



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦ. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΓΑΒΡΙΕΛΛΑ Α. ΜΙΧΑΗΛ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΕ ΝΕΟΛΙΘΙΚΗ
ΜΑΓΟΥΛΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2017



ΓΑΒΡΙΕΛΛΑ Α. ΜΙΧΑΗΛ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΕ ΝΕΟΛΙΘΙΚΗ ΜΑΓΟΥΛΑ
ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Εργαστήριο Εφ. Γεωφυσικής



© Γαβριέλλα Α. Μιχαήλ, Εργ. Γεωφυσικής, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΕ ΝΕΟΛΙΘΙΚΗ ΜΑΓΟΥΛΑ
ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



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.



Πρόλογος

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση του παλαιομαγνητισμού βοήθησε πολύ την αρχαιολογία σαν μέθοδος χρονολόγησης. Στην παρούσα εργασία, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου μας βοηθάει να σχηματίσουμε καλύτερη εικόνα για τα χαρακτηριστικά της Αλμυριώτικης μαγούλας στη Θεσσαλία μέσα από τη μελέτη των ιδιοτήτων των μαγνητικών ορυκτών.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην τοποθεσία της μαγούλας και στα ιστορικά στοιχεία της περιοχής.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αφορά τα μαγνητικά μεγέθη, τα μαγνητικά ορυκτά και τις γενικές ιδιότητές τους.

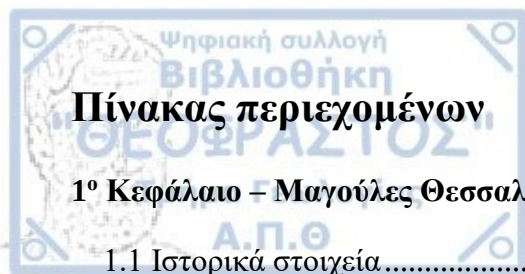
Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναλύεται η μεθοδολογία της έρευνας όπου περιλαμβάνεται η δειγματοληψία, η προετοιμασία των δειγμάτων και τα όργανα μέτρησης.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα αποτελέσματα και τα σχεδιαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναπτύσσονται τα συμπεράσματα από την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η διπλωματική αυτή δεν θα μπορούσε να είχε γίνει χωρίς την βοήθεια, την στήριξη και τις συνεχείς συμβουλές της κυρίας επιβλέπουσας Ε. Αηδονά, Λέκτορα του Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Την ευχαριστώ θερμά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, που με εμπιστεύτηκε και με καθοδήγησε καθ' όλη την πορεία της εργασίας και για την υπομονή της.

Επίσης, ευχαριστώ τον Dr. Α. Σαρρή, Ερευνητή του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών και την Dr. C. Cuenca Garcia που μου παραχώρησαν μέρος των δειγμάτων τους για την εκπόνηση της εργασίας και για τη μέτρηση μαγνητικής επιδεκτικότητας που έκαναν για λογαριασμό μου.



Πίνακας περιεχομένων

1^ο Κεφάλαιο – Μαγούλες Θεσσαλίας	- 7 -
1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	- 7 -
2^ο Κεφάλαιο – Μαγνητικό πεδίο της Γης.....	- 9 -
2.1 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη.....	- 9 -
2.2 Βασικές μαγνητικές ιδιότητες.....	- 12 -
2.2.1 Διαμαγνητισμός	- 12 -
2.2.2 Παραμαγνητισμός	- 12 -
2.2.3 Σιδηρομαγνητισμός.....	- 13 -
2.3 Η παραμένουσα μαγνήτιση.....	- 15 -
2.3.1 Φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (NRM – Natural Remanent Magnetism)	- 15 -
2.3.2 Θερμομαγνητικές καμπύλες (Thermomagnetic Curves)	- 15 -
2.3.3 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM – Isothermal Remanent Magnetism).....	- 15 -
3^ο Κεφάλαιο – Μεθοδολογία αρχαιομαγνητικής έρευνας.....	- 16 -
3.1 Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων	- 16 -
3.1.1 Δειγματοληψία δειγμάτων	- 16 -
3.1.2 Προετοιμασία δειγμάτων στο εργαστήριο	- 16 -
3.1.3 Όργανα μετρήσεων	- 17 -
4^ο Κεφάλαιο – Παλαιομαγνητικές μετρήσεις	- 18 -
4.1 Μετρήσεις και σχεδιαγράμματα	- 18 -
4.1.1. Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM – Isothermal Remanent Magnetism).....	- 18 -
4.1.2. Θερμομαγνητικές καμπύλες.....	- 27 -
5^ο Κεφάλαιο – Συζήτηση-Συμπεράσματα.....	- 31 -
5.1 IRM	- 31 -
5.2 Μεταβολή μαγνητικής επιδεκτικότητας με τη θερμοκρασία.....	- 34 -
Βιβλιογραφία	- 35 -

1^ο Κεφάλαιο – Μαγούλες Θεσσαλίας

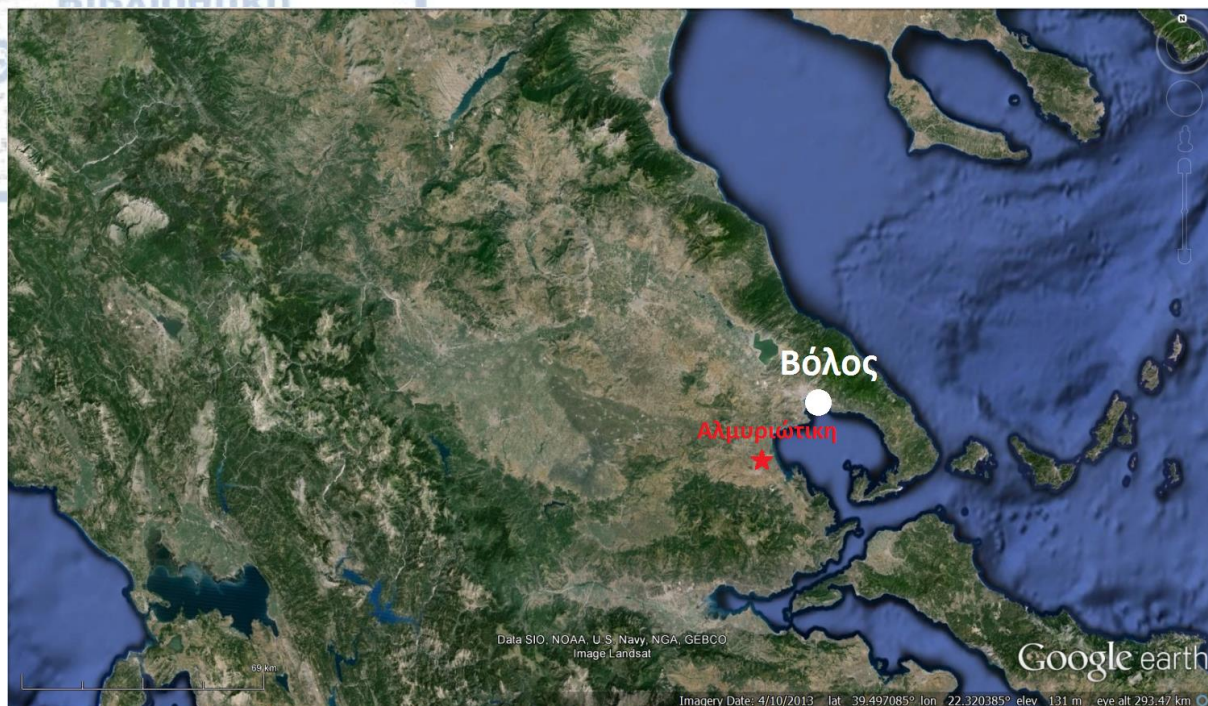
1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η εποχή στην οποία τοποθετείται η δημιουργία και κατοίκηση του οικισμού της Αλμυριώτικης μαγούλας είναι η Νεολιθική εποχή. Η Νεολιθική εποχή ξεκινά περίπου το 6.500 π.Χ. στην Ελλάδα και τελειώνει λίγο μετά το 3.000 π.Χ. Κατά την 7η χιλιετία π.Χ. εμφανίζεται στην Ελλάδα, και ειδικά στη Θεσσαλία, το νεολιθικό στάδιο με τη λεγόμενη «Προκεραμική Νεολιθική» σε οικισμούς. Χαρακτηρίζεται από σταθεροποίηση των κλιματολογικών συνθηκών, από την οργάνωση οικισμών μόνιμου χαρακτήρα, την οικονομία βασισμένη στη συστηματική άσκηση γεωργίας, στην κτηνοτροφία, στην ανταλλαγή πρώτων υλών και προϊόντων, στην παραγωγή κεραμικής, και από την πολυμορφία στην τέχνη (Θεοχάρης 1973).

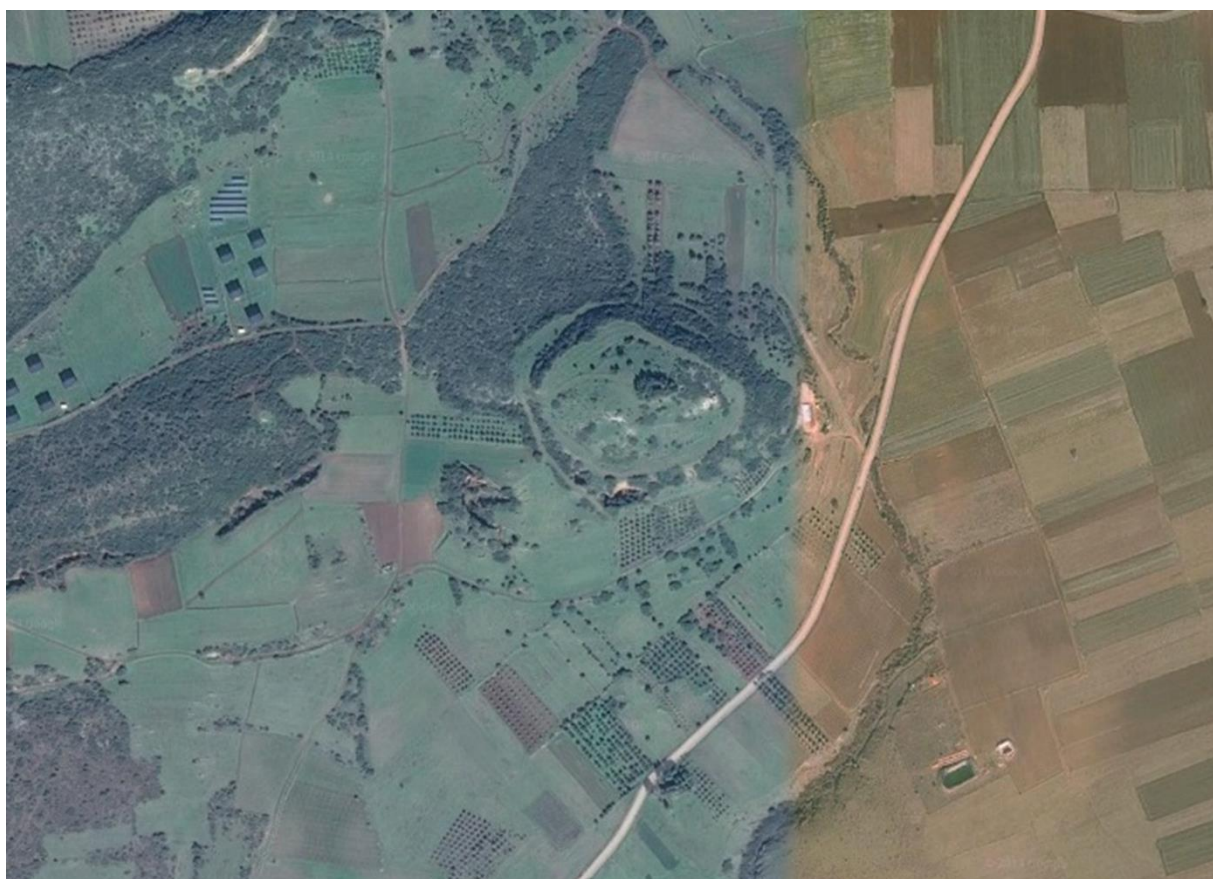
Για πρακτικούς λόγους, η εποχή αυτή έχει χωριστεί σε τέσσερις περιόδους με βάση τα αρχαιολογικά ευρήματα της κάθε μίας:

- Αρχαιότερη νεολιθική: Από περίπου το 6500 π.Χ. και μέχρι περίπου το 5600 π.Χ.
- Μέση νεολιθική: Από περίπου το 5600 π.Χ. και μέχρι περίπου το 5300 π.Χ.
- Νεότερη νεολιθική: Από περίπου το 5300 π.Χ. και μέχρι περίπου το 4500 π.Χ.
- Τελική νεολιθική: Από περίπου το 4500 π.Χ. μέχρι περίπου το 3000 π.Χ.

Το έδαφος της Θεσσαλίας, ως προς τη διαμόρφωσή του, είναι 50% ορεινό-ημιορεινό και 50% πεδινό και στα όριά του περιλαμβάνεται η πεδιάδα της Θεσσαλίας. Η πεδιάδα αυτή είναι εύφορη και έχει πλούσιο, κατά τη νεολιθική εποχή, υδρολογικό δίκτυο με βασικούς ποταμούς και ρέματα, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί καθ' όλη τη διάρκεια της Νεολιθικής Εποχής, αλλά και μετέπειτα στην εποχή του Χαλκού, ένα σημαντικό «δίκτυο» μόνιμων εγκαταστάσεων καταλαμβάνοντας όλη την έκταση της Θεσσαλίας. Οι προϊστορικοί αυτοί οικισμοί είναι γνωστοί με το όνομα «Μαγούλες». Πρόκειται δηλαδή για τεχνητά εξάρματα, γηλόφους οι οποίοι δημιουργήθηκαν σταδιακά από τη συνεχή και διαδοχική κατοίκηση.



Σχήμα 1: Χάρτης Θεσσαλίας



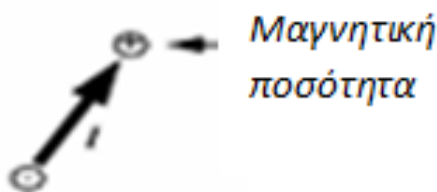
Σχήμα 2: Αλμυριώτικη μαγούλα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες εδαφών από τον αρχαιολογικό χώρο της Αλμυριώτικης μαγούλας της Θεσσαλίας (Σχήμα 1). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο λοφώδες ανάγλυφο (Σχήμα 2).

