



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟ ΤΗΝ
ΣΩΣΤΙΚΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΤΗΣ
ΟΔΟΥ ΓΙΑΝΝΙΤΣΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ

ΑΕΜ: 4463

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΕΣ: ΑΪΔΟΝΑ ΕΛΕΝΗ

ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2014

© Γεώργιος Νικολαΐδης Εργ. Γεωφυσικής, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΩΣΤΙΚΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ
ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΓΙΑΝΝΙΤΣΩΝ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ενός αριθμού ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Δέσποινα Κοντοπούλου για την συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την αμείωτη συμπαράσταση που επέδειξε σε όλη την προπτυχιακή μου πορεία καθώς και τη συμβολή της στη συνέχιση των σπουδών μου σε μεταπτυχιακό επίπεδο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στη έτερη επιβλέπουσα, λέκτορα κ. Ελίνα Αϊδονά, για την συνεχή βοήθεια και υπομονή τόσο κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους, όσο και κατά τη διάρκεια της συγγραφής.

Ευχαριστώ επίσης τον Αλέξανδρο Κουγιουμτζίδα για την ουσιαστική βοήθεια του κατά την προετοιμασία του πειραματικού μέρους στο εργαστήριο, κάτι που χωρίς αυτόν θα ήταν αδύνατο.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τον κοσμήτορα της σχολής Θετικών Επιστημών και καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας, Σπύρο Παυλίδη, για το ενδιαφέρον και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και για την αρχική γνωριμία μέσω αυτού με τις καθηγήτριες Κοντοπούλου και Αϊδονά.

Τέλος, ευχαριστώ το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και δη τον τομέα Γεωφυσικής του τμήματος Γεωλογίας, για την διάθεση του εργαστηριακού χώρου και την παραχώρηση των οργάνων για την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή

2. Παλαιομαγνητισμός

- 2.1 Γενικά περί παλαιομαγνητισμού
- 2.2 Θεμελιώδη Μαγνητικά Μεγέθη
- 2.3 Μαγνητικές ιδιότητες των στερεών
 - 2.3.1 Διαμαγνητισμός
 - 2.3.2 Παραμαγνητισμός
 - 2.3.3 Σιδηρομαγνητισμός
- 2.4 Το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο
- 2.5 Σιδηρομαγνητικά ορυκτά

3. Είδη Παραμένουσας Μαγνήτισης

- 3.1 Ο Σιδηρομαγνητισμός στα σωματίδια
- 3.2 Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)
 - 3.2.1 Θερμοκρασίες φραγμού (T_b) και Curie (T_c)
- 3.3 Παραμένουσα Θερμομαγνήτιση (TRM)
- 3.4 Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM)
- 3.5 Θραυσματοπαγής Παραμένουσα Μαγνήτιση (DRM)
- 3.6 Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (VRM)
- 3.7 Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση (IRM)

4. Αρχαιομαγνητική μελέτη κλιβάνου από την ανασκαφή της οδού Γιαννιτσών

- 4.1 Γενικά στοιχεία και αρχαιολογική περιγραφή των κλιβάνων
- 4.2 Δειγματοληψία
- 4.3 Εργαστηριακή Μελέτη
 - 4.3.1 Προετοιμασία δειγμάτων
 - 4.3.2 Μέτρηση NRM
 - 4.3.3 Απομαγνήτιση σε εναλλασόμενο πεδίο
 - 4.3.4 Πείραμα IRM
 - 4.4.5 Πείραμα Lowrie- Fuller

5. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

- 5.1 Συνολικά αποτελέσματα
- 5.2 Πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας

- 5.2.1 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση
- 5.2.2 Πείραμα Lowrie- Fuller
- 5.3 Στερεογραφική προβολή NRM
- 5.4 Στερεογραφική προβολή αρχαιοδιεύθυνσης

6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

- 6.1 Συμπέρασμα

Παράρτημα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αρχαιομαγνητική μελέτη κλιβάνου από την σωστική αρχαιολογική ανασκαφή στη συμβολή των οδών Γιαννιτσών και Μαζαράκη - Καβάλας στη Θεσσαλονίκη κατά το 2010. Διερευνάται η διεύθυνση του διανύσματος του γήινου μαγνητικού πεδίου κατά την περίοδο την οποία οι πλίνθοι απέκτησαν παραμ ένουσα μαγνήτιση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, με σκοπό την εξακρίβωση της μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου κατά το παρελθόν σε εκείνη τη περιοχή.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι, αρχικά η μέτρηση της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης (NRM) των δειγμάτων. Στη συνέχεια η σταδιακή απομ αγνήτισή τους με εναλλασσόμενο πεδίο. Επίσης, πραγματοποιήθηκε το πείραμα της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM) κατά το οποίο εξετάζεται η αύξηση της μαγνήτισης που δημιουργείται σε ένα σώμα όταν σε αυτό εφαρμοσθεί μαγνητικό πεδίο αυξανόμενης ισχύος. Όταν αυτή σταματήσει να αυξάνεται σημαίνει ότι το σώμα έχει μαγνητικά κορεστεί.

Η σταδιακή απομ αγνήτιση σε συνδυασμό με την IRM χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του τεστ των Lowrie και Fuller (1971). Με το τεστ αυτό μπορούμε να ταυτοποιήσουμε το είδος των κόκκων ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών περιοχών τους. Το δείγμα υπόκειται σε σταδιακή απομ αγνήτιση, έπειτα κορένεται αμέσως με τη βοήθεια της συσκευής απόκτησης της IRM και απομ αγνητίζεται ξανά. Στη συνέχεια, υπόκειται σε σταδιακή αύξηση της μαγνήτισης του (τεχνητή IRM). Τέλος, οι τρεις αυτές καμ πύλες μετατρέπονται σε ποσοστό % της μεταβολής της μαγνήτισης.

2. Παλαιομαγνητισμός

2.1 Γενικά περί Παλαιομαγνητισμού

Το βασικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται ο παλαιομαγνητισμός είναι η απόκτηση από τα πετρώματα, μιας μόνιμης μαγνήτισης κατά το χρόνο ή πολύ κοντά στο χρόνο δημιουργίας τους. Αυτή η μαγνήτιση προέρχεται από το υπάρχον μαγνητικό πεδίο της ευρύτερης περιοχής κατά το χρόνο κρυστάλλωσης του πετρώματος. Βασική προϋπόθεση είναι το πέτρωμα να περιέχει κόκκους σιδηρομαγνητικών ορυκτών. Το πέτρωμα, κατά τη δημιουργία του, καταγράφει τη διεύθυνση του «παλαιού» πεδίου και την έντασή του. Στη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας του, το πέτρωμα καταγράφει και άλλες μαγνήτισεις που επικάθονται στην αρχική. Κατά την εργαστηριακή μελέτη είναι δυνατόν να διαχωριστούν οι διάφορες μαγνητικές συνιστώσες του πετρώματος και να ερμηνευθούν ως κύριες και δευτερεύουσες.

Έτσι για παράδειγμα, ο παλαιομαγνητισμός μπορεί να προσφέρει σχετική χρονολόγηση σε αρχαιολογικές μελέτες. Η διεύθυνση και η ένταση του διανύσματος της μαγνήτισης αντικατοπτρίζουν την θέση του διανύσματος του πεδίου, όπως αυτό καταγράφηκε σε ένα αντικείμενο γνωστής ή άγνωστης ηλικίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά αντιστοιχίζονται με το χρόνο, από γνωστές καμπύλες μεταβολής της διεύθυνσης και της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου, εν συναρτήσει με τον χρόνο, οι οποίες θεωρούνται καμπύλες αναφοράς (απόκλισης, έγκλισης, έντασης).

2.2 Θεμελιώδη Μαγνητικά Μεγέθη

Μαγνητικές δυνάμεις δεν ασκούνται σε οποιοδήποτε σώμα, το οποίο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, αλλά μόνο πάνω σε ορισμένα υλικά τα οποία λέγονται μαγνητικά (ενώσεις του σιδήρου όπως μαγνητίτης, αιματίτης, κ.λ.π.). Οι μαγνητικές δυνάμεις είναι ανάλογες ενός υποθετικού μεγέθους m το οποίο αναφέρεται ως ποσότητα μαγνητισμού ή μαγνητική ποσότητα. Η ποσότητα αυτή, για λόγους συμβατικούς, είναι είτε θετική (βόρεια) είτε αρνητική (νότια) και ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται από ένα μαγνητικό πόλο σε μια ορισμένη απόσταση.

Όπως σε όλα τα δυναμικά, ως ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ορισμένο σημείο αυτού, ορίζουμε ένα διανυσματικό μέγεθος « H », το οποίο έχει τη διεύθυνση και φορά της μαγνητικής δύναμης, « F », η οποία ασκείται πάνω σε θετική μαγνητική ποσότητα, « m » που βρίσκεται στο σημείο αυτό και έχει μέτρο ανάλογο του λόγου « F/m ». Η ένταση, « H » του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται σε ένα σημείο που απέχει απόσταση « r » από ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης « I » είναι ανάλογη του λόγου « I/r », σύμφωνα με το νόμο των Biot-Savart, και για αυτό η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο SI είναι το 1Am^{-1} . Στο cgs, που ειδικά στον ηλεκτρομαγνητισμό αναφέρεται και ως cgs-emu ή απλώς emu (electromagnetic unit – ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων), η μονάδα μέτρησης της « H » είναι το 1Oesterd ($1\text{Oe}=10^3/4\pi\text{Am}^{-1}$), το οποίο ισούται και με 1mT (10^{-3}Tesla).

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου « H » αποτελεί το πιο συνηθισμένο μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κενό. Συνήθως, όμως, όταν εξετάζουμε το μαγνητικό πεδίο και ιδιαίτερα όταν αυτό γίνεται μέσα σε ένα υλικό, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται είναι ένα διανυσματικό μέγεθος « B », που καλείται μαγνητική επαγωγή ή ολική ένταση του πεδίου αυτού. Το μέγεθος αυτό έχει τη διεύθυνση και τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου και μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

όπου « μ_0 » η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ίση με $4\pi\cdot 10^{-7}\text{Hm}^{-1}$, όπου H είναι η μονάδα μέτρησης του συντελεστή αυτεπαγωγής στο SI ($1\text{Henry}=\text{m}^2\text{kg}/\text{sec}^2\text{Amber}^2$), και « μ » η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των υλικών, η οποία είναι ο λόγος της έντασης της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου, το αντίστροφο της οποίας ονομάζεται "συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας". Είναι αδιάστατος αριθμός και ισούται με τη μονάδα για το κενό. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των σωμάτων, τα οποία ανάλογα με την τιμή του προσδιορίζονται σε αμαγνητικά, παραμαγνητικά, διαμαγνητικά και μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά σώματα, κατηγορίες οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς παρακάτω. Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής στο SI είναι το 1Tesla (στο cgs είναι το 1Gauss= 10^{-4}Tesla).

Το δυναμικό « W » του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τη σχέση:

$$W = \int_r^{\infty} \vec{H} \cdot d\vec{r}$$

με μονάδα μέτρησης στο SI το 1Ampere. Όπως και στο ηλεκτρικό πεδίο, οι συνιστώσες της έντασης του μαγνητικού πεδίου ως προς ορθογώνιο σύστημα αξόνων, Oxyz, δίνονται από τις σχέσεις:

$$H_x = -\frac{\partial W}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{\partial W}{\partial y}, \quad H_z = -\frac{\partial W}{\partial z}$$

Δηλαδή,

$$\vec{H} = -\frac{\partial W}{\partial x}\vec{i} - \frac{\partial W}{\partial y}\vec{j} - \frac{\partial W}{\partial z}\vec{k}$$

Η μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού διπόλου του οποίου οι ποσότητες μαγνητισμού είναι +m και -m και απέχουν μεταξύ τους «l», είναι ένα διανυσματικό μέγεθος «M», που έχει τη διεύθυνση του «l», φορά από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο και μέτρο το γινόμενο «ml». Οποιοσδήποτε μαγνήτης, λοιπόν, αποτελείται από ζεύγος θετικού και αρνητικού πόλου, οι οποίοι συνδέονται νοητά με κλειστές καμπύλες γραμμές του δυναμικού του μαγνητικού πεδίου που ο ίδιος προκαλεί.

Υποθέτουμε ότι ένα μαγνητισμένο σώμα αποτελείται από στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα, τα οποία τείνουν να αποκτήσουν τη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όταν το σώμα τεθεί μέσα στο πεδίο. Έστω, ότι η συνολική μαγνητική ροπή ενός μαγνητισμένου σώματος είναι ίση με «M». Ονομάζουμε μαγνήτιση ένα διανυσματικό μέγεθος «J» που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική ροπή και μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

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

όπου V ο όγκος του σώματος. Η μαγνήτιση μετράται σε Am⁻¹ στο SI (1 Gauss στο cgs-emu). Μπορεί να γίνει δι' επαφής, δι' επαγωγής και διά μηχανικών παραμορφώσεων.

Όταν το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο τοποθετείται ένα μαγνητικό σώμα, δεν είναι πολύ ισχυρό, η μαγνήτιση του σώματος συνδέεται με την ένταση του πεδίου με τη σχέση:

$$\vec{J} = \kappa \vec{H}$$

όπου «κ» είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα, η οποία εξαρτάται από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

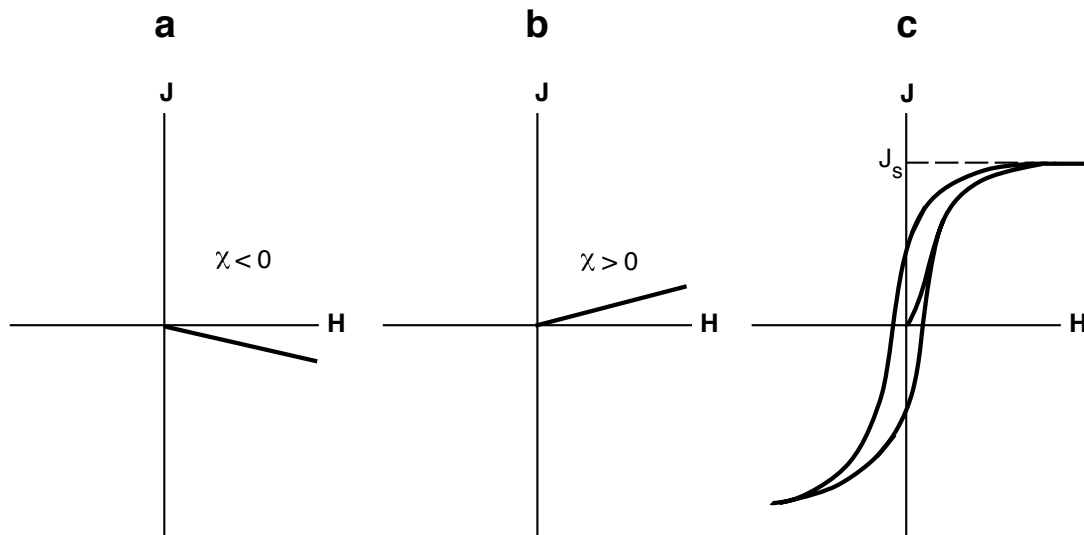
Επιπλέον, Η εξάρτηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας από τη θερμοκρασία ακολουθεί το νόμο του Curie:

$$\chi = C / T$$

όπου C είναι η σταθερά Curie και T η απόλυτη θερμοκρασία. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα ανά μονάδα μάζας είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, σύμφωνα με το νόμο Curie.

2.3 Μαγνητικές ιδιότητες των στερεών

Τα στερεά σώματα χωρίζονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με τη μαγνητική τους επιδεκτικότητα: σε *διαμαγνητικά (diamagnetic)*, *παραμαγνητικά (paramagnetic)* και *σίδηρομαγνητικά (ferromagnetic)*. Ακολουθεί διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τους 3 βασικούς τύπους, κατά το οποίο αποκτάται μαγνήτιση **J**, ως αποτέλεσμα της δράση μαγνητικού πεδίου εντάσεως **H** (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1. a) Μαγνήτιση J , συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου, H , για ένα διαμαγνητικό υλικό. Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ , είναι σταθερά με αρνητικές τιμές.
 b) J - V διάγραμμα για διαμαγνητικό υλικό. Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ , είναι σταθερά με θετικές τιμές.
 c)) J - V διάγραμμα για σιδηρομαγνητικό υλικό. Η καμπύλη της μαγνήτισης παρουσιάζει υστέρηση (είναι μη αναστρέψιμη), και η μαγνητική επιδεκτικότητα χ δεν είναι μια απλή σταθερά. Από Butler (2004)

2.3.1 Διαμαγνητισμός

Η διαμαγνητική ανταπόκριση στην εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου είναι η απόκτηση μίας μικρής επαγόμενης μαγνήτισης \mathbf{J}_i , αντίθετης με το εφαρμοζόμενο πεδίο \mathbf{H} . Η μαγνητική επιδεκτικότητα, « χ », για ένα διαμαγνητικό υλικό έχει αρνητικές τιμές και είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Ένα παράδειγμα διαμαγνητικού ορυκτού είναι ο χαλαζίας, SiO_2 , με τυπική τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας $\sim 10^{-6}$ σε μονάδες cgs ($\sim -0.8 \times 10^{-7}$ SI).

2.3.2 Παραμαγνητισμός

Τα παραμαγνητικά στερεά σώματα περιέχουν άτομα με ατομικές μαγνητικές ροπές (αλλά χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών ατομικών ροπών) και αποκτούν επαγόμενη μαγνήτιση, \mathbf{J}_i , παράλληλη στο εφαρμοζόμενο πεδίο, \mathbf{H} . Για γεωλογικού ενδιαφέροντος συνθήκες, η J_i είναι γραμμικά μεταβαλλόμενη σε σχέση με την H . Όπως και με τα διαμαγνητικά υλικά, η μαγνήτιση μηδενίζεται όταν το μαγνητικό πεδίο αφαιρείται. Ένα παράδειγμα παραμαγνητικού ορυκτού είναι ο

φαιϋαλίτης, Fe_2SiO_4 , με μαγνητική επιδεκτικότητα σε συνθήκες δωματίου ίση με $\sim 4.4 \times 10^{-4}$ cgs ($\sim 3.5 \times 10^{-5}$ SI).

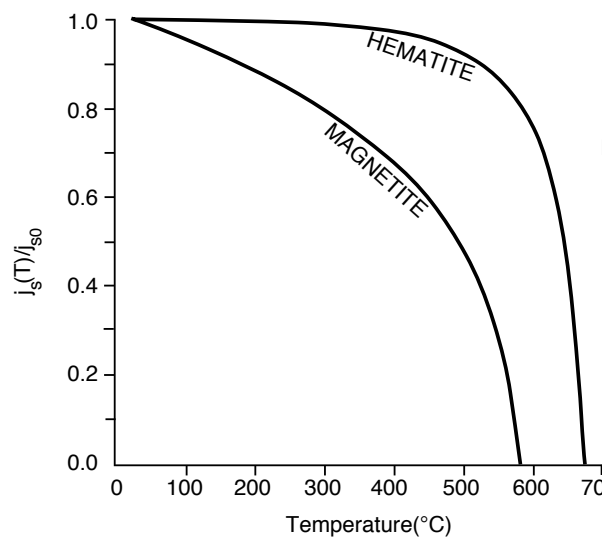
Στα παραμαγνητικά στερεά σώματα, οι ατομικές μαγνητικές ροπές αντιδρούν ανεξάρτητα από το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο και την θερμική ενέργεια.

2.3.3 Σιδηρομαγνητισμός

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν άτομα με μαγνητικές ροπές, αλλά αντίθετα με τα παραμαγνητικά, οι γειτονικές ατομικές μαγνητικές ροπές αλληλεπιδρούν έντονα. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης είναι η δημιουργία μαγνητίσεων στα σιδηρομαγνητικά στερεά υλικά που μπορεί να είναι μεγαλύτερες κατά αρκετές κλίμακες μεγέθους σε σχέση με τα παραμαγνητικά υλικά, για το ίδιο μαγνητικό πεδίο. Για ένα δεδομένο σιδηρομαγνητικό υλικό και θερμοκρασία, υπάρχει μια μέγιστη μαγνήτιση η οποία αναφέρεται ως *μαγνήτιση κορεσμού (saturation magnetization)*, j_{ess} . Με την αύξηση της \mathbf{H} πάνω από τα επίπεδα της j_s , δεν θα αυξηθεί η συνολική μαγνήτιση του υλικού. Ο μεταλλικός σίδηρος είναι ένα σιδηρομαγνητικό ορυκτό με τιμή κορεσμού για θερμοκρασίες δωματίου ίση με 1.8×10^3 G (1.8×10^6 A/m).

