

3. Η ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 Εισαγωγή - Η φύση του μαγνητισμού

Το 18^ο αιώνα ο Γάλλος φυσικός Charles Coulomb (1736-1806), περιέγραψε την αλληλεπίδραση των μαγνητών υπό μορφή δυνάμεων που δρουν σε σημεία, τα οποία ονομάζονται μαγνητικοί πόλοι. Κάθε μαγνήτης έχει ένα θετικό και ένα αρνητικό πόλο, οι οποίοι ονομάζονται έτσι λόγω των αντίθετων επιδράσεων που ασκούν στους πόλους ενός άλλου μαγνήτη. Όμοιοι πόλοι δύο μαγνητών ασκούν μια απωθητική δύναμη μεταξύ τους, ενώ ανόμοιοι πόλοι ασκούν μια ελκτική δύναμη. Η δύναμη, F , που ασκείται σε δύο πόλους που έχουν ποσότητες μαγνητισμού (pole strength), P_1 και P_2 και απέχουν απόσταση, r , εκφράζεται με το νόμο Coulomb από τη σχέση:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2} \quad (1)$$

όπου:

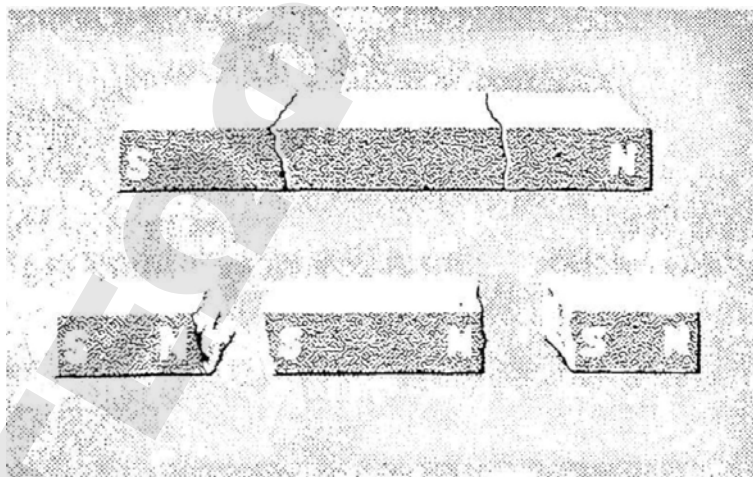
μ , είναι η μαγνητική διαπερατότητα, η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον που βρίσκονται οι μαγνητικοί πόλοι

P_1, P_2 , είναι οι ποσότητες μαγνητισμού

r , είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πόλων

Στο κενό η τιμή του μ ισούται με τη μονάδα (CGS), η οποία είναι πολύ κοντά στη τιμή του αέρα. Στο σύστημα SI, η μαγνητική διαπερατότητα μ ισούται με $4\pi \cdot 10^{-7}$ H(energy) m⁻¹.

Η **ποσότητα μαγνητισμού**, P , περιγράφεται ως η δύναμη που ασκείται από ένα μαγνητικό πόλο σε μια ορισμένη απόσταση. Ο πόλος που ασκεί μια δύναμη ίση με 1 δύνη (dyne) σε ένα άλλο πόλο σε απόσταση 1 cm, θεωρείται ότι έχει μια μονάδα ποσότητας μαγνητισμού ($P = 1$ ups). Εάν στην ίδια απόσταση ασκηθεί δύναμη 2 dynes τότε η ποσότητα μαγνητισμού θα είναι 2 ups. Για λόγους συμβατικούς οι βόρειοι πόλοι λαμβάνονται ως θετικοί και οι νότιοι πόλοι ως αρνητικοί. Με αυτή τη συμβατότητα η δύναμη είναι θετική μεταξύ δύο όμοιων πόλων (απωθητική) και αρνητική για ανόμοιους πόλους (ελκτική). Οι δύο πόλοι ενός μαγνήτη έχουν ίσες ποσότητες μαγνητισμού. Δεν είναι δυνατόν να διαχωρίσουμε ή να αφαιρέσουμε ένα από τους δύο πόλους ενός μαγνήτη. Σε περίπτωση που διασπασθεί ένας μαγνήτης σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, αυτόματα δημιουργούνται δύο ή περισσότεροι μαγνήτες, ο καθένας έχοντας ένα θετικό και ένα αρνητικό πόλο (εικ. 3-1). Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται συχνά η λέξη δίπολο για να περιγραφεί ένας μαγνήτης.



Εικόνα 3-1. Εάν ένας ραβδόμορφος μαγνήτης κοπεί, κάθε κομμάτι γίνεται ένα μικρό δίπολο.

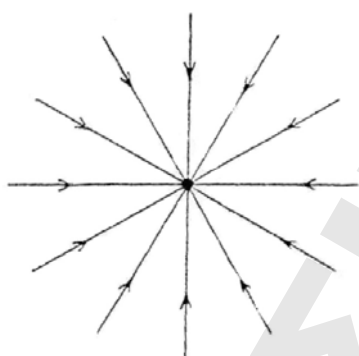
3.2 Μαγνητικές παράμετροι

3.2.1 Ένταση μαγνητικού πεδίου, H

Η παρουσία ενός μαγνητικού πόλου δημιουργεί ένα πεδίο και η δύναμη που αναπτύσσεται με την παρουσία ενός άλλου πόλου σε απόσταση, r , ουσιαστικά οφείλεται στην αντίδραση του ενός πόλου στο μαγνητικό πεδίο του άλλου. Η ένταση, H, ορίζεται ως:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{P_2} = \frac{1}{\mu} \frac{P_1}{r^2} \quad (2)$$

και ισοδυναμεί με τη δύναμη που ασκείται από ένα πόλο ανά μοναδιαία ποσότητα μαγνητισμού σε ένα άλλο πόλο (κυρίως θετικό), αν τοποθετηθεί σε απόσταση r . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου 1 Oe (Oersted) ορίζεται ως η δύναμη μιας δύνης (1 dyne) που ασκείται από ένα πόλο ανά μοναδιαία ποσότητα μαγνητισμού, σε ένα άλλο πόλο (1 ups). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι διανυσματική ποσότητα, με μέτρο και διεύθυνση. Το μαγνητικό πεδίο παριστάνεται συμβατικά με «δυναμικές γραμμές» και η ένταση του πεδίου, H, από την πυκνότητα των γραμμών ή τον αριθμό των δυναμικών γραμμών ανά cm^2 , σε τομή κάθετη προς τη διεύθυνση τους. Οι δυναμικές γραμμές εξέρχονται από το θετικό πόλο (+) και εισέρχονται στον αρνητικό πόλο (-). Σε απόσταση 1cm από μια μονάδα ποσότητας μαγνητισμού, η ένταση του πεδίου είναι 1 Oe ή 1 Maxwell/cm². Η ολική επιφάνεια μιας σφαίρας ακτίνας 1 cm είναι 4π cm². Άρα με τη μονάδα ποσότητας μαγνητισμού συμπαρομαρτεί ένα σύνολο 4π Maxwell, δηλ. 4π δυναμικές γραμμές (εικ. 3-2).



Εικόνα 3-2. Απεικόνιση των δυναμικών μαγνητικών γραμμών (γραμμές Maxwell) στο νότιο πόλο, N, ενός μαγνήτη.

3.2.2 Μαγνητική ροπή, M - Ένταση μαγνήτισης, J

Οι μαγνήτες, οποιονδήποτε σχήμα και εάν έχουν, θεωρούνται πάντοτε ότι αποτελούνται από ζεύγη θετικών και αρνητικών πόλων. Η μαγνητική ροπή, M, κάθε διπόλου είναι διανυσματική ποσότητα με διεύθυνση από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο και έχει μέγεθος που δίδεται από τη σχέση:

$$\vec{M} = P\vec{L}$$

Όπου:

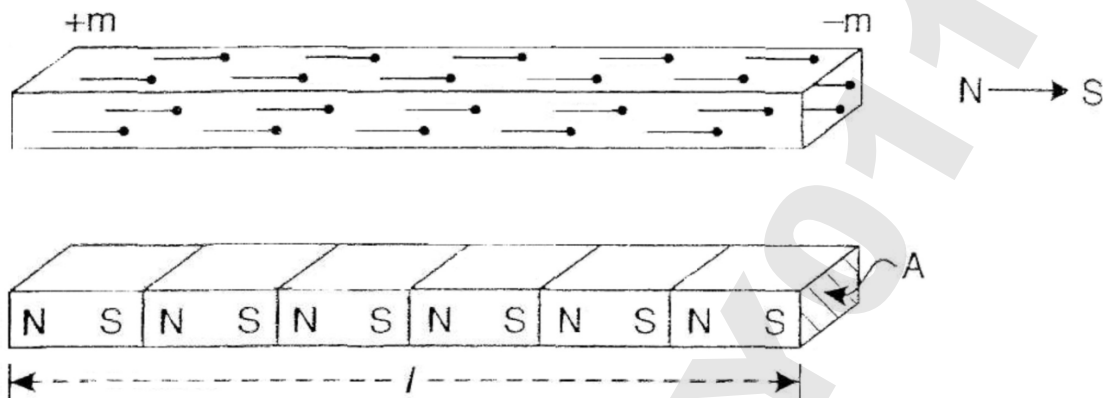
P , είναι η ποσότητα μαγνητισμού

L , είναι η απόσταση μεταξύ των πόλων

Το αποτέλεσμα που παράγει ένας μαγνήτης σε μεγάλη απόσταση, σχετικά με το μήκος του, είναι ανάλογο προς τη μαγνητική ροπή του. Εάν ένας μαγνήτης, που αποτελείται από δίπολο τοποθετηθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε τα δίπολα προσανατολίζονται παράλληλα προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (εικ. 3-3). Η προκαλούμενη με αυτό το τρόπο μαγνητική

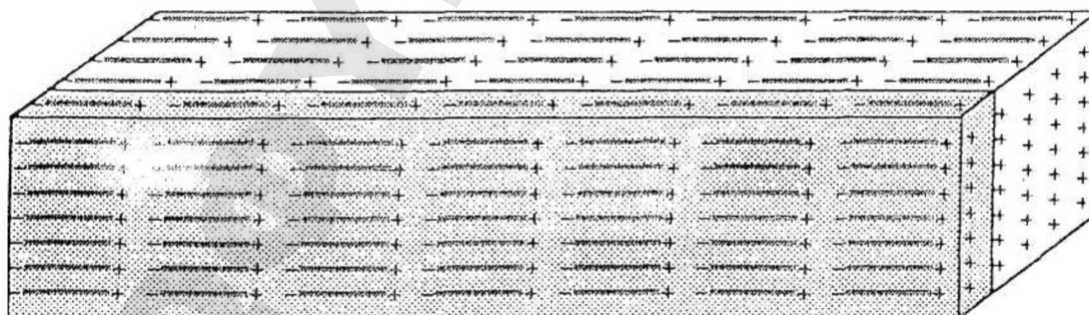
ροπή, M , ανά μονάδα όγκου, V , ονομάζεται **ένταση μαγνήτισης**, J , το μέτρο της οποίας δίδεται από τη σχέση:

$$\vec{J} = M/V_{(\acute{o}\gamma\kappa\omicron\varsigma)} = PL / V_{(\acute{o}\gamma\kappa\omicron\varsigma)} = P / \text{Επιφάνεια.}$$



Εικόνα 3-3. Σχηματική απεικόνιση ομοιόμορφα μαγνητισμένης ράβδου, ως μια συγκέντρωση ευθύγραμμων διπόλων (μιας σειράς μικρότερων ραβδόμορφων μαγνητών), που παράγουν ποσότητα μαγνητισμού $\pm m$.

Για να εκτιμηθεί καλύτερα η παραπάνω σχέση της έντασης μαγνήτισης, ας θεωρήσουμε το ραβδόμορφο μαγνήτη της εικόνας 3-4. Εάν κοπεί ο μαγνήτης σε άνισα κομμάτια κάθετα προς το μήκος του, η δύναμη που ασκείται σε μια απόσταση είναι ανάλογη του μήκους καθενός κομματιού. Δεν έχουν αλλάξει οι θεμελιώδεις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού, αλλά απλώς έχει αλλάξει ο όγκος του. Ομοίως, εάν ο μαγνήτης κοπεί κατά μήκος του σε δύο κομμάτια, τότε η δύναμη που ασκείται σε μια απόσταση, είναι ανάλογη της διατομής καθενός κομματιού. Βέβαια, οι όγκοι των δύο κομματιών είναι διαφορετικοί, αλλά εφόσον τα μήκη είναι ίσα, είναι εύλογο να θεωρήσουμε ότι η επίδραση εξαρτάται από τις διατομές των δύο κομματιών, οι οποίες δεν είναι ίσες. Έτσι, καθώς η ένταση μαγνήτισης αυξάνει, η συγκέντρωση των πόλων αυξάνει και η ποσότητα μαγνητισμού ανά μονάδα επιφανείας αυξάνει.



Εικόνα 3-4. Απεικόνιση ενός μαγνήτη ως ένα σύνολο μικρών διπόλων. Το σκιασμένο τμήμα είναι μικρότερο σε όγκο από το υπόλοιπο κομμάτι και παρουσιάζει μικρότερη ένταση μαγνήτισης.

3.2.3 Μαγνητική επιδεκτικότητα, k

Εάν ένα υλικό τοποθετηθεί σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης, H , του οποίου η διεύθυνση είναι κάθετη προς την επιφάνεια του σώματος, τότε η προκαλούμενη ένταση

μαγνήτισης, J , του υλικού είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου, H . Το μέτρο και η διεύθυνση της μαγνήτισης που επάγεται μέσα στο υλικό, εξαρτάται από το μέτρο και διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου και της ικανότητας του υλικού να μαγνητισθεί και δίδεται από τη σχέση,

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

όπου:

- \vec{J} , είναι η επαγόμενη μαγνήτιση του υλικού
- k , είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού
- \vec{H} , είναι το μέτρο και η διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου

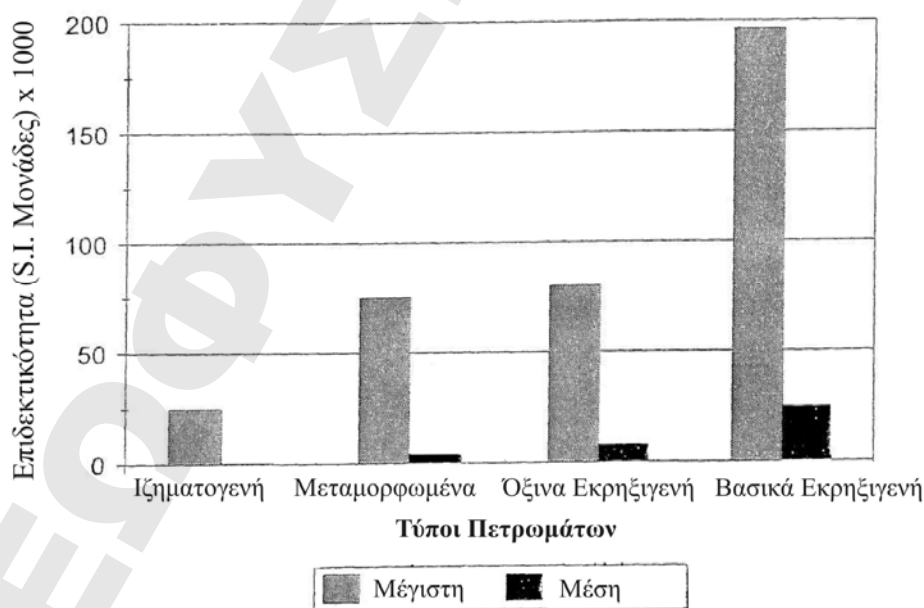
Η μαγνητική επιδεκτικότητα εκφράζει το βαθμό ικανότητας ενός υλικού να μαγνητισθεί (ευκολία ή δυσκολία με την οποία μαγνητίζεται το υλικό). Η επιδεκτικότητα ενός πετρώματος είναι γενικά ισοδύναμη με την επιδεκτικότητα του μαγνητικού υλικού (ή μαγνητικών ορυκτών) που υπάρχει στο πέτρωμα.

Πίνακας 3-1.

ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΕΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΓΗΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Υλικό	Μαγνητική Επιδεκτικότητα, k
Μαγνητίτης	10000×10^{-5}
Περιδοτίτης	500×10^{-5}
Βασάλτης/Γάββρος	200×10^{-5}
Διορίτης	20×10^{-5}
Ψαμμίτης	10×10^{-5}
Γρανίτης	1×10^{-5}
Άλας	-1×10^{-5}

Τιμές Μαγνητικής Επιδεκτικότητας



Εικόνα 3-5. Μαγνητικές επιδεκτικότητες των κυριότερων τύπων πετρωμάτων

Ο Πίνακας 3-1 δείχνει ότι η ποσότητα του σιδήρου σε ένα ορυκτό, ιδιαίτερα υπό μορφή του ορυκτού μαγνητίτη (Fe_3O_4), επιδρά έντονα στη μαγνητική επιδεκτικότητα. Υπερβασικά και βασικά πετρώματα (περιδοτίτης, βασάλτης, γάββρος), τα οποία είναι πλούσια σε μαγνητίτη, έχουν υψηλές μαγνητικές επιδεκτικότητες σε σχέση με αστριούχα πετρώματα (διορίτης, ψαμμίτης, γρανίτης). Στο ιστόγραμμα της εικόνας 3-5 παρουσιάζεται το εύρος μαγνητικής επιδεκτικότητας για διαφορετικά είδη πετρωμάτων.

3.2.4 Μαγνητική επαγωγή, B

Η ευθυγράμμιση των μαγνητικών διπόλων ενός υλικού προκαλείται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης, H , με αποτέλεσμα τη γένεση ενός δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, H' , που περιγράφεται από τη σχέση:

$$H' = 4\pi J$$

Όπου:

J είναι η επαγόμενη μαγνήτιση του υλικού

Το συνολικό πεδίο γύρω και μέσα στο υλικό θα είναι:

$$B = H + H' = H + 4\pi J = H + 4\pi kH = H(1 + 4\pi k)$$

Το B είναι η ποσότητα την οποία μετράμε και ερμηνεύουμε κατά την εκτέλεση των μαγνητικών διασκοπήσεων. Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί ως:

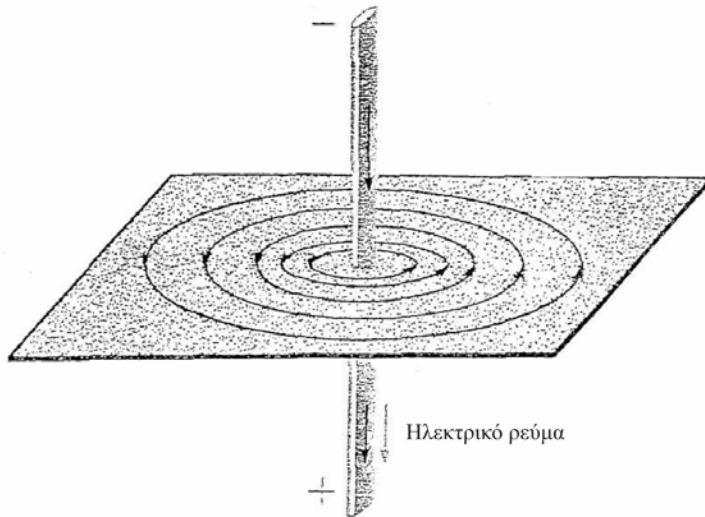
$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Όπου:

$\mu = 1 + 4\pi k$ είναι η μαγνητική διαπερατότητα

3.3 Σχέση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Ηλεκτρομαγνητικό δίπολο

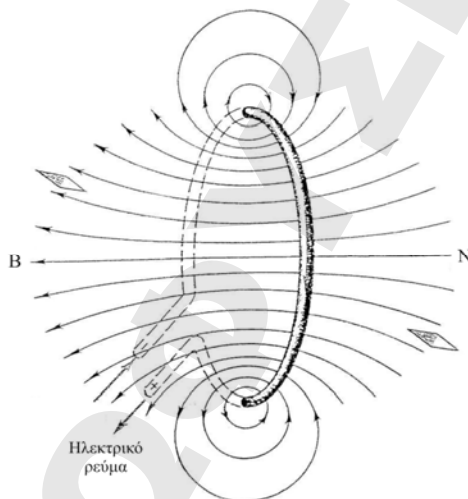
Με βάση το πείραμα του Oersted κάθε ευθύγραμμος μεταλλικός αγωγός (καλώδιο) που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Η διεύθυνση αυτού του πεδίου σε κάθε σημείο, όπως εκείνο γύρω από το ραβδόμορφο μαγνήτη, μπορεί να χαρτογραφηθεί με τη χρήση μιας πυξίδας ή με ρινίσματα σιδήρου. Εάν το καλώδιο αναρτηθεί κατακόρυφα περνώντας μέσα από μια οπή υάλινης πλάκας ή άλλο κατάλληλο μονωτικό σώμα και στη συνέχεια διασκορπιστούν ρινίσματα σιδήρου στην υάλινη πλάκα, θα υπάρξει μια ευθυγράμμιση των ρινισμάτων παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι δυναμικές μαγνητικές γραμμές ή οι γραμμές επαγωγής είναι ομόκεντροι κύκλοι των οποίων τα επίπεδα είναι κάθετα προς τη διεύθυνση του ρεύματος (εικ. 3-6).



