

Φυσική.....



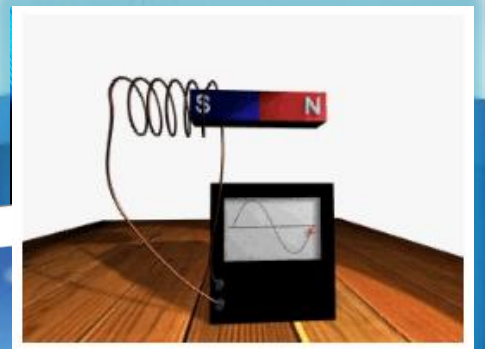
The Sun Tells the Time

The Moon Tells the Day

The Stars Tell the Month

ing inside a beautiful ce

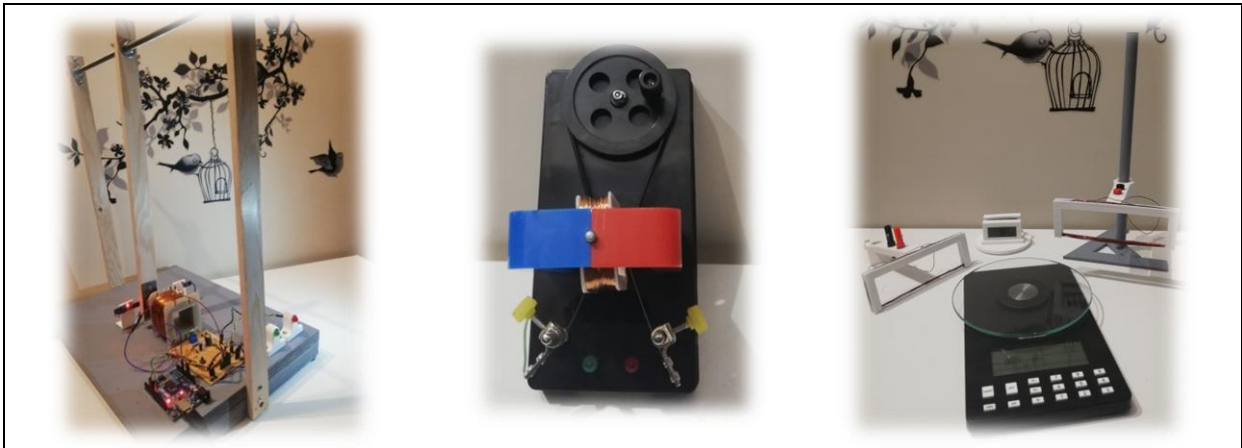
.....φυσικά!!!



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη εκπαιδευτικής διαδραστικής εφαρμογής
για τη διδασκαλία της Φυσικής»



Της φοιτήτριας
Αικατερίνης Κίτσιου
Αρ. Μητρώου: 52110Μ

Επιβλέπων
Dr Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Σίνδος, Φεβρουάριος 2025

Τίτλος Δ.Ε. : Ανάπτυξη εκπαιδευτικής διαδραστικής εφαρμογής για τη διδασκαλία της Φυσικής

Κωδικός Δ.Ε. : 23111

Όνοματεπώνυμο φοιτήτριας : Αικατερίνη Κίτσιου

Όνοματεπώνυμο εισηγητή : Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 19 Σεπτεμβρίου 2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. : 20 Φεβρουαρίου 2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Αικατερίνης Κίτσιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένειά μου»

Πρόλογος

Η εν λόγω διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εκτενή παρουσίαση των φαινομένων της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και της Δύναμης Laplace στη θεωρία και στο εργαστήριο (κατασκευές). Η εφαρμογή τους αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας, προχωρώντας με γοργά βήματα προς την πράσινη ανάπτυξη και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το θέμα φάνηκε εξ αρχής πολύ ενδιαφέρον. Ως εν ενεργεία εκπαιδευτικός σε επαγγελματικά λύκεια, θεωρώ ότι θα μπορούσα να τη χρησιμοποιήσω και να την εφαρμόσω στην πράξη μέσα στις διδακτικές αίθουσες, δίνοντας τη δυνατότητα στους μαθητές να αφομοιώσουν τις θεωρητικές της έννοιες με τον καλύτερο και πιο εποικοδομητικό τρόπο, μέσα από τις προσομοιώσεις και τελικά με τις πειραματικές διατάξεις που κατασκευάστηκαν για την επίτευξη του σκοπού αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ο προβληματισμός ήταν κυρίως το ποιος θα ήταν ο ιδανικότερος και αποτελεσματικότερος τρόπος μετάδοσης της γνώσης αυτών των αντικειμένων, οι έννοιες των οποίων μπορεί να είναι σχετικά γνωστές, αλλά όχι ιδιαίτερα αντιληπτές και βαθύτερα κατανοητές. Οι πειραματικές διατάξεις εμπλουτίστηκαν και με γνώσεις της ειδικότητάς μου, κάποιες από τις οποίες απέκτησα κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή αυτή, προσφέροντας μια πιο διαθεματική και STEM προσέγγιση των θεμάτων μελέτης και αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.



