



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΧΑΤΖΗΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΟΛΙΘΙΚΟΥ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΣΤΗ ΜΑΓΟΥΛΑ
"ΙΜΒΡΟΥ ΠΗΓΑΔΙ" (ΝΕΟ ΜΟΝΑΣΤΗΡΙ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022



Χατζηαναγνώστου Ειρήνη

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ

AEM 5559

Αρχαιομαγνητική Μελέτη Νεολιθικού Κλιβάνου στη Μαγούλα 'Ιμβρου Πηγάδι'
(Νέο Μοναστήρι)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Γεωφυσικής

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Επ. Καθηγήτρια, Αηδονά Ελένη





©Χατζηαναγνώστου Ειρήνη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΡΧΑΙΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΟΛΙΘΙΚΟΥ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΣΤΗ ΜΑΓΟΥΛΑ 'ΙΜΒΡΟΥ ΠΗΓΑΔΙ' (NEO MONASTIRI) – *Διπλωματική Εργασία*

©Chatzianagnostou Eirini, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2022

All rights reserved.

ARCHAEOMAGNETIC STUDY OF A NEOLITHIC CERAMIC KILN FROM MAGOULA "IMBROU PIGADI" (NEO MONASTIRI) – *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.



Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερος την κ. Αηδονά Ελίνα, Επ. Καθηγήτρια, Τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, για την συμβολή και βοήθεια του στην πραγμάτωση αυτή της εργασίας και στην ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω σε μια διαφορετική και επιστημονικά κερδοφόρα εργασία καθώς και στην υποδειγματική υπομονή που έδειξε σε όλο το χρονικό διάστημα συνεργασίας μας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπεύθυνη Αρχαιολόγο κα. Δρ. Ν. Κυπαρίσση-Αποστολικά για την διάθεση του υλικού από τον αρχαιολογικό χώρο Ίμβρου Πηγάδι.





Περιεχόμενα

Περίληψη.....	9
Abstract	10
Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 1 ^ο	12
Θεωρητική ανασκόπηση.....	12
1.1. Το μαγνητικό πεδίο.....	12
1.2. Τα μαγνητικά μεγέθη	13
1.3. Ιστορική Αναδρομή του γεωμαγνητισμού.....	14
1.4. Το Μαγνητικό Πεδίο της Γης	15
1.5. Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)	21
1.6. Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (TRM)	21
1.7. Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM).....	23
1.8. Αποθετική Παραμένουσα Μαγνήτιση(DRM)	24
1.9. Δευτερεύουσες NRM.....	24
1.10. Θερμοκρασία Curie (T_c).....	25
Κεφάλαιο 2 ^ο	27
Αρχαιομαγνητική Μέθοδος.....	27
2.1. Βασικές αρχές.....	27
2.2. Ιστορική αναδρομή.....	29
2.3. Συλλογή δειγμάτων.....	30
2.4. Καμπύλες αιώνιας μεταβολής	31
Κεφάλαιο 3 ^ο	33
Ερευνητικό Μέρος	33
3.1. Περιοχή Μελέτης.....	33
3.2. Βήματα Μελέτης.....	34
3.3. Θερμομαγνητικές καμπύλες	38
3.4. Μέτρηση της Φυσικής παραμένουσας Μαγνήτισης (NRM).....	39
3.5. Μέθοδος Σταδιακής Απομαγνήτισης	40



Κεφάλαιο 4 ^ο	42
Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	42
4.1. Αποτελέσματα Θερμομαγνητικών καμπυλών	42
4.2. Αποτελέσματα αρχαιομαγνητικής διεύθυνσης	49
4.3. Αρχαιομαγνητική χρονολόγηση.....	56
Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία	60
Παράρτημα.....	64

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιείται στα πλαίσια του μαθήματος της διπλωματικής εργασίας του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ με θέμα την Αρχαιομαγνητική μελέτη νεολιθικού κλιβάνου στην Μαγούλα "Ίμβρου Πηγάδι" (Νέο Μοναστήρι). Η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση εισήχθη στον τομέα της αρχαιολογίας το 1960 από τον Robert Dubois. Για την επιστήμη της γεωλογίας ο αρχαιομαγνητισμός είναι ο κλάδος του Παλαιομαγνητισμού που ασχολείται με το πεδίο των αρχαίων χρόνων μόνο (μέχρι το ~ 10,000 π.Χ.), οπότε περιορίζεται στην μελέτη αρχαιολογικών αντικειμένων.

Η εργασία δομείται σε τρεις βασικές θεματικές. Την γενική περιγραφή, αρχικά, της επιστήμης του αρχαιομαγνητισμού, αναλύοντας βασικές έννοιες όπως είναι το μαγνητικό πεδίο της Γης. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι βασικές αρχές που την διέπουν, τα είδη παραμένουσας μαγνήτισης που συμβάλουν καθοριστικά στην ανάλυση της αρχαιομαγνητικής μεθόδου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πειραματικό κομμάτι, της εργασίας μέσα από την θεωρητική επεξεργασία και ανάλυση των παραμέτρων μαγνήτισης που δημιουργούνται κατά την καύση των δειγμάτων μελέτης.

Η εργασία καταλήγει με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων όσο αφορά στην καταγραφή της αρχαιοδιεύθυνσης στα δείγματα που μελετήθηκαν καθώς και στην αρχαιομαγνητική χρονολόγηση του Νεολιθικού οικισμού.



ABSTRACT

The present paper is held in the frame of my diplomatic thesis during my studies at the Geology department of AUTH, and its main subject is the Archaeomagnetic Study Of A Neolithic Ceramic Kiln From Magoula “Imbrou Pigadi” (Neo Monastiri). Archaeomagnetic dating was introduced into the field of archaeology in 1960 by Robert Dubois. For Geology, archaeomagnetism belongs to the field of Geophysics and more specific in Paleomagnetism, which only deals with the ancient pole positions (until ~ 10.000 BC), so it is limited to the study of archaeological samples.

The current thesis is constructed in three thematic topics. Theoretical description, in first place of the archaeomagnetism science, analyzing basic concept, such as the geomagnetic field. Then, the basic principles that govern it are stated, the types of the Remanent Magnetization are listed which contribute decisively to the analysis of the archaeomagnetic method.

The experimental part is following, through the processing and analysis of the magnetization parameters which is being acquired during the combustion of the samples.

The study comes up with the presentation of the results and the final conclusions regarding the recording of the archeodirection in the studied samples as well as the archaeomagnetic dating of the Neolithic settlement.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, έχει επιτευχθεί η εισαγωγή των θετικών επιστημών στην Αρχαιολογία, με στόχο τόσο της ανασύνθεσης της κοινωνικοοικονομικής δομής ενός αρχαίου πολιτισμού, όσο και της χρονολόγησης αρχαιολογικών δομών για την κατανόηση της συμπεριφοράς του γεωμαγνητικού πεδίου.

Μέσα σε αυτό, λοιπόν, το πλαίσιο ο Παλαιομαγνητισμός, ο κλάδος της Γεωφυσικής, και η επιστήμη της Αρχαιολογία συναντώνται, με σκοπό την περιγραφή της δράσης του μαγνητικού πεδίου της Γης μελετώντας αρχαιολογικές δομές, όπως αρχαία κεραμικά σκεύη, αγγεία, κλιβάνους και υλικά με σημαντική χρήση σε ιστορικές περιόδους. Αρχαιολόγοι και γεωεπιστήμονες συλλέγουν δείγματα από αρχαιολογικούς χώρους, από τα οποία προκύπτουν συμπεράσματα για την αρχαιοδιεύθυνση και την αρχαιοένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης.

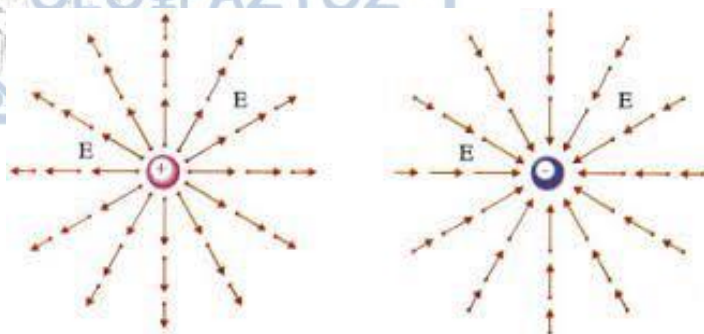
Από τη μελέτη των καμένων αργίλων μπορούν να αντληθούν πληθώρα πληροφοριών που αφορούν την αρχαιοδιεύθυνση, ενώ η διεξαγωγή συμπερασμάτων για την αρχαιοένταση πολλές φορές είναι πολύπλοκη.

Στο εργαστήριο Παλαιομαγνητισμού του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. πραγματοποιήθηκαν αρχαιομαγνητικές μετρήσεις σε δείγματα που συλλέχθηκαν από Νεολιθικό κλίβανο με σκοπό την εύρεση της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου κατά την τελευταία καύση του υπό μελέτη υλικού. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής θα βοηθήσουν στη συμπλήρωση των καμπυλών αιώνιας μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου που έχουν κατασκευαστεί, καλύπτοντας περίπου τις τελευταίες 2-3 χιλιετίες, του Ελληνικού χώρου, ο οποίος παρά την πληθώρα πληροφοριών που διαθέτει, παραμένει ιδιαίτερα την Νεολοθική εποχή, σε σημαντικά πρώιμο στάδιο.

1.1. Το μαγνητικό πεδίο.

Ως μαγνητικό πεδίο δυνάμεων ή μαγνητικό πεδίο ορίζουμε τον χώρο στον οποίο όταν φορτισμένο σωματίδιο q κινείται με ταχύτητα $\vec{u}$ του ασκείται μια δύναμη, η Δύναμη Laplace, που ισούται με $q\vec{u} \times \vec{B}$, όπου $\vec{B}$ η μαγνητική επαγωγή. Το μέτρο της Δύναμη Laplace είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από την διεύθυνση και την ταχύτητα του πεδίου και μπορεί να μεταβάλλει την διεύθυνση του q αλλά δεν μπορεί να αλλάξει το μέτρο της ταχύτητάς του $\vec{u}$. Συνεπώς, το έργο της σε κάθε μετατόπιση του φορτίου ισούται με μηδέν και άρα η ολική ενέργεια του δεν επηρεάζεται από αυτήν. Συμπερασματικά, η προσανατολισμένη κίνηση του φορτισμένου σωματιδίου q ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Το κλειστό ηλεκτρικό ρεύμα ισοδυναμεί με Μαγνητικό Δίπολο. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται με την παρουσία ρεύματος στον περιβάλλοντα χώρο και η μορφή του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την κατανομή του ρεύματος αυτού στον χώρο δημιουργίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το μαγνητικό πεδίο διέπτετε από συγκεκριμένους νόμους και κατά συνέπεια εμφανίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που παραμένουν ίδια, ανεξάρτητα από την μορφή του, τα οποία χαρακτηριστικά περιγράφονται με την έννοια των Δυναμικών Γραμμών. Δυναμικές Γραμμές πεδίου δυνάμεων ονομάζονται οι νοητές γραμμές που σχεδιάζουμε σε μια περιοχή του χώρου έτσι ώστε σε κάθε σημείο το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου να εφάπτεται σε αυτές. Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές έχουν σε κάθε σημείο προσανατολισμό ίδιο με αυτόν της έντασης. Με άλλα λόγια, φανερώνουν την μορφή του ηλεκτρικού πεδίου. Χαρακτηριστικό των Δυναμικών Γραμμών είναι ότι ποτέ δεν τέμνονται και η πυκνότητά τους είναι το μέτρο της έντασης του πεδίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ακτινική συμμετρία 2 φορτίων. Θετικό φορτίο (αριστερά): οι Δυναμικές Γραμμές αποκλίνουν και προς το άπειρο, Αρνητικό φορτίο (δεξιά): οι Δυναμικές Γραμμές συγκλίνουν και κατευθύνονται προς αυτό.

Μέχρι σήμερα υπάρχει η θεώρηση των μαγνητικών δίπολων και όχι μονόπολα, με το χαρακτηριστικό των κλειστών γραμμών.

1.2. Τα Μαγνητικά Μεγέθη

Τα σημαντικότερα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στον μαγνητισμό, οι συμβολισμοί και οι μονάδες μέτρησης τους συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Συμβολισμός	Gaussian units	Παράγοντας μετροπής	SI units
Μαγνητική επαγωγή	$\vec{B}$	Gauss (G)	10^4	Tesla (T)
Μαγνητική ροή	Φ	Maxwell (Mx)	10^8	Weber (Wb)
Ένταση μαγνητικού πεδίου	$\vec{H}$	Oersted (Oe)	$4\pi/10^3$	A/m
Μαγνήτιση	$\vec{M}$	Emu/cm ³	10^3	A/m
Μαγνητική ροπή	$\vec{m}$	emu	10^3	Am ²
Ειδική μαγνήτιση	$\vec{\sigma}$	Emu/g	1	Am ² /kg
Μαγνητική επιδεκτικότητα	χ	Αδιάστατο	$1/4\pi$	Αδιάστατο

Μαγνητική διαπερατότητα	μ	Αδιάστατο	$10^7/4\pi$	N/A^2
Σχετική διαπερατότητα	μ_r	Δεν ορίζεται	-	Αδιάστατο

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας μαγνητικών μεγεθών (Βέλκος, Γ., 2014).

1.3. Ιστορική Αναδρομή του γεωμαγνητισμού.

Η παρατήρηση της έλξης και απώθησης φυσικών μαγνητών πραγματοποιήθηκε από τους φιλοσόφους ήδη από τον 6^ο αι. π.Χ. Αρχικά αποδόθηκαν θρησκευτικές ερμηνείες στο φαινόμενο, καθώς ο φυσικός προσδιορισμός του ήταν αρκετά πολύπλοκος. Οι «θρησκευτικές», ωστόσο, ερμηνείες δεν εμπόδισαν τους Κινέζους, το 1064 μ.Χ. στην φυσική εξήγηση του φαινομένου με την εφεύρεση της Μαγνητικής Πυξίδας Προσανατολισμού. Η ανακάλυψη αυτή τέλεσε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της ευρωπαϊκής ναυσιπλοΐας τον 12^ο και 13^ο αι. μ.Χ. (Mitchell, 1932).



Σχήμα 2: Μαγνητική πυξίδα προσανατολισμού.

Ο Άγγλος William Gilbert, το 1600 μ.Χ., ανακάλυψε ότι η Γη αντιδρά σαν ένας γιγάντιος μαγνήτης και το 1701 ο Άγγλος αστρονόμος Edmund Halley, («Halley comet»), κατασκεύασε και δημοσίευσε τον πρώτο χάρτη μεταβολών της μαγνητικής απόκλισης για τον Ατλαντικό Ωκεανό, έργο 3 χρόνων, με τίτλο «General Chart of the Variation of the Compass». Πραγματοποιώντας, έτσι, το πρώτο βήμα για την κατασκευή παγκόσμιων χαρτών μεταβολής της μαγνητικής απόκλισης.

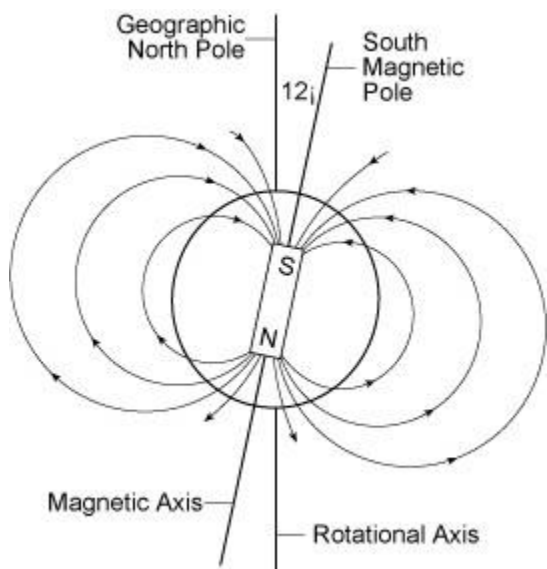
Τα πρωταρχικά στάδια των γεωμαγνητικών παρατηρήσεων ανέλαβαν τα εμπορικά και ναυτιλιακά πλοία του 16^{ου} αι. μ.Χ. και το 1840 ξεκίνησαν οι παρατηρήσεις του συνολικού διανύσματος του μαγνητικού πεδίου της Γης.

Σήμερα, λοιπόν, παρατηρητήρια καταγραφής μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου με σύγχρονη τεχνολογία και εξελιγμένες διαδικασίες, έχουν κατασκευαστεί σε στεριά, θάλασσα, αέρα και διάστημα. Για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, χρησιμοποιούνται μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα) ή διαφορικά

μαγνητόμετρα (πρωτονιακά ή ροής), τα οποία, χωρίς διακοπές, μετρούν την κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου με ακρίβεια της τάξης $1\text{nT} = 10^{-9} \text{ T}$. Με την αξιοποίηση διαφορικών μαγνητόμετρων δίνεται η δυνατότητα καταγραφής των ριζικών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου και των δραστικών γεωλογικών αλλαγών και η ελάττωση του ποσοστού λανθασμένων μετρήσεων (Βέλκος, 2014).

1.4. Το Μαγνητικό Πεδίο της Γης.

Ο Άγγλος επιστήμονας William Gilbert το 1600 μ.Χ. έφερε τις πρώτες αποδείξεις ότι η Γη συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος μαγνήτης (De Magnete, 1600). Μέχρι και σήμερα, όμως, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ο φυσικός μηχανισμός της Γης στην δημιουργία του μαγνητικού της πεδίου αλλά και στην συντήρηση αυτού.



Σχήμα 3: Γεωκεντρικό διπολικό πεδίο: απεικονίζεται η απλούστερη αλλά και πολύ καλή προσέγγιση του πραγματικού μαγνητικού πεδίου της Γης, το οποίο συχνά σχεδιάζεται με γραμμές μαγνητικού πεδίου, οι οποίες έχουν ως αρχή τον Νότιο μαγνητικό πόλο και συγκλίνουν στο Βόρειο μαγνητικό πόλο.

Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι παρόμοιο με αυτό ενός μαγνήτη ράβδου που έχει κλίση 11 μοίρες από τον άξονα περιστροφής της Γης (Σχήμα 3). Η κλίση των 11 μοιρών προέρχεται από το γεγονός ότι οι μαγνητικοί πόλοι δεν συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς. Για παράδειγμα, η διεύθυνση της πυξίδας σε ένα σημείο της επιφάνειας της Γης διαφέρει από τη διεύθυνση του γεωγραφικού ή αληθινού βορρά (ο βόρειος μαγνητικός πόλος βρίσκεται σήμερα βόρεια του Καναδά και ο νότιος στην Ανταρκτική) (De Marco, 2007).

Το γεωμαγνητικό πεδίο δημιουργείται στον ρευστό εξωτερικό πυρήνα, ~3000km κάτω από την επιφάνεια της Γης, ο οποίος αποτελείται από σίδηρο και νικέλιο. Στον εξωτερικό πυρήνα, λοιπόν, υπαίτια του μαγνητικού πεδίου είναι η ελεύθερη

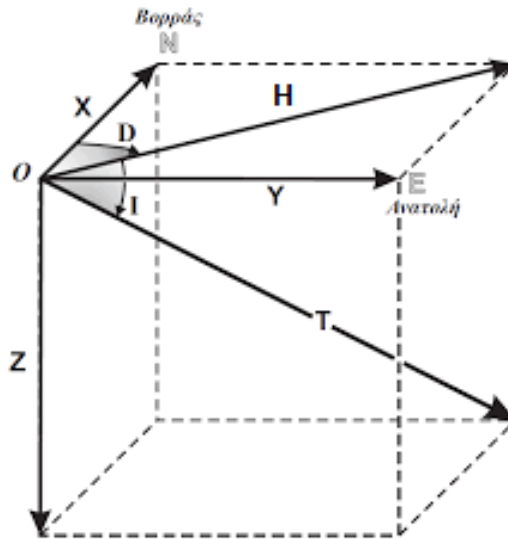
περιφορά των ηλεκτρονίων και λόγο αυτής, η συμπεριφορά του σαν αυτοδιεγειρόμενο ηλεκτρικό δυναμό. Το πεδίο μεταβάλλεται συνεχώς χωρικά και χρονικά και στο «γεωλογικό αρχείο» έχουν καταγραφεί περιοδικές αντιστροφές των πόλων στην πάροδο των γεωλογικών χρόνων (κάθε περίπου 200.000 έως 300.000 χρόνια), με τις αναστροφές αυτές να πραγματοποιούνται σταδιακά και να έχουν διάρκεια εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια.

Επίσης, το μαγνητικό πεδίο της Γης αποτελεί μια φυσική ασπίδα απέναντι στον Ηλιακό Άνεμο, εκτρέποντας την ροή φορτισμένων σωματιδίων, που αποτελείται, κυρίως, από ηλεκτρόνια και πρωτόνια, που εκπέμπονται από τον ήλιο με την μορφή πλάσματος. Η αλληλεπίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου με τα σωματίδια του Ηλιακού Ανέμου δημιουργεί τις συνθήκες εμφάνισης των φαινομένων Σέλας κοντά στους πόλους.

Συμπεραίνουμε, ότι το μαγνητικό πεδίο αποτελεί αναπόσπαστη συνθήκη ανάπτυξης αλλά και επιβίωσης της ζωής του πλανήτη, με οποιαδήποτε αλλαγή στις ισορροπίες, είτε με την εξασθένηση του γεωμαγνητικού πεδίου, που θα επιφέρει την διάχυτη εισροή επιβλαβών για την ζωή φορτισμένων σωματιδίων του Ηλιακού Ανέμου, είτε με την ξαφνική άνοδο αυτού, να έχει ολέθριες συνέπειες στους ζωντανούς οργανισμούς.

