και από αυτό είναι έτοιμο να γυψωθεί και να διατηρηθεί.

Το γύψωμα γίνεται για να μπορέσουν τα δείγματα να διατηρηθούν χωρίς να σπάσουν (Σχήμα 4.6). Πρώτα απ' όλα σημειώνεται πάνω στο δείγμα σε ένα πλέγμα η γραμμή προσανατολισμού. Στη συνέχεια, γεμίζουμε ένα καλούπι από plexiglass με γύψο και μέσα σε αυτό τοποθετούμε το δείγμα. Μόλις συμπαγοποιηθεί ο γύψος απομακρύνουμε το καλούπι. Έπειτα μπορεί να χαραχθεί ο προσανατολισμός σε κάθε δείγμα.

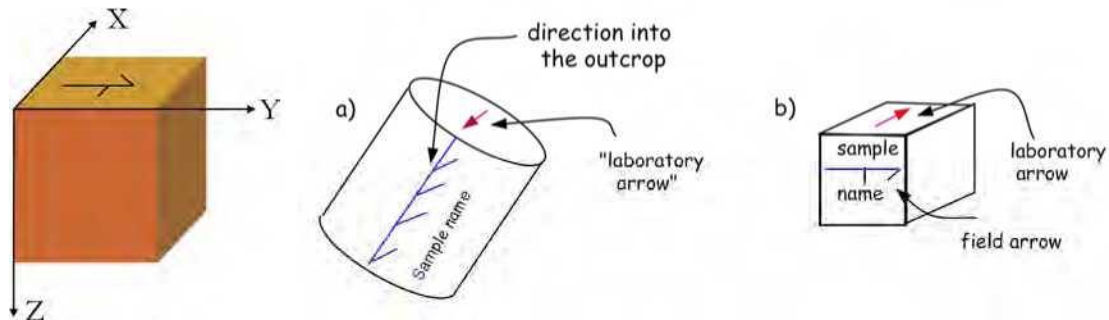


Σχήμα 4.6. Η διαδικασία γυψώματος.



Σχήμα 4.7. Διαδικασία λήψης πυρήνων

Τέλος το σύστημα συντεταγμένων του δείγματος καθορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Σχήμα 4.8). Τα δεδομένα μεταφέρονται από το σύστημα συντεταγμένων του δείγματος στο γεωγραφικό. Αυτό γίνεται είτε γραφικά είτε μαθηματικά (Ταυχε, 2005). Τώρα, η συλλογή των δειγμάτων είναι έτοιμη για τις μετρήσεις.



**Σχήμα 4.8.** Σύστημα συντεταγμένων του δείγματος και διάφοροι τύποι προσανατολισμού. (a) Ένας 2.5 cm (=1 ίντσα) κυλινδρικός πυρήνας και (b) κυβικό δείγμα (από Ταυχε, 2005).

## 4.5 Μετρήσεις εργαστηρίου.

### 4.5.1 Μέτρηση της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης (NRM)

Η NRM είναι ένα διανυσματικό μέγεθος και για τον πλήρη ορισμό της απαιτείται το μέτρο (ένταση)  $F$  και η διεύθυνση της  $D, I$ . Γενικά πάντως αυτή είναι το διανυσματικό άθροισμα δύο η περισσότερων συνιστωσών, δηλαδή της κάθε μαγνήτισης που αποκτάται από το υλικό σε διάφορες χρονικές στιγμές .

Στον αρχαιομαγνητισμό, ως «χαρακτηριστική» ή σταθερή συνιστώσα (ChRM) θεωρείται η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM) που αποκτήθηκε στο αρχαίο μαγνητικό πεδίο κατά τη ψύξη του υλικού μετά την τελευταία καύση του ενώ οι δευτερεύουσες μαγνήτισεις (ιξώδεις) αποκτήθηκαν αργότερα.

Στη περίπτωση δειγμάτων που έχουν μετακινηθεί από τη θέση τους μετά τη ψύξη τους, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αυτά για τον υπολογισμό της αρχαιο- έντασης. Ακόμη, και εάν είναι γνωστή η θέση τους κατά το ψήσιμο (για παράδειγμα αγγεία που ψήθηκαν σε



κατακόρυφη θέση η πλακίδια σε οριζόντια θέση) μπορεί να επιτευχθεί ο προσδιορισμός της έγκλισης όχι όμως και της απόκλισης τους.

Τα όργανα τα οποία μετρούν την NRM είναι τα μαγνητόμετρα και η φυσική ποσότητα που μετρούν είναι η συνολική διπολική ροπή  $M$  του δείγματος σε σχέση με τις ορθογώνιες συνιστώσες  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Μετά τις μετρήσεις, ο καθορισμός της γεωγραφικής διεύθυνσης της NRM, δηλαδή των γωνιών  $D$  και  $I$  γίνεται ως εξής:

$$I_s = \tan^{-1} \left[ \frac{M_z}{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}} \right] \quad \& \quad D_s = \tan^{-1} \left[ \frac{M_y}{M_x} \right]$$

όπου  $I_s$ ,  $D_s$  η έγκλιση και η απόκλιση αντίστοιχα, σε συντεταγμένες δείγματος και  $V = \text{cm}^3$  ο όγκος του δείγματος αυτού. Αν λάβουμε υπόψη το αζιμούθιο και την κλίση που μετρήθηκαν κατά την δειγματοληψία μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της NRM στις γεωγραφικές συντεταγμένες .



**Σχήμα 4.9.** Τύποι μαγνητομέτρων.(α) Κρυογενετικό μαγνητόμετρο ([www.soest.hawaii.edu](http://www.soest.hawaii.edu)), (β) Μαγνητόμετρο ροής ([www.bgs.ac.uk](http://www.bgs.ac.uk)), (γ) Περιστροφικό μαγνητόμετρο ([www.ascscientific.com](http://www.ascscientific.com)).

Διάφοροι τύποι μαγνητομέτρων είναι διαθέσιμοι για την πραγματοποίηση των εργασιών που περιγράφονται παραπάνω.(Σχήμα 4.9). Τα **περιστρεφόμενα μαγνητόμετρα** είναι τα πιο οικονομικά και το λόγο αυτό είναι πιο εύκολο για τα εργαστήρια να τα προμηθευτούν.

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό μαγνητόμετρο τύπου Molyneux (Molsprin). Το δείγμα περιστρέφεται και δημιουργεί με αυτό τον τρόπο αυξομειούμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (emf) η οποία είναι ανάλογη της μαγνήτισης και μπορεί να καθοριστεί σε σχέση με το τρισσορθογώνιο σύστημα, το οποίο προσδιορίζεται από το σύστημα συντεταγμένων του δείγματος. Έτσι υπολογίζονται τα D και I, καθώς και η συνολική ένταση της NRM σύμφωνα με τις πιο πάνω σχέσεις. Τα πιο εξελιγμένα περιστρεφόμενα μαγνητόμετρα μπορούν να μετρήσουν δείγματα με μαγνητική ροπή της τάξης των  $10^{-10}$  Am<sup>2</sup> σε χρόνο από 2-3 έως 5-10 λεπτά (Ο χρόνος αυξάνεται με μείωση της έντασης της μαγνήτισης).

Ένας άλλος τύπος μαγνητομέτρων είναι αυτά της **μαγνητικής ροής** όπου το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το δείγμα μετρείται από έναν αισθητήρα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Και τέλος, τα κρυογενετικά μαγνητόμετρα λειτουργούν με τη χρήση υγρού ηλίου.

#### 4.5.2 Μαγνητική ορυκτολογία

Έχει γίνει λόγος στα προηγούμενα σχετικά με τα κυριότερα μαγνητικά ορυκτά.

Ο λόγος που μελετώνται οι ιδιότητες των περισσότερων φυσικών μαγνητικών ορυκτών είναι η πολύ μεγάλη σημασία τους στις παλαιομαγνητικές και αρχαιομαγνητικές έρευνες.

Ο τρόπος και η διαδικασία σχηματισμού των μαγνητικών ορυκτών από προϋπάρχοντα πυριτικά είναι αντικείμενο έρευνας στα πυριγενή, ιζηματογενή, και μεταμορφωμένα πετρώματα. Σε πολλές περιπτώσεις έχουν σημαντική επίδραση ο χρόνος και οι χημικές αντιδράσεις.

Οι συνθήκες που επικρατούν στο εργαστήριο είναι πολύ δύσκολο και σπάνια επιτυγχάνουν να αναπαράγουν αυτές (πχ φυσικές ,χημικές) που συμβαίνουν στη φύση όπως για παράδειγμα το τι ακριβώς επικρατεί σε ένα μάγμα που βρίσκεται στη διαδικασία της πήξης. Ακολουθώντας τώρα την αντίστροφη πορεία, η καλή μελέτη των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των μαγνητικών ορυκτών μπορεί να μας δώσει σημαντικές ενδείξεις σχετικά με τις φυσικές διεργασίες που επέδρασαν κατά την δημιουργία τους (Σχήμα 4.10).

Γενικά σε παλαιομαγνητικές και σε αρχαιομαγνητικές έρευνες είναι απαραίτητο να γίνεται η αναγνώριση των μαγνητικών ορυκτών του υπό έρευνα πετρώματος καθώς και του κάθε φορέα της παραμένουσας μαγνήτισης. Αυτή η αναγνώριση μπορεί να δώσει ένδειξη για τον μηχανισμό με τον οποίο αποκτήθηκε η παραμένουσα μαγνήτιση. Υπάρχει πάντως

μεγάλη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες μεταξύ των μαγνητικών ορυκτών, πράγμα που δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα.

Πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας είναι απαραίτητο να γίνουν πριν από τη διαδικασία απομαγνήτισης (που θα περιγραφεί παρακάτω) με σκοπό τον εντοπισμό των σιδηρομαγνητικών ορυκτών, τη μελέτη της μαγνητικής δομής με στόχο την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της NRM και την ορθή επιλογή του τρόπου απομαγνήτισης. Τα κυριότερα από αυτά είναι :

1. Μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία για να γίνει ο εντοπισμός της θερμοκρασίας Curie
2. Καμπύλες απόκτησης επαγόμενης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM).
3. Πείραμα Lowrie-Fuller
4. Καμπύλες υστέρησης



**Σχήμα 4.10.** Σειτ οργάνων μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε θερμοκρασία δωματίου. (β) Σειτ οργάνων μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. (γ) Όργανο απόκτησης ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM) (Εργαστήριο Γεωφυσικής, ΑΠΘ).

#### 4.5.3 Καθορισμός θερμοκρασίας Curie

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας Curie των σιδηρομαγνητικών ορυκτών είναι δυνατό να επιτευχθεί με το πείραμα συμπεριφοράς της μαγνητικής επιδεκτικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα σημεία (θερμοκρασίες) που παρατηρείται η απότομη μείωση της μαγνητικής επιδεκτικότητας καθορίζουν τις ζητούμενες θερμοκρασίες Curie. Επιτυγχάνεται έτσι και ο καθορισμός των κύριων σιδηρομαγνητικών ορυκτών που είναι

υπεύθυνα για την μαγνητική συμπεριφορά των καμένων δομών.

Τα αρχαιολογικά υλικά δεν παρουσιάζουν συνήθως μια μόνο θερμοκρασία Curie συχνά ούτε αντιστρέψιμες καμπύλες ψύξης-θέρμανσης. Χημικές αλλαγές ή συνδυασμοί σιδηρομαγνητικών ορυκτών παράγουν συχνά περίπλοκες καμπύλες οι οποίες είναι δύσκολο να ερμηνευτούν. Διαφορετικές μορφές των θερμομαγνητικών καμπυλών μπορεί να δηλώνουν και διαφορετική κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αρχαιολογικών υλικών (Jordanova et al., 2001).

Τα κεραμίδια, τα τούβλα και οι καλά ψημένες άργιλοι παρουσιάζουν συνήθως πολύ καλή μαγνητική συμπεριφορά. Κατά την ψύξη μπορεί να εμφανιστούν μικρές αλλαγές που δηλώνουν ότι η μαγνητική ορυκτολογία έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί και πιθανόν καμία φάση δεν έχει αλλάξει κατά την θέρμανση μέχρι και τους 700°C. Ο μαγνητίτης (ή τιτανομαγνητίτης) είναι συνήθως το κύριο σιδηρομαγνητικό ορυκτό ενώ ο αιματίτης ανιχνεύεται σπάνια. Η θερμοκρασία Curie του αιματίτη εμφανίζεται πιο σπάνια. Πειράματα σε καμένες αργίλους έδειξαν ότι ο κρυσταλλικός αιματίτης εμφανίζεται με θέρμανση πάνω από τους 800-1100°C. Επομένως η απουσία αιματίτη είναι μια επιπλέον ένδειξη ότι δεν επιτεύχθηκαν τόσο υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της καύσης των κλιβάνων. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται το όργανο μέτρησης της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Εκτός της εύρεσης της θερμοκρασίας Curie και έπειτα την ταυτοποίηση της ορυκτολογίας ενός δείγματος οι καμπύλες μεταβολής της θερμοκρασίας με την επιδεκτικότητα μας παρέχουν και άλλες χρήσιμες πληροφορίες. Αν παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη που καταγράφεται κατά την θέρμανση του υλικού είναι ίδια η σχεδόν ίδια με αυτή της ψύξης του, τότε μιλάμε για αντιστρέψιμη μεταβολή, πράγμα που σημαίνει ότι έχουν γίνει ελάχιστες χημικές αλλαγές ή μη ουσιαστικές κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.

Άρα το δείγμα εμφανίζεται να είναι ορυκτολογικά σταθερό με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για πειράματα προσδιορισμού της αρχαιοέντασης.

Κάποια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι όταν βλέπουμε την επιδεκτικότητα να μειώνεται απότομα και ιδιαίτερα στις χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε χαμηλή οξειδωση των κόκκων του δείγματος. Όταν όμως ελαττώνεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες έχουμε υψηλή οξειδωση.

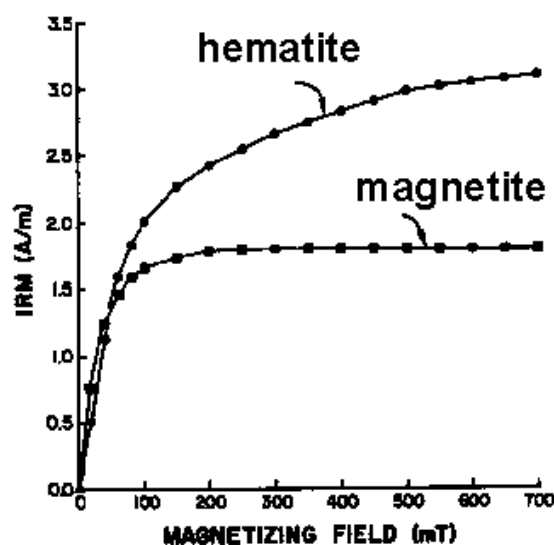
#### 4.5.4 Απόκτηση ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM)

Μια πολύ χρήσιμη διαδικασία για τον προσδιορισμό των κυρίων σιδηρομαγνητικών ορυκτών καθώς και των συνδυασμών τους μέσα σε αρχαιολογικά υλικά, είναι η απόκτηση στο εργαστήριο ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM). Αυτό συμβαίνει γιατί οι διάφορες μαγνητικές φάσεις μέσα στα ανωτέρω υλικά, εμφανίζονται να έχουν χαρακτηριστικές μαγνητίσεις κορεσμού και τιμές συνοχής.

Αρχικά το προς εξέταση δείγμα εκτίθεται σε ασθενές μαγνητικό πεδίο για σύντομο χρονικό διάστημα και κατόπιν μετρίεται η παραμένουσα μαγνήτιση που αποκτάται από αυτό. Έπειτα ακολουθεί η έκθεση του σε ισχυρότερο πεδίο και η επαναμέτρηση της τιμής της μαγνήτισης του. (Σχήμα 4.11). Η διαδικασία συνεχίζεται επαναλαμβανόμενη έως ότου επέλθει ο κορεσμός της μαγνήτισης του δείγματος και συνήθως τερματίζεται στη τιμή των 1200 Oe.

Αν μέχρι το πεδίο αυτό οι σιδηρομαγνητικοί κόκκοι του έχουν κορεστεί, τότε το δείγμα αυτό έχει υψηλή ποσότητα μαγνητίτη. Γενικά, δείγματα που περιέχουν μόνο χαμηλής μαγνήτισης ορυκτά (π.χ. τιτανομαγνητίτης) αποκτούν IRM σε πεδία  $H \leq 300 \text{ mT}$  ενώ όσο μεγαλώνει το πεδίο η μαγνήτισή τους δεν αυξάνει (Από Butler, 1992; electronic edition, 2004). Αν υπάρχει αιματίτης (ή γκαιτίτης), η IRM αποκτάται σταδιακά μέχρι και τα 3 Tesla. Με αυτή τη διαδικασία μπορούμε να ανιχνεύσουμε μικρές ποσότητες αιματίτη (ή γκαιτίτη) ακόμα και όταν συνυπάρχουν με πιο ισχυρούς σιδηρομαγνητικούς τιτανομαγνητίτες.

#### IRM Acquisition Curves



Σχήμα 4.11. Παράδειγμα μη κανονικοποιημένων καμπυλών, για ακραίες περιπτώσεις μαγνητίτη –αιματίτη (από Butler 1982).

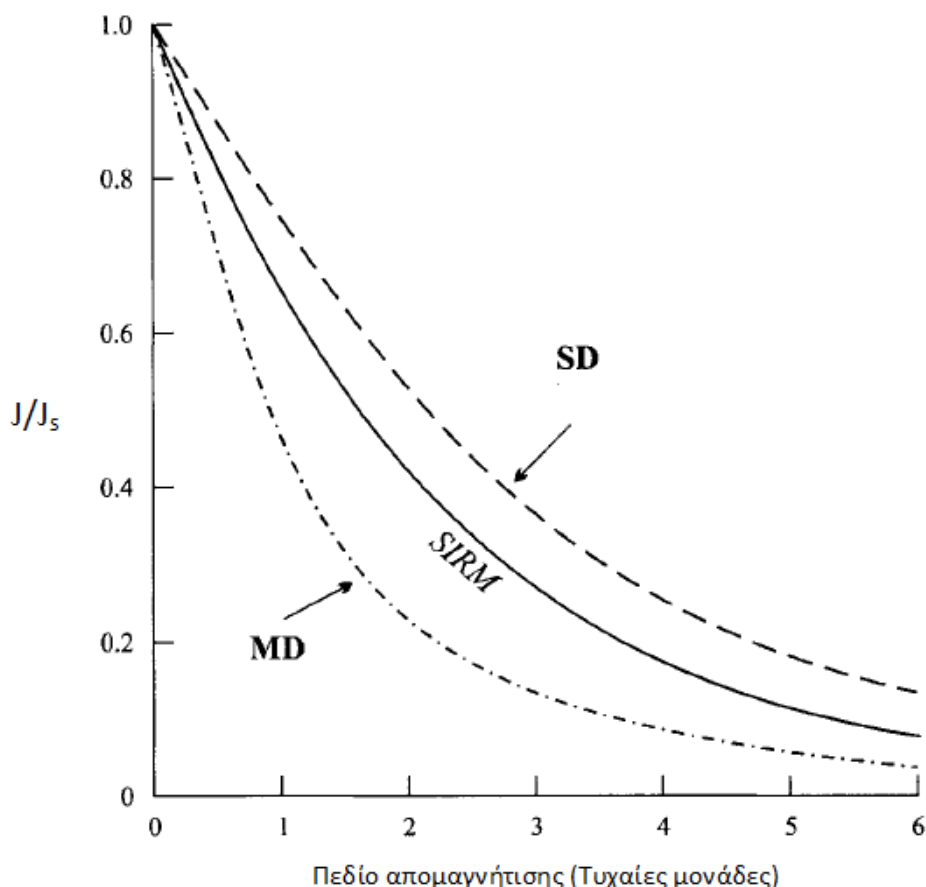
Το επόμενο βήμα είναι η σταδιακή απομαγνήτιση της IRM που αποκτήθηκε με τον παραπάνω τρόπο με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που περιγράφεται παρακάτω.

#### 4.5.5 Πείραμα Lowrie και Fuller

Μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος στις παλαιομαγνητικές –αρχαιομαγνητικές έρευνες για να μπορέσει να γίνει η διάκριση σχετικά με το αν οι φορείς της παραμένουσας μαγνήτισης είναι κυρίως κόκκοι μιας (SD) ή πολλών (MD) μαγνητικών περιοχών, είναι το πείραμα των Lowrie και Fuller (1971). Αυτή η διαδικασία βασίζεται στη διαφορετική σταθερότητα της θερμοπαραμένουσας (TRM) σε σχέση με τη μαγνήτιση (IRM) που έχει τεχνητά αποκτηθεί, κατά την διάρκεια της AF- απομαγνήτισης στην οποία υποβάλλονται τα δείγματα και των δύο.

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις καταγράφονται οι καμπύλες που παριστάνουν τη μαγνήτιση του δείγματος σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο, κανονικοποιούνται για να μπορέσουν να είναι συγκρίσιμες και παραθέτονται.

Όταν η καμπύλη απομαγνήτισης της TRM είναι κάτω από εκείνη της IRM τότε το δείγμα κυριαρχείται από MD κόκκους κι επομένως είναι αρκετά ασταθές στη διατήρηση παραμένουσας μαγνήτισης, ενώ όταν είναι πάνω από αυτή κυριαρχείται από SD κόκκους που σημαίνει ότι είναι πλήρως σταθερό. Όταν συμπίπτουν το δείγμα κυριαρχείται από PSD κόκκους που σημαίνει ότι είναι πάλι αρκετά σταθερό για διατήρηση της παραμένουσας μαγνήτισης. (Απαραίτητη προϋπόθεση για το πείραμα αυτό αποτελεί η παρουσία μαγνητίτη ως κύριου φορέα της μαγνήτισης) (Σχήμα 4.12)



**Σχήμα 4.12.** Το Lowrie – Fuller τεστ για SD και MD κόκκους. Υποθετικές κανονικοποιημένες AF καμπύλες απομαγνήτισης για ασθενή παραμένουσα μαγνήτιση και τεχνητή μαγνήτιση (SIRM). Για MD κόκκους η πρώτη καμπύλη είναι πάντοτε κάτω από την SIRM ενώ η δεύτερη πάντα από πάνω (McElhinny, McFadden. 2000).

#### 4.5.6 Τεχνικές απομαγνήτισης και μαγνητικός καθαρισμός

Κατόπιν της συλλογής των δειγμάτων και της μέτρησης της NRM, ακολουθεί το στάδιο του μαγνητικού καθαρισμού τους. Κάτι τέτοιο συμβαίνει γιατί ο τελικός σκοπός των αρχαιομαγνητικών πειραμάτων είναι να καταφέρουμε να απομακρύνουμε όλες τις δευτερεύουσες μαγνητικές συνιστώσες, έτσι ώστε να απομονωθεί η χαρακτηριστική μαγνήτιση (ChRM) και να μπορέσει να γίνει δυνατός ο καθορισμός της έντασης και της διεύθυνσης της. Διάφορες τεχνικές εφαρμόζονται για την ανωτέρω διεργασία και η γνώση της προέλευσης της δευτερεύουσας φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης μπορεί να μας οδηγήσει στην κατάλληλη επιλογή. Γενικά στον αρχαιομαγνητισμό χρησιμοποιούνται ο χρόνος ηρεμίας, η συνοχή, και η θερμοκρασία για την απομόνωση και απομάκρυνση των χαμηλής σταθερότητας συνιστωσών. Λεπτομερής θερμική ή

απομαγνήτιση εναλλασσομένου πεδίου σε πιλοτικά δείγματα, δίνει αποτελέσματα που μπορούν να υποδείξουν το κατάλληλο μέσο πεδίο ή τη θερμοκρασία που απαιτείται για την απομαγνήτιση.

Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η διαδικασία των απομαγνητίσεων είναι η εξής : Οι διάφορες δευτερογενείς μαγνητίσεις έχουν μικρή σταθερότητα σε σχέση με αυτές που αποκτήθηκαν από τις αρχικές διαδικασίες της χημικής παραμένουσας και της θερμοπαραμένουσας.

Οι πιο κοινές από τις μεθόδους αυτές είναι η μέθοδος της σταδιακής απομαγνήτισης με εναλλασσόμενο πεδίο (AF – Alternative Field), της θερμικής (TH – Thermal) και της χημικής απομαγνήτισης. Οι μέθοδοι αυτές συχνά αναφέρονται ως μαγνητικός, θερμικός και χημικός «καθαρισμός», αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές, τα δείγματα υποβάλλονται σε σταδιακή απομαγνήτιση, αυξάνοντας ανά σταθερό βήμα την ένταση του εναλλασσόμενου πεδίου, τη θερμοκρασία ή τον χρόνο για κάθε μια από τις τρεις μεθόδους αντίστοιχα, παρουσία μηδενικού εξωτερικού πεδίου. Έπειτα από κάθε βήμα μετρείται ξανά η προκύπτουσα μαγνήτιση και όλες στο σύνολό τους απεικονίζονται και αναλύονται σε αντίστοιχα διαγράμματα . Μια γενική περιγραφή δίνεται από τον Collinson (1983) πάνω στις μεθόδους αυτές.

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους μόνο η χημική απομαγνήτιση δεν έχει χρησιμοποιηθεί στη παρούσα εργασία. Παρόλ' αυτά αξίζει να αναφερθεί ότι η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Collinson (1965) πάνω σε έρευνα της μαγνήτισης ερυθρών ιζημάτων. Σε γενικές γραμμές, στη μέθοδο αυτή τα δείγματα βυθίζονται σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέως για ανάλογους χρόνους, έπειτα ξεπλένεται, ξηραίνεται και μετράται η μαγνήτισή του.

### **Απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο**

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών να χάνουν τις μαγνητικές ιδιότητές τους όταν σε αυτά επιδρά εναλλασσόμενο πεδίο του οποίου το πλάτος ελαττώνεται σταδιακά.

Η (AF) απομαγνήτιση όπως ονομάζεται πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας συσκευής απομαγνητισμού, (Σχήμα 4.13) μέσα στην οποία εισάγεται το δείγμα και κατόπιν εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο πεδίο έως μια μέγιστη τιμή και μετά μηδενίζεται.

Οι ροπές όλων των κόκκων που έχουν συνοχή μικρότερη από τη μέγιστη τιμή που εφαρμόζεται θα παρουσιάσουν προσανατολισμό, οι μισές ως προς το πεδίο και οι μισές αντίθετα προς αυτό με αποτέλεσμα η τελική παραμένουσα να είναι μηδέν.



Το δείγμα πρέπει να περιστραφεί και να απομαγνητιστεί κατά μήκος τριών ορθογωνίων αξόνων. Έπειτα μετρίεται η παραμένουσα μαγνήτιση και το πείραμα συνεχίζεται με την αύξηση κατά 50 ή 100 Oe του πεδίου (Collinson 1983).



**Σχήμα 4.13** Molspin demagnetizer

### **Θερμική απομαγνήτιση**

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής τα δείγματα τοποθετούνται μέσα σε ειδικό φούρνο κατά συγκεκριμένη διεύθυνση και στη συνέχεια θερμαίνονται έως μια ορισμένη θερμοκρασία έστω ( $T_i$ ). Η διάρκεια της θέρμανσης αυτής πρέπει να είναι περίπου στα 20 λεπτά και οι φούρνοι απομαγνήτισης να έχουν την ικανότητα να αναπτύξουν θερμοκρασίες μέχρι  $700^{\circ}\text{C}$ . Αυτό το τελευταίο συμβαίνει γιατί πρέπει να καλύπτονται όλες οι θερμοκρασίες Curie των ορυκτών που μπορεί να είναι φορείς της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης. Κατόπιν τα δείγματα ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου σε μηδενικό πεδίο που παράγεται από πηνίο και μετρώνται. Επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία, στο επόμενο βήμα, με την σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας έως ότου φτάσουμε στο σημείο Curie του αιματίτη εκτός και εάν έχει επιτευχθεί σε προηγούμενο στάδιο η πλήρης απομαγνήτιση (Σχήμα 4.14).

Η μέθοδος στηρίζεται στο ότι μέσα στα δείγματα υπάρχουν κόκκοι μαγνητικών ορυκτών με διάφορες μεταξύ τους θερμοκρασίες φραγμού ( $T_b$ ), από τις οποίες εξαρτάται φυσικά και ο χρόνος ηρεμίας που τους χαρακτηρίζει, συνδεδεμένες (οι  $T_b$ ) και με τον τρόπο απόκτησης της κάθε μαγνήτισης. Όπως είναι γνωστό αν ένα δείγμα θερμανθεί τότε μειώνεται εκθετικά ο χρόνος ηρεμίας των μαγνητικών μορίων που περιέχει. Οι κόκκοι των μαγνητικών ορυκτών για τους οποίους ισχύει ότι η θερμοκρασία φραγμού τους έστω ( $T_b$ ) είναι μικρότερη ή ίση της ( $T_i$ ) κατά περίπτωση διαφορετικής θέρμανσης θα παρουσιάζεται να έχουν πολύ μικρούς χρόνους ηρεμίας. Αρχίζουν έτσι να εμφανίζουν παραμαγνητική συμπεριφορά. Όταν λοιπόν επέλθει η ψύξη του δείγματος και σε μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητίσεις των ανωτέρω μορίων τείνουν να ευθυγραμμιστούν με τους τυχαία κατανομημένους άξονες προτίμησης τους στο χώρο. Έτσι σταδιακά συμβαίνει αφαίρεση της συμβολής των κόκκων που παρατηρούνται τα παραπάνω, στη τελική τιμή της (NRM). Κάθε φορά μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος έχουμε την μέτρηση και καταγραφή της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης. Η θερμοκρασία μεταβολής κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι οι 50 ή 100°C. Επίσης οι MD κόκκοι χάνουν τη μαγνήτισή τους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απ' ότι οι SD και PSD .



**Σχήμα 4.14** Φούρνος θερμικής απομαγνήτισης

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω επιτυγχάνουμε τελικά να απομακρύνουμε τις όχι σταθερές, λόγω της φύσης τους, δευτερογενείς συνιστώσες και να απομονώσουμε τη σταθερή πρωτογενή η οποία μετράται και προσδιορίζεται. Επιπροσθέτως λαμβάνονται και πληροφορίες με αυτό τον τρόπο για τη φύση και τη χημική σύσταση των μαγνητικών ορυκτών.