2^ο Κεφάλαιο – Μαγνητικό πεδίο της Γης

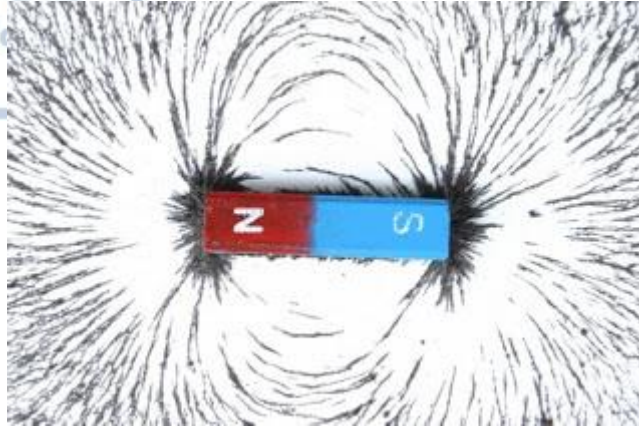
2.1 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη

Μαγνητικές δυνάμεις ασκούνται 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 (Σχήμα 3). Η ποσότητα αυτή, για λόγους συμβατικών, είναι είτε θετική (βόρεια) είτε αρνητική (νότια) και περιγράφεται ως η δύναμη που ασκείται από ένα μαγνητικό πόλο σε μια ορισμένη απόσταση.



Σχήμα 3: Σχήμα Μαγνητικό δίπολο κατασκευασμένο από ζεύγος μαγνητικών ποσοτήτων, αντίθετα μαγνητισμένων με απόσταση l μεταξύ τους, με μαγνητική ροπή $M=ml$ (Butler, 1992, electronic edition, 2004).

Όπως σε όλα τα δυναμικά πεδία (Σχήμα 4), 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, το οποίο ειδικά στον ηλεκτρομαγνητισμό, αναφέρεται και ως cgs-emu ή απλώς emu (electromagnetic unit – ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων), η μονάδα μέτρησης της έντασης H είναι το 1oesterd ($1Oe=103/4\pi Am^{-1}$), το οποίο ισούται και με 1mT (10^{-3} Tesla) (Παπαζάχος & Παπαζάχος, 2008).



Σχήμα 4: Μαγνητικό πεδίο και οι δυναμικές γραμμές του

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H αποτελεί το πιο συνηθισμένο μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κενό. Όταν όμως 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:

$$B = \mu \mu_0 H$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ίση με $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, H η μονάδα μέτρησης του συντελεστή αυτεπαγωγής στο SI ($1 \text{ Henry} = \text{m}^2 \text{ kg/sec}^2 \text{ Am}^2$), 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, που 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 1 Tesla (στο cgs είναι το 1 Gauss = 10^{-4} Tesla).

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:

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

όπου V ο όγκος του σώματος. Η μαγνήτιση μετρείται 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:

$$J = \kappa H$$

όπου κ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα, η οποία εξαρτάται από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Επειδή η μαγνητική επιδεκτικότητα προκύπτει από τη μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου (μαγνήτιση), ορισμένες φορές αναφέρεται και ως μαγνητική επιδεκτικότητα όγκου, ώστε να διακριθεί από τη μαγνητική επιδεκτικότητα ανά μονάδα μάζας χ , η οποία είναι ίση με $\chi = \kappa/\rho$, όπου ρ η πυκνότητα του σώματος. Είναι ένα μέτρο της ευκολίας, με την οποία ένα δεδομένο υλικό μαγνητίζεται.

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 τον Curie (Butler, 1991).

2.2 Βασικές μαγνητικές ιδιότητες

Τα μαγνητικά ορυκτά του φλοιού της Γης προέρχονται από πυριγενή πετρώματα που σχηματίζονται στις μεσοωκεάνιες ράχες. Τα ορυκτά αυτά αποτελούνται κυρίως από σίδηρο, ο οποίος κατανέμεται σε μαγνητικές και μη μαγνητικές φάσεις.

Τα μαγνητικά ορυκτά τα οποία απομακρύνονται από μαγνητικό πεδίο και διατηρούν την μαγνήτισή τους κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ονομάζονται **σιδηρομαγνητικά** ή **σιδηριμαγνητικά**, ενώ τα ορυκτά που δεν μπορούν να την διατηρήσουν ονομάζονται **παραμαγνητικά** ή **διαμαγνητικά** ανάλογα με το αν έλκονται ή απωθούνται αντίστοιχα από περιοχές ισχυρού μαγνητικού πεδίου.

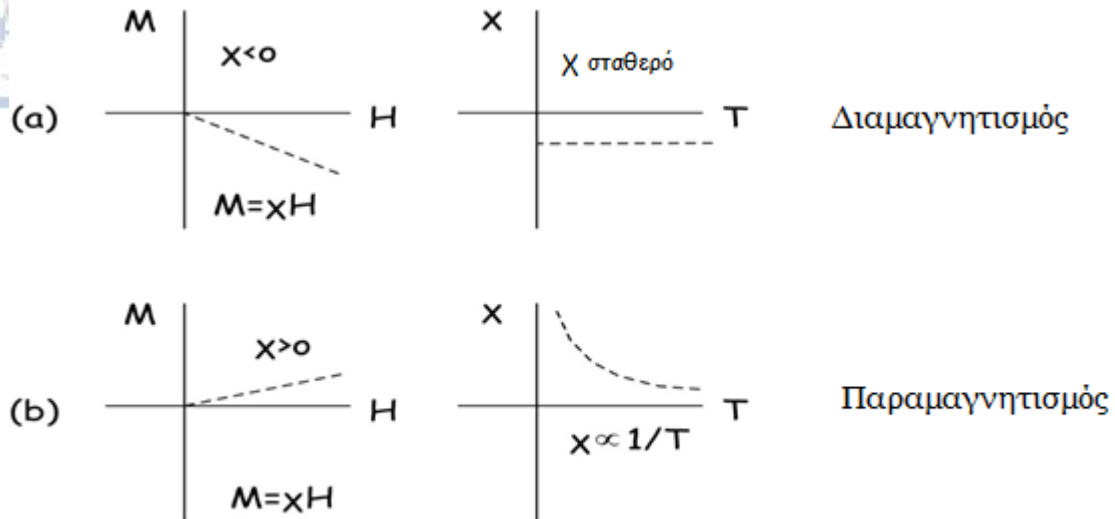
Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από δύο διαφορετικού τύπου κίνησης των ηλεκτρονίων: από τροχιακή περιστροφή του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και από την περιστροφική κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον εαυτό του (spin).

2.2.1 Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός είναι μια ιδιότητα κατά την οποία το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων προκαλεί ασθενή αρνητική μαγνήτιση μόλις απομακρυνθεί από αυτό (Σχήμα 5a). Τα ισχυρά μαγνητικά πεδία απωθούν τα διαμαγνητικά υλικά. Η ιδιότητα αυτή είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Μερικά από τα υλικά που δείχνουν αυτή την ιδιότητα είναι ο χαλαζίας, οι άστριοι, ο ασβεστίτης και το νερό.

2.2.2 Παραμαγνητισμός

Κατά την ιδιότητα του παραμαγνητισμού οι μαγνητικές ροπές των spin των υλικών προσανατολίζονται παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο και προκαλούν μία ασθενή θετική μαγνήτιση (Σχήμα 5b). Τα ισχυρά μαγνητικά πεδία έλκουν τα παραμαγνητικά υλικά. Η θερμότητα είναι αιτία να χαθεί η μαγνήτιση. Παραμαγνητικά υλικά είναι ο ολιβίνης, ο πυρόξενος, ο γρανάτης, ο βιοτίτης και ανθρακικά άλατα του σιδήρου και του μαγγανίου. Η μαγνήτιση των παραμαγνητικών είναι πιο ισχυρή από αυτή των διαμαγνητικών αλλά πιο ασθενής των σιδηρομαγνητών.



Σχήμα 5: (α) Διαμαγνητισμός, (β) Παραμαγνητισμός

2.2.3 Σιδηρομαγνητισμός

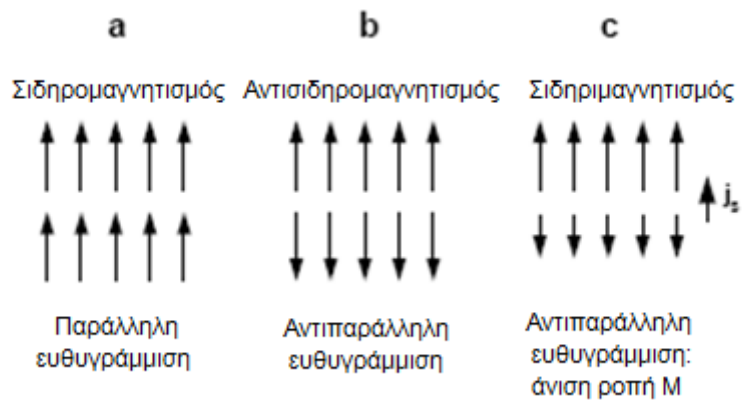
Η αλλαγή των μαγνητικών ιδιοτήτων σιδηρομαγνητικών υλικών είναι πολύ έντονη όταν φτάσουν σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (Σχήμα 7). Κάτω από αυτή την θερμοκρασία, ένα υλικό έχει ισχυρή παραμένουσα μαγνήτιση, αλλά όταν υπερβεί την θερμοκρασία Curie συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό (Σχήμα 6α). Επίσης, η μαγνητική ροπή αυτών των υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη από των παραμαγνητικών και διαμαγνητικών υλικών.

I. Σιδηρομαγνητισμός

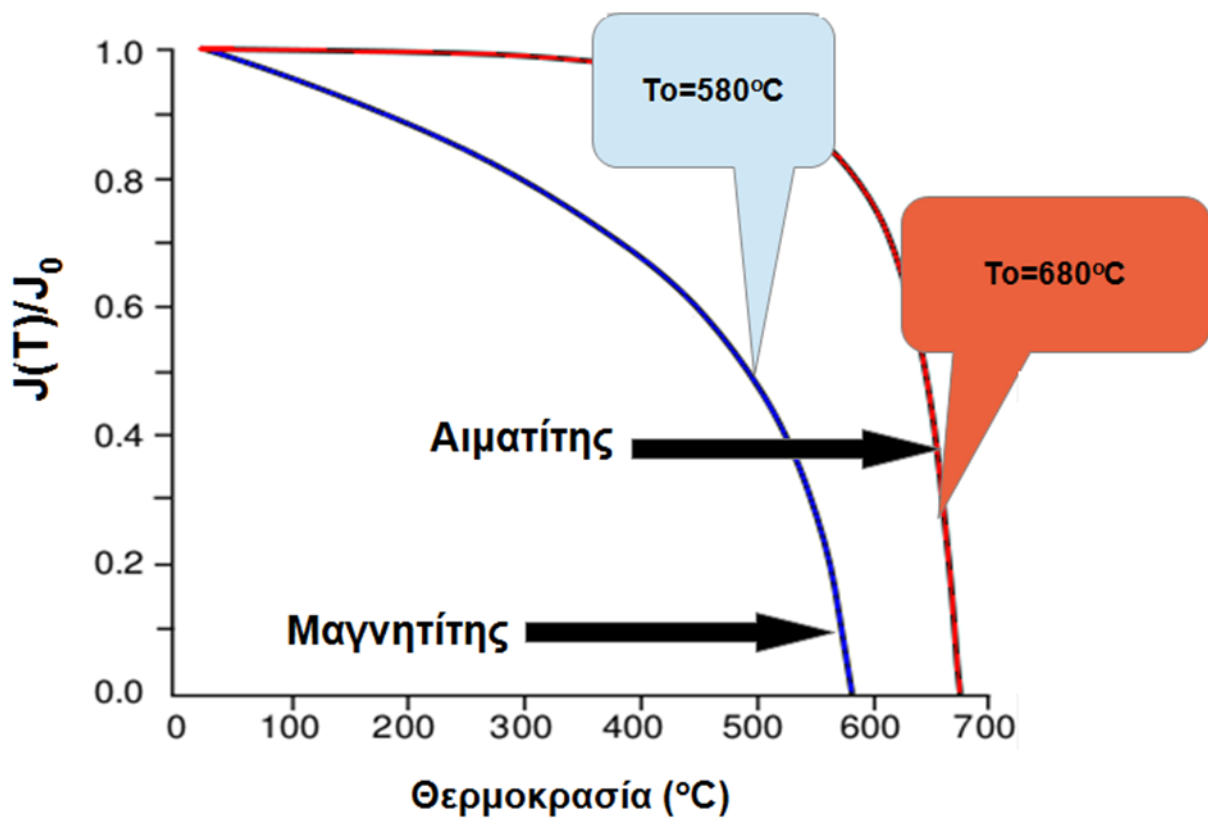
Οι κύριες μαγνητικές ροπές των φερριτών (οξειδία του σιδήρου με δομή σπινελίου) ευθυγραμμίζονται σε αντιπαράλληλη διεύθυνση και μαγνητίζονται προς τη διεύθυνση που το σύνολο των ροπών είναι μεγαλύτερο (Σχήμα 6b).

II. Αντισιδηρομαγνητισμός

Οι κύριες μαγνητικές ροπές είναι ίσες και αντίθετες, με αποτέλεσμα η τελική μαγνήτιση να είναι μηδέν (Σχήμα 6c). Ορυκτά με αυτή την ιδιότητα είναι ο Αιματίτης και ο Πυρροτίτης (Butler, 1991).



Σχήμα 6: (a) Σιδηρομαγνητισμός, (b) Αντισιδηρομαγνητισμός, (c) Σιδηριμαγνητισμός



Σχήμα 7: Κανονικοποιημένη μαγνήτιση κορεσμού με τη θερμοκρασία για το μαγνητίτη και τον αιματίτη, όπου J_0 η μαγνήτιση κορεσμού σε θερμοκρασία δωματίου (2 Gauss για τον αιματίτη και 480 Gauss για το μαγνητίτη) (Butler, 1992).

