

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ

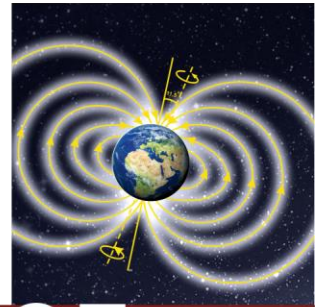
2020

ΦΥΣΙΚΗ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4





ΦΥΣΙΚΗ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συγγραφή:

Αντρέας Αντωνίου, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Μέσης Εκπαίδευσης

Σάββας Πολυδωρίδης, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Μέσης Εκπαίδευσης

Γεώργιος Τσαλακός, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Μέσης Εκπαίδευσης

Ιωάννης Καρμιώτης, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Μέσης Εκπαίδευσης

Παναγιώτης Ελευθερίου
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής

Γιαννάκης Χατζηκωστής
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής

Επιμέλεια Σχημάτων/
Σχεδιασμός έκδοσης:

Αντώνης Τσάκωνας, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Μέσης Εκπαίδευσης

Επιμέλεια έκδοσης:

Μαρίνα Άστρα Ιωάννου, Λειτουργός Υπηρεσίας
Ανάπτυξης Προγραμμάτων

Συντονισμός έκδοσης:

Χρίστος Παρπούνας, Συντονιστής Υπηρεσίας
Ανάπτυξης Προγραμμάτων

Α΄ Έκδοση 2019
Β΄ Έκδοση 2020
Εκτύπωση: Κώνος Λτδ

© ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ, ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΝΕΟΛΑΙΑΣ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ISBN: 978-9963-54-230-7

4.1 Μαγνητισμός

Γνωρίζουμε, από την εμπειρία της καθημερινής ζωής, ότι κάποια υλικά που ονομάζουμε μαγνήτες έλκουν σιδερένια αντικείμενα αλλά και έλκονται ή απωθούνται από άλλους μαγνήτες.

Στην Α΄ Λυκείου αναφερθήκαμε σε μαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ μαγνητών, ή μεταξύ ενός μαγνήτη και ενός σιδερένιου αντικείμενου. Τέτοιες εμπειρικές διαπιστώσεις έγιναν από τα αρχαία χρόνια, όταν οι άνθρωποι παρατήρησαν ότι μερικά κομμάτια από ένα συγκεκριμένο πέτρωμα είχαν την ιδιότητα να έλκουν σιδερένια αντικείμενα αλλά και να έλκονται ή να απωθούνται μεταξύ τους.

Το πέτρωμα αυτό ονομάζεται μαγνητίτης¹ [Μαγνήτης Λίθος], και είναι ένα φυσικό ορυκτό του σιδήρου (Fe_3O_4).



Εικόνα 4-1



Εικόνα 4-2

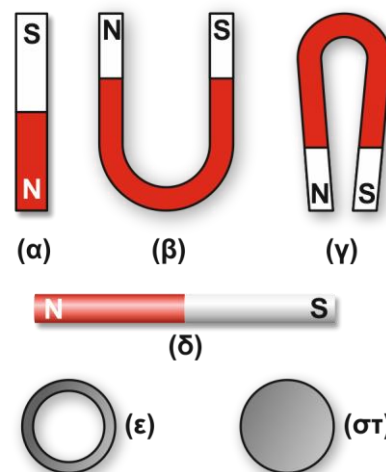
Πετρώματα μαγνητίτη τα οποία έλκουν ρινίσματα σιδήρου.

4.2 Μόνιμοι μαγνήτες.

Εκτός από το πέτρωμα μαγνητίτη, που αποτελεί ένα φυσικό μόνιμο μαγνήτη, υπάρχουν και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών, όπως είναι ο σίδηρος (**Fe**), το κοβάλτιο (**Co**), το νικέλιο (**Ni**), αλλά και διάφορα κράματα ή οξειδία τους.

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε εύκολα, η έλξη που ασκούν τα διάφορα σημεία ενός μαγνήτη σε ένα σιδερένιο σώμα δεν είναι το ίδιο μεγάλη. Για παράδειγμα, τα άκρα ενός ραβδόμορφου μαγνήτη έλκουν πολύ πιο έντονα ένα μικρό σιδερένιο συνδετήρα, παρά η ενδιάμεση περιοχή. Για τη συνέχεια θα αποκαλούμε τις ακραίες περιοχές ενός μαγνήτη ως «**πόλους**»². Στην περίπτωση, ενός μαγνήτη σε σχήμα μικρού «κουμπιού» όπως τα μαγνητάκια ψυγείου, οι πόλοι αντιστοιχούν στις δύο επίπεδες επιφάνειες.

Ξέρουμε ότι, αν πλησιάσουμε δύο μαγνήτες, αυτοί μπορεί να έλκονται ή να απωθούνται, σύμφωνα με τον προσανατολισμό των πόλων τους. Επομένως, όπως και στην αλληλεπίδραση ηλεκτρικών φορτίων, συμπεραίνουμε ότι υπάρχουν δύο είδη μαγνητικών πόλων.



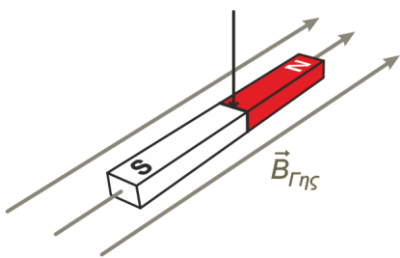
- α) Ευθύγραμμος Μαγνήτης
- β) Μαγνήτης σχήματος **U**
- γ) Πεταλοειδής Μαγνήτης
- δ) Κυλινδρικός Μαγνήτης
- ε) Μαγνήτης Δακτύλιος
- στ) Μαγνήτης κουμπί

Εικόνα 4-3

Συναντάμε τους μόνιμους μαγνήτες σε διάφορα σχήματα, με πιο συνηθισμένα τη ράβδο, το πέταλο, τον κύλινδρο και τον δακτύλιο.

¹ Ο **μαγνητίτης** πιθανότατα πήρε το όνομά του από την αρχαία πόλη της Μαγνησίας του Σιπύλου (που ιδρύθηκε στην περιοχή της Μικράς Ασίας το 2^ο αιώνα π.Χ.) στην οποία υπήρχαν μεγάλα κοιτάσματα του ορυκτού.

² Το μοντέλο με τους μαγνητικούς πόλους προτάθηκε από τον Άγγλο φυσικό William Gilbert (1544 - 1603) και αποτελεί μια καλή προσέγγιση σε απλές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης μαγνητών.



Εικόνα 4-4



Εικόνα 4-5

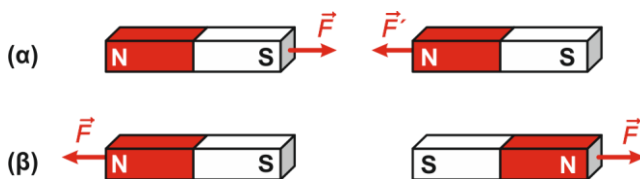
Για να προσδιορίσουμε τους πόλους ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, αρκεί να κρεμάσουμε τον μαγνήτη από ένα σχοινί, έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από το κέντρο του. Πολύ σύντομα ο μαγνήτης ισορροπεί σε ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό στη διεύθυνση Βορράς – Νότος.

Ο πόλος με κατεύθυνση προς τον γεωγραφικό Βορρά ονομάζεται «**Βόρειος**» και ο άλλος με κατεύθυνση προς τον γεωγραφικό Νότο, «**Νότιος**» πόλος.

Η διαδικασία αυτή αποτελεί ουσιαστικά την λειτουργία της μαγνητικής πυξίδας³. Η μαγνητική βελόνα της πυξίδας είναι ένας πολύ λεπτός μαγνήτης, που μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από άξονα που διέρχεται από το κέντρο της. Σε κάθε σημείο στην επιφάνεια της Γης, η μαγνητική βελόνα περιστρέφεται, έτσι ώστε η αιχμή «**N**» να δείχνει προς τον γεωγραφικό Βορρά.

Στην πιο κάτω εικόνα, παρατηρούμε ότι, οι δύο μαγνήτες έλκονται όταν ο Νότιος πόλος του ενός βρίσκεται κοντά στον Βόρειο του άλλου (εικόνα 4-6α). Διαφορετικά, όταν πλησιάζουν όμοιοι πόλοι, οι μαγνήτες απωθούνται (εικόνα 4-6β).

Οι δυο πόλοι συμβολίζονται με τα αρχικά γράμματα «**N**» και «**S**» των λέξεων **North (Βόρειος)** και **South (Νότιος)**.



Εικόνα 4-6

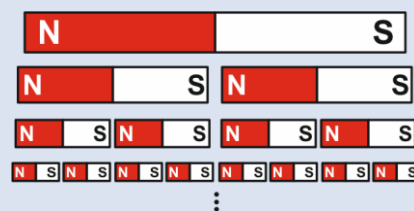
Η μαγνητική δύναμη είναι δύναμη από απόσταση, όπως και η ηλεκτρική. Είναι απωστική μεταξύ όμοιων μαγνητικών πόλων και ελκτική μεταξύ αντίθετων μαγνητικών πόλων.

ΕΝΘΕΤΟ: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΜΟΝΟΠΟΛΟ

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων και μαγνητικών πόλων είναι ότι τα δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου μπορούν να απομονωθούν, αλλά οι μαγνητικοί πόλοι όχι.

Δηλαδή, ενώ ένα πρωτόνιο ή ένα ηλεκτρόνιο μπορούν να βρεθούν μόνα τους σε κάποιο σημείο του χώρου, οι δύο μαγνητικοί πόλοι πάντα συνυπάρχουν.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όταν «κόψουμε» ένα ραβδόμορφο μαγνήτη στη μέση να πάρουμε δύο μικρότερους μαγνήτες, που ο καθένας έχει και πάλι δύο διαφορετικούς μαγνητικούς πόλους (εικόνα 4-7).



Εικόνα 4-7

³ Οι πρώτες μαγνητικές πυξίδες έφτασαν στην Ευρώπη τον 12^ο αιώνα και το 1600 ο Γουίλιαμ Γκίλμπερτ μέσα από τη διάσημη δημοσίευση του «De Magnete» έδωσε μια ολοκληρωμένη ερμηνεία της λειτουργίας της μαγνητικής πυξίδας.

Όσες φορές και να επαναλάβουμε τη διαδικασία, πάντα καταλήγουμε σε ένα κομμάτι μαγνήτη που η συμπεριφορά του περιγράφεται από ένα ζεύγος αντίθετων μαγνητικών πόλων (μαγνητικό δίπολο).

Γενικά, η μαγνητική δύναμη, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι το μέγεθος και το σχήμα των μαγνητών, η απόσταση και ο προσανατολισμός τους, γεγονός που καθιστά την ακριβή μαθηματική έκφραση που την περιγράφει αρκετά πολύπλοκη.

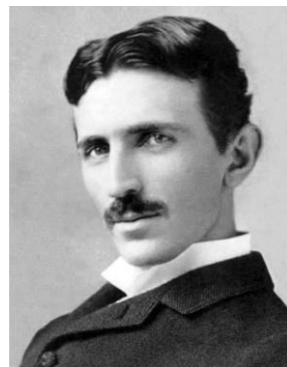
4.3 Μαγνητικό πεδίο.

Έχουμε δει στο κεφάλαιο του στατικού ηλεκτρισμού ότι σε μια περιοχή του χώρου όπου υπάρχουν κάποια ηλεκτρικά φορτία, ένα νέο ηλεκτρικό φορτίο q στην ίδια περιοχή, δέχεται συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη \vec{F} .

Κατ' αναλογία με το ηλεκτρικό πεδίο συμπεραίνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο, ο χώρος μέσα στον οποίο βρίσκεται ένας μαγνήτης έχει την ιδιότητα να ασκεί μαγνητική δύναμη σε άλλους μαγνήτες στο χώρο αυτό.

Το μαγνητικό πεδίο όπως και το ηλεκτρικό είναι ένα διανυσματικό πεδίο που περιγράφεται σε κάθε σημείο του χώρου από μια διανυσματική ποσότητα. Τη ποσότητα αυτή θα την ονομάζουμε **ένταση του μαγνητικού πεδίου** και θα την συμβολίζουμε με το \vec{B} .

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζεται στο S.I. σε μονάδες **Tesla (T)**, προς τιμή του Σέρβου φυσικού Νικόλα Τέσλα (Νικολά Τέσλα) (1856–1943) για τη σπουδαία συνεισφορά του στον ηλεκτρομαγνητισμό (εικόνα 4-8).



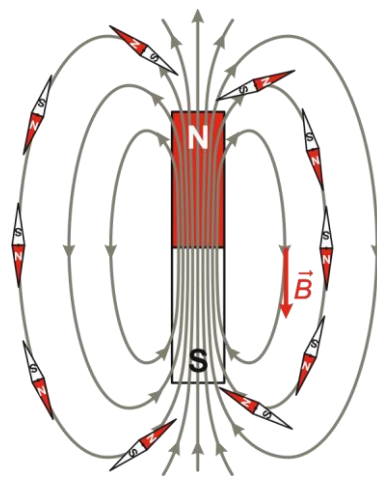
Για να απεικονίσουμε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί στο χώρο ένας ραβδόμορφος μαγνήτης, χρησιμοποιούμε μια μαγνητική πυξίδα την οποία τοποθετούμε σε διάφορα σημεία γύρω από τον μαγνήτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-9.

Σε κάθε σημείο του χώρου, ο βόρειος πόλος «N» του μαγνήτη, έλκει τον νότιο πόλο «S» και απωθεί τον βόρειο πόλο «N» της μαγνητικής βελόνας. Αντίστοιχα, ο νότιος πόλος «S» του μαγνήτη, απωθεί τον νότιο πόλο «S» και έλκει τον βόρειο πόλο «N» της μαγνητικής βελόνας.

Οι ροπές των ζευγών δυνάμεων από τους πόλους του μαγνήτη, περιστρέφουν την μαγνητική βελόνα γύρω από τον άξονά της, η οποία προσπαθεί να προσανατολίσει τον βόρειο πόλο της προς τον νότιο πόλο του μαγνήτη.

Η διεύθυνση της μαγνητικής βελόνας σε κάθε σημείο του χώρου, υποδεικνύει την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στο αντίστοιχο σημείο.

Κατ' αναλογία με τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο είναι εφαπτόμενη στη Μαγνητική Δυναμική Γραμμή (ΜΔΓ) που διέρχεται από το σημείο, με φορά που απομακρύνεται από τον βόρειο πόλο και πλησιάζει τον νότιο πόλο, για τον χώρο γύρω από τον μαγνήτη.



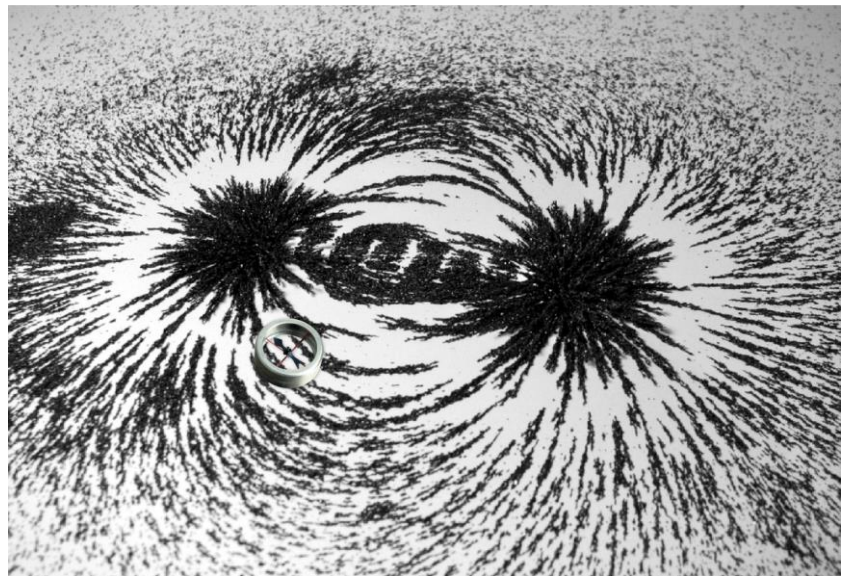
Εικόνα 4-9

Σε κάθε σημείο του χώρου αντιστοιχεί μια διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου \vec{B} , επομένως, σε κανένα σημείο του χώρου δεν τέμνονται δύο μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

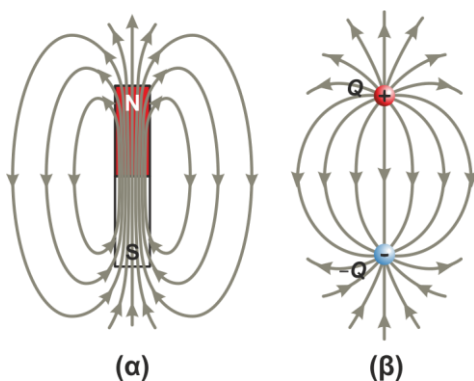
Ένας άλλος τρόπος για να απεικονίσουμε το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, είναι να τον τοποθετήσουμε κάτω από ένα λεπτό χαρτόνι πάνω στο οποίο σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου. Τα ρινίσματα σιδήρου, μαγνητίζονται από τον μαγνήτη και μετατρέπονται σε μικρές μαγνητικές πυξίδες, οι οποίες προσανατολίζονται γύρω από τον μαγνήτη, σχηματίζοντας τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές (εικόνα 4-10).

Παρατηρούμε ότι κοντά στους δύο πόλους του μαγνήτη οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές φαίνονται πιο πυκνές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές γύρω από τον μαγνήτη. Όσο απομακρυνόμαστε από τον μαγνήτη τόσο πιο αραιές φαίνονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Κατ' αναλογία με τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογος του μέτρου του μαγνητικού πεδίου. Επομένως, κοντά στους πόλους του μαγνήτη το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό και μειώνεται με την απόσταση.



Εικόνα 4-10



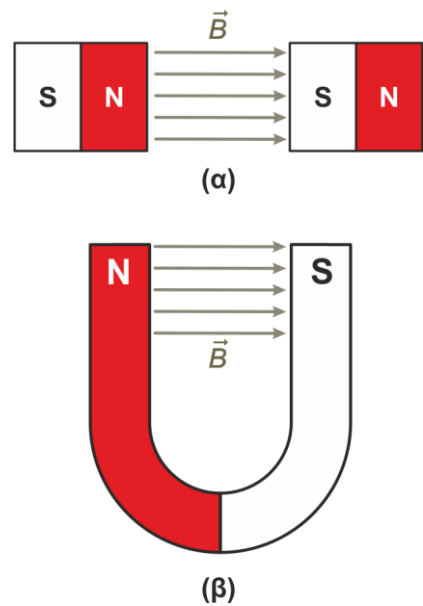
Εικόνα 4-11

Στην εικόνα 4-11α απεικονίζεται το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη και στην εικόνα 4-11β το ηλεκτρικό πεδίο δύο αντίθετων φορτίων. Παρατηρούμε ότι το μοτίβο των μαγνητικών και ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών είναι παρόμοιο, επομένως κατ' αντιστοιχία μπορούμε να περιγράψουμε το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη (δύο αντίθετοι πόλοι – μαγνητικό δίπολο) σύμφωνα με το ηλεκτρικό πεδίο δύο αντίθετων φορτίων (ηλεκτρικό δίπολο).

- Αντιστοιχώντας την περιοχή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των δύο φορτίων, με το εσωτερικό του μαγνήτη, αντιλαμβανόμαστε ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν ξεκινούν από τον βόρειο πόλο του μαγνήτη και καταλήγουν στον νότιο πόλο, αλλά διέρχονται μέσα στο μαγνήτη και σχηματίζουν κλειστές διαδρομές. Επομένως, μέσα στον μαγνήτη οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται από τον νότιο πόλο στον βόρειο.
- Για το ηλεκτρικό πεδίο, έχουμε δει ότι οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές ξεκινούν από κάποιο θετικό φορτίο και καταλήγουν στο άπειρο ή ξεκινούν από το άπειρο και καταλήγουν σε κάποιο αρνητικό φορτίο.

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές από την άλλη, αντιστοιχούν σε κλειστούς βρόχους, χωρίς αρχή και τέλος. Η διαφορά αυτή μεταξύ των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυναμικών γραμμών οφείλεται στο γεγονός ότι είναι αδύνατο να απομονωθεί κάποιος μαγνητικός πόλος, όπως συμβαίνει στο ηλεκτρικό πεδίο ενός στατικού φορτίου.

Στην εικόνα 4-12α απεικονίζεται μια διάταξη δύο ραβδόμορφων μαγνητών και στην εικόνα 4-12β ένας μαγνήτης σχήματος **U**. Δύο αντίθετοι πόλοι, βρίσκονται σε μικρή απόσταση ο ένας απέναντι στον άλλο. Στην περιοχή μεταξύ των δύο επίπεδων επιφανειών, δημιουργείται προσεγγιστικά **ομογενές μαγνητικό πεδίο**, δηλαδή σε κάθε σημείο της περιοχής αυτής, το μαγνητικό πεδίο, έχει το ίδιο μέτρο και κατεύθυνση. Επομένως οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές απεικονίζονται παράλληλες και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Σε άλλες περιοχές γύρω από τους δύο μαγνήτες το πεδίο δεν είναι ομογενές.



Εικόνα 4-12

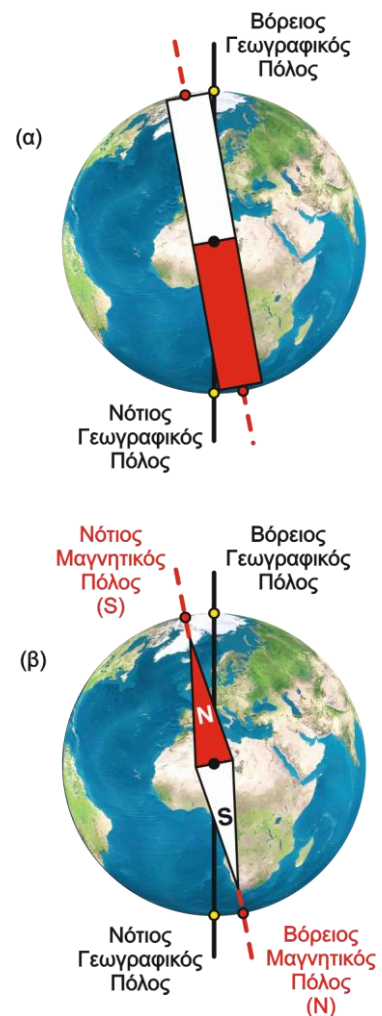
4.4 Μαγνητικό πεδίο Γης

Όπως έχουμε δει προηγουμένως, ο βόρειος πόλος «N» της μαγνητικής βελόνας σε μια πυξίδα, τείνει πάντα να προσανατολιστεί προς τον γεωγραφικό βόρειο πόλο. Παρόμοια συμπεριφορά έχει η μαγνητική πυξίδα όταν την τοποθετήσουμε κοντά στο νότιο πόλο «S» ενός μαγνήτη, ο οποίος έλκει τον βόρειο πόλο της πυξίδας και απωθεί τον νότιο. Επομένως και στις δύο περιπτώσεις η μαγνητική βελόνα δέχεται δυνάμεις από το μαγνητικό πεδίο της Γης και του μαγνήτη αντίστοιχα.

Οι ροπές των δύο δυνάμεων από τον μαγνήτη περιστρέφουν την μαγνητική βελόνα έτσι ώστε ο βόρειος της πόλος να έχει κατεύθυνση προς τον νότιο πόλο του μαγνήτη.

Συγκρίνοντας τα δύο φαινόμενα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο ενός τεράστιου ραβδόμορφου μαγνήτη (εικόνα 4-13α). Ο μαγνητικός Νότιος Πόλος «S» της Γης βρίσκεται κοντά⁴ στον γεωγραφικό Βόρειο Πόλο «N» και γι' αυτό έλκει το Βόρειο Πόλο κάθε πυξίδας προς το μέρος του (εικόνα 4-13β).

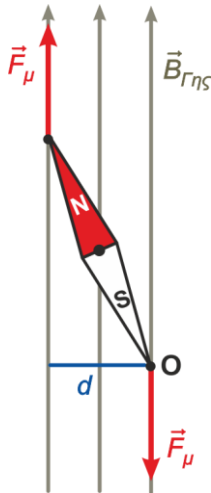
Το μαγνητικό πεδίο της Γης, είναι αρκετά πιο ασθενές (50 μT) ακόμα και από το μαγνητικό πεδίο ενός μικρού μαγνήτη ψυγείου (5 mT). Επομένως, αν πλησιάσουμε ένα μαγνήτη κοντά στην πυξίδα, αυτή θα περιστραφεί έτσι ώστε ο βόρειος πόλος της να δείχνει προς τον νότιο πόλο του μαγνήτη.



