



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ ΒΑΤΗ

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΕΡΙΣΣΟ  
ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2019





Ευφροσύνη Βατή

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας

AEM:4766

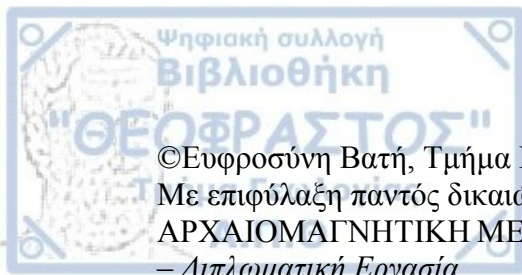
Αρχαιομαγνητική μελέτη κλιβάνου από την Ιερισσό Χαλκιδικής

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Γεωφυσικής

Επιβλέπουσες Καθηγήτριες

Αηδονά Ελένη, Επ. Καθηγήτρια

Κοντοπούλου Δέσποινα, Καθηγήτρια



©Ευφροσύνη Βατή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΕΡΙΣΣΟ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

– Διπλωματική Εργασία

©Effrosyni Vati, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2019

All rights reserved.

ARCHAEOMAGNETIC STUDY OF A CERAMIC KILN FROM IERISSOS

CHALKIDIKI - *Bachelor Thesis*

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.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ** **Αρχαιομαγνητική μελέτη κλιβάνου από την Ιερισσό Χαλκιδικής**

**Ευφροσύνη Βατή**

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται ο κλιβάνος της Ιερισσού με την μέθοδο του Αρχαιομαγνητισμού. Αρχικά δίνονται οι βασικές αρχές του μαγνητικού πεδίου, παρουσιάζονται τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά και οι ιδιότητες τους, τα είδη μαγνήτισης και η απόκτηση τους. Αναφέρονται επίσης οι έννοιες του αρχαιομαγνητισμού ενώ περιγράφονται και οι τεχνικές επεξεργασίας των δειγμάτων στο εργαστήριο, οι τεχνικές απομαγνήτισης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Ως κύριο θέμα της εργασίας αποτελεί η μελέτη κλιβάνου που εντοπίστηκε ύστερα από αρχαιολογική ανασκαφή στην περιοχή της Ιερισσού Χαλκιδικής. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τον κλιβάνο μελετήθηκαν αρχαιομαγνητικά και προσδιορίστηκε η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που είχαν καταγράψει. Η μέση τιμή που υπολογίστηκε για τον κλιβάνο είναι :  $D = 12.4^\circ$ ,  $I = 60.2^\circ$ ,  $a_{95} = 6.8^\circ$ . Με βάση την υπολογιζόμενη τιμή της διεύθυνσης έγινε η χρονολόγηση του κλιβάνου η οποία τοποθετεί την τελευταία καύση του κλιβάνου στο διάστημα 1083-1228μ.Χ. Η τιμή αυτή βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με την αρχαιολογική εκτίμηση.

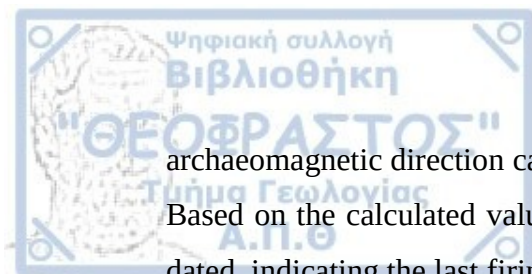
Λέξεις κλειδιά: Γεωμαγνητισμός, Γεωχρονολόγηση, Παλαιομαγνητισμός

### **ABSTRACT**

#### **Archaeomagnetic study of a ceramic kiln from Ierissos Chalkidiki**

**Effrosyni Vati**

The present thesis studies the Ierissos kiln by the means of Archaeomagnetism. At the beginning of the thesis, the basic principles of the magnetic field are given while the ferromagnetic minerals and their properties and the magnetization types and their acquisition are presented. An introduction of the method of the archaeomagnetism is also mentioned, as well as the techniques of sample preparation in the laboratory, techniques of demagnetization and analysis of results. The main topic of this work is the study of a kiln that was discovered during an archaeological excavation in the area of Ierissos Halkidiki. The samples collected from the kiln were archaeomagnetically studied and the direction of the magnetic field recorded was determined. The mean



archaeomagnetic direction calculated for the kiln is:  $D = 12.4^\circ$ ,  $I = 60.2^\circ$ ,  $a_{95} = 6.8^\circ$ .

Based on the calculated value of the direction of the geomagnetic field, the kiln was dated, indicating the last firing of the kiln in the interval 1083-1228 AD. This dating is in very good agreement with the archaeological estimation.

Key words: Geochronology, Geomagnetism, Paleomagnetism

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ**

**9**

1.1. Βασικοί Ορισμοί

1.1.2. Γεωκεντρικό Αξονικό Μοντέλο Διπόλου

1.1.3. Παρόν Γεωμαγνητικό Πεδίο Της Γης

1.1.4. Γεωμαγνητικές Χρονικές Μεταβολές / Αιώνιες Μεταβολές

1.2. Σιδηρομαγνητικά Ορυκτά

1.2.1. Μαγνητικές Ιδιότητες Στερεών Υλικών

1.2.2. Διαμαγνητισμός

1.2.3. Παραμαγνητισμός

1.2.4. Σιδηρομαγνητισμός

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ**

**19**

2.1. Σιδηρομαγνητισμός Μικροσωματιδίων

2.2. Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)

2.3. Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (TRM)

2.3.1. Μερική Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (PTRM)

2.4. Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM)

2.5. Ιζηματογενής Παραμένουσα Μαγνήτιση (DRM)

2.6. Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (VRM)

2.6.1. Απόκτηση VRM

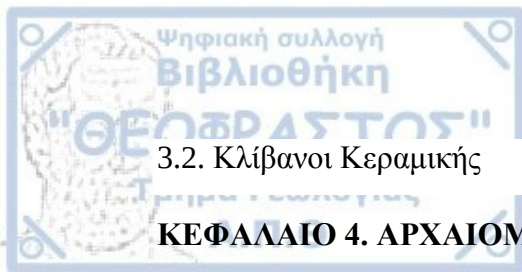
2.7. Θερμοϊξώδης παραμένουσα μαγνήτιση (TVRM)

2.8. Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση (IRM)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ**

**24**

3.1. Βασικές Αρχές Του Αρχαιομαγνητισμού



3.2. Κλίβανοι Κεραμικής

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΙΕΡΙΣΣΟΥ 29**

4.1. Ιερισσός/Αρχαία Άκανθος

4.2. Περιοχή Μελέτης

4.3. Δειγματοληψία – Εργαστηριακά Πειράματα – Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

4.4. Θεωρία Θερμικής Απομαγνήτισης

4.5. Μέθοδοι Σταδιακής Απομαγνήτισης

4.6. Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 43**

5.1. Αρχαιομαγνητικά Αποτελέσματα

5.2. Αρχαιομαγνητική Χρονολόγηση

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 53**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 54**

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 57**



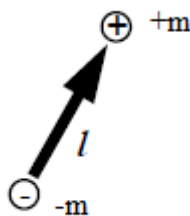
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Μια παλαιομαγνητική μελέτη γίνεται με σκοπό την συγκέντρωση των καταγραφών που σχετίζονται με παρελθοντικές καταστάσεις και μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι έννοιες του παλαιομαγνητισμού και του γεωμαγνητικού πεδίου συνδέονται. Για την κατανόηση της έννοιας του παλαιομαγνητισμού μας είναι απαραίτητες βασικές γνώσεις σχετικές με το γεωμαγνητικό πεδίο.

### 1.1. Βασικοί Ορισμοί

Ξεκινάμε αναλύοντας ορισμούς όπως η μαγνητική ροπή ( $M$ ), μαγνήτιση ( $J$ ), το μαγνητικό πεδίο έντασης ( $H$ ) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\kappa$ ). Σημαντικό ρόλο για τη μαγνήτιση παίζει το μαγνητικό δίπολο, το οποίο είναι η μικρότερη μονάδα μαγνητικού συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί μεμονωμένα μαγνητικά πεδία, έχοντας ένα μόνο πόλο, υπάρχουν μόνο στιγμιαία δεν έχουν ισορροπία και καταστρέφονται. Μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού διπόλου ορίζεται η μεταφορά φορτίου ( $m$ ) από έναν αρνητικό πόλο ( $-m$ ) προς ένα θετικό πόλο ( $+m$ ) κατά απόσταση ( $l$ ) (σχήμα 1). Ισούται για αυτό το ζεύγος με τον εξής τύπο:

$$M = m \times l$$



**Σχήμα 1.** Ορισμός μαγνητικής ροπής, (τροποποίηση από Butler, 2004).

Ως μια πιο απλή περιγραφή της μαγνητικής ροπής μπορούμε να φανταστούμε πως η μαγνητική ροπή αποτελείται από ζεύγη μαγνητικών φορτίσεων. Θεωρούμε δηλαδή πως προκαλείται από ηλεκτρικές διεγέρσεις (Butler, 2004).

Η μαγνήτιση ενός υλικού ( $J$ ), η οποία ως διάνυσμα έχει ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα  $\vec{M}$ , ισούται με το κλάσμα του διανύσματος της μαγνητικής ροπής του μαγνητικού διπόλου ανά μονάδα όγκου:

$$\vec{J} = \frac{\vec{M}}{V}$$

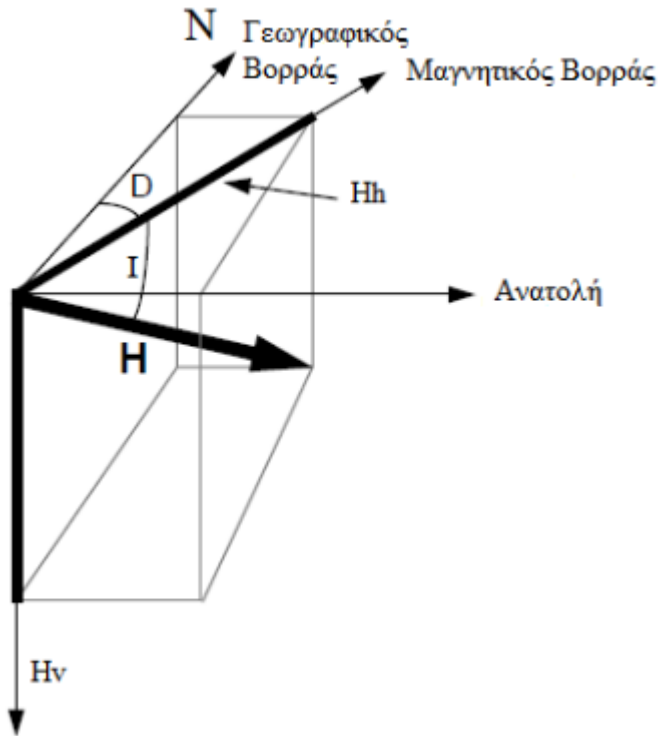
Μονάδα μέτρησης στο S.I της μαγνήτισης είναι το  $Am^{-1}$ . Άλλες μονάδες αποτελούν cgs ή Gauss ή emu. Σχετικά με το μαγνητισμό ισχύουν οι βασικές έννοιες της μαγνήτισης, της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου. Τα τρία αυτά μεγέθη συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$B = \mu_0 H + 4\pi J$$

όπου  $B$  η ολική ένταση του πεδίου/μαγνητική επαγωγή και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα (Butler, 2004).

Σχετικά με τη μαγνήτιση, υπάρχουν δύο είδη μαγνητίσεων η επαγόμενη μαγνήτιση και η παραμένουσα μαγνήτιση. Όταν το σώμα εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο έντασης ( $H$ ) τότε προκαλείται σε αυτό επαγόμενη μαγνήτιση, της οποίας το μέτρο βρίσκεται από τον τύπο :  $J = \kappa \times H$

όπου  $\kappa$  είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα η οποία ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού για μαγνήτιση. Για τη χρήση του παραπάνω τύπου θεωρούμε πως η μαγνήτιση είναι παράλληλη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στα δύο μεγέθη. Η παραμένουσα μαγνήτιση είναι ουσιαστικά η καταγραφή όλων των παρελθοντικών πεδίων που επηρέασαν το σώμα. Στον παλαιομαγνητισμό η διεύθυνση του διανύσματος της επιφάνειας της έντασης του μαγνητικού πεδίου, κατά συνέπεια το εύρος και η διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, αναλύεται από το παρακάτω σχήμα (σχήμα 2):



**Σχήμα 2.** Περιγραφή του μαγνητικού πεδίου, (τροποποίηση από Butler, 2004).

Το διάνυσμα  $\vec{H}$  χωρίζεται σε  $\vec{H}_v$  και  $\vec{H}_h$ , όπου :

$$\vec{H}_v = \vec{H} \times \sin I \quad \vec{H}_h = \vec{H} \times \cos I$$

Ως  $I$  ορίζεται η γωνία ανάμεσα στην ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  και στο  $H_h$ , το μαγνητικό βορρά, η οποία ονομάζεται έγκλιση. Κυμαίνεται σε τιμή από  $-90^\circ$  ως  $+90^\circ$ . Στο σχήμα 2 απεικονίζονται επίσης ο γεωγραφικός βορράς και η ανατολή και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

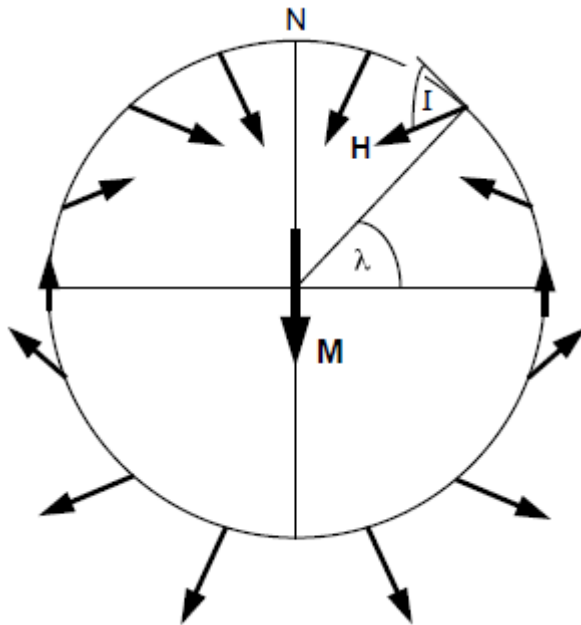
$$\vec{H}_N = \vec{H} \times \cos I \times \cos D \quad H_E = \vec{H} \times \cos I \times \sin D$$

Ως  $D$  ορίζεται η γωνία ανάμεσα στο γεωγραφικό βορρά και το μαγνητικό βορρά ή αλλιώς οριζόντιο τμήμα ( $H_h$ ) της έντασης του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ). Η γωνία  $D$  ονομάζεται απόκλιση και κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  μετρώντας δεξιόστροφα, όπως οι κινήσεις των δεικτών του ρολογιού. Ο ορισμός των γωνιών  $I$  και  $D$  οδηγεί στην ολοκληρωμένη περιγραφή της διεύθυνσης του γεωμαγνητικού πεδίου. Αυτό μπορεί να

$$\text{περιγραφεί με τη σχέση: } H = \sqrt{H_v^2 + H_E^2 + H_h^2}$$

### 1.1.2. Γεωκεντρικό Αξονικό Μοντέλο Διπόλου

Αυτό το θεωρητικό μοντέλο αναφέρεται στην παρουσία ενός μοναδικού μαγνητικού διπόλου, στο κέντρο της γης και ευθυγραμμισμένο με τον άξονα περιστροφής της, το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο (σχήμα 3) (Butler, 2004).



**Σχήμα 3.** Γεωκεντρικό αξονικό διπολικό μοντέλο, (τροποποίηση Butler, 2004).

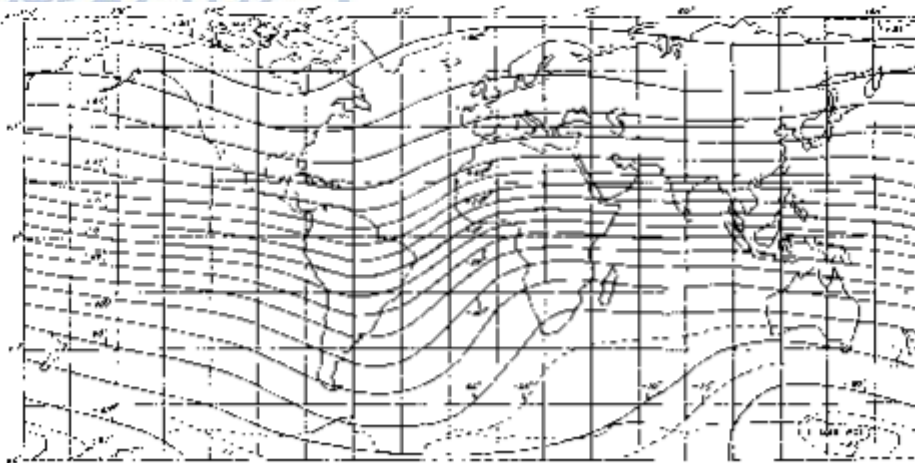
Από αυτό το μοντέλο προκύπτει η σχέση που χρησιμοποιείται ευρέως στον παλαιομαγνητισμό και είναι γνωστή ως "σχέση διπόλου", όπου ισχύει η εξής σχέση:

$$\tan I = \left( \frac{H_v}{H_h} \right) = \left( \frac{2 \sin \lambda}{\cos \lambda} \right) = 2 \tan \lambda$$

Ως  $\lambda$  θεωρείται το γεωγραφικό πλάτος το οποίο κυμαίνεται από  $-90^\circ$  έως  $+90^\circ$ . Για το νότιο γεωγραφικό πόλο έχει τιμή  $-90^\circ$  και για το βόρειο γεωγραφικό πόλο  $+90^\circ$ . Στις ίδιες τιμές κυμαίνεται και το  $I$ , ενώ το  $D$  είναι παντού  $0^\circ$  (Butler, 2004).

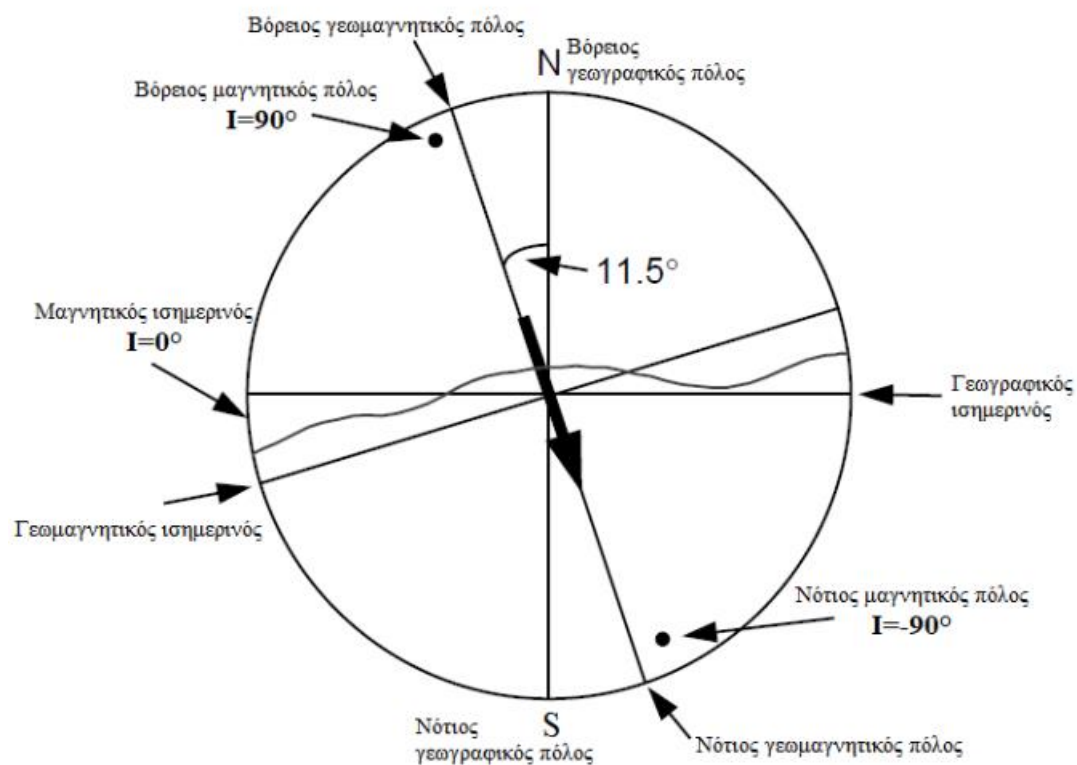
### 1.1.3. Παρόν Γεωμαγνητικό Πεδίο Της Γης

Για την απεικόνιση του γεωμαγνητικού πεδίου της γης χρησιμοποιούνται χάρτες που ονομάζονται ισομαγνητικοί ή ισοκλινικοί (σχήμα 4). Αποτυπώνουν τις ισοκλινικές γραμμές οι οποίες ενώνουν όλα τα σημεία της περιοχής του χάρτη στα οποία η έγκλιση έχει ίδια τιμή (Παπαζάχος, Β., Παπαζάχος, Κ., 2008).