2.3 Η παραμένουσα μαγνήτιση

2.3.1 Φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (NRM – Natural Remanent Magnetism)

Η φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (NRM) είναι η παραμένουσα μαγνήτιση που έχει ένα πέτρωμα πριν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία στο εργαστήριο. Η NRM εξαρτάται από το γήινο μαγνητικό πεδίο και τις γεωλογικές διεργασίες που υπάρχουν κατά τη διάρκεια δημιουργίας των πετρωμάτων και κατά τη διάρκεια της ιστορίας του πετρώματος. Η μαγνήτιση αυτή δεν είναι τόσο ισχυρή αλλά είναι σταθερή και δημιουργείται και σε ασθενή μαγνητικά πεδία. Ένα από αυτά είναι το μαγνητικό πεδίο της Γης.

2.3.2 Θερμομαγνητικές καμπύλες (Thermomagnetic Curves)

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ενός υλικού εξαρτάται από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού αλλά και από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Έτσι, αν τοποθετήσουμε δείγμα σε φούρνο και μετρήσουμε την μαγνητική επιδεκτικότητα όσο αυξάνουμε την θερμοκρασία θα προκύψει καμπύλη που θα απεικονίζει την μεταβολή των δύο παραμέτρων. Το ίδιο θα συμβεί και στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία μειώνεται. Επίσης, στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι καμπύλες για τον μαγνητίτη και τον αιματίτη. Τα δύο αυτά ορυκτά διαφέρουν στην θερμοκρασία που χρειάζεται να φτάσουν για να απομαγνητιστούν. Οι καμπύλες που θα προκύψουν από τις παραπάνω μετρήσεις σε συνδυασμό με το Σχήμα 7 είναι αρκετά για να καταλάβουμε αν το δείγμα περιέχει μαγνητίτη ή αιματίτη. Άλλες παρατηρήσεις, όπως η κλίση της καμπύλης, μας δίνουν ακόμα περισσότερες πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού του δείγματος.

2.3.3 Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM – Isothermal Remanent Magnetism)

Η παραμένουσα μαγνήτιση που προκύπτει από μικρής διάρκειας έκθεση του δείγματος του πετρώματος σε ισχυρά μαγνητικά πεδία σε σταθερή θερμοκρασία αναφέρεται ως ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM). Στο εργαστήριο, η IRM εφαρμόζεται με την έκθεση του δείγματος (συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου) σε ένα μαγνητικό πεδίο που παράγεται από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Η τιμή της εξαρτάται από την ισχύ του πεδίου που του εφαρμόζεται. Όταν αυτή είναι μέγιστη ονομάζεται ισόθερμη κορεσμού (SIRM) και είναι απαραίτητο εργαλείο εύρεσης του κύριου μαγνητικού συστατικού (μαγνητίτης, αιματίτης, κ.α.) του δείγματος. Η SIRM προκαλείται και με φυσικό τρόπο π.χ. από κεραυνούς (Butler, 1991). Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η πλήρης περιγραφή της εφαρμογής αυτής.

3^ο Κεφάλαιο – Μεθοδολογία αρχαιομαγνητικής έρευνας

3.1 Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων

3.1.1 Δειγματοληψία δειγμάτων

Η δειγματοληψία πραγματοποιείται έπειτα από συνεννόηση του ερευνητή με τον υπεύθυνο αρχαιολόγο της περιοχής που μελετάται. Το σχέδιο των δομών και οι γεωγραφικές συντεταγμένες τους (μετρημένες με GPS για όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια) είναι οι πρώτες βασικές πληροφορίες τις οποίες πρέπει να συλλέξει ο κάθε ερευνητής. Έπειτα, λαμβάνονται φωτογραφίες της περιοχής και των σημείων δειγματοληψίας.

Τα σημεία δειγματοληψίας επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε την καλύτερη εικόνα της περιοχής για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δειγματοληψία έγινε κατά μήκος ευθείας που ξεκινούσε από το κέντρο της μαγούλας και του αρχαίου οικισμού και τελείωνε κοντά στη βάση της. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά αυτόν τον τρόπο γιατί σκοπός της εργασίας ήταν να μελετήσουμε τις διαφοροποιήσεις των μαγνητικών ιδιοτήτων και την πιθανή εύρεση των ορίων του νεολιθικού οικισμού.

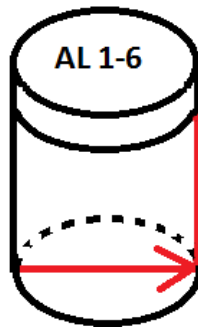
Η προσεκτική και ακριβής δειγματοληψία και η αντιπροσωπευτική αποτύπωση της περιοχής μελέτης ελαχιστοποιεί τα σφάλματα και βοηθάει στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ενώ η ακρίβεια μεγαλώνει ανάλογα με τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται.

Στην παρούσα μελέτη τα εδαφικά δείγματα λήφθηκαν με τρυπάνι χειρός από τα πρώτα 10cm της επιφάνειας του εδάφους. Αφού συλλέξουμε τα δείγματα από την ύπαιθρο μπαίνουν σε ξεχωριστά νάιλον σακουλάκια ανάλογα με το σημείο λήψης και καταγράφουμε πάνω τους μια ονομασία ανάλογα, συνήθως, με την τοποθεσία της έρευνας, την τομή που βρίσκονται και τον αριθμό τους στη σειρά που έχουν ληφθεί. Για παράδειγμα, αν έχω το 6^ο δείγμα στη σειρά της 1ης τομής από το κέντρο τις μαγούλας προς τα κάτω θα ονομαστεί ως AL1-6.

3.1.2 Προετοιμασία δειγμάτων στο εργαστήριο

Μετά τη συλλογή τους ξεκινάει η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων για τις μετρήσεις στο εργαστήριο. Παίρνουμε υλικό από κάθε δείγμα τόσο ώστε στο τέλος να γεμίσει 10 cc χωρητικότητας κυλινδρικό πλαστικό κουτάκι, ένα για κάθε δείγμα. Για να φτάσουμε σε αυτό το στάδιο, κονιορτοποιούμε το δείγμα σε γουδί αφαιρώντας οργανικά και χαλαζιακά υλικά με το χέρι. Αμέσως μετά περνάμε το κονιορτοποιημένο δείγμα από κόσκινο 2mm διαμέτρου και τέλος γεμίζουμε ένα κουτάκι μέχρι πάνω πιέζοντας με τον αντίχειρα ώστε να μην υπάρχει αέρας μεταξύ των κόκκων

και προσθέτουμε λίγο βαμβάκι ώστε να συμπιεστεί τελείως μετά το κλείσιμο. Κατευθείαν γράφουμε στο καπάκι το ίδιο όνομα με αυτό στο σακουλάκι που ήταν το δείγμα. Αφού περάσουν όλα τα δείγματα αυτή τη διαδικασία, σχεδιάζουμε βελάκι στη βάση του κουτιού κατά μήκος της διαμέτρου του και μια γραμμή κατά μήκος του ύψους του από το σημείο που δείχνει το βελάκι και προς τα πάνω ώστε να έχουμε ένα σταθερό σημείο κατά τις μετρήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Κουτάκι δείγματος και τοποθέτηση βελών

3.1.3 Όργανα μετρήσεων

Για την μέτρηση της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM) χρησιμοποιήθηκε ένας παλμικός μαγνήτης (Impulse Magnetizer, ASC IM10-30) με τον οποίο μαγνητίστηκαν τα δείγματα μέχρι τα 1.2 T. Η μαγνήτιση των δειγμάτων μετρήθηκε με περιστρεφόμενο μαγνητόμετρο (Spinner Magnetometer, Molspin).

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον καθορισμό της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας από τους 50°C μέχρι και τους 700°C. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα της Bartington, το οποίο μετράει την μαγνητική επιδεκτικότητα με προσαρμοσμένο φούρνο για την παρακολούθηση της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας με τη θερμοκρασία.

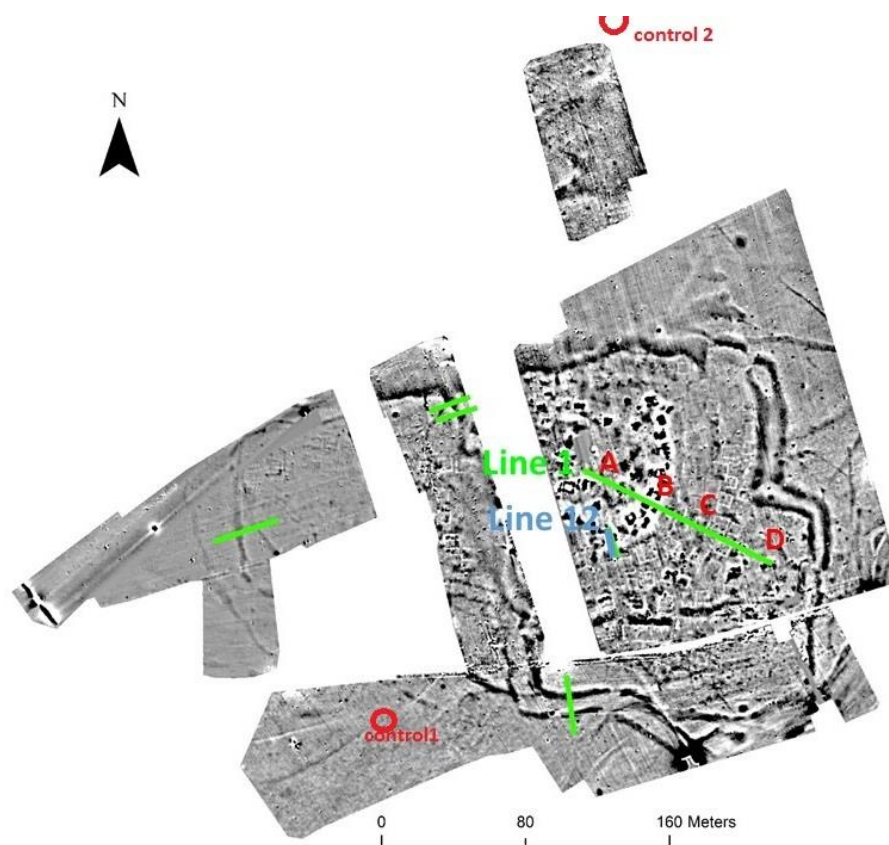
4^ο Κεφάλαιο – Παλαιομαγνητικές μετρήσεις

4.1 Μετρήσεις και σχεδιαγράμματα

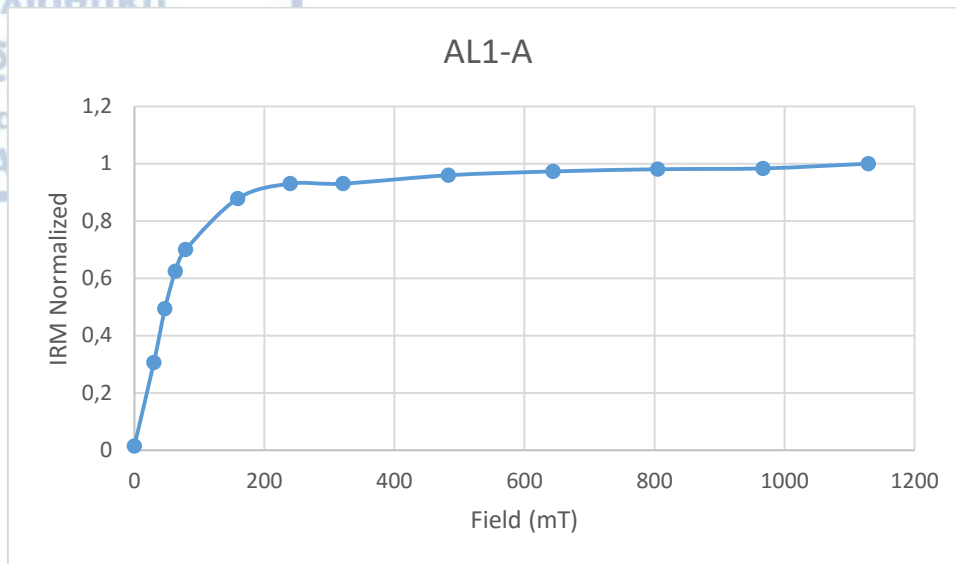
4.1.1. Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση (IRM – Isothermal Remanent Magnetism)

Με το πείραμα της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (IRM) εξετάζουμε την αύξηση της μαγνήτισης που δημιουργείται σε ένα υλικό όταν σε αυτό εφαρμοσθεί μαγνητικό πεδίο αυξανόμενης ισχύος. Όταν με την εφαρμογή του πεδίου σταματήσει να αυξάνεται η μαγνήτιση που αποκτά το υλικό αυτό, έχει μαγνητικά κορεστεί.

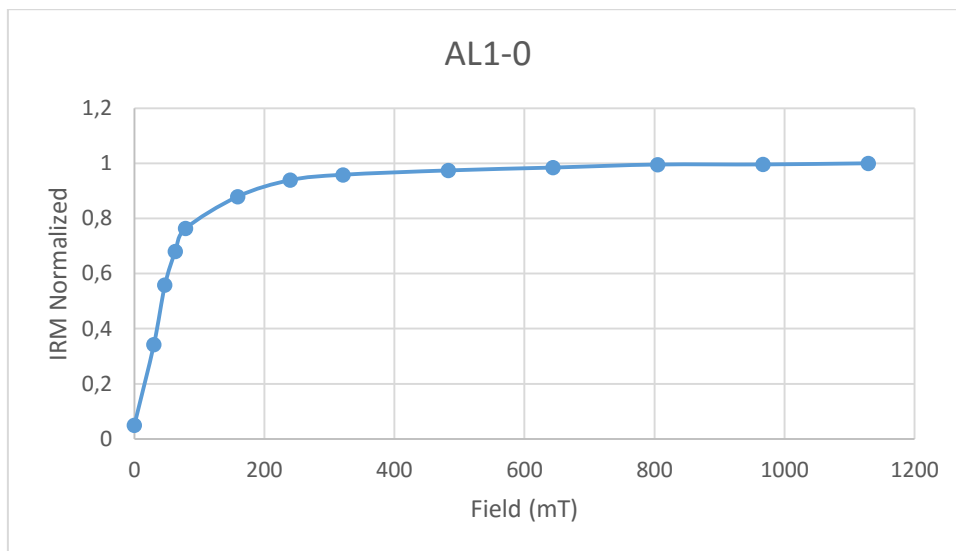
Στην παρούσα μελέτη μετρήθηκαν 19 δείγματα κατά μήκος της LINE 1 (AL1-A – AL1-27) και επιπλέον σε δείγμα της LINE12 (AL12) και σε δύο σημεία εκτός της περιοχής αυτής (AL Control 1, 2) (Σχήμα 9, 10-31).



