

# ( 4 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ )



- 4.1. Μαγνητικό πεδίο
- 4.2. Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρων αγωγών
- 4.3. Ηλεκτρομαγνητική δύναμη
- 4.4. Η ύλη μέσα στο μαγνητικό πεδίο
- 4.5. Εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων
- 4.6. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση της βελόνας μιας πυξίδας με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες, αλλά όπως θα δούμε και από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Οι μαγνητικές δυνάμεις παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην καθημερινή ζωή π.χ. ηλεκτρικούς κινητήρες, τηλεόραση, ηχεία, εκτυπωτές, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλέφωνο κ.ά.

Σ' ένα κλειστό κύκλωμα η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί ηλεκτρεγερτική δύναμη και ρεύμα. Το ρεύμα αυτό θα έχει τέτοια φορά, ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που το προκάλεσε.

Σ' αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε το μαγνητικό πεδίο, τις μαγνητικές δυνάμεις και την ηλεκτρεγερτική δύναμη επαγωγής.

## ( 4.1. ) Μαγνητικό πεδίο

### α) Περιγραφή

Πάνω σε μία γυάλινη επιφάνεια απλώνουμε ρινίσματα σιδήρου. Κάτω από την επιφάνεια τοποθετούμε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη, ώστε τα ρινίσματα σιδήρου να μαγνητιστούν. Κτυπάμε λίγο τη γυάλινη επιφάνεια με το χέρι μας και βλέπουμε τα ρινίσματα να παίρνουν μία καθορισμένη μορφή. Η εικόνα που σχηματίστηκε είναι ανάλογη με αυτή των δυναμικών γραμμών ενός ηλεκτρικού πεδίου. Μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για δυναμικές γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου.

Οι περιοχές όπου τα ρινίσματα σιδήρου είναι περισσότερο συγκεντρωμένα, εκεί δηλαδή όπου πυκνώνουν οι δυναμικές γραμμές, **ονομάζονται πόλοι του μαγνήτη**.

Η μορφή που βλέπουμε πάνω στη γυάλινη επιφάνεια, το σύνολο δηλαδή των δυναμικών γραμμών, **ονομάζεται μαγνητικό φάσμα** (Εικ. 1).

Κάθε μαγνήτης έχει δύο διαφορετικούς πόλους που τους ονομάζουμε βόρειο και νότιο. Οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, ενώ οι ετερόνυμοι έλκονται. Διαπιστώνουμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από τους πόλους και πλησιάζουμε προς το μέσο του μαγνήτη, οι μαγνητικές δυνάμεις εξασθενούν (Εικ. 2).

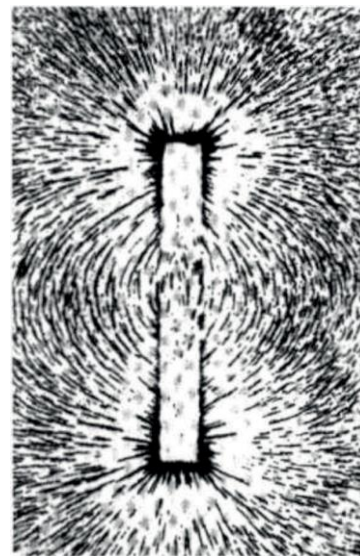
Αν κόψουμε ένα μαγνήτη σε δύο μέρη προκύπτουν δύο νέοι μαγνήτες. Όσες φορές και αν επαναληφθεί αυτό θα προκύπτουν πάντοτε νέοι μαγνήτες. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι οι μαγνητικοί πόλοι υπάρχουν πάντα σε ζευγάρια.

Έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες για να βρεθούν μαγνητικά μονόπολα, χωρίς όμως επιτυχία μέχρι σήμερα.

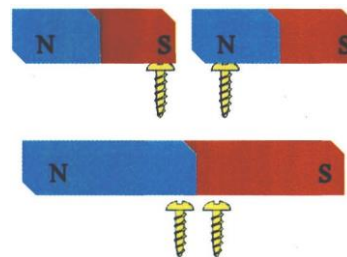
Αν τοποθετήσουμε μία μαγνητική βελόνα σε διαφορετικά σημεία ενός χώρου που υπάρχουν μαγνητικές γραμμές, παρατηρούμε ότι η μαγνητική βελόνα προσανατολίζεται, με τον άξονά της εφαπτόμενο σε κάθε σημείο των δυναμικών γραμμών.

Ο χώρος στον οποίο μία μαγνητική βελόνα δέχεται δυνάμεις με αποτέλεσμα να προσανατολίζεται ονομάζεται **μαγνητικό πεδίο**. Η διεύθυνση του πεδίου σε κάποιο σημείο του είναι η διεύθυνση του άξονα της βελόνας, όταν αυτή είναι ελεύθερη να κινηθεί.