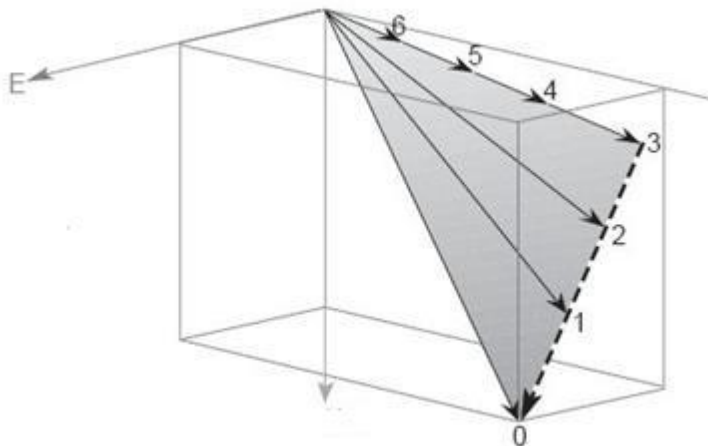
#### 4.5.7 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων απομαγνήτισης

Οι εργασίες και οι μετρήσεις που περιγράφηκαν πιο πάνω, γίνονται με το σκοπό να μπορέσουμε να παρακολουθήσουμε τη πορεία της απομαγνήτισης των προς εξέταση δειγμάτων σε διάφορα στάδια. Τα δεδομένα που λαμβάνουμε και στα οποία στηριζόμαστε για να γίνει δυνατόν κάτι τέτοιο κατά τις αρχαιομαγνητικές αναλύσεις είναι οι διευθύνσεις και οι εντάσεις των μαγνητίσεων των τεμαχίων που μετρώνται στην ίδια θέση δειγματοληψίας κατά τα βήματα της πορείας απομαγνήτισης.

Επιδιώκουμε τελικά μετά τον μαγνητικό καθαρισμό των δειγμάτων να καταλήξουμε σε έναν καλό προσδιορισμό της μέσης τιμής της αρχικής φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης. Αυτό και σε συνδυασμό με τη γνώση μας για τη χρονική μεταβολή των γεωμαγνητικών στοιχείων της περιοχής, μας επιτρέπει την χρονολόγηση της δομής από την οποία προέρχονται τα δείγματα.

Οι μεταβολές του διανύσματος της μαγνήτισης κατά την πορεία της απομαγνήτισης ενός δείγματος, αφορούν τόσο την διεύθυνση όσο και την ένταση του. Η διεύθυνση καθορίζεται από την έγκλιση του διανύσματος  $I$  καθώς και την απόκλιση  $D$ .

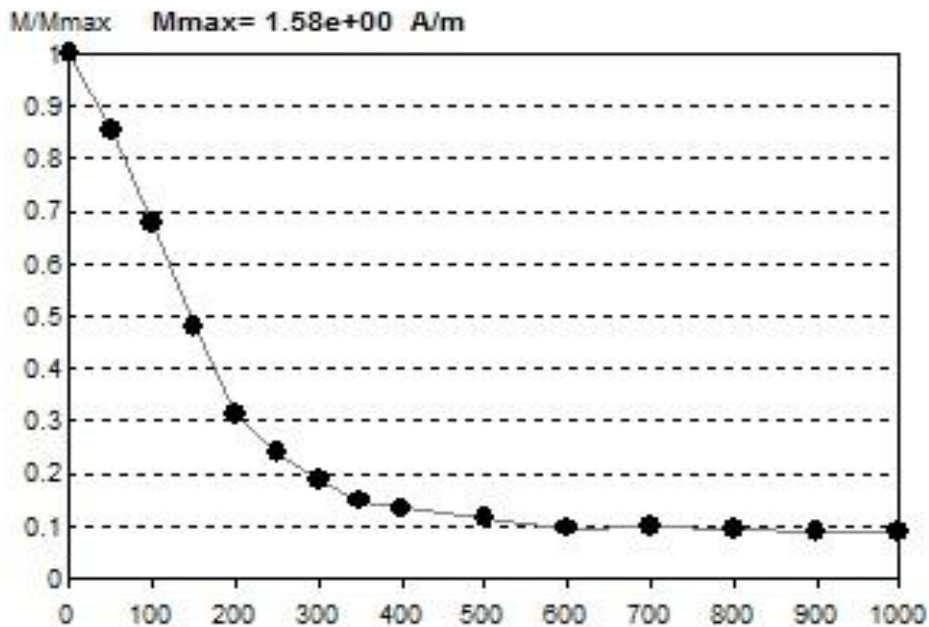
(Σχήμα 4.15)



**Σχήμα 4.15.** Πορεία απομαγνήτισης δείγματος

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων της σταδιακής απομαγνήτισης. Για την απεικόνιση του διανύσματος της μαγνήτισης και τις αλλαγές του συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η στερεογραφική προβολή ίσης επιφάνειας (Lambert).

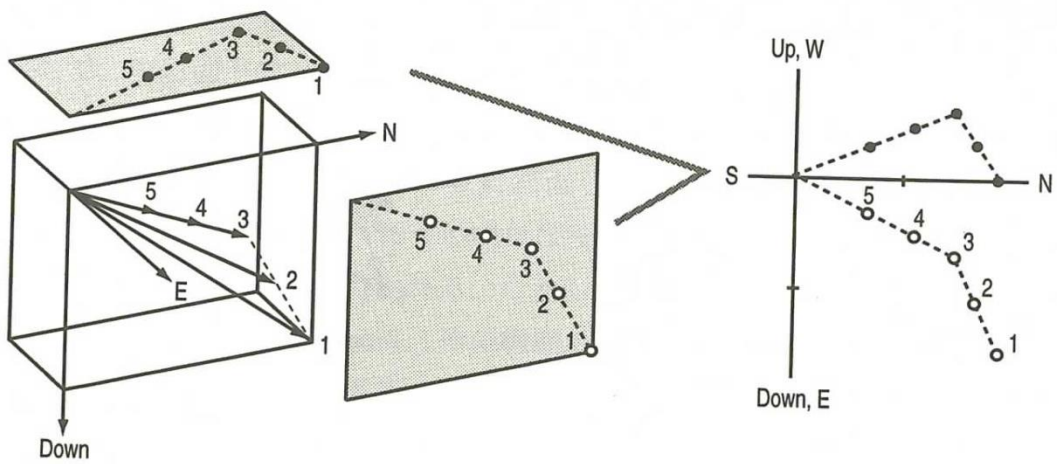
Μπορούμε επίσης να σχεδιάσουμε ξεχωριστά σε ένα διάγραμμα τη μεταβολή της έντασης της μαγνήτισης, η οποία θα μειώνεται σταδιακά, σε σχέση με τα βήματα απομαγνήτισης, να κανονικοποιήσουμε τις τιμές που προκύπτουν και να λάβουμε την καμπύλη απομαγνήτισης (Σχήμα 4.16).



**Σχήμα 4.16.** καμπύλη απομαγνήτισης δείγματος

Τέλος υπάρχει και η μέθοδος παρουσίασης των αποτελεσμάτων στην οποία συνδυάζονται πληροφορίες στο ίδιο διάγραμμα για την ένταση και τις μεταβολές της διεύθυνσης και προτάθηκε αρχικά από τους Wilson και Zijderveld.

Σε αυτή τη περίπτωση ενώ κανονικά θα χρειαζόνταν δύο διαγράμματα για να απεικονισθούν οι συνιστώσες (κατακόρυφη και οριζόντια) του διανύσματος της μαγνήτισης, αυτά αντικαθιστώνται από ένα διπλό διάγραμμα όπως θα δούμε παρακάτω. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά από τον Zijderveld (1967), και έκτοτε είναι η πλέον καθιερωμένη μέθοδος παρουσίασης αποτελεσμάτων σταδιακής απομαγνήτισης (Σχήμα 4.17).



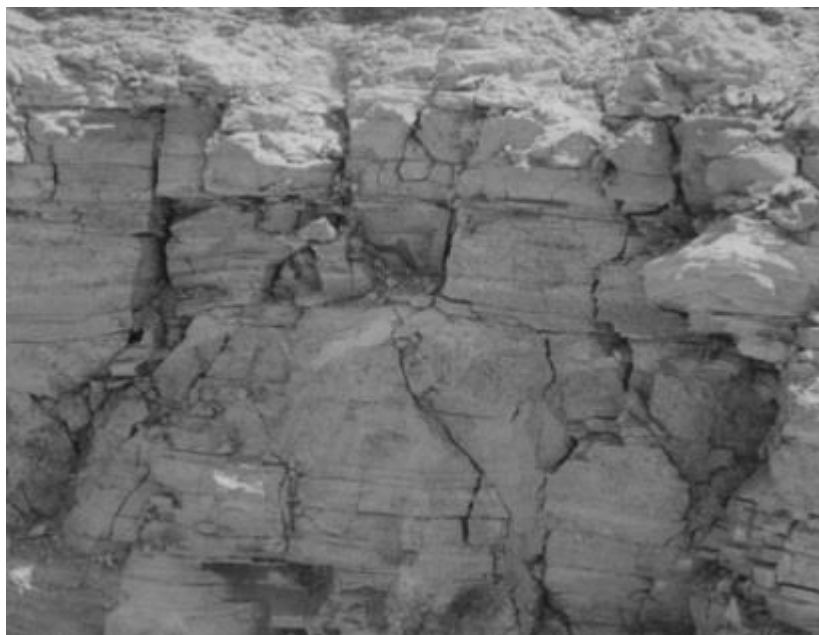
**Σχήμα 4.17.** Παρουσίαση της μεταβολής της μαγνήτισης στο χώρο (αριστερά) και σε ένα διάγραμμα Zijderveld (δεξιά).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΛΙΒΑΝΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΣΚΑΦΗΣ ΣΤΟ ΝΕΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

#### 5.1 Γενικές πληροφορίες για τα υλικά και τις δομές μελέτης. Ο πηλός στην αρχαιομαγνητική έρευνα.

Πηλός η άργιλος είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένυδρα αργιλούχα ορυκτά που περιέχουν διάφορες ποσότητες μετάλλων, μεταλλικών οξειδίων και οργανικών ενώσεων. Από τη διάβρωση διαφόρων πετρωμάτων (Σχήμα 5.1), κυρίως πυριτικών λόγω της ύπαρξης ανθρακικού οξέως ή άλλου διαλύτη, προέρχεται το αργιλώδες χώμα. Άλλες αιτίες αυτής της διάβρωσης είναι η κίνηση του νερού και του αέρα στην ατμόσφαιρα, η διέλευση ενός ποταμού και σε μικρότερο ποσοστό κάποιοι γεωλογικοί λόγοι που προξένησαν πιέσεις και απότομες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας στα πετρώματα. Τα πετρώματα διαλύονται σε πολύ λεπτά σωματίδια (σχεδόν σε μοριακή μορφή). Το μέγεθος των κόκκων της αργίλου διαφοροποιείται ανάλογα με την ποιότητα του υλικού. Το αργίλιο, το πυρίτιο και το νερό αποτελούν τα βασικά συστατικά του πηλού.



Σχήμα 5.1. Φωτογραφία αργιλώδους πετρώματος

Ο κεραμικός πηλός, η άργιλος δηλαδή που έχει υποστεί θερμική επεξεργασία, μπορεί να περιέχει διάφορα σωματίδια από στρώματα με ποικιλία αποχρώσεων που συμβάλουν στο χρωματισμό του και τον χαρακτηρίζουν ως γκρίζο, καστανό ή κοκκινωπό.

Οι διαφορετικές αυτές αποχρώσεις αποκαλύπτονται μόνο έπειτα από ψήσιμο και συνδέονται άμεσα με την γεωλογία της περιοχής προέλευσης. Αυτή καθορίζει και τη σύσταση του, άρα και την περιεκτικότητα του σε μαγνητικά ορυκτά που είναι και η πιο σημαντική του ιδιότητα για τις αρχαιομαγνητικές έρευνες.

Μετά από περίπλοκη επεξεργασία η οποία ποικίλλει ανάλογα με τις περιοχές, τους κεραμείς κτλ, ο πηλός μορφοποιείται σε αγγεία και άλλα σκεύη ή σε οικοδομικά υλικά όπως κεραμίδια και τούβλα. Όλα τα προϊόντα αποξηραίνονται στον αέρα και στην συνέχεια ψήνονται.

Ωστόσο ο πηλός αποτελεί και βασικό συστατικό στην κατασκευή του κλίβανου, τον οποίο συνήθως κατασκευάζει ο κεραμέας μόνος του. Σαν βάση χρησιμοποιείται το οποιοδήποτε υπόβαθρο είναι διαθέσιμο στην περιοχή, συχνά σχιστόλιθος ή άλλο πέτρωμα, και το τοίχωμα αυτό επικαλύπτεται με λάσπη ή πλίνθους από προηγούμενες καύσεις. Με το πρώτο ψήσιμο ο κλίβανος γίνεται συμπαγής και ανθεκτικός. Με τις επαναλαμβανόμενες καύσεις συμπαγοποιείται όλο και περισσότερο μέχρι να γίνει κόκκινος, όπως και παραμένει μετά την τελευταία καύση του.

Οι συνθήκες μέσα στον κλίβανο δεν είναι παντού ίδιες, οι αναπτυσσόμενες μέγιστες θερμοκρασίες έχουν εύρος από 800-950°C, και απαιτούνται περίπου 8 ώρες μέχρι να φτάσει η θερμοκρασία εκεί. Η κατανομή των θερμοκρασιών μέσα στον κλίβανο διαφέρει αρκετά, σε συνάρτηση με την απόσταση από τον θάλαμο καύσης. Ήδη όμως μετά τις 6-7 ώρες έχει επέλθει πυράκτωση εφόσον η θερμοκρασία φτάνει τους 500°C. Η ψύξη ακολουθεί σταδιακά και διαρκεί περίπου 24 ώρες.

## **5.2 Οι κεραμικοί κλίβανοι στην ανασκαφή του ΜΕΤΡΟ « Νέος σιδηροδρομικός σταθμός »-αρχαιολογικές πληροφορίες.**

Στο πλαίσιο της κατασκευής του ΜΕΤΡΟ Θεσσαλονίκης η πρώην ΙΣΤ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων πραγματοποίησε από το 2006 ανασκαφές στον Νέο Σιδηροδρομικό Σταθμό Θεσσαλονίκης. Μεταξύ των άλλων ευρημάτων, κατά κύριο λόγο ταφικών συνόλων, βρέθηκαν και δύο ομάδες κεραμικών κλιβάνων σε διαφορετικά σημεία και χρονικά διαστήματα. Αρχικά, και στο δυτικό τμήμα των ορίων του σταθμού,



εντοπίστηκαν τέσσερις κλίβανοι σε βάθος 1,5-4,0 μ. από την επιφάνεια του εδάφους, ένας εκ των οποίων, ορθογώνιος με διαστάσεις 4,90X2,10 μ. μελετήθηκε με αρχαιομαγνητική μέθοδο (Aidona et al.,2010) και χρονολογήθηκε αρχικά με τα αρχαιομαγνητικά δεδομένα και στην συνέχεια με θερμοφωταύγεια (Πολυμέρης Γ. προσωπική επικοινωνία). Και οι δύο χρονολογήσεις συγκλίνουν σε μια χρονολόγηση του κλιβάνου στους Οθωμανικούς χρόνους, περί τον 12-14<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. Λόγω περιορισμένης αρχαιολογικής πληροφορίας δεν είναι δυνατός περαιτέρω περιορισμός αυτού του χρονικού διαστήματος.

Κατά την συνέχιση της ανασκαφής αποκαλύφθηκαν και άλλοι δύο κλίβανοι ορθογώνιοι (σχήμα 5.2) και (σχήμα 5.3). Ο ένας κλίβανος 5, εντοπίστηκε σε βάθος 2,55μ και έχει διαστάσεις 5,30X2,65μ και αποτελεί τον κλίβανο OSE2 της παρούσας μελέτης. Ο άλλος, κλίβανος 6, εντοπίστηκε σε βάθος 3μ από την επιφάνεια του εδάφους και έχει διαστάσεις 5X2,25μ. Το ανατολικό του τμήμα φαίνεται κατεστραμμένο λόγω μιας νεώτερης κατασκευής απροσδιόριστης χρήσης. Σημαντικό εύρημα για την μελέτη μας αποτελούν πεσμένα κεραμίδια στέγης στην περίμετρο της κατασκευής, με σφράγισμα ALLATINI.

Όλες οι πληροφορίες που σχετίζονται με τους δύο αυτούς κλιβάνους προέρχονται από το αρχείο της πρώην 16<sup>ης</sup> Εφορείας Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων, νύν Εφορείας Πόλης Θεσσαλονίκης, με την σύμφωνη γνώμη της ανασκαφέως κ. Λ. Αχειλαρά.

Λόγω επειγουσών αναγκών αλλά και της μικρής αρχαιολογικής σημασίας τους, η Εφορεία προχώρησε στην καταστροφή τους αμέσως μετά την δειγματοληψία που έγινε τον Ιούνιο του 2011 από τις κ. Αηδονά και Κοντοπούλου και τον τότε μεταπτυχιακό φοιτητή Ν. Ιωαννίδη.





**Σχήμα 5.2.** Φωτογραφία του κλιβάνου OSE -1



**Σχήμα 5.3.** Φωτογραφία του κλιβάνου OSE -2

Από τους δύο αυτούς κλιβάνους συλλέχθηκαν 19 δείγματα απο τον πρώτο (OSE-1) και 11 δείγματα απο τον δεύτερο (OSE-2) με μαγνητική και ηλιακή πυξίδα και εγκλισιόμετρο όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη παράγραφο.

Μετά την μεταφορά τους στο εργαστήριο τα τεμάχια γυψώθηκαν και κόπηκαν σε κυλίνδρους 2.2X2.5 εκ. Ο συνολικός αριθμός που προέκυψε για μελέτη ήταν 218 δείγματα.

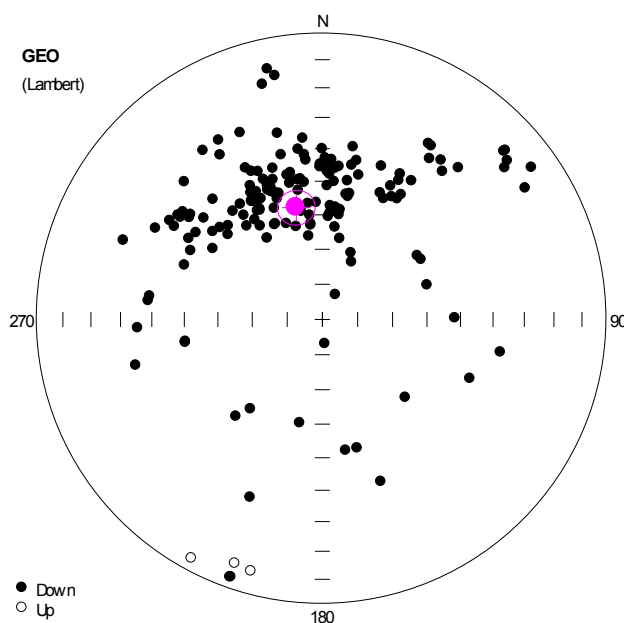
Σε τρία από αυτά τα δείγματα πραγματοποιήθηκε χρονολόγηση με θερμοφωταύγεια (Γ.Πολυμέρης,προσωπική επικοινωνία) με τα εξής αποτελέσματα:

<b>ΔΕΙΓΜΑ</b>	<b>ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ</b>	<b>ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ</b>
<b>OSE1-6</b>	<b>1490 AD</b>	<b>58 years</b>
<b>OSE1-11</b>	<b>1593 AD</b>	<b>53 years</b>
<b>OSE2-8</b>	<b>1370 AD</b>	<b>65 years</b>

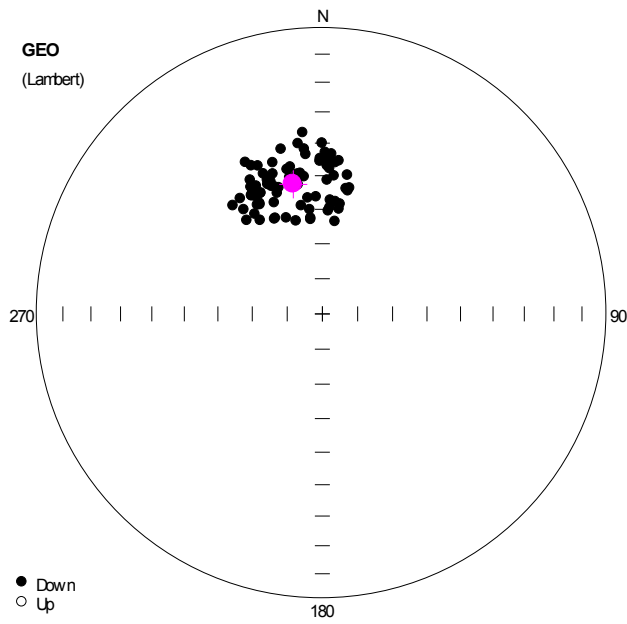
Στην συνέχεια της εργασίας θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε αυτές τις ηλικίες με αυτές που θα προκύψουν από την αρχαιομαγνητική μελέτη.

### 5.3 Αποτελέσματα αρχαιομαγνητικής μελέτης. Υπολογισμός της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης

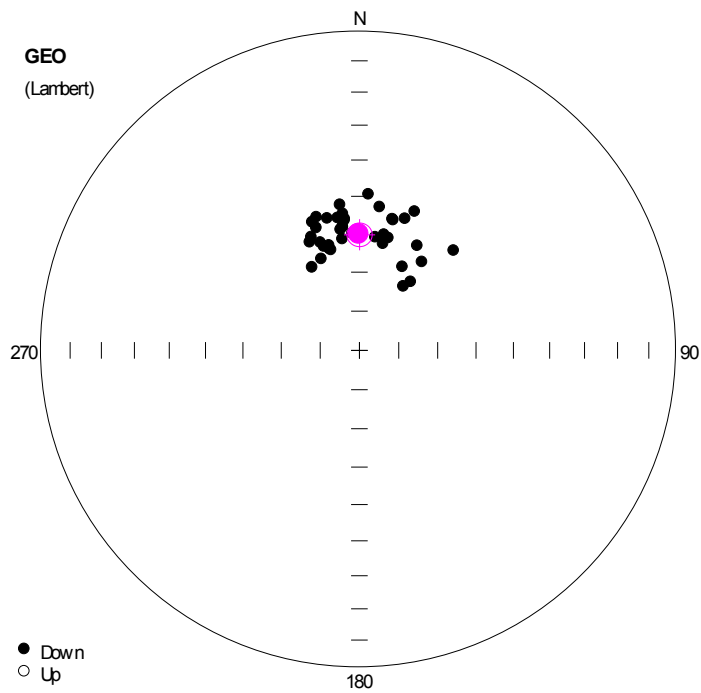
Σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί παραπάνω, τα δείγματα που λαμβάνονται από την ύπαιθρο κόβονται ώστε οι διαστάσεις τους να προσαρμόζονται ανάλογα στις συσκευές που βρίσκονται στο εργαστήριο παλαιομαγνητισμού. Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της μέσης φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης (NRM) στον κάθε κλίβανο ή και στους δύο μαζί εφ' όσον βρίσκονται σε κοντινές τοποθεσίες και βάθη. Μετρήθηκαν 167 δείγματα από τον φούρνο OSE-1 και 40 δείγματα από τον φούρνο OSE-2. Πιο κάτω θα γίνει η παράθεση των στερεογραφικών προβολών των διευθύνσεων (απόκλισης και έγκλισης) της NRM των δειγμάτων που μετρήθηκαν από τον κάθε κλίβανο. Μπορούμε με αυτό τον τρόπο να έχουμε μια εικόνα για τον τρόπο κατανομής της NRM κατά περίπτωση, και να εξάγουμε συμπεράσματα (Σχήματα 5.4,5.5,5.6,5.7).



**Σχήμα 5.4.** Στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων της NRM που μετρήθηκαν για τον κλίβανο OSE-1

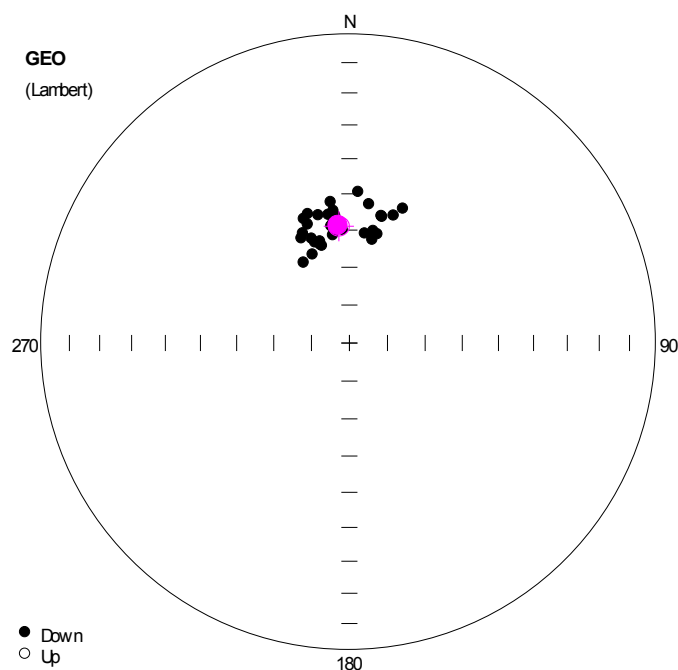


**Σχήμα 5.5.** Στερεογραφική προβολή μετά την επεξεργασία της αφαίρεσης των τιμών της NRM που απείχαν από το σύνολο στον κλίβανο OSE-1



**Σχήμα 5.6.** Στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων της NRM που μετρήθηκαν για τον κλίβανο OSE-2





**Σχήμα 5.7.** Στερεογραφική προβολή μετά την επεξεργασία της αφαίρεσης των τιμών της NRM που απείχαν από το σύνολο στον κλίβανο OSE-2

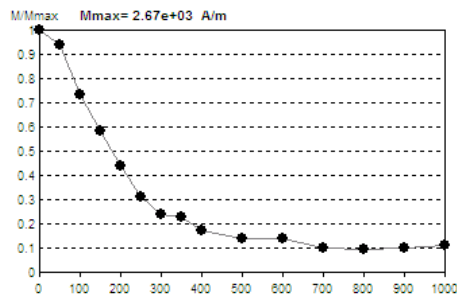
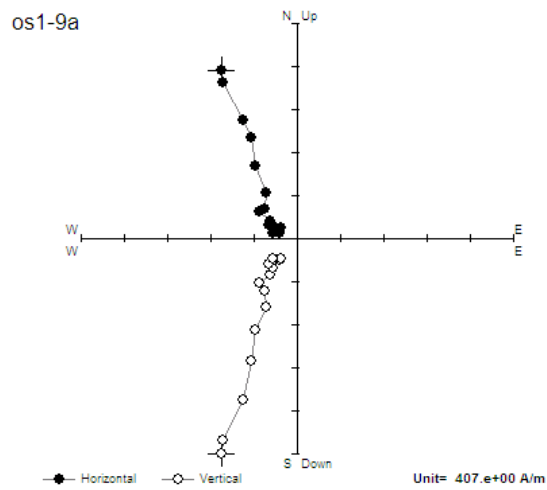
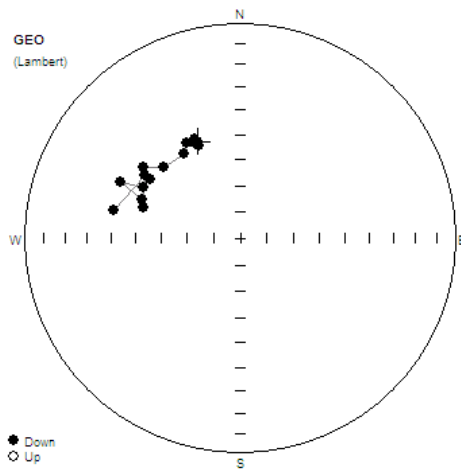
εδώ και τη διαφορά στον αριθμό των δειγμάτων μεταξύ τους.

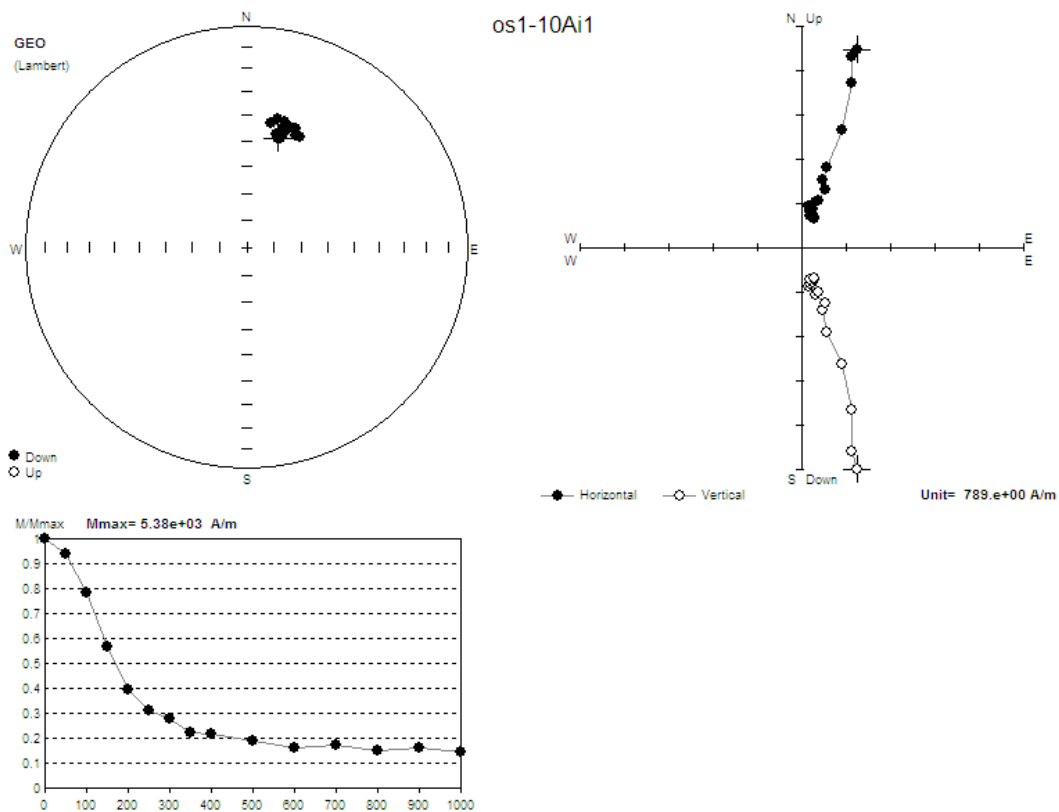
Το ότι υπάρχει μια ανισοκατανομή όπως παρατηρούμε των διευθύνσεων των δειγμάτων πάνω στις στερεογραφικές προβολές (ελήφθησαν με τη βοήθεια του λογισμικού remasoft) μπορεί να παρουσιάζει κάποια εξήγηση. Έχει να κάνει είτε με το μέρος του κλιβάνου από τον οποίο αποσπάστηκε το δείγμα (χώρος καύσης, εξωτερικά τοιχώματα, κ.τ.λ.) και συνδυάζεται με την ανισοκατανομή των θερμοκρασιών, είτε με πιθανή καταπόνηση του κτίσματος, είτε από το ιξώδες της μαγνήτισης του ίδιου του δείγματος. Με τον όρο *ιξώδης* εννοούμε το πόσο ευμετάβλητη είναι η τιμή της NRM σε ένα δείγμα, και ως άμεση συνέπεια κατά πόσο μπορεί να διατηρήσει την παραμένουσα μαγνήτιση.