Η ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης θεωρείται αρκετά ασθενής, καθώς σύμφωνα με υπολογισμούς, αυτή κυμαίνεται από $\sim 25\mu\text{T}$ μέχρι $\sim 65\mu\text{T}$ (δηλαδή έχει μέση τιμή περίπου $45\mu\text{T}$). Όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 5, οι υψηλότερες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου συναντώνται στους πόλους και η ασθενέστερη ένταση απαντάται στον γεωγραφικό Ισημερινό. (βόρειο μαγνητικός πόλος: Ν. Αυστραλία, γεωγραφικό πλάτος $\approx -67^\circ$, νότιος μαγνητικός πόλος: Β. Καναδάς, $\approx +75^\circ$). Οι μεγαλύτερες εντάσεις συναντώνται στις περιοχές κοντά στους πόλους, καθώς οι δυναμικές γραμμές πυκνώνουν, ενώ στις περιοχές του Ισημερινού, οι δυναμικές γραμμές λιγοστεύουν. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι στους πόλους οι δυναμικές γραμμές αποκτούν την μέγιστη τιμή τους (Βέλκος, 2014).

Για την περιγραφή του γεωμαγνητικού πεδίου σε ένα τυχαίο σημείο πάνω στην επιφάνεια της Γης, απαιτείται η περιγραφή του διανύσματος της έντασης του πεδίου που διέρχεται από το σημείο αυτό, εφόσον μόνο μία δυναμική γραμμή διέρχεται. Άρα, το διάνυσμα που εφάπτεται στην δυναμική γραμμή αποτελεί την ένταση του πεδίου.



Σχήμα 4: Περιγραφικό σχήμα μαγνητικού πεδίου (Παπαζάχος, Β., & Παπαζάχος, Κ., 2008).

Σύμφωνα με το σχήμα 4, οι πολικές συντεταγμένες αναφέρονται σε σύστημα αξόνων με αρχή το σημείο O, με επίπεδο xy το επίπεδο του τοπικού ορίζοντα και άξονα z τον κατακόρυφο του τόπου με φορά προς το κέντρο της Γης. Δηλαδή, ο άξονας x έχει διεύθυνση γεωγραφικού βορρά – νότου, ορίζοντας ως θετική φορά (+) προς τον βορρά και ο άξονας y έχει διεύθυνση ανατολής – δύσης και ορίζουμε θετική φορά (+) προς την ανατολή. Με το T να συμβολίζει το διάνυσμα της έντασης σε κάποιον σημείο της επιφάνειας της Γης (O).

Γεωμαγνητικά στοιχεία:

T: διάνυσμα της ολικής έντασης (επαγωγής), του μαγνητικού πεδίου της Γης σε ορισμένο τόπο

H: οριζόντια συνιστώσα

Z: κατακόρυφη συνιστώσα ((+) φορά προς τα κάτω, (-)φορά προς τα πάνω)

X: μεσημβρινή συνιστώσα ((+) φορά προς τον βορρά, (-)φορά προς τον νότο)

Y: συνιστώσα ((+) φορά προς τα ανατολικά, (-)φορά προς την δύση)



Ισχύουν οι απλές σχέσεις:

$$T = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (4.2)$$

$$D = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (4.3)$$

$$Z = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (4.4)$$

Καθώς, επίσης:

$$H = T \cos I \quad (4.5)$$

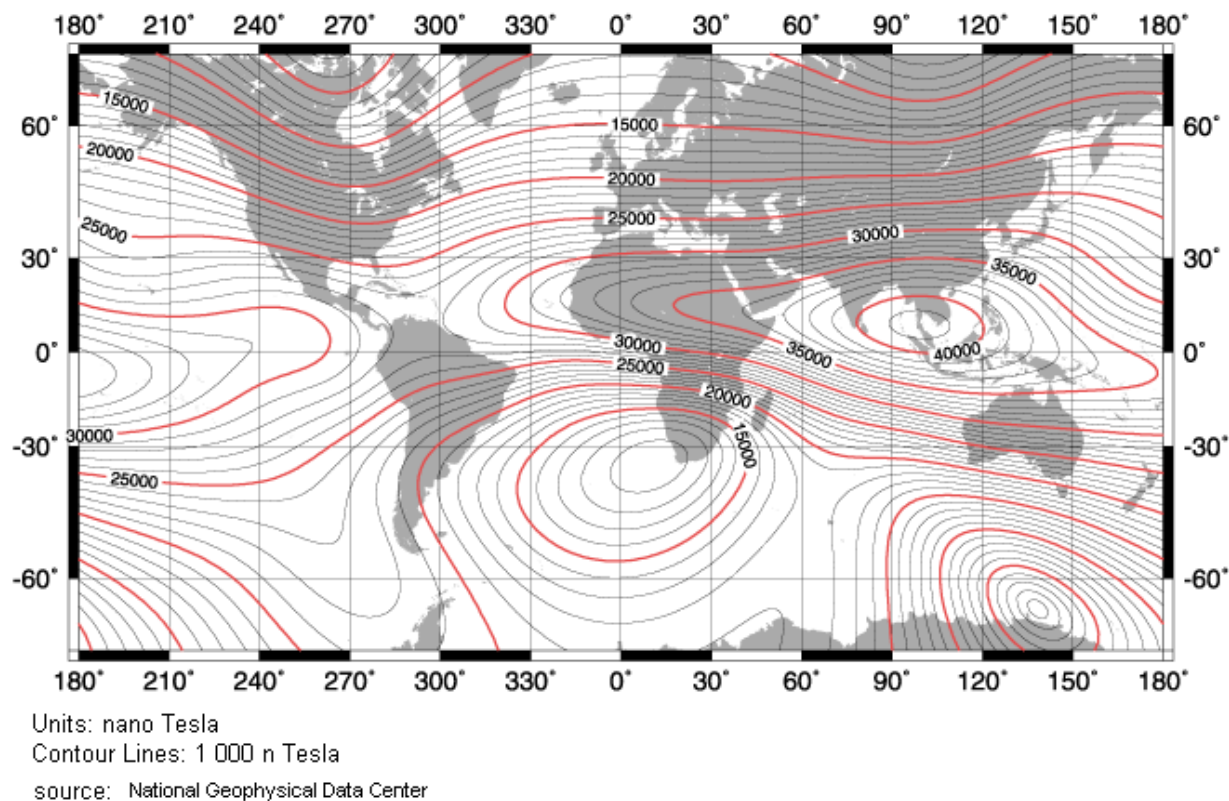
$$Z = T \sin I \quad (4.6)$$

$$X = T \cos I \cos D \quad (4.7)$$

$$Y = T \cos I \sin D \quad (4.8)$$

Το διάνυσμα $\vec{T}$ μπορεί να προσδιοριστεί από το μέτρο του διανύσματος T και τις γωνίες D και I . Το διάνυσμα $\vec{H}$ είναι η κάθετη προβολή του διανύσματος $\vec{T}$ πάνω στον ορίζοντα του τόπου που ορίσαμε. Η χωρική μεταβολή των γεωμαγνητικών στοιχείων T , H , D και I προβάλλονται στους λεγόμενους Ισομαγνητικούς Χάρτες και προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) (Παπαζάχος, Β. & Παπαζάχος, Κ., 2008). Οι Ισομαγνητικοί Χάρτες είναι παγκόσμιοι χάρτες στους οποίους κάθε φορά απεικονίζεται μόνο ένα από τα μεγέθη, με την μορφή γραμμών ίσης τιμής, δηλαδή γραμμών κατά μήκος των οποίων τα σημεία της επιφάνειας της Γης που ενώνει (προκαθορισμένων μαγνητικών στοιχείων) έχουν τιμή σταθερή (Σχήμα 5) (Βέλκος, 2014).

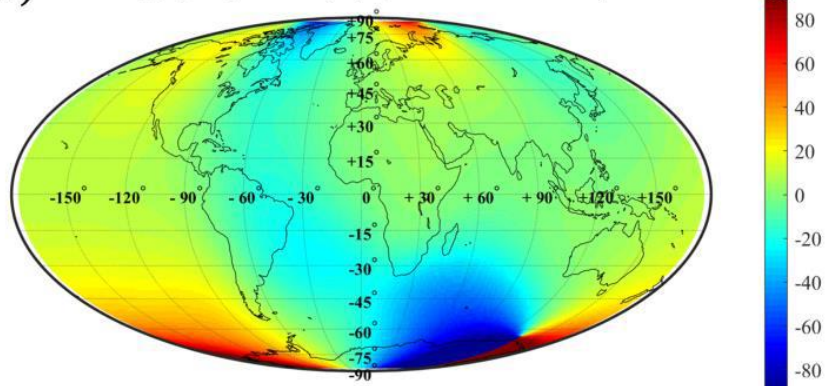
US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Horizontal Intensity - Main Field (H)



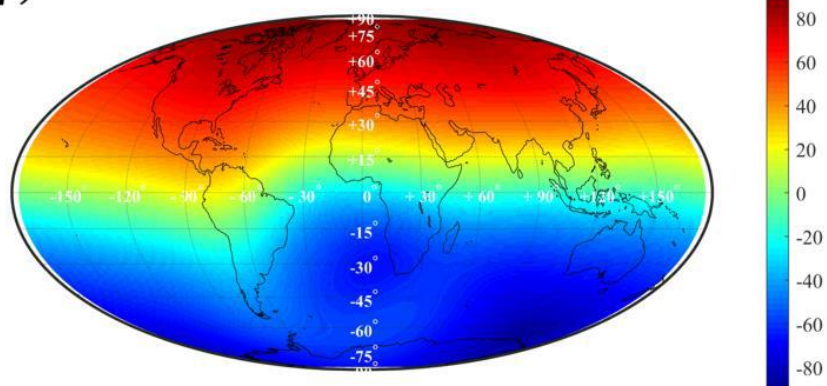
Σχήμα 5: Ισομαγνητικός χάρτης του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσα $\vec{H}$.

Για τον προσδιορισμό του γεωμαγνητικού πεδίου πρέπει να ορίσουμε την απόκλιση (D) και την έγκλιση (I) του ολικού πεδίου. Απόκλιση D, όπως ορίζεται και από το σχήμα 4 είναι η γωνία επί του οριζόντιου επιπέδου, η οποία σχηματίζεται μεταξύ του γεωγραφικού βορρά και της οριζόντιας συνιστώσας H του μαγνητικού πεδίου της Γης και κατευθύνεται προς τον μαγνητικό βορρά. Έγκλιση I είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της κατακόρυφης συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου και μεταβάλλεται ανάλογα την θέση του παρατηρητή σε κάποιο σημείο της επιφάνειας της Γης (Τζάνης, 2021).

(α) Απόκλιση (D) Κυρίου Γεωμαγνητικού Πεδίου - Έτος 2020.0



(β) Έγκλιση (I) Κυρίου Γεωμαγνητικού Πεδίου - Έτος 2020.0



Σχήμα 6: Παγκόσμια αναπαράσταση της απόκλισης D και της έντασης I του γεωμαγνητικού πεδίου το έτος 2020.

1.5. Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM)

Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (NRM) ονομάζουμε την συνολική μαγνήτιση που εμφανίζει ένα σιδηρομαγνητικό υλικό απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Η μαγνήτιση (*in situ*) των πετρωμάτων είναι το διανυσματικό άθροισμα της επαγόμενης μαγνήτισης (J_i) και της φυσικής παραμένουσας μαγνήτισης (J_r) (Νικολαΐδης, 2014):

$$J = J_i + J_r \quad (5.1)$$

Η NRM αποκτάται καθ' όλη την διάρκεια της έκθεσης του υλικού στο γεωμαγνητικό πεδίο, είτε από φυσικές είτε από χημικές διεργασίες και στον τομέα του αρχαιομαγνητισμού είναι αυτή που έχει σημασία μελέτης.

Διακρίνονται 2 κατηγορίες NRM, οι κύριες και οι δευτερεύουσες. Κύρια NRM είναι αυτή που αποκτάται από το πέτρωμα κατά τον σχηματισμό του και δευτερεύουσα συνιστώσα NRM είναι η μαγνήτιση που αποκτάται μεταγενέστερα. Μόνο οι κύριες μπορούν να δώσουν τις πληροφορίες για το παλαιομαγνητικό πεδίο.

Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συνολική NRM είναι το άθροισμα των 2 αυτών συνιστωσών. Δηλαδή, $NRM = \text{κύρια NRM} + \text{δευτερεύουσα NRM}$.

Οι κύριες NRM διακρίνονται σε 3 βασικά είδη:

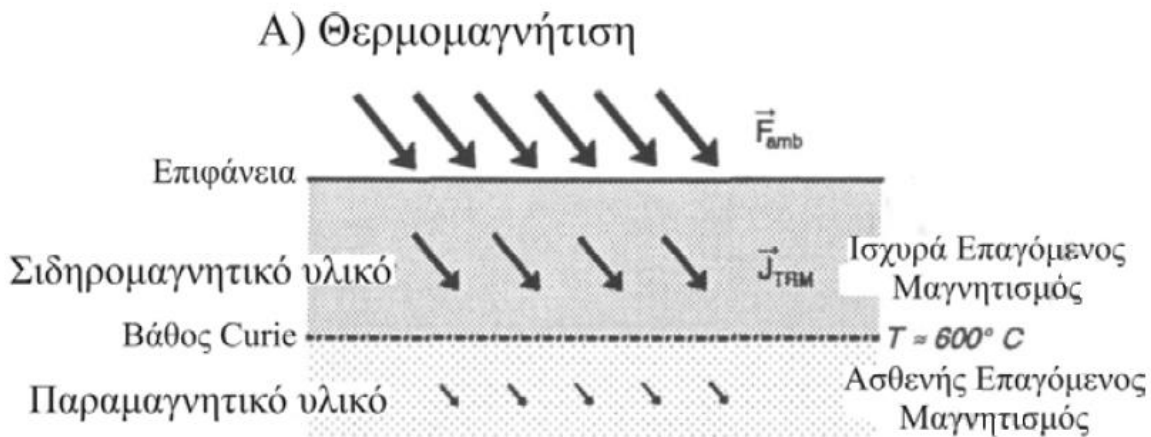
- i. Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (Thermal Remanent Magnetization (TRM))
- ii. Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (Chemical Remanent Magnetization (CRM))
- iii. Αποθετική Παραμένουσα Μαγνήτιση (Depositional Remanent Magnetization (DRM))

1.6. Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (TRM)

Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση (Thermal Remanent Magnetization (TRM)) είναι η NRM που παράγεται με ψύξη του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ύστερα από την καύση του σε θερμοκρασία Curie T_c , παρουσία μαγνητικού πεδίου και αφορά, κυρίως πυριγενή πετρώματα και υψηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα. Με την μείωση της θερμοκρασίας, αν αυτή φτάσει κάτω από τις

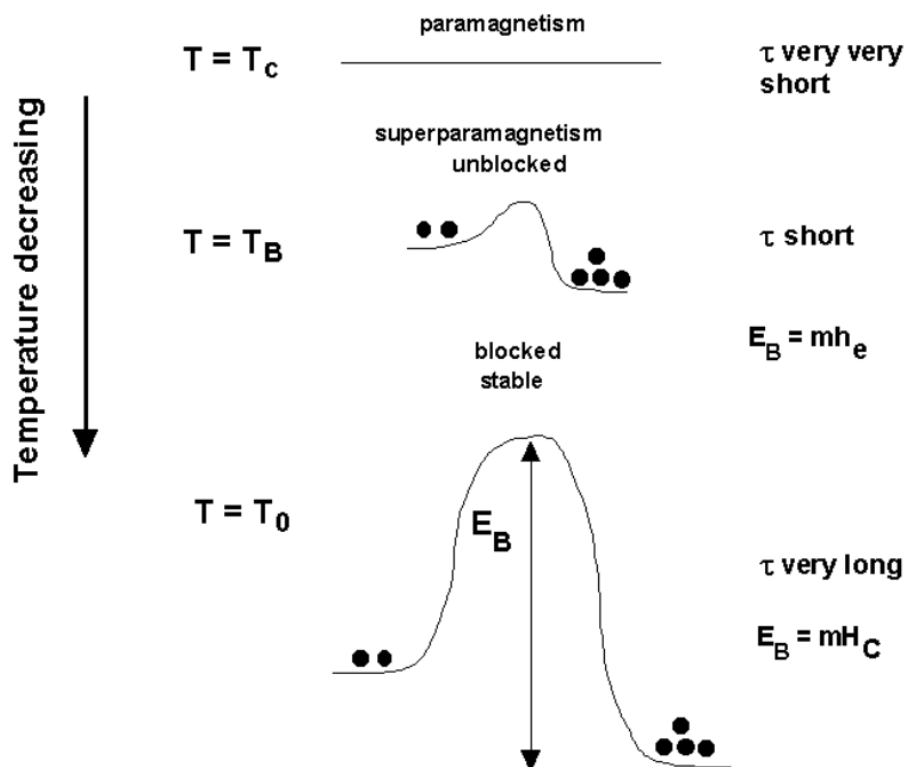
θερμοκρασίες φραγμού των κόκκων ($T < T_b$), ο χρόνος ηρεμίας (τ) αυξάνεται εκθετικά, έχοντας ως απόρροια την διατήρηση την TRM για αιώνες (Βάτη, 2019).

Η θεωρία διατήρησης της TRM προτάθηκε από τον Néel (1955) και στην ουσία περιλαμβάνει την εξέλιξη της μαγνήτισης ενός πληθυσμού σωματιδίων κατά την ψύξη από την Θερμοκρασία Curie, παραμένοντας σε ισορροπία με το εξωτερικό πεδίο, εφόσον ο χρόνος ηρεμίας (τ) είναι αρκετά μικρός σε σύγκριση με τον χρόνο ψύξης και τελικά σταθεροποιείται όταν ο (τ) αυξάνεται. Μια λεπτομερής ανασκόπησης της θεωρίας Néel (1955) δίνεται από τους Dunlop και Özdemir το 1997.



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση θερμομαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού (Παπαδόπουλος, 2008).

Τα υλικά από τους αρχαίους κλιβάνους αποτελούν σπουδαία πηγή πληροφοριών καθώς είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα διαθέτουν ισχυρή συνιστώσα TRM, με την προϋπόθεση ότι η άργιλος έφτασε την θερμοκρασία Curie. Ωστόσο, σύμφωνα με τους αρχαιολόγους οι φούρνοι της αρχαιότητας έφταναν και ξεπερνούσαν σημαντικά τις θερμοκρασίες Curie. Είναι πιθανή η ύπαρξη μερικής θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης (partial Thermal Remanent Magnetization (pTRM)) όταν το υλικό θερμανθεί ξανά αλλά η θερμοκρασία δεν υπερβεί της T_c , έτσι, ορισμένα μαγνητικά σωματίδια θα ευθυγραμμιστούν εκ νέου με το μαγνητικό πεδίο της Γης, αλλά τα πιο σταθερά σωματίδια θα διατηρήσουν την αρχική τους θέση.



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση του σχηματισμού της TRM στους SD κόκκους.

1.7. Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση (CRM).

Η χημική παραμένουσα μαγνήτιση (CRM) είναι η μαγνήτιση που αποκτούν τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά λόγω διαφόρων χημικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον (π.χ. αφυδάτωση του γκαιτίτη : $2(a\text{FeOOH}) \rightarrow a\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (εξάτμιση)). Η CRM εξαρτάται από την θερμοκρασία και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες και απαντάται κυρίως σε ιζηματογενή πετρώματα.

Δηλαδή, ένα πέτρωμα αποκτά χημική παραμένουσα μαγνήτιση όταν σε ένα διάλυμα, τα σιδηρομαγνητικά υλικά προκύπτουν με την καθίζηση των ιόντων και στην συνέχεια με τον προσανατολισμό των κρυστάλλων προς το εκάστοτε μαγνητικό πεδίο της Γης.

1.8. Αποθετική Παραμένουσα Μαγνήτιση (DRM)

Είναι η μαγνήτιση που αποκτάται κατά την απόθεση και συμπαγοποίηση των ιζηματογενών πετρωμάτων. Είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από την TRM διότι σε αυτήν συμμετέχουν τόσο φυσικές όσο και χημικές διεργασίες καθιστώντας την μέτρηση της δύσκολη και ανακριβής, εξαιτίας των φυσικών παραγόντων όπως η πίεση από τα υπερκείμενα στρώματα, οι καθιζήσεις και ο τουρβιδιτισμός όσο και των χημικών διεργασιών όπως η χημική μεταβολή ή και απομάκρυνση διαφόρων ορυκτών και την δημιουργία νέων.

1.9. Δευτερεύουσες NRM

Οι δευτερεύουσες NRM διακρίνονται σε 2 είδη:

- i. Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση (Viscous Remanent Magnetization -VRM)
- ii. Ισοθερμική Παραμένουσα Μαγνήτιση (Isothermal Remanent Magnetization-IRM)

Ιξώδης παραμένουσα μαγνήτιση είναι η μαγνήτιση που αποκτάται βαθμιαία όταν ένα σιδηρομαγνητικό ορυκτό είναι έκθετο σε ασθενές μαγνητικό πεδίο μακροχρόνια. Οι κόκκοι με θερμοκρασία φραγμού κάτω των 200°C κατά κύριο λόγο αποκτούν μαγνήτιση VRM, και αυτό συμβαίνει καθώς είναι πιθανός ο επαναπροσανατολισμός των κόκκων δίχως την συμβολή θερμότητας, την περίοδο των αρχαιολογικών χρόνων, στο εκάστοτε γήινο μαγνητικό πεδίο.