Εικόνα 3-6. Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου ενός ευθύγραμμου αγωγού που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

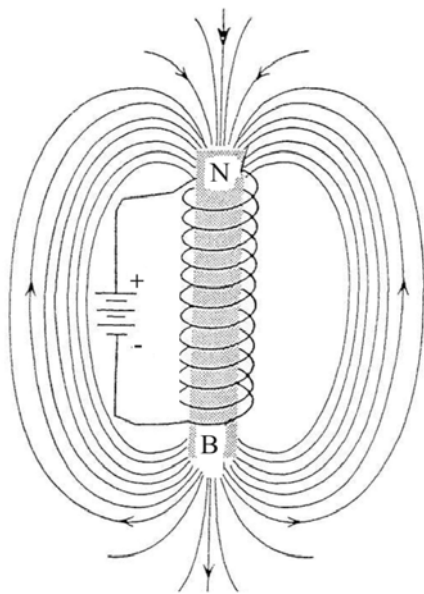
Ο κανόνας του «αριστερού χεριού» που χρησιμοποιείται στον ηλεκτρομαγνητισμό μπορεί πάντοτε να δώσει τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται σε ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στο καλώδιο. Ο κανόνας αυτός δηλώνει ότι: **«Εάν ένας ευθύγραμμος αγωγός ρεύματος κρατηθεί με το αριστερό χέρι και ο αντίχειρας δείχνει προς τη διεύθυνση του ρεύματος, (-) προς (+), τότε τα δάκτυλα δείχνουν τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου».**

Λίγο αργότερα από την ανακάλυψη του Oersted, ο Ampere βρήκε ότι μια μεταλλική σπείρα που διαρρέεται από ρεύμα συμπεριφέρεται επίσης ως μαγνήτης. Στην εικόνα 3-7 φαίνεται μια απλή σπείρα καλωδίου και στην εικόνα 3-8 ένα πηνίο με αρκετές σπείρες. Ένα τέτοιο πηνίο ονομάζεται σωληνοειδές. Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις οι δυναμικές μαγνητικές γραμμές είναι τέτοιες ώστε η μια πλευρά του πηνίου δρα όπως ο βόρειος πόλος και η άλλη πλευρά ως ο νότιος μαγνητικός πόλος.



Εικόνα 3-7. Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου εξωτερικά και εσωτερικά μιας απλής σπείρας που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Σε όλα τα σημεία στην περιοχή γύρω από το πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα, η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται από την πυξίδα (εικ. 3-7), μπορούν να προβλεφθούν με το κανόνα του αριστερού χεριού. Μέσα σε κάθε σπείρα οι γραμμές δείχνουν μια διεύθυνση, ενώ έξω από αυτή σε αντίθετες κατευθύνσεις.



Εικόνα 3-8. Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου εξωτερικά και εσωτερικά ενός απλής πηνίου που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

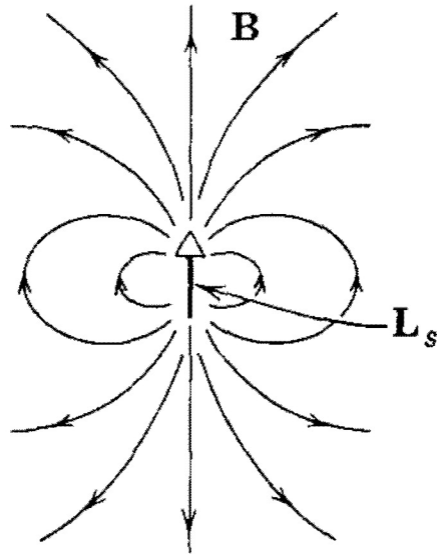
Εκτός του πηνίου, οι δυναμικές γραμμές οδεύουν από Β προς Ν, με ακριβώς τον ίδιο τρόπο που οδεύουν σε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη, ενώ στο εσωτερικό του πηνίου οδεύουν από Ν προς Β (εικ. 3-8).

Εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος κανόνας του αριστερού χεριού, ο οποίος δεν πρέπει να συγχέεται με τον προηγούμενο, διότι προκύπτει από αυτόν. Ο κανόνας είναι: «**Εάν ένα σωληνοειδές κρατηθεί με το αριστερό χέρι και τα δάκτυλα να δείχνουν προς τη διεύθυνση του ρεύματος, γύρω από το πηνίο από (-) προς (+), τότε ο αντίχειρας θα δείχνει στη διεύθυνση του εσωτερικού πεδίου δηλαδή προς το βόρειο πόλο Β**».

3.4 Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Εάν εξετάσουμε χωριστά τα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες που αποτελούν τα άτομα ενός μαγνήτη, θα βρούμε ότι ακόμη και αυτά τα στοιχειώδη σωματίδια είναι μαγνητικά δίπολα. Η εικόνα 3-9 παραλληλίζει τον ηλεκτρικό και μαγνητικό χαρακτήρα του ελεύθερου ηλεκτρονίου. Όλα τα ηλεκτρόνια έχουν μια στροφορμή εξ ιδιοπεριστροφής (spin) γύρω από ένα ορισμένο άξονα, η οποία έχει τιμή

$$L_s = 0,52723 \times 10^{-34} \text{ joule-sec}$$



Εικόνα 3-9. Απεικόνιση των δυναμικών μαγνητικών γραμμών ενός ηλεκτρονίου.

Αυτό δηλώνεται στην εικόνα 3-9 με το διάνυσμα L_s . Ένα τέτοιο φορτίο περιστρεφόμενο γύρω από τον εαυτό του μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από απειροστούς βρόχους (σπείρες) ρεύματος. Κάθε βρόχος είναι ένα μικροσκοπικό δίπολο του οποίου η ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = NiA$$

όπου:

- i , είναι το ρεύμα που ισοδυναμεί για κάθε απειροστό βρόχο
- A , είναι το εμβαδόν του βρόχου και
- N , είναι ο αριθμός σπειρών

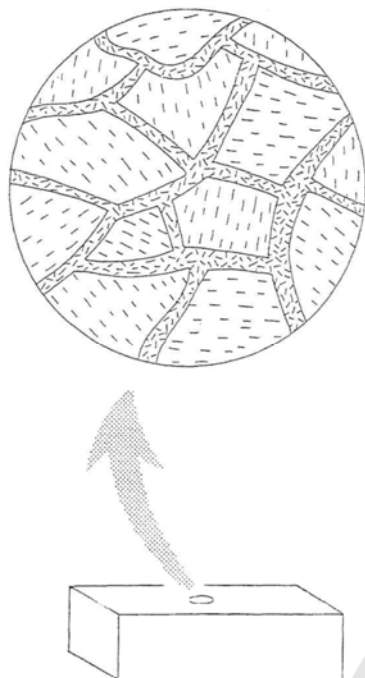
Η μαγνητική διπολική ροπή του φορτίου, που περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του, μπορεί να βρεθεί με ολοκλήρωση των ροπών των απειροστών βρόχων ρεύματος οι οποίοι το αποτελούν.

Αν και το πρότυπο αυτό του περιστρεφόμενου γύρω από τον εαυτό του ηλεκτρονίου είναι πολύ μηχανιστικό και δεν συμφωνεί με τη σύγχρονη κβαντική φυσική, εξακολουθεί να ισχύει ότι η μαγνητική διπολική ροπή των στοιχειωδών σωματιών συνδέεται στενά με ενδογενή στροφορμή.

Μελετώντας τη μαγνητική συμπεριφορά των υλικών προκύπτει ότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση των ενεργειακών σχέσεων που οδηγούν στο φαινόμενο της μαγνήτισης. Απαιτείται ένα ορισμένο ποσό ενέργειας, π.χ., για να παραμείνει ένας μόνιμος μαγνήτης με ελεύθερους τους μαγνητικούς του πόλους.

Το ερώτημα που τίθεται είναι πώς ο μαγνήτης δημιουργεί ένα πεδίο δυνάμεων; Βασικά, το πεδίο δημιουργείται με εσωτερικά ηλεκτρικά ρεύματα που συνδέονται με την ατομική δομή του υλικού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα συνίσταται από φορτισμένα σωματίδια σε κίνηση, κυρίως ηλεκτρόνια. Κάθε αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο περιστρέφεται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και την ίδια στιγμή γύρω από τον άξονα (spin) του, όπως η γη γυρίζει στον άξονα της, ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο. Θετικά φορτισμένα πρωτόνια στο πυρήνα του ατόμου επίσης εμφανίζονται να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους. Λόγω των τροχιακών και των κινήσεων ιδιοπεριστροφής, κάθε ηλεκτρόνιο και πρωτόνιο παράγει το δικό του διπολικό μαγνητικό πεδίο. Εν τούτοις, τα περισσότερα άτομα δεν φαίνεται να μαγνητίζονται, επειδή οι

μαγνητικές ροπές των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων προσανατολίζονται τυχαία και αλληλοαναιρούνται. Αυτό δεν ισχύει για το σίδηρο (Fe), που είναι το μόνο στοιχείο στη γη σε αφθονία που κατέχει σημαντικό ατομικό μαγνητισμό. Ο σίδηρος καθώς και τα ορυκτά μαγνητίτης (Fe_3O_4), ιλμενίτης ((FeTiO_3)) και πυρροτίτης (Fe_{1-x}S) είναι μερικά από τα υλικά που αποκτούν και κατακρατούν μαγνητισμό. Τα υλικά αυτά ονομάζονται σιδηρομαγνητικά.



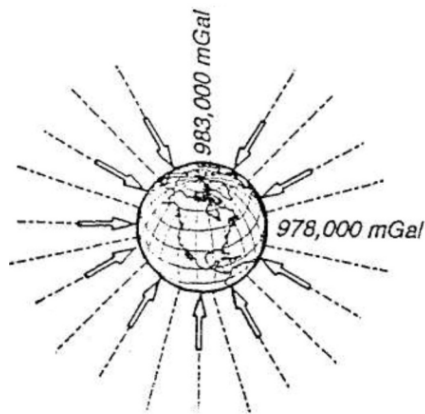
Εικόνα 3-10. Μαγνητικές ζώνες (μαγνητικοί τομείς) ενός σιδηρομαγνητικού υλικού

Ο προσανατολισμός των ατόμων σιδήρου εξαρτάται από την ισορροπία που υπάρχει μεταξύ της χημικής ενέργειας σύνδεσης και της θερμικής ενέργειας. Η ενέργεια σύνδεσης χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμισθούν οι μαγνητικές ροπές, αλλά η θερμική ενέργεια προκαλεί δονήσεις παρέκκλισης από την ευθυγράμμιση. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η θερμική ενέργεια κυριαρχεί, έτσι ώστε οι ατομικές ροπές παραμένουν τυχαία προσανατολισμένες και εξουδετερώνονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το υλικό να μη μαγνητίζεται. Σε θερμοκρασίες κάτω από ένα κρίσιμο σημείο, το οποίο ονομάζεται θερμοκρασία Curie, η ενέργεια σύνδεσης κυριαρχεί. Κάτω από τη θερμοκρασία Curie, ομάδες ατόμων σιδήρου περιορίζονται σε μικρή έκταση διατηρώντας τις μαγνητικές ροπές παράλληλες μεταξύ τους. Μια τέτοια ομάδα καταλαμβάνει μια ζώνη (διαμέρισμα), η οποία είναι συνήθως μερικά μικρά σε διάμετρο και αποτελεί μια ξεχωριστή μαγνητική περιοχή. Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται από τέτοιες ξεχωριστές μαγνητικές περιοχές (εικ. 3-10), εκ των οποίων η κάθε μια δρα ως ένας μικρός αλλά ισχυρά πολωμένος μαγνήτης. Οι χωριστές αυτές περιοχές διαχωρίζονται με «τοιχώματα», τα οποία είναι ζώνες με υψηλή αταξία των ατομικών ροπών.

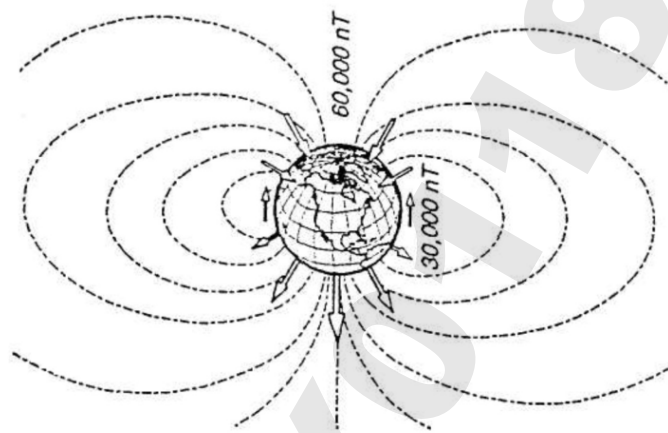
3.5 Το μαγνητικό πεδίο της γης

Το μαγνητικό πεδίο που παρατηρείται στην επιφάνεια της γης μεταβάλλεται σημαντικά και στην ένταση και στη διεύθυνση. Αντίθετα προς το πεδίο βαρύτητας, το οποίο διευθύνεται σχεδόν κάθετα προς την επιφάνεια της γης, η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει από σχεδόν οριζόντια στον ισημερινό μέχρι κατακόρυφα στους πόλους (εικ. 3-11). Η μεταβολή στην ένταση του βαρυτικού πεδίου είναι μόνο το 0,5% (περίπου 978.000 mGal στον ισημερινό, 983.000 mGal στους πόλους), συγκρινόμενο με τον διπλασιασμό του μαγνητικού πεδίου (περίπου 30.000 nT στον ισημερινό, 60.000 nT στους πόλους).

A) Βαρυτικό Πεδίο



B) Μαγνητικό Πεδίο



- Εικόνα 3-11.** Μεγέθη (μέτρα) και διευθύνσεις του βαρυτικού και μαγνητικού πεδίου της γης
- A) Το βαρυτικό πεδίο είναι περίπου κατακόρυφο, με μια ελαφρά μεταβολή στο μέγεθος από τον ισημερινό προς τους πόλους.
 - B) Το μαγνητικό πεδίο δείχνει ισχυρές αποκλίσεις τόσο στο μέγεθος όσο και στη διεύθυνση.

Η μαγνητική μέθοδος έχει πολλές και ενδιαφέρουσες εφαρμογές. Ανωμαλίες που επάγονται από το φυσικό μαγνητικό πεδίο της γης, δίδουν ενδείξεις σχετικά με τη γεωμετρία των μαγνητικών σωμάτων του φλοιού και του βάθους των πηγών των ανωμαλιών. Το βάθος των βαθύτερων πηγών των ανωμαλιών (βάθος Curie) δείχνει το βάθος κάτω από το οποίο τα πετρώματα είναι πολύ θερμά για να κρατήσουν έντονη μαγνήτιση (θερμοκρασία Curie). Οι μελέτες των πετρωμάτων τα οποία έχουν μόνιμα μαγνητισθεί (παλαιομαγνητισμός) δίδουν ενδείξεις για τις ηλικίες αυτών, τα γεωγραφικά πλάτη στα οποία σχηματίστηκαν και για τις σχετικές θέσεις των ηπείρων στο παρελθόν.

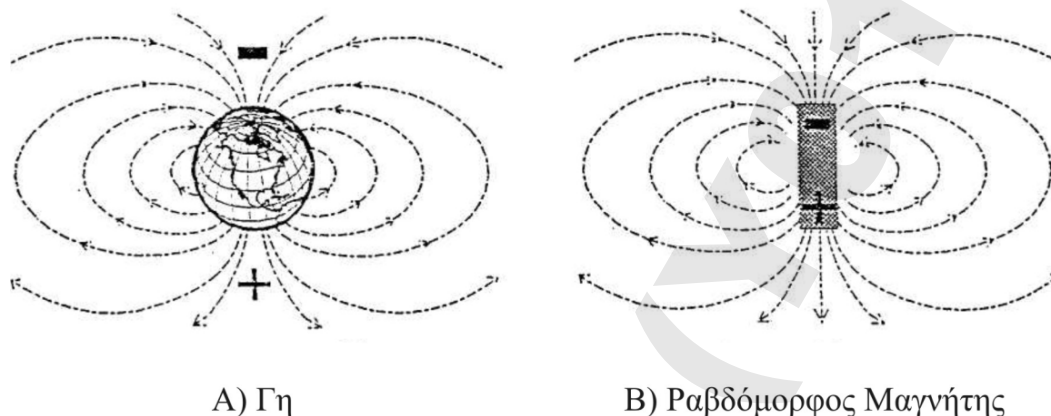
Ο William Gilbert, παρουσίασε πρώτος πειστικές ενδείξεις για την εσωτερική προέλευση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Ο Carl Gauss το 1838 δημοσίευσε μία μαθηματική απόδειξη με την οποία αποδίδει τη δημιουργία του 95% του πεδίου σε εσωτερικές πηγές και μόλις 5% έχει προέλευση από εξωτερικές διαδικασίες. Παραπέρα έρευνα έδειξε ότι, ένα μεγάλο μέρος του εσωτερικού πεδίου παράγεται στον πυρήνα της γης, και το υπόλοιπο έχει την πηγή του στο φλοιό. Έτσι, μπορούμε να διαχωρίσουμε το γήινο μαγνητικό πεδίο στα παρακάτω τρία μέρη:

1. Το **κύριο μαγνητικό πεδίο**, το οποίο παράγεται στον πυρήνα της γης και δημιουργεί τις ευρείες σε έκταση μεταβολές της έντασης του πεδίου και της διεύθυνσης αυτού.
2. Το **εξωτερικό μαγνητικό πεδίο**, το οποίο παράγεται από ηλεκτρικά ρεύματα της ιονόσφαιρας, που αποτελείται από ιονισμένα σωματίδια λόγω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και τα οποία τίθενται σε κίνηση από τη δύναμη της ηλιακής παλίρροιας.
3. Το **ανώμαλο μαγνητικό πεδίο**, το οποίο παράγεται από σιδηρομαγνητικά ορυκτά που βρίσκονται στο φλοιό της γης.