#### 5.4 Σταδιακή απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο και θέρμανση

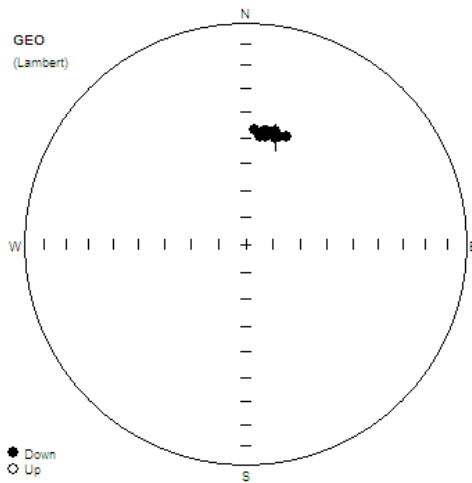
Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή ενός αριθμού δειγμάτων με σκοπό τη σταδιακή τους απομαγνήτιση είτε με εφαρμογή εναλλασσόμενου πεδίου είτε με θέρμανση. Ο διαχωρισμός αυτών των δειγμάτων γίνεται με τη βοήθεια πειραμάτων μαγνητικής ορυκτολογίας. Παίρνουμε με αυτό τον τρόπο πληροφορίες για την παρουσία του μαγνητίτη ή του αιματίτη σαν επικρατέστερο ορυκτό στα δείγματα μας.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα αποτελεσμάτων της απομαγνήτισης που προκύπτει με εναλλασσόμενο πεδίο (σχήμα 5.8) και με θέρμανση (σχήμα 5.9) αντίστοιχα από τον κλίβανο OSE-1. Κατόπιν με την ίδια σειρά από τον κλίβανο OSE-2 (σχήμα 5.10) και (σχήμα 5.11)

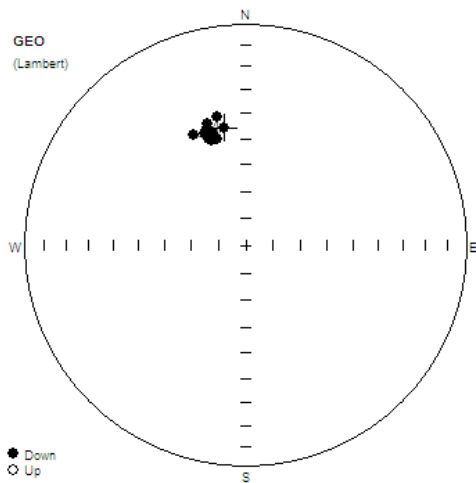
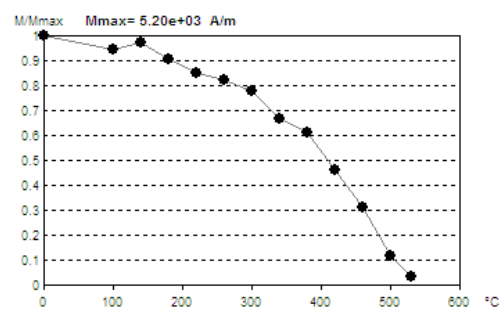
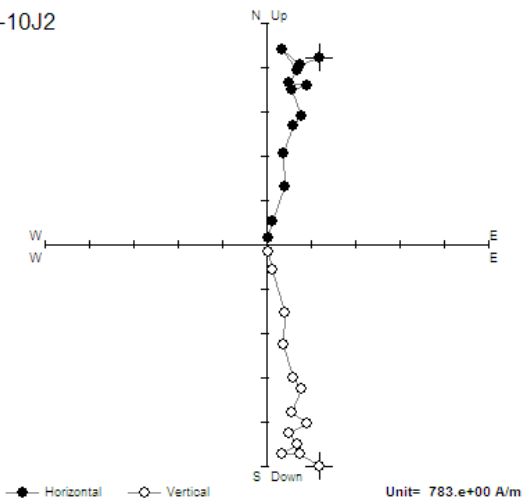




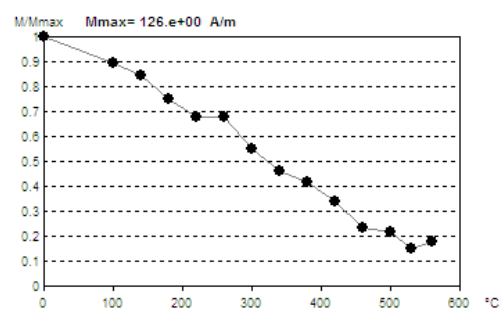
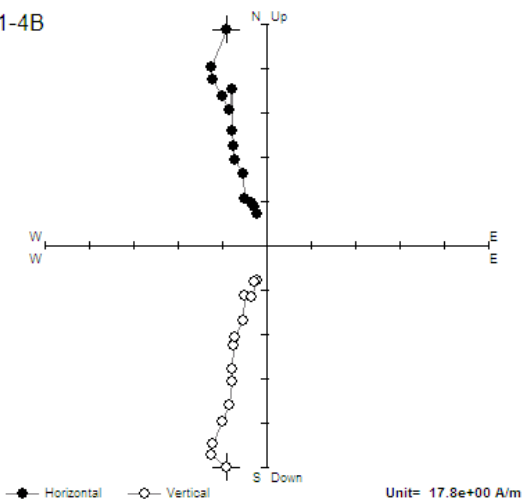
**Σχήμα 5.8.** Παραδείγματα αποτελεσμάτων απομαγνήτισης με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (Κλίβανος OSE-1). Σε κάθε περίπτωση παρατηρούμε πάνω αριστερά τη στερεογραφική προβολή της μέσης απόκλισης και έγκλισης που καταγράφηκε σε ένα δείγμα, πάνω δεξιά το διάγραμμα της αρχαιοδιεύθυνσης και τέλος κάτω αριστερά την σταδιακή ελάττωση της έντασης της NRM συναρτήσεως της άυξης του εξωτερικού εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού Remasoft.



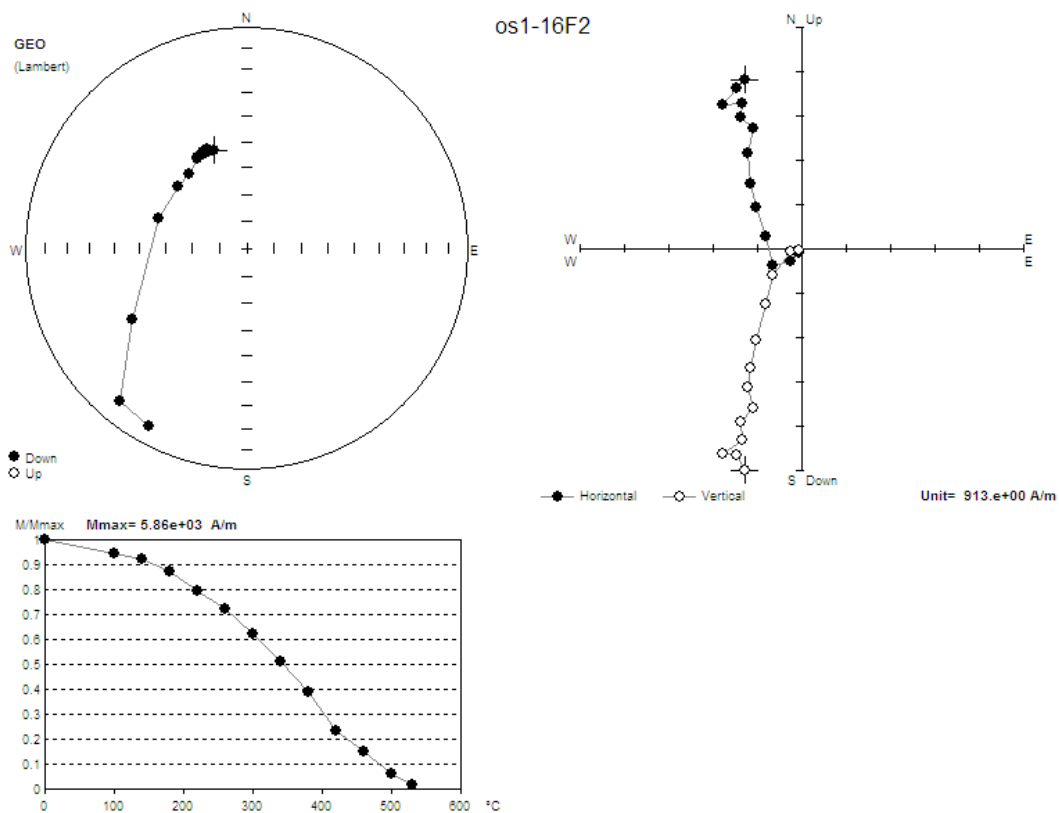
os1-10J2



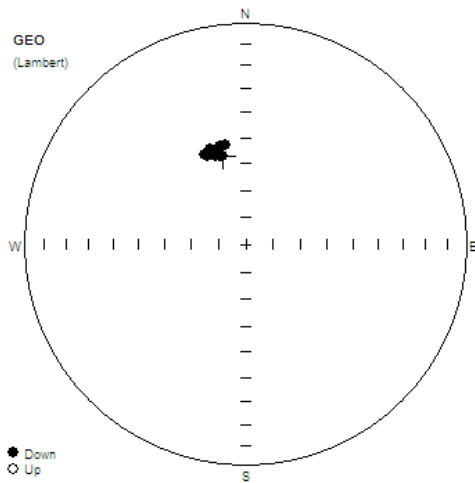
os1-4B



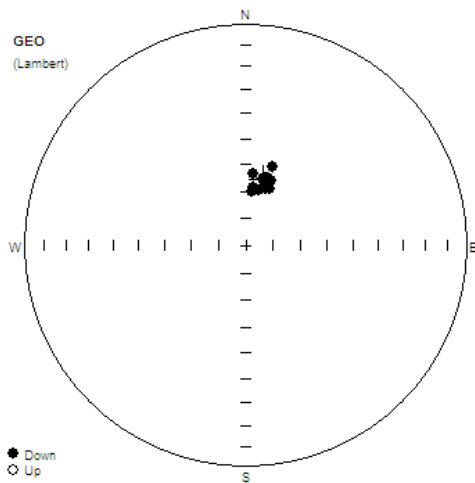
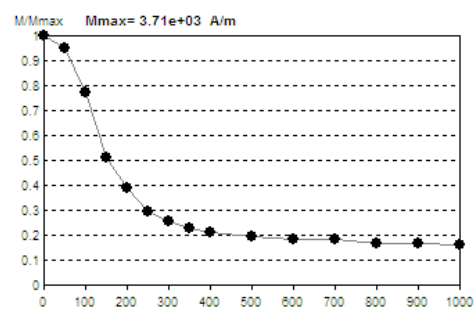
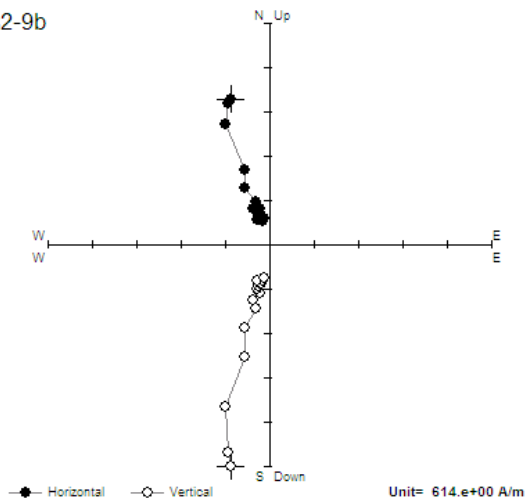




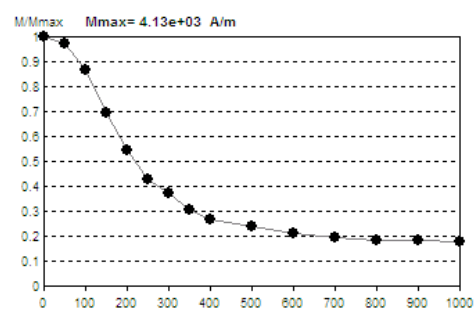
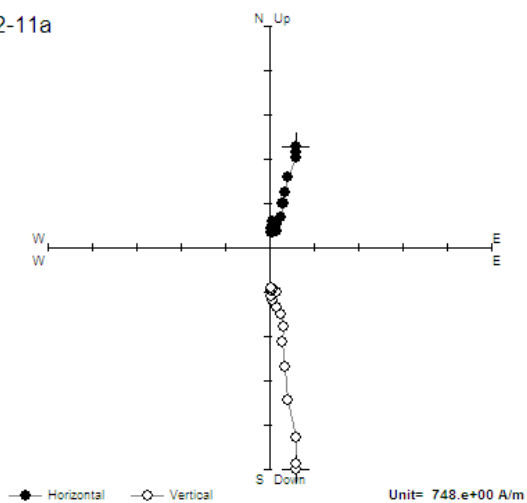
**Σχήμα 5.9.** Παραδείγματα αποτελεσμάτων απομαγνήτισης με αύξηση της θερμοκρασίας(Κλίβανος OSE-1). Σε κάθε περίπτωση παρατηρούμε πάνω αριστερά τη στερεογραφική προβολή της μέσης απόκλισης και έγκλισης που καταγράφηκε σε ένα δείγμα, πάνω δεξιά ο διαχωρισμός των συνιστωσών του διανύσματος της NRM και τέλος κάτω αριστερά την σταδιακή ελάττωση της έντασης της NRM συναρτήσει της αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στον εργαστηριακό κλίβανο. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού Remasoft.



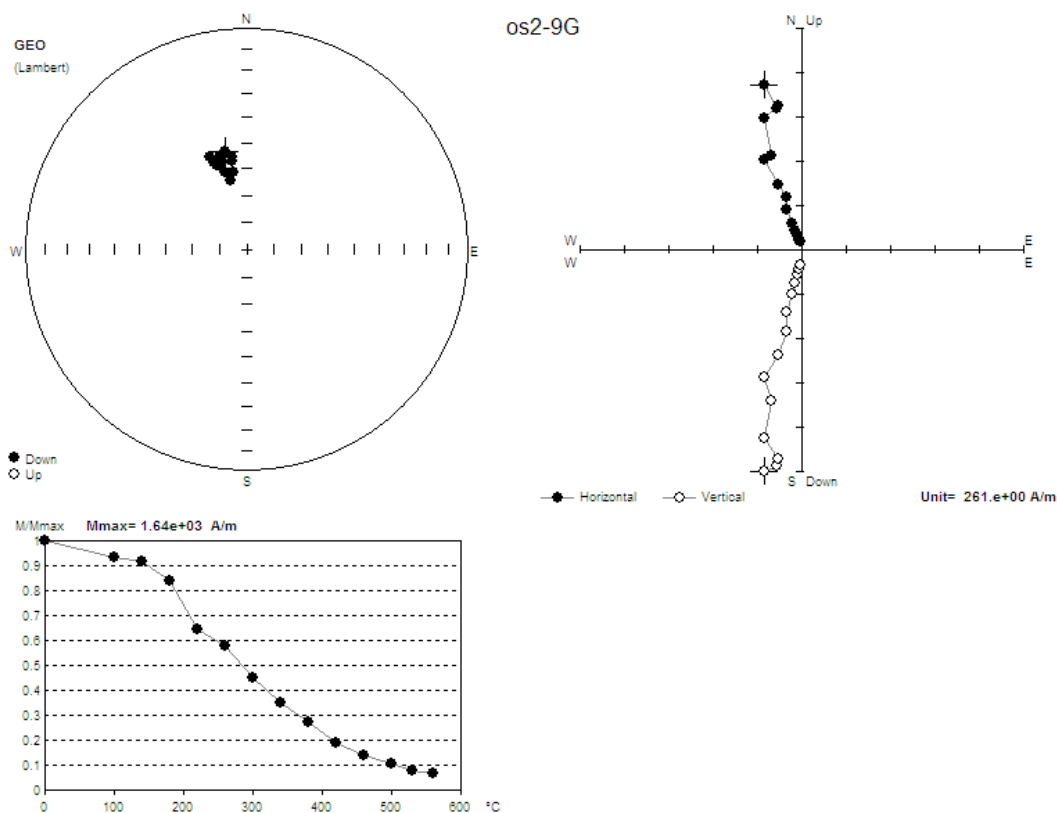
os2-9b



os2-11a

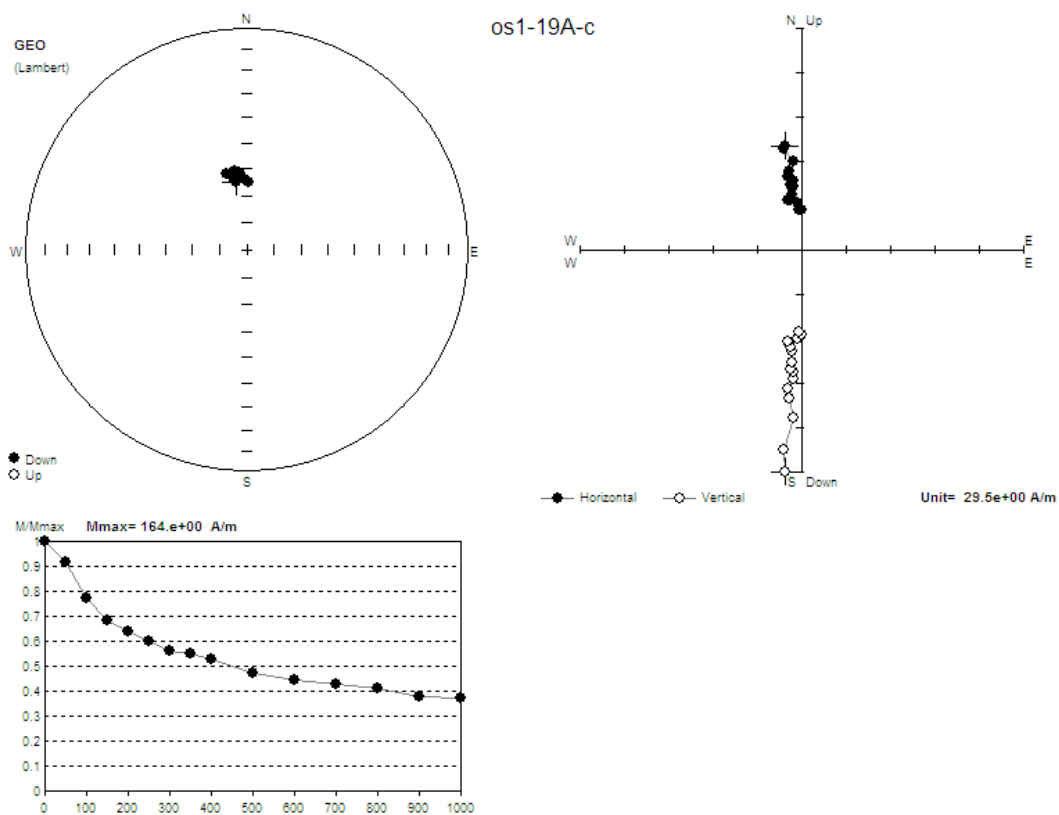


**Σχήμα 5.10.** Παραδείγματα αποτελεσμάτων απομαγνήτισης με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (Κλίβανος OSE-2). Σε κάθε περίπτωση παρατηρούμε πάνω αριστερά τη στερεογραφική προβολή της μέσης απόκλισης και έγκλισης που καταγράφηκε σε ένα δείγμα, πάνω δεξιά το διάνυσμα της αρχαιοδιεύθυνσης και τέλος κάτω αριστερά την σταδιακή ελάττωση της έντασης της NRM συναρτήσει της αύξησης του εξωτερικού εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού Remasoft.

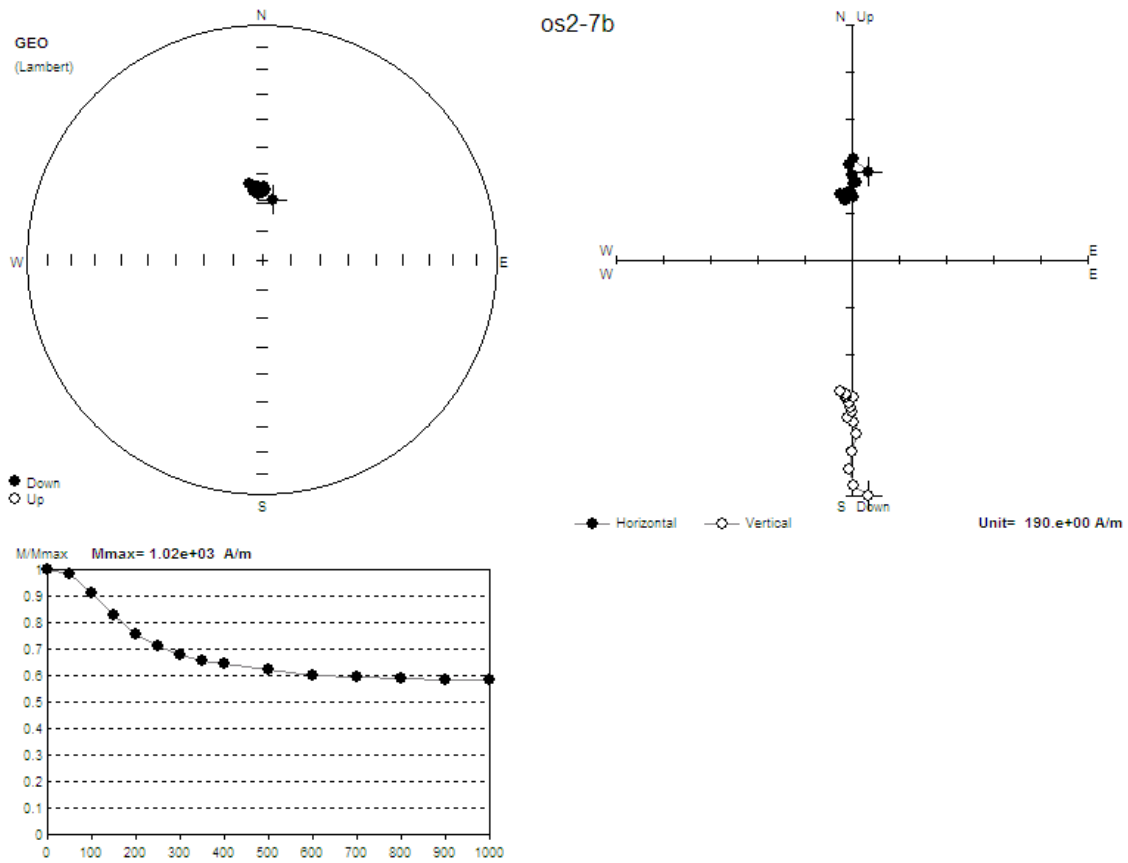


**Σχήμα 5.11.** Παράδειγμα αποτελεσμάτων απομαγνήτισης με αύξηση της θερμοκρασίας (Κλίβανος OSE-2). Παρατηρούμε πάνω αριστερά τη στερεογραφική προβολή της μέσης απόκλισης και έγκλισης που καταγράφηκε σε ένα δείγμα, πάνω δεξιά ο διαχωρισμός των συνιστωσών του διανύσματος της NRM και τέλος κάτω αριστερά την σταδιακή ελάττωση της έντασης της NRM συναρτήσει της αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στον εργαστηριακό κλίβανο. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού Remasoft.

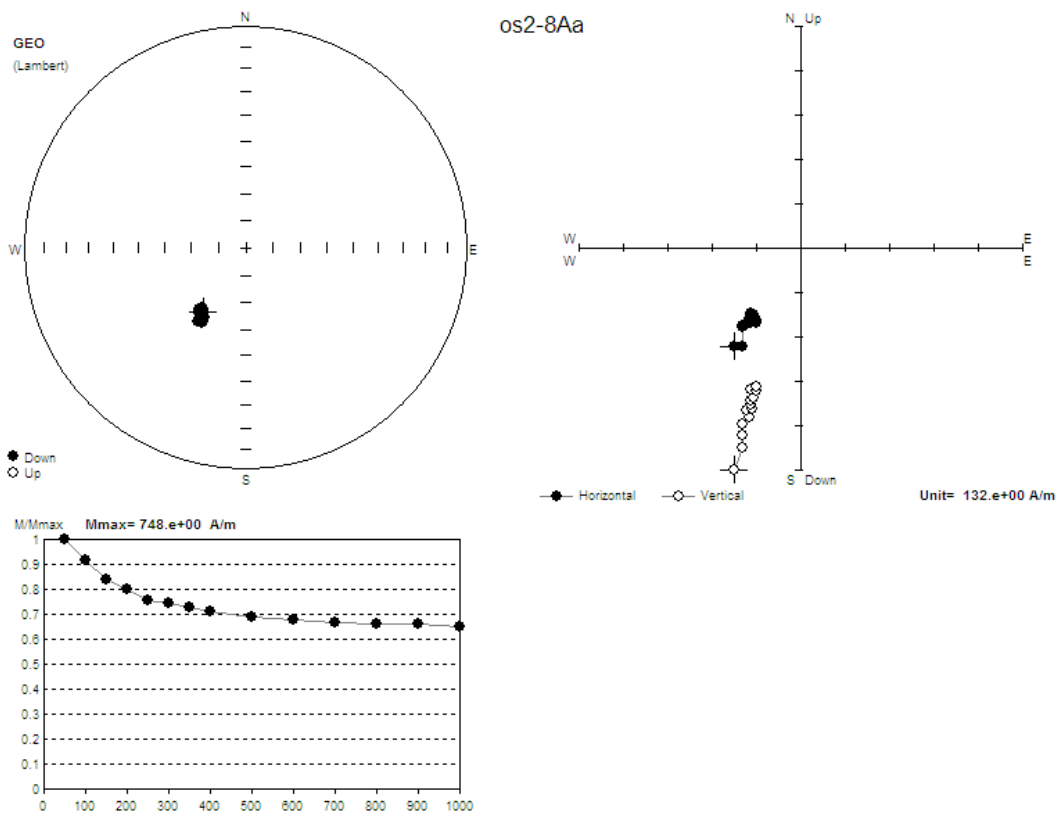
Γενικά, όταν ένα δείγμα χάσει μεγάλο ποσοστό από τη μαγνήτισή του μέχρι και τα 300 – 400 Oe ή αντίστοιχα στους 580°C, τότε κυριαρχείται επί το πλείστον από χαμηλή συνεκτικότητας ορυκτά, όπως ο μαγνητίτης και ο τιτανομαγνητίτης (Όπως στα σχήματα παραπάνω). Στην αντίθετη περίπτωση περιέχει και κάποιο ποσοστό υψηλής συνεκτικότητας ορυκτών, όπως ο αιματίτης. Αυτό φαίνεται απο την μη απομαγνήτιση μέχρι και τα 1000 Oe. Παραδείγματα, ένα από τον OSE-1 και δύο από τον OSE-2, παρατίθενται παρακάτω (σχήματα 5.12,5.13,5.14).



**Σχήμα 5.12.** Δείγμα os1-19c (Από OSE-1)



Σχήμα 5.13. Δείγμα os2-7b (Από OSE-2)



Σχήμα 5.14. Δείγμα os2-8Aa (Από OSE-2)

Στα παραπάνω σχήματα και συγκεκριμένα πάνω στην κάθε στερεογραφική προβολή, μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διεύθυνση (απόκλιση και έγκλιση) των επί μέρους διανυσμάτων της (NRM) που προκύπτουν κατά την πορεία της απομαγνήτισης καθώς και τη χαρακτηριστική της τιμή. Στα διαγράμματα που υπάρχουν κάτω ακριβώς από τις στερεογραφικές προβολές φαίνεται κατά περίπτωση η φθίνουσα πορεία που ακολουθεί η τιμή του μεγέθους της μαγνήτισης, σε σχέση με την αύξηση του εναλλασσόμενου πεδίου ή της θερμοκρασίας.

Τέλος πάνω δεξιά παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα Zijderveld με τον κατακόρυφο άξονα (Up & Down στο σχήμα) πάνω στον άξονα B – N.

Όπως έχει προαναφερθεί ανωτέρω ένας αριθμός δειγμάτων που επιλέχθηκαν απομαγνητίζονται, κάποια με εναλλασσόμενο πεδίο και κάποια άλλα θερμικά για τον κάθε κλίβανο. Έπειτα οι τιμές που προκύπτουν τελικά από αυτές τις απομαγνήτισεις υποβάλλονται σε στατιστική επεξεργασία για τον υπολογισμό της τιμής της μέσης αρχαιοδύθυνσης. Αυτή είναι αντιπροσωπευτική για όλο τον κλίβανο.

Από τον φούρνο OSE-1 ελήφθησαν ένδεκα (11) δείγματα ενώ από τον OSE-2 τρία (3) για θερμική απομαγνήτιση. Όλα αυτά συμμετέχουν στους τελικούς υπολογισμούς. Με εναλλασσόμενο πεδίο (AF) απομαγνητίστηκαν 23 δείγματα από τον OSE-1 και 16 από τον OSE-2. Δεν κρίθηκαν όμως όλα κατάλληλα, σύμφωνα με τα δεδομένα που λήφθηκαν κατά την πορεία της απομαγνήτισης, και κάποια από αυτά απορρίφθηκαν.