Επειδή δεν είναι δυνατό να απομονωθεί ένας μαγνητικός πόλος (Βόρειος ή Νότιος) οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι πάντοτε



Φωτογραφία μαγνητικού φάσματος ραβδόμορφου μαγνήτη **Εικόνα 4-1.**



Παρατηρούμε ότι όταν ενώσουμε τους δύο μαγνήτες οι βίδες που συγκρατούσαν θα πέσουν. Αυτό γίνεται επειδή ενώνοντας τους δύο μαγνήτες οι βίδες θα βρίσκονται στο μέσο του μεγάλου μαγνήτη όπου οι μαγνητικές δυνάμεις εξασθενούν.

**Εικόνα 4-2.**

κλειστές. Οι μαγνητικές γραμμές στο χώρο έξω από το μαγνήτη εξέρχονται από το βόρειο και εισέρχονται στο νότιο πόλο (Εικ. 3).

Όπως στο ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιούμε το διανυσματικό μέγεθος της έντασης  $\vec{E}$  για να περιγράψουμε το πεδίο και να εκφράσουμε το πόσο ισχυρό είναι, έτσι και στο μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα εισάγουμε το διανυσματικό μέγεθος  $\vec{B}$  που ονομάζεται ένταση του μαγνητικού πεδίου ή μαγνητική επαγωγή.

Το διάνυσμα της έντασης  $\vec{B}$  του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του έχει διεύθυνση τη διεύθυνση του άξονα της μαγνητικής βελόνας (αυτή ισορροπεί με την επίδραση του πεδίου) και φορά από το νότιο προς το βόρειο πόλο της. (Εικ. 3).

Η μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο S.I. ονομάζεται

Tesla  $\left(1 \text{ Tesla} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Am}}\right)$  και ο πλήρης ορισμός της θα δοθεί σε επόμενη παράγραφο.

Κατ' αναλογία λοιπόν με το ηλεκτρικό πεδίο, ορίζουμε δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου τη γραμμή που σε κάθε σημείο της το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι εφαπτόμενο σ' αυτή.

Όταν σε ένα πεδίο, η ένταση παραμένει σταθερή κατά διεύθυνση φορά και μέτρο, το πεδίο λέγεται ομογενές (Εικ. 5).

Στο πεδίο αυτό οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες και ισόπυκνες.

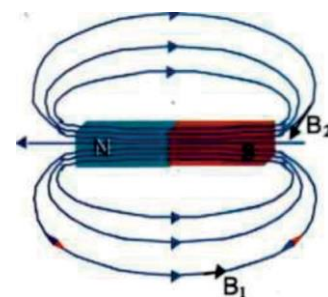
Όπως στο ηλεκτρικό, έτσι και στο μαγνητικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται.

- Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο εμφανίζονται μαγνητικές δυνάμεις. Τις δυνάμεις αυτές πιστοποιούμε εύκολα με τη βοήθεια μίας μαγνητικής βελόνας
- Δυναμική γραμμή λέμε τη γραμμή εκείνη σε κάθε σημείο της οποίας το διάνυσμα της έντασης του πεδίου είναι εφαπτόμενο σε αυτή.
- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μας δείχνει πόσο ισχυρό ή ασθενές είναι το πεδίο.
- Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν τέμνονται και είναι πάντοτε κλειστές.
- Ομογενές είναι το πεδίο εκείνο στο οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίδια σε όλα τα σημεία του.

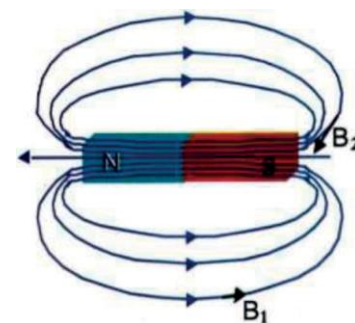
## β) Το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο

Μόλις τον 19<sup>ο</sup> αιώνα έγιναν καινούριες ανακαλύψεις σχετικά με το μαγνητικό πεδίο. Αρχικά, ο Alessandro Volta εφεύρε την ηλεκτρική στήλη, με την οποία διευκολύνθηκαν σημαντικά τα πειράματα. Ο Δανός φυσικός Christian Oersted (1777-1851) (Ερστεντ) πραγματοποιούσε πειράματα αναζητώντας ένα σύνδεσμο ανάμεσα στον ηλεκτρισμό

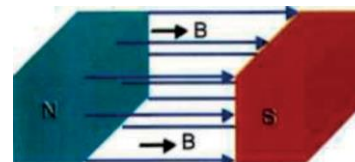
Για λόγους απλούστευσης θα αναφερόμαστε σε βόρειο και νότιο πόλο αντί του ορθού βόρειου και νότιου μαγνητικού πόλου



Εικόνα 4-3.



Ανομοιογενές πεδίο ( $B_2 > B_1$ ).  
Εικόνα 4-4.



Ομογενές πεδίο.  
Εικόνα 4-5.

και στο μαγνητισμό, επηρεασμένος από τη φιλοσοφία η οποία δεχόταν ότι όλα τα φυσικά φαινόμενα αποτελούν μία ενότητα.

Ο Oersted μετά από πολλές προσπάθειες και κατά τη διάρκεια μίας διάλεξής του το 1820 στην Κοπεγχάγη ανακάλυψε το φαινόμενο για το οποίο τόσο είχε πειραματιστεί.

