

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



Διατριβή ειδίκευσης:

**“ΧΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΛΙΜΝΑΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ:
ΛΙΜΝΗ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗ ΚΕΡΚΙΝΗ”**

Της μεταπτυχιακής φοιτήτριας

ΕΥΔΟΚΙΑΣ ΤΕΜΑ



Επιβλέπουσα: ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη 2003

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δ. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ

Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Α. ΨΙΛΟΒΙΚΟΣ

Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Χ. ΖΕΡΗ

Διδάκτορας, Ερευνήτρια ΕΚΘΕ

Η διατριβή αυτή αφιερώνεται
σε δύο ανθρώπους,
στους οποίους οφείλω πολλά....
... τους γονείς μου

**APPLICATION OF MAGNETIC METHODS ON THE INVESTIGATION OF THE
ENVIRONMENTAL CONTITIONS ON LAKE SEDIMENTS
A CASE STUDY: KOUMOUNDOUROU LAKE AND KERKINI LAKE**

Abstract: The present master thesis deals with some aspects of environmental magnetism. Several magnetic properties present a notable correlation with magnetic mineral concentrations of anthropogenic origin and heavy metal concentrations into various environmental systems. In this way, they offer important information about heavy metal contaminated areas, magnetic minerals and anthropogenic impact into sediments. The need for rapid and inexpensive (proxy) methods that could outline areas exposed to increased pollution by particles of anthropogenic origin has drawn increased attention to the magnetic methods. This master thesis constitutes a pilot environmental magnetic study and aims to detect the anthropogenic impact into the sediments of Koumoundourou Lake (Attica) and Kerkini Lake (Northern Greece).

Sediment samples were collected at three locations from Koumoundourou Lake. They have been prepared properly and their magnetic susceptibility, the frequency dependent susceptibility, the changes of magnetic susceptibility as a function of temperature and the isothermal remanent magnetization have been measured. The magnetic susceptibility profiles of the three cores have shown very small values of magnetic susceptibility. The core taken from the right bank of the lake presents the highest magnetic susceptibility values. The IRM acquisition curves show that the main magnetic mineral of the sediments is magnetite as they reveal a fast and drastic increase at weak magnetic fields. The thermomagnetic curves for core KM2-1 agree with the IRM results suggesting the presence of magnetite as the dominant magnetic mineral while the curves for the other two cores do not give much information as the magnetization of the samples is very weak to give a meaningful result. The comparison of the magnetic results with the chemical analysis of heavy metal concentrations held out at the same area (Gritzalis K. et al, 1995) is very good. It is quite probable that there is no great loading of magnetic pollution at the area investigated.

Kerkini Lake is a large, artificial lake that is fed by Strymon River flowing in Greece from Bulgaria. From this lake 9 cores from 9 different sites have been taken. The magnetic susceptibility results give high magnetic susceptibility values for the first 50-80cm of the cores while at greater depths the magnetic susceptibility is much smaller and without great fluctuations. The cores G4 and G9 present the highest values and intense differentiations as a function of the depth. The IRM measurements for all cores show that magnetite is the main magnetic carrier of the sediments. For core G4 the Isothermal Remanent Magnetization has been measured for all samples and from all

the different depths and the results of these measurements reveal that magnetite is the main magnetic mineral for the sediments deposited at the lake's bottom during the last decades. Moreover, the results of the changes of magnetic susceptibility as a function of temperature give Curie temperature of about 580°C, indicative of the presence of magnetite. The increase of the magnetic susceptibility at the upper layer of the examined cores probably indicates an anthropogenic contribution on magnetic mineral concentrations possibly related with anthropogenic and industrial activities along the bank of the river.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	15
1.1.1. Διαμαγνητικά υλικά.....	15
1.1.2. Παραμαγνητικά υλικά.....	15
1.1.3. Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	16
1.1.4. Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	16
1.1.5. Σιδηριμαγνητικά υλικά.....	16
1.2. ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ.....	18
1.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ, ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ.....	20
1.3.1. Μαγνητική ανισοτροπία.....	20
1.3.2. Μέγεθος κόκκων.....	21
1.4. ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ – ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	24
1.5. ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ.....	26
1.5.1. Είδη Μαγνήτισης.....	26
Κύριες μαγνητίσεις.....	26
1. Φυσική παραμένουσα μαγνήτιση.....	26
2. Θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση.....	27
3. Χημική παραμένουσα μαγνήτιση.....	27
4. Θραυσματοπαγής παραμένουσα μαγνήτιση.....	27
Δευτερεύουσες Μαγνητίσεις.....	28
1. Ιξώδης μαγνήτιση.....	28
2. Ισόθερμη μαγνήτιση.....	28
3. Ανυστερητική παραμένουσα μαγνήτιση.....	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

2.1. ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	29
2.2. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΛΙΜΝΑΙΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ.....	31
2.3. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΤΑ ΛΙΜΝΑΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ.....	32
2.4. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	34
2.4.1. Μαγνητική επιδεκτικότητα.....	34
2.4.2. Εξαρτημένη από τη συχνότητα επιδεκτικότητα.....	36
2.4.3. Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	38
2.4.4. Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση.....	38
2.5. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	40
2.5.1. Όργανο μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	40
2.5.2. Όργανο μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.....	43
2.5.3. Όργανο μέτρησης της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης – Μαγνητόμετρο.....	45
2.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΛΙΜΝΗ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ

3.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	49
3.2. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	51
3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	52
3.3.1. Μαγνητική επιδεκτικότητα.....	52
3.3.2. Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση.....	55
3.3.3. Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	57
3.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	60
3.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΛΙΜΝΗ ΚΕΡΚΙΝΗ

4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	63
4.2. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	65
4.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	66
4.3.1. Μαγνητική επιδεκτικότητα.....	66
4.3.2. Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση.....	68
4.4. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ G4.....	77
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	81
4.6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

5.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΙΜΝΗΣ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗΣ ΚΕΡΚΙΝΗΣ.....	84
5.2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	85

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86
--------------------------	-----------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	93
-----------------------	-----------

Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης είναι το αποτέλεσμα επιμελούς μελέτης πάνω σε θέματα περιβαλλοντικού μαγνητισμού και δε θα μπορούσε να αρχίσει και να ολοκληρωθεί χωρίς την καθοριστική συμβολή μιας σειράς ανθρώπων που συνεργάστηκαν μαζί μου και μου προσέφεραν απλόχερα τις γνώσεις και τις συμβουλές τους. Σε όλους αυτούς τους ανθρώπους οφείλω ένα μεγάλο και ειλικρινές ευχαριστώ.

Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την επιβλέπουσα της παρούσας διατριβής ειδίκευσης, κυρία Δ. Κοντοπούλου, Καθηγήτρια του Τομέα Γεωφυσικής, χωρίς την καθοδήγηση και συνεχή βοήθεια της οποίας δε θα ήταν δυνατό να ξεκινήσει και να ολοκληρωθεί η διατριβή αυτή. Υπήρξε για εμένα συνοδηγός στα πρώτα μου βήματα στον χώρο του περιβαλλοντικού μαγνητισμού και πολύτιμο στήριγμα σε κάθε πρόβλημα που συνάντησα στη διαδρομή αυτή. Ήταν πάντοτε πρόθυμη να μοιραστεί μαζί μου τις γνώσεις της αλλά και να αναζητήσουμε μαζί νέες. Πάνω απ' όλα, όμως, της οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την υπομονή και τη διαρκή συμπαράσταση της σε θέματα, τόσο επιστημονικά όσο και ανθρώπινα, που ανέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής ειδίκευσης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Α. Ψιλοβίκο, Καθηγητή του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, για την ουσιαστική του συμβολή, τις εποικοδομητικές του παρατηρήσεις, τα σχόλια και τη σημαντική του συνεισφορά σε θέματα που άπτονται ιζηματολογικού ενδιαφέροντος. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το πολύτιμο στοιχείο που μου παρείχε όσον αφορά τη λίμνη Κερκίνη, όπου και έχει διεξάγει αναλυτική ιζηματολογική έρευνα.

Θερμά ευχαριστώ και το τρίτο μέλος της συμβουλευτικής μου επιτροπής Δρ. Χ. Ζέρη, Ερευνήτρια του ΕΚΘΕ, για την παροχή πλούσιου βιβλιογραφικού υλικού καθώς επίσης και για τις χρήσιμες υποδείξεις και τη σημαντική συνεισφορά της στο σχολιασμό και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω να απευθύνω στον κ. Γ. Τσόκα, Καθηγητή του Τομέα Γεωφυσικής, χάρη στο ενδιαφέρον και την πολύτιμη συμβολή του οποίου πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες από τις δύο περιοχές μελέτης. Επίσης, ευχαριστώ τους κ. Κ. Αλμπανάκη, Επίκουρο Καθηγητή και κ. Κ. Βουβαλίδη, Λέκτορα του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, οι οποίοι μου παραχώρησαν τους πυρήνες των γεωτρήσεων από τη λίμνη Κουμουνδούρου και τη λίμνη Κερκίνη και μου παρείχαν πληροφορίες σχετικά με αυτές.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Τομέα Γεωφυσικής για τη βοήθεια τους καθώς και τους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Τομέα Γεωφυσικής για τη βοήθεια που ο καθένας με το τρόπο του μου προσέφερε. Ιδιαίτερως

ευχαριστώ τη Δρ. Ελίνα Αηδονά και τους υποψήφιους διδάκτορες Ειρήνη Ζανανίρι και Βασίλη Σπαθάρ, οι οποίοι με βοήθησαν καθοριστικά όσον αφορά την εξοικείωση μου με τη χρήση των οργάνων αλλά και σε πολλά άλλα θέματα μαγνητικού ενδιαφέροντος.

Τέλος, ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική ενίσχυση που μου παρείχε κατά το χρονικό διάστημα 2001-2003, μα πάνω απ' όλα την οικογένεια μου για την αμέριστη οικονομική και ηθική της στήριξη, την κατανόηση και συνεχή, ανεκτίμητη συμπαράστασή της καθ'όλη τη διάρκεια της επιστημονικής κατάρτισης μου.

Θεσσαλονίκη 2003

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης αποτελεί η μελέτη της εφαρμογής μαγνητικών μεθόδων σε θέματα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Η μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των ιζημάτων παρέχει πολύτιμες πληροφορίες οσον αφορά ζητήματα ιζηματολογίας, οικολογίας, υδρολογίας, λιμνολογίας, ωκεανογραφίας και ρύπανσης του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένες μαγνητικές παράμετροι εμφανίζουν αξιοσημείωτη συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις μαγνητικών ορυκτών ανθρωπογενούς προέλευσης καθώς επίσης και ορισμένων βαρέων μετάλλων στα ιζήματα και δίνουν πληροφορίες για τους φορείς μαγνήτισης τους, βρίσκοντας έτσι εφαρμογή σε διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με την επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας στα διάφορα περιβάλλοντα.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης γίνεται αναφορά στις βασικές μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, στα κύρια μαγνητικά ορυκτά και στα είδη μαγνήτισης τους.



Σχήμα 1: Χάρτης της Ελλάδας όπου έχουν σημειωθεί οι περιοχές μελέτης Α) λίμνη Κουμουνδούρου και Β) λίμνη Κερκίνη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον περιβαλλοντικό μαγνητισμό και στις εφαρμογές του, παρουσιάζονται οι βασικές μαγνητικές παράμετροι που μετρούνται σε μελέτες περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος και περιγράφονται οι συσκευές με τις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις των παραμέτρων αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται γενικές πληροφορίες για τη πρώτη περιοχή μελέτης που είναι η λίμνη Κουμουνδούρου (σχ1, Α), σχολιάζεται ο τρόπος δειγματοληψίας και η προετοιμασία των δειγμάτων, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μερήσεων (μαγνητική επιδεκτικότητα, θερμομαγνητικές αναλύσεις,

μετρήσεις ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης) και παραθέτονται τα διαγράμματα αυτών. Επίσης, σχολιάζονται τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων και συγκρίνονται με αποτελέσματα χημικών αναλύσεων βαρέων μετάλλων, όπως αυτά έχουν καταγραφεί σε προηγούμενη μελέτη που έχει διεξαχθεί στην περιοχή (Γκρίτζαλης και συνεργάτες, 1995).

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται ορισμένα γενικά στοιχεία για τη δεύτερη περιοχή μελέτης, τη λίμνη Κερκίνη (σχ1, Β). Παρουσιάζονται και πάλι τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων, δίνονται τα διαγράμματα της μαγνητικής επιδεκτικότητας, της μεταβολής αυτής με τη θερμοκρασία, της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης και της παραμένουσας μαγνήτισης σε κορεσμό, ενώ τέλος τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και ερμηνεύονται.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης, επιχειρείται μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο περιοχές μελέτης, τη Λίμνη Κουμουνδούρου και τη Λίμνη Κερκίνη. Επίσης, καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής αυτής και αναφέρονται οι ενδιαφέρουσες προοπτικές που αφορούν στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης και στις προεκτάσεις αυτού.

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης φιλοδοξεί να συμβάλει στη διερεύνηση της αξιοπιστίας των μαγνητικών μετρήσεων σε θέματα ιζηματολογικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και πιθανή ρύπανση από βαρέα μέταλλα) και ελπίζουμε, έτσι, να αποτελέσει έναυσμα ανάπτυξης της έρευνας στο χώρο του περιβαλλοντικού μαγνητισμού στην Ελλάδα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οικοσυστήματα της Γης είναι δυναμικά και επιρρεπή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες ικανούς να προκαλέσουν βλάβες, ασθένειες και θνησιμότητα. Ανάμεσα σε αυτούς τους παράγοντες, που είναι ποικίλων προελεύσεων, συγκαταλέγονται και οι αυξημένες συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα.

Βαρέα μέταλλα είναι ένας όρος που αναφέρεται σε μια μεγάλη ομάδα ιχνοστοιχείων βιομηχανικής και βιολογικής σημασίας, με ατομικές πυκνότητες μεγαλύτερες από 6gr/cm^3 . Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα ακόλουθα: Hg, Cd, Cu, As, Ni, Pb και Cr. Η σκόνη που περιέχει βαρέα μέταλλα διασκορπίζεται σε ολόκληρο τον πλανήτη με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και γίνεται ένα σημαντικό συστατικό των ιζημάτων, του εδάφους και της υδρόσφαιρας. Η χημεία, η βιοδυναμική και η βιοδιαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων στα διάφορα οικοσυστήματα είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος, κυρίως από την σκοπιά της μέτρησης και του προσδιορισμού του ρυπογόνου φορτίου, το οποίο προκαλεί βλαβερά αποτελέσματα στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

Πολυάριθμες ανθρωπογενείς πηγές προκαλούν αύξηση των συγκεντρώσεων των μαγνητικών ορυκτών και των βαρέων μετάλλων στα διάφορα οικοσυστήματα με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία τους και να προβάλλει, έτσι, επιτακτική η ανάγκη εντοπισμού των περιοχών αυτών. Συνήθως, για την επίτευξη του σκοπού αυτού πραγματοποιούνται προσεκτικές γεωχημικές αναλύσεις, οι οποίες, όμως, απαιτούν αρκετό χρόνο, καλά εξοπλισμένα εργαστήρια και είναι συχνά επίπονες και πολυέξοδες.

Γι' αυτόν τον λόγο, προέκυψε η ανάγκη εφαρμογής μεθόδων που να μην είναι χρονοβόρες και πολυέξοδες, τέτοιες όπως προσεγγιστικές μέθοδοι που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπίσουν και να οριοθετήσουν περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις ανθρωπογενούς προέλευσης μαγνητικών ορυκτών ή και ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις, να ανιχνεύσουν υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Έρευνες που γίνονται εδώ και δύο δεκαετίες (Thompson et al. 1980, King and Channell 1991, Scholger 1998, Hoffman et al. 1999) έχουν δείξει ότι ορισμένες μαγνητικές παράμετροι των ιζημάτων έχουν την ιδιότητα να αντικατοπτρίζουν αυξημένες συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα. Συγκεκριμένα, χημικές αναλύσεις διαφόρων σωματιδίων και υλικών που έχουν επιβαρυνθεί από ρυπογόνες ουσίες ανθρωπογενούς δραστηριότητας εμφανίζουν θετική συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας και στις συγκεντρώσεις των μετάλλων Cu, Fe, Pb και Zn. Κατά συνέπεια η μέτρηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να συντελέσει ουσιαστικά στον εύκολο, γρήγορο και χωρίς μεγάλο κόστος εντοπισμό ρύπανσης στο περιβάλλον. Σε πολυάριθμα περιβαλλοντικά ζητήματα μαγνητικές μετρήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί

για την αναγνώριση σωματιδίων που προέρχονται από εκπομπές αυτοκινήτων, από εργοστάσια και βιομηχανίες, από έργα κατασκευής δρόμων και γενικότερα από την ανθρώπινη δραστηριότητα σε αστικά περιβάλλοντα (Oldfield and Scoullos 1984, Knab et al 1999, Petrovsky et al. 2000, Chan et al. 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα άτομα ενός υλικού έχουν μια ηλεκτρονική δομή στην οποία τα ηλεκτρόνια θεωρούνται οι βασικοί παράγοντες της δημιουργίας των μαγνητικών ιδιοτήτων αυτού. Λόγω του ότι τα ηλεκτρόνια κατέχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο, η κυκλική τους κίνηση γύρω από τον πυρήνα των ατόμων δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο, με τη σειρά του, γίνεται η αιτία της δημιουργίας ενός μαγνητικού πεδίου. Έτσι, τα ηλεκτρόνια δημιουργούν μια μαγνητική ροπή λόγω της τροχιάς τους γύρω από τον πυρήνα ενώ ταυτόχρονα έχουν μαγνητικές ροπές λόγω spin.

Τα πετρώματα περιέχουν μαγνητικούς κόκκους που συμπεριφέρονται σαν μικρά δίπολα. Η μαγνητική συμπεριφορά των κόκκων αυτών οφείλεται στην τροχιά και το spin των ηλεκτρονίων του υλικού. Ανάλογα με τη συμπεριφορά τους όταν εκτίθενται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα φυσικά στοιχεία ταξινομούνται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες: στα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά, τα σιδηρομαγνητικά, τα αντισιδηρομαγνητικά και τα σιδηριμαγνητικά υλικά.

1.1.1 Διαμαγνητικά είναι τα υλικά που παρουσιάζουν αρνητικό μαγνητισμό. Αν και αποτελούνται από άτομα που δεν έχουν συνισταμένη μαγνητική ροπή, συμπεριφέρονται κατά ένα ιδιαίτερο τρόπο μέσα σε ένα εξωτερικό πεδίο, δηλαδή δημιουργείται μαγνητικό πεδίο αντίθετης διεύθυνσης με αυτό του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η μαγνήτιση αυτών των υλικών είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και πάντοτε πολύ μικρή. Όταν διακοπεί το εξωτερικό πεδίο, τότε η μαγνήτιση μηδενίζεται. Τα περισσότερα υλικά είναι διαμαγνητικά (χαλαζίας, γραφίτης, ασβεστίτης κ.α.). Αυτό συμβαίνει επειδή τα ηλεκτρόνια στα άτομα βρίσκονται συνήθως σε άρτιο αριθμό, έτσι ώστε οι περιστροφές να εξουδετερώνονται ανά δύο.

1.1.2. Παραμαγνητικά είναι τα υλικά που εμφανίζουν ασθενή θετική μαγνήτιση όταν επιδράσει σε αυτά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα άτομα των παραμαγνητικών υλικών έχουν μια συνισταμένη μαγνητική ροπή. Η μαγνήτιση είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου πεδίου. Ελαττώνεται με τη θερμοκρασία και ξαναγίνεται μηδενική όταν μηδενιστεί το

μαγνητικό πεδίο. Πολλά φυσικά ορυκτά όπως π.χ. ο ολιβίνης, πυρόξενος, βιοτίτης κ.α. παρουσιάζουν παραμαγνητική συμπεριφορά.

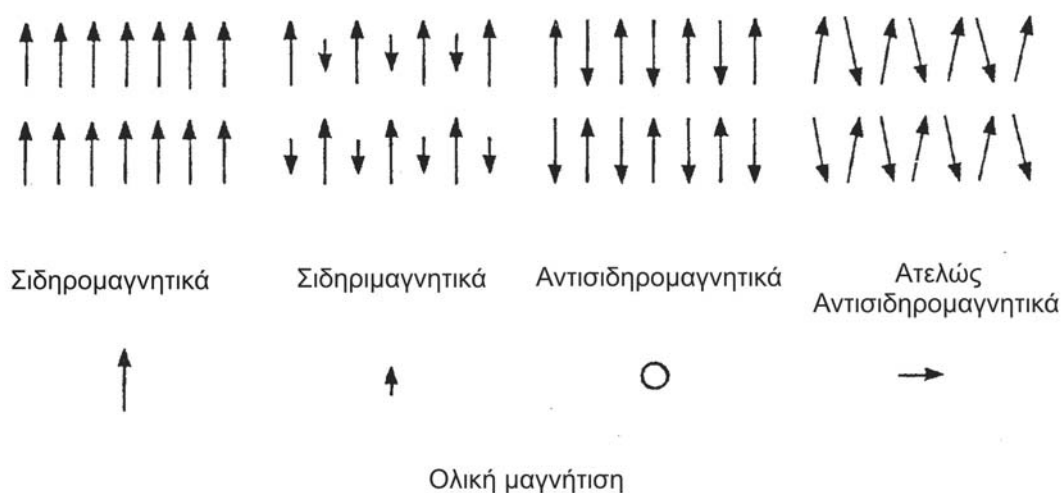
1.1.3. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα ζεύγη των ατόμων είναι παράλληλα μεταξύ τους και προκαλούν μια πολύ ισχυρή στιγμιαία μαγνήτιση ακόμα κι όταν δεν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Στα υλικά με αντιπαράλληλες συζεύξεις, η μαγνήτισή τους θεωρείται ότι αποτελείται από δυο ξεχωριστές μαγνητικές δομές, η κάθε μία από τις οποίες είναι μαγνητισμένη σε αντίθετη διεύθυνση από την άλλη. Όταν ένα μαγνητικό πεδίο επιδράσει σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, η μαγνήτιση του υλικού μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι την τιμή κορεσμού του υλικού.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερες ιδιότητες. Οι πιο χαρακτηριστικές είναι ότι μαγνητίζονται πολύ εύκολα και φθάνουν σε κατάσταση κορεσμού με την επίδραση πολύ μικρών εξωτερικών πεδίων, καθώς και ότι παρουσιάζουν υψηλές τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται ο σιδηρομαγνητισμός και οι ιδιότητες αυτές εξαφανίζονται όταν η θερμοκρασία του υλικού ταυτιστεί με μια θερμοκρασία που είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό, τη θερμοκρασία Curie. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, το υλικό συμπεριφέρεται ως παραμαγνητικό. Η θερμοκρασία φραγμού (θεωρία Néel), η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη θερμοκρασία Curie, είναι αυτή που χαρακτηρίζει το μεταβατικό στάδιο ενός υλικού από τη σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική φάση. Πραγματικά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι τα οξειδία του σιδήρου και του νικελίου.

1.1.4. Αντισιδηρομαγνητικά υλικά είναι εκείνα στα οποία εμφανίζεται ισχυρή αντιπαράλληλη σύζευξη των ατομικών μαγνητικών ροπών. Σε αυτά τα υλικά, σε θερμοκρασίες μικρότερες από τη θερμοκρασία Néel ακόμα κι όταν δεν επιδρά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι εσωτερικές δυνάμεις υπερανταλλαγής προκαλούν αντιπαράλληλους προσανατολισμούς στις μαγνητίσεις των δυο υποπλεγμάτων. Έτσι, τα υλικά αυτά – μακροσκοπικά - δεν εμφανίζουν μαγνήτιση εκτός πεδίου. Αντισιδηρομαγνητικό υλικό είναι ο μαγνητίτης. Σχεδόν όλα είναι ημιαγωγοί και οι μαγνητικές τους ιδιότητες είναι εντοπισμένες στα ιόντα του πλέγματος.

1.1.5. Στα σιδηριμαγνητικά υλικά, οι δυο μαγνητικές δομές δεν είναι ακριβώς όμοιες κι έτσι η στιγμιαία τους μαγνήτιση είναι παρόμοια με αυτή των σιδηρομαγνητικών υλικών, αλλά πολύ ασθενέστερη. Αυτή εξαρτάται από τη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δυο δομών όσον αφορά τον αριθμό και το μέγεθος των spin των ιόντων.

Οι μαγνητίσεις από περιστροφή είναι αντιπαράλληλες μεταξύ τους, αλλά έχουν διαφορετικό μέγεθος, έτσι ώστε αυτά τα υλικά να έχουν ασθενέστερη μαγνήτιση απ' ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά.



Σχήμα 1.1: Διάταξη των μαγνητικών ροπών στα σιδηρομαγνητικά, σιδηριμαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά και ατελή αντισιδηρομαγνητικά υλικά (Thompson and Oldfield, 1986).

Η θέρμανση των σιδηριμαγνητικών υλικών αποπροσανατολίζει τα spin και στη θερμοκρασία Curie καταστρέφεται η διάταξη τους, το υλικό απομαγνητίζεται και αποκτά σχεδόν παραμαγνητική συμπεριφορά. Οι μαγνητικές ιδιότητες αυτών των υλικών είναι μεγαλύτερης έντασης από αυτές των διαμαγνητικών, παραμαγνητικών και αντισιδηρομαγνητικών υλικών.

Τόσο στα σιδηρομαγνητικά (οξειδία σιδήρου και νικελίου) όσο και στα σιδηριμαγνητικά υλικά (μαγνητίτης), μετά τη χαρακτηριστική θερμοκρασία **Curie**, ξεπερνιούνται οι ενδοατομικές αποστάσεις και συντρίβονται οι συνδέσεις ανταλλαγής και υπερ-ανταλλαγής. Στις αντισιδηρομαγνητικές ουσίες γκετίτη και αιματίτη, η θερμοκρασία Néel είναι εκείνη η θερμοκρασία στην οποία σπάζουν οι συνδέσεις μεταξύ των δομών στην ίδια θερμοκρασία με αυτή των δια-ατομικών συνδέσεων. Κάθε μαγνητικό ορυκτό έχει μία και μοναδική θερμοκρασία Curie ή Néel κι έτσι ο προσδιορισμός αυτής της θερμοκρασίας είναι διαγνωστικός για τα ορυκτά και χρησιμοποιείται για να διακρίνουμε τις ακριβείς συστάσεις στους τιτανομαγνητίτες και ιλμενοαιματίτες.

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία Curie, τα μόρια όλων των σιδηρο- και σιδηριμαγνητικών υλικών συμπεριφέρονται παραμαγνητικά, δηλαδή η μαγνητική τους επιδεκτικότητα μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία.

1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΡΥΚΤΑ

Τα μαγνητικά ορυκτά είναι, κυρίως, οξειδία του σιδήρου τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

α) Ο μαγνητίτης Fe_3O_4 είναι σιδηριμαγνητικό υλικό με θερμοκρασία Curie 575°C . Το βρίσκουμε στα περισσότερα πυριγενή πετρώματα, σε αρκετά μεταμορφωμένα και ιζηματογενή και θεωρείται ένα από τα πιο άφθονα όξινα ορυκτά. Οι ιδιότητες του μαγνητίτη εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Πολλοί φυσικοί μαγνητίτες περιέχουν προσμίξεις (συνήθως Ti, Al, Mg). Η οξειδωση του μαγνητίτη, σε θερμοκρασία μικρότερη των 200°C , δημιουργεί ένα άλλο ορυκτό, το μαγγελίτη, ο οποίος έχει τη σύσταση του αιματίτη αλλά την κυβική δομή του μαγνητίτη. Οι μαγνητικές ιδιότητες του μαγγελίτη είναι παρόμοιες με αυτές του μαγνητίτη, ενώ καταστρέφεται με θέρμανση στους 350°C και μετατρέπεται πλήρως σε αιματίτη.

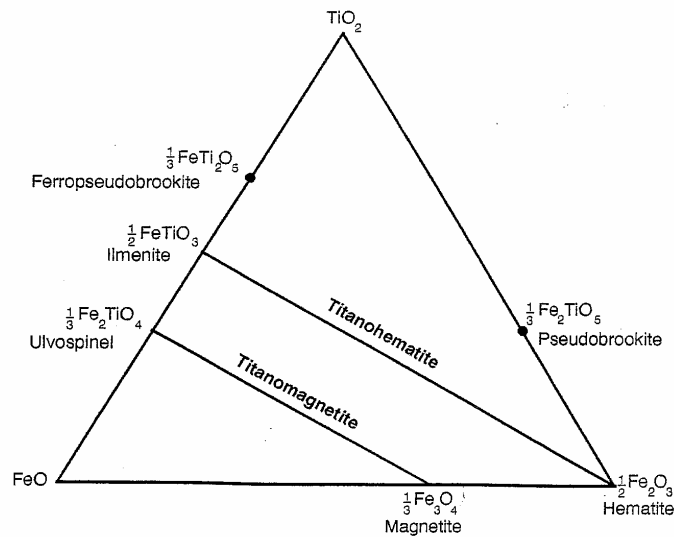
β) Ο αιματίτης ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) είναι αντισιδηρομαγνητικό ορυκτό και αποτελεί κοινό στοιχείο πολλών όξινων πυριγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων. Οι μαγνητικές του ιδιότητες εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων του, τις προσμίξεις και τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία Néel του καθαρού αιματίτη είναι 675°C , ενώ είναι λίγο μικρότερη όταν περιέχει προσμίξεις.

γ) Ο υκετίτης ($\alpha\text{-FeOOH}$) είναι αντισιδηρομαγνητικό υλικό με θερμοκρασία Néel μεταξύ 60° και 170°C . Είναι ασταθής και όταν θερμανθεί σε θερμοκρασίες 300 έως 400°C στον αέρα μεταπίπτει σε μια φτωχή κρυσταλλική μορφή του αιματίτη. Σπανίζει σε λιμναίες ή ωκεάνιες αποθέσεις και σε χώματα ή ιζήματα σπηλαίων.

Ο σίδηρος είναι, επίσης, συστατικό ανθρακικών ορυκτών, όπως ο σιδερίτης (FeCO_3) και ο ανκερίτης $[(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})\text{CO}_3]$ που είναι συστατικά ιζηματογενών πετρωμάτων.

Γενικά, τα οξειδία του σιδήρου (μαγνητίτης, αιματίτης και μαγγελίτης) είναι τα πλέον καθοριστικά των μαγνητικών ιδιοτήτων του εδάφους, το οποίο κυρίως αποτελείται από ανόργανα συστατικά. Όμως, ακόμη και τα εδάφη με οργανικά συστατικά παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες λόγω της συγκέντρωσης μικρών μαγνητικών σωματιδίων από μαγνητικά βακτήρια και θαλάσσιους ή λιμναίους οργανισμούς (Scollar et al, 1990).

Πρέπει να τονιστεί ότι οι ιδιότητες των μαγνητικών αυτών ορυκτών μπορεί να διαφέρουν στη φύση από αυτές που καθορίζονται από τις εργαστηριακές τους μορφές. Οι ιδιότητες των περισσοτέρων φυσικών μαγνητικών ορυκτών έχουν μελετηθεί εξαιτίας της μεγάλης τους σημασίας σε μαγνητικές μελέτες. Και αυτό επειδή η υψηλή ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ή η χημική τους αστάθεια τα καθιστούν άχρηστα για βιομηχανική χρήση.



Σχήμα 1.2: Τριγωνικό διάγραμμα $\text{TiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$.

1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ, ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ

1.3.1 Μαγνητική Ανισοτροπία

Μαγνητική ανισοτροπία ονομάζεται η εξάρτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός υλικού από τη διεύθυνση κατά την οποία μετρώνται τα μαγνητικά μεγέθη. Έτσι, κάθε σώμα που οι μαγνητικές του ιδιότητες μεταβάλλονται με την διεύθυνση λέγεται μαγνητικά ανισότροπο. Γενικά, οι βασικές μορφές μαγνητικής ανισοτροπίας είναι οι ακόλουθες:

A. Ανισοτροπία σχήματος: Σχετίζεται με το σχήμα των μαγνητικών σωμάτων και σύμφωνα με αυτήν τα υλικά μαγνητίζονται ευκολότερα παράλληλα προς τον μακρύ άξονα συμμετρίας τους. Έτσι, αν ένα δείγμα έχει σχήμα σφαιρικό και δεχτεί την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, τότε μαγνητίζεται ανεξάρτητα από την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Αν, όμως, το σχήμα του δεν είναι σφαιρικό, τότε μαγνητίζεται πιο εύκολα όταν το πεδίο δρα κατά μήκος της πιο μεγάλης του διάστασης. Ένα πεδίο με διεύθυνση παράλληλη προς την μικρότερη διάσταση του δείγματος, πρέπει να είναι πολύ ισχυρό για να προκαλέσει ίδιας έντασης εσωτερικό μαγνητικό πεδίο με αυτό που θα προκαλέσει ένα πεδίο που δρα κατά την μεγαλύτερη διάσταση. Αυτό σημαίνει ότι το σχήμα και μόνο μπορεί να προκαλέσει μαγνητική ανισοτροπία.

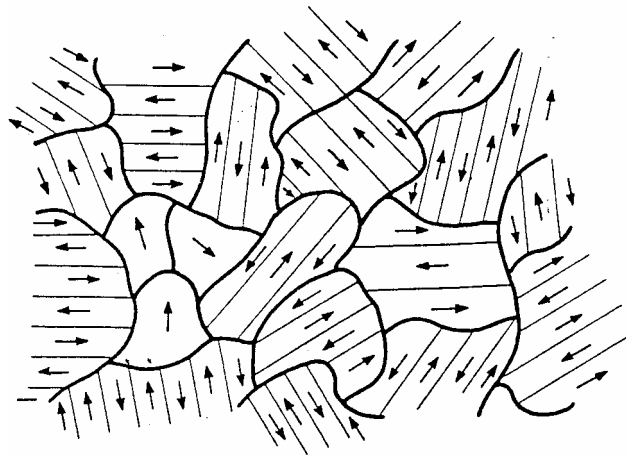
B. Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία: Οφείλεται στην εσωτερική γεωμετρία της κρυσταλλικής δομής. Έτσι, παρατηρούνται διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες ανάλογα με τους διαφορετικούς άξονες της δομής. Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία είναι πολύ σημαντική για το σύνολο των ορυκτών που είναι αντισιδηρομαγνητικά, όπως ο αιματίτης και ο γκαιπίτης. Σ' αυτά τα ορυκτά η μαγνητική ανισοτροπία οδηγεί σε χαμηλής θερμοκρασίας μαγνητική συμπεριφορά, ως αποτέλεσμα της ευαισθησίας της ανισοτροπίας στην θερμοκρασία.

Γ. Ανισοτροπία τάσης: Ανισοτροπία τάσης ονομάζεται η αλλαγή των μαγνητικών ιδιοτήτων λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής. Εξαιτίας αυτής έχουμε αλλαγή του μεγέθους ενός δείγματος όταν αυτό εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο.

1.3.2 Μέγεθος κόκκων

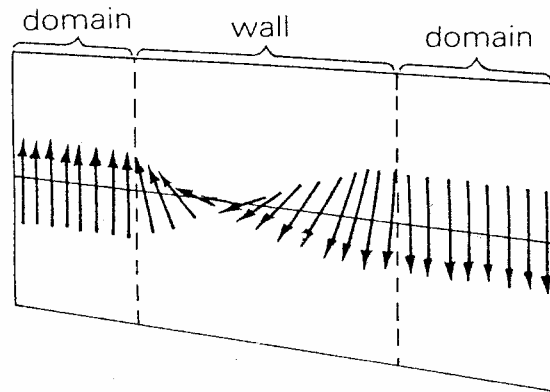
Το μέγεθος των κόκκων αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών. Η θεώρηση αυτή οφείλεται στον Weiss και υιοθετήθηκε από τον Néel με την θεωρία των μαγνητικών περιοχών ή κυψελίδων (magnetic domains), για να εξηγηθεί η απομαγνητική κατάσταση των υλικών με φυσική μαγνήτιση.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι μεγάλοι σιδηρομαγνητικοί κόκκοι αποτελούνται από μικρότερες μονάδες που καλούνται «περιοχές» ή κυψελίδες (domains), η κάθε μία από τις οποίες είναι προσανατολισμένη παράλληλα με μία από τις διευθύνσεις «εύκολης» μαγνήτισης σε σχέση με το κρυσταλλικό πλέγμα.



Σχήμα 1.3 :Διάταξη μαγνητικών περιοχών (κυψελίδων).

Οι κόκκοι του μαγνητίτη αποτελούνται από πολλές μαγνητικές κυψελίδες (MD – Multidomain grains) ενώ οι κόκκοι του αιματίτη αποτελούνται, συνήθως, από μία μαγνητική κυψελίδα (SD – Single domain grains). Το κριτικό όριο κάτω από το οποίο οι κόκκοι του μαγνητίτη θεωρούνται SD από MD είναι περίπου 300nm (σε διάμετρο) ενώ για τον αιματίτη είναι περίπου 1nm. Κάθε «περιοχή» είναι μαγνητισμένη σε διαφορετικές διευθύνσεις με συνέπεια την μικρού μεγέθους συνισταμένη μαγνητική ροπή. Στα τοιχώματα των «περιοχών» (Block walls) υπάρχει μια σταδιακή περιστροφή των ατομικών spins και άρα μια αργή αλλαγή της διεύθυνσης της μαγνήτισης.



Σχήμα 1.4 : Σταδιακή περιστροφή των ατομικών spins. Φαίνονται οι μαγνητικές περιοχές (domains) και τα τοιχώματα (walls).