**Σχήμα 4.** Ισοκλινικός χάρτης του 1922, (Fossil hunters).

Στο παρόν γεωμαγνητικό πεδίο παρατηρούνται αλλαγές σε σχέση με αυτό του γεωκεντρικού αξονικού διπόλου, το οποίο είναι πιο απλοϊκό .



**Σχήμα 5.** Γεωκεντρικό αξονικό διπολικό πεδίο, (τροποποίηση από Butler, 2004).

Το γεωμαγνητικό πεδίο είναι περισσότερο σύνθετο συγκριτικά με ένα γεωκεντρικό αξονικό διπολικό πεδίο. Όπως παρατηρούμε και στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 5), οι γεωγραφικοί πόλοι δεν συμπίπτουν με τους μαγνητικούς πόλους (εκεί όπου  $I = \pm 90^\circ$ ). Το γεωκεντρικό δίπολο έχει κλίση σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της Γης,

περίπου στις 11,5°. Παρ' όλα αυτά οι μαγνητικοί πόλοι δεν συμπίπτουν με τους γεωμαγνητικούς πόλους. Στους μαγνητικούς πόλους λαμβάνει χώρα η βύθιση των μαγνητικών κυμάτων, ενώ οι γεωμαγνητικοί πόλοι είναι εκείνοι που ορίζονται από το κεκλιμένο γεωκεντρικό δίπολο (Butler, 2004).

Το δίπολο όμως το οποίο περιγράφει με καλύτερο τρόπο το γεωμαγνητικό πεδίο της Γης, για περίπου το 80% της επιφάνειάς της, είναι το έκκεντρο δίπολο (Butler, 2004).

Το 20% των περιοχών που δεν καλύπτονται από το έκκεντρο δίπολο αντιπροσωπεύονται από το μη διπολικό γεωμαγνητικό πεδίο (Butler, 2004).

#### **1.1.4. Γεωμαγνητικές Χρονικές Μεταβολές / Αιώνιες Μεταβολές**

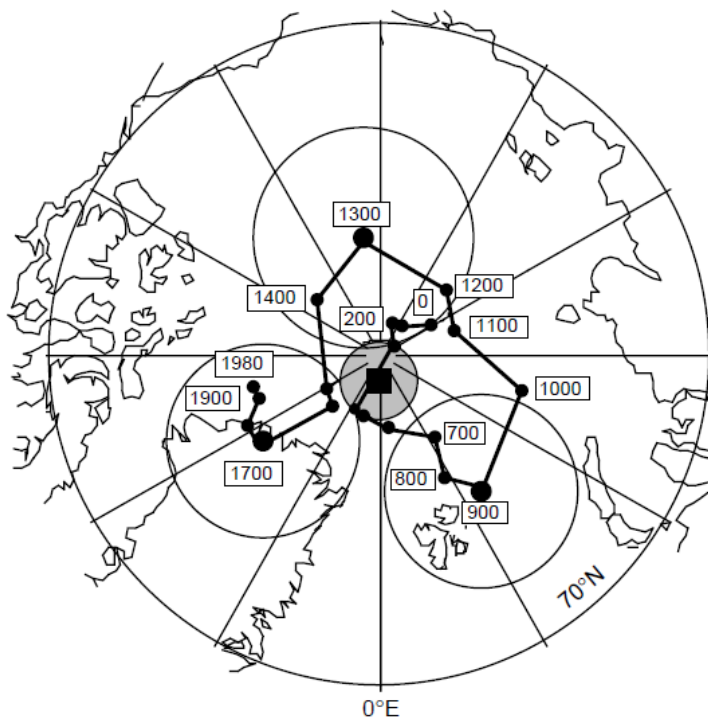
Σε γεωλογικό χρόνο, συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου, όπως το εύρος και η κατεύθυνση, μεταβάλλονται. Αλλαγές που έχουν χρονική διάρκεια από 1 ως  $10^5$  έτη αποτελούν γεωμαγνητική χρονική μεταβολή. Από τις πιο έντονες και ευδιάκριτες είναι αυτές που απασχολούν την κατεύθυνση. Τα μοτίβα των χρονικών μεταβολών είναι ίδια σε περιοχές ενδοηπειρωτικές και μεταβάλλονται από ήπειρο σε ήπειρο. Αυτό το γεγονός πιθανώς οφείλεται στο χώρο που καταλαμβάνει στο εσωτερικό της Γης το μη διπολικό γεωμαγνητικό πεδίο. Υπάρχει η άποψη πως οι γεωμαγνητικές χρονικές μεταβολές είναι επαναλαμβανόμενες και μπορούν να προβλεφθούν. Στην πραγματικότητα οι αλλαγές αυτές θα μπορούσαμε να πούμε πως μοιάζουν περισσότερο με μια τυχαία πορεία προς μια κοινή κατεύθυνση. Μετρήσεις των γεωμαγνητικών χρονικών μεταβολών αποκτώνται από παλαιομαγνητικές έρευνες (αρχαιομαγνητισμό, μεταπαγετώδη λιμναία ιζήματα, Ολοκαινικά ηφαιστειακά πετρώματα) (Butler, 2004).

Οι λόγοι που υπάρχουν οι γεωμαγνητικές χρονικές μεταβολές είναι δύο, οι αλλαγές στο διπολικό πεδίο και αυτές που λαμβάνουν χώρα στο μη διπολικό πεδίο. Καθεμία από τις παραπάνω ορίζει και από μια περίοδο. Τα δύο διαφορετικά είδη περιόδων, μικρή περίοδο αντιπροσωπεύει τις αλλαγές του μη διπολικού πεδίου και μεγάλη περίοδος τις αλλαγές στο διπολικό πεδίο, αλληλοκαλύπτονται. Οι αλλαγές του μη διπολικού πεδίου διαρκούν περίπου 3.000 έτη και τα στοιχεία τους φαίνεται να έχουν κύκλο ζωής που διαρκεί περίπου  $10^3$  έτη. Υπάρχουν παρατηρήσεις πως ορισμένα από τα μέλη του μη διπολικού πεδίου έχουν την τάση να οδηγούνται σε μία πορεία προς τα δυτικά με  $0,4^\circ$  γεωγραφικού μήκους ανά έτος. Το διπολικό τμήμα του γεωμαγνητικού πεδίου, επίσης παρουσιάζει αλλαγές εύρους και κατεύθυνσης. Για να διαχωριστούν οι



συγκεκριμένες μεταβολές από εκείνες του μη διπολικού πεδίου, μελετήθηκαν ιστορικές καταχωρήσεις και παλαιομαγνητικές μελέτες (Butler, 2004).

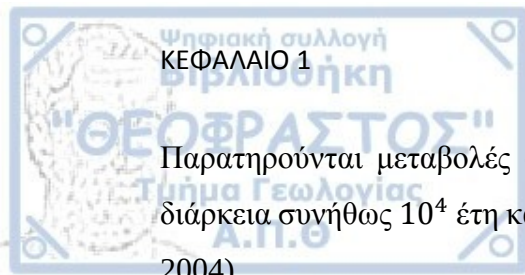
Έτσι επιλέχθηκαν 8 περιοχές της Γης μέσα στις οποίες ορίστηκαν μέσες κατευθύνσεις του γεωμαγνητικού πεδίου για περίοδο 100 ετών. Οι θέσεις των μαγνητικών πόλων καθορίστηκαν από τις μέσες τοπικές κατευθύνσεις. Οι τελευταίες οδήγησαν στην εύρεση ενός μέσου γεωμαγνητικού πόλου ανά 100 έτη για τα τελευταία 2.000 έτη συνολικά (Butler, 2004).



**Σχήμα 6.** Οι θέσεις του γεωμαγνητικού β. πόλου τα τελευταία 2.000 έτη, (Butler, 2004).

Οι αιώνιες μεταβολές που αποτυπώνονται στο παραπάνω σχήμα είναι από το διπολικό πεδίο (σχήμα 6).

Τα στοιχεία μας δείχνουν πως ο γεωμαγνητικός πόλος εκτελεί μια τυχαία διαδρομή γύρω από τη θέση του βόρειου γεωγραφικού πόλου. Κατά προσέγγιση, η θέση του γεωμαγνητικού πόλου συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής. Άρα το μοντέλο του γεωκεντρικού άξονα διπόλου περιγράφει το μέσο γεωμαγνητικό πεδίο για περίπου τα τελευταία 2.000 έτη (Butler, 2004).



Παρατηρούνται μεταβολές στο εύρος του γεωμαγνητικού διπόλου οι οποίες έχουν διάρκεια συνήθως  $10^4$  έτη και κυμαίνονται ως και  $\pm 50\%$  από την αρχική τιμή (Butler, 2004).

## 1.2. ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ

### 1.2.1. Μαγνητικές Ιδιότητες Στερεών Υλικών

Υπάρχουν τρεις στοιχειώδεις μαγνητικές ιδιότητες που παρατηρούνται όταν υπάρχει μαγνήτιση μεγέθους  $J$  σε ένα μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$ . Αυτά τα φαινόμενα αιτιολογούνται από την ιδιότητα κάποιων ατόμων να έχουν ατομικές μαγνητικές ροπές λόγω των περιστροφικών κινήσεων, σύμφωνα με κάποια τροχιά, των ηλεκτρονίων (Butler, 2004).

### 1.2.2. Διαμαγνητισμός

Ορίζεται ως η απόκτηση μίας επαγόμενης μαγνήτισης μικρού μεγέθους  $J_i$ , αντίθετη στην ένταση του εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου  $H$ . Η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλει την περιστροφική κίνηση σύμφωνα με την τροχιά των ηλεκτρονίων και τα οδηγεί να παράγουν τη μαγνήτιση  $J_i$  αντιπαράλληλα στη μαγνητική επαγωγή  $B$ . Ως διαμαγνητικό υλικό θεωρείται αυτό το οποίο αποτελείται από άτομα τα οποία δεν παρουσιάζουν ατομική μαγνητική ροπή, αλλά μόνο διαμαγνητική απόκριση. Η μαγνητική επιδεκτικότητα για ένα διαμαγνητικό υλικό είναι αρνητική και ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Ένα παράδειγμα διαμαγνητικού ορυκτού είναι ο χαλαζίας ( $SiO_2$ ) (Butler, 2004).

### 1.2.3. Παραμαγνητισμός

Παραμαγνητικά στερεά είναι εκείνα που τα άτομα τους έχουν ατομική μαγνητική ροπή και αναπτύσσουν επαγόμενη μαγνήτιση  $J_i$  παράλληλη στην ένταση του εφαρμοσμένου πεδίου  $H$ , με τη  $J_i$  να είναι εξαρτώμενη από τη  $H$ . Όπως και με τα διαμαγνητικά υλικά, η μαγνήτιση μηδενίζεται με την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου. Ένα παράδειγμα παραμαγνητικού ορυκτού είναι ο φαυαλίτης ( $Fe_2SiO_4$ ) (Butler, 2004).

Στα στερεά παραμαγνητικά, η ατομική μαγνητική ροπή αντιδρά με διαφορετικό τρόπο σε εφαρμοσμένα μαγνητικά πεδία και αλλιώς στη θερμική ενέργεια. Για θερμοκρασίες

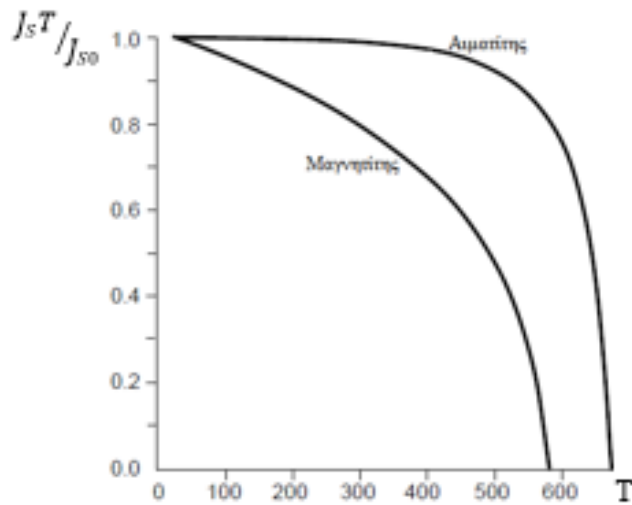
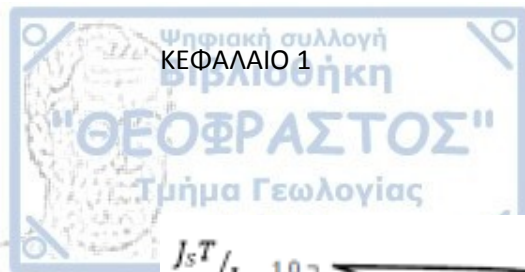


πάνω από το απόλυτο μηδέν, η θερμική ενέργεια δονεί το κρυσταλλικό πλέγμα, οδηγώντας στη ραγδαία αύξηση των ατομικών μαγνητικών ροπών χωρίς να έχουν κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αν δεν υπάρχει εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές των ατόμων είναι κατανεμημένες ισόποσα προς όλες τις κατευθύνσεις με η προκύπτουσα μαγνήτιση είναι  $J_i = 0$  (Butler, 2004).

#### 1.2.4. Σιδηρομαγνητισμός

Τα σιδηρομαγνητικά στερεά είναι αυτά των οποίων τα άτομα έχουν μαγνητική ροπή και αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους. Σαν αποτέλεσμα, παράγονται μαγνητίσεις στα σιδηρομαγνητικά στερεά που μπορούν να οδηγήσουν σε μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό που θα μας έδιναν τα παραμαγνητικά στερεά στο ίδιο μαγνητικό πεδίο. Για ένα δεδομένο σιδηρομαγνητικό υλικό και για συγκεκριμένη θερμοκρασία υπάρχει μία μέγιστη μαγνήτιση, η οποία ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού  $J_s$  και είναι ανεξάρτητη από την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Ένα παράδειγμα σιδηρομαγνητικού στερεού είναι ο μεταλλικός σίδηρος (Butler, 2004).

Η μαγνήτιση κορεσμού μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία η μαγνήτιση μηδενίζεται αντιστοιχεί στη θερμοκρασία Curie ( $T_C$ ) για το συγκεκριμένο σιδηρομαγνητικό υλικό. Η θερμοκρασία Curie ( $T_C$ ) είναι χαρακτηριστική για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό και πάνω από αυτή το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών ορυκτών είναι ο μαγνητίτης και ο αιματίτης στα οποία οι  $T_C$  τους είναι 580°C και 680°C αντίστοιχα (σχήμα 7) (Butler, 2004).



**Σχήμα 7.** Η μείωση της μαγνήτισης κορεσμού με την αύξηση της θερμοκρασίας για τον αιματίτη και το μαγνητίτη, (τροποποίηση από Butler, 2004).

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι σημαντικά όχι μόνο λόγω του ότι δίνουν υψηλής έντασης μαγνήτιση, αλλά μπορούν να καταγράφουν την κατεύθυνση ενός εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου. Κατά τη διάρκεια της αφαίρεσης του μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτιση δε μηδενίζεται, διατηρεί την καταγραφή του εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου (Butler, 2004).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

### 2.1. Σιδηρομαγνητισμός Μικροσωματιδίων

Τα πετρώματα περιέχουν ένα σύνολο από σιδηρομαγνητικά ορυκτά τα οποία είναι διάσπαρτα μέσα σε ένα χώρο διαμαγνητικών και παραμαγνητικών ορυκτών. Βασική αρχή αποτελεί το γεγονός πως στα σιδηρομαγνητικά σωματίδια η μαγνήτιση εξαρτάται από διάφορα είδη ενεργειών. Παρ' όλα αυτά πάντα οι μαγνητικοί κόκκοι επιλέγουν πάντα εκείνο το είδος της μαγνήτισης στο οποίο θα διατηρήσει την ολική ενέργεια του στο ελάχιστο (Butler, 2004).

### 2.2. Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)

Η μαγνήτιση των πετρωμάτων είναι το άθροισμα δύο μελών, το οποίο ισούται με:

$J = J_i + J_r$ , όπου  $J_i$  η επαγόμενη μαγνήτιση και  $J_r$  η φυσική παραμένουσα μαγνήτιση.

Η μαγνήτιση που έχει σημασία για τον τομέα του παλαιομαγνητισμού είναι η παραμένουσα μαγνήτιση, η οποία μένει στο υλικό. Αυτού του είδους η μαγνήτιση εξαρτάται από το γεωμαγνητικό πεδίο και τις γεωλογικές διεργασίες στις οποίες υπόκεινται το πέτρωμα όσο καιρό υφίσταται, ξεκινώντας από το σχηματισμό του. Η NRM αποτελεί σύνθεση πολλών μαγνητίσεων, όπως για παράδειγμα η πρωταρχική NRM, η οποία αποκτάται κατά το σχηματισμό του πετρώματος και είναι συνιστώσα που αναζητείται περισσότερο στις παλαιομαγνητικές έρευνες. Η δευτερεύουσα συνιστώσα NRM μπορεί να αποκτηθεί μεταγενέστερα, στο σχηματισμό πετρώματος και είναι ικανή να αλλάξει ή να επισκιάσει την πρωταρχική NRM. Η δευτερεύουσα συνιστώσα προστίθεται διανυσματικά στην πρωταρχική και μας οδηγεί στην συνολική NRM, η οποία περιγράφεται από τη σχέση:

$$\text{NRM} = \text{πρωταρχική NRM} + \text{δευτερεύουσα NRM}$$

Η πρωταρχική NRM έχει τρία βασικά είδη, τη θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM), τη χημική παραμένουσα μαγνήτιση (CRM) και τη ιζηματογενή παραμένουσα μαγνήτιση (DRM). Το πρώτο είδος αποκτάται κατά τη διάρκεια της ψύξης μετά από υψηλή θερμοκρασία. Η χημική χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία σιδηρομαγνητικών κόκκων κάτω από τη θερμοκρασία Curie. Η ιζηματογενής μπορεί να αποκτηθεί κατά

τη διάρκεια συσσώρευσης ιζηματογενών πετρωμάτων που περιέχουν σιδηρομαγνητικά ορυκτά. Γενικά, η πρωταρχική NRM μπορεί να καταγράψει το υπάρχον γεωμαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και να το διατηρήσει σε γεωλογικό χρόνο ακόμα και σε ιδιαίτερες καταστάσεις .

Η δευτερεύουσα NRM μπορεί να προκύψει από χημικές αλλαγές που επηρέασαν τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά, έκθεση σε κοντινές καταιγίδες ή μακρόχρονη έκθεση σε γεωμαγνητικό πεδίο μεταγενέστερο του σχηματισμού του πετρώματος (Butler, 2004).