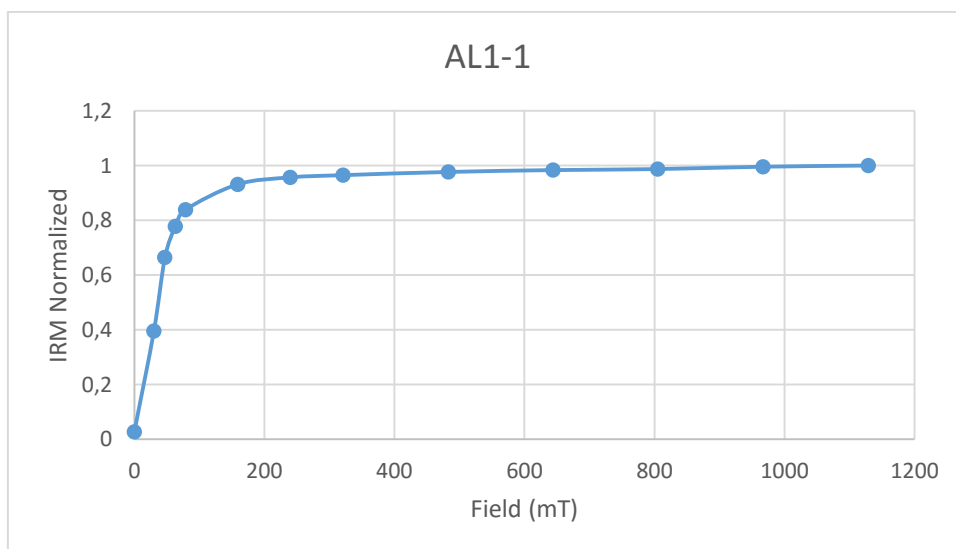
Σχήμα 9: Χάρτης μαγνητικής διασκόπησης με τα σημεία δειγματοληψίας (πράσινες κουκίδες)



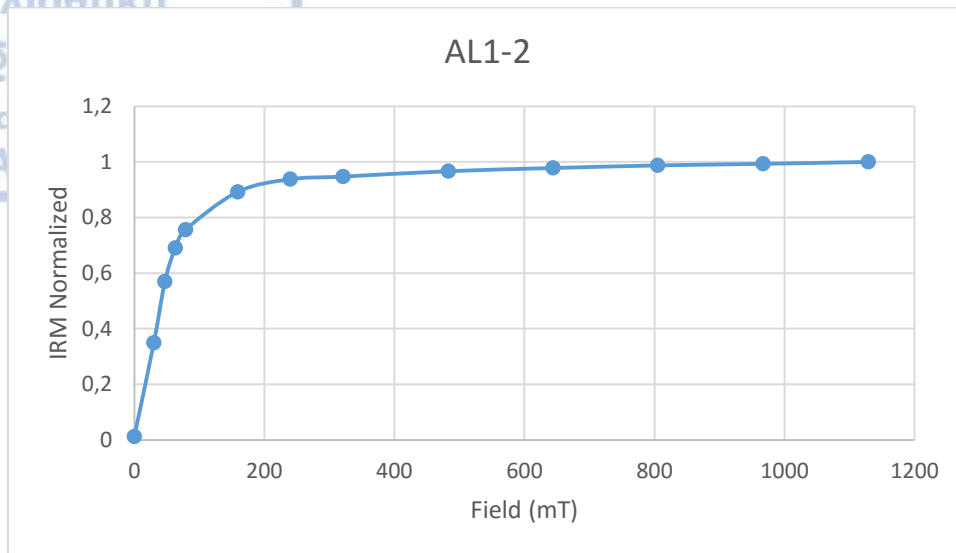
Σχήμα 10: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-A



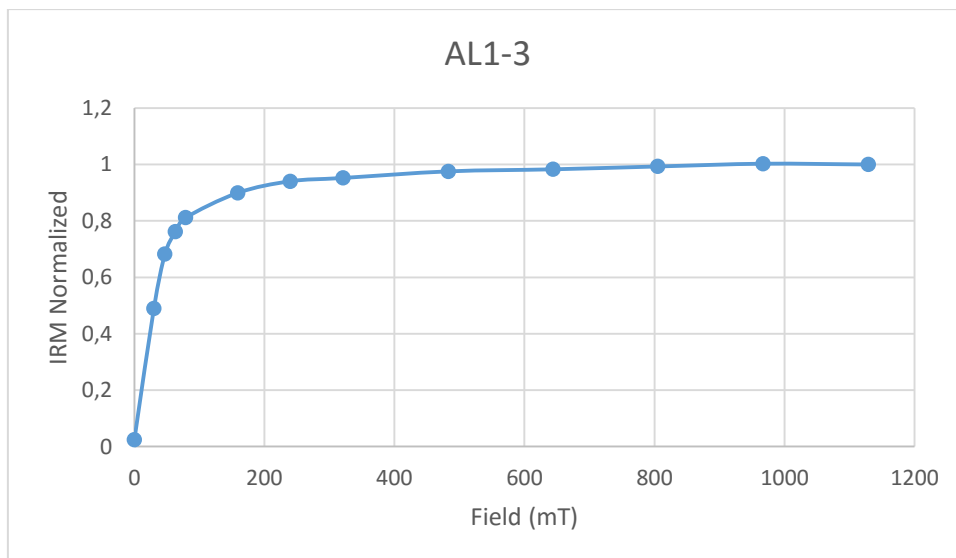
Σχήμα 11: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-0



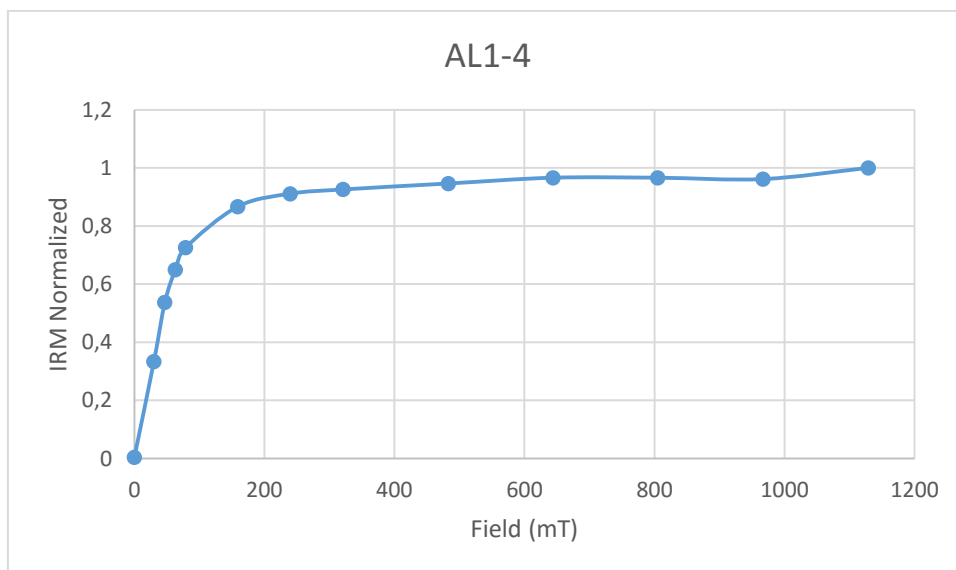
Σχήμα 12: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-1



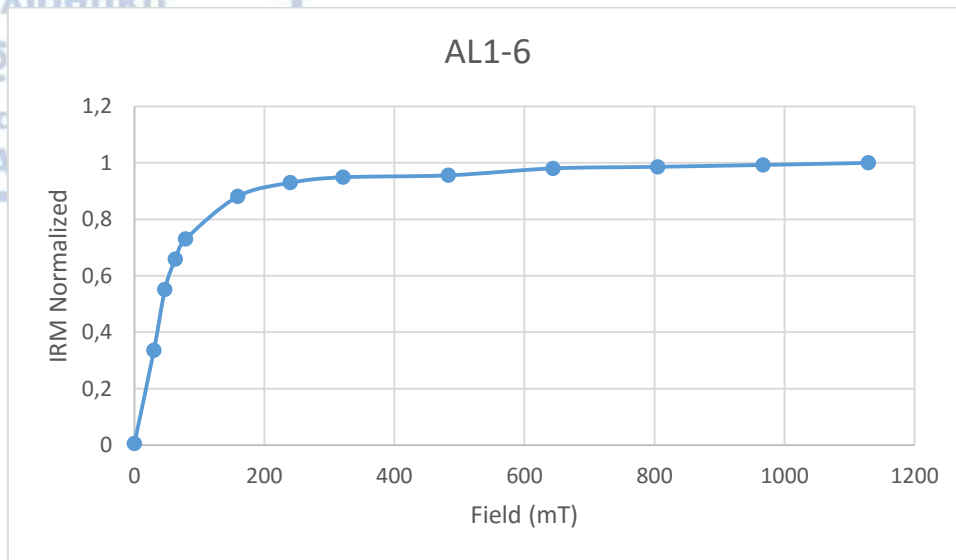
Σχήμα 13: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-2



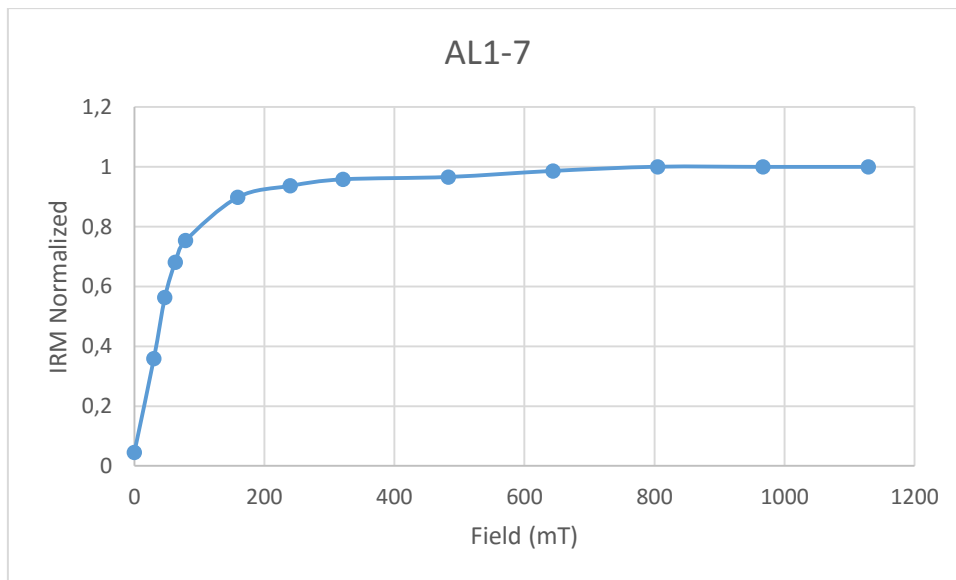
Σχήμα 14: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-3



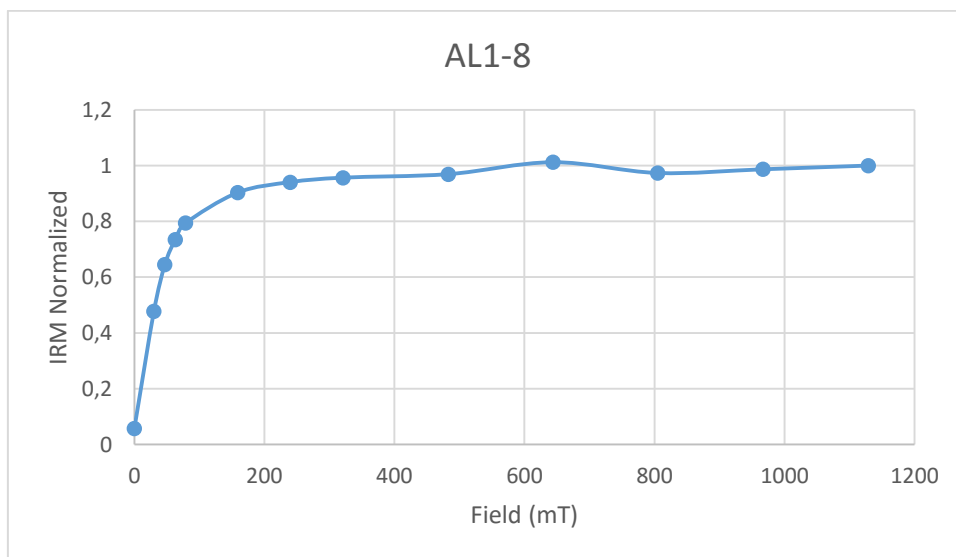
Σχήμα 15: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-4



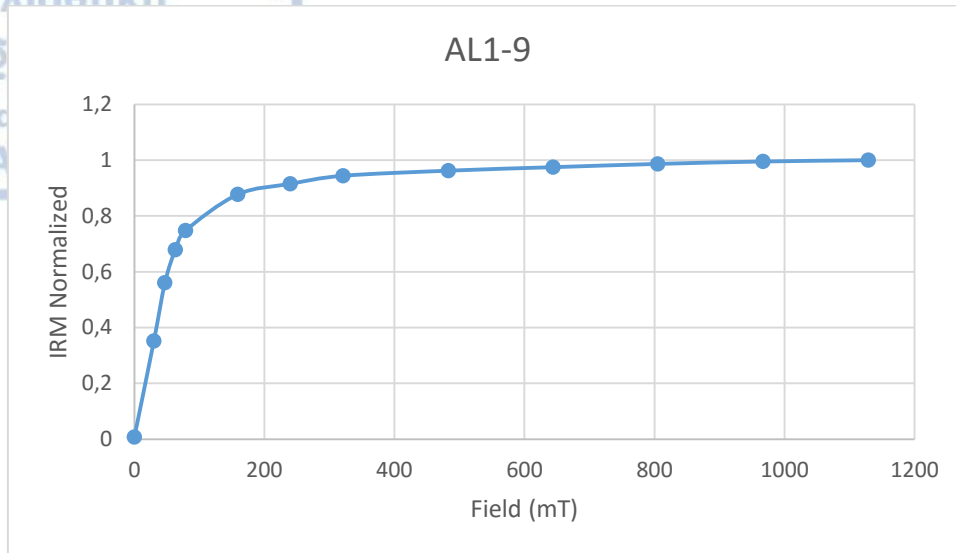
Σχήμα 16: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-6