Η ελαχιστοποίηση της ολικής δυναμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα τοιχώματα αυτά ισοδυναμεί με την κατάσταση ισορροπίας του κόκκου. Για μεγάλους κόκκους, η ισορροπία επιτυγχάνεται με πολλές κυψελίδες μαγνήτισης διαφορετικών διευθύνσεων, με αποτέλεσμα μικρή μαγνητική ροπή. Για μικρούς κόκκους, με διαστάσεις λίγο μεγαλύτερες από αυτές των τοιχωμάτων, η μικρότερη δυναμική ενέργεια επιτυγχάνεται όταν αυτοί περιέχουν μόνο μία μαγνητική κυψελίδα. Αυτοί οι SD κόκκοι έχουν πολύ μεγαλύτερη μαγνητική επιδεκτικότητα από αυτήν των MD κόκκων. Κατά συνέπεια, η μεγαλύτερη μαγνήτιση προέρχεται από SD κόκκους με διάμετρο περίπου 40-80nm.

Οι SPD (superparamagnetic domain) κόκκοι είναι πολύ μικρότερου μεγέθους από τους SD κόκκους και είναι θερμικά ασταθείς, ώστε η διεύθυνση της ολικής μαγνητικής ροπής ενός κόκκου να μπορεί να αντιστραφεί από έναν άξονα εύκολης μαγνήτισης σε έναν άλλο. Υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική ροπή ενός κόκκου βρίσκεται για μεγαλύτερο διάστημα προσανατολισμένη προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η συνιστάμενη συμπεριφορά είναι ανάλογη με το κλασσικό παραμαγνητικό μοντέλο, με μαγνητική ροπή του κόκκου να αντικαθιστά αυτή του κάθε ατόμου. Επομένως, αφού η μαγνητική ροπή του κόκκου είναι μεγαλύτερη από τη μαγνητική ροπή του ατόμου, ο προσανατολισμός τους μέσα στο πεδίο είναι ισχυρότερος και άρα η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι υψηλότερη και είναι ανάλογη προς τον όγκο του κόκκου. Αυτή η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική για SPD κόκκους.

Όταν ένα εξωτερικό πεδίο εφαρμοστεί σε MD (Multidomain) κόκκους, το μέγεθος των κυψελίδων με μαγνήτιση παράλληλη προς αυτήν του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αυξάνει (εις βάρος των κυψελίδων με αντίθετη μαγνήτιση) για να αποκτήσει την

ελάχιστη δυναμική ενέργεια, δηλαδή μία νέα κατάσταση ισορροπίας με μαγνητική ροπή παράλληλη προς αυτή του μαγνητικού πεδίου.

Όμως, μόνο μερικές περιοχές, με μαγνήτιση αρχικά αντίθετη προς το εξωτερικό πεδίο, αντιστρέφουν την διεύθυνση της μαγνήτισης τους. Έτσι, ακόμα και η νέα κατάσταση ισορροπίας αποτελείται από περιοχές με αντίθετες διευθύνσεις μαγνήτισης που ισοδυναμούν με μικρή μαγνητική ροπή. Για τον μαγνητίτη, η δύναμη απομαγνήτισης είναι της τάξεως των 10-100 Oersteds.

Αντίθετα, οι SD (Single domain) κόκκοι διατηρούν την κατάσταση της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας μέσω της αντιστροφής της διεύθυνσης μαγνήτισης. Οι SD κόκκοι δεν μπορούν να μεγαλώσουν σε μέγεθος, αφού βρίσκονται ήδη σε κατάσταση ισορροπίας (ελάχιστη δυναμική ενέργεια) και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν μεγαλύτερη μαγνητική επιδεκτικότητα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντιστροφή της μαγνήτισης μπορεί να προέλθει από θερμική ενέργεια εκτός του κόκκου. Για τον λόγο αυτό, η μαγνητική ροπή των υλικών που περιέχουν SD κόκκους τείνει να αυξάνει σταδιακά με τον χρόνο, καθώς αυτοί τοποθετούνται σε ένα μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό της αύξησης του μαγνητισμού ονομάζεται “christened magnetic viscosity”.

1.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ - ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα ιζήματα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες:

1. Αυτά που προέκυψαν από τη διάβρωση των πετρωμάτων και μεταφέρθηκαν με τον αέρα, το νερό ή τη βαρύτητα στους χώρους απόθεσης.
2. Αυτά που δημιουργήθηκαν με χημικές διεργασίες, με ή χωρίς την παρουσία βιολογικών διαδικασιών, μέσα στους χώρους απόθεσης (in situ).

Οι φυσικές διαδικασίες της απόθεσης έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για όλα τα ιζήματα. Μετά την απόθεση, τα χαλαρά ιζήματα τείνουν να συμπαγοποιηθούν με τη βοήθεια φυσικών και χημικών αντιδράσεων μεταξύ των ορυκτών και των ρευστών που μεταναστεύουν μέσω των πόρων τους.

Τα περισσότερα κλαστικά ιζήματα αποτίθενται συνήθως σε υγρό περιβάλλον. Ακόμα και αν η απόθεση γίνεται με τον αέρα ακολουθούνται παρόμοιες διαδικασίες. Τα κλαστικά στοιχεία (κόκκοι) που δημιουργούνται σε τέτοιες αποθέσεις αποκτούν φυσιολογικά μια μαγνήτιση, είτε από θερμικές είτε από χημικές διαδικασίες. Η σταθερότητα της μαγνήτισης τέτοιων κόκκων είναι χαρακτηριστική του μεγέθους τους και της σύνθεσης των αρχικών συστατικών. Το σχήμα και η μορφή των κόκκων ποικίλει και είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των διαβρωτικών και μεταφορικών παραγόντων.

Κατά την διάρκεια της απόθεσης, όλα τα μαγνητικά συστατικά προσανατολίζονται υπό την επίδραση των γεωμαγνητικών, των βαρυτικών και των πάσης φύσεως δυνάμεων που επιδρούν σ' αυτά. Όλοι οι κόκκοι δέχονται την επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας και της ροής του νερού. Οι σφαιρικοί κόκκοι, με διαμέτρους μεγαλύτερες των 30 έως 50 μm , και οι επιμήκεις κόκκοι περιστρέφονται συστηματικά έξω από τη μαγνητική διεύθυνση έτσι ώστε οι μεγάλοι άξονές τους να γίνονται παράλληλοι με το βυθό και κάθετοι με τη φορά του ρεύματος, αν αυτό κινείται με ταχύτητες μεγαλύτερες από 1cm/sec. Οι κόκκοι που έχουν ασύμμετρη μορφή τείνουν να προσανατολίσουν τους μεγάλους και τους ενδιάμεσους άξονές τους σχεδόν παράλληλα με τη διεύθυνση απόθεσης του ιζήματος. Η απόθεση και στερεοποίηση των επιμήκων κόκκων, που συνήθως μαγνητίζονται κατά μήκος των μεγάλων τους αξόνων, έχει μαγνητικό ενδιαφέρον. Αυτή η απόθεση προκαλεί μια μικρή και καθαρή μαγνήτιση στα ιζήματα σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Στις κανονικές συνθήκες μιας αργής ιζηματογένεσης, με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, ο μετα- ιζηματογενής επαναπροσανατολισμός των σιδηρομαγνητικών υλικών, που η διάμετρος τους είναι μικρότερη από λίγα μm , γίνεται πολύ γρήγορα. Το γεωμαγνητικό πεδίο είναι πολύ ασθενικό για να προκαλέσει επαναπροσανατολισμό των μεγάλων κόκκων. Αν τα ιζήματα έχουν αποτεθεί σε περιοχή όπου έχουμε διακυμάνσεις της στάθμης του νερού, τότε είναι σαν να δέχεται την

εναλλαγή της επίδρασης ξήρανσης και ύγρυνσης. Παρόμοιες συνθήκες προκύπτουν από τα οργανικά υλικά που προκαλούν παραγωγή μη διαλυτών αερίων. Αποτέλεσμα της επίδρασης του νερού στη διαδικασία ιζηματογένεσης είναι η μείωση του προσανατολισμού των μεγάλων αξόνων των κόκκων και της καθαρής μαγνητικής έγκλισης μακριά από το γεωμαγνητικό πεδίο.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι μερικά ιζήματα έχουν φυσική παραμένουσα μαγνήτιση που προκύπτει από το γεωμαγνητικό πεδίο κατά το χρόνο της απόθεσής τους. Ιζήματα που αποτίθενται πολύ γρήγορα ή έχουν μικρό πορώδες συνοδεύονται από σημαντικές διαφορές στην έγκλιση και την κλίση του σχηματισμού και έτσι η παραμένουσα μαγνήτισή τους εμφανίζεται να έχει μικρότερη τιμή από αυτή του περιβάλλοντος γεωμαγνητικού πεδίου. Όλοι οι κόκκοι που έχουν μεγέθη μικρότερα από 0.1 μm προσανατολίζονται τυχαία από διάφορες κινήσεις, ενώ οι ελαφρώς μεγαλύτεροι κόκκοι αποκτούν προσανατολισμούς μετά την απόθεσή τους μέσα στο περιβάλλον γεωμαγνητικό πεδίο. Μεγαλύτερα μόρια, που έχουν διαμέτρους από 10 έως 20 μm , διατηρούν τον προσανατολισμό που ήδη απέκτησαν με φυσικές μεθόδους κατά τη διάρκεια των διαδικασιών απόθεσης. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο πιθανότερο είναι να αποκτήσουν, με ακρίβεια, τη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου.

1.5 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

Όταν ένα σώμα εκτεθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε τα στοιχειώδη δίπολα από τα οποία αποτελείται τείνουν να αποκτήσουν την διεύθυνση της έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και έτσι το σώμα αποκτά κάποια μαγνήτιση, η οποία ισούται με:

$$J = M / V$$

όπου M είναι η μαγνητική ροπή και V ο όγκος του σώματος.

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 την σχέση:

$$J = k H$$

όπου k είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα.

1.5.1 ΕΙΔΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Η αρχική μαγνήτιση που αποκτά ένα υλικό υπό την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ονομάζεται κύρια μαγνήτιση. Από το χρόνο δημιουργίας του πετρώματος μέχρι το χρόνο δειγματοληψίας μπορεί να αποκτηθούν και άλλες μαγνητίσεις που ονομάζονται δευτερεύουσες. Το διανυσματικό άθροισμα της κύριας και των δευτερευουσών μαγνητίσεων, που υπάρχουν στο πέτρωμα, ονομάζεται φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (NRM).

ΚΥΡΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΕΙΣ

1. Φυσική παραμένουσα μαγνήτιση

Τα πετρώματα, τα ιζήματα και τα εδάφη αποκτούν παραμένουσα μαγνήτιση με φυσικές διαδικασίες. Τέτοιες μαγνητίσεις δεν είναι τόσο ισχυρές αλλά μπορούν να είναι σταθερές και να δημιουργούνται ακόμα και σε ασθενές μαγνητικό πεδίο, όπως αυτό της γης. Τα ιζηματογενή πετρώματα αποκτούν συνήθως δύο ειδών φυσική παραμένουσα μαγνήτιση (N.R.M): α. την εξ απόθεσης (depositional) παραμένουσα μαγνήτιση και β. τη χημική παραμένουσα μαγνήτιση.

Καθώς αποτίθεται ένα ίζημα στο νερό, τα μόρια του τείνουν να αυτοπροσανατολιστούν σε θέσεις με τη μικρότερη ενέργεια (κατά μήκος της διεύθυνσης του περιβάλλοντος πεδίου). Η εξ απόθεσης (depositional) παραμένουσα μαγνήτιση αποκτάται καθώς τα ιζήματα αποθέτονται. Συχνά στα ιζήματα παρατηρούνται και οι δύο

τύποι μαγνήτισης: η εξ απόθεσης παραμένουσα μαγνήτιση που οφείλεται στον μαγνητίτη και η χημική παραμένουσα μαγνήτιση που οφείλεται στον αιματίτη.

2.Θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση

Όταν ένα μαγνητικό ορυκτό ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, τότε αποκτά θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση. Αν το δείγμα είναι ισότροπο, η μαγνήτιση είναι παράλληλη με αυτή του μαγνητικού πεδίου και για μικρά πεδία η ένταση της παραμένουσας είναι ανάλογη του πεδίου. Επιπλέον, η μαγνήτιση αυτή είναι σταθερή, γεγονός που σημαίνει ότι επιβιώνει για μικρές αλλαγές στο γεωλογικό χρόνο. Η ένταση της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης ενός πολυκρυσταλλικού κόκκου είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή ενός μονοκρυσταλλικού κόκκου.

3.Χημική παραμένουσα μαγνήτιση

Η χημική παραμένουσα μαγνήτιση αποκτάται κατά την διαδικασία εκείνη όπου κάποια από τα συστατικά του ιζήματος υφίστανται χημικές αλλαγές, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία Curie, οπότε τα νέα ορυκτά μαγνητίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτή η μαγνήτιση έχει μικρότερη τιμή από την θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση καθώς τόσο η μαγνήτιση κορεσμού όσο και η ανισοτροπία, είναι μικρότερες σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από την θερμοκρασία Curie. Εντούτοις, όσον αφορά τη σταθερότητα τα δύο είδη μαγνήτισης εμφανίζονται εξίσου σταθερά.

Η χημική παραμένουσα μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η χημική ανάπτυξη του νέου ορυκτού και από τη διάρκεια εφαρμογής του πεδίου.

4.Θραυσματοπαγής ή αποθετική παραμένουσα μαγνήτιση

Καθώς μαγνητικοί κόκκοι πέφτουν στο νερό, τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και να αποκτήσουν κατά αυτόν τον τρόπο θραυσματοπαγή παραμένουσα μαγνήτιση. Η μαγνήτιση αυτή αποκτά τον τελικό προσανατολισμό της μόνο όταν το ίζημα έχει συμπιεστεί λόγω του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων και όταν το νερό έχει αποβληθεί από τη διαδικασία της συμπαγοποίησης. Βεβαίως, μετά την απόθεση, τα υγρά μη συνεκτικά ιζήματα συχνά διαταράσσονται λόγω πτώσης ή βιοδιατάραξης (bioturbation) με αποτέλεσμα η θραυσματοπαγής μαγνήτιση να χάνει το μεγαλύτερο μέρος της συνεκτικότητας της. Σε ορισμένα, αργής ιζηματογένεσης ιζήματα η συμπαγοποίηση μπορεί να διαρκέσει δεκάδες ή και εκατοντάδες χρόνια ενώ σε άλλα ιζήματα η αποθετική παραμένουσα

μαγνήτιση μπορεί να αποκτηθεί ακόμη και μέσα σε λίγες μέρες ή εβδομάδες μετά την απόθεση.

ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΕΙΣ

1.Ιξώδης μαγνήτιση

Η ιξώδης μαγνήτιση μπορεί να αποκτηθεί όταν ένα μαγνητικό υλικό εκτεθεί σε ένα νέο μαγνητικό πεδίο. Αυτή εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την σύσταση του υλικού και από τη διάρκεια και ισχύ του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι μαγνητικοί κόκκοι που βρίσκονται κοντά στο σταθερό όριο μονοκρυσταλλικού – υπερπαραμαγνητικού κόκκου συνεισφέρουν περισσότερο στη ιξώδη μαγνήτιση των φυσικών υλικών. Οι περισσότερες ιξώδεις παραμένουσες μαγνητίσεις έχουν διευθύνσεις παραπλήσιες με τη διεύθυνση του γεωμαγνητικού πεδίου των τελευταίων 100 χρόνων.

2. Ισόθερμη μαγνήτιση

Ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση ονομάζεται η παραμένουσα μαγνήτιση που αποκτάται με την πρόσθετη έκθεση ενός υλικού σε συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο υπό σταθερή θερμοκρασία (συνήθως θερμοκρασία δωματίου). Το μέγεθος της μαγνήτισης αυτής εξαρτάται από την ισχύ του σταθερού πεδίου που εφαρμόζεται. Η μέγιστη ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση που επιτυγχάνεται ονομάζεται ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση κορεσμού SIRM.

3.Ανυστερητική παραμένουσα μαγνήτιση

Η ανυστερητική παραμένουσα μαγνήτιση μπορεί να αποκτηθεί όταν ένα δείγμα υποβάλλεται σε ισχυρό μαγνητικό εναλλασσόμενο πεδίο, το οποίο σταδιακά μηδενίζεται με την παρουσία ενός μικρού σταθερού πεδίου. Η ανυστερητική (χωρίς υστέρηση) παραμένουσα μαγνήτιση ορισμένες φορές αναφέρεται και σαν ιδεατή παραμένουσα. Η ένταση της ανυστερητικής παραμένουσας μαγνήτισης αυξάνεται με την εφαρμογή ενός ισχυρότερου σταθερού ή εναλλασσόμενου πεδίου μέχρι την επίτευξη κορεσμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Περιβαλλοντικό μαγνητισμό (environmental magnetism) ονομάζουμε το πεδίο εκείνο της επιστήμης του μαγνητισμού που συνδέεται με τις εφαρμογές των μαγνητικών ιδιοτήτων των ορυκτών σε καταστάσεις στις οποίες η μεταφορά, η απόθεση και ο μετασχηματισμός των μαγνητικών κόκκων επηρεάζονται από περιβαλλοντικές διεργασίες της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της λιθόσφαιρας. Η πρώτη διεξοδική περιγραφή του περιβαλλοντικού μαγνητισμού ως διακεκριμένου πεδίου μελέτης έγινε το 1980. Οι Thompson et al (Science, 1980) έδειξαν πώς κάποιες μαγνητικές παράμετροι των ορυκτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο φάσμα περιβαλλοντικών μελετών. Η έκδοση του “Environmental magnetism” από τους Thompson and Oldfield (1986) έκανε το αντικείμενο γνωστό σε ένα μεγαλύτερο αριθμό ερευνητών και ανάδειξε την πρακτική σημασία των εφαρμογών του περιβαλλοντικού μαγνητισμού σε διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι Βρετανοί ερευνητές διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην εδραίωση του περιβαλλοντικού μαγνητισμού ως ανεξάρτητου πεδίου έρευνας ενώ σήμερα οι τεχνικές του χρησιμοποιούνται από ερευνητές στη Βόρεια Αμερική και στον κόσμο ολόκληρο.

Τα τελευταία χρόνια, ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός βρίσκει εφαρμογές σε ολοένα και περισσότερα αντικείμενα επιστημονικής μελέτης. Γενικά, τα αντικείμενα αυτά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες.

Καταρχήν, ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός σχετίζεται με τη χρήση των ποικίλων μαγνητικών ορυκτών με σκοπό την μελέτη των φυσικών διαδικασιών απόθεσής τους στα διάφορα περιβάλλοντα. Σ' αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται: η συσχέτιση των πυρήνων ιζημάτων με τη χρήση μετρήσεων μαγνητικής επιδεκτικότητας, η μελέτη της συμπεριφοράς του γεωμαγνητικού πεδίου, η ανάλυση των αποθετικών και μετα-αποθετικών μηχανικών διαδικασιών που επηρεάζουν τα ιζήματα και η εξέταση των μαγνητικών εκείνων παραμέτρων που μπορούν να δώσουν πληροφορίες για παλαιοκλιματικές και περιβαλλοντικές αλλαγές.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την μελέτη των διαδικασιών εκείνων που είναι υπεύθυνες για μεταβολές στα διάφορα μαγνητικά ορυκτά που αποθέτονται σε ένα ιζηματογενές περιβάλλον. Αυτές οι έρευνες της προέλευσης των διαφόρων υλικών

συμπεριλαμβάνουν μελέτες στα ιζήματα που αποτίθενται στις λεκάνες απορροής των λιμνών, στις διακυμάνσεις των συνεισφορών στα ιζήματα βαθιάς θάλασσας από υλικά αιολικής ή παγετώδους προέλευσης και στην προέλευση των ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Μελετά την πιθανή προέλευση μαγνητικών σωματιδίων από ανθρωπογενή δράση και την συσχέτιση αυτών με τις τιμές διαφόρων μαγνητικών παραμέτρων.

Τέλος, ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός μελετά τις *in situ* αλλαγές και μετασχηματισμούς των μαγνητικών ορυκτών σε ιζηματογενή περιβάλλοντα, όπως είναι η εδαφογένεση, ο αυθιγενετικός ή διαγενετικός σχηματισμός σιδηριμαγνητικών φάσεων, η διάλυση μαγνητικών ορυκτών λόγω της διαγένεσης και η συνεισφορά του βιομαγνητισμού στον ιζηματογενή μαγνητισμό.

Πολυάριθμα είναι, επομένως, τα πεδία στα οποία ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός μπορεί να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις, όπως π.χ. στην κλιματολογία, οικολογία, γεωμορφολογία, υδρολογία, λιμνολογία, ωκεανογραφία, ιζηματολογία και ακόμη σε ζητήματα προστασίας του περιβάλλοντος.

2.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΛΙΜΝΑΙΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ

Η έρευνα των λιμναίων ιζημάτων στοχεύει συνήθως στην αναδόμηση των περιβαλλοντικών συνθηκών του παρελθόντος καθώς και στη διερεύνηση των σύγχρονων περιβαλλοντικών διεργασιών με σκοπό τη λύση προβλημάτων σε μια πιο μακροχρόνια προοπτική. Τον καλύτερο τρόπο για την επίτευξη τέτοιου είδους στόχων, συχνά αποτελεί η μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των ιζημάτων μιας λίμνης και της ευρύτερης λεκάνης απορροής της (Borman and Likens 1969, Oldfield 1977, O'Sullivan 1979).

Στα πλαίσια μιας τέτοιου είδους μελέτης, η εκτίμηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και η αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών, στο παρόν και στο μέλλον, συχνά εξαρτώνται από: α) την σύγκριση των σημερινών παρατηρήσεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων με δεδομένα που προέρχονται από την ανάλυση ιζημάτων που υφίστανται έντονες ανθρωπογενείς επιδράσεις (Oldfield et al 1983b), β) την αναγνώριση με λεπτομέρεια της ανθρώπινης επίδρασης σε κάποιες διεργασίες της βιόσφαιρας, όπως π.χ. της διάβρωσης του εδάφους (Dearing 1983), της συνεχούς μεταβολής των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων (Edgington and Robbins 1976) ή της πρωτογενούς παραγωγής τους (Battarbee 1978) και γ) την σύνδεση των σημερινών μελετών και της ιστορικής καταγραφής με σκοπό την ανάπτυξη μιας αδιάσπαστης αλληλουχίας στοιχείων σχετικά με τις περιβαλλοντικές διεργασίες, με την βοήθεια των οποίων καταστάσεις και ρυθμοί του παρελθόντος και του παρόντος μπορούν να συγκριθούν (Oldfield 1977, 1983b).

Έτσι, τη τελευταία δεκαετία, σε πάρα πολλές ιζηματολογικές και περιβαλλοντικές μελέτες σε λιμναία και θαλάσσια περιβάλλοντα πραγματοποιούνται και μαγνητικές μετρήσεις με σκοπό τον εμπλουτισμό των πληροφοριών που τυχόν λαμβάνονται με άλλες μεθόδους.

2.3 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΣΤΑ ΛΙΜΝΑΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

Τα μαγνητικά ορυκτά που συναντάμε στα λιμναία ιζήματα είναι πολυάριθμων τύπων και προελεύσεων. Κατά συνέπεια, η μελέτη των μεταβολών των μαγνητικών ορυκτών στα ιζήματα συνδέεται άμεσα με την εκτίμηση των διαφόρων πηγών προέλευσης τους, την αναγνώριση των κύριων τύπων που επικρατούν και τη διαδρομή που αντιπροσωπεύουν. Από αυτή τη σκοπιά, η συμβατική διάκριση ανάμεσα σε αυθιγενή και αλλόχθονα ιζήματα είναι ιδιαίτερως χρήσιμη.

Τα αυθιγενή μαγνητικά ορυκτά είναι αυτά που σχηματίστηκαν με χημικές ή βιογενείς διαδικασίες *in situ*, κατόπιν απόθεσης του ιζήματος. Είναι, δηλαδή, το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού των μαγνητικών ή μη μαγνητικών ορυκτών, που ήδη έχουν αποτεθεί στην λίμνη, σε νέους μαγνητικούς τύπους. Αντίθετα, τα αλλόχθονα μαγνητικά υλικά είναι αυτά που μεταφέρονται μέσα στην λίμνη από περιοχές έξω από αυτήν. Μπορεί να προέρχονται από περιοχές εντός της λεκάνης απορροής ή να έχουν μεταφερθεί (για παράδειγμα από τον αέρα ή τον άνθρωπο) από πηγές που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση (αλλού-αλλόχθονα).

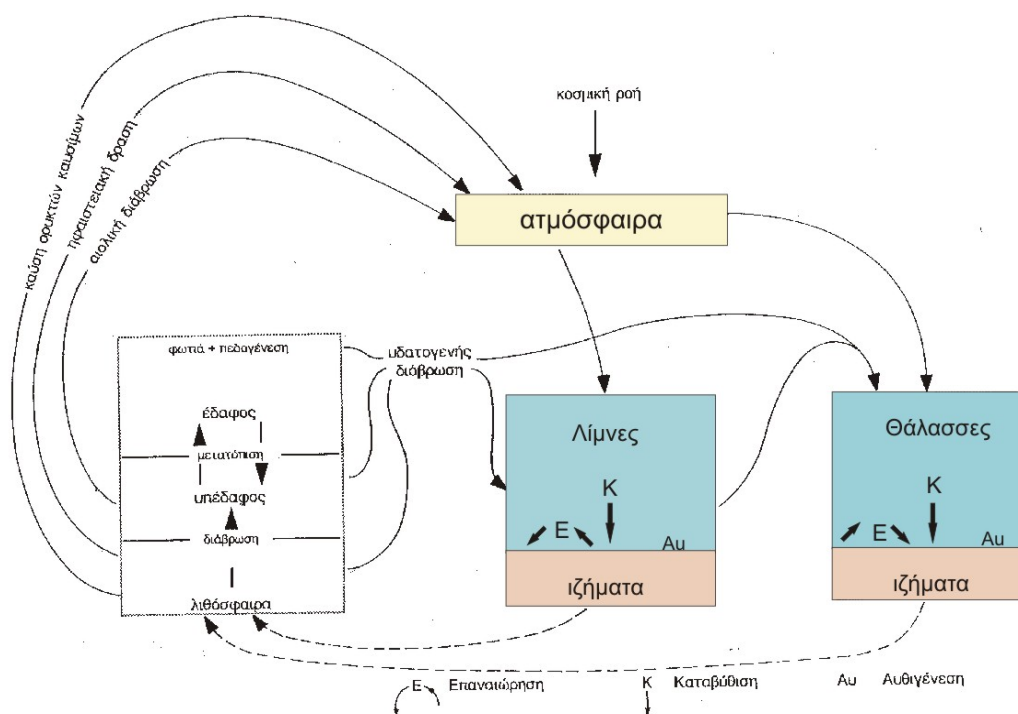
Βεβαίως, τα ιζήματα που αποτίθενται τελικά στις λίμνες είναι το αποτέλεσμα της ανάμιξης διαφόρων υλικών, πολλά εκ των οποίων προέρχονται από αθρωπογενείς δραστηριότητες μέσα στη λεκάνη απορροής της κάθε λίμνης. Οι Beckwith et al (1986) αναφέρουν τρεις βασικές πηγές προέλευσης μαγνητικών σωματιδίων σε περιοχές κοντά σε αστικά περιβάλλοντα:

- α. ατμοσφαιρικές πηγές
- β. καλλιεργούμενα εδάφη
- γ. πηγές από υλικά που έχουν αποτεθεί στις περιοχές γύρω από την λίμνη, συχνά απόβλητα εργοστασίων.

Παρ' όλα αυτά, θα ήταν πολύ απλουστευμένο αν λέγαμε ότι όλα αυτά τα σωματίδια μεταφέρονται και αποτίθενται στις λίμνες αμετάβλητα. Οι Beckwith et al (1986) βρήκαν ότι υπάρχει μια περίπλοκη διαδικασία ανάμιξης, η οποία συμβαίνει κατά την διάρκεια της μεταφοράς και μπορεί να συνεχίζεται και μετά την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα ιζήματα της λίμνης. Σύμφωνα με τον Charlesworth (1994) τα βαρέα μέταλλα των λιμναίων ιζημάτων συγκεντρώνονται, κατά προτίμηση, στην ανόργανη ύλη και στα οξείδια του Fe και του Mn των λιμναίων ιζημάτων. Οργανική ύλη, καθώς επίσης και διαμαγνητικά υλικά, όπως ο χαλαζίας και το ανθρακικό ασβέστιο έχει διαπιστωθεί ότι μειώνουν το μαγνητικό σήμα (Thompson και Oldfield, 1986). Σε σπάνιες περιπτώσεις, ενισχυμένα μαγνητικά σήματα μπορεί να οφείλονται σε βακτηριδιακή δράση (Farina et al, 1990) ή στην παρουσία αυθιγενών ορυκτών, όπως ο γκρεγίτης (Snowball and

Thompson, 1988). Και οι δύο αυτές πηγές θα μπορούσαν να δώσουν μαγνητικό σήμα, το οποίο δεν σχετίζεται με την απόθεση βαρέων μετάλλων.

Η σχέση ανάμεσα στις μαγνητικές ιδιότητες των ιζημάτων και στα βαρέα μέταλλα οφείλεται κυρίως στις κοινές πηγές προέλευσής τους και στις κοινές οδούς μεταφοράς και απόθεσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, για τους επιστήμονες που ασχολούνται με θέματα περιβαλλοντικού μαγνητισμού, παρουσιάζει η μελέτη της σχέσης αυτής και η διερεύνηση της αξιοπιστίας της χρήσης μαγνητικών παραμέτρων σε ζητήματα που σχετίζονται με την παρουσία μεγάλων συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στα διάφορα οικοσυστήματα.



Σχήμα 2.1: Κύκλος μαγνητικών ορυκτών (από Thompson and Oldfield, 1986).

2.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Οι μαγνητικές μετρήσεις μπορούν να συντελέσουν ουσιαστικά στην ανίχνευση ρύπανσης στο περιβάλλον, όσον αφορά στον εντοπισμό αυξημένων συγκεντρώσεων σε βαρέα μέταλλα. Συγκεκριμένα, μετά από πολυάριθμες μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι οι μετρήσεις κάποιων μαγνητικών παραμέτρων των ιζημάτων μπορούν να δώσουν πολύτιμα στοιχεία για την ύπαρξη ή μη αυξημένων συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, για την προέλευση αυτών καθώς επίσης και για την αναγνώριση του μαγνητικού ορυκτού που επικρατεί στα ιζήματα. Οι μαγνητικές μετρήσεις που πραγματοποιούνται, συνήθως, για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων είναι αυτές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, της μεταβολής αυτής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία καθώς και της θερμοπαραμένουσας μαγνήτισης.

2.4.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η επιδεκτικότητα k είναι η μέτρηση της ευκολίας των υλικών να μαγνητίζονται. Ορίζεται από τον λόγο της μαγνήτισης προς το μαγνητικό πεδίο και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k = m / H$$

Η τελική μαγνητική ροπή ανά μονάδα μάζας προς το πεδίο ονομάζεται επιδεκτικότητα μάζας χ . Αυτή συνδέεται με την μαγνητική επιδεκτικότητα μέσω της πυκνότητας ρ του υλικού με τη σχέση:

$$\chi = k / \rho$$

Η επιδεκτικότητα μετριέται, συνήθως, σε ασθενή πεδία με ισχύ μικρότερη από 1 mT. Σε τέτοια πεδία βρέθηκε ότι το k είναι ανεξάρτητο από την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Όταν ένα υλικό είναι μαγνητισμένο, το εσωτερικό του μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο από το εξωτερικό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Η εσωτερική επιδεκτικότητα k_i σχετίζεται με την επαγόμενη του εσωτερικού πεδίου, ενώ η εξωτερική επιδεκτικότητα k_e , την οποία και μπορούμε να παρατηρήσουμε, συνδέεται με την εξωτερική μαγνήτιση. Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές επιδεκτικότητες είναι η ακόλουθη:

$$k_e = k_i / (1 + Nk_i)$$

όπου N είναι ο παράγοντας απομαγνήτισης.

Για ισχυρά μαγνητικά υλικά όπως είναι ο καθαρός μαγνητίτης έχουμε ότι $Nk_i > 1$. Έτσι προκύπτει ότι $k_e \approx 1 / N$ και αν το N είναι γνωστό, τότε δημιουργείται μια πολύ

απλή σχέση ανάμεσα στην επιδεκτικότητα που μετράμε και την συγκέντρωση των σιδηρομαγνητικών κόκκων στο δείγμα. Αυτό συμβαίνει στα φυσικά δείγματα όπου η συγκέντρωση των σιδηρομαγνητικών κόκκων είναι μικρή. Για ένα πέτρωμα ή έδαφος με κλάσμα όγκου $f \ll 1$ του μαγνητικού υλικού η παραπάνω σχέση γίνεται

$$K_e = f k_i / 1 + N k_i$$

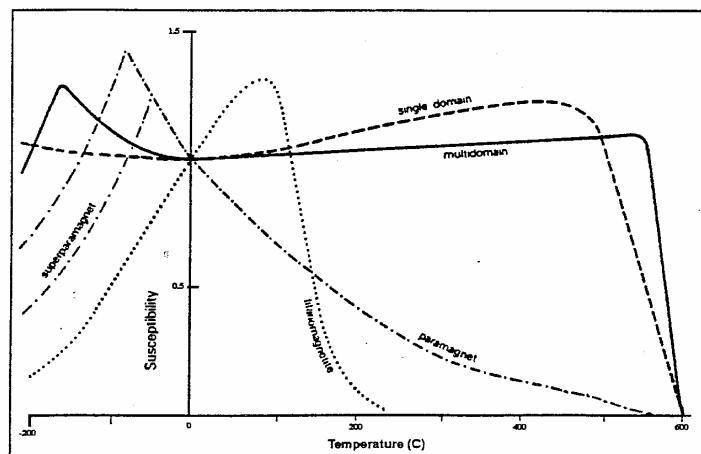
όπου το N είναι το ίδιο για όλους τους κόκκους. Η μετρούμενη επιδεκτικότητα K δίνεται από τη σχέση $K = f K_e$ και με μία καλή προσέγγιση $K = f / N$. Πρακτικά βρέθηκε για τα φυσικά υλικά ότι το N είναι περίπου ίσο με την τιμή $1/3$, η οποία αναμένεται για μία σφαίρα. Έτσι, αν το μέγεθος των μαγνητικών κόκκων είναι περίπου σφαιρικό και το κύριο μαγνητικό ορυκτό είναι ο μαγνητίτης, όπως αναμένεται για τα περισσότερα δείγματα, το f μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα διαιρώντας την επιδεκτικότητα μάζας διά τρία.

Για δείγματα με υψηλή επιδεκτικότητα, ο παράγοντας απομαγνήτισης που παράγεται από ολόκληρο το δείγμα, θα μειώνει την παρατηρούμενη επιδεκτικότητα. Έτσι η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$K_e = f k_i / 1 + (N + f N') k_i$$

όπου το N' είναι ο παράγοντας απομαγνήτισης, ανάλογος με το μέγεθος του δείγματος.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα K , εξαρτάται από τη θερμοκρασία με πολύπλοκο τρόπο από ότι η παραμένουσα μαγνήτιση. Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι ευαίσθητη σε διάφορες παραμέτρους όπως η εσωτερική τάση και η κρυσταλλική ανισοτροπία η οποία αλλάζει με τη θερμοκρασία. Στο σχήμα 2.2 παριστάνονται τυπικές αλλαγές της επιδεκτικότητας με τη θερμοκρασία για διάφορων μεγεθών κρυστάλλους μαγνητίτη. Όλες οι καμπύλες έχουν κανονικοποιηθεί έτσι ώστε η επιδεκτικότητα στους 0°C να είναι μονάδα. Η επιδεκτικότητα των μονοκρυσταλλικών κόκκων δεν παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές παρά μόνο κοντά στο σημείο Curie. Για τους πολυκρυσταλλικούς κόκκους του μαγνητίτη εμφανίζονται πιο έντονες οι αλλαγές στην επιδεκτικότητα και ειδικά σε θερμοκρασίες ψύξης κάτω από την θερμοκρασία δωματίου.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα μαγνητικής επιδεκτικότητας με τη θερμοκρασία για διάφορες μαγνητικές καταστάσεις. Ο τιτανομαγνητίτης συμβολίζεται με τη στικτή γραμμή, ο πολυκρυσταλλικός μαγνητίτης με τη διακεκομένη, οι πολυκρυσταλλικοί κόκκοι με τη συνεχή και οι υπερμαγνητικοί κόκκοι με τη διακεκομένη στικτή γραμμή (Thompson and Oldfield, 1986).

Οι καμπύλες των κόκκων του μαγνητίτη που είναι πλούσιοι σε τιτάνιο, είναι χαρακτηριστικές, με χαμηλές θερμοκρασίες Curie και με σταθερή μείωση της επιδεκτικότητας κατά την ψύξη. Η επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών ορυκτών ακολουθεί το νόμο των Curie - Weiss, $k = C / T$, ο οποίος δηλώνει ότι η επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας. Οι υπερμαγνητικοί κρύσταλλοι ακολουθούν έναν παρόμοιο νόμο σε θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία φραγμού, όταν οι επιδεκτικότητές τους μειώνονται με το $1 / T$. Κατά την ψύξη η επιδεκτικότητα των υπερμαγνητικών κόκκων πέφτει απότομα. Οι μετρήσεις της επιδεκτικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι εύκολα πραγματοποιήσιμες και μας παρέχουν χρήσιμες μαγνητικές πληροφορίες και ιδιαίτερα για τη σημασία της συμβολής των παραμαγνητικών και των υπερμαγνητικών κρυστάλλων στην επιδεκτικότητα.