#### **5.4.1 Θερμική απομαγνήτιση**

Η περιγραφή της μεθόδου της θερμικής απομαγνήτισης καθώς και οι αρχές στις οποίες στηρίζεται έχουν αναφερθεί ανωτέρω. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε μια επιλογή δειγμάτων από τον κάθε κλίβανο για τη θερμική απομαγνήτιση τους, με την βοήθεια των πειραμάτων μαγνητικής ορυκτολογίας που θα αναπτυχθούν παρακάτω. Σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι όπως γνωρίζουμε ο εντοπισμός του κύριου ορυκτού-φορέα της μαγνήτισης στα δείγματα που πραγματοποιούνται, αλλά και του ποσοστού κυριαρχίας του σε σχέση με τα συνυπάρχοντα μαγνητικά ορυκτά.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δείγματα που απομαγνητίστηκαν θερμικά και από τους δυο κλίβανους :

### ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

OS1-1E	OS1-4B	OS1-5D	OS1-6D
OS1-16F2	OS1-6G	OS1-9F	OS1-9J
OS1-10C2	OS1-10J2	OS1-G2	
OS2-9G	OS2-10A	OS2-10E	

#### 5.4.2 Απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο (AF)

Για την AF απομαγνήτιση και με παρόμοια κριτήρια όπως και παραπάνω, τα δείγματα από τους δυο κλιβάνους που επιλέχθηκαν για τη διαδικασία και απομαγνητίστηκαν με αυτό τρόπο, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα :

### AF ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

OS1-7E	OS1-Ad	OS1-1B	OS1-2AB
OS1-2AE	OS1-4AA	OS1-4AF	OS1-4BA
OS1-5B	OS1-6B	OS1-6E	OS1-6H
OS1-9A	OS1-9D	OS1-9G	OS1-10AC1
OS1-10AI1	OS1-10AK1	OS1-16AA1	OS1-16AA2
OS1-16AB2	OS1-18AB	OS1-19AC	OS2-1B
OS2-2AB	OS2-3A	OS2-5AD	OS2-5AE
OS2-5AF	OS2-7A	OS2-7B	OS2-8AA
OS2-9B	OS2-9D	OS2-9F	OS2-10C
OS2-10D	OS2-11A	OS1-8B	

#### 5.4.3 Υπολογισμός της αρχαιοδιεύθυνσης από τα δεδομένα.

Τελικά τα δείγματα που επιλέχθηκαν και από τους δυο κλιβάνους για τον υπολογισμό της αρχαιοδιεύθυνσης στην κάθε περίπτωση, βρίσκονται στους παρακάτω πίνακες. Ο πρώτος αναφέρεται στον OSE-1 για AF και θερμική απομαγνήτιση και ο δεύτερος ομοίως στον OSE-2:

OSE-1

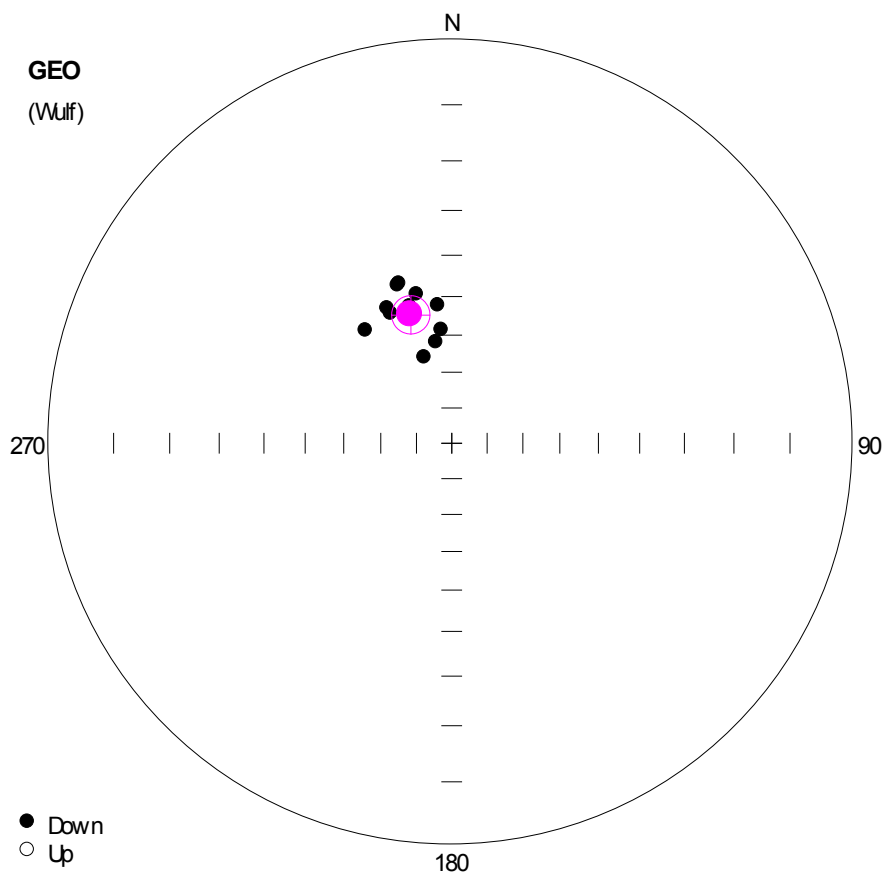
OS1-1AD	OS1-1B	OS1-1E	OS1-4B
OS1-10AK1	OS1-6H	OS1-19AC	OS1-16AA2
OS1-6B	OS1-10AI1	OS1-16AA1	OS1-10AC1
OS1-9A	OS1-5D	OS1-6E	OS1-4AA
OS1-5B	OS1-6D	OS1-6G	OS1-9F
OS1-9J	OS1-4BA	OS1-10C2	OS1-10J2
OS1-4AF	OS1-16F2	OS1-16G2	

OSE-2

OS2-7B	OS2-8AA	OS2-9B	OS2-9D
OS2-10D	OS2-11A	OS2-10C	OS2-2AB
OS2-3A	OS2-5AD	OS2-5AF	OS2-9F
OS2-9G	OS2-10A	OS2-10E	OS2-7A

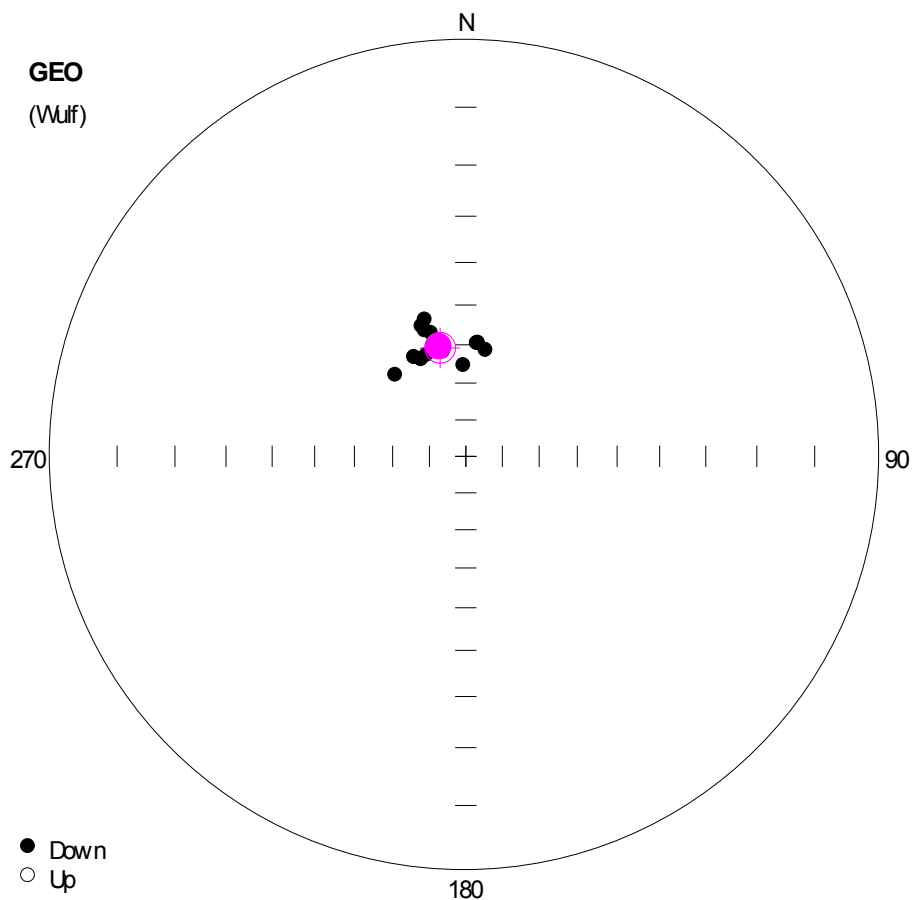
Ακολουθεί η στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων των δειγμάτων του OSE-1 σε κοινό δίκτυο για τον στατιστικό υπολογισμό της μέσης τιμής της αρχαιοδιεύθυνσης (σχήμα 5.15).





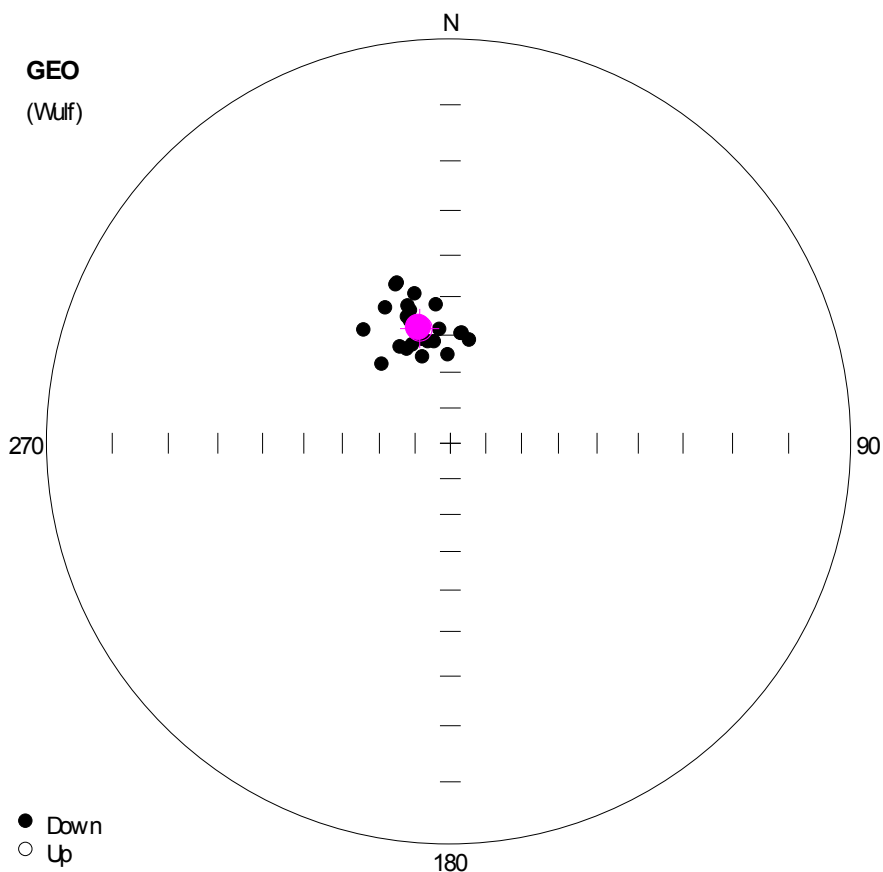
**Σχήμα 5.15.** Στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων των δειγμάτων του κλιβάνου OSE-1 μετά την θερμική ή AF απομαγνήτιση τους και μετά την απομάκρυνση των τιμών που απέκλιναν αισθητά από το σύνολο.

Κατόπιν επαναλαμβάνεται η διαδικασία και για τον OSE-2 παρομοίως και παίρνουμε την παρακάτω προβολή (σχήμα 5.16) :



**Σχήμα 5.16.** Στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων των δειγμάτων του κλιβάνου OSE-2 μετά την θερμική ή AF απομαγνήτιση τους και μετά την απομάκρυνση των τιμών που απέκλιναν αισθητά από το σύνολο.

Και τέλος συνδυάζοντας τα δεδομένα και από τους δύο κλιβανους μαζί εφόσον παρατηρούμε πολύ καλό βαθμό σύμπτωσης των διευθύνσεων τους έχουμε την προβολή (σχήμα 5.17) :



**Σχήμα 5.17.** Στερεογραφική προβολή των διευθύνσεων των δειγμάτων των κλιβάνων OSE-1+2 μετά την θερμική ή AF απομαγνήτιση τους και μετά την απομάκρυνση των τιμών που απέκλιναν αισθητά από το σύνολο.

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα αποτελέσματα μετά την στατιστική επεξεργασία για τις τιμές της απόκλισης και της έγκλισης (αρχαιοδιεύθυνση) και για τις τρεις περιπτώσεις που αναφέρονται πιο πάνω. Ο (N) είναι ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιείται κάθε φορά, το (a95) αναφέρεται στο σφάλμα, δηλαδή στην εμπιστοσύνη που μπορούμε να έχουμε στις προσδιορισθείσες διευθύνσεις και το (k) είναι παράγοντας που φανερώνει την συγκέντρωση του συνόλου των τιμών. Σε μια αρχαιομαγνητική μελέτη θεωρούμε αξιόπιστο ένα αποτέλεσμα με  $a95 < 5$  και  $k > 50$ .

	<b>N</b>	<b>Απόκλιση</b>	<b>Έγκλιση</b>	<b>a95</b>	<b>k</b>
<b>OSE 1</b>	<b>10</b>	<b>343</b>	<b>53.3</b>	<b>5.4</b>	<b>82.17</b>
<b>OSE 2</b>	<b>14</b>	<b>346.6</b>	<b>60</b>	<b>3.9</b>	<b>102.25</b>
<b>OSE ALL</b>	<b>24</b>	<b>345</b>	<b>57.2</b>	<b>3.3</b>	<b>82.16</b>

## 5.5 Πειράματα Μαγνητικής ορυκτολογίας

Έχει γίνει ήδη αναφορά παραπάνω σχετικά με τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας, που γίνονται κατά τη διάρκεια της αρχαιομαγνητικής έρευνας, καθώς και για τους λόγους τους οποίους αυτά πραγματοποιούνται. Αναφέρθηκε ακόμη πως προηγούνται της διαδικασίας των απομαγνητίσεων εφόσον αποτελούν κριτήριο αναγνώρισης του είδους του μαγνητικού ορυκτού που κυριαρχεί στο προς εξέταση δείγμα. Συμβάλλουν έτσι και στην επιλογή του τρόπου απομαγνήτισης που πρόκειται να αποδεχθούμε. Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε δείγμα που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για κάθε κλίβανο.

### 5.5.1 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM)

Η IRM όπως γνωρίζουμε είναι η μαγνήτιση που αποκτάται από το υλικό όταν σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος, επιδράσει σε αυτό ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί στη φύση αλλά και στο εργαστήριο με τη μορφή πειράματος, ώστε να είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα για την ορυκτολογική σύσταση του δείγματος. Συνήθως μας αρκεί το πεδίο που εφαρμόζουμε να φτάνει στη τιμή των 1200 Oe. Από τις τιμές του πεδίου στις οποίες τα δείγματα μας κατά περίπτωση φτάνουν σε κορεσμό βγάζουμε συμπέρασμα για την περιεκτικότητα τους σε ισχυρής συνεκτικότητας (σκληρά) και ασθενούς συνεκτικότητας (μαλακά) ορυκτά.

Συγκεκριμένα όταν παρατηρούμε σε κάποιο δείγμα κορεσμό μέχρι τα 200 Oe τότε αυτό περιέχει κυρίως μαγνητίτη. Όσο μάλιστα πιο κοντά στο μηδέν βρίσκεται η τιμή της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην οποία επιτυγχάνεται κορεσμός, τόσο αυξανόμενο είναι και το ποσοστό του μαγνητίτη επί των άλλων μαγνητικών ορυκτών. Όταν τώρα η τιμή του κορεσμού του δείγματος βρίσκεται στα 400 Oe σημαίνει ότι σε αυτό υπάρχει ένας συνδυασμός σκληρών και μαλακών μαγνητικά ορυκτών. Τελικά όσο παρατηρούμε να αυξάνεται η ένταση του πεδίου που θα επιτυγχάνεται ο κορεσμός, τόσο μεγαλύτερο θα είναι

το ποσοστό των ισχυρής συνεκτικότητας μαγνητικών ορυκτών επί της συνολικής ποσότητας των μαγνητικών ορυκτών του δείγματος.

Από τον κάθε κλίβανο ελήφθησαν αντιπροσωπευτικά δείγματα και μετά την απομαγνήτιση τους εφαρμόστηκε σε αυτά η ανωτέρω διαδικασία για να εξαχθεί το συμπέρασμα που αφορά το είδος των μαγνητικών ορυκτών που περιέχονται στο υλικό τους.

Συγκεκριμένα ελήφθησαν από τον OSE-1 τα :

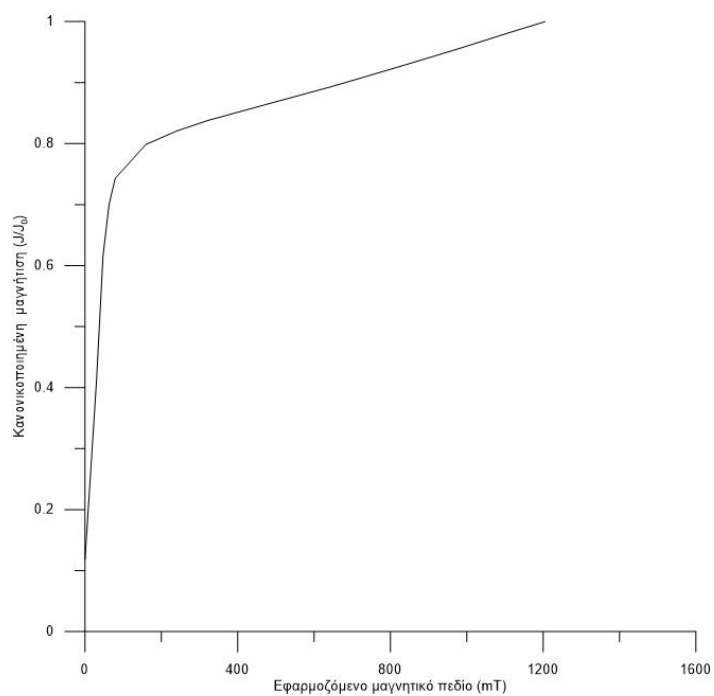
OS1-5AB	OS1-9G	OS1-10K1	OS1-16A2
---------	--------	----------	----------

Και από τον OSE-2 τα :

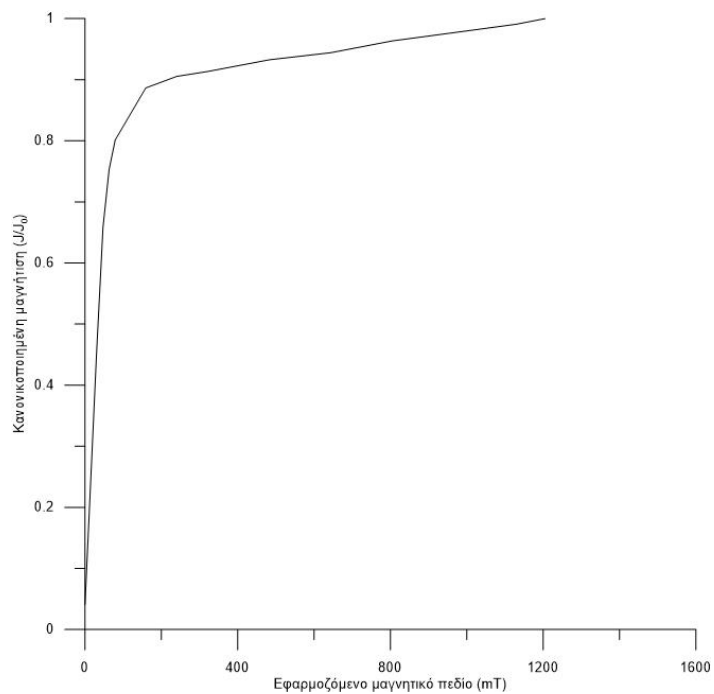
OS2-5AD	OSE2-9B
---------	---------

Ακολουθούν αρχικά τα τέσσερα διαγράμματα απόκτησης IRM που αφορούν τον OSE-1 (σχήμα 5.18) και κατόπιν τα δύο που αφορούν τον OSE-2 (σχήμα 5.19)

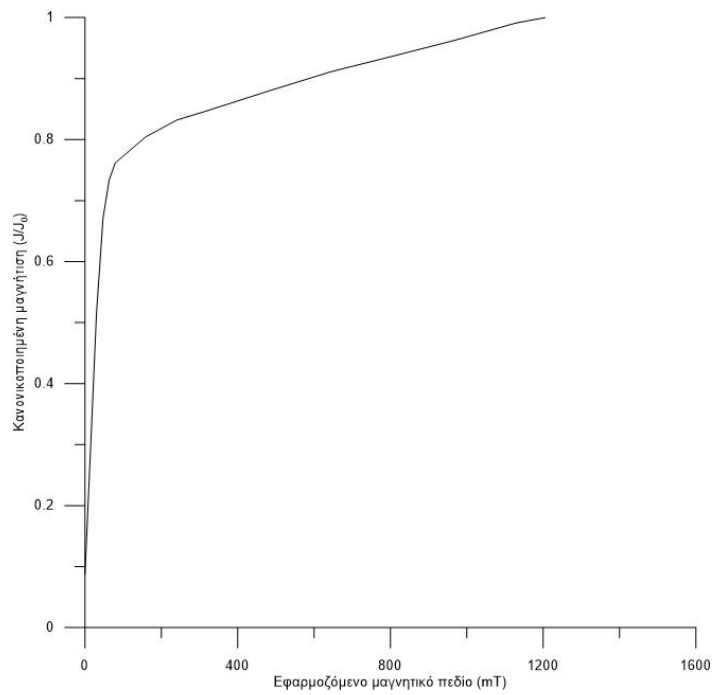
## ΦΟΥΡΝΟΣ OSE-1



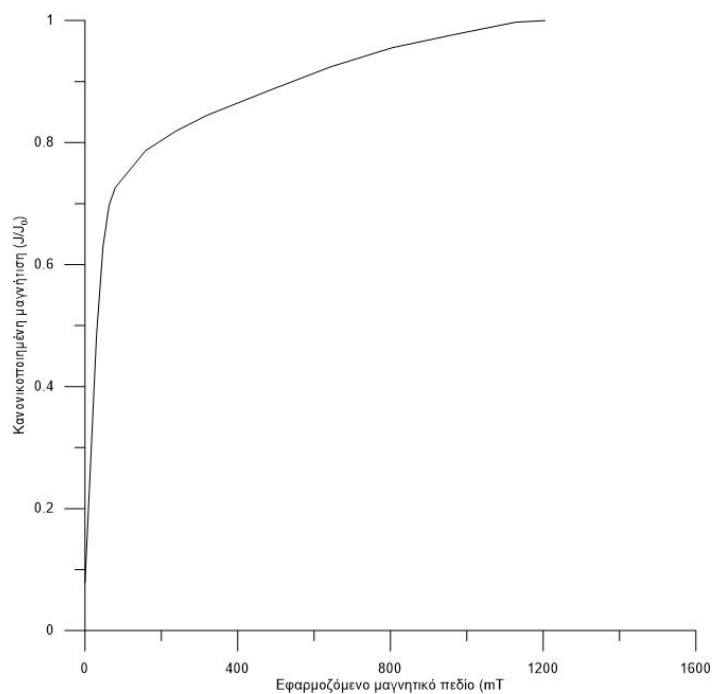
## OS1-5AB



## OS1-9G



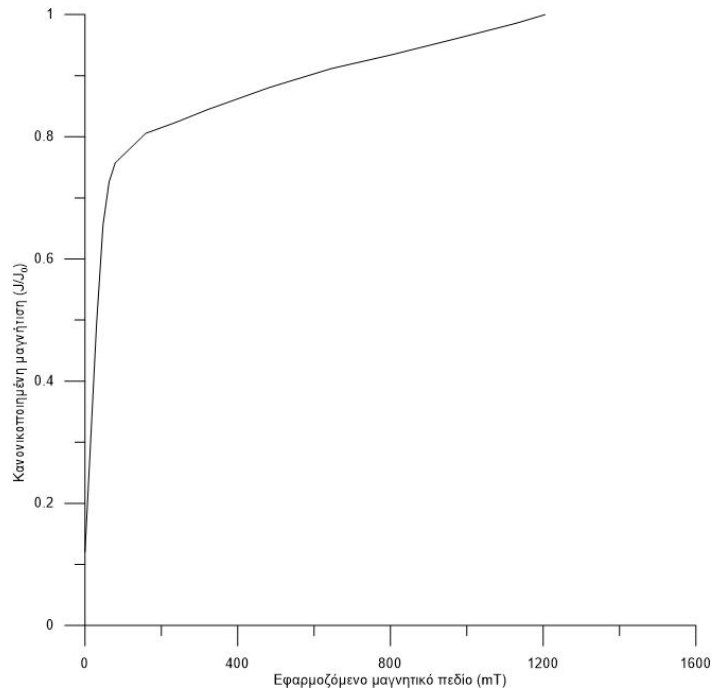
**OS1-10K1**



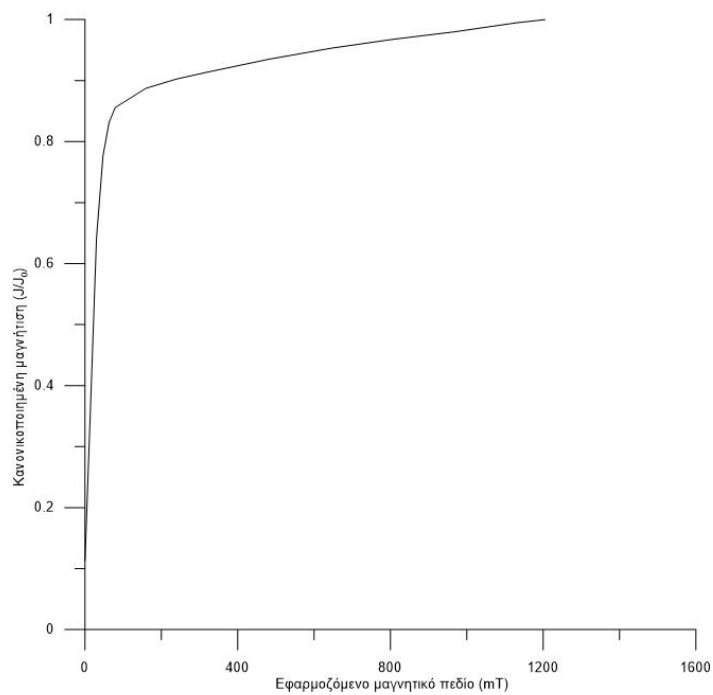
**OS1-16A2**

**Σχήμα 5.18.** Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο σε δείγματα του κλιβάνου OSE-1

## ΦΟΥΡΝΟΣ OSE-2



### OS2-5AD



### OS2-9B

**Σχήμα 5.19.** Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πεδίο σε δείγματα του κλιβάνου OSE-2



## OSE-1

Σαν συμπέρασμα από την μελέτη των τιμών της μαγνήτισης σε σχέση με το πεδίο για τον πρώτο κλίβανο συνάγεται η ύπαρξη ποσοστού σκληρού μαγνητικού υλικού που ποικίλει σχετικά από δείγμα σε δείγμα.

## OSE-2

Στα δυο δείγματα του δεύτερου φούρνου παρατηρείται μια διαφορά στη συμπεριφορά ως προς την απόκτηση της IRM. Το OS2-9B περιέχει περισσότερο μαγνητιση σε σχέση με το OS2-5AD ποσοστιαία και το αντίστροφο συμβαίνει με τον αιματίτη. Έχουμε και εδώ την ύπαρξη τόσο ασθενούς όσο και ισχυρής συνεκτικότητας υλικών.

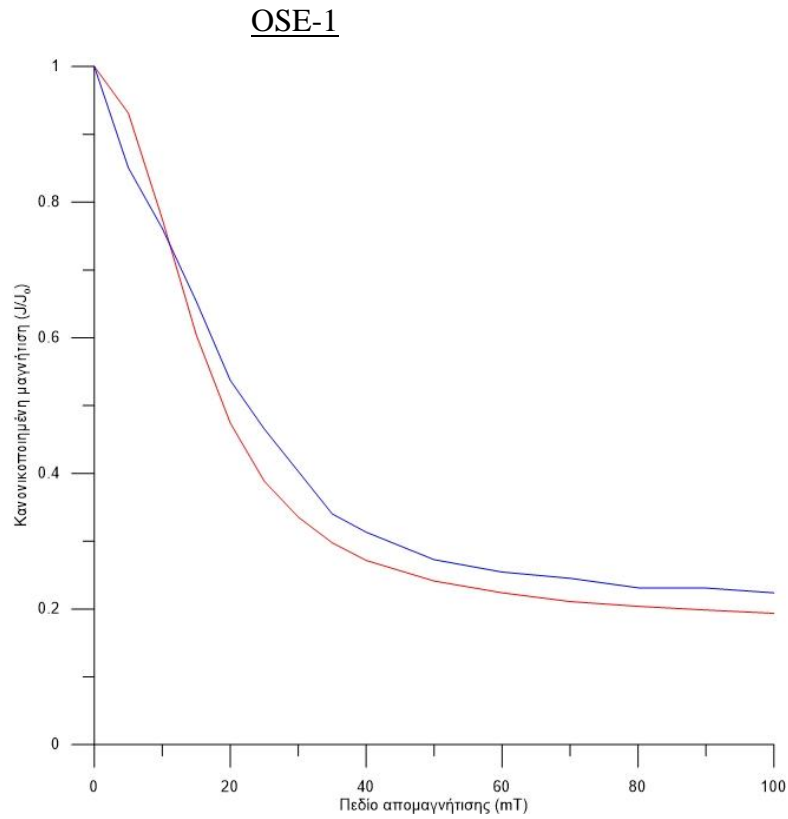
### 5.5.2 Πειράματα Lowrie-Fuller (L-F)

Η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται, ο λόγος για τον οποίο γίνεται και ο τρόπος ερμηνείας του πειράματος L-F έχουν ήδη αναφερθεί. Η εφαρμογή του στην παρούσα περίπτωση ελέγχει τον τρόπο συμπεριφοράς σε εξεταζόμενα δείγματα τους, κατά τη διάρκεια δύο διαφορετικών ειδών απομαγνήτισης. Όπως έχουμε αναφέρει και στα προηγούμενα η απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο της αρχικής NRM συγκρίνεται με αυτή που γίνεται (επίσης AF) μετά την απόκτηση τεχνητής IRM. Η πρόταση για την παραπάνω διεργασία έγινε από τους Lowrie and Fuller (1971) και με αυτό τον τρόπο μπορούμε να εντοπίσουμε αν το δείγμα μας αποτελείται κυρίως από κόκκους μιας (SD) ή πολλών (MD) μαγνητικών περιοχών. Στην πρώτη περίπτωση εμφανίζεται η NRM σταθερότερη της IRM στο διάγραμμα που τις παραβάλλουμε ενώ στη δεύτερη το αντίθετο. Όταν οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν θεωρούμε ότι αποτελείται κυρίως από (PSD) κόκκους. Οι Xu and Dunlop (1995) and Jordanova et al. (1997) διατύπωσαν αργότερα την άποψη πως δεν είναι πλήρης αυτή η προσέγγιση και έκαναν την πρόταση να γίνεται η χρήση της σε συνδυασμό με τις καμπύλες υστέρησης, και μόνο όταν το κύριο μαγνητικό ορυκτό είναι ο μαγνητίτης.