Το κύριο μαγνητικό πεδίο είναι το ισχυρότερο από τα τρία μέρη. Το εξωτερικό πεδίο παρουσιάζει διακυμάνσεις με ημερήσιους κύκλους. Αντίθετα προς το βαρυτικό πεδίο, το οποίο ουσιαστικά παραμένει σταθερό, το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει αργές και μακροχρόνιες μεταβολές. Το ανώμαλο μαγνητικό πεδίο ενδιαφέρει κυρίως τους γεωφυσικούς και χρησιμοποιείται στις γεωμαγνητικές διασκοπήσεις.

3.5.1 Το κύριο μαγνητικό πεδίο.

Το κύριο μαγνητικό πεδίο της γης μπορεί να αποδοθεί ότι οφείλεται σε ένα μεγάλο ραβδόμορφο μαγνήτη, που έχει τοποθετηθεί στο κέντρο της γης και έχει μια απόκλιση $10,9$ μοιρών από τον άξονα περιστροφής της γης. Αυτός ο εικονικός μαγνήτης, ονομάζεται **κεντρικό γεωμαγνητικό δίπολο**. Αυτό το μοντέλο του μαγνητικού πεδίου της γης είναι ανάλογο με εκείνο που παράγεται από μια ράβδο μαγνήτη (εικ. 3-12β). Η μαγνητική ροπή του είναι 8×10^{25} ups-cm. Στην εικόνα 3-12α, φαίνεται σε πρώτη προσέγγιση το γήινο μαγνητικό πεδίο.

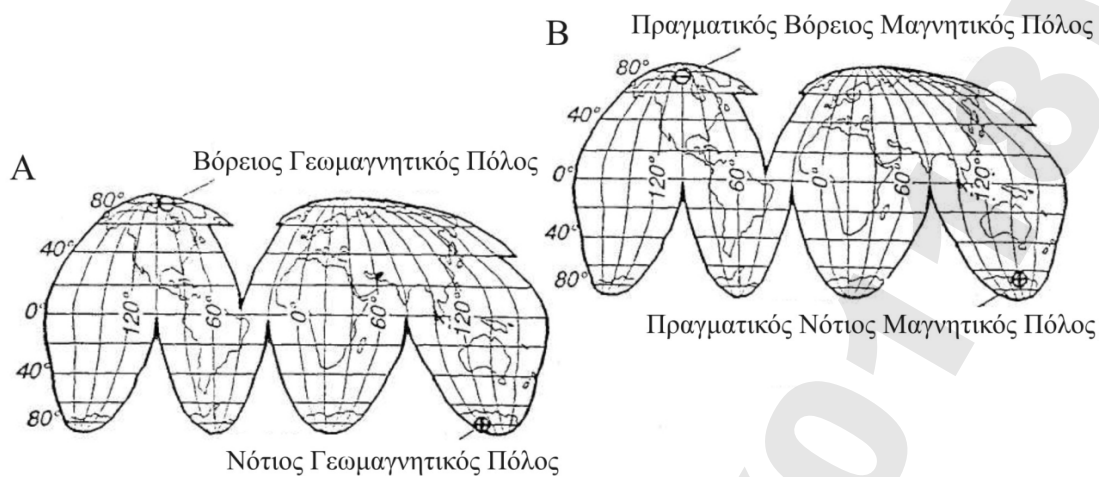


Εικόνα 3-12. Το μαγνητικό πεδίο της γης (A), είναι όμοιο με εκείνο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη (B), με τον αρνητικό μαγνητικό πόλο στο βόρειο ημισφαίριο και τον θετικό μαγνητικό πόλο στο νότιο ημισφαίριο.

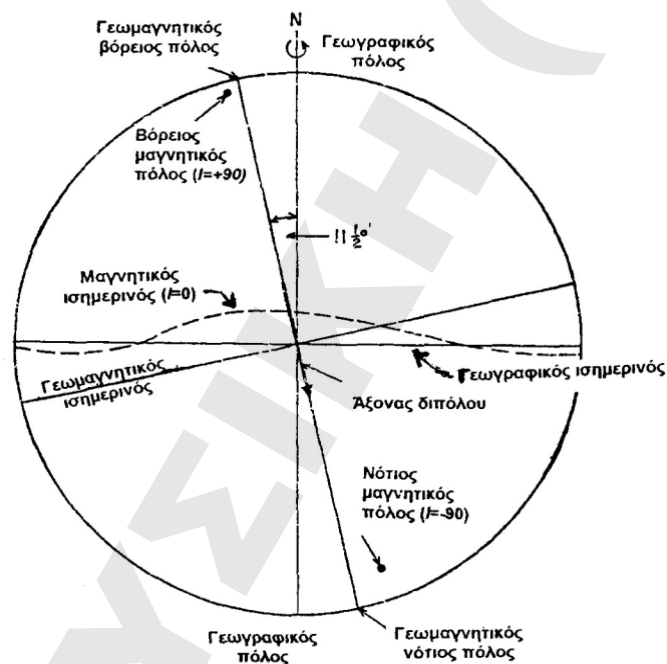
Ο μεγάλος άξονας του μαγνήτη είναι γνωστός ως **γεωμαγνητικός άξονας** και μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να τμήσει την επιφάνεια της γης σε δύο σημεία γνωστά, ως **γεωμαγνητικοί πόλοι**, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους 180° (εικ. 3-13α). Ο πόλος που βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο και με γεωγραφικές συντεταγμένες $79,1^\circ$ Β, $71,1^\circ$ Δ, ονομάζεται **βόρειος γεωμαγνητικός πόλος**. Εκείνος που είναι στο νότιο ημισφαίριο και με συντεταγμένες $79,1^\circ$ Ν, $108,9^\circ$ Α, ονομάζεται **νότιος γεωμαγνητικός πόλος**. Ο **γεωμαγνητικός ισημερινός** είναι ο ισημερινός του γεωμαγνητικού διπόλου. Η πολύπλοκη πηγή του γήινου μαγνητικού πεδίου παράγει δυναμικές μαγνητικές γραμμές, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από εκείνες του απλού διπόλου.

Τα σημεία της επιφάνειας της γης, στα οποία η κλίση του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι κατακόρυφη ($i = 90^\circ$), ονομάζονται **πραγματικοί μαγνητικοί πόλοι** της γης και δεν απέχουν μεταξύ τους 180° (εικ. 3-13β). Τα σημεία αυτά που έχουν γεωγραφικές συντεταγμένες 75° Β 101° Δ, στην περιοχή του βορείου Καναδά και 67° Ν 143° Α, στην Ανταρκτική, δεν πρέπει να συγχέονται με τις θέσεις των γεωμαγνητικών πόλων. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η γραμμή που συνδέει τους δύο μαγνητικούς πόλους, δεν διέρχεται από το κέντρο της γης.

Ο **πραγματικός μαγνητικός ισημερινός** της γης, είναι η γραμμή όπου η κλίση του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι μηδέν (εικ. 3-14). Εάν το γήινο μαγνητικό πεδίο ήταν ακριβώς διπολικό, τότε οι μαγνητικοί πόλοι και ο ισημερινός θα συνέπιπταν με το γεωμαγνητικό βορρά και νότο, καθώς και τον ισημερινό αντίστοιχα. Οι διάφοροι πόλοι και ισημερινοί φαίνονται στην εικόνα 3-14.



Εικόνα 3-13. Οι μαγνητικοί πόλοι της γης. Α) Οι γεωμαγνητικοί πόλοι της γης και Β) Οι πραγματικοί μαγνητικοί πόλοι της γης.



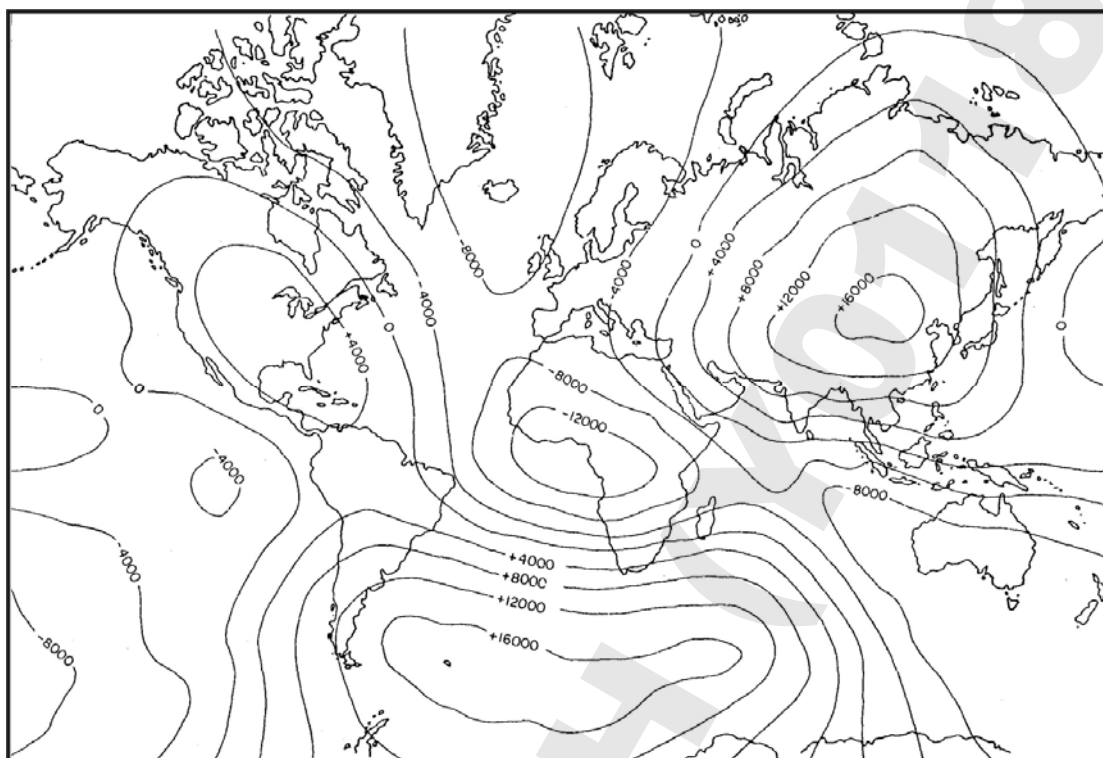
Εικόνα 3-14. Διάγραμμα που δείχνει τη διαφορά μεταξύ των γεωγραφικών, γεωμαγνητικών και πραγματικών μαγνητικών πόλων και ισημερινών.

Το κεντρικό γεωμαγνητικό δίπολο δεν εξηγεί τις ανωμαλίες μεγάλης έκτασης του κύριου πεδίου, οι οποίες υποδεικνύονται από:

- α) Τη διαφορά των θέσεων των μαγνητικών και γεωμαγνητικών πόλων,
- β) τη μεταβολή της έντασης του πεδίου κατά μήκος του μαγνητικού ισημερινού και
- γ) την ασύμμετρη κατανομή των ανωμαλιών των γεωμαγνητικών παραμέτρων (απόκλιση, κλίση, κ.λ.π).

Οι αποκλίσεις αυτές που οφείλονται στην παραδοχή ύπαρξης ενός μόνο απλού διπόλου στο κέντρο της γης, μπορούν να εξηγηθούν εάν τοποθετήσουμε επιπλέον 12 ραβδόμορφους μαγνήτες στο όριο του πυρήνα με τον μανδύα της γης, με τους άξονες τους να διευθύνονται προς το κέντρο της γης. Οι μαγνήτες αυτοί θα είναι ασθενέστεροι, ο καθένας έχοντας το ένα όγδοο της μαγνητικής ροπής του κεντρικού γεωμαγνητικού διπόλου. Το πεδίο που

δημιουργούν οι μαγνήτες αυτοί αποτελεί ένα τμήμα του κύριου μαγνητικού πεδίου και ονομάζεται **μη διπολικό πεδίο** (εικ. 3-15).



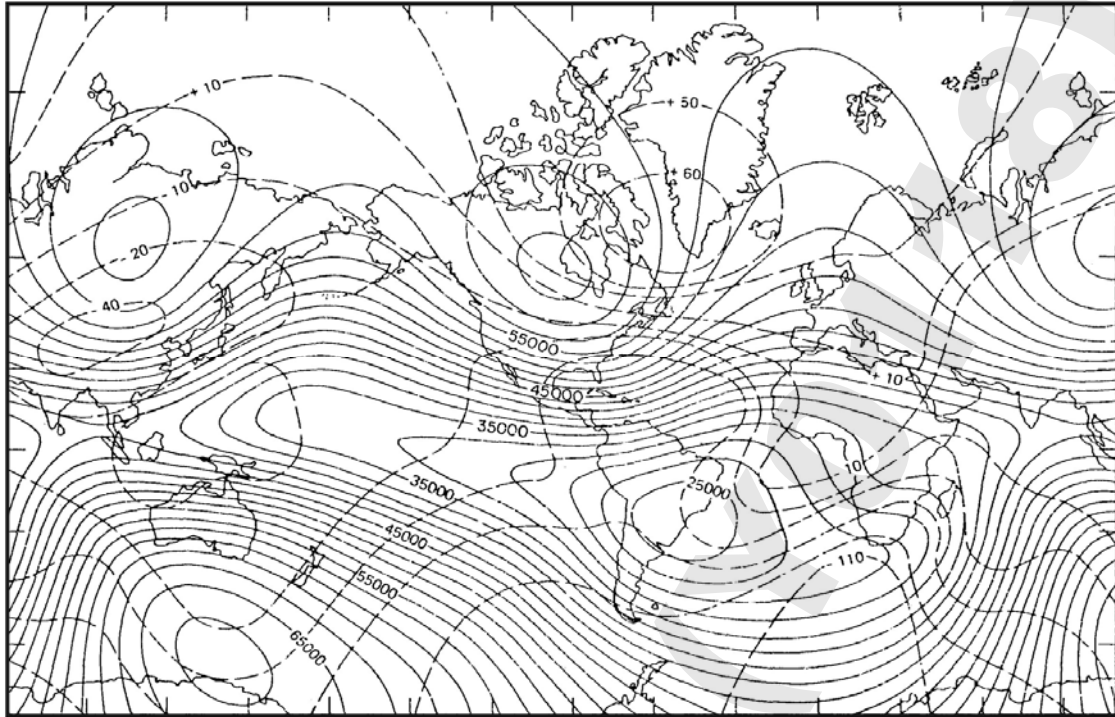
Εικόνα 3-15. Κατανομή του μη διπολικού πεδίου της ολικής έντασης του κύριου μαγνητικού πεδίου της γης, με ισοδιάσταση καμπύλων ανά 4000 γ.

Τα μεγάλης έκτασης χαρακτηριστικά του κύριου μαγνητικού πεδίου, παρουσιάζονται καλύτερα σε χάρτη ισότιμων καμπύλων της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης (εικ. 3-16).

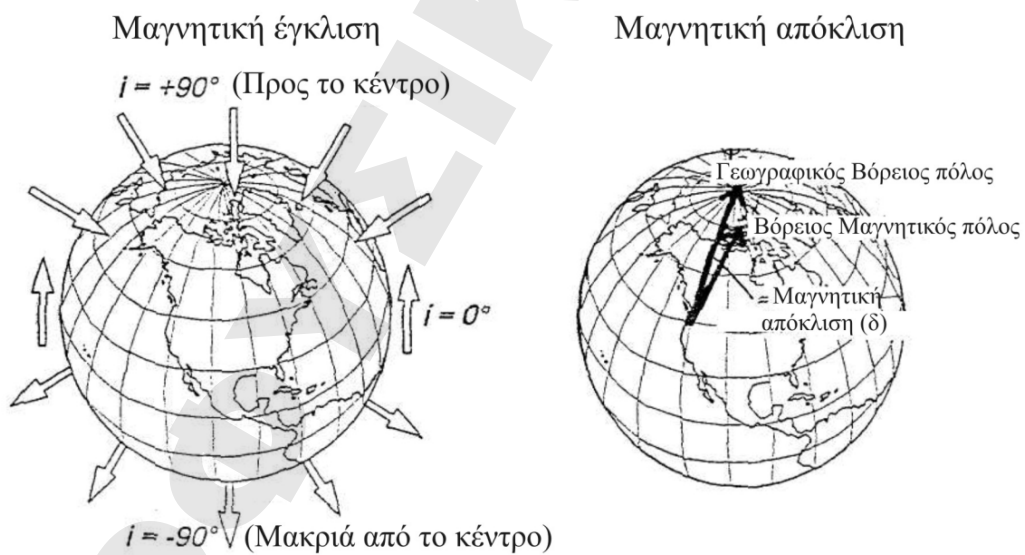
3.5.1.α Ένταση και διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης

Το μαγνητικό πεδίο είναι διανυσματικό μέγεθος και έχει μέτρο και διεύθυνση. Ο προσανατολισμός της βελόνας της πυξίδας δείχνει τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης.

Η μαγνητική κλίση, ή έγκλιση, (i) είναι η γωνία την οποία σχηματίζει η βελόνα της πυξίδας με την οριζόντια επιφάνεια του εδάφους (εικ. 3-17α). Η βελόνα κλίνει κατακόρυφα προς το έδαφος στο βόρειο μαγνητικό πόλο ($+90^\circ$ κλίση) και προς τα έξω στο νότιο μαγνητικό πόλο (-90° κλίση). Στον μαγνητικό ισημερινό η βελόνα δείχνει μια κλίση μηδέν μοιρών. Η γωνία μεταξύ της βελόνας και του αληθινού (γεωγραφικού) βορρά δείχνει την μαγνητική απόκλιση (δ), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-17β.



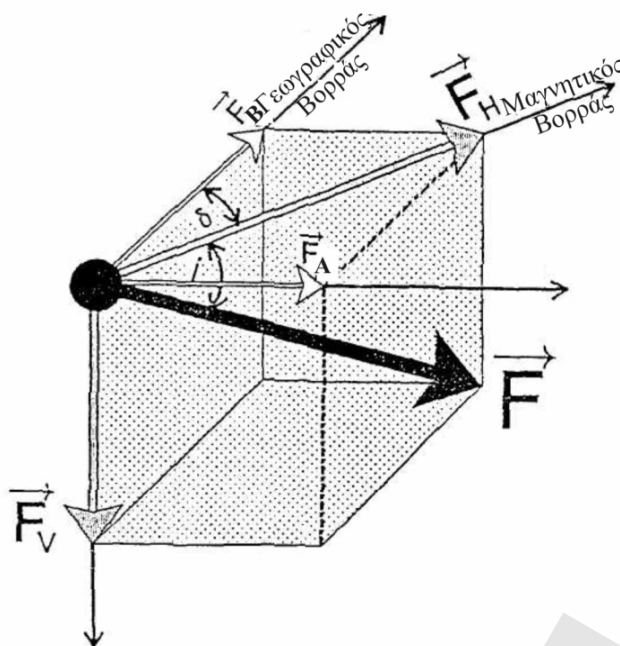
Εικόνα 3-16. Κατανομή της ολικής έντασης του κύριου μαγνητικού πεδίου (συνεχείς γραμμές) και η ετήσια αιώνια μεταβολή (διακεκομμένες γραμμές) στην επιφάνεια της γης, εκφρασμένες σε γ, για το έτος 1975.



Εικόνα 3-17. Μαγνητική έγκλιση (α) και απόκλιση (β).

Αντίθετα προς την βαρύτητα, όπου μικρές αποκλίσεις από την κατακόρυφο είναι συχνά μη σημαντικές, η γνώση της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου της γης είναι πολύ σημαντική.

Το διάνυσμα που περιγράφει την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη διεύθυνση του σε μια θέση, μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες του ως ακολούθως (εικ. 3-18):



Εικόνα 3-18. Οι συνιστώσες της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης.