Εικόνα 4-13

⁴ Οι μαγνητικοί πόλοι αν και βρίσκονται κοντά στους γεωγραφικούς πόλους, δεν συμπίπτουν με αυτούς και έτσι υπάρχει απόκλιση μεταξύ του μαγνητικού άξονα και του γεωγραφικού άξονα της Γης, η οποία και αλλάζει με την πάροδο του χρόνου.

Μαγνητικό πεδίο	Μέτρο
Ανθρώπινος εγκέφαλος	1 pT
Επιφάνεια της Γης	50 μT
Μαγνήτης ψυγείου	5 mT
Μαγνητικός τομογράφος	2 T
Εργαστηρίου	20 T
Αστέρας νετρονίων	1 MT



Εικόνα 4-14

Στον διπλανό πίνακα αναγράφονται κάποια ενδεικτικά παραδείγματα μαγνητικών πεδίων και το αντίστοιχο μέτρο της έντασης του πεδίου.

Η εικόνα 4-14 δείχνει σε κάτοψη μια μαγνητική πυξίδα η οποία μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από σταθερό άξονα που διέρχεται από το κέντρο μάζας της, με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της σελίδας. Το μαγνητικό πεδίο της Γης ασκεί στον βόρειο πόλο της μαγνητικής πυξίδας δύναμη ομόρροπη προς την ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου και στον άλλο πόλο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν υποθέσουμε ότι οι δύο μαγνητικές δυνάμεις είναι ίσου μέτρου, τότε στη μαγνητική βελόνα δρα ένα ζεύγος δυνάμεων του οποίου η ροπή την αναγκάζει να περιστραφεί.

Το μέτρο της συνολικής ροπής του ζεύγους ισούται με το μέτρο των δυνάμεων επί την απόσταση μεταξύ των φορέων των δυνάμεων.

$$|\vec{M}| = |\vec{F}_\mu|d$$

Η μαγνητική βελόνα περιστρέφεται μέχρι να ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση Βορράς – Νότος. Στην διεύθυνση αυτή η απόσταση μεταξύ των φορέων είναι μηδέν και η ροπή του ζεύγους είναι μηδενική.

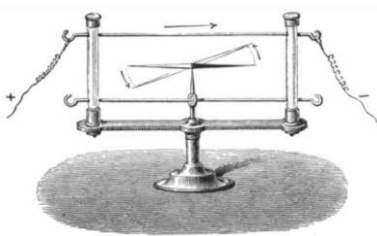
4.5 Το πείραμα του Oersted - Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.



Εικόνα 4-15

Το 1820 ο Δανός φυσικο-χημικός Hans Christian Ørsted (Χάνς Κρίστιαν Έρστεντ) (1777 – 1851) (εικόνα 4-15) παρατήρησε ότι, μια μαγνητική πυξίδα που βρισκόταν κοντά σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, παρέκκλινε από τον μαγνητικό βορρά, κάθε φορά που το κύκλωμα διαρρέεταν από ηλεκτρικό ρεύμα (εικόνα 4-16).

Αυτή θεωρείται και η πρώτη εμπειρική διαπίστωση συσχέτισης του ηλεκτρισμού με τον μαγνητισμό, η οποία μέχρι τότε δεν ήταν καθόλου προφανής και γι' αυτό οι επιστήμονες μελετούσαν και ερμήνευαν ξεχωριστά τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα.



Εικόνα 4-16

Στην εικόνα 4-17 φαίνεται σε κάτοψη ένας αγωγός που βρίσκεται κάτω από μια μαγνητική πυξίδα. Όταν ο αγωγός δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα η μαγνητική βελόνα της πυξίδας παραμένει προσανατολισμένη στη διεύθυνση Βορράς – Νότος σύμφωνα με το μαγνητικό πεδίο της Γης⁵ (εικόνα 4-17β). Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η μαγνητική βελόνα περιστρέφεται μέχρι οι δύο πόλοι της να ευθυγραμμιστούν σε μια διαφορετική διεύθυνση (εικόνα 4-17α). Στην περίπτωση που η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό αντιστραφεί τότε, η βελόνα αρχίζει να περιστρέφεται αντίστροφα με προηγούμενως και προσανατολίζεται σε διαφορετική κατεύθυνση

⁵ Η μαγνητική βελόνα ευθυγραμμίζεται σύμφωνα με την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της Γης.

(εικόνα 4-17γ). Από τις πιο πάνω παρατηρήσεις συμπεραίνουμε ότι η ροή ηλεκτρικού φορτίου στον αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο του ρευματοφόρου αγωγού ασκεί ζεύγος δυνάμεων στους μαγνητικούς πόλους της πυξίδας με αποτέλεσμα, αυτή να περιστρέφεται.

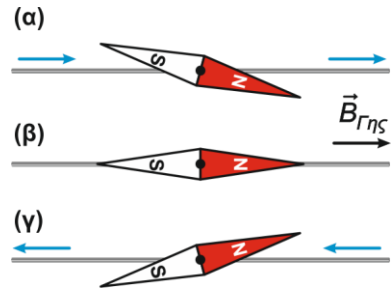
Όπως γνωρίζουμε, η συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα αγωγό αντιστοιχεί στην κίνηση των θετικών φορέων του ηλεκτρικού φορτίου. Επομένως η προσανατολισμένη κίνηση θετικών φορτίων προς μια κατεύθυνση δημιουργεί το ίδιο μαγνητικό πεδίο με την προσανατολισμένη κίνηση αρνητικών φορτίων προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Όπως και στην περίπτωση του ραβδόμορφου μαγνήτη, μπορούμε να απεικονίσουμε το μαγνητικό πεδίο ενός ρευματοφόρου αγωγού χρησιμοποιώντας μια μαγνητική πυξίδα την οποία, τοποθετούμε σε διάφορα σημεία γύρω από τον αγωγό, χαράσσοντας τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ή να περάσουμε τον αγωγό κάθετα μέσα από ένα λεπτό χαρτόνι πάνω στο οποίο σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου. Όπως παρατηρούμε στις εικόνες 4-18 και 4-19, τόσο η πυξίδα όσο και τα ρινίσματα σιδήρου, που δρουν σαν μικρές πυξίδες, προσανατολίζονται έτσι ώστε η διεύθυνσή τους να εφάπτεται σε ομόκεντρους, συνεπίπεδους κύκλους με κέντρο τον αγωγό.

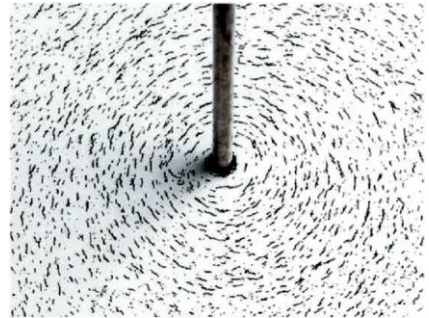
Επομένως, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού αντιστοιχούν σε ομόκεντρους κύκλους, με κέντρο τον αγωγό, που περιέχονται σε επίπεδα κάθετα στον άξονα του αγωγού.

Το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου εφάπτεται σε κάθε σημείο του κύκλου και η φορά του καθορίζεται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, ως ακολούθως:

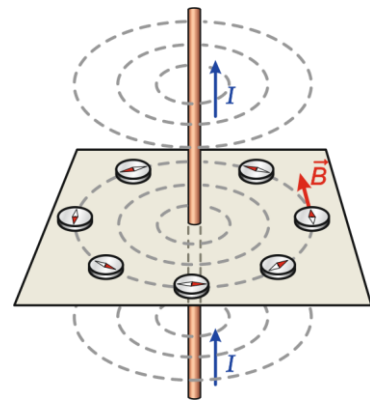
Τοποθετούμε τον τεντωμένο αντίχειρα, κατά μήκος του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, έτσι ώστε να δείχνει την συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα υπόλοιπα λυγισμένα δάχτυλα της κλειστής παλάμης δείχνουν την φορά του μαγνητικού πεδίου.



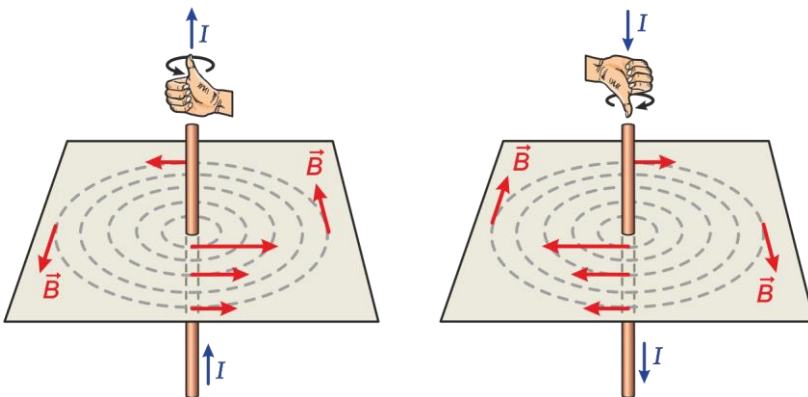
Εικόνα 4-17



Εικόνα 4-18



Εικόνα 4-19



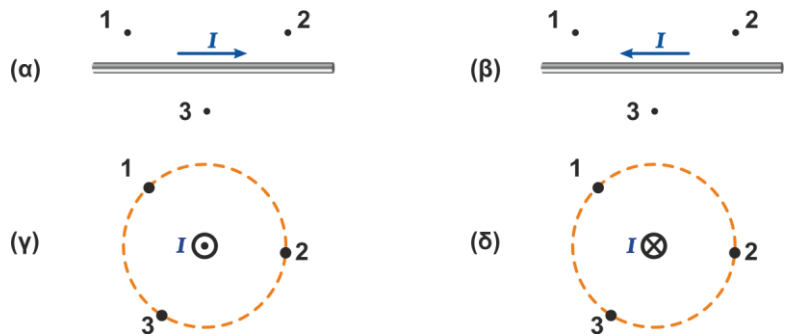
Εικόνα 4-20

Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, είναι ανάλογο με την ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό και φθίνει με την απόσταση από τον αγωγό (εικόνα 4-20).



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

4.5.1. Να σχεδιάσετε την ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου στις ακόλουθες περιπτώσεις:



Εικόνα 4-21

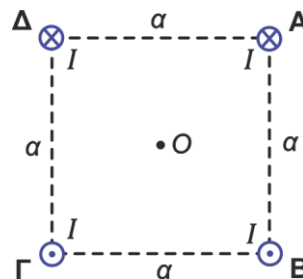
Όταν η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας χρησιμοποιήστε το συμβολισμό \otimes και \odot .

4.5.2. Να σημειώσετε τη συμβατική φορά της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον κάθε αγωγό στις εικόνες (α) και (β). Ο αγωγός είναι κάθετος στην σελίδα. Χρησιμοποιήστε το συμβολισμό \otimes και \odot .



Εικόνα 4-22

4.5.3. Τέσσερις μεγάλου μήκους αγωγοί, διέρχονται από τις κορυφές ενός τετραγώνου πλευράς a και διαρρέονται από ρεύμα έντασης I κάθετα στο επίπεδο της σελίδας, με τη φορά που φαίνεται στην εικόνα 4-23.



Εικόνα 4-23

Αν το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου του κάθε αγωγού στο σημείο O είναι $|\vec{B}|$, να υπολογίσετε, συναρτήσει του $|\vec{B}|$, το μέτρο και τη φορά του συνολικού μαγνητικού πεδίου στο σημείο O .

4.5.4. Στην εικόνα 4-24 φαίνονται τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες, δύο ευθύγραμμοι αγωγοί, πολύ μεγάλου μήκους, διαρρέονται ηλεκτρικό ρεύμα ίδιας έντασης. Η φορά του ρεύματος σε κάθε αγωγό καθορίζεται στο σχήμα. Το σημείο P σε καθεμιά από τις τέσσερις περιπτώσεις απέχει την ίδια απόσταση και από τους δύο αγωγούς.



Εικόνα 4-24

Σε ποια ή ποιες από τις τέσσερις περιπτώσεις το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο σημείο P είναι μηδέν;

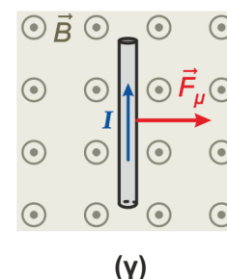
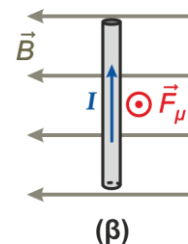
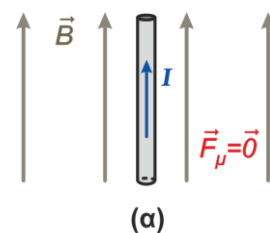
- A.** Στις 2 και 4, **B.** Στην 1 μόνο, **Γ.** Στην 2 μόνο,
Δ. Στις 2 και 3, **Ε.** Στις 3 και 4

4.6 Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Νόμος Laplace

Όπως έχουμε δει, κάθε μαγνητικό πεδίο, έχει την ιδιότητα να ασκεί μαγνητική δύναμη σε άλλους μαγνήτες στο χώρο. Επομένως, ένα μαγνητικό πεδίο θα ασκεί μαγνητική δύναμη και σε ένα ρευματοφόρο αγωγό⁶ που βρίσκεται εντός του πεδίου.

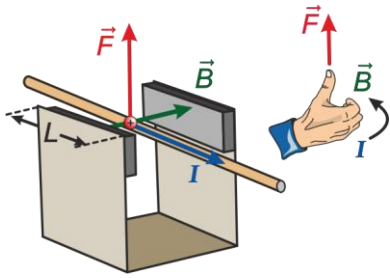
Στο εικόνα 4-25 απεικονίζεται ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς.

- Όταν η διεύθυνση της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλη με τον αγωγό δεν ασκείται δύναμη σε αυτόν (εικόνα 4-25α).
- Όταν η διεύθυνση της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετη στον αγωγό (εικόνα 4-25β,γ) παρατηρούμε ότι, η διεύθυνση της δύναμης που ασκείται στον αγωγό από το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετη και στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου \vec{B} και στη διεύθυνση του αγωγού.
- Για να καθορίσουμε τη φορά της μαγνητικής δύναμης εφαρμόζουμε τον ακόλουθο **κανόνα δεξιού χεριού**:
 - Τοποθετούμε τα τεντωμένα δάκτυλα του δεξιού χεριού, έτσι ώστε να δείχνουν την φορά της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει τον ευθύγραμμο αγωγό.
 - Στη συνέχεια τα λυγίζουμε προς την ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου, από την μικρότερη γωνία.

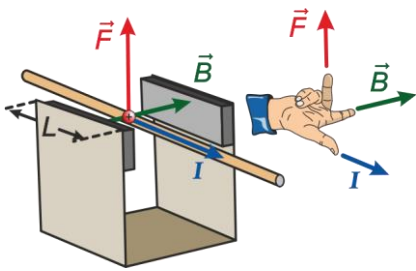


Εικόνα 4-25

⁶ Το μαγνητικό πεδίο του ρευματοφόρου αγωγού είναι μικρό για να μην επηρεάζει το υφιστάμενο μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 4-26



Εικόνα 4-27

- Ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά της δύναμης που δέχεται ο αγωγός, (εικόνα 4-26).

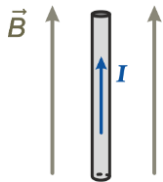
• Η φορά της δύναμης, μπορεί να βρεθεί και από τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, ως ακολούθως:

Τεντώνουμε τον δείκτη, τον αντίχειρα και το μεσαίο δάκτυλο έτσι ώστε να σχηματίζουν τρισορθογώνιο σύστημα.

- Τοποθετούμε τον δείκτη έτσι ώστε να δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου \vec{B} .

- Τον αντίχειρα έτσι ώστε να δείχνει την φορά της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος

- Τότε το μεσαίο δάκτυλο δείχνει τη φορά της δύναμης \vec{F} , (Εικόνα 4-27).



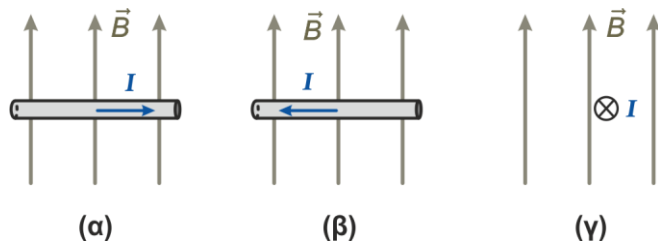
Εικόνα 4-28



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

4.6.1. Στην εικόνα 4-28 ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, παράλληλα προς τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Να αναφέρετε αν ασκείται μαγνητική δύναμη στον αγωγό και τι θα συμβεί αν αντιστραφεί η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

4.6.2. Τρία ίδια καλώδια που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό, διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα ίδιας έντασης και βρίσκονται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} , όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

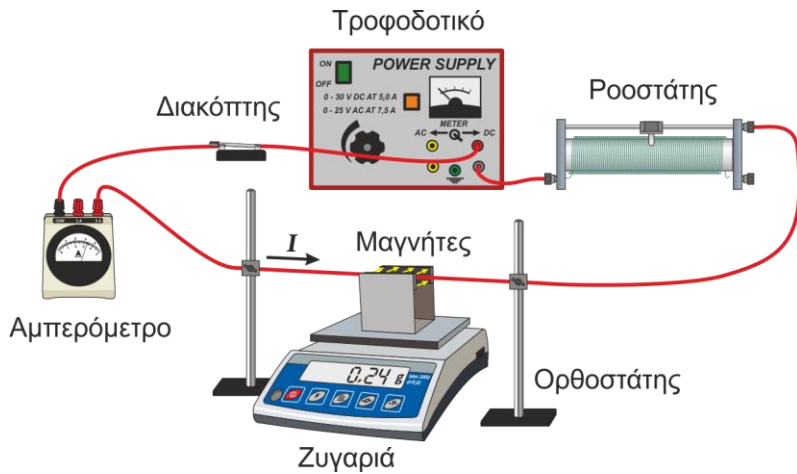


Εικόνα 4-29

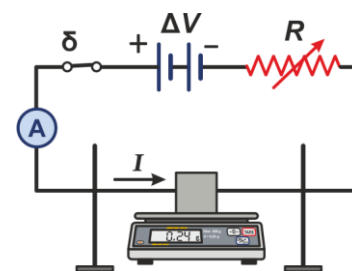
Να σχεδιάσετε την μαγνητική δύναμη που δέχεται ο ρευματοφόρος αγωγός σε κάθε περίπτωση.

Παράγοντες που καθορίζουν το μέτρο της δύναμης σε ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Για να μελετήσουμε τους παράγοντες που καθορίζουν το μέτρο της δύναμης που δέχεται ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιούμε την πειραματική διάταξη της εικόνας 4-30.



Εικόνα 4-30



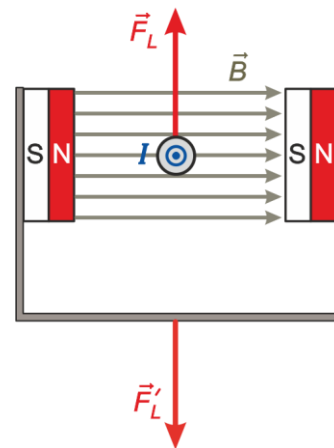
Εικόνα 4-31

Το κύκλωμα αποτελείται από την πηγή και τον ευθύγραμμο αγωγό, ο οποίος τοποθετείται στο εσωτερικό ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, που δημιουργείται με την κατάλληλη διάταξη μαγνητών. Στο κύκλωμα συμπεριλαμβάνεται ένας ροοστάτης με τον οποίο μεταβάλλεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, ένα αμπερόμετρο και ένας διακόπτης. Η βάση με τους μαγνήτες τοποθετείται πάνω σε μια ηλεκτρονική ζυγαριά και ο αγωγός τοποθετείται παράλληλα με τη βάση, έτσι ώστε να τέμνει κάθετα τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του ομογενούς πεδίου, χωρίς να ακουμπά τους μαγνήτες ή τη βάση.

Η ένδειξη της ζυγαριάς είναι ανάλογη με το μέτρο της κάθετης δύναμης που της ασκείται από το αντικείμενο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Στην περίπτωση που το κύκλωμα είναι ανοιχτό και δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η ένδειξη της ζυγαριάς αντιστοιχεί στην κάθετη δύναμη που της ασκεί το σύστημα βάση – μαγνήτες, η οποία ισούται με το συνολικό βάρος της βάσης με τους μαγνήτες, εφόσον το σύστημα ισορροπεί πάνω στη ζυγαριά. Επομένως, όταν η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν, η ένδειξη της ζυγαριάς ισούται με τη συνολική μάζα της βάσης με τους μαγνήτες.

Όταν το κύκλωμα κλείσει, ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I και το μαγνητικό πεδίο ασκεί στο τμήμα του αγωγού, που βρίσκεται στο εσωτερικό του, δύναμη κάθετη στη διεύθυνση του αγωγού και του μαγνητικού πεδίου με φορά μακριά από τη ζυγαριά. Κατά συνέπεια, λόγω δράσης – αντίδρασης, το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου αγωγού ασκεί με τη σειρά του μια δύναμη ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς στο σύστημα της βάσης με τους μαγνήτες, και παρατηρούμε ότι η ένδειξη της ζυγαριάς αυξάνεται.

Η ζυγαριά εξακολουθεί να καταγράφει την κάθετη δύναμη που της ασκεί το σύστημα βάση – μαγνήτες. Επειδή το σύστημα της βάσης με τους



Εικόνα 4-32: Η δύναμη \vec{F}'_L είναι η αντίδραση της δύναμης Laplace \vec{F}_L που δέχεται ο ρευματοφόρος αγωγός από τη διάταξη των μαγνητών και προκαλεί αύξηση της κάθετης δύναμης επαφής μεταξύ της ζυγαριάς και της μεταλλικής βάσης με αποτέλεσμα την αύξηση της ένδειξης της ζυγαριάς.

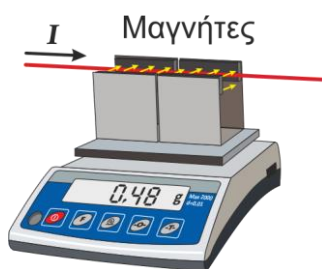
μαγνήτες ισορροπεί, το μέτρο της κάθετης δύναμης ισούται με το άθροισμα των μέτρων του βάρους και της μαγνητικής δύναμης από τον αγωγό.

Η διαφορά της φαινόμενης μάζας που καταγράφει η ζυγαριά από την συνολική μάζα του συστήματος βάση – μαγνήτες είναι ανάλογη με το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκεί το μαγνητικό πεδίο του αγωγού στη βάση με τους μαγνήτες και ισούται με το μέτρο της δύναμης που ασκεί το ομογενές μαγνητικό πεδίο στο τμήμα του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται στο εσωτερικό του.

Παρατήρηση

Εάν μηδενιστεί η ένδειξη της ζυγαριάς όταν τοποθετηθεί πάνω της η βάση με τους μαγνήτες, τότε η ζυγαριά θα καταγράφει μόνο την μάζα που αντιστοιχεί στην μαγνητική δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο του αγωγού στη βάση με τους μαγνήτες.

Αν η ένδειξη είναι θετική (+) τότε η δύναμη που δέχονται οι μαγνήτες έχει φορά προς τα κάτω, άρα ο αγωγός δέχεται από το μαγνητικό πεδίο δύναμη με φορά προς τα πάνω. Ενώ αν η ένδειξη είναι αρνητική (–) τότε η δύναμη που δέχονται οι μαγνήτες έχει φορά προς τα πάνω, άρα ο αγωγός δέχεται από το μαγνητικό πεδίο δύναμη με φορά προς τα κάτω.



Εικόνα 4-33

- Αν αυξήσουμε την ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό παρατηρούμε ότι η ένδειξη της ζυγαριάς αυξάνεται.
- Αν αντικαταστήσουμε το σύστημα των μαγνητών με πιο ισχυρούς μαγνήτες έτσι ώστε να αυξήσουμε το μέτρο της έντασης $|\vec{B}|$ του ομογενούς μαγνητικού πεδίου, παρατηρούμε ότι η ένδειξη της ζυγαριάς αυξάνεται.
- Αν αυξήσουμε το μήκος L του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, προσθέτοντας μια βάση δίπλα από την άλλη (εικόνα 4-33), παρατηρούμε ότι η ένδειξη της ζυγαριάς αυξάνεται.