Περίληψη

Θέτοντας ως στόχο την πλήρη κατανόηση των εννοιών τις οποίες πραγματεύεται η παρούσα εργασία και την πρακτική τους εφαρμογή μέσω πειραματικών διατάξεων, η δομή της διπλωματικής αυτής, επιμερίζεται σε τρία αλληλένδετα μέρη.

Στο πρώτο μέρος, παρέχονται όλες οι απαραίτητες προαπαιτούμενες γνώσεις και το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορούν στον μαγνητισμό και ηλεκτρομαγνητισμό, συμπεριλαμβανομένων της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και δύναμης Laplace.

Στο δεύτερο μέρος, γίνεται η παρουσίαση και εκτέλεση πληθώρας προγραμμάτων προσομοίωσης των προς μελέτη εννοιών, καθώς και της βασικής τους εφαρμογής, αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσα από τις προσομοιώσεις αυτές, ο μαθητής είναι σε θέση ν' αντιληφθεί και να οπτικοποιήσει τη συμπεριφορά και τον τρόπο λειτουργίας των αντίστοιχων αντικειμένων μελέτης, επαληθεύοντας ταυτόχρονα τις γνώσεις που απέκτησε στο πρώτο μέρος.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της παρούσας, υλοποιούνται μια σειρά από πειραματικές διατάξεις και κατασκευές, με σκοπό τόσο την επαλήθευση και εφαρμογή των αποκτηθέντων γνώσεων όσο και την εξάλειψη οποιωνδήποτε τυχόν αποριών και εναπομεινάντων κενών. Με τον τρόπο αυτό, ο μαθητής θα έχει αφομοιώσει και αντιληφθεί εμπειριστατωμένα όλη την προσφερόμενη θεωρητικά γνώση, ελέγχοντας ταυτόχρονα και την ορθότητα λειτουργίας των διατάξεων και εξάγοντας συμπεράσματα για τυχόν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από τα αναμενόμενα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν και απεικονίστηκαν στο πρώτο και δεύτερο μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι θεωρητικές γνώσεις επιβεβαιώνονται και επικαιροποιούνται με τη βοήθεια των προσομοιώσεων αλλά και μέσω των υλοποιούμενων πειραματικών διατάξεων, αρχικός στόχος ο οποίος μετά το πέρας των μετρήσεων στις κατασκευές θα έχει επιτευχθεί.



«Development of an educational interactive application for the teaching of Physics»

«Aikaterini Kitsiou»

Abstract

This thesis attempts to put forth both in theory and through workshop demonstration (constructions), the phenomena of Electromagnetic Induction and the Laplace Force. Their applications are integral parts of life, as society makes the transition to “green” technologies with use of renewable energy sources.

Aiming at the full understanding of the concepts which this work deals with and their practical application through experimental arrangements, the structure of this thesis is divided into three interrelated parts.

The first part is dedicated to providing the theoretical background concerning magnetism and electromagnetism, including electromagnetic induction and Laplace force.

In the second part, there is the presentation and execution of numerous simulation programs of the concepts to be studied, as well as their basic application, that of electricity production. Through these simulations, the student is able to perceive and visualize the behavior and operation of the respective study objects, verifying at the same time the knowledge acquired on the first part.

In the third and last part of this thesis, a series of experimental arrangements and constructions are implemented, with the aim of both verifying and applying the acquired knowledge and eliminating any possible questions and remaining gaps. In this way, the student will have assimilated and thoroughly understood all the knowledge offered in theory, at the same time checking the correctness of the operation of the provisions and drawing conclusions about any deviations of the results from the expected ones, as they were presented and illustrated in the first and second part of this thesis.

In conclusion, it can be said that the theoretical knowledge is confirmed and updated with the help of the simulations but also through the implemented experimental devices, an initial goal which after the measurements in the structures will have been achieved.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό μου δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν με τον τρόπο τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής και συνέβαλαν στην επίτευξη αποπεράτωσης της.

Κατ' αρχήν, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Ιορδάνη Κιοσκερίδη, τόσο για την ανάθεση της εργασίας όσο και για τη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Στη συνέχεια, τους αγαπητούς συναδέλφους στο σχολείο που εργάζομαι για την κατανόησή τους και την εμπύχωσή τους. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να κάνω στο τμήμα Μηχανολόγων και πιο συγκεκριμένα στον Χρήστο Πετκάκη για την επιμέλεια της μεταλλικής βάσης (ηλεκτροσυγκόλληση). Επίσης, τον Χρήστο Στυλιανίδη για τις φιλολογικές του παρεμβάσεις.