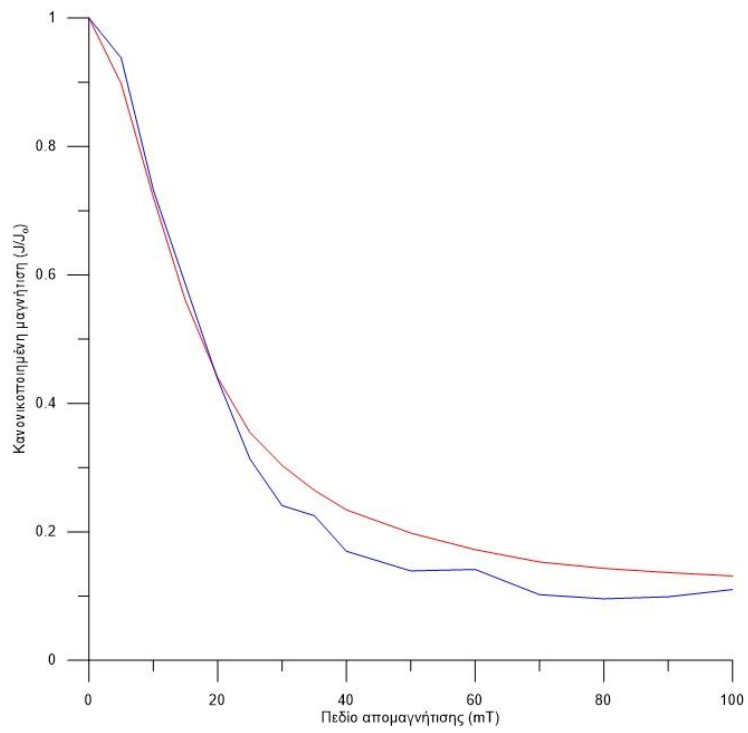
Παρακάτω παρατίθενται τα δείγματα που εξετάστηκαν από τον κάθε φούρνο(σχήμα 5.20, OSE-1 σχήμα 5.21 OSE-2) και τα διαγράμματα που προέκυψαν.

Με μπλε χρώμα παριστάνεται η AF απομαγνήτιση της NRM και με κόκκινο η AF απομαγνήτιση της εργαστηριακής IRM.

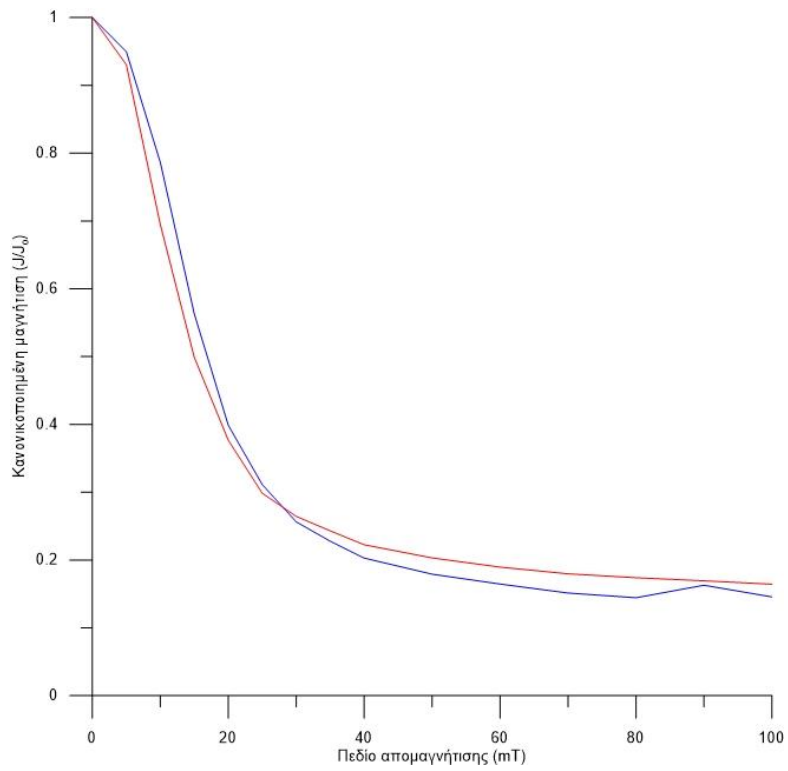
Αν η NRM είναι κάτω από την IRM έχουμε δείγμα κυρίως από MD κόκκους. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε SD κόκκους που αποτελούν σταθερότερο φορέα μαγνήτισης. Αν οι δύο καμπύλες τέμνονται και συμπίπτουν, έστω εν μέρει, έχουμε PSD κόκκους, επίσης κατάλληλους για τις μετρήσεις μας.



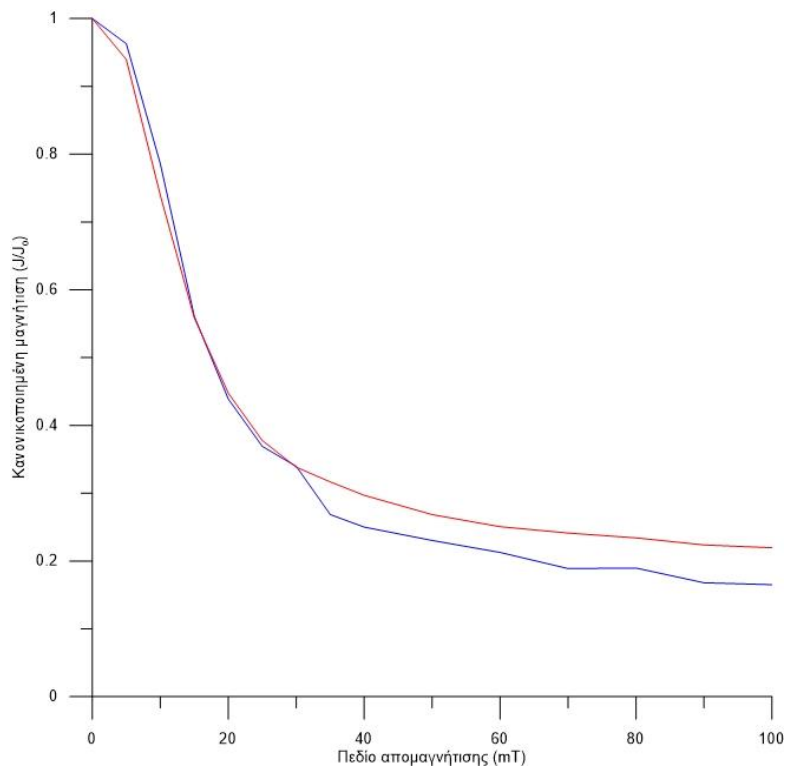
**OS1-5AB**



**OS1-9A**

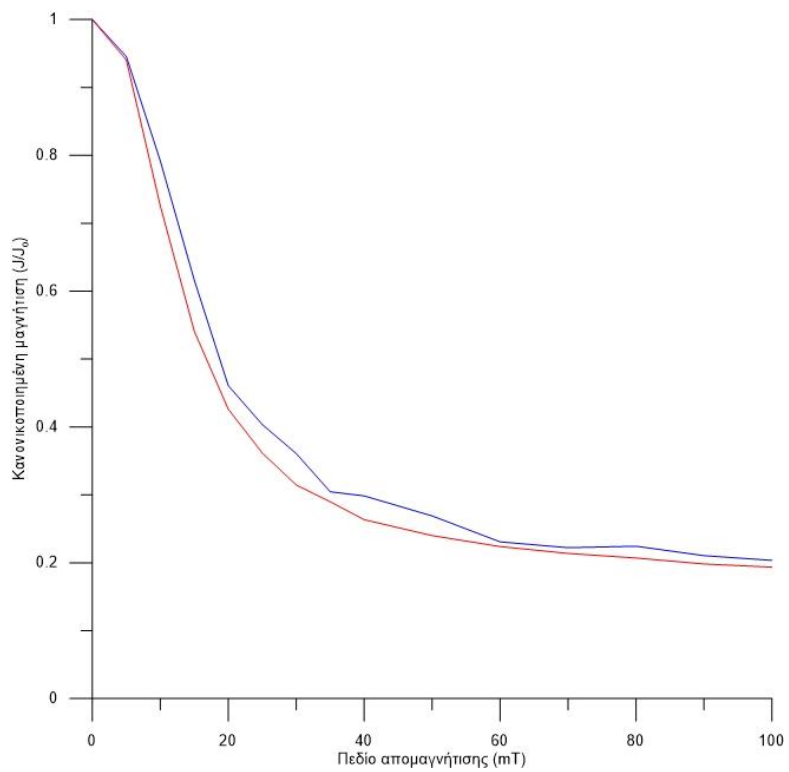


**OS1-10AK**

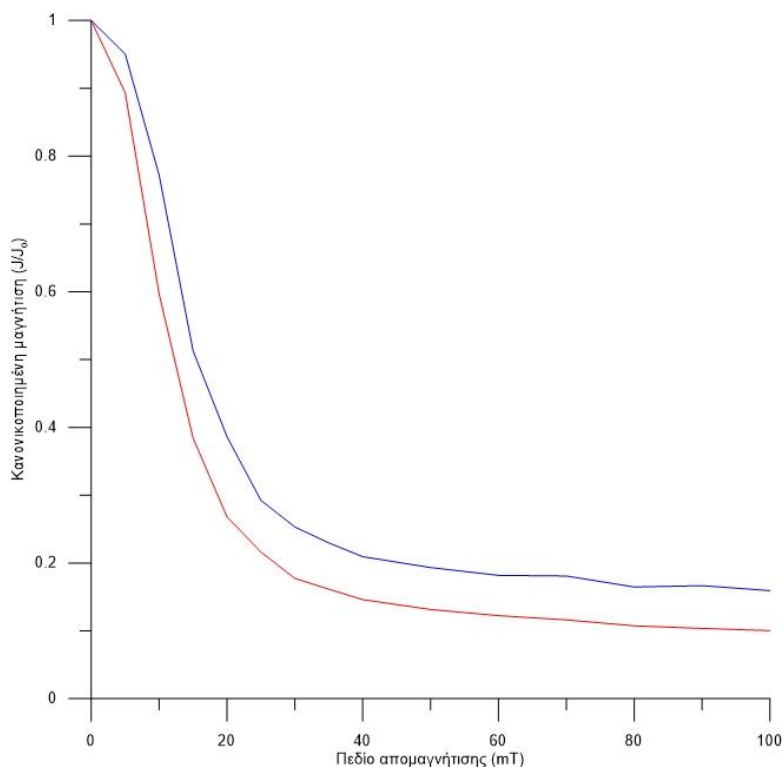


**OS1-16A2**

**Σχήμα 5.20.** Το L-F test για τα δείγματα από τον OSE-1



### OS2-5AB



### OS2-9B

**Σχήμα 5.21.** Το L-F test για τα δείγματα από τον OSE-2

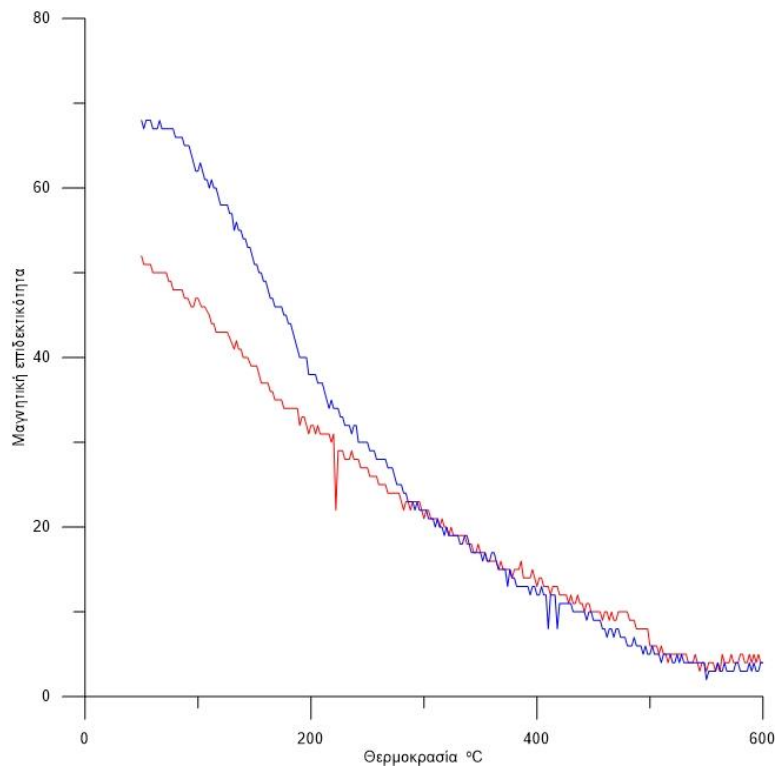
Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στον πρώτο κλίβανο υπάρχει μια εναλλαγή στη σχετική θέση μεταξύ των δυο καμπύλων κατά την πορεία της απομαγνήτισης σε διάφορα σημεία. Αυτό σημαίνει πως το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελείται από διαφόρων ειδών (περιοχών MD, SD, PSD) κόκκους. Αντίθετα στον δεύτερο βλέπουμε καθαρά πως η μπλε καμπύλη είναι πάνω από την κόκκινη, πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα δείγματα που ελήφθησαν από αυτόν αποτελούνται κυρίως από MD κόκκους. Διευκρινίζουμε εδώ πως αναφερόμαστε στο τι συμβαίνει με το σύνολο των μαγνητικών ορυκτών που βρίσκονται διασκορπισμένα στην κύρια μάζα του τμήματος που μελετάμε. Ωστόσο, και με δεδομένο ότι τα δείγματα μας εμφανίζουν στοιχεία παρουσίας σκληρών φάσεων όπως έδειξαν και οι καμπύλες IRM, πρέπει να αναζητήσουμε και άλλες πληροφορίες πριν καταλήξουμε σε τελικό συμπέρασμα. Αυτές εμφανίζονται παρακάτω.

### 5.5.3 Θερμομαγνητικές καμπύλες

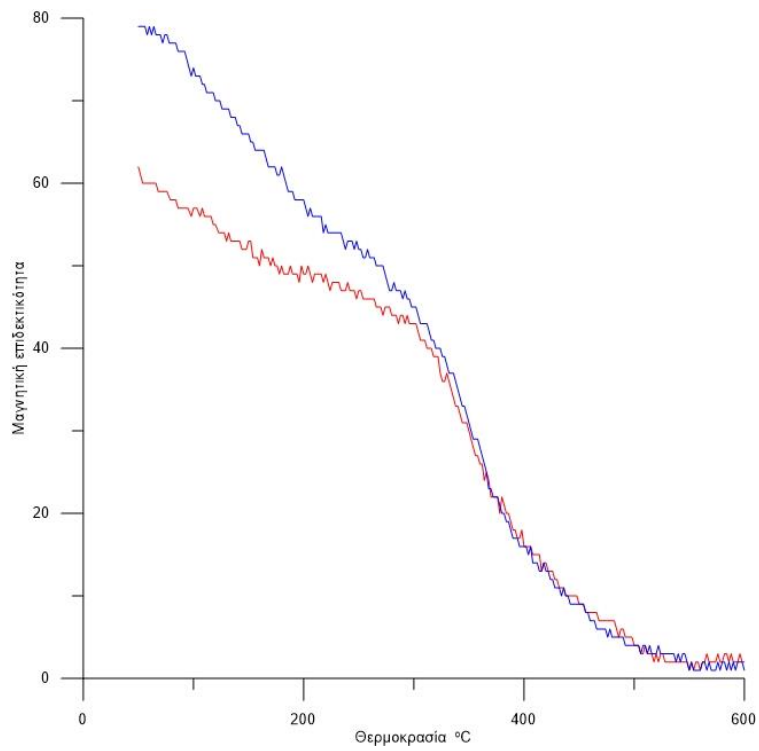
Έχει ήδη γίνει αναφορά στα προηγούμενα σχετικά με την εξέταση του τρόπου συμπεριφοράς της μαγνητικής επιδεκτικότητας ενός υλικού με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Σχηματίζονται έτσι οι θερμομαγνητικές καμπύλες που όπως γνωρίζουμε μια από τις χρήσεις τους είναι η αναγνώριση των κύριων σιδηρομαγνητικών ορυκτών που υπάρχουν στο δείγμα, εφόσον έτσι εντοπίζεται η θερμοκρασία Curie αυτών των ορυκτών. Η μελέτη αυτή γίνεται συνήθως μέχρι και τους 700° C. Με την παράθεση τώρα σε διάγραμμα της καμπύλης θέρμανσης με αυτήν της ψύξης για το ίδιο εύρος θερμοκρασιών λαμβάνουμε και άλλες σημαντικές πληροφορίες. Επιδιώκουμε να εντοπίσουμε σε αυτή τη περίπτωση το κατά πόσο είναι αντιστρέψιμη η διαδικασία θέρμανσης-ψύξης. Αν δηλαδή και κατά πόσο συμπίπτουν οι δύο αυτές καμπύλες και αν διαφέρουν, παρατηρούμε τα σημεία που συμβαίνει. Διαπιστώνουμε έτσι πότε συμβαίνουν χημικές μεταβολές και σε ποιες θερμοκρασίες, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε τι είδους μαγνητικά ορυκτά υπάρχουν μέσα στο δείγμα και ποια νέα σχηματίζονται, όταν βέβαια αυτά παρουσιάζονται.

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα η παραμένουσα μαγνήτιση εκδηλώνεται σε ένα διάστημα θερμοκρασιών φραγμού, πράγμα που εξαρτάται από τις διαφορετικές ιδιότητες των φορέων της μαγνήτισης. Αν η θερμοκρασία φραγμού είναι περίπου ίδια με τη θερμοκρασία Curie τότε η θερμοπαραμένουσα θα χαθεί και θα επανακτηθεί σε ένα στενό θερμοκρασιακό διάστημα ακριβώς κάτω από το σημείο Curie. Η πρώτη καμπύλη, δηλαδή αυτή που λαμβάνεται με τη θέρμανση, μας δίνει τις θερμοκρασίες φραγμού των ορυκτών που βρίσκονται αρχικά στο δείγμα, ενώ η δεύτερη της ψύξης μας δίνει τις θερμοκρασίες φραγμού των ορυκτών που τυχόν προέκυψαν με τη θέρμανση. Με αυτόν τον τρόπο ανιχνεύονται και τα νέα ορυκτά (σχήμα 5.22 για OSE-1, σχήμα 5.23 για OSE-2).

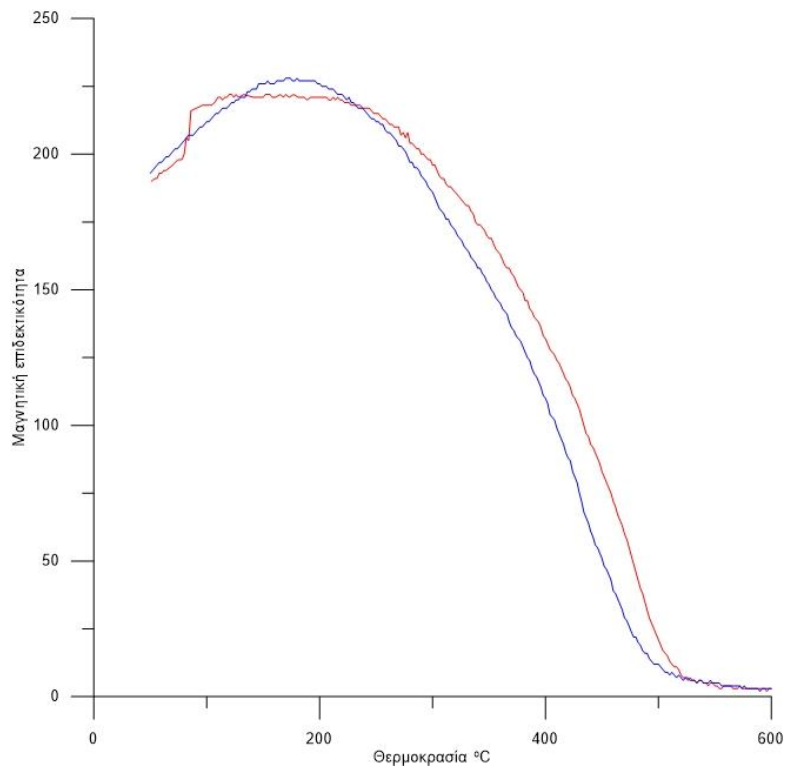
Σε κάθε περίπτωση η κόκκινη καμπύλη είναι αυτή που μας δείχνει το πως μεταβάλλεται η επιδεκτικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία κατά την θέρμανση του δείγματος μέχρι το σημείο που αυτή μηδενίζεται, ενώ η μπλε καμπύλη αντίστροφα, προκύπτει ψύχοντας το υλικό από τη ανωτέρω θερμοκρασία μέχρι εκείνη του περιβάλλοντος. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάσαμε η επιδεκτικότητα δεν μηδενίζεται τελείως στους 580° C, και αυτό συνηγορεί στην ύπαρξη μιας σκληρής συνιστώσας.



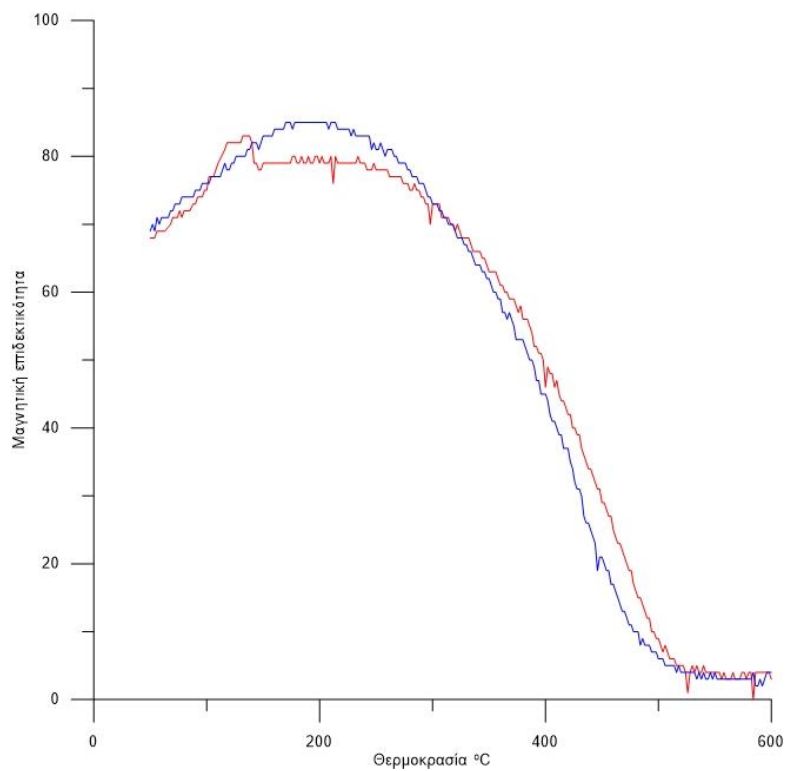
**OS1- 6**



**OS1- 9**



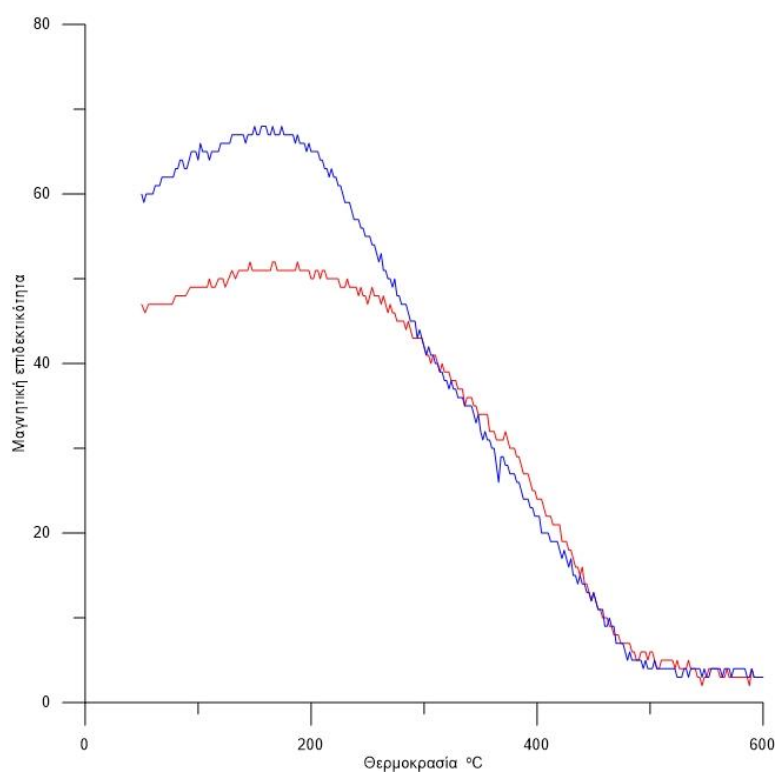
**OSE1-10**



**OSE1-16**

**Σχήμα 5.22.** Θερμομαγνητικές καμπύλες σε δείγματα του κλιβάνου OSE-1





### OSE2-10

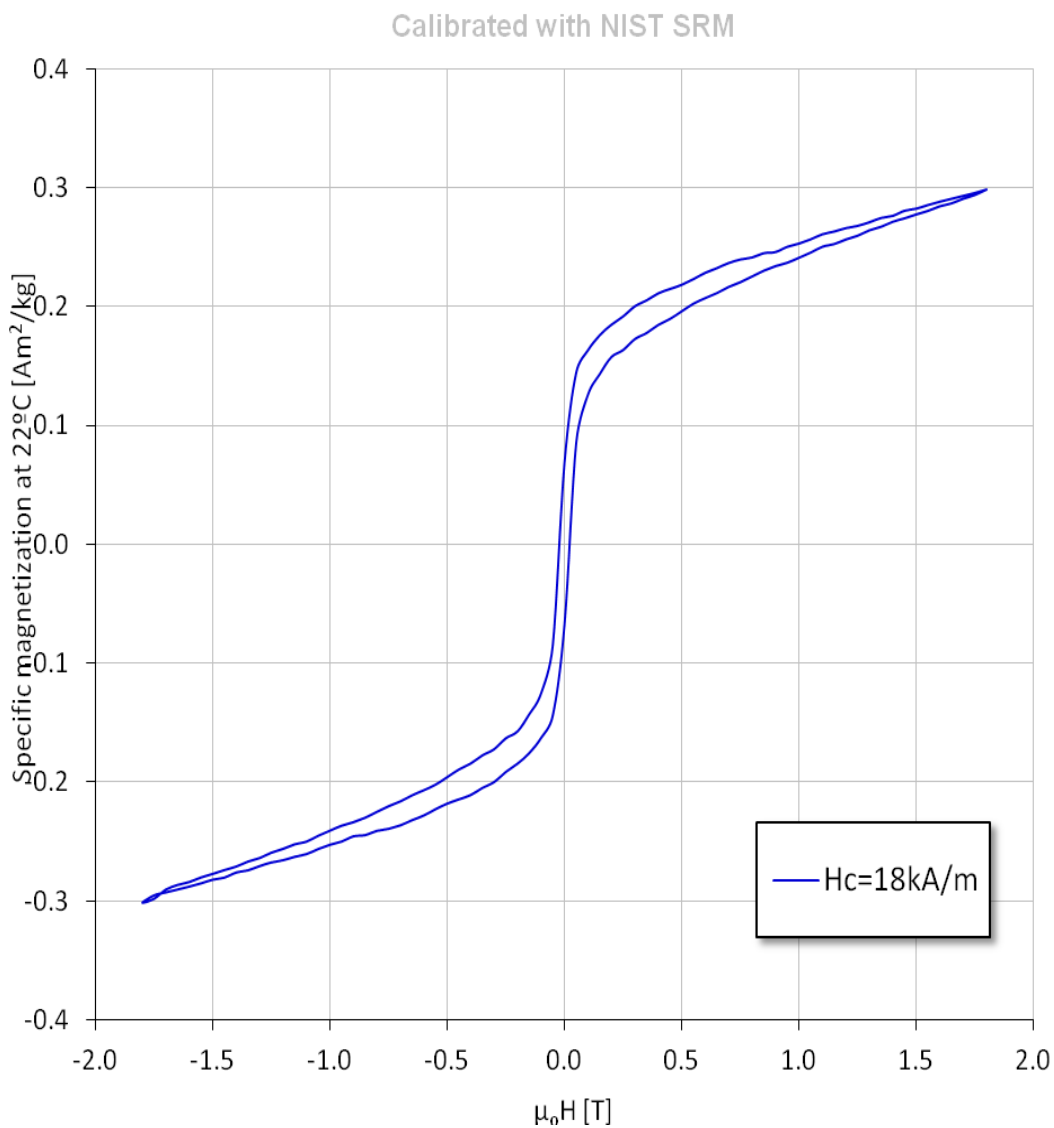
**Σχήμα 5.23.** Θερμομαγνητική καμπύλη σε δείγμα του κλιβάνου OSE-2

Από τα παραπάνω διαγράμματα και εξετάζοντας τις σχετικές θέσεις των καμπυλών θέρμανσης- ψύξης συμπεραίνουμε ότι δεν έχουμε αξιόλογη μεταβολή στην ορυκτολογία του υλικού κατά την θέρμανση του. Στα δείγματα 6 και 9 του OSE-1 και στο 10 του OSE-2 παρατηρείται μια διαφοροποίηση κάτω από τους 300 ° C περίπου. Αυτό θα μπορούσε να ερμηνευθεί με την πιθανή παρουσία στο υλικό κόκκων SD, που ήταν αδρανείς στην αρχική μορφή του υλικού αλλά δραστηριοποιούνται μετά την θέρμανση του σε θερμοκρασία Curie.