### **2.3. Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (TRM)**

Θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση είναι η φυσική παραμένουσα μαγνήτιση που δημιουργείται κατά την ψύξη ενός υλικού με την παρουσία μαγνητικού πεδίου, αλλά σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία Curie. Ως  $T_B$  ορίζεται η θερμοκρασία φραγμού, στην οποία κλειδώνεται η θερμική παραμένουσα μαγνήτιση ενός πετρώματος για γεωλογικό χρόνο και η οποία βρίσκεται χαμηλότερα από τη θερμοκρασία Curie. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται και πλησιάζει τις τιμές της  $T_B$  ενός κόκκου μίας περιοχής (SD κόκκου), αυτός αντιλαμβάνεται μια ραγδαία αύξηση του χρόνου ηρεμίας  $\tau$  και από υπερπαραμαγνητικός γίνεται κόκκος μίας περιοχής. Σε ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο (όπως το γεωμαγνητικό πεδίο) και σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσει την κατανομή της μαγνήτισης στους σιδηρομαγνητικούς κόκκους κατά τη διάρκεια της ψύξης και με αυτό τον τρόπο να οδηγήσει στην παραγωγή παραμένουσας μαγνήτισης. Σε κανονικές θερμοκρασίες αυτή η παραμένουσα μαγνήτιση μπορεί να διατηρηθεί καθ' όλο το γεωλογικό χρόνο χωρίς να επηρεάζεται από την επίδραση μαγνητικών πεδίων μετά την αρχική ψύξη (Butler, 2004).

#### **2.3.1. Μερική Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (PTRM)**

Η συνολική θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM) χωρίζεται σε μέλη τα οποία αποκτώνται σε διακριτές θερμοκρασιακά καταστάσεις. Η ποσότητα της TRM η οποία έχει δεσμευτεί σε οποιοδήποτε σημείο  $T_B$  ονομάζεται μερική θερμοπαραμένουσα (PTRM). Η κάθε PTRM είναι δείκτης ποσότητας και η TRM είναι ο συνολικός δείκτης όλων των PTRM που προκύπτουν από όλα τα θερμοκρασιακά παράθυρα φραγμού. Μεμονωμένες PTRM εξαρτώνται μόνο από το μαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια ψύξης σχετικά με τα στοιχεία της μεμονωμένης  $T_B$ . Δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο το οποίο εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια ψύξης σε χαμηλότερες

θερμοκρασίες. Αυτό ονομάζεται νόμος της εξάρτησης της PTRM. Ένα παράδειγμα αποτελεί ένα πυριγενές πέτρωμα με κύριο σιδηρομαγνητικό ορυκτό το μαγνητίτη, το οποίο ψύχεται για να παράγει μία θερμική παραμένουσα μαγνήτιση, της οποίας ο συνολικός δείκτης των PTRM με  $T_B$ , υπολογίζεται για θερμοκρασίες που είναι από την  $T_C$  ως τη θερμοκρασία δωματίου. Αν το μαγνητικό πεδίο ήταν συνεχές καθ' όλη την αρχική ψύξη τότε τα διανύσματα των PTRM θα έχουν ίδια κατεύθυνση. Στη συνέχεια το πέτρωμα έχει αναθερμανθεί κατάλληλα, ακόμα και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία  $T_r$  η οποία είναι ενδιάμεση των  $T_C$  και της θερμοκρασίας δωματίου και μετά ψύχεται σε ένα διαφορετικό μαγνητικό πεδίο. Τότε όλα τα PTRM με θερμοκρασία  $T_B > T_r$  θα κρατήσουν την TRM καταγραφή του αρχικού μαγνητικού πεδίου. Αυτή η ικανότητα, να αφαιρεί στοιχεία της μαγνήτισης συμβαίνει σε κόκκους με χαμηλή  $T_B$  μόνο και όχι σε αυτά με  $T_B$  υψηλή (Butler, 2004).

#### 2.4. Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM)

Η χημική παραμένουσα μαγνήτιση (CRM) αφορά την απόκτηση μαγνήτισης από χημικές αλλαγές που οδηγούν σε σχηματισμό σιδηρομαγνητικών ορυκτών σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία φραγμού τους.

Χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά περιέχουν:

- Μεταβολή του προϋπάρχοντος ορυκτού σε σιδηρομαγνητικό ορυκτό
- Συμπύκνωση ενός σιδηρομαγνητικού ορυκτού από διάλυση

Η CRM συναντάται συχνότερα σε ιζηματογενή πετρώματα.

Όπως και στην TRM, μπορεί να δημιουργηθεί μια χημική παραμένουσα μαγνήτιση που θα είναι σταθερή σε γεωλογικό χρόνο. Κατά τη μεταβολή ενός σιδηρομαγνητικού ορυκτού σε ένα άλλο, αν υπάρχει μεγάλη αλλαγή στην κρυσταλλική δομή, γίνονται καταγραφές CRM της κατεύθυνσης που έχει το μαγνητικό πεδίο. Δεν επηρεάζεται δηλαδή από τη μαγνήτιση του ορυκτού που προϋπήρχε της μεταβολής. Αν όμως δεν υπάρχει αλλαγή στην κρυσταλλική δομή, τότε το αποτέλεσμα καθορίζεται από την παραμένουσα κατεύθυνση των αρχικών κόκκων.

Παράδειγμα φυσικής CRM είναι ο προκαθορισμένος σχηματισμός του αιματίτη, κυρίως στα ιζήματα ερυθρού χρώματος. Ένας τρόπος δημιουργίας CRM αποτελεί η αφυδάτωση του γκαιτίτη :  $2(a\text{FeOOH}) \rightarrow a\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$  (εξάτμιση)

Η CRM που θα καταγραφεί θα έχει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που είναι πιο κοντά με την απόθεση του αιματίτη. Αυτή θεωρείται ως πρωταρχική μαγνήτιση. Δευτερεύουσα CRM μαγνήτιση θεωρείται εκείνη που αποκτάται αρκετό διάστημα μετά την απόθεση. Για παράδειγμα, διαγενετικοί σχηματισμοί σουλφιδίων Fe και σιδηρομαγνησιούχα οξείδια σε ωκεάνια ιζήματα μπορούν να σχηματίσουν CRM (Butler, 2004).

### **2.5. Ιζηματογενής Παραμένουσα Μαγνήτιση (DRM)**

Η ιζηματογενής παραμένουσα μαγνήτιση αποκτάται κατά τη διάρκεια απόθεσης και συμπαγοποίησης ιζηματογενών πετρωμάτων. Το κυρίαρχο σιδηρομαγνητικό ορυκτό είναι ο μαγνητίτης (ή ο φτωχός σε Ti τιτανομαγνητίτης) στα περισσότερα ιζηματογενή περιβάλλοντα. Φυσικές διεργασίες που έλαβαν χώρα πριν την απόθεση, επηρεάζουν τη μαγνήτιση π.χ τουρβιδιτισμός. Μεταβολές έχουν επίσης οι χημικές διεργασίες και οδηγούν σε πιθανή μεταβολή ή αφαίρεση αρχικών ορυκτών ακόμα και στην επίσπηση της δημιουργίας νέων σιδηρομαγνητικών ορυκτών. Για τους παραπάνω λόγους, η DRM δεν προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία σχετικά με τις παλαιομαγνητικές καταγραφές στα ιζηματογενή πετρώματα.

Γενικά χωρίζεται σε μαγνητικές διεργασίες που έγιναν μετά την απόθεση (μεταποθετικές ιζηματογενείς παραμένουσες μαγνητίσεις / Pdrn) και σε αυτές που έγιναν κατά την απόθεση. Στις διεργασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της απόθεσης περιλαμβάνεται η φυσική ευθυγράμμιση που οδηγεί στην αποθετική ιζηματογενή παραμένουσα μαγνήτιση. Στις μεταποθετικές ανήκουν οι διεργασίες φυσικής ευθυγράμμισης που λαμβάνουν χώρα μετά την απόθεση αλλά πριν τη στερεοποίηση (Butler, 2004).

### **2.6. Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (VRM)**

Ιξώδης παραμένουσα μαγνήτιση είναι η παραμένουσα μαγνήτιση που σταδιακά αποκτάται κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε ασθενή μαγνητικά πεδία. Η φυσική VRM είναι η δευτερογενής μαγνήτιση που προκύπτει ως αποτέλεσμα της δράσης του γεωμαγνητικού πεδίου, πολύ μετά από τη δημιουργία του πετρώματος. Παλαιομαγνητικά η VRM συνήθως αποτελεί "θόρυβο" και αφαιρείται με τεχνικές απομαγνήτισης για να αναδειχτούν οι πρωτογενείς συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (Butler, 2004).



### 2.6.1. Απόκτηση VRM

Μετά από μετρήσεις και πειράματα δημιουργήθηκε ο παρακάτω τύπος ο οποίος περιγράφει τη VRM που αποκτάται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία:

$VRM = S \times \log t$ , όπου  $t$ = χρόνος απόκτησης,  $s$ = συντελεστής ιξώδους, ο οποίος αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας

Λόγω της λογαριθμικής ανάπτυξης της VRM ανάλογα με το χρόνο έκθεσης, η ιξώδης μαγνήτιση υπόκειται των νεώτερων μαγνητικών πεδίων. Έτσι, πετρώματα τα οποία έχουν υψηλές συνιστώσες VRM, συνήθως έχουν NRM ευθυγραμμισμένη με το παρόν γεωμαγνητικό πεδίο της περιοχής στην οποία συμβαίνει η δειγματοληψία.

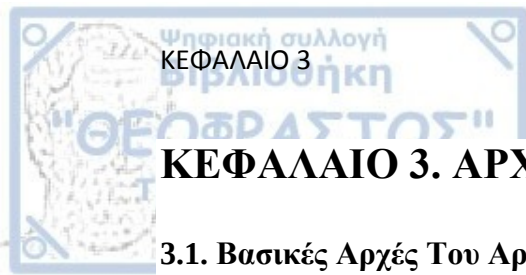
Σε φυσικά αποκτώμενη VRM ο χρόνος απόκτησης μπορεί να είναι ως και  $10^9$  έτη ή και περισσότερο. Όλοι οι κόκκοι με  $T < 10^9$  έτη μπορούν να μεταφέρουν VRM (Butler, 2004).

### 2.7. Θερμοϊξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (TVRM)

Η VRM που προκύπτει από αρκετά υψηλή θερμοκρασία ονομάζεται θερμοϊξώδης παραμένουσα μαγνήτιση (TVRM). Πετρώματα παλαιομαγνητικού ενδιαφέροντος είναι πιθανό εσωτερικά να είναι θερμά λόγω μεταμόρφωσης. Η έκθεση για μεγάλο χρονικό διάστημα σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτω από τη θερμοκρασία Curie επηρεάζει τα πετρώματα ως προς τη διατήρηση μιας πρωταρχικής NRM και τη δημιουργία TVRM. Παρ'όλα αυτά είναι πιθανό ένα τμήμα σιδήρομαγνητικών σωματιδίων των πετρωμάτων να διατηρήσει την πρωτογενή παλαιομαγνητική καταγραφή και μετά από σημαντική μεταμόρφωση (Butler, 2004).

### 2.8. Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση (IRM)

Ως IRM ορίζεται η παραμένουσα μαγνήτιση που προκύπτει από έκθεση σε ισχυρά μαγνητικά πεδία, σε σταθερή θερμοκρασία για μικρό χρονικό διάστημα. Η φυσική IRM σχηματίζεται ως δευτερεύων σκέλος της IRM από έκθεση σε παροδικά μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από αστραπές, κάτι το οποίο δημιουργεί προβλήματα στην δειγματοληψία σε περιοχές που έχουν συχνές καταιγίδες. Η IRM εργαστηριακά ορίζεται ως η μορφή της παραμένουσας μαγνήτισης που παράγεται σε πειράματα υστέρησης και αποκτάται από σιδήρομαγνητικούς κόκκους που έχουν συνεκτικότητα λιγότερη από αυτή του εφαρμοζόμενου πεδίου (Butler, 2004)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

### 3.1. Βασικές Αρχές Του Αρχαιομαγνητισμού

Ο αρχαιομαγνητισμός, είναι ο συνδυασμός της αρχαιολογίας και της γεωλογίας. Ορίζεται ως ο κλάδος του παλαιομαγνητισμού που μελετά τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης στους προϊστορικούς και ιστορικούς χρόνους. Αυτές οι μεταβολές αποτελούν την αιώνια μεταβολή, δηλαδή την αργή χρονική μεταβολή της διεύθυνσης και της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου που οφείλονται στο μη διπολικό πεδίου της Γης (Butler, 2004).

Μια βασική αρχή της φυσικής στην οποία στηρίζεται η αρχαιομαγνητική μέθοδος είναι το γεγονός ότι τα ψημένα αρχαιολογικά ευρήματα αργλικής φύσεως (π.χ αγγεία, δομικά υλικά) έχουν την ικανότητα καταγραφής και διατήρησης της διεύθυνσης και έντασης του μαγνητικού πεδίου λόγω των μαγνητικών ορυκτών που περιέχουν στη δομή τους. Τα μαγνητικά υλικά όπως είναι γνωστό χαρακτηρίζονται από την θερμοκρασία Curie, την θερμοκρασία δηλαδή που πάνω από την οποία τα μαγνητικά υλικά παύουν να είναι σιδηρομαγνητικά και συμπεριφέρονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία αυτή είναι διαφορετική για κάθε μαγνητικό υλικό. Επομένως κατά την καύση των αργλικών δομών όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την θερμοκρασία Curie όλα τα μαγνητικά υλικά βρίσκονται σε παραμαγνητική κατάσταση. Κατά την ψύξη του υλικού, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το σημείο Curie οι μαγνητικοί κρύσταλλοι περιέρχονται σταδιακά ξανά σε σιδηρομαγνητική κατάσταση και οι μαγνητικές ροπές των κόκκων προσανατολίζονται παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο που επικρατεί στην συγκεκριμένη θέση και την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτή η καταγραφή γίνεται με τη μορφή σταθερής μαγνήτισης (θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση). Αν δεν ακολουθήσει επαναθέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία, τότε η καταγραφή της διεύθυνσης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου παραμένουν στο υλικό και μπορούν να μελετηθούν εργαστηριακά. Για να μπορεί να συγκριθεί η αρχαία μαγνητική διεύθυνση με τη σύγχρονη οι αργλικές δομές δεν πρέπει να μετακινηθούν. Πρέπει δηλαδή να είναι *in situ* (Butler, 2004; Ιωαννίδης, 2010).

Η αρχαιομαγνητική μέθοδος χρησιμοποιείται για χρονολόγηση και φανερώνει την τελευταία απόθεση για τα ηφαιστειακά πετρώματα και την τελευταία καύση ενός κλιβάνου (Ιωαννίδης, 2010).



### 3.2. Κλίβανοι Κεραμικής

Η χρήση κλιβάνου ήταν ευρέως διαδεδομένη στην αρχαιότητα για πολλές χρήσεις, όπως για παράδειγμα σε μαγειρική, αγγειοπλαστική, χρυσοχοΐα, δομικά υλικά. Ειδικά για την κεραμική υπήρχε μεγάλη ζήτηση. Οι χρήσεις εκτός από μαγειρική και αποθήκευση προϊόντων ήταν και θρησκευτικές, ως δώρα/ανταλλάγματα σε τελετουργίες, αλλά και ως δομικά υλικά (σωλήνες, κεραμίδια, τούβλα) (Δελαβίνιας, 2011; Ράπτης, 2001).

Μια αρχική προσπάθεια φούρνου ήταν οι ανοιχτού τύπου φούρνοι όπου τοποθετούνταν η καύσιμη ύλη σε ένα λάκκο στο έδαφος και από πάνω της τα αγγεία. Δεν ήταν επιτυχής γιατί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα αγγεία καταστρεφόντουσαν από την έλλειψη σταθερής θερμοκρασίας (Δελαβίνιας, 2011).

Αυτό το γεγονός οδήγησε στη δημιουργία κλειστών δομών. Οι πρώτοι αρχαιοελληνικοί κλίβανοι χρησιμοποιήθηκαν για κατασκευή κεραμικής αγγειοπλαστικής (Δελαβίνιας, 2011).

Η ονομασία του κλιβάνου ποικίλει στην αρχαιότητα. Έχουν συναντηθεί ονομασίες όπως ίπνος, κρίβανος (κλίβανος), πνιγύς, κάμινος. Η πιο ολοκληρωμένη αναφορά σε αρχαίο κείμενο σχετικά με κλίβανο αποτελεί ένα ποίημα του Ψευδο-Ηροδότου (Δελαβίνιας, 2011).

Ο υπό μελέτη κλίβανος στην παρούσα εργασία είναι ένας κλίβανος παραγωγής κεραμικών.

Οι προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός κλιβάνου ήταν πολλές. Για παράδειγμα η επιλογή θέσης κατασκευής έπρεπε να είναι σε μαλακό χώμα και σε κοντινή απόσταση να υπάρχει επαρκής ποσότητα σε νερό και καύσιμη ύλη. Τα εργαστήρια κεραμικής τη βυζαντινή περίοδο βρισκόντουσαν συνήθως εντός πόλεων, σε περιοχές κοντά στα τείχη, όπως στην περιοχή μελέτης (σχήματα 13, 14) ή ακόμα σε αραιοκατοικημένα τμήματα πόλεων με εργαστηριακή δραστηριότητα (Δελαβίνιας, 2011).

Για την απόκτηση της πρώτης ύλης, τον πηλό, σκαβόντουσαν ανοικτοί λάκκοι επιφανειακά σε σημεία με αργιλώδες έδαφος. Η επεξεργασία συνεχιζόταν σε κοντινή περιοχή, όπου γινόταν καθάρισμα από ξένα σώματα και το διάλυμα τυχόν σβώλων που μπορεί να υπήρχαν. Μετά βυθιζόταν σε δεξαμενές με νερό, έτσι ώστε να ξεχωριστεί σε τρία μέρη, από τα οποία το μεσαίο τμήμα είναι μάζα καθαρού πηλού και τοποθετούνταν σε ξεχωριστές δεξαμενές. Αφού εξατμιζόταν το νερό, κοβόταν σε πλάκες και αποθηκευόταν μέχρι να ωριμάσει (Ράπτης, 2001).

Για να επιτευχθεί το ψήσιμο σταδιακά αναπτύσσονταν υψηλές θερμοκρασίες μέχρι να φτάσει η θερμοκρασία τους  $800^{\circ} - 950^{\circ} \text{C}$ . Η διαδικασία ξεκινούσε με προθέρμανση στους  $300^{\circ} - 500^{\circ} \text{C}$  και με αυτόν τον τρόπο στέγνωνε πλήρως από υπολειπόμενη υγρασία ο πηλός και καιγόntonτουσαν τα οργανικά του μέρη. Η όπτηση ουσιαστικά λάμβανε χώρα στους  $500^{\circ} - 600^{\circ} \text{C}$  και έπειτα από ώρες ολοκληρωνόταν στους  $800^{\circ} - 950^{\circ} \text{C}$  (Ράπτης, 2001).

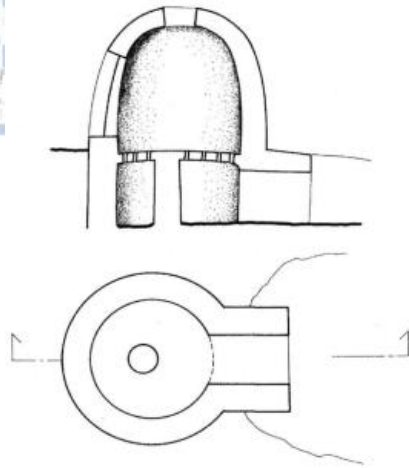
Στην αρχή της διαδικασίας υπάρχει συνεχή τροφοδοσία και υποδαύλιση της φωτιάς, αλλά όταν αποκτηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία αυτό σταματάει και ξεκινούσε η ανόπτηση του κλιβάνου. Ακολουθώντας τα προϊόντα παραμέναν στον κλίβανο για μία μέρα έτσι ώστε να ψυχθούν σταδιακά και να αποφευχθεί σπάσιμο της κεραμικής (Ράπτης, 2001).