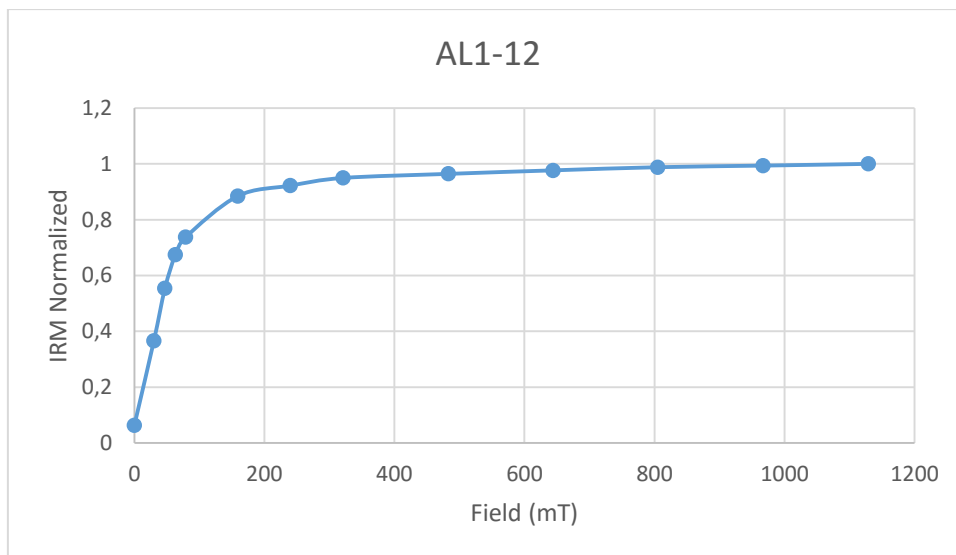
Σχήμα 17: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-7



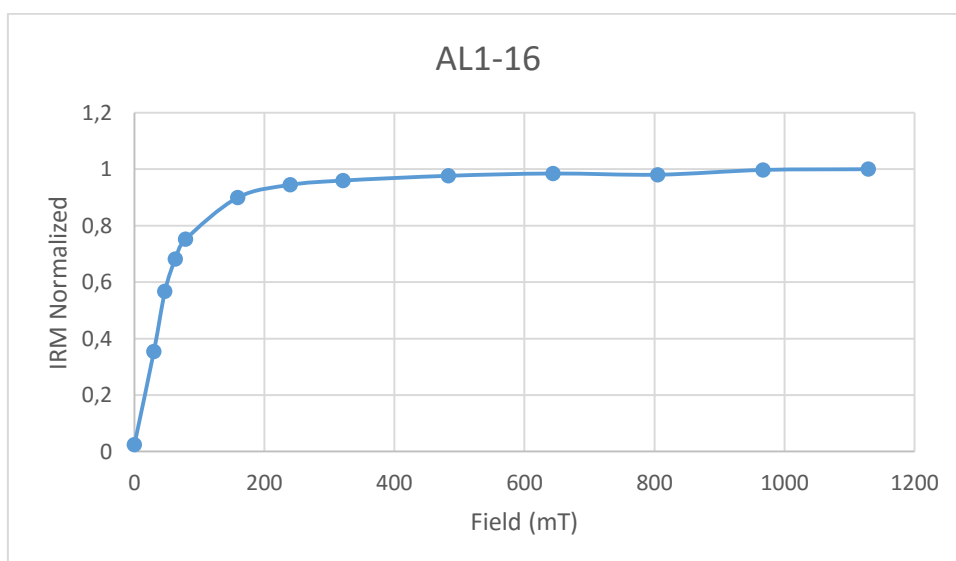
Σχήμα 18: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-8



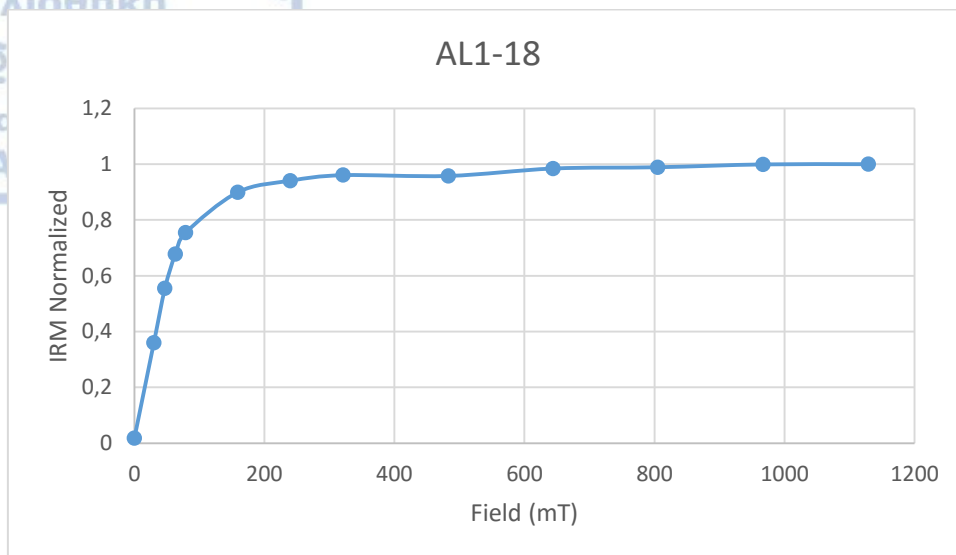
Σχήμα 19: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-9



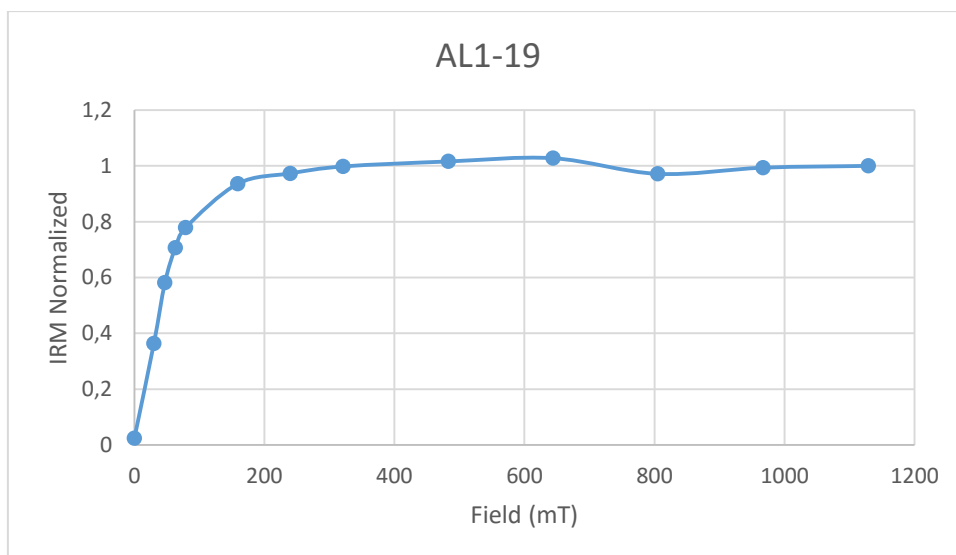
Σχήμα 20: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-12



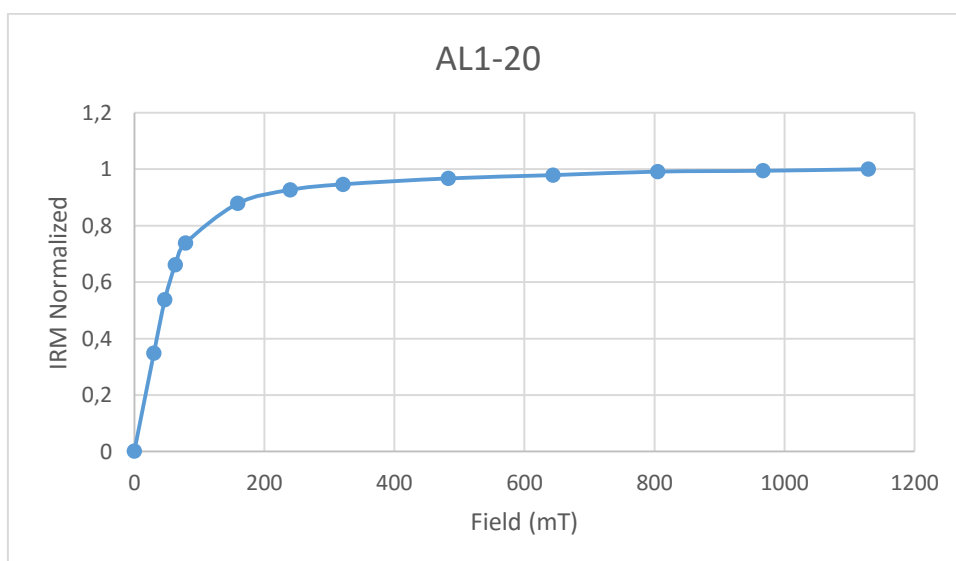
Σχήμα 21: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-16



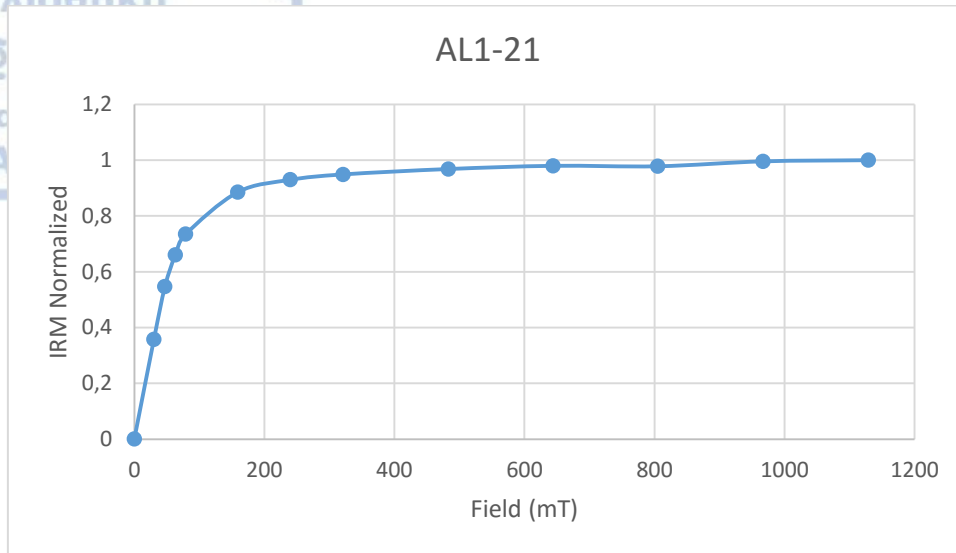
Σχήμα 22: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-18



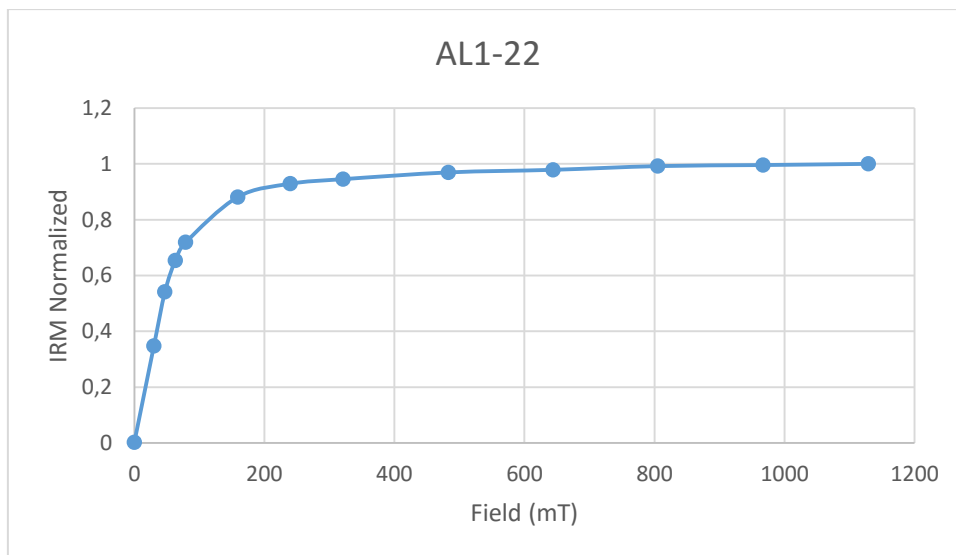
Σχήμα 23: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-19



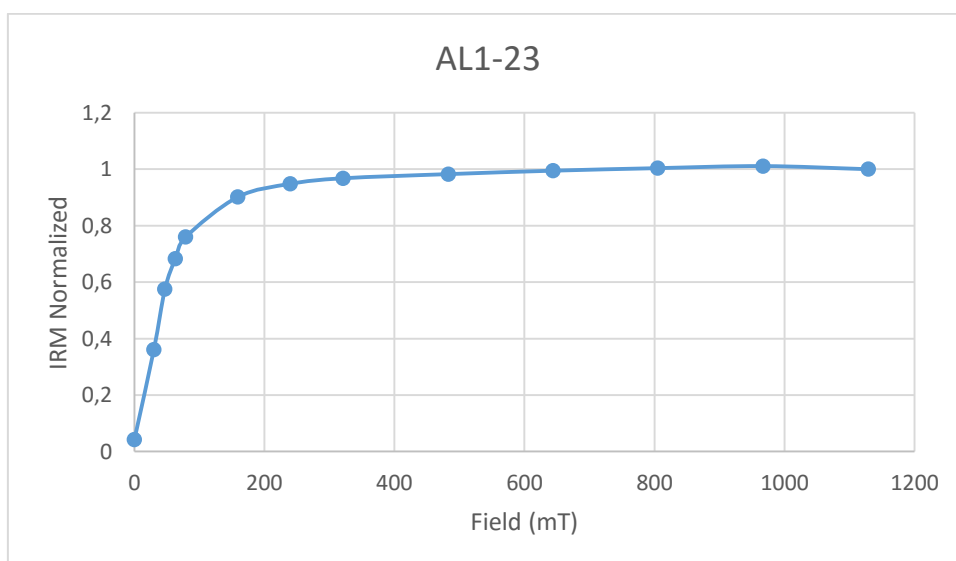
Σχήμα 24: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-20