#### 5.5.4 Καμπύλες υστέρησης.

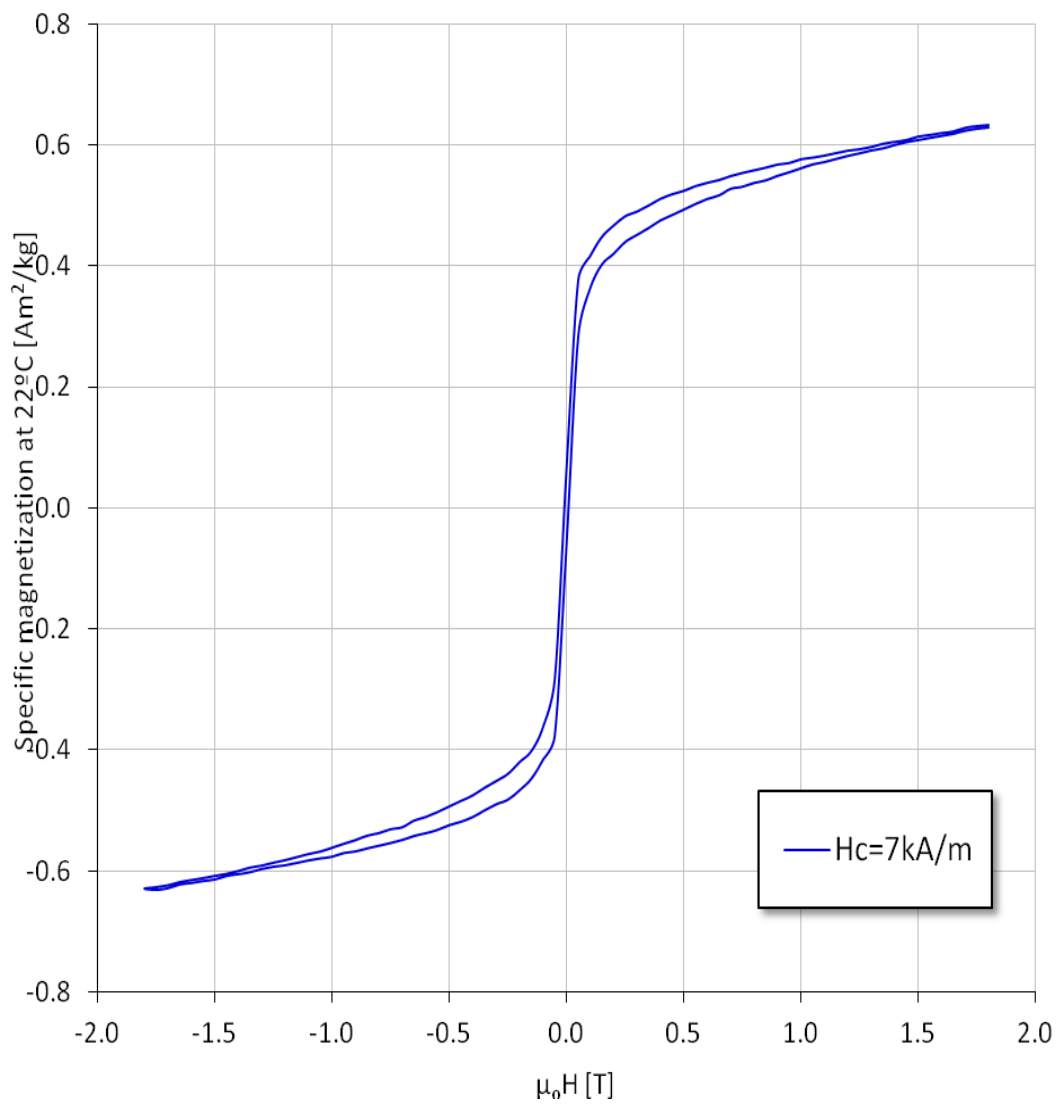
Σε τρία από τα τέσσερα δείγματα που μελετήθηκαν με το ανωτέρω πείραμα, δηλ. τα OSE1-09,10,16 (σχήμα 5.24) και στο OSE2-09 (σχήμα 5.25) πραγματοποιήθηκαν καταγραφές καμπυλών υστέρησης.

Οι βρόχοι υστέρησης που αποκτήθηκαν παρατίθενται στα κάτωθι σχήματα.

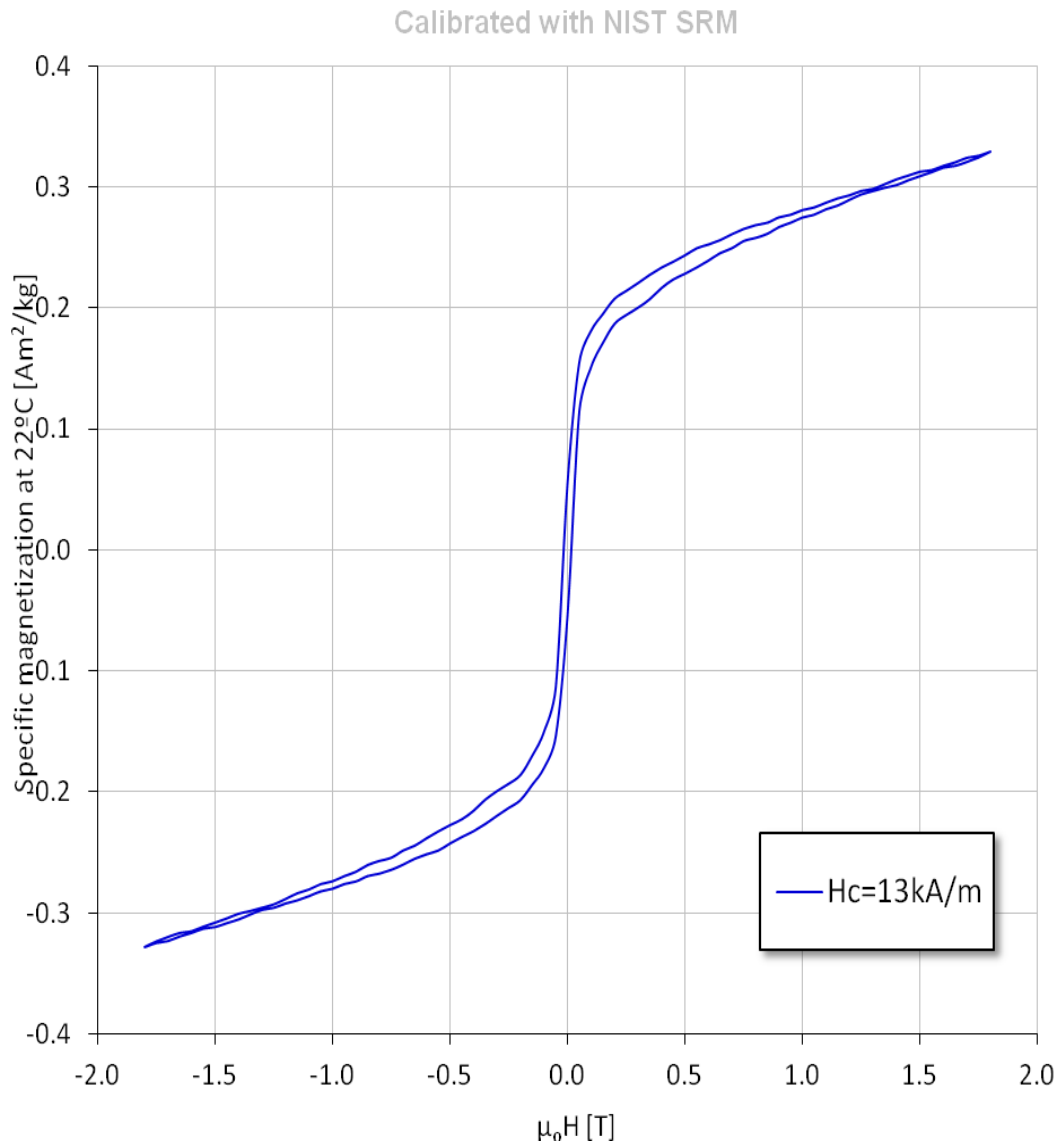


**OSE1-09**

Calibrated with NIST SRM

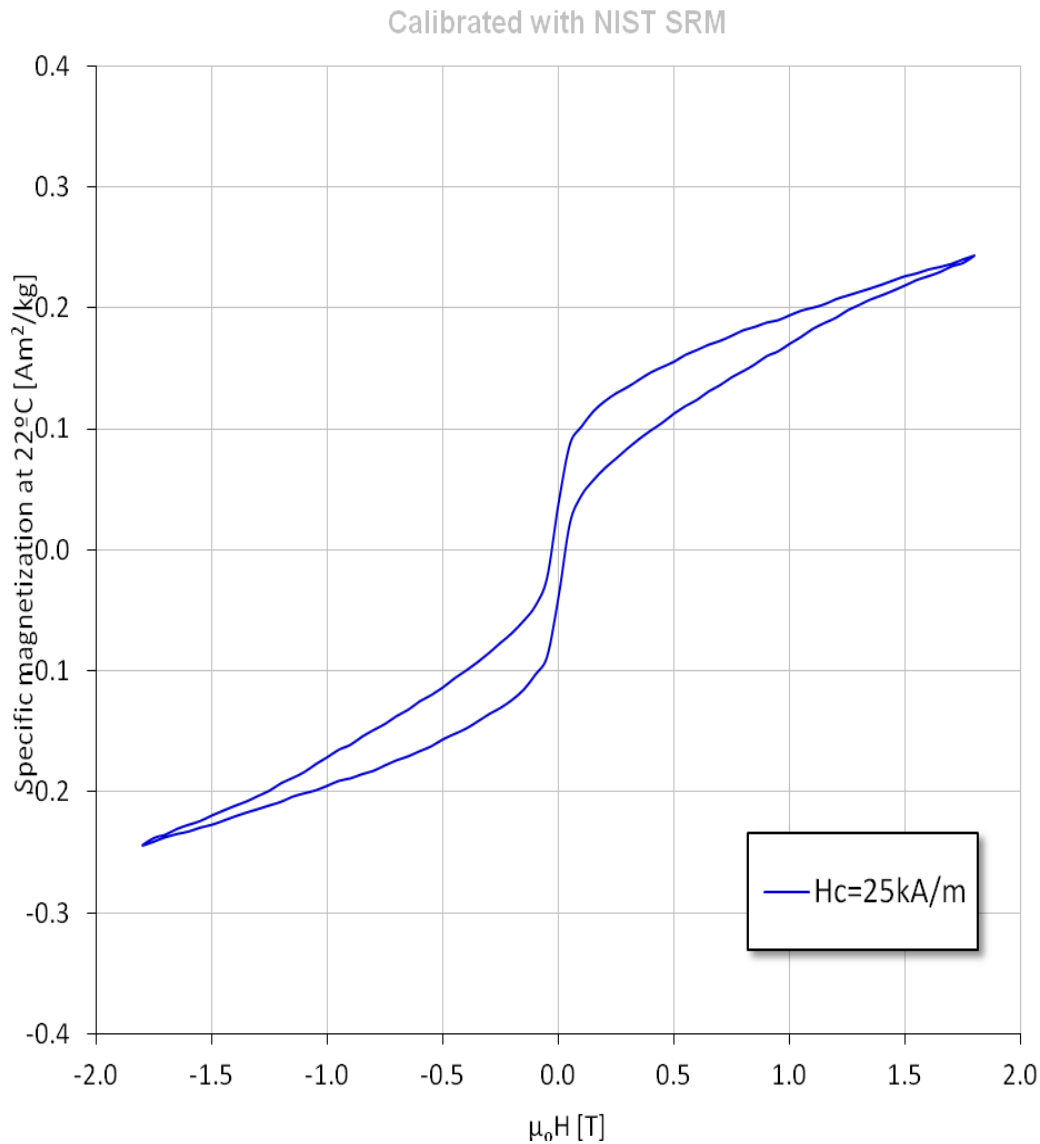


**OSE1-10A**



**OSE1-16A**

**Σχήμα 5.24.** Βρόχοι υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού του κλιβάνου OSE-1



**OSE2-09**

**Σχήμα 5.25.** Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού του κλιβάνου OSE-2

Από τις καταγραφές των βρόχων υστέρησης σε όλα τα ανωτέρω δείγματα, συμπεραίνουμε την ύπαρξη μαλακού μαγνητικού υλικού μέσα στη δομή τους. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούμε μικρές τιμές συνεκτικού πεδίου (διαφοροποιείται κάπως σχετικά με το σύνολο η σύσταση του δείγματος OSE2-09 δηλ. στον δεύτερο κλίβανο). Τα σχήματα των καμπύλων υστέρησης εξαρτώνται από το είδος των σιδηρομαγνητικών ορυκτών και το είδος των κόκκων. Η μορφή τους στην περίπτωση μας, φανερώνει την ύπαρξη μαγνητίτη και την παρουσία SD έως και PSD κόκκων.

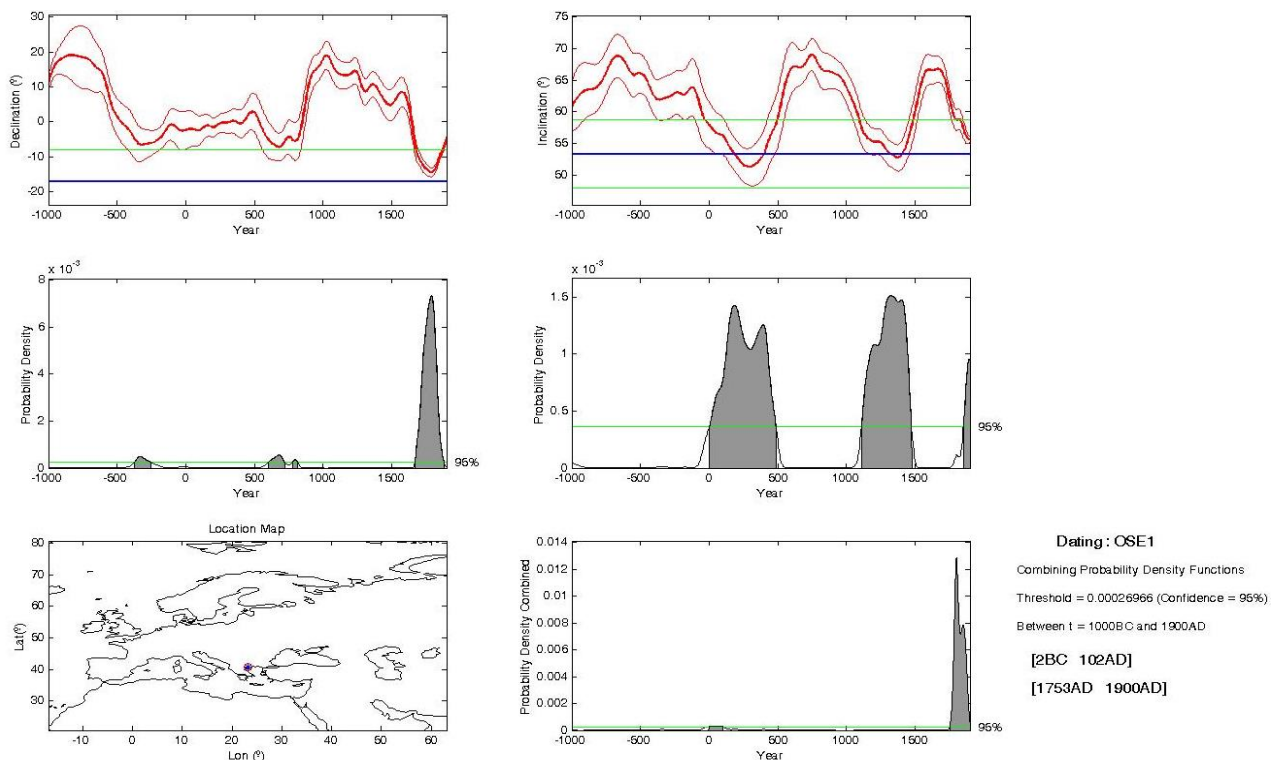
Επομένως το υλικό και ιδιαίτερα στην περίπτωση του κλιβάνου OSE-1 φαίνεται ότι μπορεί να ληφθεί ως κατάλληλο για αρχαιομαγνητική έρευνα.

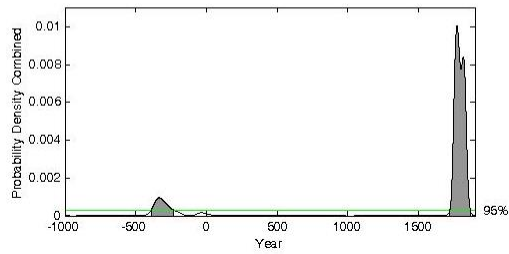
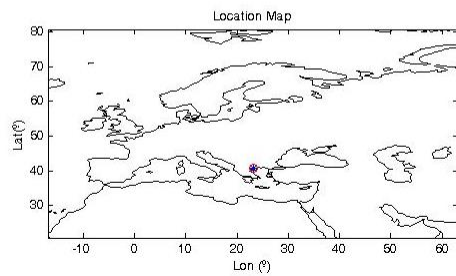
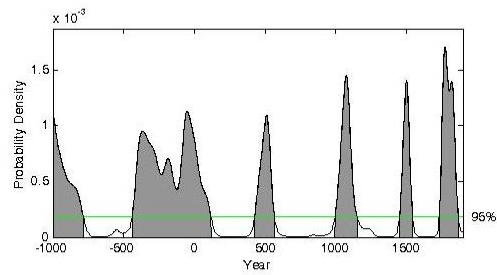
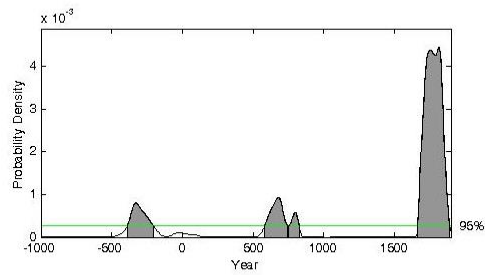
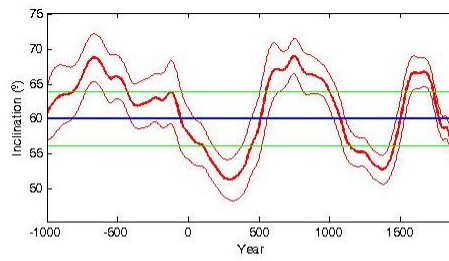
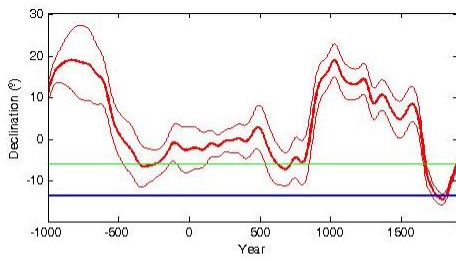
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΒΑΝΩΝ OSE-1 ΚΑΙ OSE-2

Με την μελέτη των αρχαιομαγνητικών διευθύνσεων των OSE-1 και OSE-2 διαπιστώνουμε ότι σε κάθε κλίβανο έχουμε καλό βαθμό σύμπτωσης, των μέσων τιμών των διευθύνσεων αυτών. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα είναι δυνατή η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση τους με τη χρήση του προγράμματος ‘Archeo-dating’ των Pavon- Carrasco et al, 2011.

Για την συγκεκριμένη χρονολόγηση των δύο κλιβάνων χρησιμοποιήθηκαν οι πρότυπες καμπύλες για την έγκλιση και την απόκλιση όπως αυτές προκύπτουν τόσο από τοπικά μοντέλα (SCHA.DIF.3K) όσο και από παγκόσμια (ARCH3K). Η χρονολόγηση πραγματοποιήθηκε για τον κάθε κλίβανο χωριστά για να διερευνηθεί τυχόν διαφοροποίηση στην χρονολόγηση της τελευταίας χρήσης τους ενώ στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε και για την μέση τιμή των κλιβάνων θεωρώντας ότι ήταν σύγχρονοι στην λειτουργία τους όπως αυτό προκύπτει από τις αρχαιολογικές πληροφορίες. Με την εφαρμογή και των δύο μοντέλων προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα τα οποία και παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

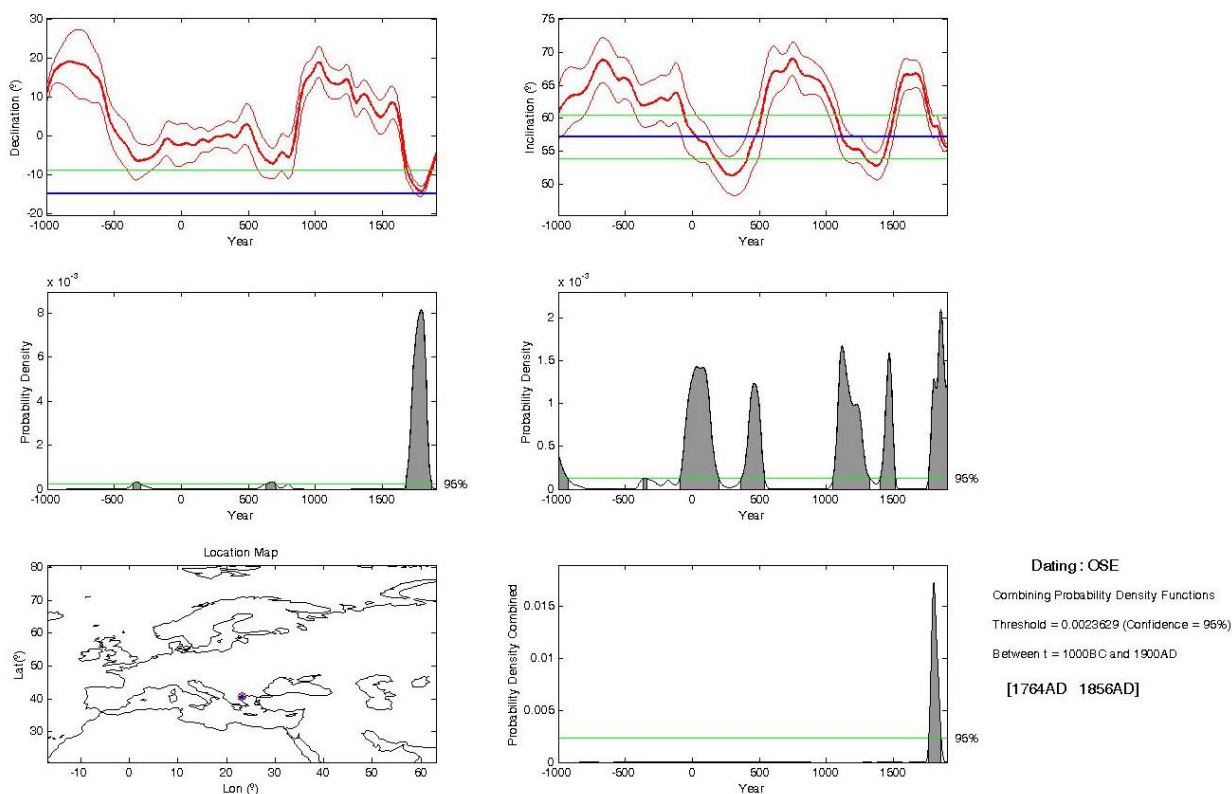




Dating : OSE2  
 Combining Probability Density Functions  
 Threshold = 0.00031109 (Confidence = 96%)  
 Between t = 1000BC and 1900AD  
 [389BC 234BC]  
 [1723AD 1867AD]

Με τις ξεχωριστές διαδικασίες χρονολόγησης για τους ανωτέρω κλιβάνους του ΟΣΕ παρατηρείται μια, σε μεγάλο βαθμό σύμπτωση, των δύο ηλικιών που προσδιορίζονται για τον κάθε ένα, πράγμα που φανερώνει την πιθανή λειτουργία τους την ίδια περίπου εποχή.





## ΤΕΛΙΚΗ ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ

<b>OSE-1</b>	<b>1753 AD-1900 AD</b>
<b>OSE-2</b>	<b>1723 AD-1867 AD</b>
<b>OSE1+2</b>	<b>1764 AD-1856 AD</b>

Σε κάθε περίπτωση παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των χρονολογήσεων απέχουν κατά πολύ από τις εκτιμήσεις (Ρωμαϊκή εποχή) που είχαν υποθέσει αρχικά οι αρχαιολόγοι. Η μεγάλη αυτή διαφορά μεταξύ των ηλικιών που προσδιόρισαν οι αρχαιολόγοι και της τελευταίας καύσης των δομών (καθώς και της θερμοφωταύγειας) συμβάλει στο να γίνει αποδεκτή ευρύτερα η αρχαιομαγνητική μέθοδος χρονολόγησης από την αρχαιολογική κοινότητα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι δύο κλίβανοι που εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία (OSE-1, OSE-2), περικλείουν στη μάζα τους υλικό (μαγνητικά οξείδια) σε τέτοια ποσότητα ώστε να είναι δυνατή η ακριβής καταγραφή του αρχαιομαγνητικού πεδίου. Τα πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας που έγιναν δείχνουν την παρουσία SD-PSD κόκκων έστω και σε μικρή ποσότητα άρα αποδεικνύουν την ικανότητα αποτύπωσης του πεδίου. Οι θερμομαγνητικές καμπύλες έδειξαν ικανοποιητική σταθερότητα κατά τη διαδικασία θέρμανσης-ψύξης άρα δεν παρατηρείται μεγάλη αλλοίωση του υλικού αυτού. Διαπιστώνεται όμως και η παρουσία MD κόκκων η διαφορετικά σκληρού υλικού όπως φαίνεται από τις με εναλλασσόμενο πεδίο απομαγνητίσεις κατά περιπτώσεις. Τελικά και μετά την τελευταία επαρκή θέρμανση και ψύξη αποτυπώνεται στον κάθε κλίβανο η σταθερή μαγνήτιση που εντοπίζεται για την χρονολόγηση του.

Κατά τη διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητο να απορριφθεί ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων ειδικά στον κλίβανο OSE-1. Ο λόγος που συνέβη αυτό δεν ήταν η απουσία μαγνήτισης των δειγμάτων που προήλθαν από τα τεμάχια των κλιβάνων, αλλά η ασυμβατότητα με το σύνολο ικανού αριθμού διευθύνσεων που μετρήθηκαν. Σε αυτή τη περίπτωση δυο είναι οι πιθανές ερμηνείες που δίνονται:

α) Ένα μέρος από τα υλικά που αποτελούν τον κλίβανο (τούβλα-κεραμίδες) πιθανόν να έχουν μετακινηθεί σε σχέση με τις αρχικές τους θέσεις και κατόπιν της τελευταίας καύσης τους, οπότε και οι μετρήσεις των διευθύνσεων που λαμβάνονται σε αυτή τη περίπτωση κατανέμονται τυχαία στο χώρο και δεν συνεισφέρουν στους υπολογισμούς (πρέπει να αποκλειστούν). Υπάρχει επίσης και το ενδεχόμενο της μεταγενέστερης αντικατάστασης κάποιων τεμαχίων η πλίνθων του κλιβάνου με το ίδιες τελικά συνέπειες .

β) Ένας άλλος λόγος όπως έχει προαναφερθεί και κατά την μέτρηση της NRM, είναι η σημασία της σχετικής θέσης λήψης του δείγματος ως προς τον θάλαμο καύσης. Εξωτερικά και απομακρυσμένα τμήματα είναι δυνατόν να μην έχουν θερμανθεί επαρκώς κατά την τελευταία καύση και να μην είναι ικανά για αυτό το λόγο να καταγράψουν την αρχαιοδιεύθυνση του πεδίου της εποχής.

Μετά την στατιστική επεξεργασία με τη βοήθεια του προγράμματος Remasoft και ενώ προηγουμένως είχαν απομακρυνθεί οι αποκλίνουσες διευθύνσεις στους δυο κλιβάνους, προέκυψαν οι μέσοι όροι που ελήφθησαν για την αρχαιομαγνητική χρονολόγηση. Οι πρότυπες καμπύλες αναφοράς απόκλισης και έγκλισης που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη χρονολόγηση είναι οι (SCHA.DIF.3K) από τα τοπικά μοντέλα καθώς και οι (ARCH3K) από τα παγκόσμια.

Οι ηλικίες που υπολογίζονται τελικά και λαμβάνοντας υπ όψιν το εύρος σφάλματος, εμφανίζονται σε καλή συμφωνία με αυτές που προέκυψαν από τη χρονολόγηση των τριών δειγμάτων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας (δύο για τον OSE-1 και ένα για τον OSE-2).

Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, αρχαιομαγνητισμού και θερμοφωταύγειας, απομακρύνει κατά πολύ τον χρόνο της τελευταίας χρήσης των κλιβάνων από αυτόν που είχε αρχικά θεωρηθεί ως πιθανός από τους αρχαιολόγους, δηλαδή τους υστερο- ρωμαϊκούς χρόνους. Τοποθετείται μάλιστα σε αρκετά μεταγενέστερη εποχή σε σχέση και με τον κλίβανο RS1 που βρέθηκε σε κοντινό σημείο της περιοχής τους και χρονολογήθηκε αρχαιομαγνητικά μεταξύ 410-880 AD (Aidona et al 2010).

Ωστόσο, νεώτερες αρχαιολογικές έρευνες τοποθετούν και αυτό το κλίβανο στο επόμενο διάστημα της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης της ανωτέρω εργασίας δηλαδή 1445-1950 AD (Raptis,2015).

Η εποχή της τελευταίας καύσης για τους δυο κλιβάνους OSE υπολογίζεται ότι βρίσκεται τουλάχιστον σε ύστερο-βυζαντινούς χρόνους Σύμφωνα με πρόσφατες αρχαιολογικές πληροφορίες (Λ. Αχειλαρά, προφορική επικοινωνία) η πιο πιθανή ηλικία στην οποία φαίνεται να τελείωσε η λειτουργία των κλιβάνων αυτών είναι ο 17<sup>ος</sup> -18<sup>ος</sup> αιώνας μΧ.

Από τα ανωτέρω φαίνεται ότι το σύνολο των κλιβάνων παραγωγής οικοδομικού υλικού στον Δυτικό τομέα της Θεσσαλονίκης που εμφανίζουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά και μελετήθηκαν αρχαιομαγνητικά, λειτούργησαν στους Οθωμανικούς χρόνους, μετά τον 12<sup>ο</sup>-13 αιώνα μ.Χ.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία αποτελέσματα της αρχαιομαγνητικής έρευνας στις ανασκαφές για την κατασκευή του μετρό στον νέο σιδηροδρομικό σταθμό Θεσσαλονίκης, και σε συνδυασμό με αυτά που αποκτήθηκαν από την προηγούμενη ομάδα κλιβάνων, (Aidona et al 2010) επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα των πηλών της ευρύτερης περιοχής, για αρχαιομαγνητική μελέτη. Η συνεισφορά της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την χρονολόγηση των δομών που εξετάστηκαν είναι εμφανής.