Το σχήμα του κλιβάνου κεραμικής μπορεί να είναι κυκλικό, ελλειψοειδές ή και ορθογώνιο και το μέγεθος ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες παραγωγής (σχήματα 8, 9, 10). Ο αρχαίος ελληνικός φούρνος είχε δύο χώρους έναν υπόγειο στον οποίο γινόταν η καύση και έναν άνω χώρο όπου τοποθετούνταν τα κεραμικά (σχήμα 11). Έτσι, γίνεται χρήση της κατακόρυφης κίνησης της θερμότητας, από τον κατώτερο στον ανώτερο θάλαμο. Ο θάλαμος καύσης συνήθως ήταν υπόγειος κτισμένος από πηλό και εσωτερικά μονωμένος με νωπό στρώμα πηλού ή λάσπης, το οποίο ψηνόταν και σταθεροποιούνταν κατά τη διάρκεια της πρώτης χρήσης του κλιβάνου. Αν δεν ήταν υπόγειος υπήρχε ένα επιπλέον στρώμα μόνωσης εξωτερικά για να μειωθούν όσο το δυνατόν οι απώλειες θερμοκρασίας (Ράπτης, 2001).

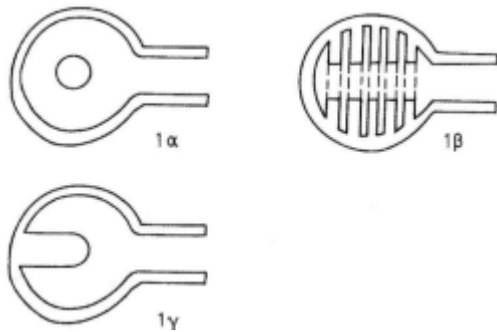
Η δίοδος τροφοδοσίας κατασκευαζόταν στο πιο προστατευμένο σημείο από τους ανέμους.

Ο θάλαμος οπτήσεως αποτελείται από την εσχάρα ή "μπατό" που τον ενώνει και τον χωρίζει ταυτόχρονα από το θάλαμο καύσης. Πάνω στην εσχάρα τοποθετούνταν τα κεραμικά. Είναι κατασκευασμένη από παχύ στρώμα πηλού και είναι κυκλική ή με αξονικό στήριγμα ή έχει εγκάρσια της πλευρικούς διαύλους (σχήμα 9) (Δελαβίνιας, 2011; Ράπτης, 2001).

Ένα τμήμα του κλιβάνου το οποίο σπανίως σώζεται είναι ο θόλος. Κατασκευαζόταν από πλίνθους και πηλό. Ο θόλος φιλοξενούσε καμινάδα για την εξαγωγή καπνού και μία οπή, η οποία έκλεινε προσωρινά και χρησιμοποιούνταν σαν σημείο παρατήρησης της λειτουργίας του κλιβάνου (Δελαβίνιας, 2011).

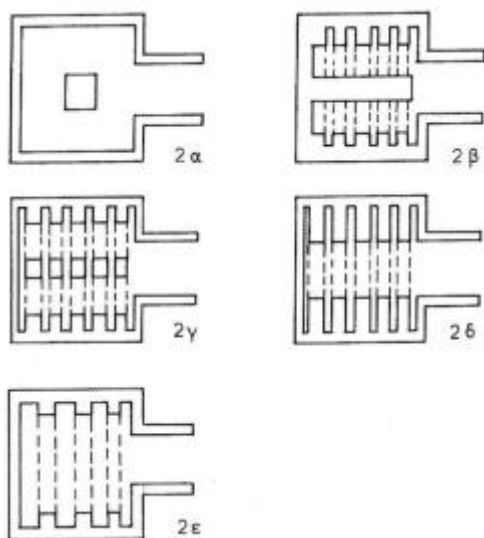


**Σχήμα 8.** Κάτοψη και πλαϊνή όψη κυκλικού, (Ράπτης, 2001).

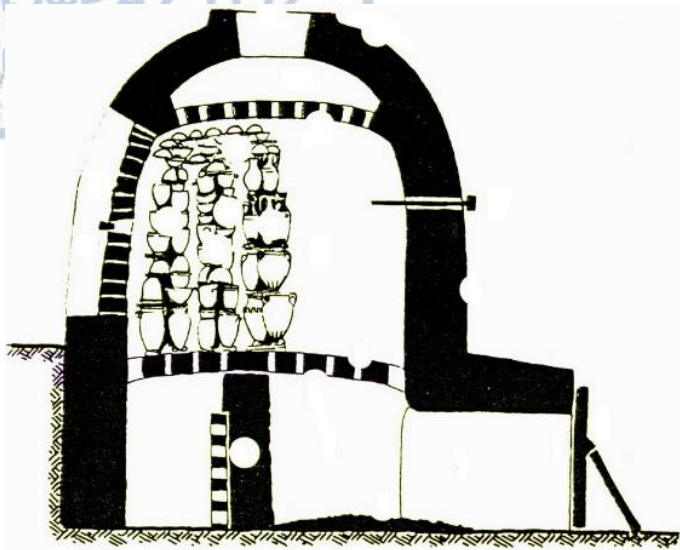


**Σχήμα 9.** Απεικονίσεις τύπων κυκλικών κλιβάνων

1α. Με κεντρικό υποστύλωμα. 1β. Με κεντρικό διάδρομο καύσης και εγκάρσια του πλευρικούς διαύλους. 1γ. Με αξονικό στήριγμα, (Ράπτης, 2001).



**Σχήμα 10.** Κλίβανοι δύο χώρων ορθογώνιου, (Ράπτης, 2001).



**Σχήμα 11.** Κυκλικός κλίβανος δύο χώρων, (Δελαβίνιας, 2011).

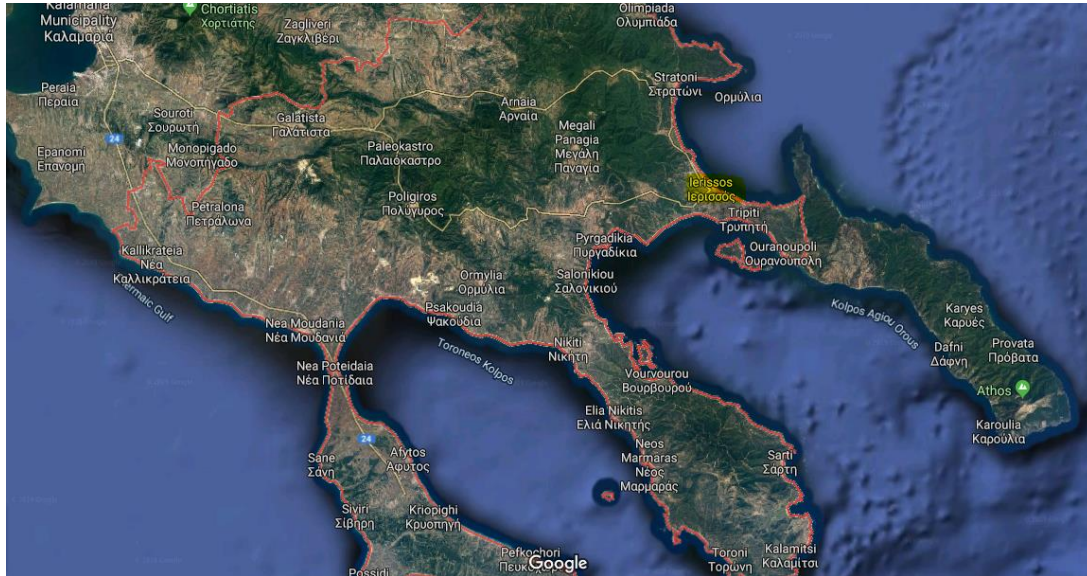
Ένα παράδειγμα σύγχρονου κλιβάνου από την περιοχή του Μανταμάδου Λέσβου (σχήμα 12), με παράδοση στην κατασκευή κεραμικών, μας δείχνει πως οι σύγχρονοι κλίβανοι κατασκευάζονται και λειτουργούν πάνω στις ίδιες αρχές με τους αρχαίους (Δελαβίνιας, 2011).



**Σχήμα 12.** Φωτογραφία από κλίβανο κεραμικής στο Μανταμάδο Λέσβου, (Δελαβίνιας, 2011).

#### 4.1. Ιερισσός/Αρχαία Άκανθος

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας βρίσκεται στην Ιερισσό Χαλκιδικής (σχήμα 13).



**Σχήμα 13.** Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Χαλκιδικής. Με κίτρινο χρώμα επισημαίνεται η περιοχή της Ιερισσού, (Google maps).

Η περιοχή της Ιερισσού κατά την αρχαιότητα ήταν γνωστή και ως αρχαία Άκανθος (σχήμα 14). Από γεωλογικής απόψεως η περιοχή της Ιερισσού, με βάση το φύλλο Ιερισσού (σχήμα 15) έχει αλλούβιες αποθέσεις κοντά στη θάλασσα (συμβολισμός με λευκό χρώμα), κόκκινη άργιλο (συμβολισμός με κίτρινο χρώμα) και βιοτιτικό-μοσχοβιτικό γρανίτη (συμβολισμός με σομόν χρώμα). Η κόκκινη άργιλος αποτελεί ιδανική πρώτη ύλη για την αγγειοπλαστική.





**Σχήμα 14.** Χάρτης της αρχαίας Ακάνθου. Αποτυπώνεται η αρχαία πόλη, ο αρχαίος λιμένας, το κάστρο, ο σύγχρονος οικισμός, τα νεκροταφεία και η βιοτεχνική ζώνη, (Παπουτσάκης, 2016).



**Σχήμα 15.** Γεωλογικός χάρτης Ιερίσσου

Η τοποθεσία της αρχαίας Ακάνθου ήταν στο Στρυμωνικό κόλπο, στο σημείο του σύγχρονου κόλπου της Ιερισσού. Ιδρύθηκε περίπου το 7<sup>ο</sup> αιώνα από Ίωνες. Αναφέρεται ως αποικία των Ανδρίων από το Θουκυδίδη και το Στράβωνα. Σε έκταση κάλυπτε περίπου 550 στρέμματα, σε τρεις λόφους του Στρατονικού όρους στα νοτιοανατολικά του οικισμού της Ιερισσού (Wikipedia).

Πήρε το όνομά της από τα πολλά αγκάθια που υπήρχαν στην περιοχή ή από την οχύρωση της πόλης που είχε ακανθώδη σχηματισμό. Το όνομα Ιερισσός προέρχεται από την ονομασία Eriçius, δηλαδή Ερισσός που προσέδωσαν οι Ρωμαίοι στην περιοχή μετά το 199 π.Χ που την λεηλάτησαν (Wikipedia).

Η αρχαία Άκανθος είχε εργαστήρια κεραμικής ανάμεσα στο νεκροταφείο και την πόλη. Η παραγωγή κεραμικών προϊόντων ήταν μεγάλη σε αριθμό και αυτό εξηγείται από τον αριθμό των σημερινών ευρημάτων από τις ανασκαφές και από την εύρεση πολυάριθμων κλιβάνων. Στα εργαστήρια αγγειοπλαστικής κατασκευάζονταν μεταξύ άλλων αμφορείς για χρήση σε συμπόσια και για μεταφορά του φημισμένου ακάνθιου οίνου. Ξακουστή ήταν επίσης για το αλάτι της (Ευγενικός, Π., κ.α. 2014; Δήμος Αριστοτέλη Χαλκιδικής; Φίλης, 2012).

Σημαντικό τμήμα της πόλης αποτελούσε το λιμάνι, από το οποίο σώζονται τμήματα του κρηπιδώματος στην παραλία της Ιερισσού. Η αρχαία Άκανθος αποτελούσε κέντρο εμπορίου και με τη χρήση του λιμανιού της και τη στρατηγική της θέση είχε αναπτυγμένες πολιτισμικές επαφές με βυζαντινά κέντρα όπως την Κωνσταντινούπολη, την Αθήνα αλλά και πόλεις όπως η Κόρινθος (Ευγενικός, Π., κ.α. 2014).

Η πόλη ήταν ανεξάρτητη και έκοβε τα δικά της νομίσματα από το 530 π.Χ περίπου. Σε περίοδο ακμής ήταν από το δεύτερο μισό του 10<sup>ου</sup> αιώνα ως το τέλος του 11<sup>ου</sup> αιώνα αυτό αποτυπώνεται από τα νεκροταφεία της εποχής. Οι κάτοικοι της πόλης είχαν τη δυνατότητα να εξασκήσουν και άλλες εργασίες εκτός από τις αμιγώς γεωργικές (Ευγενικός, Π., κ.α. 2014; Wikipedia).

Κατά την εποχή των Κομνηνών και μέχρι το 12<sup>ο</sup> αιώνα παρακαμάζει σταδιακά η Ιερισσός και δεν υπάρχει πληθώρα ευρημάτων εξωτερικά του κάστρου (Τσανανά, 2019).



## 4.2. Περιοχή Μελέτης

Κατά τη διάρκεια αρχαιολογικής σωστικής ανασκαφής στην περιοχή μελέτης, βρέθηκαν σε μεγάλο αριθμό ράβδοι κεραμικού κλιβάνου. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την παρουσία φούρνων στην περιοχή, που με βάση την αρχαιολογική μελέτη χρονολογούνται περίπου στον 11<sup>ο</sup> αιώνα. Αυτή την χρονική περίοδο, βυζαντινή, το σχήμα των κεραμικών κλιβάνων που χτιζόταν και χρησιμοποιούνταν ήταν οι κυκλικοί/ελλειψοειδείς κλίβανοι κεραμικής, όπως και ο κλίβανος μελέτης (σχήμα 17) (Ράπτης, 2001).

Παρακάτω ακολουθούν λεπτομερείς απεικονίσεις του κλιβάνου μελέτης.



**Σχήμα 16.** Φωτογραφία ανασκαφής τμήματος του κάστρου της Ιερισσού παρακειμένως στον κλίβανο μελέτης, (Τσανανά, 2019).



**Σχήμα 17.** Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, στο σημείο της αρχαιολογικής ανασκαφής

#### **4.3. Δειγματοληψία – Εργαστηριακά Πειράματα – Επεξεργασία Αποτελεσμάτων**

Τα δείγματα που πάρθηκαν από το σημείο μελέτης στην περιοχή της Ιερισσού επιλέχθηκαν, από 9 διαφορετικά σημεία του κλιβάνου και συμβολίζονται με το όνομα IERA (σχήματα 18-23). Σωστή δειγματοληψία θεωρείται αυτή στην οποία τα δείγματα βγαίνουν απόφια, χωρίς να απουσιάζει μεγάλο τμήμα τους.





**Σχήμα 18.** Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης



**Σχήμα 19.** Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, δείγματα IERA 1,2





**Σχήμα 20.** Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, δείγματα IERA 3,4,5



**Σχήμα 21.** Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, δείγμα IERA 5





Σχήμα 22. Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, δείγματα IERA 6,7,8



Σχήμα 23. Φωτογραφία του κλιβάνου μελέτης, δείγματα IERA 8,9



Τα τεμάχια 1 ως 9 του κλιβάνου πάρθηκαν από την περιοχή μελέτης και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο.

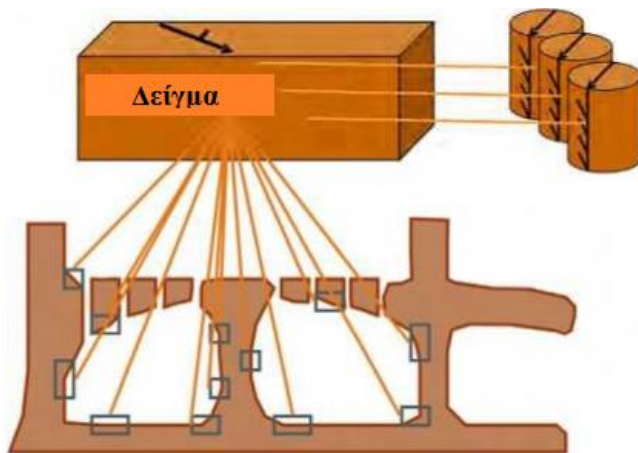
Πριν τη μεταφορά των τεμαχίων στο εργαστήριο έγινε η οριζοντίωση τους. Φτιάχτηκε γύψος και καλύφθηκαν τα δείγματα. Πριν ο γύψος στεγνώσει γίνεται η οριζοντίωση με μία πλακέτα από plexiglas χρησιμοποιώντας μία στάθμη. Γίνεται χρήση της μαγνητικής πυξίδας για να σχεδιάσουμε τη διεύθυνση του Βορρά πάνω στο γύψο (De Marco, 2007).

Μετά χρησιμοποιήθηκε η ηλιακή πυξίδα (σχήμα 24).



**Σχήμα 24.** Η διαδικασία γυψοποίησης και οριζοντίωσης των δειγμάτων (De Marco, 2007).

Στη συνέχεια τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο. Ο τρόπος λήψης των κυλινδρικών πυρήνων που μελετώνται στο εργαστήριο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 25) .



**Σχήμα 25.** Λήψη πυρήνων από δείγμα κλιβάνου για εργαστηριακή μελέτη, (τροποποίηση από Χίνης, 2016).

Από αυτή τη διαδικασία αποκτήσαμε 147 κυλινδρικά 'αρχαιομαγνητικά' δείγματα. Κάθε κυλινδρικός πυρήνας έχει μήκος 2,5 εκατοστά. Τα κυλινδρικά δείγματα της συγκεκριμένης μελέτης απεικονίζονται παρακάτω (σχήμα 26).



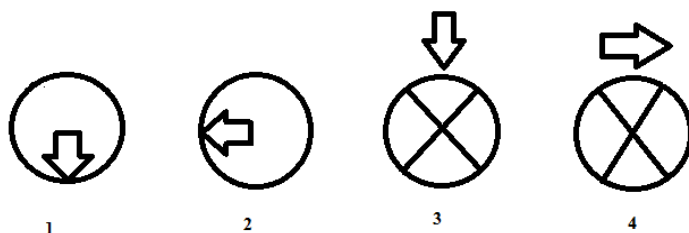


**Σχήμα 26.** Κυλινδρικοί πυρήνες- δείγματα από τον κλίβανο μελέτης της Ιερισσού

Μετρήθηκε σε κάθε δείγμα η Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM) με τη χρήση περιστροφικού μαγνητόμετρου (σχήμα 27). Πριν την τοποθέτηση κάθε δείγματος στο μηχάνημα, πρέπει να αφαιρεθεί οποιαδήποτε περιττή σκόνη και χώμα για να διενεργηθεί η σωστότερη δυνατή μέτρηση. Για τη μέτρηση τοποθετείται το δείγμα-κυλινδρικός πυρήνας στις τέσσερις διαφορετικές θέσεις, όπως στο σχήμα παρακάτω (σχήμα 28).



**Σχήμα 27.** Περιστροφικό μαγνητόμετρο Minispin, Εργαστήριο Γεωφυσικής ΑΠΘ



**Σχήμα 28.** Θέση των πυρήνων στο περιστροφικό μαγνητόμετρο, με βάση την κατεύθυνση που δείχνει το εργαστηριακό βέλος όταν ο πυρήνας βρίσκεται μέσα στο περιστροφικό μαγνητόμετρο

Πιο αναλυτικά, έγινε μέτρηση της απόκλισης, η γωνία που υπάρχει μεταξύ μαγνητικού και του γεωγραφικού βορρά-νότου (declination), της έγκλισης, η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και του οριζόντιου επιπέδου (inclination) και της έντασης της μαγνήτισης (intensity).