Εικόνα 4-34

Επομένως, το μέτρο της δύναμης που δέχεται ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, κάθετος μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο⁷ εξαρτάται από την ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος, το μέτρο $|\vec{B}|$ της έντασης του μαγνητικού πεδίου και το μήκος L του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$|\vec{F}_L| = |\vec{B}|IL$$

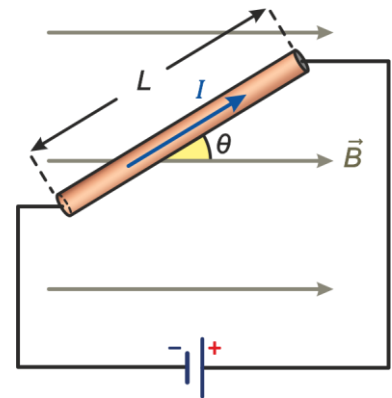
Συνεπώς, ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης 1 T, ασκεί δύναμη ενός 1 N πάνω σε ένα κυλινδρικό αγωγό μήκους 1 m και σταθερής διατομής, που διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασης 1 A, και είναι τοποθετημένος κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Η δύναμη αυτή αναφέρεται και ως **δύναμη Laplace** από τον Γάλλο μαθηματικό Pierre - Simon Laplace (Πιερ Σιμόν Λαπλάς) (1749 – 1827) (εικόνα 4-34).

⁷ Στο μαγνητικό πεδίο δεν συμπεριλαμβάνεται το μαγνητικό πεδίο του ρευματοφόρου αγωγού.

Η πιο πάνω σχέση δίνει τη μέγιστη δύναμη που δέχεται ο αγωγός από το μαγνητικό πεδίο επειδή η διεύθυνση του ρεύματος είναι κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Όπως έχουμε δει πιο πάνω (εικόνα 4-25) όταν το ρεύμα έχει την ίδια διεύθυνση με το μαγνητικό πεδίο, δεν ασκείται δύναμη Laplace στον αγωγό. Συνεπώς η γωνία θ μεταξύ του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου πρέπει να επηρεάζει το μέτρο της δύναμης Laplace έτσι ώστε όταν είναι ίση με 90° η δύναμη Laplace να γίνεται μέγιστη ενώ όταν είναι 0° ή 180° , η δύναμη Laplace να μηδενίζεται. Στη γενική περίπτωση που ο αγωγός σχηματίζει γωνία θ με το μαγνητικό πεδίο (εικόνα 4-35), τότε μόνον η κάθετη στον αγωγό συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου του ασκεί δύναμη Laplace, οπότε η πιο πάνω σχέση τροποποιείται στη σχέση:

$$|\vec{F}_L| = |\vec{B}|IL \eta \mu\theta$$



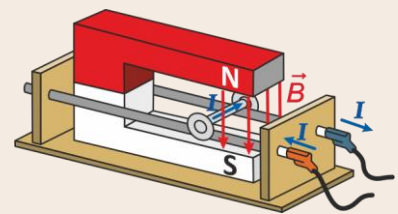
Εικόνα 4-35

Παράδειγμα 1

Ένας ισχυρός πεταλοειδής μαγνήτης βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων σταθερών μεταλλικών ράβδων. Μεταξύ των οπλισμών του μαγνήτη δημιουργείται ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης μέτρου $0,3 \text{ T}$ με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των μεταλλικών ράβδων. Τρίτη ράβδος, μήκους 5 cm μπορεί να κινείται πάνω στις άλλες δύο ράβδους με αμελητέα τριβή.

Η δύναμη που δέχεται από το μαγνητικό πεδίο η τρίτη ράβδος όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης $1,5 \text{ A}$ έχει μέτρο:

$$|\vec{F}| = |\vec{B}|IL = (0,3 \text{ T}) \times (1,5 \text{ A}) \times (0,05 \text{ m}) = 0,0225 \text{ N}$$

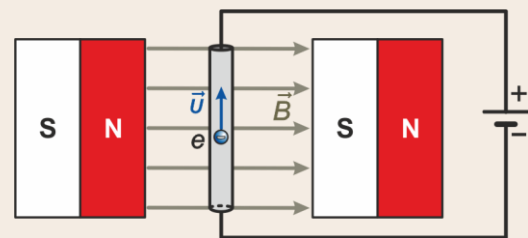


Εικόνα 4-36

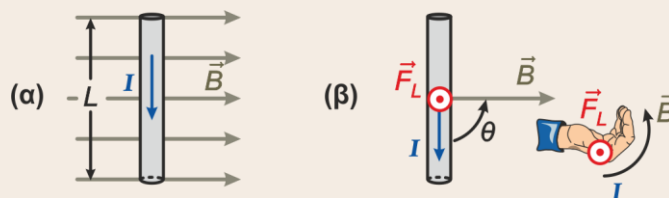
Παράδειγμα 2

Να προσδιορίσετε την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στον ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα στο ομογενές μαγνητικό πεδίο του σχήματος.

- Πρώτα καθορίζουμε τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αντίθετη από τη φορά ολίσθησης των ηλεκτρονίων σε ένα αγωγό, και έχει φορά από τον θετικό (+) προς τον αρνητικό (-) πόλο της μπαταρίας (σχήμα 4-38α).



Εικόνα 4-37



Εικόνα 4-38

- Σχεδιάζουμε την φορά του ηλεκτρικού ρεύματος I και την ένταση του μαγνητικού πεδίου \vec{B} με κοινή αρχή και προσδιορίζουμε τη γωνία ανάμεσα στις διευθύνσεις τους. Υπάρχουν δύο γωνίες και διαλέγουμε τη μικρότερη.

- Υπολογίζουμε το μέτρο της δύναμης που θα ασκηθεί πάνω στον ευθύγραμμο αγωγό από τη σχέση:

$$|\vec{F}| = |\vec{B}|IL$$

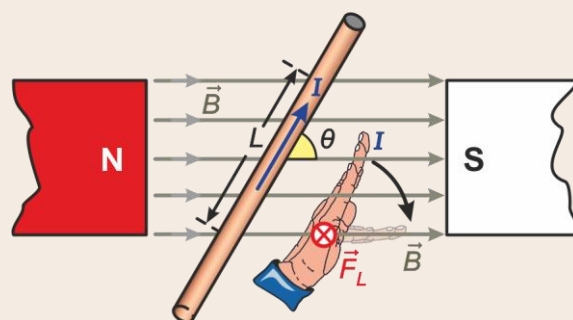
- Η διεύθυνση της δύναμης είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζει ο αγωγός και η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή στην περίπτωση μας, κάθετη στο επίπεδο της σελίδας.
- Η φορά της δύναμης προσδιορίζεται με τον κανόνα της δεξιάς παλάμης. Δηλαδή, λυγίζουμε τα δάκτυλα μας κατά τη φορά του τόξου, από το I προς το \vec{B} . Ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά της δύναμης προς τον αναγνώστη (εικόνα 4-38β).

Παράδειγμα 3

Ένας λεπτός κυλινδρικός αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης 30 A. Ένα τμήμα του αγωγού μήκους $L = 12,0$ cm βρίσκεται μεταξύ των πόλων ενός μαγνήτη.

Ο αγωγός σχηματίζει γωνία $\theta = 60^\circ$ με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-39.

Αν το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι $|\vec{B}| = 0,90$ T και το πεδίο θεωρείται ομογενές στο χώρο μεταξύ των πόλων και μηδενικό έξω από αυτόν, *να υπολογίσετε το μέτρο και την κατεύθυνση της δύναμης Laplace, που ασκείται στον αγωγό.*



Εικόνα 4-39

- Υπολογίζουμε το μέτρο της δύναμης που θα ασκηθεί πάνω στον ευθύγραμμο αγωγό από τη σχέση:

$$|\vec{F}| = |\vec{B}|IL \eta \mu \theta$$

$$|\vec{F}| = |\vec{B}|IL \eta \mu \theta \Rightarrow |\vec{F}| = (0,90 \text{ T}) \times (30 \text{ A}) \times (0,12 \text{ m}) \times \eta \mu 60^\circ \Rightarrow |\vec{F}| = 2,8 \text{ N}$$

- Η διεύθυνση της δύναμης είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζει ο αγωγός και η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή στην περίπτωση μας, κάθετη στο επίπεδο της σελίδας.
- Η φορά της δύναμης προσδιορίζεται με τον κανόνα της δεξιάς παλάμης. Δηλαδή, λυγίζουμε τα δάκτυλα μας κατά τη φορά του τόξου, από το I προς το \vec{B} . Ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά της δύναμης προς τον αναγνώστη (εικόνα 4-39).



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

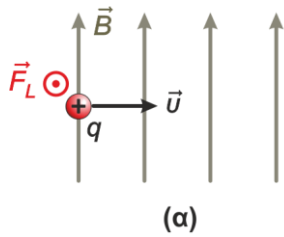
- 4.6.3.** Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου \vec{B} και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I . Ποιο ή ποια από τα επόμενα είναι ορθά:
- α)** Αν ο άξονας του αγωγού είναι παράλληλος με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του πεδίου η μαγνητική δύναμη είναι μηδενική.
 - β)** Αν αντιστραφεί η φορά του μαγνητικού πεδίου αντιστρέφεται και η φορά της δύναμης.
 - γ)** Αν αυξηθεί το μέτρο του μαγνητικού πεδίου, το μέτρο της δύναμης που ασκείται στον αγωγό αυξάνεται.
- 4.6.4.** Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός δέχεται δύναμη από το μαγνητικό πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη, και εκτρέπεται. Να εξηγήσετε αν ο αγωγός ασκεί δύναμη στον μαγνήτη.

4.7 Κινούμενο φορτίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ηλεκτρομαγνητική Δύναμη Lorentz

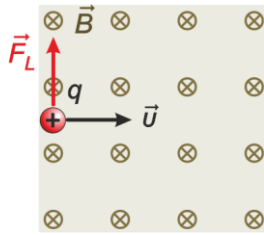
Έχουμε αναφέρει ότι ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο αποτελεί πηγή μαγνητικού πεδίου.

Όταν κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο σε διεύθυνση που τέμνει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, τότε δέχεται δύναμη από το μαγνητικό πεδίο.

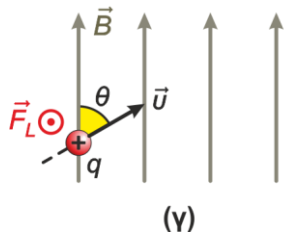
Στις εικόνες 4-40α και 4-40β φαίνεται ένα θετικό φορτίο που κινείται κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Σε αυτήν την περίπτωση:



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 4-40

- Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο της απόλυτης τιμής του φορτίου (q), του μέτρου της ταχύτητας \vec{v} του φορτίου και του μέτρου της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου, και εκφράζεται από τη σχέση:

$$|\vec{F}| = |q||\vec{v}||\vec{B}|$$

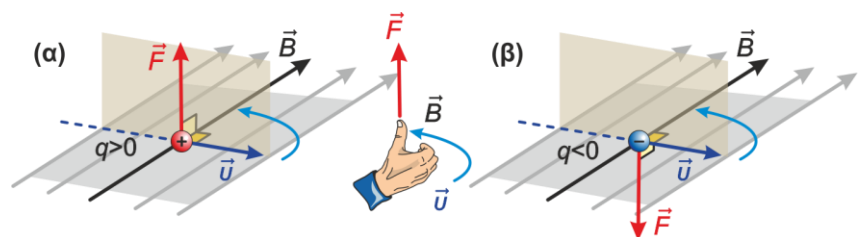
Η δύναμη είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν η ταχύτητα \vec{v} και η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου.

- Στην γενικότερη περίπτωση που η κατεύθυνση της ταχύτητας σχηματίζει γωνία θ με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (εικόνα 4-40 γ) η δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$|\vec{F}| = |q||\vec{v}||\vec{B}|\eta\mu\theta$$

- Η φορά της δύναμης, καθορίζεται από τον **κανόνα του δεξιού χεριού**, ως ακολούθως:

Τοποθετούμε τα λυγισμένα δάκτυλα της παλάμης του δεξιού χεριού, έτσι ώστε να δείχνουν την φορά περιστροφής της ταχύτητας \vec{v} προς την ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου. Ο τεντωμένος



Εικόνα 4-41

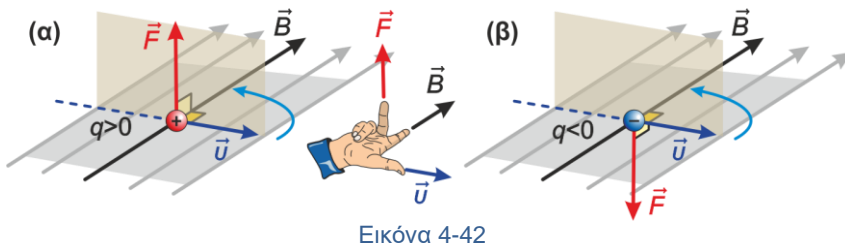
αντίχειρας δείχνει τη φορά της δύναμης που δέχεται ένα θετικό φορτίο (εικόνα 4-41α) ενώ για ένα αρνητικό φορτίο (εικόνα 4-41β) η φορά της δύναμης είναι αντίθετη.

- Η φορά της δύναμης, μπορεί να βρεθεί και από τον **κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού**, ως ακολούθως:

Τεντώνουμε τον δείκτη, τον αντίχειρα και το μεσαίο δάκτυλο έτσι ώστε να σχηματίζουν τρισορθογώνιο σύστημα.

- Τοποθετούμε τον δείκτη έτσι ώστε να δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου \vec{B} .
- Τον αντίχειρα έτσι ώστε να δείχνει την φορά της ταχύτητας \vec{v} .

- Τότε το μεσαίο δάκτυλο δείχνει τη φορά της δύναμης \vec{F} , αν το φορτίο είναι θετικό (Εικόνα 4-42α). Αν το φορτίο είναι αρνητικό παίρνουμε την αντίθετη φορά (εικόνα 4-42β).



Εικόνα 4-42

Η δύναμη που δέχεται ένα κινούμενο φορτίο εντός μαγνητικού πεδίου ονομάζεται **μαγνητική δύναμη**.

Έργο μαγνητικής δύναμης σε κινούμενο φορτίο.

Ένα φορτίο q κινείται με ταχύτητα \vec{v} και εισέρχεται κάθετα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} . Το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με κατεύθυνση προς τον αναγνώστη (εικόνα 4-43). Η δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρικό φορτίο είναι κάθετη και στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και στην διεύθυνση της ταχύτητας. Αφού η δύναμη είναι συνεχώς κάθετη στην ταχύτητα, τότε θα είναι κάθετη και στην μετατόπιση, επομένως, εξ' ορισμού το έργο της μαγνητικής δύναμης είναι μηδέν.

$$\vec{v} \parallel \Delta\vec{r} \Rightarrow \vec{F} \perp \Delta\vec{r} \Leftrightarrow W_{\vec{F}} = 0$$

Επομένως, από το θεώρημα έργου – κινητικής ενέργειας, το μέτρο της ταχύτητας του ηλεκτρικού φορτίου παραμένει σταθερό, και συνεπώς η επιτάχυνση του φορτίου είναι κάθετη στην ταχύτητα του.

$$|\vec{v}| = \text{σταθερή} \Leftrightarrow \vec{a} \perp \vec{v}$$

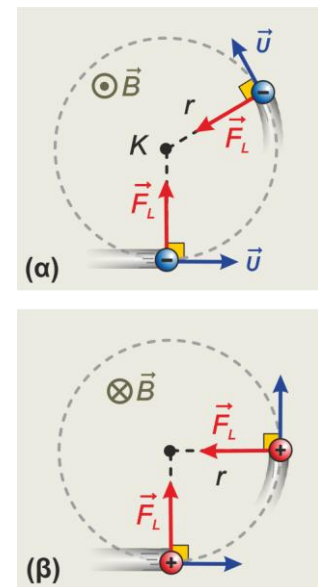
Από την πιο πάνω σχέση, συμπεραίνουμε ότι η επιτάχυνση είναι κεντρομόλος, με ακτινική διεύθυνση και φορά προς το κέντρο της κυκλικής τροχιάς που διαγράφει το φορτίο.

Συμπέρασμα: Ένα ηλεκτρικό φορτίο που εισέρχεται κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση, όπου η μαγνητική δύναμη επιδρά ως κεντρομόλος.

$$|\vec{F}_L| = |\vec{F}_κ|$$

Χρησιμοποιώντας, τη γνωστή σχέση για το μέτρο της κεντρομόλου δύναμης, υπολογίζουμε την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς που ακολουθεί το ηλεκτρικό φορτίο q , μάζας m , που εισέρχεται κάθετα σε μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} με ταχύτητα \vec{v} .

$$|\vec{F}_L| = |\vec{F}_κ| \Rightarrow |q|v|\vec{B}| = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m|v|}{|q|\vec{B}}$$



Εικόνα 4-43. Αν το μαγνητικό πεδίο έχει μεγάλη έκταση, και το σωματίδιο βάλλεται στο εσωτερικό του, τότε το σωματίδιο θα διαγράψει ολόκληρη περιφέρεια.

Παράδειγμα 1

Ένα σωματίδιο α (άλφα) κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, κάθετα στις μαγνητικές γραμμές. Στη θέση P το μαγνητικό πεδίο έχει ένταση μέτρου 0,5 T και διεύθυνση κάθετη στην σελίδα του βιβλίου. Το σωματίδιο κινείται με ταχύτητα 3 km/s. *Να υπολογίσετε το μέτρο της δύναμης που δέχεται το σωματίδιο από το μαγνητικό πεδίο, στη θέση P και να προσδιορίσετε την κατεύθυνση της.*



Εικόνα 4-44

Το σωματίδιο α έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο $q = +2e$.

• 1η περίπτωση:

Η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου στη θέση P είναι κάθετη στη σελίδα του βιβλίου και έχει φορά προς τα έξω.

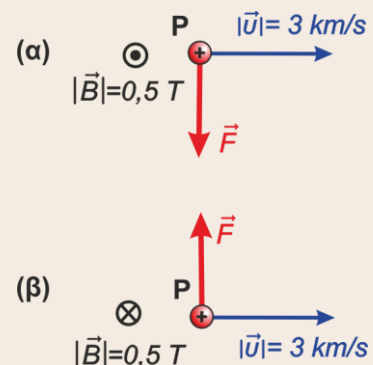
Η δύναμη είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν οι διευθύνσεις των \vec{v} και \vec{B} , και καθορίζεται από τον κανόνα της δεξιάς παλάμης (εικόνα 4-45α).

• 2η περίπτωση:

Η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου στη θέση P είναι κάθετη στη σελίδα του βιβλίου και έχει φορά προς τα μέσα.

Το διάνυσμα σχεδιάζεται με \otimes (εικόνα 4-45β).

Η δύναμη είναι κάθετη στο επίπεδο των \vec{v} και \vec{B} , με φορά προς τα πάνω, όπως καθορίζεται από τον κανόνα της δεξιάς παλάμης.



Εικόνα 4-45

Και στις δύο περιπτώσεις το μέτρο της δύναμης ισούται με:

$$|\vec{F}_\alpha| = |q||\vec{v}||\vec{B}| = 2 \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times \left(3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times (0,5 \text{ T}) = 4806 \times 10^{-19} \text{ N}$$

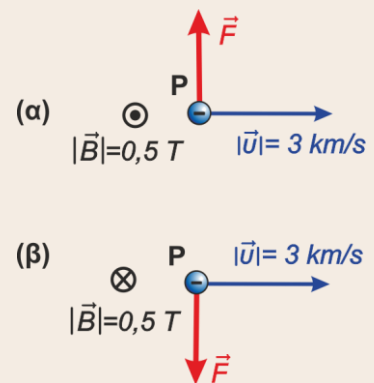
Παράδειγμα 2

Να προσδιορίσετε τη δύναμη (μέτρο και κατεύθυνση) που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο με την ίδια ταχύτητα στο ίδιο σημείο του πεδίου. Το ηλεκτρόνιο έχει αρνητικό φορτίο, επομένως η δύναμη που δέχεται έχει την ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά.

Στο σχήμα (4-46α) φαίνεται η δύναμη όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει φορά προς τα έξω, ενώ στο σχήμα (4-46β) φαίνεται η δύναμη όταν η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου έχει φορά προς τα μέσα.

Το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου είναι κατ' απόλυτη τιμή το μισό του φορτίου του σωματιδίου άλφα (α) και συνεπώς το μέτρο της δύναμης θα είναι το μισό.

$$|\vec{F}_e| = \frac{|\vec{F}_\alpha|}{2} = 2403 \times 10^{-19} \text{ N}$$



Εικόνα 4-46

Παράδειγμα 3

Ένα ηλεκτρόνιο εισέρχεται με ταχύτητα μέτρου $3,2 \times 10^5$ m/s, κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης $2,2 \times 10^{-1}$ T όπως φαίνεται στην εικόνα 4-47.

Να υπολογίσετε τη μαγνητική δύναμη Lorentz που ασκείται στο ηλεκτρόνιο.

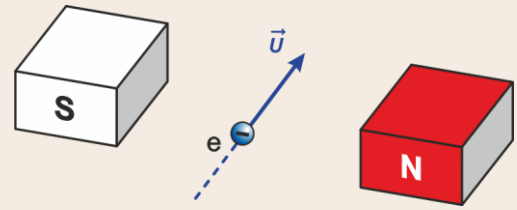
Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι από τον βόρειο (N) πόλο του μαγνήτη προς τον Νότιο πόλο (S) του μαγνήτη.

- Σχεδιάζουμε τα διανύσματα \vec{v} και \vec{B} με κοινή αρχή και προσδιορίζουμε τη γωνία ανάμεσα στις διευθύνσεις τους. Υπάρχουν δύο γωνίες και διαλέγουμε τη μικρότερη ($0 \leq \theta \leq 180^\circ$).

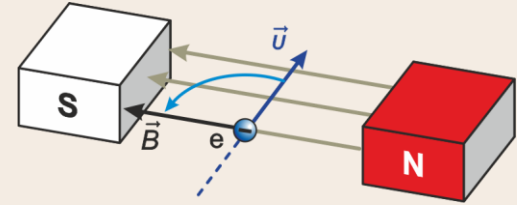
- Υπολογίζουμε το μέτρο της δύναμης από τη σχέση:

$$|\vec{F}| = |q||\vec{v}||\vec{B}| = (1,602 \times 10^{-19}\text{C}) \times (3,2 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}) \times (2,2 \times 10^{-1}\text{T}) = 1,13 \times 10^{-14}\text{N}$$

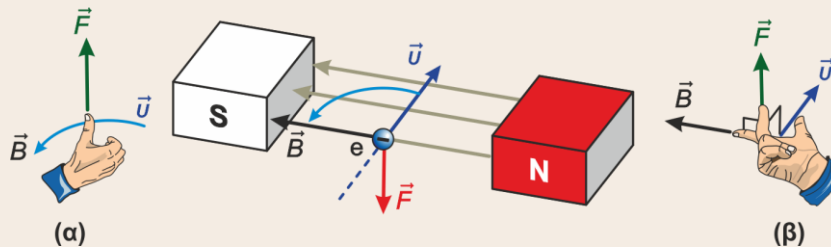
- Η διεύθυνση της δύναμης είναι κάθετη στο επίπεδο των \vec{v} και \vec{B} . Στην περίπτωση μας η δύναμη έχει κατακόρυφη διεύθυνση.
- Η φορά της δύναμης για ένα θετικό φορτίο προσδιορίζεται είτε με τον κανόνα της δεξιάς παλάμης (εικόνα 4-49α), είτε με τον κανόνα των τριών δακτύλων (εικόνα 4-49β) και είναι προς τα πάνω.
- Επειδή όμως το ηλεκτρικό φορτίο είναι αρνητικό, η φορά της μαγνητικής δύναμης θα είναι αντίθετη, δηλαδή προς τα κάτω.