2.4.2 ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Οι μετρήσεις που γίνονται σε δυο συχνότητες (470Hz και 4700Hz) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των λεπτόκοκκων υπερπαραμαγνητικών σιδηρομαγνητικών ορυκτών που παράγονται από βακτήρια ή χημικές διεργασίες στα εδάφη. Στα δείγματα που περιέχουν λεπτόκοκκα ορυκτά οι τιμές της επιδεκτικότητας είναι λίγο χαμηλότερες στην υψηλή συχνότητα ενώ δείγματα χωρίς αυτά τα ορυκτά δείχνουν ίδιες τιμές της επιδεκτικότητας και στις δυο συχνότητες.

Το δείγμα βαθμονόμησης έχει επιλεγεί έτσι ώστε να δείχνει παρόμοια τιμή και στις δυο συχνότητες. Ο καλύτερος τύπος ορυκτών που δείχνει σημαντική εξάρτηση της συχνότητας είναι εύφορα εδάφη από καλά αποστραγγισμένες περιοχές.

Η εξαρτημένη από την συχνότητα επιδεκτικότητα συνήθως εκφράζεται σαν το ποσοστό της αρχικής τιμής, όπως αυτή μετράται σε χαμηλή συχνότητα (k_{lf}) αλλά μπορεί να εκφραστεί και σαν το πηλίκο της διαφοράς $k_{lf} - k_{hf}$ προς τη μάζα. Οι μαθηματικές εκφράσεις των παραπάνω τιμών είναι απλές και δίνονται παρακάτω.

Το ποσοστό της εξαρτημένης από την συχνότητα επιδεκτικότητας ($k_{fd} \%$ ή $\chi_{fd} \%$) είναι:

$$(k_{lf} - k_{hf}/k_{lf}) \times 100$$

όπου k_{lf} είναι η διορθωμένη τιμή στην χαμηλή συχνότητα και k_{hf} η διορθωμένη τιμή στην υψηλή συχνότητα.

Η ειδικής μάζας διπλής συχνότητας εξαρτημένη επιδεκτικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\chi_{fd} = \{ (k_{lf} - k_{hf}) / \text{μάζα} \} / 10$$

όπου η μάζα είναι σε γραμμάρια και ο όγκος του δείγματος είναι 10cm^3 (Bartington Instruments Ltd., 1995).

Η μαγνητική επιδεκτικότητα χαμηλού πεδίου (k_{lf}) είναι μια κλασική παράμετρος για τη μέτρηση της συγκέντρωσης σιδηριμαγνητικών ορυκτών σε δείγματα για περιβαλλοντικές μελέτες. Ωστόσο, δεν επαρκεί για τον διαχωρισμό των διαστάσεων των κόκκων αυτών των ορυκτών ούτε για τον διαχωρισμό των τύπων των ορυκτών. Αυτό είναι σημαντικό γιατί στα εδάφη, η συνολική σιδηριμαγνητική συνιστώσα μπορεί να περιέχει πρωτογενή ορυκτά, συνδεδεμένα με τη γεωλογική ιστορία τους (π.χ. τιτανομαγνητίτες) ή δευτερογενή (π.χ. μαγνητίτη, μαγγελίτη) που προέρχονται από χημικές ή βακτηριακές διαδικασίες. Επίσης, μαγνητικά σφαιρίδια περιέχονται σε αιωρούμενα σωματίδια από περιοχές που παρουσιάζουν προβλήματα ρύπανσης.

Μια μέτρηση που επιτρέπει την ανίχνευση δευτερογενών σιδηριμαγνητικών ορυκτών είναι εκείνη της μέτρησης της απώλειας μαγνητικής επιδεκτικότητας χαμηλού πεδίου σε δύο συχνότητες. Το ενδιαφέρον αυτής της μέτρησης έγκειται στο ότι διερευνά την παρουσία υπερμαγνητικών κόκκων που βρίσκονται σε στενό διάστημα διαστάσεων κόκκων διαμέτρου $0.018\text{--}0.020\mu\text{m}$, το οποίο είναι απίθανο να περιλαμβάνει πρωτογενή ορυκτά.

2.4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (ΘΕΡΜΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ).

Κατά τη διαδικασία της θερμομαγνητικής ανάλυσης καταγράφεται η μεταβολή των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας ενός δείγματος, καθώς αυτό υφίσταται θέρμανση από μια αρχική θερμοκρασία, συνήθως 50°C, σε μια τελική θερμοκρασία 700° C. Εν συνεχεία, το δείγμα ψύχεται σε μηδενικό πεδίο μέχρις ότου φτάσει στην αρχική του θερμοκρασία, ενώ και πάλι μετράται συνεχώς η μεταβολή της μαγνητικής του επιδεκτικότητας.

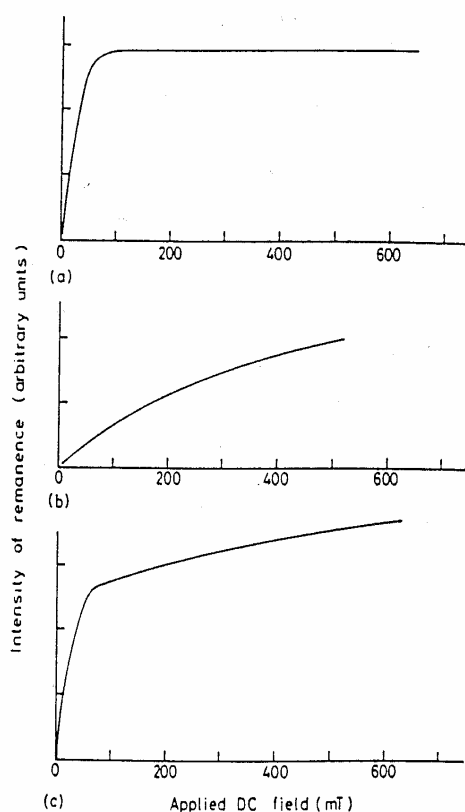
Τα ορυκτά, στη θερμοκρασία Curie και πάνω από αυτήν, χάνουν την ικανότητά τους να φέρουν σταθερή μαγνήτιση και μετατρέπονται σε παραμαγνητικά ορυκτά άσχετα από την πρότερη κατάσταση τους. Έτσι, από την μορφή που έχουν οι καμπύλες που λαμβάνουμε κατά τη θερμομαγνητική ανάλυση μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με το πιο είναι το κύριο μαγνητικό ορυκτό που επικρατεί στο δείγμα μας, βασιζόμενοι στη θερμοκρασία Curie του. Η καμπύλη της θέρμανσης, λοιπόν, μας δίνει τις θερμοκρασίες φραγμού των ορυκτών που είναι παρόντα στο δείγμα, ενώ η καμπύλη που λαμβάνουμε κατά τη διαδικασία της ψύξης παρέχει πληροφορίες για τα ορυκτά που δημιουργήθηκαν κατά τη θέρμανση και επομένως κατά αυτό το τρόπο ανιχνεύονται και τα νέα ορυκτά που πιθανόν έχουν δημιουργηθεί.

2.4.4 ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ (I.R.M)

Όταν αλλάζει το εφαρμοζόμενο πεδίο, όλες οι περιοχές των μαγνητικών ορυκτών δεν είναι ικανές να επανέλθουν στην προηγούμενή τους κατάσταση (εξαιτίας των ενεργειακών εμποδίων). Οι περιοχές που έχουν προσανατολιστεί παράλληλα με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, παραμένουν σε αυτή τη διεύθυνση. Έτσι, οι κόκκοι έχουν μια παραμένουσα μαγνήτιση, την ισόθερμη παραμένουσα, που αποκτάται από την εφαρμογή μαγνητικών πεδίων υπό σταθερή θερμοκρασία. Όσο υψηλότερα πεδία εφαρμόζονται, τόσο περισσότερες περιοχές Weiss ξεπερνάνε τα ενεργειακά εμπόδια, και έτσι αυξάνουν την ένταση της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης τους (I.R.M.). Σε πολύ ισχυρά πεδία η μαγνήτιση των περιοχών, που αρχικά ήταν αντιπαράλληλη με το εφαρμοζόμενο πεδίο, αλλάζει φορά. Από τη μορφή που έχει η καμπύλη της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την παρουσία ή όχι των ορυκτών μαγνητίτη και αιματίτη (σχήμα 2.3).

Έτσι, λοιπόν, αν η καμπύλη που προκύπτει από την μέτρηση της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης του δείγματος, φτάνει στη μέγιστη τιμή της πολύ γρήγορα

(σε μικρές τιμές έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου) και στη συνέχεια η τιμή της μαγνήτισης παραμένει σταθερή, δηλαδή η καμπύλη παραμένει παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα, τότε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι, το κύριο μαγνητικό ορυκτό του δείγματος είναι ο μαγνητίτης. Αν όμως, ακόμη και σε μεγάλες τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, το δείγμα δεν φτάσει σε κατάσταση κορεσμού, τότε πιθανότατα το κύριο μαγνητικό ορυκτό είναι ο αιματίτης. Βεβαίως, πολλές φορές παρατηρείται η συνύπαρξη περισσοτέρων του ενός μαγνητικών ορυκτών, οπότε και η μορφή της καμπύλης που λαμβάνουμε από τις μετρήσεις I.R.M. αποτελεί ένα συνδυασμό των παραπάνω καμπυλών.



Σχήμα 2.3: Καμπύλες ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης για τον μαγνητίτη και τον αιματίτη. (α) Ο μαγνητίτης φτάνει σε κατάσταση κορεσμού σε πολύ ασθενέστερα μαγνητικά πεδία ενώ (β) ο αιματίτης συνήθως δεν αποκτά κορεσμό στα συνηθισμένα μαγνητικά πεδία (μέχρι τα 600mT). (γ). Όταν είναι παρόντα και τα δύο ορυκτά, η καμπύλη που προκύπτει είναι το άθροισμα των δύο απλών καμπυλών. Επικρατεί όμως στην καμπύλη περισσότερο ο μαγνητίτης, ακόμη και αν βρίσκεται σε πολύ μικρά ποσοστά στο συνολικό δείγμα (Tarling 1983).

2.5 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

2.5.1 ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας με τη συχνότητα του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου, είναι γνωστή ως «φάσμα» της επιδεκτικότητας. Η μαγνητική επιδεκτικότητα αποτελείται από δυο συνιστώσες που σε σχέση με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζονται η μία «εντός φάσης» (in phase) και η άλλη «εκτός φάσης» (quadrature). Για χαμηλές συχνότητες του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτιση παραμένει σε συμφωνία «φάσης» με το πεδίο. Έτσι η «εντός φάσης» επιδεκτικότητα έχει μια τιμή που είναι ανάλογη της επιδεκτικότητας, ενώ η «εκτός φάσης» αυξάνεται μέχρι ένα μέγιστο για να μηδενιστεί στη συνέχεια.

Η μέγιστη «εκτός φάσης» επιδεκτικότητα και η «ταχύτερη μείωση» της «εντός φάσης» θεωρητικά συμπίπτουν. Γενικά η επιδεκτικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα.



Σχήμα 2.4 : Όργανο μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας της εταιρείας Bartington.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των δειγμάτων μετρήθηκε στη παρούσα εργασία με το Bartington MS2 Susceptibility System, με τον μετρητή διπλής συχνότητας MS2B (σχήμα 2.4). Ο μετρητής αυτός δέχεται 10cm³ όγκου δείγματα σε πλαστικά δοχεία ή πυρήνες πετρωμάτων αναλόγων διαστάσεων. Είναι ένας φορητός μετρητής που έχει την

ικανότητα να μετράει σε δυο διαφορετικές συχνότητες με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανίχνευση των λεπτόκοκκων σιδηρομαγνητικών ορυκτών των εδαφών ή των πετρωμάτων.

Το κύκλωμα του οργάνου είναι τοποθετημένο σε ένα κουτί που έχει διαστάσεις 160mm x 255mm x 50mm και βάρος 1.3kg. Οι διακόπτες διαχείρισης, το καλώδιο του TNC αισθητήρα και η 4-ψηφιακή οθόνη βρίσκονται στο μπροστινό μέρος ενώ η σειριακή έξοδος (RS232), η οποία επιτρέπει την μεταφορά των δεδομένων από το όργανο σε ένα συμβατό ηλεκτρονικό υπολογιστή, είναι τοποθετημένη στο πίσω μέρος του οργάνου. Οι εσωτερικές Ni/Cd μπαταρίες παρέχουν δωδεκάωρη συνεχιζόμενη χρήση και μπορούν να επαναφορτιστούν.



Σχήμα 2.5 : Αισθητήρας MS2B της εταιρείας Bartington.

Ο MS2B αισθητήρας έχει εσωτερική διάμετρο 36mm και δέχεται 25.40 mm και 23mm κουτιά, 20cc και 10cc κυλινδρικά δοχεία και 1" καρότα πετρωμάτων, ανάλογα με την εκάστοτε υποδοχή. Η υψηλή ακρίβεια του αισθητήρα προέρχεται από την χρήση καλά καθορισμένων μεγεθών των δειγμάτων. Τα δείγματα τοποθετούνται μέσα στο όργανο με έναν απλό μηχανισμό. Το όργανο μπορεί να λειτουργήσει σε δυο συχνότητες για την μελέτη της εξαρτώμενης από τη συχνότητα επιδεκτικότητας. Το ακριβές βάρος των δειγμάτων επιτρέπει και την ακριβή μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας μάζας. Ο αισθητήρας είναι ειδικά κατασκευασμένος για τη χρήση 10cc όγκου δοχείων με εσωτερικές διαστάσεις 24mm διάμετρο, 23mm ύψος και εξωτερική βάση μέγιστης διαμέτρου 26mm. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα δεν επηρεάζονται από την αγωγιμότητα του δείγματος ακόμα και σε 25% αλατούχο διάλυμα. Μεταλλικά αγωγίμα υλικά μπορούν να μετρηθούν αφού, παρέχεται η δυνατότητα να μειωθεί η φαινόμενη διαμαγνητική συνεισφορά η οποία μπορεί να οφείλεται στην δημιουργία δινορευμάτων.

Η διαδικασία των μετρήσεων ξεκινάει με τη βαθμονόμηση του οργάνου με ένα δείγμα 10cm³ ανθρακικού μαγνανίου, το οποίο είναι παραμαγνητικό υλικό με υψηλή και σταθερή μαγνητική επιδεκτικότητα. Τα στάδια που ακολουθούμε είναι τα ακόλουθα:

1. Συνδέουμε τον MS2B αισθητήρα με τον μετρητή.

2. Γυρίζουμε το δεξί διακόπτη στο BATT. Εμφανίζεται μια πράσινη φωτεινή ένδειξη η οποία δηλώνει ότι οι μπαταρίες είναι φορτισμένες.

3. Γυρίζουμε τον διακόπτη ON/OFF στην ένδειξη SI για να μετρήσουμε την επιδεκτικότητα σε μονάδες του Διεθνούς Συστήματος.

Διαλέγουμε την κλίμακα 1.0

4. Επιλέγουμε με τον διακόπτη την επιλογή LF. Θα πρέπει να εμφανιστούν κάποιοι αριθμοί στην οθόνη.

5. Το toggle switch θα πρέπει να είναι στην κεντρική θέση. Αφήνουμε το σύστημα να ζεσταθεί για 10 λεπτά.

6. Πατώντας το κουμπί Z καθαρίζει η οθόνη και μετά το χαρακτηριστικό ήχο, εμφανίζονται μια σειρά από μηδενικά (0000).

7. Σηκώνουμε τη λαβή του σένσορα, τοποθετούμε το δείγμα βαθμονόμησης και κατεβάζουμε τη λαβή αφού πρώτα βεβαιωθούμε ότι το δείγμα είναι σταθερά τοποθετημένο.

8. Πιέζουμε το κουμπί M (ελεγχόμενη και όχι αυτόματη μέτρηση) και ο μετρητής αρχίζει να μετράει. Μετά το χαρακτηριστικό ήχο η τιμή εμφανίζεται στην οθόνη. Θα πρέπει να είναι κοντά στη τιμή που αναγράφεται στο πλαστικό κουτί.

9. Σηκώνουμε την λαβή και βγάζουμε το δείγμα.

10. Για να επαναλάβουμε τη μέτρηση απλά αντικαθιστούμε το δείγμα και πατάμε το M. Δεν χρειάζεται να μηδενίσουμε το όργανο ανάμεσα σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ή μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων.

Όταν μετρούμε ασθενώς μαγνητισμένα δείγματα παίρνουμε πριν και μετά τη μέτρηση δυο μετρήσεις ελεύθερου αέρα (χωρίς να υπάρχει δείγμα στον σένσορα) για να διορθώσουμε τη μέτρησή μας ως εξής:

$$\kappa \text{ (διορθωμένο)} = \kappa \text{ (δείγματος)} - [(\kappa \text{ (πρώτου αέρα)} + \kappa \text{ (δευτέρου αέρα)}) / 2]$$

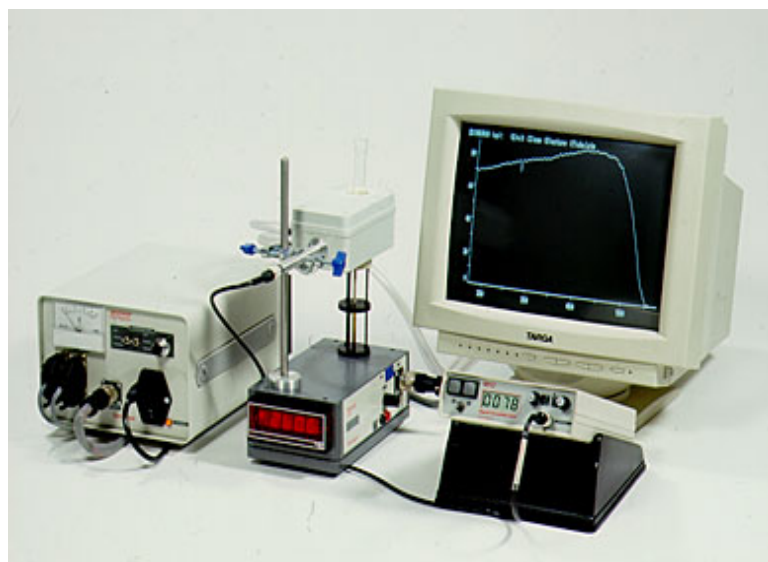
Όταν τα δείγματα είναι ασθενή, οι διαμαγνητικές ιδιότητες του δοχείου που βρίσκεται το δείγμα και του εσωτερικού του μηχανήματος, μπορεί να συνεισφέρουν σημαντικά στην επιδεκτικότητα, μειώνοντας τη πραγματική τιμή της. Για την αποφυγή τέτοιων επιδράσεων προτείνεται η μέτρηση των δοχείων όσο αυτά είναι άδεια έτσι ώστε να υπολογισθεί η μέση διαμαγνητική τιμή κ . Μια τυπική τιμή κ θεωρείται η $-0.4 \times 10 \text{ SI}$ για ένα δοχείο 10cm^3 . Αυτή η τιμή πρέπει να προστίθεται σε όλα τα δείγματα.

Υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης του μετρητή επιδεκτικότητας με ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον άμεσο υπολογισμό των παραμέτρων και την αποθήκευση των δεδομένων. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το όργανο είναι προγραμματισμένο να δίνει απευθείας τις τιμές επιδεκτικότητας θεωρώντας τον όγκο του δείγματος σταθερό και ίσο με 10cm^3 . Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του συστήματος μονάδων

που θα χρησιμοποιηθούν. Στην παρούσα εργασία η επιδεκτικότητα μετρήθηκε σε μονάδες SI.

2.5.2 ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μεταβολή της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας και ακολούθως με την ελάττωση αυτής, μετρήθηκε στο εργαστήριο με τη βοήθεια της κατάλληλης συσκευής της εταιρείας Bartington (σχήμα 2.6), η οποία συνδέεται μ' έναν συμβατό ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο καταγράφονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.6: Όργανο μέτρησης της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, της εταιρείας Bartington.

Το δείγμα τοποθετείται σε διάφανο σωλήνα, κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο 1cm και ύψος 10cm, κατασκευασμένο από υλικό που αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες. Το όργανο φέρει ειδική υποδοχή για τη τοποθέτηση του σωλήνα αυτού.

Προτού αρχίσει η διαδικασία των μετρήσεων είναι απαραίτητο να ανοίξουμε την παροχή του νερού καθώς με τη βοήθεια του νερού κρυώνει ο σένσορας και μειώνεται η θερμοκρασία για να μπορέσουμε να μελετήσουμε στη συνέχεια την πορεία της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά τη ψύξη του δείγματος. Όταν το όργανο

είναι κλειστό, οι διακόπτες βρίσκονται στη θέση HOLD και RESET. Για να αρχίσουμε να παίρνουμε μετρήσεις ακολουθούμε τα εξής στάδια:

1. Ανοίγουμε τον μετρητή της επιδεκτικότητας και ρυθμίζουμε τους διακόπτες στις ενδείξεις SI και 1.0 .
2. Ρυθμίζουμε μέσω του υπολογιστή τη μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία που θέλουμε καθώς και το βήμα με το οποίο επιθυμούμε να παίρνονται οι μετρήσεις. Για τη συγκεκριμένη εργασία ως ελάχιστη θερμοκρασία ορίστηκαν οι 50°C, ως μέγιστη οι 700°C και βήμα 1.
3. Ανοίγουμε τον διακόπτη και παίρνουμε μια μέτρηση background.
4. Τοποθετούμε το δείγμα στο δοκιμαστικό σωλήνα και στη συνέχεια τοποθετούμε αυτόν στην υποδοχή.
5. Ενώ οι διακόπτες είναι ακόμα στο HOLD και στο RESET, γυρίζουμε το διακόπτη της θερμοκρασίας στην τιμή 700.
6. Μετακινούμε το διακόπτη στο SET και αμέσως(!) γυρίζουμε το κουμπί στο 2, έτσι ώστε να αποφύγουμε την άνοδο του ρεύματος πάνω από 4A.
7. Τοποθετούμε τον πρώτο διακόπτη στο UP και τον δεύτερο στο RAMB.
8. Τέλος πατάμε space bar για να αρχίσουν να λαμβάνονται οι μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στην οθόνη απ' ευθείας υπό μορφή διαγράμματος.

Μόλις η θερμοκρασία φτάσει τους 700°C πάμε το διακόπτη στο DOWN και πατάμε ξανά space bar για να αρχίσουν να καταγράφονται οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά τη ψύξη του δείγματος.

Μετά το πέρας των μετρήσεων και το κλείσιμο του οργάνου αφήνουμε την παροχή του νερού ανοιχτή για δυο περίπου ώρες.

2.5.3 ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΙΣΟΘΕΡΜΗΣ ΠΕΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ - ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ

Το MINISPIN είναι ένα φορητό μαγνητόμετρο υψηλής ευαισθησίας, περιστρεφόμενο (μαγνητικής ροής) και μικρής ταχύτητας. Τα δείγματα περιστρέφονται με ταχύτητα 6Hz σ' ένα περίπου κατακόρυφο άξονα. Αυτός βρίσκεται μέσα σ' ένα δακτύλιο μαγνητικής ροής και είναι περιτριγυρισμένος από ένα τριπλού στρώματος κυλινδρικό καπάκι.



Σχήμα 2.7: Περιστρεφόμενο μαγνητόμετρο τύπου Minispin.

Το σήμα της εξόδου, που ολοκληρώνεται σε 6 ή σε 24sec, εμφανίζεται σε οθόνη υγρού κρυστάλλου 5 ψηφίων, υπό μορφή 2 οριζοντίων συνιστωσών της μαγνήτισης του δείγματος. Για να επιτευχθούν πλήρως διανυσματικά αποτελέσματα είναι απαραίτητο να εκτελεσθεί μια σειρά μετρήσεων, με το δείγμα σε διαφορετικούς προσανατολισμούς. Η βαθμολόγηση του οργάνου γίνεται με προσαρμογή του σήματος εξόδου σ' ένα πρότυπο δείγμα. Μόνιμα συνδεδεμένος με το μαγνητόμετρο είναι ένας υπολογιστής, ο οποίος επεξεργάζεται τα στοιχεία και τα δίνει τελικά υπό μορφή διαγράμματος.

Οι διακόπτες SHORT/LONG διαλέγουν τον αριθμό των περιστροφών για τις οποίες ολοκληρώνεται το σήμα εξόδου. Σε 24 περιστροφές ανά 6 sec για το SHORT και σε 120 περιστροφές ανά 24 sec για το LONG.

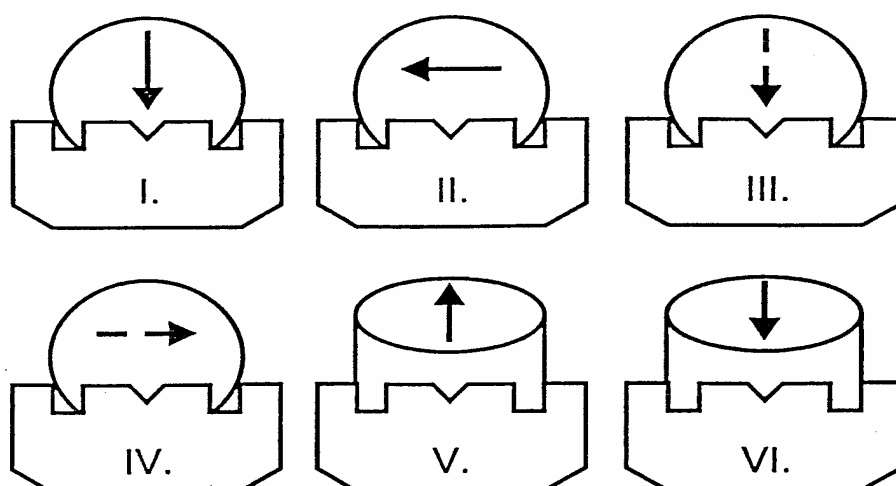
Ο διακόπτης ATTENUATOR ελαττώνει την αναλογική έξοδο της μαγνητικής ροής σε 4 δεκαδικά στάδια. Πάντοτε αποφεύγεται η υπερφόρτωση της οθόνης χρησιμοποιώντας ένα πολύ χαμηλό διακόπτη απόσβεσης.

Ο διακόπτης SET GAIN προσαρμόζει την ενίσχυση του τελικού σταδίου, ώστε να μετατρέψει το σήμα εξόδου ενός δείγματος στο απαιτούμενο αποτέλεσμα. Ο διακόπτης

αυτός χρησιμοποιείται για τη μεταβολή των μονάδων στις οποίες εμφανίζονται τα αποτελέσματα, όπως μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου ή ένταση μαγνήτισης.

Όσον αφορά τη διαδικασία χειρισμού, αυτή είναι η ακόλουθη:

Θέτουμε το διακόπτη στη θέση ON. Μετά από καθυστέρηση ενός περίπου δευτερολέπτου, αρχίζει η λειτουργία του μοτέρ. Στο τέλος του δευτερολέπτου, η ένδειξη 32 στο LCD δείχνει ότι το όργανο λειτουργεί σωστά. Τοποθετούμε τον ATTENUATOR στη χαμηλότερη τιμή που θεωρούμε ότι χρειάζεται για τα δείγματα που πρόκειται να μετρηθούν (για τις παρούσες μετρήσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1). Για ελαφρά μαγνητισμένα πετρώματα είναι απαραίτητες 6 θέσεις περιστροφής (σχήμα 2.8). Αφού συνδεθεί το μαγνητόμετρο με τον υπολογιστή, γίνεται η μέτρηση και καταγραφή των συνιστωσών X,Y,Z και D και I.



Σχήμα 2.8: Οι 6 θέσεις τοποθέτησης των δειγμάτων στο μαγνητόμετρο με τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις της παραμένουσας μαγνήτισης.

Τα διαθέσιμα μαγνητόμετρα, που μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση της παραμένουσας μαγνήτισης είναι πολλά. Τα περισσότερα από αυτά είναι σχεδιασμένα για ένα μέγεθος δειγμάτων κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 2.5cm και ύψους 2.1-2.2cm. Σχεδόν όλα έχουν παραπλήσια ακρίβεια. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μαγνητόμετρα, σε παλαιομαγνητικά εργαστήρια, είναι τα περιστρεφόμενα μαγνητόμετρα, στα οποία τα δείγματα περιστρέφονται κοντά σ' ένα πηνίο. Η περιστρεφόμενη μαγνήτιση επάγει στο πηνίο ένα ρεύμα, του οποίου η ένταση εξαρτάται από την ένταση της μαγνήτισης του δείγματος που βρίσκεται σ' ένα επίπεδο κάθετο

στον άξονα περιστροφής, ενώ η διεύθυνση του μέσα σ' αυτό το επίπεδο δίνεται από τη γωνία φάσης.

2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Η μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας θεωρείται χρήσιμη προσεγγιστική μέθοδος για την ανίχνευση ρύπανσης θαλάσσιων και λιμναίων ιζημάτων. Πολυάριθμες μελέτες (Scoullos et al 1979, Oldfield and Scoullos 1984, Scoullos 1986, Yu et al 1992, Zeri and Scoullos 1993, 1998, Petrovsky et al 2000, Chan et al 2001) έχουν δείξει ότι αυξημένες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας σε επιφανειακά λιμναία ή θαλάσσια ιζήματα ήταν το αποτέλεσμα λεπτόκοκκων οξειδίων του σιδήρου προερχόμενων από αστικές και βιομηχανικές πηγές. Ανάμεσα στους πολυάριθμους οργανικούς και ανόργανους ρύπους στα ιζήματα, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων δείχνουν μια αξιοσημείωτη συσχέτιση με τις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Durza and others 1993, Beckwith et al 1996).

Βεβαίως, πέρα απ' όλες αυτές τις μελέτες που επικεντρώνονται στην ανθρωπογενή φύση των υψηλών τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας στα επιφανειακά ιζήματα, υπάρχει και η άποψη ότι υψηλές τέτοιες τιμές μπορεί να οφείλονται και σε άλλα αίτια (όπως π.χ. σε κάποια διαγενετικά φαινόμενα). Για το λόγο αυτό, επομένως, κρίνεται απαραίτητη η λεπτομερής και προσεκτική στατιστική ανάλυση της σχέσης μεταξύ της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της ανθρωπογενούς προέλευσης μαγνητικών ορυκτών. Μέσα στο πλαίσιο αυτό, τρεις τουλάχιστον προϋποθέσεις είναι αναγκαίες για μια αξιόλογη και αξιόπιστη ανάλυση της σχέσης αυτής. Κατ' αρχήν χρειάζεται να υπάρχουν ενδείξεις (αν όχι αποδείξεις) που να μπορούν να υποστηρίξουν τον ισχυρισμό της ανθρωπογενούς προέλευσης των υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στα ιζήματα. Κατά δεύτερον, η δειγματοληψία θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και δείγματα να λαμβάνονται από διάφορα βάθη. Τέλος, είναι απαραίτητο να εξεταστεί ένας αξιοσημείωτος αριθμός δειγμάτων έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα όσο γίνεται πιο αξιόπιστης εξακρίβωσης της σχέσης ανάμεσα στην μαγνητική επιδεκτικότητα και τη συγκέντρωση μαγνητικών ορυκτών ανθρωπογενούς προέλευσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη που έγινε στα θαλάσσια ιζήματα του λιμανιού του Hong Kong. Όντας ένα από τα πιο βιομηχανοποιημένα και τα πιο μεγάλα λιμάνια σ' ολόκληρο τον κόσμο, το λιμάνι του Hong Kong αποτελεί ένα εξαιρετικό γεωγραφικό μοντέλο για τέτοιες μελέτες. Εκπομπές από βιομηχανικές και αστικές πηγές έχουν πιθανώς συντελέσει σημαντικά στη συσσώρευση ρύπων στα επιφανειακά

θαλάσσια ιζήματα (Lo and Fung 1992). Μέσα στα πλαίσια της προσπάθειας που έκανε η κυβέρνηση του Hong Kong για να εκτιμηθεί και εν συνεχεία να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα των θαλασσίων ιζημάτων, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες γεωχημικές αναλύσεις βαρέων μετάλλων αλλά και μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών έδειξαν μια πολύ καλή συσχέτιση ανάμεσα στις συγκεντρώσεις κάποιων βαρέων μετάλλων και στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, με αποτέλεσμα η χαρτογράφηση υψηλών τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας να αντιπροσωπεύει και υψηλές τιμές συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων.

Αντίστοιχες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί, για την ανίχνευση ρύπανσης που οφείλεται σε αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, στη Τσεχία, σε περιοχή γύρω από εργοστάσιο καύσης άνθρακα (Karicka A et al, 1999). Κατά τη μελέτη αυτή, μετρήθηκαν οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας της ευρύτερης περιοχής καθώς επίσης και οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων με σκοπό την σύγκριση τους, η οποία έδειξε και πάλι μια πολύ καλή συσχέτιση ανάμεσα στους ρύπους και τις μαγνητικές παραμέτρους που μετρήθηκαν. Συγκεκριμένα, οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας έδωσαν πολύ καλή συσχέτιση με τα μέταλλα Pb, Cu και Zn. Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν από μελέτη των εδαφών γύρω από ένα μεταλλουργικό εργοστάσιο στη Σλοβακία (Durza, 1996). Επίσης, εφαρμογές των μαγνητικών μετρήσεων για την ανίχνευση ρύπανσης έχουν γίνει σε ποτάμια περιβάλλοντα (Scholger R, 1998 – Brilhante O et al, 1989 – Bubb J. and Lester J., 1993 κ.α.) αλλά και σε λιμναία και θαλάσσια περιβάλλοντα (Scoulllos and Oldfield 1979, Petrovsky et al. 1997, Zeri and Scoulllos 1993, 1995, 1998, κ.α.). Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εφαρμογές της μαγνητικής επιδεκτικότητας όσον αφορά την χαρτογράφηση των συγκεντρώσεων μαγνητικών σωματιδίων πλευρικά μεγάλων αυτοκινητόδρομων (Knab et al, 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΛΙΜΝΗ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ

3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λίμνη Κουμουνδούρου είναι μια μικρή παράκτια λίμνη στα ΒΑ του κόλπου της Ελευσίνας, η οποία χωρίζεται από τη θάλασσα με μια λωρίδα ξηράς πλάτους 20 περίπου μέτρων και βρίσκεται στη δεξιά πλευρά της Εθνικής οδού Αθηνών - Κορίνθου, στο 15^ο χιλιόμετρο από την Αθήνα. Η λίμνη στο μεγαλύτερο τμήμα της είναι αβαθής, με βάθος που φτάνει το 1 με 1,5m και μόνο στο σημείο που βρίσκονται οι υπολίμνιες πηγές το βάθος πλησιάζει τα 2,5m. Η επιφάνειά της είναι περίπου 143.000m², το μέγιστο μήκος και πλάτος της είναι 600 και 400m αντίστοιχα, ενώ το μήκος των ακτών της φτάνει τα 1300m περίπου. Η λεκάνη απορροής της λίμνης περιλαμβάνει ποικιλία πετρωμάτων ενώ η έκτασή της ανέρχεται στα 1,2km².



Σχήμα 3.1: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής, όπου φαίνεται η λίμνη Κουμουνδούρου και ο κόλπος της Ελευσίνας.

Η τροφοδοσία της λίμνης Κουμουνδούρου γίνεται, σχεδόν αποκλειστικά, από ύδατα υπολίμνιων αναβλύσεων καθώς και από όμβρια ύδατα που δέχεται η λίμνη, είτε απ' ευθείας στην επιφάνειά της, είτε μέσω των κάθε είδους απορροών από φυσικές και ανθρωπογενείς δραστηριότητες που υπάρχουν στη λεκάνη απορροής της. Αξιοσημείωτη είναι επίσης και η παροχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους των υπολίμνιων αναβλήσεων, γεγονός το οποίο συνέβαλε στην δημιουργία θετικού υδατικού ισοζυγίου στο λιμναίο σύστημα (Γκρίτζαλης και συνεργάτες, 1995). Έτσι, εξηγείται η συνεχής εκροή των υδάτων προς τη θάλασσα δια μέσου της μοναδικής ελεύθερης εξόδου κάτω από την Εθνική οδό, που βρίσκεται στο βορειανατολικό τμήμα της λίμνης.