Ισοθερμική Παραμένουσα Μαγνήτιση είναι η μαγνήτιση που αποκτούν τα υλικά κατά την επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή, για μικρό χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο κεραυνός. Κατά την πτώση αυτού, το ισχυρό μαγνητικό πεδίο του αποπροσανατολίζει τους μαγνητικούς κόκκους.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα είδη των φυσικών παραμενουσών μαγνητισμών:

Παραμένουσα Μαγνήτιση	Ακρωνύμιο	Διαδικασία Μαγνητισμού
Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση	TRM	Η μαγνήτιση αποκτάται κατά την ψύξη από θερμοκρασίες άνω της θερμοκρασίας Curie (T_c)
Χημική Παραμένουσα Μαγνήτιση	CRM	Η μαγνήτιση αποκτάται κατά την διάρκεια χημικών μεταβολών
Αποθετική Παραμένουσα Μαγνήτιση	DRM	Η μαγνήτιση αποκτάται κατά την απόθεση και συμπαγοποίηση των ιζηματογενών πετρωμάτων
Ιξώδης Παραμένουσα Μαγνήτιση	VRM	Η μαγνήτιση αποκτάται με την πάροδο του χρόνου
Ισοθερμική Παραμένουσα Μαγνήτιση	IRM	Η μαγνήτιση αποκτάται στιγμιαία
Μερική Θερμοπαραμένουσα Μαγνήτιση	pTRM	Η μαγνήτιση αποκτάται κατά την ψύξη από θερμοκρασίες κατώτερες της θερμοκρασίας Curie (T_c)

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμένουσων μαγνητισμών.

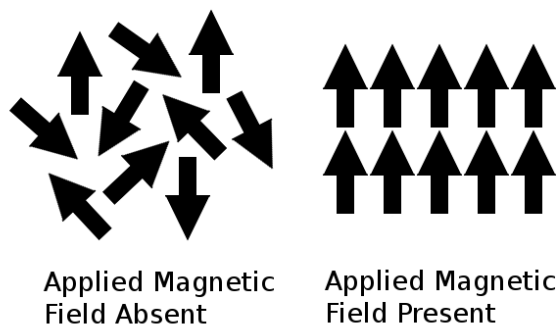
4.10. Θερμοκρασία Curie (T_c)

Ο σιδηρομαγνητισμός εξαφανίζεται για θερμοκρασία χαμηλότερη μιας χαρακτηριστικής, που ονομάζεται Θερμοκρασία Curie (T_c). Για θερμοκρασίες μεγαλύτερης αυτής, η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαφανίζεται και το υλικό συμπεριφέρεται ως παραμαγνητικό. Στις θερμοκρασίες αυτές ($T > T_c$) η μαγνητική επιδεκτικότητα ακολουθεί τον νόμο Curie-Weiss:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}$$

(5.2)

Όπου C είναι μια σταθερά και θ είναι η παραμαγνητική θερμοκρασία Curie, που συνήθως είναι μεγαλύτερη τη T_c κατά μερικούς βαθμούς.



Σχήμα 9: Πάνω από τη θερμοκρασία Κιουρί, τα μαγνητικά σπιν στοιχίζονται τυχαία σε έναν παραμαγνήτη (αριστερά, χωρίς πεδίο) και προσανατολίζονται (δεξιά, με μαγνητικό πεδίο).

Για θερμοκρασία $T < T_c$ το σιδηρομαγνητικό υλικό μπορεί να μην παρουσιάζει κατά μέσο όρο κάποια μαγνήτιση. Αν, όμως, επιβάλλουμε ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο, μπορεί να δημιουργηθεί μια πολύ μεγαλύτερη μαγνήτιση που παραμένει μετά την απομάκρυνση του πεδίου.

Παλαιομαγνητισμός (Paleomagnetism) ονομάζεται ο κλάδος της Γεωφυσικής που μελετά πυριγενή πετρώματα και ιζήματα για την άντληση πληροφοριών για το μαγνητικό πεδίο της Γης στο παρελθόν. Ορισμένα πετρώματα και υλικά περιέχουν ορυκτά που ανταποκρίνονται στο μαγνητικό πεδίο. Έτσι, με τον σχηματισμό των πετρωμάτων, τα ορυκτά αυτά ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο διατηρώντας τις θέσεις τους. Η μαγνητική υπογραφή των πετρωμάτων επιτρέπει τους Γεωφυσικούς να χρονολογήσουν τα πετρώματα και να χαρτογραφήσουν την θέση του μαγνητικού πεδίου την στιγμή σχηματισμού τους.

Αρχαιομαγνητισμός (Archaeomagnetism) είναι ο κλάδος του Παλαιομαγνητισμού, που μελετά και ερμηνεύει τις μαγνητικές ιδιότητες των καμένων αρχαιολογικών υλικών, όπως αρχαία κεραμικά σκεύη, αγγεία, κλιβάνους, παρμένων από αρχαιολογικούς χώρους και περιορίζεται με το πεδίο των αρχαίων χρόνων, δηλαδή περίπου μέχρι το 10.000 π.Χ. Είναι ένα διεπιστημονικό θέμα που απαιτεί εξειδίκευση τόσο στη γεωφυσική, όσο και στην αρχαιολογία.

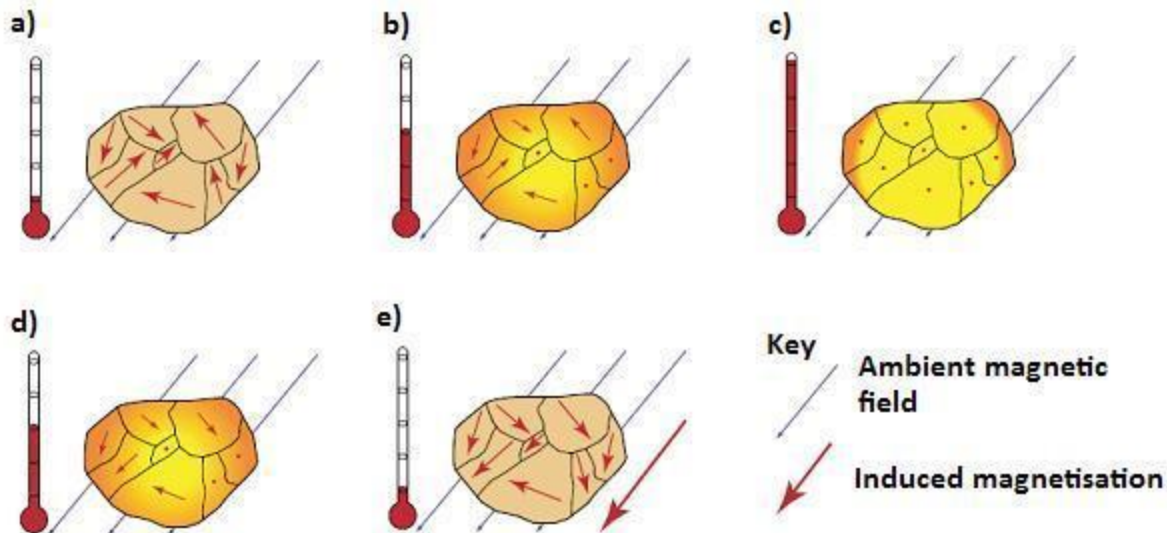
Η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση είναι, πιθανώς, η πιο γνωστή εφαρμογή παλαιομαγνητισμού στην αρχαιολογία. Σκοπός και των δύο αυτών κλάδων της επιστήμης της Γεωφυσικής είναι η μελέτη και τελικώς η περιγραφή του Γήινου μαγνητικού πεδίου του παρελθόντος, που εν συνεχεία τα αποτελέσματα θα μπορούν να στηρίξουν θεωρίες κατανόησης και εξήγησης των μηχανισμών δημιουργίας και διατήρησης του γεωμαγνητικού πεδίου, καθώς και παροχή πληθώρα πληροφοριών για τα καμένα υλικά συμπεριλαμβανομένης γνώσεων για την σύνθεση τους, για την προέλευση τους και της τελικής καύσης τους .

2.1. Βασικές αρχές της αρχαιομαγνητικής μεθόδου.

Η αρχαιομαγνητική μέθοδος στηρίζεται σε δύο συναφή φυσικά φαινόμενα. Στην βασική αρχή της φυσικής της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης (Nèel, 1955), ότι, δηλαδή, οι αρχαιολογικές καμένες δομές έχουν την ιδιότητα "αποθήκευσης" της διεύθυνσης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης εξαιτίας της ύπαρξης μαγνητικών ορυκτών στην δομή τους και δεύτερον, η ένταση και η κατεύθυνση

(κλίση και απόκλιση) του γεωμαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Τα οξειδία του σιδήρου που βρίσκονται παντού στο περιβάλλον δημιουργούν τα λεγόμενα σιδηρομαγνητικά ορυκτά (π.χ. μαγνητίτης, αιματίτης) τα οποία συμμετέχουν στις αργιλικές αρχαιολογικές δομές, έχοντας ως βασική ιδιότητα την καταγραφή της διεύθυνσης εφαρμοζόμενου πεδίου και την διατήρηση της μαγνήτισης ακόμα και μετά την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου, εφόσον βρίσκονται υπό ορισμένες συνθήκες. Επιπλέον, η θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση, TRM, των ορυκτών αυτών αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας φτάνοντας στην μέγιστη τιμή (μαγνήτιση κορεσμού) και μηδενίζεται στην κρίσιμη Θερμοκρασία Curie (T_c), όπου αποτελεί χαρακτηριστικό κάθε σιδηρομαγνητικού υλικού (π.χ. 580°C για τον μαγνητίτη και 680°C για τον αιματίτη).

Αναλυτικότερα της διαδικασίας, ένα υλικό έχει την ικανότητα να καταγράψει το μαγνητικό πεδίο της Γης όταν περιέχει μαγνητισμένα σωματίδια κατάλληλου τύπου και σε επαρκείς ποσότητες. Τις προϋποθέσεις αυτές τηρούν τα περισσότερα υλικά γεωλογικής προέλευσης, όπως η άργιλος. Ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο καταγράφεται το μαγνητικό πεδίο είναι η θερμότητα. Όταν τα μαγνητικά ορυκτά θερμαίνονται (συνήθως πάνω από του 400°C) τα μαγνητικά σωματίδια κινούνται ελεύθερα και μπορούν να ευθυγραμμιστούν με τον μαγνητικό βορρά. Με την ψύξη του υλικού, υλοποιείται ή σταθεροποιείται η καταγραφή του μαγνητικού πεδίου μέσα στο υλικό, 'κλειδώνοντας', έτσι, μία εγγραφή της θέσης του μαγνητικού βορρά εκείνη την στιγμή. Συνεπώς, η καταγραφή που αποθηκεύτηκε στο υλικό σηματοδοτεί την τελευταία φορά θέρμανσης και ψύξης αυτού ($\sim 400^\circ\text{C}$). Το υλικό μπορεί να διατηρήσει αυτήν την παραμένουσα μαγνήτιση εκτός εάν ξανά θερμανθεί σε παρόμοια θερμοκρασία, όπου αποκτά νέα μαγνήτιση. Επιπλέον, το υλικό πρέπει να παραμείνει ακίνητο μετά την μαγνήτιση για να διατηρηθεί ο κατευθυντικός προσανατολισμός. Για αυτόν τον λόγο, οι αρχαιομαγνητικές μελέτες πραγματοποιούνται σε σταθερές αρχαιολογικές δομές (π.χ. κλιβάνους) (Gómez-Paccard & Panón-Carrasco, 2018).



Σχήμα 10: Στάδια απόκτησης TRM: a) σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπου κυριαρχεί τυχαίος μαγνητισμός, b) αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της μαγνήτισης, c) η θερμοκρασία φτάνει ή ξεπερνά την θερμοκρασία Curie (T_c) συνεπώς μηδενίζεται η μαγνήτιση, d) μείωση της θερμοκρασίας και σταδιακή ψύξη και σταδιακός επαναμαγνητισμός στην διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου, e) ολική ψύξη και προσανατολισμός μαγνήτισης παράλληλα με την διεύθυνση του πεδίου που επικρατούσε την εκάστοτε χρονική στιγμή.

2.2. Ιστορική αναδρομή.

Ο αρχαιομαγνητισμός έχει υβριδική προέλευση, αφού εξελίχθηκε τόσο από τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου της Γης όσο και από την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων από φυσικά υλικά και υλικά ανθρωπογενής προέλευσης. Τα πρώτα βήματα στην ανακάλυψη της προέλευσης και συμπεριφοράς του γεωμαγνητικού πεδίου έγιναν το 1269, από τον Petrus Peregrinus όπου τεκμηρίωσε μια πειραματική πραγματεία για τις ιδιότητες ενός φυσικού σφαιρικού μαγνήτη, καθώς και ήταν ο πρώτος που υποστήριξε την ύπαρξη δύο μαγνητικών πόλων σε ένα μαγνήτη. Τρεις αιώνες αργότερα, όπως προαναφέρθηκε, ο William Gilbert πρότεινε ότι η ίδια η Γη συμπεριφέρεται ως ένας μεγάλος μαγνήτης, που σε συνδυασμό με την ανακάλυψη από τον Gellibrand, το 1635, της γεωμαγνητικής κοσμικής παραλλαγής, ενέπνευσε νέα μοντέλα για την προέλευση του πεδίου.

Οι ενόργανες μετρήσεις του γεωμαγνητικού πεδίου αποπειράθηκαν το 1832 από τον Gauss, ο οποίος εφάρμοσε μια μέθοδο που του επέτρεπε την μέτρηση των απόλυτων

εντάσεων του γήινου μαγνητικού πεδίου. Ειδικότερα, πειραματικές μελέτες ότι ο μαγνητισμός μπορεί να επιβιώσει πάνω σε πετρώματα και αρχαιολογικά υλικά έγιναν τον 17^ο αιώνα από τον Boyle (1691). Ωστόσο, μόλις πριν από έναν περίπου αιώνα, η Αρχαιομετρία αναπτύσσεται και εισάγεται ως ένα καινούριος κλάδος των Θετικών Επιστημών και ασχολείται με την χρονολόγηση, ανάλυση και εξέταση αρχαιολογικών αντικειμένων. Πρώτος ο Thellier (Thellier, 1938) και οι μαθητές του διατύπωσαν την θεώρηση ότι η αποκτηθείσα μαγνήτιση ενός υλικού είναι παράλληλη και ανάλογη του μαγνητικού πεδίου της Γης την δεδομένη χρονική στιγμή, όταν, δηλαδή το σώμα υφίσταται την θέρμανση και ύστερα την ψύξη. Η καταγραφή αυτή των αργιλικών δομών της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου την χρονική στιγμή ψύξης ονομάζεται Φυσική Παραμένουσα Μαγνήτιση (Natural Remanent Magnetization (NRM)).

Οι μέθοδοι του Néel και του Thellier χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα για τον προσδιορισμό της αρχαιοέντασης. (Gómez-Paccard & Panón-Carrasco, 2018).

2.3. Συλλογή δειγμάτων.

Στο πλαίσιο της αρχαιομαγνητικής χρονολόγησης, πληθώρα μεθοδολογιών και δειγματοληψίας έχουν αναπτυχθεί, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανάκτηση των κατάλληλων υλικών. Σε όλες τις μεθοδολογίες το υλικό του δείγματος που συλλέγεται πρέπει να σχετίζεται με γνωστό αρχαιολογικό χώρο. Σε κάθε δειγματοληψία ανακτώνται, συνήθως, μεταξύ 6 έως 20 προσανατολισμένα δείγματα, τα οποία μπορούν να δώσουν ένα στατιστικά έγκυρο αποτέλεσμα.

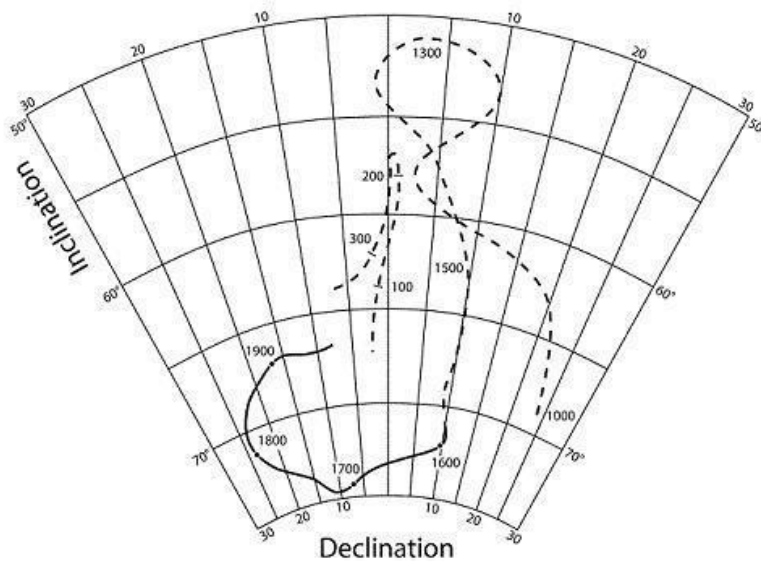
Η τεχνική που ανέπτυξε ο Thellier το 1967 (Thellier, 1967) χρησιμοποιείται από πολλούς επιστήμονες μέχρι και σήμερα, η οποία ακολουθεί τα βήματα της απομόνωσης του ανακτημένου υλικού σε μη μαγνητικό γύψο, της σημείωσης του προσανατολισμού του δείγματος στον γύψο και στην συνέχεια την απομάκρυνση αυτών σε ειδικά εργαστήρια για περαιτέρω ενοποίηση και τελικά υποδειγματοληψία.

Στα αρχαιομαγνητικά εργαστήρια χρησιμοποιούνται μια σειρά από τεχνικές απομόνωσης και επεξεργασία των δειγμάτων. Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα εργαστήρια μετρούσαν μόνο της διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε ότι αφορά της αρχαιοένταση. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές επικεντρώνονται

στην βελτίωση των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τιμών αυτών (Lengyel, 2017).

2.4. Καμπύλες αιώνιας μεταβολής.

Τα αρχαιολογικά δεδομένα είναι, επί του παρόντος, τα πιο ακριβή παλαιομαγνητικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης για την μελέτη των τελευταίων χιλιετιών. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται για την κατασκευή Καμπυλών Αιώνια Μεταβολής (Secular Variation Curves (SVC)) (Σχήμα 11). Οι SVC μπορούν να απεικονιστούν είτε ως μεταβολές της έγκλισης (I), απόκλισης (D) και της παλαιοέντασης σε σχέση με τον χρόνο (Schnepp, & Lanos, 2005, Zanani, 2007) είτε ως μεταβολή της θέσης του γεωγραφικού μαγνητικού πόλου σε σχέση με τον χρόνο (Lengyel, 2010). Οι SVC παρέχουν γνώση των διακυμάνσεων του γεωμαγνητικού πεδίου σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα για περιόδους που καλύπτουν από 1 έτος ως και 10^5 χρόνια. Μαζί με τα ιστορικά δεδομένα, οι λεπτομερείς καμπύλες SVC μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως εργαλείο χρονολόγησης, καθώς η παλαιομαγνητική κατεύθυνση μιας αρχαιολογικής δομής άγνωστης ηλικίας μπορεί να συγκριθεί με την SVC. Πολλές και πλούσιες σε πληροφορία SVC είναι πλέον διαθέσιμες στην Ευρώπη, όπως Μεγάλη Βρετανία (Batt, 1997), Βουλγαρία (Kovacheva et al., 1998), Γαλλία (Gallet et al., 2002), Ουγγαρία (Márton, 2003), Γερμανία (Schnepp & Lanos, 2005) και Ιταλία (Tema et al., 2006).





Σχήμα 11: Καμπύλες και βαθμονόμηση αιώνιας μεταβολής

Η Ισπανία και η Ελλάδα αποτελούν δύο χώρες με πληθώρα αρχαιολογικών ανασκαφών αλλά με περιορισμένα δεδομένα διαθέσιμα για την συμπλήρωση των SVC. Πιο συγκεκριμένα για τον ελλαδικό χώρο η συμπλήρωση των καμπυλών αυτών κατά την Νεολοθική εποχή, είναι σε σημαντικό πρώιμο στάδιο. Σε γενικότερο πλαίσιο, μια ενιαία SVC για όλη την μέση Ευρώπη εξακολουθεί να αποτελεί ένα μείζον ζήτημα. Έχουν παρατηρηθεί μεταβολές στην μέση ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Σύμφωνα με παρατηρήσεις στο χρονικό διάστημα των τελευταίων 150 χρόνων, η μεταβολή αυτή έχει υπολογιστεί ως μια δραματική μείωση της τάξεως του 85%.

Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα, τα οποία θεωρούνται αρκετά φερέγγυα και δίνουν την δυνατότητα επαρκώς αξιόπιστων προβλέψεων για επικείμενα χρόνια. Εκτιμήσεις δεν μπορούν να δοθούν με βεβαιότητα καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η συστηματική μελέτη των διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου της Γης διεξάχθηκαν μόλις το 1.600 μ.Χ. Συνεπώς, τα μοντέλα που έχουν ως βάση τις μετρήσεις αυτές, μικρής διάρκειας μέτρησης, δεν καθιστούν δυνατόν την ερμηνεία των SVC.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ομοιότητα των καμπυλών της αιώνιας μεταβολής σε διάφορα και διάσπαρτα τμήματα των ηπείρων σε σύγκριση με τις αξιοσημείωτες ανομοιότητες από την μία ήπειρο στην άλλη. Η απόκλιση αυτή σηματοδοτεί πιθανόν το μέγεθος και την σημασία των μη διπολικών πηγών του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα της Γης (Butler, 1992). Βασιζόμενη σε αυτήν την παρατήρηση, έγιναν προσπάθειες εύρεσης κατάλληλου μεγέθους χωρικών μεταβολών για τις αρχαιομαγνητικές περιοχές και διεξάχθηκε το συμπέρασμα ότι είναι αποδεκτές περιοχές διαμέτρου 1000km με αρχαιομαγνητικές καταγραφές (Noël & Batt, 1990, Batt, 1997, Sternberg, 1997).