Συγκεκριμένα, τοποθέτησε παράλληλα σε έναν ευθύγραμμο αγωγό μία μαγνητική βελόνα στο ίδιο με τον αγωγό κατακόρυφο επίπεδο. Όταν από τον αγωγό διαβίβασε ρεύμα, παρατήρησε ότι η βελόνα εκτρέπεται και ισορροπεί σε μία νέα θέση. Όταν διέκοπτε το ρεύμα, η βελόνα γύριζε πάλι στην αρχική της θέση (Εικ. 6).

Όταν διαβίβαζε ρεύμα αντίθετης φοράς η βελόνα εκτρέπεται αντίθετα προς την αρχική εκτροπή. Διαπίστωσε επίσης ότι, όταν αύξανε την ένταση του ρεύματος, αυξανόταν και η εκτροπή της βελόνας όχι όμως ανάλογα.

Είναι φανερό ότι, για να υποστεί εκτροπή η μαγνητική βελόνα, πρέπει πάνω της να ασκηθεί δύναμη. Δύναμη όμως, δέχεται ένας μαγνήτης μόνο όταν βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι: **γύρω από ρευματοφόρο αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο.**

Μπορούμε να δούμε τη μορφή αυτού του πεδίου με το παρακάτω πείραμα:

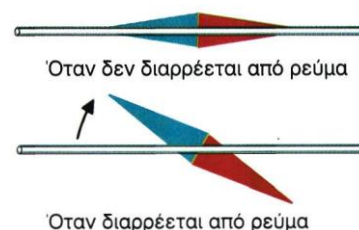
Περνάμε ένα κατακόρυφο αγωγό μέσα σ' ένα οριζόντιο χαρτόνι στην επιφάνεια του οποίου σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου. Διοχετεύουμε ρεύμα στον αγωγό οπότε τα ρινίσματα μαγνητίζονται, διατάσσονται κυκλικά γύρω από το ρευματοφόρο αγωγό και συμπεριφέρονται ως μικρές μαγνητικές βελόνες (Εικ. 7). Με τη βοήθεια μίας μαγνητικής βελόνας, πιστοποιούμε τη φορά των δυναμικών γραμμών που δημιουργούνται γύρω από το ρευματοφόρο αγωγό. Ο βόρειος πόλος της μαγνητικής βελόνας δείχνει τη φορά των δυναμικών γραμμών του πεδίου.

Το πείραμα του Oersted μας έδειξε ότι οι μαγνήτες, όταν βρεθούν κοντά σε ρευματοφόρο αγωγό, εκτρέπονται. Το ρεύμα λοιπόν, ασκεί δύναμη πάνω στους μαγνήτες. Σύμφωνα όμως με το νόμο δράσης-αντίδρασης θα πρέπει να ισχύει και το αντίστροφο. Δηλαδή, οι μαγνήτες πρέπει να ασκούν δύναμη σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα.

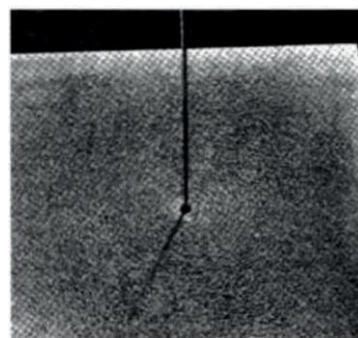
Για να το αποδείξουμε, κρεμάμε ένα μικρού μήκους αγωγό μεταξύ των πόλων ενός πεταλοειδούς μαγνήτη κάθετα στις δυναμικές γραμμές του και τον συνδέουμε με μία μπαταρία (Εικ. 8). Όταν κλείσουμε το διακόπτη το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, παρατηρούμε ότι ο αγωγός εκτρέπεται από την αρχική θέση ισορροπίας του και ισορροπεί σε μία νέα θέση. Αν βάλουμε τον αγωγό παράλληλα στις δυναμικές γραμμές, παρατηρούμε ότι δεν εκτρέπεται άρα δεν ασκείται πάνω του καμία δύναμη. Το ίδιο θα συμβεί, αν ανοίξουμε το διακόπτη και δε διαρρέεται από ρεύμα το κύκλωμα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι:

**Γύρω από ρευματοφόρους**

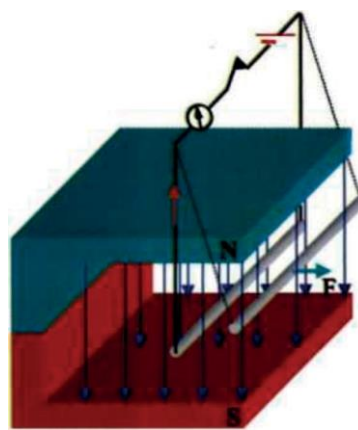


Εικόνα 4-6.



Μαγνητικό φάσμα γύρω από ρευματοφόρο αγωγό.