Η τιμή κορεσμού ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, παίρνοντας την τιμή μηδέν στη θερμοκρασία Currie, T_C , μέγεθος χαρακτηριστικό για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό (580°C για τον μαγνητίτη και 680°C για τον αιματίτη). Οι θερμοκρασιακές εξαρτήσεις της j_s για τον μαγνητίτη και τον αιματίτη δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Πάνω από τη θερμοκρασία Currie, το υλικό μεταπίπτει στην παραμαγνητική κατάσταση (Σχήμα 2.2).

Εκτός από την μεγάλη ένταση της μαγνήτισης, μία βασική ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι η ικανότητα να καταγράφουν την διεύθυνση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου, ιδιότητα πολύ χρήσιμη για τον παλαιομαγνητισμό. Κατά την αφαίρεση του μαγνητιζόντος πεδίου, η μαγνήτιση δεν επιστρέφει στο μηδέν αλλά παραμένει ως καταγραφή του πεδίου. Η καμπύλη της μαγνήτισης \mathbf{J} , ως συνάρτηση του πεδίου \mathbf{H} , ονομάζεται *καμπύλη υστέρησης (hysteresis loop)*. Λόγω της υστέρησης, η μαγνητική επιδεκτικότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν μπορεί να εκφραστεί τόσο απλά όσο στα διαμαγνητικά ή τα παραμαγνητικά υλικά.



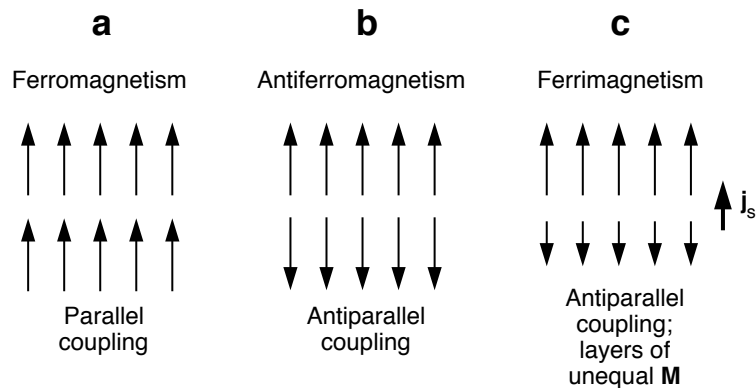
Σχήμα 2.2. Απλοποιημένες καμπύλες κορεσμού εν συνάρτησει της θερμοκρασίας (Temperature) για τον μαγνητίτη (MAGNETITE) και τον αιματίτη (HEMATITE). J_{s0} = τιμή κορεσμού για θερμοκρασία δωματίου, για τον αιματίτη $J_{s0} \sim 2G$, για τον μαγνητίτη $J_{s0} \sim 480G$. Από Butler (2004) (redrawn from Pullaiah 1975)

Η σύζευξη των γειτονικών ατομικών ροπών σε ένα σιδηρομαγνητικό ορυκτό είναι το αποτέλεσμα της ανταλλαγής ενέργειας κβαντομηχανικής φύσεως. Η κλασσική φυσική δεν είναι αρκετή για να εξηγήσει την ανταλλαγή ενέργειας.

Η μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών ορυκτών έως τον κορεσμό τους μπορεί να επιτευχθεί ευκολότερα σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, ονομαζόμενες *μαγνητοκρυσταλλικές «εύκολες» διευθύνσεις*. Η κρυσταλλογραφική εξάρτηση του σιδηρομαγνητισμού ονομάζεται *μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία*.

Η ανταλλαγή ενέργειας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία είτε παράλληλων, είτε αντιπαράλληλων ζευγών ανταλλαγής. Η λογική της ζεύξης εξαρτάται από το στοιχείο μετάπτωσης που λαμβάνει μέρος, και στην κρυσταλλική δομή. Μπορεί να θεωρηθεί ότι ο γενικός όρος «σιδηρομαγνητισμός» εφαρμόζεται και στα τρία είδη στερεών με ζεύξη των ατομικών μαγνητικών ροπών τους. Από τυπικής απόψεως, ο σιδηρομαγνητισμός αναφέρεται σε υλικά με παράλληλη ζεύξη των γειτονικών ατομικών ροπών. Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίστανται τρεις περιπτώσεις: 1) παράλληλη ζεύξη των γειτονικών ατομικών ροπών, 2) παράλληλη ζεύξη των γειτονικών ατομικών ροπών αλλά με παράλληλη ζεύξη εντός των στρωμάτων και 3) αντιπαράλληλη μεταξύ των στρωμάτων (Σχήμα 2.1). Εάν τα σώματα έχουν ίσες μαγνητικές ροπές, τα αντιτασσόμενα στρώματα αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα $j_s = 0$. Αυτός ο τύπος ζεύξης ονομάζεται *αντισιδηρομαγνητικός (antiferromagnetic)*. Εάν τα στρώματα άνισων μαγνητικών ροπών είναι

αντιπαράλληλα, το αποτέλεσμα είναι μια j_s με κατεύθυνση αυτή του επικρατούντος έντασης στρώματος. Τέτοια υλικά ονομάζονται *σιδηριμαγνητικά (ferrimagnetic)* και πολλά από τα λεγόμενα «σιδηρομαγνητικά ορυκτά» είναι στην πραγματικότητα σιδηριμαγνητικά.



Σχήμα 2.1. a) Σιδηρομαγνητικά υλικά, b) Αντιπαράλληλη ζεύξη, c) Σιδηριμαγνητικά υλικά. Η συνισταμένη μαγνήτιση για το σιδηριμαγνητικό υλικό δείχνεται στα δεξιά, για το αντισιδηρομαγνητικό είναι μηδέν. Από Butler(2004).

2.5 Σιδηρομαγνητικά ορυκτά

Τα πιο συνηθισμένα σιδηρομαγνητικά ορυκτά είναι τα οξειδία του σιδήρου (π.χ. μαγνητίτης, μαγκεμίτης και αιματίτης), τα υδροξείδια του σιδήρου (γκραιτίτης) και τα σουλφίδια του σιδήρου (γκρεγκίτης, πυρροτίτης). **Τα πιο σημαντικά μαγνητικά ορυκτά που συνεισφέρουν στην παραμένουσα μαγνήτιση των ψημένων αργίλων, οι οποίες και αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, είναι τα οξειδία του σιδήρου με πιο σημαντικό το μαγνητίτη (Fe_3O_4), έπειτα το μαγκεμίτη ($\gamma-Fe_2O_3$) και τέλος τον αιματίτη ($\alpha-Fe_2O_3$)** (Thomson and Oldfield, 1986). Τα λεπτόκοκκα οξειδία του σιδήρου είναι υπεύθυνα για το κόκκινο χρώμα των αργίλων όταν θερμαίνονται σε οξειδωτικό περιβάλλον ή για το γκριζό χρώμα όταν θερμαίνονται σε αναγωγικό περιβάλλον.

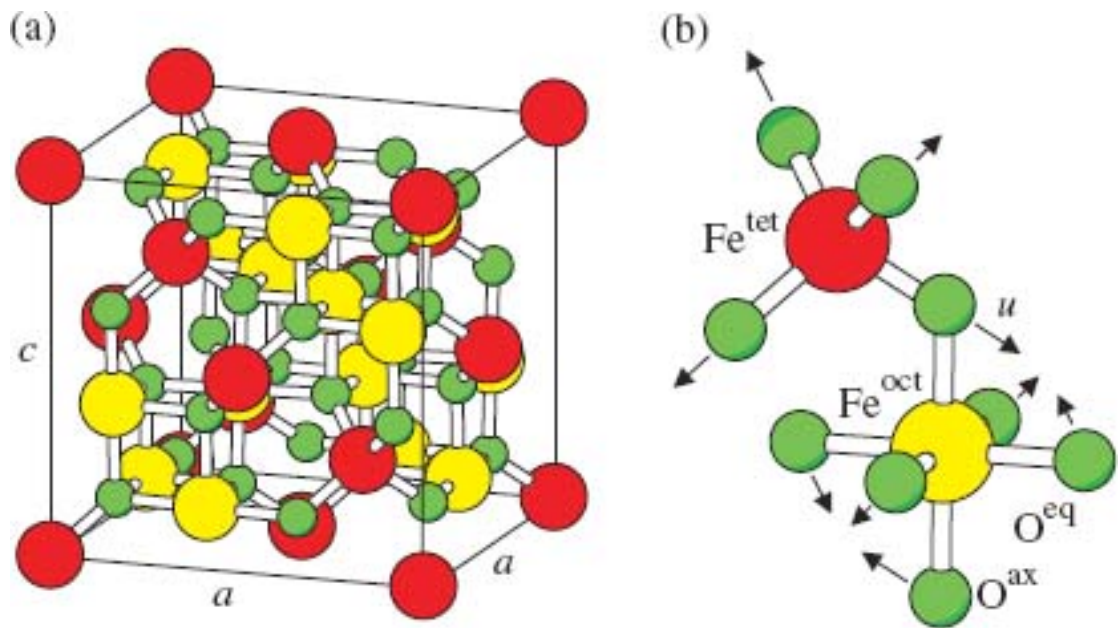
Οι θερμοκρασίες Curie/Neel είναι $320^\circ C$ για τον γκρεγκίτη, $\sim 333^\circ C$ για τον πυρροτίτη, από $\sim 150^\circ C$ έως $\sim 580^\circ C$ για τον τιτανομαγνητίτη, $\sim 580^\circ C$ για το μαγνητίτη και $675^\circ C$ για τον αιματίτη. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $250^\circ C$ ο μαγκεμίτης μετατρέπεται σε αιματίτη και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των $300^\circ C$ 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 των ορυκτών μειώνεται κατά: τιτανομαγνητίτης < μαγνητίτης ~ μαγκεμίτης ~ γκρεγκίτης < πυρροτίτης < αιματίτης. Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων μαγνητικών ορυκτών (Πίνακας 2.1). Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων για την παλαιομαγνητική μας μελέτη: μαγνητίτη (τιτανομαγνητίτες), αιματίτη, ιλμενίτη (τιτανοαιματίτες).

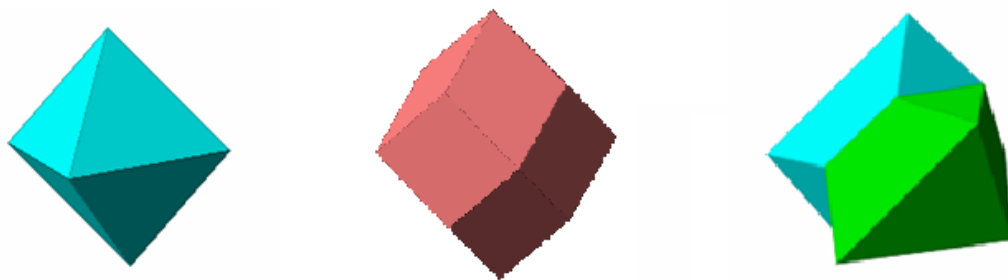
Ορυκτό	Χημικός Τύπος	M_s (Am ² /kg)	T_c or T_N (°C)	X (E-06) (m ³ /kg)	H (mT)
Μαγνητίτης	Fe ₃ O ₄	90-92	575-585	200-1100	10-50
Ουλβοσπινέλιος	Fe ₂ TiO ₄		-153	~1*	
Τιτανομαγνητίτης 60%	xFe ₃ O ₄ (1-x) Fe ₂ TiO ₄	24	150	25-120	8
Ιλμενίτης	FeTiO ₃		-233	1-1.13	
Αιματίτης	α-Fe ₂ O ₃	0.4	675	0.1-7.6	>1000
Μαγκεμίτης	γ-Fe ₂ O ₃	70-80	-600	400-500	
Πυρροτίτης	Fe ₇ S ₈	~20	-320	0.1-300	100-500
Γκρεγκίτης	Fe ₃ S ₄	~25	-333		60-100
Γκαϊτίτης	αFeOOH	<1	~100-120	0.26-0.28	>1000
Λεπιδοκροκίτης	γFeOOH		-196		

Πίνακας 2.1. Κύρια χαρακτηριστικά των κοινών μαγνητικών ορυκτών. M_s , μαγνήτιση κορεσμού σε θερμοκρασία δωματίου, T_c η θερμοκρασία Curie, T_N η θερμοκρασία Neel, X η αρχική επιδεκτικότητα, H η τυπική δύναμη συνοχής η οποία εξαρτάται από το μέγεθος. Από Hunt et al., 1995; Tauxe, 2005.

Τιτανομαγνητίτες (Titanomagnetites): Ανήκουν στην πιο σημαντική ομάδα των σιδηρομαγνητικών ορυκτών, τα σιδηρο-τιτανιούχα οξείδια (FeTi). Είναι αδιαφανή ορυκτά, που κατατάσσονται στο κυβικό σύστημα κρυσταλλώσεως (Σχήμα 2.2, Σχήμα 2.3) με χημικές συστάσεις που κυμαίνονται από το ακραίο μέλος του Μαγνητίτη (Magnetite- Fe₃O₄) έως τον ουλβοσπινέλλιο ή ουλβίτη (Ulvöspinel/ Ulvite- Fe₂TiO₄). Η κρυσταλλική δομή των τιτανομαγνητών ανήκει στην ομάδα των σπινελίων.

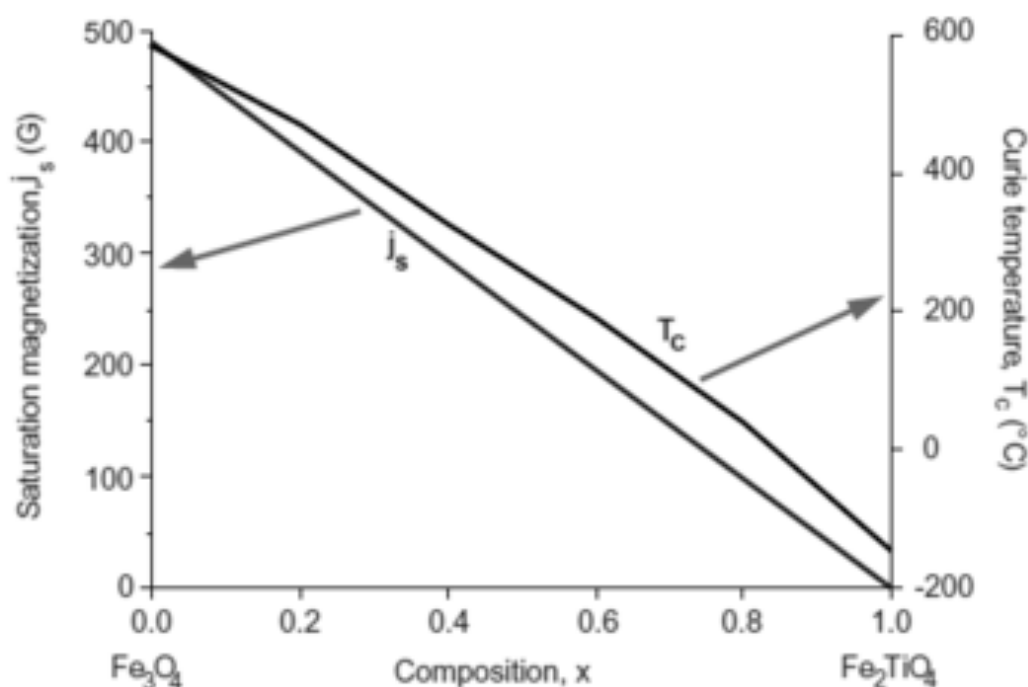


Σχήμα 2.2. a) Κρυσταλλική δομή του Μαγνητίτη. b) Μεγέθυνση ενός τετραέδρου και ενός παρακείμενου οκταέδρου που μοιράζονται ένα άτομο οξυγόνου. Οι μεγάλες σφαίρες έχουν επισημανθεί από τους Fe^{tet} και Fe^{oct} ως άτομα σιδήρου σε τεταεδρικά (κόκκινο χρώμα) και οκταεδρικά ενωμένα υποπλέγματα. Τα άτομα οξυγόνου αναπαρίστανται ως μικρές σφαίρες (πράσινο χρώμα). Τα βέλη υποδεικνύουν την τάση των οξυγόνων να μετατοπισθούν προς την βέλτιστη θέση τους για εσωτερική παράμετρο $u > 0$. Από *Friák et al, 2007*



Σχήμα 2.3. Κρυσταλλικές δομές μαγνητίτη.
 Θεοδωρίκας Σ. Σ., *Ορυκτολογία-Πετρολογία*, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη 2002.

Ο μαγνητίτης, ιδιαίτερα, παρουσιάζει σκληρότητα 6 στην κλίμακα του Mohs και πυκνότητα 5,18(gr/cm^3). Έχει 16 άτομα τρισθενούς σιδήρου (Fe^{3+}) και 8 άτομα δισθενούς σιδήρου (Fe^{2+}) ανά μόριο. Η συνολική μαγνήτιση κορεσμού του είναι περίπου $480\text{G}=4,8 \times 10^5$ (A/m), τιμή αποκτώμενη με μηδενική θερμική ενέργεια στους 0°K , και θερμοκρασία Curie 580°C (Σχήμα 2.4.). Η χημική σύσταση του μαγνητίτη είναι 72,4% Fe και 27,6% οξυγόνο (O). Εμφανίζεται πλήρης σειρά στερεών διαλυμάτων μεταξύ του μαγνητίτη ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) και του ουλβοσπινελίου (Fe_2TiO_4) σε θερμοκρασία πάνω από τους 600°C . Εμφανίζεται ως επουσιώδες ορυκτό στα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα. Παρόλο που ο μαγνητίτης είναι σιδηρομαγνητικό ορυκτό, ο ουλβοσπινέλλιος είναι αντισιδηρομαγνητικός σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ εκατέρωθεν αυτής παρουσιάζει παραμαγνητική συμπεριφορά. **Επομένως, το ποσοστό του Τιτανίου, Ti, παίζει σημαντικό ρόλο στη μαγνητική, και πιο συγκεκριμένα στη σιδηρομαγνητική, συμπεριφορά των ορυκτών της ομάδας αυτής.**



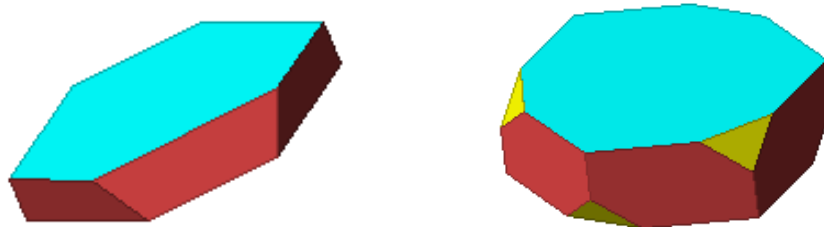
Σχήμα 2.4. Καμπύλη κορεσμού της μαγνήτισης και καμπύλη θερμοκρασίας Curie για την σειρά των τιτανομαγνητιτών. Η σύσταση υποδεικνύεται από την παράμετρο x. Ο αριστερός άξονας υποδεικνύει τον μαγνητικό κορεσμό (J_s). Ο δεξιός άξονας υποδεικνύει τη θερμοκρασία Curie (T_c). Από Butler, redrawn after Nagata (1961).

Τιτανοαιματίτες: Οι τιτανοαιματίτες αποτελούν μια πιο σύνθετη ομάδα από τους τιτανομαγνητίτες. Στα περισσότερα πυριγενή πετρώματα, οι τιτανοαιματίτες και τα προϊόντα της οξείδωσής τους αποτελούν ένα μικρότερο μέρος των σιδηρομαγνητικών ορυκτών σε σχέση με τους τιτανομαγνητίτες (κατά συνέπεια και τα προϊόντα οξειδώσής τους). Αλλά για πυριγενή με μεγάλη περιεκτικότητα πυριτίου, ή/και προχωρημένης οξειδώσεως, ο αιματίτης μπορεί να αποτελεί το κύριο σιδηρομαγνητικό ορυκτό. Επιπλέον, ο αιματίτης είναι σχεδόν πάντοτε το κύριο ή και το αποκλειστικό σιδηρομαγνητικό ορυκτό σε ερυθρά ιζήματα, μια κύρια πηγή παλαιομαγνητικών δεδομένων. Ιζήματα τέτοιας σύστασης είναι τις περισσότερες φορές η κύρια πρώτη ύλη στην κατασκευή κεραμικών (πηλός).

Η κρυσταλλική μορφή τόσο του αιματίτη (Fe_2O_3) όσο και του ιμηνίτη (FeTiO_3) είναι πλακώδης και ρομβοεδρική (Σχήμα 2.5). Η σκληρότητα του πρώτου είναι από 5,5 έως 6,5 ενώ του ιμηνίτη μεταξύ 5,5 και 6 στην κλίμακα του Mohs. Αντίστοιχα η πυκνότητα του πρώτου είναι $5,26 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$ και του άλλου $4,7 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$. Η χημική σύσταση του αιματίτη είναι 70% Fe και 30% O. Μικρές ποσότητες Ti και Mn περιέχονται στον αιματίτη. Σχηματίζει μικτούς κρυστάλλους με τον ιμηνίτη σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τους 950°C . Η ποσότητα του αιματίτη που περιέχεται στον ιμηνίτη είναι λιγότερη από 6%. Ο ιμηνίτης απαντά ως επουσιώδες ορυκτό στα πυριγενή πετρώματα. Συνήθως βρίσκεται σε γάββρους, διορίτες και ανορθοσίτες. Απαντά επίσης σε μερικούς πηγματίτες και σε μερικές φλέβες υψηλής θερμοκρασίας. Συνδέεται με μαγνητίτη, αιματίτη, ρουτίλιο και ζirkόνιο. Το όνομα του αιματίτη προέρχεται από την ελληνική λέξη **αίμα** λόγω του χρώματός του, ενώ του ιμηνίτη από το όνομα των ορέων Ilmen της Ρωσίας.