3.1. Περιοχή μελέτης

Η θέση Ίμβρου Πηγάδι βρίσκεται στην περιοχή του Νέου Μοναστηρίου του νομού Φθιώτιδας, στα όρια τις νοτιοδυτικής Θεσσαλίας. Οι ανασκαφές για την εύρεση των νεολιθικών κλιβάνων άρχισε το 2002 στην κορυφή της Μαγούλας και στην δυτική πλευρά, ωστόσο υπήρξαν τις πολλές και μακροχρόνιες τις διακοπές της ανασκαφής, με τα πρώτα σημαντικά κεραμικά ευρήματα και την εύρεση κλιβάνων να συμβαίνει περίπου το 2009. Η ύπαρξη έντονης πυράκτωσης των χωμάτων, όπου έγινε η ανασκαφή, ήταν η αφετηρία υπόθεσης παρουσίας κλιβάνων.

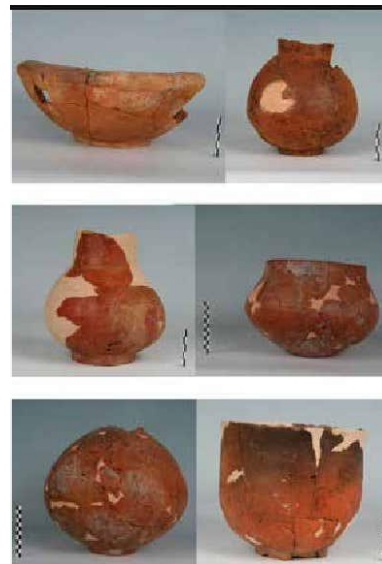


Σχήμα 12: Επιφάνειες καμένων κλιβάνων, χτισμένων ανάμεσα σε δύο παράλληλους αργιλικούς τοίχους με κατεύθυνση Βορρά-Νότον.

Οι πρώτες προσδοκίες των επιστημών αφορούσαν την παρουσία ενός και μόνο κλιβάνου. Καθώς, όμως, οι ανασκαφές επεκτεινόταν, γινόταν αντιληπτή η συνύπαρξη πολλών κλιβάνων (Σχήμα 12).

Κατά την διάρκεια της ανασκαφής βρέθηκαν διάφορα τετράπλευρα σκεύη, αγγεία, στην συντριπτική τους πλειοψηφία μονόχρωμα και με θαμπές επιφάνειες, τα οποία είχαν ψηθεί στους κλιβάνους αυτούς (Σχήμα 13). Επίσης, ανάμεσα στις πυρακτωμένες επιχώσεις, βρέθηκαν κέρατα ελαφιών και άλλων ζώων που πιθανόν χρησιμοποιούνταν ως καύσιμη ύλη.

Δεν είναι γνωστό αν οι κλίβανοι εξυπηρετούσαν μόνο τις ανάγκες ενός οικισμού ή χρησιμοποιούνταν και από άλλους. Εντούτοις, η ανακάλυψη μικρότερων οικισμών στην τριγύρω περιοχή μαρτυρά την εκμετάλλευση των κλιβάνων σαν εξειδικευμένη εργασία. Σύμφωνα με τις ραδιοχρονολογήσεις των δειγμάτων που πάρθηκαν από την εκταφή, οι χρονολογίες φαίνεται να κυμαίνονται από το 5870 π.Χ. ως 5470 π.Χ. (Κυπαρίσση-Αποστόλικά, 2011).



Σχήμα 13: Ψημένα αγγεία μέσα στους κλιβάνους της Μαγούλας "Τυμβρου Πηγάδι".

3.2. Βήματα Μελέτης

Από τη περιοχή μελέτης, για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν δείγματα με τον κωδικό MIN (Σχήμα 14). Η διαδικασία της δειγματοληψίας είναι αρκετά απαιτητική και οι υπεύθυνοι ομάδα επιστημών ακολουθούν μια σειρά βημάτων και διεργασιών καθώς, επίσης, κρίνουν την καταλληλότητα των δομών. Σημαντικό να αναφερθεί ότι σημειώνονται, κατά την επιλογή τους, οι αριθμοί των δειγμάτων, οι περιοχές δειγματοληψίας και ο προσανατολισμός τους. Ο κωδικός MIN έφερε έξι (6) διαφορετικά δείγματα: MIN1, MIN2, MIN4, MIN5, MIN6 και MIN7, από τα οποία όλα αξιοποιήθηκαν στις εργαστηριακές διεργασίες, στην μελέτη και τέλος στην άντληση συμπερασμάτων. Παρακάτω παρατίθενται οι εργαστηριακές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της εργασίας.



Σχήμα 14. Καμένη δομή από όπου πάρθηκαν τα δείγματα της παρούσας μελέτης

3.2.1. Συμπαγοποίηση

Η διαδικασία της συμπαγοποίησης έλαβε χώρα στο εργαστήριο Παλαιομαγνητισμού του ΑΠΘ. Η διαδικασία αυτή προηγείται της λήψης των πυρήνων και υλοποιείται στα λιγότερα συμπαγή δείγματα. Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα πυριτικού νατρίου (Na_2SiO_3), όπου περιχύθηκε σε όλο το υλικό. Τα δείγματα πρέπει να στεγνώνουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 2-3 μέρες. Στην περίπτωση των δειγμάτων MIN η συμπαγοποίηση ήταν απαραίτητη σε όλα τα δείγματα και σε κάποιους κωδικούς επαναλήφθηκε 2-3 φορές (MIN1, MIN4, MIN5, MIN7). Μόλις το δείγμα στεγνώσει προχωράμε στην επόμενη διαδικασία της γυψοποίησης.

3.2.2. Γυψοποίηση

Η γυψοποίηση πραγματοποιείται για την ευστάθεια των δειγμάτων, για την αποφυγή σπασιμάτων και ρωγμών. Αρχικά, χρησιμοποιούμε ένα καλούπι από plexi-glass όπου γεμίζουμε ένα μικρό ποσοστό γύψου. Τοποθετούμε πάνω σε αυτό το δείγμα, σε οριζόντια θέση και τέλος περιχύνουμε επιπλέον γύψο γύρω από το δείγμα με πολλή προσοχή, έτσι ώστε να μην καλυφθεί το πάνω μέρος του, όπου υπάρχει ο ακριβής προσανατολισμός του δείγματος (Σχήμα 15). Με το στέγνωμα της γύψου, αφαιρούμε το καλούπι και με ιδιαίτερη ακρίβεια πρέπει να σημειωθούν σε ένα πλέγμα οι γραμμές προσανατολισμού (Σχήμα 16).



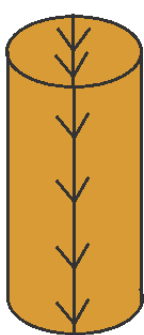
Σχήμα 15: Γυψοποίηση δειγμάτων και διατήρηση της καταγραφής προσανατολισμού αυτών.



16: Πλέγμα γραμμών προσανατολισμού.

3.2.3. Λήψη πυρήνων

Με ειδικό τρυπάνι λαμβάνονται κυλινδρικοί πυρήνες με διάμετρο 2.5cm. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας ο χειριστής του μηχανήματος πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικός κάνοντας αργές και σταθερές κινήσεις, έτσι ώστε ο πυρήνας του δείγματος να μην υποστεί θραύση. Λαμβάνονται όσοι πυρήνες μπορεί να διαθέσει κάθε δείγμα. Μετά την λήψη των πυρήνων πρέπει να σημειωθεί πάνω σε αυτά η γραμμή προσανατολισμού. Το πλέγμα που δημιουργήσαμε στην προηγούμενη φάση της επεξεργασίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια του προσανατολισμού που θα σημειωθεί πάνω στον πυρήνα.



Σχήμα 17: Πυρήνες δειγμάτων. Σχηματική απεικόνιση προβολής γραμμής σχηματισμού (αριστερά), κάτοψη (μέση) και όψη (δεξιά) των πυρήνων των δειγμάτων MIN.

Πέρα της διαμέτρου των δειγμάτων, σημαντικό ρόλο έχει και το ύψος αυτών. Μερικές φορές αυτούσια τα δείγματα δεν διαθέτουν το κατάλληλο πάχος με συνέπεια οι πυρήνες να είναι μικρότεροι σε ύψος από αυτό που απαιτείται, ή υπάρχει πιθανότητα σπασίματος του πυρήνα είτε κατά την διάρκεια κοπής, είτε μετά από αυτή. Για αυτόν τον λόγο, υπάρχει δυνατότητα γυψοποίησης των πυρήνων, χρησιμοποιώντας ειδικά κυλινδρικά καλούπια plexi-glass, ακολουθώντας παρόμοια μεθοδολογία που ακολουθήσαμε στην πρώτη διαδικασία γυψοποίησης. Για την τελειοποίηση των πυρήνων είναι δυνατή η κοπή τους με ειδικό τροχό (diameter: 25.4 ± 1 mm, length: 22.0 ± 1 mm).

Το πρώτο στάδιο της εργαστηριακής επεξεργασίας ολοκληρώθηκε, δυστυχώς, με λίγα διαθέσιμα δείγματα για το επόμενο στάδιο της μελέτης, λόγω εύθραυστων

δειγμάτων. Η συνέχεια των εργαστηριακών δραστηριοτήτων έλαβε μέρος στο εργαστήριο παλαιομαγνητισμού στην Σχολή Θετικών Επιστημών του ΑΠΘ.

3.3. Θερμομαγνητικές Καμπύλες

Για να παρθούν ακριβή και ξεκάθαρα αποτελέσματα εξετάζεται η συμπεριφορά της μαγνητικής επιδεκτικότητας των δειγμάτων σε σχέση με την θερμοκρασία. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι ο καθορισμός των σιδηρομαγνητικών ορυκτών που υπάρχουν στα δείγματα μας και είναι η αιτία της μαγνητικής επαύξησης στην καμένη άργιλο.

Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρο στο εργαστήριο παλαιομαγνητισμού της σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε υλικό και από τα 6 διαθέσιμα δείγματα της περιοχής μελέτης.

Από κάθε κώδικο δείγματος, πάρθηκαν μέρος αυτών, τα οποία σε ένα γουδί κορνιοτοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν στο ειδικό δοχείο του μηχανήματος.



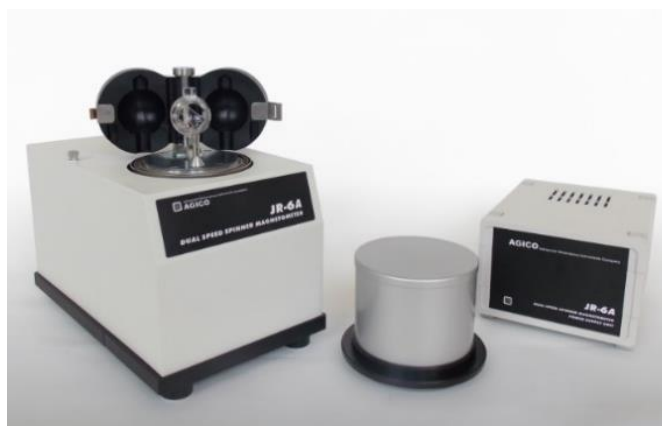
Σχήμα 18: MS2WFP Susceptibility/
Temperature system from Bartington

Το σύστημα μηχανημάτων που χρησιμοποιούμε κατά την διάρκεια του πειράματος των θερμομαγνητικών καμπυλών ονομάζεται MS2WFP Susceptibility/ Temperature system της Bartington. Αποτελείται από τον μετρητή της μαγνητικής επιδεκτικότητας και έναν φούρνο με μέγιστη θερμοκρασία τους 700 °C. Ορίζουμε την θερμοκρασία έναρξης και την μέγιστη θερμοκρασία στην οποία θέλουμε το δείγμα να θερμανθεί. Επίσης, ορίζουμε το βήμα ανόδου της θερμοκρασίας.

Στα αποτελέσματα των πειραμάτων απεικονίζεται η καμπύλη θέρμανσης → κόκκινη καμπύλη (heating) και η καμπύλη ψύξης → μπλε καμπύλη (cooling). Από τα διαγράμματα μπορούν να γίνει αντιληπτή η διαφορά της μαγνητικής επιδεκτικότητας όταν το δείγμα θερμαίνεται και όταν το δείγμα κρυώνει.

3.4. Μέτρηση της Φυσικής Παραμένουσας Μαγνήτισης (NRM)

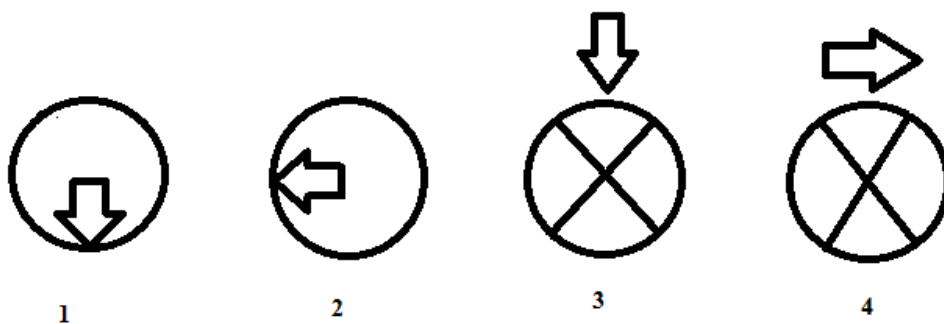
Σε πρώτο στάδιο, μετρήθηκε η ένταση και η κατεύθυνση της Φυσικής Παραμένουσας Μαγνήτισης (NRM) κάθε δείγματος.



Σχήμα 19: Μαγνητόμετρο JR-6 Dual Speed Spinner Magnetometer by Agico (Advance Geoscience Company)

Το μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτές τις μετρήσεις αλλά και στο επόμενο στάδιο της απομαγνήτισης είναι το μαγνητόμετρο JR-6 Dual Speed Spinner Magnetometer (Agico). Η έκδοση JR-6 είναι μία μη αυτοματοποιημένη έκδοση του οργάνου αλλά με την ίδια ευαισθησία και ακρίβεια. Η χρήση του είναι όμοια με όλα τα άλλα μαγνητόμετρα, με τον προσανατολισμό του δείγματος να

πρέπει να αλλάζει με το χέρι από τον χειριστή. Υπάρχει δυνατότητα μέτρησης του δείγματος σε δύο, τέσσερις ή έξι προσανατολισμούς. Σε όλα τα δείγματα μας οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις προσανατολισμούς (Σχήμα 20).



Σχήμα 20: Οι 4 θέσεις προσανατολισμού των πυρήνων μέσα στο μαγνητόμετρο.

Μετά το τέλος κάθε μέτρησης παίρνουμε τις τιμές της έντασης (intensity), της απόκλισης (declination) και της έγκλισης (inclination).

3.5. Μέθοδος Σταδιακής Απομαγνήτισης

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η αφαίρεση των ασταθών συνιστωσών και τον διαχωρισμό των σταθερών συνιστωσών. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, χρησιμοποιούμε την μέθοδο της σταδιακής απομαγνήτισης σε αυξανόμενες θερμοκρασίες (ΤΗ) (Σχήμα 21).

Τα δείγματα τοποθετούνται στον ειδικό υποδοχέα (Σχήμα 22). Ορίζεται από τον διαχειριστή η μέγιστη θερμοκρασία θέρμανσης των δειγμάτων, το χρονικό διάστημα θέρμανσης των δειγμάτων στην ορισμένη μέγιστη θερμοκρασία (hold) και ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας. Σε αυτή την μελέτη, η αρχική θερμοκρασία θέρμανσης των δειγμάτων ήταν ο 100°C και η μέγιστη θερμοκρασία ήταν στους 580°C , πραγματοποιώντας μια κυκλική διαδικασία. Από τους 100°C έως τους 350°C η αύξηση της θερμοκρασίας (step) γινόταν αν 50°C . Από τους 350°C έως τους 580°C η αύξηση σε κάθε νέα θέρμανση γινόταν ανά 40°C . Ο χρόνος διατήρησης της ορισμένης μέγιστης θερμοκρασίας σε όλο τον κύκλο θέρμανσης εσωτερικά του φούρνου ήταν 35 minutes. Σε κάθε στάδιο του πειράματος τα δείγματα



Σχήμα 21: Θερμικός απομαγνητιστής.



Σχήμα 22: Εργαστήριο Παλαιομαγνητισμού Σχολής Θετικών Επιστημών ΑΠΘ, Θερμικός απομαγνητιστής και τοποθέτηση δειγμάτων στον ειδικό στύλο.

τοποθετούνταν αντιπαράλληλα στον υποδοχέα, για την αποφυγή δημιουργίας ιξώδους μαγνήτισης μέσα στον φούρνο απομαγνήτισης.

Ύστερα από κάθε θέρμανση τα δείγματα ψύχονται εσωτερικά του φούρνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σε μηδενικό πεδίο, με τον επαναμαγνητισμό των κόκκων τυχαία και συνεπώς την αποχή των κόκκων αυτών από την NRM. Είναι πιθανόν οι κόκκοι με χαμηλότερες θερμοκρασίες φραγμού να αποκτήσουν μια μερική θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση (pTRM).

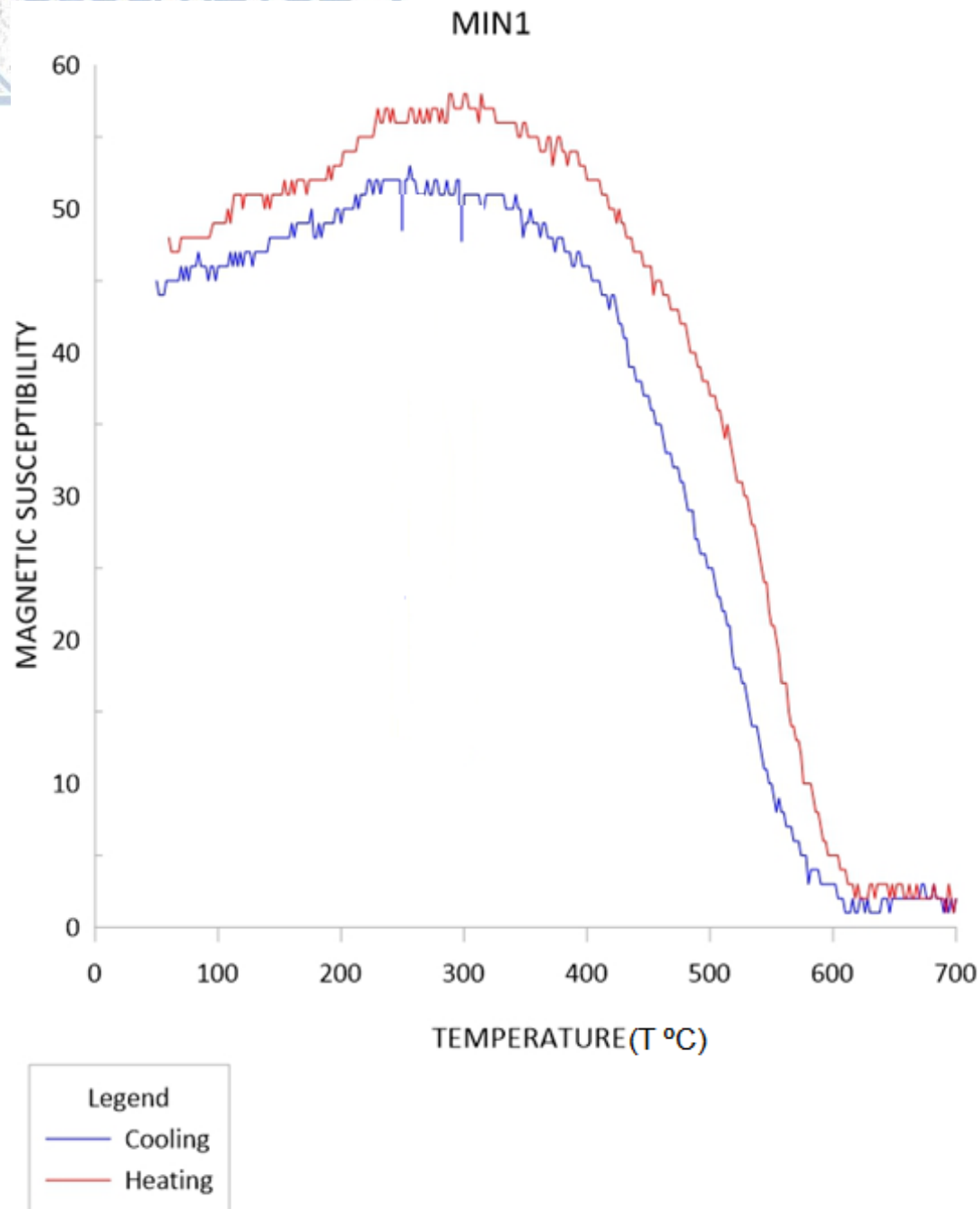
Με την αφαίρεση των δειγμάτων από τον φούρνο μεταφέρουμε τα δείγματα στο μαγνητόμετρο όπου γίνεται η μέτρηση της παραμένουσας μαγνήτισης.

Όπως προαναφέρθηκε, τοποθετούμε κάθε δείγμα στο μαγνητόμετρο με τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς (Σχήμα 20), με τις μετρήσεις να εισάγονται αυτόματα στο λογισμικό Rema6 by Agico.

Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων.

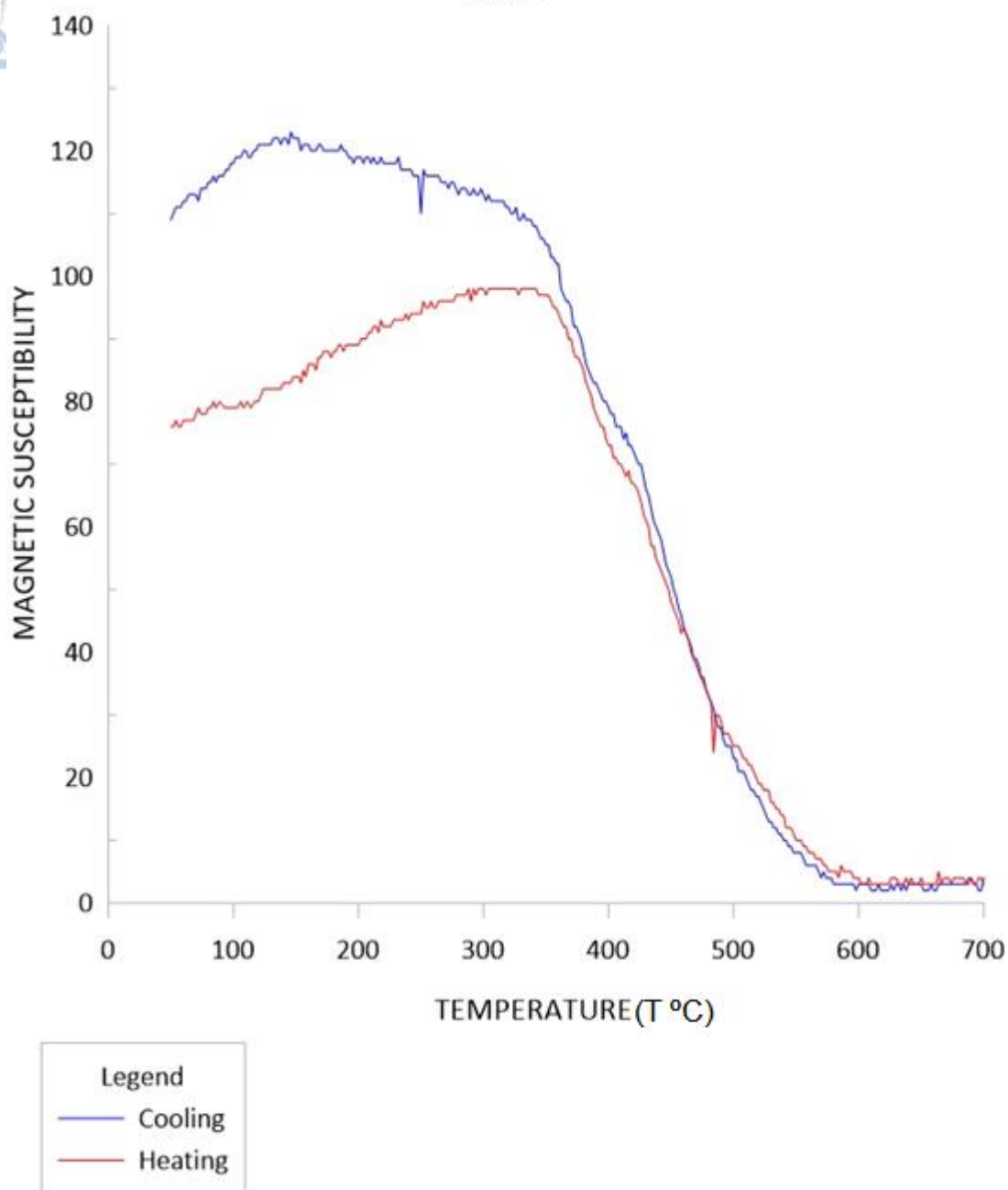
4.1. Αποτελέσματα θερμομαγνητικών καμπύλων

Οι θερμομαγνητικές καμπύλες των δειγμάτων MIN παρατίθενται παρακάτω (σχήματα 23-28). Όπως προκύπτει και από τα σχήματα οι καμπύλές θέρμανσης – ψύξης παρουσιάζουν μία σχετική αντιστρεψιμότητα. Ειδικότερα τα δείγματα MIN1 και 6 είναι τα μόνα δείγματα που η καμπύλη θέρμανσης βρίσκεται πάνω από την καμπύλη ψύξης, γεγονός που υποδεικνύει την σχεδόν αμετάβλητη μαγνητική ορυκτολογία των δειγμάτων κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Και στις δύο περιπτώσεις η καμπύλη θέρμανσης μηδενίζεται μετά τους 600°C υποδεικνύοντας την ύπαρξη μαγκεμίτη. Τα υπόλοιπα δείγματα που μελετήθηκαν (MIN2, MIN4, MIN5 και MIN7) εμφανίζουν την καμπύλη ψύξης πάνω από την καμπύλη θέρμανσης και μικρότερη ταύτιση των δύο καμπύλων υποδηλώνοντας την δημιουργία νέων ορυκτολογικών φάσεων κατά την θέρμανση του υλικού. Σε όλες τις περιπτώσεις η καμπύλη θέρμανσης φαίνεται να μηδενίζεται κοντά στους 580 °C και κατά συνέπεια μπορούμε να υποθέσουμε ότι το κύριο μαγνητικό ορυκτό αυτών των δειγμάτων είναι ο μαγνητίτης.



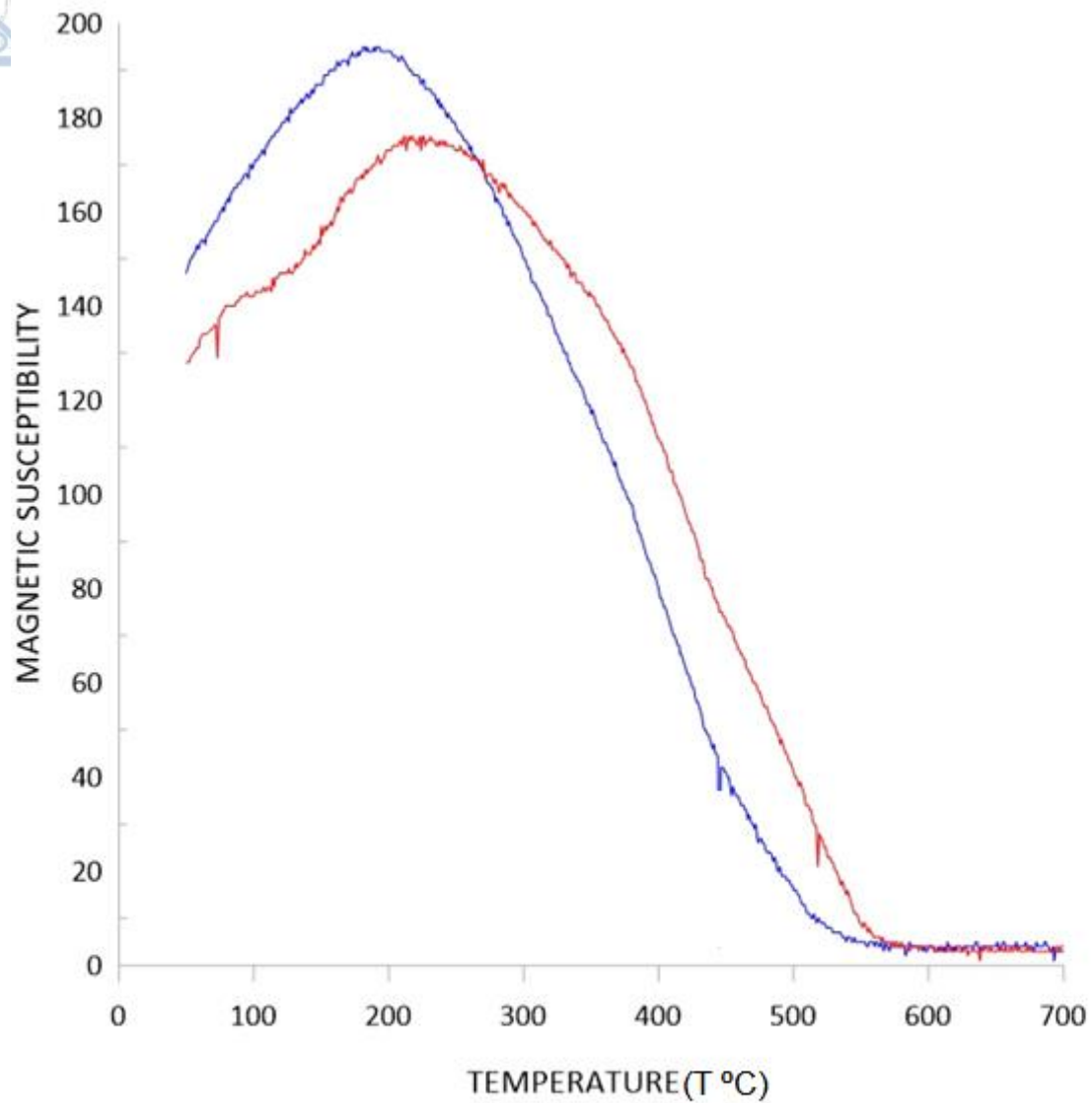
Σχήμα 23: Θερμομαγνητική καμούλη δείγματος MIN1

MIN2

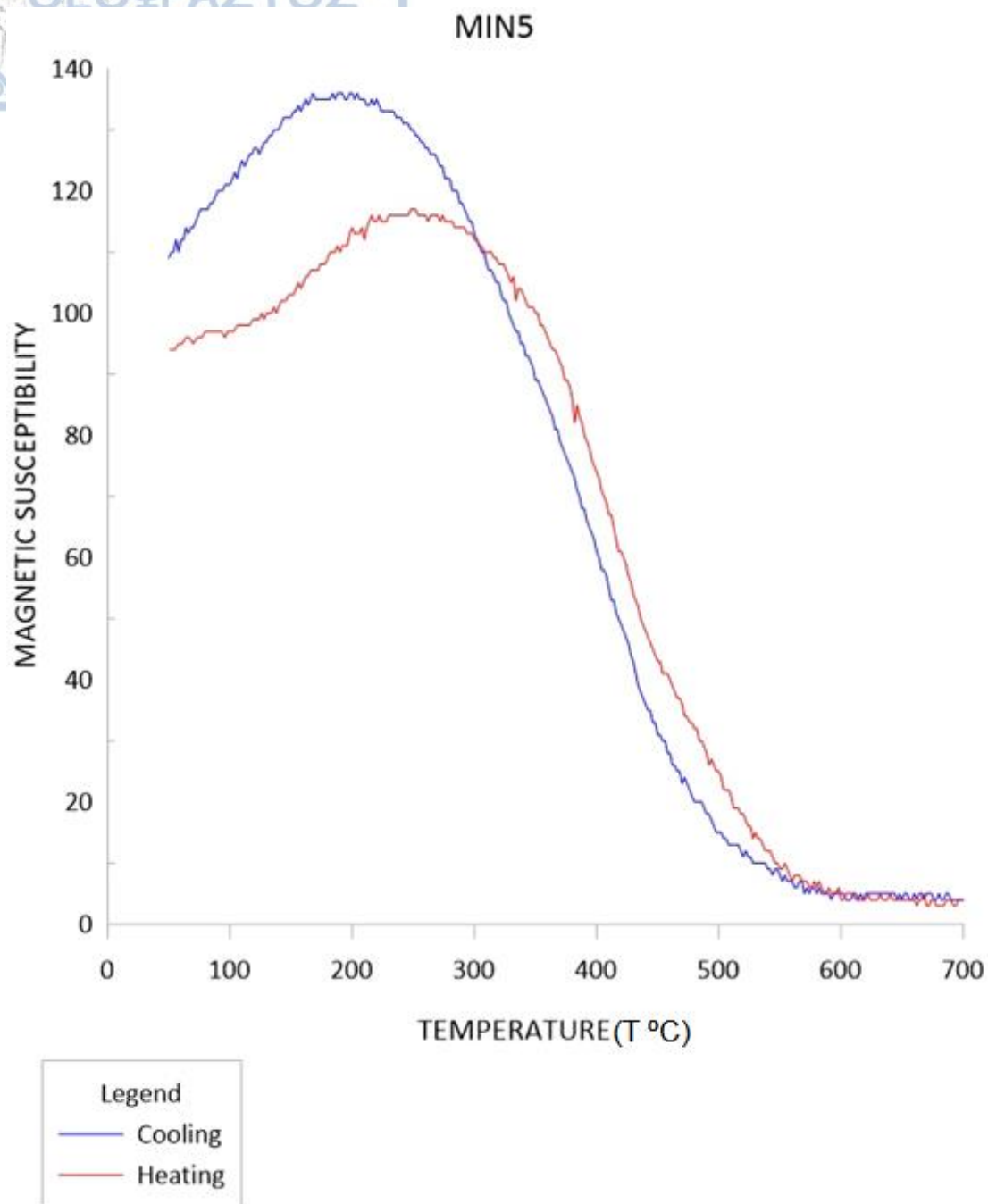


Σχήμα 24: : Θερμομαγνητική καμύλη δείγματος MIN2

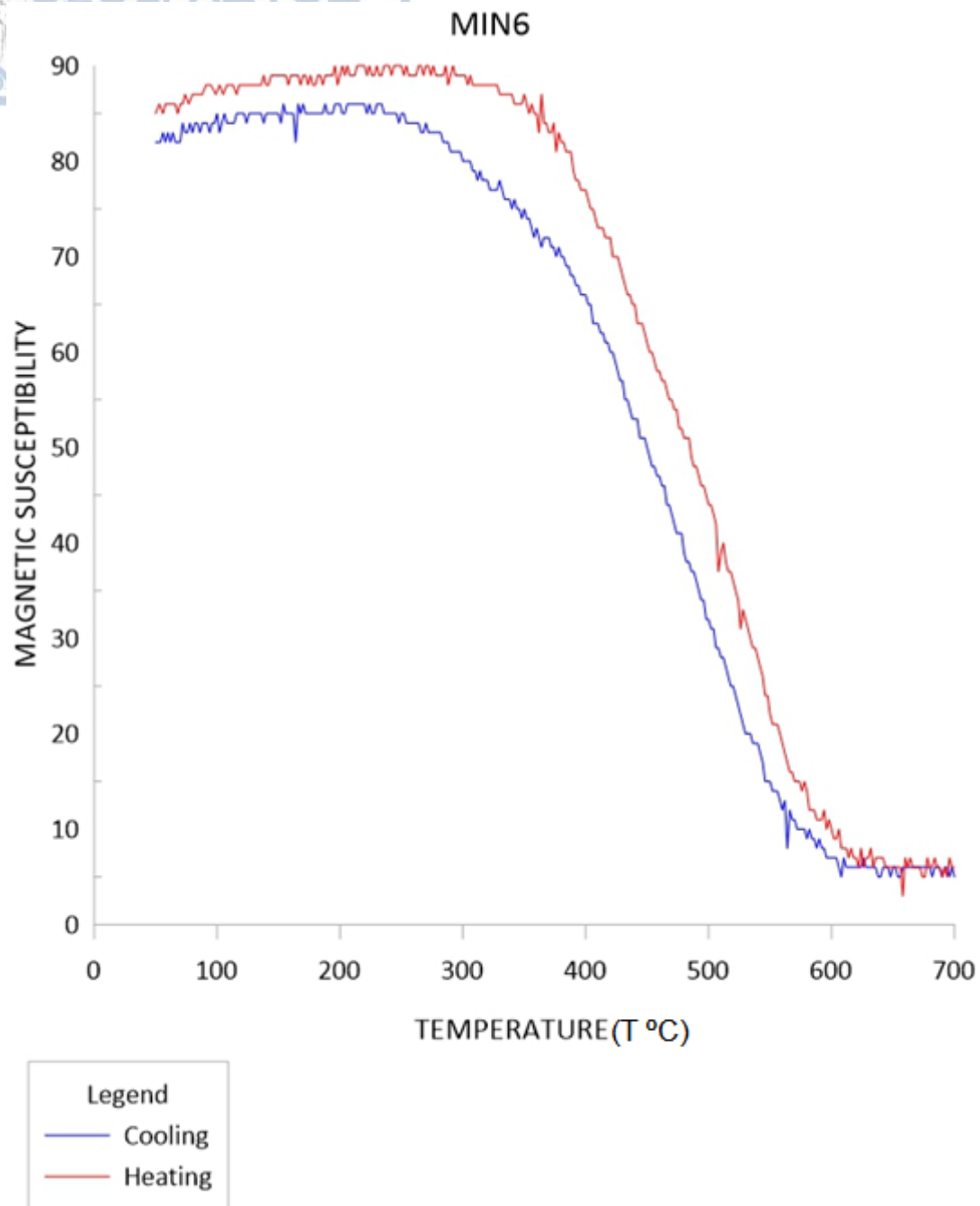
MIN4



Σχήμα 25: : Θερμομαγνητική καμύλη δείγματος MIN4

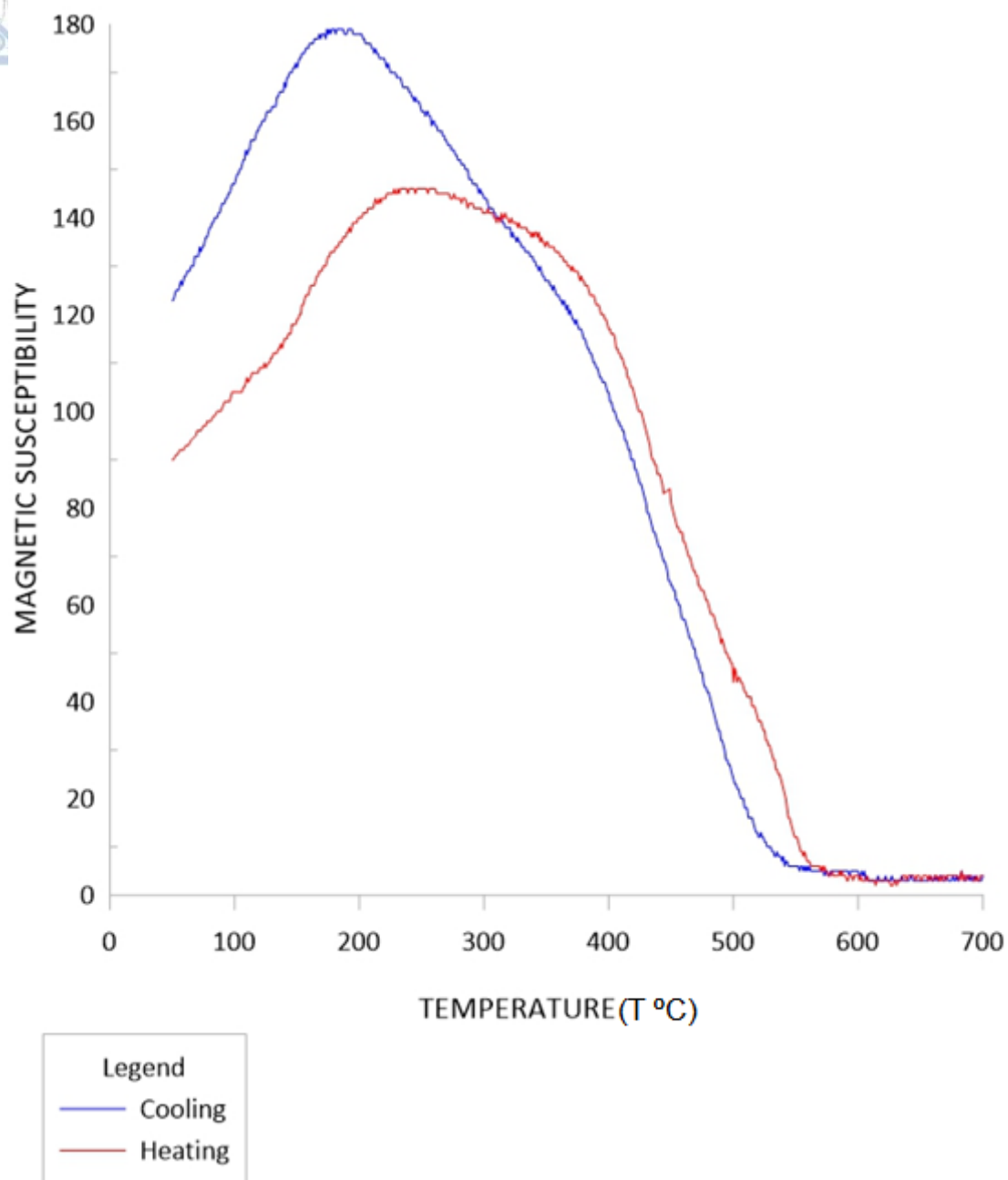


Σχήμα 26: : Θερμομαγνητική καμούλη δείγματος MIN5



Σχήμα 27: : Θερμομαγνητική καμύλη δείγματος MIN6

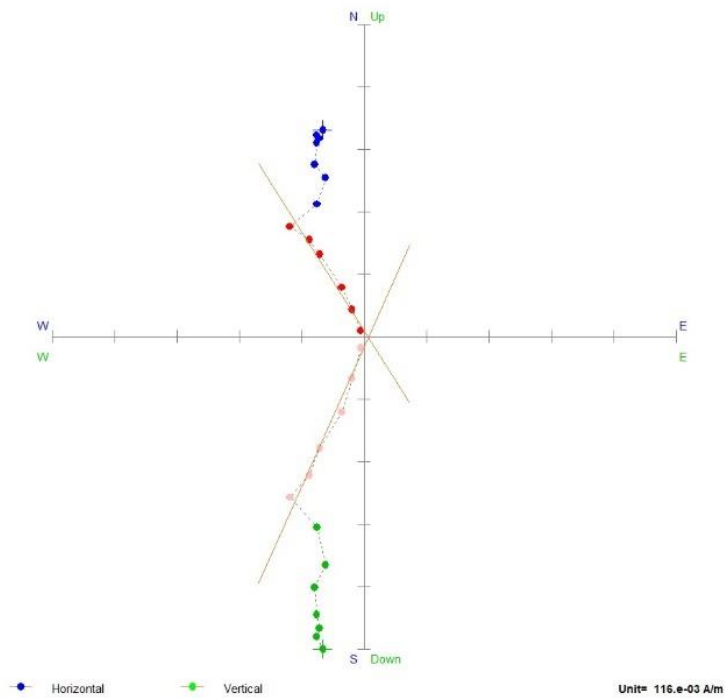
MIN7



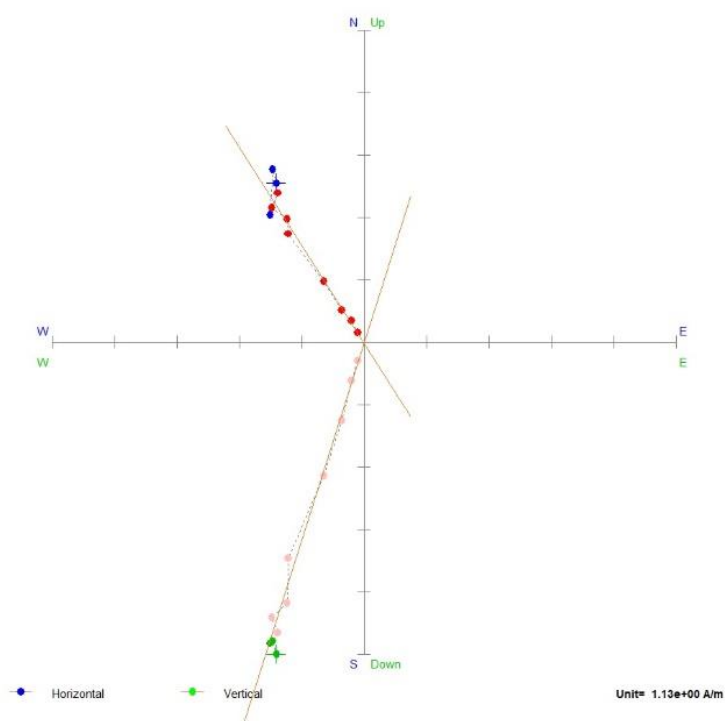
Σχήμα 28: : Θερμομαγνητική καμούλη δείγματος MIN7