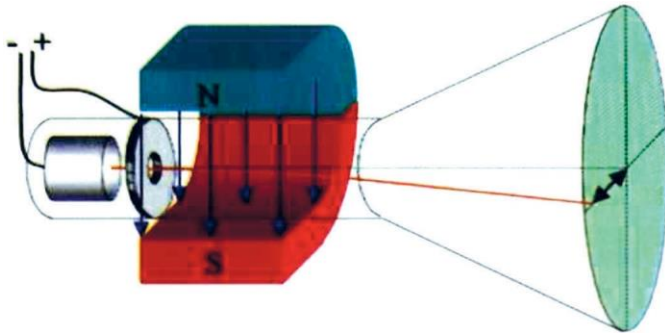
Εικόνα 4-7.



Ο αγωγός εκτρέπεται όταν διαρρέεται από ρεύμα.

Εικόνα 4-8.

γούς δημιουργείται μαγνητικό πεδίο και οι μαγνήτες που θα βρεθούν μέσα σ' αυτό θα δεχτούν δύναμη. Αλλά και ο ρευματοφόρος αγωγός, όταν βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, δέχεται δύναμη από αυτό.



Εικόνα 4-9. Σωλήνας Crookes.

Δύναμη δέχονται επίσης και φορτία που κινούνται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο μπορούμε να το διαπιστώσουμε εύκολα, αν βάλουμε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετα στις καθοδικές ακτίνες ενός σωλήνα Crookes.

Οι καθοδικές ακτίνες είναι κινούμενα ηλεκτρόνια, τα οποία δέχονται δύναμη από το μαγνητικό πεδίο τέτοια, ώστε να εκτρέπονται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου (Εικ. 9).

## (4.2.) Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρων αγωγών

### α) Μαγνητικό πεδίο γύρω από ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό

Με τα πειράματα του Oersted αποδείχθηκε ότι γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Ας εξετάσουμε το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού. Για το σκοπό αυτό περνάμε ένα κατακόρυφο αγωγό από μία τρύπα ενός οριζόντιου χαρτονιού πάνω στο οποίο σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου. Για να γίνει το πείραμα καλύτερα διαβιβάζουμε από τον αγωγό ρεύμα μεγάλης έντασης. Κτυπώντας ελαφρά το χαρτόνι, τα ρινίσματα σιδήρου διατάσσονται σε ομόκεντρους κύκλους με κέντρο τον αγωγό. Οι δυναμικές γραμμές λοιπόν του μαγνητικού πεδίου, είναι ομόκεντροι κύκλοι, έχουν ως κέντρο τον αγωγό και το επίπεδο τους είναι κάθετο σε αυτόν (Εικ. 18).

Με τη βοήθεια μιας μικρής μαγνητικής βελόνας προσδιορίζουμε τη φορά των δυναμικών γραμμών.

Αν θεωρήσουμε τον ευθύγραμμο αγωγό απείρου μήκους που διαρρέεται από ρεύμα  $I$ , τότε σε απόσταση  $r$  από αυτόν η ένταση  $B$  του πεδίου αποδεικνύεται ότι είναι:

$$B = k_{\mu} \frac{2I}{r} \quad \text{ή} \quad k_{\mu} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \quad (1)$$

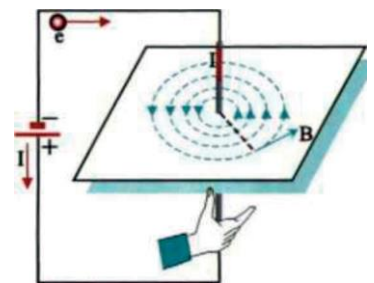
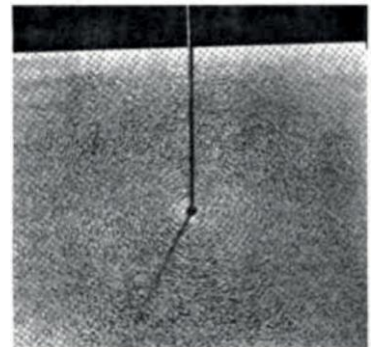
Ο αγωγός θεωρείται απείρου μήκους, όταν η απόσταση  $r$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος του.

Για να βρούμε τη φορά του διανύσματος της έντασης του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούμε τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Τοποθετούμε τη δεξιά παλάμη παράλληλα με τον αγωγό, έτσι ώστε, ο αντίχειρας να δείχνει τη φορά του ρεύματος, οπότε τα υπόλοιπα δάκτυλα καθώς κλείνουν γύρω από τον αγωγό, δείχνουν τη φορά των δυναμικών γραμμών (Εικ. 19). Η ένταση του πεδίου σε κάθε σημείο έχει φορά τη φορά των δυναμικών γραμμών και εφάπτεται σ' αυτές.