Τέλος, αλλά όχι λιγότερης σημασίας, ευχαριστώ πάρα πολύ τον πρώην, πλέον, συνάδελφο και επί σειρά ετών συνεργάτη και μέντορά μου Γιώργο Σαραντίδη, τόσο για την έμμεση και επιπλέον άμεση βοήθειά του στην επίλυση καίριων προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στην πορεία όσο και για την μεταλαμπάδευση των γνώσεών του όλα τα χρόνια που κάναμε συνδιδασκαλίες.

Οι "άτυχοι" βέβαια όλης αυτής της προσπάθειας ήταν τα μέλη της οικογένειάς μου, τα οποία ομολογώ ότι παραμέλησα κάποιες φορές αναγκαστικά και στα οποία εκτός από ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και μια μεγάλη συγγνώμη, ελπίζοντας κάποια στιγμή να καταλάβουν τους λόγους για τους οποίους αποφάσισα να κάνω αυτές τις μεταπτυχιακές σπουδές, εκπληρώνοντας ένα απωθημένο χρόνων.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	vi
Περίληψη	vii
Abstract	viii
Ευχαριστίες.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xvi
ΜΕΡΟΣ 1 ^ο : Εισαγωγικές πληροφορίες - Θεωρητικό υπόβαθρο	1
Κεφάλαιο 1ο : Μαγνητισμός.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Μαγνητισμός	1
1.2.1 Μαγνητισμός - Μόνιμος Μαγνήτης	1
1.2.2 Μόνιμοι μαγνήτες σε διάφορα μεγέθη, σχήματα και τύπους	3
1.3 Μαγνητικό πεδίο και μαγνητικές δυναμικές γραμμές	6
1.3.1 Εισαγωγή	6
1.3.2 Περιγραφή μαγνητικού πεδίου και των δυναμικών του γραμμών	6
1.3.3 Μαγνητικές δυναμικές γραμμές ραβδοειδούς μαγνήτη αξονικά μαγνητισμένου.....	10
1.4 Μαγνητική ροή.....	12
1.4.1. Εισαγωγή	12
1.4.2. Ορισμός μαγνητικής ροής Φ	12
1.5 Επίλογος	14
Κεφάλαιο 2ο : Ηλεκτρομαγνητισμός.....	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Το πείραμα και η ανακάλυψη του Oersted	15
2.3 Υπολογισμός μαγνητικής επαγωγής B - Νόμος των Biot και Savart και εφαρμογές	17
2.3.1 Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού	19
2.3.2 Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού.....	22
2.3.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς.....	25
2.4 Το φαινόμενο της επαγωγής.....	29
2.5 Ο Κανόνας του Lenz - Αρχή διατήρησης της ενέργειας στο φαινόμενο της επαγωγής....	31
2.6 Νόμος της Αυτεπαγωγής.....	33
2.7 Αμοιβαία επαγωγή.....	36
2.8 Δύναμη LAPLACE	39
2.9 Επίλογος	43

Κεφάλαιο 3ο : Ηλεκτρικές μηχανές.....	44
3.1 Εισαγωγή	44
3.2 Μετασχηματιστές (Μ/Σ)	44
3.2.1 Μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης (step up).....	48
3.2.2 Μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης (step down).....	48
3.2.3 Μετασχηματιστής απομόνωσης	49
3.2.4 Ισχύς Μ/Σ.....	49
3.3 Ηλεκτρογεννήτριες.....	53
3.3.1 Στρεφόμενο πλαίσιο – Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης.....	53
3.3.2 Κατασκευή και λειτουργία γεννήτριας	55
3.3.3 Παραγωγή συνεχούς τάσης (DC) - Γεννήτριες DC.....	57
3.3.4 Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης (AC) - Γεννήτριες AC.....	59
3.4 Ηλεκτροκινητήρες	63
3.4.1 Κινητήρες DC	63
3.4.2 Κινητήρες AC	65
3.5 Επίλογος	66
ΜΕΡΟΣ 2^ο : Προσομοιώσεις	67
Κεφάλαιο 4ο : Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	68
4.1 Εισαγωγή	68
4.2 1^ο πείραμα :	68
Μετακίνηση μόνιμου μαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο N σπειρών	68
4.3 2ο πείραμα	73
Μετακίνηση μόνιμου μαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο σπειρών < N.....	73
4.4 3^ο πείραμα	74
Μετακίνηση ηλεκτρομαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο N σπειρών.....	74
4.5 Επίλογος	75
Κεφάλαιο 5ο : Δύναμη Laplace	79
5.1 Εισαγωγή	79
5.2 Δύναμη Lorentz (Ηλεκτρομαγνητική ταλάντευση).....	79
5.3 Δύναμη Laplace	81
5.4 Δύναμη Laplace και ισορροπία	85
5.5 Επίλογος	87
Κεφάλαιο 6ο : Παραγωγή εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης	88
6.1 Εισαγωγή	88
6.2 Γεννήτρια Α.С.....	88
6.3 Γεννήτρια D.С.....	91