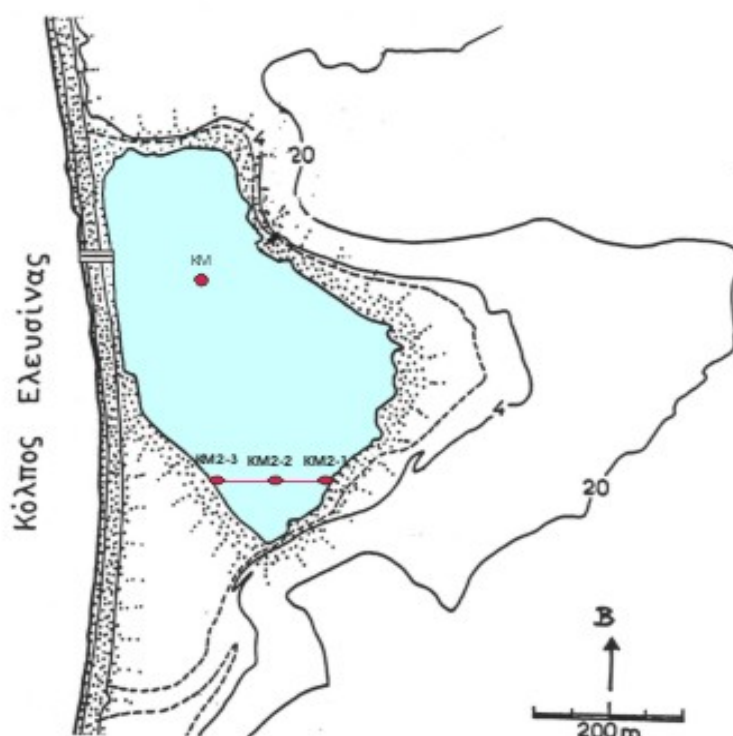
Αναλυτικά το σημερινό περιβάλλον της λίμνης Κουμουνδούρου και των γύρω περιοχών της διαμορφώνεται, συντηρείται ή και επηρεάζεται από:

- ποικίλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες
- την υπολίμνια πηγή που τροφοδοτεί την λίμνη με γλυκό νερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους
- τα πετρελαιοειδή τα οποία εκβάλλονται από την υπολίμνια πηγή και τα οποία προέρχονται από τη ρύπανση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα
- τη γειτονική θαλάσσια περιοχή του κόλπου της Ελευσίνας, η οποία ίσως τροφοδοτεί, με υπόγεια διείσδυση, θαλασσινά νερά τη λίμνη
- την επιφανειακή έξοδο του νερού της λίμνης
- το γειτονικό αλσύλιο
- τα σκουπίδια που απορρίπτονται οπουδήποτε στην ευρύτερη περιοχή και τις αποπλύσεις από τον αυτοκινητόδρομο
- ιζήματα με άφθονο δένδριτικό υλικό και τα υπολείμματα των πετρελαιοειδών
- τις αποθέσεις φερτών υλικών (Γκρίτζαλης Κ. και συνεργάτες, 1995).

Από τις μέχρι τώρα παρατηρήσεις, η λίμνη Κουμουνδούρου παρουσιάζει έντονο πρόβλημα ρύπανσης που οφείλεται κυρίως σε διαρροές των δεξαμενών των Διυλιστηρίων που υπάρχουν στην περιοχή αλλά και στο γεγονός ότι αποτελεί δέκτη μεγάλων όγκων βιομηχανικών και αστικών λυμάτων (Κούνης Θ., Σιέμος Ν, 1992). Έτσι, στα ιζήματα του πυθμένα της λίμνης παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις λαδιών και οργανικού άνθρακα (αποτελέσματα μετρήσεων Γ.Ε.Ρ.Π.Π.Ε.) ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της ύπαρξης αυξημένων συγκεντρώσεων μαγνητικών ορυκτών και βαρέων μετάλλων.

3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Η δειγματοληψία στη λίμνη Κουμουνδούρου πραγματοποιήθηκε μέσα στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος GEOWATERS, που περιλαμβάνει την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στη μελέτη ρύπανσης σε ιζήματα Ευρωπαϊκών υδάτινων συστημάτων. Συνολικά από τη λίμνη Κουμουνδούρου λήφθηκαν τέσσερις πυρήνες, οι οποίοι έφθαναν μέχρι και βάθος 1.90m από την επιφάνεια του πυθμένα της λίμνης. Ειδικότερα, οι τρεις από τους πυρήνες αυτούς, οι KM2-1, KM2-2 και KM2-3, λήφθηκαν από τα νότια της λίμνης και κατά μήκος της τομής KM2 πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκαν και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Ο πυρήνας KM λήφθηκε από το κέντρο της λίμνης. Λόγω έλλειψης ακριβών δεδομένων για τα βάθη των δειγμάτων του πυρήνα αυτού, τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν παραθέτονται στην διατριβή αυτή. Οι ακριβείς θέσεις δειγματοληψίας φαίνονται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Η λίμνη Κουμουνδούρου με τις θέσεις απ' όπου λήφθηκαν οι πυρήνες KM2-1, KM2-2, KM2-3 και KM.

Η πυρηνοληψία πραγματοποιήθηκε με έναν δειγματολήπτη βαρύτητας (gravity corer), ο οποίος είχε διαμορφωθεί ειδικά για να χρησιμοποιηθεί στις ιδιαίτερες συνθήκες της λίμνης. Το μικρό βάθος της λίμνης, μικρότερο και από 1m σε πολλά σημεία, οδήγησε στη χρήση μιας μικρής βάρκας του Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, από την οποία πλαστικοί σωλήνες διαμέτρου 10cm πιέστηκαν στο πυθμένα της λίμνης. Εξαιτίας αυτού του τρόπου λήψης, είχαμε και κάποια απώλεια ιζήματος λόγω, δυνάμεων τριβής με τα τοιχώματα του σωλήνα, με αποτέλεσμα η στρωματογραφία να μην είναι απολύτως αδιατάρακτη. Γι' αυτό το λόγο, κατά τη προετοιμασία των δειγμάτων και γνωρίζοντας το συνολικό μήκος του σωλήνα που εισχώρησε στο πυθμένα, καθώς και το μήκος του δείγματος που τελικά λάβαμε, έγινε μια αναγωγή του κάθε δείγματος στο σωστό βάθος.

Τα ιζήματα που λήφθηκαν από τους παραπάνω αυτούς πυρήνες, αρχικά χρειάστηκε να ξηρανθούν για να αποβάλουν την όποια υγρασία διατηρούσαν. Για το λόγο αυτό αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για μια περίπου εβδομάδα. Στη συνέχεια λήφθηκε δείγμα από κάθε κομμάτι των πυρήνων ανά 10cm, κονιοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός ιγδίου και κοσκινίστηκε με κόσκινο Νο 0.5, έτσι ώστε η διάμετρος των κόκκων να κυμαίνεται σε διαστάσεις μικρότερες από 0.5 mm. Το υλικό αυτό τοποθετήθηκε σε πλαστικά κυβικά κουτάκια πλευράς 2cm, πάνω στα οποία σημειώθηκε προσεχτικά ο αριθμός του δείγματος και το βάθος από το οποίο έχει παρθεί. Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν ήταν 26 εκ των οποίων τα 8 προέρχονται από τον πυρήνα KM2-1 και αντιστοιχούν σε βάθη 0,05-1,90m, τα 9 προέρχονται από τον πυρήνα KM2-2 και αντιστοιχούν σε βάθη 0,05-1,30m και τα υπόλοιπα 9 από τον πυρήνα KM2-3 και αντιστοιχούν σε βάθη 0,05-1,20m.

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

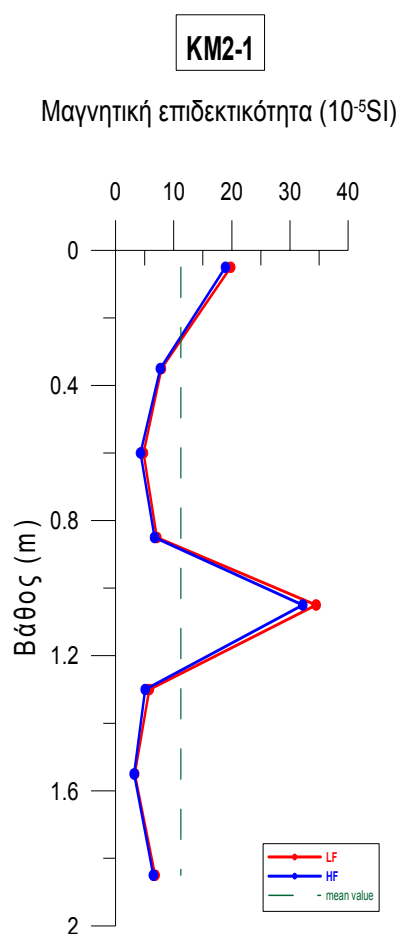
Το υλικό των δειγμάτων που τοποθετήθηκε σε πλαστικά δοχεία αποτέλεσε το αντικείμενο μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας, της μεταβολής αυτής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης.

3.3.1 Μαγνητική επιδεκτικότητα

Οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας πραγματοποιήθηκαν με το όργανο Bartington MS2 Susceptibility System, η αναλυτική λειτουργία του οποίου περιγράφηκε στο πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής ειδίκευσης (§ 2.5.1). Όλα τα δείγματα

μετρήθηκαν τόσο σε χαμηλή συχνότητα (LF) όσο και σε υψηλή συχνότητα (HF). Προτού μετρηθούν οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, μετρήθηκε το καθαρό βάρος του κάθε δείγματος με τη βοήθεια ενός ζυγού ακριβείας, έτσι ώστε οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια.

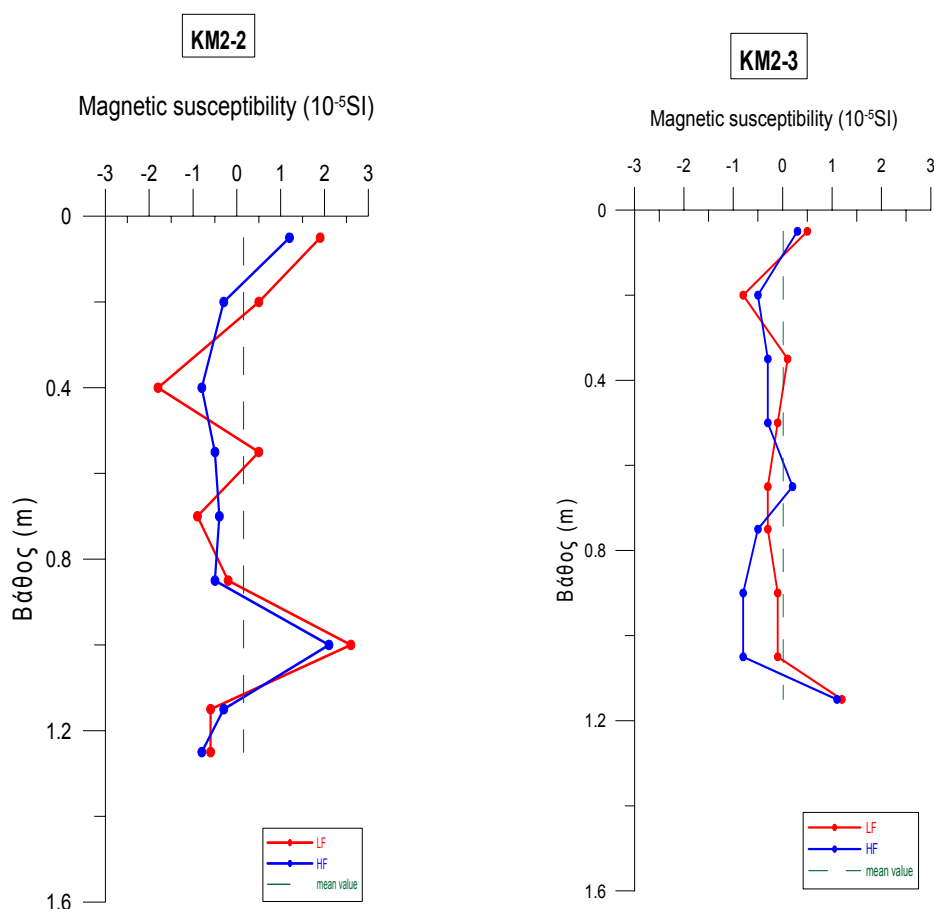
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τα δείγματα των γεωτρήσεων KM2-1, KM2-2 και KM2-3 φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα ενώ όλες οι τιμές παραθέτονται στο παράρτημα. Όλες οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι επί 10^{-5}SI .



Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τον πυρήνα KM2-1. Με LF σημειώνονται οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας που μετρήθηκαν σε χαμηλή συχνότητα και με HF αυτές που αντιστοιχούν σε υψηλή συχνότητα. Με την στικτή γραμμή έχει σημειωθεί ο μέσος όρος των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Σε καθ' ένα από τα διαγράμματα έχουν χαρτογραφηθεί οι μεταβολές της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος και στις δύο συχνότητες. Με κόκκινη συνεχή γραμμή σημειώνονται οι τιμές που μετρήθηκαν σε LF ενώ με μπλέ αυτές που

μετρήθηκαν σε HF. Με τη πράσινη διακεκομμένη γραμμή έχει σημειωθεί ο μέσος όρος των τιμών της LF επιδεκτικότητας.



Σχήμα 3.4-3.5 : Γραφική παράσταση της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος για τους πυρήνες KM2-2 και KM2-3 αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την μεταβολή των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος αλλά και την επιφανειακή μεταβολή αυτών πάνω στη τομή KM2.

Ο πυρήνας KM2-1, που βρίσκεται στην ΝΑ όχθη της λίμνης παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας σε σχέση με αυτές των δύο άλλων πυρήνων, αλλά και πάλι οι τιμές αυτές δεν είναι ιδιαίτερες υψηλές ($10\text{-}40 \text{ E-5SI}$). Σε βάθος περίπου 1m σημειώνεται μια απότομη αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας, η οποία πιθανώς να οφείλεται σε μία τοπική συσσώρευση μαγνητικών υλικών.

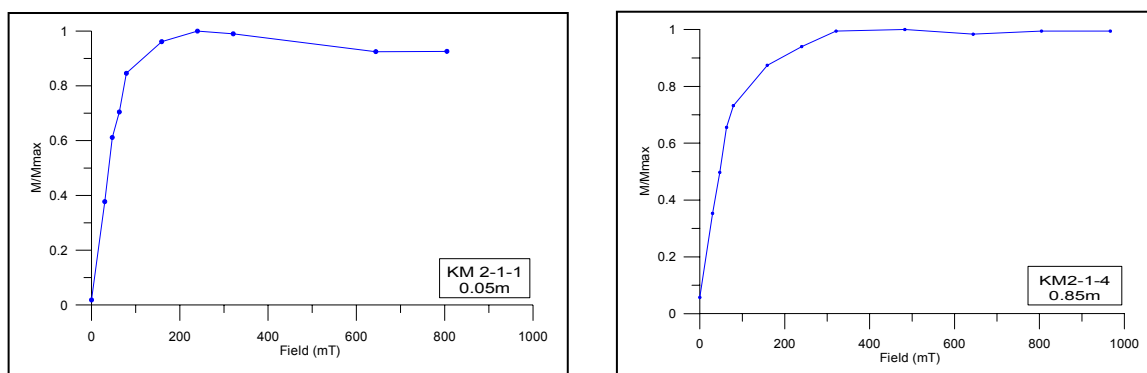
Στους πυρήνες KM2-2 και KM2-3 οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι πολύ μικρές και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες μεταβολές αναφορικά με το βάθος. Επιπλέον σε ορισμένα βάθη σημειώνονται ακόμη και αρνητικές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας,

γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη διαμαγνητικών ορυκτών, όπως πιθανότατα ασβεστίτη και χαλαζία ή και οργανικής ύλης. Τέτοια υλικά, η παρουσία των οποίων μειώνει το μαγνητικό σήμα, είναι προφανώς άφθονα στη λίμνη καθώς προέρχονται από το γειτονικό ασβεστολιθικό περιβάλλον το οποίο και την τροφοδοτεί με υλικά.

Όσον αφορά στη χωρική κατανομή της μαγνητικής επιδεκτικότητας παρατηρούμε ότι κατά μήκος της τομής KM2, οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας μειώνονται από τα δεξιά της τομής προς τα αριστερά αυτής. Ενώ, δηλαδή, οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι της τάξεως $10\text{--}40 \text{ E-5SI}$, στους πυρήνες KM2-2 και KM2-3 οι τιμές αυτής μειώνονται σημαντικά και κυμαίνονται γύρω στο μηδέν.

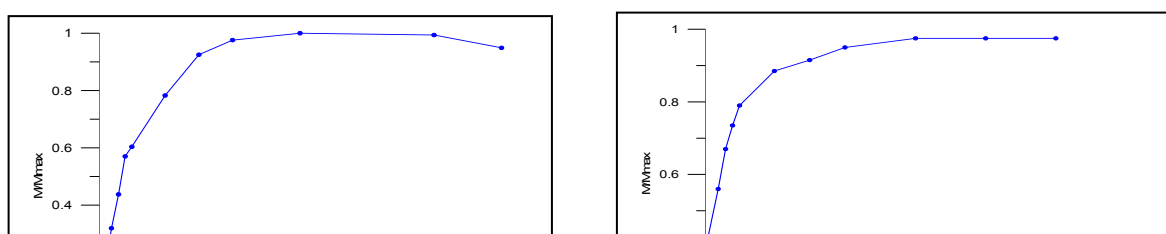
3.3.2 Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση

Από τους πυρήνες KM2-1, KM2-2 και KM2-3 επιλέχθηκαν δείγματα από διάφορα βάθη με σκοπό να μελετηθεί η ανταπόκριση των ιζημάτων σε ολοένα αυξανόμενες τιμές έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Έτσι, μετρήθηκε η ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση των δειγμάτων αυτών σε τιμές εφαρμοζόμενου πεδίου 30, 47, 63, 79, 159, 240, 321, 483, 644, 805 και 967mT και σε σταθερή θερμοκρασία δωματίου.

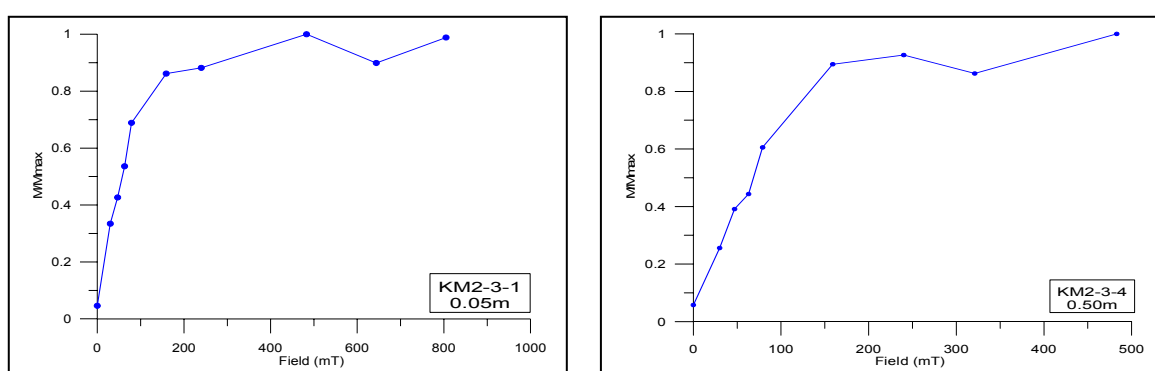


Σχήμα 3.6: Καμπύλες ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (I.R.M.) από δείγματα του πυρήνα KM2-1 που αντιστοιχούν σε βάθη 0,05 και 1,05m.

Όσον αφορά τον πυρήνα KM2-1 φαίνεται, από τις καμπύλες που προκύπτουν από την μέτρηση της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης, ότι ο κύριος φορέας μαγνήτισης είναι ο μαγνητίτης, καθώς παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται κορεσμός ακόμη και σε ασθενές εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε ένταση εφαρμοζόμενου πεδίου περίπου 300mT το δείγμα αποκτά τη μεγαλύτερη μαγνήτιση του και εν συνεχεία όσο και αν αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο, η μαγνήτιση του δείγματος παραμένει σταθερή.



Σχήμα 3.7: Καμπύλες ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (I.R.M.) από δείγματα του πυρήνα KM2-2 που αντιστοιχούν σε βάθη 0,05 και 0,40m.

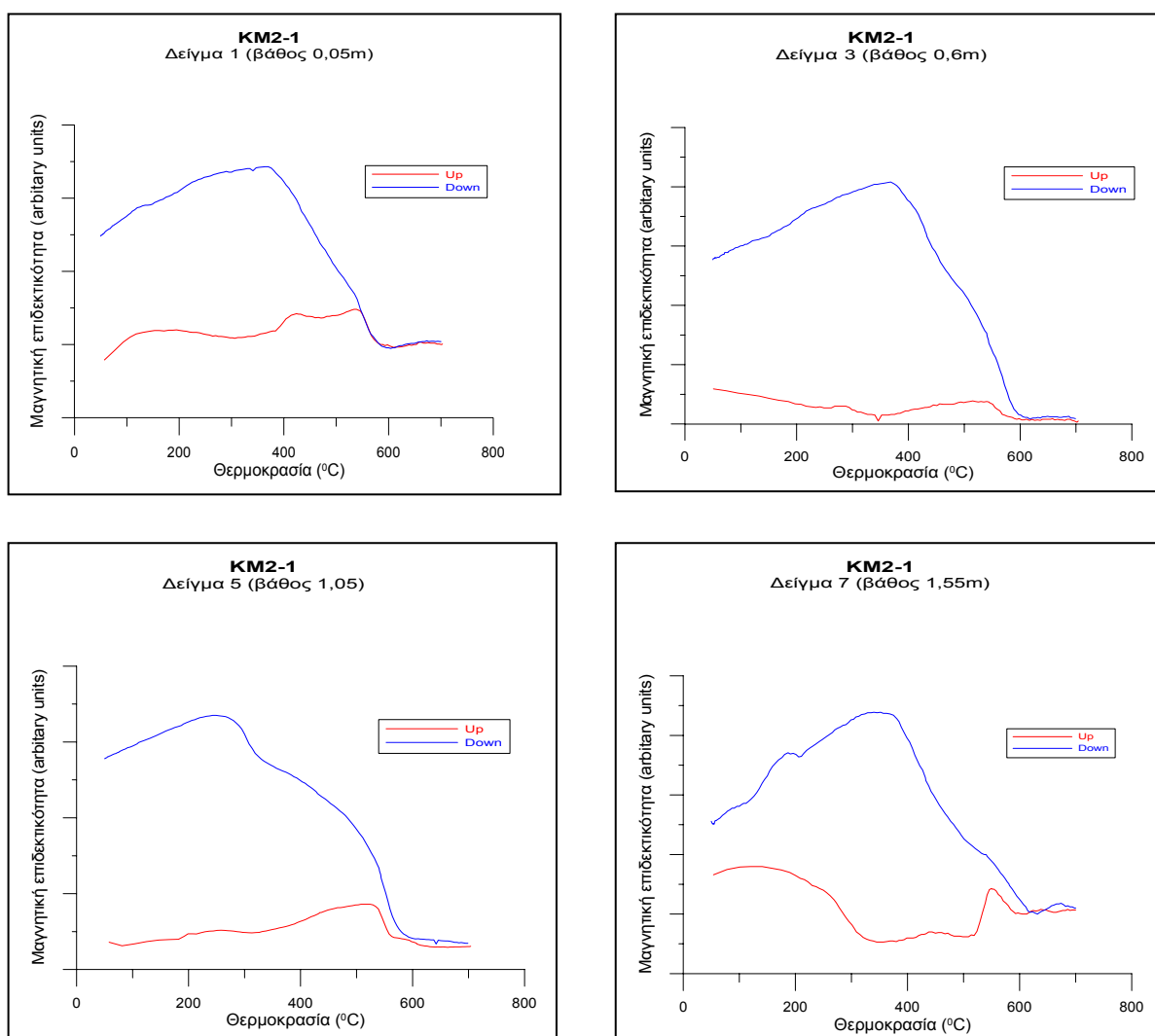


Σχήμα 3.8: Καμπύλες ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (I.R.M.) από δείγματα του πυρήνα KM2-3 που αντιστοιχούν σε βάθη 0,05 και 0,50m.

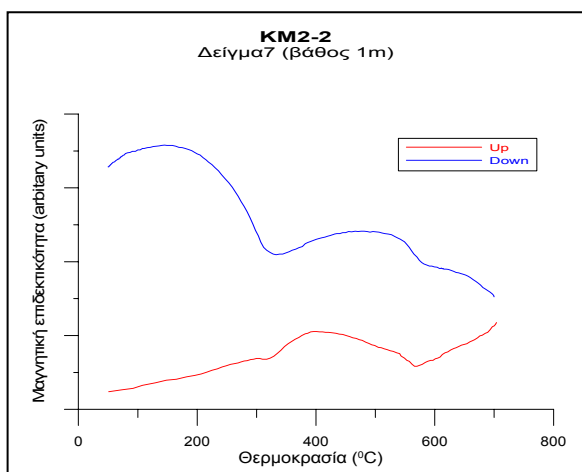
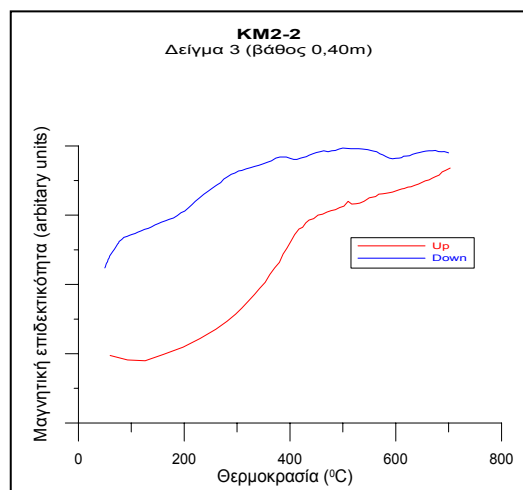
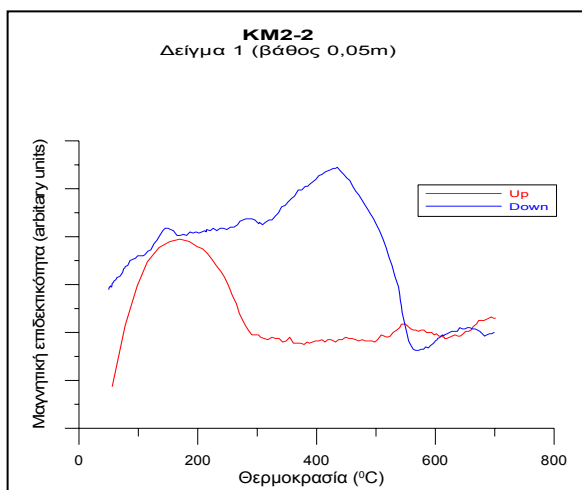
Το ίδιο κύριο μαγνητικό ορυκτό φαίνεται να επικρατεί και στον πυρήνα KM2-2, όπου και πάλι οι καμπύλες της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης (τόσο για το πολύ επιφανειακό δείγμα, που αντιστοιχεί σε βάθος 0.05m, όσο και για αυτό από τα 0.40m) φτάνουν στο σημείο κορεσμού πολύ γρήγορα, γεγονός που είναι ενδεικτικό της ύπαρξης μαγνητίτη. Στον πυρήνα KM2-3 παρατηρείται μια διαφοροποίηση και φαίνεται ότι υπάρχει μεγαλύτερη συνεισφορά σε αιματίτη αν και η ποσότητα των μαγνητικών ορυκτών σε αυτά τα δείγματα φαίνεται να είναι ιδιαίτερως μικρή καθώς οι τιμές μαγνήτισης που επιτυγχάνονται ακόμη και για ισχυρό εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο είναι μικρές, της τάξεως 3.43×10^{-2} (βλ. παράρτημα).

3.3.3 Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

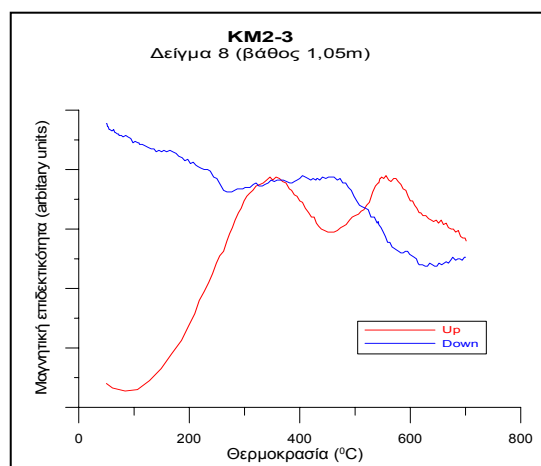
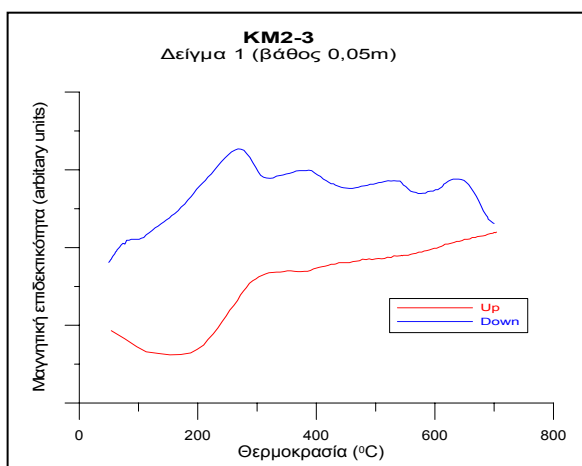
Για να πάρουμε πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασίες Curie των ορυκτών που περιέχονται στα δείγματα, καταγράφηκε η μεταβολή των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Έτσι, επιλέχθηκαν κάποια δείγματα από διάφορα βάθη και από τους τρεις διαθέσιμους πυρήνες KM2-1, KM2-2 και KM2-3, τα οποία αρχικά θερμάνθηκαν μέχρι την θερμοκρασία των 700°C και εν συνεχεία ψύχθηκαν μέχρι να φθάσουν τη θερμοκρασία των 50°C. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται ακολούθως.



Σχήμα 3.9: Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δειγμάτων από τον πυρήνα KM2-1.



Σχήμα 3.10: Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δειγμάτων από τον πυρήνα KM2-2.



Σχήμα 3.11: Μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δειγμάτων από τον πυρήνα KM2-3.

Οι θερμομαγνητικές καμπύλες που προέκυψαν από την καταγραφή της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για δείγματα από τον πυρήνα KM2-1 δείχνουν ότι το κύριο μαγνητικό υλικό που κυριαρχεί στα ιζήματα αυτά είναι ο μαγνητίτης. Οι καμπύλες της θέρμανσης σημειώνουν μια απότομη πτώση σε θερμοκρασία περίπου 580°C και εν συνεχεία η μαγνητική επιδεκτικότητα παραμένει σταθερή και αμετάβλητη με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που υποδηλώνει πως η θερμοκρασία Curie του κύριου μαγνητικού υλικού των ιζημάτων είναι 580°C , θερμοκρασία Curie που αντιστοιχεί στον μαγνητίτη. Στο δείγμα KM2-1-7 που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο βάθος, περίπου 1.55m, πιθανόν να αναγνωρίζονται και μικρές ποσότητες αιματίτη, καθώς σημειώνονται κάποιες μεταβολές της μαγνητικής επιδεκτικότητας και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από την θερμοκρασία Curie του μαγνητίτη πάνω από την οποία το ορυκτό αυτό χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες. Επιπλέον, παρατηρώντας τις θερμομαγνητικές αυτές καμπύλες γίνεται φανερό ότι σημειώνεται μια αύξηση της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά την ψύξη των δειγμάτων. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε δημιουργία νέων μαγνητικών ορυκτών κατά τη θέρμανση, τα οποία και ανιχνεύονται κατά την διαδικασία της ψύξης δίνοντας αυξημένες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Οι θερμομαγνητικές καμπύλες που προέκυψαν από τα δείγματα των πυρήνων KM2-2 και KM2-3 εμφανίζουν μη σταθερή μορφή και δε μας παρέχουν ιδιαίτερες πληροφορίες για τα μαγνητικά ορυκτά των δειγμάτων. Παρ' όλα αυτά, όμως, συμφωνούν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας που έδιναν πολύ μικρές τιμές και σε κάποια βάθη μάλιστα ακόμη και αρνητικές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας. Κατά πάσα πιθανότητα, λοιπόν, στους πυρήνες αυτούς έχουμε πολύ μικρές ποσότητες μαγνητικών ορυκτών και γι' αυτό το λόγο οι θερμομαγνητικές καμπύλες αδυνατούν να τα ανιχνεύσουν.

3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.

Οι χαμηλές τιμές των μαγνητικών παραμέτρων των ιζημάτων της λίμνης Κουμουνδούρου που μετρήθηκαν κατά τη διατρίβή αυτή, υποδηλώνουν μικρές συγκεντρώσεις μαγνητικών ορυκτών και βαρέων μετάλλων στα ιζήματα της λίμνης. Παρ' όλα αυτά, από τους τρεις πυρήνες που μελετήθηκαν, οι μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας καταγράφηκαν στον πυρήνα ΚΜ2-1 και κατά συνέπεια, βασιζόμενοι στην θετική συσχέτιση που παρουσιάζει η μαγνητική επιδεκτικότητα με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων, όπως έχει διατυπωθεί από πολλούς ερευνητές (§ 2.6), σε αυτή την περιοχή της λίμνης αναμένονται πιθανώς και οι σχετικά πιο αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων.

Στην παράγραφο αυτή, λοιπόν, επιχειρείται μια σύγκριση των παραπάνω ποιοτικών αποτελεσμάτων των μαγνητικών μεθόδων με τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων βαρέων μετάλλων που υπάρχουν για την περιοχή μελέτης, όπως αυτά παραθέτονται στην εργασία των Γκρίτζαλης και συνεργατών, 1995.

Κατά την εργασία των ερευνητών αυτών, προσδιορίστηκαν οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων Mn, Ni, Zn, Cr, Pb και Cu σε 11 σταθμούς δειγματοληψίας κατά μήκος και πλάτος όλης σχεδόν της λίμνης. Από τα αποτελέσματα αυτά, παραθέτουμε εδώ μόνο τις τιμές από τους σταθμούς 7, 6 και 11, οι θέσεις των οποίων αντιστοιχούν στους δικούς μας πυρήνες ΚΜ2-1, ΚΜ2-2 και ΚΜ2-3.

Βαρέα Μέταλλα	Σταθμοί δειγματοληψίας		
	7 (ΚΜ2-1)	6 (ΚΜ2-2)	11 (ΚΜ2-3)
Mn	206	65.0	56.0
Ni	24.0	24.0	11.0
Zn	224	76.0	219
Cr	-	28.0	-
Pb	89.0	25.0	84.0
Cu	26.0	26.0	24.0

Πίνακας 3.4.1: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (ppm) στα ιζήματα της λίμνης Κουμουνδούρου. Ο σταθμός δειγματοληψίας 7 αντιστοιχεί στον πυρήνα ΚΜ2-1, ο σταθμός 6 στον πυρήνα ΚΜ2-2 και ο σταθμός 11 στον πυρήνα ΚΜ2-3 (Γκρίτζαλης και συνεργάτες, 1995).

Από τις παραπάνω τιμές των βαρέων μετάλλων προκύπτει ότι για όλα τα βαρέα μέταλλα, τις συγκεντρώσεις των οποίων διαθέτουμε, οι μεγαλύτερες τιμές έχουν καταγραφεί στα ιζήματα του πυρήνα ΚΜ2-1, όπως αναμένονταν και σύμφωνα με τις

μαγνητικές μετρήσεις καθώς στο πυρήνα αυτό μετρήθηκαν και οι μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας και SIRM.

Περιοχές	Μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων							
	Mn	Co	Ni	Cd	Cr	Zn	Pb	Cu
Λίμνη Κουμουνδούρου	206	12	44	2,8	56	224	27	82
Θερμαϊκός κόλπος*	1853	20	160	8,5	110	299	228	37
Κανονικές συγκεντρώσεις σε ιζήματα αβαθών θαλασσών*	850	13	35	--	60	92	22	56
Λιμνοθάλασσα Μεσολογίου*	1000	14	90	-	95	70	12	29
Κόλπος Ελευσίνας	1623	20	206	1,0	198	5573	1118	356

Πίνακας 3.4.2: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων (ppm) στα ιζήματα της λίμνης Κουμουνδούρου και διαφόρων άλλων περιοχών, Γκρίτζαλης και συνεργάτες 1995, (Βαρνάβας 1989).

Στον πίνακα 3.4.2 (Γκρίτζαλης και συνεργάτες, 1995) παραθέτονται οι συγκριτικές τιμές των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στα ιζήματα της λίμνης Κουμουνδούρου σε σχέση με τις τιμές αυτών στα ιζήματα άλλων περιοχών. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι η λίμνη Κουμουνδούρου δεν εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένο φορτίο σε βαρέα μέταλλα και μάλιστα οι συγκεντρώσεις των περισσότερων μετάλλων είναι χαμηλότερες και από τις κανονικές συγκεντρώσεις για ιζήματα αβαθών θαλασσών (Βαρνάβας, 1989), γεγονός που βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία προς τα ποιοτικά αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων.

Επιπλέον, μέσα στα πλαίσια της διατριβής αυτής, πραγματοποιήθηκαν και κάποιες χημικές αναλύσεις άνθρακα σε συνεργασία με το Τμήμα Χημείας του Α.Π.Θ. Επιλέχθηκε ένα δείγμα από κάθε πυρήνα και μετρήθηκε το συνολικό (%) ποσοστό άνθρακα με σκοπό να διερευνηθεί αν το χαμηλό μαγνητικό σήμα της μαγνητικής επιδεκτικότητας που λάβαμε κατά τις μαγνητικές μετρήσεις οφείλεται, κατά ένα μέρος, και σε αυξημένες συγκεντρώσεις άνθρακα, ο οποίος επιδρά αρνητικά ως προς την ένταση του μαγνητικού σήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Δείγμα	Βάθος (m)	Ποσοστό (%) άνθρακα
ΚΟΥΜ ΚΠ2	0.20	12.51
ΚΟΥΜ ΚΜ2-1-2	0.35	11.13
ΚΟΥΜ ΚΜ2-2-2	0.20	12.74
ΚΟΥΜ ΚΜ2-3-2	0.20	12.84

Πίνακας 3.4.3: Ποσοστά (%) άνθρακα στα ιζήματα της λίμνης Κουμουνδούρου.

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων εμφανίζουν ιδιαιτέρως αυξημένες συγκεντρώσεις άνθρακα στα ιζήματα της λίμνης. Κατά συνέπεια, θεωρούμε πιθανόν τα

ποσοστά αυτά άνθρακα να επηρεάζουν το μαγνητικό σήμα μειώνοντας το κατά ένα ποσοστό. Οι μεγάλες τιμές άνθρακα, ενδεχομένως, να οφείλονται τόσο στα ασβεστολιθικά πετρώματα που περιβάλλουν και τροφοδοτούν τη λίμνη όσο και στον οργανικό άνθρακα που πιθανόν να προέρχεται από τα πετρελαιοειδή που καταλήγουν σε αυτήν λόγω των διυλιστηρίων που υπάρχουν στη περιοχή.