Εικόνα 4-47



Εικόνα 4-48

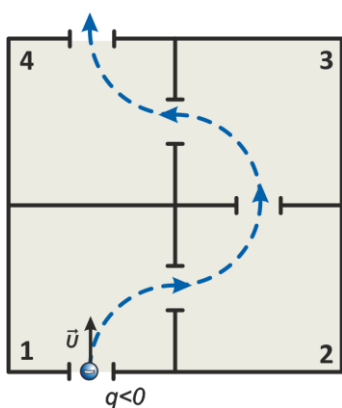


Εικόνα 4-49



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 4.7.1. Ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο, βρίσκεται ακίνητο κοντά σε ένα ρευματοφόρο αγωγό. Ασκείται μαγνητική δύναμη στο φορτίο από τον αγωγό;
- 4.72. Να απαντήσετε **Σωστό / Λάθος** για τις ακόλουθες προτάσεις.
- α) Ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται κάθετα μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} . Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στο φορτίο εξαρτάται από:
- Το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου.
 - Το είδος του ηλεκτρικού φορτίου.
 - Το μέτρο της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου.
 - Το μέτρο της ταχύτητας του ηλεκτρικού φορτίου.
- β) Ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο εισέρχονται με ίσες ταχύτητες κάθετα στη διεύθυνση ενός μαγνητικού πεδίου.
- Οι μαγνητικές δυνάμεις στα δύο σωματίδια είναι ίσες.
 - Οι μαγνητικές δυνάμεις στα δύο σωματίδια είναι αντίθετες.
 - Η μαγνητική δύναμη που ασκείται στα δύο σωματίδια έχει ίδιο μέτρο.
 - Η μαγνητική δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο έχει μεγαλύτερο μέτρο από την αντίστοιχη δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο.



Εικόνα 4-50

- 4.7.3. Στην εικόνα 4-50 φαίνεται η κάτοψη μιας διάταξης τεσσάρων συνδεδεμένων θαλάμων. Ένα αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο εκτοξεύεται στο θάλαμο 1 στη κατεύθυνση που δείχνει το σχήμα. Να προσδιορίσετε την κατεύθυνση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου στον κάθε θάλαμο ώστε το σωματίδιο να εξέλθει από τον θάλαμο 4.
- 4.7.4. Η μαγνητική δύναμη που δέχεται ένα αρνητικό φορτίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι αντίθετη της δύναμης που δέχεται ένα ίδιο θετικό φορτίο. Να εξηγήσετε, γιατί η μαγνητική δύναμη που ασκείται σε ένα ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε μαγνητικό πεδίο, έχει την ίδια κατεύθυνση είτε θεωρήσουμε την κίνηση των θετικών φορτίων (συμβατική φορά ρεύματος) ή την κίνηση των ηλεκτρονίων.

4.7.5. Ποιες από τις πιο κάτω προτάσεις για τη δύναμη που ασκείται σε φορτισμένο σωματίδιο, το οποίο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι ορθές;

- A.** Η μαγνητική δύναμη ασκείται μόνον όταν το σωματίδιο κινείται σε διεύθυνση διαφορετική από αυτήν του μαγνητικού πεδίου.
- B.** Η δύναμη γίνεται μέγιστη, όταν το σωματίδιο κινείται προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.
- Γ.** Η μαγνητική δύναμη αυξάνει την κινητική ενέργεια του σωματιδίου.
- Δ.** Η διεύθυνση της δύναμης είναι ίδια με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.
- E.** Το μαγνητικό πεδίο ασκεί πάντοτε δύναμη σε ένα φορτισμένο σωματίδιο.

4.7.6. Τρία σωματίδια ίδιας μάζας κινούνται με ταχύτητες ίδιου μέτρου, κάθετα με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου, σε τροχιές που είναι τμήματα κύκλων, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-51.

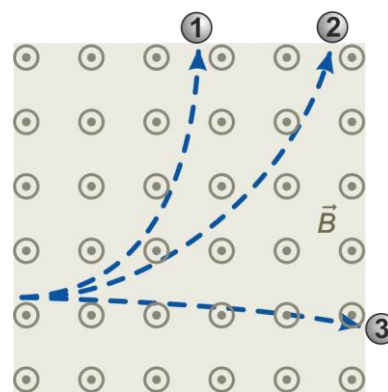
Τα σωματίδια έχουν την ίδια μάζα.

α) Να κατατάξετε τα σωματίδια σύμφωνα με την τιμή του φορτίου τους, από το μεγαλύτερο στο μικρότερο.

A. 3, 2, 1 **B.** 3, 1, 2 **Γ.** 2, 3, 1 **Δ.** 1, 3, 2 **E.** 1, 2, 3

β) Με βάση τον κανόνα της δεξιάς παλάμης να προσδιορίσετε το πρόσημο του φορτίου του κάθε σωματιδίου.

γ) Αν τα σωματίδια 1 και 2 είχαν το ίδιο φορτίο, ποιο από τα δύο έχει τη μεγαλύτερη μάζα;



Εικόνα 4-51

ΕΝΘΕΤΟ: Ο Μεγάλος Συγκρουστήρας Αδρονίων (LHC)

Ο Μεγάλος Συγκρουστήρας Αδρονίων (Large Hadron Collider, LHC) είναι ο μεγαλύτερος και πιο ισχυρός επιταχυντής στον κόσμο. Ξεκίνησε τη λειτουργία του στις 10 Σεπτεμβρίου 2008 και αποτελεί την τελευταία προσθήκη στο σύμπλεγμα επιταχυντών του CERN (Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών). Ο LHC αποτελείται από έναν υπόγειο δακτύλιο με περίμετρο 27 km με υπεραγωγίμους μαγνήτες και ισχυρά ηλεκτρικά πεδία που αυξάνουν την ενέργεια των σωματιδίων, καθώς κινούνται μέσα σ' αυτόν.

Μέσα στον επιταχυντή, δύο δέσμες σωματιδίων υψηλής ενέργειας, κινούνται με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός μέχρι να συγκρουστούν. Οι δέσμες ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, μέσα σε διαφορετικούς σωλήνες, οι οποίοι κρατούνται σε συνθήκες υπέρ-υψηλού κενού. Τα σωματίδια καθοδηγούνται μέσα στον δακτύλιο του επιταχυντή από ισχυρά μαγνητικά πεδία, που παράγονται από υπεραγωγίμους ηλεκτρομαγνήτες, οι οποίοι αποτελούνται από πηνία κατασκευασμένα από ειδικά καλώδια που λειτουργούν σε υπεραγωγίμη κατάσταση, επιτρέποντας τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος χωρίς αντίσταση ή απώλεια ενέργειας. Αυτό απαιτεί την ψύξη των μαγνητών σε θερμοκρασία $-271,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, που είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του διαστήματος. Για τον λόγο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος του επιταχυντή συνδέεται με ένα σύστημα διανομής υγρού Ηλίου, το οποίο ψύχει τους μαγνήτες και άλλα συστήματα του επιταχυντή.



Εικόνα 4-52: Ο δακτύλιος διαμέτρου 27 km του LHC διέρχεται μέσα από τα Γάλλο-Ελβετικά σύνορα. Στο κάτω αριστερό μέρος της φωτογραφίας, διακρίνεται ο δίαυλος του αεροδρομίου της Γενεύης.

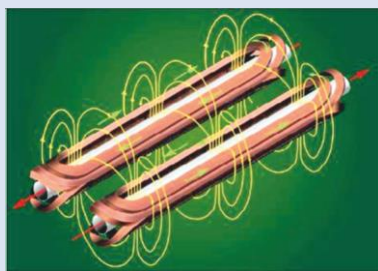
Χιλιάδες μαγνήτες διαφόρων σχημάτων και μεγεθών χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν τις δέσμες σωματιδίων μέσα στον δακτύλιο του επιταχυντή. Συγκεκριμένα, 1232 διπολικό μαγνήτες, μήκους 15 m ο καθένας, αλλάζουν την πορεία της δέσμης και την κρατούν σε κυκλική τροχιά ενώ 392 τετραπολικό μαγνήτες, 5-7 m ο καθένας, εστιάζουν τις δέσμες. Λίγο πριν την σύγκρουση, ένας άλλος τύπος μαγνήτη χρησιμοποιείται για να «συμπιέσει» τα σωματίδια ώστε να βρεθούν κοντά το ένα στο άλλο για να αυξηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των σωματιδίων των δύο δεσμών που κινούνται σε αντίθετες τροχιές. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την τάξη μεγέθους, η σύγκρουση μεταξύ δύο σωματιδίων από τις δύο δέσμες μοιάζει με την προσπάθεια να ευθυγραμμίσουμε δύο βελόνια που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 10 km έτσι ώστε να συγκρουστούν στη μέση της απόστασης.

Οι δέσμες σωματιδίων κατευθύνονται έτσι ώστε να συγκρουστούν σε τέσσερα σημεία στην περίμετρο του, στα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα τα ανιχνευτικά συστήματα ATLAS, CMS, ALICE και LHCb.

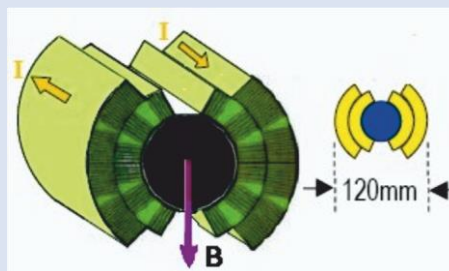
Διπολικός μαγνήτης

Το διπολικό μαγνητικό πεδίο παράγεται από υπεραγωγίμα καλώδια που περιτυλίγουν κατά μήκος την κάθε πλευρά του σωλήνα μέσα στον οποίο ταξιδεύουν τα πρωτόνια. Τα καλώδια τοποθετούνται σε ξεχωριστά, διπλά επίπεδα γύρω από κάθε σωλήνα, τυλιγμένα με αντίθετη φορά.

Αφού η διάμετρος του κάθε σωλήνα είναι 56 mm, η μέση απόσταση μεταξύ του καλωδίου και του κέντρου του σωλήνα είναι 45 mm.



Εικόνα 4-53



Εικόνα 4-54

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του κάθε σωλήνα, από το κάθε καλώδιο είναι περίπου 0,05 T και αφού χρειαζόμαστε 8,33 T, θα πρέπει το πηνίο να διαθέτει 160 περιελίξεις τοποθετημένες σε δύο επίπεδα παράλληλα με τον άξονα του σωλήνα.

Κάθε καλώδιο περιέχει 36 νήματα, διαμέτρου 0,825 mm το καθένα. Το κάθε νήμα αποτελείται από 6500 υπεραγωγίμες κλωστές.

Αφού ο κάθε διπολικός μαγνήτης έχει μήκος 15 m μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό μήκος L των υπεραγωγών του LHC.

$$L = (2 \times 1232 \times 160 \times 36 \times 6500 \times 15) \text{ m} \Rightarrow L = 1,38 \times 10^{12} \text{ m}$$

Αυτή η τιμή ισοδυναμεί με 9 φορές την απόσταση Ήλιου – Γης!



Εικόνα 4-55: Το μη μαγνητικό κολάρο που συγκρατεί τα πηνία του διπολικού ηλεκτρομαγνήτη.

Επειδή το ρεύμα στους αγωγούς σε κάθε πλευρά του σωλήνα, το συνολικό μαγνητικό πεδίο στον σωλήνα είναι προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι οι αγωγοί μεταξύ τους απωθούνται. Αν υπολογίσουμε τη δύναμη που ασκείται μεταξύ των αγωγών βρίσκουμε ότι είναι ίση με 2×10^6 N ανά μέτρο! Δηλαδή κατά τη λειτουργία του ηλεκτρομαγνήτη, μια τεράστια δύναμη μεταξύ των καλωδίων τείνει να τον ανοίξει στα δύο.

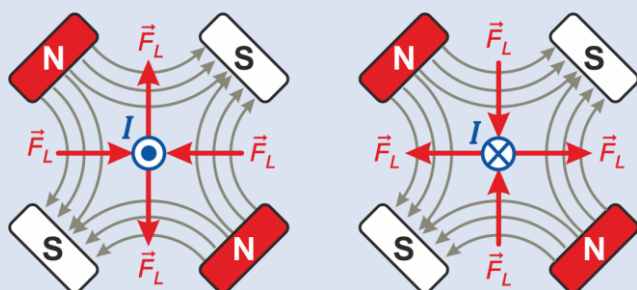
Για να συγκρατήσουν τον μαγνήτη ενωμένο, οι μηχανικοί κατασκεύασαν ένα κολάρο από μη μαγνητικό υλικό που περικλείνει τους αγωγούς (εικόνα 4-55).

Ο τετραπολικός μαγνήτης

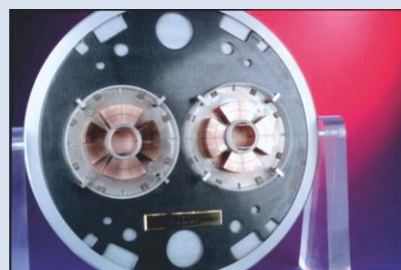
Εκτός από την ανάγκη καθοδήγησης της δέσμης σωματιδίων, για να παραμείνει σε κυκλική τροχιά, χρειάζεται να εστιαστεί γιατί, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι πιθανότητες σύγκρουσης είναι εξαιρετικά μικρές.

Η εστίαση της δέσμης κρατά τα σωματίδια μέσα στον σωλήνα κενού και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τετραπολικών μαγνητών.

Ένας τετραπολικός ηλεκτρομαγνήτης εστιάζει μια δέσμη φορτισμένων σωματιδίων προς έναν άξονα και την αποεστιάζει στον κάθετο άξονα. Ωστόσο, αν τοποθετήσουμε μερικούς τετραπολικούς μαγνήτες στη σειρά, μπορούμε να πετύχουμε μια καθαρή εστίαση της δέσμης και στις δύο κατευθύνσεις.



Εικόνα 4-56



Εικόνα 4-57

Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλά πρωτόνια και το καθένα έχει διαφορετική ενέργεια και ακολουθεί ελαφρώς διαφορετική πορεία γι' αυτό, χρειάζονται και λεπτότεροι χειρισμοί ώστε να επιτευχθεί καλύτερη εστίαση και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται και άλλοι πολύ-πολικό μαγνήτες (εξαπολικό, οκταπολικό κ.λπ.).

Πηγές βιβλιογραφίας και εικόνων:

How an accelerator works. (n.d.). Retrieved from <https://home.cern/science/accelerators/how-accelerator-works>

- The Large Hadron Collider. (n.d.). Retrieved from <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- Magnetic dipoles. (n.d.). Retrieved from https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.magnetic_dipoles
- Magnetic multipoles. (n.d.). Retrieved from https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.magnetic_multipoles
- Παπαφιλιππου, Γ. (n.d.). Εισαγωγή στη Φυσική των Επιταχυντών. Retrieved from https://indico.cern.ch/event/103360/contributions/1301236/attachments/11833/17301/greekteachers_2010.pdf

4.8 Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού

Σε προηγούμενη παράγραφο, έχουμε δει ότι το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, απεικονίζεται από μαγνητικές δυναμικές γραμμές που αντιστοιχούν σε συνεπίπεδους, ομόκεντρους κύκλους κατά μήκος του αγωγού.

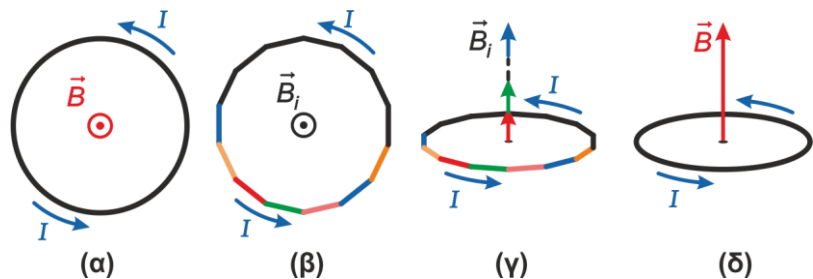
Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι γενικά ασθενές και φθίνει με την απόσταση από τον αγωγό.

Για παράδειγμα, σε ένα ευθύγραμμο αγωγό, μεγάλου μήκους, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης 50 A, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου, σε απόσταση 10 cm από τον αγωγό είναι 0,1 mT και σε απόσταση 1 m είναι 10 μ T. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης κοντά στην επιφάνειά της, είναι περίπου 50 μ T.

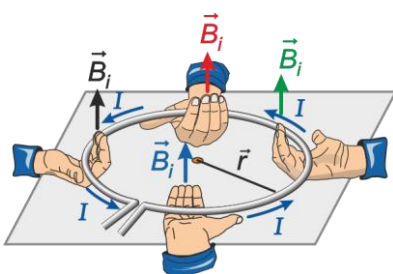
Αν λυγίσουμε τον αγωγό σε σχήμα κυκλικού βρόχου ακτίνας 1 m, τότε το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του κυκλικού βρόχου είναι περίπου 30 μ T, τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πεδίο του ευθύγραμμου αγωγού στην ίδια απόσταση.

Επομένως, για να δημιουργήσουμε πιο ισχυρά μαγνητικά πεδία, βασίζομαστε στη διάταξη των κυκλικών αγωγών.

Για να αντιληφθούμε πως μοιάζει το μαγνητικό πεδίο ενός κυκλικού βρόχου όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, μπορούμε να προσεγγίσουμε τον βρόχο σαν ένα σύνολο από πολύ μικρούς ευθύγραμμους αγωγούς, συνδεδεμένους σε σειρά, έτσι ώστε να διαρρέονται όλοι από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I .



Εικόνα 4-58



Εικόνα 4-59

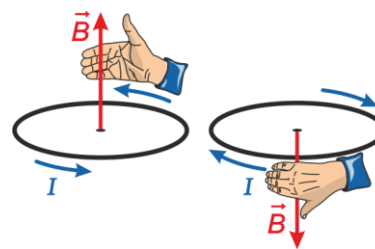
Εφαρμόζοντας τον κανόνα του δεξιού χεριού στο κάθε ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού, προσδιορίζουμε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, από κάθε στοιχειώδη αγωγό, σε διάφορα σημεία του χώρου. Εστιάζοντας στα σημεία του κεντρικού άξονα που τέμνει κάθετα το επίπεδο του βρόχου, παρατηρούμε ότι στο επίπεδο του βρόχου, οι συνιστώσες των μαγνητικών πεδίων, από όλους τους ευθύγραμμους αγωγούς είναι ομόρροπες (εικόνα 4-59). Επομένως, η συνιστώσα του συνολικού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του κεντρικού άξονα, στο επίπεδο του βρόχου, έχει την ίδια κατεύθυνση με όλες τις συνιστώσες και μέτρο ίσο με το άθροισμα των μέτρων τους.

Αντίστοιχα, η κάθετη στον άξονα συνιστώσα, του συνολικού μαγνητικού πεδίου, σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του κεντρικού άξονα είναι μηδενική, επειδή οι παράλληλες με το επίπεδο του βρόχου συνιστώσες των μαγνητικών πεδίων των ευθύγραμμων τμημάτων αλληλοαναιρούνται (οι

οριζόντιες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου δύο αντιδιαμετρικών ευθύγραμμων αγωγών είναι αντίθετες μεταξύ τους).

Η φορά της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του κεντρικού άξονα του κυκλικού αγωγού, καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, ως ακολούθως:

όταν τα λυγισμένα δάκτυλα της παλάμης δείχνουν τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου. (εικόνα 4-60).



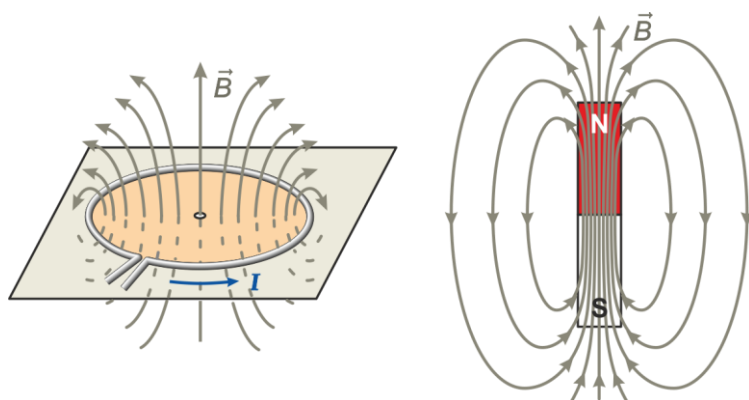
Εικόνα 4-60

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, ενός αγωγίμου κυκλικού βρόχου, το επίπεδο του οποίου τέμνει κάθετα το χαρτόνι, στο οποίο σκορπίζουμε τα ρινίσματα, φαίνονται στην εικόνα 4-61α.

Στις εικόνες 4-61α και 4-62α απεικονίζονται οι ΜΔΓ κυκλικού αγωγού που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Παρατηρείστε ότι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο κυκλικός βρόχος είναι παρόμοιο⁸ με το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, που βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου (εικόνες 4-61β και 4-62β).



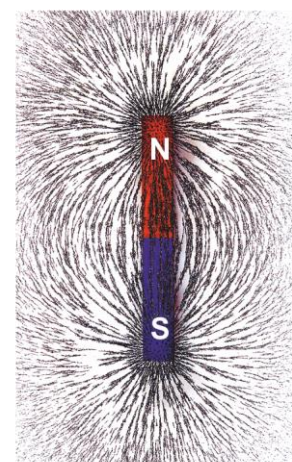
(α)



α) ΜΔΓ κυκλικού αγωγού

β) ΜΔΓ ραβδόμορφου μαγνήτη

Εικόνα 4-62



(β)

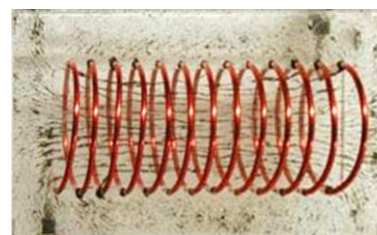
Εικόνα 4-61

4.9 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Το σωληνοειδές είναι ένα μακρύ σύρμα σφικτά τυλιγμένο σε έλικα, με τις σπείρες – κυκλικοί αγωγοί – πολύ κοντά η μια στην άλλη.

Όταν το σωληνοειδές διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στο χώρο, το οποίο μπορούμε να απεικονίσουμε με τη χρήση ρινισμάτων σιδήρου (εικόνα 4-63).

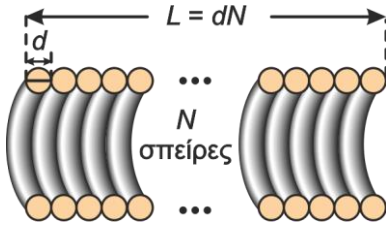
Επειδή οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές στο εσωτερικό του σωληνοειδούς εμφανίζονται πιο πυκνές συμπεραίνουμε ότι η ένταση του



Εικόνα 4-63

⁸ Για ένα μικροσκοπικό κυκλικό βρόχο, και ένα μικροσκοπικό ραβδόμορφο μαγνήτη, οι μαγνητικές γραμμές ταυτίζονται.

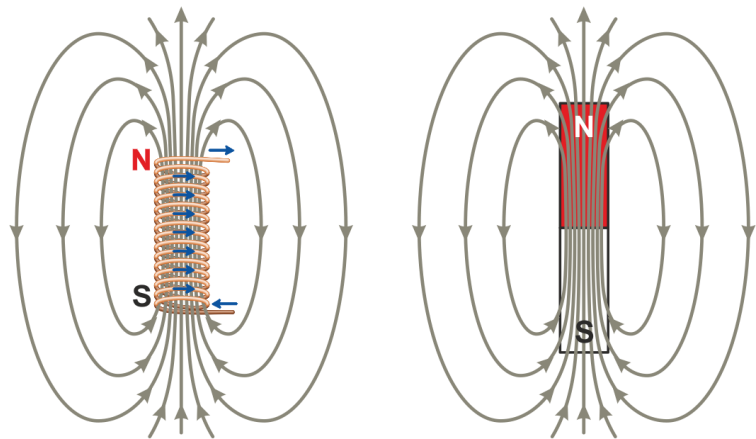
μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη στο εσωτερικό παρά στον εξωτερικό χώρο. Επίσης, στο κέντρο του σωληνοειδούς και σε μικρή απόσταση γύρω από τον κεντρικό άξονα, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές εμφανίζονται παράλληλες, επομένως συμπεραίνουμε ότι, στην περιοχή αυτή προσεγγιστικά το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές⁹.