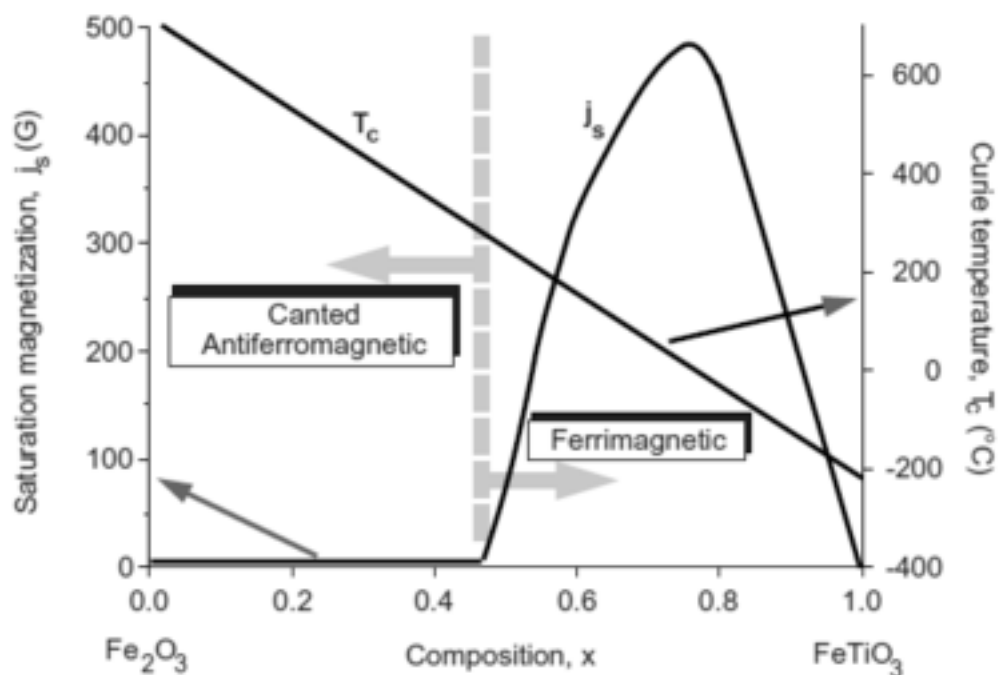
Μαγκεμίτης ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$): Είναι ασταθές ορυκτό που μετατρέπεται σε αιματίτη σε θερμοκρασίες άνω των 250°C - 300°C (Tauxe, 2005), ισχυρά μαγνητικό με μαγνήτιση κορεσμού συγκρίσιμη με αυτή του μαγνητίτη. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας μετατροπής του σε αιματίτη το σημείο Curie του δεν είναι ακριβώς καθορισμένο, αλλά ποικίλει μεταξύ 590°C - 675°C . **Γκαιτίτης ($\alpha\text{-FeOOH}$):** Είναι το μόνο υδροξείδιο που μπορεί να έχει παραμένουσα μαγνήτιση. Είναι κοινό ορυκτό που σχηματίζεται από τη διάβρωση ορυκτών που περιέχουν σίδηρο. Μετατρέπεται σε αιματίτη σε θερμοκρασίες 250°C - 400°C . **Πυρροτίτης (Fe_7S_8) & Γκρεγκίτης (Fe_3S_4):** Εμφανίζονται σε αναγωγικά περιβάλλοντα ιζημάτων. Η μαγνήτιση κορεσμού του πυρροτίτη ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεσή του. Στους 500°C μετατρέπεται σε

μαγνητίτη. Ο γκρεγκίτης μετατρέπεται κι αυτός σε μαγνητίτη αλλά σε θερμοκρασίες 270°C-350°C.

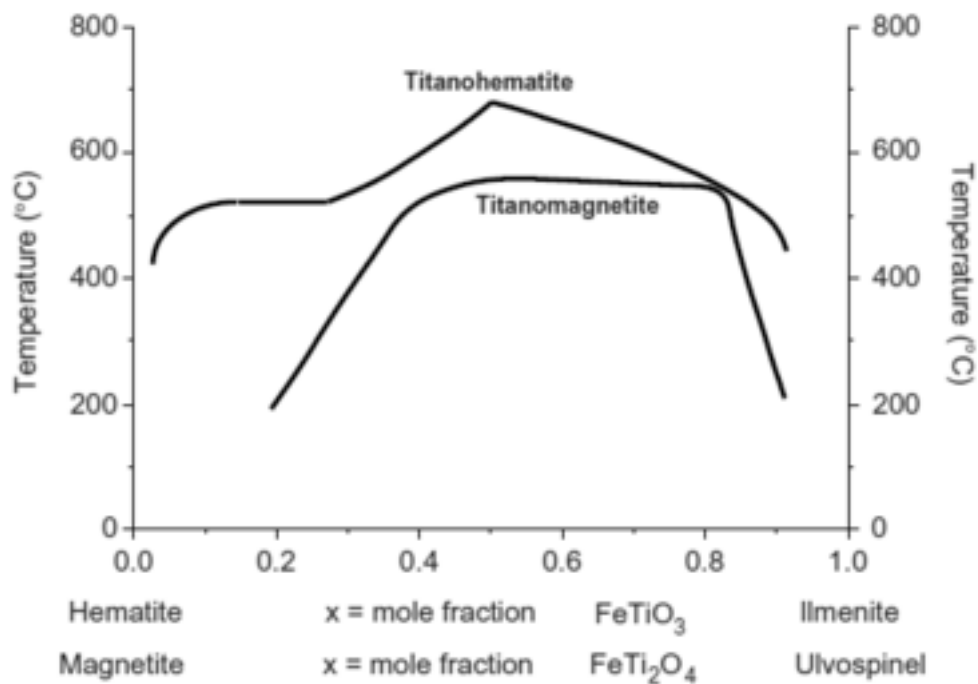


Σχήμα 2.5. Κρυσταλλικές δομές των ακραίων στερεών διαλυμάτων της σειράς των τιτανοαιματιτών. Δεξιά παρουσιάζεται η κλασική πλακώδης δομή του αιματίτη και στα δεξιά η πλακώδης δομή του ιλμενίτη.

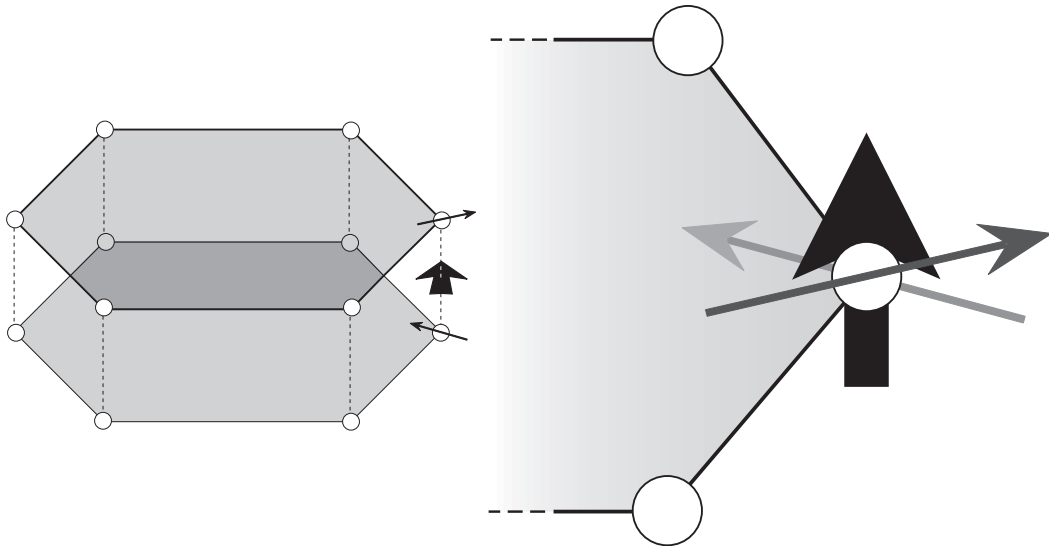
Θεοδωρίκας Σ. Σ., Ορυκτολογία Πετρολογία α, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη 2002



Σχήμα 2.6. Καμπύλες κορεσμού της μαγνήτισης και θερμοκρασίας Currie για την σειρά των τιτανομαγνητών. Η σύσταση υποδεικνύεται από την παράμετρο x . Ο αριστερός άξονας υποδεικνύει τον μαγνητικό κορεσμό (J_s). Ο δεξιός άξονας υποδεικνύει τη θερμοκρασία Currie (T_c). Συστάσεις $x < 0.45$ κλίνουν προς τη αντισιδηρομαγνητική ζεύξη (antiferromagnetic coupling). Συστάσεις $0.45 < x < 1$ έχουν σιδηρομαγνητική ζεύξη (ferrimagnetic coupling). Από Butler modified from Nagata (1961) and Stacey and Banerjee (1974).



Σχήμα 2.7. Κενά μεταξύ της σύστασης του τιτανοαιματίτη και του τιτανομαγνητίτη. Οι συστάσεις υποδηλώνονται από την παράμετρο x για κάθε σειρά. Τα στερεά διαλύματα είναι πλήρη εντός των κάθε σειρών στις παραπάνω καμπύλες. Η κλασματική κρυστάλλωση (*exsolution*) λαμβάνει χώρα σε ενδιάμεσες συστάσεις σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές των καμπυλών. Από Butler, adapted from Nagata (1961) and Burton (*Reviews in Mineralogy*, v. 24 in press).



Σχήμα 2.8. Ζεύγη κατιόντων Fe^{3+} και τον μαγνητικών ροπών τους στον αιματίτη. Τα επίπεδα των κατιόντων είναι τα βασικά (0001) επίπεδα. Οι μαγνητικές ροπές είναι παράλληλες εντός συγκεκριμένων βασικών επιπέδων. Ζεύγος μαγνητικών ροπών Fe^{3+} αναπαρίσταται στο δεξί μέρος του διαγράμματος, η μαγνητική ροπή του ανώτερου επιπέδου δηλώνεται με το σκούρο γκρι βέλος, ενώ του κατώτερου επιπέδου με το ανοικτό γκρι βέλος. Το διανυσματικό τους άθροισμα των 2 σχεδόν αντιπαράλληλων ροπών δηλώνεται με το μαύρο βέλος σε μεγαλύτερη κλίμακα από τα άλλα δύο. Από Butler (2004).

3. Είδη Παραμένουσας Μαγνήτισης

3.1 Ο Σιδηρομαγνητισμός στα σωματίδια

Τα πετρώματα (όπως και τα κεραμικά υλικά), αποτελούνται από τη σύνθεση λεπτόκοκκων σιδηρομαγνητικών ορυκτών μέσα σε ένα σύνολο διαμαγνητικών και παραμαγνητικών ορυκτών. Μια βασική αρχή είναι ότι τα σιδηρομαγνητικά σωματίδια έχουν διάφορες ενέργειες που επηρεάζουν την ολική μαγνήτισή τους. Δεν έχει σημασία πόσο απλός ή πολύπλοκος είναι ο συνδυασμός των ενεργειών αυτών. Ο κόκκος επιζητά τη διαμόρφωση που θα του επιφέρει το μικρότερο δυνατό μέγεθος της ολικής του ενέργειας.

3.2 Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)

Κατά την *in situ* μαγνήτιση των πετρωμάτων η συνισταμένη μαγνήτιση αποτελείται από δύο συνιστώσες:

$$J = J_i + J_r$$

, όπου J_i είναι η αποκτώμενη (induced) μαγνήτιση και J_r η φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (Natural Remanent Magnetization). Η «μαγνητική επιδεκτικότητα όγκου» (bulk susceptibility) « χ », είναι το αποτέλεσμα από τη συνεισφορά όλων των ορυκτών, αλλά συνήθως επικρατεί αυτή των σιδηρομαγνητικών ορυκτών. Η παρουσία του τοπικού γεωμαγνητικού πεδίου, H , παράγει την αποκτώμενη μαγνήτιση:

$$J_i = \chi H$$

Η μαγνήτιση αυτή συνήθως είναι παράλληλη στο τοπικό γεωμαγνητικό πεδίο αυτό, και είναι η κυρίαρχη συνιστώσα για πολλούς τύπους πετρωμάτων. Παρόλ' αυτά η απόκτηση αυτής είναι αναστρέψιμη διαδικασία χωρίς τη μνήμη των παλαιότερων μαγνητικών πεδίων που καταγράφησαν, οπότε μόνο η J_r συνιστώσα αποθηκεύει ουσιαστικά τα γεωμαγνητικά στοιχεία παλαιότερων μαγνητικών πεδίων.

Η *Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (Natural Remanent Magnetization)* είναι παραμένουσα μαγνήτιση παρούσα σε πετρώματα πριν την εργαστηριακή τους

επεξεργασία. Η NRM εξαρτάται από γεωμαγνητικό πεδίο και τις γεωλογικές διεργασίες κατά τον σχηματισμό του πετρώματος και κατά τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας του. Η NRM συνήθως αποτελείται από περισσότερες από μία συνιστώσες. Η NRM που καταγράφεται κατά την δημιουργία ενός πετρώματος αναφέρεται ως *πρωτογενής NRM* και είναι αυτή που μελετάται κυρίως στις παλαιομαγνητικές μελέτες. Η *δευτερογενής NRM* μπορεί να αποκτηθεί μετά τη δημιουργία του πετρώματος και να διαφοροποιήσει την κύρια NRM. Οι δευτερογενείς συνιστώσες προστίθενται διανυσματικά στην κύρια συνιστώσα για να δώσουν την ολική NRM:

$$\text{NRM} = \text{πρωτογενής NRM} + \Sigma_{(\text{δευτερεύουσες NRM})}$$

Οι τρεις βασικές μορφές της πρωτογενούς NRM είναι:

1. Η *Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (TRM)*, που παράγεται κατά την ψύξη από υψηλές σε χαμηλές θερμοκρασίες.
2. Η *Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM)*, που παράγεται από την ανάπτυξη σιδηρομαγνητικών ορυκτών κάτω από τη θερμοκρασία Currie.
3. Η *Θραυσματοπαγής Παραμένουσα Μαγνήτιση (DRM)*, που αποκτάται κατά την συσσώρευση των ιζηματογενών πετρωμάτων, τα οποία περιέχουν σιδηρομαγνητικά ορυκτά (Butler, 2004).

Δευτερεύουσες NRM μπορούν να προκύψουν από χημικές αλλαγές που επηρεάζουν τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά, από κεραυνούς, ή μεγάλης χρονικής διάρκειας έκθεση στο γεωμαγνητικό πεδίο μετά τη δημιουργία του πετρώματος (πετρώματα μεγάλης ηλικίας).

3.2.1 Θερμοκρασίες φραγμού (T_b) και Curie (T_c)

Υπάρχει ένα μικρό διάστημα θερμοκρασιών πάνω από το οποίο ο χρόνος ηρεμίας αυξάνεται από γεωλογικά μικρές σε γεωλογικά μεγάλες περιόδους (Neel, 1955). Ο χρόνος ηρεμίας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, καθώς και διαφόρων παραμέτρων οι οποίοι επίσης εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, όπως η μαγνήτιση κορεσμού « J_s ». Λόγω της αύξησης των ενδοατομικών αποστάσεων κατά τη διάρκεια της θερμικής διαστολής, η μαγνήτιση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μηδενίζεται στη θερμοκρασία Curie « T_c », η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό (Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο μαγνητίτης

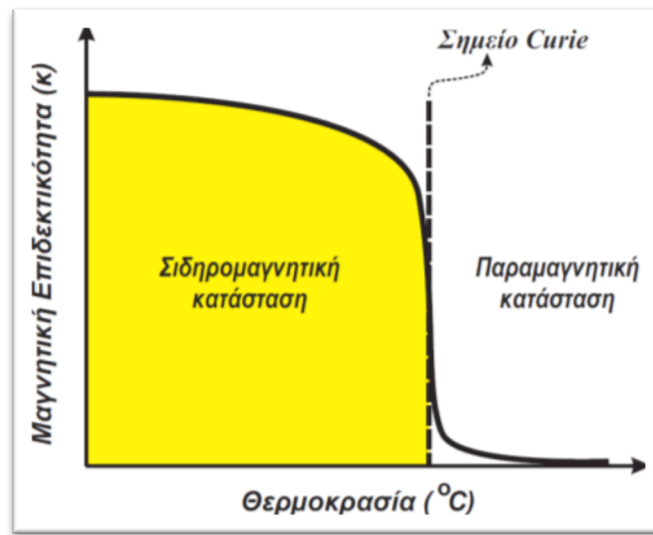
στους 580°C και ο αιματίτης στους 680°C). Επιπλέον και η δύναμη συνοχής «h_c» εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αφού είναι ανάλογη της μαγνήτισης κορεσμού.

Επομένως, πάνω από τη θερμοκρασία Curie δεν υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση, η θερμική ενέργεια κυριαρχεί στο σύστημα, οι ενδοατομικές αποστάσεις έχουν αυξηθεί σε τέτοιο σημείο που οι ζεύξεις καταστρέφονται, οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι ανεξάρτητες και τελικά το υλικό χάνει τη μαγνήτισή του και γίνεται παραμαγνητικό. Η διαδικασία αυτή είναι γενικά αντιστρέψιμη καθώς η παραμένουσα μαγνήτιση εμφανίζεται όταν το υλικό ψύχεται σε θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία Curie.

Η θερμοκρασία στην οποία ο χρόνος ηρεμίας είναι αρκετά μικρός, δηλαδή της τάξης των $10^2 - 10^3$ sec, καθορίζεται ως **θερμοκρασία φραγμού «T_b»**. Για κάθε $T > T_b$, κάτω όμως από τη θερμοκρασία Curie, ο κόκκος είναι υπερπαραμαγνητικός ενώ για $T < T_b$ ο χρόνος ηρεμίας αυξάνεται πολύ γρήγορα, η μαγνητική ροπή του κόκκου κλειδώνεται και επιπρόσθετες αλλαγές του εξωτερικού πεδίου δεν προκαλούν καμία αλλαγή στη μαγνήτιση του κόκκου. Η ισχυρή εξάρτηση, λοιπόν, του χρόνου ηρεμίας από τη θερμοκρασία και η μετάβαση από την υπερπαραμαγνητική στη σταθερή συμπεριφορά των κόκκων μιας μαγνητικής περιοχής είναι σημαντικές για την κατανόηση της διαδικασίας απόκτησης της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

3.3 Παραμένουσα Θερμομαγνήτιση (TRM)

Παραμένουσα θερμομαγνήτιση (Thermal remanent magnetization) αποκτούν τα πλουτώνια πετρώματα καθώς ψύχονται από τη θερμοκρασία τήξης στην κανονική θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (Παζάχος, 2008). Ο μαγνητίτης (Fe₃O₄) αρχίζει να υφίσταται κρυστάλλωση σε θερμοκρασία ~1000 °C και οι κρύσταλλοί του παραμένουν σε παραμαγνητική κατάσταση, δηλαδή έχουν μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα. Όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το σημείο Curie (~575°C) οι κρύσταλλοι περιέρχονται σταδιακά σε σιδηρομαγνητική κατάσταση, δηλαδή παρατηρείται απότομη αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Σχήμα 3.1).



*Σχήμα 3.1. Τυπική καμπύλη επιδεκτικότητας για σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο μαγνητίτης.
Παπαζάχος- Εισαγωγή στη Γεωφυσική*

Αν το μαγνητικό πεδίο απομακρυνθεί κατά το χρόνο που η θερμοκρασία του πετρώματος βρίσκεται κοντά στο σημείο Curie, οι στοιχειώδεις μαγνήτες που αντιστοιχούν στον σιδηρομαγνητικούς κόκκους αποκτούν τυχαίες διευθύνσεις λόγω της θερμικής κίνησης. Αν, όμως, το πέτρωμα ψύχεται εντός μαγνητικού πεδίου οι κόκκοι των μαγνητικών ορυκτών αποκτούν μόνιμο προσανατολισμό μέσα στο στερεό πέτρωμα, η μαγνήτιση σταθεροποιείται και το πέτρωμα αποκτά παραμένουσα θερμομαγνήτιση, όπως συμβαίνει με τα πλουτώνια πετρώματα στη φύση.