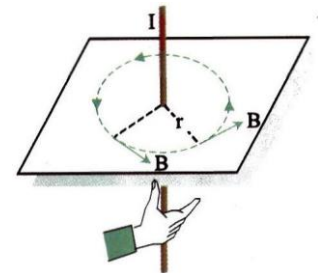
### Παράδειγμα 1

Δύο παράλληλοι ευθύγραμμοι αγωγοί απείρου μήκους, διαρρέονται από ρεύματα  $I_1=10\text{A}$  και  $I_2=20\text{A}$ , η φορά των οποίων, φαίνεται στις εικόνες (α), (β). Αν η μεταξύ τους απόσταση είναι  $r=2\text{cm}$ , να υπολογίσετε την ένταση του μαγνητικού πεδίου: α) στο μέσο της μεταξύ τους απόστασης, β) σε απόσταση  $d=2\text{cm}$  αριστερότερα του



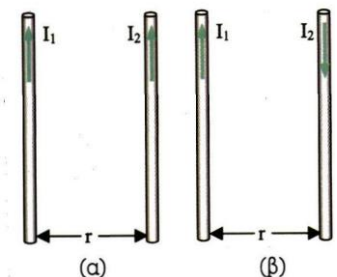
Το μαγνητικό φάσμα ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.

Εικόνα 4-18.



Ο τρόπος εύρεσης της φοράς της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Εικόνα 4-19.



πρώτου αγωγού.

### Λύση

**1<sup>η</sup> περίπτωση:** Οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα όπως δείχνει η πρώτη εικόνα.

α) Στο σημείο Μ οι εντάσεις  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$ , έχουν αντίθετη φορά.

$$B_M = B_2 - B_1 \Rightarrow B_M = k_\mu \frac{2I_2}{r} - k_\mu \frac{2I_1}{r} \Rightarrow$$

$$B_M = k_\mu \frac{4I_2}{r} - k_\mu \frac{4I_1}{r} \Rightarrow B_M = \frac{k_\mu \cdot 4}{r} (I_2 - I_1) \Rightarrow$$

$$B_M = \frac{4 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} (20A - 10A)}{2 \cdot 10^{-2} m} \Rightarrow B_M = 2 \cdot 10^{-4} T$$

Άρα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο Μ έχει μέτρο  $2 \cdot 10^{-4} T$  και φορά της  $\vec{B}_2$ .

β) Στο σημείο Λ, οι εντάσεις  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  των μαγνητικών πεδίων από τους δύο αγωγούς, είναι ομόρροπες.

$$B_\Lambda = B_1 + B_2 \Rightarrow B_\Lambda = k_\mu \frac{2I_1}{d} + k_\mu \frac{2I_2}{r+d} \Rightarrow$$

$$B_\Lambda = 2k_\mu \left( \frac{I_1}{d} + \frac{I_2}{r+d} \right) \Rightarrow B_\Lambda = 2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \left( \frac{10A}{2 \cdot 10^{-2} m} + \frac{20A}{4 \cdot 10^{-2} m} \right) \Rightarrow$$

$$B_\Lambda = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-2}} (1+1) T \Rightarrow B_\Lambda = 2 \cdot 10^{-4} T$$

Άρα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο Λ έχει μέτρο  $2 \cdot 10^{-4} T$  και φορά των  $\vec{B}_1, \vec{B}_2$ .

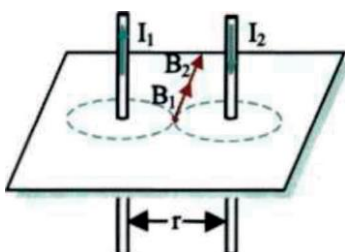
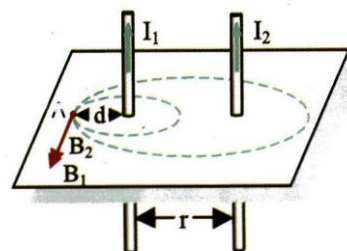
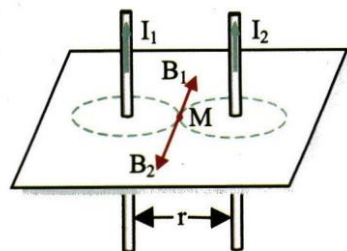
**2<sup>η</sup> περίπτωση:** Οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα όπως δείχνει η δεύτερη εικόνα.

α) Στο σημείο Μ, οι εντάσεις  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  έχουν την ίδια φορά.

$$B_M = k_\mu \frac{2I_1}{r} + k_\mu \frac{2I_2}{r} \Rightarrow B_M = 4 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \left( \frac{10A}{2 \cdot 10^{-2} m} + \frac{20A}{2 \cdot 10^{-2} m} \right) \Rightarrow$$

$$B_M = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 30}{2 \cdot 10^{-2}} T \Rightarrow B_M = 6 \cdot 10^{-4} T$$

Άρα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο Λ έχει μέτρο  $6 \cdot 10^{-4} T$  και φορά των  $\vec{B}_1, \vec{B}_2$ .





β) Στο σημείο Λ, οι εντάσεις  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  των μαγνητικών πεδίων έχουν αντίθετη φορά.

$$B_\Lambda = k_\mu \frac{2I_1}{d} - k_\mu \frac{2I_2}{r+d} \Rightarrow B_\Lambda = 2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \left( \frac{10A}{2 \cdot 10^{-2}m} - \frac{20A}{4 \cdot 10^{-2}m} \right) \Rightarrow B_\Lambda = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-2}} (10-10)T \Rightarrow B_\Lambda = 0$$

Άρα η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο Λ είναι ίση με μηδέν.