Εικόνα 4-64

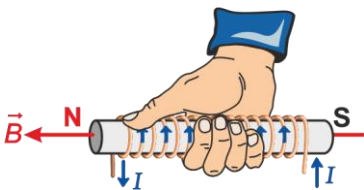
Αν περιτυλίξουμε N φορές ένα μακρύ ευθύγραμμο αγωγό, με τη μία σπείρα να εφάπτεται με την άλλη, δημιουργείται ένα σωληνοειδές μήκος L με N σπείρες. Είναι $L = dN$, όπου d είναι η διάμετρος του αγωγού (εικόνα 4-64). Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο ενός σωληνοειδούς, ακτίνας 10 cm, με 100 σπείρες ανά μέτρο (N/L), που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 50 A, είναι 6 mT, δηλαδή 60 φορές μεγαλύτερο από το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου αγωγού, στην ίδια απόσταση, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα της ίδιας έντασης.

Συγκρίνοντας, τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός σωληνοειδούς και ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, συμπεραίνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη τοποθετημένου κατά μήκος του άξονα του σωληνοειδούς¹⁰.



Εικόνα 4-65

Σε ένα ιδανικό σωληνοειδές όπου το μήκος του είναι πολύ μεγαλύτερο της διαμέτρου του, το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι ομογενές και μηδενικό εκτός.



Εικόνα 4-66

Για να προσδιορίσουμε τη φορά του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς χρησιμοποιούμε τον κανόνα του δεξιού χεριού:

όταν τα λυγισμένα δάκτυλα της παλάμης δείχνουν τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στις σπείρες του σωληνοειδούς, ο τεντωμένος αντίχειρας δείχνει τη φορά της έντασης \vec{B} του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς (εικόνα 4-66).

⁹ Όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του σωληνοειδούς προς τα άκρα του οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές καμπυλώνουν.

¹⁰ Προσεγγιστικά το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς, αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο μιας στοιβάδας ομοαξονικών κυκλικών βρόχων, που διαρρέονται με την ίδια φορά από το ίδιο ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I .

Μαγνητική ροή

Όπως έχουμε δει, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές περιγράφουν εκτός από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και το μέτρο του. Σε περιοχές όπου οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι αραιές (δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών γραμμών είναι μεγάλη) το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μικρό, ενώ σε περιοχές όπου οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι πυκνές (δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών γραμμών είναι μικρή) το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλο.

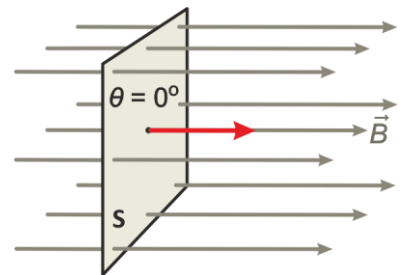
Στην εικόνα 4-67 απεικονίζονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης \vec{B} που τέμνουν κάθετα μια επίπεδη επιφάνεια S εμβαδού A . Ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που διαπερνούν την κάθετη επιφάνεια S στο πεδίο είναι ανάλογος του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αν η επιφάνεια δεν είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, όπως στην εικόνα 4-68, ο αριθμός των γραμμών που την διαπερνούν είναι μικρότερος.

Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις, ορίζουμε ένα νέο **μονόμετρο** φυσικό μέγεθος, τη **μαγνητική ροή**, για να περιγράψουμε ποσοτικά την πυκνότητα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών διαμέσου μιας επιφάνειας.

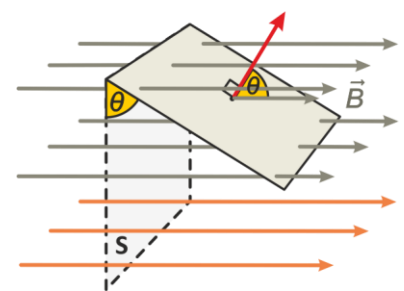
Η μαγνητική ροή Φ , δια μέσου μιας επίπεδης επιφάνειας, σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο ορίζεται ως το γινόμενο του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου $|\vec{B}|$, επί το εμβαδόν της επιφάνειας A , επί το συνημίτονο της γωνίας θ που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και της καθέτου στην επιφάνεια.

$$\Phi = |\vec{B}|A \sin(\theta)$$

Η μονάδα της μαγνητικής ροής στο διεθνές σύστημα είναι το **1 Tm²** και ονομάζεται **Weber (Wb)** προς τιμή του Γερμανού φυσικού **Wilhelm Eduard Weber** (Βίλχελμ Έντουαρντ Βέμπερ) (1804 – 1891) (εικόνα 4-69).



Εικόνα 4-67



Εικόνα 4-68

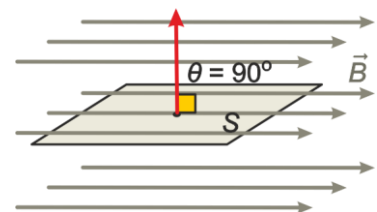


Εικόνα 4-69



Παρατηρήσεις

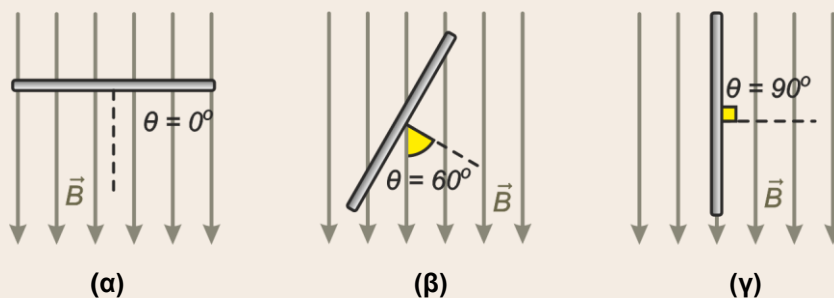
- Όταν $\theta = 0^\circ$ έχουμε $\sin(0^\circ) = 1$ και η μαγνητική ροή είναι **μέγιστη** $\Phi = |\vec{B}|A$ (εικόνα 4-67).
- Όταν $\theta = 90^\circ$ έχουμε $\sin(90^\circ) = 0$ και η μαγνητική ροή είναι **μηδέν** $\Phi = 0$ (εικόνα 4-70). Αυτό θα συμβεί όταν η επιφάνεια είναι **παράλληλη στις δυναμικές γραμμές** οπότε καμία δυναμική γραμμή δεν διέρχεται από αυτήν.



Εικόνα 4-70

Παράδειγμα 1

Ένας συρμάτινος, αγωγίμος, βρόχος βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης $|\vec{B}| = 0,50 \text{ T}$. Αν το εμβαδόν της επιφάνειας του βρόχου είναι $2,0 \text{ m}^2$. *Να υπολογίσετε τη μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του βρόχου στις περιπτώσεις (α), (β) και (γ) που φαίνονται στην εικόνα 4-71.*



Εικόνα 4-71

- Για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής χρησιμοποιούμε τη σχέση $\Phi = |\vec{B}|A \sin(\theta)$

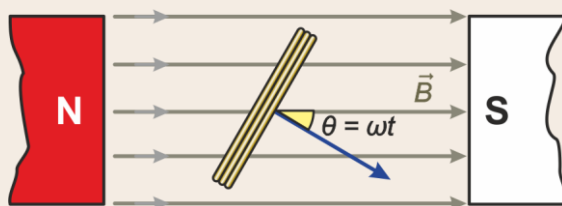
περίπτωση (α): $\Phi = (0,50 \text{ T}) \times (2,0 \text{ m}^2) \times \sin(0^\circ) \Rightarrow \Phi = 1,0 \text{ Wb}$

περίπτωση (β): $\Phi = (0,50 \text{ T}) \times (2,0 \text{ m}^2) \times \sin(60^\circ) \Rightarrow \Phi = 0,5 \text{ Wb}$

περίπτωση (γ): $\Phi = (0,50 \text{ T}) \times (2,0 \text{ m}^2) \times \sin(90^\circ) \Rightarrow \Phi = 0,0 \text{ Wb}$

Παράδειγμα 2

Ένα ορθογώνιο, αγωγίμο πλαίσιο με εμβαδό επιφάνειας A και N σπείρες περιστρέφεται με σταθερή συχνότητα f στο χώρο μεταξύ των πόλων ενός μαγνήτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-72. Το μαγνητικό πεδίο μεταξύ των πόλων του μαγνήτη θεωρείται ομογενές έντασης $|\vec{B}|$.



Εικόνα 4-72

Να υπολογίσετε τη μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του πλαισίου συναρτήσει των παραμέτρων A , N , f και $|\vec{B}|$ του προβλήματος.

- Επειδή το πλαίσιο έχει N σπείρες το συνολικό εμβαδό του αγωγίμου βρόχου είναι $A_{ολ} = NA$.
- Η γωνία θ , που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια του βρόχου με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι χρονοεξαρτώμενη διότι $\theta = \omega t \Rightarrow \theta = 2\pi f t$.
- Εφαρμόζοντας τη σχέση $\Phi = |\vec{B}|A \sin(\theta)$ καταλήγουμε στο αποτέλεσμα

$$\Phi = |\vec{B}|NA \sin(2\pi f t)$$

Ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή

Όπως μάθαμε το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Τώρα θα εξετάσουμε την αντίστροφη διαδικασία.

- Συνδέουμε τις άκρες ενός πηνίου με ένα γαλβανόμετρο, στο οποίο το μηδέν βρίσκεται στο μέσον της κλίμακας. Αρχικά, βλέπουμε ότι **ο δείκτης του οργάνου δεν έχει καμία απόκλιση**. Άρα το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα (εικόνα 4-73).
- Στη συνέχεια, παίρνουμε ένα μαγνήτη και τον πλησιάζουμε προς το πηνίο. Βλέπουμε τότε ότι, όταν ο μαγνήτης κινείται, **ο δείκτης του οργάνου έχει κάποια απόκλιση**. Άρα το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα (εικόνα 4-74).
- Όταν **ακινητοποιήσουμε το μαγνήτη** βλέπουμε ότι **ο δείκτης του οργάνου επανέρχεται στη θέση μηδέν**. Άρα πάλι το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα (εικόνα 4-75).
- Αν **αναστρέψουμε το μαγνήτη** και κάνουμε το ίδιο πείραμα θα παρατηρήσουμε ότι ο δείκτης του οργάνου θα έχει κάποια **απόκλιση αντίθετη όμως από την αρχική**. Αυτό δείχνει ότι το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.
Το ίδιο θα παρατηρηθεί αν αντί να πλησιάζουμε **απομακρύνουμε τον μαγνήτη** από το πηνίο. (εικόνα 4-76)

Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε ότι **όσο πιο γρήγορα μετακινούμε το μαγνήτη**, τόσο **πιο μεγάλη απόκλιση** εμφανίζεται στο δείκτη του γαλβανόμετρου. (εικόνα 4-78)

Το ίδιο θα συμβεί αν χρησιμοποιήσουμε έναν πιο ισχυρό μαγνήτη.

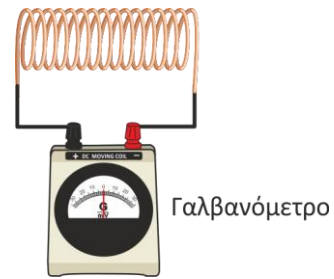
Επειδή η κίνηση είναι σχετική, **τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα θα παρατηρήσουμε αν αντί να μετακινούμε το μαγνήτη, μετακινούμε το πηνίο.**

Το ρεύμα αυτό το ονομάζουμε επαγωγικό ρεύμα επειδή προκαλείται (επάγεται) από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής διαμέσου της επιφάνειας που ορίζεται από το πηνίο. Από τη στιγμή που απαιτείται πηγή Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης για να δημιουργηθεί ρεύμα, το πηνίο συμπεριφέρεται ως να ήταν πηγή ΗΕΔ.

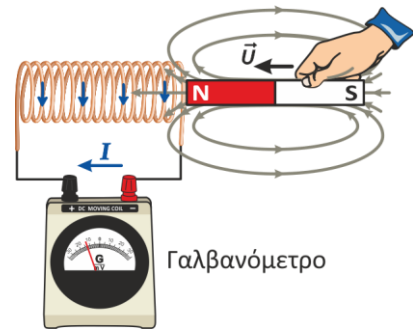
Το φαινόμενο ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή** ή απλά επαγωγή και διαπιστώθηκε πειραματικά από τον Βρετανό επιστήμονα Michael Faraday.

- Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής εμφανίζεται και στην περίπτωση όπου μετακινούμε μέρος ενός αγωγίμου βρόχου (κύκλωμα) μέσα σε μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-77. Η μαγνητική ροή διαμέσου του βρόχου μεταβάλλεται και γι' αυτό επάγεται στο βρόχο ηλεκτρικό ρεύμα.

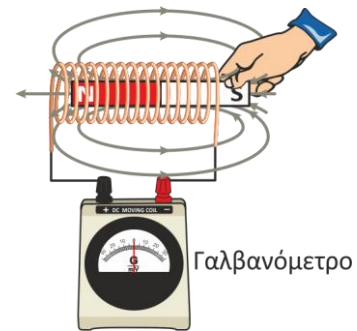
Είδαμε ότι **το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής** είναι άμεσα συνδεδεμένο με την σχετική κίνηση μαγνήτη και πηνίου. Η κίνηση αυτή προκαλεί **μεταβολή της μαγνητικής ροής** που διέρχεται μέσα από τις σπείρες του πηνίου. Η μεταβολή με οποιονδήποτε τρόπο της μαγνητικής ροής που περνά από τις σπείρες ενός πηνίου προκαλεί ανάπτυξη **ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Η.Ε.Δ) επαγωγής ή επαγωγικής τάσης** στο πηνίο που διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί η μεταβολή της μαγνητικής ροής.



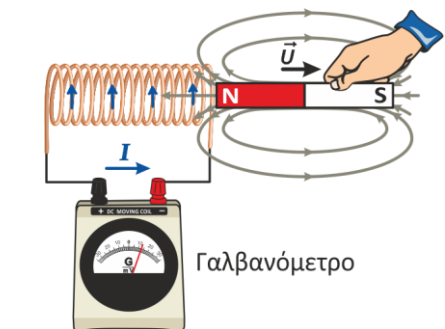
Εικόνα 4-73



Εικόνα 4-74



Εικόνα 4-75

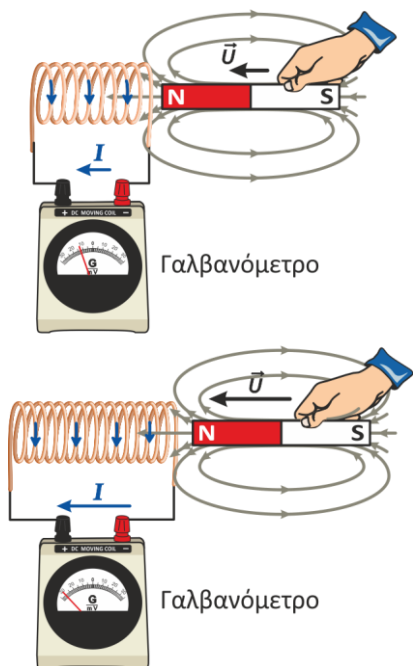


Εικόνα 4-76

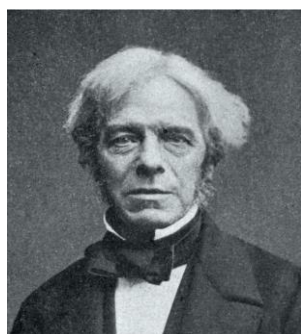


Εικόνα 4-77

Νόμος επαγωγής του Faraday



Εικόνα 4-78



Michael Faraday (Μάικλ Φαραντέι) (1791-1867)

Εικόνα 4-79



Heinrich Friedrich Emil Lenz.
(Χάινριχ Φρήντριχ Εμίλ Λεντς)
(1804 - 1865)

Εικόνα 4-80

Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι η επαγωγική τάση είναι μεγαλύτερη, όταν πλησιάσουμε έναν ισχυρότερο μαγνήτη στο πηνίο με την ίδια ταχύτητα. Η μεγαλύτερη επαγωγική τάση του πηνίου είναι φανερό ότι οφείλεται στη μεγαλύτερη μεταβολή της μαγνητικής ροής.

Παρατηρούμε επίσης ότι, όσο πιο γρήγορα πλησιάζουμε τον ίδιο μαγνήτη στο πηνίο τόσο μεγαλύτερη επαγωγική τάση παίρνουμε στο πηνίο (εικόνα (4-78)). Δηλαδή η επαγωγική τάση του πηνίου για την ίδια μεταβολή της ροής, είναι μεγαλύτερη, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος μεταβολής της ροής.

Τέλος, με ένα απλό πείραμα βλέπουμε ότι η επαγωγική τάση γίνεται μεγαλύτερη, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των σπειρών του πηνίου, εφόσον ο ίδιος μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο με την ίδια ταχύτητα.

Όλες αυτές οι παρατηρήσεις ερμηνεύονται με βάση το **Νόμο της Επαγωγής (Νόμος Faraday)**:

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) από επαγωγή που δημιουργείται σε ένα αγωγίμο βρόχο είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διαπερνά την επιφάνεια που περικλείεται από τον βρόχο

$$E_{\varepsilon\pi} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Στην περίπτωση πηνίου N όμοιων σπειρών (αγωγίμων βρόχων) με την ίδια μαγνητική ροή Φ διαμέσου της κάθε σπείρας η ΗΕΔ δίνεται από τη σχέση

$$E_{\varepsilon\pi} = - N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Η μονάδα μέτρησης στο SI είναι $1 \text{ Wb/s} = 1 \text{ V}$.

Η σημασία του αρνητικού πρόσημου δικαιολογείται με τον κανόνα Lenz που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Επαγωγικό ρεύμα – Κανόνας τον Lenz

Η δημιουργία επαγωγικής τάσης είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της μαγνητικής ροής. Η δημιουργία όμως επαγωγικού ρεύματος προϋποθέτει ότι το κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει η μεταβολή της ροής θα είναι **κλειστό**. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται **επαγωγικό** και θα διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί και η μεταβολή της ροής.

Όταν το πηνίο αποτελεί μέρος κλειστού κυκλώματος ολικής ωμικής αντίστασης R , τότε η ένταση του επαγόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα σύμφωνα με τον νόμο του **Ohm** είναι:

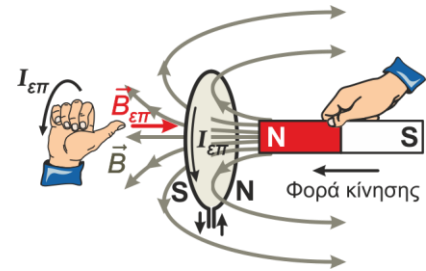
$$I_{\varepsilon\pi} = \frac{E_{\varepsilon\pi}}{R}$$

Ο νόμος του Faraday δίνει το μέγεθος της ΗΕΔ από επαγωγή, η πολικότητα όμως της ΗΕΔ και συνεπώς η φορά του επαγωγικού ρεύματος καθορίζεται από τον **κανόνα του Lenz**.

Για παράδειγμα, θεωρήστε ένα μαγνήτη ο οποίος πλησιάζει ένα πηνίο. **Η μαγνητική ροή αυξάνεται** και έτσι **δημιουργείται ΗΕΔ** επαγωγής με αποτέλεσμα να περάσει **ρεύμα από το πηνίο** καθώς αποτελεί **κλειστό κύκλωμα**.

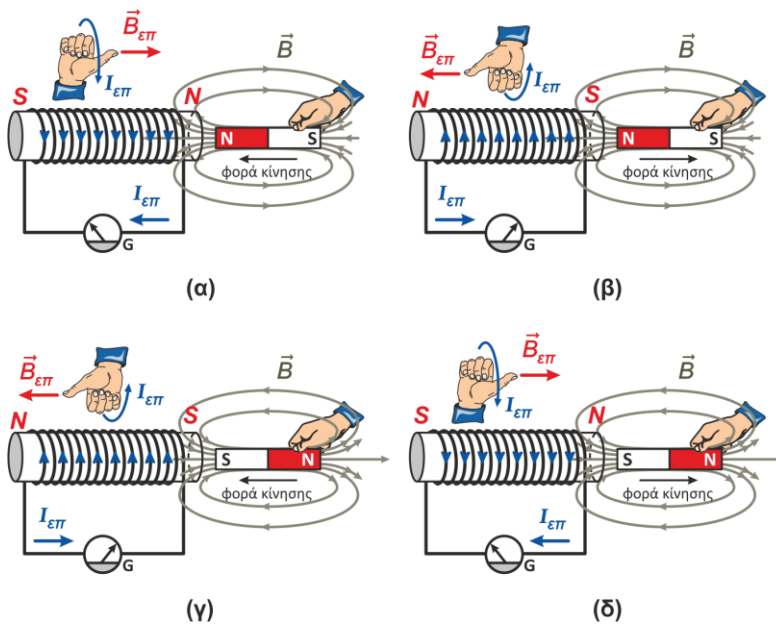
Η φορά του επαγόμενου ρεύματος θα είναι τέτοια ώστε να αντιτίθεται στην αύξηση της μαγνητικής ροής διαμέσου του πηνίου. Το επαγόμενο ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο αντίθετης φοράς του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη, δηλαδή η πλευρά του πηνίου την οποία πλησιάζει ο βόρειος πόλος του μαγνήτη αντιστοιχεί σε βόρειο μαγνητικό πόλο (N) ο οποίος απωθεί το μαγνήτη.

Η φορά του επαγόμενου ρεύματος βρίσκεται με τον κανόνα της **δεξιάς παλάμης** (εικόνα 4-81).



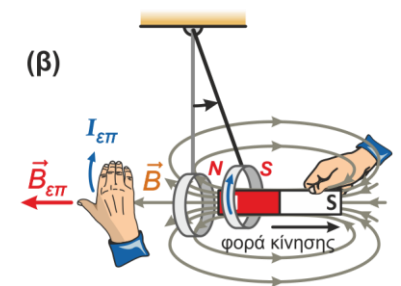
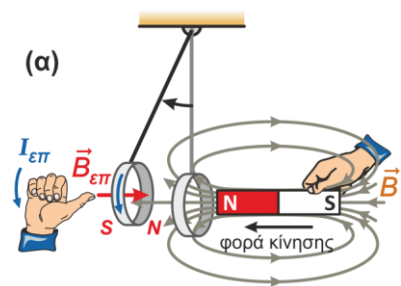
Εικόνα 4-81

- Κάνοντας τα παρακάτω πειράματα με τη βοήθεια του γαλβανόμετρου βλέπουμε ότι, **όταν ο μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο** με το βόρειο ή το νότιο πόλο (εικόνα 4-82α,γ), τότε το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα βόρειος ή νότιος πόλος, ώστε να **αντιστέκεται στη προσέγγιση του μαγνήτη**, ενώ **όταν απομακρύνεται** το άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα νότιος ή βόρειος πόλος (εικόνα 4-82β,δ), ώστε να **αντιστέκεται στην απομάκρυνση του μαγνήτη**.



Εικόνα 4-82

- Ένα άλλο πείραμα είναι να κρεμάσουμε με μονωτικό νήμα ένα αλουμινένιο δακτύλιο και να τον αφήσουμε να ηρεμήσει σε κατακόρυφη θέση. Μετά **πλησιάζουμε σ' αυτόν ένα μαγνήτη** απότομα. Παρατηρούμε ότι **ο δακτύλιος απομακρύνεται από τον μαγνήτη** (εικόνα 4-83α). Αν στη συνέχεια, αφού ο δακτύλιος έχει ηρεμήσει ξανά σε κατακόρυφη θέση, **απομακρύνουμε τον μαγνήτη**, βλέπουμε ότι **ο δακτύλιος θα κινηθεί προς τον μαγνήτη** (εικόνα 4-83β).



Εικόνα 4-83

Μπορούμε με τη βοήθεια των παραπάνω πειραμάτων να διατυπώσουμε τον **κανόνα του Lenz**.

Η επαγωγική τάση που προκύπτει από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής έχει πολικότητα η οποία προκαλεί επαγωγικό ρεύμα με κατεύθυνση τέτοια ώστε το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σ' αυτό να αντιστέκεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής.