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη νότια πλευρά της λίμνης Κουμουνδούρου λήφθηκαν τρεις πυρήνες ιζημάτων, οι οποίοι και αποτέλεσαν το αντικείμενο μαγνητικών μετρήσεων. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ότι η λίμνη δέχεται άφθονα ιζήματα από τα περιβάλλοντα ασβεστολιθικά πετρώματα που την τροφοδοτούν με διαμαγνητικά υλικά ενώ οι συγκεντρώσεις μαγνητικών ορυκτών στον πυθμένα της είναι ιδιαιτέρως χαμηλές.

Οι μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας έδειξαν στη νοτιοανατολική όχθη της λίμνης κάποια συσσώρευση μαγνητικών ορυκτών, ενδεχομένως προερχομένων από τη βιομηχανική δραστηριότητα στην πλευρά αυτή. Τα αποτελέσματα της Ισόθερμης Παραμένουσας Μαγνήτισης και η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία προσδιόρισαν το μαγνητικό ορυκτό μαγνητίτη ως τον κύριο φορέα μαγνήτισης των ιζημάτων. Η θερμοκρασία Curie που προέκυψε από τις μετρήσεις αυτές είναι 580°C, χαρακτηριστική της ύπαρξης μαγνητίτη. Κατά συνέπεια, πιθανώς στα ιζήματα που αποτίθενται δίπλα στην ανατολική όχθη της λίμνης να αποθέτονται και κάποια σφαιρίδια μαγνητίτη ανθρωπογενούς προέλευσης. Οι μαγνητικές ιδιότητες των ιζημάτων δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές με το βάθος, γεγονός που σημαίνει πως τα τελευταία χρόνια η τροφοδοσία της λίμνης με υλικό είναι σταθερή καθώς επίσης και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή γύρω από αυτή.

Τέλος, τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων στην περιοχή μελέτης βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των ιζημάτων, σύμφωνα με την μελέτη των Γκρίτζαλης και συνεργατών, 1995. Κατά συνέπεια, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα ρύπανσης της λίμνης Κουμουνδούρου εντοπίζεται περισσότερο στην επιβάρυνση των ιζημάτων με πετρελαιοειδή και λιγότερο στη συσσώρευση μαγνητικών σωματιδίων ανθρωπογενούς προέλευσης και βαρέων μετάλλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΛΙΜΝΗ ΚΕΡΚΙΝΗ

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

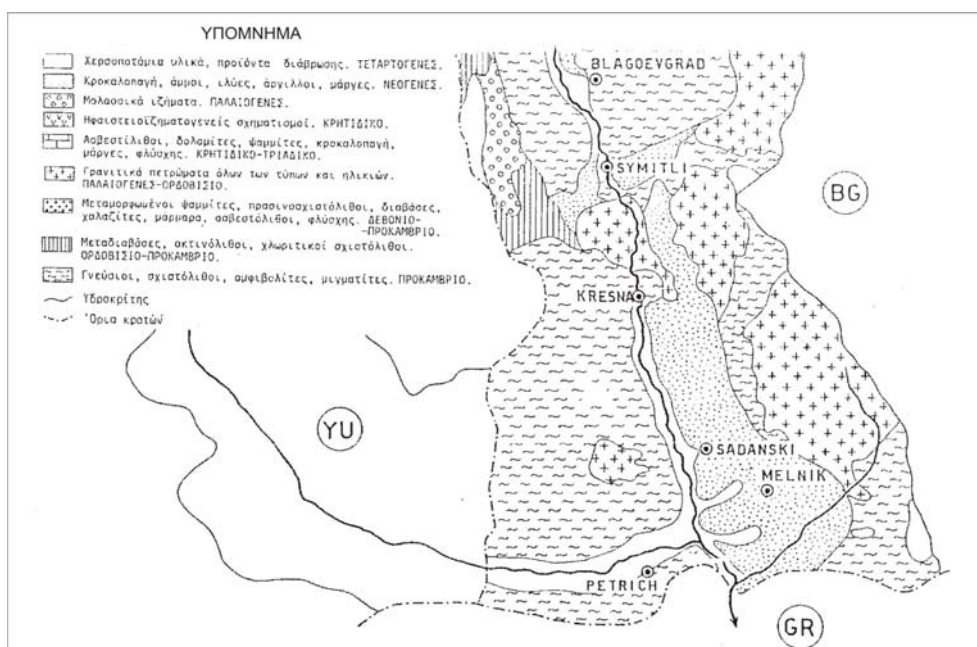
Η λίμνη Κερκίνη κατέχει σήμερα το ΝΑ τμήμα της τάφρου της Ροδοπόλεως στο ΒΔ άκρο της λεκάνης των Σερρών και απέχει από τη πόλη των Σερρών 27 km. Η θέση της Κερκίνης ακολουθεί την ασυμμετρία της τάφρου, αφού προς τα νότια έρχεται σε άμεση επαφή με τον ορεινό όγκο του Δύσωρου ή Κρουσίων ενώ προς τα βόρεια φτάνει τις απολήξεις των σύνθετων αλλουβιακών ριπιδίων του ορεινού όγκου της Κερκίνης ή Μπέλες .

Το σχήμα της λίμνης προσομοιάζει με αυτό ανεστραμμένου αχλαδιού με κορυφή το θυρόφραγμα του Λιθοτόπου. Η αρχική λίμνη που κατασκευάστηκε το 1932 ήταν μικρότερη από τη σημερινή και προσχώθηκε από τα υλικά του Στρυμόνα. Η σημερινή λίμνη έχει ανακατασκευαστεί το 1984 (Ψιλοβίκος και συνεργάτες, 1989). Το μήκος του κεντρικού της άξονα είναι 15km ενώ το μέγιστο πλάτος της, όταν είναι πλήρης, είναι 8.5km. Η στάθμη, η έκταση και η χωριτικότητα της Κερκίνης μεταβάλλονται εποχιακά μεταξύ των ελάχιστων τιμών 31.80km, 51.5km και 90x106m³ και των μέγιστων 36.5 km, 74.7 km και 411x106 m³ αντίστοιχα.

Από μορφολογική άποψη μπορούμε να χωρίσουμε την Κερκίνη σε δύο τμήματα. Στο βόρειο τμήμα, όπου εκβάλλει ο ποταμός Στρυμόνας και σχηματίζει εκτεταμένο δέλτα το οποίο κατακλύζεται εποχιακά, και στο νότιο τμήμα, όπου υπάρχει η μόνιμη και σταθερή λίμνη, γνωστή με τον όρο αδρανής ή νεκρός όγκος.

Ο ποταμός Στρυμόνας αποτελεί τον κύριο τροφοδότη της λίμνης σε νερό και σε φερτά υλικά. Ο ποταμός αυτός διασχίζει το μεγαλύτερο μέρος της ΝΔ Βουλγαρίας προτού εκβάλει στη λίμνη Κερκίνη. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του στο χώρο της Βουλγαρίας (σχ.4.1) αποτελούνται κυρίως από γνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες αλλά σε αρκετά σημεία ο ποταμός διασχίζει και γρανιτικά πετρώματα όλων των τύπων και ηλικιών. Το γεγονός αυτό φανερώνει ένα φυσικό εμπλουτισμό των ιζημάτων, που καταλήγουν τελικά και αποτίθενται στη λίμνη Κερκίνη, σε μαγνητικά ορυκτά δεδομένου ότι τα γρανιτικά πετρώματα χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές μαγνήτισης. Επιπλέον, όμως ο Στρυμόνας κατά το πέρασμα του από τη

Βουλγαρία διασχίζει και αρκετές έντονα βιομηχανοποιημένες περιοχές, οι οποίες κατά τη βιομηχανική τους δραστηριότητα παράγουν αρκετά δευτερογενή μαγνητικά ορυκτά, ένα ποσοστό από τα οποία μπορεί να καταλήγει στον ποταμό και να παρασύρεται από τη ροή αυτού.



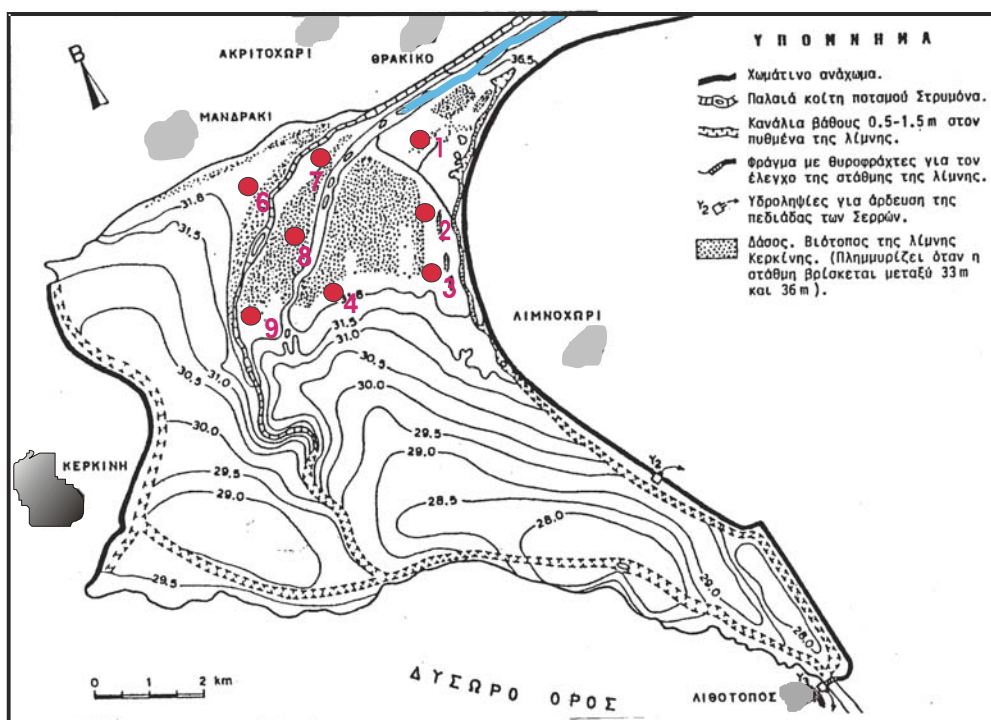
Σχήμα 4.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Στρυμόνα στο χώρο της Βουλγαρίας (Ψιλοβίκος και συνεργάτες, 1994).

Στο βόρειο τμήμα της λίμνης, λοιπόν, όπου η κοίτη του Στρυμόνα εισέρχεται στο χώρο του ταμιευτήρα, σχηματίζεται μια προσχωσιγενής δελταϊκή προεξοχή. Πρόκειται για ένα δελταϊκό σχηματισμό τύπου πέλματος πτηνού που κατακλύζεται από το νερό της λίμνης κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού ενώ χερσεύει κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα.

Η σύσταση του υλικού του πυθμένα της Κερκίνης και ο τρόπος συγκέντρωσης και κατανομής του υλικού αυτού στο χώρο προώθησης του δελταϊκού πρίσματος δείχνουν ότι κυρίως η ιλύς και η άργιλος που αιωρούνται μέσα στο νερό του Στρυμόνα καταλήγουν στη λίμνη και καθιζάνουν στον πυθμένα της υπό συνθήκες ηρεμίας ενώ οι κροκάλες, τα χαλίκια και η άμμος που μεταφέρονται με κύλιση, σύρση και πήδηση από το Στρυμόνα, κατακρατούνται στην κοίτη του και δεν φθάνουν στον πυθμένα της λίμνης. Μόνο κατά τη διάρκεια μεγάλων πλημμυρών, μικρές ποσότητες λεπτόκκοκης άμμου μπορούν να φτάσουν στο χώρο της λίμνης και να αποθεθούν στον πυθμένα της.

4.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Από τη λίμνη Κερκίνη λήφθηκαν 9 πυρήνες που έφταναν σε βάθη 2-3m. Η δειγματοληψία έγινε από διάφορα σημεία του δέλτα που σχηματίζει ο ποταμός Στρυμόνας καθώς χύνεται στη λίμνη. Οι ακριβείς θέσεις της δειγματοληψίας φαίνονται στον ακόλουθο χάρτη.



Χάρτης 4.2: Υψομετρική αποτύπωση του πυθμένα της λίμνης Κερκίνης. Στο βόρειο τμήμα (δέλτα) εντοπίζεται η περιοχή έρευνας. Με κόκκινους κύκλους σημειώνονται οι θέσεις από τις οποίες έγινε η πυρηνοληψία (Ψιλοβίκος και συνεργάτες, 1994).

Για τα δείγματα αυτά ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία προετοιμασίας με αυτή των δειγμάτων από τη λίμνη Κουμουνδούρου. Αρχικά τα δείγματα ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου, στη συνέχεια κονιοποιήθηκαν και τελικά τοποθετήθηκαν σε πλαστικά κυβικά κουτάκια. Από τους 9 πυρήνες που λήφθηκαν από την περιοχή, δεν χρησιμοποιήσαμε τα δείγματα από τον πυρήνα Νο 5 λόγω των ασαφών πληροφοριών που διαθέταμε για τα βάθη αυτών. Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν ήταν 120.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

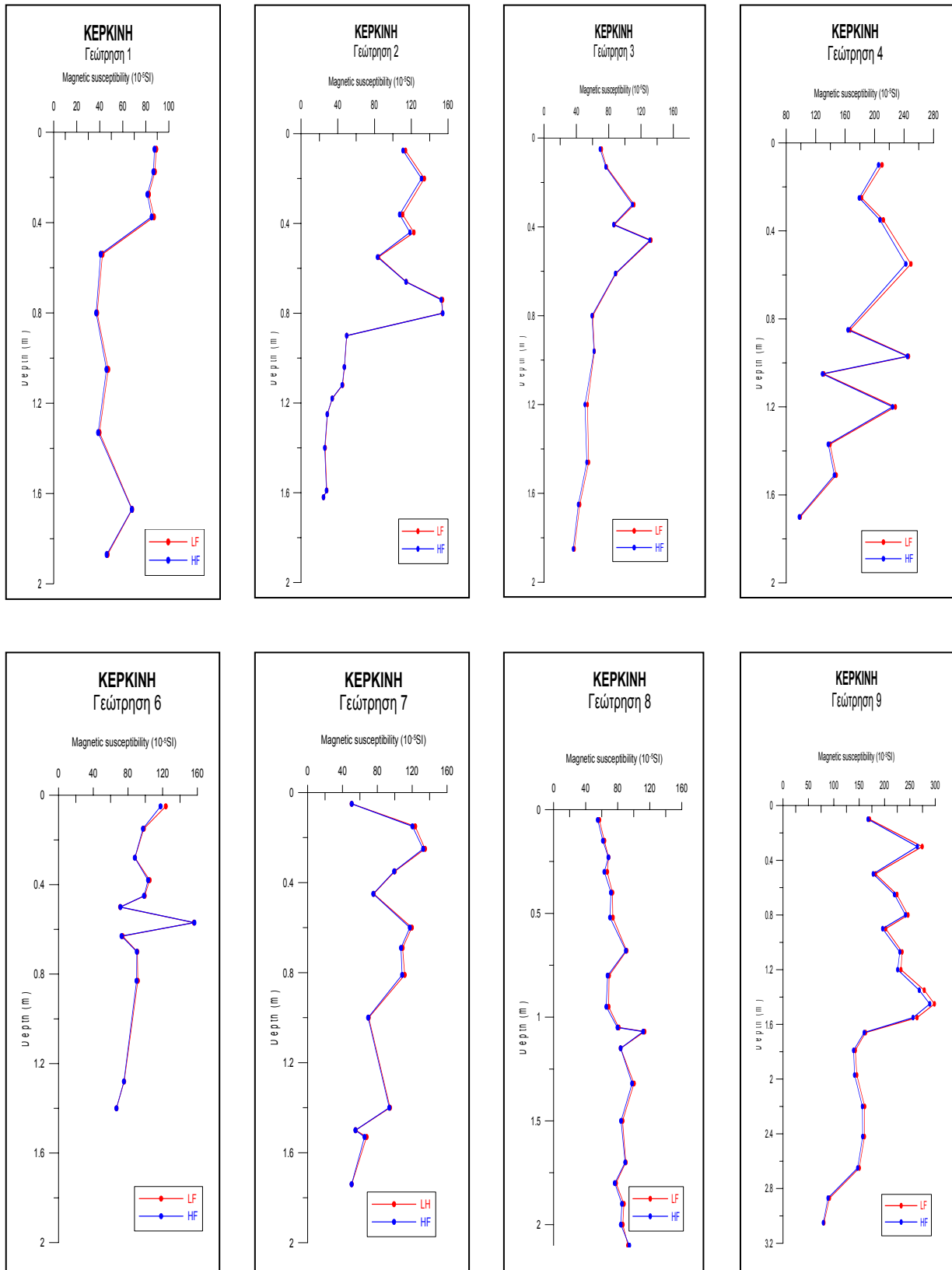
Οι μαγνητικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν αυτές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, της μεταβολής αυτής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και της μέτρησης της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης.

4.3.1 Μαγνητική επιδεκτικότητα

Οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας πραγματοποιήθηκαν και πάλι χρησιμοποιώντας το όργανο Bartington MS2 Susceptibility System. Όλα τα δείγματα μετρήθηκαν τόσο σε LF όσο και σε HF ενώ και πάλι προτού μετρηθούν οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας, μετρήθηκε το καθαρό βάρος του κάθε δείγματος με τη βοήθεια μιας ζυγαριάς ακριβείας, έτσι ώστε οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας για τους 8 πυρήνες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.

Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται καθαρά ότι οι μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας σημειώνονται στα πρώτα 50-80cm των πυρήνων ενώ σε μεγαλύτερα βάθη οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι πολύ μικρότερες και αρκετά σταθερές ($\approx 40E-5$). Στον πυρήνα G8 δεν παρατηρείται αυτή η μεταβολή αλλά σε όλα τα βάθη σημειώνονται σταθερές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας. Στον πυρήνα G9 παρατηρούνται υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας μέχρι μεγαλύτερα βάθη $\approx 1.6m$ και από το βάθος αυτό και μετά παρατηρούνται σταθερές τιμές.

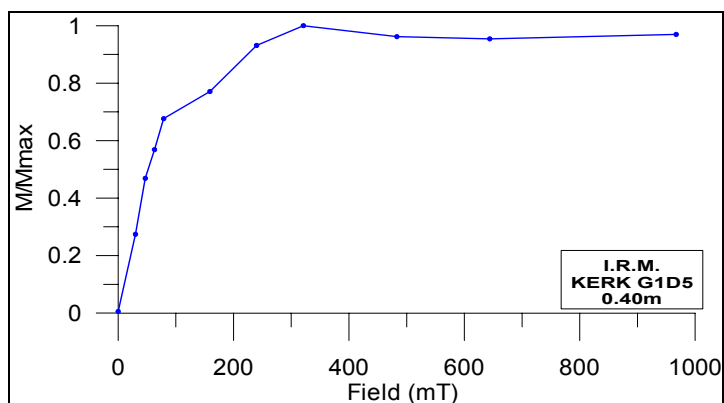
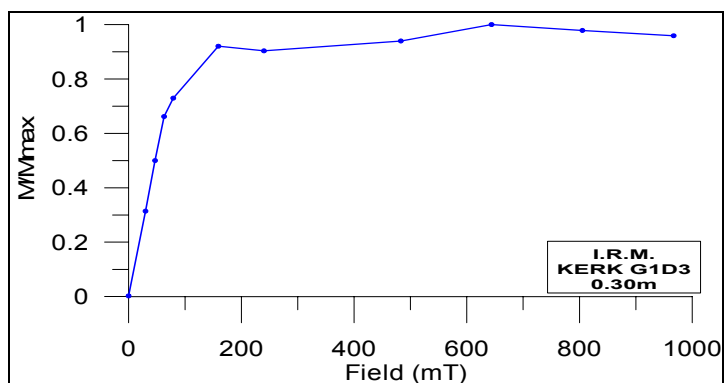
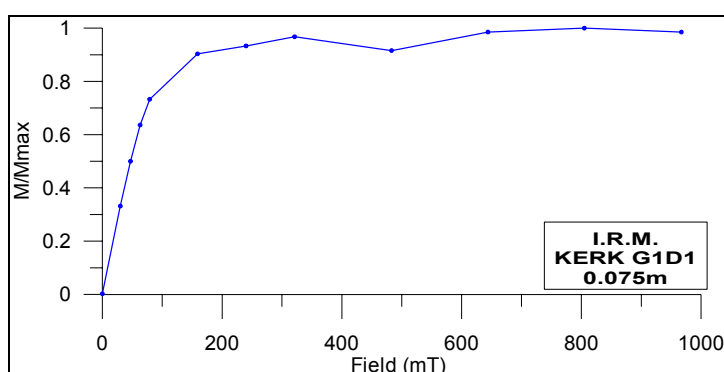
Από όλους τους πυρήνες οι υψηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας εμφανίζονται στους πυρήνες G4 και G9, οι οποίοι έχουν ληφθεί από την άκρη του δέλτα του ποταμού Στρυμόνα. Επίσης, στους πυρήνες αυτούς σημειώνονται έντονες μεταβολές των τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος. Για όλους τους πυρήνες, οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας που μετρήθηκαν σε υψηλή συχνότητα είναι πολύ κοντά στις τιμές αυτές που μετρήθηκαν σε χαμηλή συχνότητα και η τιμή της χ_{fd} είναι μικρότερη από 5% ενώ σε ορισμένους μάλιστα πυρήνες είναι μικρότερη και από 2%.

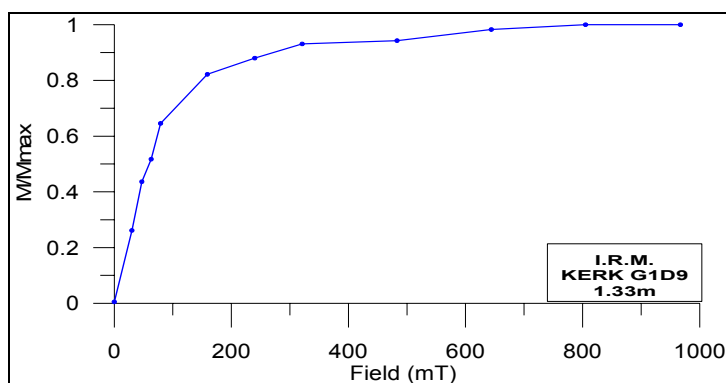


Σχήμα 4.3: Διαγράμματα μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας (υψηλής, HF, και χαμηλής, LF, συχνότητας) σε συνάρτηση με το βάθος για τους 8 πυρήνες.

4.3.2 Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση

Από κάθε πυρήνα επιλέχθηκαν κάποια αντιπροσωπευτικά δείγματα από μικρά σχετικά βάθη με σκοπό να μετρηθεί η Ισόθερμη Παραμένουσα Μαγνήτιση τους. Επίσης, μετρήθηκε η ισόθερμη παραμένουσα μαγνήτιση για δείγματα από το ίδιο βάθος (περίπου 1.20-1.30m) από όλες τις γεωτρήσεις έτσι ώστε να διερευνηθεί αν έχουμε απόθεση του ίδιου μαγνητικού υλικού στον συγκεκριμένο στρωματογραφικό ορίζοντα σε όλη την έκταση της λίμνης. Για τον πυρήνα No 4 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις I.R.M. για όλα τα δείγματα από όλα τα βάθη.



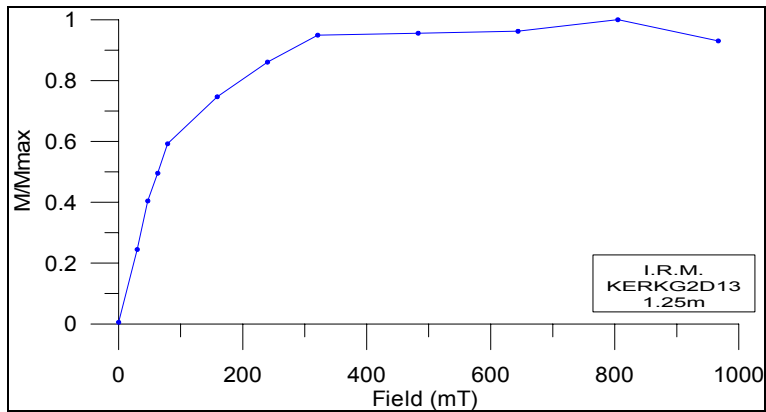
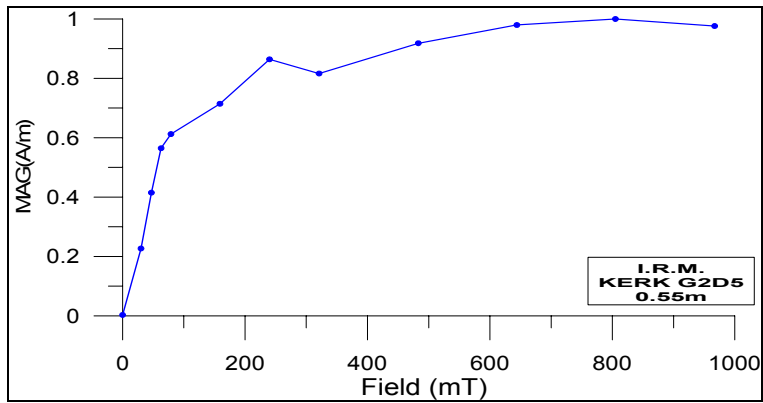
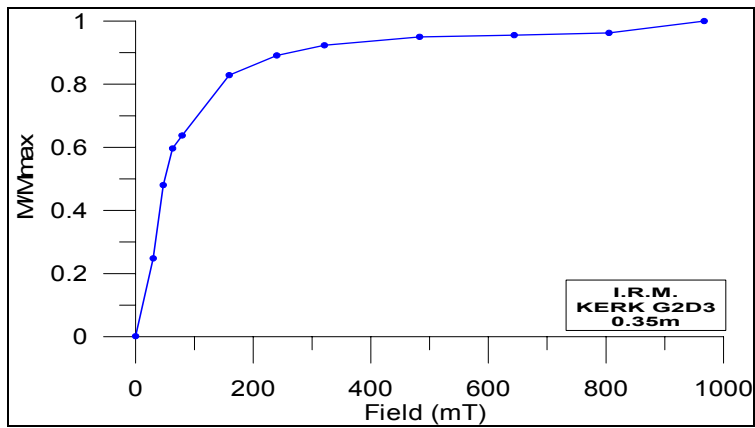
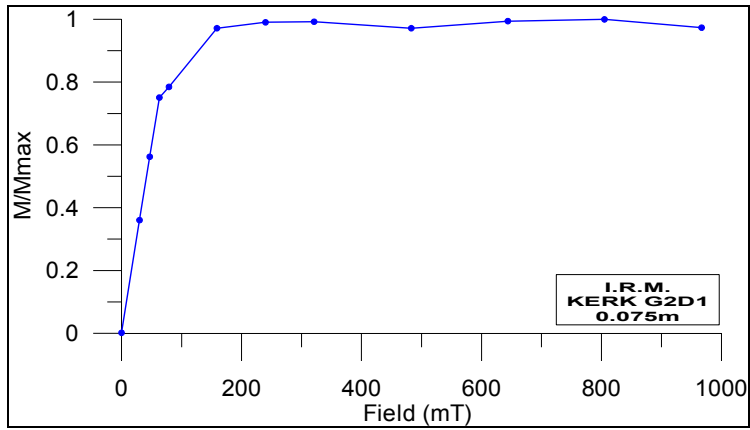


Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G1.

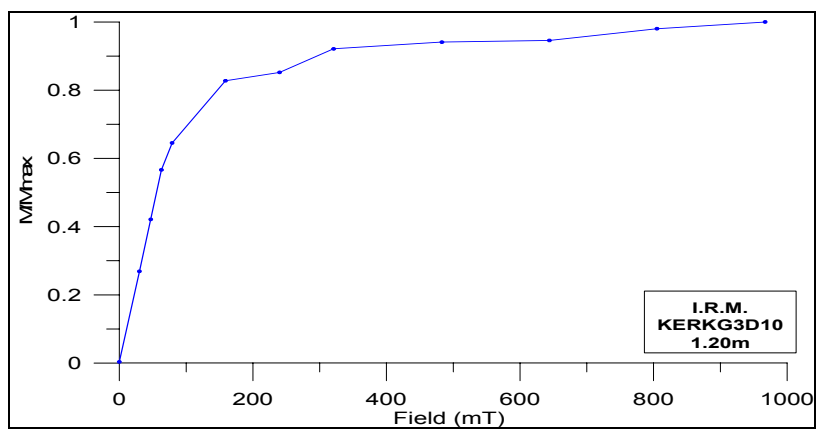
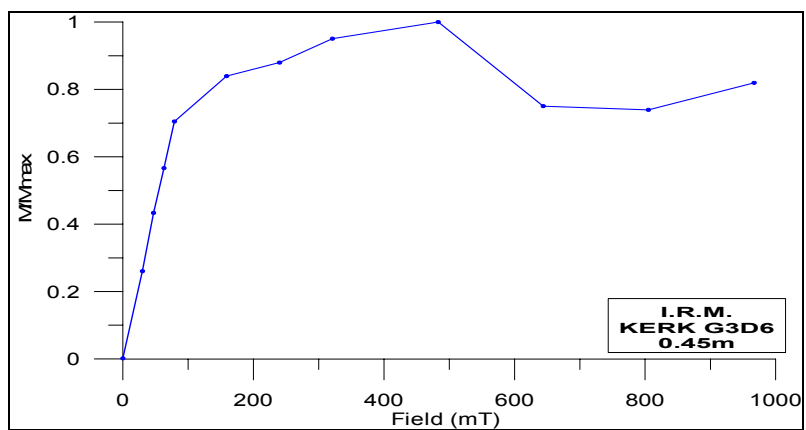
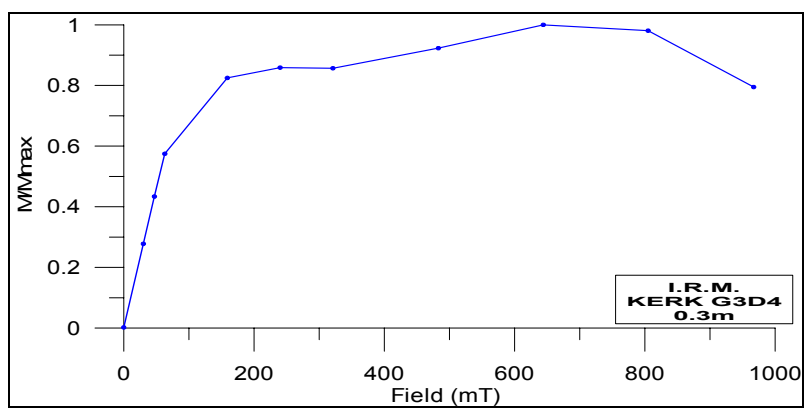
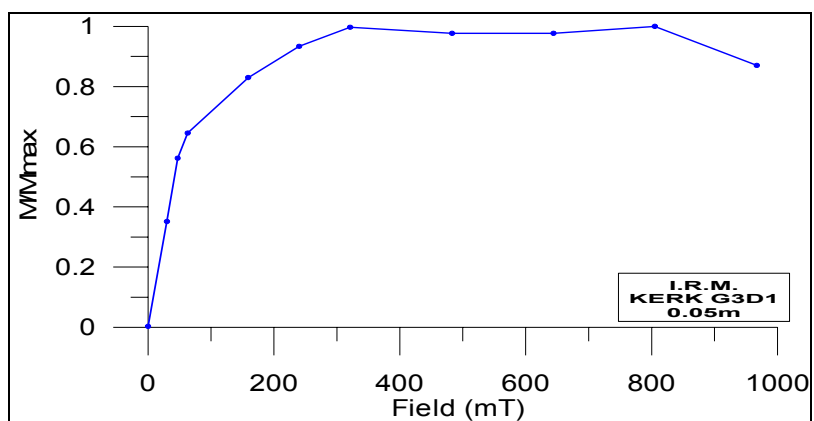
Από την μορφή που έχουν οι καμπύλες που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Ισόθερμης Παραμένουσας Μαγνήτισης για τα δείγματα της γεώτρησης G1 οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το μαγνητικό ορυκτό που επικρατεί στα ιζήματα αυτά είναι ο μαγνητίτης. Σε χαμηλές ακόμη τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου η καμπύλη φτάνει το μέγιστο της και εν συνεχεία παραμένει στο επίπεδο αυτού του κορεσμού. Ο μαγνητίτης φαίνεται να είναι το κύριο μαγνητικό ορυκτό σε όλα τα βάθη. Στο δείγμα G1D5, που αντιστοιχεί σε βάθος 0.40m, πιθανόν να περιέχονται και κάποιες ποσότητες τιτανομαγνητίτη, ενώ στο δείγμα G1D9 περιέχονται και κάποιες ποσότητες αιματίτη.

Ο μαγνητίτης φαίνεται να κυριαρχεί ως το βασικό μαγνητικό ορυκτό και στα ιζήματα των πυρήνων G2 και G3 με μικρές μόνο διαφοροποιήσεις σε συνάρτηση με το βάθος. Οι καμπύλες IRM για τα δείγματα G2D3, G2D5 και G2D13 που αντιστοιχούν σε βάθη 0.35m, 0.55m και 1,25m δείχνουν πιθανόν την ύπαρξη μικρών ποσοτήτων αιματίτη. Σε κάποια από τα δείγματα του πυρήνα G3, αλλά και κάποιων άλλων γεωτρήσεων, σε μεγάλες τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου σημειώνεται μια μείωση της μαγνήτισης, φαινόμενο που θεωρητικά είναι παράδοξο. Πιθανότατα οφείλεται σε μια μείωση της ακρίβειας του οργάνου στα μεγαλύτερα πεδία αλλά και σε μια πιθανή μετατόπιση κάποιων κόκκων στο εσωτερικό του κουτιού κατά την διάρκεια της μαγνήτισης του δείγματος, με αποτέλεσμα κάποιοι κόκκοι να έχουν μαγνητιστεί σε αντίθετη διεύθυνση και να μειώνουν τη συνιστάμενή της τιμή.

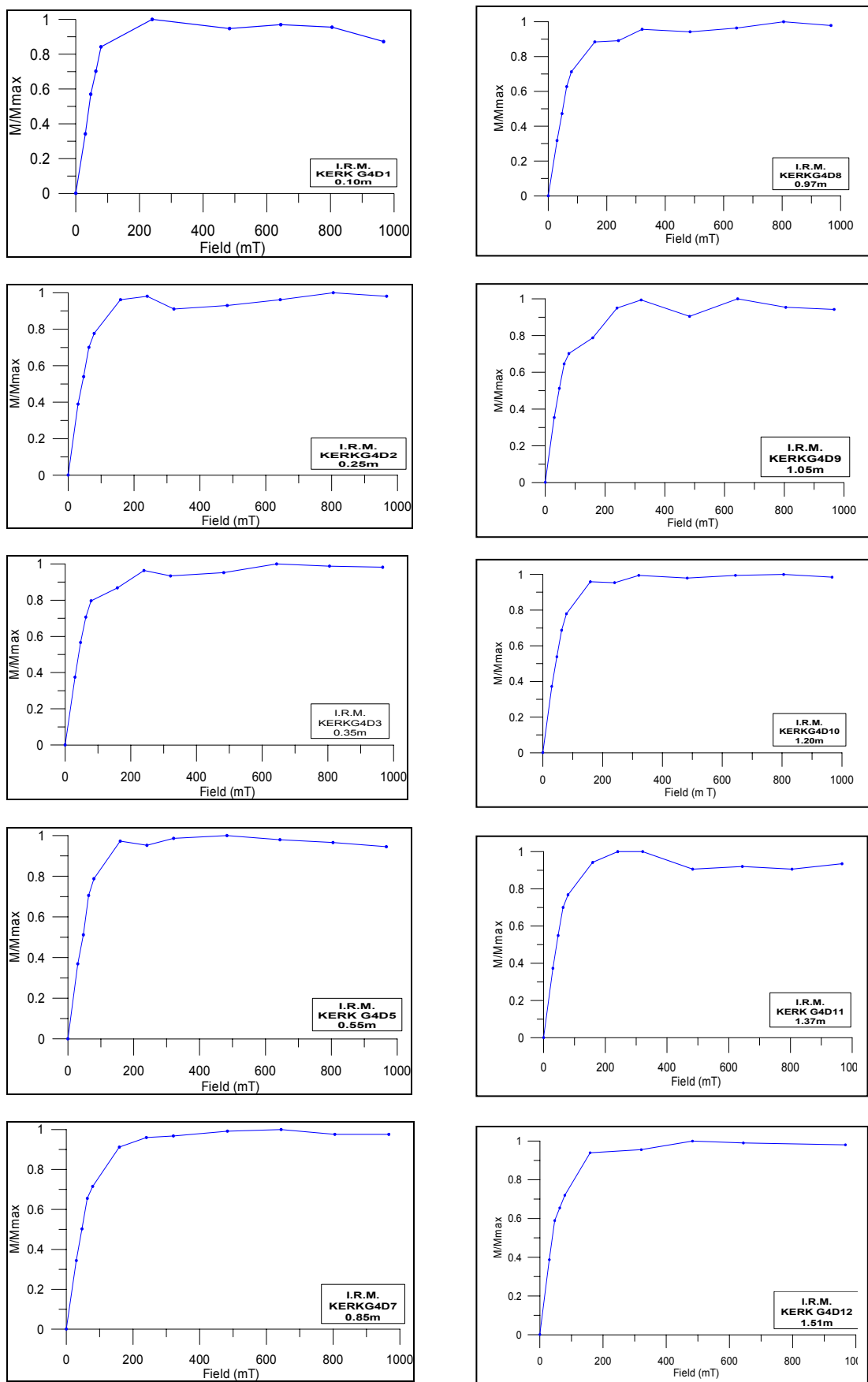
Οι μετρήσεις IRM για όλα τα δείγματα του πυρήνα G4 εμφανίζουν και πάλι τον μαγνητίτη ως το κυρίαρχο μαγνητικό ορυκτό με σταθερή ιζηματογένεση σε όλα τα βάθη. Η ίδια εικόνα επικρατεί και για τους πυρήνες G6, G7, G8 και G9. Τόσο στη γεώτρηση G4 όσο και στη γεώτρηση G9, όπου έχουν καταγραφεί έντονες μεταβολές της μαγνητικής επιδεκτικότητας με το βάθος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων IRM δείχνουν ότι οι μεταβολές αυτές δεν οφείλονται σε αλλαγή του κύριου φορέα μαγνήτισης των ιζημάτων αλλά πιθανότητα σε αλλαγή του ποσοστού απόθεσης αυτού.