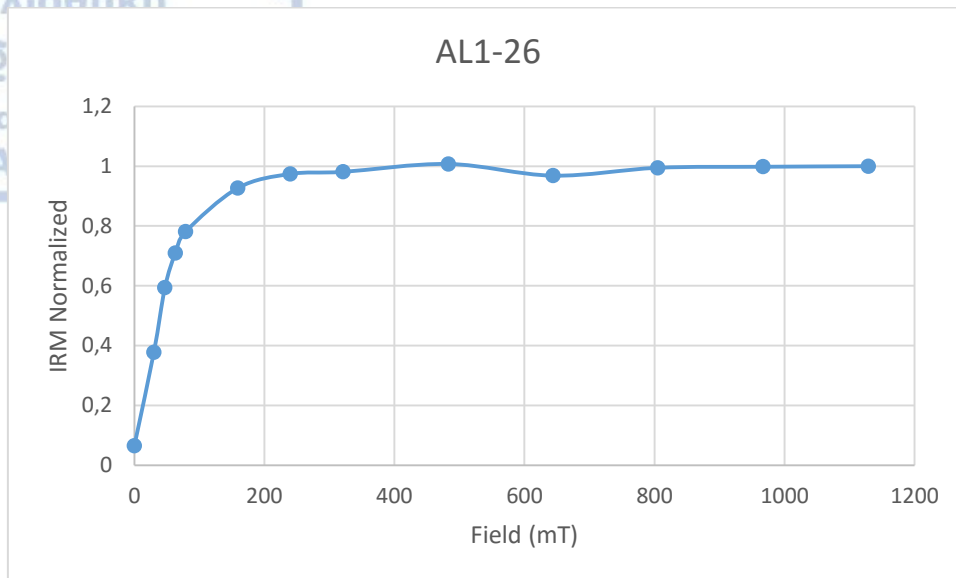
Σχήμα 25: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-21



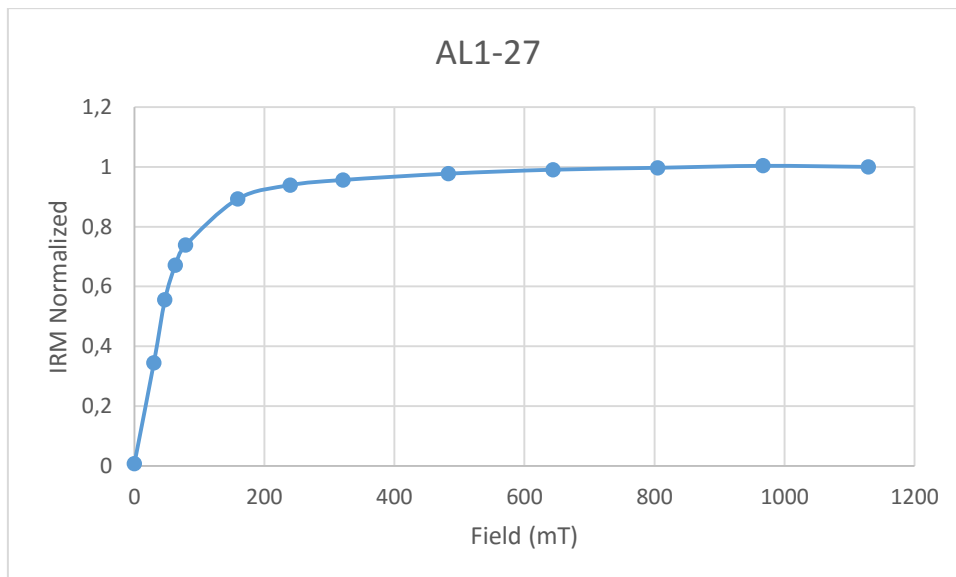
Σχήμα 26: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-22



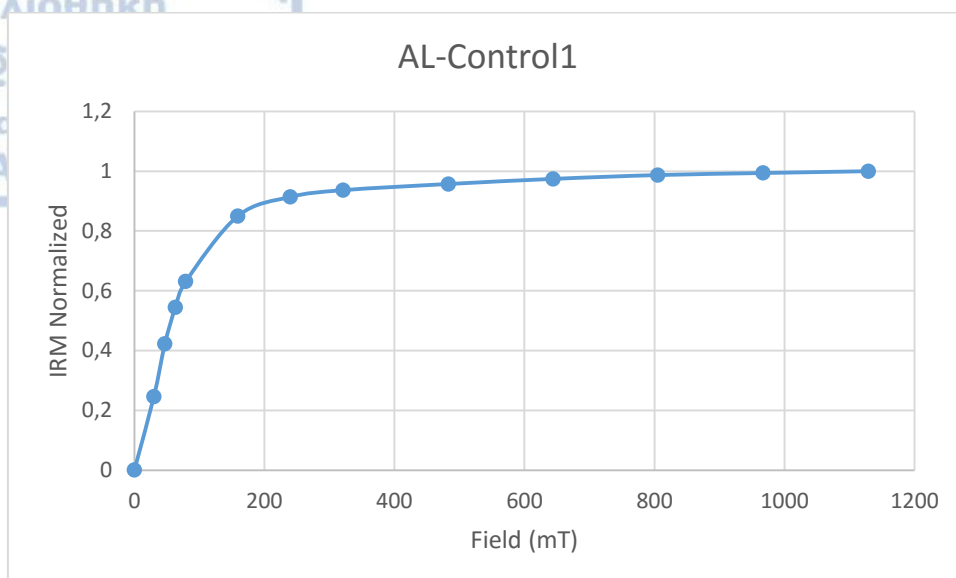
Σχήμα 27: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-23



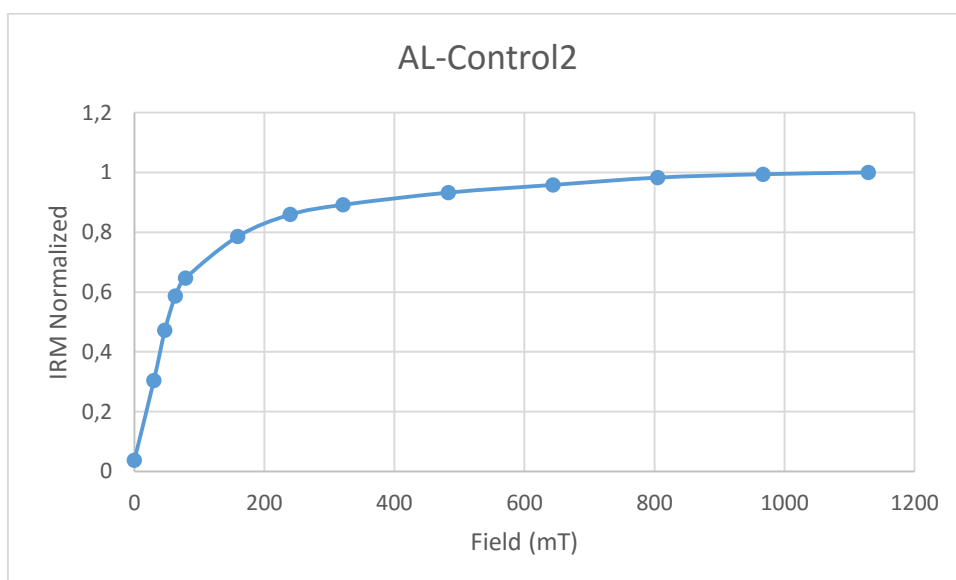
Σχήμα 28: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-26



Σχήμα 29: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL1-27



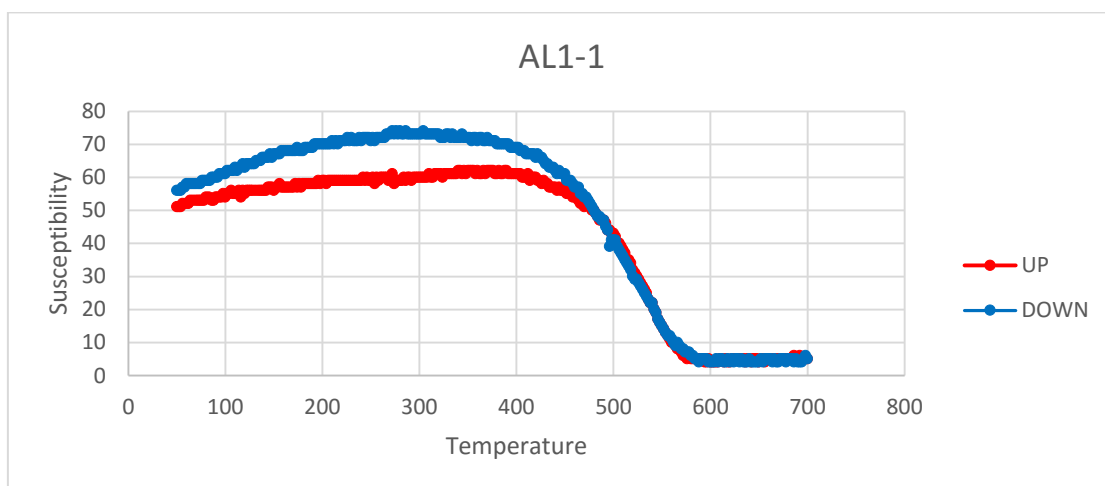
Σχήμα 30: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL-Control1



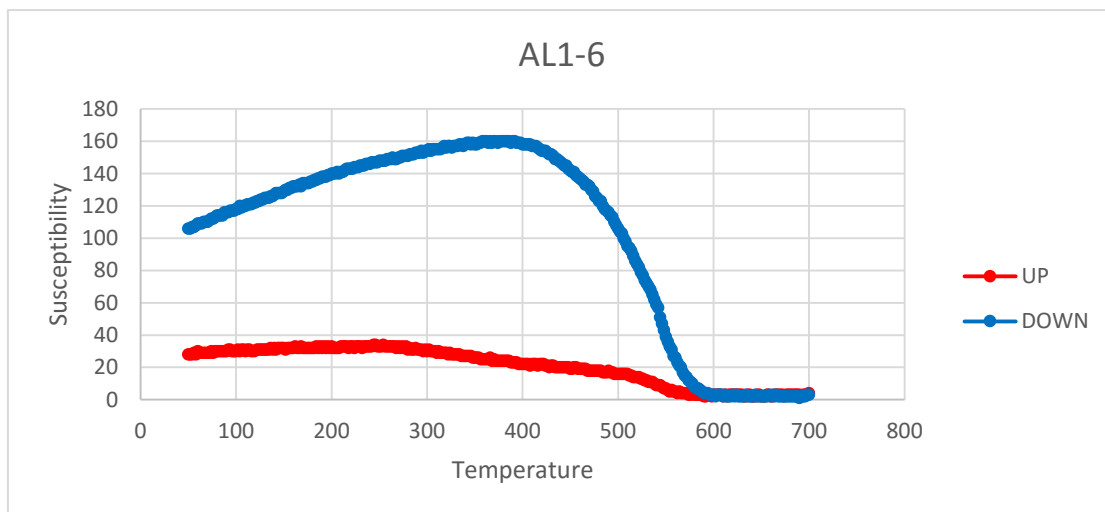
Σχήμα 31: Διάγραμμα IRM - Field για το δείγμα AL-Control2

4.1.2. Θερμομαγνητικές καμπύλες

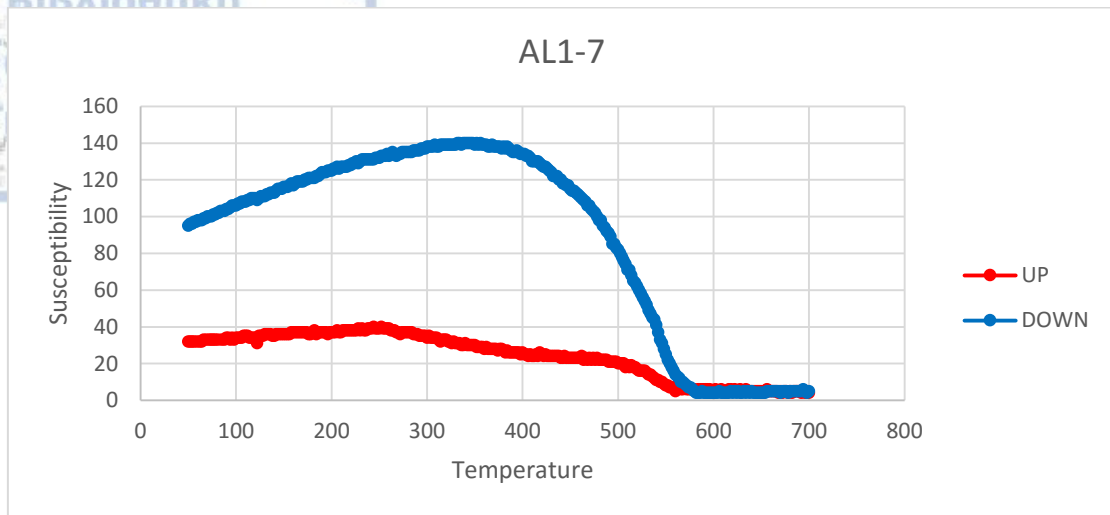
Στην παρούσα μελέτη μετρήθηκαν 11 δείγματα κατά μήκος της LINE 1 (AL1-1,6,7,8,9,12,16,22) και επιπλέον σε δείγμα της LINE12 (AL12) και σε δύο σημεία εκτός περιοχής (AL Control 1, 2) (Σχήμα 32-42). Η επιλογή τους έγινε με κριτήριο τα αποτελέσματα της IRM και με το αν η θέση τους πάνω στον μαγνητικό χάρτη είναι στα πιο σκούρα σημεία.