4.2. Αποτελέσματα αρχαιομαγνητικής διεύθυνσης

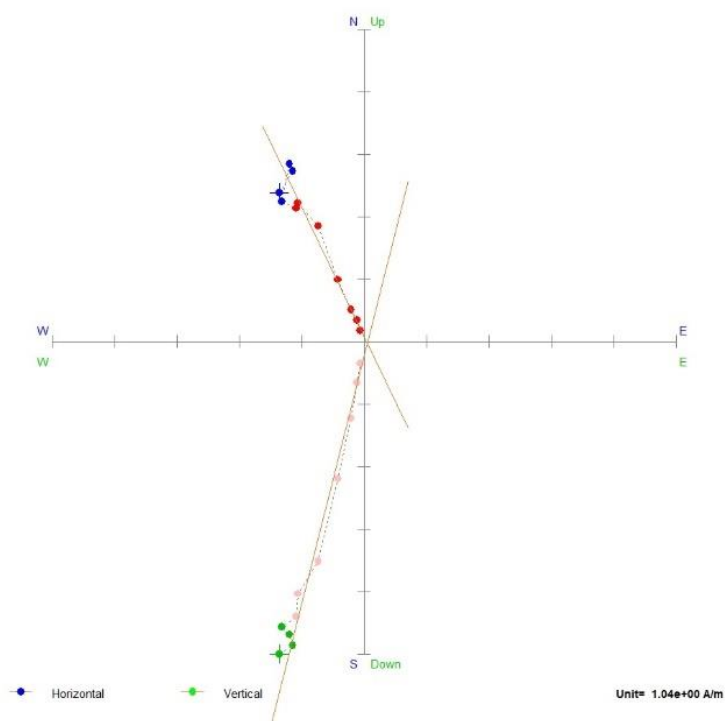
Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της απομαγνήτισης, όπου όλα τα δείγματα φτάσανε σε πλήρη απομαγνήτιση, με μερικά από αυτά σε θερμοκρασία μικρότερη των 580°C, σηματοδοτώντας την έλλειψη σκληρών μαγνητικών ορυκτών. Απομαγνητίστηκαν τα δείγματα: MIN1-6, MIN2-1, MIN2-3, MIN4-4, MIN 4-5, MIN 5-3, MIN6-9, MIN7-1, MIN7-2. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω με την παραπάνω σειρά:



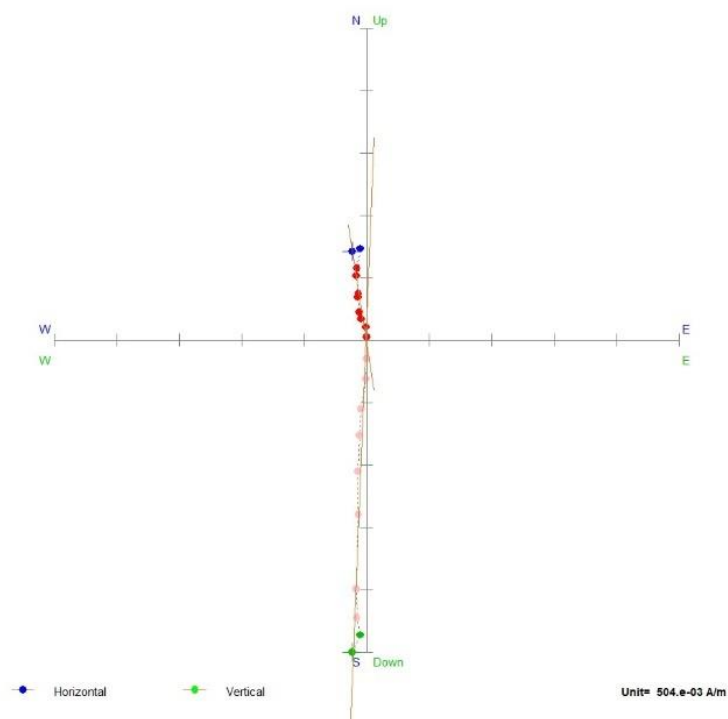
Σχήμα 29: Διάγραμμα Zijderverd του δείγματος MIN1-6



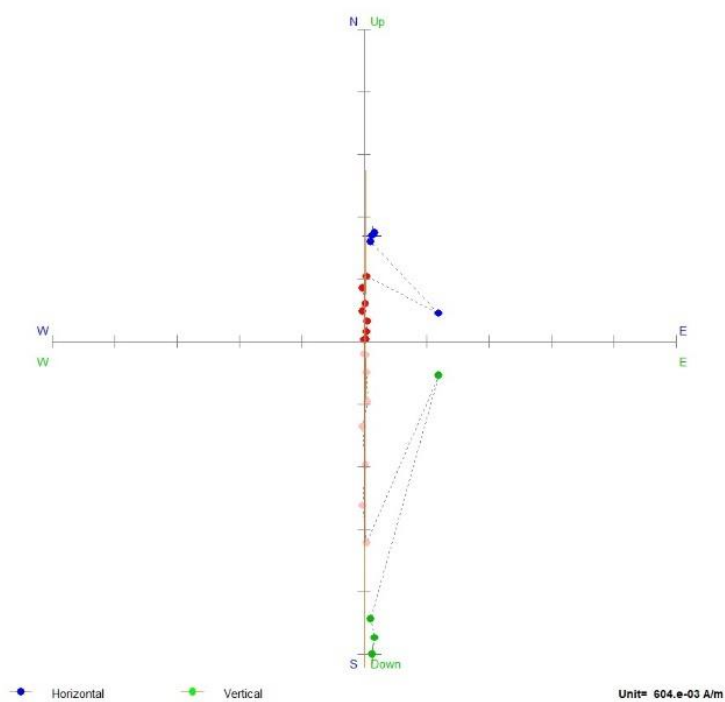
Σχήμα 30: Διάγραμμα Zijderverd του δείγματος MIN2-1



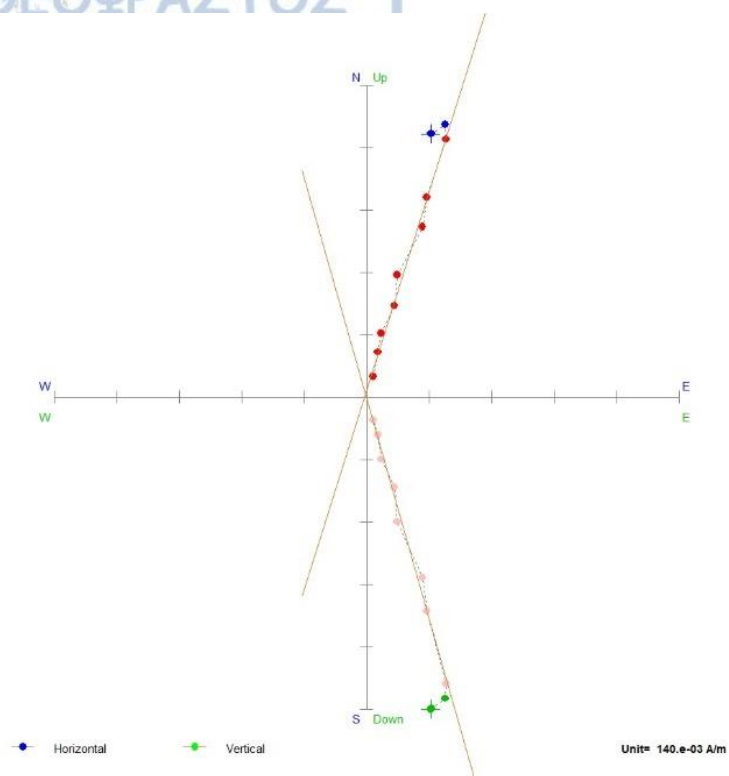
Σχήμα 31: Διάγραμμα Zijderverd του δείγματος MIN2-3



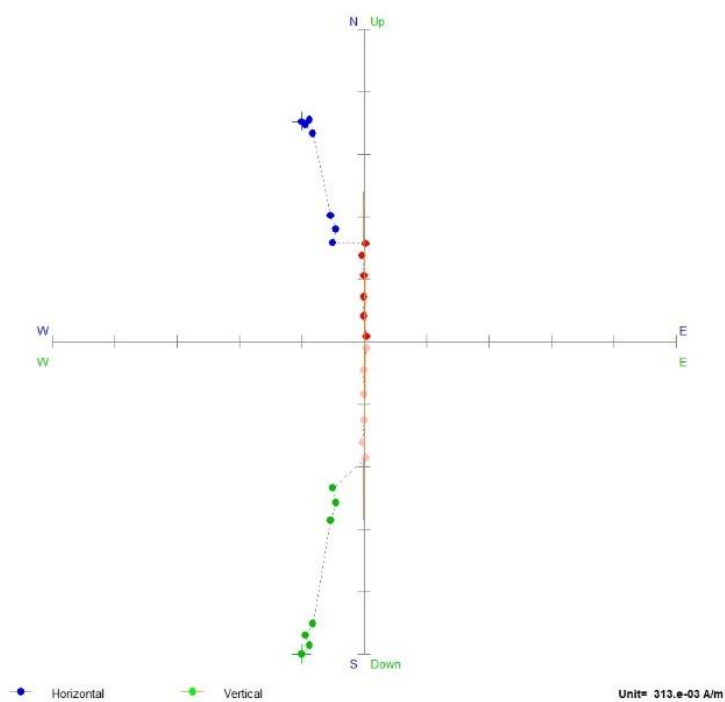
Σχήμα 32: Διάγραμμα Zijderveld του δείγματος MIN 4-4



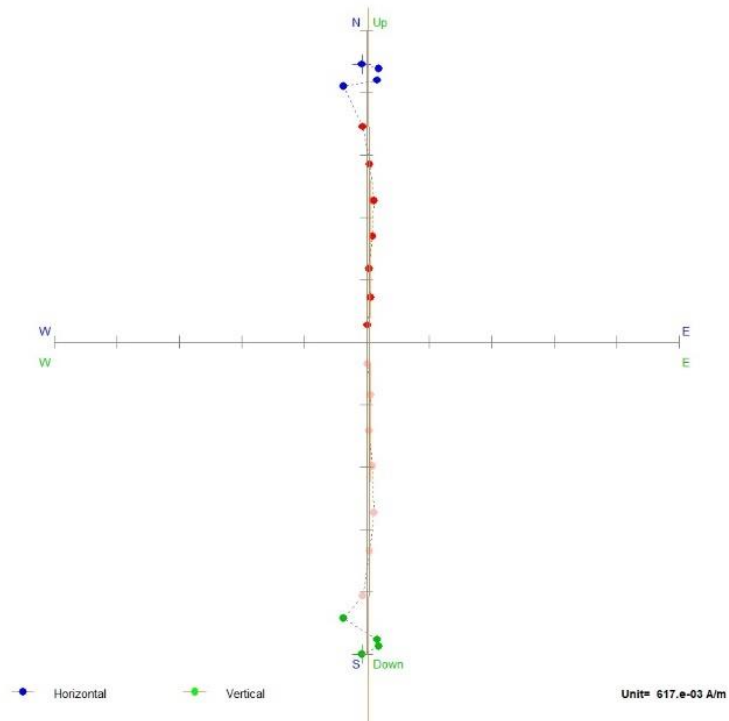
Σχήμα 33: Διάγραμμα Zijderveld του δείγματος MIN4-5



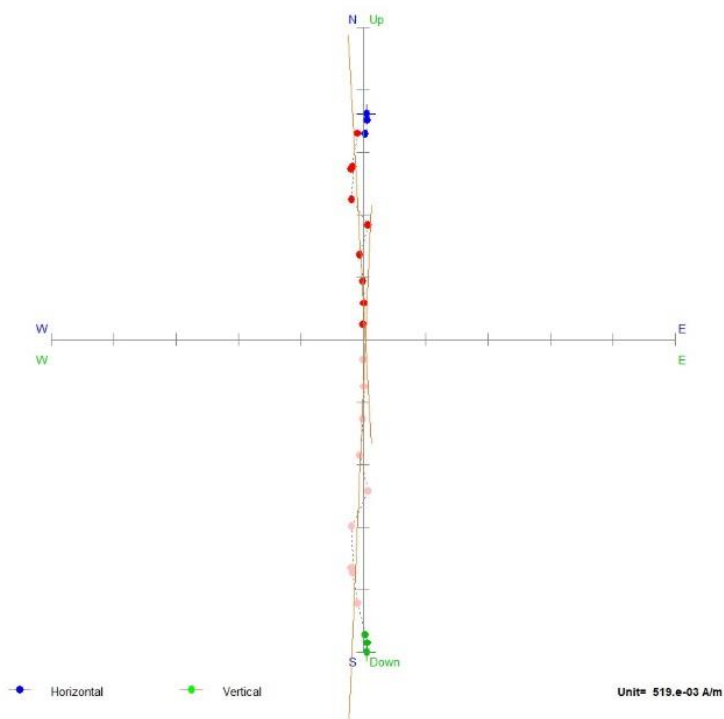
Σχήμα 34: Διάγραμμα Zijderveld του δείγματος MIN5-3



Σχήμα 35: Διάγραμμα Zijderveld του δείγματος MIN6-9



Σχήμα 36: Διάγραμμα Zijderverd του δείγματος MIN7-1

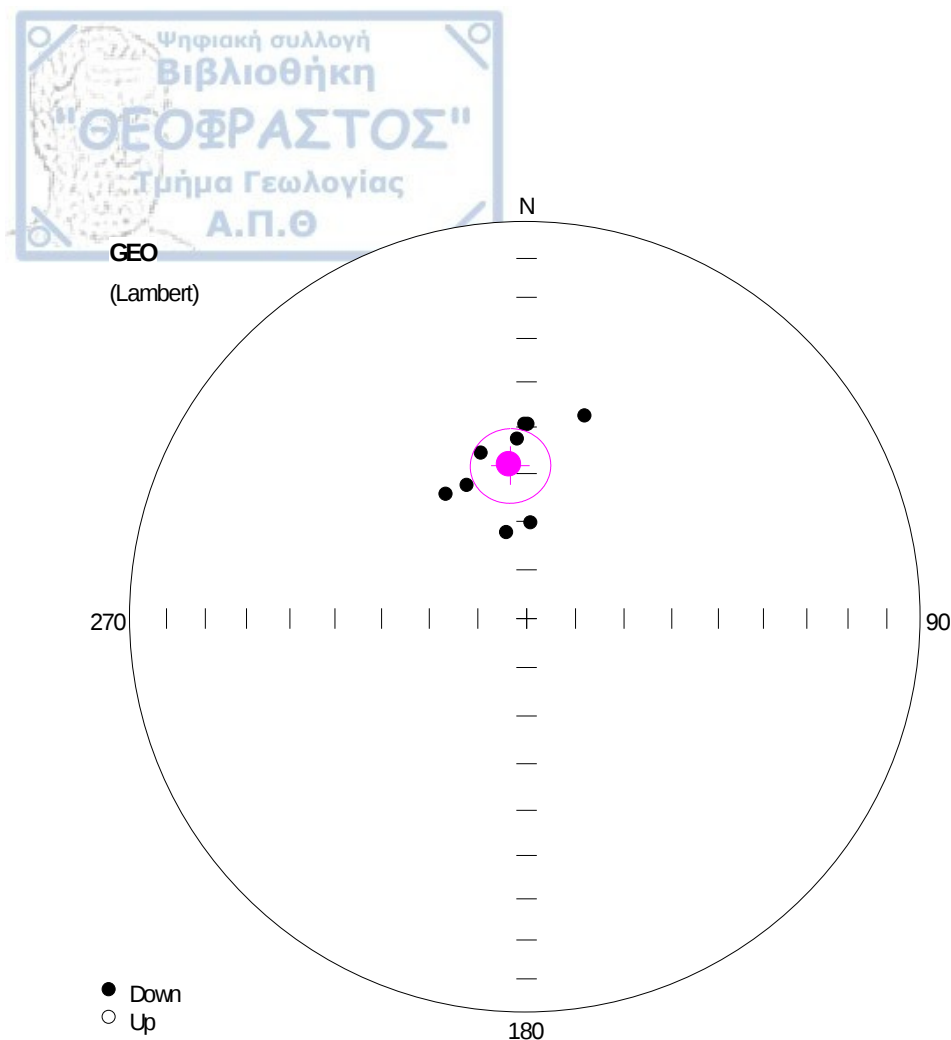


Σχήμα 37: Διάγραμμα Zijderverd του δείγματος MIN7-2

Στα παραπάνω διαγράμματα Zijderveld παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κάθε δείγματος (σχήμα 29-37). Κάθε μέτρηση υπέστη φιλτράρισμα για την απομάκρυνση 'λανθασμένων' τιμών, που προκλήθηκαν από την διαδικασία μέτρηση της παραμένουσας μαγνήτισης στο μαγνητόμετρο. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μαγνητόμετρο JR-6 είναι μία μη αυτοματοποιημένη έκδοση του οργάνου, δηλαδή ο χειριστής αναλαμβάνει το βάρος της τοποθέτησης με ακρίβεια του δείγματος στον σωστό προσανατολισμό, με άμεση απόρριξη την πιθανότητα ανθρώπινου σφάλματος. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται φίλτρα για να αφαιρέσουν τις θορυβώδεις μετρήσεις έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι ασφαλέστερο και το σφάλμα μικρότερο.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των συνιστωσών χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Remasoft και η ανάλυση των κυρίων συνιστωσών (PCA, Principal Component Analysis). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε κάθε δείγμα χωριστά και με βάση την χαρακτηριστική διεύθυνση που προέκυψε για κάθε δείγμα υπολογίστηκε η μέση τιμή απ' όλα τα δείγματα η οποία είναι και η χαρακτηριστική διεύθυνση για την εξεταζόμενη καμένη δομή. (Σχήμα 38).

Οι τιμές της Χαρακτηριστικής Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM) των δειγμάτων που μελετήθηκαν κυμαίνονται από 0.7 (A/m) έως 6.5 (A/m). Οι μαγνητικές αποκλίσεις ποικίλλουν από 359.0° έως 13.8° και οι μαγνητικές εγκλίσεις κυμαίνονται από 48.3° έως 73.9°. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέση τιμή κάθε παραμέτρου υπολογίστηκε ως εξής: Απόκλιση $D=354^\circ$, Έγκλιση $Inc=58.1^\circ$ και $a_{95}=7.9^\circ$, $n=9$.