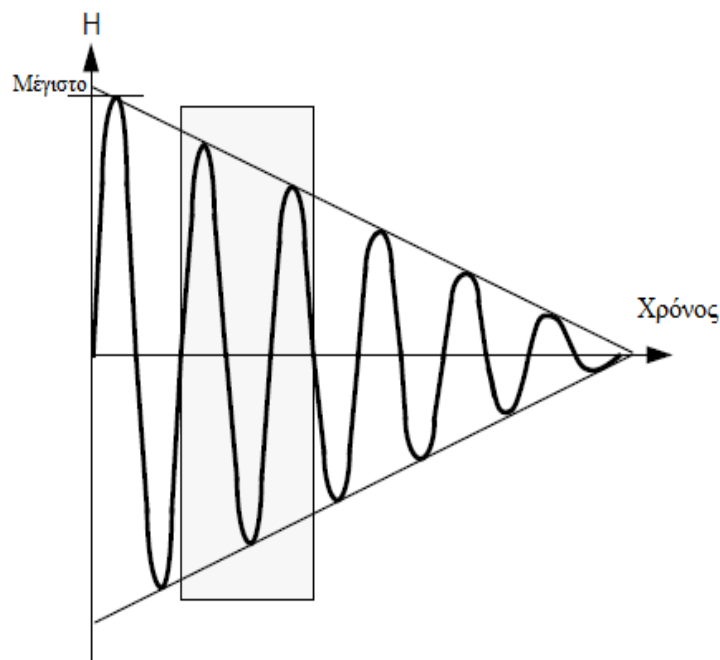
Στη συνέχεια ακολούθησε η απομαγνήτιση. Η απομαγνήτιση έγινε με χρήση εναλασσόμενου πεδίου (AF) (σχήμα 29). Το δείγμα ουσιαστικά τοποθετείται σε πηνίο. Η διαδικασία απομαγνήτισης ακολουθείται και για τους τρεις άξονες του κάθε δείγματος. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η αφαίρεση θορύβων και τυχόν δευτερευουσών μαγνητίσεων. Σε κάθε στάδιο απομαγνήτισης γινόταν μέτρηση της υπολειπόμενης μαγνήτισης των δειγμάτων με τη χρήση του περιστροφικού μαγνητομέτρου και παρατηρήθηκε η αναμενόμενη μείωση της έντασης της μαγνήτισης.



**Σχήμα 29.** Απομαγνητιστής εναλασσόμενου πεδίου (AF)

Ως βασική διαδικασία απομαγνήτισης εναλλασόμενου μαγνητικού πεδίου (AF) θεωρείται η έκθεση ενός δείγματος σε ένα εναλλασόμενο μαγνητικό πεδίο.

Στα περισσότερα AF μηχανήματα απομαγνήτισης υπάρχει ένα τύμπανο που περιστρέφει το δείγμα μέσα σε διαφορετικά εδραζόμενα γρανάζια και επιτρέπεται η απομαγνήτιση σε όλους τους άξονες του δείγματος. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 30) απεικονίζεται η απομαγνήτιση εναλλασόμενου πεδίου με τη κυματομορφή του μαγνητικού πεδίου να φθίνει όσο περνάει ο χρόνος και το μέγιστο εύρος είναι με  $H_{AF}$  (Butler, 2004).



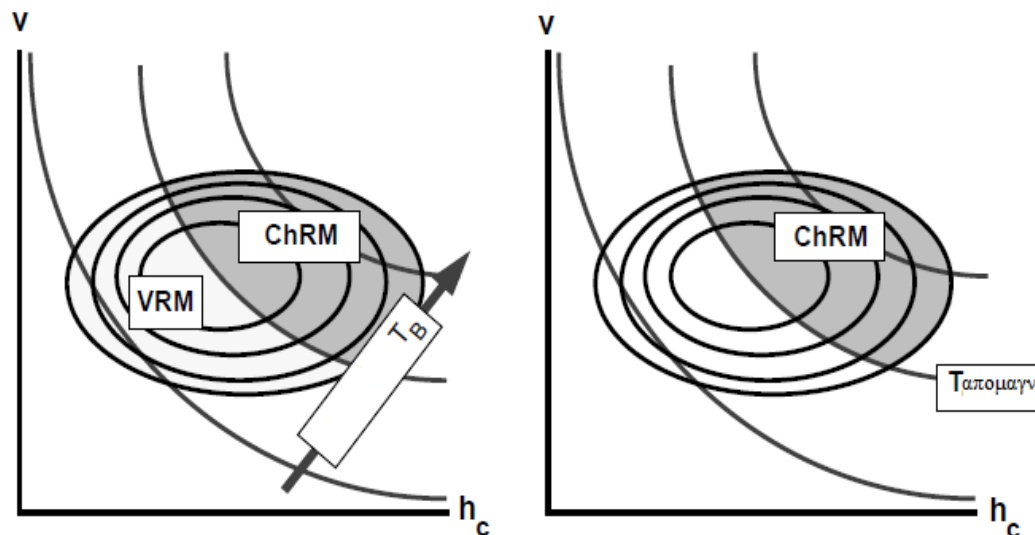
**Σχήμα 30.** Όσο περνάει ο χρόνος, τόσο μειώνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου (τροποποίηση από Butler, 2004).

Η AF απομαγνήτιση είναι συνήθως αποτελεσματική στο να αφαιρεί τη δευτερεύουσα NRM που υπάρχει σε κόκκους με συνεκτικότητες μικρότερες από τη μέγιστη τιμή απομαγνήτισης. Επίσης, περιορίζει τη χαρακτηριστική NRM (ChRM) σε πετρώματα που έχουν ως κυρίαρχο σιδηρομαγνητικό ορυκτό τον τιτανομαγνητίτη (Butler, 2004).

#### 4.4. Θεωρία Θερμικής Απομαγνήτισης

Η θερμική απομαγνήτιση ως διαδικασία αναφέρεται στη θέρμανση ενός δείγματος σε υψηλή θερμοκρασία, κάτω από τη θερμοκρασία Curie των περιλαμβανόμενων σιδηρομαγνητικών ορυκτών, ακολούθως τη ψύξη του σε θερμοκρασία δωματίου σε

συνθήκες μηδενικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό προκαλεί σε όσους κόκκους με θερμοκρασία φραγμού μικρότερη ή ίση με τη θερμοκρασία απομαγνήτισης ( $T_B < T_{\text{απομαγνήτισης}}$ ) να αποκτήσουν θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση με  $H=0$ . Έτσι σβήνεται η NRM που είχαν αποκτήσει πρωταρχικώς. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 31), αποτυπώνεται η θεωρία της επιλεκτικής αφαίρεσης της δευτερεύουσας NRM με μερική θερμική απομαγνήτιση (Butler, 2004).



**Σχήμα 31.** Επιλεκτική αφαίρεση δευτερεύουσας NRM με μερική θερμική απομαγνήτιση, (τροποποίηση από Butler, 2004).

#### 4.5. Μέθοδοι Σταδιακής Απομαγνήτισης

Η κατανομή διάφορων διευθύνσεων της NRM δίνει πληροφορίες για την παρουσία δευτερευόντων συνιστωσών. Η σιδηρομαγνητική ορυκτολογία βοηθά στην επιλογή της τεχνικής απομαγνήτισης που θα επιλεγεί για την απομόνωση των συνιστωσών της.

Η γενική διαδικασία στη σταδιακή απομαγνήτιση είναι η τμηματική απομαγνήτιση ενός δείγματος σε σταδιακά υψηλότερα επίπεδα, υπολογίζοντας την υπολειπόμενη NRM μετά από κάθε απομαγνήτιση.

Μια πρακτική που ακολουθείται γενικά είναι η υποβολή σε βαθμιαία AF απομαγνήτιση κάποιων δειγμάτων και η βαθμιαία θερμική απομαγνήτιση στα υπολειπόμενα δείγματα. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που απορρέουν και από τις δύο τεχνικές απομαγνήτισης. Το ζητούμενο είναι να αποκαλυφθούν οι συνιστώσες της NRM που έχουν μεταφερθεί από σιδηρομαγνητικούς κόκκους με ιδιαίτερο διάστημα συνεκτικότητας ή θερμοκρασία φραγμού. Σχετικά με



την αντίσταση στην απομαγνήτιση οι συνιστώσες χαμηλής σταθερότητας απομαγνητίζονται εύκολα ενώ αυτά με υψηλή σταθερότητα αφαιρούνται μόνο σε υψηλού επιπέδου απομαγνήτιση. Όσον αφορά τα επίπεδα απομαγνήτισης οι συνεκτικότητες είναι κατανεμημένες έτσι ώστε να υπάρχει αρχικά μικρή άνοδος στα μέγιστα της AF απομαγνήτισης η οποία να ακολουθείται από μεγαλύτερες ανόδους σε υψηλότερα επίπεδα. Τυπικά στάδια μίας AF απομαγνήτισης είναι η ακόλουθη με μέγιστα στα 10, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800 και 1000 Oe. Στη σταδιακή θερμική απομαγνήτιση, τα βήματα θερμοκρασίας είναι κατανεμημένα ανάμεσα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην υψηλότερη Curie θερμοκρασία. Ένας σύνηθες τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν σαν στάδια θερμοκρασίες από 50°C και πάνω ως 100°C σε χαμηλές θερμοκρασίες αλλά με μικρές διαφορές, μπορεί και 5°C, με διαφορά 100°C από τη θερμοκρασία Curie. Το αποτέλεσμα από ένα πείραμα σταδιακής απομαγνήτισης είναι ένα πακέτο από μετρήσεις NRM που έχουν παραμείνει μετά την αύξηση των επιπέδων απομαγνήτισης. Για την ανάλυση τους πρέπει να γίνει προβολή των σταδιακών αλλαγών της διεύθυνσης κατεύθυνση και της έντασης της μαγνήτισης της NRM (Butler, 2004).

#### 4.6. Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)

Συχνά παρουσιάζεται σημαντική διασπορά στα διαγράμματα των διανυσματικών συνιστωσών. Συμβαίνει σε πετρώματα με χαμηλή μαγνήτιση και σε πετρώματα των οποίων η ChRM καταλαμβάνει μικρό ποσοστό στη συνολική NRM. Για να οριστεί η κατεύθυνση της καταλληλότερης ευθείας ανάμεσα στις διασκορπισμένες παρατηρήσεις δημιουργήθηκε το σύστημα της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών (Butler, 2004).

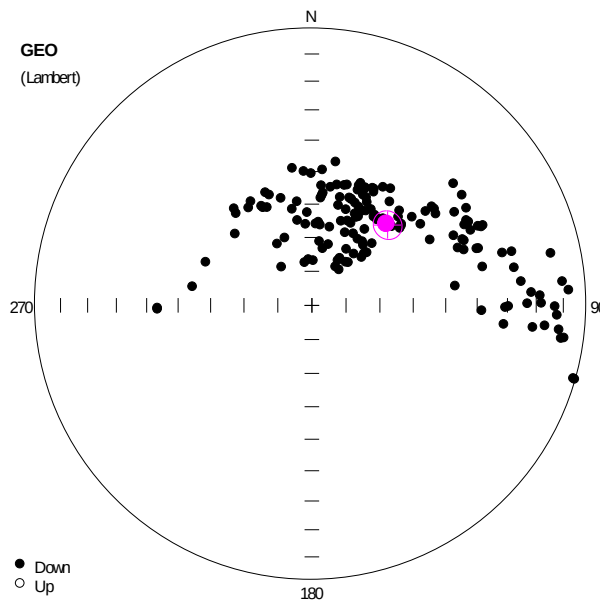
Με την χρήση του προγράμματος Remasoft έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων. Αρχικά δόθηκαν οι συντεταγμένες των δειγμάτων όπως μετρήθηκαν στην ύπαιθρο και με αυτόν τον τρόπο διορθώθηκαν οι τιμές της απόκλιση και της έγκλισης.

Ακολούθως, δημιουργήθηκαν διαγράμματα Zijderveld από τα οποία ήταν δυνατόν να υπολογισθεί η τιμή της Κύριας Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM) για τα δείγματα στα οποία έγινε απομαγνήτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

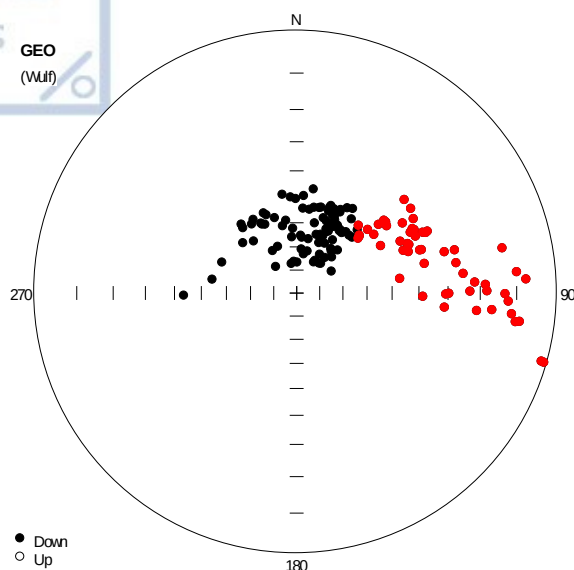
## 5.1. Αρχαιομαγνητικά Αποτελέσματα

Για όλα τα κυλινδρικά δείγματα (147) μετρήθηκε η NRM. Οι μετρήσεις αυτές απεικονίζονται στην παρακάτω στερεογραφική προβολή (σχήμα 32).



**Σχήμα 32.** Στερεογραφική προβολή των NRM των δειγμάτων. Με το ροζ χρώμα σημειώνεται η μέση τιμή των δειγμάτων.

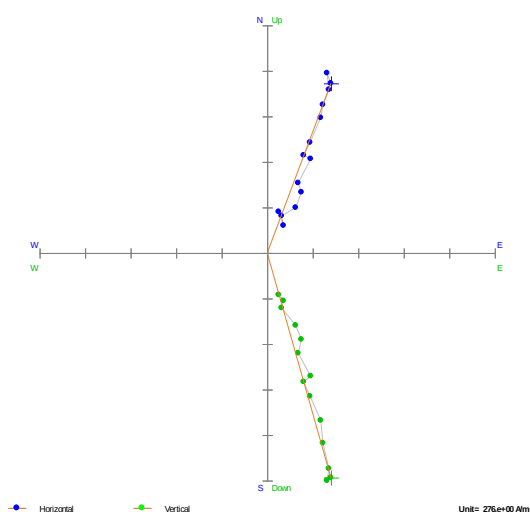
Στο παραπάνω σχήμα (σχήμα 32) φαίνεται ότι υπάρχει μία μεγάλη διασπορά των διευθύνσεων γύρω από την μέση τιμή (ροζ τελεία), που δηλώνει ότι όλα τα δείγματα δεν έχουν καταγράψει σωστά την κύρια διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 33), τα αρχαιομαγνητικά δείγματα που προέκυψαν από τα τεμάχια 5 και 8 και απεικονίζονται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα είναι αυτά που δεν έχουν καταγράψει αξιόπιστα το μαγνητικό πεδίο. Αυτό συνέβη είτε λόγω μετακίνησης τους μετά την τελευταία ψύξη τους, είτε λόγω της ελλιπούς θέρμανσής τους κατά την διάρκεια λειτουργίας του κλιβάνου. Σε κάθε περίπτωση αυτά τα δείγματα αποκλείστηκαν και δεν χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω στην αρχαιομαγνητική μελέτη.



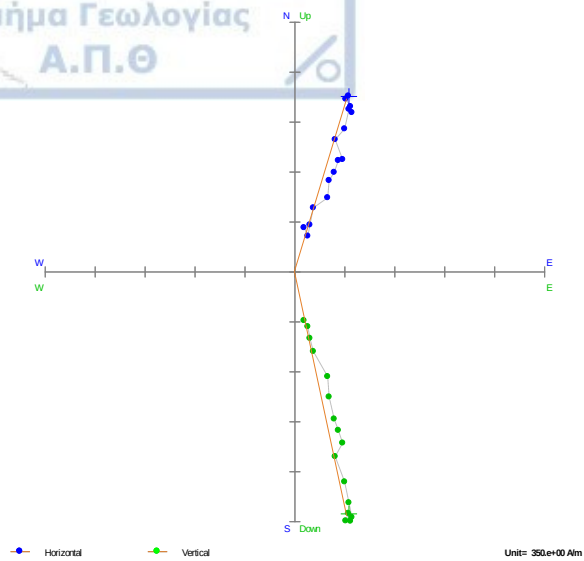
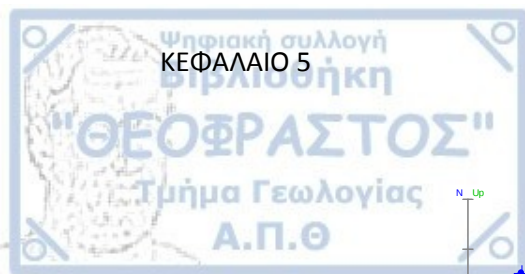
**Σχήμα 33.** Στερεογραφική προβολή. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι ομάδες 5 και 8.

Απομαγνήτιση έγινε για τα δείγματα από τις ομάδες 1, 2, 3, 6, 7, 9. Συγκεκριμένα, απομαγνητίστηκαν τα παρακάτω δείγματα: 1b, 1g, 2Ba, 2Bc, 3Ba, 3Bf, 3Cc, 6d, 6g, 7g, 7i, 9Ah, 9Ba. Η απομαγνήτιση έγινε στα εξής στάδια απομαγνήτισης 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 999 Oe.

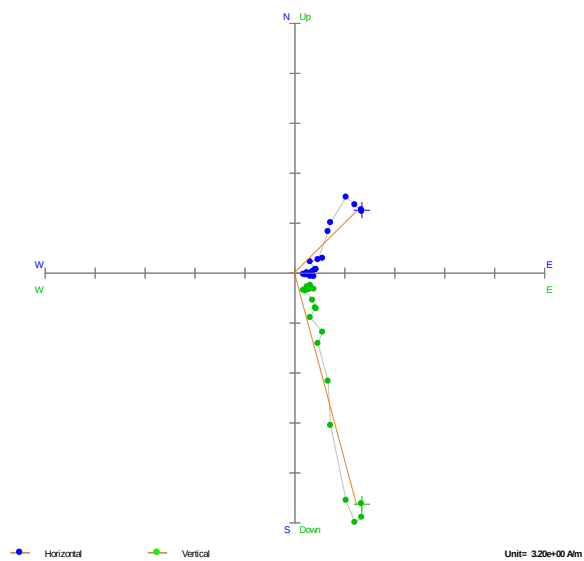
Κάποια δείγματα δεν απομαγνητίστηκαν πλήρως λόγω της παρουσίας σκληρών μαγνητικών ορυκτών όπως π.χ αιματίτης.