Για να καταστραφεί η θερμομαγνήτιση του πετρώματος θα πρέπει αυτό είτε να θερμανθεί σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο Curie, είτε να βρεθεί εντός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, του οποίου η ένταση να είναι αρκετές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου που δημιουργήσε εξ αρχής τη μαγνήτιση. Αντίθετα, η όποια μαγνήτιση αποκτιέται από ένα πέτρωμα σε θερμοκρασία δωματίου με την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της Γης (παρασιτική μαγνήτιση) καταστρέφεται με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίου του οποίου η ένταση είναι της ίδιας τάξης.

Κατά αναλογία με τη διαδικασία αυτή λειτουργεί και η θεωρία του Αρχαιομαγνητισμού.

Τα κεραμικά υλικά αποτελούνται από λεπτόκοκα υλικά της αποσάθρωσης μητρικών πετρωμάτων (πυριγενών, μεταμορφωμένων, παλαιότερων ιζηματογενών). Σε αυτά περιέχεται ένα ποσοστό σιδηρομαγνητικών ορυκτών, όπως ο μαγνητίτης και ο αιματίτης. Τα ορυκτά αυτά έχουν «αποθηκευμένη» πρωτογενή NRM αυτήν που αντιστοιχεί στο γεωμαγνητικό πεδίο της εποχής κατά την οποία σχηματίστηκαν. Ο κεραμικός πηλός περνάει τη διαδικασία του ψησίματος, κατά την οποία υπόκειται σε

υψηλές θερμοκρασίες για να βελτιωθεί η αντοχή του υλικού. Κατά την καύση, ανάλογα με την ικανότητα του κλιβάνου (δηλαδή πόσο υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επικρατήσουν) είναι πιθανό τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά να βρεθούν σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν το σημείο Currie. Έτσι το παλαιομαγνητικό τους ιστορικό «διαγράφεται» και καταγράφουν ως πρωτογενή NRM αυτή του τοπικού γεωμαγνητικού πεδίου την ώρα της ψύξης τους ως κεραμικά υλικά. Εάν οι θερμοκρασίες καύσης δεν ξεπεράσουν την πρωτογενή NRM είναι δυνατόν το τοπικό γεωμαγνητικό πεδίο να καταγραφεί ως η κύρια δευτερεύουσα NRM.

Αρχαιολογικά, η τελευταία καύση ενός κλιβάνου, για παράδειγμα, αντικατοπτρίζει ένα σημαντικό, συνήθως, πολιτιστικό γεγονός το οποίο είτε είναι τοπικής σημασίας (π.χ. πυρκαγιά οικιών, εγκατάλειψη οικισμού, κ.λ.π.), είτε συνδέεται με μεγάλης έκτασης ιστορικά γεγονότα (επιδρομές, γενοκτονίες, κ.λ.π.) είτε με επιδημίες και φυσικές καταστροφές (πλημμύρες, σεισμοί, αρρώστιες, κ.λ.π.).

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους, όμως, οι κλιβανοί έχουν καεί αρκετές φορές και παρόλο που μας ενδιαφέρει μόνο η τελευταία καύση υπάρχει μια πιθανότητα αυτή να πραγματοποιήθηκε σε σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις προηγούμενες. Αυτό σημαίνει ότι θα έχει διατηρηθεί έστω και κάποιο ελάχιστο ίχνος από τις καταγραφές του γεωμαγνητικού πεδίου από προηγούμενες καύσεις, κι επομένως οι καταγραφές αυτές θα αναφέρονται σε όλες αυτές τις καύσεις.

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, πολλοί κλιβανοί ίδιας χρονικής περιόδου εγκατάλειψης σε μια περιοχή θα έχουν καταγράψει τα ίδια γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά. Έτσι, έπειτα από προσεκτική ανάλυση της διεύθυνσης και της έντασης πολλών θέσεων από μια περιοχή, είναι δυνατό να εξακριβώσουμε τη μεταβολή του γεωμαγνητικού πεδίου κατά το παρελθόν σε εκείνη τη περιοχή. Επιπλέον, η αντίστοιχη μελέτη διαφορετικών περιοχών μπορεί να βοηθήσει στη μελέτη και κατανόηση των διαφόρων πηγών του γεωμαγνητικού πεδίου. Από την άλλη, η καλή γνώση της μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου μας επιτρέπει να χρονολογήσουμε (τόσο με απόλυτο όσο και με σχετικό τρόπο) την τελευταία καύση των καμένων δομών, διαδικασία η οποία ονομάζεται **αρχαιομαγνητική χρονολόγηση**.

Το 1938 ο Thellier (Tarling, 1983) διατύπωσε δύο νόμους που αφορούσαν στη μαγνήτιση που αποκτήθηκε από κεραμικά υλικά κατά τη διάρκεια της επανάψυξής τους μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Σύμφωνα με τον **1^ο νόμο** η μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία της απόκτησής της, όπως ειπώθηκε σε προηγούμενο

κεφάλαιο. Σύμφωνα με τον **2ο νόμο** το άθροισμα των μερικών TRM που αποκτήθηκαν διαδοχικά σε διάφορα όρια χαρακτηριστικών θερμοκρασιών ισούται με εκείνη τη μαγνήτιση που αποκτάται μόνο μια φορά μέσα στο όριο των θερμοκρασιών που ορίζεται από τις ακραίες θερμοκρασίες. 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 (Thellier, 1937).

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε σχέση με άλλες μεθόδους γεω-χρονολόγησης είναι ότι καθώς χρονολογείται η τελευταία καύση (για κλιβάνους) ή απόθεση (για ηφαιστειακούς, κ.λ.π. σχηματισμούς) και σταδιακά αυξάνεται συνεχώς η βάση δεδομένων, αυξάνεται και η ακρίβεια της μεθόδου αυτής. Αυτό κάνει τη μέθοδο μοναδική, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των δεδομένων τόσο πιο αξιόπιστη είναι η χρονολόγηση, κάτι που δε συμβαίνει στις υπόλοιπες μεθόδους χρονολόγησης.

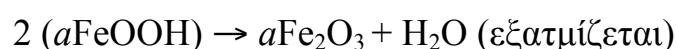
Επιπλέον, η ακρίβεια της μεθόδου αυτής εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια της μέσης τιμής της διεύθυνσης και της έντασης της μελετημένης δομής. Μεγάλο ρόλο παίζει και η αξιοπιστία με την οποία προηγούμενες δομές έχουν μελετηθεί, καθώς η ποιότητα και η ποσότητα των διαθέσιμων δεδομένων για τη βαθμονόμηση επιβάλλουν ένα περιορισμό στην ακρίβεια με την οποία μια δομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τέλος, εξίσου σημαντικό παράγοντα αποτελεί ο ρυθμός μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου ο οποίος δεν είναι πάντα σταθερός αλλά ποικίλλει, τουλάχιστον τα τελευταία 3000 χρόνια, καθώς μπορούν να καταγραφούν ίδια γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά που αναλογούν σε διαφορετικές χρονολογήσεις οδηγώντας σε αβέβαιη χρονολόγηση.

3.4 Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM)

Χημικές αλλαγές που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σιδηρομαγνητικών ορυκτών κάτω από τις θερμοκρασίες φραγμού εντός μαγνητικού πεδίου οδηγούν σε απόκτηση *χημικής παραμένουσας μαγνήτισης (chemical remanent*

magnetization- CRM). Χημικές αντιδράσεις που εμπλέκουν σιδηρομαγνητικά ορυκτά συμπεριλαμβάνουν α) αλλοίωση προϋπαρχόντων ορυκτών (πιθανώς σιδηρομαγνητικών) προς σχηματισμό σιδηρομαγνητικών ορυκτών ή β) καθίζηση σιδηρομαγνητικών ορυκτών από ένα διάλυμα. Αν και υπάρχουν εξαιρέσεις, η CRM συναντάται συχνότερα σε ιζηματογενή πετρώματα (Butler, 2004).

Ένα παράδειγμα απόκτησης CRM είναι ο σχηματισμός γκαιτίτη από αιματίτη. Ο γκαιτίτης είναι ένα ο ξυδροξείδιο παραγόμενο από την μεταβολή Fe-ούχων πυριτικών ορυκτών. Ο γκαιτίτης μπορεί να αφυδατωθεί σε αιματίτη με την ακόλουθη αντίδραση:



Η CRM αποκτιέται κατά την ανάπτυξη των κόκκων του αιματίτη.

3.5 Θραυσματοπαγής Παραμένουσα Μαγήτιση (DRM)

Η θραυσματοπαγής παραμένουσα μαγήτιση (Detrital remanent magnetization- DRM) καταγράφεται κατά την απόθεση και λιθοποίηση ιζηματογενών πετρωμάτων. Στα περισσότερα αποθετικά περιβάλλοντα, το κύριο θραυσματοπαγές ορυκτό είναι ο μαγνητίτης (ή φτωχός σε Ti τιτανομαγνητίτης) (Butler, 2004). Η DRM είναι μια περίπλοκη διαδικασία, διότι πολλές διαδικασίες και παράμετροι υπεισέρχονται κατά το σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων.

Κατά την απόθεση των ιζημάτων οι μαγνητικές ροπές των κόκκων του μαγνητίτη προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου που επικρατεί κατά το χρόνο της απόθεσης και διατηρούν τον προσανατολισμό αυτό μέσα στο ίζημα.

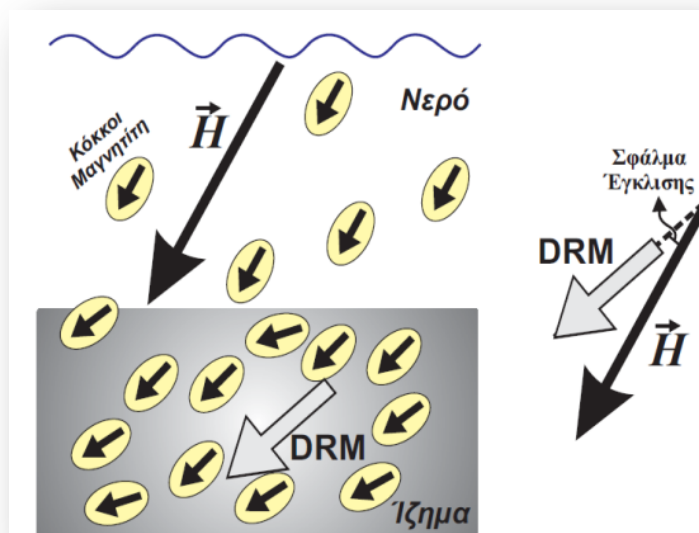
Κατά την απόθεση των ιζημάτων ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών των κόκκων του μαγνητίτη επηρεάζεται από τη μορφολογία του χώρου απόθεσης, από το σχήμα των κόκκων, είτε από άλλους παράγοντες όπως η διεύθυνση των ρευμάτων που επικρατούν εντός της υγρής μάζας. Έτσι οι κόκκοι συνήθως προσανατολίζονται ώστε ο μεγάλος άξονας να είναι παράλληλός προς τη τοπική μορφολογική κλίση, η οποία είναι συνήθως οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια στους περισσότερους χώρους απόθεσης. Αυτό έχει ως συνέπεια η μαγνητική έγκλιση I_s , της μαγήτισης των

κόκκων να αποκλίνει συστηματικά ως προς το οριζόντιο επίπεδο και να προκαλεί το σφάλμα έγκλισης (Σχήμα 3.2). Έχει αποδειχθεί ότι ισχύει η σχέση:

$$\tan I_S = f \tan I_H$$

όπου I_S είναι η έγκλιση της θραυσματοπαγούς μαγνήτισης των ιζημάτων, I_H η έγκλιση του εσωτερικού πεδίου της Γης και f είναι συντελεστής με τιμές από 0.4 ως 0.6.

Επιπλέον, αυτή η διαφοροποίηση κατά τη διάρκεια της απόθεσης των κόκκων έχει ως πρόσθετο αποτέλεσμα η μαγνητική απόκλιση D_S , της μαγνήτισης των κόκκων να αποκλίνει είτε τυχαία σε σχέση με τη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης, είτε συστηματικά λόγω της διεύθυνσης του ρεύματος του νερού το οποίο προσανατολίζει τους κόκκους σε διεύθυνση διαφορετική από αυτή του γήινου μαγνητικού πεδίου (Παζάχος, 2008).



Σχήμα 3.2. Διαδικασία απόκτησης θραυσματοπαγούς παραμένουσας μαγνήτισης, λόγω προσανατολισμού κόκκων μαγνητίτη με το μαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια απόθεσης. Από Παπαζάχος 2008 (τροποποιημένο από Lowrie, 1997)

3.6 Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (VRM)

Η Ιξώδης παραμένουσα μαγνήτιση (*Viscous remanent magnetization*) είναι μια μόνιμη μαγνήτιση η οποία αποκτιέται σταδιακά κατά την έκθεση σε ασθενή μαγνητικά πεδία.

Η φυσική VRM είναι μια δευτερεύουσα μαγνήτιση, αποτέλεσμα της δράσης του γεωμαγνητικού πεδίου πολύ μετά από το σχηματισμό του πετρώματος. Αυτό συμβαίνει γιατί ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες κάποιοι κόκκοι μαγνητικών ορυκτών μπορούν να επαπροσανατολιστούν παράλληλα με το τρέχον μαγνητικό πεδίο. Από παλαιομαγνητικής απόψεως, αυτή η VRM σηνήθως εκλαμβάνεται ως «ανεπιθύμητος θόρυβος». Σ σνήθως, η «διαγραφή» της από το σιδηρομαγνητικό δείγμα είναι εύκολη εργαστηριακά με τη χρήση μικρής σχετικά έντασης εναλλασόμενου πεδίου, που δεν θα επηρεάσει την πρωτογενή NRM και τις κύριες δευτερεύουσες NRM (Butler, 2008).

3.7 Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση (IRM)

Η Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (*Isothermal remanent magnetization-IRM*) είναι αποτέλεσμα μικρής διάρκειας έκθεσης σε ισχυρά μαγνητικά πεδία υπό σταθερές θερμοκρασίες. Εργαστηριακά, η IRM προδίδεται από την έκθεση (σνήθως σε θερμοκρασίες δωματίου) σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από ηλεκτρομαγνήτη. Η IRM είναι η μορφή της παραμένουσας μαγνήτισης παραγόμενης από πειράματα υστέρησης και αποκτιέται από σιδηρομαγνητικούς κόκκους με δυνάμεις συνοχής μικρότερες από το εφαρμοζόμενο πεδίο (Butler, 2004).

4. Αρχαιομαγνητική μελέτη κλιβάνου και κεραμικών του αρχαιολογικού χώρου

4.1 Γενικά στοιχεία και αρχαιολογική περιγραφή των κλιβάνων

Ο κλίβανος που μελετήθηκε βρίσκεται στην κεντρική Μακεδονία. Πιο συγκεκριμένα ονομάστηκε, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης «ΥΑ3» και βρέθηκε στη συμβολή των οδών Γιαννιτσών και Μαζαράκη - Καβάλας στη Θεσσαλονίκη κατά τη διάρκεια σωστικής ανασκαφής προς το τέλος του 2010 (Σχήμα 4.1).

Στην ανασκαφή της οδού Γιαννιτσών είχαν αποκαλυφθεί κατά την εποχή έναρξης της εργασίας αυτής -2011- τέσσερις κεραμικοί κλίβανοι. Το σύνολο αυτό, σύμφωνα με ευρήματα νομισμάτων αλλά και ενός νεκροταφείου, τοποθετείται προς τα τέλη του 5^{ου} μΧ αιώνα, ανήκει δηλαδή στους πρωτοβυζαντινούς χρόνους. Εξ αυτών οι 1 και 3 βρίσκονται δίπλα ενώ ο 4 απέχει περί τα 25 μέτρα και ονομάστηκαν αντίστοιχα- «ΥΑ1», «ΥΑ3», «ΥΑ4» (Σχήμα 4.2). Ο κλίβανος 2 κρίθηκε από τους αρχαιολόγους ως διατηρητέος και επομένως δεν ήταν δυνατή η δειγματοληψία σε αυτόν. Δειγματοληψία έγινε και στους 3 κλιβάνους, αλλά στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία μόνο από τον κλίβανο «ΥΑ3» (Σχήμα 4.3). Τα στοιχεία από τον κλίβανο 1 (ΥΑ1) εμπεριέχονται στην διατριβή ειδίκευσης που παρουσιάστηκε στον τομέα Γεωφυσικής τον Ιανουάριο του 2013 (Ιωαννίδης 2013). Παρατίθενται φωτογραφίες από τον κλίβανο ΥΑ3 και από την περιοχή της ανασκαφής.



Σχήμα 4.1. Δορυφορική εικόνα της θέσης ανασκαφής. Λήψη μέσω Google Earth.



Σχήμα 4.2. Πανοραμική φωτογραφία της θέσης ανασκαφής (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).

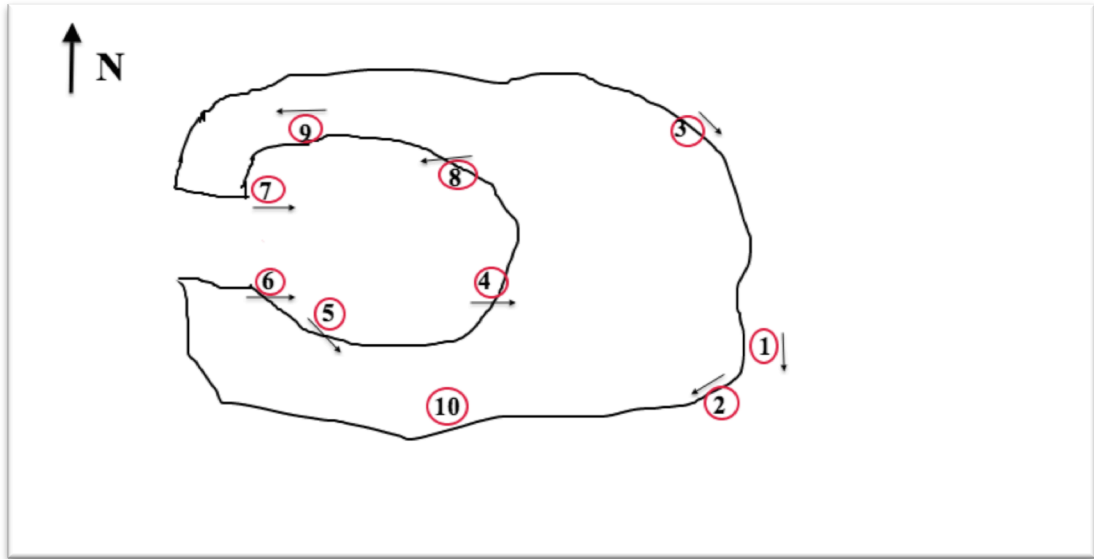


Σχήμα 4.3. Κλίβανος ΥΑ3 στην οδό Γιαννιτσών (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).

4.2 Δειγματοληψία.

Ο κλίβανος ανήκει στην κατηγορία των «απίοσχημων» κλιβάνων που συναντώνται συχνά στα πρωτοβυζαντινά χρόνια (Raptis 2010) (Σχήμα 4.4). Σε αυτό το είδος των κλιβάνων αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 700 °C οι οποίες είναι επαρκείς για την απόκτηση θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας που αναφέρει τα ονόματα των δειγμάτων που ελήφθησαν από τον κλίβανο ΥΑ3. Ακόμα αναγράφονται η παράταξη (strike) και η κλίση (dip) που είχαν τα δείγματα in situ την ώρα που έγινε η δειγματοληψία, η θέση του ήλιου στον ορίζοντα καθώς και σχόλια για τη σχετική θέση των δειγμάτων στο χώρο (Πίνακας 4.1). Ακολουθεί σκαρίφημα του κλιβάνου με τις θέσεις των δειγμάτων (Σχήμα 4.4). Μεριμνάται πάντοτε να υπάρχει μια κατά τον δυνατόν ομοιογενής κατανομή των δειγμάτων. Τα βέλη υποδεικνύουν τη διεύθυνση της παράταξης. Τα δείγματα αποτελούνται είτε από ψημένο πηλό, είτε από τεμάχια πλίνθων που χρησιμοποιήθηκαν σαν οικοδομικό υλικό των κλιβάνων.



Σχήμα 4.4. Σκαρίφημα του κλιβάνου (εικόνα Corel).