\vec{F} = διάνυσμα του ολικού μαγνητικού πεδίου

\vec{F}_H = διάνυσμα της οριζόντιας συνιστώσας του ολικού πεδίου

\vec{F}_N = διάνυσμα της οριζόντιας συνιστώσας με διεύθυνση προς βορρά

\vec{F}_E = διάνυσμα της οριζόντιας συνιστώσας με διεύθυνση προς ανατολάς

\vec{F}_V = διάνυσμα της κατακόρυφης συνιστώσας του ολικού πεδίου

i = γωνία μαγνητικής κλίσης

δ = γωνία μαγνητικής απόκλισης

Το μέτρο (F) του διανύσματος του ολικού μαγνητικού πεδίου (ή η ολική ένταση του πεδίου) είναι:

$$F = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = \sqrt{F_N^2 + F_E^2 + F_V^2}$$

όπου:

F_H = το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας του ολικού πεδίου

F_V = το μέτρο της κατακόρυφης συνιστώσας του ολικού πεδίου

F_N = το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας με διεύθυνση προς βορρά

F_E = το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας με διεύθυνση προς ανατολάς

Η μαγνητική κλίση και απόκλιση είναι αντίστοιχα:

$$i = \varepsilon\varphi^{-1}(F_V / F_H) \text{ και}$$

$$\delta = \varepsilon\varphi^{-1}(F_E / F_N)$$

Το αξονικό διπολικό μοντέλο απλοποιεί τη θεώρηση του μαγνητικού πεδίου της γης και μπορεί να περιγράψει την ένταση και τη διεύθυνση του. Με ένα τέτοιο μοντέλο, τα μέτρα των συνιστωσών της οριζόντιας, κατακόρυφης και ολικής έντασης του πεδίου είναι (Butler, 1992):

$$F_H = \frac{M \sigma \nu \varphi}{R^3}$$

$$F_V = \frac{2M \eta \mu \varphi}{R^3}$$

$$F = \frac{M \sqrt{1 + 3\eta \mu^2 \varphi}}{R^3}$$

όπου:

R , είναι η ακτίνα της γης

M/R^3 , είναι η ένταση του ολικού πεδίου στον ισημερινό

Φ , είναι το μαγνητικό πλάτος (για άξονα υπό κλίση $10,9^\circ$ από τον πραγματικό άξονα περιστροφής)

Η μαγνητική κλίση για ένα αξονικό δίπολο επίσης μεταβάλλεται συστηματικά με το μαγνητικό πλάτος σύμφωνα με:

$$\epsilon\phi\iota = 2 \epsilon\phi\varphi$$

3.5.1.β Η έγκλιση του μαγνητικού πεδίου της γης

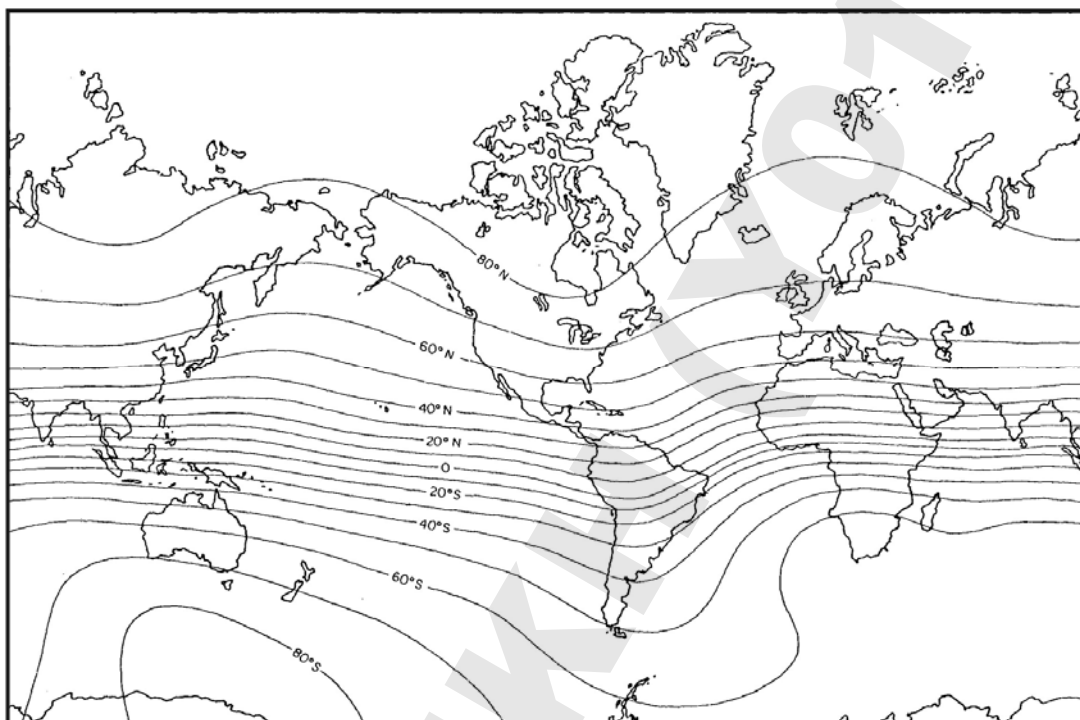
Από την εικόνα 3-17α είναι φανερό ότι στο μαγνητικό ισημερινό μια ελεύθερα αιωρούμενη μαγνητική βελόνα ευθυγραμμίζεται παράλληλα προς την επιφάνεια του εδάφους, ενώ στους μαγνητικούς πόλους κατευθύνεται κατακόρυφα προς τα πάνω ή προς τα κάτω και σε ενδιάμεσα γεωγραφικά πλάτη σχηματίζει μία γωνία σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους.

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δυναμικών γραμμών και της επιφάνειας της γης, είναι η **μαγνητική έγκλιση**. Η έγκλιση μπορεί να μετρηθεί από μία μαγνητική βελόνα, η οποία στηρίζεται σε ένα οριζόντιο άξονα μιας πυξίδας και μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα σε ένα κατακόρυφο επίπεδο (εικ. 3-19).



Εικόνα 3-19. Απλή πυξίδα για τη μέτρηση της έγκλισης του μαγνητικού πεδίου.

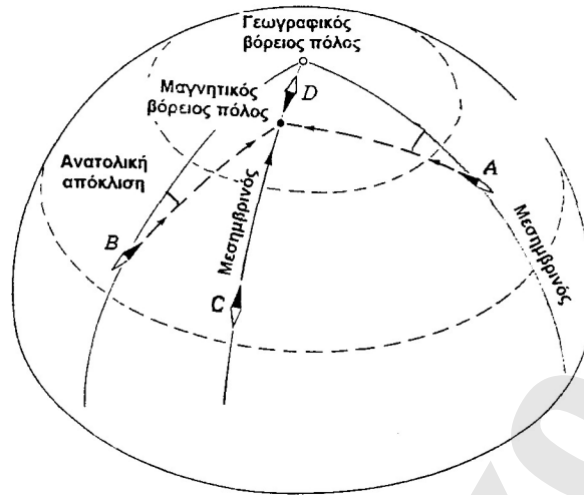
Η βελόνα έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να είναι πλήρως οριζόντια ευθυγραμμισμένη όταν δεν είναι μαγνητισμένη. Ο βόρειος πόλος της βελόνας έχει μια συνιστώσα προς το εσωτερικό της γης, σε όλα τα σημεία βόρεια του μαγνητικού ισημερινού και μια συνιστώσα προς το εξωτερικό μέρος αυτής, νότια του μαγνητικού ισημερινού. Η κατανομή της κλίσης του μαγνητικού πεδίου σε παγκόσμια κλίμακα για το έτος 1975, φαίνεται στην εικόνα 3-20, όπου έχουν χαραχθεί γραμμές ίσης κλίσης και οι οποίες ονομάζονται **ισοκλινείς γραμμές**.



Εικόνα 3-20. Κατανομή της έγκλισης του κύριου μαγνητικού πεδίου (συνεχείς γραμμές) στην επιφάνεια της γης, εκφρασμένη σε μοίρες, για το έτος 1975.

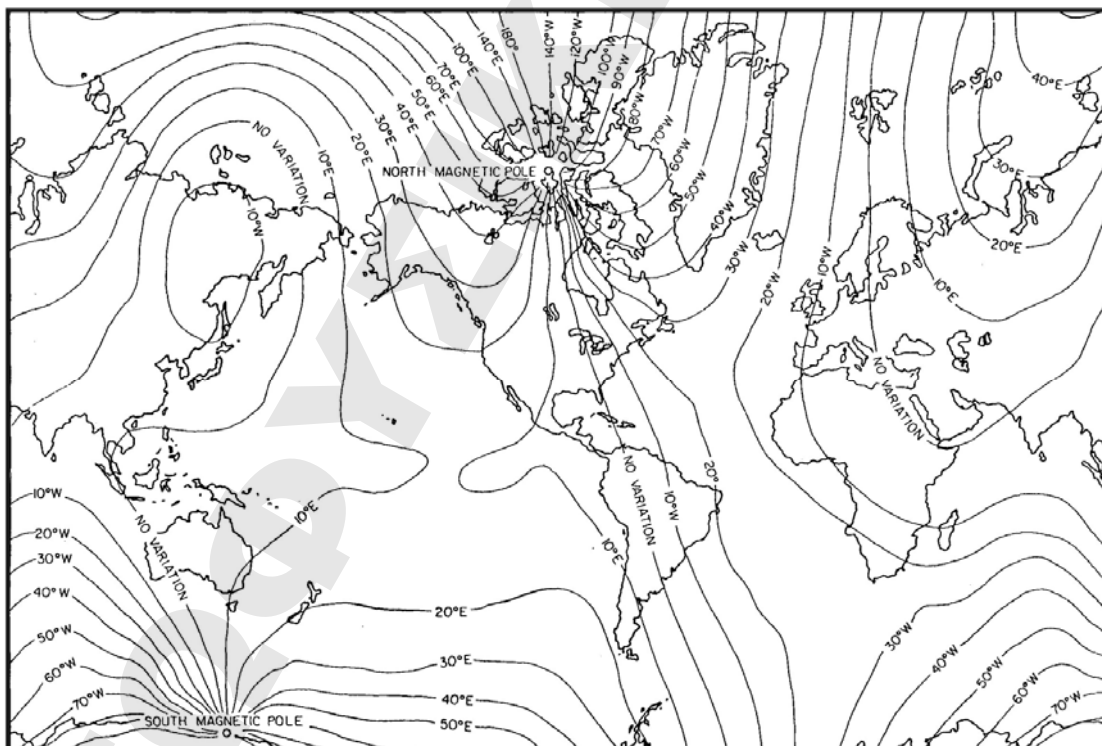
3.5.1.γ Η απόκλιση του μαγνητικού πεδίου της γης

Επειδή ο μαγνητικός άξονας είναι υπό κλίση σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της γης (γεωγραφικός) και οι μαγνητικοί πόλοι δεν ταυτίζονται με τους γεωγραφικούς πόλους, ο βόρειος πόλος της πυξίδας θα δείχνει κανονικά μια διεύθυνση διαφορετική από εκείνη του γεωγραφικού βορρά του μεσημβρινού. Η οριζόντια γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του γεωγραφικού μεσημβρινού και της οριζόντιας συνιστώσας των μαγνητικών δυναμικών γραμμών, που δείχνει η βελόνα της πυξίδας, ονομάζεται **απόκλιση** του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 3- 21. Μετρήσεις απόκλισης του μαγνητικού πεδίου για διαφορετικές θέσεις.

Η απόκλιση εκφράζεται σε μοίρες ανατολικά ή δυτικά του γεωγραφικού βορρά. Στην εικόνα 3-21 για το σημείο *A* η πυξίδα δείχνει αρκετές μοίρες προς τα αριστερά (δυτικά) του γεωγραφικού μεσημβρινού, εάν φαντασθούμε τους εαυτούς μας να στεκόμαστε στο σημείο *A* και να βλέπουμε προς το γεωγραφικό βορρά. Στο σημείο *B* η πυξίδα θα δείχνει προς τα δεξιά (ανατολικά) του πραγματικού βορρά. Στο σημείο *C* η διεύθυνση της πυξίδας ταυτίζεται με το γεωγραφικό μεσημβρινό, έτσι ώστε η απόκλιση να είναι μηδέν. Στο σημείο *D* η πυξίδα δείχνει προς νότο και η απόκλιση είναι 180° .



Εικόνα 3-22. Κατανομή της απόκλισης του κύριου μαγνητικού πεδίου (συνεχείς γραμμές) στην επιφάνεια της γης, εκφρασμένη σε μοίρες, για το έτος 1975.

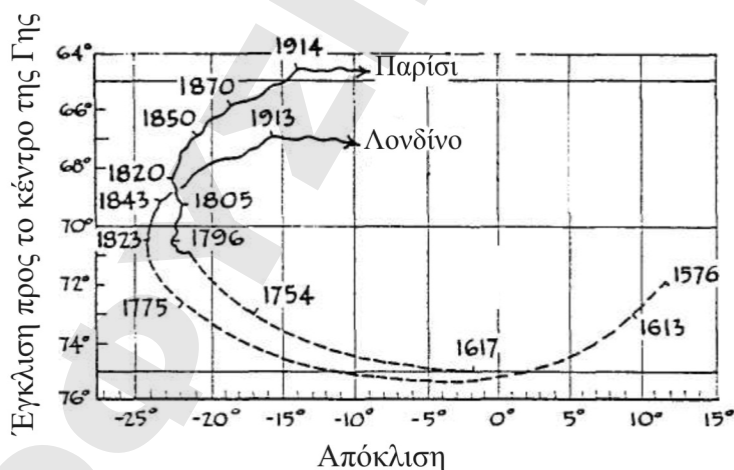
Επειδή υπάρχουν ανωμαλίες στο μαγνητικό πεδίο της γης, η απόκλιση που μετρείται από την πυξίδα δεν ακολουθεί την ιδανική γεωμετρία που αναπτύχθηκε παραπάνω (εικ. 3-21). Με τη χάραξη των **ισογωνικών γραμμών**, γραμμών που έχουν την ίδια απόκλιση, μπορεί να απεικονισθεί καλύτερα η κατανομή της απόκλισης του μαγνητικού πεδίου της γης (εικ. 3-22). Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, το μαγνητικό πεδίο της γης μεταβάλλεται συνεχώς. Έτσι, η απόκλιση υφίσταται μία μικρή ετήσια μεταβολή. Για υπηρεσίες ή ειδικότητες που χρησιμοποιούν γεωγραφικούς χάρτες, όπως στη ναυτιλία, κατασκευάζεται ένας ισογωνικός χάρτης για ένα δεδομένο ημερολογιακό έτος και στα επόμενα χρόνια αναθεωρείται, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της απόκλισης που εν τω μεταξύ έχουν επέλθει.

Οι γεωμαγνητικοί χάρτες κατασκευάζονται από μετρήσεις που διεξάγονται σε ένα δίκτυο γεωμαγνητικών σταθμών παγκόσμιας κλίμακας και αντιπροσωπεύουν το Διεθνές Γεωμαγνητικό Πεδίο Αναφοράς (IGRF). Οι τιμές των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για τη χάραξη των παραπάνω χαρτών, διορθώνονται από επιδράσεις ανώμαλων πεδίων και άλλων εξωτερικών παραγόντων. Οι χάρτες που απεικονίζονται στις εικόνες 3-15, 3-16, 3-20 και 3-22, έτσι έχουν προκύψει για το έτος 1975. Τέτοιοι χάρτες εκπονούνται από Εθνικές Υπηρεσίες πολλών κρατών. Επειδή το πεδίο αλλάζει συνεχώς, οι χάρτες αυτοί αναθεωρούνται κάθε 10 χρόνια.

3.5.1.δ Μακράς κλίμακας χρονικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης

Από μακροχρόνιες παρατηρήσεις μαγνητικών σταθμών, έχει αποκαλυφθεί ότι δύο μεγάλες μεταβολές λαμβάνουν χώρα τόσο στην ένταση όσο και στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης: 1) Μακράς κλίμακας μεταβολές, οι οποίες ονομάζονται **αιώνιες μεταβολές** και 2) Βραχείας περιόδου μεταβολές, οι οποίες ακολουθούν κυκλικές ή ανώμαλες φάσεις και οφείλονται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Οι αιώνιες μεταβολές αφορούν χρονικές μεταβολές του κύριου μαγνητικού πεδίου της γης. Οι πρώτες ενδείξεις αιώνιας μεταβολής βρέθηκαν από μετρήσεις της κλίσης και της απόκλισης του μαγνητικού πεδίου πριν από τέσσερις αιώνες (1600 μ.Χ), στο Λονδίνο και στο Παρίσι. Μερικές από αυτές τις μετρήσεις παριστάνονται γραφικά στην εικόνα 3-23.



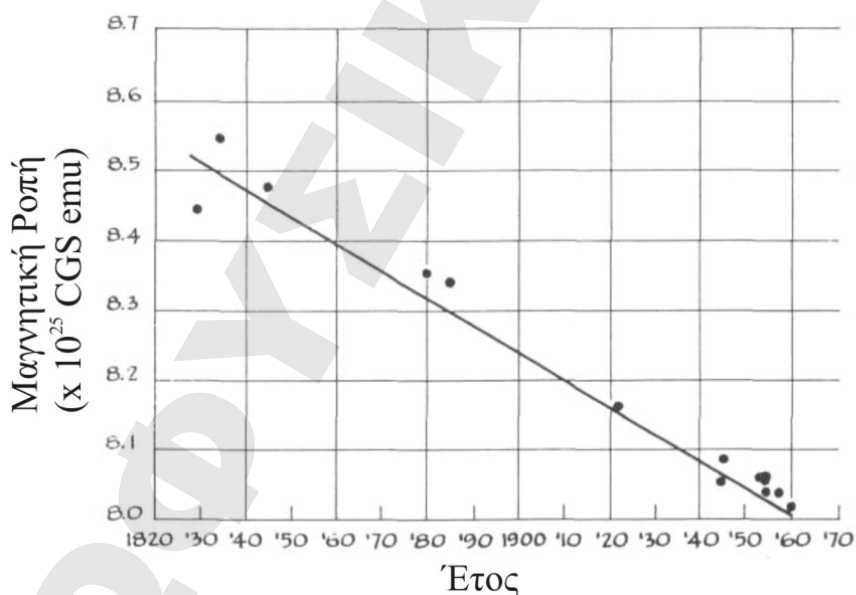
Εικόνα 3-23. Αιώνια μεταβολή της μαγνητικής κλίσης και απόκλισης στο Λονδίνο και στο Παρίσι.

Τελευταία, έχουν συγκεντρωθεί στοιχεία από το παγκόσμιο δίκτυο γεωμαγνητικών σταθμών και έχει διαμορφωθεί μία περισσότερο κατανοητή εικόνα της αιώνιας μεταβολής, με τη συνεχή διεξαγωγή επαναληπτικών μετρήσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, κατασκευάζονται χάρτες που δείχνουν την ετήσια μεταβολή όλων των γεωμαγνητικών παραμέτρων, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως. Π.χ. οι διακεκομμένες ισότιμες καμπύλες της εικόνας 3-16 δείχνουν τον ετήσιο ρυθμό μεταβολής της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αξιοσημείωτο εδώ είναι, ότι για τα περισσότερα μέρη της γης, η μεταβολή της έντασης του πεδίου είναι μεταξύ 50 και 150 γ ανά έτος. Αυτή η πληροφορία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στους γεωφυσικούς για να ρυθμίζουν τα μαγνητικά δεδομένα υπαίθρου που λαμβάνονται σε γεωμαγνητικές διασκοπήσεις διαφορετικών χρονικών περιόδων.

Η αιώνια μεταβολή φαίνεται να σχετίζεται κατά κάποιο τρόπο με το μη διπολικό μέρος του κύριου μαγνητικού πεδίου της γης. Με μία προσεκτική παρατήρηση μπορεί κανείς να διαπιστώσει την ομοιότητα της μορφής των διακεκομμένων γραμμών της εικόνας 3-16, με τη μορφή των ισότιμων καμπύλων της εικόνας 3-15. Υπάρχει επίσης ένδειξη ότι η μαγνητική ροπή ελαττώνεται κατά ένα προσεγγιστικό ρυθμό 1/2000 της τιμής της κάθε χρόνο (εικ. 3-24).