- Ο κανόνας του Lenz **συσχετίζεται με την αρχή διατήρησης της ενέργειας**, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 4.10.1.** Ένα πηνίο είναι τοποθετημένο μέσα σε μαγνητικό πεδίο έτσι ώστε η επιφάνειά του να είναι κάθετη με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Ποια από τις πιο κάτω περιπτώσεις επάγει τη μεγαλύτερη τάση στο πηνίο;
- A.** Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλο και ο ρυθμός μεταβολής τους είναι μικρός.
 - B.** Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μικρό και ο ρυθμός μεταβολής του είναι μεγάλος.
 - Γ.** Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλο και σταθερό.
- 4.10.2.** Ένας κυκλικός αγωγίμος βρόχος είναι τοποθετημένος σε οριζόντια θέση μέσα σε κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο. Αν επάγεται δεξιόστροφο ρεύμα στον βρόχο, να αναφέρετε ποια είναι η φορά του μαγνητικού πεδίου (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) και αν το μέτρο της έντασής του αυξάνεται ή μειώνεται. (Σημείωση: Υπάρχουν δύο πιθανές απαντήσεις)

Κίνηση ευθύγραμμου αγωγού σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

Όπως παρατηρήσαμε σε προηγούμενη παράγραφο όταν ο αγωγός κινείται σε μαγνητικό πεδίο και **κόβει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές** δημιουργείται στα άκρα του αγωγού ΗΕΔ επαγωγής. Στην συνέχεια θα μελετήσουμε την συγκεκριμένη περίπτωση και **θα εξηγήσουμε την αιτία δημιουργίας ΗΕΔ επαγωγής** στα άκρα του αγωγού.

Έστω μεταλλικός αγωγός ΑΓ μήκους L , που κινείται **με σταθερή ταχύτητα** \vec{v} , κάθετη σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} όπως φαίνεται στην εικόνα 4-84.

Μετακινώντας τον αγωγό προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα \vec{v} , τα **ελεύθερα ηλεκτρόνια e δέχονται δύναμη Lorentz** η οποία τα μετακινεί προς το άκρο Γ. Η φορά της δύναμης βρίσκεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.

Ως αποτέλεσμα της μετακίνησης των ηλεκτρονίων έχουμε συσσώρευσή τους στο άκρο Γ το οποίο και φορτίζεται αρνητικά, ενώ το άκρο Α λόγω έλλειψης ηλεκτρονίων φορτίζεται θετικά. Αποτέλεσμα τούτου είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού και συνεπώς ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό μεταξύ των άκρων Α και Γ (εικόνα 4-85).

Η αιτία επομένως που δημιουργεί τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του συγκεκριμένου αγωγού είναι η μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του, λόγω της κίνησης του αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E} που δημιουργείται στο εσωτερικό του αγωγού ασκεί ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{\eta\lambda}$ στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού με φορά προς το άκρο Α. Όσο αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στον αγωγό (με τη συσσώρευση ηλεκτρονίων στο άκρο Γ) τόσο μεγαλώνει η ηλεκτρική δύναμη μέχρι που να γίνει ίση με τη δύναμη Lorentz \vec{F}_L .

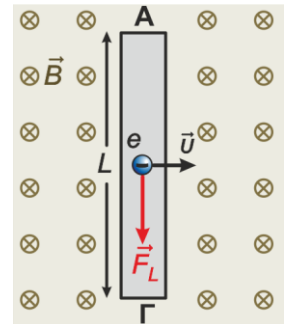
$$|\vec{F}_{\eta\lambda}| = |\vec{F}_L| \Rightarrow E \ell = |\vec{B}| \ell |\vec{v}| \Rightarrow E = |\vec{B}| |\vec{v}|$$

Το μέτρο της έντασης όμως του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό δίνεται από τη σχέση $E = \frac{V_{A\Gamma}}{L}$ όπου $V_{A\Gamma} = V_A - V_\Gamma$ είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα Α και Γ, με το σημείο Α να έχει ψηλότερο δυναμικό.

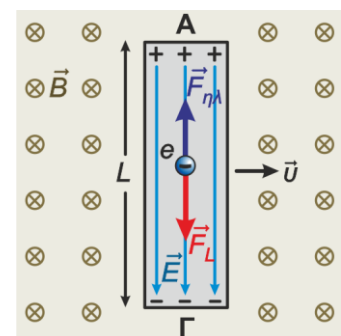
Από τα πιο πάνω προκύπτει ότι:

$$\frac{V_{A\Gamma}}{L} = |\vec{B}| |\vec{v}| \Rightarrow V_{A\Gamma} = |\vec{B}| |\vec{v}| L$$

Επομένως, η διαφορά δυναμικού στα άκρα του ευθύγραμμου αγωγού **ισούται** με την ΗΕΔ από επαγωγή.



Εικόνα 4-84



Εικόνα 4-85

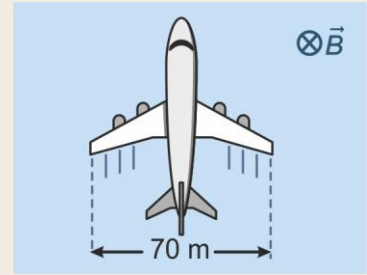
Σημείωση:

Η δύναμη Lorentz, ασκείται στα φορτία λόγω της ταχύτητας \vec{v} του αγωγού και είναι κάθετη και στο \vec{B} και στο \vec{v} . Άρα το έργο της είναι μηδέν.

Παράδειγμα 1

Ένα αεροπλάνο ταξιδεύει με ταχύτητα 1000 km/h σε μια περιοχή όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης είναι $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ με διεύθυνση σχεδόν κάθετη στο επίπεδο των φτερών του αεροπλάνου.

Αν το άνοιγμα των φτερών του αεροπλάνου είναι 70 m, να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των άκρων των φτερών του και να σχολιάσετε την τιμή της.



Εικόνα 4-86

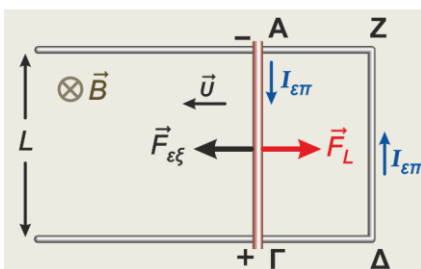
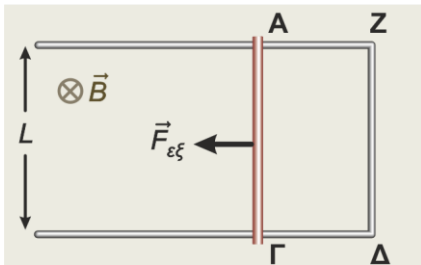
- Θεωρούμε ότι τα φτερά του αεροπλάνου αποτελούν έναν αγωγό μήκους 70 m ο οποίος κινείται με ταχύτητα \vec{v} κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές.
- Η ταχύτητα του αεροπλάνου είναι:

$$1000 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \left(\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = \frac{1000 \times 1000 \times 1}{1 \times 3600} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 277,77 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \approx 280 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

- Για να υπολογίσουμε τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των άκρων των φτερών του αεροπλάνου εφαρμόζουμε τη σχέση $V = |\vec{B}| |\vec{v}| L$

$$V = |\vec{B}| |\vec{v}| L \Rightarrow V = (5 \times 10^{-5} \text{ T}) \times \left(280 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times (70 \text{ m}) = 0,98 \text{ V} \approx 1 \text{ V}$$

Τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των άκρων των φτερών του αεροπλάνου είναι πολύ μικρή. Στην πράξη, η τάση αυτή είναι ακόμα μικρότερη διότι η ταχύτητα του αεροπλάνου δεν είναι κάθετη με το μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 4-87

Αν θεωρήσουμε τώρα ότι ο ευθύγραμμος αγωγός κινείται κατά μήκος ενός αγωγού σχήματος Π δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα (εικόνα 4-87), το ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E} που δημιουργείται από τη συσσώρευση των φορτίων στα άκρα Α και Γ προκαλεί ρεύμα στην κατεύθυνση που φαίνεται στην εικόνα.

Στην περίπτωση αυτή ο κινούμενος ευθύγραμμος αγωγός γίνεται πηγή Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης. Κατά μήκος του ευθύγραμμου αγωγού τα φορτία κινούνται από το χαμηλότερο στο υψηλότερο δυναμικό και στο υπόλοιπο κύκλωμα κινούνται από το υψηλότερο στο χαμηλότερο δυναμικό.

Το μέγεθος της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης Επαγωγής στην περίπτωση ευθύγραμμου αγωγού κινούμενου κάθετα σε μαγνητικό πεδίο δίνεται από την σχέση

$$E_{\varepsilon\pi} = |\vec{B}| |\vec{v}| L$$

Εάν η συνολική αντίσταση του ευθύγραμμου αγωγού και του αγωγού σχήματος Π είναι R τότε το επαγωγικό ρεύμα στο κύκλωμα δίνεται με βάση τη σχέση

$$I = \frac{E_{\varepsilon\pi}}{R} \Rightarrow I = \frac{|\vec{B}| |\vec{v}| L}{R}$$

Η ΗΕΔ που οφείλεται στην κίνηση του ευθύγραμμου αγωγού είναι ανάλογη της ΗΕΔ μιας ηλεκτρικής πηγής (μπαταρίας) με το θετικό πόλο στο σημείο Γ και τον αρνητικό πόλο στο σημείο Α. Θα πρέπει όμως να θυμόμαστε ότι ο τρόπος δημιουργίας τους είναι διαφορετικός.

Η ΗΕΔ από επαγωγή ορίζεται ως το έργο ανά μονάδα φορτίου, της εξωτερικής δύναμης που ασκείται στον αγωγό κατά τη μετακίνηση του μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Η φορά του επαγωγικού ρεύματος ερμηνεύεται από τον κανόνα του Lenz.

Ας δούμε το πιο κάτω παράδειγμα.

Η μεταλλική ράβδος ΑΓ, μήκους L ολισθαίνει χωρίς τριβές πάνω σε δύο ράγες, ώστε να αποτελεί μέρος κλειστού κυκλώματος. Το σύστημα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} , υπό την επίδραση της εξωτερικής δύναμης $\vec{F}_{εξ}$.

Το επαγωγικό ρεύμα θα έχει τέτοια φορά ώστε να εξουδετερώνει την αιτία που το προκαλεί (την $\vec{F}_{εξ}$), θα δημιουργεί δηλαδή μια μαγνητική δύναμη Laplace \vec{F}_L η οποία θα ασκείται στον αγωγό και θα έχει αντίθετη φορά (βρίσκεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού) από την $\vec{F}_{εξ}$ (εικόνα 4-87).

Κανόνας Lenz και Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας.

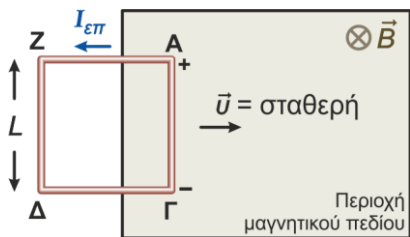
Αν υποθέσουμε ότι το επαγόμενο ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα της εικόνας 4-87 είχε την αντίθετη φορά (από ότι προβλέπει ο κανόνας του Lenz) η δύναμη \vec{F}_L θα είχε φορά προς αριστερά και θα προκαλούσε επιτάχυνση της ράβδου που με τη σειρά της θα αύξανε το εμβαδόν που περικλείεται από τον βρόχο πιο γρήγορα. Το αποτέλεσμα θα ήταν να αυξάνεται το επαγωγικό ρεύμα, το οποίο θα προκαλούσε περαιτέρω αύξηση της δύναμης \vec{F}_L , οδηγώντας ξανά σε αύξηση του επαγωγικού ρεύματος και ούτω καθεξής. Δηλαδή, το σύστημα θα κέρδιζε ενέργεια χωρίς να προσφέρεται σ' αυτό ενέργεια.

Η διαδικασία αυτή αντιβαίνει προς την **αρχή διατήρησης της ενέργειας** και επομένως το επαγωγικό ρεύμα θα πρέπει να έχει αριστερόστροφη κατεύθυνση.

Κίνηση μεταλλικού πλαισίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Ένα μεταλλικό τετραγωνικό **πλαίσιο (N = 1)** ΑΓΔΖ πλευράς L και αντίστασης R κινείται προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα \vec{v} . Αρχικά είναι εκτός του μαγνητικού πεδίου. Κατά την πορεία του εισέρχεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , κινείται ολόκληρο μέσα στο μαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια εξέρχεται από αυτό. Πριν το πλαίσιο να εισέλθει στο μαγνητικό πεδίο δεν παρατηρείται Ηλεκτρεγερτική Δύναμη Επαγωγής επειδή δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Θα μελετηθούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

- α)** όταν το πλαίσιο **εισέρχεται** στο μαγνητικό πεδίο,
- β)** όταν το πλαίσιο κινείται και **βρίσκεται ολόκληρο** μέσα στο μαγνητικό πεδίο και
- γ)** όταν το πλαίσιο **εξέρχεται** από το μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 4-88

α) Όταν εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο (εικόνα 4-88)

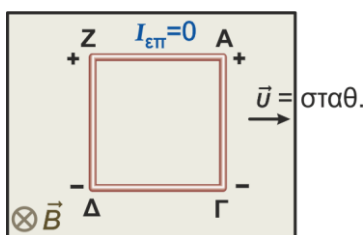
Η μαγνητική ροή του πλαισίου αυξάνεται και συνεπώς δημιουργείται ΗΕΔ επαγωγής και επαγωγικό ρεύμα. Το επαγωγικό ρεύμα σύμφωνα με τον κανόνα Lenz έχει αριστερόστροφη φορά επειδή πρέπει να δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση από τη σελίδα προς τα έξω (αντίθετο με το αρχικό πεδίο). Η ΗΕΔ επαγωγής, που δημιουργείται λόγω της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στα ηλεκτρικά φορτία στη δεξιά κατακόρυφη πλευρά του πλαισίου, δίνεται όπως έχουμε δει προηγουμένως από τη σχέση:

$$E_{επ} = |\vec{B}| |\vec{v}| L$$

Επειδή το πλαίσιο αποτελεί κλειστό κύκλωμα θα διαρρέεται από επαγωγικό ρεύμα

$$I_{επ} = \frac{E_{επ}}{R} = \frac{|\vec{B}| |\vec{v}| L}{R}$$

όπου R είναι η αντίσταση του πλαισίου.



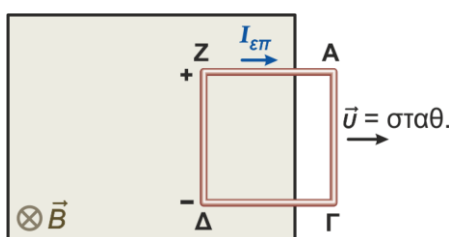
Εικόνα 4-89

β) Όταν το πλαίσιο βρίσκεται ολόκληρο μέσα στο μαγνητικό πεδίο (εικόνα 4-89)

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι μηδέν ($\Delta\Phi = 0$), άρα και η συνολική επαγωγική τάση που παράγεται στο πλαίσιο είναι μηδέν ($E_{επ} = 0$).

Ασφαλώς το πλαίσιο δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ($I_{επ} = 0$).

Διαφορετικά θα μπορούσαμε να το δούμε και ως εξής: Η επαγωγική τάση στα άκρα ΑΓ έχει αντίθετη φορά από αυτή που δημιουργείται στα άκρα ΖΔ με αποτέλεσμα η ολική επαγωγική τάση να είναι μηδέν. Έτσι και η ένταση του επαγωγικού ρεύματος είναι μηδέν.



Εικόνα 4-90

γ) Όταν εξέρχεται από το μαγνητικό πεδίο (εικόνα 4-90)

Στα άκρα ΖΔ δημιουργείται επαγωγική τάση η οποία δίνεται από τη γνωστή σχέση $E_{επ} = |\vec{B}| |\vec{v}| L$. Το άκρο Ζ φορτίζεται θετικά και το άκρο Δ αρνητικά.

Το πλαίσιο θα διαρρέεται από επαγωγικό ρεύμα,

$$I_{επ} = \frac{E_{επ}}{R}$$

όπου R είναι η αντίσταση του πλαισίου και η φορά του από το (+) στο (-) (συμβατική φορά).

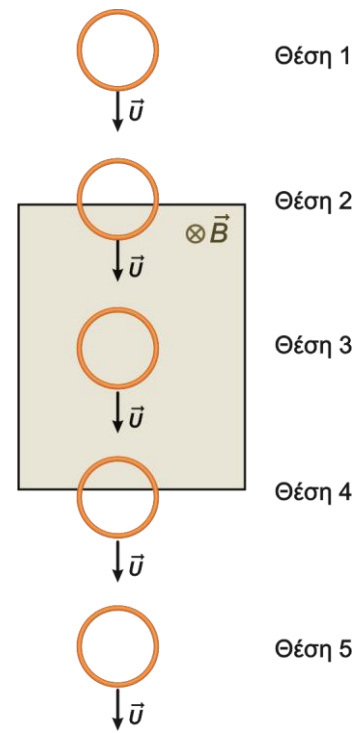
Όταν το πλαίσιο εξέλθει πλήρως από το μαγνητικό πεδίο η Επαγωγική τάση μηδενίζεται πάλι.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

4.10.3. Στο σχήμα 4-91 φαίνεται σε κάτοψη η περιοχή που υπάρχει ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο. Ένας χάλκινος κρίκος κινείται με σταθερή ταχύτητα από τη θέση 1 μέχρι τη θέση 5.

- α) Να εξηγήσετε γιατί καθώς ο κρίκος περνά από τις θέσεις 1 και 5 δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.
- β) Ποια από τις ακόλουθες επιλογές περιγράφει ορθά τη φορά του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον κρίκο καθώς περνά από τις θέσεις 2, 3, 4;
- Στη θέση 2 το ρεύμα I_2 κινείται δεξιόστροφα, στη θέση 3 το ρεύμα I_3 κινείται αριστερόστροφα και στη θέση 4 το ρεύμα I_4 κινείται αριστερόστροφα.
 - Στη θέση 2 το ρεύμα I_2 κινείται αριστερόστροφα, στη θέση 3 το ρεύμα I_3 κινείται δεξιόστροφα και στη θέση 4 το ρεύμα I_4 κινείται δεξιόστροφα.
 - Στη θέση 2 το ρεύμα I_2 κινείται δεξιόστροφα, στη θέση 3 το ρεύμα $I_3 = 0$ A και στη θέση 4 το ρεύμα I_4 κινείται αριστερόστροφα.
 - Στη θέση 2 το ρεύμα I_2 κινείται αριστερόστροφα, στη θέση 3 το ρεύμα $I_3 = 0$ A και στη θέση 4 το ρεύμα I_4 κινείται δεξιόστροφα.



Εικόνα 4-91

4.11 Περιστροφική κίνηση πλαισίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

Το πλαίσιο της εικόνας 4-92 αποτελείται από N σπείρες και έχει **εμβαδόν A** . Το πλαίσιο περιστρέφεται με σταθερή **γωνιακή ταχύτητα ω** , γύρω από οριζόντιο άξονα που βρίσκεται στο επίπεδο του πλαισίου και είναι κάθετος στις μαγνητικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου \vec{B} .

Η μαγνητική ροή που διαπερνά κάθε σπείρα δίνεται από τη σχέση,

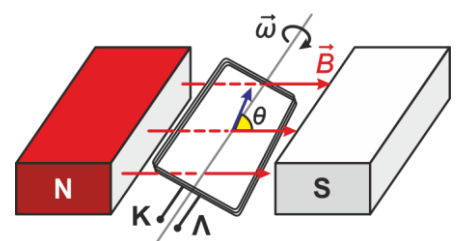
$$\Phi = |\vec{B}|A\sigma\eta\nu(\theta)$$

όπου θ η γωνιά που σχηματίζει κάθε χρονική στιγμή το μαγνητικό πεδίο έντασης \vec{B} με την κάθετο στο πλαίσιο. Όμως $\theta = \omega t$, άρα η μαγνητική ροή που διαπερνά το πλαίσιο τη χρονική στιγμή t είναι,

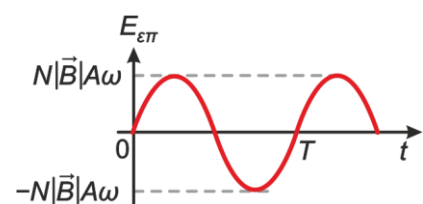
$$\Phi = |\vec{B}|A\sigma\eta\nu(\omega t)$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday στα άκρα Κ, Λ του πλαισίου θα δημιουργείται επαγωγική τάση

$$E_{\varepsilon\pi} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



Εικόνα 4-92



Εικόνα 4-93

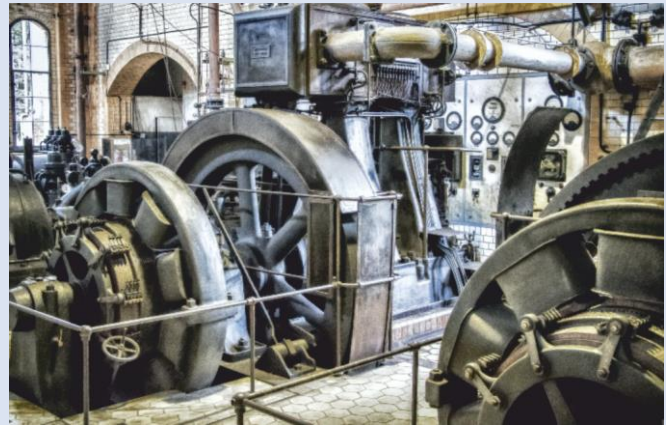
Για Δt πολύ μικρό είναι:

$$E_{\varepsilon\pi} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N |\vec{B}| A \frac{d(\sigma\upsilon\nu(\omega t))}{dt} \Rightarrow E_{\varepsilon\pi} = N |\vec{B}| A \omega \eta\mu(\omega t)$$

Η Η.Ε.Δ από επαγωγή που δημιουργείται στο πλαίσιο είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου. Η τάση αυτή ονομάζεται **εναλλασσόμενη τάση**. Στο διάγραμμα 4-93 φαίνεται η μεταβολή της τάσης αυτής με τον χρόνο.

ΕΝΘΕΤΟ: Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος ή ηλεκτρογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια και στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται παγκοσμίως προέρχεται από ηλεκτρογεννήτριες σαν και αυτή της εικόνας 4-94.

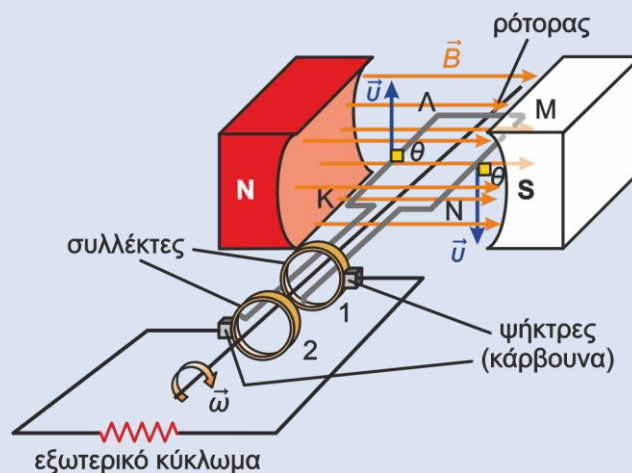


Εικόνα 4-94

Η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας εναλλασσόμενης τάσης είναι πολύ απλή. Ένα αγώγιμο πλαίσιο, τυλιγμένο πάνω σε σιδερένιο πυρήνα, περιστρέφεται με τη βοήθεια άξονα μέσα σε μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα τη δημιουργία επαγωγικής τάσης σε αυτό.

Αν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με ένα εξωτερικό κύκλωμα, αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Στην εικόνα 4-95 πιο κάτω φαίνονται τα βασικά μέρη μιας γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος.



Εικόνα 4-95

Ένα αγώγιμο πλαίσιο ΚΛΜΝ στερεωμένο πάνω σε έναν άξονα, που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω με τη βοήθεια μηχανικού μέσου, όπως ο ατμός, η υδατόπτωση, η ροή του αέρα κ.λπ., περιστρέφεται μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο \vec{B} . Ο άξονας που μεταφέρει την κίνηση στο πλαίσιο ονομάζεται **ρότορας** ή επαγωγίμο. Στα τμήματα ΚΛ και ΜΝ του πλαισίου ασκείται μαγνητική δύναμη, η οποία διαχωρίζει τα ηλεκτρικά φορτία.

Εφαρμόζοντας τον κανόνα του δεξιού χεριού για το τμήμα ΚΛ, βλέπουμε ότι στο άκρο Κ συσσωρεύονται αρνητικά φορτία ενώ στο άκρο Λ θετικά. Άρα δημιουργείται διαφορά δυναμικού. Αντίστοιχα στο τμήμα ΜΝ, στο άκρο Μ συσσωρεύονται αρνητικά φορτία και στο άκρο Ν θετικά.