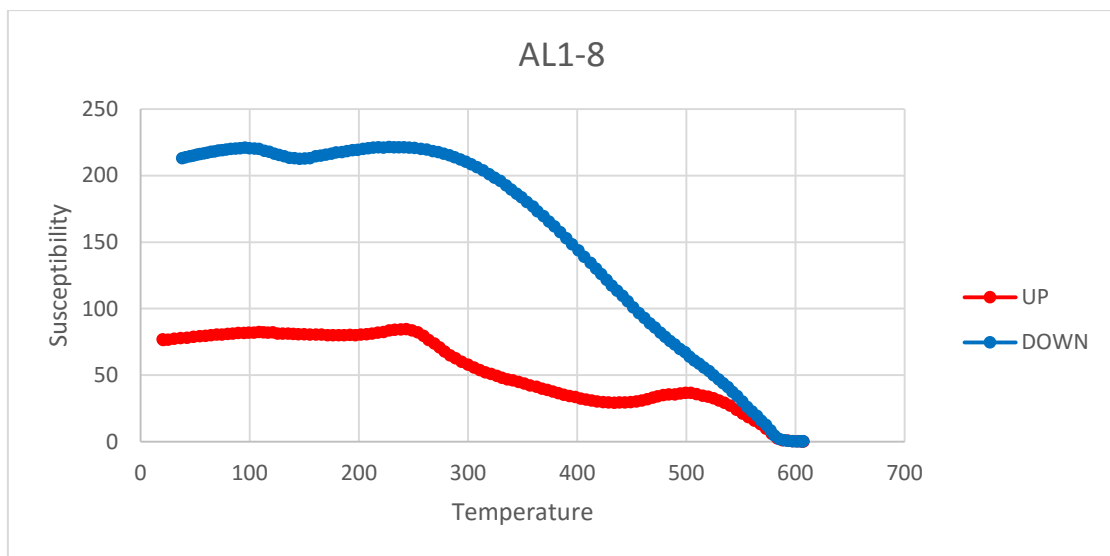
Σχήμα 32: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-1



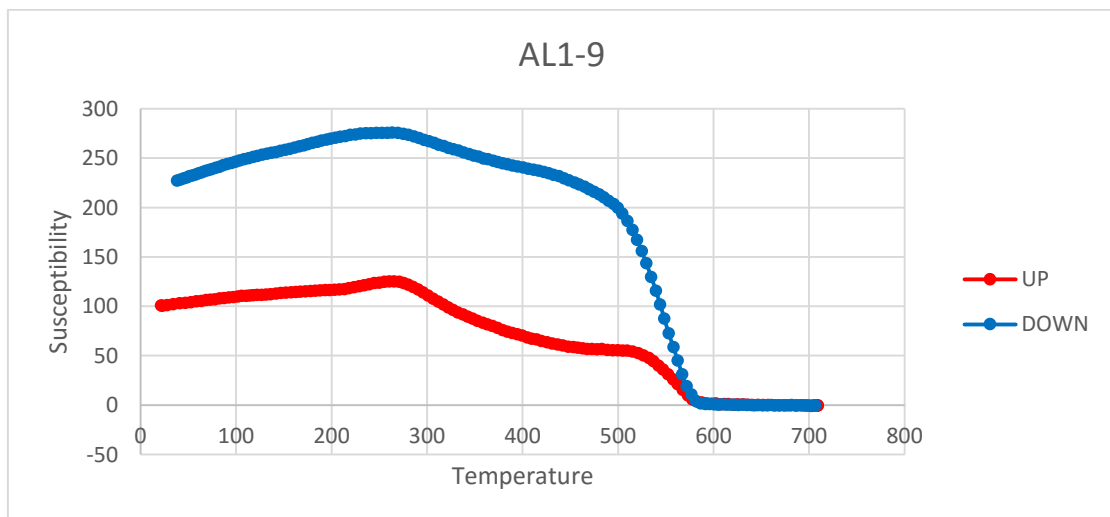
Σχήμα 33: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-6



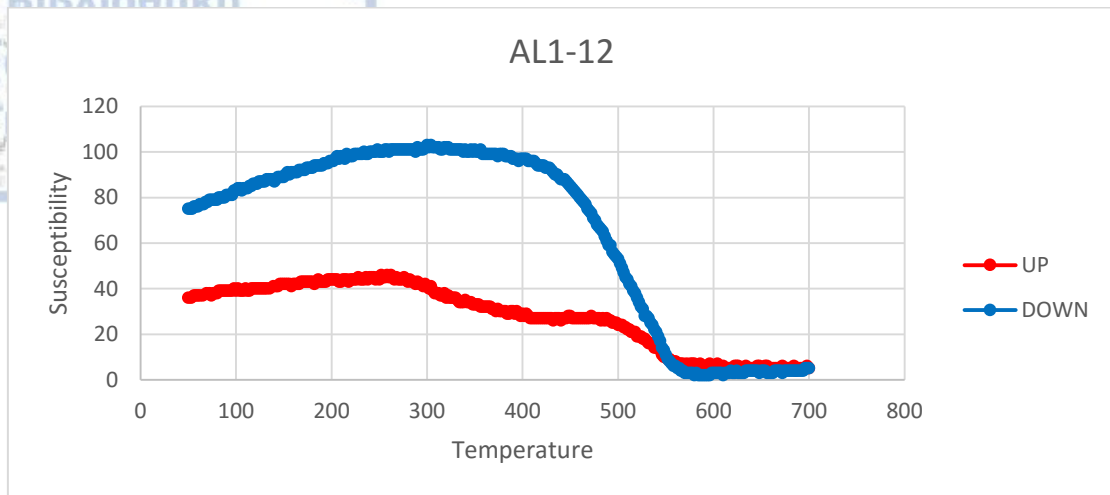
Σχήμα 34: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-7



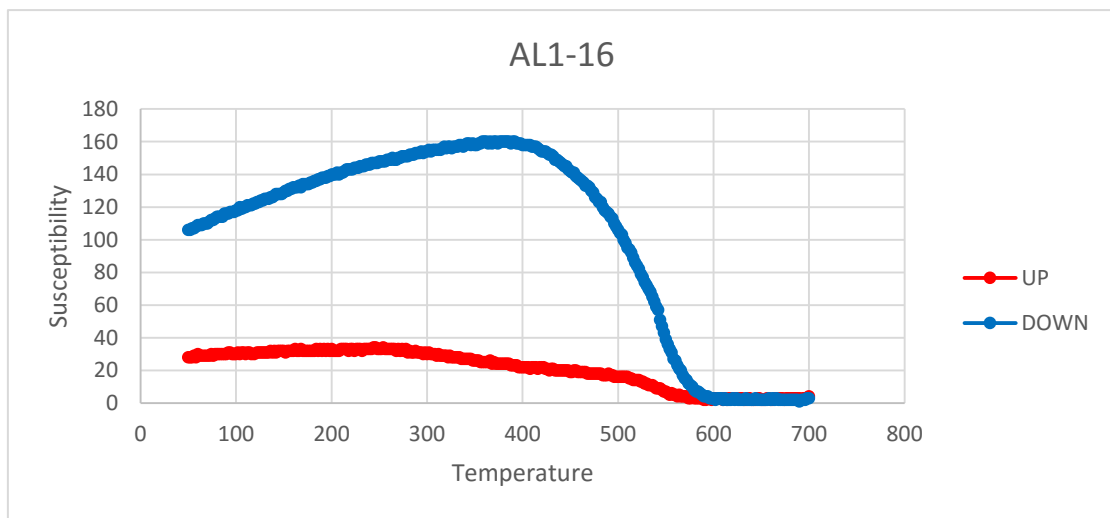
Σχήμα 35: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-8



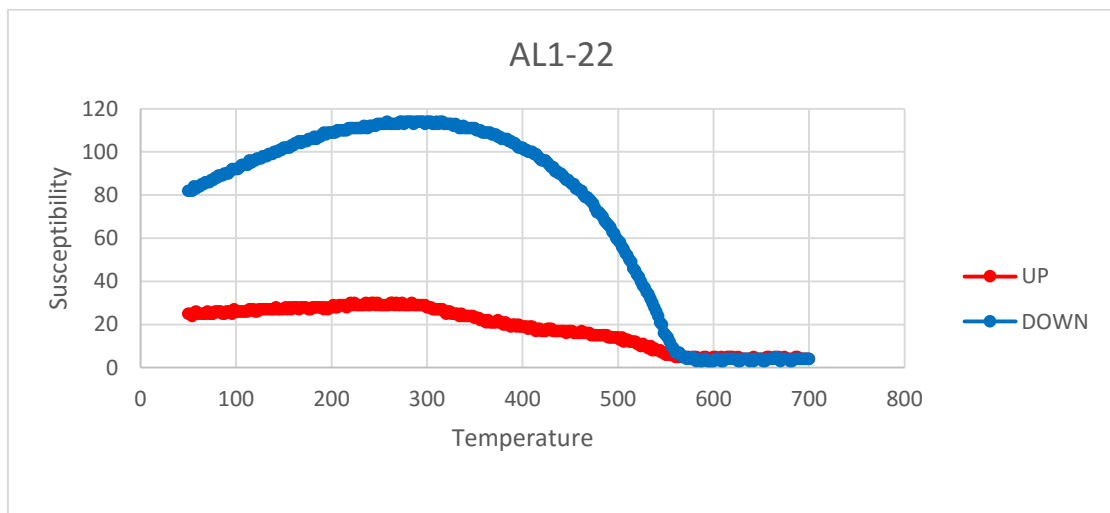
Σχήμα 36: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-9



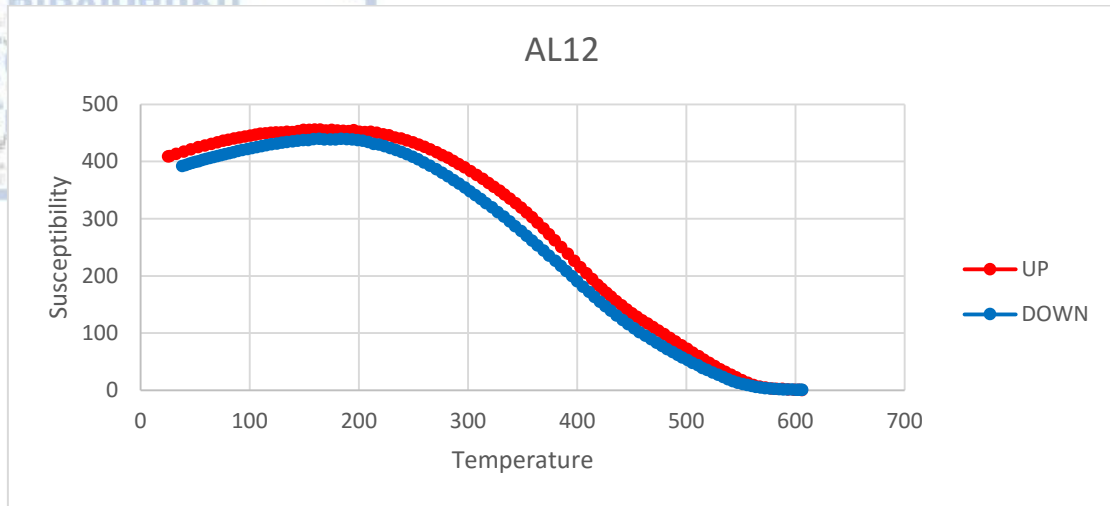
Σχήμα 37: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-12



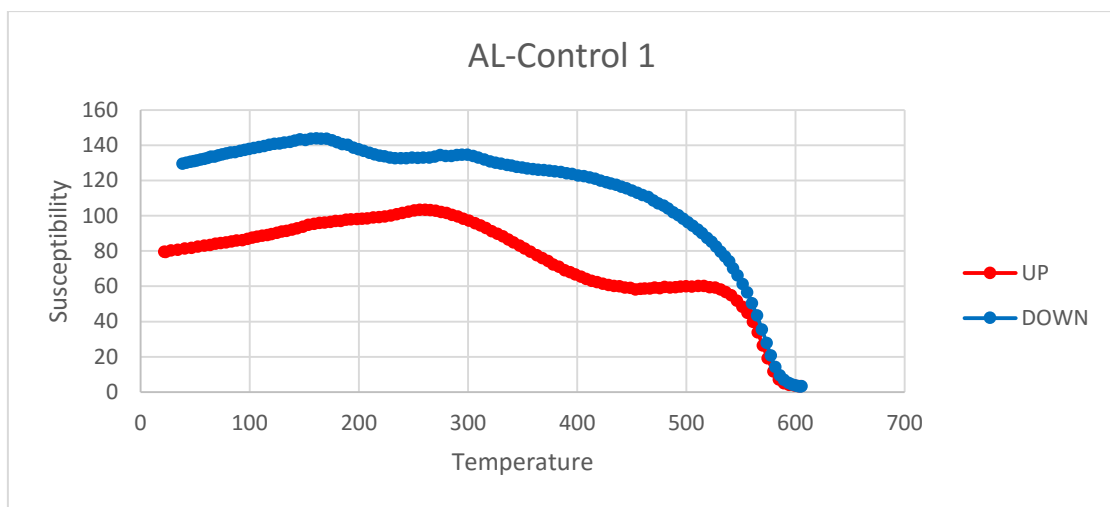
Σχήμα 38: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-16



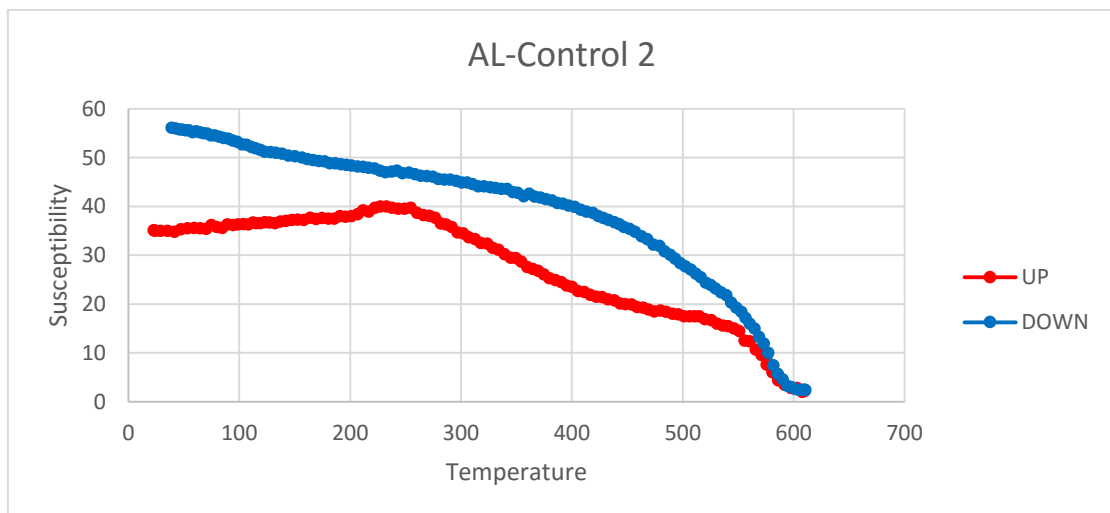
Σχήμα 39: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL1-22