Αυτό το γεγονός μπορεί επίσης να συνεισφέρει στην εξήγηση της αιώνιας μεταβολής. Ίσως, η περισσότερο σημαντική ιδιότητα της αιώνιας μεταβολής είναι η προς δυσμάς πορεία της. Τα περισσότερα από τα μεγάλης έκτασης χαρακτηριστικά των χαρτών των εικόνων 3-15 και 3-16, παρουσιάζουν μία μικρή προς δυσμάς μετατόπιση. Ο ρυθμός της προς δυσμάς μετατόπισης είναι περίπου 0.2 μοίρες γεωγραφικού μήκους ανά έτος. Έτσι, εξηγείται γιατί η ένταση του πεδίου αυξάνεται σε ορισμένες θέσεις ενώ ελαττώνεται σε άλλες (εικ. 3-16). Καθώς μία μεγάλη ανωμαλία πλησιάζει σε μία θέση, η ένταση του πεδίου αργά γίνεται ισχυρότερη. Αργότερα, όταν η ανωμαλία μετατοπίζεται, η ένταση του πεδίου αρχίζει να ελαττώνεται. Η προς δυσμάς μετατόπιση του πεδίου οφείλεται στο γεγονός ότι ο πυρήνας της γης περιστρέφεται με λίγο μικρότερη ταχύτητα από εκείνη του στερεού μανδύα και του φλοιού της γης.



Εικόνα 3-24. Απεικόνιση της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής ροπής της γης.

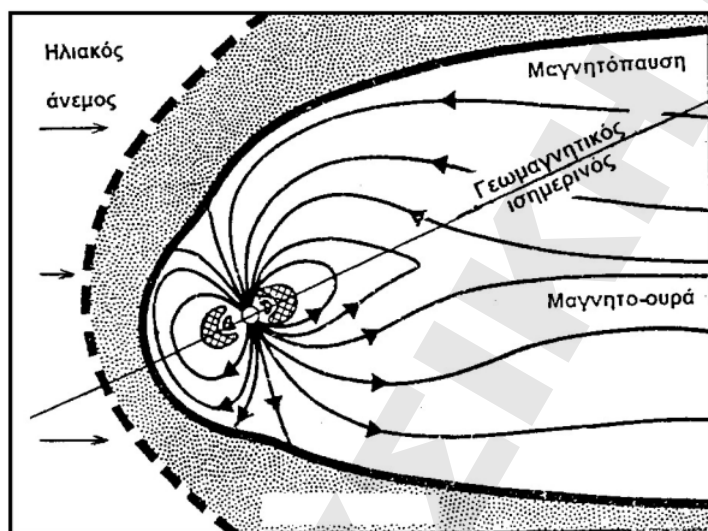
Παρά την περιπλάνηση του, ο γεωμαγνητικός άξονας φαίνεται ότι κατά μέσο όρο 2000 ετών (Strangway, 1970), είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα περιστροφής της γης (δηλ., κατά μέσο όρο οι γεωμαγνητικοί πόλοι συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς πόλους). Αυτό σημαίνει ότι, κατά μία πρώτη προσέγγιση, **το γεωμαγνητικό πεδίο μπορεί να εξομοιωθεί με το πεδίο ενός διπόλου ευθυγραμμισμένου με το γεωγραφικό άξονα B-N**. Η υπόθεση αυτή είναι πολύ

σημαντική για τη μελέτη παλαιομαγνητικών δεδομένων. Εάν ο άξονας του μαγνητικού διπόλου άλλαζε τυχαία δια μέσου του χρόνου και δεν ευθυγραμμιζόταν κατά μέσο όρο με το γεωγραφικό άξονα σε μία περίοδο (γεωλογική), τότε όλες οι παλαιομαγνητικές εκτιμήσεις για τις παλιές θέσεις των δειγμάτων πετρωμάτων δεν θα είχαν καμία σημασία, διότι θα ήταν σχετικές μόνο με τη θέση του γεωμαγνητικού πόλου, κατά τη χρονική στιγμή που απέκτησαν τα δείγματα τη μόνιμη μαγνήτιση και δεν θα είχαν καμία σχέση με το γεωγραφικό πόλο.

3.5.2 Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

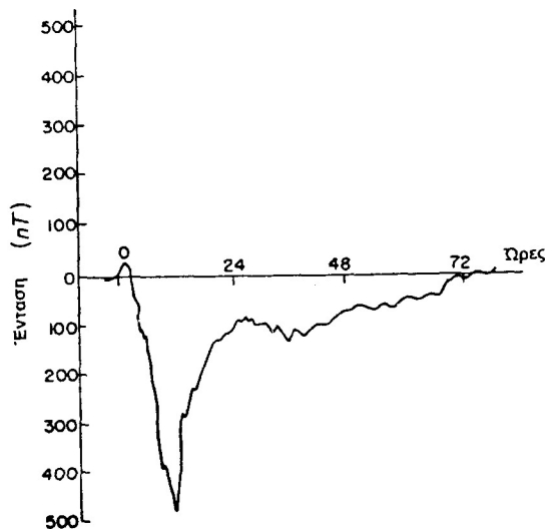
Στην εικόνα 3-25 φαίνεται η κατανομή των γραμμών του μαγνητικού πεδίου γύρω από τη γή. Ο ήλιος παίζει ένα σπουδαίο ρόλο,

α) στη διαμόρφωση της μορφής του μαγνητικού πεδίου μακριά από τη γή και
β) στις βραχείας περιόδου μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου. Ο **ηλιακός άνεμος**, που συνίσταται από μία συνεχή ροή ιονισμένων σωματιδίων που εκπέμπονται από τον ήλιο, περιορίζει το μαγνητικό πεδίο της γης σε μία περιοχή γνωστή ως **μαγνητόσφαιρα**, και παραμορφώνει τις δυναμικές γραμμές, έτσι ώστε η μαγνητόσφαιρα να παρουσιάζει μία μακριά “ουρά”, την “**μαγνητο-ουρά**”, η οποία εκτείνεται αρκετά εκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά από τον ήλιο. Μεταξύ του μετώπου του ηλιακού ανέμου και του μαγνητικού πεδίου της γης δημιουργείται μία τυρβώδης ζώνη, το εσωτερικό όριο της οποίας ονομάζεται **μαγνητόπαυση**.



Εικόνα 3-25. Το γήινο μαγνητικό πεδίο μακριά από τη γη επηρεάζεται δραστικά από τον ηλιακό άνεμο.

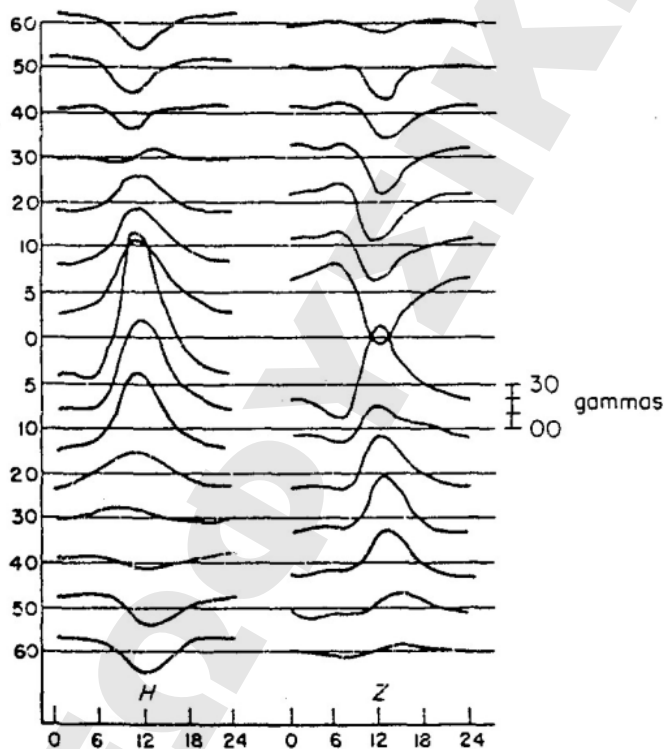
Το μαγνητικό πεδίο της γης κατ' αυτό το τρόπο προστατεύει τη γη από το μεγαλύτερο τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και η ατμόσφαιρα απορροφά το μεγαλύτερο τμήμα της υπόλοιπης παραμένουσας ακτινοβολίας. Οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, είναι ζώνες φορτισμένων σωματιδίων που έχουν παγιδευτεί από το μαγνητικό πεδίο της γης. Μεταβολές στον ηλιακό άνεμο και στη συνέχεια του μαγνητικού πεδίου της γης, μπορούν να οδηγήσουν τα φορτισμένα σωματίδια στο ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, όπου προκαλούν **το βόρειο και νότιο σέλας**. Αυτές οι ανωμαλίες, οι οποίες σχετίζονται με τη δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων, προκαλούν επίσης τις βραχείας περιόδου διακυμάνσεις στο μαγνητικό πεδίο, γνωστές ως **μαγνητικές καταιγίδες** (εικ. 3-26). Ο ήλιος είναι επίσης υπεύθυνος για τις **ημερήσιες** μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης.



Εικόνα 3-26. Μεταβολή της ολικής έντασης του πεδίου κατά τη διάρκεια μιας τυπικής μαγνητικής καταιγίδας.

Αυτές οι μεταβολές, οι οποίες έχουν πλάτος μικρότερο από το 0.5% της ολικής έντασης του πεδίου, είναι η κύρια πηγή των βραχείας περιόδου μεταβολών που επιδρούν στο μαγνητικό πεδίο της γης.

Στην εικόνα 3-27 φαίνεται ότι η ημερήσια διακύμανση ανέρχεται σε μερικές δεκάδες γ. Η επίδραση είναι ισχυρότερη στην περιοχή του ισημερινού και ελαττώνεται προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Υπάρχει επίσης μία εποχική μεταβολή, όπου η ημερήσια διακύμανση είναι μεγαλύτερη κατά το καλοκαίρι παρά το χειμώνα. Επίσης, η ημερήσια μεταβολή παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας παρά τη νύκτα.

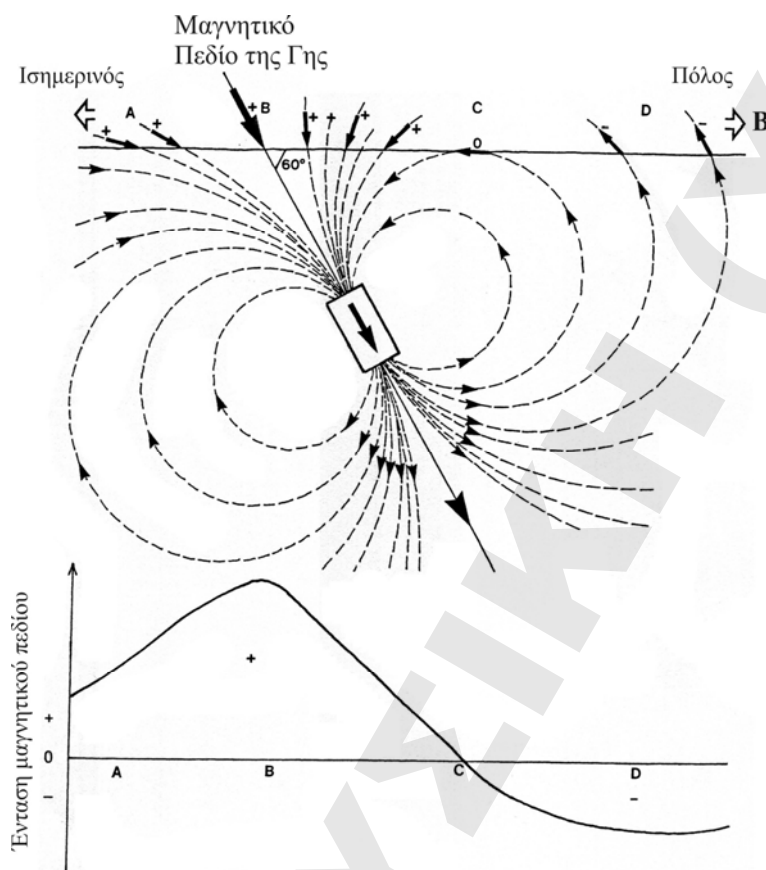


Εικόνα 3-27. Ημερήσια μεταβολή των συνιστωσών H & Z του μαγνητικού πεδίου της γης, για διαφορετικά πλάτη.

3.5.3 Ανώμαλο μαγνητικό πεδίο

3.5.3.a Η μαγνήτιση των υλικών

Το μαγνητικό πεδίο της γης παραμορφώνεται τοπικά από υλικά τα οποία είναι ικανά να μαγνητισθούν. Οι παραμορφώσεις αυτές στην διεύθυνση του πεδίου, μπορούν να απεικονισθούν παραστατικά, με την περιφορά ενός μαγνήτη γύρω από μια πυξίδα; Η κλίση και η απόκλιση της βελόνας αλλάζουν ανάλογα με τη θέση του μαγνήτη (εικ. 3-28). Έτσι ακριβώς, όταν μαγνητικά υλικά εμφανίζονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η διεύθυνση και το μέτρο του ολικού πεδίου αλλάζουν ελαφρώς. Είναι ενδιαφέρον να καταλάβουμε την «προδιάθεση» διαφόρων τύπων υλικών για μαγνήτιση και πως η μαγνήτιση αυτή επιδρά τοπικά στο πεδίο της γης.



Εικόνα 3-28. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σώμα μαγνητικής έγκλισης 60° παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο της γης (α), το οποίο παράγει μια μαγνητική ανωμαλία κατά μήκος του προφίλ A-D (β).

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στη μελέτη του μαγνητικού πεδίου μπορούν να προκαλέσουν σύγχυση στους μη ειδικούς (Butler, 1992). Για εφαρμογές που θα ασχοληθούμε παρακάτω, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η σχέση μεταξύ του μέτρου του ολικού μαγνητικού πεδίου της γης (H) και της μαγνήτισης (J), που επάγεται μέσα στο σώμα μαγνητικής επιδεκτικότητας (k). Μια τυπική μαγνητική έρευνα χρησιμοποιεί ένα μαγνητόμετρο που μετρά το μέτρο του διανύσματος (ένταση) του ολικού πεδίου, αλλά όχι και τη διεύθυνση του.

Στο σύστημα *SI* (International Standard), η μονάδα και για τα δύο, την ένταση και τη μαγνήτιση του μαγνητικού πεδίου είναι το Αμπέρ/μέτρο ($1 \text{ Am}^{-1} = 1 \text{ Cs}^{-1}\text{m}^{-1}$), ενώ η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αδιάστατη. Η μονάδα της μαγνητικής επαγωγής, το tesla (T) είναι επίσης ισοδύναμο με 1 Am^{-1} . Για ευκολία και για να αποφευχθεί σύγχυση θα χρησιμοποιείται το nanotesla ($1 \text{ nT} = 10^{-9}\text{T}$). Σε παλαιότερη βιβλιογραφία η ένταση εκφράζονταν σε γάμμα ($1 \gamma = 1 \text{ nT}$); Η ένταση μπορεί επίσης να εκφρασθεί σε oersted ($1 \text{ Oe} = 10^{-4}\text{T}$) και η μαγνήτιση σε gauss ($1 \text{ G} = 10^{-4}\text{T}$).

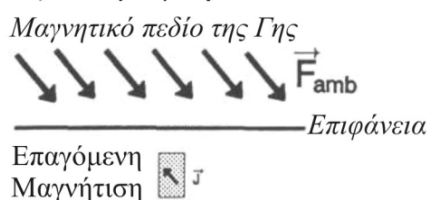
3.5.3.β Τύποι μαγνητικής συμπεριφοράς των υλικών

Ο τύπος της μαγνήτισης που παρουσιάζει ένα ορυκτό, με την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, εξαρτάται από την μαγνητική επιδεκτικότητα του ορυκτού. Εάν το σώμα που περιλαμβάνει το ορυκτό τοποθετηθεί μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο \vec{H} , το σώμα θα αποκτήσει μια μαγνήτιση \vec{J} , με ένταση ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας του, k .

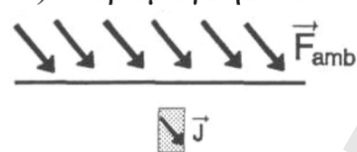
Διαμαγνητικά υλικά ($k \sim -10^{-5}$)

Ένα διαμαγνητικό υλικό, όπως το ορυκτό άλας (αλίτης), έχει μια αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα, με την απόκτηση δηλαδή μιας επαγόμενης μαγνήτισης, αντίθετης προς τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου (εικ. 3-29α). Η ασθενής μαγνήτιση προκύπτει από την αλλαγή των τροχιών των ηλεκτρονίων του υλικού, καθώς εφαρμόζεται μια δύναμη στο υλικό από το εξωτερικό πεδίο. Επιδεκτικότητες της τάξης των -10^{-5} σημαίνουν ότι η μαγνήτιση είναι της τάξης του 1/100.000 της έντασης του εξωτερικού πεδίου.

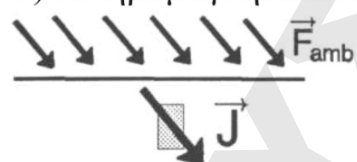
A) Διαμαγνητικά Υλικά



B) Παραμαγνητικά Υλικά



Γ) Σιδηρομαγνητικά Υλικά



Εικόνα 3-29. Τύποι μαγνητικής συμπεριφοράς.

- A) Τα διαμαγνητικά υλικά αποκτούν μια ασθενή μαγνήτιση (\vec{J}), αντίθετη προς το εξωτερικό πεδίο (\vec{F}_{amb}).
- B) Η μαγνήτιση στα παραμαγνητικά υλικά είναι ασθενής αλλά προς την ίδια διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου.
- Γ) Μια ισχυρή μαγνήτιση, προς την ίδια διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, εμφανίζεται στα σιδηρομαγνητικά υλικά.

Παραμαγνητικά υλικά ($k \sim +10^{-4}$). Η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι θετική. Αυτά αποκτούν μια μαγνήτιση παράλληλα προς το εξωτερικό πεδίο (εικ. 3-29β). Η μαγνήτιση εμφανίζεται καθώς οι μαγνητικές ροπές των ατόμων ευθυγραμμίζονται μερικώς με τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Τα περισσότερα μαγνητικά ορυκτά παρουσιάζουν αυτού του τύπου ασθενή μαγνητική συμπεριφορά.

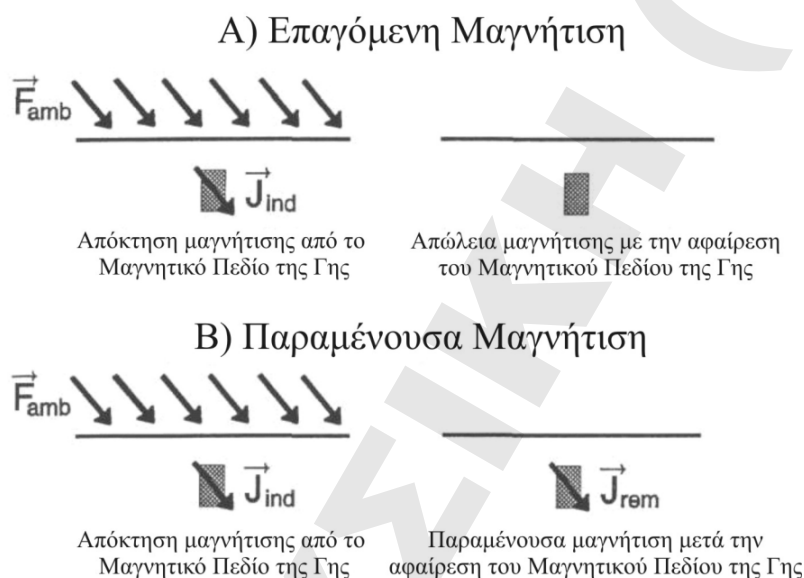
Σιδηρομαγνητικά υλικά ($k \sim +10^{-1}$). Σε κάποια μεταλλικά ορυκτά πλούσια σε σίδηρο, κοβάλτιο, μαγγάνιο ή νικέλιο, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται έντονα με το εξωτερικό πεδίο (εικ. 3-29γ). Επιδεκτικότητες της τάξης των $+10^{-1}$ δείχνουν ότι η επαγόμενη μαγνήτιση είναι στην ίδια διεύθυνση και περίπου το 1/10 σε μέγεθος του εξωτερικού πεδίου. Κάτω από κάποιες περιστάσεις η επαγόμενη μαγνήτιση μπορεί να παραμείνει στα υλικά ακόμα και αν πάψει να εφαρμόζεται το εξωτερικό πεδίο (παραμένουσα μαγνήτιση).