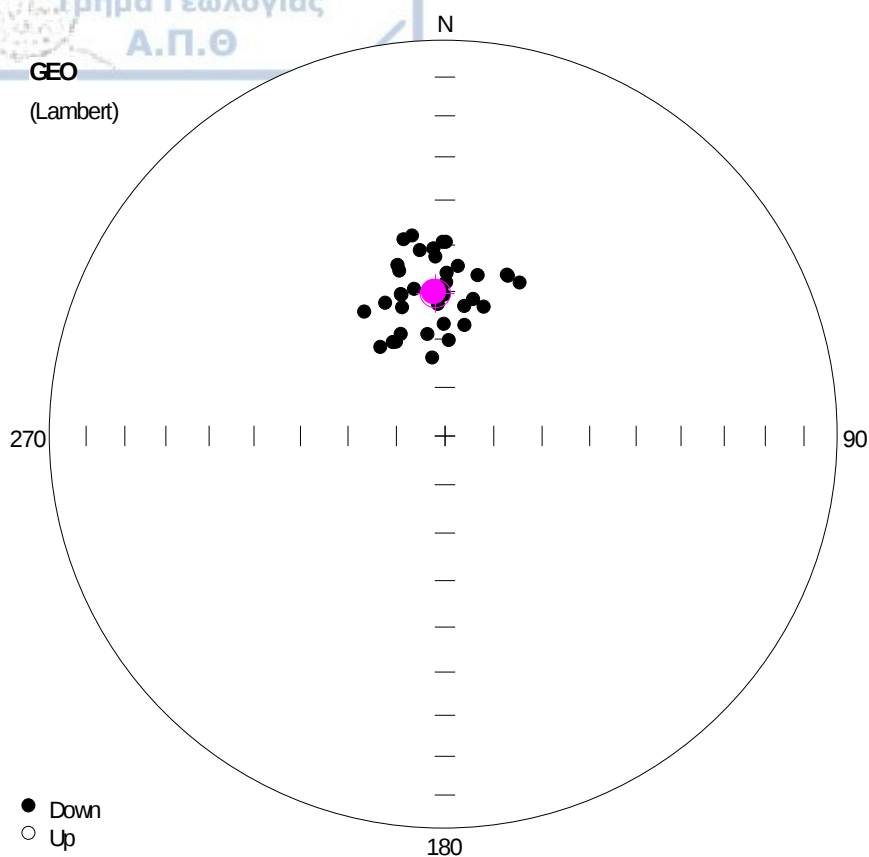


Σχήμα 38: Στερεογραφική προβολή Κύριας Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM).

Η μέση τιμή που υπολογίσθηκε παρουσιάζει σχετικά μεγάλο σφάλμα, το οποίο οφείλεται κυρίως στον μικρό αριθμό δειγμάτων που ήταν διαθέσιμα για την παρούσα μελέτη. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα δείγματα που συλλέχθηκαν ήταν πολύ εύθραυστα με αποτέλεσμα ακόμα και μετά την συμπαγοποίησή τους να μην είναι δυνατή η λήψη περισσότερων αρχαιομαγνητικών δειγμάτων.

Στον ίδιο αρχαιολογικό χώρο έχει πραγματοποιηθεί και παλαιότερα αρχαιομαγνητική μελέτη σε καμένες δομές πλησίον της υπό μελέτη δομής στην παρούσα μελέτη. Αν λοιπόν συμπεριλάβουμε στον υπολογισμό της μέσης τιμής και τα υπάρχοντα στοιχεία προκύπτει ένας νέος μέσος όρος (Σχήμα 39) ως εξής:

Απόκλιση $D=356.1^\circ$, Έγκλιση $Inc=60.3^\circ$ και $a_{95}=3.0^\circ$, $n=37$.



Σχήμα 39. Στερεογραφική προβολή Κύριας Παραμένουσας Μαγνήτισης (ChRM) μετά την προσθήκη και παλαιότερων αποτελεσμάτων από την ίδια περιοχή.

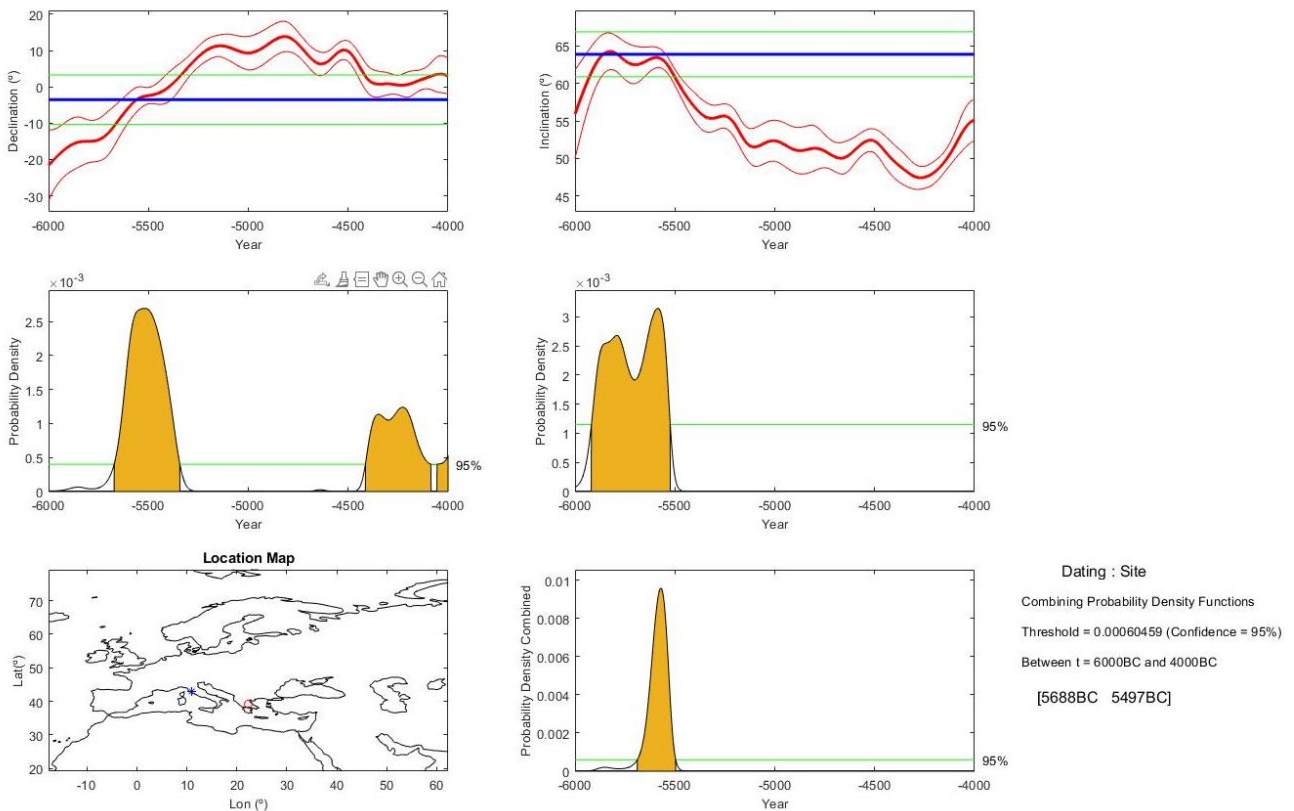
Από την σύγκριση των δύο μέσων όρων προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα νέα αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα προηγούμενα αποτελέσματα και συνεισφέρουν στην διαμόρφωση μίας πολύ αξιόπιστης τιμής αφού το σφάλμα που υπολογίσθηκε με την χρήση όλων των δεδομένων είναι μικρό και πλήρως αποδεκτό.

4.3. Αρχαιομαγνητική χρονολόγηση

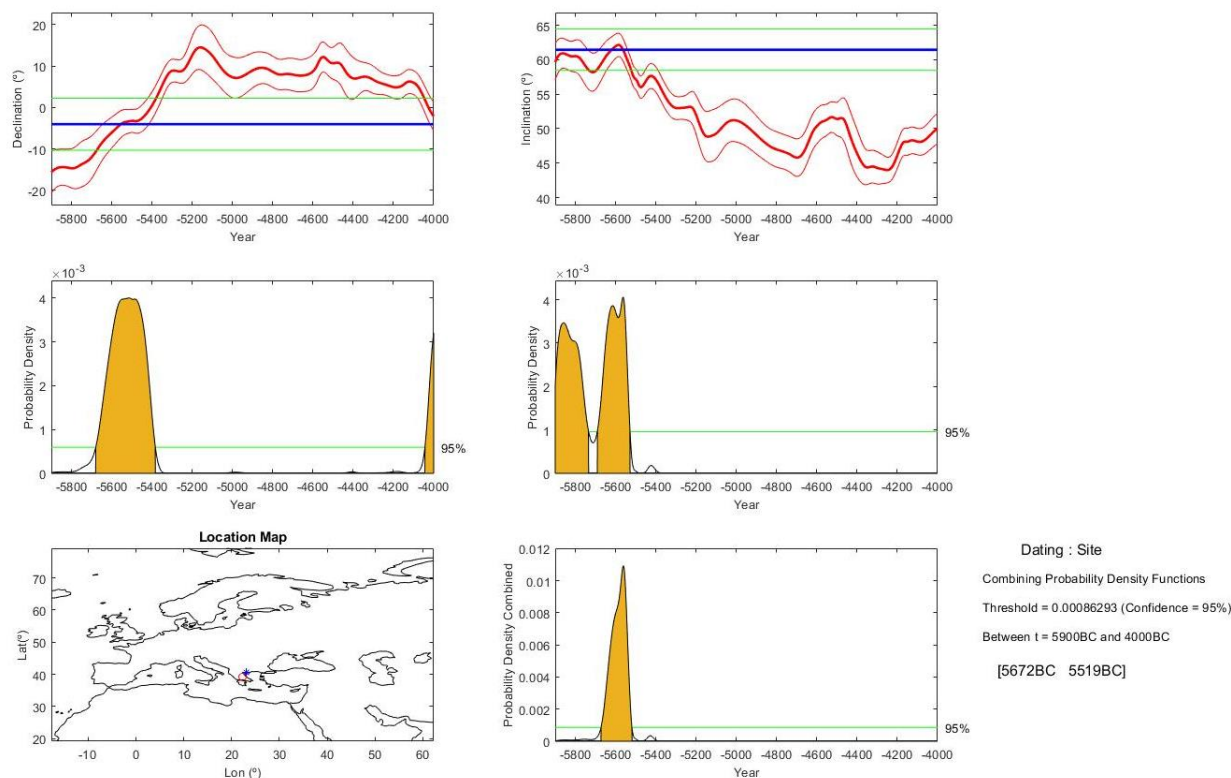
Με βάση την νέα μέση τιμή της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου υπολογίσθηκε η εκτίμηση της ηλικίας των καμένων δομών από την Νεολιθικό οικισμό της Μαγούλας

Ίμβρου Πηγάδι. Για τον χρονολόγηση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα archaeodating tool σε περιβάλλον Matlab (Pavon Carrasco et al., 2011).

Για την πραγματοποίηση της χρονολόγησης χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικές καμπύλες αιώνιας μεταβολής που είναι διαθέσιμες για την Νεολιθική περίοδο. Η πρώτη είναι η Νεολιθική καμπύλη αρχαιοδιεύθυνσης για την Ευρώπη (Carrancho et al., 2013) και η δεύτερη η βαλκανική (Tema and Kondoroulou, 2012). Τα αποτελέσματα της χρονολόγησης φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (40-41).



Σχήμα 40. Αποτελέσματα χρονολόγησης με την χρήση της Νεολιθικής καμπύλης για την Ευρώπη.



Σχήμα 41. Αποτελέσματα χρονολόγησης με την χρήση της Βαλκανικής καμπύλης.

Τα σχήματα 40 και 41 απεικονίζουν την χρονολόγηση όπως προκύπτει μέσω του προγράμματος archaeodating tool. Στην πρώτη σειρά εμφανίζονται χωριστά η καμπύλη της Απόκλισης και της Έγκλισης (κόκκινη καμπύλη) του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με τον χρόνο καθώς και η μέση τιμή που υπολογίσαμε και την οποία θέλουμε να χρονολογήσουμε (μπλέ καμπύλη). Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το διάστημα από 6000-4000 π.Χ.

Στην δεύτερη σειρά, φαίνονται οι πυκνότητες πιθανότητας για κάθε στοιχείο χωριστά (Απόκλιση και Έγκλιση), ενώ στην τελευταία σειρά φαίνεται η συνδυασμένη πυκνότητα πιθανότητας η οποία μας δίνει και την τελική χρονική εκτίμηση.

Στην παρούσα μελέτη, όπως φαίνεται και από τα 2 παραπάνω σχήματα (40,41) η αρχαιομαγνητική χρονολόγηση για τον Νεολιθικό οικισμό της Μαγούλας Ίμβρου Πηγάδι' υπολογίστηκε στο διάστημα 5688-5497π.Χ. (5592 ± 95) με την χρήση της πρώτης καμπύλης ή 5672-5591π.Χ. (5631 ± 40) με την χρήση της δεύτερης. Είναι

φανερό ότι και οι 2 εκτιμήσεις είναι πολύ κοντά και βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες ραδιοχρονολογήσεις (5870-5470 π.Χ.)

8. Συμπεράσματα

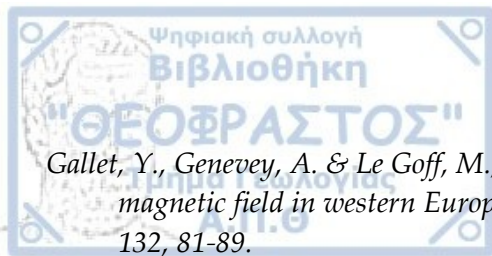
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε αρχαιομαγνητική μελέτη από τον Νεολιθικό οικισμό Μαγούλα 'Ιμβρου Πηγάδι'. Από τον χώρο συλλέχθηκαν δείγματα από καμένες δομές.

Έγινε η κατάλληλη προετοιμασία των δειγμάτων στο εργαστήριο (συμπαγοποίηση και σχηματισμό μικρών κυλινδρικών αρχαιομαγνητικών δειγμάτων) και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις για μία πλήρη αρχαιομαγνητική μελέτη (Θερμομαγνητικές καμπύλες, θερμική απομαγνήτιση). Από την ανάλυση των συνιστωσών της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου υπολογίσθηκε η μέση τιμή των μελετημένων δειγμάτων στην παρούσα μελέτη. Δυστυχώς ο μικρός αριθμός δειγμάτων οδήγησε σε μία μέση τιμή που παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα. Για τον λόγο αυτό, υπολογίσθηκε ένας νέος μέσος όρος λαμβάνοντας υπόψη και προηγούμενα διαθέσιμα δεδομένα από τον ίδιο αρχαιολογικό χώρο. Η νέα τιμή χρησιμοποιήθηκε για την αρχαιομαγνητική χρονολόγηση του οικισμού.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι πολύ σημαντικά γιατί συνεισφέρουν στον προσδιορισμό της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου κατά την Νεολιθική Περίοδο που είναι μία περίοδος με πολύ περιορισμένα δεδομένα. Η συνέχιση της μελέτης για τον προσδιορισμό και της αρχαιοέντασης θα οδηγήσει στον πλήρη καθορισμό και των τριών στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου και θα συμβάλει σημαντικά στην συμπλήρωση των καμπυλών αιώνιας μεταβολής για τον Ελληνικό χώρο.

Βιβλιογραφία

- Βάττη, Ε., 2019. «Αρχαιομαγνητική Μελέτη Κλίβανου Από Την Ιερισσό Χαλκιδικής». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωφυσικής.
- Βέλκος, Γ., 2014, «Μαγνητικός Χαρακτηρισμός Αρχαιομαγνητικών Δειγμάτων», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Εφαρμογών Φυσικής και Φυσικής Περιβάλλοντος.
- Κυπαρίσση- Αποστολικά, Ν., 2011. «Η «οφθαλμαπάτη» της στρωματογραφίας», Παραδείγματα από την Μαγούλα Ιμβρου Πηγάδι και το σπήλαιο Θεόπετρα. Περιοδικό: Ανάσκαμμα.
- Νικολαΐδης, Α. Γ., 2014. «Αρχαιομαγνητική Μελέτη από την Σωστική Αρχαιολογική Ανασκαφή της οδού Γιαννιτσών Θεσσαλονίκης». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ, Τομέας Γεωφυσικής.
- Παπαδόπουλος, Τ., 2008. «Εισαγωγή στη Γεωφυσική», Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογία και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας.
- Παπαζάχος, Β., Παπαζάχος, Κ., 2008. «Εισαγωγή στη Γεωφυσική». Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 7, 359-429.
- Τζανής, Α., 2021. «Στοιχεία Γενικής Και Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Γεωμαγνητισμός Και Γεωηλεκτρισμός». Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής- Γεωθερμίας.
- Batt, C.M., 1997. «The British archaeomagnetic calibration curve: an objective treatment». *Archaeological Science, University of Bradford, UK*, 39, 159-168
- Butler, F.R., 1992. «Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes». Blackwell Scientific Publications, Boston ©1992.
- Carrancho et al., 2013. «First directional European palaeosecular variation curve for the Neolithic based on archaeomagnetic data». *Earth and Planetary Science Letters*, 380, 124-137.
- 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.
- Dunlop, D.J., and O. Özdemir, 1997. «Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers». In *Cambridge Studies in Magnetism*, Vol. 3, edited by D. Edwards. Cambridge: Cambridge University Press.



Gallet, Y., Genevey, A. & Le Goff, M., 2002. «Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artifacts». *Phys. Earth Planet. Inter.*, 132, 81-89.

Gómez-Paccard M., and Javier Panón-Carrasco F., 2018. «Archaeomagnetism». *The Encyclopedia of Archaeological Sciences* (2018): 1-5

Kovacheva, M., Jordanova, N. and Karloukovski, V., 1998. «Geomagnetic field variations as determined from Bulgarian archaeomagnetic data. Part II. The last 8000 years». *Survey in Geophysics*, 19(5), 431-460.

Lengyel S. N., 2017. «Archaeomagnetic Dating». *Encyclopedia of Geoarchaeology*, edited by Allan S. Gilbert. *Encyclopedia of Earth Science Series*, Springer Netherlands, 2017.

Lengyel, S. N., 2010. «The pre-AD 585 extension of the U.S. Southwest archaeomagnetic reference curve». *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3081–3090.

Marton, P., 2003. «Recent achievements in archaeomagnetism in Hungary». *Geophys Journal International*, 153, 675-690.

Mitchell, A.C., 1932. «Chapters in the history of terrestrial magnetism». Chapter 1, *Terr. Mag.*, 37, 105-146.

Néel, L., 1955. «Some theoretical aspects of rock-magnetism». *Advances in Physics* 4: 191-243.

Noël, M & Batt, C.M., 1990. «A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating». *Geophys Journal International*, 102, 753-756.

Pavón-Carrasco, F.J., J. Rodríguez-González, M.L. Osete and J.M. Torta. 2011. «A Matlab tool for archaeomagnetic dating». *Journal of Archaeological Science*, 38 (2), 408 – 419.

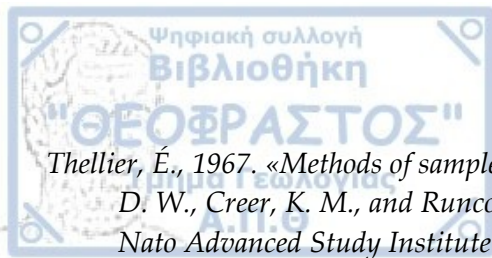
Schnepp, E. & Lanos, Ph., 2005. «Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years». *Geophys Journal International*, 163, 479-490.

Sternberg, R.S. 1997. «Archaeomagnetic Dating». *Chronometric Dating in Archaeology*, edited by R.E. Taylor and M.J. Springer, Boston, MA, 1997. 323-356.

Tema E., Hedley, I. and Lanos, Ph., 2006. «Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve». *Geophys Journal International*, 167, 1160-1171.

Tema, E., Kondopoulou, D., 2012. «Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data». *Geophys Journal International*, 186, 603–614.

Thellier, E., 1938. «Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications geophysiques». *Annales de l'Institut de Physique du Globe*, 16, 157-302.



Thellier, É., 1967. «Methods of sample collection and orientation for archaeomagnetism». In Collinson, D. W., Creer, K. M., and Runcorn, S. K. (eds.), *Methods in Paleomagnetism: Proceedings of the Nato Advanced Study Institute on Palaeomagnetic Methods, held in the University of Newcastle upon Tyne, April 1–10, 1964*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. *Developments in Solid Earth Geophysics* 3, pp. 16–20.

Zananiri, I., Batt, C. M., Lanos, P., Tarling, D. H., and Linford, P., 2007. «Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 160(2), 97–107.