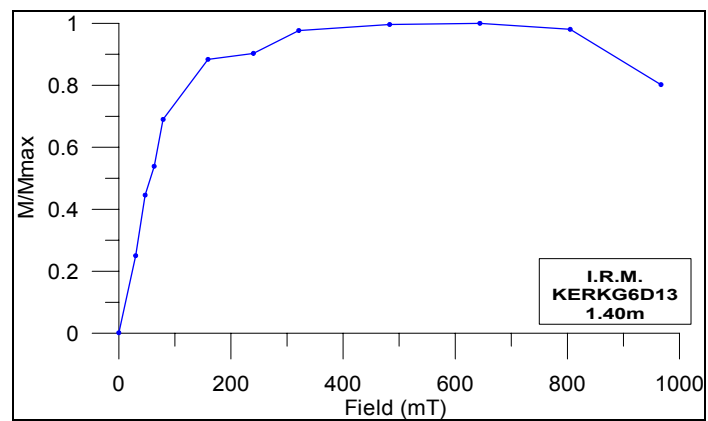
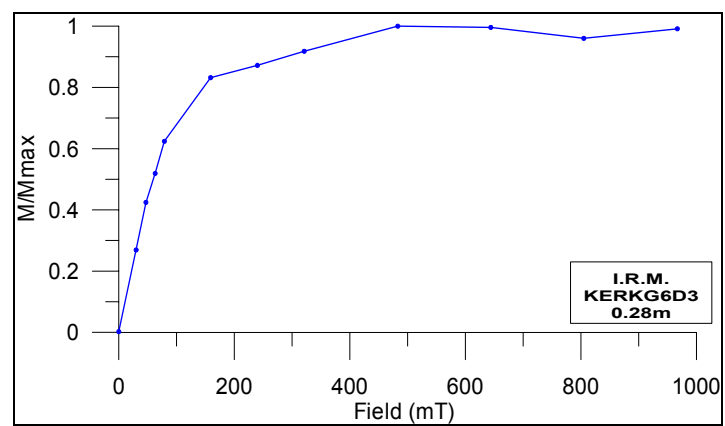
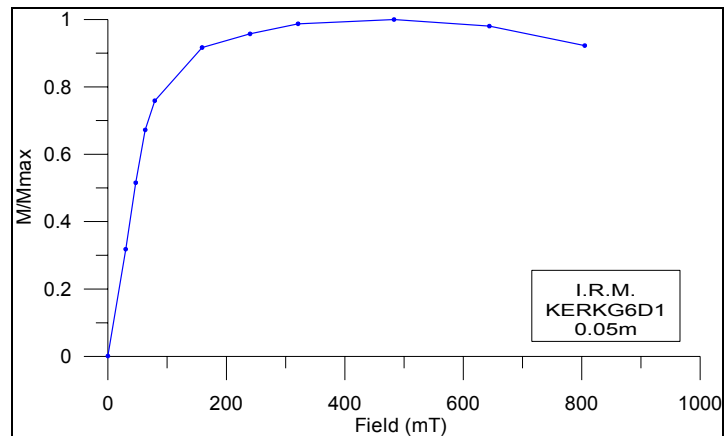
Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G2.



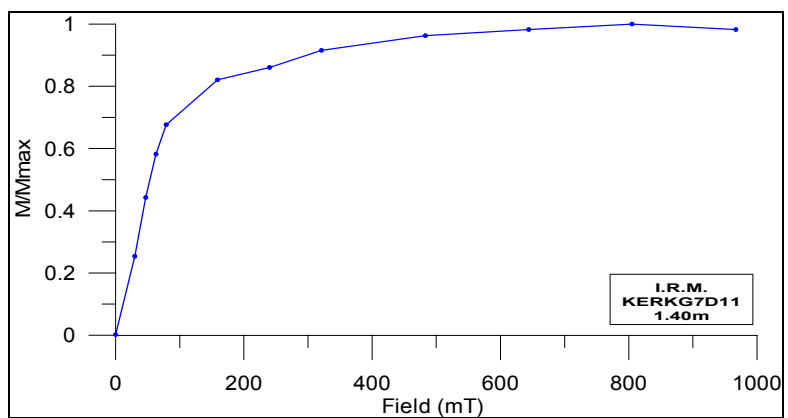
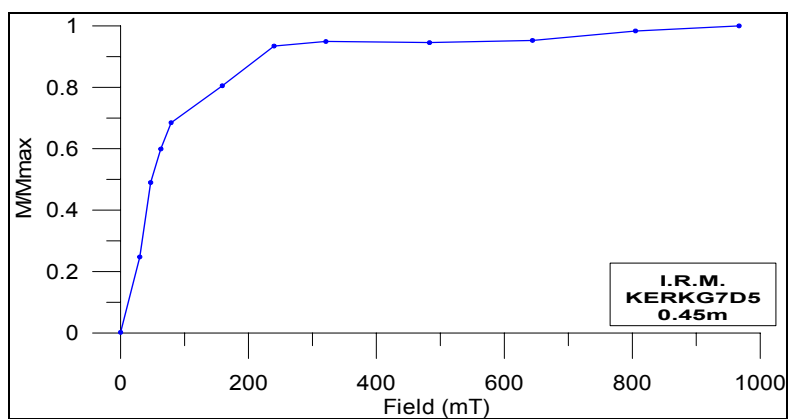
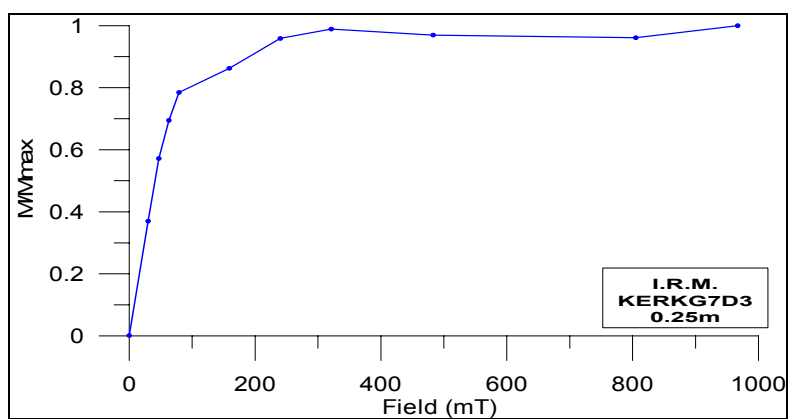
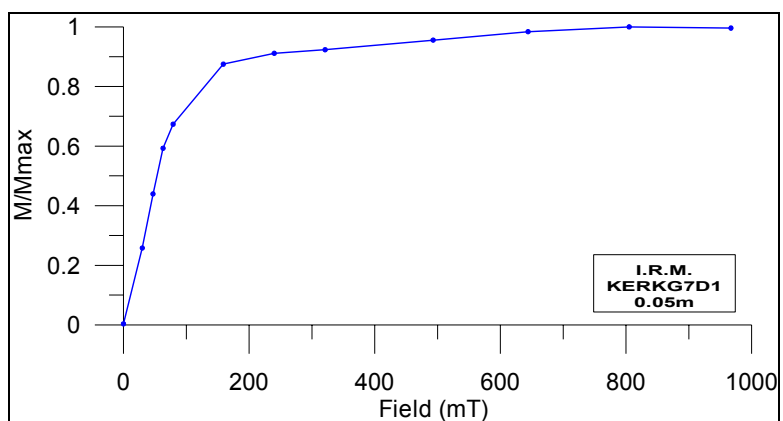
Σχήμα 4.6 : Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G3.



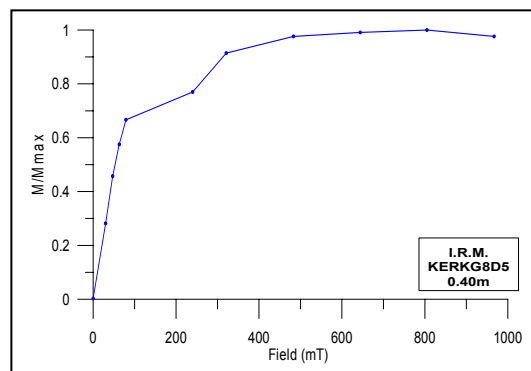
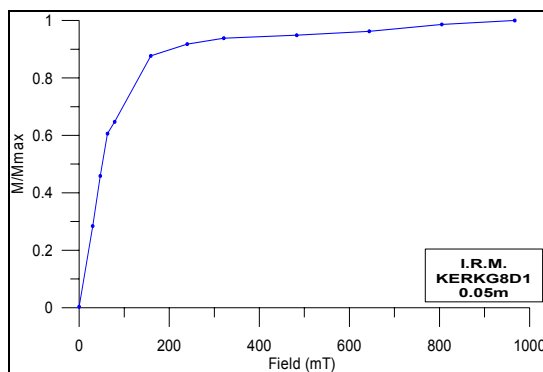
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G4.



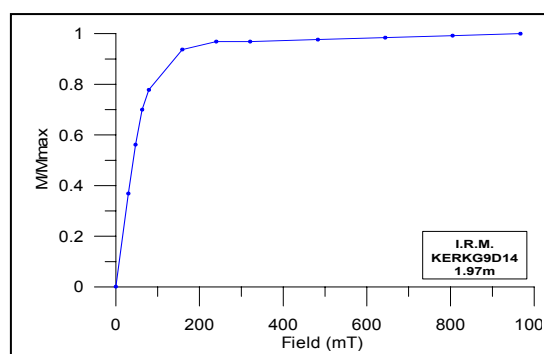
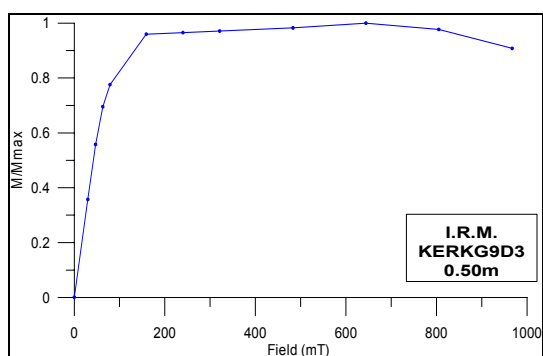
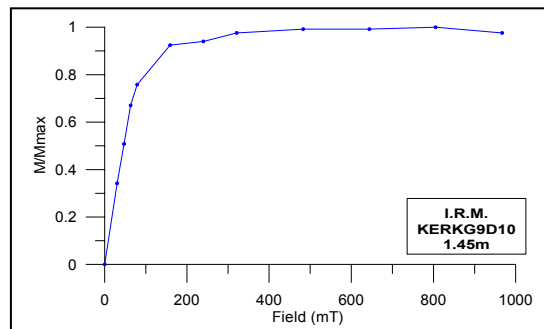
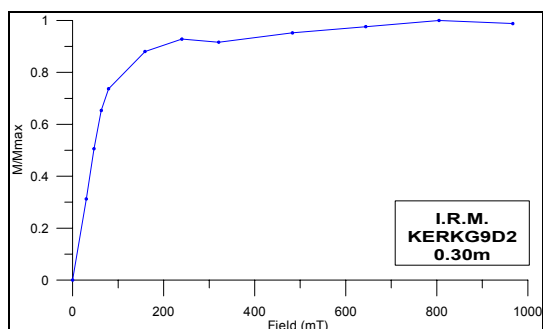
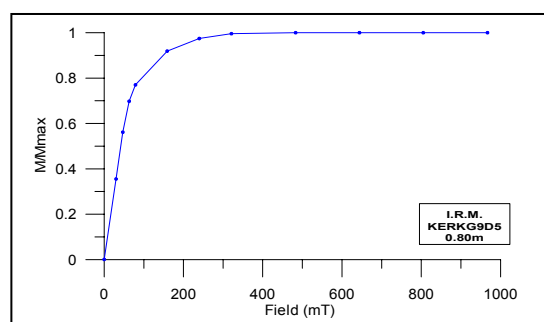
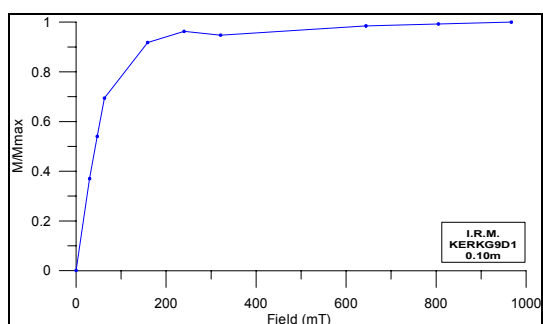
Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G6.



Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G7.

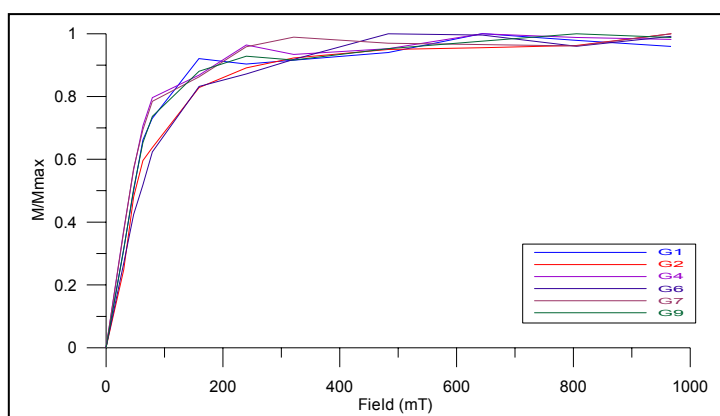


Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G8.

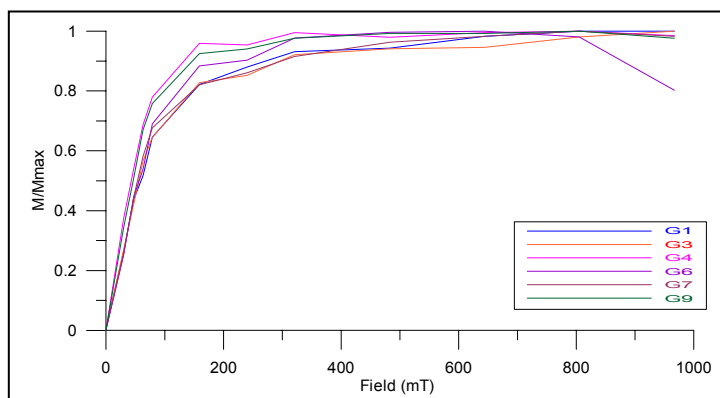


Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. από δείγματα της γεώτρησης G9.

Για την διερεύνηση του αιτίου που προκαλεί αυξημένες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας στα πρώτα 80cm των πυρήνων ενώ σε μεγαλύτερα βάθη σημειώνεται μια αισθητή μείωση αυτών, τοποθετήθηκαν στο ίδιο διάγραμμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων I.R.M. που προέκυψαν από δείγματα που αντιστοιχούσαν σε μικρά βάθη 0,30-0,40m από όλους τους πυρήνες και σε ένα άλλο διάγραμμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων I.R.M. που προέκυψαν από δείγματα που αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερα βάθη 1,20-1,40m.



Σχήμα 4.12: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. για βάθη 0,30-0,40m.



Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα μετρήσεων I.R.M. για βάθη 1,20-1,40m.

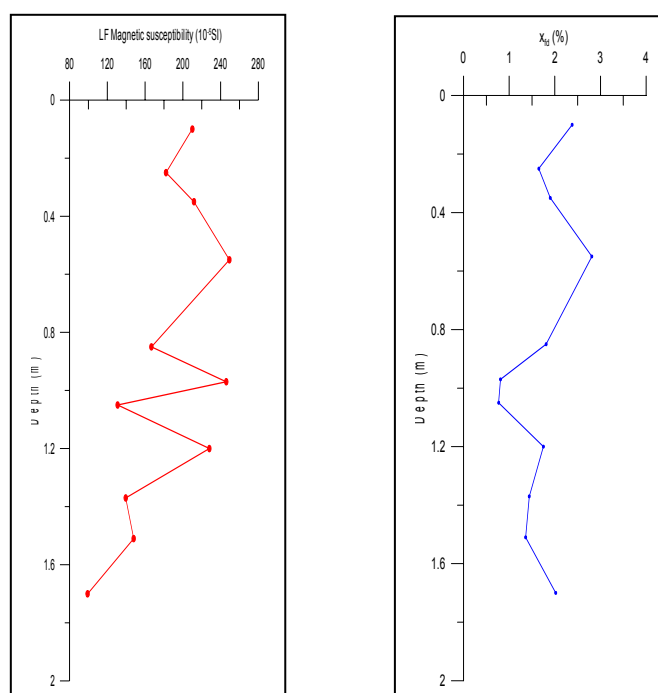
Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι τόσο σε μικρά όσο και σε μεγαλύτερα βάθη το κύριο μαγνητικό υλικό των ιζημάτων είναι ο μαγνητίτης, γεγονός που σημαίνει ότι η πηγή που τροφοδοτεί την λίμνη με υλικό παραμένει σταθερή στο πέρασμα του χρόνου και επομένως οι διαφορές στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας ανάμεσα στα ανώτερα ιζήματα και σε αυτά που προέρχονται από μεγαλύτερο βάθος δεν οφείλεται σε μεταβολή της φύσης του μαγνητικού υλικού αλλά σε μεταβολή της ποσότητας αυτού (γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους

πυρήνες G4 και G9). Για κάποιο λόγο δηλαδή τα τελευταία χρόνια έχουμε απόθεση στον πυθμένα της λίμνης μεγαλύτερης ποσότητας μαγνητίτη.

4.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ G4.

Ο πυρήνας G4 επιλέχθηκε για να αποτελέσει το αντικείμενο λεπτομερέστερων μαγνητικών μετρήσεων καθώς παρουσίαζε τις πιο αυξημένες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας (μαζί με τον πυρήνα G9) αλλά και έντονες μεταβολές αυτής σε συνάρτηση με το βάθος. Επίσης, ο πυρήνας αυτός λήφθηκε από την άκρη του δέλτα του ποταμού Στρυμόνα και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της ιζηματογένεσης στην περιοχή αυτή.

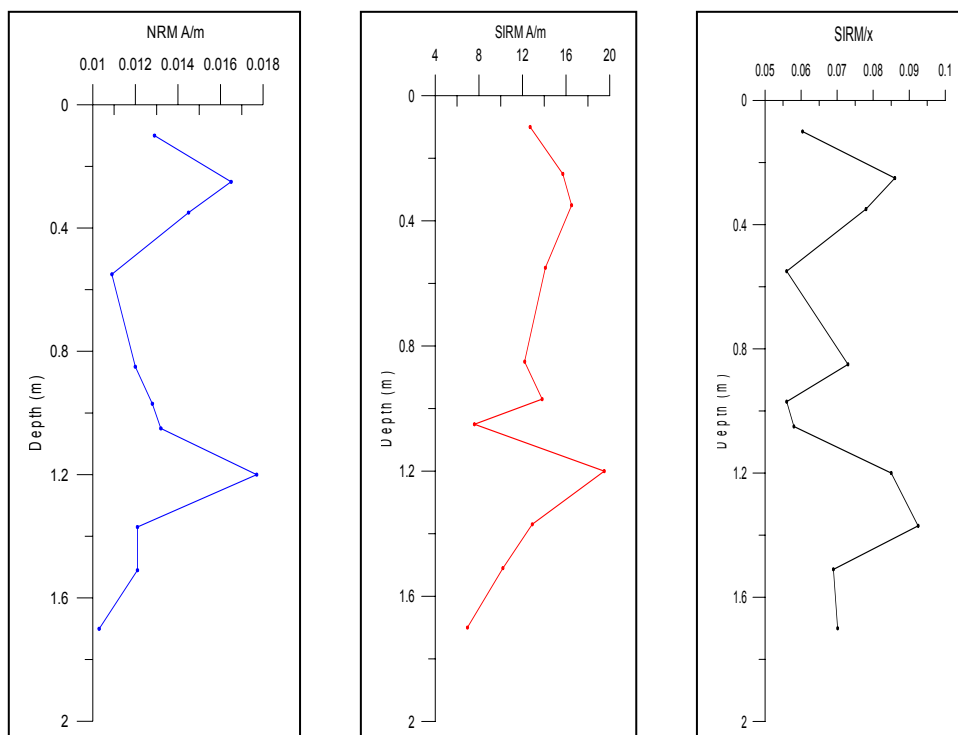
Για τον πυρήνα αυτόν μετρήθηκαν και χαρτογραφήθηκαν σε συνάρτηση με το βάθος η μαγνητική επιδεκτικότητα, η εξαρτώμενη από τη συχνότητα επιδεκτικότητα $\chi_{fd}(\%)$, η NRM, η SIRM, η SIRM/ χ και η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 4.14: Σύγκριση διαγραμμάτων μαγνητικής επιδεκτικότητας, χ , και εξαρτώμενης από τη συχνότητα μαγνητικής επιδεκτικότητας $\chi_{fd}(\%)$.

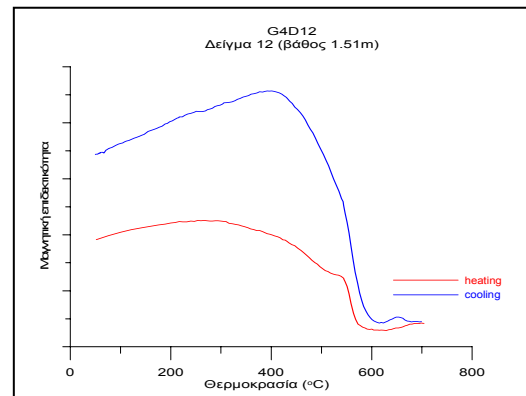
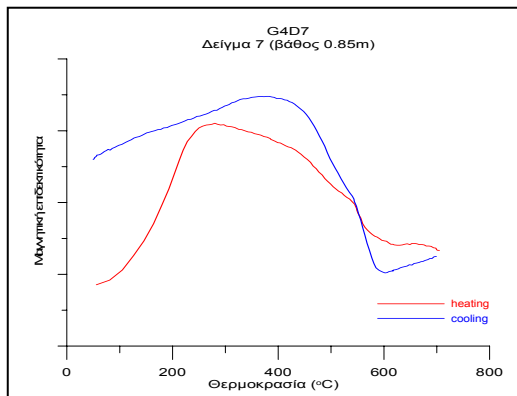
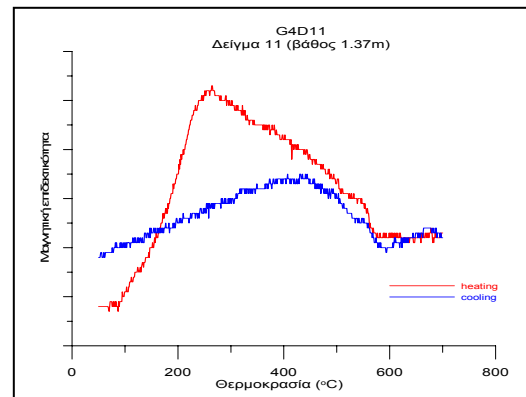
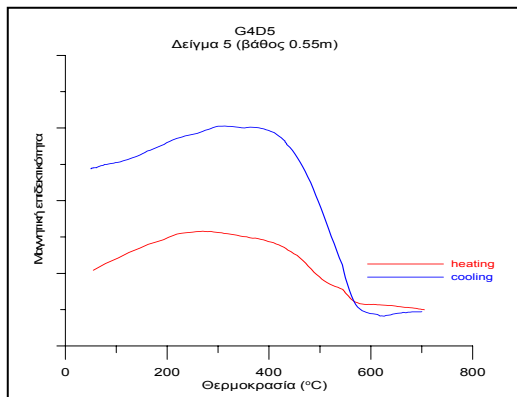
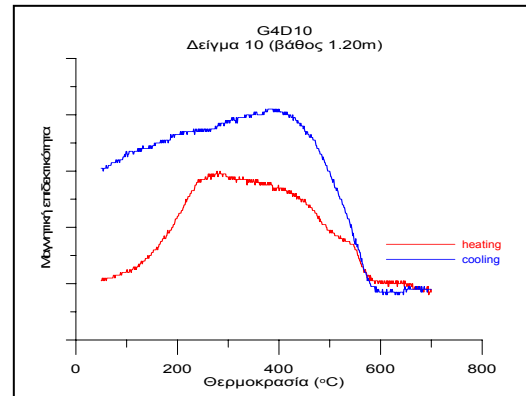
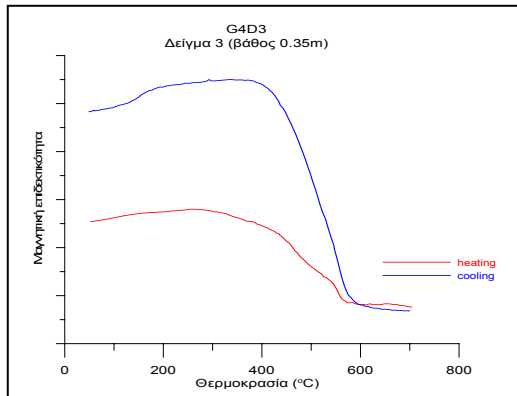
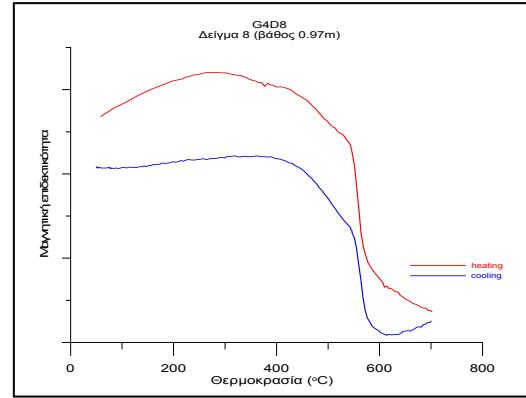
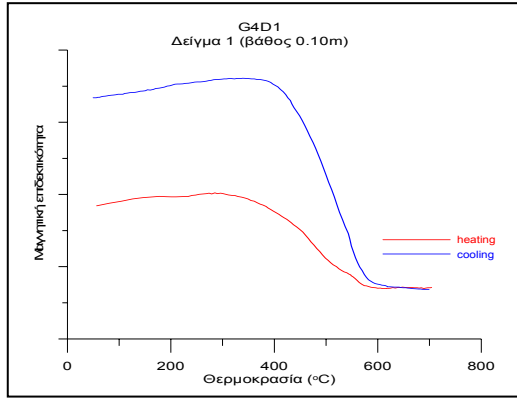
Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της εξαρτώμενης από τη συχνότητα μαγνητικής επιδεκτικότητας φαίνεται ότι και τα δύο διαγράμματα μεταβάλλονται σχεδόν παράλληλα ενώ οι τιμές της χ_{fd} δεν ξεπερνάνε το 3%.

Από αυτό το γεγονός μπορούμε να συμπεράνουμε ότι απουσιάζουν από τα δείγματα λεπτόκκοκα υπερμαγνητικά ορυκτά τα οποία και παρουσιάζουν μεγάλη εξάρτηση από τη συχνότητα.



Σχήμα 4.15: Διαγράμματα NRM, SIRM και SIRM/x σε συνάρτηση με το βάθος για τον πυρήνα G4.

Τα διαγράμματα των παραμέτρων NRM, SIRM και SIRM/x παρουσιάζουν την ίδια τάση. Σημειώνουν ένα μέγιστο σε βάθος 0.3m και ένα δεύτερο μέγιστο σε βάθος 1.20m περίπου. Για κάθε ένα από τα δείγματα του πυρήνα G4 πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις της μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται ακολούθως. Με κόκκινη γραμμή έχουν χαρτογραφηθεί οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ενώ με μπλέ χρώμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θέρμανσης. Η μέγιστη θερμοκρασία καταγραφής ήταν οι 700°C ενώ ως αρχική και τελική θερμοκρασία ορίστηκαν οι 50 °C.



Σχήμα 4.16: Διαγράμματα μεταβολής της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για δείγματα από τον πυρήνα G4.

Από τα αποτελέσματα των θερμομαγνητικών αναλύσεων των δειγμάτων του πυρήνα G4, προκύπτει και πάλι ότι έχουμε σταθερή τροφοδότηση της λίμνης με το ίδιο κύριο μαγνητικό ορυκτό που είναι ο μαγνητίτης. Όλα τα δείγματα, τόσο αυτά που αντιστοιχούν σε μικρά βάθη όσο και αυτά που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα, εμφανίζουν μια θερμοκρασία Curie που κυμαίνεται γύρω στους 580°C. Η θερμοκρασία αυτή αντιστοιχεί στο μαγνητικό ορυκτό μαγνητίτη, συμπέρασμα που βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ισόθερμης παραμένουσας μαγνήτισης των δειγμάτων αυτών (σελ.72).

Επίσης, η μορφή της θερμομαγνητικής καμπύλης κατά τη θέρμανση και ψύξη των δειγμάτων φανερώνει μια μη αντιστρεπτή διαδικασία που σημαίνει ότι κατά τη θέρμανση των δειγμάτων δημιουργούνται νέα μαγνητικά ορυκτά τα οποία ανιχνεύονται κατά τη διαδικασία της ψύξης από την παρατηρούμενη αύξηση της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Για τα δείγματα 8 και 11 παρατηρείται η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή πιθανώς κατά τη θέρμανση καταστράφηκαν κάποια μαγνητικά ορυκτά με αποτέλεσμα να καταγράφονται μικρότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας κατά τη ψύξη.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Από τη λίμνη Κερκίνη επιλέχθηκαν δείγματα από τους πυρήνες G1, G2 και G9 με σκοπό τη μέτρηση των ποσοστών σε άνθρακα των ιζημάτων αυτών. Οι γεωτρήσεις G1 και G2 επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις αυτές λόγω του ότι εμφάνιζαν ιδιαίτερως έντονη διαφορά στις τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας ανάμεσα στα ανώτερο στρώμα ιζημάτων και στα ιζήματα που αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερο βάθος. Όσον αφορά τη γεώτρηση G9, επιλέχθηκε εξαιτίας του ενδιαφέροντος που παρουσίαζαν οι πολύ μεγάλες τιμές των μαγνητικών παραμέτρων που μετρήθηκαν.

Το αντικείμενο των χημικών αναλύσεων άνθρακα, λοιπόν, αποτέλεσαν δείγματα από τις παραπάνω γεωτρήσεις που αντιστοιχούσαν σε δύο διαφορετικά βάθη. Το ένα δείγμα προερχόταν από τα επιφανειακά ιζήματα ενώ το άλλο από ιζήματα μεγαλύτερου βάθους, έτσι ώστε να μπορέσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με το αν οι χαμηλότερες τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας που μετρήθηκαν στα δείγματα που αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερα βάθη (§ 4.3.1) ενδεχομένως οφείλονταν σε μεγάλα ποσοστά άνθρακα, η παρουσία του οποίου μειώνει το μαγνητικό σήμα. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν και πάλι σε συνεργασία με το Τμήμα Χημείας του Α.Π.Θ.

Δείγμα	Βάθος (m)	Ποσοστό (%) άνθρακα
KERK G1D2	0.15-0.35	1.27
KERK G1D8	0.94-1.15	0.70
KERK G2D2	0.15-0.33	0.99
KERK G2D12	1.15-1.20	0.10
KERK G9D4	0.60-0.71	0.78
KERK G9D16	2.30-2.55	1.63

Πίνακας 4.5.1: Ποσοστά (%) άνθρακα στα ιζήματα της λίμνης Κερκίνης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα ιζήματα της λίμνης Κερκίνης έχουν πολύ μικρές περιεκτικότητες σε άνθρακα. Οι τιμές αυτού, που δεν ξεπερνούν το 2%, είναι ιδιαίτερως χαμηλές τόσο στα ιζήματα του ανώτερου στρώματος του πυθμένα της λίμνης όσο και στα ιζήματα μεγαλύτερου βάθους. Κατά συνέπεια μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή στις μαγνητικές παραμέτρους των ιζημάτων σε συνάρτηση με το βάθος δεν μπορεί να οφείλεται ή/και να επηρεάζεται από διαφορετικές περιεκτικότητες σε άνθρακα, καθώς οι τιμές αυτού είναι πολύ μικρές και σταθερές σε όλα τα βάθη.

4.6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ιζήματα εννέα πυρήνων, που λήφθηκαν από διαφορετικά σημεία του δέλτα που σχηματίζει ο ποταμός Στρυμόνας καθώς χύνεται στη λίμνη Κερκίνη, εξετάστηκαν ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας έδειξαν ιδιαίτερα αυξημένο μαγνητικό φορτίο για τα πρώτα 50-80 cm των πυρήνων, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη οι τιμές της επιδεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν σημαντικά χαμηλότερες και σταθερές ώστε να θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή της επιδεκτικότητας των ιζημάτων που προέρχονται από τα περιβάλλοντα πετρώματα (background values).

Οι ιδιαιτέρως αυξημένες τιμές επιδεκτικότητας του επιφανειακού στρώματος των ιζημάτων της λίμνης θα μπορούσαν να είναι το αποτέλεσμα της μεταβολής της μαγνητικής ορυκτολογίας των ιζημάτων λόγω διαγενετικών φαινομένων, της μεταβολής της τροφοδοσίας της λίμνης λόγω αλλαγής των συνθηκών στη λεκάνη απορροής της ή/και ακόμη της απόθεσης νέων μαγνητικών σωματιδίων προερχόμενων από αλλαγή της ανθρωπογενούς δραστηριότητας κατά μήκος του ποταμού Στρυμόνα τις τελευταίες δεκαετίες.

Οι μετρήσεις της Ισόθερμης Παραμένουσας Μαγνήτισης για όλους τους πυρήνες υποδεικνύουν ότι το κύριο μαγνητικό ορυκτό των ιζημάτων που αποτίθενται σε όλη την επιφάνεια του δέλτα του ποταμού είναι μαγνητίτης. Επίσης, τα αποτελέσματα των μετρήσεων της Ισόθερμης Παραμένουσας Μαγνήτισης για δείγματα από τον ίδιο πυρήνα που αντιστοιχούν, όμως, σε διαφορετικά βάθη καθώς και οι αναλυτικές IRM μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δείγματα του πυρήνα G4 δείχνουν καθαρά πως κατά τις τελευταίες δεκαετίες ο ποταμός Στρυμόνας τροφοδοτεί σταθερά τη λίμνη Κερκίνη με το ίδιο μαγνητικό ορυκτό το οποίο είναι κατά βάση μαγνητίτης με ελάχιστες προσμίξεις άλλων ορυκτών.

Στο ίδιο συμπέρασμα μας οδηγούν και τα αποτελέσματα της καταγραφής των μεταβολών της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για διάφορα βάθη, τα οποία προσδιορίζουν θερμοκρασία Curie του μαγνητικού ορυκτού των ιζημάτων γύρω στους 580°C, χαρακτηριστική της παρουσίας μαγνητίτη. Επίσης, οι αναλύσεις άνθρακα ορισμένων δειγμάτων δείχνουν πολύ χαμηλές περιεκτικότητες τόσο στα ανώτερα ιζήματα όσο και στα ιζήματα που προέρχονται από μεγαλύτερα βάθη, που σημαίνει ότι τα ποσοστά άνθρακα στα ιζήματα της λίμνης είναι τόσο αμελητέα που δεν επηρεάζουν το μαγνητικό σήμα. Κατά συνέπεια, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας στο ανώτερο στρώμα των ιζημάτων δεν οφείλεται στην αλλαγή του φορέα μαγνήτισης των ιζημάτων αλλά στην αύξηση της ποσότητας απόθεσης αυτού.

Γνωρίζοντας ότι το 1932 κατασκευάστηκε στην περιοχή το πρώτο τεχνητό φράγμα με στόχο την κατακράτηση των νερών του Στρυμόνα και λαμβάνοντας ένα μέσο όρο ιζηματογένεσης της περιοχής 0,9 cm/yr, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας στα ανώτερα 60-70 cm οφείλεται στη συσσώρευση των μαγνητικών φορτίων που μεταφέρει ο ποταμός και τα οποία μετά την κατασκευή του φράγματος αποθέτονται αναγκαστικά στο δέλτα και δεν διασκορπίζονται όπως παλαιότερα. Σε αυτό το γεγονός θα μπορούσαν να αποδοθούν και οι πολύ μεγάλες τιμές επιδεκτικότητας που σημειώνονται στους πυρήνες G4 και G9. Οι πυρήνες αυτοί έχουν ληφθεί από το σημείο όπου τελειώνει το δέλτα του Στρυμόνα. Στο σημείο αυτό ο ποταμός αποθέτει όλη την ιλύ και την άργιλο που μεταφέρει καθώς επίσης και τα μαγνητικά ορυκτά και τυχόν βαρέα μέταλλα και παρασέρνει μαζί του πλέον μόνο κάποια εν αιωρήσει πολύ λεπτόκοκκα υλικά.