3.5.3.γ Τύποι μαγνήτισης

Η μαγνήτιση ενός πετρώματος εμφανίζεται με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος επιτυγχάνεται με επαγωγή από την παρουσία του μαγνητικού πεδίου της γης και ο άλλος μπορεί να έχει σχηματισθεί κάποια χρονική στιγμή στο παρελθόν κατά το σχηματισμό λιθοποίησης (στερεοποίησης) του πετρώματος.

3.5.3.γ.1 Επαγόμενη μαγνήτιση.

Το μαγνητικό πεδίο της γης είναι ένα εξωτερικό πεδίο, το οποίο μπορεί να προκαλέσει την προσωρινή μαγνήτιση των πετρωμάτων (εικ. 3-30α). Εάν αφαιρεθεί το εξωτερικό αυτό πεδίο, η επαγόμενη μαγνήτιση μπορεί να χαθεί. Το μέτρο και η διεύθυνση του επαγόμενου πεδίου εξαρτάται από το μέτρο και τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου καθώς και από τη μαγνητική επιδεκτικότητα του πετρώματος.



Εικόνα 3-30. Τύποι μαγνήτισης.

- A) Με την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση μπορεί να επαχθεί στο υλικό. Τα υλικά συνήθως χάνουν την επαχθείσα μαγνήτιση όταν το εξωτερικό πεδίο αφαιρεθεί.
- B) Μερικά υλικά διατηρούν την μαγνήτιση μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου, αποκτώντας μια παραμένουσα μαγνήτιση.

3.5.3.γ.2 Παραμένουσα μαγνήτιση.

Όταν τα πετρώματα σχηματίζονται, οι ξεχωριστές μαγνητικές περιοχές ορισμένων ορυκτών (ιδιαίτερα του μαγνητίτη), συμπεριφέρονται σαν μαγνητικές βελόνες, οι οποίες προσανατολίζονται παράλληλα προς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Καθώς το πέτρωμα στερεοποιείται, ο προσανατολισμός των χωριστών μαγνητικών περιοχών μπορεί να καθηλωθεί (ή παγώσει) μέσα στο πέτρωμα. Η παραμένουσα μαγνήτιση υφίσταται και αν ακόμα το εξωτερικό πεδίο παύσει να εφαρμόζεται (εικ. 3-30β). Είναι συνήθως 5 φορές μεγαλύτερη από την επαγόμενη μαγνήτιση που επιφέρει το εξωτερικό πεδίο.

Τύποι παραμένουσας μαγνήτισης

Τα πετρώματα αποτελούνται από διαμαγνητικά, παραμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά ορυκτά. Τα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά αποκτούν μια μαγνήτιση όταν εκτίθενται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (εικ. 3-29α,β). Σε μια δεδομένη θερμοκρασία τα υλικά αυτά έχουν μια σταθερή επιδεκτικότητα, αποκτώντας μια μαγνήτιση η οποία είναι γραμμικά ανάλογη με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση χάνεται όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρυνθεί. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά (εικ. 3-29γ), εν τούτοις, κρατούν μια σταθερή (παραμένουσα) μαγνήτιση και αν ακόμα το εξωτερικό πεδίο απομακρυνθεί. Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους τα υλικά μπορούν να αποκτήσουν παραμένουσα μαγνήτιση.

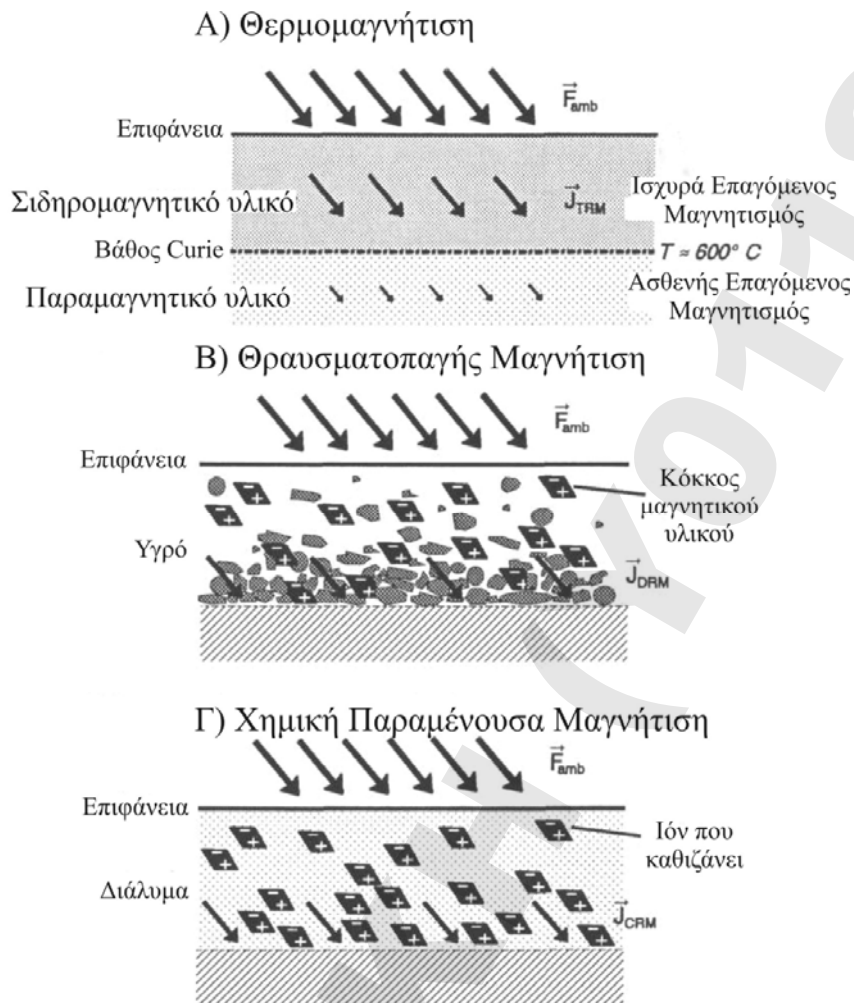
Θερμομαγνήτιση (\vec{J}_{TRM}). Σε υψηλή θερμοκρασία ένα σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει παραμαγνητική συμπεριφορά. Καθώς τα πετρώματα ψύχονται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, ορισμένα ορυκτά (ιδιαίτερα ο μαγνητίτης) αλλάζουν από παραμαγνητική σε πολύ ισχυρή σιδηρομαγνητική συμπεριφορά. Τα πετρώματα αποκτούν μια μεγάλη θερμομαγνήτιση καθώς οι χωριστές μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο της γης (εικ. 3-31α).

Μια ανάλογη και συχνή περίπτωση θερμομαγνήτισης είναι, εκείνη κατά την οποία κρύσταλλοι ορυκτών προσανατολίζονται στο πεδίο της γης, καθώς ρέουσα λάβα ψύχεται και αποκτά σκληρότητα.

Πράγματι, η ροή, αν και είναι αρκετά θερμή, είναι αρκετά σκληρή (οι κρύσταλλοι τυχαία κατανέμονται στη μάζα της λάβας) πριν η παραμένουσα μαγνήτιση αποκτηθεί. Οι κρύσταλλοι δεν μπορούν να περιστραφούν και να ευθυγραμμισθούν με το μαγνητικό πεδίο της γης. Αντίθετα, οι μαγνητικές ροπές των ορυκτολογικών κόκκων αποκτούν μια τάση εκτροπής από τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης κατά την ψύξη της λάβας. Η θερμομαγνήτιση είναι έτσι ένα στατιστικό, θερμοδυναμικό φαινόμενο και προκύπτει από το γεγονός ότι ο κόκκος μαγνητίτη είναι σε ένα ελαφρώς χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο όταν η μαγνητική ροπή του ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο της γης.

Θραυσματοπαγής μαγνήτιση (\vec{J}_{DRM}). Όταν ιζήματα καθιζάνουν στο νερό, οι κόκκοι σιδηρομαγνητικών ορυκτών (ιδιαίτερα μαγνητίτη και αιματίτη), έχουν τη τάση να προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο της γης (εικ. 3-31β). Το πέτρωμα έτσι αποκτά μια θραυσματοπαγή μαγνήτιση.

Χημικώς παραμένουσα μαγνήτιση (\vec{J}_{CRM}). Καθώς ιόντα καθιζάνουν από ένα διάλυμα, σχηματίζοντας σιδηρομαγνητικά ορυκτά, οι χωριστές μαγνητικές περιοχές στους κρυστάλλους των ορυκτών αυτών προσανατολίζονται εκλεκτικά προς το μαγνητικό πεδίο της γης (εικ. 3-31γ). Το πέτρωμα έτσι αποκτά μια χημικώς παραμένουσα μαγνήτιση. Ο παλαιομαγνητισμός αναπτύχθηκε τοιούτοτρόπως, στηριζόμενος στα πλούσια ιζήματα σιδήρου των ηπειρωτικών περιοχών. Αυτά τα «ερυθρά στρώματα» έχουν χρησιμοποιηθεί για τον όγκο των παλαιομαγνητικών παρατηρήσεων στη ξηρά, για την εκπόνηση μελετών παλαιομαγνητικής στρωματογραφίας και παλαιο-γεωγραφικών πλατών. Το ερυθρό χρώμα προκύπτει από το σιδηρομαγνητικό ορυκτό του αιματίτη.



Εικόνα 3-31. Τύποι παραμένουσας μαγνήτισης.

- A) Θερμομαγνήτιση (\vec{J}_{TRM}). Όταν ένα υλικό (π.χ. ροή λάβας) ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, εμφανίζεται μια ισχυρή σιδηρομαγνήτιση, παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο της γης.
- B) Θραυσματοπαγής μαγνήτιση (\vec{J}_{DRM}). Καθώς ιζήματα καθιζάνουν σε υδατικά διαλύματα, οι κόκκοι ορυκτών περιστρέφονται έτσι ώστε εκλεκτικά να προσανατολισθούν προς το μαγνητικό πεδίο της γης.
- Γ) Χημική παραμένουσα μαγνήτιση (\vec{J}_{CRM}). Καθώς ιόντα καθιζάνουν από ένα διάλυμα, η διπολική τους δομή ευθυγραμμίζεται προς το μαγνητικό πεδίο της γης.

3.5.4 Κανονικό και ανάστροφο μαγνητικό πεδίο της γης

Η μελέτη του παλαιομαγνητισμού στα πετρώματα μπορεί να οδηγήσει σε ερμηνείες σχετικά με τις ηλικίες των πετρωμάτων (γεωχρονολόγηση, παλαιομαγνητική στρωματογραφία), και για τις θέσεις των διαφορετικών τεμαχών του φλοιού, όταν αρχικά σχηματίστηκαν τα πετρώματα αυτά (παλαιο-γεωγραφικό πλάτος).

Η χρονολόγηση των πετρωμάτων που στηρίζεται σε μαγνητικές μετρήσεις, περιστρέφεται γύρω από την παρατήρηση ότι το μαγνητικό πεδίο της γης περιοδικά αναστρέφεται (εικ. 3-32). Οι χωριστές μαγνητικές περιοχές των ορυκτών, που συμπεριφέρονται σαν βελόνες

πυξίδων, δείχνουν προς το βόρειο μαγνητικό πόλο στην «κανονική» διάταξη που υπάρχει σήμερα. Σε άλλες περιόδους του παρελθόντος, εν τούτοις, το μαγνητικό πεδίο έχει αναστραφεί, έτσι ώστε οι χωριστές περιοχές των ορυκτών να έχουν μαγνητισθεί κατά την αντίθετη διεύθυνση.

Χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις αναστροφών πολικότητας του μαγνητικού πεδίου της γης, έχει αναπτυχθεί μια Χρονική Κλίμακα Γεωμαγνητικής Πολικότητας (εικ. 3-33). Η κλίμακα αυτή βασίζεται σε διαφόρους μεθόδους που περιλαμβάνουν:

- α) μελέτες παραμένουσας μαγνήτισης με ισοτοπικό χρονικό προσδιορισμό νέων (5 εκατομμυρίων ετών) γρανιτικών πετρωμάτων,
- β) παρατηρήσεις θαλάσσιων μαγνητικών ανωμαλιών, που συνοδεύονται από παλαιοντολογική χρονολόγηση των ιζημάτων και Κάλιο/Αργό (K/Ar) χρονολόγηση βασαλτών που έχουν ληφθεί από το πρόγραμμα DSDP (Deep Sea Drilling Project),
- γ) μελέτες μαγνητικής στρωματογραφίας ιζηματογενών τομών με πλήρη συνήθως κατάλογο απολιθωμάτων.

3.5.4.1 Γεωχρονολόγηση βασισμένη σε ένα ζεύγος μαγνητικών ανωμαλιών εγκάρσια προς τις μεσο-ωκεάνιες ράχες.

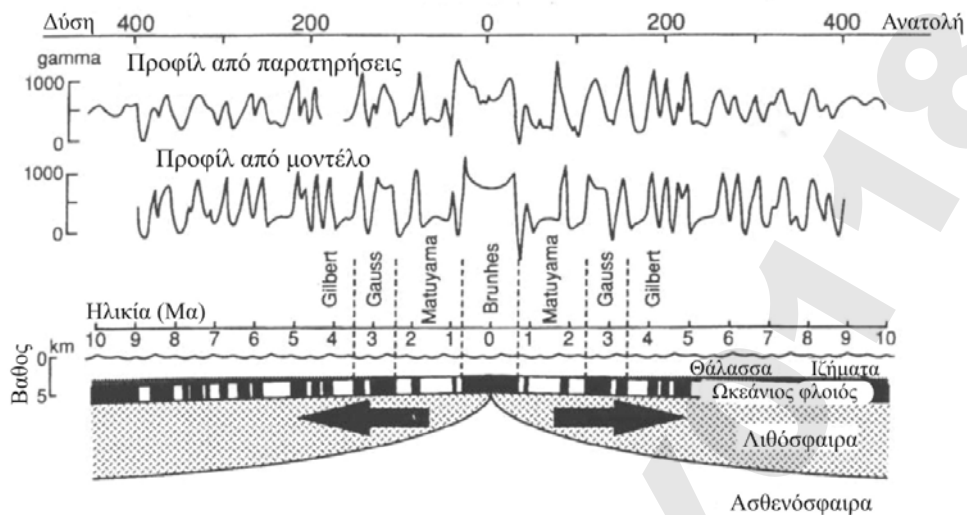
Οι πυθμένες των ωκεανών δίδουν τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης των μαγνητικών δεδομένων για να προσδιορισθούν οι ηλικίες ορισμένων υλικών.

Καθώς τα βασαλτικά πετρώματα ψύχονται στις μεσο-ωκεάνιες ράχες, αυτά αποκτούν μια ισχυρή θερμομαγνήτιση (εικ. 3-31α). Μια καταγραφή κανονικών και ανάστροφων πολικότητων έχει «παγώσει» (αποτυπωθεί) στο βασάλτη του ωκεάνιου στρώματος 2 (εικ. 3-34, οροφή εικόνας). Η παραμένουσα μαγνήτιση του ωκεάνιου βασάλτη προκύπτει από προσθα-αφαιρέσεις του μαγνητικού πεδίου της γης. Προφίλ ανωμαλιών ολικού πεδίου, που έχουν καταγραφεί εγκάρσια προς τις μεσο-ωκεάνιες ράχες, δείχνουν έτσι εναλλασσόμενα μέγιστα και ελάχιστα, αναπαριστώντας περιόδους που το ωκεάνιο στρώμα 2 ήταν κανονικώς ή αναστρόφως πολωμένο (εικ. 3-34, κάτω μέρος εικόνας).

Οι αναστροφές μαγνητικής πολικότητας που παρατηρούνται εγκάρσια προς τις μεσο-ωκεάνιες ράχες συμφωνούν με τα δεδομένα του προγράμματος *DSDP*, δείχνοντας ότι τα ιζήματα των ωκεανών και οι υποκειμένοι βασάλτες γίνονται σταδιακά αρχαιότερα μακριά από τους άξονες των μεσο-ωκεάνιων ραχών. Οι ηλικίες των ωκεάνιων πετρωμάτων μπορούν έτσι να προκύψουν από τη διάταξη των παρατηρηθεισών μαγνητικών ανωμαλιών, που εναρμονίζονται με τη Χρονική Κλίμακα Γεωμαγνητικής Πολικότητας.

Οι εναλλασσόμενες ζώνες θετικών και αρνητικών μαγνητικών ανωμαλιών δείχνουν αξιοσημείωτη συμμετρία σε αντίθετες πλευρές των μεσο-ωκεάνιων ραχών. Αυτή η συμμετρία είναι ένα βασικό τεκμήριο για την ιδέα της δημιουργίας της νέας λιθόσφαιρας στα όρια απόκλισης των πλακών (εικ. 3-32).

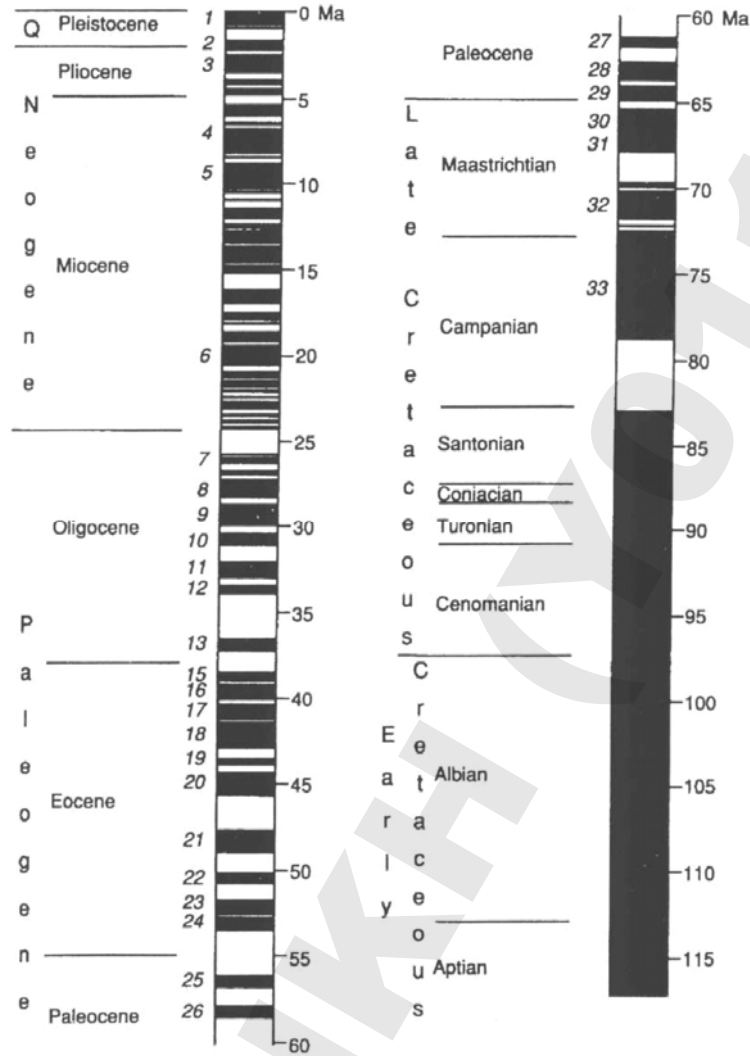
Τα πλάτη των ανωμαλιών δείχνουν το ρυθμό με τον οποίο οι πλάκες απομακρύνονται στις μεσο-ωκεάνιες ράχες. Στενές ανωμαλίες δείχνουν αργούς ρυθμούς απομάκρυνσης, ενώ μεγαλύτερου εύρους ανωμαλίες δείχνουν γρηγορότερους ρυθμούς.