Με την πραγματοποίηση μετρήσεων αρχαιοέντασης στα ανωτέρω δείγματα σε επόμενο στάδιο, είναι πιθανός ο περιορισμός του σφάλματος και ο ακριβέστερος προσδιορισμός της ηλικίας, ώστε να είναι πλήρης η συνεισφορά της μεθόδου στην αρχαιολογική κοινότητα.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω καθώς και συμπληρωματικών χρονολογήσεων με φωταύγεια, αναμένεται ως επιτυχές αποτέλεσμα, η τελική σύγκλιση των δυο μεθόδων, όπως έχει ήδη συμβεί σε αντίστοιχες προηγούμενες μελέτες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrahamsen N., Jacobsen U., Mejdahl V. & Mejdahl U., Magnetic investigations and dating of a brick kiln at Veldbaek near Esbjerg, Denmark.
- Aidona E., Kondopoulou D., Alexandrou M. & Ioannidis N., Archaeomagnetic studies in kilns from N. Greece, 12<sup>th</sup> International Congress of the Geological Society of Greece, Vol. 4, 2010.
- Butler R. F., Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes, electronic edition, 2004.
- Butler & Banerjee, Single-domain grain size limits for metallic iron, J. Geophys. Res., v. 80, 4049-4058, 1975
- Chapman S. and Bartels J., 1940, 1962. Geomagnetism, Volumes 1 and 2, 1940; 2<sup>nd</sup> Edition, 1962. Oxford University Press, Oxford, 1049pp.
- Collinson D. W., Methods in rock magnetism and Paleomagnetism, Chapman and Hall, London, 1983.
- De Marco E., Ολοκληρωμένες μαγνητικές και αρχαιομαγνητικές μετρήσεις σε αρχαιολογικούς χώρους: Συμβολή στις καμπύλες αναφοράς για τον Ελληνικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Εργ. Γεωφυσικής Α.Π.Θ., 2007.
- Dunlop, D.J. The rock magnetism of fine particles. Phys. Earth Planet. Int., v. 26, 1-26, 1981.
- Evans M. E., Recent archaeomagnetic investigations in Greece and their geophysical significance, Proc. 2<sup>nd</sup> Conference of Hellenic Geophysical Society, 5-7 May, Florina, Greece, 1994.
- Goff M., Gallet Y., Genevey A. & Warme N., On archaeomagnetic secular variation curves and archaeomagnetic dating, Phys. Earth Planet, 2002.
- Hongre, L., G. Hulot, and A. Khokhlov, An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years, Phys. Earth Planet. Inter., 160, 311– 335, 1998.
- Jordanova, N., Petrovsky, E., Kovacheva, M., 1997. Preliminary rock magnetic study of archaeomagnetic samples from Bulgarian sites of BC time. J. Geomagn. Geoelectricity, 49, 543-566.
- Jordanova, N., Petrovsky, E., Kovacheva, M., Jordanova D., 2001. Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites. J. Archaeol. Sci., 28, 1137-1148.

- Korte, M., and Constable, C.G., 2005. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6 (2), doi: 10.1029/2004GC000801.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0-3 ka : 2. Revised global time-varying models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06008, doi:10.1029/2008GC002297.
- Lanos, Ph., Le Goff, M., Kovacheva, M., Schepp, E., 2005. Hierarchical modelling of archaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique. *Geophys. J. Int.*, 160, 440-476.
- Lowrie W. & Fuller M., 1971. On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanent magnetization in magnetite, *J. Geophys. Res.*, 76, 26 6339-26 6349.
- McElhinny M. W. & McFadden P. L., *Paleomagnetism: Continents and Oceans*, Academic Press, 2000.
- Merrill R. T., McElhinny, M.W., and McFadden, P.L., 1996. *The magnetic field of the Earth: Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*. Academic Press, San Diego, 531pp.
- Needham J., 1962. *Science and Civilization in China, Vol. 4, Physics and Physical Technology, Part 1. Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pavon-Carrasco, F.J., Rodriguezgonzalez, J., Osete, M.L. and Torta, J.M. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* (2011).
- Raptis K.,T (2015) Brick and tile producing workshops in the outskirts of Thessaloniki from fifth to fifteenth century: a study of the firing technology that has been diachronically applied in the ceramic workshops of a large Byzantine urban center. *Proceedings of Xth CICM2,22-27/10/2012 ,Silves,Portugal* (in press).
- Smith P. J., 1970a. Petrus Peregrinus Epistola: The beginning of experimental studies of magnetism in Europe. *Atlas (News Suppl. To Earth Science review)*, 6, A11-A17.
- Tarling D. H., Kontopoulou D., & Spatharas V., An archaeomagnetic study of the LM IB kilns. In: Soles J. S., Davaras C. (Eds.), *Mochlos IC-Period III. Neopalatial Settlement on the Coast: The Artisans' Quarter and the Farmhouse at Chalinomouri. The small finds*. Prehistory Monographs 9, INSTAP Academic Press, Philadelphia, Pennsylvania, 2004.
- Tauxe L., *Lectures in Paleomagnetism*, Citation and home page: <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>, 2005.
- Tauxe L., *Paleomagnetic principles and practice*, Kluwer Academic Publishers, Boston,

Massachusetts, 1998.

Tauxe L., Paleomagnetic principles and practice. Kluwer Academic Publishers, 2003.

Thompson R. & Oldfield F., Environmental Magnetism, London: George Allen & Unwin, 1986.

Xu, S., and D. J. Dunlop Toward a better understanding of the Lowrie-Fuller test, J. Geophys. (1995).

Zijderveld J. D. A., AC demagnetization of rocks: analysis of results. In: Collinson D. W., Creer K. M., Runcorn S. K. (Eds.), Methods in Paleomagnetism, Developments in Solid Earth Geophysics, Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, 1967.

Οικονόμου Ν. Α., Γενική Φυσική ΙΙ, Εκδόσεις Γιαχούδη, 1980.

Παπαζάχος Κ., Παπαζάχος Β., Εισαγωγή στη Γεωφυσική, Εκδόσεις Ζήτη, Νοέμβριος 2008.

## Ιστοσελίδες

[www.ascscientific.com](http://www.ascscientific.com)

[http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/services.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/services.html)

<http://physiclessons.blogspot.gr/2013/04/>

<https://el.wikipedia.org/wiki>

<http://docplayer.gr/163606-Aristoteleio-panepistimio-thessalonikis>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ NRM OSE -1

ΔΕΙΓΜΑ	Mag(A/ m)	D(°)	I (°)	a95
OS1-6B	1.52	336.3	29.6	1.6
OS1-18B	0.239	12.7	66.5	2.0
OS1-10A1	5.36	47.4	14.4	1.9
OS1-10A2	4.65	50.5	18.0	2.6
OS1-10B1	4.49	47.5	13.8	3.2
OS1-10B2	4.58	57.3	16.4	3.7
OS1-10C1	5.0	54.2	10.3	2.3
OS1-10C2	4.3	49.6	15.7	2.7
OS1-10D1	5.34	31.4	28.9	2.3
OS1-10D2	5.32	34.0	32.9	2.7
OS1-10E1	4.06	37.0	31.1	2.8
OS1-10E2	4.71	32.4	29.1	2.2
OS1-10F1	4.34	39.4	33.7	3.8
OS1-10F2	4.52	42.2	29.4	1.6
OS1-10G1	4.74	5.2	50.1	2.7
OS1-10G2	4.7	2.2	47.2	3.3



OS1-10H1	5.51	27.5	46.5	2.1
OS1-10H2	4.34	29.2	43.8	2.4
OS1-10I1	6.08	11.1	44.4	1.3
OS1-10I2	4.62	21.4	42.1	3.5
OS1-10J1	6.43	29.9	49.2	2.5
OS1-10J2	5.77	10.6	49.3	2.7
OS1-10K1	6.27	27.3	50.9	2.1
OS1-10K2	5.75	25.0	49.8	2.8
OS1-11A1	8.17	221.4	52.5	1.9
OS1-11A2	9.64	218.4	57.0	1.7
OS1-11B1	7.28	346.5	47.1	2.2
OS1-11B2	7.11	347.9	46.6	2.9
OS1-11C1	9.16	329.2	50.3	2.0
OS1-11C2	7.96	333.2	51.1	2.0
OS1-11D1	8.37	2.0	46.6	1.7
OS1-11D2	8.9	1.5	45.2	2.4
OS1-11E1	8.03	330.7	48.1	2.4
OS1-11E2	8.78	331.8	46.1	2.3
OS1-11F1	7.98	301.1	44.8	2.3
OS1-11F2	6.63	304.4	45.7	2.6
OS1-11G1	8.79	307.6	38.6	2.0
OS1-11G2	8.86	305.8	38.0	2.4
OS1-11H1	6.27	310.5	44.9	3.0
OS1-11H2	6.64	317.7	42.9	2.6
OS1-11I1	6.72	308.5	41.0	2.1
OS1-11I2	7.07	305.6	39.0	2.7
OS1-11J1	7.19	298.6	34.1	1.9
OS1-11J2	7.44	302.1	39.0	2.7
OS1-11K1	7.71	302.9	36.8	1.8
OS1-11K2	8.32	307.4	41.3	2.6
OS1-12A	1.55	3.5	45.6	2.3
OS1-12B	1.95	3.6	43.5	2.8

OS1-12C	1.75	349.1	14.4	3.0
OS1-12D	1.6	345.8	16.5	3.2
OS1-12E	1.66	347.7	11.5	3.4
OS1-13B	4.14	12.2	53.9	2.7
OS1-13C	1.36	14.5	46.9	2.9
OS1-13D	1.98	192.0	59.5	2.4
OS1-13E	0.965	11.1	53.4	1.3
OS1-13F	2.03	5.2	46.1	2.1
OS1-13G	0.571	12.5	42.7	2.5
OS1-14B1	0.641	24.0	69.4	1.7
OS1-14B2	3.08	169.7	51.4	2.7
OS1-14C	0.171	29.7	82.1	2.3
OS1-14D	0.145	172.7	82.9	2.6
OS1-14E	6.03	164.7	51.3	3.8
OS1-16A1	6.28	341.2	51.7	1.4
OS1-16A2	6.64	350.2	49.1	2.2
OS1-16B1	4.51	329.2	50.5	2.5
OS1-16B2	5.19	329.3	53.7	2.2
OS1-16C1	3.26	260.6	50.0	1.6
OS1-16C2	3.37	260.2	49.9	2.1
OS1-16D1	6.43	324.6	49.3	1.2
OS1-16D2	6.48	332.8	48.6	1.1
OS1-16E1	5.94	339.7	53.1	2.0
OS1-16E2	6.38	338.9	47.6	1.7
OS1-16F1	5.7	330.4	51.1	2.5
OS1-16F2	5.72	330.3	49.8	2.3
OS1-16G1	7.92	323.1	52.6	2.0
OS1-16G2	7.49	320.5	49.6	2.0
OS1-18A	0.656	27.8	71.7	2.1
OS1-18BA	0.79	12.6	53.0	2.2
OS1-18BB	0.683	4.4	57.4	2.1
OS1-18BC	0.389	9.6	58.2	2.8

OS1-18C	0.575	3.7	60.6	2.5
OS1-18E	1.26	351.1	66.1	1.9
OS1-19A	0.451	4.5	59.6	2.2
OS1-19B	0.395	7.1	57.7	2.9
OS1-19BA	0.361	33.1	41.9	1.3
OS1-19BB	0.31	32.2	48.9	2.7
OS1-19BC	0.269	32.7	47.2	2.6
OS1-19BD	0.206	28.5	41.9	3.0
OS1-19BE	0.194	3.2	48.0	1.9
OS1-19C	0.183	353.5	62.6	2.9
OS1-19D	0.339	2.4	51.5	2.6
OS1-19E	0.195	9.5	59.7	2.1
OS1-1A	2.09	349.7	52.3	1.2
OS1-1B	0.981	353.4	63.0	1.6
OS1-1C	2.81	344.5	62.6	3.1
OS1-1D	0.931	339.7	60.9	2.3
OS1-1E	0.999	354.3	43.5	1.8
OS1-1F	0.778	347.0	47.2	1.1
OS1-1G	0.916	346.1	40.6	2.5
OS1-2B	2.06	10.4	38.7	2.4
OS1-2C	2.14	359.5	45.0	2.0
OS1-2D	1.32	1.3	43.1	2.8
OS1-2E	1.8	354.0	36.6	2.1
OS1-2F	2.24	0.2	40.2	2.3
OS1-2G	1.22	6.5	45.4	1.2
OS1-2H	1.3	133.2	57.0	2.7
OS1-3A	0.027	199.6	4.7	3.5
OS1-3B	0.026	209.1	33.2	4.6
OS1-3C	0.0495	208.6	-5.2	3.1
OS1-3D	0.0381	199.4	4.8	3.5
OS1-3E	0.0544	195.7	-9.2	2.7
OS1-3F	0.0404	199.6	-10.1	2.7

OS1-4A	8.820001e-2	342.0	43.9	2.7
OS1-4B	0.0916	336.6	43.2	3.3
OS1-4BA	0.0997	339.7	51.1	1.0
OS1-4BB	0.118	338.4	50.5	2.0
OS1-4C	0.0948	346.7	49.7	2.4
OS1-4E	0.0926	352.1	39.9	1.7
OS1-4F	0.134	337.3	46.1	1.9
OS1-5A	1.49	357.3	56.5	1.7
OS1-5B	3.31	337.8	48.3	2.2
OS1-5C	2.2	353.5	60.1	2.2
OS1-5D	4.07	353.2	56.6	2.0
OS1-5E	5.01	351.4	49.0	1.7
OS1-6A	3.24	314.9	32.6	1.1
OS1-6B	1.3	330.0	28.6	4.2
OS1-6C	1.1	324.8	28.7	4.3
OS1-6D	1.17	291.6	26.2	4.0
OS1-6E	0.501	346.6	33.7	3.7
OS1-6F	0.431	328.2	33.0	2.6
OS1-6G	0.538	334.5	42.3	2.8
OS1-6H	0.321	333.2	40.6	3.1
OS1-6I	0.29	354.0	41.8	3.6
OS1-7A	0.116	291.4	47.2	1.6
OS1-7B	0.11	297.5	47.1	1.8
OS1-7C	0.0962	314.9	51.9	2.3
OS1-7D	0.185	321.1	55.7	2.4
OS1-7E	0.118	330.6	53.6	1.5
OS1-7F	0.0938	302.8	52.6	1.8
OS1-7G	0.134	160.0	39.3	2.5
OS1-7H	0.137	325.9	62.1	1.7
OS1-7I	0.11	333.4	59.8	1.9
OS1-7J	0.122	334.0	59.7	1.7
OS1-7K	0.105	326.5	58.0	2.2

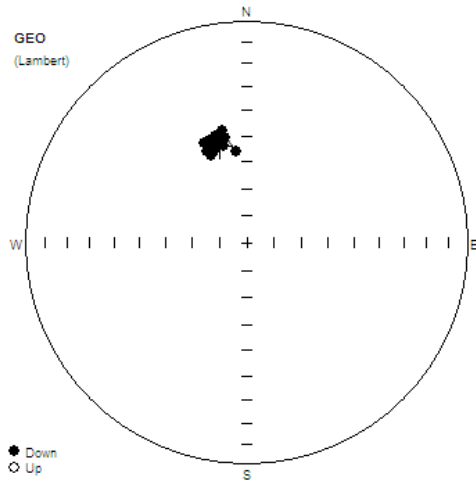
OS1-8A	5.29	59.2	56.7	1.6
OS1-8B	4.2	56.6	57.0	2.4
OS1-8BA	0.819	352.7	50.2	2.2
OS1-8BC	0.833	359.4	45.8	2.1
OS1-8BD	0.859	337.3	49.6	1.8
OS1-8BE	0.826	340.7	47.2	2.2
OS1-8BF	0.920	336.6	55.4	1.1
OS1-8C	0.619	111.9	43.4	2.2
OS1-8D	0.501	338.9	49.2	1.6
OS1-8E	0.431	89.6	51.5	2.0
OS1-8F	0.519	72.2	58.2	1.1
OS1-9A	2.34	330.4	54.0	2.3
OS1-9B	1.55	326.0	55.6	2.2
OS1-9C	1.14	332.9	51.1	2.8
OS1-9D	1.92	312.0	53.7	2.4
OS1-9E	1.52	311.9	50.5	2.5
OS1-9F	1.03	308.7	49.6	2.6
OS1-9G	1.91	276.0	38.8	2.9
OS1-9H	0.705	267.2	35.7	2.6
OS1-9I	0.966	277.5	39.1	2.3
OS1-9J	1.38	100.5	36.5	2.1
OS1-9K	0.982	256.0	33.3	2.8

ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ NRM OSE -2

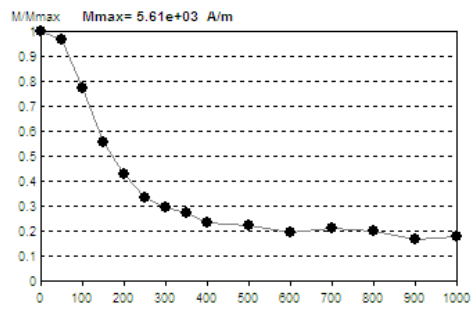
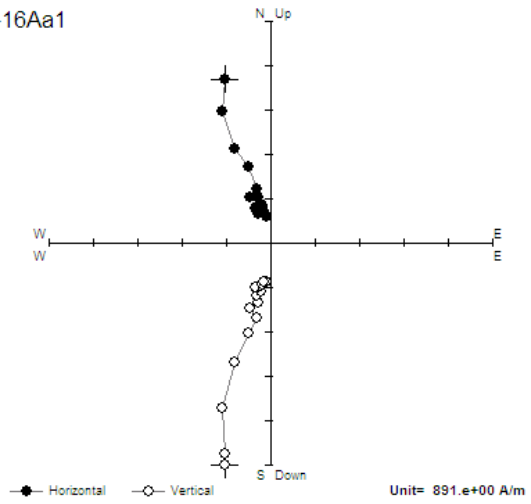
ΔΕΙΓΜΑ	Mag(A/ m)	D(°)	I (°)	a95
OS2-10A	7.92	341.1	62.1	3.5
OS2-10B	7.75	344.2	62.5	3.2
OS2-10C	7.41	344.6	63.5	3.9
OS2-10D	10.8	337.7	64.9	4.0
OS2-10E	7.95	343.9	63.1	6.5
OS2-10F	4.21	330.6	65.8	4.2
OS2-11A	4.97	35.4	70.2	4.2
OS2-11B	6.43	37.7	68.1	3.7
OS2-1A	0.846	29.6	59.3	3.8
OS2-1B	2.05	36.0	62.2	2.7
OS2-1D	0.546	43.9	54.5	3.8
OS2-2A	0.766	13.1	62.1	2.3
OS2-2B	0.887	12.6	59.7	2.6
OS2-2C	1.32	19.6	54.1	1.7
OS2-2D	2.24	14.6	55.2	3.0
OS2-5A	10.2	15.0	60.3	1.9
OS2-5D	3.39	8.5	60.8	3.1
OS2-5E	0.753	8.5	52.7	3.9
OS2-5F	0.456	15.0	55.4	4.5
OS2-6A	0.619	353.8	56.5	3.5
OS2-6B	0.33	357.0	60.1	5.8
OS2-6C	0.377	352.7	58.5	4.5
OS2-6D	0.274	351.5	58.8	6.4
OS2-7A	1.58	337.2	58.6	1.7
OS2-7B	1.22	335.6	59.7	2.3
OS2-7C	0.687	22.2	51.4	3.5
OS2-8A	0.753	351.7	61.3	3.3
OS2-8B	1.1	352.7	58.1	3.0

OS2-8C	1.19	354.0	56.1	2.1
OS2-8D	0.571	28.0	66.6	2.6
OS2-8E	0.689	340.4	60.8	4.0
OS2-9B	3.51	342.4	54.1	2.3
OS2-9C	1.24	351.0	55.6	3.0
OS2-9D	2.31	340.9	56.8	2.3
OS2-9E	2.21	353.4	54.7	0.9
OS2-9F	1.2	352.7	52.2	1.2
OS2-9G	1.52	346.6	55.2	2.3
OS2-9H	1.68	3.7	49.6	1.9
OS2-9I	1.49	340.0	55.0	3.1

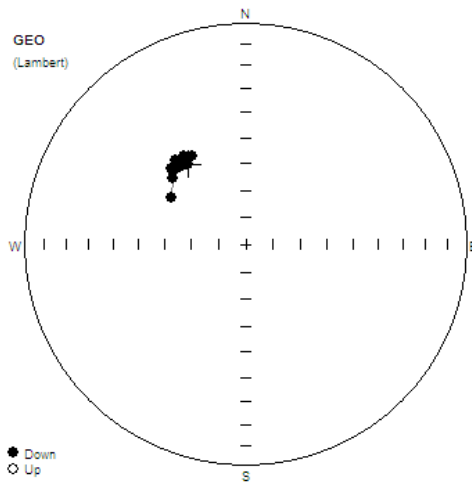
## ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΦ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ



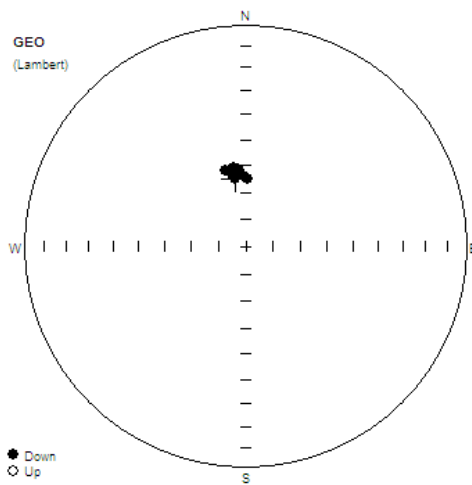
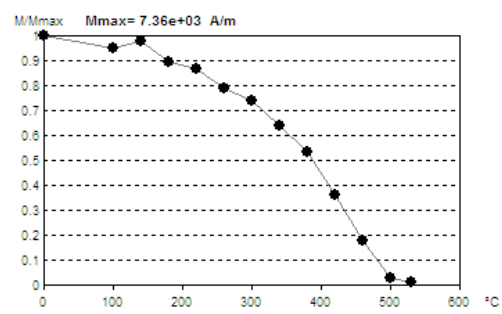
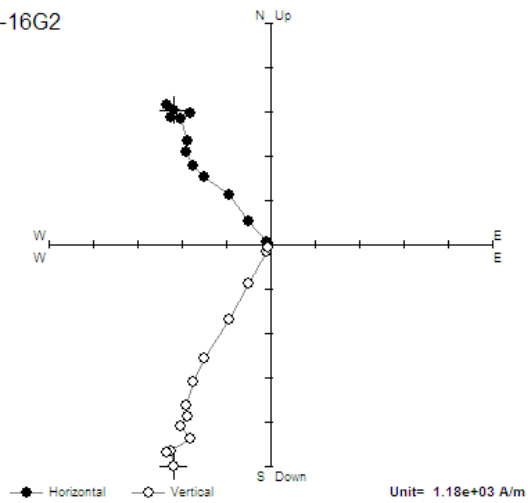
os1-16Aa1



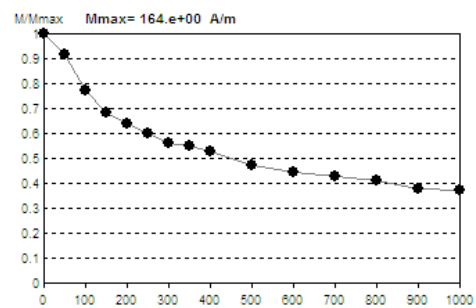
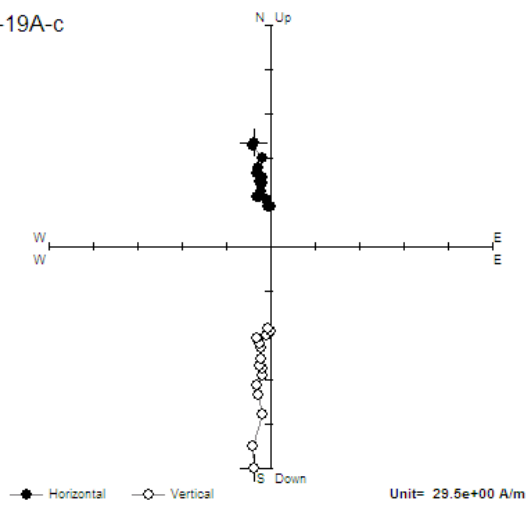


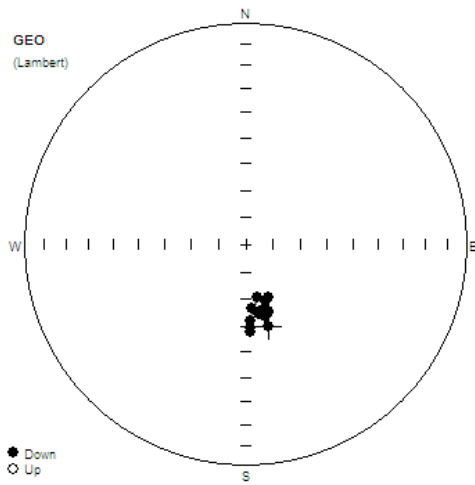


os1-16G2

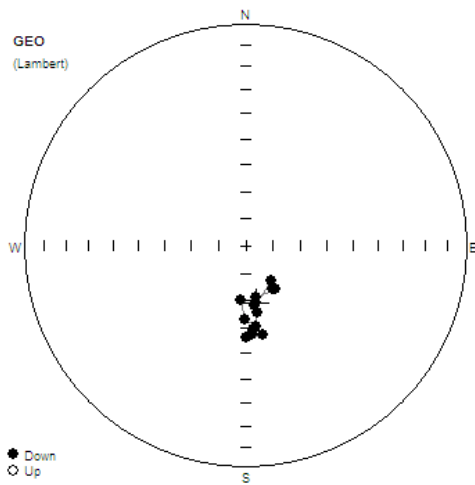
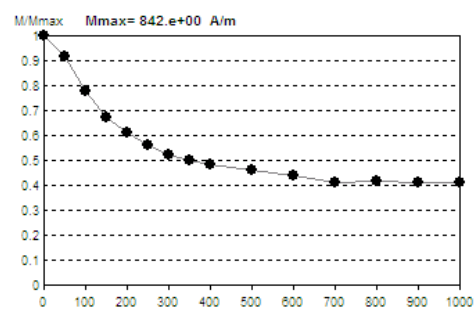
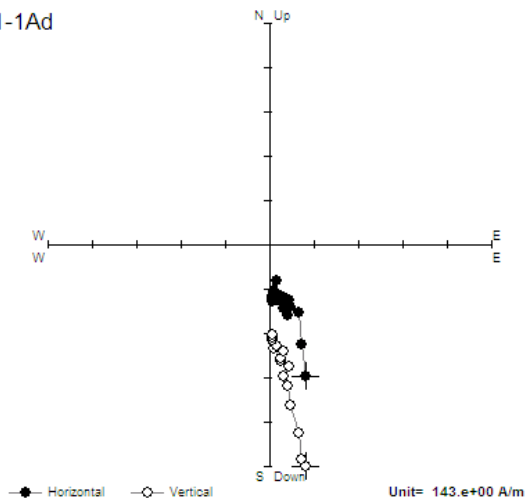


os1-19A-c

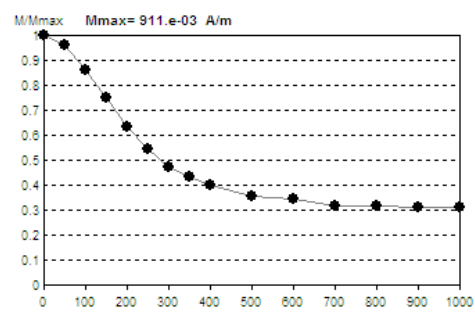
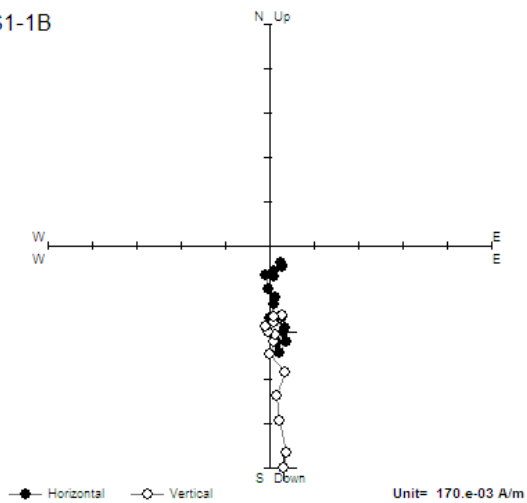


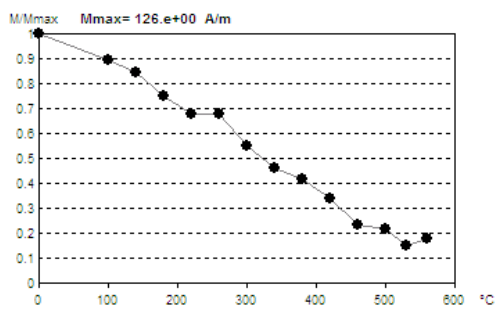
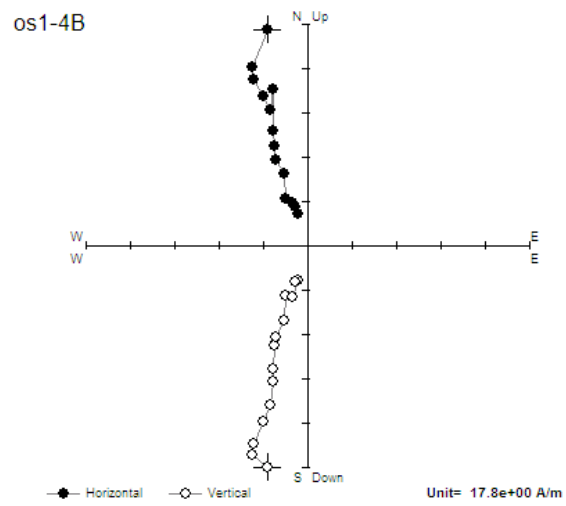
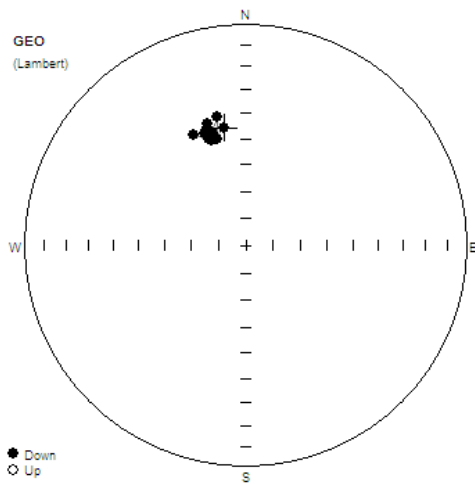