Διαδικτυακές πηγές:

Γεωφυσικές Διασκοπήσεις, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών,
<https://ims.forth.gr/el/page/view?id=50>

Τάσος Οικονόμου, Άρθρο, «Η αντιστροφή των μαγνητικών πόλων της Γης πριν 42.000 χρόνια πιθανώς να προκάλεσε την εξαφάνιση των Νεάντερταλ»: <https://www.ertnews.gr/frontpage/i-antistrofi-ton-magnitikon-polon-tis-gis-prin-42-000-chronia-pithanos-na-prokalese-tin-exafanisi-ton-neantertal/>

College of Science and Engineering Institute for Rock Magnetism; 6. Types of Remanence:

<https://cse.umn.edu/irm/6-types-remanence>

William Gilbert, 1599. «De Magnete». <https://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/gilbert/docs/DeMag.pdf>

Google Images: <https://www.google.gr/imghp?hl=el&ogbl>

Laboratory Instruments for Measurements of Magnetic Properties for Rocks:
<https://www.agico.com/text/products/jr6/jr6.php>

ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/natural-remanent-magnetization>

University of Bradford: What does archaeomagnetism date?:
<https://www.bradford.ac.uk/archaeomagnetism/archaeomagnetic-dating/what-does-it-date/>

[Archaeomagnetic Dating - Archaeomagnetism - University of Bradford](#)



Wikipedia:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%99%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%83%CF%8C%CF%82>

https://el.wikipedia.org/wiki/Μαγνητική_επαγωγή

https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρικό_πεδίο

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

<http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/geomagnetismos.pdf>

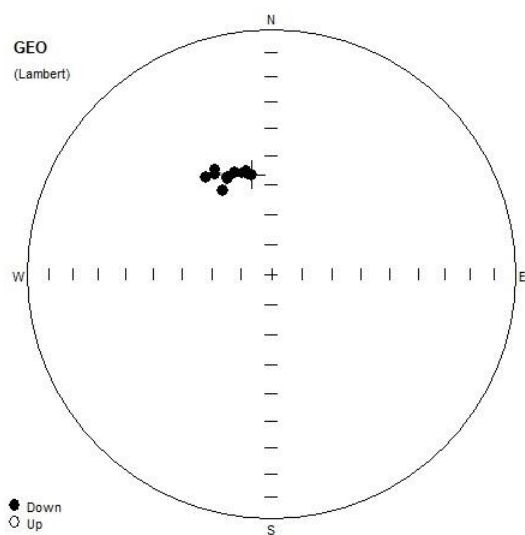
https://wikipedia.net/el/History_of_geomagnetism

https://wikipedia.net/el/History_of_geomagnetism

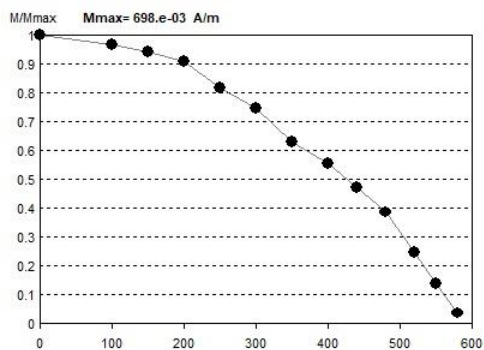
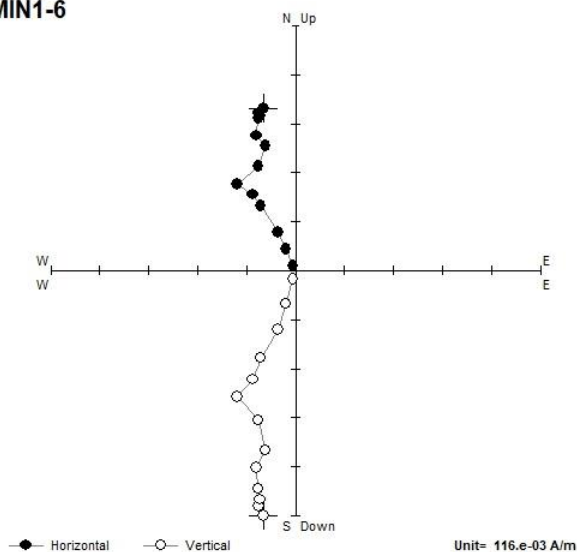
https://en.wikipedia.org/wiki/De_Magnete

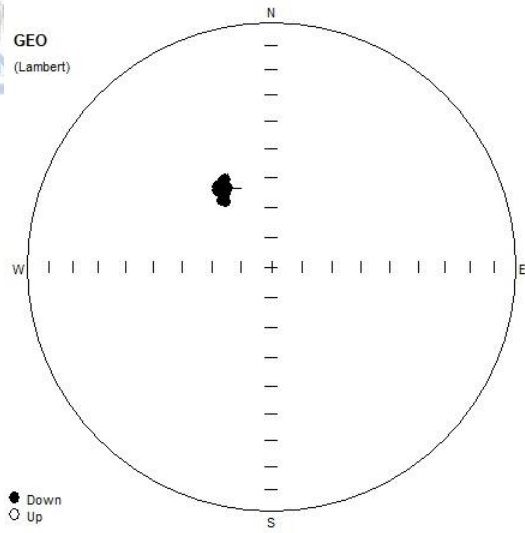
Παράρτημα

Συγκεντρωτικά οι αναλύσεις των δειγμάτων MIN1-6, MIN2-1, MIN2-3, MIN4-5, MIN4-5, MIN5-3, MIN6-9, MIN7-1 και MIN7-2 αντίστοιχα στο λογισμικό Remasoft30.

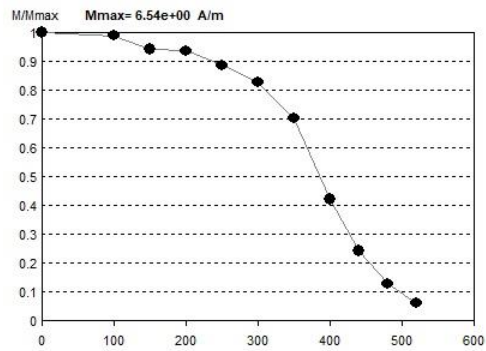
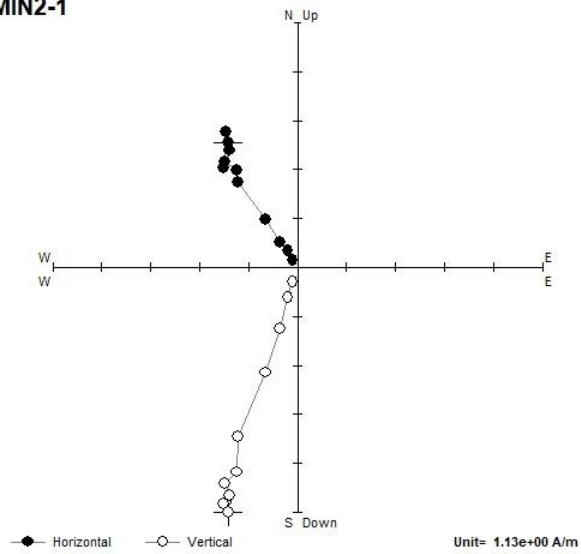


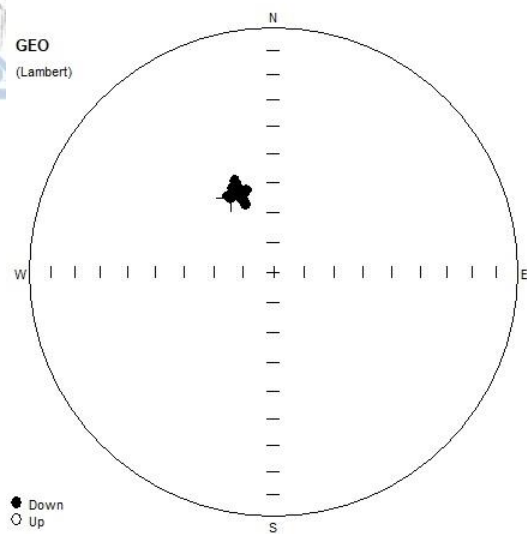
MIN1-6



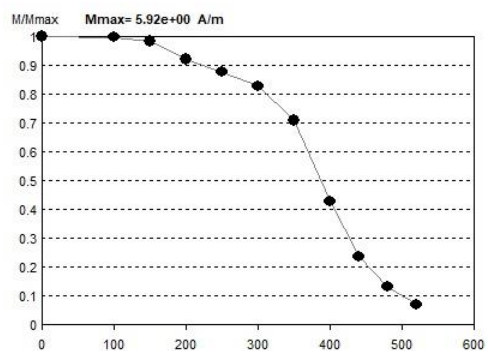
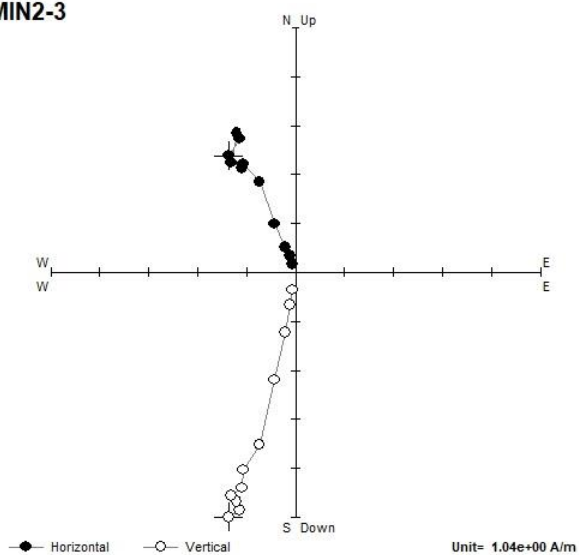


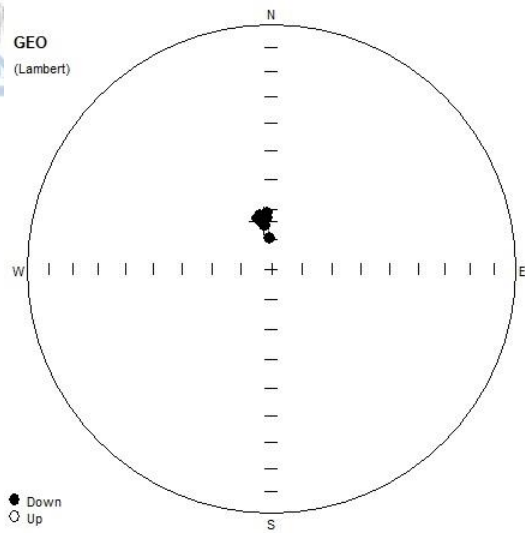
MIN2-1



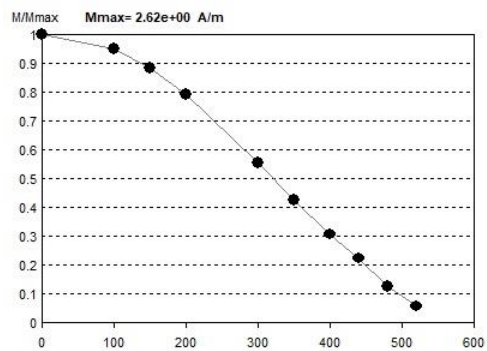
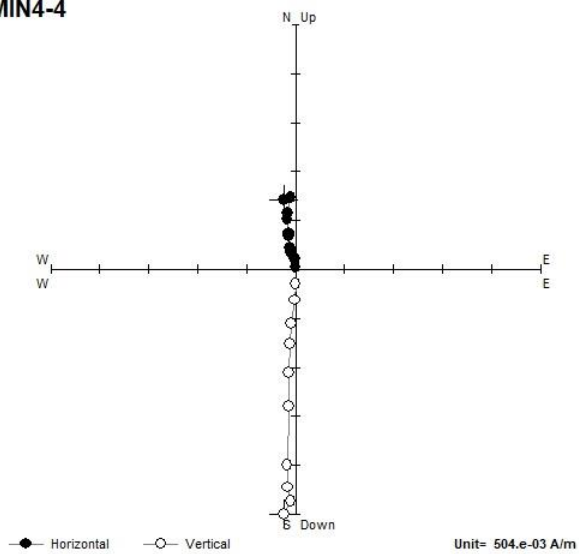


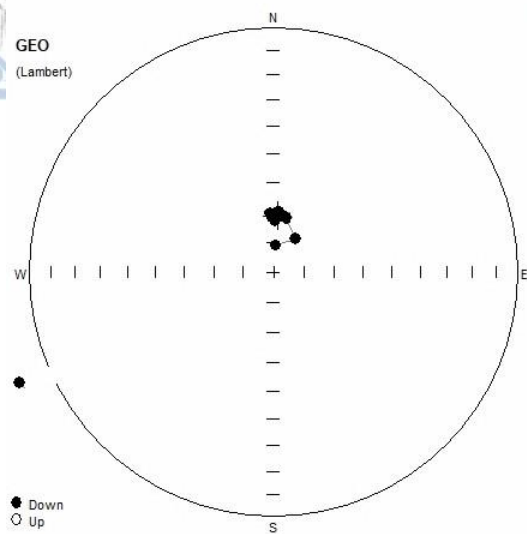
MIN2-3



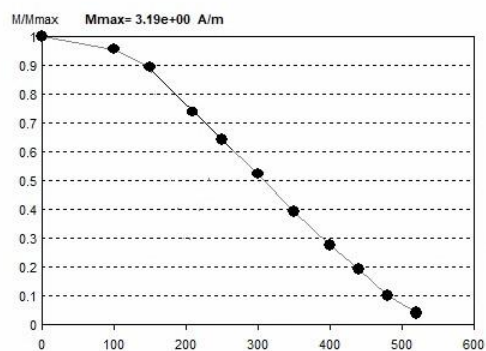
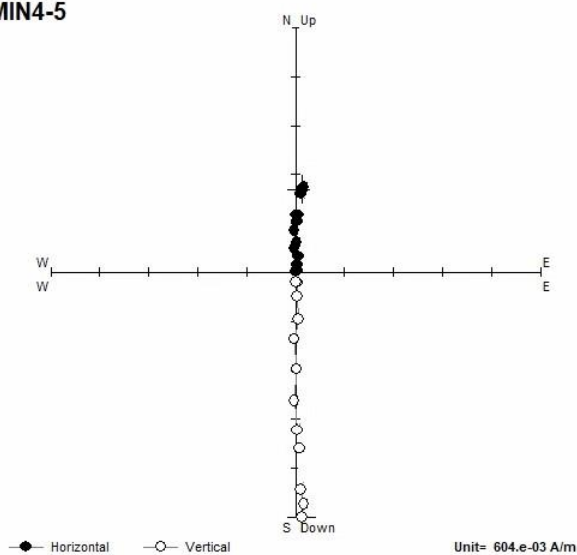


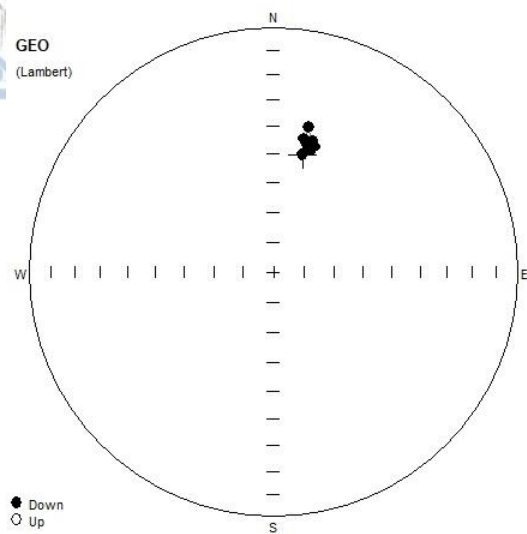
MIN4-4



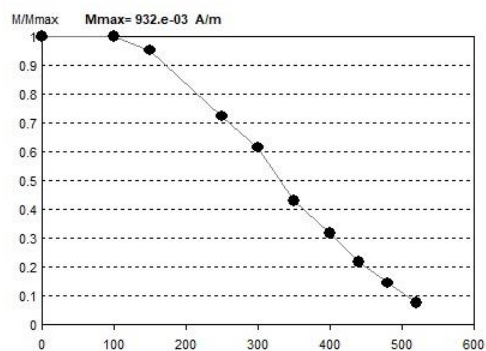
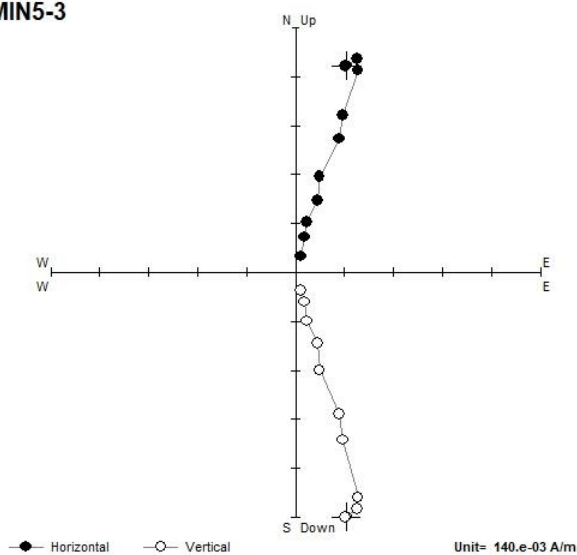


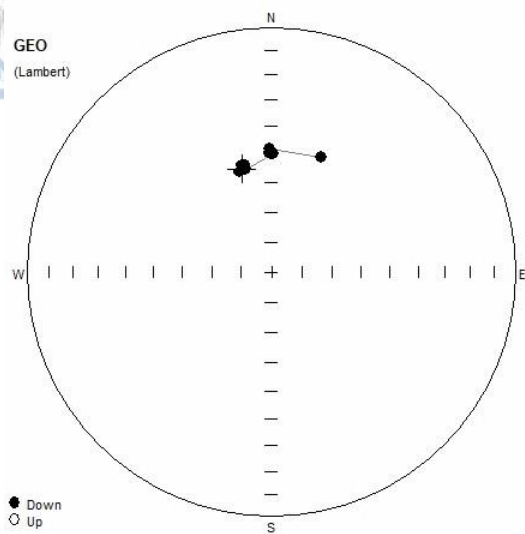
MIN4-5



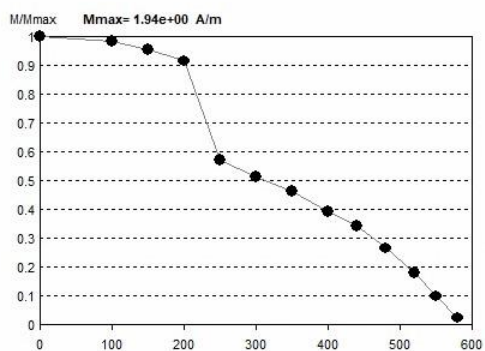
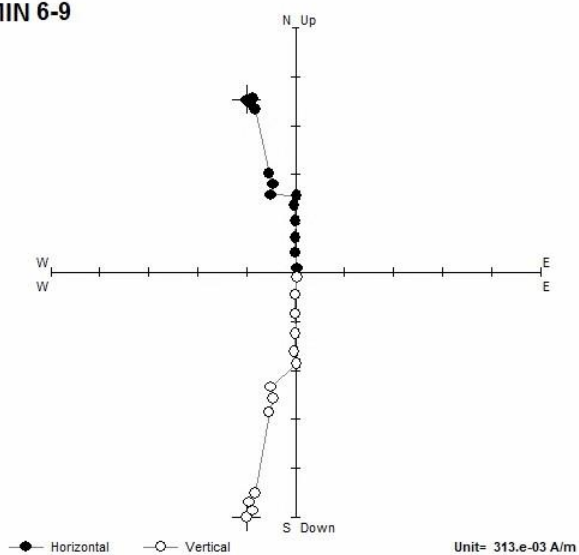


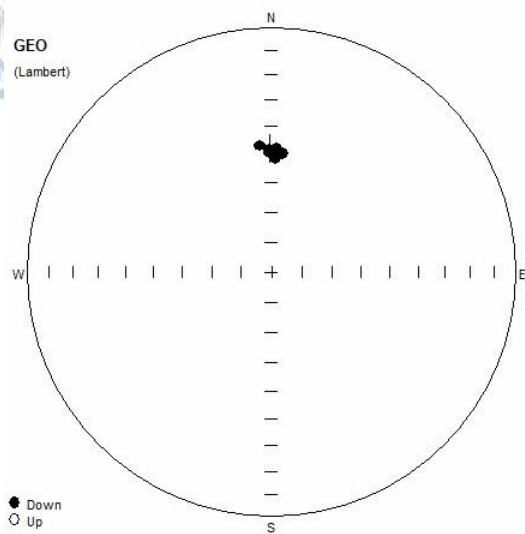
MIN5-3



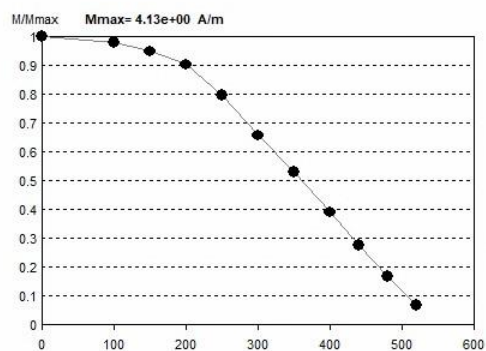
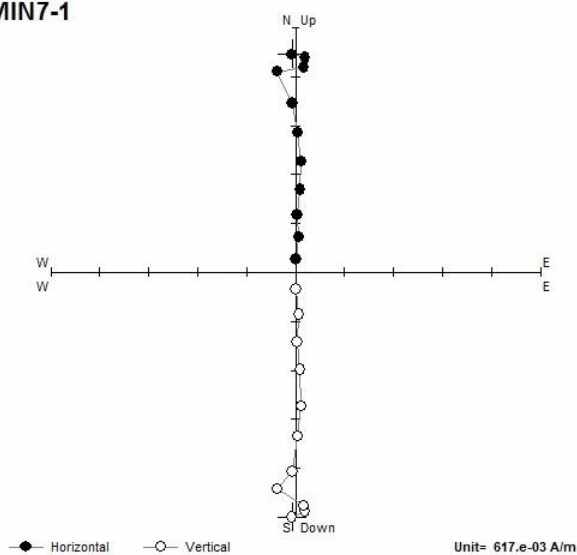


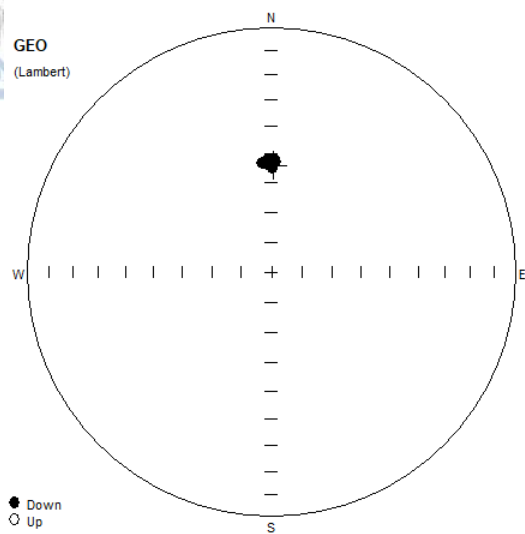
MIN 6-9





MIN7-1





MIN7-2