ΔΕΙΓΜΑ	STRIKE <i>CL - BR</i>	DIP	SUN	TIME	COMMENT
YA3-1	338 - 074	03	122	09:49	αριστερή είσοδος
YA3-2	010 – 100	08	154	09:50	αριστερή είσοδος
YA3-3	262 – 356	20	051	09:51	δεξιά είσοδος
YA3-4	196 – 287	00	345	09:51	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-5	252 – 345	00	040	09:55	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-6	194 – 280	01	333	09:58	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-7	190 – 280	00	332	10:02	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-8	330 – 062	01	112	10:025	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-9	024 – 120	02	166	10:10	κεντρικό υποστήλωμα
YA3-10	190 – (-)	64	(-)	(-)	κεντρικό υποστήλωμα

Πίνακας 4.1. Στοιχεία των 10 δειγμάτων του κλιβάνου YA3.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη διαδικασία λήψης δειγμάτων από τον κλιβάνο YA3



Σχήμα 4.5. Δειγματοληψία εντός του κλιβάνου YA3. Στη φωτο είναι η Ελίνα Αϊδονά, λέκτορας του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, καθώς και ο μεταπτυχιακός φοιτητής Νίκος Ιωαννίδης (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.6. Δειγματοληψία στον κλιβανο YA3. Διακρίνονται 2 δείγματα, τα YA3-1 και YA3-2, καθώς και δεξιά η είσοδος του κλιβάνου (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.7. Δείγμα YA3_3 (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.8. Δείγμα YA3_4 (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.9. Δείγμα YA3_6 (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.10. Δείγμα YA3_7 (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).



Σχήμα 4.11. Δείγματα YA3_8 και YA3_9 (φωτογραφίες εργαστηρίου Γεωφυσικής ΑΠΘ).

4.3 Εργαστηριακή μελέτη

4.3.1 Προετοιμασία δειγμάτων

Στην αρχή προσαρμόζεται το σχήμα και το μέγεθος των δειγμάτων έτσι ώστε να προκύψουν κύβοι ή κύλινδροι συγκεκριμένων διαστάσεων, αναλόγως το είδος του οργάνου μέτρησης, διατηρώντας την διεύθυνση αναφοράς. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη χρήση τρυπανιού ή με δίσκο κοπής. Μη καμένα μέρη του δείγματος ή ξένα σώματα (θραύσματα αγγείων, κομμάτια σιδήρου, κ.λ.π.) τα οποία βρίσκονται μέσα στο δείγμα πρέπει να απομακρύνονται. Επίσης, πριν από την λήψη πυρήνων τα λιγότερο συμπαγή δείγματα πρέπει να υφίστανται συμπαγοποίηση η οποία συντελείται σε εύθραυστα ή ευαίσθητα δείγματα με την εισαγωγή αυτών σε συμπαγοποιητικό υλικό για 48 ώρες. Πιο συγκεκριμένα, στο παλαιομαγνητικό εργαστήριο του Α.Π.Θ. χρησιμοποιήθηκε διάλυμα πυριτικού νατρίου (γύψος). Στη συνέχεια, το δείγμα στεγνώνει (στον αέρα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) για περίπου 2-3 μέρες, αναλόγως με το δείγμα. Μόλις στεγνώσει είναι έτοιμο να γυψωθεί κι έπειτα να διατηρηθεί.

Τα δείγματα γυψώνονται για να μπορέσουν να διατηρηθούν χωρίς να σπάσουν. Αρχικά, μαρκάρεται πάνω στο δείγμα σε πλέγμα η γραμμή προσανατολισμού. Στη συνέχεια, γεμίζουμε ένα καλούπι από plexiglass με γύψο και μέσα σε αυτό τοποθετούμε το δείγμα. Μόλις συμπαγοποιηθεί η γύψος απομακρύνεται το καλούπι. Έπειτα, χαράσσεται ο προσανατολισμός σε κάθε δείγμα.

Οι ιδανικές διαστάσεις εξαρτώνται από την φύση του υλικού (κυλινδρικά ή κυβικά δείγματα). Η επιλογή του σχήματος των δειγμάτων καθορίζεται από πολύ συχνά από τα όργανα που είναι διαθέσιμα στο εργαστήριο και συνήθως λαμβάνονται πυρήνες κυλινδρικοί με διάμετρο 2,5cm και 2,2cm μήκους. Ο λόγος, όμως, του ύψους προς την διάμετρο πρέπει να βρίσκεται μέσα στο διάστημα 0.85-0.892, για τα κυλινδρικά δείγματα συγκεκριμένα.

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

4.3.2 Μέτρηση NRM

Η NRM είναι ένα διάνυσμα το οποίο καθορίζεται από την έντασή του (F) και την διεύθυνση (D , I), η οποία είναι, γενικά, το άθροισμα δύο ή περισσότερων συνιστωσών της μαγνήτισης που αποκτώνται σε διάφορες χρονικές στιγμές, όπως έχει ειπωθεί προηγουμένως. Στον αρχαιομαγνητισμό, ως «χαρακτηριστική» ή σταθερή συνιστώσα (ChRM) θεωρείται η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (TRM) που αποκτήθηκε στο αρχαίο μαγνητικό πεδίο κατά την ψύξη του υλικού μετά την τελευταία καύση του, ενώ οι δευτερεύουσες μαγνήτισεις (ιξώδεις) αποκτήθηκαν αργότερα. Από την NRM ικανοποιητικού αριθμού προσανατολισμένων δειγμάτων στο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς μπορεί να βρεθεί αν το καμμένο υλικό είναι *in-situ* (δεν έχει υποστεί, δηλαδή, καμία μετακίνηση μετά την καύση του). Από την TRM μπορεί να βρεθεί η διεύθυνση και η ένταση του πεδίου κατά το χρόνο της τελευταίας καύσης του υλικού.

Ο υπολογισμός, όμως, της σχετικά ασθενούς μαγνήτισης του αρχαιομαγνητικού πεδίου απαιτεί όργανα υψηλής ευαισθησίας. Τα όργανα τα οποία μετρούν την NRM είναι τα μαγνητόμετρα και η φυσική ποσότητα που μετρούν είναι η συνολική διπολική ροπή \mathbf{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» από τις μετρούμενες ποσότητες γίνεται ως εξής:

$$M_{tot} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (Am^2)$$

$$NRM = \frac{M_{tot}}{V} \quad (A/m)$$

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

όπου I_s , D_s η έγκλιση και η απόκλιση αντίστοιχα, σε συντεταγμένες δείγματος και $V=10^3$ cm ο όγκος του δείγματος αυτού. Αν λάβουμε υπόψη το αζιμούθιο και την κλίση που μετρήθηκαν κατά την δειγματοληψία μπορούμε να υπολογίσουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες της NRM.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μαγνητόμετρων, τρεις εκ των οποίων είναι τα **μαγνητόμετρα ροής**, τα **περιστροφικά** και τα **κρυογενετικού τύπου**. Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό μαγνητόμετρο (*spinner magnetometer*). 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.

Οι NRM μετρήθηκαν για όλα τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, δηλαδή τα:

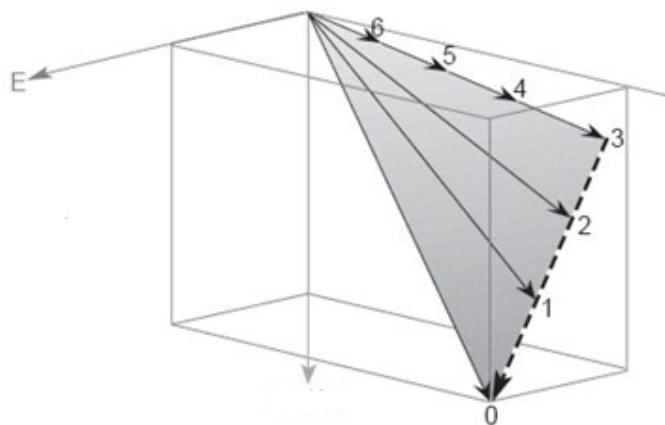
1. YA3_1-1
2. YA3_1-9
3. YA3_2-11
4. YA3_3-4
5. YA3_4-2
6. YA3_5-1
7. YA3_6-4
8. YA3_6-12
9. YA3_7-4
10. YA3_7-19
11. YA3_8-5
12. YA3_8-6
13. YA3_9-16
14. YA3_10-2
15. YA3_10-4

4.3.3 Απομαγνήτιση σε εναλλασσόμενο πεδίο

Με τη μέθοδο αυτή, το δείγμα εκτίθεται σε εξωτερικό εναλλασσόμενο πεδίο, του οποίου η κυματομορφή είναι ημιτονοειδής συνάρτηση με γραμμική ελάτωση του μεγέθους αυτού με τον χρόνο. Τυπικά όργανα αναπτύσσουν πεδία έντασης μέχρι και

1000Oe (100mT) με συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής στα 400Hz και μέγιστο χρόνο σταδιακού μηδενισμού της έντασής του γύρω στο ένα λεπτό. Τα περισσότερα από τα μηχανήματα αυτά έχουν ένα χώρο, μέσα στον οποίο τοποθετείται το δείγμα, που περιστρέφεται μέσα στο όργανο κατά τη διάρκεια εφαρμογής του εναλλασσόμενου πεδίου.

Οι αλλαγές στο διάνυσμα της μαγνήτισης ενός δείγματος κατά τη διάρκεια της απομαγνήτισης περιλαμβάνουν τόσο τη διεύθυνση όσο και την ένταση αυτού. Οι αλλαγές στη διεύθυνση απεικονίζονται καλύτερα σε στερεογραφική προβολή, ενώ σε διαγράμματα Zijderveld οι μεταβολές της έντασης απεικονίζεται σε συνδυασμό με τις μεταβολές της διεύθυνσης). Ενώ θα χρειαζόταν, δηλαδή, δύο διαγράμματα προς απεικόνιση των δύο συνιστωσών του διανύσματος της μαγνήτισης, χρησιμοποιείται ένα Zijderveld (διπλό διάγραμμα. Μερικά παραδείγματα τέτοιων διαγραμμάτων απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά από τον Zijderveld (1967), και τώρα πια είναι η πλέον καθιερωμένη μέθοδος παρουσίασης αποτελεσμάτων σταδιακής απομαγνήτισης (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12. Τρισδιάστατη απεικόνιση της σταδιακής μεταβολής του διανύσματος μαγνήτισης σε ιδανικό δείγμα με δύο συνιστώσες, τη δευτερεύουσα (Στάδια απομαγνήτισης 0, 1, 2) NRM και την πρώτη (Στάδια απομαγνήτισης 3, 4, 5, 6) – χαρακτηριστική NRM. Από Butler (2004).

Απομαγνητίστηκαν σε εναλασσόμενο πεδίο τα δείγματα:

1. YA3_1-1**
2. YA3_1-9
3. YA3_2-11
4. YA3_3-4
5. YA3_4-2
6. YA3_5-1
7. YA3_6-4
8. YA3_6-12
9. YA3_7-4
10. YA3_7-19
11. YA3_8-5
12. YA3_8-6
13. YA3_9-16
14. YA3_10-2*
15. YA3_10-4*

*τα δύο αυτά δείγματα (YA3_10-2 και YA3_10-4) παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διαδικασία απομαγνήτισης τους, η οποία διακόπηκε πρόωρα γιατί τα αποτελέσματα δεν θα είχαν φυσική σημασία. Τα δείγματα αυτά δεν ελήφθησαν υπόψη στην τελική μέτρηση της αρχαιοδιεύθυνσης και δεν παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα των μετρήσεων τους.

** το δείγμα YA3_1-1 υποβλήθηκε σε τεχνητή μαγνήτιση (IRM) μετά την απομαγνήτιση του. Στη συνέχεια ακολούθησε μια δεύτερη απομαγνήτιση του, στα πλαίσια της διαδικασίας του πειράματος Lowrie – Fuller.

4.3.4 Πείραμα IRM

Στο πείραμα της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (Isothermal Remanent Magnetization- IRM) το δείγμα εκτίθεται σε συνεχώς αυξανόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, με ταυτόχρονη μέτρηση της μαγνήτισης που αποκτά μέχρι τα 1200Oe συνήθως (*stepwise remanance aquisition*). Αν μέχρι το πεδίο αυτό οι σιδηρομαγνητικοί κόκκοι του έχουν κορεστεί, τότε το δείγμα αυτό έχει υψηλή ποσότητα μαγνητιότητας. 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. Αν υπάρχει αιματίτης (ή γκαιτίτης), η IRM αποκτάται σταδιακά μέχρι και τα 3Tesla. Με αυτή τη διαδικασία μπορούμε να ανιχνεύσουμε μικρές ποσότητες αιματίτη (ή γκαιτίτη) ακόμα και όταν συνυπάρχουν με πιο ισχυρούς σιδηρομαγνητικούς τιτανομαγνητίτες.

4.3.5 Πείραμα Lowrie- Fuller

Με το τεστ των Lowrie και Fuller (1971) μπορεί να ταυτοποιηθεί το είδος των κόκκων ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών περιοχών τους. Το δείγμα υπόκειται σε σταδιακή απομαγνήτιση της NRM, στη συνέχεια κορένεται με τη βοήθεια του οργάνου απόκτησης της IRM και απομαγνητίζεται ξανά. Τέλος, οι τρεις αυτές καμπύλες μετατρέπονται σε ποσοστό % της μεταβολής της μαγνήτισης.

Όταν η πρώτη καμπύλη απομαγνήτισης είναι κάτω από τη δεύτερη 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 αποτελεί η παρουσία μαγνητίτη ως κύριος φορέας της μαγνήτισης).

5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

5.1 Συνολικά αποτελέσματα

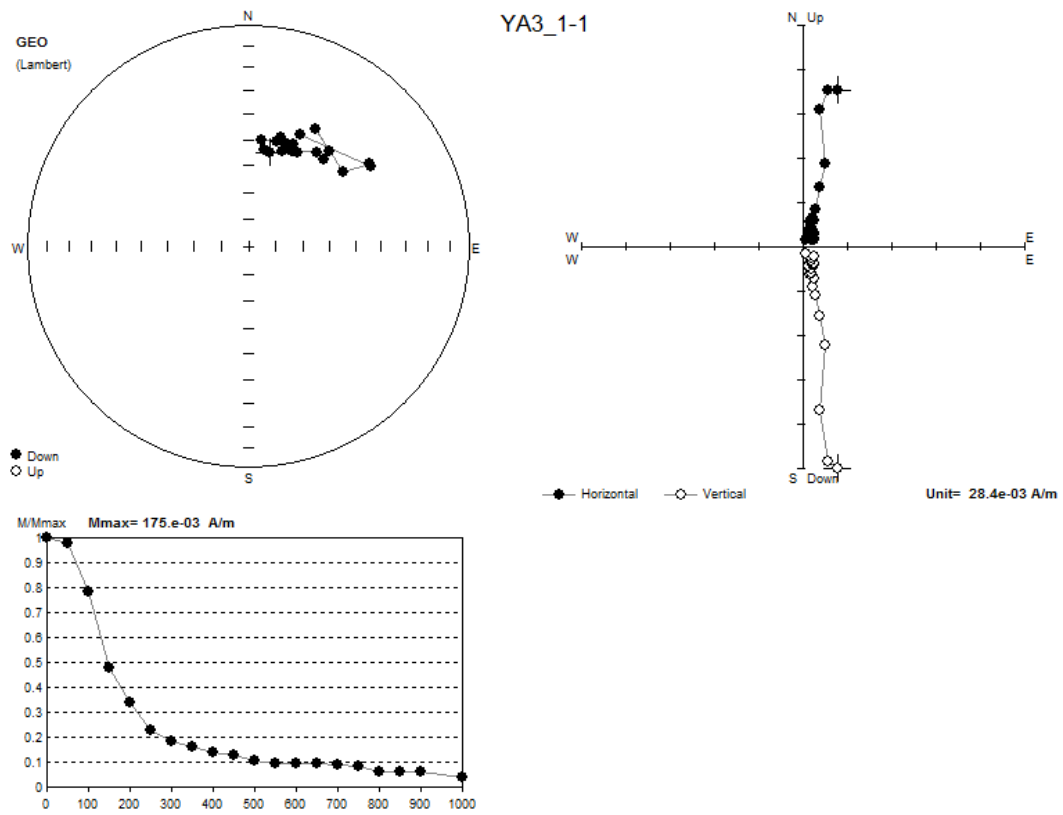
Παρατίθενται διαγράμματα με τις σταδιακές απομαγνητίσεις με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο για τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία:

- YA3_1-1
- YA3_1-9
- YA3_2-11
- YA3_3-4
- YA3_4-2
- YA3_5-1
- YA3_6-4
- YA3_6-12
- YA3_7-4
- YA3_7-19
- YA3_8-5
- YA3_8-6
- YA3_9-16
- YA3_10-2 (δεν ήταν δυνατή η λήψη αποτελεσμάτων)
- YA3_10-4 (δεν ήταν δυνατή η λήψη αποτελεσμάτων)

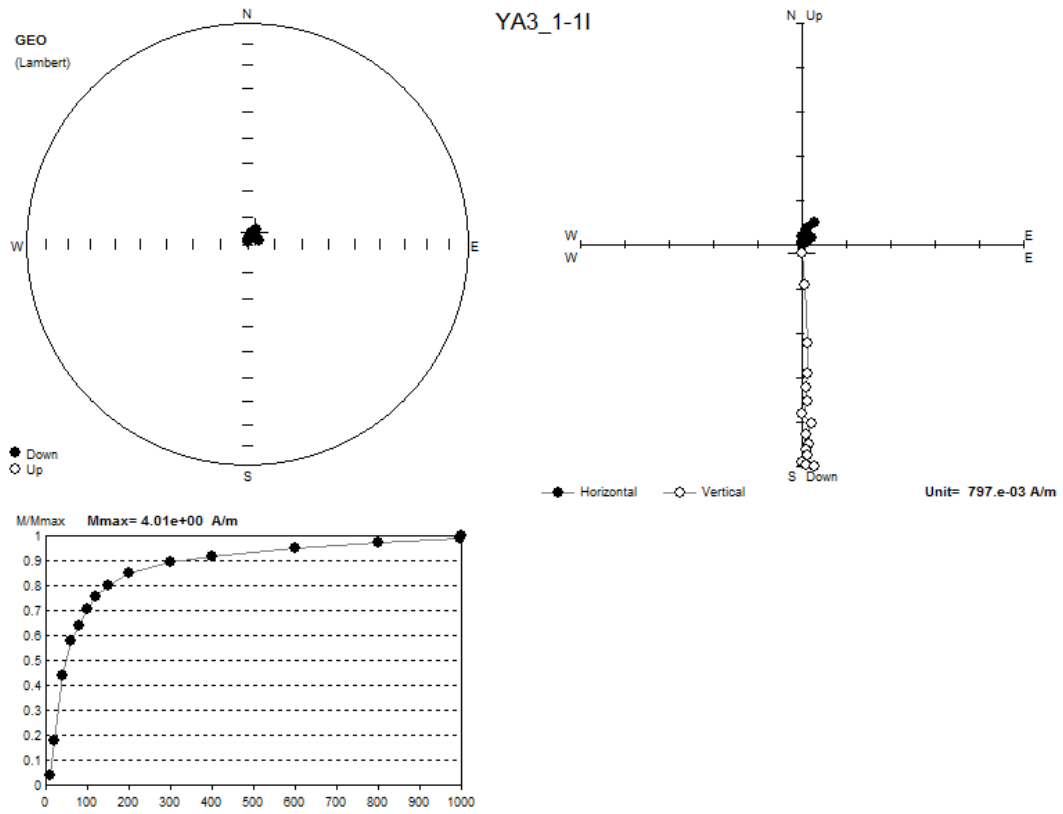
Εξ' αυτών το δείγμα **YA3_1-1** υποβλήθηκε στο τεστ των Lowrie και Fuller (1971).

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 5.1 έως 5.14) παρουσιάζεται πάνω αριστερά τη στερεογραφική προβολή της μέσης απόκλισης και έγκλισης που καταγράφηκε στο δείγμα, πάνω δεξιά το διάνυσμα και τέλος κάτω αριστερά την σταδιακή ελάττωση της έντασης (μείωση για την IRM του YA3_3-1 I) της NRM συναρτήσει της αύξησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου εντός του σωληνοειδούς πηνείου. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού Remasoft.