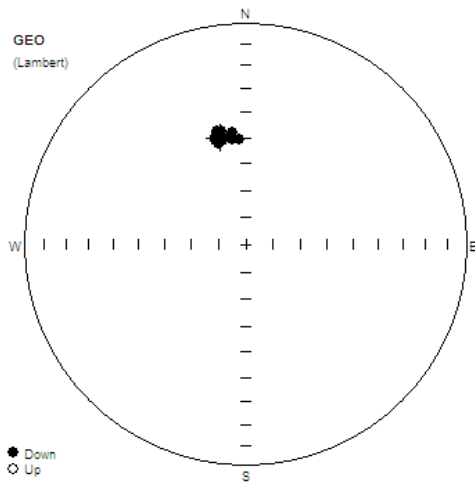
os1-1Ad



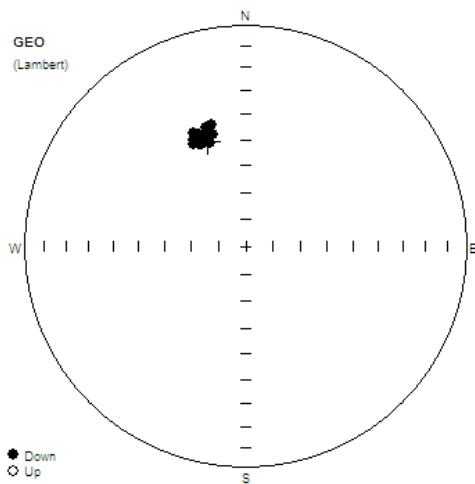
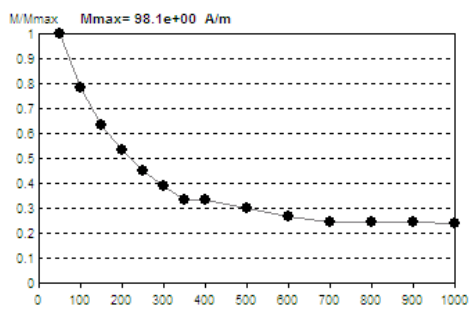
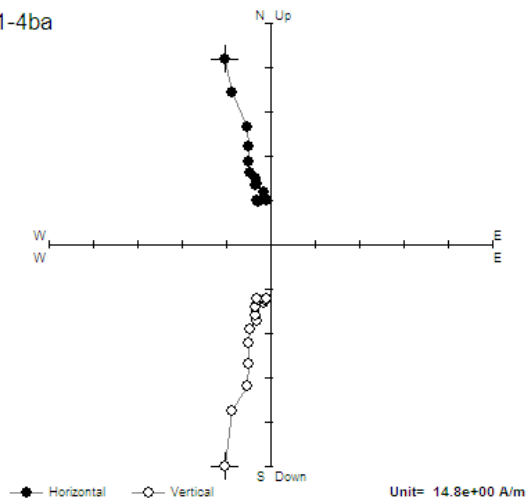
OS1-1B



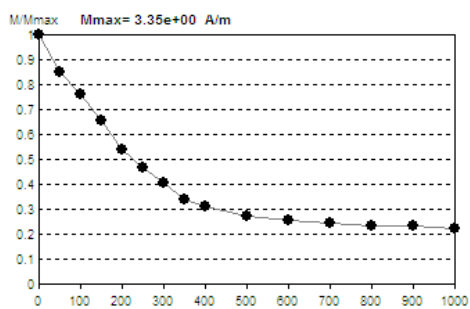
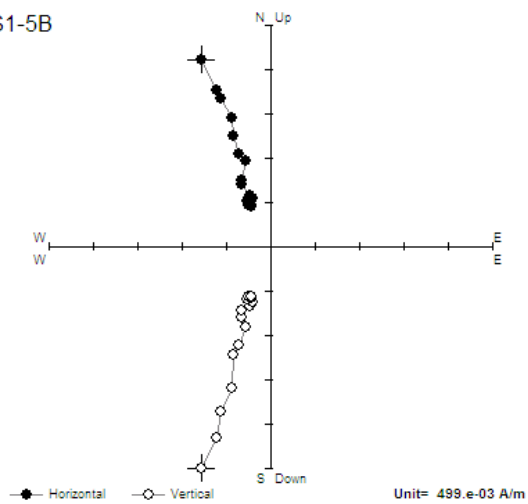


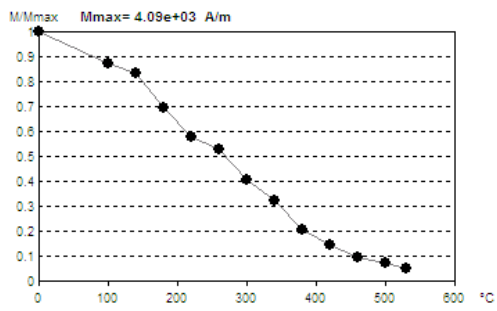
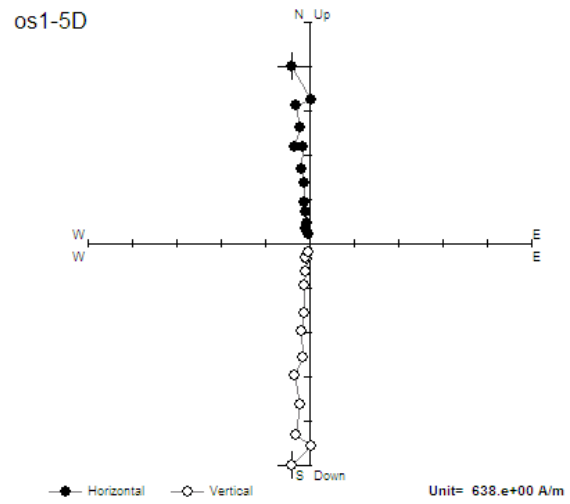
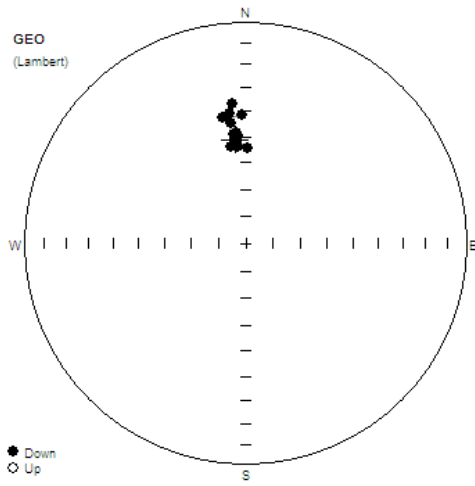


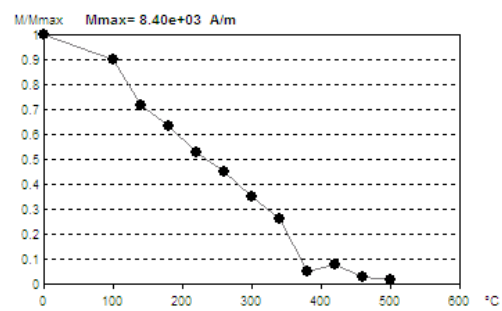
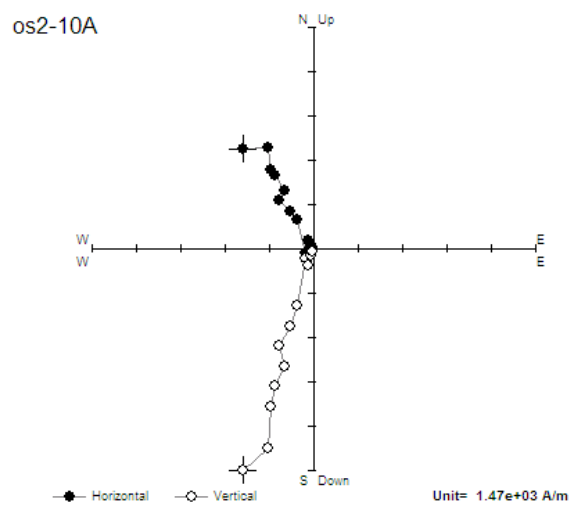
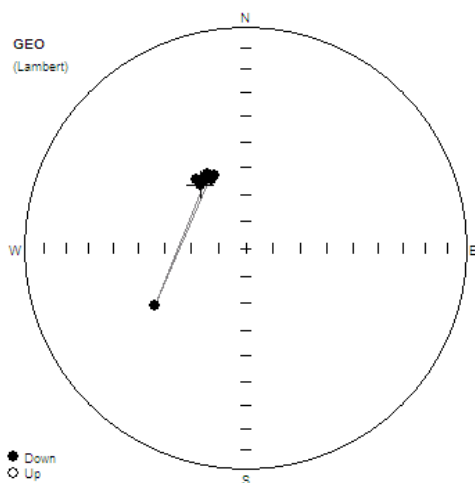
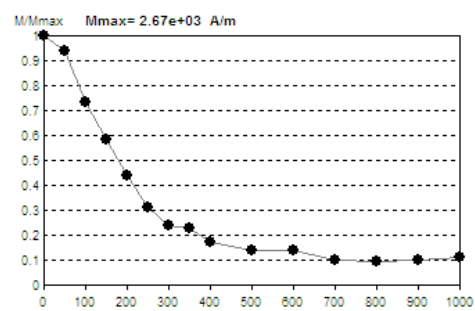
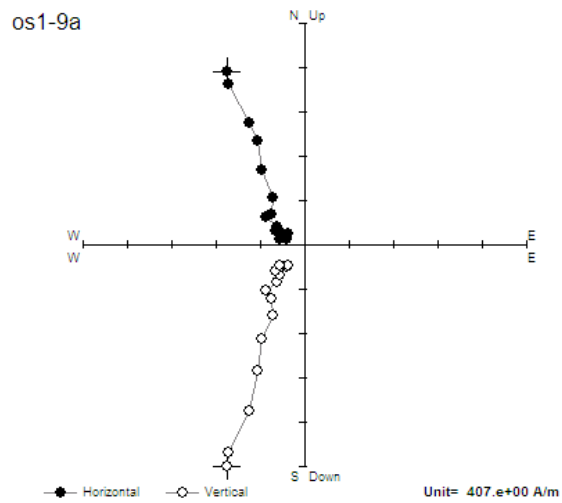
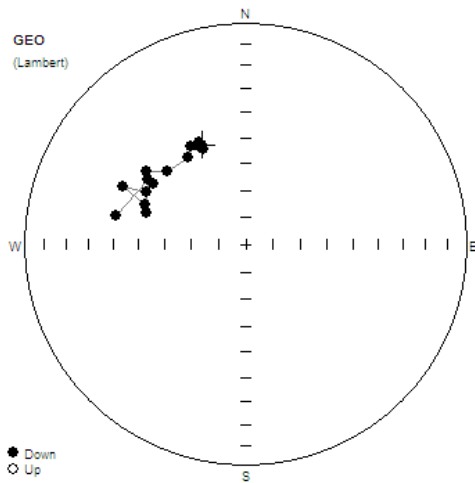
os1-4ba

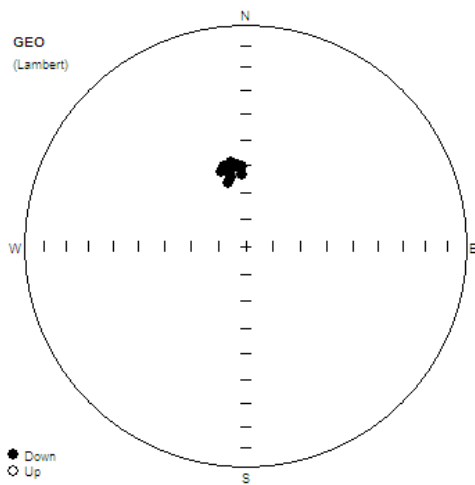


OS1-5B

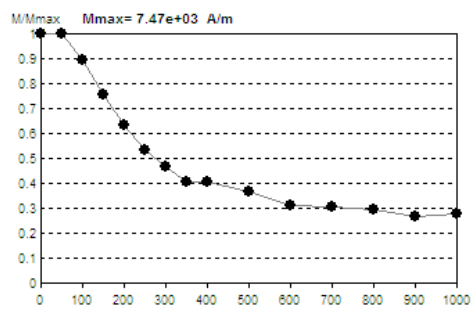
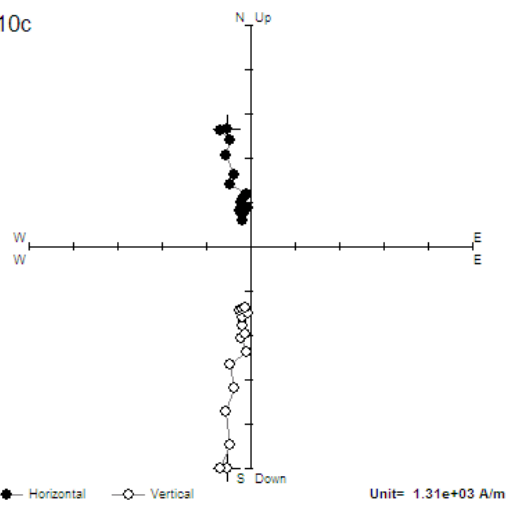


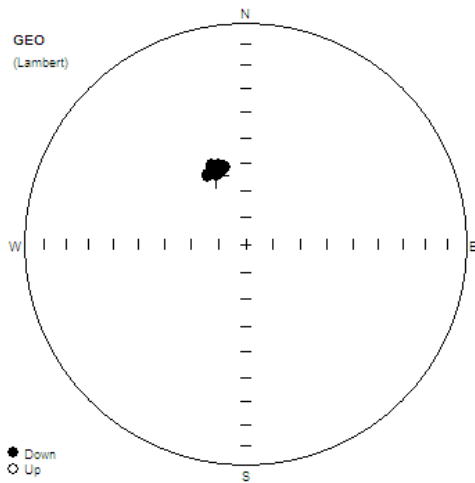




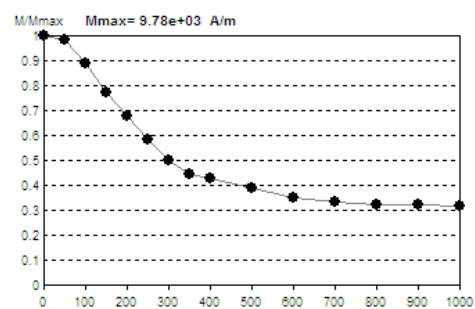
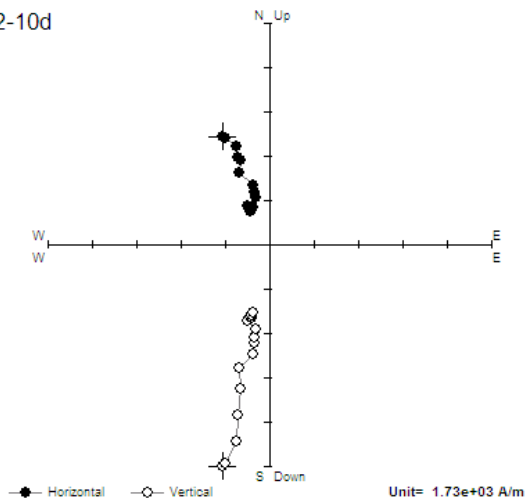


os2-10c

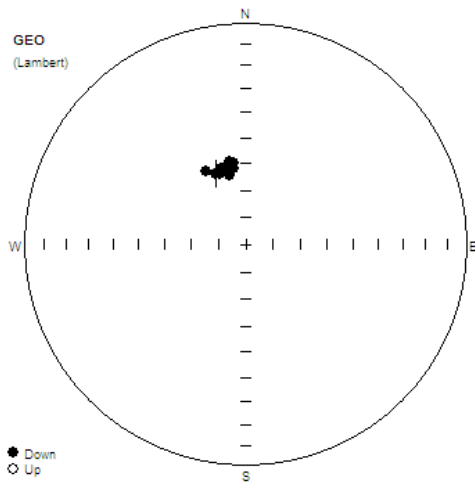




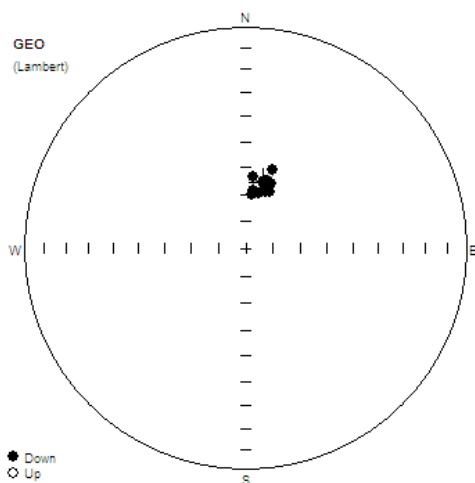
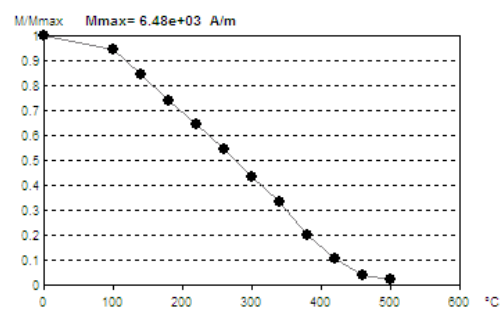
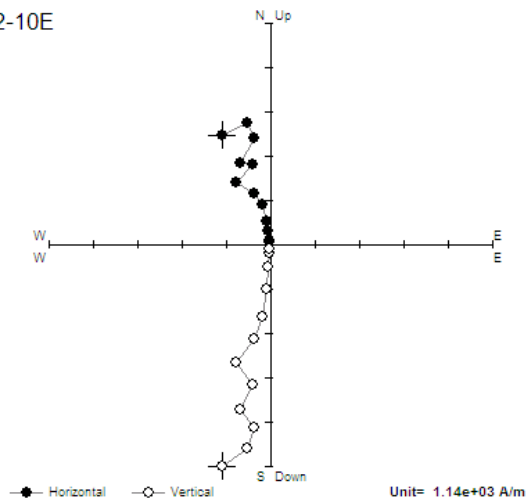
os2-10d



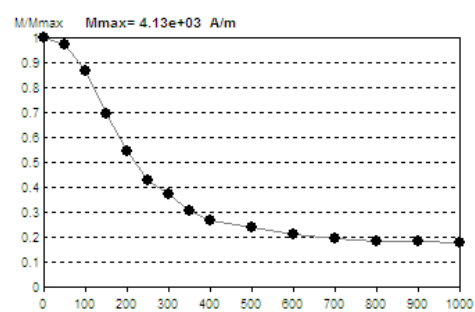
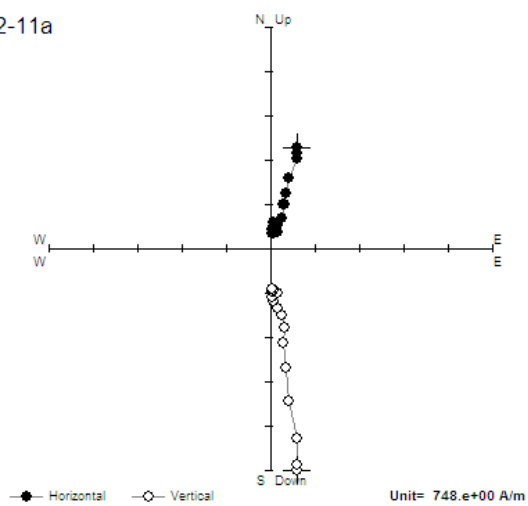


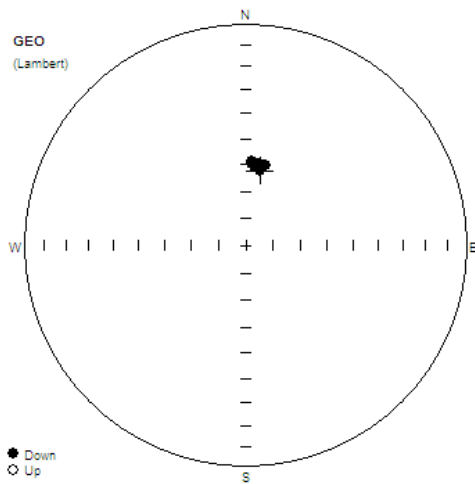


os2-10E

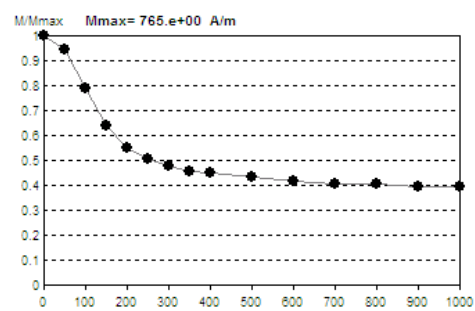
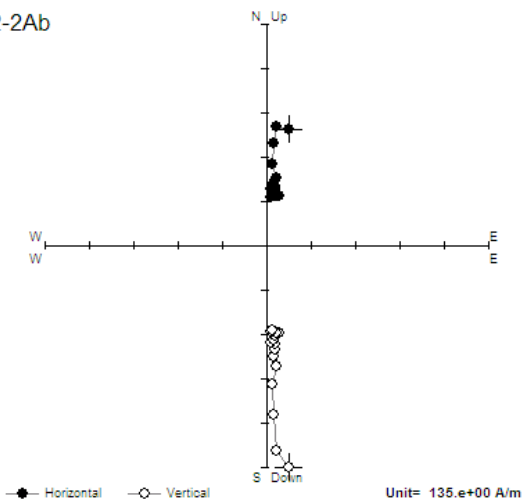


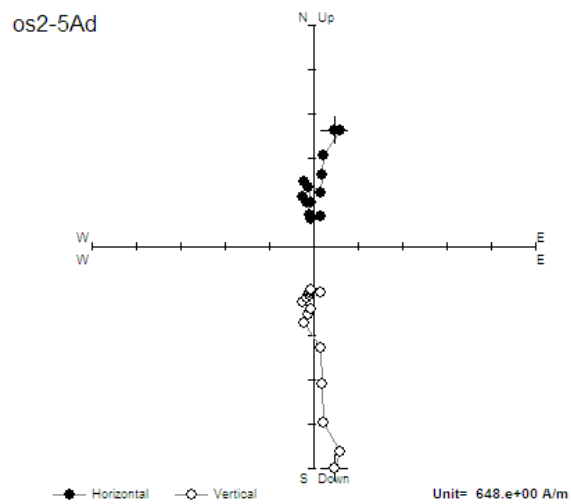
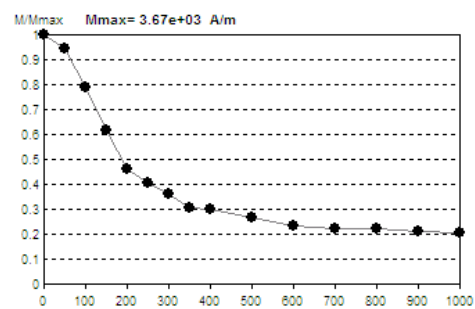
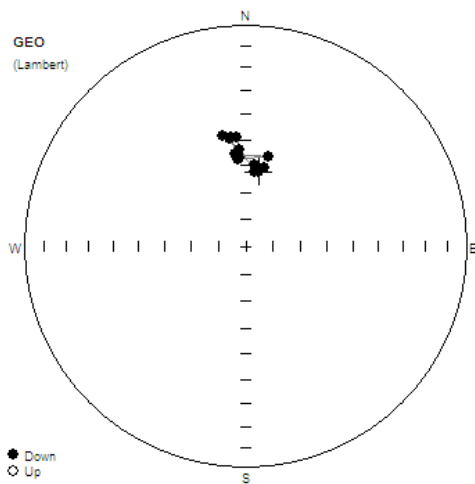
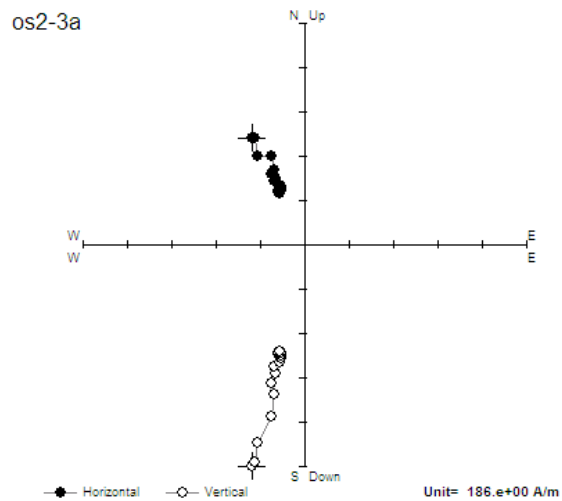
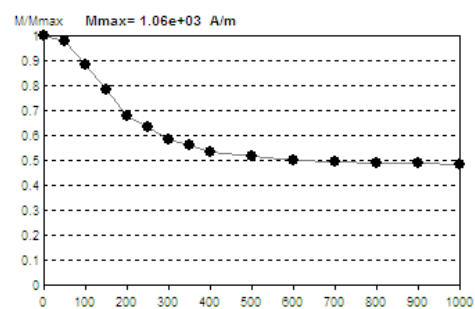
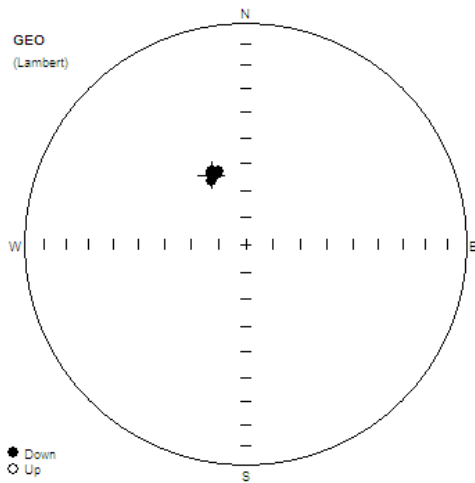
os2-11a

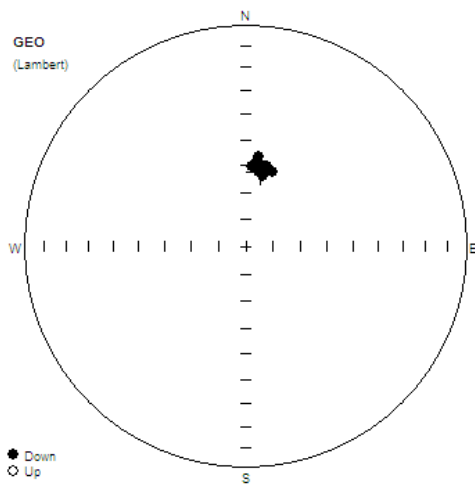




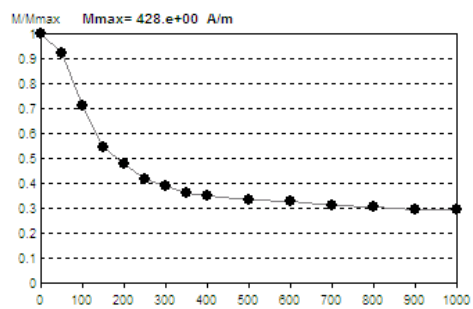
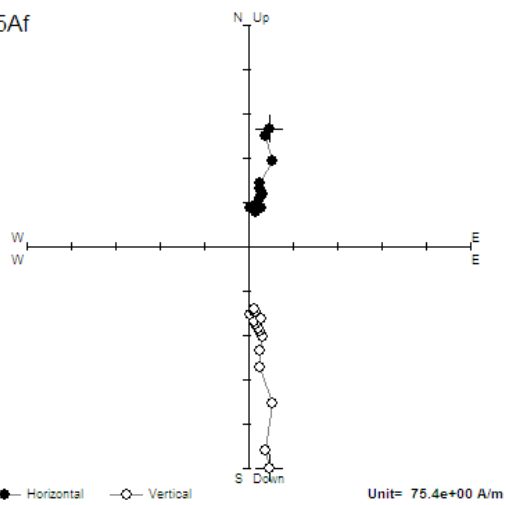
os2-2Ab

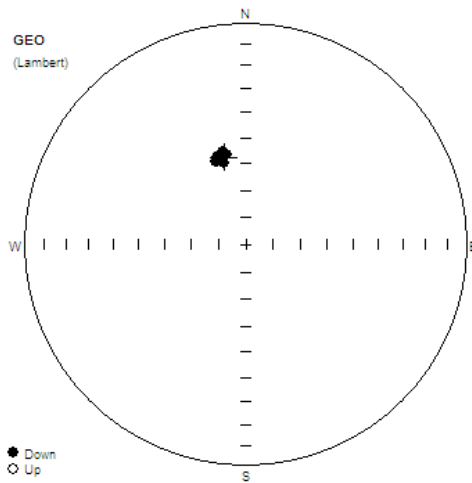




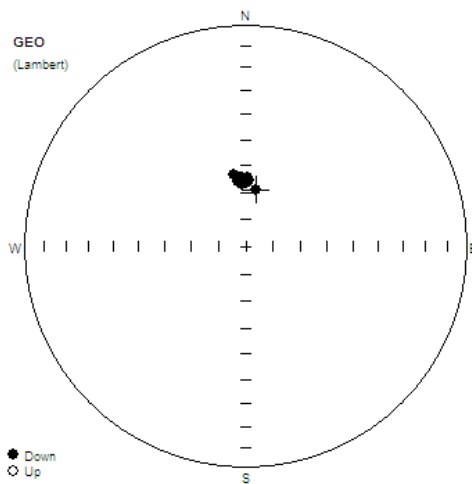
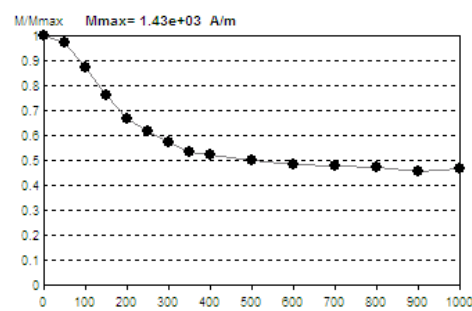
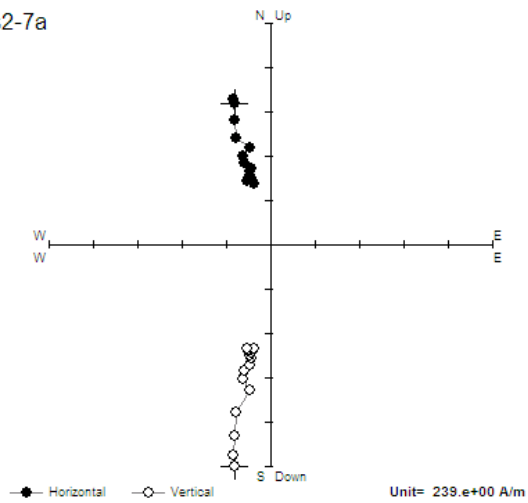


os2-5Af





os2-7a



os2-7b