Σχήμα 40: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL12



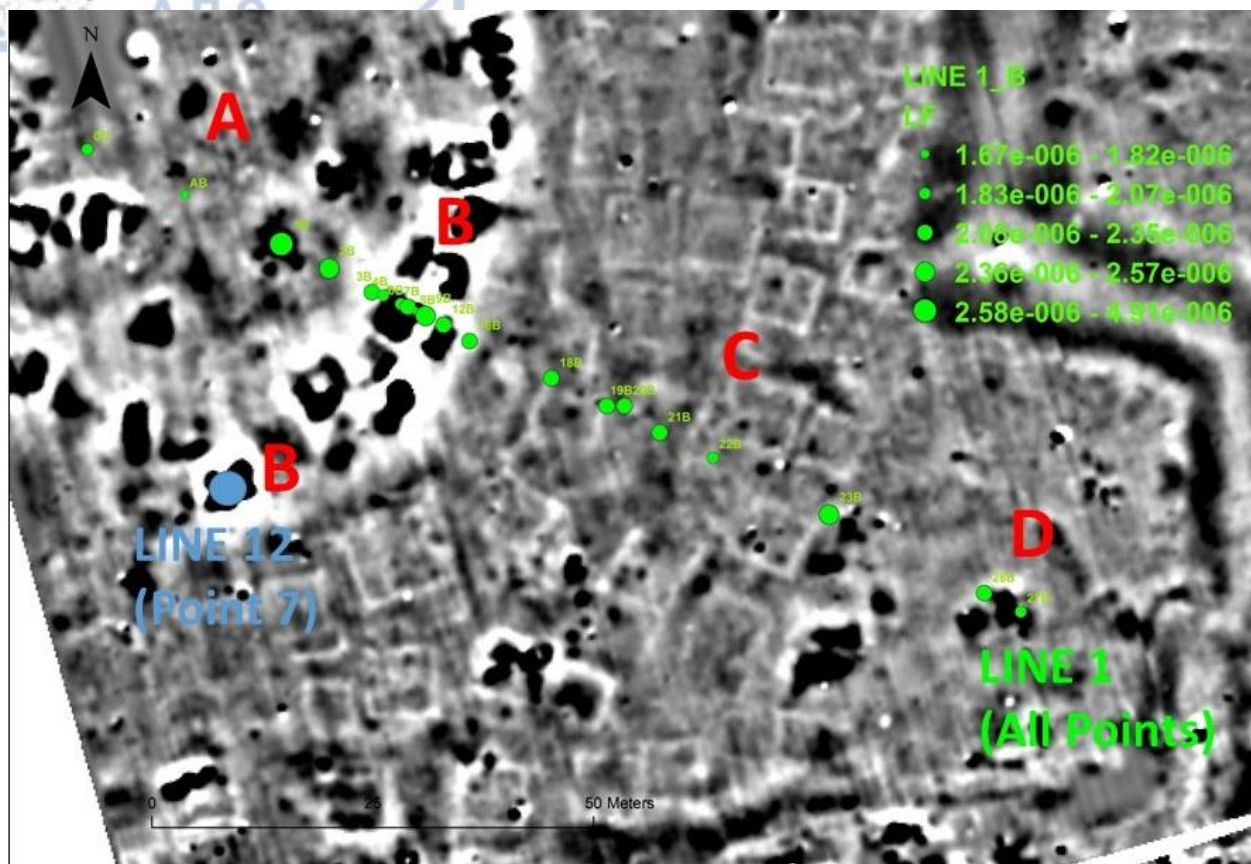
Σχήμα 41: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL-Control 1



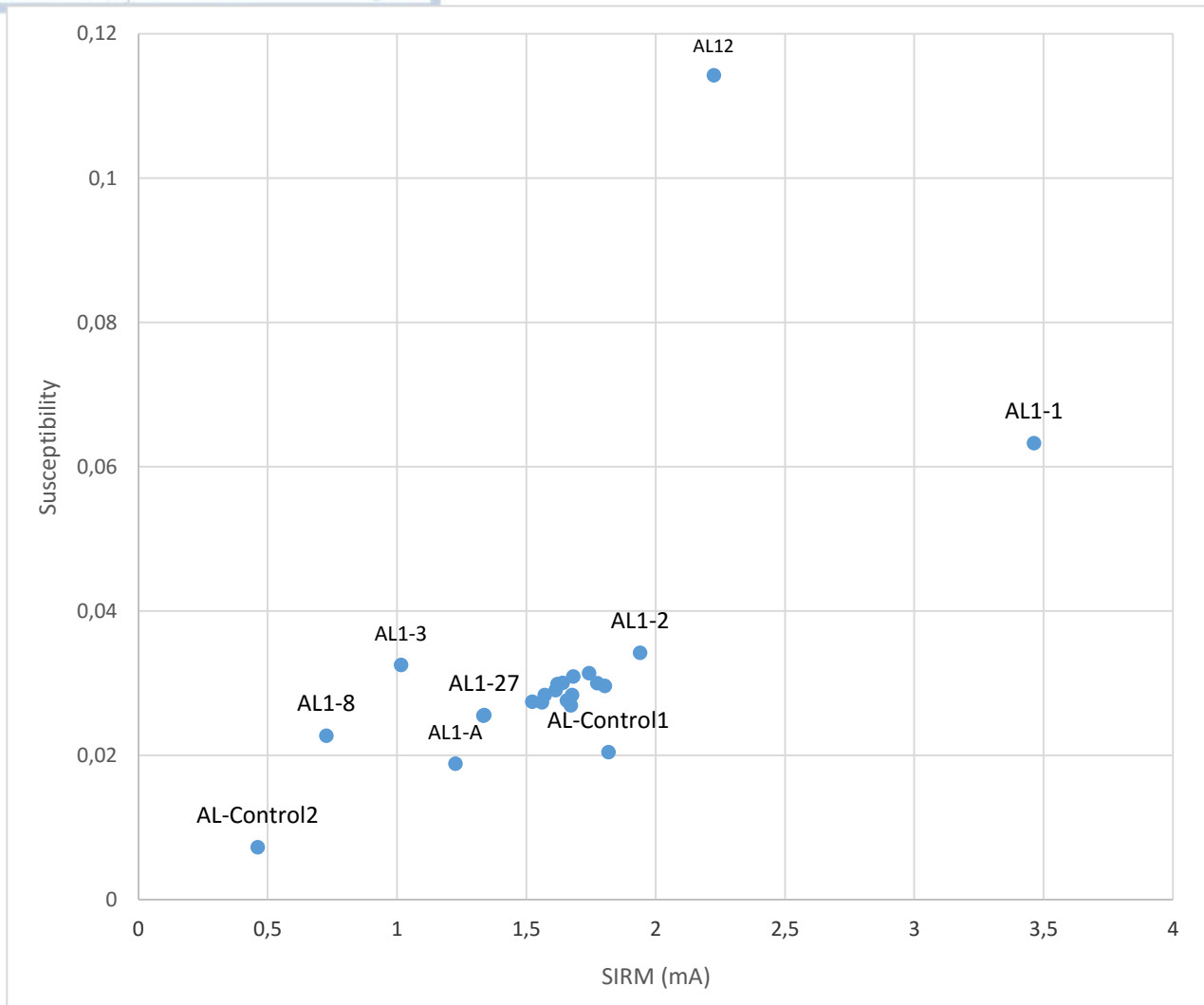
Σχήμα 42: Διάγραμμα μεταβολής Μαγνητικής Επιδεκτικότητας με την θερμοκρασίας για το δείγμα AL-Control 2

5^ο Κεφάλαιο – Συζήτηση-Συμπεράσματα

Στα δείγματα που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη έχει ήδη μετρηθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 43. Με πράσινες τελείες φαίνονται οι τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 1.67×10^{-6} μέχρι $4.21 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ κατά μήκος της γραμμής 1. Παράλληλα μελετήθηκαν και 2 δείγματα έξω από τα όρια του οικισμού (δείγματα AL Control 1 και 2) που εμφανίζουν τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας 1.4 και $0.595 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ αντίστοιχα. Στο Σχήμα 43 παρατηρούμε κάποιες περιοχές πιο σκούρες σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αυτές οι περιοχές έχουν υποστεί υψηλότερου βαθμού καύση, όπως προέκυψε από την επιφανειακή μαγνητική διασκόπηση. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν το παραπάνω συμπέρασμα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 44 όπου έχουν χαρτογραφηθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα με την ισόθερμη Παραμένουσα μαγνήτιση κορεσμού (SIRM). Από το Σχήμα 44 προκύπτει ότι τα δύο δείγματα AL12 και AL1-1 παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας και SIRM και διαφοροποιούνται σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν και την μεγαλύτερη καύση. Αντίθετα τα δύο δείγματα AL Control 1 και 2 ενώ θα περιμέναμε να παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές τόσο μαγνητικής επιδεκτικότητας όσο και SIRM και να αποτελούν ένα ξεχωριστό σύνολο στο Σχήμα 44, δεν εμφανίζουν αυτή την εικόνα. Ιδιαίτερα το δείγμα AL Control 1 συμμετέχει στην ομάδα όπου ανήκουν τα περισσότερα δείγματα της γραμμής 1 παρουσιάζοντας αντίστοιχες μαγνητικές ιδιότητες. Αυτή η παρατήρηση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο δείγμα έχει πιθανώς ‘μολυνθεί’ από τα αρχαιολογικά εδάφη της Μαγούλας και δεν μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστο δείγμα αναφοράς.



Σχήμα 43: Απεικόνιση της μαγνητικής ανωμαλίας όπως προκύπτει από την μαγνητική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στην Μαγούλα καθώς και οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε επιλεγμένες θέσεις της Μαγούλας.



Σχήμα 44: Διάγραμμα Μαγνητικής επιδεκτικότητας (Susceptibility LF) – Ισόθερμη κορεσμού SIRM ($\text{mAm}^2\text{gr}^{-1}$)

5.2 Μεταβολή μαγνητικής επιδεκτικότητας με τη θερμοκρασία

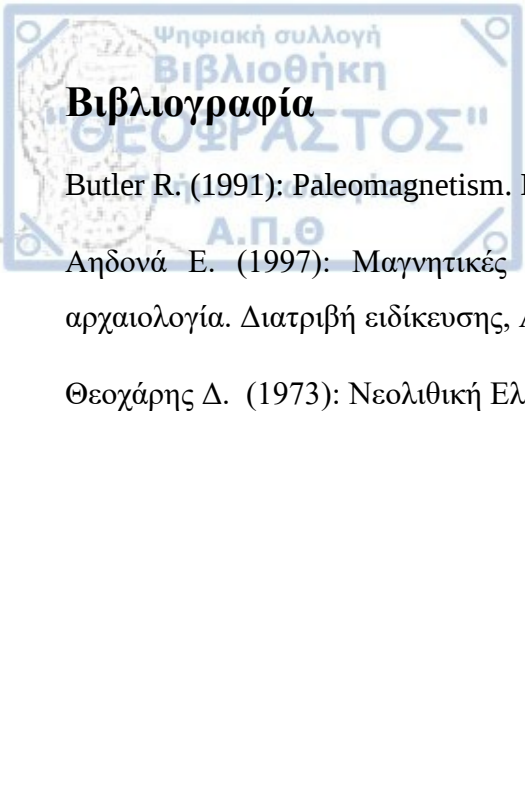
Αρχικά, μία γενική παρατήρηση για όλες τις θερμομαγνητικές καμπύλες είναι ότι σ' όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν η μαγνητική επιδεκτικότητα μηδενίζεται σε θερμοκρασίες 560-580 °C υποδηλώνοντας την ύπαρξη μαγνητίτη.

Ταυτόχρονα, παρατηρείται στα περισσότερα δείγματα μία διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο καμπύλες (θέρμανσης – ψύξης). Αυτό υποδηλώνει δημιουργία δευτερογενούς μαγνητίτη κατά την διάρκεια της θέρμανσης του δείγματος που έχει σαν αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της καμπύλης ψύξης και την απότομη αύξηση της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Αντίθετα όταν οι δύο καμπύλες είναι αντιστρέψιμες φανερώνει δείγματα με σταθερά μαγνητικά υλικά που προκύπτουν στην περίπτωση της παρούσας μελέτης λόγω του μεγαλύτερου βαθμού καύση που έχουν υποστεί.

Για την ακρίβεια, θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τις καμπύλες σε τρεις ομάδες ανάλογα με την μορφή των καμπύλων. Στην πρώτη ομάδα έχουμε τις καμπύλες που η απόσταση μεταξύ θέρμανσης και ψύξης είναι πολύ μικρή, όπως στο δείγμα AL1-1 και AL12. Σε αυτά τα δείγματα έχουμε σταθερά μαγνητικά υλικά.

Στην δεύτερη ομάδα ανήκουν τα δείγματα AL1-6, AL1-7, AL1-8, AL1-9, AL1-12, AL1-16 και AL1-22, διότι η απόσταση ανάμεσα στις καμπύλες είναι μεγάλη. Τα δείγματα αυτά έχουν ασταθή υλικά.

Στην τρίτη ομάδα μπορούμε να βάλουμε τα δείγματα που ξεχωρίζουν διαφορετικά και δείχνουν ότι η καύση έγινε σε μικρό βαθμό. Τα δείγματα αυτά είναι τα AL Control 1 και AL Control 2.



Βιβλιογραφία

Butler R. (1991): Paleomagnetism. Blackwell Scientific Publications, 319p.

Αηδονά Ε. (1997): Μαγνητικές ιδιότητες ορυκτών και εφαρμογές τους στη γεωλογία και αρχαιολογία. Διατριβή ειδίκευσης, ΑΠΘ.

Θεοχάρης Δ. (1973): Νεολιθική Ελλάς – Εθνική Τράπεζα της Ελλάδας.