**Σχήμα 34.** Δείγμα 1B

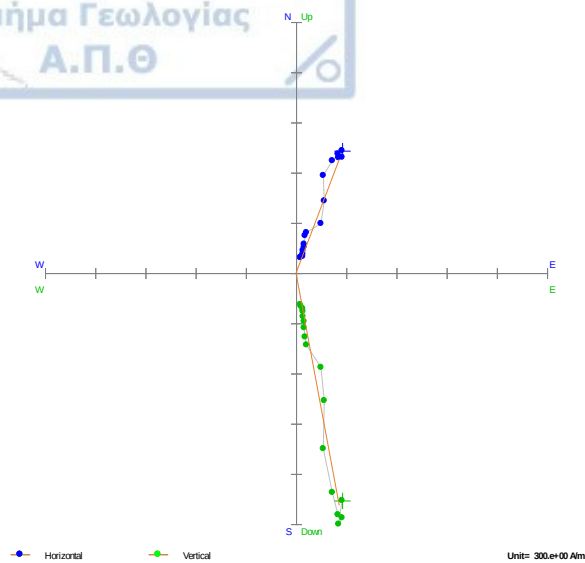


Σχήμα 35. Δείγμα 1g

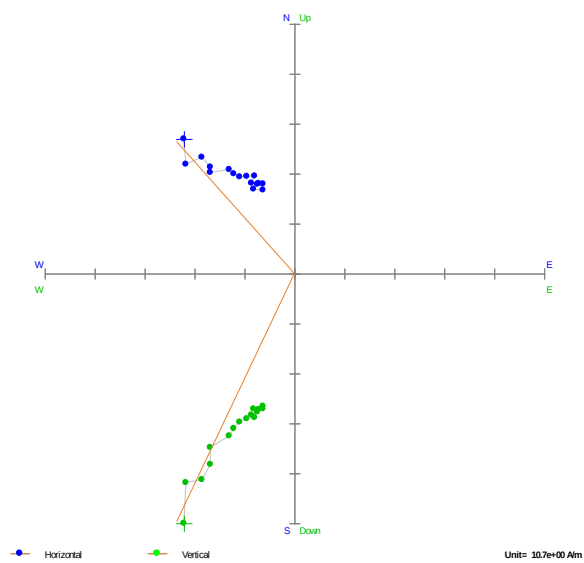


Σχήμα 36. Δείγμα 2Ba

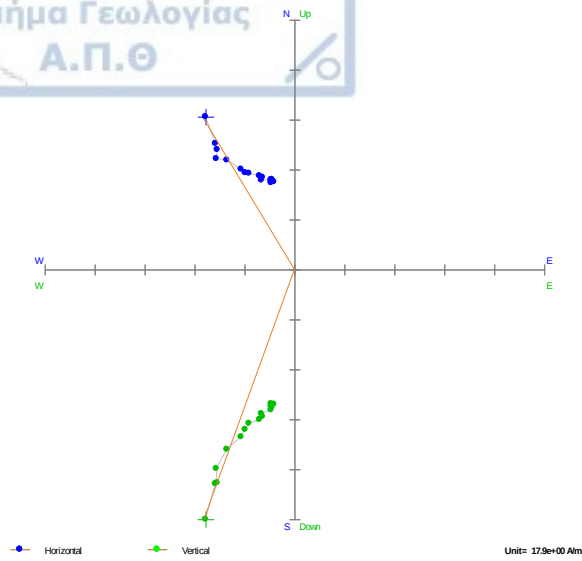




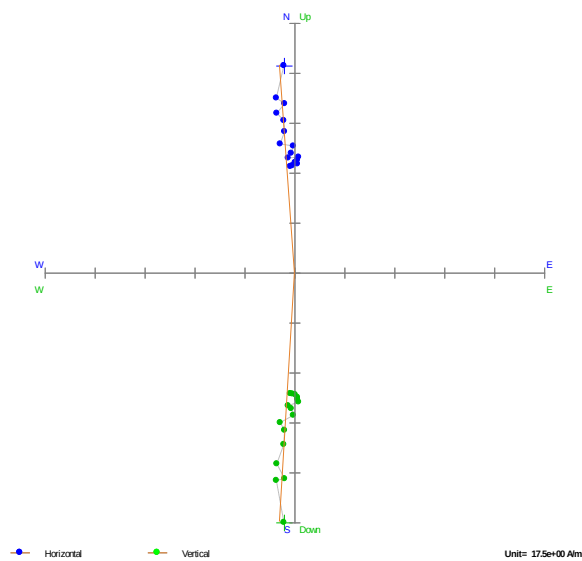
Σχήμα 37. Δείγμα 2Bc



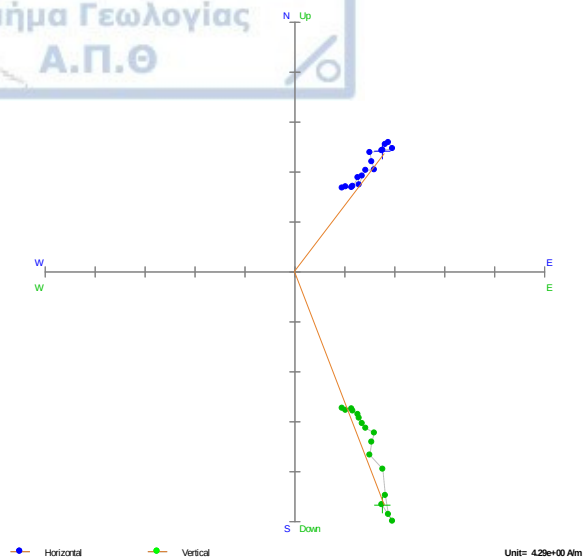
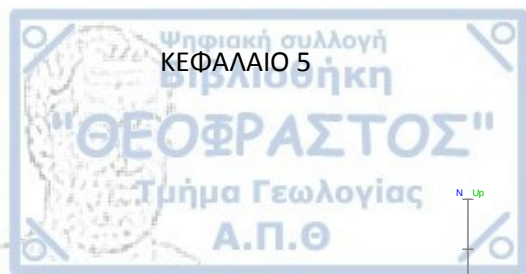
Σχήμα 38. Δείγμα 3Ba



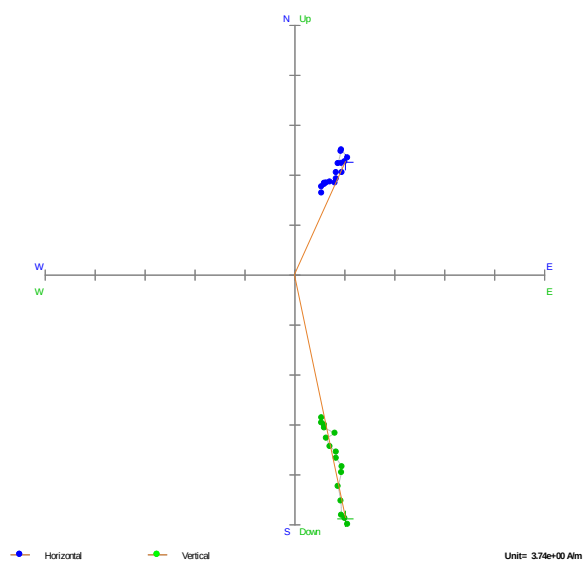
Σχήμα 39. Δείγμα 3Bf



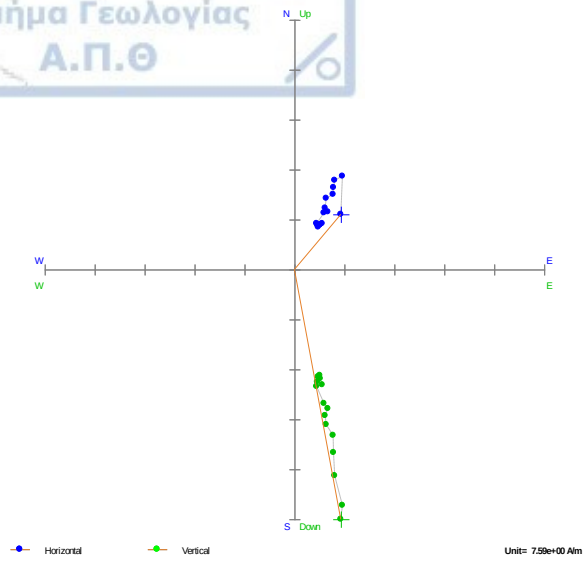
Σχήμα 40. Δείγμα 3Cc



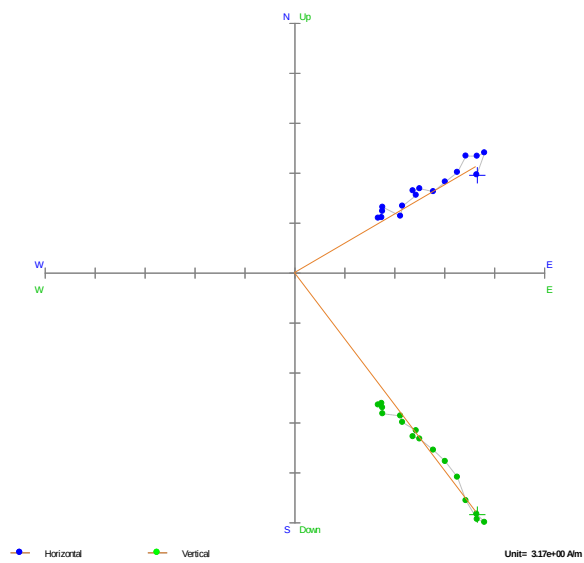
Σχήμα 41. Δείγμα 6d



Σχήμα 42. Δείγμα 6g

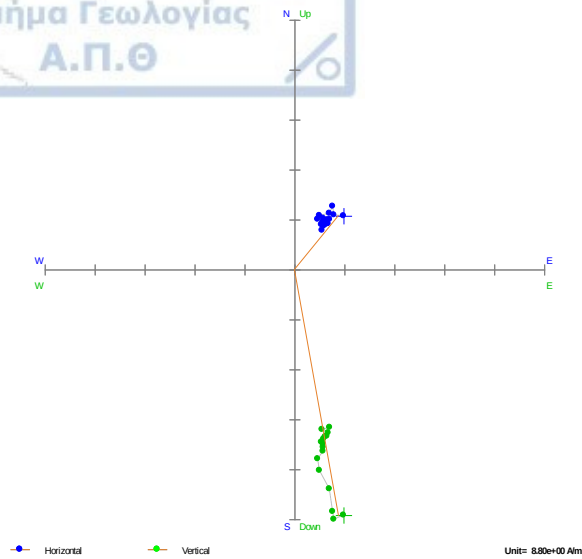
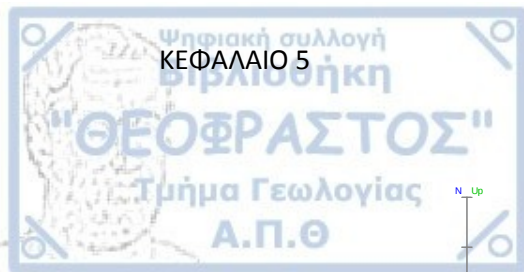


Σχήμα 43. Δείγμα 7g

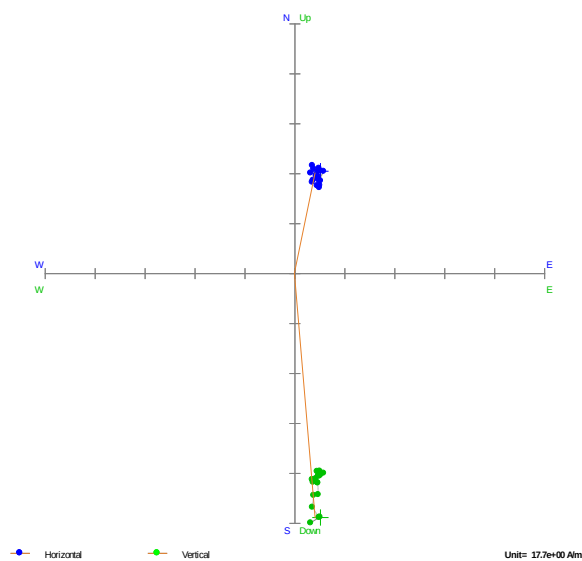


Σχήμα 44. Δείγμα 7i





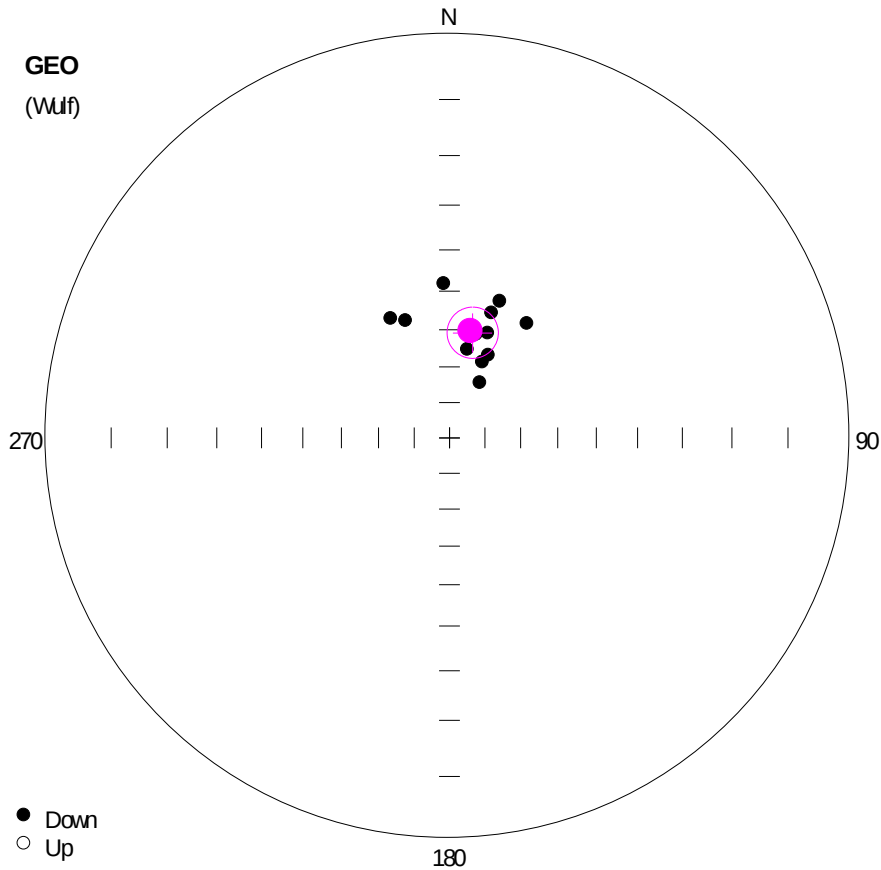
**Σχήμα 45.** Δείγμα 9Ah



**Σχήμα 46.** Δείγμα 9Ba

Τα αποτελέσματα της απομαγνήτισης για κάθε δείγμα φαίνονται στα διαγράμματα Zijderveld (σχήματα 34 - 46). Με βάση αυτά και χρησιμοποιώντας την ανάλυση των κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis) υπολογίστηκε η τιμή της διεύθυνσης της Κύριας Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM) για κάθε δείγμα χωριστά. Στην συνέχεια, όλες οι υπολογισμένες χαρακτηριστικές μαγνητίσεις σχεδιάζονται σε μία νέα στερεογραφική προβολή και υπολογίζεται η μέση τιμή τους, που είναι και η

χαρακτηριστική τιμή της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου όλου του κλιβάνου (σχήμα 47). Στην περίπτωση του κλιβάνου της Ιερισσού, η μέση τιμή της χαρακτηριστικής τιμής της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου υπολογίσθηκε ως εξής:  $D = 12.4^\circ$ ,  $I = 60.2^\circ$ ,  $a_{95} = 6.8^\circ$ .

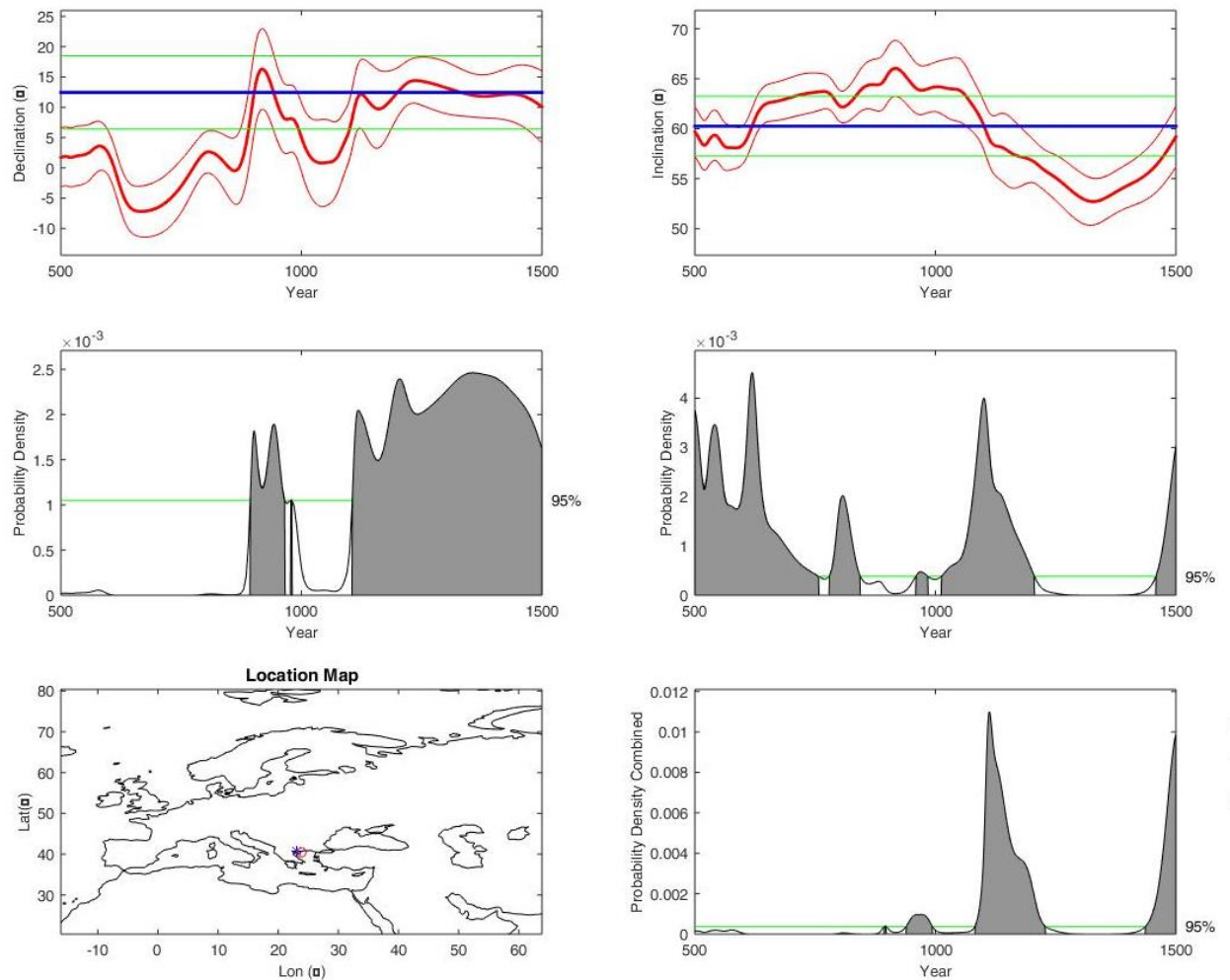


**Σχήμα 47.** Στερεογραφική προβολή της Κύριας Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM)

## 5.2. Αρχαιομαγνητική Χρονολόγηση

Τη μέση τιμή της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου που προσδιορίστηκε από τον κλίβανο της Ιερισσού μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε για την χρονολόγηση του. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι το Archaeo\_dating των Pavon- Carrasco et al, 2011. Για την συγκεκριμένη χρονολόγηση του κλιβάνου χρησιμοποιήθηκαν οι βαλκανικές πρότυπες καμπύλες για την έγκλιση και την απόκλιση (Tema and Kondoroulou, 2011) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 48). Η συνδυασμένη πυκνότητα πιθανότητας για τον κλίβανο της Ιερισσού δίνει τα

παρακάτω διαστήματα: 940-993AD, 1083-1228AD, 1437-1500AD. Με βάση τις αρχαιολογικές εκτιμήσεις, ο συγκεκριμένος κλίβανος ανήκει στον 11<sup>ο</sup> αιώνα κατά συνέπεια η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση που μπορούμε να δεχτούμε είναι **1083-1228AD**.



**Σχήμα 48.** Αρχαιομαγνητική χρονολόγηση του κλιβάνου της Ιερισσού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της αρχαιομαγνητικής έρευνας, που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στον κλίβανο της ανασκαφής της Ιερισσού υποδεικνύουν την καταλληλότητα των πηλών της ευρύτερης περιοχής για αρχαιομαγνητική μελέτη. Η πλειονότητα των τεμαχών που συλλέχθηκαν από τον κλίβανο φαίνεται ότι κατέγραψαν αξιόπιστα την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η μέση τιμή της διεύθυνσης που προέκυψε από την παρούσα μελέτη είναι  $D = 12.4^\circ$ ,  $I = 60.2^\circ$   $a_{95} = 6.8^\circ$ . Αν και το σφάλμα της υπολογιζόμενης τιμής είναι σχετικά μεγάλο οι τιμές της απόκλισης και της έγκλισης είναι σε καλή συμφωνία με τις αναμενόμενες τιμές κατά το χρονικό διάστημα που λειτούργησε ο κλίβανος.