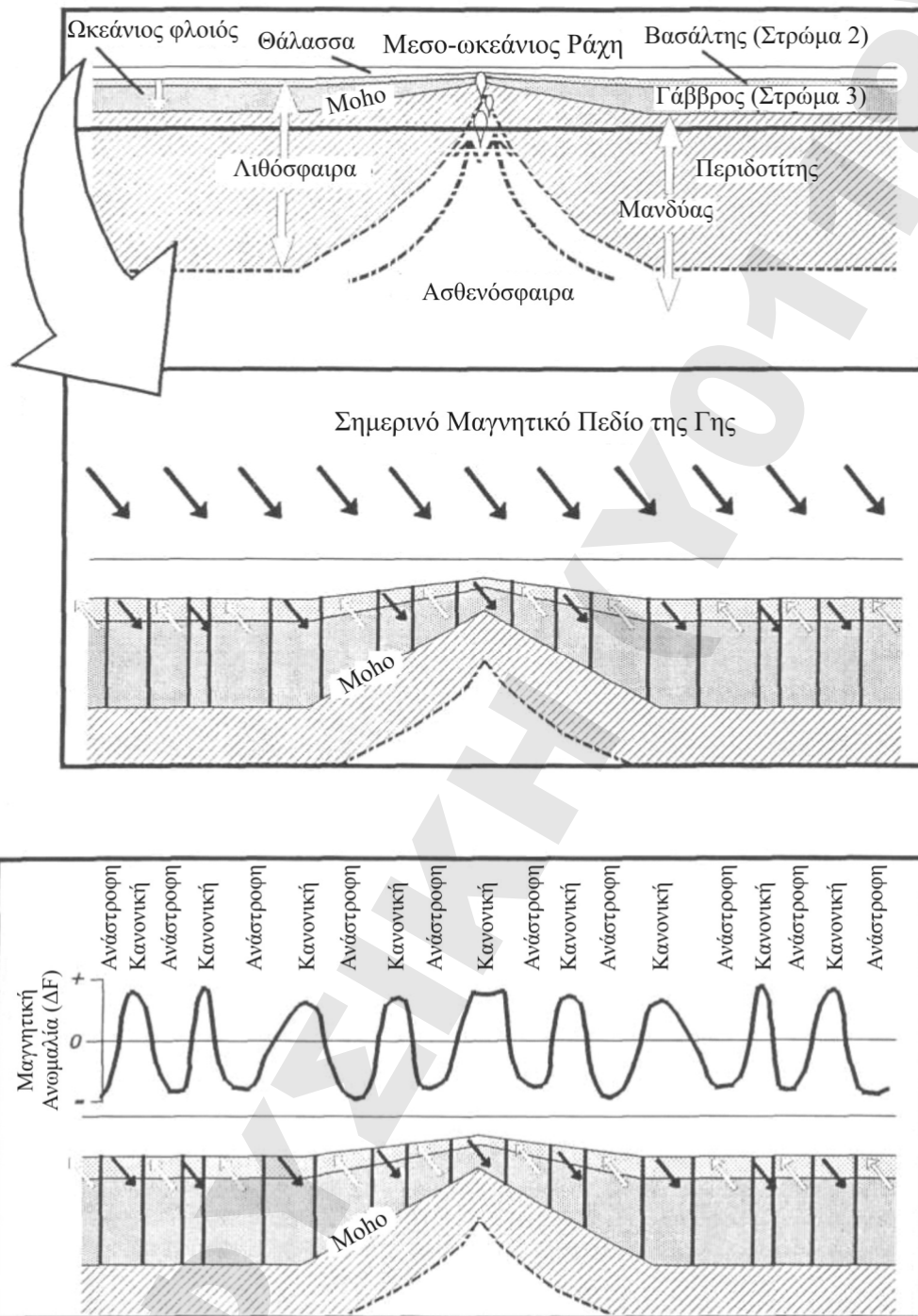
Εικόνα 3-32. Προφίλ μαγνητικής ανωμαλίας και μοντέλο ανάπτυξης των τεκτονικών πλακών Ειρηνικού και Μεσο-ωκεάνιας Ατλαντικής Ράχης. Η παρατηρηθείσα μαγνητική ανωμαλία της ολικής έντασης του πεδίου κατά μήκος του προφίλ (οροφή εικόνας), συσχετίζεται πολύ καλά με το υπολογισθέν προφίλ (μεσαίο τμήμα εικόνας), με βάση το μοντέλο των αναστροφών πολικότητας (κάτω μέρος εικόνας). Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει περιόδους κανονικής (μαύρη ζώνη) και αναστροφής (λευκή ζώνη) πολικότητας παλαιομαγνητισμού, σύμφωνα με τη Χρονική Κλίμακα Γεωμαγνητικής Πολικότητας. Τα ονόματα αναφέρονται σε μαγνητικές περιόδους με βάση τη χρονική κλίμακα και οι αριθμοί είναι ηλικίες σε εκατομμύρια έτη (Ma).

3.5.4.2 Παλαιομαγνητική στρωματογραφία

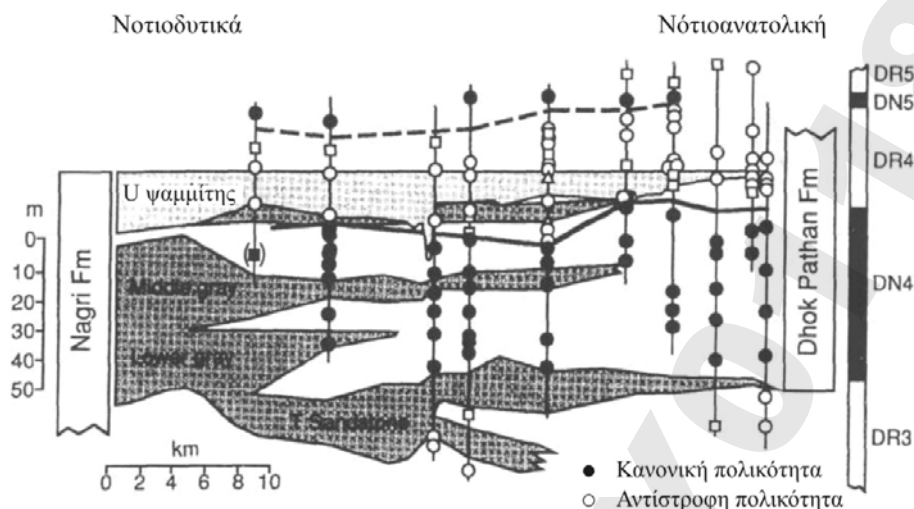
Ϊζηματογενή στρώματα μπορούν να αποκτήσουν παραμένουσα μαγνήτιση μέσω θραυσματοπαγών και χημικών μηχανισμών (εικ. 3-31). Οι ηλικίες των στρωμάτων σε μια αλληλουχία Ϊζηματογενών στρωμάτων μπορεί έτσι να προσδιορισθούν, συγκρίνοντας παρατηρηθείσες αναστροφές πολικότητας με βάση τη Χρονική Κλίμακα Γεωμαγνητικής Πολικότητας. Η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, εάν τμήματα της τομής μπορούν να εναρμονισθούν με ισοτοπική χρονολόγηση ενδιάμεσων στρωμάτων ηφαιστειακής τέφρας.



Εικόνα 3-33. Χρονική Κλίμακα Γεωμαγνητικής Πολικότητας για τα τελευταία 117 εκατομμύρια έτη. Οι περίοδοι κανονικής πολικότητας εμφανίζονται με μαύρο και ανάστροφης πολικότητας με λευκό χρώμα. Οι αριθμοί που βρίσκονται στο δεξιό μέρος της στήλης αντιστοιχούν σε ηλικίες εκφρασμένες σε εκατομμύρια έτη.



Εικόνα 3-34. Παλαιομαγνητική καταγραφή εγκάρσια μιας μέσο-ωκεάνιας ράχης. Στο επάνω μέρος της εικόνας, εμφανίζεται η λιθοσφαιρική τομή που δείχνει το βασάλτη (στρώμα 2) και το γάββρο (στρώμα 3). Στο μέσον, το μαύρο βέλος πάνω από τον άξονα της ράχης δείχνει τη μαγνήτιση, που είναι ευθυγραμμισμένη με κανονική πολικότητα, παράλληλα προς το σημερινό μαγνητικό πεδίο. Μακριά από τον άξονα εμφανίζονται εναλλαγές ανάστροφης (λευκά βέλη) και κανονικής πολικότητας, που αντανακλούν τις περιοδικές αναστροφές του μαγνητικού πεδίου. Στο κάτω μέρος της εικόνας, εμφανίζεται η κατανομή των μαγνητικών ανωμαλιών εγκάρσια προς τη μέσο-ωκεάνια ράχη.



Εικόνα 3-35. Παράδειγμα παλαιομαγνητικής στρωματογραφίας. Οι παλαιομαγνητικές κανονικές πολικότητες (μαύροι κύκλοι και τετράγωνα) και οι ανάστροφες πολικότητες (λευκοί κύκλοι, τετράγωνα και τρίγωνα) υπολογίστηκαν για κάθε θέση. Το όριο μεταξύ της ζώνης κανονικής πολικότητας DN4 και της ζώνης ανάστροφης πολικότητας DR4, παριστά τη χρονική γραμμή ηλικίας 8.1 εκατομμυρίων ετών, επιτρέποντας την ηλικιακή σύγκριση των διαφόρων ιζηματογενών αποθέσεων.

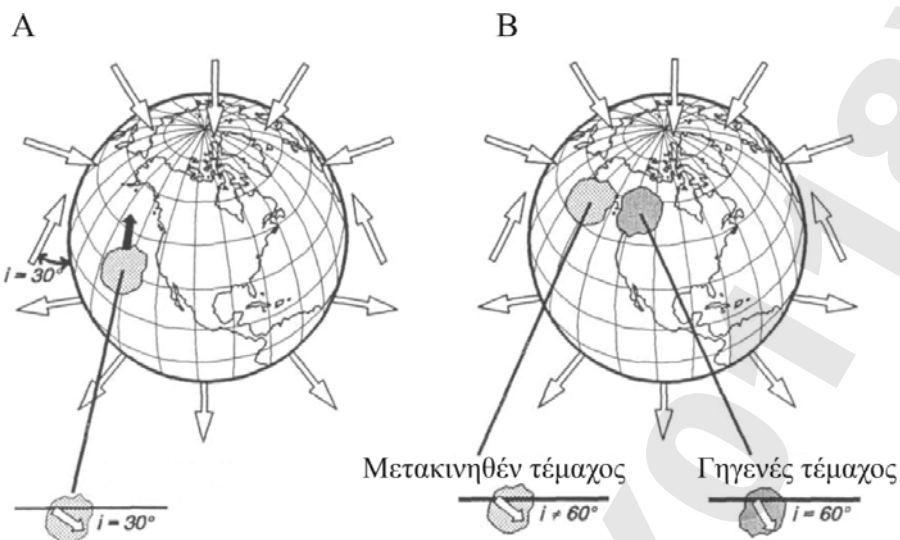
Στην εικόνα 3-35 φαίνεται ένα παράδειγμα από την περιθωριακή ιζηματογενή λεκάνη των Ιμαλαΐων στο Πακιστάν. Τα δείγματα έχουν ληφθεί από 10 στρωματογραφικές τομές, τα αποτελέσματα των οποίων έχουν παρασταθεί στο διάγραμμα υπό μορφή εγκάρσιων τομών. Σύμφωνα με τη λιθοστρωματογραφία, οι τομές είναι μέρος του γεωλογικού σχηματισμού Nagri στα νοτιοδυτικά και ο σχηματισμός Dhok Pathan στα βορειοανατολικά. Τα δείγματα που αναλύθηκαν για τη μαγνητική πολικότητα δείχνουν ότι, υπάρχουν συσχετίσεις με θετικές και αρνητικές εποχές της Χρονικής Κλίμακας Γεωμαγνητικής Πολικότητας. Αυτή η χρονοστρωματογραφία έτσι αποκαλύπτει ότι, αυτά τα τμήματα των σχηματισμών Nagri και Dhok Pathan αποτέθηκαν την ίδια περίοδο.

3.5.4.3 Μελέτες παλαιο-γεωγραφικού πλάτους

Η παραμένουσα μαγνήτιση των ιζηματογενών ή ηφαιστειακών πετρωμάτων καταγράφει τις μαγνητικές κλίσεις, i , κατά την περίοδο σχηματισμού αυτών. Η κλίση, εν συνεχεία, μπορεί να συσχετισθεί με το γεωγραφικό πλάτος (φ) του πετρώματος κατά την περίοδο σχηματισμού του, σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{\text{φι}} = 2 \epsilon \varphi \varphi$$

Η εξίσωση υποθέτει ότι, η μαγνήτιση του πετρώματος καταγράφει την αρχική μαγνητική διεύθυνση κατά την περίοδο σχηματισμού του, ότι το πεδίο δρα ως ένα γεωκεντρικό δίπολο και ότι οι μακράς κλίμακας χρονικές μεταβολές έχουν στατιστικά αφαιρεθεί. Τα πετρώματα που σχηματίστηκαν κοντά στο μαγνητικό ισημερινό θα έχουν παραμένουσες μαγνητίσεις με οριζόντιο προσανατολισμό. Μαγνητίσεις κοντά στους μαγνητικούς πόλους θα είναι απότομες (εικ. 3-36α). Η μαγνητική κλίση που παρατηρείται για ένα ιζηματογενές στρώμα δείχνει έτσι, το μαγνητικό πλάτος της περιοχής κατά την περίοδο που αποτέθηκε το στρώμα. Εάν το τμήμα του φλοιού στο οποίο το πέτρωμα σχηματίστηκε αποκλίνει και μεταφερθεί σε ένα άλλο γεωγραφικό πλάτος, τότε η κλίση της παραμένουσας μαγνήτισης θα διαφέρει από εκείνη του παρόντος μαγνητικού πεδίου της γης (εικ. 3-36β).



Εικόνα 3-36. Α) Διεύθυνση της μαγνητικής έγκλισης μέσα σε πέτρωμα που σχηματίστηκε στο παρελθόν σε μαγνητικό πλάτος 30° .

Β) Η μαγνητική έγκλιση (i) παραμένει όταν το πέτρωμα μετακινείται σε μεγαλύτερα μαγνητικά πλάτη, διαφέροντας από την έγκλιση του μαγνητικού πεδίου της γης που υπάρχει στη νέα θέση. Η παλαιομαγνητική έγκλιση έτσι, δίνει μια ένδειξη για το πλάτος που σχηματίστηκε το πέτρωμα.

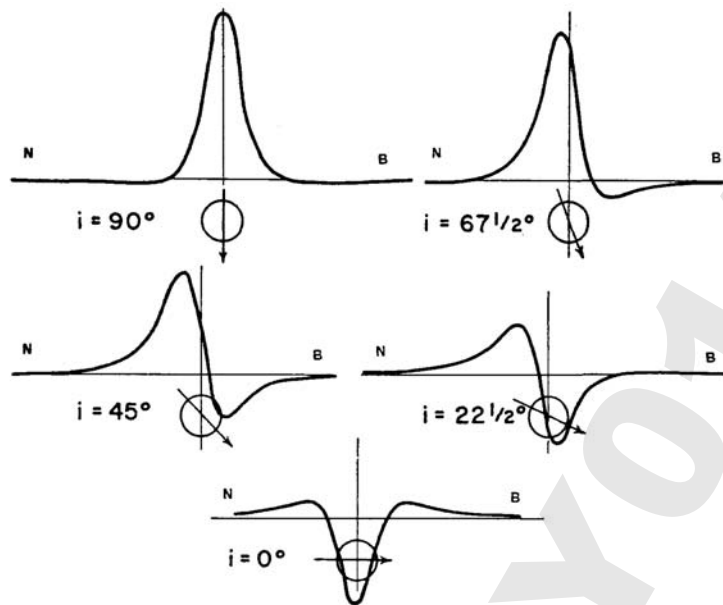
3.5.5 Γεωμαγνητικές διασκοπήσεις

Τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά που βρίσκονται στο φλοιό της γης αποτελούν τη κύρια πηγή του ανώμαλου μαγνητικού πεδίου αυτής. Οι διαφορετικές αναλογίες των ορυκτών αυτών στα διάφορα πετρώματα του φλοιού παράγουν τις μαγνητικές ανωμαλίες, που είναι ο στόχος των μαγνητικών διασκοπήσεων.

Η μορφή μιας μαγνητικής ανωμαλίας επηρεάζεται έντονα από την κλίση του μαγνητικού πεδίου της γης, το σχήμα του σώματος που προκαλεί την ανωμαλία και τη διεύθυνση της μαγνήτισης του. Οι μεταβολές της κλίσης του μαγνητικού πεδίου προκαλούν μεγάλες αλλαγές στη μορφή μιας μαγνητικής ανωμαλίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-37.

Τα διάφορα διαγράμματα δείχνουν την υπολογισθείσα μεταβολή της ολικής έντασης του πεδίου που προκαλείται από μία πολωμένη σφαίρα, με διαφορετικές κλίσεις της διεύθυνσης μαγνήτισης. Οι τομές έχουν διεύθυνση B-N με το βορρά προς τα δεξιά. Σε υψηλά γεωγραφικά (μαγνητικά) πλάτη, όπου η μαγνητική κλίση είναι σχεδόν κατακόρυφη, η θεωρητική ανωμαλία έχει ένα απλό μέγιστο με πολύ ασθενή και συμμετρικά ελάχιστα (πλάτη μικρότερα από το 5% του μεγίστου) στις δύο πλευρές της ανωμαλίας. Στο μαγνητικό ισημερινό (όπου $i=0$) η διεύθυνση μαγνήτισης είναι οριζόντια και η ανωμαλία έχει μία ισχυρή αρνητική τιμή με συμμετρικές θετικές τιμές εκατέρωθεν αυτής. Έτσι, η μαγνητική ανωμαλία, η οποία παρουσιάζει μία θετική ανωμαλία σε υψηλά μαγνητικά πλάτη, ουσιαστικά αντιστρέφεται και γίνεται μία αρνητική ανωμαλία σε πολύ μικρά μαγνητικά πλάτη.

Στην εικόνα 3-38 παρουσιάζεται η ολική ανωμαλία του πεδίου που προκύπτει από την ολική ένταση του πεδίου (συνισταμένη του γήινου μαγνητικού πεδίου και του μαγνητικού σώματος) με αφαίρεση της γραμμικής τάσης του πεδίου.



Εικόνα 3-37. Μεταβολή στη μορφή της ανωμαλίας της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου, για διαφορετικά μαγνητικά πλάτη.