**β) Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού**

Πάνω στο χαρτόνι σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου και διαβιβάζουμε ρεύμα στον αγωγό. Κτυπάμε ελαφρά το χαρτόνι και βλέπουμε ότι τα ρινίσματα διατάσσονται σε **ομόκεντρους κύκλους με κέντρο το σημείο τομής του χαρτονιού από τον αγωγό** (Εικ. 20).

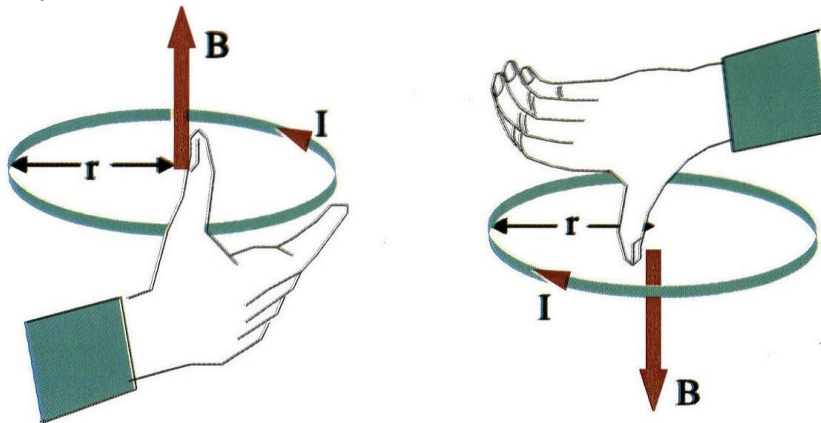
Με τη βοήθεια της μαγνητικής βελόνας, βρίσκουμε την φορά των δυναμικών γραμμών.

Με αυτό τον τρόπο αποδείξαμε ότι ένας κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο η μορφή του οποίου πιστοποιείται με τη βοήθεια των ρινισμάτων σιδήρου.

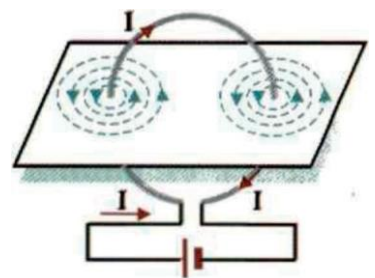
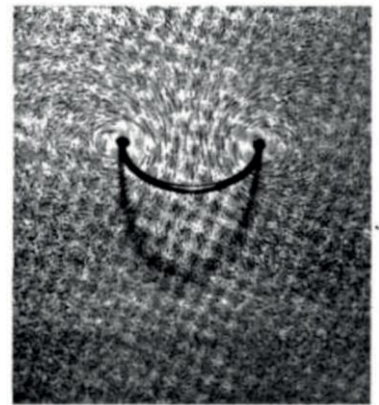
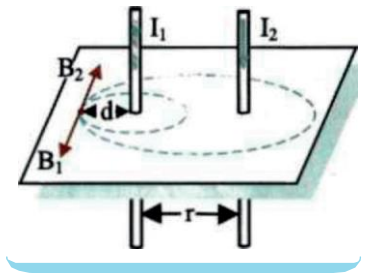
Στο κέντρο του κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού ακτίνας r, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, αποδεικνύεται ότι είναι:

$$B = k_\mu \frac{2\pi I}{r} \text{ όπου } k_\mu = 2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \quad (2)$$

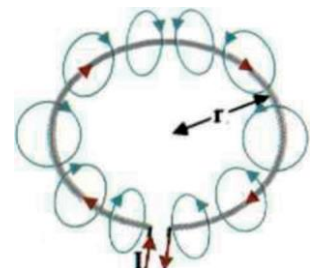
Η διεύθυνση της έντασης του πεδίου είναι κάθετη στο επίπεδο του κύκλου και η φορά της βρίσκεται με τον παρακάτω πρακτικό κανόνα. Τοποθετούμε τη δεξιά παλάμη ώστε τα δάκτυλα, καθώς κλείνουν να δείχνουν τη φορά του ρεύματος. Τότε, ο αντίχειρας δείχνει την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του αγωγού (Εικ. 22).



Εικόνα 4 -22 . Ο προσδιορισμός της φοράς της έντασης του μαγνητικού πεδίου.



Το μαγνητικό φάσμα κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού. Εικόνα 4-20.



Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές γύρω από έναν κυκλικό ρευματοφόρο αγωγό. Εικόνα 4-21.

Αν ο κυκλικός αγωγός αποτελείται από  $N$  σύρματα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου, αυξάνεται  $N$  φορές, δηλαδή, γίνεται:

$$B = k_{\mu} \frac{2\pi I}{r} N \quad (3)$$

## Παράδειγμα 2

Οι άκρες ενός σύρματος μήκους  $\ell = 4\pi^2 \text{ m}$  που έχει αντίσταση  $R=16\Omega$  συνδέεται με πηγή ΗΕΔ  $\mathcal{E} = 100\text{V}$  και εσωτερικής αντίστασης  $r=4\Omega$ . Αν καμπυλώσουμε το σύρμα και φτιάξουμε αρχικά α) έναν κυκλικό αγωγό και (β) πέντε κυκλικούς αγωγούς ίδιας ακτίνας, να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο αντίστοιχο κέντρο.