Κατά συνέπεια, βασιζόμενοι σε όλα τα ανωτέρω δεδομένα θεωρούμε ότι οι μαγνητικές μετρήσεις μπόρεσαν αποτελεσματικά να αντικατοπτρίσουν την ανθρωπογενή παρέμβαση στην ιζηματογένεση της περιοχής με την κατασκευή του φράγματος, ενώ, επίσης, είναι πιθανόν κατά τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη της βιομηχανίας στις περιοχές που αποσταγγίζονται στον ποταμό Στρυμόνα να παράγει σφαιρίδια μαγνητίτη, τα οποία παρασέρνονται από τον ποταμό και αποθέτονται στο δέλτα που σχηματίζει ο ποταμός στη λίμνη Κερκίνη. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος πιθανόν αποτελεί η αύξηση των μαγνητικών σωματιδίων στα ιζήματα της λίμνης και ενδεχομένως και των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων που συχνά ενσωματώνονται στη δομή των ορυκτών αυτών. Πρόσφατες χημικές αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα νερά του ποταμού Στρυμόνα (Lazaridou et al, 2001), δίνουν χαμηλές έως μέτριες τιμές για τα βαρέα μέταλλα Zn, Cu, As και Cu αλλά ιδιαίτερα υψηλές τιμές για τα μέταλλα Pb, Cd και Mn. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα συγκεκριμένα αυτά βαρέα μέταλλα έχει καταγραφεί αξιοσημείωτη συσχέτιση με τις μαγνητικές παραμέτρους σε αρκετές εργασίες (Petrovsky et al 1998, Scholger R. 1998 κ.α) και κατά συνέπεια εμφανίζει εξαιρετικό ενδιαφέρον η περαιτέρω διερεύνηση της περιοχής για ενδεχόμενες αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα ιζήματα της λίμνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1 ΣΥΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΙΜΝΗΣ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗΣ ΚΕΡΚΙΝΗΣ

Η λίμνη Κουμουνδούρου είναι μια μικρή, κλειστή λίμνη η οποία τροφοδοτείται με ιζήματα κυρίως από το γειτονικό ασβεστολιθικό περιβάλλον. Τα υλικά αυτά είναι κυρίως διαμαγνητικά με τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας αρνητικές ή πολύ κοντά στο μηδέν. Αντιθέτως, η λίμνη Κερκίνη τροφοδοτείται από τον ποταμό Στρυμόνα, ο οποίος διασχίζει κατά την πορεία του διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, κυρίως γρανιτικά και αμφιβολιτικά πετρώματα και τροφοδοτεί τη λίμνη με τέτοια υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές επιδεκτικότητας.

Η ιζηματογένεση στη λίμνη Κουμουνδούρου, όπως προκύπτει από τις μαγνητικές μετρήσεις των ιζημάτων σε συνάρτηση με το βάθος, υπήρξε σταθερή όσον αφορά στην παροχή μαγνητικών ορυκτών, σε αντίθεση με τη λίμνη Κερκίνη όπου καταγράφεται μια έντονη συσσώρευση μαγνητικού φορτίου στα ανώτερα ιζήματα του πυθμένα της.

Τόσο στα ιζήματα της λίμνης Κουμουνδούρου όσο και στα ιζήματα της λίμνης Κερκίνης, ο μαγνητίτης είναι το κύριο μαγνητικό ορυκτό. Παρ' όλα αυτά στην λίμνη Κουμουνδούρου φαίνεται ότι η ποσότητα αυτού είναι περιορισμένη ενώ στη λίμνη Κερκίνη παρατηρείται μια συσσώρευση αυτού. Η λίμνη Κουμουνδούρου βρίσκεται σε μια περιοχή με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα και αναερόβιες συνθήκες ενώ η λίμνη Κερκίνη αποτελεί έναν υδροβιότοπο και στο άμεσο περιβάλλον γύρω από αυτήν δεν υπάρχουν βιομηχανικές μονάδες. Παρ' όλα αυτά, οι μαγνητικές καταγραφές για τις δύο λίμνες δίνουν μεγαλύτερες τιμές μαγνητικών φορτίων στη λίμνη Κερκίνη και όχι στη λίμνη Κουμουνδούρου, όπως ίσως θεωρητικά θα αναμένονταν.

Οι δύο αυτές περιοχές μελέτης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί αποτελούν παραδείγματα δύο διαφορετικών λιμναίων συστημάτων. Και στις δύο περιπτώσεις όμως οι μαγνητικές μετρήσεις μπόρεσαν αποτελεσματικά να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στα δύο αυτά συστήματα και να επισημάνουν πιθανές περιοχές για περαιτέρω μελέτη.

5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Οι συστηματικοποιημένες μετρήσεις των μαγνητικών ιδιοτήτων ιζημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε θέματα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, παρέχοντας πληροφορίες για τη φύση των ιζημάτων, την πιθανή προέλευση αυτών, ενδεχόμενες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην διαδικασία ιζηματογένεσης και τον εμπλουτισμό σε μαγνητικά σωματίδια και βαρέα μέταλλα λόγω αστικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Οι μαγνητικές μετρήσεις, όπως προκύπτει και από την παρούσα διατριβή ειδίκευσης, σε αντίθεση με τις γεωχημικές μεθόδους πραγματοποιούνται γρήγορα και πάνω από όλα έχουν μικρό οικονομικό κόστος. Ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων μπορεί να μετρηθεί ως προς διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες χωρίς αυτό να συνεπάγεται μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Βεβαίως, τέτοιου είδους μαγνητικές μελέτες δεν μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και να παρέχουν πλήρεις πληροφορίες για την ιζηματογένεση μιας περιοχής και τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις κατά τη διάρκεια αυτής. Παρ' όλα αυτά, ο ρόλος τους είναι καθοριστικός ως προς την αρχική διερεύνηση των συνθηκών ιζηματογένεσης. Οι μαγνητικές μετρήσεις μπορούν να αποτελέσουν το πρώτο στάδιο μελέτης μιας περιοχής ανιχνεύοντας και υποδεικνύοντας τις θέσεις εκείνες στις οποίες θα είχε ενδιαφέρον η πραγματοποίηση μιας πιο αναλυτικής μελέτης. Τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων μπορούν, επί παραδείγματι, να επισημάνουν συγκεκριμένες περιοχές με αυξημένα μαγνητικά φορτία και πιθανώς και αυξημένες συγκεντρώσεις σε βαρέα μέταλλα καθιστώντας αναγκαίες τις χημικές αναλύσεις σε εκείνες μόνο τις θέσεις. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, διαμορφώνεται γρήγορα, εύκολα και χωρίς μεγάλο κόστος μια πρώτη ιδέα των περιβαλλοντικών συνθηκών και περιορίζεται ο αριθμός των χημικών αναλύσεων που κοστίζουν πολύ.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός συγκεντρώνει πάνω του το ενδιαφέρον ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού επιστημόνων. Αποτελεί έναν κλάδο του μαγνητισμού που αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο βρίσκοντας άμεσες εφαρμογές σε πληθώρα πεδίων περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Σήμερα διερευνάται ιδιαιτέρως, από μεγάλη ομάδα επιστημόνων, ακόμη και η ποσοτική σχέση ανάμεσα σε κάποιες μαγνητικές παραμέτρους και τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων και θεωρείται ότι στο μέλλον οι μαγνητικές μέθοδοι θα μπορούν να λειτουργούν και αυτοτελώς μειώνοντας στο ελάχιστο την αναγκαιότητα πραγματοποίησης χημικών αναλύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΑΗΔΟΝΑ Ε., Μαγνητικές ιδιότητες ορυκτών και εφαρμογές τους στην γεωλογία και αρχαιολογία. *Διατριβή ειδίκευσης*, Θεσσαλονίκη, 1997.

ΑΗΔΟΝΑ Ε., Παλαιομαγνητικές και μαγνητικές ιδιότητες ιζημάτων και υποβάθρου σε πυρήνες γεωτρήσεων από τον Β. Ελλαδικό χώρο: Συμβολή στη διερεύνηση των συνθηκών διαγένεσης. *Διδακτορική διατριβή*, Θεσσαλονίκη, 2002.

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ Χρ., ΚΑΜΠΕΡΗ Ε., ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΗΣ Α., Τάσεις στην κατανομή των βαρέων μετάλλων στα σύγχρονα ιζήματα του όρμου και του κόλπου της Θεσσαλονίκης. Αθήνα, 1996.

ANDERSON N. and RIPPEY B., Diagenesis of magnetic minerals in the recent sediments of a eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 33, pp.1476-1492, 1988.

ΑΤΖΕΜΟΓΛΟΥ Α., Παλαιομαγνητικά αποτελέσματα από το Βόρειο Ελλαδικό χώρο και η συμβολή τους στην ερμηνεία της γεωδυναμικής εξέλιξης της περιοχής κατά το τριτογενές. *Διδακτορική διατριβή*, Θεσσαλονίκη, 1997.

BARTINGTON INSTRUMENTS LTD., Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System, 1995.

BITYUKOVA L., SCHOLGER R. and BIRKE M., Magnetic Susceptibility as Indicator of Environmental Pollution of Soils in Tallinn. *Phys.Chem.Earth (A)*, Vol.24, No 9, pp.829-835, 1999.

BRILHANTE O., DALY L. et TRABUC P., Application du magnetisme a la detection des pollutions causees par les metaux lourds dans l' environnement, 1989.

BUBB J. and LESTER J., Anthropogenic heavy metal inputs to river systems, a case study. The river Stour, U.K. *Water, Air and Soil Pollution*, 78, pp.279-296, 1994.

ΓΚΡΙΤΖΑΛΗΣ Κ., ΜΠΕΡΤΑΧΑΣ Η., ΚΟΥΣΟΥΡΗΣ Θ., ΔΙΑΠΟΥΛΗΣ Α., ΜΠΟΓΔΑΝΟΣ Κ., Συγκεντρώσεις Βαρέων Μετάλλων στα Επιφανειακά Ιζήματα και στα Νερά της Λίμνης Κουμουνδούρου. *4^ο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας*, Μόλυβος Λέσβου, 1995.

CHAN L.S., YEUNG C.H., YIM S., OR O.L., Correlation between magnetic susceptibility and distribution of heavy metals in contaminated sea - floor sediments of Hong Kong Harbour, Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, 1997.

CHAN L.S., NG S.L., DAVIS A.M., YIM W.S. and YEUNG C.H., Magnetic Properties and Heavy-metal Contents of Contaminated Seabed Sediments of Penny's Bay, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin Vol.42, No7*, pp 569, 2001.

CHARLESWORTH S. and LEES J. The use of Mineral Magnetic Measurements in Polluted Urban Lakes and Deposited Dusts, Coventry, U.K. *Phys.Chem.Earth. Vol 22, No 1-2*, pp.203-206, 1997.

COX A. and HART R., Plate tectonics, How It Works. Blackwell Scientific Publications, Inc.

DEARING J., Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 System, 1995.

DEARING J., DANN R.J.L., HAY K., LEES J.A., LOVELAND P.J., MAHER B.A. and O'GRADY K., Frequency – dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys.J.Int., 124*, pp.228-240, 1996.

DURZA O., Heavy Metals Contamination and Magnetic Susceptibility in Soils around Metallurgical Plant. *Phys.Chem.Earth (A), Vol. 24, No. 6*, pp. 541-543, 1999.

E.K.Θ.E, Μελέτη του θαλάσσιου οικοσυστήματος του Θερμαϊκού κόλπου, Αθήνα, 1996.

ELLWOOD B., Pollution of Air, Land and Waters, University of Texas, Arlington, USA, 1997.

ERIKSSON M. and SANDGREN P., Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeocology 152*, pp. 365-383, 1999.

GEORGEAUD V.M., ROCHETTE P., AMBROSI J.P., VANDAMME D. and WILLIAMSON D., Relationship Between Heavy Metals and Magnetic Properties in a

Large Polluted Catchment: The Etang de Berre (South of France). *Phys.Chem.Earth*, Vol.22, No 1-2, pp.211-214, 1997.

HAY K., DEARING J., BABAN S. and LOVELAND P., A Preliminary Attempt to Identify Atmospherically Derived Pollution Particles in English Topsoils from Magnetic Susceptibility Measurements. *Phys.Chem.Earth*, Vol.22, No 1-2, pp.207-210, 1997.

HELLER F., STRZYSZCZ Z. and MAGIERA T., Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland. *Journal of Geophysical Research*, Vol.103, No B8, 1998.

HILTON J., A Simple Model for the Interpretation of Magnetic Records in Laustrine and Ocean Sediments. *Quaternary Research* 27, pp. 160-166, 1987.

HOFFMAN V., KNAB M., APPEL E., Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration* (66), 1999.

JELINOWSKA A., TUCHOLKA P. and BADAUT-TRAUTH D., Magnetic Mineral Variations of Caspian Sea Sediments at Laminae Scale. *Phys.Chem.Earth (A)*, Vol.24, No 9, pp.823-828, 1999.

ZEPH XP., Εφαρμογή της μαγνητικής μεθοδολογίας σε ανοιχτά θαλάσσια συστήματα. Η περίπτωση της ΒΔ Μεσογείου. Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 1995.

ZERI Ch. and SCOULLOS M., An integrated magnetic – chemical approach to the study of iron in Rhone estuary sediments. *Oceanologica Acta*, Vol. 21, No 1, 1996.

ZHENG H., OLDFIELD F., YU L., SHAW J. and AN Z., The magnetic properties of particle – sized samples from the Luo Chuan loess section: evidence of pedogenesis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 68, pp. 250-258, 1991.

PETROVSKY E., KAPICKA A., JORDANOVA N., KNAB M., HOFFMAN V., Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environmental Geology* 39 (3-4), 2000.

PETROVSKY E., KAPICKA A., ZAPLETAL K., SEBESTOVA E., SPANILA T., DEKKERS M. and ROCHETTE P., Correlation Between Magnetic Parameters and

Chemical Composition of Lake Sediments from Northern Bohemia, Preliminary Study. *Phys.Chem.Earth*, Vol.23, No 9-10, pp.1123-1126, 1998.

KAPICKA A., PETROVSKY E., USTJAK S., MACHACKOVA K., Proxy mapping of fly – ash pollution of soils around a coal-burning power plant: a case study in the Czech Republic. *Journal of Geochemical Exploration* (66), 1999.

KENNETH V. and ROBERTS A., Environmental magnetism: Past, present and future. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No B2, pp. 2175-2192, 1995.

KING J., GALBRUN B. and ACTON G., Magnetic studies of selected sediments. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 165, 2000.

KING J., BANERJEE S., MARVIN J. and OZDEMIR O., A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science*, 59, pp.404-419, 1982.

KOUTSOMITROS S., MIMIDES A., SGOUMPOPOULOS A., RIZOS S., Investigation of the self-cleaning ability of Lake Koumoundourou near Athens from oil pollution. *Environ.Engg. and Policy* 2, pp.155-159, 2001.

LAZARIDOU M. , POLYZONIS E. and ARVANITIDIS N., Water Capacity and Heavy Metals Compositional Trends of Greek Bulgarian Rivers across the Rhodope Mountains., *INTERREG Meeting-North Aegean System Functioning and Inter-Regional Pollution*, Kabala, Greece, 2001.

MOYNTPAKHΣ Δ., Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1985.

OLDFIELD F., Magnetic measurements of recent sediments from Big Moose Lake, Adirondack Mountains, N.Y., USA. *Journal of Paleolimnology*, 4, pp.93-101, 1990.

OLDFIELD F. and RICHARDSON N., Lake sediment magnetism and atmospheric deposition. *Phil.Trans.R.Soc.Lond.,B* 327, pp. 325-330, 1990.

ΣΚΟΡΔΑΣ Κ., ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ Μ., Αειφορική διαχείριση του νερού της λίμνης Κερκίνης. Πρακτικά Προγράμματος Κατάρτισης. Σέρρες, 1995.

SCHOLGER R., Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of the river Mur (Styria, Austria). *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, pp. 25-37, 1998.

SCOTT A., Sediment tracing in a reservoir-catchment system using a magnetic mixing model, *Phys. Earth Planet. Int.*, 42, pp.105-112, 1986.

SCOULLOS M., Lead in coastal sediments: The case of Elefsis Gulf. *The SCI of the total Env.*, 49, pp.199-219, 1986.

SCOULLOS M. and PAVLIDOU A., Metal speciation studies in a brackish-marine interface system. *Global Nest: the Int.J.*, Vol.2, No 3, pp.255-264, 2000.

SCOULLOS M., ZERI C., OLDFIELD F., FRANCE D., Investigations on magnetic properties of sediments of the Rhone estuary and the Gulf of Lions, *EEC-Water Pollution Research Reports*, No 20, pp.547-561, 1990.

SCOULLOS M. and OLDFIELD F., Magnetic monitoring of Marine Particulate Pollution in the Elefsis Gulf, Greece. *Marine Pollution Bulletin*, Vol.10, pp.287-291, 1979.

SCOULLOS M. and OLDFIELD F., Trace metal and magnetic studies of sediments in Greek estuaries and enclosed gulfs. *Marine Chemistry*, 18, pp.249-268, 1986.

SINGH M., Heavy metal pollution in freshly deposited sediments of the Yamuna River (the Ganges River tributary): a case study from Delhi and Agra urban centers, India. *Environmental Geology* 40, 2001.

STACEY F. and BANERJEE S., The Physical Principles of Rock Magnetism. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1974.

STRZYSZCZ Z. and MAGIERA T., Magnetic Susceptibility and Heavy Metals Contamination in Soils of Southern Poland. *Phys.Chem.Earth (A)*, Vol. 23, No. 9-10, pp. 1127-1131, 1998.

TARLING D., Paleomagnetism, principles and application in Geology, Geophysics and Archeology. Chapman and Hall, 1983.

TAUXE L., Paleomagnetic Principles and Practice. Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA, USA. Kluwer Academic Publishers.

TEMA E., Μαγνητικές μετρήσεις που συντελούν στον εντοπισμό ρύπανσης στο περιβάλλον. *Διπλωματική εργασία*, Θεσσαλονίκη, 2001.

THOMPSON R. and OLDFIELD F., Environmental Magnetism. Allen and Unwin, London, 1986.

THOMPSON R., BATTARBEE R., O'SULLIVAN P. and OLDFIELD F., Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnology and Oceanography*, Vol. 20, No 5, pp.687-698, 1975.

TOLONEN K. and OLDFIELD F., The record of magnetic – mineral and heavy metal deposition at Regent Street Bog, Fredricton, New Brunswick, Canada. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42,pp. 57-66, 1986.

XIE S., DEARING J. and BLOEMENDAL J., A partial susceptibility approach to analyzing the magnetic properties of environmental materials: a case study. *Geophys.J.Int.*, 138, pp. 851-856, 1999.

ΨΙΛΟΒΙΚΟΣ Α. Μελέτη – έρευνα περιβαλλοντικών επιπτώσεων των έργων προστασίας περιοχών περί του άνω και κάτω ρού του ποταμού Στρυμόνα, τη λίμνη Κερκίνη και χειμάρρους της πεδιάδας Σερρών. Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ., 1994.

WALDEN J., SLATTERY M.C., BURT T.P., Use of mineral magnetic measurements to fingerprint suspended sediment sources: approaches and techniques for data analysis. *Journal of Hydrology*, 202, pp.353-372, 1997.

WALLING D., PEART M., OLDFIELD F., THOMPSON R., Suspended sediments sources identified by magnetic measurements. *Nature*, Vol. 281, 1979.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΛΙΜΝΗ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ

Αποτελέσματα μαγνητικής επιδεκτικότητας

Koum2-1, Koum2-2, Koum2-3

Sensor	MS2B
Range	.1
Units	SI
Frequency	HF, LF
Drift Limit	3
Weight Correction	yes
Container weight	5
Container Correction	yes

Magnetic susceptibility (10E-5SI)

KM2-1

Αρ. δείγματος	Βάρος (gr)	Βάθος (m)	Magnetic Susceptibility	
			LF	HF
1	11,54	0,05	19,8	18,9
2	9,25	0,35	7,9	7,7
3	10,31	0,6	4,8	4,3
4	9,94	0,85	7,1	6,7
5	11,54	1,05	34,5	32,2
6	10,75	1,3	5,8	5,1
7	10,84	1,55	3,3	3,2
8	11,74	1,85	6,8	6,5

KM2-2

Αρ. Δείγματος	Βάρος (gr)	Βάθος (m)	Magnetic susceptibility	
			LF	HF
1	11,24	0,05	1,9	1,2
2	11,5	0,2	0,5	-0,3
3	11,15	0,4	-1,8	-0,8
4	10,19	0,55	0,5	-0,5
5	10,14	0,7	-0,9	-0,4
6	10,53	0,85	-0,2	-0,5
7	11,36	1	2,6	2,1
8	10,32	1,15	-0,6	-0,3
9	10,29	1,25	-0,6	-0,8

KM2-3

Αρ. Δείγματος	Βάρος (gr)	Βάθος (m)	Magnetic Susceptibility	
			LF	HF
1	11,34	0,05	0,5	0,3
2	11,12	0,2	-0,8	-0,5
3	10,21	0,35	0,1	-0,3
4	10,15	0,5	-0,1	-0,3
5	10,87	0,65	-0,3	0,2
7	10,41	0,75	-0,3	-0,5
6	10,67	0,9	-0,1	-0,8
8	9,99	1,05	-0,1	-0,8
9	13,53	1,15	1,2	1,1

Αποτελέσματα I.R.M.**KM2-1-1**

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	4.92E-09	-8.38E-09	1.24E-07	1.13E-02	3.0
I10	-2.05E-07	-2.11E-07	2.56E-06	2.35E-01	2.1
I15	-2.39E-07	-2.96E-07	4.18E-06	3.81E-01	1.7
I20	-5.05E-07	-3.65E-07	4.78E-06	4.39E-01	3.2
I25	-4.80E-07	-4.21E-07	5.77E-06	5.27E-01	1.4
I50	-6.69E-07	-1.63E-07	6.55E-06	5.99E-01	3.1
I75	-7.54E-07	-4.92E-08	6.82E-06	6.23E-01	3.1
I100	-2.85E-07	-6.60E-07	6.75E-06	6.17E-01	4.4
I150	-8.84E-07	-4.66E-07	5.52E-06	5.10E-01	2.7
I200	-3.48E-07	-5.07E-08	6.07E-06	5.53E-01	2.7
I250	-1.21E-07	-1.47E-07	6.35E-06	5.77E-01	4.2
I300	-5.36E-07	5.84E-07	6.75E-06	6.18E-01	1.8

KM2-1-4

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	5.55E-09	-2.78E-09	1.15E-07	1.05E-02	2.8
I10	-4.14E-08	-6.94E-09	7.09E-07	6.46E-02	1.1
I15	-7.80E-08	-1.53E-08	9.97E-07	9.10E-02	1.7
I20	-4.28E-08	-4.07E-08	1.32E-06	1.20E-01	1.2
I25	-8.47E-08	-1.16E-08	1.47E-06	1.34E-01	1.8
I50	-6.48E-08	-3.93E-08	1.76E-06	1.60E-01	1.5
I75	-1.14E-07	-5.09E-08	1.88E-06	1.72E-01	1.5
I100	-7.15E-08	-1.14E-07	2.00E-06	1.82E-01	2.0
I150	-1.73E-07	-3.03E-08	2.01E-06	1.83E-01	2.9
I200	-1.99E-07	-6.50E-08	1.97E-06	1.80E-01	2.9
I250	-9.62E-08	-1.96E-07	1.99E-06	1.82E-01	3.2
I300	-1.69E-07	-2.46E-07	1.83E-06	1.69E-01	2.6

KM2-2-1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	2.28E-08	-7.11E-09	6.93E-09	2.26E-03	16.3
I10	-4.92E-09	1.09E-09	2.19E-07	2.00E-02	3.6
I15	-3.46E-09	-9.30E-09	3.02E-07	2.74E-02	6.6
I20	-5.65E-09	-8.38E-09	3.92E-07	3.57E-02	4.2
I25	-4.96E-08	-7.47E-09	4.13E-07	3.78E-02	5.0
I50	-4.05E-08	-2.99E-08	5.37E-07	4.90E-02	3.8
I75	-5.72E-08	-2.57E-08	6.34E-07	5.79E-02	4.0
I100	-2.86E-08	1.04E-08	6.71E-07	6.11E-02	3.2
I150	-5.98E-08	2.33E-08	6.86E-07	6.26E-02	3.6
I200	-3.74E-08	-2.73E-08	6.34E-07	5.78E-02	3.0
I250	-2.24E-08	7.11E-09	6.84E-07	6.22E-02	2.8
I300	-3.23E-08	6.93E-09	6.53E-07	5.94E-02	4.1
I350	-8.20E-09	1.75E-08	5.80E-07	5.28E-02	9.3

KM2-2-3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	4.19E-09	6.38E-09	8.53E-08	7.79E-03	0.9
I10	2.19E-09	4.92E-09	1.23E-07	1.12E-02	1.0
I15	2.55E-09	4.56E-09	1.47E-07	1.34E-02	1.4
I20	-9.11E-10	1.64E-09	1.61E-07	1.47E-02	0.9
I25	7.29E-10	2.55E-09	1.73E-07	1.58E-02	1.4
I50	-9.11E-10	-3.28E-09	1.94E-07	1.77E-02	1.9
I75	-9.66E-09	-6.74E-09	2.01E-07	1.83E-02	1.1
I100	-1.33E-08	-1.11E-16	2.09E-07	1.90E-02	1.9
I150	-1.33E-08	2.73E-09	2.14E-07	1.95E-02	1.2
I200	-8.57E-09	1.48E-08	2.14E-07	1.95E-02	1.5
I250	-6.93E-09	-2.92E-09	2.15E-07	1.95E-02	1.8

KM2-3-1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	7.07E-10	-9.19E-09	1.48E-08	1.59E-03	5.7
I10	-7.07E-10	7.07E-10	1.27E-07	1.16E-02	2.5
I15	2.65E-09	-7.24E-09	1.63E-07	1.48E-02	4.1
I20	-8.66E-09	-1.66E-08	2.04E-07	1.86E-02	6.0
I25	-8.30E-09	-2.42E-08	2.61E-07	2.39E-02	3.8
I50	-4.24E-09	-1.11E-08	3.29E-07	2.99E-02	3.9
I75	-8.30E-09	-3.73E-08	3.34E-07	3.06E-02	4.1
I100	1.68E-08	-4.95E-08	2.73E-07	2.52E-02	2.1
I150	-1.94E-09	-5.14E-08	3.78E-07	3.47E-02	3.8
I200	-6.27E-09	-6.74E-09	3.43E-07	3.12E-02	4.7
I250	5.96E-09	1.44E-08	3.77E-07	3.43E-02	3.9
I300	-1.96E-08	-1.27E-08	2.51E-07	2.29E-02	8.0

KM2-3-4

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.39E-08	-3.70E-10	0.00E+00	1.26E-03	3.5

I10	-2.59E-08	-8.32E-09	5.51E-08	5.58E-03	2.9
I15	-3.23E-08	-3.70E-09	8.80E-08	8.53E-03	3.8
I20	-2.37E-08	-7.02E-09	1.04E-07	9.67E-03	9.6
I25	-1.81E-08	-2.05E-08	1.43E-07	1.32E-02	4.7
I50	-2.96E-08	-1.02E-08	2.12E-07	1.95E-02	2.3
I75	-1.72E-08	9.24E-10	2.21E-07	2.02E-02	3.0
I100	-2.59E-08	-7.39E-09	2.05E-07	1.88E-02	2.0
I150	-2.40E-08	-1.29E-08	2.38E-07	2.18E-02	2.9

ΛΙΜΝΗ ΚΕΡΚΙΝΗ

Οι ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων είναι:

ΓΕΩΤΡΗΣΗ 1 → N: 41 ⁰ 14,850'	ΓΕΩΤΡΗΣΗ 6 → N: 41 ⁰ 15,058'
E: 23 ⁰ 11,137'	E: 23 ⁰ 08,986'
ΓΕΩΤΡΗΣΗ 2 → N: 41 ⁰ 14,447'	ΓΕΩΤΡΗΣΗ 7 → N: 41 ⁰ 15,031'
E: 23 ⁰ 11,008'	E: 23 ⁰ 09,810'
ΓΕΩΤΡΗΣΗ 3 → N: 41 ⁰ 14,080'	ΓΕΩΤΡΗΣΗ 8 → N: 41 ⁰ 14,417'
E: 23 ⁰ 10,974'	E: 23 ⁰ 09,604'
ΓΕΩΤΡΗΣΗ 4 → N: 41 ⁰ 13,999'	ΓΕΩΤΡΗΣΗ 9 → N: 41 ⁰ 14,324'
E: 23 ⁰ 10,298'	E: 23 ⁰ 08,644'

Αποτελέσματα μαγνητικής επιδεκτικότητας

G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9

Sensor	MS2B
Range	
Units	SI
Frequency	HF, LF
Drift Limit	3
Weight Correction	yes
Container weight	5
Container Correction	yes

Magnetic susceptibility (10E-5SI)

G1

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG1D1	13,79	89,1	87,6
KerkG1D2	13,69	87,9	86,6
KerkG1D3	13,29	82,7	81,4
KerkG1D4	13,29	83,9	81,4
KerkG1D5	13,14	87,1	85,1
KerkG1D6	12,09	42,4	40,8
KerkG1D7	13,14	37,7	36,9
KerkG1D8	12,04	47,4	45,8
KerkG1D9	13,72	39,8	38,6
KerkG1D10	15,89	68,2	67,9
KerkG1D11	14,91	46,8	46

G2

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG2D1	13,06	113,7	111
KerkG2D2	12,78	134,2	131,1
KerkG2D3	12,05	110,5	107,3
KerkG2D4	12,27	122,8	118,6
KerkG2D5	16,19	84,3	83,2
KerkG2D6	16,93	114,6	114,2
KerkG2D7	17,22	154	152,5
KerkG2D8	17,12	153,8	154,3
KerkG2D9	17,08	49,8	49,6
KerkG2D10	16,42	47,2	47,1
KerkG2D11	16,94	45,3	44,8
KerkG2D12	16,9	34,1	33,9
KerkG2D13	17,23	28,7	28,5
KerkG2D14	16,23	26,3	25,8
KerkG2D15	16,43	28	27,7
KerkG2D16	16,56	24,5	24,4

G3

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG3D1	14,75	71,2	69,4
KerkG3D2	15,04	77,3	76,4
KerkG3D4	16,51	111,4	109,5
KerkG3D5	17,3	87	86,1
KerkG3D6	16,5	132,5	131
KerkG3D7	17,05	89	88,3
KerkG3D8	16,78	60,3	59,2
KerkG3D9	17,13	62,3	61,9
KerkG3D10	13,87	53,7	50,6
KerkG3D11	12,87	55,3	52,9
KerkG3D12	14,38	44,4	42,4
KerkG3D13	12,35	37,5	36,2

G4

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG4D1	13,67	210,1	205,4
KerkG4D2	14,26	182,2	179,2
KerkG4D3	14,99	211,8	207,3
KerkG4D5	12,76	249,3	242,4
KerkG4D7	14,3	166,7	163,9
KerkG4D8	16,14	246	244,5
KerkG4D9	16,7	130,9	129,2
KerkG4D10	14,79	228,1	224,4
KerkG4D11	15,73	139,5	137,1
KerkG4D12	16,47	147,9	145,4
KerkG4D13	16,72	99,1	97,8

G6

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG6D1	13	123,6	117,6
KerkG6D2	16,13	98,3	97,3
KerkG6D3	17,1	88,1	87,9
KerkG6D4	16,87	105	103,2
KerkG6D5	17,22	99,3	98,5
KerkG6D6	17,43	71	71,3
KerkG6D7	17,52	156,1	156,6
KerkG6D8	15,8	73,8	72,6
KerkG6D9	16,97	90,8	90,2
KerkG6D10	15,38	91,4	89,9
KerkG6D12	16,44	75,6	75,3
KerkG6D13	16,32	66,8	66,7

G7

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG7D1	12,27	50,5	50,6
KerkG7D2	12,62	123,4	120,3
KerkG7D3	14,73	134,7	132,6
KerkG7D4	16,71	100	99,3
KerkG7D5	16,86	75,8	75,3
KerkG7D6	15,34	119,6	117,3
KerkG7D7	13,71	109	107,2
KerkG7D8	12,69	111,4	108,5
KerkG7D9	16,07	70,1	69,4
KerkG7D11	16,52	94,5	93,7
KerkG7D12	16,26	55,1	54,8
KerkG7D13	14,92	67,7	65,3
KerkG7D15	15,07	50,6	50,4

G8

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG8D1	12,13	57,1	55,1
KerkG8D2	12,29	63,4	61,5
KerkG8D3	12,7	68,6	68,4
KerkG8D4	11,98	66,9	63,3
KerkG8D5	12,71	73,4	71,5
KerkG8D6	12,43	74	70,4
KerkG8D7	13,02	91,1	90,2
KerkG8D8	12,35	69,2	67,3
KerkG8D9	12,25	68,7	65,7
KerkG8D10	12,83	81,3	79,7
KerkG8D11	17	113,5	111,8
KerkG8D12	15,09	83,6	83,6
KerkG8D13	13,34	100,3	97,9
KerkG8D14	14,25	86,1	84,1

KerkG8D16	15,63	90,1	89,3
KerkG8D17	15,01	77,9	76,3
KerkG8D18	14,75	87,7	85,3
KerkG8D19	14,47	86,3	83,9
KerkG8D20	13,71	92,9	94,4

G9

Sample	Weight	LF Sus	HF Sus
KerkG9D1	14,44	170,5	167,5
KerkG9D2	13,55	274,3	264,7
KerkG9D3	14,25	182	177,7
KerkG9D4	13,44	224,5	219,5
KerkG9D5	14,96	246,3	241,4
KerkG9D6	14,28	202,3	196,3
KerkG9D7	13,85	234,6	230,1
KerkG9D8	13,43	232,4	225,9
KerkG9D9	12,83	278,4	268,5
KerkG9D10	13,35	298,4	289,2
KerkG9D11	13,34	264,1	256,2
KerkG9D12	14,04	162,7	159,9
KerkG9D13	15,25	142,5	139
KerkG9D14	14,62	145,4	140,9
KerkG9D15	14,82	161	156,4
KerkG9D16	14,44	160,5	156,9
KerkG9D17	13,1	150,4	147
KerkG9D18	12,32	91,6	88,6
KerkG9D19	12,09	80,6	79,3

Αποτελέσματα I.R.M.