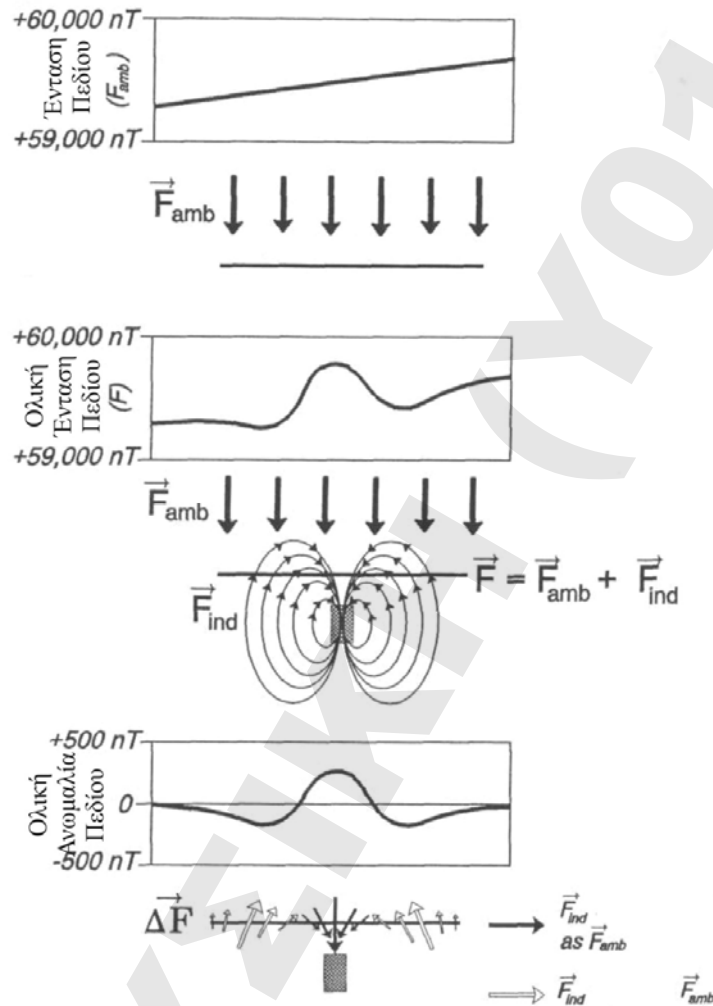
3.6 Προέλευση του μαγνητικού πεδίου της γης

3.6.1 Η υπόθεση της μόνιμης μαγνήτισης του πυρήνα της γης.

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να παραχθεί, είτε με ένα μαγνητισμένο υλικό (ένας ραβδόμορφος μαγνήτης) ή με ηλεκτρικά ρεύματα όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως. Από τις δύο αυτές περιπτώσεις, η πρώτη είναι η πλέον απλή να κατανοηθεί, εφόσον υπάρχει εμπειρία από τη συμπεριφορά ενός κομματιού μαγνητισμένου υλικού. Πράγματι, οι πρώτοι ερευνητές θεώρησαν ότι το μαγνητικό πεδίο της γης δημιουργείται από ένα μεγάλο μαγνήτη που βρίσκεται στο εσωτερικό της. Ιδιαίτερα, θεωρήθηκε ότι ο μαγνήτης βρίσκεται στον πυρήνα της γης, ο οποίος αποτελείται από τα στοιχεία σιδήρου και νικελίου, τα οποία είναι σιδηρομαγνητικά υλικά. Εάν ο πυρήνας, με ακτίνα που ξεπερνά τα 3400 χιλιόμετρα, είναι πράγματι ένας μόνιμος μαγνήτης, τότε το κύριο μαγνητικό πεδίο της γης θα μπορούσε εύκολα να εξηγηθεί. Επί πλέον, οι γεωμαγνητικές ανωμαλίες θα μπορούσαν να εξηγηθούν εάν υποθεθεί μια έλλειψη ομοιογένειας εντός του πυρήνα. Η εξήγηση αυτή είναι εντελώς αποτυχημένη διότι, τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως είναι ο σίδηρος και το νικέλιο, χάνουν την μαγνητική ιδιότητα τους, όταν θερμανθούν πάνω από τη θερμοκρασία Curie. Το σημείο Curie είναι 770°C για το σίδηρο και 360°C για το νικέλιο. Εάν η θερμοκρασία του πυρήνα είναι υψηλότερη από τις παραπάνω θερμοκρασίες, τα υλικά αυτά χάνουν τη μαγνητική τους ιδιότητα. Σήμερα, είναι γνωστό ότι, ο εξωτερικός πυρήνας της γης είναι σχεδόν σε υγρή φάση, πράγμα που σημαίνει ότι η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, καθώς γνωρίζουμε ότι τα σημεία τήξεως του σιδήρου και του νικελίου στην επιφάνεια είναι 1535°C και 1453°C , αντίστοιχα.

Γενικά, το σημείο τήξεως ενός υλικού αυξάνει με την αύξηση της πίεσης. Στον πυρήνα, όπου η πίεση ξεπερνά τα 10^6 bars, τα σημεία τήξεως του σιδήρου και του νικελίου πρέπει να είναι υψηλότερα εκείνων στην επιφάνεια. Έτσι, θεωρώντας ότι η θερμοκρασία στον πυρήνα είναι της τάξης των 2000°C , ο σίδηρος και το νικέλιο δεν θα μπορούσαν να διατηρήσουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες.

Υπήρξαν και κάποιες άλλες απόψεις των υποστηρικτών του μόνιμου μαγνήτη στον πυρήνα της γης, σχετικά με την αύξηση και του σημείου Curie με την αύξηση της πίεσης. Πράγματι, το σημείο Curie αυξάνει με την αύξηση της πίεσης με ένα ρυθμό 1°C ανά 10^5 bars. Έτσι, το σημείο Curie για το σίδηρο στον πυρήνα της γης υπολογίζεται να είναι όχι υψηλότερο από 780°C . Αυτό το στοιχείο δεν φαίνεται να διασώζει την υπόθεση του μόνιμου μαγνήτη στον πυρήνα της γης.



Εικόνα 3-38. Μαγνητική ανωμαλία της ολικής έντασης του πεδίου που παράγεται από ένα μαγνητικό σώμα. α) Στο επάνω μέρος της εικόνας εμφανίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου της γης που έχει μέγεθος αρκετών χιλιάδων nT, με πολύ μεγάλο μήκος κύματος \vec{F}_{amb} . β) Στο μέσον, ένα σώμα με μαγνήτιση (\vec{J}) περιβάλλεται από ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο (\vec{F}_{ind}), με πλάτη μερικών εκατοντάδων nT που εμφανίζουν πολύ μικρότερα μήκη κύματος. Το ολικό μαγνητικό πεδίο (\vec{F}) που προκύπτει είναι η συνισταμένη του μαγνητικού πεδίου της γης και του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου του σώματος. γ) Στο κάτω μέρος της εικόνας, με την αφαίρεση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου της γης, \vec{F}_{amb} από το ολικό πεδίο \vec{F} , παράγεται η ανωμαλία της ολικής έντασης, (ΔF).

Θα μπορούσε κάποιος να ισχυρισθεί ότι ο μανδύας και ο φλοιός της γης, αντί του πυρήνα, μπορούν να δρουν ως μόνιμα μαγνητισμένα σώματα. Στην περίπτωση του μανδύα, η υψηλή

θερμοκρασία θα παρουσίαζε το ίδιο πρόβλημα, ενώ ο φλοιός, όπου η θερμοκρασία είναι γενικά όχι μεγαλύτερη από λίγες εκατοντάδες βαθμών Κελσίου, δεν θα παρουσίαζε πρόβλημα. Από το 1950 έχουν αρχίσει οι προσπάθειες να αποδοθεί το μαγνητικό πεδίο της γης στη μαγνήτιση των πετρωμάτων του φλοιού, από την επίδραση εξωτερικών πεδίων, όπως οι μαγνητικές καταιγίδες. Αυτή η θεωρία εγκαταλείφθηκε διότι αποδείχθηκε ότι η μαγνήτιση του φλοιού είναι πολύ ασθενής ώστε να μπορεί να δημιουργήσει το πεδίο της γης.

3.6.2 Η γη ως αυτοδιεγειρόμενη ηλεκτρική γεννήτρια (ή υπόθεση δυναμό)

Έχουν διατυπωθεί και άλλες απόψεις, θεωρίες όπως, **η υπόθεση των περιστρεφόμενων μαζί με τη γη ηλεκτρικών φορτίων** (ηλεκτρικά φορτισμένα σώματα στην επιφάνεια της γης), **η υπόθεση του γυρομαγνητικού πεδίου** (όταν το περιστρεφόμενο σώμα είναι σιδηρομαγνητικό), οι οποίες όμως δεν μπορούν να ερμηνεύσουν το μαγνητικό πεδίο της γης.

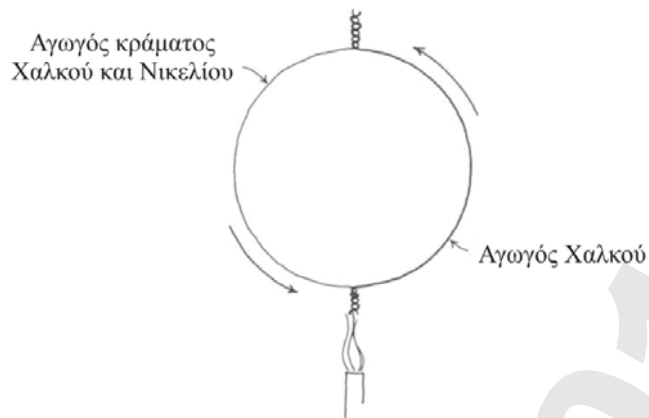
Η εκδοχή που παραμένει είναι, η πιθανότητα δημιουργίας του γεωμαγνητικού πεδίου με ηλεκτρικά ρεύματα στο εσωτερικό της γης. Το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου της γης ανέρχεται σε 10^9 Amps. Όπως είναι γνωστό, ο φλοιός αποτελείται από γρανίτη και βασάλτη και ο μανδύας πιθανόν από περιδοτίτη ή εκλογίτη. Όλα αυτά τα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι οι αγωγιμότητες αυτών είναι μεγαλύτερες σε υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό της γης, αλλά θα παραμένουν πολύ μικρές σε σχέση με εκείνες των μετάλλων. Ο πυρήνας της γης με το σίδηρο και το νικέλιο είναι ένας καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Έτσι, εάν το μαγνητικό πεδίο της γης δημιουργείται από ηλεκτρικά ρεύματα στο εσωτερικό της, τότε αυτά τα ρεύματα θα ρέουν στον πυρήνα της.

Η ταχύτητα των μεγάλης κλίμακας χρονικών μεταβολών υποστηρίζει το ρόλο αυτό του πυρήνα της γης. Όπως είναι γνωστό, η μαγνητική ροπή του γήινου διπόλου έχει ελαττωθεί 5% τα τελευταία εκατό έτη και το μη διπολικό πεδίο μετακινείται προς δυσμάς περίπου $0,18^\circ$ ετησίως. Έτσι, οτιδήποτε προκαλεί το γεωμαγνητικό πεδίο, υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές σε σχετικά βραχείες περιόδους δεκάδων ή εκατοντάδων ετών. Τέτοιες ραγδαίες αλλαγές θα μπορούσαν να εμφανισθούν μόνο σε ένα υγρό πυρήνα διότι, μεγάλης κλίμακας αλλαγές μπορούν να λάβουν χώρα γρηγορότερα σε ένα μετακινούμενο υγρό παρά σε ένα στερεό.

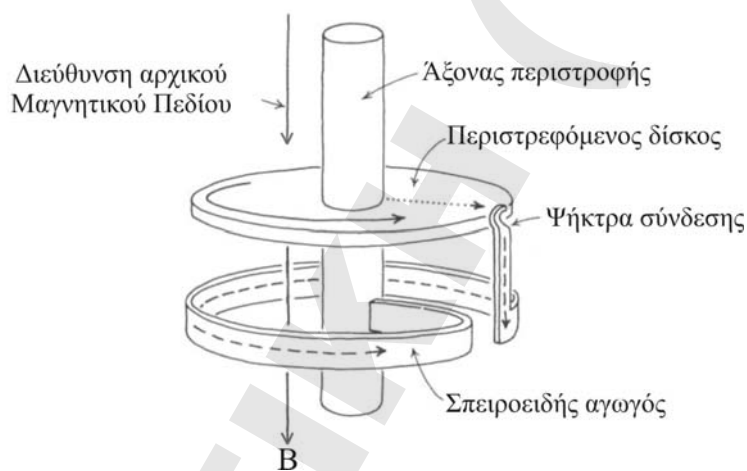
Το ερώτημα που εδώ προκύπτει είναι: Πώς μπορούν να δημιουργηθούν ηλεκτρικά ρεύματα της τάξης των 10^9 Amps και να παραμείνουν στον πυρήνα;

Η άποψη που διατυπώθηκε είναι ότι ο πυρήνας της γης λειτουργεί ως ένα δυναμό. Ένα δυναμό όμως έχει μια σύνθετη δομή, που αποτελείται από πηνία, ψήκτρες και ένα περιστρεφόμενο δρομέα που κινείται π.χ. από κάποια μορφή κινητικής ενέργειας (νερού ή ατμού). Ο πυρήνας της γης αποτελείται μόνο από μια υγρή μάζα σιδήρου και νικελίου. Μπορεί αυτή η υγρή φάση να λειτουργήσει όπως ένα δυναμό; Μερικοί ερευνητές έχουν προτείνει ότι το ηλεκτρικό ρεύμα του πυρήνα παράγεται από **θερμοηλεκτρικά ρεύματα**, τα οποία δημιουργούνται όταν δύο διαφορετικά αγώγιμα υλικά παραμένουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες (εικ. 3-39). Μια παρόμοια διαδικασία μπορεί να εμφανίζεται στον πυρήνα. Εάν υπάρχει θερμικό ρεύμα μεταφοράς στον πυρήνα, θα υπάρχουν μερικές διαφορές θερμοκρασίας μέσα σ' αυτόν. Εφόσον ο μανδύας και ο πυρήνας αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, είναι εύλογο ότι θα παραχθούν θερμοηλεκτρικά ρεύματα στα σύνορα τους. Δεν είναι γνωστό, εν τούτοις, εάν το παραγόμενο ρεύμα είναι ποσοτικά αρκετό να δράσει ως ένα δυναμό.

Η θεωρία ότι ο πυρήνας της γης δρα ως δυναμό (εικ. 3-40), θα γίνει δεκτή εφόσον συμπεριλάβει τόσο την μακράς διάρκειας σταθερότητα του διπολικού πεδίου, όσο και τις μεγάλης κλίμακας χρονικές μεταβολές του μη διπολικού πεδίου. Πρέπει να τονισθεί εδώ ότι, δεν είναι αρκετό να βεβαιώσουμε ότι από κάποια τυχαία αιτία ρέουν ηλεκτρικά ρεύματα της τάξης των 10^9 Amps εντός του πυρήνα.



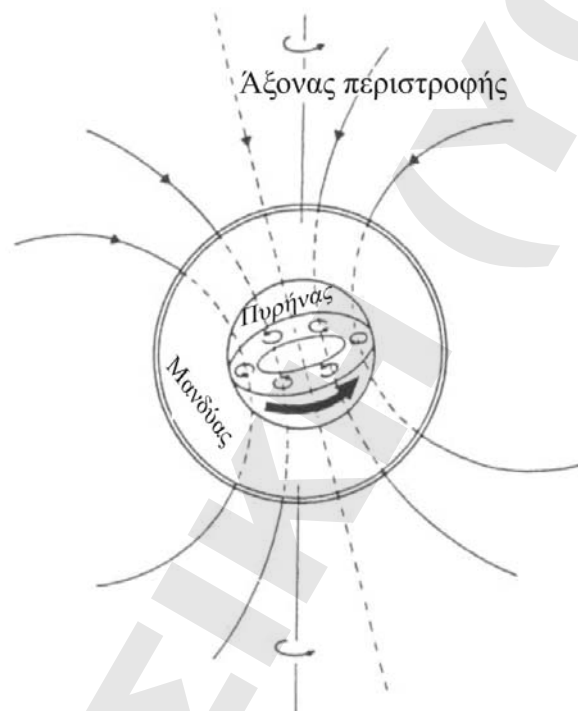
Εικόνα 3-39. Θερμοηλεκτρικό ρεύμα. Τα βέλη δείχνουν τη διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 3-40. Απεικόνιση λειτουργίας ενός δισκοειδούς δυναμό. Ο μεταλλικός δίσκος περιστρέφεται γύρω από ένα μεταλλικό άξονα. Κάτω από τον δίσκο υπάρχει ένα σπειροειδές ηλεκτρικό καλώδιο, του οποίου το ένα άκρο συνδέεται με τον άξονα και το άλλο στην περιφέρεια του περιστρεφόμενου δίσκου, μέσω μιας ψήκτρας. Εάν εφαρμοσθεί ένα μαγνητικό πεδίο και ο περιστρεφόμενος δίσκος κινείται προς την κατεύθυνση του βέλους, τότε ένα ρεύμα επάγεται στο δίσκο με κατεύθυνση που υποδεικνύεται από τη διακεκομμένη γραμμή. Το ρεύμα αυτό ρέει μέσω της ψήκτρας στο σπειροειδές καλώδιο και το οποίο παράγει ένα δευτερογενές μαγνητικό πεδίο προς την ίδια διεύθυνση του αρχικού πεδίου, ενισχύοντας το τοιουτοτρόπως.

Ο πυρήνας, αν και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, παρουσιάζει κάποια ηλεκτρική αντίσταση. Η αρχική ηλεκτρική ενέργεια θα μετατραπεί σε θερμική ενέργεια διότι, η ηλεκτρική αντίσταση του πυρήνα και συνεπώς τα ρεύματα θα χαθούν σε μερικές χιλιάδες έτη. Για να διατηρηθούν τα ρεύματα, η απώλεια που προκύπτει λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης πρέπει να ανακτηθεί από νέα ηλεκτρικά ρεύματα. Εφόσον δεν υπάρχει εξωτερική τροφοδοσία, ο πυρήνας πρέπει να δημιουργεί ηλεκτρισμό από μόνος του. Πώς μπορεί να επιτευχθεί αυτό;

Ας θεωρήσουμε ότι ηλεκτρικά ρεύματα ρέουν εντός του πυρήνα και σχηματίζεται τοιουτοτρόπως ένα διπολικό πεδίο (εικ. 3-41). Μπορούμε επίσης να υποθέσουμε ότι υπάρχει μια κίνηση της υγρής μάζας του πυρήνα με θερμικό ρεύμα μεταφοράς. Είναι αρχή του ηλεκτρομαγνητισμού ότι, υγρό μέταλλο με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα σε κίνηση, μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, επάγει νέο ηλεκτρικό ρεύμα. Το νέο ηλεκτρικό ρεύμα παράγει ένα νέο μαγνητικό πεδίο. Ας υποθέσουμε τώρα ότι, το νέο μαγνητικό πεδίο ενισχύει το αρχικό πεδίο. Τότε δεν προκύπτει ότι, θεωρώντας την ύπαρξη των αρχικών ηλεκτρικών ρευμάτων και τη δημιουργία του διπολικού πεδίου, ότι ο πυρήνας, δια μέσου των μηχανισμών του, διατηρεί αυτό το διπολικό πεδίο σταθερό, τροφοδοτώντας με νέα ρεύματα και ενισχύοντας έτσι τα πεδία; Εάν πράγματι είναι έτσι, ο πυρήνας θα λειτουργεί ως μια αυτοδιεγερόμενη ηλεκτρική γεννήτρια. Η ιδέα αυτή προτάθηκε το 1919 και από τότε έχει κερδίσει αρκετό έδαφος.



Εικόνα 3-41. Πιθανός μηχανισμός γένεσης του γεωμαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται στον εξωτερικό πυρήνα της Γης (Sharma, 1976).