Διαφορά δυναμικού δημιουργείται και στα τμήματα ΛΜ και ΚΝ του αγωγίμου πλαισίου αλλά, επειδή το πάχος του αγωγού είναι μικρό, μπορούμε να την αγνοήσουμε.

Ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης αντίθετων φορτίων στα άκρα Κ και Ν του αγωγίμου πλαισίου, οι συλλέκτες 1 και 2 φορτίζονται, ο 2 αρνητικά και ο 1 θετικά.

Όταν το πλαίσιο ολοκληρώσει μισή περιστροφή και το τμήμα ΚΛ κινείται πλέον προς τα κάτω και το ΜΝ προς τα πάνω, η φορά της μαγνητικής δύναμης στο καθένα αντιστρέφεται. Ταυτόχρονα αντιστρέφεται και το φορτίο των συλλεκτών. Έτσι, το εξωτερικό κύκλωμα, που έρχεται σε επαφή με τους συλλέκτες μέσω δύο επαφών άνθρακα, που ονομάζονται **ψήκτρες**, έχει στα άκρα του διαφορά δυναμικού που μεταβάλλει την πολικότητά της κάθε μισή περίοδο και γι' αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, η φορά του οποίου επίσης αντιστρέφεται κάθε μισή περίοδο.

Ποσοτική περιγραφή της λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας.

Έστω ότι οι πλευρές ΚΛ και ΜΝ έχουν μήκος L και οι πλευρές ΛΜ και ΝΚ έχουν μήκος w . Η γραμμική ταχύτητα των τμημάτων ΚΛ και ΜΝ, τα οποία διαγράφουν κυκλική τροχιά ακτίνας $w/2$ συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου μέσω της σχέσης $|\vec{v}| = |\vec{\omega}| \frac{w}{2}$ και γενικά σχηματίζει γωνία $\theta = \omega t$ με το μαγνητικό πεδίο.

Συνεπώς, η επαγωγική τάση στα τμήματα ΚΛ και ΜΝ του πλαισίου θα είναι:

$$V_{\varepsilon\pi,ΚΛ} = V_{\varepsilon\pi,ΜΝ} = |\vec{B}|L\frac{w}{2}|\vec{\omega}|\eta\mu(\omega t)$$

Η συνολική επαγωγική τάση στο πλαίσιο ισούται με το άθροισμα των δύο τάσεων:

$$V_{\varepsilon\pi} = 2|\vec{B}|L\frac{w}{2}|\vec{\omega}|\eta\mu(\omega t) \Rightarrow V_{\varepsilon\pi} = |\vec{B}|Lw|\vec{\omega}|\eta\mu(\omega t)$$

Όμως το γινόμενο Lw ισούται με το εμβαδό A της επιφάνειας του πλαισίου, οπότε το τελικό αποτέλεσμα καταλήγει στη γνωστή σχέση

$$V_{\varepsilon\pi} = |\vec{B}|A|\vec{\omega}|\eta\mu(\omega t)$$

Το αγωγίμο πλαίσιο, συνήθως αποτελείται από N σπείρες έτσι ώστε να πολλαπλασιάζεται το εμβαδόν του έτσι η πιο πάνω σχέση μετατρέπεται στην

$$V_{\varepsilon\pi} = N|\vec{B}|A|\vec{\omega}|\eta\mu(\omega t)$$

Η γραφική παράσταση της εναλλασσόμενης τάσης φαίνεται στην εικόνα 4-93 πιο πάνω και το μέγιστο μέτρο της παίρνει την τιμή $V_{\varepsilon\pi,max} = N|\vec{B}|A|\vec{\omega}|$.

Παράδειγμα 1.

Το πηνίο της ηλεκτρογεννήτριας της εικόνας 4-95 περιστρέφεται με συχνότητα $f = 60$ Hz, και παράγει εναλλασσόμενη τάση, η οποία έχει μέγιστη τιμή 170 V. Το πηνίο έχει εμβαδό $A = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ και αποτελείται από $N = 500$ σπείρες. Να υπολογίσετε το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, μέσα στο οποίο περιστρέφεται το πηνίο.

- Από τη σχέση $\omega = 2\pi f$, υπολογίζουμε τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής γύρω από τον άξονα.

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 376,99 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \approx 377 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

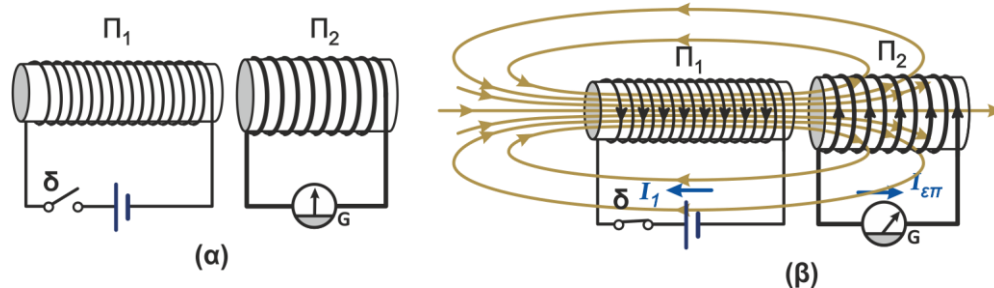
- Λύνοντας τη σχέση $V_{\varepsilon\pi, \max} = N|\vec{B}|A|\vec{\omega}|$ ως προς το μέτρο του μαγνητικού πεδίου, μπορούμε να το υπολογίσουμε.

$$V_{\varepsilon\pi, \max} = N|\vec{B}|A|\vec{\omega}| \Rightarrow 170 \text{ V} = 500 \times |\vec{B}| \times (3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2) \times (377 \frac{\text{rad}}{\text{s}})$$

$$\Rightarrow |\vec{B}| = \frac{170 \text{ V}}{500 \times (3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2) \times (377 \frac{\text{rad}}{\text{s}})} \Rightarrow |\vec{B}| = \frac{170 \text{ V}}{565,5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \Rightarrow |\vec{B}| = 0,30 \text{ T}$$

4.12 Αμοιβαία επαγωγή

Στην εικόνα 4-96 φαίνονται δύο πηνία, το ένα κοντά στο άλλο. Αν ο διακόπτης του πρώτου κυκλώματος κλείσει τότε ο δείκτης του γαλβανόμετρου στο πηνίο 2 **αποκλίνει στιγμιαία**.



Εικόνα 4-96

Αυτό σημαίνει ότι στο πηνίο 2 δημιουργήθηκε **στιγμιαία** τάση (για όσο διαρκεί το κλείσιμο του διακόπτη). Η τάση αυτή ονομάζεται **τάση αμοιβαίας επαγωγής**.

Αμοιβαία επαγωγή ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο εμφανίζεται επαγωγική τάση στα άκρα ενός πηνίου, όταν μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα άλλο πηνίο με το οποίο βρίσκεται σε επαγωγική σύζευξη.

Εξήγηση του φαινομένου

Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος I στο πρωτεύον πηνίο Π_1 δημιουργεί μεταβολή του μαγνητικού πεδίου \vec{B} στο εσωτερικό του και συνεπώς μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή Φ που το διαπερνά. Επειδή το πρωτεύον πηνίο Π_2 βρίσκεται σε επαγωγική σύζευξη με το δευτερεύον οποιαδήποτε μεταβολή της μαγνητικής ροής συμβαίνει στο πρωτεύον πηνίο μεταβιβάζεται στο δευτερεύον. Αν η επαγωγική σύζευξη μεταξύ των πηνίων είναι τέλεια, τότε η μαγνητική ροή στο πρωτεύον ισούται με τη μαγνητική ροή στο δευτερεύον. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday κάθε μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί στα άκρα του επαγωγική τάση.

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η επαγωγική τάση εξαρτάται από,

- **Το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στο πρωτεύον.** Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγική τάση που δημιουργείται.
- **Τον αριθμό των σπειρών των πηνίων.** Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σπειρών των πηνίων τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγική τάση που δημιουργείται.
- **Τον βαθμό σύζευξης των δύο πηνίων.** Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός σύζευξης των δύο πηνίων τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγική τάση που δημιουργείται.
- **Την ύπαρξη πυρήνα.** Η ύπαρξη πυρήνα οδηγεί στην δημιουργία μεγαλύτερης επαγωγικής τάσης.

Δύο πηνία είναι **συζευγμένα** όταν βρίσκονται το ένα κοντά στο άλλο έτσι ώστε η μαγνητική ροή του ενός να διαπερνά την επιφάνεια που ορίζεται από το άλλο. Ο βαθμός σύζευξης ορίζεται από το λόγο Φ_1/Φ_2 των μαγνητικών ροών στα δύο πηνία.

4.13 Μετασχηματιστής

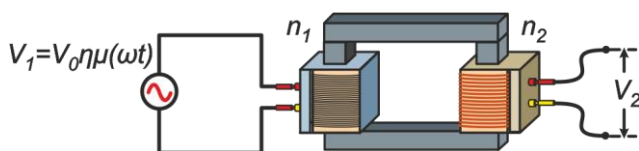
Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να ανυψώνει ή να υποβιβάζει εναλλασσόμενη τάση. Αποτελείται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον, που είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους και περιτυλιγμένα γύρω από σιδερένιο πυρήνα, ώστε να βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη.

Η λειτουργία ενός μετασχηματιστή στηρίζεται στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής.

Όταν εισάγουμε μια εναλλασσόμενη τάση $V_1 = V_0 \eta \mu(\omega t)$ στο πρωτεύον πηνίο τότε στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου θα **επάγεται τάση**.



Εικόνα 4-97



Εικόνα 4-98

- Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι **ένας μετασχηματιστής δεν λειτουργεί όταν τροφοδοτείται με συνεχή τάση**, δηλαδή στο δευτερεύον πηνίο δεν επάγεται τάση.

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα **ιδανικό μετασχηματιστή** (στον οποίο δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας) και **η σύζευξη των δύο πηνίων είναι τέλεια** δηλαδή η ίδια μαγνητική ροή που περνά από το πρωτεύον περνά και από το δευτερεύον τότε ισχύει ότι:

$$\frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{I_{02}}{I_{01}}$$

Η πιο πάνω σχέση δείχνει ότι ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος καθορίζουν την τιμή της τάσης που επάγεται στο δευτερεύον πηνίο. Ο λόγος $\frac{n_1}{n_2}$ λέγεται **λόγος μετασχηματισμού**.

Αν $n_2 > n_1$ τότε $V_2 > V_1$, δηλαδή ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση.

Αν $n_2 < n_1$ τότε $V_2 < V_1$, δηλαδή ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

4.13.1. Ένας μετασχηματιστής αλλάζει την τάση των 240 V της πρίζας σε 24 000 V. Το ρεύμα:

- A. Αυξάνεται κατά 100 φορές
- B. Μειώνεται κατά 100 φορές
- Γ. Ούτε αυξάνεται ούτε μειώνεται

4.13.2. Το πρωτεύον κύκλωμα ενός μετασχηματιστή διαρρέεται από συνεχές ρεύμα εντάσεως 1,0 A, όταν στα άκρα του εφαρμοστεί τάση 10,0 V. Αν το πρωτεύον πηνίο έχει 10 σπείρες και το δευτερεύον έχει 20, ποιο είναι το ρεύμα και η τάση στο δευτερεύον κύκλωμα;

- A. 10,0 V & 0,5 A
- B. 20,0 V & 0,5 A
- Γ. 20,0 V & 1,0 A
- Δ. 10,0 V & 1,0 A
- E. 0,0 V & 0,0 A

Παράδειγμα 1

Ο φορτιστής κινητού τηλεφώνου περιέχει έναν μετασχηματιστή, ο οποίος υποβιβάζει την εναλλασσόμενη τάση των 240 V της παροχής σε 5 V. Θεωρείστε ότι το δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή έχει 30 σπείρες και το επαγωγικό ρεύμα σε αυτό είναι 700 mA. *Να υπολογίσετε:*

- α) τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος πηνίου,
- β) την ένταση του ρεύματος στο πρωτεύον κύκλωμα.

- Λύνουμε τη σχέση $\frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{n_1}{n_2}$ ως προς το n_1 για να υπολογίσουμε τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος πηνίου.

$$\frac{V_{01}}{V_{02}} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow n_1 = n_2 \frac{V_{01}}{V_{02}} \Rightarrow n_1 = 30 \frac{240 \text{ V}}{5 \text{ V}} \Rightarrow n_1 = 1440$$

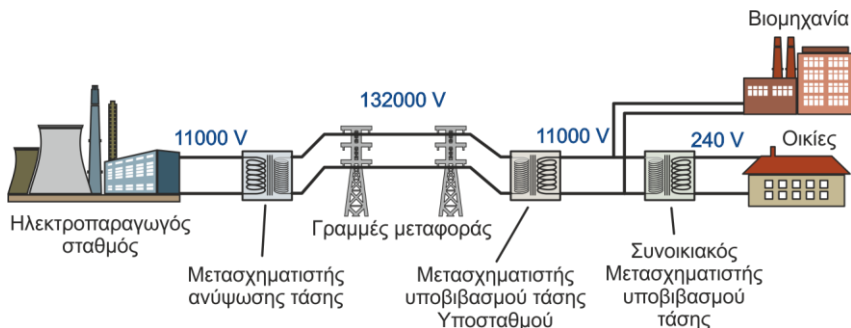
- Από την ισότητα $I_1 V_{01} = I_2 V_{02}$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του ρεύματος στο πρωτεύον κύκλωμα.

$$I_1 V_{01} = I_2 V_{02} \Rightarrow I_1 = I_2 \frac{V_{02}}{V_{01}} \Rightarrow I_1 = 700 \text{ mA} \frac{5 \text{ V}}{240 \text{ V}} = \frac{700 \text{ mA}}{48} \Rightarrow I_1 = 14,58 \text{ mA}$$

Χρήσεις Μετασχηματιστή

- **Στη μετατροπή τάσεων σε επιθυμητές τιμές.** Χρησιμοποιούνται για μετατροπή της τάσης των 240V, που φθάνει στα σπίτια μας για οικιακή χρήση, σε τιμές κατάλληλες για τη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών. Για παράδειγμα σε μια τηλεόραση υπάρχουν μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης για την λειτουργία της οθόνης και μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης για τη λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος.
- **Στον βραστήρα νερού.** Στο δευτερεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή για βραστήρα νερού υπάρχει μόνο μια σπείρα έτσι ώστε να υποβιβάζει την τάση. Έτσι δημιουργείται ρεύμα μεγάλης έντασης για να ζεστάνει το νερό.
- **Στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.** Μια σημαντική χρήση του μετασχηματιστή γίνεται στα ηλεκτρικά δίκτυα για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τον τόπο παραγωγής της στον τόπο κατανάλωσής της.

Για να αποφεύγονται μεγάλες απώλειες ενέργειας, σε θερμότητα στους αγωγούς του δικτύου μεταφοράς, πρέπει είτε να ελαττώσουμε την αντίσταση R των αγωγών είτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς. Για να ελαττωθεί η αντίσταση R πρέπει να χρησιμοποιηθούν σύρματα πολύ μεγάλου πάχους. Αυτό όμως έχει πολύ μεγάλο οικονομικό κόστος και συνεπώς είναι ασύμφορο. Αυτό που γίνεται στην πράξη είναι να ελαττώσουμε την ένταση του ρεύματος χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές.



Εικόνα 4-99

Σε κάθε ηλεκτροπαραγωγό σταθμό υπάρχουν μετασχηματιστές οι οποίοι ανυψώνουν την τάση, ώστε στις γραμμές μεταφοράς η ένταση του ρεύματος να είναι χαμηλή. Στο τέλος της γραμμής μεταφοράς υπάρχουν άλλοι μετασχηματιστές, σαν και αυτόν της εικόνας 4-100 που υποβιβάζουν την τάση ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα ασφαλείας στους καταναλωτές. Το πιο πάνω σχήμα δείχνει τον τρόπο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη σημασία του μετασχηματιστή στη μεταφορά αυτή.

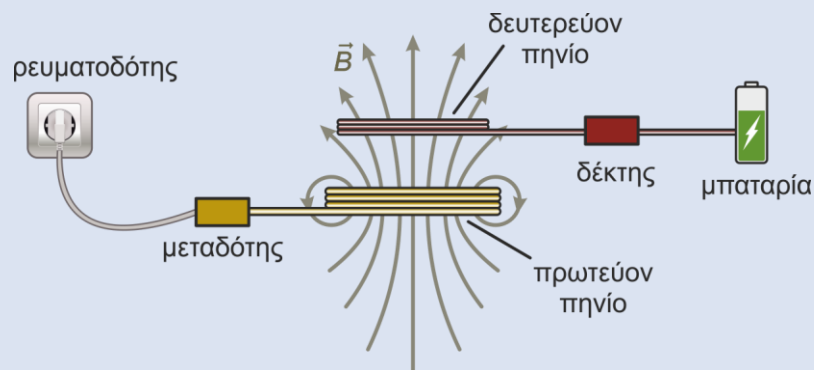


Εικόνα 4-100

Η ασύρματη φόρτιση συσκευών είναι μια σύγχρονη εφαρμογή του φαινομένου της αμοιβαίας επαγωγής, στην οποία στηρίζουν τη λειτουργία τους οι μετασχηματιστές. Πολλές συσκευές με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, όπως τα κινητά τηλέφωνα, τα ασύρματα τηλέφωνα, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, οι ξυριστικές μηχανές κ.λπ. μπορούν να φορτιστούν είτε με τη σύνδεσή τους στην παροχή μέσω του φορτιστή είτε ασύρματα με τη βοήθεια του φαινομένου της αμοιβαίας επαγωγής, χωρίς να συνδεθούν μέσω ειδικής επαφής με κάποια συσκευή.



Εικόνα 4-101 (Retrieved from <https://www.mouser.com/images/microsites/whats-old-new-wireless-charging-fig1.jpg>)



Εικόνα 4-102

Μέσα στη βάση φόρτισης υπάρχει ένα πηνίο (το πρωτεύον) που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, όταν συνδεθεί στην παροχή. Μέσα στη συσκευή υπάρχει επίσης ένα πηνίο (το δευτερεύον) το οποίο διαρρέεται από επαγωγικό ρεύμα, όταν η συσκευή τοποθετηθεί πάνω στη βάση φόρτισης, λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής που οφείλεται στην περιοδική μεταβολή της φοράς του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο. Το ρεύμα που επάγεται στο δευτερεύον πηνίο φορτίζει τις μπαταρίες της συσκευής.

Η απουσία σιδερένιου πυρήνα μεταξύ των δύο πηνίων, μειώνει το βαθμό σύζευξής τους και γι' αυτό η ασύρματη μεταφορά ενέργειας πρέπει να γίνεται από μικρή απόσταση για να είναι αποτελεσματική.

Ερωτήσεις Κατανόησης

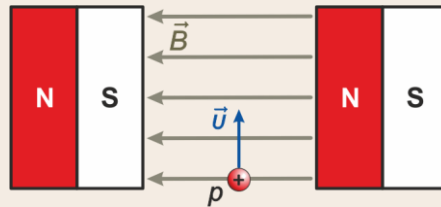
Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, **να αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

Α/Α	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό/Λάθος
1	Ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται ευθύγραμμα σε μια περιοχή του χώρου. Ποιες από τις πιο κάτω προτάσεις μπορεί να ισχύουν για το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή αυτή;	
	α) Το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στην ταχύτητα του σωματιδίου.	
	β) Το μαγνητικό είναι παράλληλο με την ταχύτητα του σωματιδίου.	
	γ) Το μαγνητικό πεδίο είναι μηδενικό στην περιοχή αυτή.	
2	Ένα φορτισμένο σωματίδιο εισέρχεται σε περιοχή με ομογενές μαγνητικό πεδίο. Τι από τα πιο κάτω είναι ορθό.	
	α) Το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί ν' αλλάξει την ταχύτητα του σωματιδίου.	
	β) Το μαγνητικό πεδίο μπορεί ν' αλλάξει το μέτρο της ταχύτητας του σωματιδίου.	
	γ) Το μαγνητικό πεδίο μπορεί ν' αλλάξει την κατεύθυνση της ταχύτητας του σωματιδίου.	
3	Όταν ένας ευθύγραμμος αγωγός κινείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, κάθετα με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, επάγεται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο.	
	α) Το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην ταχύτητα του αγωγού και παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο.	
	β) Το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην ταχύτητα του αγωγού και κάθετο στο μαγνητικό πεδίο.	
	γ) Το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο με την ταχύτητα του αγωγού και κάθετο στο μαγνητικό πεδίο.	
	δ) Χρειάζεται να ασκηθεί εξωτερική δύναμη στον αγωγό για να συνεχίσει να κινείται με σταθερή ταχύτητα.	
	ε) Ο αγωγός θα συνεχίσει να κινείται με σταθερή ταχύτητα.	
4	Η συνισταμένη δύναμη που ασκεί ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο στη μαγνητική βελόνα είναι μηδέν.	
5	Ένας ιδανικός μετασχηματιστής δεν μπορεί να μεταβάλει την ηλεκτρική ισχύ, που παράγεται στο πρωτεύον κύκλωμα (γινόμενο $I_1 V_1$).	

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

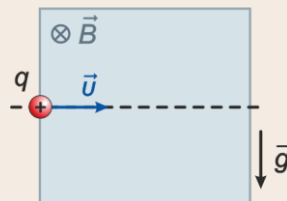
Κίνηση φορτίου σε μαγνητικό πεδίο

- Ένα πρωτόνιο εισέρχεται με ταχύτητα μέτρου $3,5 \times 10^4$ m/s, κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης μέτρου $4,2 \times 10^{-4}$ T όπως φαίνεται στην εικόνα 4-103. Να υπολογίσετε τη μαγνητική δύναμη Lorentz που ασκείται στο πρωτόνιο.



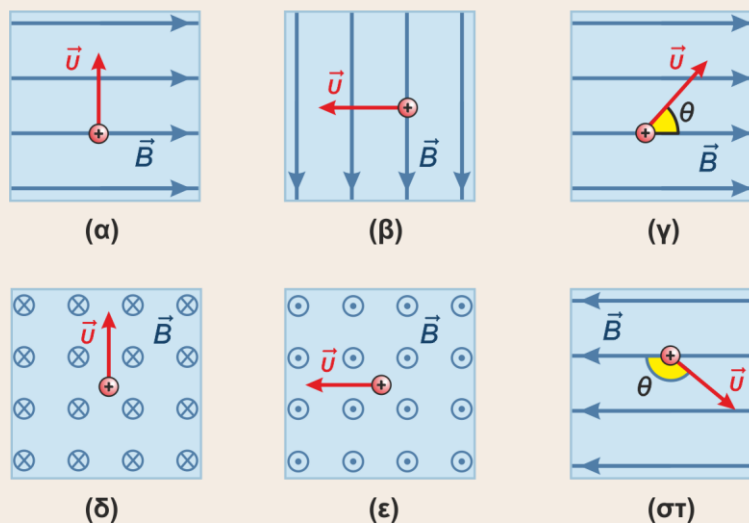
Εικόνα 4-103

- Ένα ιόν άνθρακα μάζας $2,01 \times 10^{-26}$ kg και φορτίου $+1,6 \times 10^{-16}$ C, εισέρχεται με οριζόντια ταχύτητα μέσα σε οριζόντιο ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης μέτρου $6,32 \times 10^{-5}$ T. Η ταχύτητα του ιόντος είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στη εικόνα 4-104. Να υπολογίσετε το μέτρο της ταχύτητας του ιόντος ώστε να συνεχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή κατά τη διέλευση του μέσα από το μαγνητικό πεδίο.



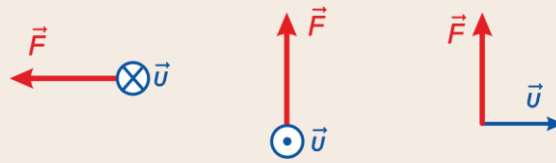
Εικόνα 4-104

- Να εξηγήσετε πως μεταβάλλεται το μέτρο της ταχύτητας ενός ηλεκτρονίου που κινείται με ταχύτητα u :
 - παράλληλα σε μακρύ ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό.
 - κάθετα σε μακρύ ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό.
- Να βρείτε την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που ασκείται σε ένα πρωτόνιο το οποίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, στις πιο κάτω περιπτώσεις, της εικόνας 4-105.