### Λύση

Από το νόμο του Ohm, βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό ΑΓ.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow I = \frac{100\text{V}}{16\Omega+4\Omega} = 5\text{A}$$

α) Όταν φτιάξουμε έναν κυκλικό αγωγό θα έχει ακτίνα

$$d_1 = \frac{\ell}{2\pi} = \frac{4\pi^2 \text{ m}}{2\pi} = 2\pi \text{ m}$$

Άρα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του έχει μέτρο:

$$B = k_{\mu} \frac{2\pi I}{d_1} \Rightarrow B = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \frac{2\pi \cdot 5\text{A}}{2\pi \cdot \text{m}} \Rightarrow B = 5 \cdot 10^{-7} \text{T}$$

β) Όταν φτιάξουμε 5 κυκλικούς αγωγούς θα έχουν ακτίνα  $d_2$ . Το μήκος  $\ell$  του σύρματος θα είναι 5 φορές το μήκος κάθε κύκλου δηλαδή:

$$\ell = N2\pi d_2 \Rightarrow d_2 = \frac{\ell}{N2\pi} \Rightarrow d_2 = \frac{4\pi^2 \text{ m}}{5 \cdot 2\pi} = \frac{4\pi}{10} \text{ m} = 0,4\pi \text{ m}$$

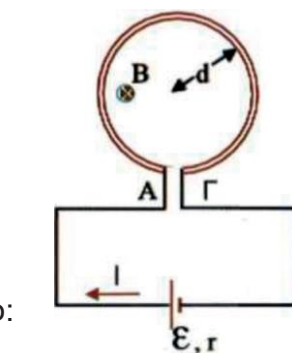
Άρα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο τους, είναι:

$$B = k_{\mu} \frac{2\pi I}{d_2} N \Rightarrow B = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \frac{2\pi \cdot 5\text{A}}{0,4\pi \cdot \text{m}} 5 \Rightarrow B = 125 \cdot 10^{-7} \text{T}$$

### γ) Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Το μαγνητικό, πεδίο γύρω από ένα μακρύ ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό είναι ασθενές, εκτός και αν, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα μεγάλης έντασης.

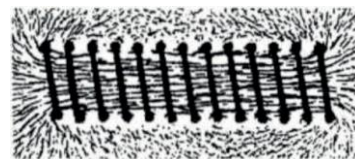
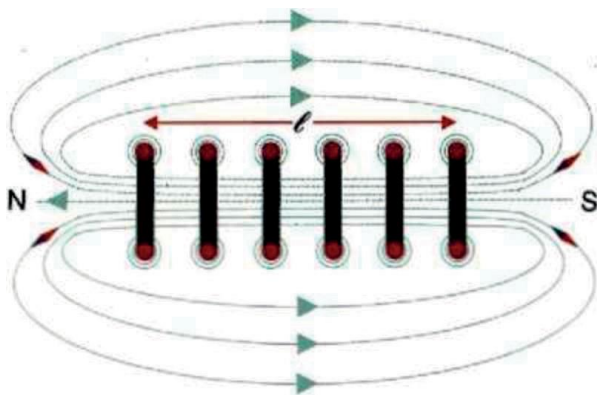
Ένας ευθύγραμμος αγωγός μεγάλου μήκους που διαρρέεται από ρεύμα έντασης 50A δημιουργεί σε απόσταση ενός μέτρου από αυτόν μαγνητικό πεδίο έντασης μέτρου  $10^{-5}$  Tesla που είναι αρκετά ασθενές. Αν όμως, τον ίδιο αγωγό τον τυλίξουμε, έτσι ώστε να δημιουργήσουμε πολλούς μικρούς κυκλικούς αγωγούς, τα πράγματα



Οι σταυροί στους κύκλους  $\otimes$  σημαίνουν ότι η συμβατική φορά του ρεύματος έχει κατεύθυνση προς το επίπεδο της σελίδας. Τα σημεία στους κύκλους  $\odot$  σημαίνουν ότι το ρεύμα έχει κατεύθυνση προς τον παρατηρητή.

αλλάζουν. Τότε, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ίδιο το σύρμα είναι πολύ ισχυρό. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος της προτίμησης που δείχνουμε για κυκλικούς ρευματοφόρους αγωγούς. Ένα σύνολο τέτοιων κυκλικών αγωγών αποτελεί ένα πηνίο. Κάθε ένας κυκλικός αγωγός λέμε ότι αποτελεί μία σπείρα. Αν τυλίξουμε πολλές σπείρες σε ένα μονωτικό κύλινδρο οι οποίες να ισαπέχουν έχουμε φτιάξει ένα σωληνοειδές. Η ευθεία που ορίζεται από τα κέντρα των σπειρών λέγεται άξονας του σωληνοειδούς.

Ας εξετάσουμε το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς. Χρησιμοποιούμε μία συσκευή φάσματος σωληνοειδούς. Σκορπίζουμε στην πλαστική διαφανή πλάκα ρινίσματα σιδήρου και διαβιβάζουμε ρεύμα στο σωληνοειδές. Κτυπώντας ελαφρά τη διαφανή πλάκα, βλέπουμε τη μορφή του φάσματος του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται (Εικ. 23).