Με την πραγματοποίηση μετρήσεων αρχαιοέντασης σε δείγματα του ίδιου κλίβανου 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.

Butler, F. R., 2004. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Electronic Edition, Department of Chemistry and Physics University of Portland, Oregon.

Pavon-Carrasco, F.J., Rodriguezgonzalez, J., Osete, M.L. and Torta, J.M. 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science* 38 (2) 408-419.

Tema, E. & Kondopoulou, D., 2011. Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, 186, 603–614.

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

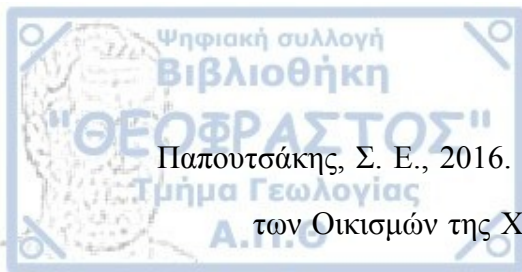
De Marco, E., 2007. Ολοκληρωμένες Μαγνητικές και Αρχαιομαγνητικές Μετρήσεις σε Αρχαιολογικούς Χώρους: Συμβολή στις Καμπύλες Αναφοράς για τον Ελληνικό Χώρο. *Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωφυσικής.*

Ευγενικός, Π., Μπιτζικόπουλος, Δ., Τσανάνα, Α., 2014. Σωστικές Ανασκαφικές Έρευνες στη Χαλκιδική το 2010, *Το Αρχαιολογικό Έργο στη Μακεδονία και στη Θράκη*. 24, Εκδόσεις Ζήτη, Υπουργείο Παιδείας, Θρησκευμάτων, Πολιτισμού και Αθλητισμού, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ιωαννίδης, Η. Ν., 2010. Αρχαιομαγνητική Μελέτη σε Κλιβάνους του Πολύμυλου (Κοζάνη). *Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωφυσικής*

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





Παπουτσάκης, Σ. Ε., 2016. Αγγεία για Εγχυτρισμούς και Καύσεις στα Νεκροταφεία των Οικισμών της Χαλκιδικής κατά την εποχή του Σιδήρου και την Αρχαϊκή

Περίοδο. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Φιλοσοφική Σχολή Τμήμα Ιστορίας και Αρχαιολογίας Α.Π.Θ, Τομέας Αρχαιολογίας και Ιστορίας της Τέχνης, Κλάδος Κλασικής Αρχαιολογίας*

Ράπτης, Θ. Κ., 2001. Αρχαιολογικά Τεκμήρια Κεραμικών Εργαστηρίων στον Ελλαδικό Χώρο (4ος-15ος αι. μ.Χ.), *Δελτίον ΧΑΕ* 32 (Σελ. 173-196), Αθήνα

Φίλης, Κ., 2012. Εμπορικοί αμφορείς από εργαστήρια του Β. Αιγαίου στο νεκροταφείο της Ακάνθου. *Στο Π. Αδάμ – Βελένη, Κ. Τζαναβάρη (επιμ) Δινήεσσα, Τιμητικός Τόμος για την Κ. Ρωμιοπούλου, Θεσσαλονίκη, 2012*

Χίνης, Π. Δ., 2016. Αρχαιομαγνητική Μελέτη σε Βυζαντινούς Κλιβάνους του Σιδηροδρομικού Σταθμού Θεσσαλονίκης (Ανασκαφή ΜΕΤΡΟ). *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωφυσικής*



### Διαδικτυακές Πηγές

Δελαβίνιας, Π., 2011. Οι αρχαίοι ελληνικοί κεραμικοί κλίβανοι των ιστορικών χρόνων

<https://www.archaiologia.gr/blog/2011/10/26/%CE%BF%CE%B9-%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%B1%CE%AF%CE%BF%CE%B9-%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF-%CE%BA%CE%B5%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF-%CE%BA%CE%BB%CE%AF%CE%B2%CE%B1/> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

Δήμος Αριστοτέλη Χαλκιδικής, Αρχαία Άκανθος  
<http://www.dimosaristoteli.gr/gr/sights/ancient-akanthos> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

Τσανανά Α., 2019, "Τερισός: Ψηφίδες από το βυζαντινό παρελθόν της"  
<http://eranistis.net/wordpress/2019/01/10/%CE%B9%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%83%CF%8C%CF%82-%CF%88%CE%B7%CF%86%CE%AF%CE%B4%CE%B5%CF%82-%CE%B1%CF%80%CF%8C-%CF%84%CE%BF-%CE%B2%CF%85%CE%B6%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BD%CF%8C-%CF%80%CE%B1%CF%81/> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

Google maps

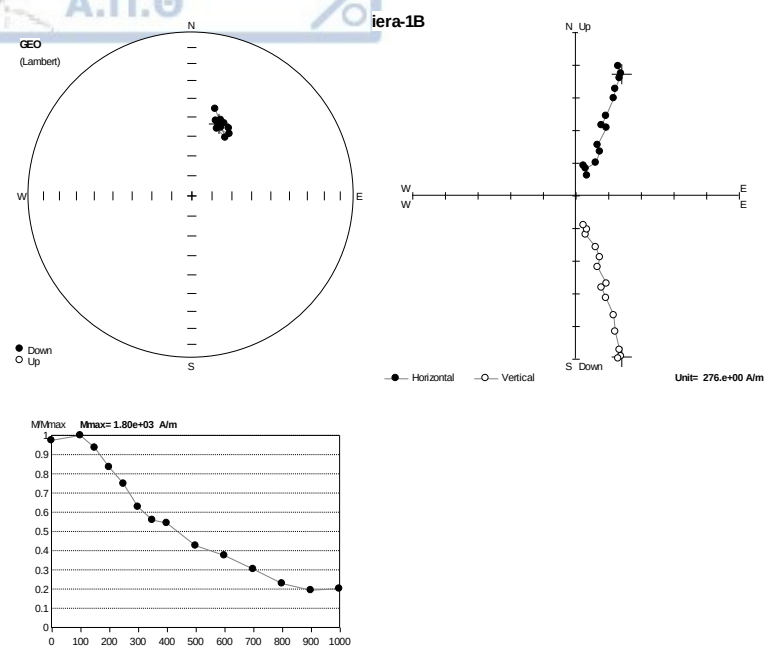
<https://www.google.com/maps/> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

Fossil hunters, British Admiralty Charts, <https://www.fossilhunters.xyz/exoplanets/the-magnetic-elements.html> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

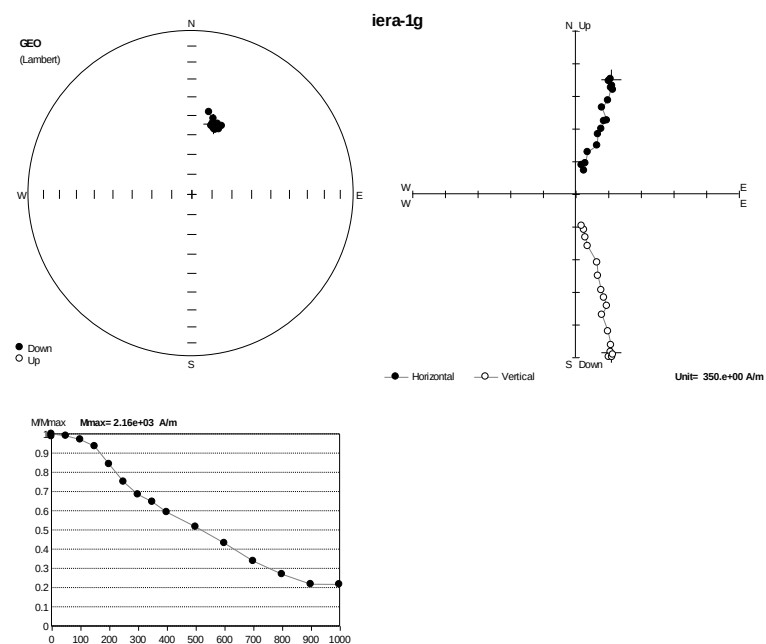
Wikipedia

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%99%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%83%CF%8C%CF%82> (ανακτήθηκε την 15-10-2019)

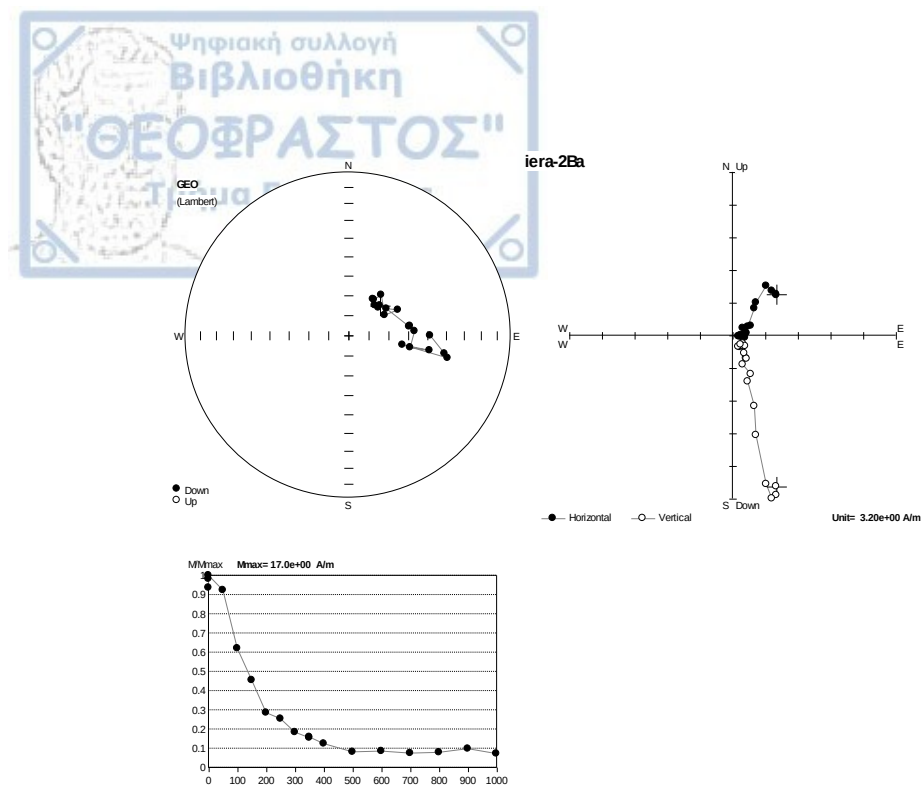
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