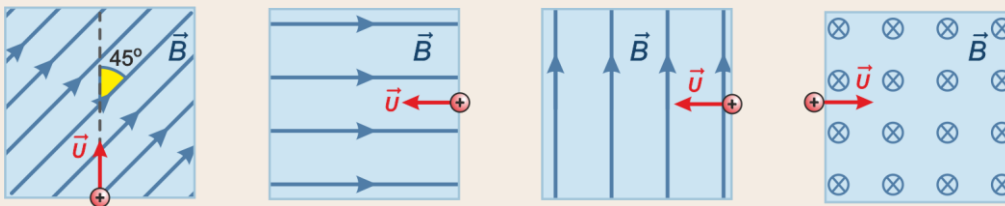
Εικόνα 4-105

5. Να βρείτε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που ασκεί δύναμη πάνω σε ένα κινούμενο θετικό φορτίο, στις πιο κάτω περιπτώσεις, της εικόνας 4-106.



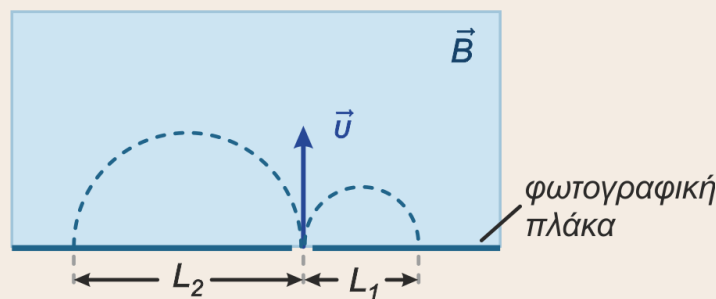
Εικόνα 4-106

6. Να βρείτε την κατεύθυνση της δύναμης που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε ένα θετικό πεδίο, τη στιγμή που εισέρχεται μέσα σε αυτό, στις πιο κάτω περιπτώσεις.



Εικόνα 4-107

7. Δύο φορτισμένα σωματίδια με μάζες m_1 και m_2 εισέρχονται, με την ίδια ταχύτητα \vec{v} από ένα άνοιγμα σε χώρο που υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , κάθετο στο επίπεδο της σελίδας. Η ταχύτητα των σωματιδίων είναι παράλληλη με το επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα πάνω. Τα δύο σωματίδια αφού κινηθούν στο χώρο του μαγνητικού πεδίου αφήνουν ίχνη πάνω σε φωτογραφική πλάκα σε αποστάσεις L_1 και $L_2 = 2L_1$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-108.



Εικόνα 4-108

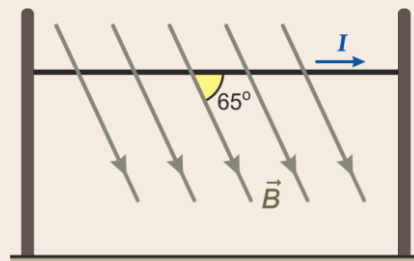
- α) Αν το σωματίδιο μάζας m_1 έχει φορτίο $-q$, να καθορίσετε τη φορά του μαγνητικού πεδίου.
- β) Να αποδείξετε ότι η ακτίνα της τροχιάς, που διαγράφει ένα φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου q , όταν εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο B , με διεύθυνση κάθετη στις γραμμές του πεδίου δίνεται από τη σχέση

$$r = \frac{m|\vec{v}|}{|\vec{B}||q|}$$

- γ) Αν το σωματίδιο μάζας m_2 έχει φορτίο $+q$, να υπολογίσετε το λόγο m_1/m_2 των μαζών των δύο σωματιδίων.

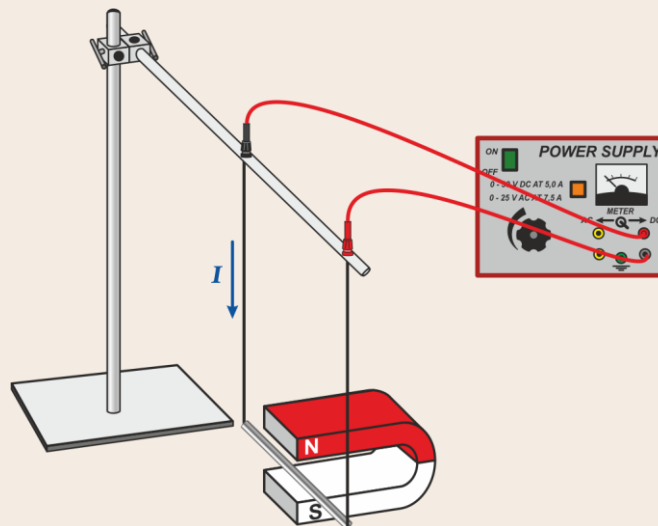
Δύναμη Laplace σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

8. Ένα καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως 10 A με κατεύθυνση, η οποία σχηματίζει γωνία 30° με μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0,5 T. Να υπολογίσετε το μέτρο της μαγνητικής δύναμης που ασκείται σε ένα τμήμα του καλωδίου μήκους 5 m.
9. Ένας οριζόντιος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα 15 A με κατεύθυνση το θετικό ημιάξονα Ox. Η διεύθυνση του ρεύματος είναι κάθετη με την διεύθυνση ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου \vec{B} . Αν στον αγωγό ασκείται δύναμη ανά μονάδα μήκους ίση με 0,12 N/m με κατεύθυνση τον αρνητικό ημιάξονα Oy, να προσδιορίσετε την ένταση και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.
10. Μία οριζόντια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού μήκους 58 m διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως 2,2 kA, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-109. Το μαγνητικό πεδίο της γης στην περιοχή αυτή είναι 5×10^{-5} T και σχηματίζει γωνία 65° με το καλώδιο (γραμμή μεταφοράς). Να βρείτε το μέτρο και την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που ασκείται στο καλώδιο.



Εικόνα 4-109

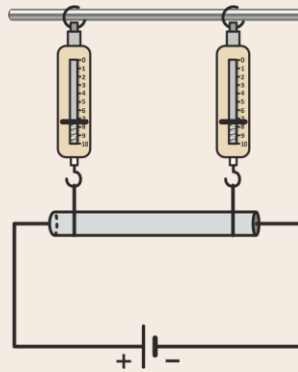
11. Η πιο κάτω διάταξη της εικόνας 4-110 απεικονίζει έναν αγωγό ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος κάθετα στις μαγνητικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 4-110

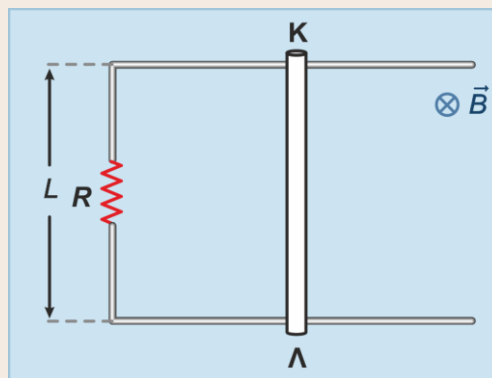
- α) Να προσδιορίσετε την κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που θα ασκηθεί στον αγωγό αν αυτός αρχίσει να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.
- β) Να εξηγήσετε αν θα διαφοροποιηθεί η μαγνητική δύναμη αν αντιστρέψω τα καλώδια στο τροφοδοτικό.

12. Ένα σύρμα μήκους $L = 0,6 \text{ m}$ και βάρους $B_s = 0,12 \text{ N}$, είναι αναρτημένο από δύο δυναμόμετρα και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I , όπως δείχνει το πιο κάτω σχήμα 4-111. Στο χώρο που βρίσκεται το σύρμα, εφαρμόζεται ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης μέτρου $|\vec{B}| = 0,4 \text{ T}$.



Εικόνα 4-111

- α) Να προσδιορίσετε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου ώστε η ένδειξη των δυναμόμετρων να γίνει ίση με μηδέν.
- β) Να υπολογίσετε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που πρέπει να διαρρέει το σύρμα, έτσι ώστε η ένδειξη των δυναμόμετρων να γίνει ίση με μηδέν.
13. Μία αγώγιμη ράβδος ΚΛ μήκους $L = 1,2 \text{ m}$ ολισθαίνει πάνω σε οριζόντιες ράγες αμελητέας αντίστασης, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματίζεται κλειστός αγώγιμος βρόχος συνολικής αντίστασης $R = 6,0 \Omega$. Η ράβδος βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης $2,5 \text{ T}$ το οποίο είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα μέσα.



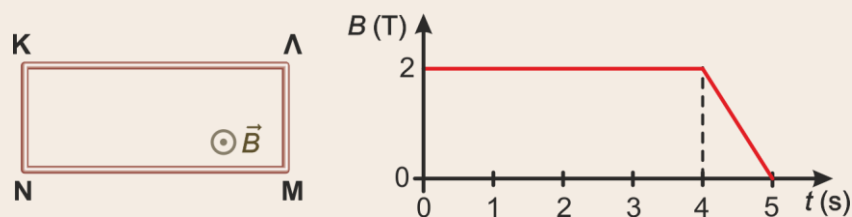
Εικόνα 4-112

Αν το επαγωγικό ρεύμα στο βρόχο έχει ένταση $0,5 \text{ A}$ τότε:

- α) Να υπολογίσετε το μέτρο της ταχύτητας της ράβδου
- β) Να προσδιορίσετε τη φορά της κίνησης της ράβδου ώστε το επαγωγικό να τη διαρρέει με φορά από πάνω προς τα κάτω.
- γ) Να υπολογίσετε το μέτρο και να προσδιορίσετε τη φορά της δύναμης που πρέπει να ασκείται στη ράβδο ώστε η ταχύτητά της να παραμείνει σταθερή.

Μαγνητική Ροή και Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

14. Ένα τετράγωνο, αγώγιμο πλαίσιο με πλευρά $L = 5,0 \text{ cm}$ βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης $B = 0,16 \text{ T}$.
- α) Να υπολογίσετε τη μαγνητική ροή στο πλαίσιο όταν (Α) το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο την επιφάνειά του και (Β) όταν το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει γωνία 30° με το κάθετο στην επιφάνεια του πλαισίου διάνυσμα.
- β) Αν η αντίσταση του πλαισίου είναι $0,012 \Omega$, να υπολογίσετε την μέση ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πλαίσιο, όταν αυτό περιστρέφεται από τη θέση (Β) στη θέση (Α) σε χρονικό διάστημα $0,14 \text{ s}$.
15. Ένας τετράγωνος αγώγιμος βρόχος βρίσκεται μέσα ομογενές μαγνητικό πεδίο. Το κάθετο στην επιφάνεια του βρόχου διάνυσμα είναι ομόρροπο με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Η μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του βρόχου είναι $7,0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.
Να υπολογίσετε τη μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του βρόχου, αν αλλάξει το σχήμα του από τετράγωνο σε κυκλικό.
16. Το ορθογώνιο πλαίσιο ΚΛΜΝ της εικόνας αποτελείται από 5 σπείρες και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο το οποίο, μεταβάλλεται σύμφωνα με τη γραφική παράσταση του σχήματος.



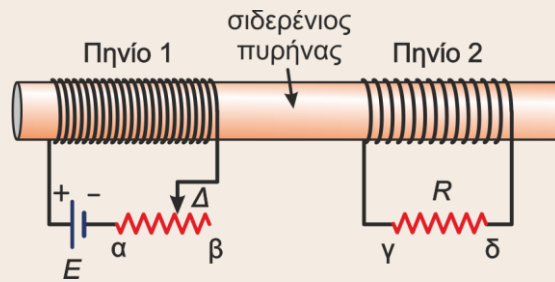
Εικόνα 4-113

- α) Να εξηγήσετε αν τη χρονική στιγμή $t = 2 \text{ s}$ το πλαίσιο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.
- β) Να εξηγήσετε γιατί τη χρονική στιγμή $t = 4,5 \text{ s}$ το πλαίσιο διαρρέεται από αριστερόστροφο ρεύμα.
- γ) Αν οι πλευρές ΚΛ και ΛΜ του ορθογωνίου πλαισίου έχουν μήκη 5 cm και 2 cm αντίστοιχα, να υπολογίσετε την ΗΕΔ από επαγωγή που αναπτύσσεται στο πλαίσιο και να χαράξετε τη γραφική της παράσταση συναρτήσεως του χρόνου, για το χρονικό διάστημα από 0 s μέχρι 5 s .
17. Ο ρότορας μιας ηλεκτρογεννήτριας περιστρέφεται με συχνότητα 60 Hz μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης $B = 0,15 \text{ T}$. Αν η επιφάνεια του πηνίου είναι $2,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, πόσες σπείρες πρέπει να έχει το πηνίο ώστε η μέγιστη τιμή της επαγωγικής τάσης να είναι $E_{\text{επ}} = 170 \text{ V}$;

Αμοιβαία Επαγωγή - Μετασχηματιστές

18. Αν η σύζευξη του πρωτεύοντος με το δευτερεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή είναι τέλεια ($\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 1$), να αποδείξετε ότι ο λόγος των επαγωγικών τάσεων $\frac{V_{\text{επ,πρωτ}}}{V_{\text{επ,δευτ}}}$ που αναπτύσσονται στα δύο πηνία, ισούται με το λόγο των αριθμών των σπειρών των δύο πηνίων $\frac{N_{\text{πρωτ}}}{N_{\text{δευτ}}}$.

19. Δύο πηνία βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-114.



Εικόνα 4-114

- α)** Όταν ο δρομέας Δ του ροοστάτη είναι ακίνητος, να εξηγήσετε:
- i.** αν υπάρχει μαγνητική ροή στο πηνίο 2 και αν αυτή μεταβάλλεται
 - ii.** αν το πηνίο 2 διαρρέεται από ρεύμα.
- β)** Όταν ο δρομέας Δ του ροοστάτη κινείται από το άκρο β στο άκρο α :
- i.** να εξηγήσετε αν το πηνίο 2 διαρρέεται από ρεύμα και
 - ii.** να προσδιορίσετε τη φορά του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R

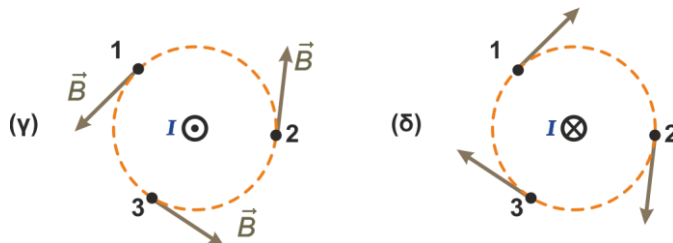
20. Ο λόγος των σπειρών του μετασχηματιστή του φορτιστή ενός MP3 player είναι 1:64. Αν το πρωτεύον πηνίο συνδέεται με την εναλλασσόμενη τάση της παροχής που είναι 240 V και παρέχει ρεύμα 300 mA στην μπαταρία, να υπολογίσετε:

- α)** την τάση στο δευτερεύον κύκλωμα
- β)** την ένταση του ρεύματος στο πρωτεύον κύκλωμα.

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΕΡΩΤΗΣΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ

4.5.1 α) Στα σημεία 1 και 2 το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα έξω ενώ στο σημείο 3 είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα μέσα.

β) Στα σημεία 1 και 2 το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα μέσα ενώ στο σημείο 3 είναι κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά προς τα έξω.



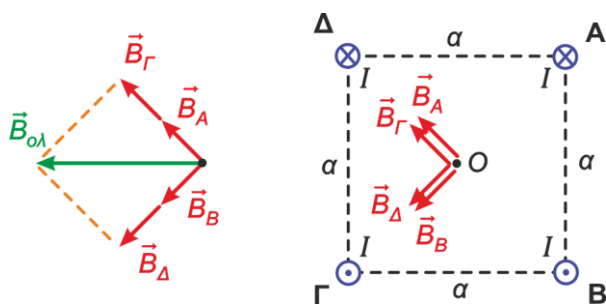
Εικόνα 4-115

4.5.2 α) Η φορά του ρεύματος είναι προς τα μέσα.

β) Η φορά του ρεύματος είναι προς τα έξω.

4.5.3 Τα μέτρα των μαγνητικών πεδίων των τεσσάρων αγωγών είναι ίσα διότι η ένταση του ρεύματος είναι η ίδια σε όλους τους αγωγούς και το σημείο Ο απέχει την ίδια απόσταση από όλους.

$$|\vec{B}_{ολ}| = \sqrt{(2|\vec{B}|)^2 + (2|\vec{B}|)^2} \Rightarrow |\vec{B}_{ολ}| = 2\sqrt{2}|\vec{B}|$$



Εικόνα 4-116

4.5.4 Σωστή επιλογή: **A**

Εφαρμόζοντας τον κανόνα του δεξιού χεριού βρίσκουμε ότι στις περιπτώσεις 2 και 4 τα μαγνητικά πεδία των δύο αγωγών στο σημείο P είναι αντίθετα.

4.6.1 Επειδή η φορά του ρεύματος είναι ίδια με τη φορά του μαγνητικού πεδίου ($\theta = 0^\circ$), η μαγνητική δύναμη είναι μηδέν.

Αν αντιστραφεί η φορά του ρεύματος ($\theta = 180^\circ$), η μαγνητική δύναμη πάλι είναι μηδέν.

Γενικά η μαγνητική δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό είναι ανάλογη του ημθ της γωνίας μεταξύ του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου.

4.6.2 α) Κάθετα στο επίπεδο της σελίδας, προς τα έξω.

β) Κάθετα στο επίπεδο της σελίδας, προς τα μέσα.

γ) Παράλληλα στο επίπεδο της σελίδας, προς τα δεξιά.

4.6.3 $F = BIL \eta \mu \theta$

- α) Σωστό διότι $\theta = 0^\circ$
- β) Αν ασκείται δύναμη στον αγωγό, τότε είναι σωστό γιατί για να ισχύει ο κανόνας του δεξιού χεριού πρέπει να αντιστραφεί η φορά της δύναμης.
- γ) Επειδή η δύναμη είναι ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αν αυξηθεί το μέτρο του μαγνητικού πεδίου, θα αυξηθεί και το μέτρο της μαγνητικής δύναμης.

4.6.4 Σύμφωνα με τον 3^ο Νόμο του Νεύτωνα, κάθε σώμα που δέχεται μια δύναμη F , ασκεί αντίθετη δύναμη στο σώμα που του άσκησε τη δύναμη. Συνεπώς, ο αγωγός ασκεί δύναμη στον μαγνήτη ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης από τη δύναμη που δέχτηκε.

4.7.1 Όχι, δεν ασκείται δύναμη στο φορτίο, επειδή η ταχύτητά του είναι μηδέν.

4.7.2 α) Σωστά: i, iii, iv β) Σωστά ii, iii

4.7.3 Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού,

Περιοχή 1: προς τα μέσα, Περιοχή 2: προς τα έξω, Περιοχή 3: προς τα μέσα, Περιοχή 4: προς τα έξω

4.7.4 Επειδή η κίνηση των θετικών φορτίων προς τη μία κατεύθυνση είναι ισοδύναμη με την κίνηση των αρνητικών φορτίων προς την αντίθετη κατεύθυνση, η μαγνητική δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό είναι η ίδια είτε με την συμβατική είναι με την πραγματική φορά του ρεύματος.

4.7.5 Ορθή πρόταση είναι μόνο η πρόταση **A**.

4.7.6 α) Σωστή απάντηση το **E**

Επειδή η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς είναι αντιστρόφως ανάλογη του φορτίου του σωματιδίου, σύμφωνα με τη σχέση $r = \frac{m|\vec{v}|}{|q||\vec{B}|}$, όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο μικρότερη θα είναι η ακτίνα της τροχιάς συνεπώς, μεγαλύτερο φορτίο θα έχει το σωματίδιο 1 και μικρότερο το σωματίδιο 3.

β) Με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού προσδιορίζουμε ότι τα φορτία των σωματιδίων 1 και 2 είναι αρνητικά και του σωματιδίου 3 θετικό.

γ) Αν τα σωματίδια 1 και 2 είχαν το ίδιο φορτίο τότε, επειδή η ακτίνα είναι ανάλογη της μάζας, το σωματίδιο 2 θα είχε μεγαλύτερη μάζα.

4.10.1 Σωστή απάντηση το **B**, διότι η επαγωγική τάση είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής και όχι της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με μεγάλο ρυθμό, τότε και η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό.

4.10.2 Το επαγωγικό ρεύμα στον βρόχο προκαλεί μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του με φορά προς τα κάτω, συνεπώς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ή πρέπει να μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση (προς τα κάτω) ή να αυξάνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση (προς τα πάνω) έτσι ώστε η μαγνητική ροή που οφείλεται στο επαγωγικό ρεύμα να αντισταθμίζει τη μεταβολή αυτή. Άρα, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είτε έχει φορά προς τα κάτω και το μέτρο της έντασης του μειώνεται είτε έχει φορά προς τα πάνω και το μέτρο της έντασής του αυξάνεται.

- 4.10.3 α)** Στις θέσεις 1 και 5 η μαγνητική ροή διαμέσου της επιφάνειας του βρόχου είναι μηδέν, συνεπώς και ο ρυθμός μεταβολής της ροής είναι μηδέν δεν επάγεται τάση για να προκληθεί ροή ρεύματος.
- β)** Σωστή απάντηση είναι το **iv**.

Στη θέση 2 η μαγνητική ροή στην επιφάνεια του βρόχου αυξάνεται προς τα μέσα, οπότε σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, το επαγωγικό ρεύμα πρέπει να δημιουργήσει μαγνητική ροή αντίθετης φοράς ώστε να ελαττώσει τη μεταβολή (να αντισταθεί στην αύξηση) της μαγνητικής ροής. Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, το επαγωγικό ρεύμα πρέπει να είναι αριστερόστροφο για να δημιουργήσει μαγνητική ροή προς τα έξω.

Στη θέση 3 η μαγνητική ροή στην επιφάνεια του βρόχου είναι σταθερή άρα ο ρυθμός μεταβολής της είναι μηδέν και γι' αυτό δεν επάγεται τάση στον βρόχο που να προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στη θέση 5 η μαγνητική ροή στην επιφάνεια του βρόχου μειώνεται προς τα μέσα, οπότε σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, το επαγωγικό ρεύμα πρέπει να δημιουργήσει μαγνητική ροή αντίθετης φοράς ώστε να ελαττώσει τη μεταβολή (να αντισταθεί στη μείωση) της μαγνητικής ροής. Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, το επαγωγικό ρεύμα πρέπει να είναι δεξιόστροφο για να δημιουργήσει μαγνητική ροή προς τα μέσα.

-
- 4.13.1** Σύμφωνα με τη σχέση $\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$, αν ο λόγος των τάσεων είναι $\frac{240\text{ V}}{24000\text{ V}} = \frac{1}{100}$, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον κύκλωμα θα είναι 100 φορές μικρότερο από το ρεύμα στο πρωτεύον.

- 4.13.2** Σωστή απάντηση το **Ε**.

Αν το πρωτεύον πηνίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, τότε η μαγνητική ροή που μεταφέρεται λόγω επαγωγικής σύζευξης στο δευτερεύον είναι σταθερή, συνεπώς ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι μηδέν και άρα δεν επάγεται τάση στο δευτερεύον κύκλωμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

4.1	Μαγνητισμός	3
4.2	Μόνιμοι μαγνήτες	3
4.3	Μαγνητικό πεδίο	5
4.4	Μαγνητικό πεδίο Γης	7
4.5	Πείραμα του Oersted - Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού	8
4.6	Δύναμη σε ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Νόμος Laplace	11
	Παράγοντες που καθορίζουν το μέτρο της δύναμης σε ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο	13
4.7	Κινούμενο φορτίο μέσα σε μαγνητικό πεδίο Ηλεκτρομαγνητική Δύναμη Lorentz	18
	Έργο μαγνητικής δύναμης σε κινούμενο φορτίο	19
4.8	Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού	26
4.9	Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς	27
4.10	Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή	29
	Μαγνητική ροή	29
	Ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή	31
	Νόμος επαγωγής του Faraday	32
	Επαγωγικό ρεύμα – Κανόνας του Lenz	32
	Κίνηση ευθύγραμμου αγωγού σε ομογενές μαγνητικό πεδίο	35
	Κανόνας Lenz και Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας.	37
	Κίνηση μεταλλικού πλαισίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο	37
4.11	Περιστροφική κίνηση πλαισίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο	39
4.12	Αμοιβαία επαγωγή	42
4.13	Μετασχηματιστής	43
	Χρήσεις Μετασχηματιστή	45
	Ερωτήσεις Κατανόησης - Ασκήσεις	47
	Απαντήσεις Ερωτήσεων Ελέγχου Κατανόησης	54