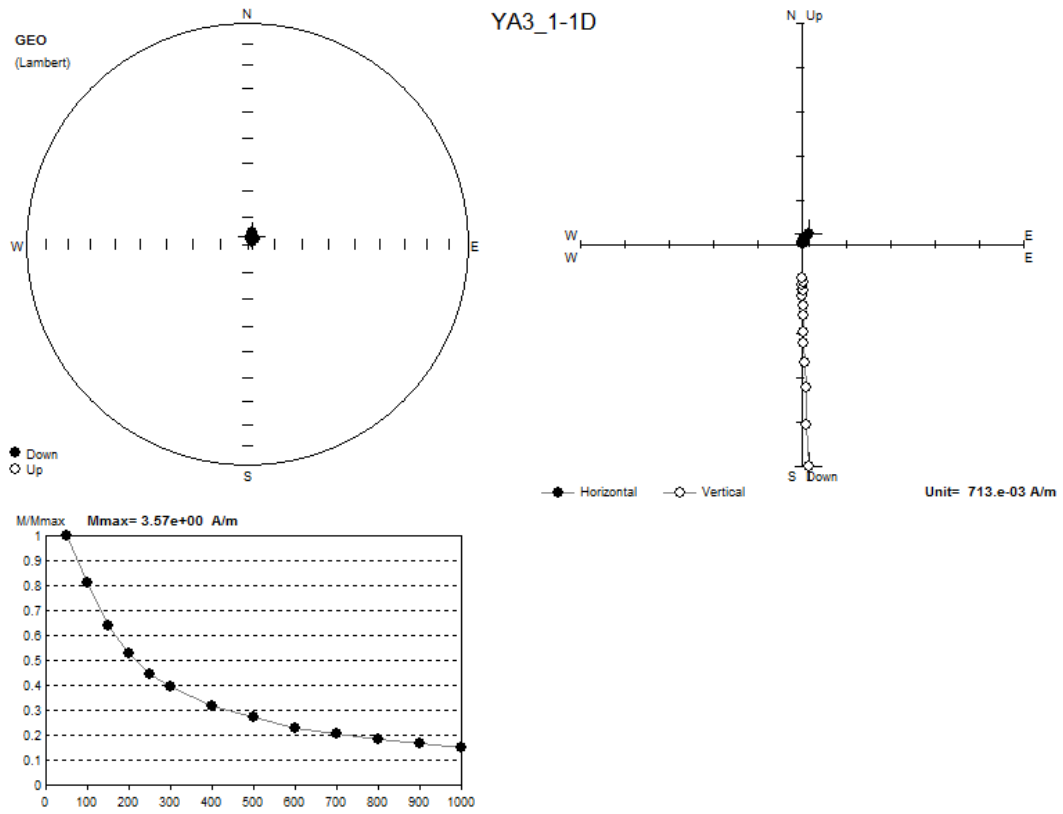
Δείγμα YA3_1-1:



Σχήμα 5.1. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_1-1 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

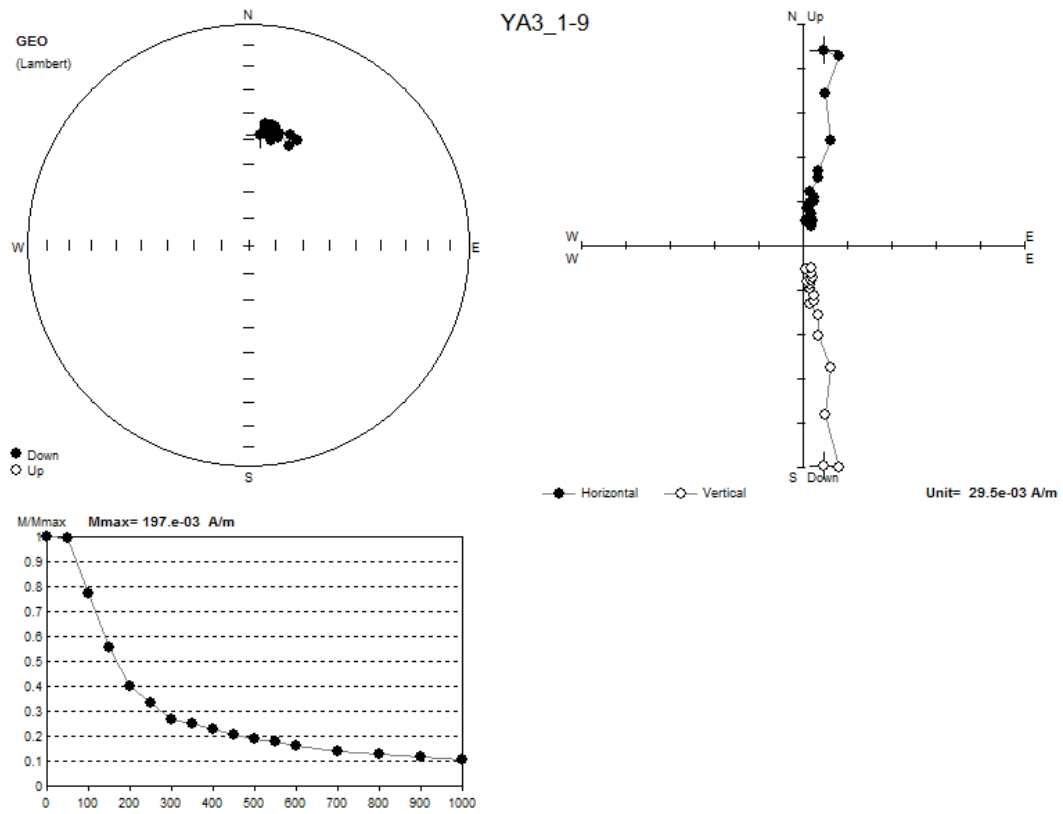


Σχήμα 5.2. Σταδιακή μαγνήτιση δείγματος YA3_1-1 (IRM)



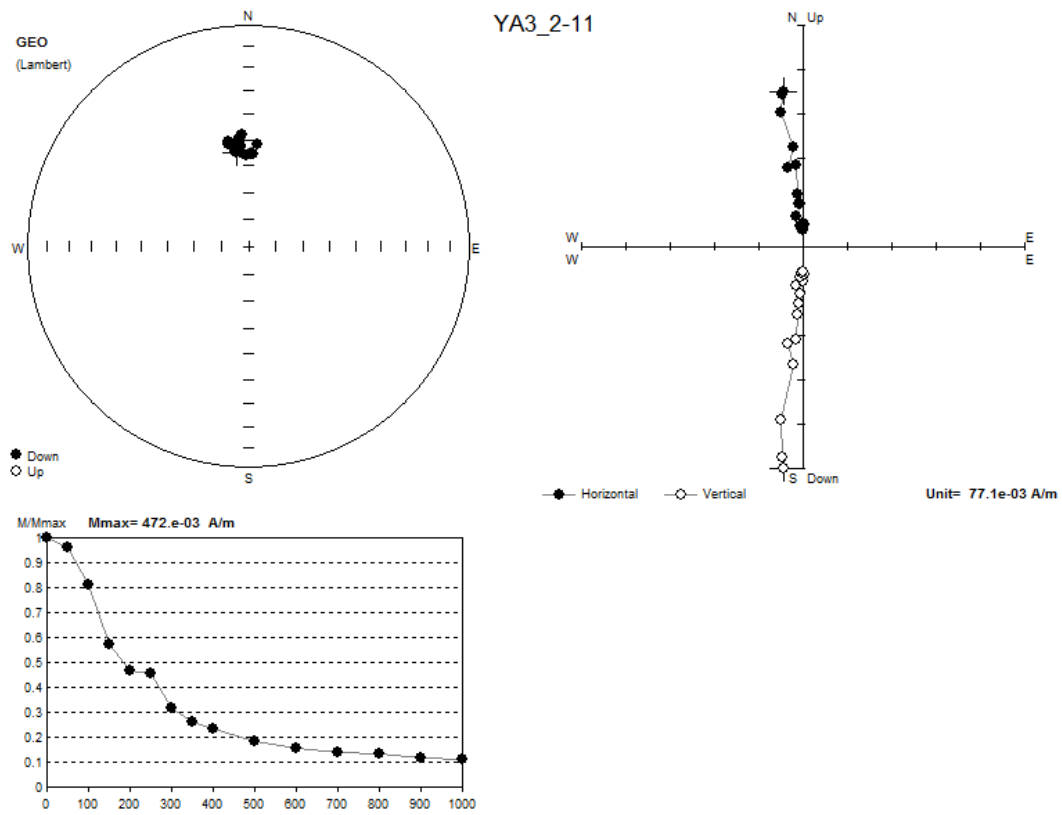
Σχήμα 5.3. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_1-1 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα, μετά από την αύξηση της μαγνήτισης του από την IRM.

Δείγμα YA3_1-9:



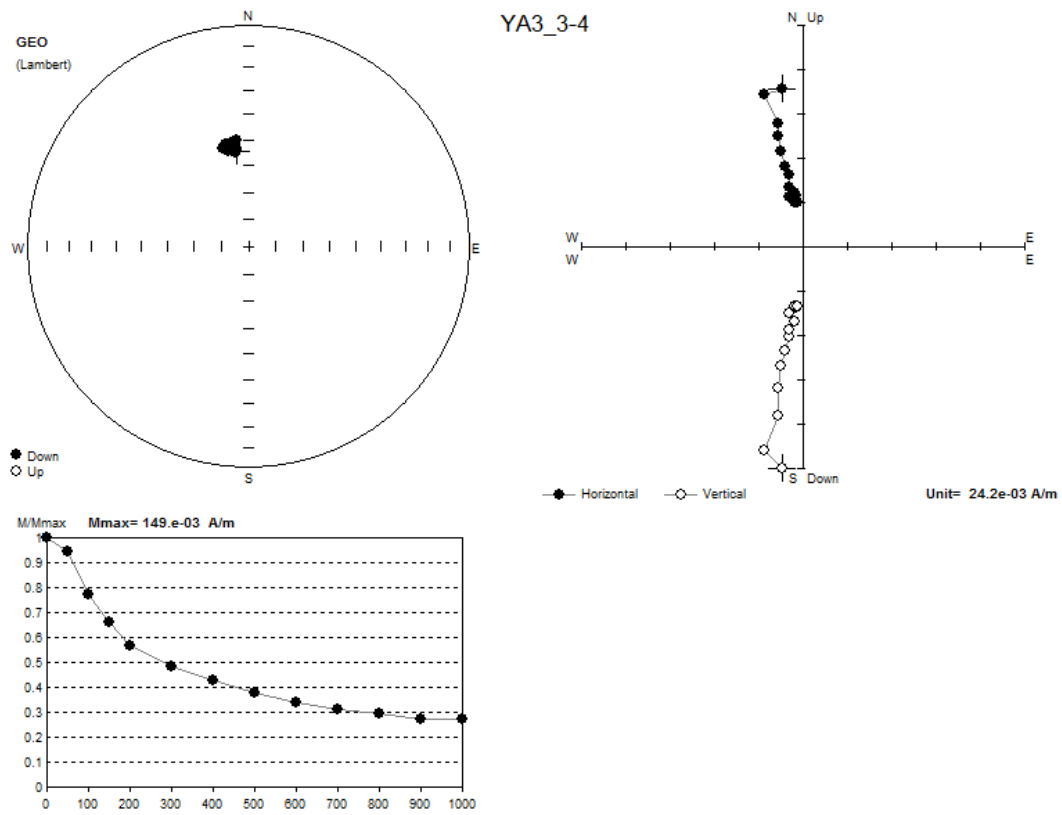
Σχήμα 5.4. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_1-9 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_2-11



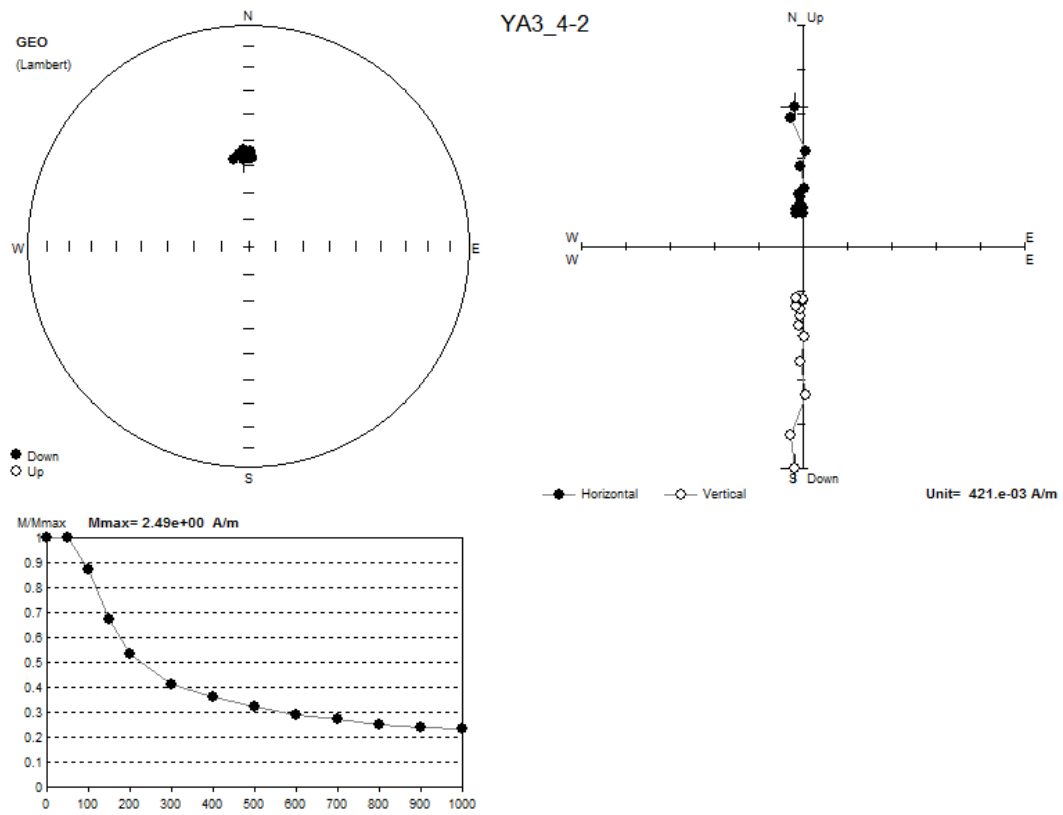
Σχήμα 5.5. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_2-11 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_3-4



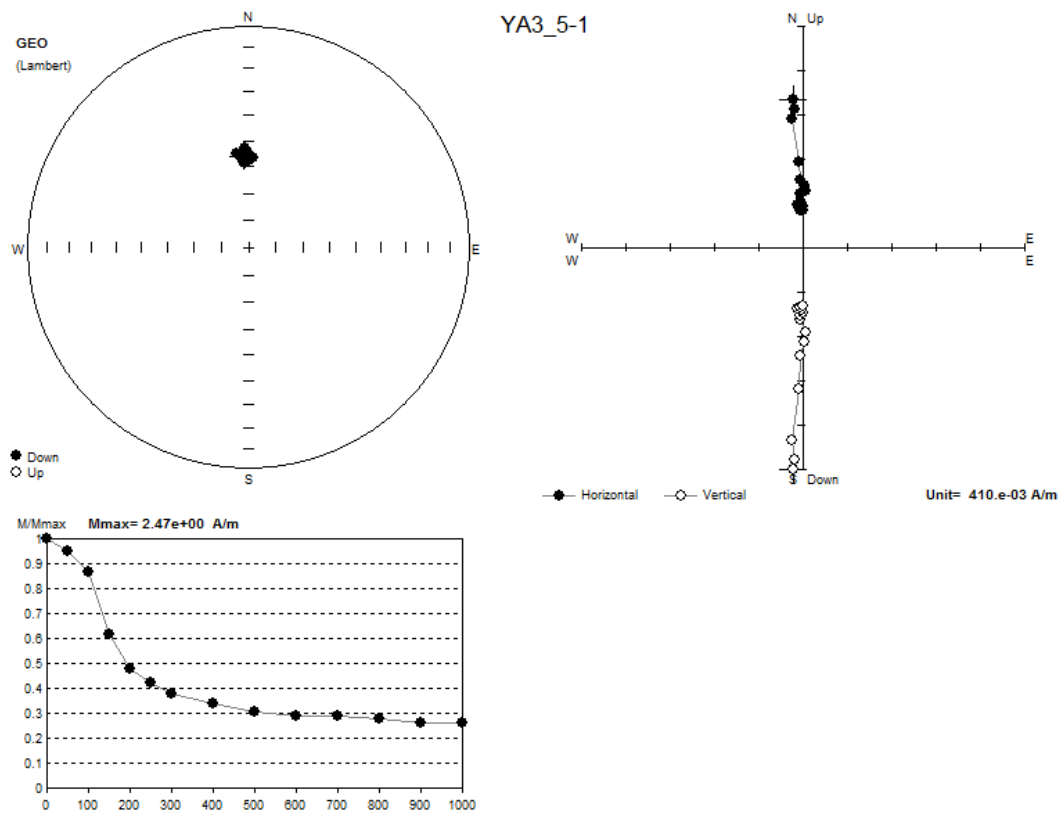
Σχήμα 5.6. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_3-4 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_4-2



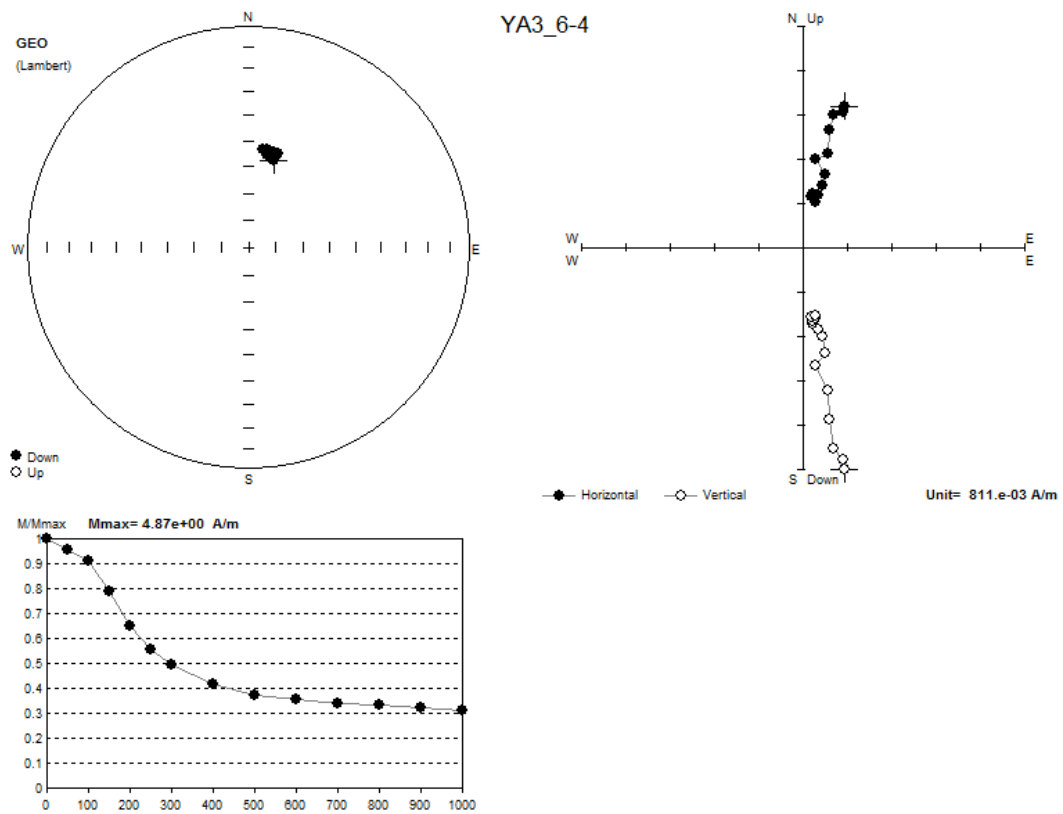
Σχήμα 5.7. Σταδιακή απομαγνήτιση δείγματος YA3_4-2 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_5-1



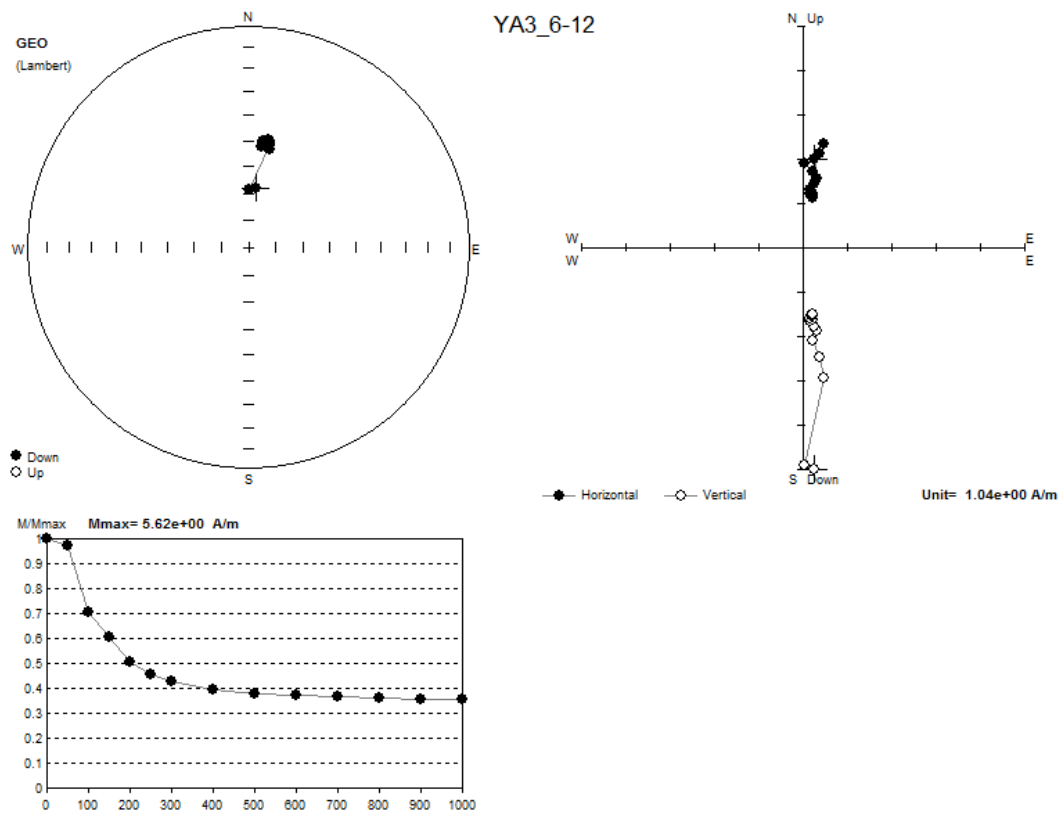
Σχήμα 5.8. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_5-1 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_6-4