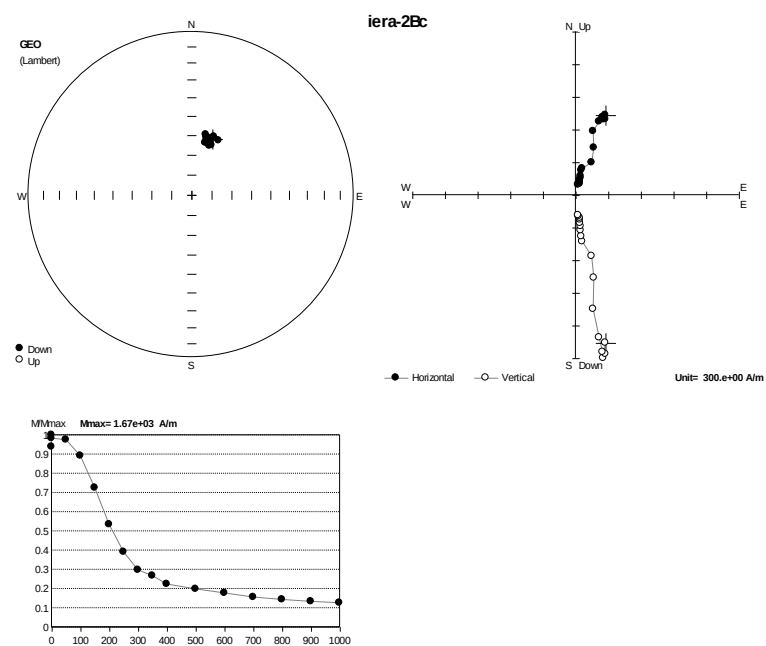
Σχήμα 49. IERA 1B



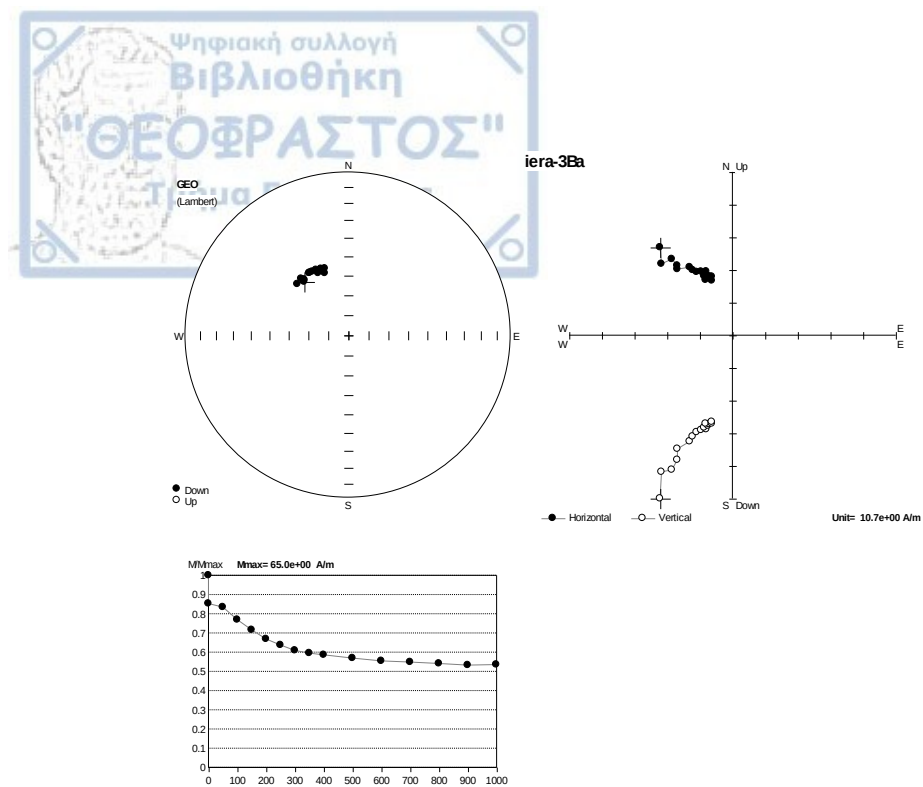
Σχήμα 50. IERA 1g



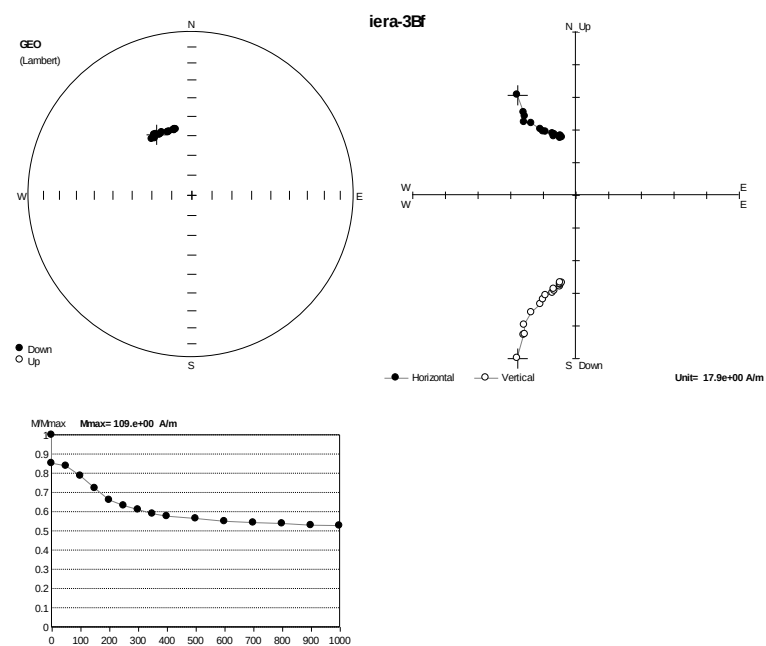
Σχήμα 51. IERA 2Ba



Σχήμα 52. IERA 2Bc

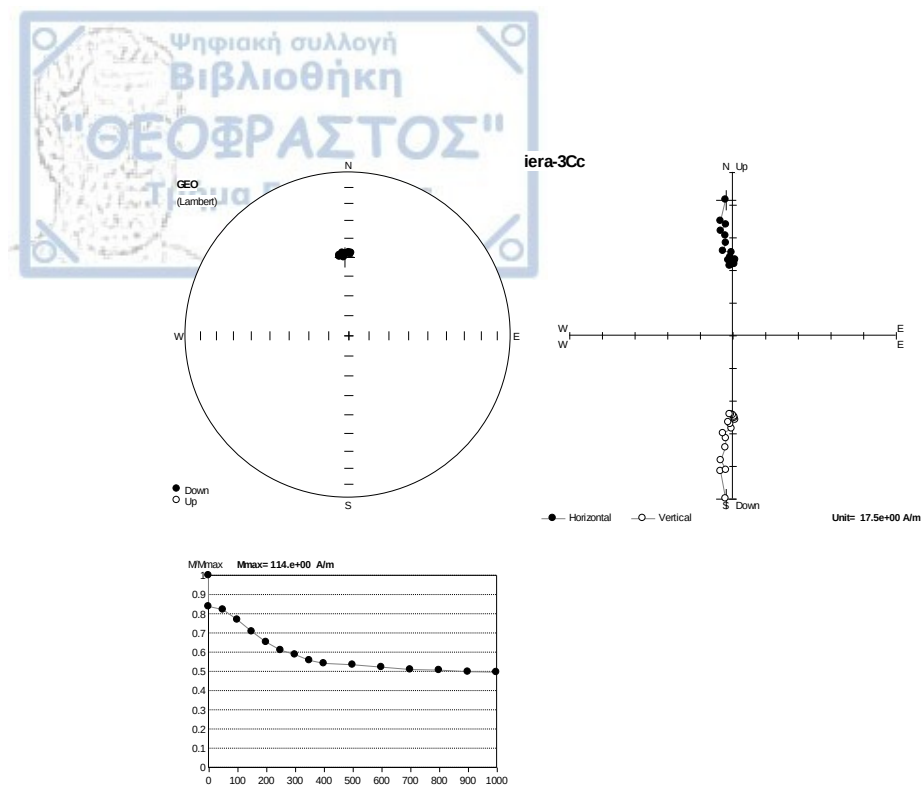


**Σχήμα 53. IERA 3Ba**

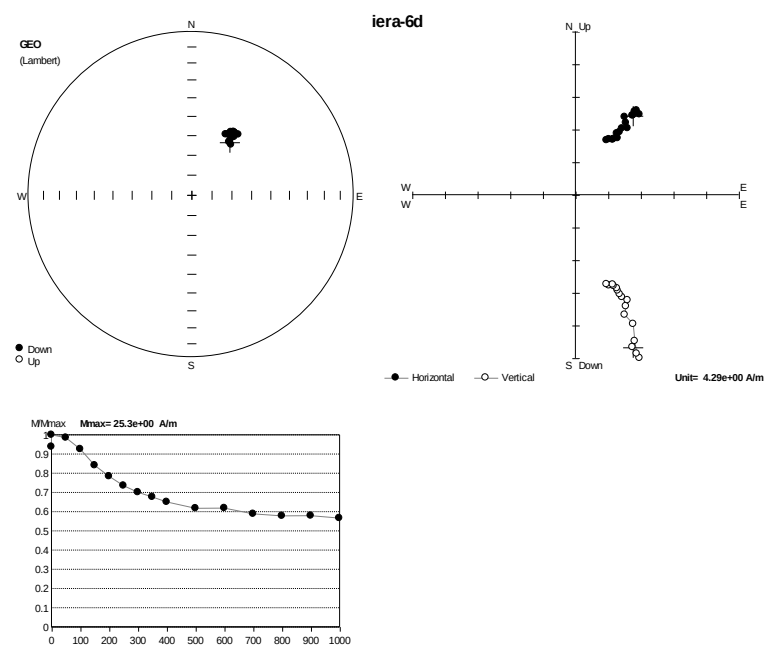


**Σχήμα 54. IERA 3Bf**

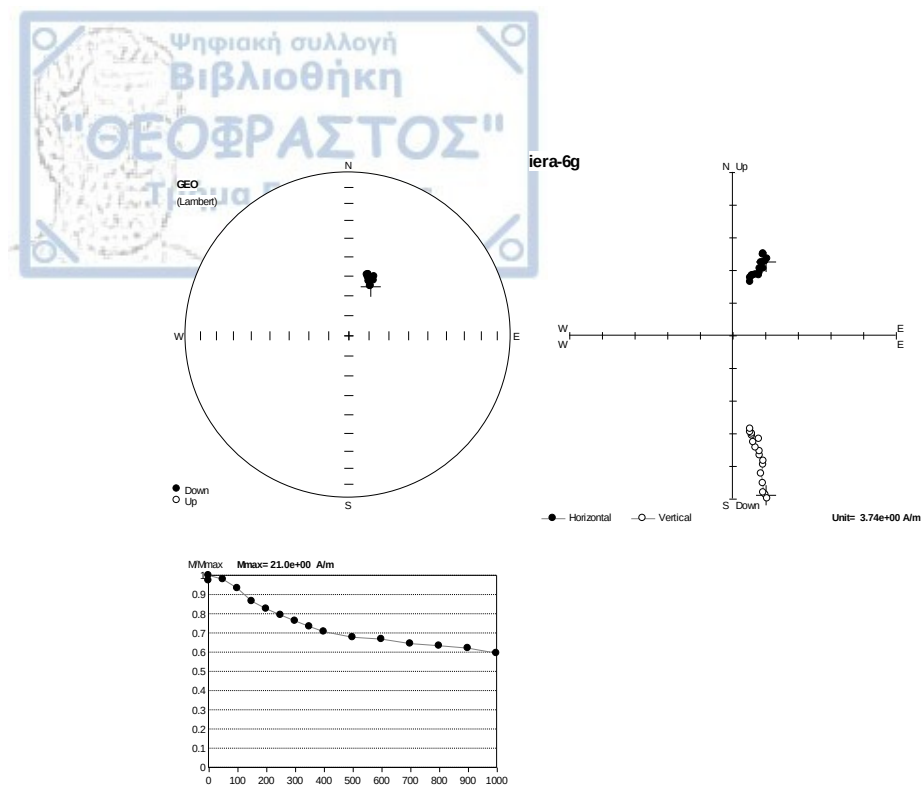




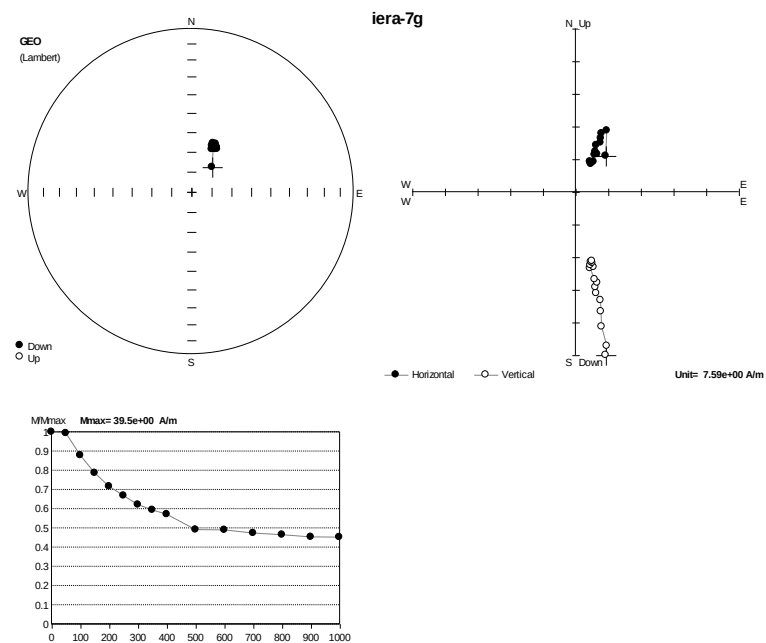
Σχήμα 55. IERA 3Cc



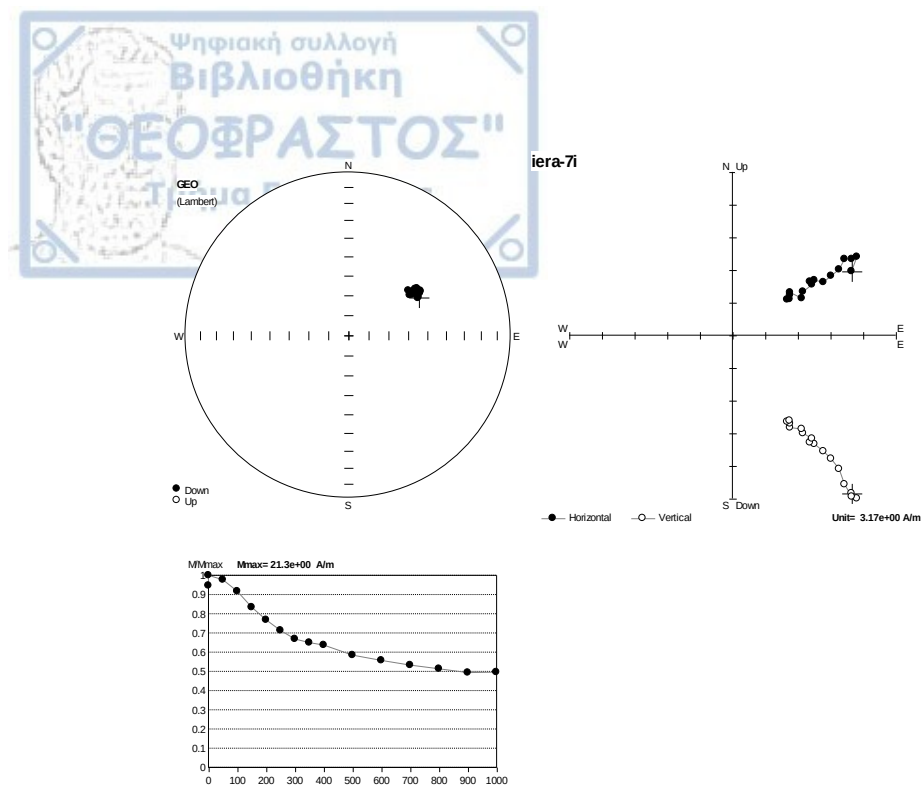
Σχήμα 56. IERA 6d



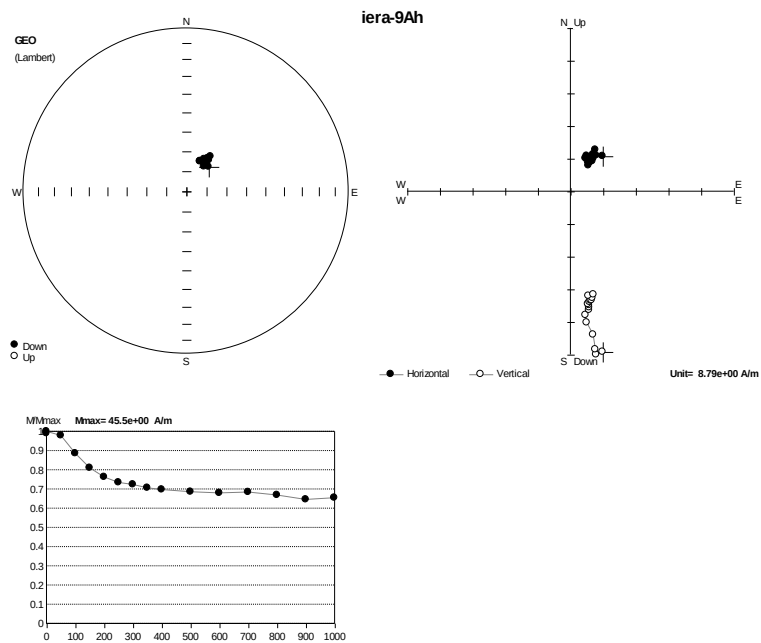
Σχήμα 57. IERA 6g



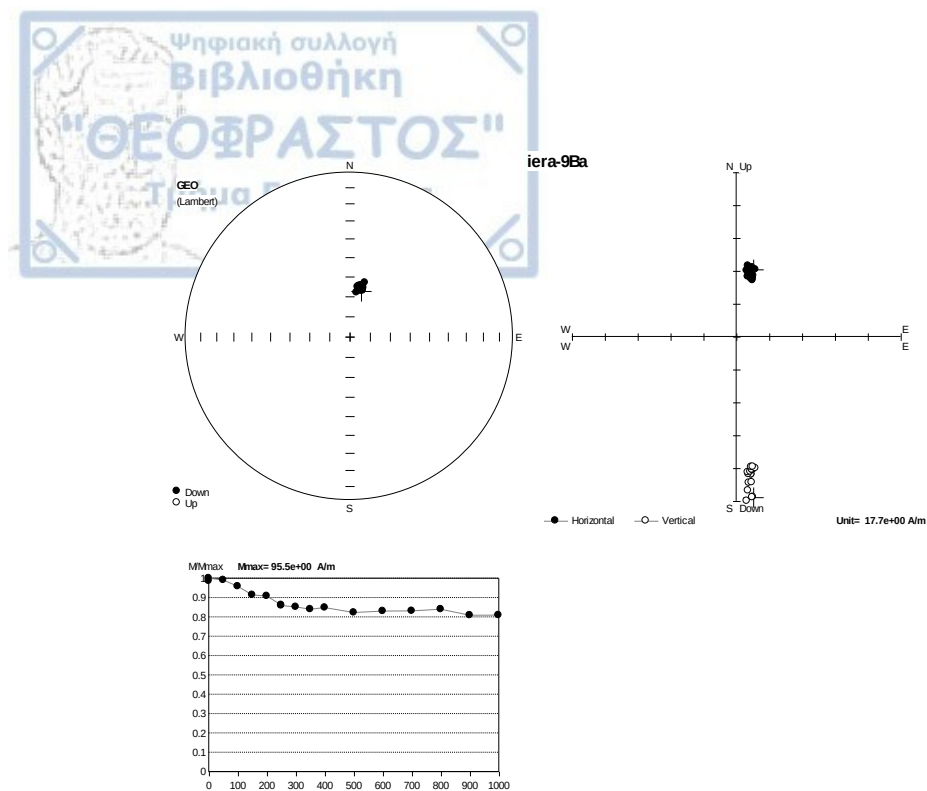
Σχήμα 58. IERA 7g



**Σχήμα 59. IERA 7i**



**Σχήμα 60. IERA 9Ah**



**Σχήμα 61. IERA 9Ba**

| 1b   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 313.1      | 38.6      | 17497.164   |
| M50  | 265.3      | 48.2      | 14824.763   |
| M100 | 311.0      | 38.4      | 17962.692   |
| M150 | 313.1      | 38.5      | 16815.754   |
| M200 | 312.6      | 37.8      | 15000.452   |
| M250 | 312.7      | 36.4      | 13445.300   |
| M300 | 313.1      | 37.8      | 11278.108   |
| M350 | 312.9      | 38.5      | 10046.189   |
| M400 | 315.5      | 36.4      | 9761.482    |
| M500 | 316.3      | 39.1      | 7647.735    |
| M600 | 319.4      | 36.3      | 6734.749    |
| M700 | 322.5      | 37.9      | 5462.141    |
| M800 | 315.2      | 41.0      | 4113.485    |
| M900 | 323.0      | 40.8      | 3485.517    |
| M999 | 305.7      | 33.9      | 3628.562    |

| 1g   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 312.1      | 42.5      | 21567.189   |
| M50  | 314.2      | 42.6      | 21356.315   |
| M100 | 315.2      | 42.7      | 20928.613   |
| M150 | 313.1      | 41.3      | 20179.680   |
| M200 | 314.1      | 41.8      | 18171.953   |
| M250 | 312.0      | 41.5      | 16196.048   |
| M300 | 317.0      | 41.0      | 14763.807   |
| M350 | 314.9      | 40.1      | 13939.630   |
| M400 | 315.7      | 40.9      | 12774.919   |
| M500 | 313.9      | 39.5      | 11141.261   |
| M600 | 316.5      | 38.8      | 9304.310    |
| M700 | 309.7      | 39.0      | 7293.027    |
| M800 | 313.0      | 41.5      | 5816.061    |
| M900 | 315.8      | 42.5      | 4692.086    |
| M999 | 305.0      | 37.8      | 4665.226    |

| 2Ba  | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 0.3        | 42.0      | 170.124     |
| M50  | 356.8      | 40.2      | 157.059     |
| M100 | 357.5      | 40.1      | 105.454     |
| M150 | 359.1      | 35.9      | 77.327      |
| M200 | 9.5        | 42.0      | 48.517      |
| M250 | 12.4       | 35.1      | 43.119      |
| M300 | 7.2        | 39.2      | 31.256      |
| M350 | 24.3       | 35.1      | 26.319      |
| M400 | 28.2       | 33.7      | 21.100      |
| M500 | 35.9       | 38.9      | 13.759      |
| M600 | 41.7       | 29.8      | 14.471      |
| M700 | 32.4       | 42.1      | 12.701      |



|      |      |      |        |
|------|------|------|--------|
| M800 | 48.6 | 21.3 | 13.342 |
| M900 | 46.0 | 22.5 | 16.553 |
| M999 | 34.4 | 27.2 | 12.252 |

| 3Bf  | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 339.8      | 51.5      | 933.161     |
| M50  | 339.3      | 52.5      | 917.926     |
| M100 | 337.0      | 52.0      | 861.667     |
| M150 | 340.2      | 50.7      | 791.014     |
| M200 | 343.6      | 52.0      | 723.639     |
| M250 | 344.5      | 52.0      | 691.885     |
| M300 | 346.1      | 51.4      | 669.121     |
| M350 | 350.5      | 52.4      | 645.331     |
| M400 | 351.7      | 52.4      | 631.298     |
| M500 | 350.7      | 52.6      | 618.096     |
| M600 | 355.8      | 52.5      | 602.399     |
| M700 | 356.4      | 52.0      | 594.239     |
| M800 | 355.6,     | 52.2      | 589.446     |
| M900 | 357.1      | 52.2      | 579.609     |
| M999 | 355.4      | 52.2      | 577.689     |

| 6d   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 28.5       | 51.8      | 253.202     |
| M50  | 26.5       | 50.6      | 249.441     |
| M100 | 26.3       | 48.9      | 234.295     |
| M150 | 27.1       | 46.7      | 212.964     |
| M200 | 23.9       | 46.2      | 198.523     |
| M250 | 26.4       | 45.6      | 186.270     |
| M300 | 29.1       | 45.3      | 177.541     |
| M350 | 26.4       | 45.5      | 171.344     |
| M400 | 26.5       | 46.2      | 164.680     |
| M500 | 27.6       | 47.5      | 156.318     |
| M600 | 25.5       | 45.4      | 156.560     |
| M700 | 25.6       | 47.3      | 148.974     |
| M800 | 22.6       | 48.1      | 146.308     |
| M900 | 25.4       | 47.3      | 146.666     |
| M999 | 21.3       | 48.5      | 143.458     |

| 6g   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 15.9       | 56.1      | 210.317     |
| M50  | 13.0       | 54.2      | 206.048     |
| M100 | 13.1       | 53.0      | 196.194     |
| M150 | 13.7       | 53.8      | 182.073     |
| M200 | 15.1       | 51.9      | 173.730     |
| M250 | 16.7       | 53.0      | 166.836     |
| M300 | 14.5       | 52.3      | 160.463     |

|      |      |      |         |
|------|------|------|---------|
| M350 | 15.5 | 52.8 | 154.247 |
| M400 | 13.3 | 53.2 | 148.650 |
| M500 | 11.9 | 52.5 | 142.441 |
| M600 | 16.0 | 51.0 | 140.527 |
| M700 | 11.1 | 51.1 | 135.574 |
| M800 | 11.3 | 50.9 | 133.288 |
| M900 | 10.3 | 51.3 | 130.632 |
| M999 | 11.3 | 52.2 | 125.124 |

| 7i   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 51.5       | 42.3      | 213.347     |
| M50  | 51.0       | 43.0      | 208.478     |
| M100 | 49.8       | 41.8      | 195.692     |
| M150 | 52.3       | 41.3      | 177.881     |
| M200 | 52.8       | 41.5      | 163.879     |
| M250 | 53.3       | 42.4      | 152.133     |
| M300 | 50.1       | 41.9      | 142.594     |
| M350 | 49.2       | 42.7      | 138.610     |
| M400 | 51.4       | 41.9      | 135.919     |
| M500 | 51.5       | 44.1      | 124.676     |
| M600 | 54.6       | 44.9      | 118.785     |
| M700 | 46.5       | 45.8      | 113.575     |
| M800 | 48.2       | 45.4      | 109.576     |
| M900 | 49.3       | 47.0      | 105.295     |
| M999 | 50.4       | 45.9      | 105.831     |

| 7g   | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 28.5       | 60.1      | 405.979     |
| M50  | 21.3       | 56.9      | 392.277     |
| M100 | 19.5       | 55.4      | 346.859     |
| M150 | 20.7       | 54.5      | 310.517     |
| M200 | 22.1       | 54.0      | 282.860     |
| M250 | 19.7       | 54.1      | 263.789     |
| M300 | 21.2       | 55.7      | 245.293     |
| M350 | 24.0       | 55.6      | 234.399     |
| M400 | 22.0       | 55.5      | 225.485     |
| M500 | 25.4       | 53.5      | 217.591     |
| M600 | 24.6       | 56.2      | 193.289     |
| M700 | 21.4       | 56.8      | 186.895     |
| M800 | 23.9       | 55.8      | 183.408     |
| M900 | 23.0       | 56.7      | 178.961     |
| M999 | 23.8       | 55.4      | 178.595     |

| 9Ah | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|-----|------------|-----------|-------------|
| NRM | 31.8       | 63.1      | 455.500     |
| M50 | 31.7       | 60.8      | 445.636     |

|      |      |      |         |
|------|------|------|---------|
| M100 | 31.8 | 61.1 | 403.364 |
| M150 | 28.0 | 60.3 | 368.927 |
| M200 | 27.8 | 60.5 | 347.305 |
| M250 | 31.7 | 60.9 | 334.309 |
| M300 | 32.1 | 59.4 | 329.548 |
| M350 | 32.4 | 60.4 | 321.681 |
| M400 | 31.5 | 60.9 | 317.430 |
| M500 | 33.4 | 61.1 | 312.176 |
| M600 | 34.6 | 60.6 | 309.502 |
| M700 | 35.5 | 58.9 | 311.567 |
| M800 | 36.9 | 59.8 | 304.468 |
| M900 | 33.4 | 61.7 | 294.034 |
| M999 | 38.1 | 57.9 | 298.118 |

| 9Ba  | Απόκλιση D | Έγκλιση I | Ένταση mA/m |
|------|------------|-----------|-------------|
| NRM  | 23.4       | 53.2      | 954.680     |
| M50  | 26.7       | 52.1      | 945.739     |
| M100 | 25.0       | 50.5      | 914.616     |
| M150 | 25.9       | 50.1      | 872.105     |
| M200 | 27.4       | 50.8      | 866.932     |
| M250 | 27.8       | 50.6      | 822.437     |
| M300 | 25.9       | 51.3      | 812.780     |
| M350 | 25.6       | 51.4      | 801.323     |
| M400 | 27.4       | 49.9      | 809.550     |
| M500 | 28.6       | 52.6      | 785.165     |
| M600 | 29.2       | 50.9      | 792.530     |
| M700 | 28.4       | 50.7      | 793.233     |
| M800 | 30.6       | 48.6      | 801.656     |
| M900 | 28.0       | 51.6      | 771.640     |
| M999 | 29.1       | 51.5      | 772.359     |