Μαγνητικό φάσμα σωληνοειδούς.

Εικόνα 4-23. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς.

Με τη βοήθεια της μαγνητικής βελόνας, βρίσκουμε, ότι το ένα άκρο του σωληνοειδούς συμπεριφέρεται σαν βόρειος πόλος και το άλλο σαν νότιος.

Το σημείο εξόδου των δυναμικών γραμμών το χαρακτηρίσαμε **βόρειο πόλο** ενώ το σημείο εισόδου **νότιο πόλο**. Ενώ στον ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό δεν βρίσκουμε πόλους, αντίθετα το σωληνοειδές συμπεριφέρεται όπως ένας ευθύγραμμος μαγνήτης.

Μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την παραπάνω παρατήρηση με ένα απλό πείραμα. Κρεμάμε με δύο λεπτά αγωγά νήματα, ένα αρκετά μεγάλο και σχετικά ελαφρύ σωληνοειδές και διοχετεύουμε μέσα από τα νήματα ρεύμα περίπου 2A. Παρατηρούμε ότι μετά από μερικές αιωρήσεις το σωληνοειδές θα προσανατολισθεί με τον άξονά του περίπου στη διεύθυνση Βορράς, Νότος. Όπως ακριβώς θα έκανε ένας ευθύγραμμος μαγνήτης.

Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς οι δυναμικές γραμμές είναι **παράλληλες** με τον άξονα του σωληνοειδούς και **ισαπέχουν**. Το πεδίο λοιπόν είναι ομογενές. Στον υπόλοιπο χώρο το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές και ασθενέστερο. Λέμε λοιπόν ότι στο εσωτερικό του σωληνοειδούς δημιουργείται ένα ισχυρό ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Αποδεικνύεται ότι σε ένα σημείο A του άξονα του σωληνοειδούς κοντά στο κέντρο του, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι:

$$B = k_{\mu} 4\pi \frac{N}{\ell} I \quad (4)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των σπειρών,  $\ell$  το μήκος του σωληνοειδούς και  $I$  η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές. Το πηλίκο  $\frac{N}{\ell}$  εκφράζει τον αριθμό σπειρών ανά μονάδα μήκους του σωληνοειδούς και συμβολίζεται με  $n \left( n = \frac{N}{\ell} \right)$ .

Αν εφαρμόσουμε τον κανόνα της δεξιά παλάμης για μία σπείρα, όπως τον εφαρμόσαμε στον κυκλικό ρευματοφόρο αγωγό, τότε ο αντίχειρας θα μας δείξει τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, θα μας δείξει δηλαδή το βόρειο πόλο του πηνίου (Εικ. 24).

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου κοντά στα άκρα του σωληνοειδούς αποδεικνύεται ότι έχει μέτρο ίσο με το μισό του μέτρου της έντασης στο κέντρο του σωληνοειδούς:

$$B' = \frac{B}{2} \Rightarrow B' = k_{\mu} 2\pi \frac{N}{\ell} I$$

### Παράδειγμα 3

Οι άκρες ενός σωληνοειδούς μήκους  $\ell = \pi \text{ m}$  και αριθμού σπειρών  $N = 100$  συνδέονται με πηγή ΗΕΔ  $\mathcal{E} = 50 \text{ V}$  και εσωτερικής αντίστασης  $r = 1 \Omega$ . Το σωληνοειδές έχει αντίσταση  $0,09 \Omega$  ανά σπείρα. Να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς.

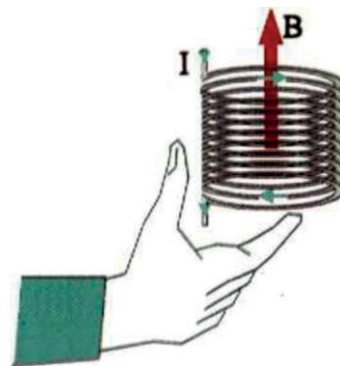
#### Λύση

Η αντίσταση του σωληνοειδούς είναι  $R = 0,09 \Omega \cdot 100 = 9 \Omega$ . Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές βρίσκεται από το νόμο του Ohm:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow I = \frac{50 \text{ V}}{10 \Omega} = 5 \text{ A}$$

Η ένταση στο εσωτερικό του σωληνοειδούς θα είναι:

$$B = k_{\mu} 4\pi \frac{N}{\ell} I \Rightarrow B = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} 4\pi \frac{100}{\pi \cdot \text{m}} 5 \text{ A} \Rightarrow B = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$



Εικόνα 4-24. Ο προσδιορισμός της φοράς της έντασης του μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς.

Οι τύποι που μας δίνουν την ένταση μαγνητικού πεδίου στο κέντρο και στα άκρα του σωληνοειδούς ισχύουν κατά προσέγγιση. Η προσέγγιση αυτή είναι αποδεκτή μόνο αν το μήκος του σωληνοειδούς είναι δεκαπλάσιο τουλάχιστον από τη διάμετρό του.