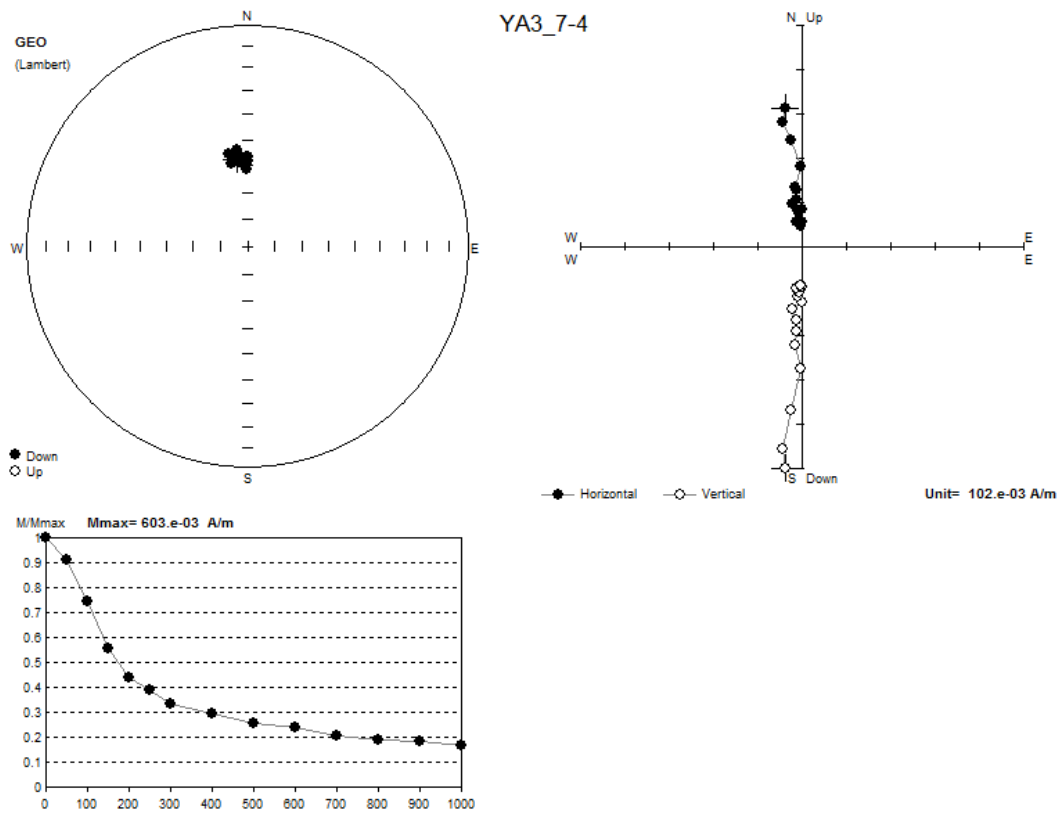
Σχήμα 5.9. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_6-4 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_6-12



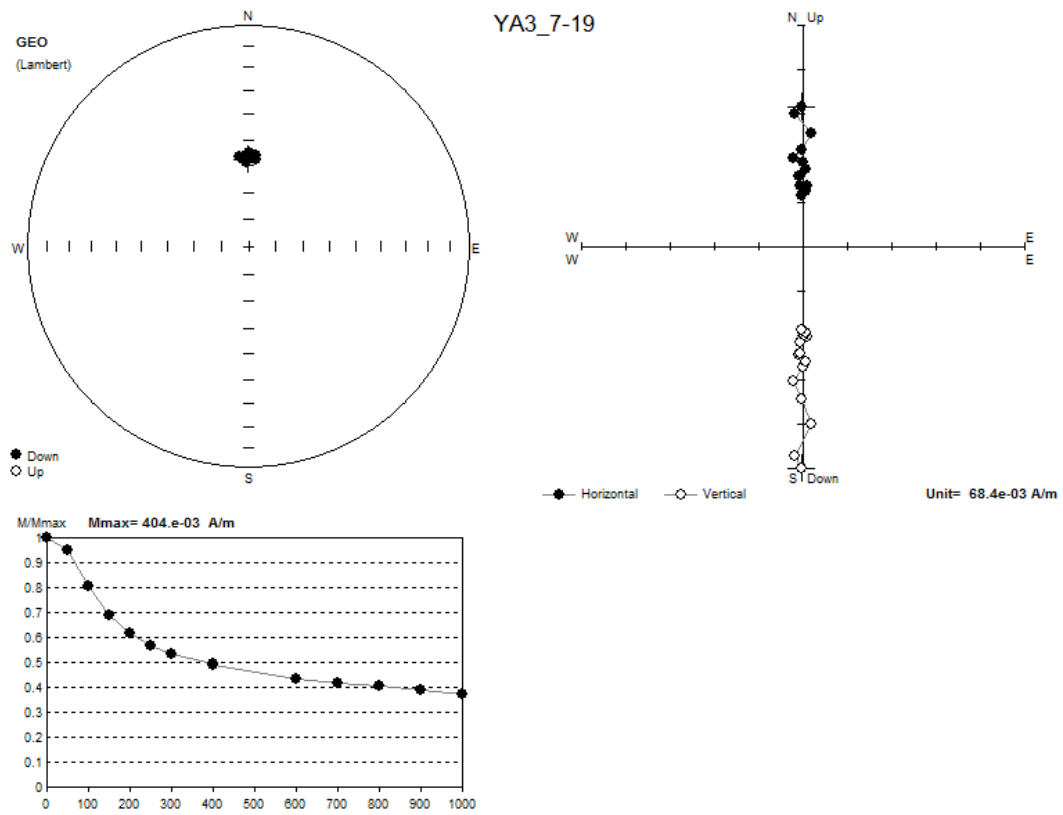
Σχήμα 5.10. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_6-12 σε μαγήητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλάσσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_7-4



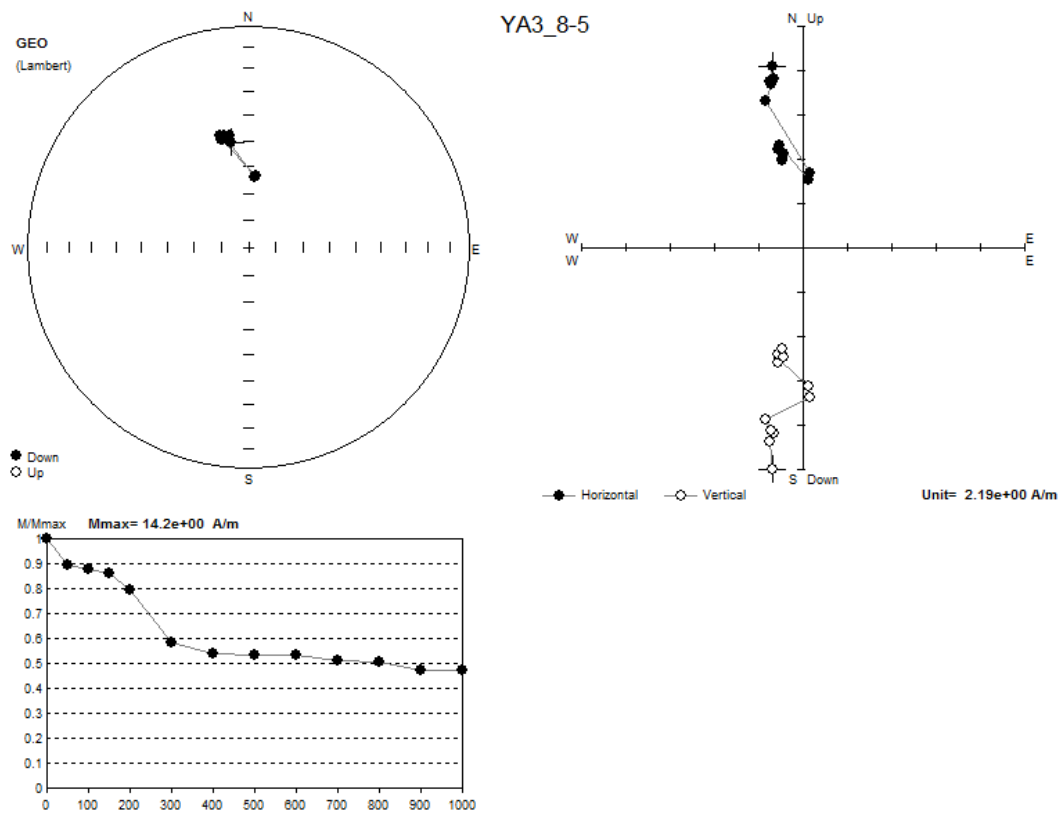
Σχήμα 5.11. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_7-4 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_7-19



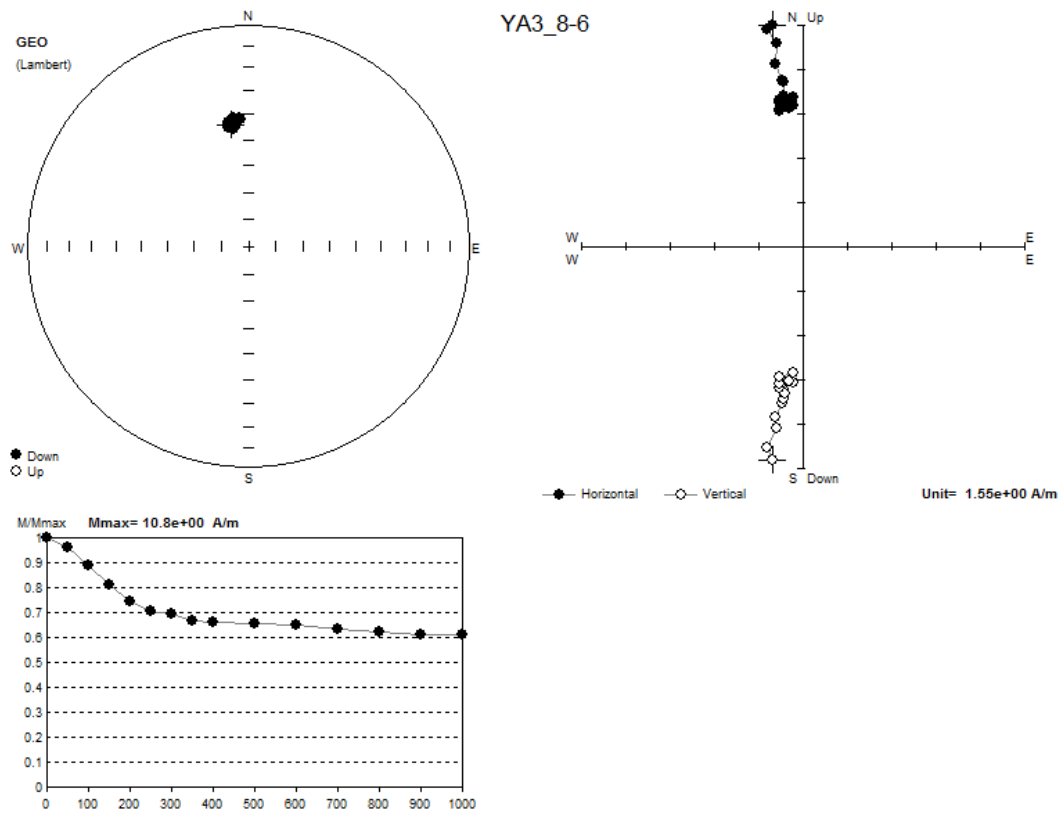
Σχήμα 5.12. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_7-19 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_8-5



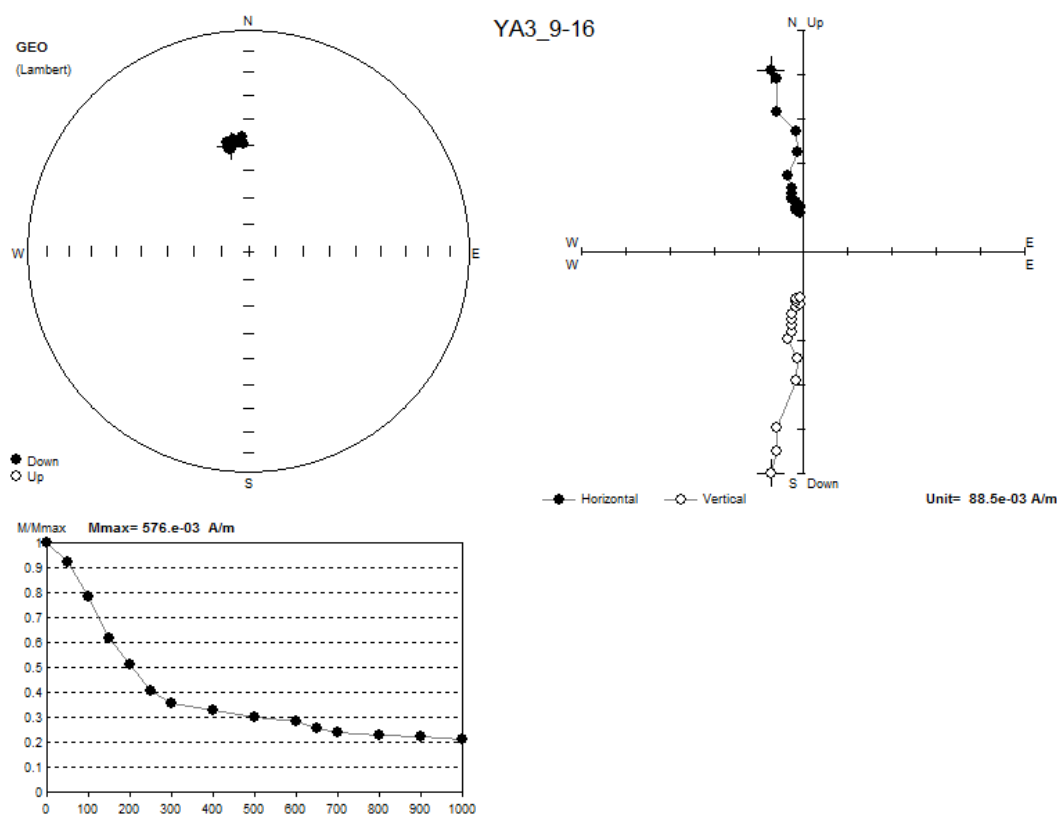
Σχήμα 5.13. Σταδιακή α πομαγήτιση δείγματος YA3_8-5 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_8-6



Σχήμα 5.14. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_8-6 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Δείγμα YA3_9-16



Σχήμα 5.15. Σταδιακή α πομαγνήτιση δείγματος YA3_9-16 σε μαγνητικό πεδίο παραγόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα.

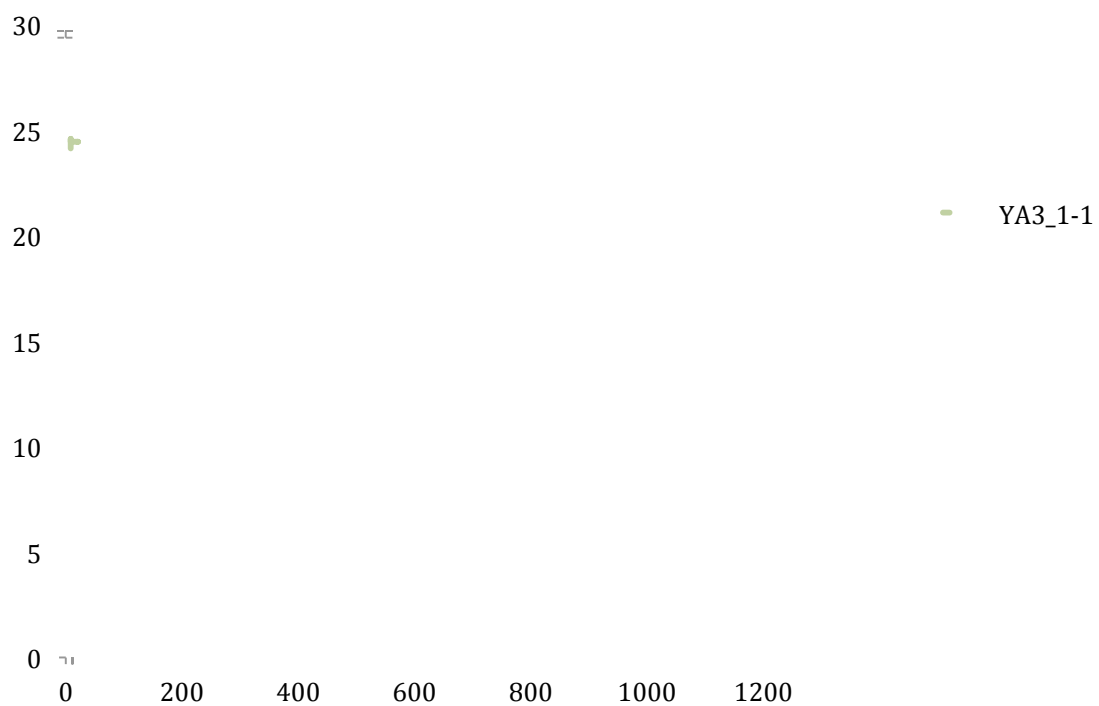
5.2 Πειράματα μαγνητικής ορυκτολογίας

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα της τεχνητής μαγνήτισης IRM και των 2 απομαγνητίσεων του δείγματος YA3_1-1. Δίνεται ακόμα και ένα διάγραμμα με τα αποτελέσματα του πειράματος Lowrie-Fuller για το ίδιο δείγμα. Με την μπλε γραμμή απεικονίζονται τα αποτελέσματα της αρχικής απομαγνήτισης της NRM, με πράσινη η IRM και με κόκκινη η απομαγνήτιση έπειτα από την απόκτηση της IRM.

5.2.1 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση

Με το πείραμα της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM) εξετάζεται η αύξηση της μαγνήτισης που δημιουργείται σε ένα σώμα όταν σε αυτό εφαρμοσθεί μαγνητικό πεδίο αυξανόμενης ισχύος. Όταν αυτή σταματήσει να αυξάνεται σημαίνει ότι το σώμα έχει μαγνητικά κορεστεί. Παρατίθεται το αποτέλεσμα της απόκτησης IRM για το δείγμα «YA3_3-1» (Σχήμα 5.16). Όσον αφορά στην ερμηνεία του διαγράμματος, ισχύει γενικά ότι, δείγματα που δείχνουν κορεσμό κοντά στα 200 Oe αντιπροσωπεύουν υλικά αποτελούμενα κατά πλείστον από μαγνητίτη (όσο 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) και όσα δείχνουν κορεσμό κοντά στα 400 Oe αποτελούν συνδιασμό μαγνητίτη – αιματίτη. Τέλος, όσο αυξάνεται η ένταση του εξωτερικού πεδίου στην οποία επιτυγχάνεται κορεσμός τόσο περισσότερο αυξάνεται το ποσοστό του αιματίτη στο δείγμα σε σχέση με το μαγνητίτη. Η καμπύλη της μαγνήτισης το δείγματος «YA3_3-1», αυξάνεται απότομα περίπου στα 200 Oe αλλά παρουσιάζει μια μικρή αλλά συνεχή αύξηση στη συνέχεια. Άρα, το δείγμα «YA3_3-1» αποτελείται επί το πλείστον από μαγνητίτη, με κάποια μικρή συνύπαρξη αιματίτη.