KERKG1D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	8.67E-09	6.38E-09	1.06E-07	9.65E-03	0.8
I10	4.09E-07	-1.81E-06	1.46E-05	1.34E+00	1.3
I15	3.62E-07	-2.80E-06	2.21E-05	2.02E+00	3.1
I20	5.78E-08	-7.43E-07	2.82E-05	2.57E+00	2.1
I25	3.04E-07	-7.54E-07	3.25E-05	2.96E+00	1.4
I50	-1.76E-07	5.38E-07	4.01E-05	3.65E+00	2.5
I75	-1.77E-06	1.24E-06	4.14E-05	3.77E+00	2.6
I100	-4.17E-07	1.72E-07	4.30E-05	3.91E+00	1.7
I150	-3.61E-06	2.21E-06	4.05E-05	3.70E+00	2.0
I200	3.01E-07	-2.59E-06	4.37E-05	3.98E+00	2.9
I250	-1.10E-06	-5.50E-06	4.41E-05	4.04E+00	2.5
I300	-2.61E-06	-9.90E-07	4.37E-05	3.98E+00	1.9

KERKG1D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	4.26E-09	-4.71E-09	1.08E-07	9.86E-03	4.7
I10	-7.81E-07	9.73E-08	1.43E-05	1.30E+00	2.4

I15	-8.97E-07	7.77E-07	2.27E-05	2.07E+00	2.3
I20	-1.61E-07	-7.43E-07	3.01E-05	2.74E+00	2.1
I25	-1.42E-06	1.89E-07	3.32E-05	3.02E+00	2.5
I50	2.11E-06	-2.13E-06	4.18E-05	3.81E+00	2.0
I75	-1.92E-06	-6.54E-07	4.10E-05	3.74E+00	2.5
I100	-1.04E-06	1.98E-06	3.34E-05	3.05E+00	7.7
I150	-7.75E-08	-2.01E-06	4.28E-05	3.89E+00	2.5
I200	3.71E-07	6.02E-07	4.55E-05	4.14E+00	2.2
I250	-4.53E-06	-8.35E-07	4.43E-05	4.05E+00	1.5
I300	-3.02E-06	5.12E-07	4.36E-05	3.97E+00	2.2

KERKG1D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	7.50E-09	8.12E-09	7.83E-08	7.19E-03	3.8
I10	-8.93E-08	-1.97E-07	3.94E-06	3.59E-01	2.6
I15	-9.40E-07	2.73E-07	6.68E-06	6.14E-01	2.5
I20	-5.52E-07	-2.42E-07	8.18E-06	7.45E-01	3.0
I25	-5.48E-07	-4.89E-07	9.72E-06	8.86E-01	2.2
I50	-1.71E-06	-7.56E-07	1.10E-05	1.01E+00	2.9
I75	-9.93E-07	-9.00E-07	1.34E-05	1.22E+00	1.6
I100	-1.37E-06	-9.39E-07	1.43E-05	1.31E+00	3.0
I150	-1.07E-06	-1.06E-07	1.38E-05	1.26E+00	2.6
I200	-1.50E-06	-7.02E-07	1.36E-05	1.25E+00	2.3
I250	-1.99E-06	-7.71E-07	1.47E-05	1.35E+00	2.6
I300	-2.20E-06	-3.58E-07	1.38E-05	1.27E+00	2.1

KERKG1D9

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	6.43E-09	8.79E-09	9.71E-08	8.88E-03	7.3
I10	-2.15E-07	1.03E-07	5.00E-06	4.55E-01	0.8
I15	-3.91E-07	-8.73E-08	8.39E-06	7.64E-01	0.9
I20	-6.69E-07	1.03E-07	9.88E-06	9.00E-01	0.8
I25	-7.72E-07	4.59E-07	1.24E-05	1.13E+00	0.9
I50	-1.06E-06	1.97E-07	1.57E-05	1.43E+00	1.7
I75	-1.05E-06	6.86E-08	1.69E-05	1.54E+00	1.3
I100	-1.03E-06	9.43E-08	1.78E-05	1.62E+00	1.4
I150	-1.16E-06	-1.93E-08	1.81E-05	1.65E+00	1.4
I200	-1.13E-06	1.99E-07	1.88E-05	1.71E+00	0.6
I250	-1.45E-06	5.55E-07	1.92E-05	1.75E+00	1.6
I300	-1.23E-06	-9.22E-08	1.91E-05	1.74E+00	1.4

KERKG2D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	3.40E-09	-6.44E-09	9.18E-08	8.37E-03	6.5
I10	6.75E-07	5.89E-07	2.10E-05	1.91E+00	2.7
I15	1.22E-07	2.40E-06	3.27E-05	2.98E+00	3.7
I20	1.44E-06	-1.56E-07	4.37E-05	3.98E+00	2.8
I25	2.68E-08	8.95E-09	4.58E-05	4.16E+00	2.9
I50	-2.98E-06	8.90E-07	5.66E-05	5.15E+00	3.5

I75	1.20E-06	-7.80E-07	5.77E-05	5.25E+00	2.9
I100	-3.15E-06	1.72E-06	5.78E-05	5.26E+00	2.9
I150	-3.18E-06	-3.30E-06	5.64E-05	5.15E+00	2.7
I200	-6.01E-07	-1.29E-06	5.80E-05	5.27E+00	2.8
I250	-4.86E-06	6.49E-06	5.78E-05	5.30E+00	2.6
I300	-2.87E-06	-1.69E-06	5.67E-05	5.16E+00	3.5

KERKG2D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	8.44E-09	-2.48E-09	1.00E-07	9.14E-03	3.4
I10	-1.46E-06	4.53E-07	1.52E-05	1.39E+00	1.4
I15	-2.15E-07	-3.38E-06	2.94E-05	2.69E+00	1.9
I20	1.32E-07	-3.00E-07	3.67E-05	3.34E+00	3.0
I25	-5.64E-06	-1.82E-06	3.88E-05	3.57E+00	2.2
I50	-5.67E-06	3.08E-07	5.08E-05	4.64E+00	3.0
I75	-7.58E-06	-1.39E-07	5.43E-05	4.99E+00	2.5
I100	-5.82E-06	-2.81E-07	5.66E-05	5.17E+00	3.3
I150	-4.51E-06	9.17E-07	5.83E-05	5.32E+00	1.8
I200	-4.26E-06	-3.46E-06	5.86E-05	5.35E+00	1.8
I250	-4.93E-06	9.95E-07	5.91E-05	5.39E+00	2.5
I300	-3.39E-06	-5.22E-06	6.13E-05	5.60E+00	4.6

KERKG2D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	1.49E-09	4.96E-10	9.86E-08	8.97E-03	2.9
I10	6.45E-08	-1.62E-07	7.34E-06	6.67E-01	1.9
I15	-6.77E-07	-2.71E-07	1.34E-05	1.22E+00	4.0
I20	-9.57E-07	-2.64E-06	1.80E-05	1.66E+00	2.6
I25	1.24E-07	5.94E-07	1.98E-05	1.80E+00	2.1
I50	1.75E-06	-2.17E-06	2.30E-05	2.10E+00	3.2
I75	1.24E-07	-1.07E-06	2.80E-05	2.54E+00	4.1
I100	5.25E-07	-1.53E-06	2.64E-05	2.40E+00	4.8
I150	-1.06E-06	9.90E-07	2.96E-05	2.70E+00	3.3
I200	4.14E-08	-3.99E-06	3.15E-05	2.88E+00	4.1
I250	-5.41E-07	1.16E-08	3.23E-05	2.94E+00	2.6
I300	-1.42E-07	-4.27E-06	3.13E-05	2.87E+00	2.3

KERKG2D13

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.01E-08	-1.14E-08	9.56E-08	8.80E-03	1.5
I10	-2.73E-07	-1.61E-07	4.25E-06	3.87E-01	2.6
I15	-2.14E-07	-2.36E-07	7.02E-06	6.39E-01	4.2
I20	-4.72E-08	-3.90E-07	8.60E-06	7.83E-01	3.6
I25	-6.43E-07	-4.20E-07	1.03E-05	9.36E-01	3.2
I50	-9.35E-07	-5.10E-07	1.29E-05	1.18E+00	2.9
I75	-4.44E-07	-5.32E-07	1.50E-05	1.36E+00	2.7
I100	-1.93E-07	-3.37E-07	1.65E-05	1.50E+00	1.9
I150	-4.72E-07	-1.17E-06	1.66E-05	1.51E+00	2.5
I200	-8.25E-07	-7.67E-07	1.66E-05	1.52E+00	2.5
I250	-5.98E-07	-8.23E-07	1.73E-05	1.58E+00	2.6
I300	-1.19E-06	-5.64E-07	1.61E-05	1.47E+00	3.1

KERKG3D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-2.65E-09	-4.14E-09	1.17E-07	1.07E-02	3.7
I10	-5.49E-07	7.30E-07	1.34E-05	1.22E+00	3.4
I15	-2.98E-07	-3.92E-07	2.15E-05	1.95E+00	4.3
I20	-1.11E-06	-1.02E-06	2.46E-05	2.24E+00	4.7
I25	-1.41E-06	7.38E-07	1.73E-05	1.58E+00	2.8
I50	-1.25E-06	6.62E-07	3.16E-05	2.88E+00	3.5
I75	-1.46E-06	-5.01E-07	3.56E-05	3.24E+00	3.0
I100	-1.64E-06	-1.71E-06	3.80E-05	3.46E+00	3.3
I150	-2.29E-06	7.94E-07	3.72E-05	3.39E+00	3.3
I200	-1.55E-06	1.21E-07	3.73E-05	3.39E+00	3.4
I250	-1.70E-06	1.39E-07	3.81E-05	3.47E+00	3.5
I300	-1.57E-06	1.46E-06	3.31E-05	3.02E+00	3.2

KERKG3D4

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	4.87E-09	-6.68E-09	1.09E-07	9.90E-03	4.5
I10	2.51E-07	-2.58E-07	1.44E-05	1.30E+00	4.0
I15	6.31E-08	1.01E-07	2.24E-05	2.03E+00	4.1
I20	-1.63E-06	-1.66E-06	2.95E-05	2.69E+00	3.5
I25	-4.60E-07	-1.50E-06	2.61E-05	2.38E+00	1.8
I50	-3.16E-06	-3.20E-06	4.22E-05	3.86E+00	3.8
I75	-1.26E-06	-3.59E-06	4.40E-05	4.02E+00	4.6
I100	-2.60E-06	2.63E-07	4.40E-05	4.01E+00	3.6
I150	-4.55E-06	-3.66E-06	4.71E-05	4.32E+00	3.1
I200	-2.04E-06	-2.13E-06	5.14E-05	4.68E+00	3.6
I250	-1.33E-06	-2.22E-07	5.05E-05	4.59E+00	3.1
I300	-8.91E-07	-4.62E-06	4.07E-05	3.72E+00	2.4

KERKG3D6

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.44E-08	-1.66E-08	1.04E-07	9.69E-03	4.3
I10	-4.02E-07	9.02E-09	1.57E-05	1.43E+00	3.3
I15	-4.38E-07	-2.36E-06	2.61E-05	2.38E+00	3.1
I20	-2.04E-06	-1.77E-06	3.41E-05	3.11E+00	2.5
I25	5.54E-07	1.03E-07	4.26E-05	3.87E+00	2.2
I50	-2.94E-07	-6.49E-08	5.07E-05	4.61E+00	3.6
I75	7.88E-07	-3.61E-09	5.32E-05	4.83E+00	2.3
I100	-7.63E-07	1.19E-07	5.74E-05	5.22E+00	3.6
I150	-2.98E-06	-1.13E-06	6.03E-05	5.49E+00	2.7
I200	1.16E-06	-1.09E-06	4.53E-05	4.12E+00	2.1
I250	-1.36E-06	-3.56E-06	4.44E-05	4.06E+00	1.8
I300	-1.28E-06	-6.29E-06	4.91E-05	4.50E+00	2.5

KERKG3D10

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.94E-09	-8.39E-09	8.24E-08	7.53E-03	2.8
I10	-3.44E-07	-1.98E-07	5.99E-06	5.46E-01	1.9

I15	-9.92E-07	1.38E-07	9.36E-06	8.55E-01	1.3
I20	-3.18E-07	-1.20E-07	1.27E-05	1.15E+00	1.5
I25	-1.24E-06	-6.88E-07	1.44E-05	1.31E+00	0.6
I50	-6.84E-07	-7.68E-07	1.85E-05	1.68E+00	1.3
I75	-1.11E-06	-8.71E-07	1.90E-05	1.73E+00	0.7
I100	-1.65E-06	-8.56E-07	2.05E-05	1.87E+00	0.9
I150	-1.13E-06	-1.11E-06	2.09E-05	1.91E+00	1.5
I200	-1.30E-06	-1.87E-07	2.11E-05	1.92E+00	1.6
I250	-2.56E-06	-1.74E-07	2.18E-05	1.99E+00	2.0
I300	-1.47E-06	-9.62E-07	2.22E-05	2.03E+00	1.8

KERKG4D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-3.28E-08	-1.53E-08	1.37E-07	1.29E-02	5.0
I10	-5.52E-06	-3.33E-06	4.96E-05	4.55E+00	5.1
I15	-6.06E-06	3.68E-06	8.30E-05	7.58E+00	1.8
I20	-1.16E-05	-3.39E-06	1.02E-04	9.34E+00	2.6
I25	-1.29E-05	-2.84E-14	1.23E-04	1.12E+01	2.4
I50	-7.02E-06	-8.14E-06	1.06E-04	9.65E+00	1.8
I75	-7.61E-06	-1.41E-05	1.45E-04	1.33E+01	2.9
I100	-9.62E-06	3.54E-06	1.20E-04	1.09E+01	1.9
I150	-1.29E-05	7.40E-07	1.38E-04	1.26E+01	3.0
I200	-1.23E-05	-1.08E-05	1.41E-04	1.29E+01	2.6
I250	-9.36E-06	-3.79E-06	1.39E-04	1.27E+01	3.1
I300	-9.45E-06	-9.94E-06	1.27E-04	1.16E+01	2.8

KERKG4D2

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	1.44E-09	-2.09E-08	1.80E-07	1.65E-02	2.5
I10	-5.69E-06	1.46E-06	6.70E-05	6.12E+00	1.3
I15	-5.75E-06	6.65E-07	9.31E-05	8.48E+00	1.2
I20	-7.73E-06	2.50E-06	1.21E-04	1.10E+01	2.1
I25	-9.22E-06	2.71E-06	1.34E-04	1.22E+01	2.5
I50	-9.40E-06	5.27E-06	1.66E-04	1.51E+01	1.6
I75	-6.97E-06	1.56E-06	1.69E-04	1.54E+01	1.4
I100	-4.33E-06	-1.55E-06	1.57E-04	1.43E+01	2.0
I150	-9.49E-06	-2.55E-06	1.60E-04	1.46E+01	2.5
I200	-7.23E-06	-3.26E-06	1.66E-04	1.51E+01	1.1
I250	-1.08E-05	1.59E-06	1.72E-04	1.57E+01	1.6
I300	-1.43E-05	-3.23E-06	1.69E-04	1.54E+01	2.1

KERKG4D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	3.04E-08	-4.47E-08	1.50E-07	1.45E-02	3.7
I10	1.35E-06	-2.42E-06	6.88E-05	6.26E+00	1.6
I15	3.11E-07	1.21E-06	1.04E-04	9.46E+00	2.3
I20	2.62E-06	-1.29E-06	1.29E-04	1.18E+01	1.2
I25	-1.35E-06	6.21E-07	1.46E-04	1.33E+01	1.1
I50	-1.31E-06	-2.26E-06	1.59E-04	1.45E+01	1.4

I75	2.93E-06	-7.63E-06	1.76E-04	1.61E+01	1.3
I100	-1.92E-06	1.48E-06	1.71E-04	1.56E+01	2.9
I150	-1.62E-06	-9.01E-06	1.74E-04	1.59E+01	1.4
I200	3.57E-06	-5.11E-06	1.84E-04	1.67E+01	1.5
I250	-2.50E-06	2.07E-07	1.82E-04	1.65E+01	1.4
I300	1.47E-06	1.16E-06	1.81E-04	1.64E+01	1.6

KERKG4D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.80E-08	-9.38E-09	1.18E-07	1.09E-02	4.5
I10	-6.54E-06	2.48E-06	5.88E-05	5.39E+00	2.4
I15	-4.98E-06	-1.73E-06	8.20E-05	7.47E+00	1.4
I20	-1.05E-05	-2.16E-06	1.13E-04	1.03E+01	2.8
I25	-1.13E-05	2.92E-06	1.26E-04	1.15E+01	1.7
I50	-1.18E-05	-1.23E-06	1.55E-04	1.42E+01	2.8
I75	-1.13E-05	-7.22E-06	1.53E-04	1.39E+01	1.8
I100	-9.31E-06	-9.83E-06	1.58E-04	1.44E+01	2.2
I150	-1.28E-05	-1.79E-06	1.60E-04	1.46E+01	2.5
I200	-1.76E-05	6.31E-07	1.56E-04	1.43E+01	2.0
I250	-1.30E-05	-8.12E-07	1.55E-04	1.41E+01	2.4
I300	-8.73E-06	-3.37E-06	1.51E-04	1.38E+01	2.2

KERKG4D7

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	2.99E-08	-1.86E-08	1.27E-07	1.20E-02	4.4
I10	-1.73E-06	-5.26E-06	4.70E-05	4.30E+00	1.6
I15	-1.68E-06	-9.49E-07	6.91E-05	6.28E+00	1.8
I20	-1.99E-06	-5.73E-07	9.01E-05	8.19E+00	1.1
I25	-3.17E-06	-2.33E-07	9.83E-05	8.94E+00	1.1
I50	-4.94E-06	-5.14E-06	1.25E-04	1.14E+01	1.8
I75	-5.69E-06	-2.22E-06	1.32E-04	1.20E+01	1.0
I100	-5.24E-06	-1.66E-06	1.33E-04	1.21E+01	0.7
I150	-9.74E-06	-3.33E-06	1.36E-04	1.24E+01	1.5
I200	-6.09E-06	-2.00E-06	1.38E-04	1.25E+01	1.4
I250	-5.60E-06	-7.12E-06	1.34E-04	1.22E+01	1.4
I300	-1.06E-05	-4.28E-06	1.34E-04	1.22E+01	1.7

KERKG4D8

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	5.07E-09	-2.50E-08	1.38E-07	1.28E-02	1.2
I10	-1.94E-06	2.78E-06	4.82E-05	4.39E+00	1.6
I15	-2.65E-06	-1.63E-06	7.17E-05	6.52E+00	1.8
I20	-2.10E-06	-2.76E-06	9.52E-05	8.66E+00	1.6
I25	-1.77E-06	-1.82E-06	1.08E-04	9.83E+00	1.8
I50	-6.95E-07	3.74E-06	1.34E-04	1.22E+01	1.6
I75	-3.03E-06	1.79E-06	1.36E-04	1.23E+01	1.6
I100	-7.87E-06	-5.04E-06	1.44E-04	1.32E+01	1.7
I150	7.89E-07	1.60E-06	1.43E-04	1.30E+01	1.6
I200	9.40E-07	-3.38E-07	1.46E-04	1.33E+01	1.5
I250	-7.70E-06	-2.44E-06	1.51E-04	1.38E+01	1.4
I300	-8.02E-06	2.31E-06	1.49E-04	1.35E+01	2.9

KERKG4D9

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-3.58E-10	-1.20E-08	1.45E-07	1.32E-02	3.0
I10	-3.05E-06	6.00E-07	3.09E-05	2.82E+00	3.6
I15	-2.47E-06	5.44E-07	4.49E-05	4.08E+00	3.1
I20	-2.89E-06	8.41E-07	5.65E-05	5.14E+00	2.4
I25	-1.52E-06	2.63E-07	6.15E-05	5.59E+00	2.3
I50	-5.35E-06	-1.97E-06	6.88E-05	6.27E+00	2.4
I75	-4.17E-06	1.16E-06	8.30E-05	7.56E+00	2.2
I100	-1.31E-06	-3.78E-06	8.69E-05	7.91E+00	2.4
I150	-6.09E-06	-4.30E-07	7.90E-05	7.20E+00	2.5
I200	-3.74E-06	-3.45E-06	8.74E-05	7.96E+00	3.1
I250	-6.32E-06	-8.95E-08	8.33E-05	7.59E+00	3.1
I300	-7.84E-06	-3.44E-06	8.21E-05	7.50E+00	2.6

KERKG4D10

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-6.67E-09	-5.85E-08	1.86E-07	1.77E-02	1.5
I10	-2.11E-06	-2.84E-06	7.98E-05	7.26E+00	2.1
I15	-1.70E-06	-1.68E-06	1.16E-04	1.05E+01	1.8
I20	5.77E-06	1.89E-06	1.47E-04	1.34E+01	1.9
I25	-2.52E-06	2.45E-06	1.68E-04	1.52E+01	1.5
I50	-4.47E-06	-9.16E-06	2.06E-04	1.87E+01	2.2
I75	-6.50E-06	-7.14E-06	2.04E-04	1.86E+01	2.6
I100	-3.36E-06	-9.23E-06	2.13E-04	1.94E+01	1.9
I150	-6.37E-06	-2.15E-07	2.10E-04	1.91E+01	2.4
I200	-9.44E-06	-8.07E-06	2.12E-04	1.94E+01	2.3
I250	-5.57E-06	-7.01E-06	2.15E-04	1.95E+01	2.0
I300	-7.06E-06	-6.84E-06	2.11E-04	1.92E+01	2.3

KERKG4D11

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	8.95E-10	-8.59E-09	1.33E-07	1.21E-02	5.0
I10	-5.03E-06	-3.61E-06	5.63E-05	5.15E+00	1.6
I15	-5.19E-06	-6.30E-06	8.30E-05	7.58E+00	1.8
I20	-8.93E-06	-4.80E-06	1.06E-04	9.66E+00	1.2
I25	-7.98E-06	-7.27E-06	1.16E-04	1.06E+01	1.7
I50	-8.73E-06	-9.49E-06	1.43E-04	1.30E+01	1.9
I75	-1.16E-05	-9.04E-06	1.51E-04	1.38E+01	1.8
I100	-1.17E-05	-1.21E-05	1.51E-04	1.38E+01	1.3
I150	-5.62E-06	2.50E-06	1.37E-04	1.25E+01	1.9
I200	-6.49E-06	-6.82E-06	1.40E-04	1.27E+01	1.6
I250	-9.06E-06	1.30E-06	1.37E-04	1.25E+01	1.9
I300	-1.18E-05	-4.72E-07	1.42E-04	1.29E+01	1.2

KERKG4D12

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-4.46E-08	9.04E-09	1.25E-07	1.21E-02	3.6
I10	-6.53E-07	-2.02E-07	4.43E-05	4.03E+00	1.6
I15	-3.50E-06	-6.39E-07	6.73E-05	6.13E+00	2.0
I20	-2.87E-06	-3.48E-06	7.48E-05	6.81E+00	1.2
I25	-3.87E-07	2.56E-06	8.23E-05	7.49E+00	1.2
I50	-3.00E-06	-2.71E-06	1.07E-04	9.77E+00	1.9
I75	-1.55E-06	-4.07E-06	9.76E-05	8.88E+00	0.7
I100	-3.98E-06	-2.27E-06	1.09E-04	9.94E+00	2.1
I150	-6.91E-06	-1.27E-06	1.14E-04	1.04E+01	1.7
I200	-2.88E-06	5.34E-07	1.14E-04	1.03E+01	2.2
I250	-5.75E-06	3.02E-06	1.09E-04	9.89E+00	2.0
I300	-2.91E-06	-1.66E-06	1.12E-04	1.02E+01	1.8

KERKG4D13

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	2.05E-08	-8.29E-09	1.11E-07	1.03E-02	5.0
I10	-1.21E-06	3.80E-07	2.80E-05	2.55E+00	2.0
I15	-2.21E-06	-1.77E-07	4.51E-05	4.10E+00	1.7
I20	-1.48E-06	-1.39E-06	5.26E-05	4.79E+00	2.8
I25	-9.62E-07	-1.83E-06	6.30E-05	5.73E+00	1.5
I50	-2.49E-06	-3.52E-06	6.80E-05	6.19E+00	1.4
I75	-2.10E-06	-7.37E-08	7.47E-05	6.80E+00	2.1
I100	-4.66E-06	-2.16E-06	7.43E-05	6.77E+00	2.2
I150	-3.45E-06	-5.53E-08	7.75E-05	7.05E+00	2.1
I200	-2.58E-06	-4.29E-06	7.47E-05	6.81E+00	2.5
I250	-2.19E-06	-1.82E-06	7.64E-05	6.95E+00	1.7
I300	-4.63E-06	-8.29E-07	7.63E-05	6.95E+00	1.8

KERKG6D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	3.33E-09	-2.19E-08	1.09E-07	1.01E-02	3.7
I10	-7.30E-08	-4.59E-07	3.04E-05	2.76E+00	0.4
I15	-8.46E-07	-2.52E-07	4.92E-05	4.47E+00	0.7
I20	-1.08E-06	-5.42E-07	6.42E-05	5.83E+00	1.0
I25	-1.76E-06	-1.96E-07	7.24E-05	6.58E+00	1.0
I50	-1.33E-06	-6.32E-06	8.72E-05	7.95E+00	1.2
I75	2.48E-06	-1.75E-06	9.12E-05	8.30E+00	1.3
I100	2.44E-06	1.38E-06	9.41E-05	8.56E+00	1.8
I150	1.88E-06	-3.96E-07	9.54E-05	8.67E+00	1.6
I200	-3.40E-06	-2.69E-06	9.34E-05	8.50E+00	1.5
I250	-3.98E-06	-2.54E-06	8.79E-05	8.00E+00	1.8
I300	-3.65E-06	-2.29E-07	9.63E-05	8.76E+00	1.9

KERKG6D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.46E-09	1.21E-08	1.08E-07	9.90E-03	6.5
I10	-5.67E-07	-2.36E-07	1.41E-05	1.28E+00	2.0
I15	-4.75E-07	-2.71E-07	2.22E-05	2.02E+00	1.8
I20	-2.89E-06	-1.35E-07	2.70E-05	2.47E+00	1.8

I25	-1.80E-06	-7.36E-07	3.26E-05	2.97E+00	2.9
I50	-2.63E-06	-6.96E-07	4.35E-05	3.96E+00	1.9
I75	-5.44E-07	-3.48E-07	4.56E-05	4.15E+00	2.6
I100	-2.08E-06	-3.17E-07	4.80E-05	4.37E+00	1.1
I150	-1.34E-06	-2.13E-06	5.23E-05	4.76E+00	2.3
I200	-2.25E-06	-1.60E-06	5.21E-05	4.74E+00	2.0
I250	-3.21E-06	-2.77E-06	5.01E-05	4.57E+00	2.0
I300	-3.07E-06	-3.78E-06	5.17E-05	4.72E+00	2.8

KERKG6D13

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	4.98E-09	-2.49E-09	4.92E-08	4.50E-03	5.8
I10	-3.79E-07	2.40E-07	6.11E-07	6.89E-02	25.9
I10	-6.63E-07	1.36E-07	7.07E-06	6.46E-01	1.3
I15	-8.04E-07	6.47E-07	1.26E-05	1.15E+00	1.7
I20	-1.62E-06	2.22E-07	1.52E-05	1.39E+00	1.7
I25	-1.32E-06	4.08E-07	1.95E-05	1.78E+00	1.7
I50	-7.08E-07	5.23E-07	2.50E-05	2.28E+00	2.0
I75	-1.54E-06	-1.14E-06	2.56E-05	2.33E+00	2.4
I100	-1.57E-06	-5.17E-07	2.77E-05	2.52E+00	2.6
I150	-1.51E-06	-5.88E-07	2.82E-05	2.57E+00	2.0
I200	-1.66E-06	1.37E-06	2.83E-05	2.58E+00	1.6
I250	-1.41E-06	-1.54E-06	2.77E-05	2.53E+00	2.4
I300	-2.09E-06	-1.70E-06	2.26E-05	2.07E+00	1.5

KERKG7D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	9.40E-09	-9.60E-09	9.32E-08	8.56E-03	2.6
I10	1.59E-07	2.22E-07	7.03E-06	6.40E-01	3.1
I15	8.20E-08	4.50E-07	1.20E-05	1.09E+00	1.6
I20	5.80E-08	5.48E-07	1.61E-05	1.47E+00	2.2
I25	-4.38E-07	-9.80E-08	1.83E-05	1.67E+00	1.1
I50	-5.08E-07	4.44E-07	2.38E-05	2.17E+00	1.6
I75	-3.70E-07	4.40E-08	2.48E-05	2.26E+00	1.4
I100	-1.22E-06	-3.20E-07	2.52E-05	2.29E+00	1.4
I150	-1.21E-06	-7.88E-07	2.60E-05	2.37E+00	0.7
I200	-1.20E-06	-2.28E-06	2.68E-05	2.44E+00	1.4
I250	-1.52E-06	-6.56E-07	2.73E-05	2.48E+00	1.5
I300	-1.29E-06	-2.04E-07	2.71E-05	2.47E+00	1.4

KERKG7D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-8.80E-09	5.60E-09	1.22E-07	1.11E-02	2.6
I10	1.42E-07	1.54E-07	3.34E-05	3.04E+00	1.5
I15	-1.71E-06	9.64E-07	5.17E-05	4.70E+00	1.9
I20	-2.94E-06	4.14E-07	6.28E-05	5.71E+00	2.2
I25	-6.30E-07	-5.62E-07	7.09E-05	6.45E+00	2.1
I50	-2.02E-06	-1.60E-07	7.80E-05	7.09E+00	1.7
I75	-2.46E-06	-3.88E-06	8.66E-05	7.88E+00	1.7
I100	-8.00E-08	3.60E-07	8.95E-05	8.13E+00	1.9
I150	-2.56E-06	-1.84E-06	8.76E-05	7.97E+00	2.7

I200	-7.70E-06	1.40E-07	7.14E-05	6.53E+00	0.9
I250	-7.40E-07	-4.24E-06	8.68E-05	7.90E+00	2.0
I300	-4.40E-07	5.20E-07	9.05E-05	8.22E+00	2.2

KERKG7D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-1.01E-09	1.43E-08	1.27E-07	1.16E-02	4.7
I10	-5.85E-08	6.72E-07	1.49E-05	1.36E+00	3.4
I15	-2.16E-07	8.65E-07	2.96E-05	2.69E+00	2.7
I20	1.42E-14	-1.03E-06	3.62E-05	3.29E+00	1.9
I25	4.80E-07	-3.23E-08	4.14E-05	3.76E+00	2.0
I50	-4.50E-07	-1.01E-08	4.86E-05	4.42E+00	3.5
I75	1.34E-06	3.43E-08	5.64E-05	5.13E+00	1.8
I100	-1.97E-06	1.43E-06	5.72E-05	5.21E+00	2.8
I150	5.93E-07	1.41E-06	5.71E-05	5.19E+00	1.9
I200	-1.32E-06	7.26E-07	5.75E-05	5.23E+00	2.3
I250	-1.29E-06	-1.47E-06	5.94E-05	5.40E+00	2.5
I300	-7.06E-07	-6.03E-07	6.04E-05	5.49E+00	2.7

KERKG7D11

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	2.26E-09	3.76E-10	9.47E-08	8.61E-03	2.4
I10	-5.00E-07	1.01E-07	1.13E-05	1.02E+00	1.3
I15	-2.93E-07	1.80E-07	1.96E-05	1.78E+00	1.8
I20	-1.07E-06	-4.68E-07	2.58E-05	2.34E+00	1.6
I25	-7.76E-07	-6.20E-08	2.99E-05	2.72E+00	1.4
I50	-6.60E-07	-1.52E-06	3.63E-05	3.30E+00	1.9
I75	-8.63E-07	6.77E-08	3.80E-05	3.46E+00	2.2
I100	-1.25E-06	1.49E-06	4.05E-05	3.68E+00	1.4
I150	-1.57E-06	3.12E-07	4.25E-05	3.87E+00	1.5
I200	5.64E-09	-4.36E-07	4.35E-05	3.95E+00	1.3
I250	-1.80E-07	-2.99E-07	4.43E-05	4.02E+00	1.2
I300	-7.52E-07	-2.20E-07	4.34E-05	3.95E+00	2.0

KERKG8D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	7.06E-09	-5.44E-09	1.08E-07	9.86E-03	7.4
I10	1.41E-08	2.02E-09	9.13E-06	8.30E-01	1.3
I15	-2.98E-07	-7.30E-07	1.47E-05	1.34E+00	1.9
I20	1.47E-07	-4.46E-07	1.95E-05	1.77E+00	0.9
I25	-2.78E-07	-1.01E-06	2.07E-05	1.89E+00	1.2
I50	-8.27E-07	-1.07E-06	2.82E-05	2.56E+00	1.8
I75	-1.37E-06	-1.23E-06	2.95E-05	2.68E+00	2.0
I100	-9.96E-07	-5.24E-07	3.01E-05	2.74E+00	1.7
I150	-3.47E-07	-1.01E-06	3.05E-05	2.77E+00	1.1
I200	-1.64E-06	-4.58E-07	3.09E-05	2.81E+00	1.4
I250	-2.82E-06	-1.30E-06	3.16E-05	2.88E+00	2.0
I300	-1.90E-06	-1.26E-06	3.21E-05	2.92E+00	1.0

KERKG8D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	1.26E-09	-1.33E-08	1.02E-07	9.36E-03	3.9
I10	-3.73E-07	-6.32E-09	1.05E-05	9.55E-01	1.3
I15	-1.67E-06	9.26E-08	1.69E-05	1.55E+00	2.0
I20	-2.13E-06	-2.38E-07	2.13E-05	1.95E+00	1.7
I25	-1.19E-06	4.72E-07	2.48E-05	2.26E+00	1.6
I50	-3.56E-06	-1.32E-06	3.09E-05	2.83E+00	2.2
I75	-3.33E-06	-5.60E-07	2.85E-05	2.61E+00	1.9
I100	-3.30E-06	-2.05E-06	3.39E-05	3.10E+00	2.7
I150	-2.64E-06	-8.42E-07	3.63E-05	3.31E+00	2.0
I200	-1.41E-06	-1.48E-06	3.69E-05	3.36E+00	1.9
I250	-3.16E-06	-2.12E-06	3.71E-05	3.39E+00	2.3
I300	-3.12E-06	-2.00E-06	3.62E-05	3.31E+00	3.3

KERKG9D1

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	1.68E-09	-6.74E-09	9.64E-08	8.79E-03	2.6
I10	-3.67E-06	-2.89E-06	5.44E-05	4.96E+00	2.5
I15	-6.82E-06	-4.88E-06	7.92E-05	7.24E+00	2.1
I20	-4.13E-06	-5.90E-06	1.02E-04	9.30E+00	2.9
I25	-3.18E-06	-2.72E-06	8.31E-05	7.56E+00	2.5
I50	-1.17E-05	-3.45E-06	1.35E-04	1.23E+01	3.2
I75	-1.02E-05	-1.45E-06	1.42E-04	1.29E+01	2.1
I100	-1.07E-05	-1.96E-06	1.40E-04	1.27E+01	2.4
I150	-1.39E-05	5.18E-06	1.14E-04	1.04E+01	2.4
I200	-1.72E-05	-7.50E-06	1.44E-04	1.32E+01	2.5
I250	-1.31E-05	-6.59E-06	1.45E-04	1.33E+01	2.4
I300	-1.32E-05	-6.21E-06	1.47E-04	1.34E+01	2.8

KERKG9D2

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	5.31E-09	5.50E-09	1.06E-07	9.64E-03	2.3
I10	-3.30E-06	-1.00E-06	8.63E-05	7.85E+00	1.3
I15	-4.45E-06	-4.62E-06	1.40E-04	1.27E+01	1.3
I20	-9.30E-06	-1.52E-06	1.80E-04	1.64E+01	0.9
I25	-6.65E-06	-6.86E-06	2.03E-04	1.85E+01	1.4
I50	-1.11E-05	-2.33E-06	2.43E-04	2.21E+01	1.2
I75	-1.13E-05	-3.41E-06	2.56E-04	2.33E+01	1.2
I100	-1.62E-05	-9.17E-06	2.53E-04	2.30E+01	1.6
I150	-1.94E-05	3.62E-06	2.62E-04	2.39E+01	2.1
I200	-1.86E-05	-4.59E-06	2.68E-04	2.45E+01	1.4
I250	-1.79E-05	-7.98E-06	2.76E-04	2.51E+01	1.4
I300	-3.04E-05	-1.96E-05	2.70E-04	2.48E+01	3.0

KERKG9D3

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-3.11E-08	-4.32E-08	1.41E-07	1.37E-02	3.1
I10	-4.66E-06	-4.72E-06	6.81E-05	6.22E+00	2.1
I15	-8.91E-06	-7.96E-06	1.06E-04	9.71E+00	2.3
I20	-8.47E-06	-8.07E-06	1.33E-04	1.21E+01	2.4
I25	-1.79E-05	-1.67E-06	1.47E-04	1.35E+01	2.0
I50	-1.40E-05	-1.01E-05	1.83E-04	1.67E+01	1.8
I75	-2.16E-05	-1.12E-05	1.83E-04	1.68E+01	2.3
I100	-1.50E-05	-9.84E-06	1.85E-04	1.69E+01	1.9
I150	-1.61E-05	-9.10E-06	1.87E-04	1.71E+01	1.5
I200	-1.55E-05	-1.21E-05	1.90E-04	1.74E+01	1.8
I250	-2.07E-05	-5.57E-06	1.85E-04	1.70E+01	1.7
I300	-1.91E-05	-1.60E-05	1.72E-04	1.58E+01	2.3

KERKG9D5

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-8.62E-08	6.53E-09	1.71E-07	1.74E-02	1.6
I10	2.18E-07	-2.20E-06	9.18E-05	8.35E+00	0.5
I15	6.17E-06	-3.16E-07	1.45E-04	1.32E+01	1.3
I20	3.54E-06	7.71E-07	1.81E-04	1.64E+01	0.8
I25	4.02E-06	-3.88E-06	1.99E-04	1.81E+01	0.9
I50	-3.76E-06	-2.51E-06	2.38E-04	2.16E+01	0.8
I75	8.11E-07	-1.90E-06	2.51E-04	2.29E+01	1.0
I100	-1.92E-06	-2.27E-06	2.57E-04	2.34E+01	0.9
I150	-1.54E-06	-7.75E-06	2.63E-04	2.39E+01	1.0
I200	-6.90E-06	-3.56E-07	2.58E-04	2.35E+01	1.8
I250	-9.49E-07	-6.01E-06	2.51E-04	2.28E+01	0.8
I300	-6.11E-06	-2.89E-06	2.52E-04	2.29E+01	1.1

KERKG9D10

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-3.73E-08	1.91E-08	9.70E-08	9.61E-03	2.6
I10	-5.85E-06	-3.00E-06	9.46E-05	8.62E+00	1.4
I15	4.44E-06	1.05E-06	1.41E-04	1.28E+01	1.1
I20	-6.16E-06	-1.34E-06	1.86E-04	1.69E+01	1.0
I25	-2.20E-06	2.18E-06	2.10E-04	1.91E+01	1.7
I50	-6.39E-06	-5.74E-07	2.56E-04	2.33E+01	1.7
I75	-7.85E-06	7.85E-06	2.60E-04	2.37E+01	1.4
I100	-4.17E-06	3.29E-06	2.71E-04	2.46E+01	1.3
I150	-9.63E-06	-2.45E-06	2.75E-04	2.50E+01	1.2
I200	-1.15E-05	3.48E-06	2.74E-04	2.50E+01	1.8
I250	-1.10E-05	-7.14E-06	2.77E-04	2.52E+01	1.4
I300	-1.55E-05	-7.87E-06	2.70E-04	2.46E+01	1.9

KERKG9D14

STEP	Xc (Am2)	Yc (Am2)	Zc (Am2)	MAG(A/m)	a95
NRM	-3.45E-09	-2.87E-09	1.47E-07	1.34E-02	5.2
I10	-1.78E-06	-8.92E-07	5.18E-05	4.72E+00	1.3
I15	-2.78E-06	-1.44E-06	7.90E-05	7.19E+00	2.0
I20	-4.96E-06	1.67E-06	9.84E-05	8.96E+00	1.1

I25	-7.96E-06	-3.73E-06	1.09E-04	9.96E+00	2.0
I50	-5.01E-06	1.72E-07	1.31E-04	1.20E+01	1.6
I75	-1.08E-05	-3.04E-06	1.36E-04	1.24E+01	1.9
I100	-3.81E-06	-4.59E-07	1.37E-04	1.24E+01	1.7
I150	-3.60E-06	-3.58E-06	1.37E-04	1.25E+01	1.2
I200	-6.18E-06	-2.32E-06	1.38E-04	1.26E+01	1.0
I250	-9.67E-06	-1.13E-06	1.40E-04	1.27E+01	1.1
I300	-7.04E-06	2.16E-06	1.41E-04	1.28E+01	0.9