YA3_1-1 IRM



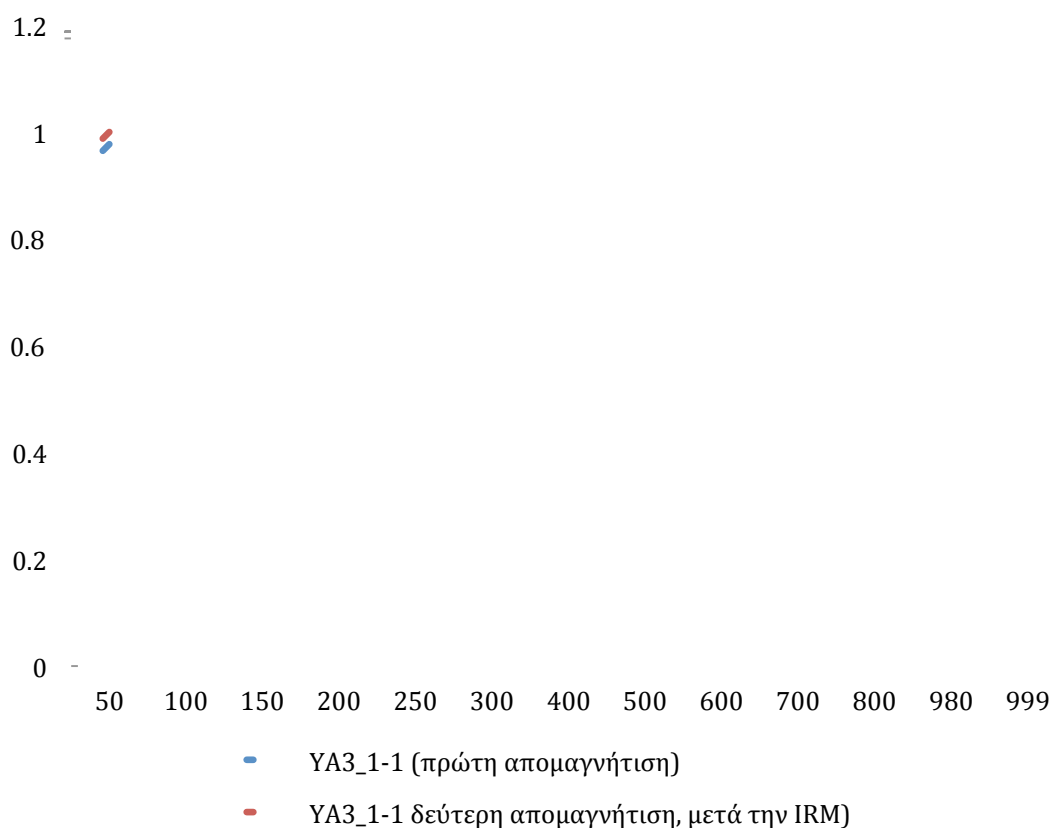
Σχήμα 5.16. Διαγράμματα ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης του δείγματος YA3_1-1. Επεξεργασία μέσω Microsoft Excel.

5.2.2 Πείραμα Lowrie- Fuller

Παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα δείγματα αυτά κατά τη διάρκεια δύο συνεχών απομαγνητίσεων (η θέση της αρχικής καμπύλης της AF σε σχέση με τη δεύτερη έπεται είτε από εφαρμογή του πειράματος IRM). Συμπερασματικά, το δείγμα «YA3_1-1» στο οποίο έγινε το πείραμα, αποτελείται κυρίως από SD κόκκους (Σχήμα 5.17).

□

YA3_1-1 Απομαγνητίσεις IRM και NRM

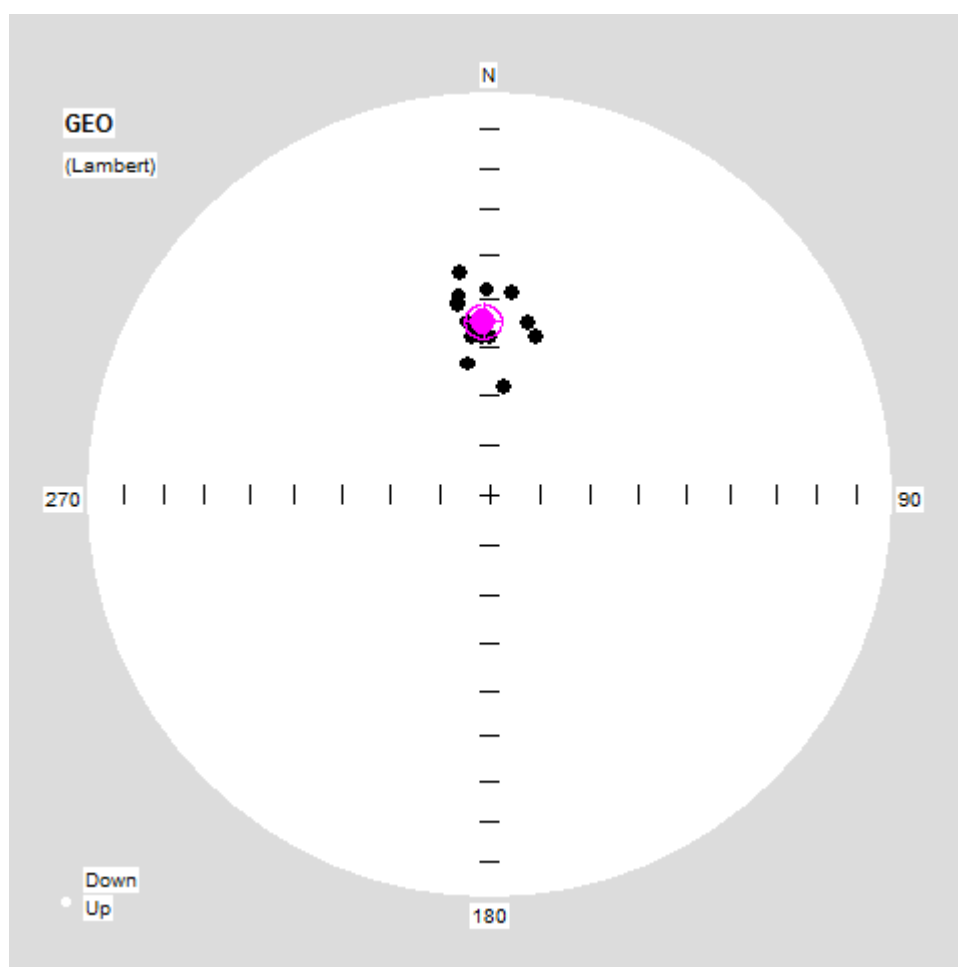


Σχήμα 5.17. Διάγραμμα απομαγνητίσεως του δείγματος YA3_1-1. Σύγκριση των καμπυλών μεταξύ της πρώτης και δεύτερης απομαγνήτισης μετά το πείραμα της IRM. Αποτελείται κυρίως από SD κόκκους

5.3 Στερεογραφική προβολή NRM

Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνεται η στερεογραφική προβολή από τη μέτρηση της αρχικής NRM από την οποία προκύπτει ότι τα δείγματα παρουσιάζουν ικανοποιητική συγκέντρωση, άρα όλα έχουν καεί in situ (Σχήμα 5.18).

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η μέση μαγνητική απόκλιση κυμαίνεται στις 358° και η έγκλιση στις 54.6° για την NRM.



Σχήμα 5.18. Η στερεογραφική προβολή εκπροσωπεί τον μελετημένο κλίβανο YA3. Οι μαύρες κουκίδες υποδηλώνουν τις διευθύνσεις της NRM για κάθε δείγμα ξεχωριστά, ενώ η κόκκινη τη μέση καταγεγραμμένη διεύθυνση (μέσω προγράμματος Remasoft).

Από την υπολογιζόμενη διεύθυνση κάθε δείγματος και με στατιστική επεξεργασία υπολογίζεται η μέση NRM, η τιμή της οποίας είναι αντιπροσωπευτική για όλο τον κλίβανο. Προκύπτουν τα εξής στοιχεία (Πίνακας 5.1):

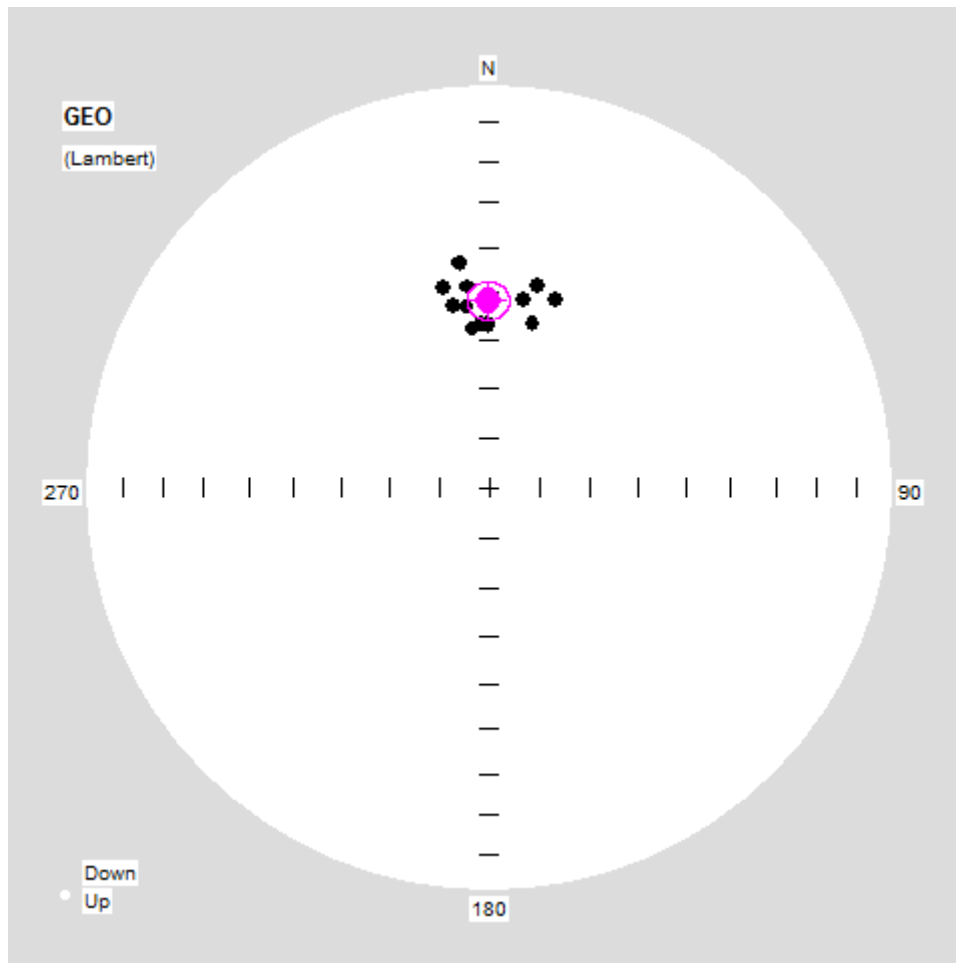
Κλίβανος	Απόκλιση (°)	Έγκλιση(°)	Σφάλμα (°)
ΥΑ3	357.7°	54.6°	3.6°

Πίνακας 5.1. Προκύπτοντα στοιχεία – συμπεράσματα της καταγεγραμμένης NRM στον κλίβανο ΥΑ3 με το σφάλμα του.

5.4 Στερεογραφική προβολή αρχαιοδιεύθυνσης

Οι τελικές τιμές των απομαγνητισθέντων, πλέον, δειγμάτων υπόκεινται σε στατιστική επεξεργασία με σκοπό την εύρεση της μέσης αρχαιοδιεύθυνσης, η τιμή της οποίας είναι αντιπροσωπευτική για όλο τον κλίβανο (στη συγκεκριμένη εργασία). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η μέση μαγνητική απόκλιση κυμαίνεται στις 359.5° και η έγκλιση στις 51.7 °.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι μέσοι όροι των τελικών αποτελεσμάτων απομαγνήτισης για όλα τα δείγματα τα οποία έχουν υποστεί την αντίστοιχη επεξεργασία, ενώ στο σχήμα οι αντίστοιχες στερεογραφικές προβολές με τις τελικές χαρακτηριστικές διευθύνσεις (απόκλιση και έγκλιση) του μαγνητικού πεδίου για τον κλίβανο (Σχήμα 5.19, Πίνακας 5.2).



Σχήμα 5.19. Η στερεογραφική προβολή εκπροσωπεί τον μελετημένο κλίβανο YA3. Οι μαύρες κουκίδες υποδηλώνουν τις αρχαιοδιευθύνσεις για κάθε απομαγνητισμένο δείγμα ξεχωριστά, ενώ η κόκκινη τη μέση καταγεγραμμένη αρχαιοδιεύθυνση.

Κλίβανος	Απόκλιση (°)	Έγκλιση(°)	Σφάλμα (°)
YA3	359.5°	51.7°	4.1°

Πίνακας 5.2. Προκύπτοντα στοιχεία – συμπεράσματα της καταγεγραμμένης αρχαιοδιεύθυνσης στον κλίβανο YA3 με το σφάλμα του.

6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

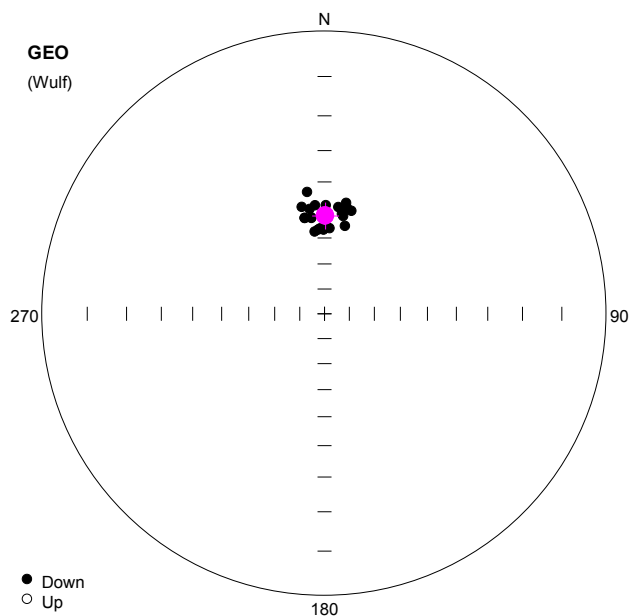
Πολλά από τα δείγματα δεν απομαγνητίστηκαν πλήρως με εναλασσόμενο πεδίο. Αυτό υποδηλώνει την *αυξημένη παρουσία αιματίτη* στο υλικό τους. Μια σειρά απομαγνητίσεων με θέρμανση που έγινε σε αντίστοιχα δείγματα έδωσε πληρέστερες απομαγνητίσεις. Οι απομαγνητίσεις αυτές με θέρμανση συμπεριλήφθηκαν στην εργασία *Archaeomagnetic and thermoluminescence dating of historical kilns from N. Greece* των E. Aidona, G. Polymeris, D. Kondopoulou, N. Ioannidis, P. Makridis (2013).

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν εκτός από τον κλίβανο YA3, καθώς και οι διπλανοί YA1 και YA4. Η αρχαιοδιεύθυνση υπολογίστηκε μετά από απομαγνήτιση τόσο θερμική όσο και εναλασσόμενου πεδίου.

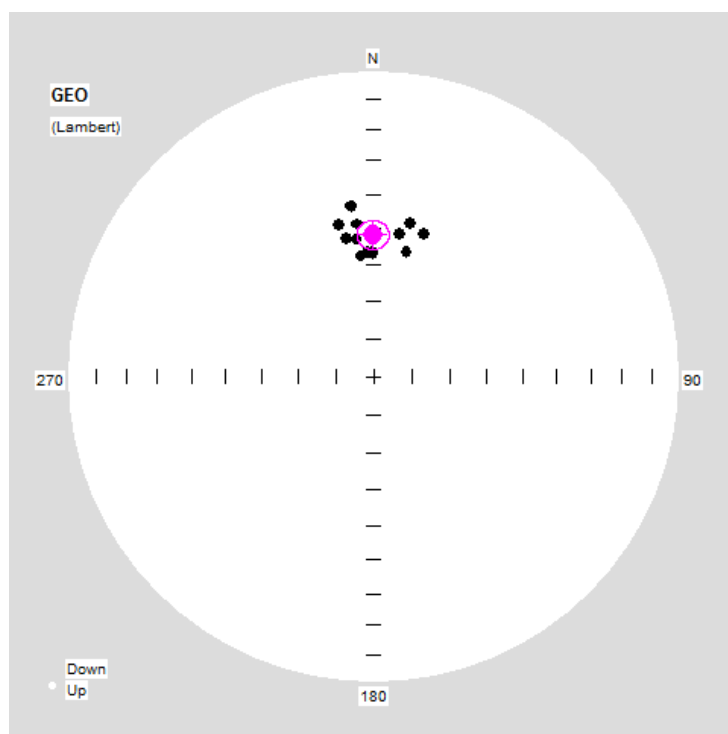
Παρακάτω παρατίθενται οι μέσοι όροι των τελικών αποτελεσμάτων απομαγνήτισης για όλα τα δείγματα τα οποία έχουν υποστεί την αντίστοιχη επεξεργασία, ενώ στο σχήμα οι αντίστοιχες στερεογραφικές προβολές με τις τελικές χαρακτηριστικές διευθύνσεις (απόκλιση και έγκλιση) του μαγνητικού πεδίου για τους κλιβάνους (*Aidona et. al. 2013*) (Πίνακας 6.1). Επίσης δίδεται και η στερεογραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας (Σχήμα 6.2) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των *Aidona(2013)* (Σχήμα 6.1).

Κλίβανος	Lat/Long	N	D (°)	I(°)	α_{95}
YA1	40.7°/23.1°	25	0.8°	49.3°	3.8°
YA3	40.7°/23.1°	23	0.6°	51.9°	2.6°
YA4	40.7°/23.1°	21	355.2°	51.3°	3.2°

Πίνακας 6.1. Προκύπτοντα στοιχεία – συμπεράσματα της καταγεγραμμένης αρχαιοδιεύθυνσης στους κλιβάνους YA1, YA3, YA4 με τα αντίστοιχα σφάλματά τους. Από *Aidona, et al., (2013)*.



Σχήμα 6.1. Στερεογραφική προβολή της αρχαιοδιεύθυνσης για τον κλίβανο YA3. Οι μάρκες κουκίδες υποδηλώνουν τις αρχαιοδιευθύνσεις για κάθε απομαγνητισμένο δείγμα ξεχωριστά στους αντίστοιχους κλιβάνους, ενώ οι κόκκινες τη μέση καταγεγραμμένη αρχαιοδιεύθυνση. Από Aidona, et al., (2013).



Σχήμα 6.2. Η στερεογραφική προβολή εκπροσωπεί τον μελετημένο κλίβανο YA3. Οι μάρκες κουκίδες υποδηλώνουν τις αρχαιοδιευθύνσεις για κάθε απομαγνητισμένο δείγμα ξεχωριστά, ενώ η κόκκινη τη μέση καταγεγραμμένη αρχαιοδιεύθυνση.

6.1 Συμπέρασμα

Από την παρούσα μελέτη έγινε εμφανές ότι το υλικό της ανασκαφής ήταν κατάλληλο για αρχαιομαγνητική μελέτη. Όπως αποδείχθηκε, η αυξημένη παρουσία αιματίτη στα δείγματα καθιστά την απομαγνήτιση με εναλλασσόμενο πεδίο μερικώς αποτελεσματική. Όπως φάνηκε από την παράλληλη μελέτη του υλικού με θέρμανση, η απομαγνήτιση αυτή βελτιώνει τα τελικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό φαίνεται καθαρά με τη σύγκριση του μέσου όρου της παρούσας εργασίας με εκείνον που προέκυψε από τον συνδυασμό των δύο μεθόδων (*Aidona et al., 2013*). Ωστόσο τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής παραμένουν απολύτως συγκρίσιμα με τα υπόλοιπα.

Βιβλιογραφία

- Aidona E., Kondopoulou D., Alexandrou M. & Ioannidis N., Archaeomagnetic studies in kilns from N. Greece, 12th International Congress of the Geological Society of Greece, Vol. 4, 2010.
- Aidona E., G. Polymeris, D. Kondopoulou, N. Ioannidis and P. Makridis, Archaeomagnetic and thermoluminescence dating of historical kilns from N. Greece, IAGA 2013.
- Butler R. F., Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes, electronic edition, 2004.
- Butler & Banerjee; J. Geophys. Res., v. 80, 4049-4058, 1975.
- Lowrie W. & Fuller M., On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanent magnetization in magnetite, 1971.
- Martin Friák, Arno Schindlmayr, Matthias Scheffler, Ab initio study of the half-metal to metal transition in strained magnetite, New Journal of Physics, Vol. 9, 2007
- Nagata, Rock Magnetism, Maruzen Ltd., Tokyo, 350 pp, 1961.
- Neel L., Some theoretical aspects of rock-magnetism, Adv. Phys. 4, 1955.
- Raptis, K., 2012. Early Christian and Byzantine ceramic production workshops in Greece: Typology and distribution. In Atti del IX Congresso Internazionale sulla Ceramica Medievale nel Mediterraneo, Venezia, 23-27 November 2009, pp38-44.
- Tarling D. H., Paleomagnetism: Principles and applications on geology, geophysics and archaeology, Chapman and Hall, London, 1983
- Thellier E., Aimantation des terres cuites; application a la recherche de l'intensite du champ magnetique terrestre dans le passé, 1937.
- Thomson R. & Oldfield F., Environmental Magnetism, London: George Allen & Unwin, 1986.
- 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.

- Θεοδωρίκας Σ. Σ., Ορυκτολογία-Πετρολογία, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη 2002.
- Ιωαννίδης Ν., Χρονολογήσεις σε κλιβάνους από ανασκαφές Θεσσαλονίκης και Μεγάλης Κύπας (Χαλκιδικής) με συνδυασμό δεδομένων αρχαιομαγνητισμού και θερμοφωταύγειας, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Θεσσαλονίκη 2013.
- Παπαζάχος Κ., Παπαζάχος Β., Εισαγωγή στη Γεωφυσική, Εκδόσεις Ζήτη, Νοέμβριος 2008.