6.4	Κινητήρες.....	91
6.5	Επίλογος	93
ΜΕΡΟΣ 3^ο : Πειραματική διαδικασία – Κατασκευές.....		94
Κεφάλαιο 7ο : Πειραματική διάταξη ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής		95
7.1	Εισαγωγή	95
7.2	πειραματική διάταξη : Κίνηση ραβδόμορφου μαγνήτη μπροστά από πηνίο.....	95
7.3	Επίλογος	99
Κεφάλαιο 8ο : Πειραματικές διατάξεις δύναμης Laplace.....		100
8.1	Εισαγωγή	100
8.2	1 ^η πειραματική διάταξη : Απλό κύκλωμα με χρήση μικρών κομματιών καλωδίου, τροφοδοτικό και μαγνήτη	100
8.3	2 ^η πειραματική διάταξη : Κατασκευή με χρήση μικρών καλωδίων ή πηνίων σε πλαίσιο, ζυγαριά ακριβείας, τροφοδοτικό και μαγνήτη.....	101
8.4	Παραγωγή εναλλασσόμενες τάσης	108
8.5	Παραγωγή D.C. τάσης - Κινητήρας D.C.	110
8.6	Επίλογος	110
Κεφάλαιο 9ο : Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης.....		111
9.1	Εισαγωγή	111
9.2	Συμπεράσματα.....	111
9.3	Προτάσεις βελτίωσης	111
9.4	Επίλογος	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ		113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		115
A.1	Κύκλωμα πλακέτας και οπτο-ανακλαστήρας.....	115
A.2	Πρόγραμμα στο arduino uno	124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		126
B.1	Επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας.....	126
B.2	Λινκ διαδραστικού βίντεο για ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	126
B.3	Σταυρόλεξο για ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	127
B.4	Κουίζ ηλεκτρομαγνητισμού	127

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1ο :

Σχήμα 1. 1: Πετρώματα μαγνητίτη, τα οποία έλκουν ρινίσματα σιδήρου	1
Σχήμα 1. 2: Πόλοι του μαγνήτη - Αλληλεπιδράσεις μαγνητικών πόλων - Συνθήκες έλξης και άπωσης	2
Σχήμα 1. 3: Σχήματα μαγνητών και τύποι μαγνητισμού	3
Σχήμα 1. 4: Διάφορα σχήματα μόνιμων μαγνητών	4
Σχήμα 1. 5: α. Προσανατολισμός πυξίδας, β. Γεωγραφικοί πόλοι Γης, γ. Προσδιορισμός πόλων ραβδόμορφου μαγνήτη	5
Σχήμα 1. 6: α. Οι δύο πόλοι δε γίνεται ν' απομονωθούν, β. Συνύπαρξη μαγνητικών πόλων	5
Σχήμα 1. 7: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου : α. με χρήση πυξίδας/ων, β. με χρήση ρινισμάτων σιδήρου	6
Σχήμα 1. 8: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου διαφόρων σχημάτων μαγνητών και σχετικών θέσεων.	7
Σχήμα 1. 9: Κοντά στους πόλους του μαγνήτη το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς	7
Σχήμα 1. 10: Ένταση μαγνητικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από έναν ραβδόμορφο μαγνήτη	8
Σχήμα 1. 11: α. ομογενές και β. ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο i. μεταξύ δύο ραβδόμορφων μαγνητών και ii. μαγνήτη σχήματος U	9
Σχήμα 1. 12: Μαγνητική βελόνα και μαγνητικό πεδίο της Γης	9
Σχήμα 1. 13: Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη αξονικά μαγνητισμένου	11
Σχήμα 1. 14: Προσομοίωση δημιουργίας μαγνητικού πεδίου.....	11
Σχήμα 1. 15: Επίπεδη επιφάνεια S μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο υπό διάφορες γωνίες με τις δυναμικές γραμμές.....	12
Σχήμα 1. 16: Προσομοίωση υπολογισμού μαγνητικής ροής Φ επιφανείας A σε μαγνητικό πεδίο πυκνότητας B υπό γωνία θ	14

Κεφάλαιο 2ο :

Σχήμα 2. 1: Το πείραμα του Έρστεντ και η ανακάλυψη δημιουργίας μαγνητικού πεδίου	16
Σχήμα 2. 2: Το πείραμα του Έρστεντ μέσω προσομοίωσης	16
Σχήμα 2. 3: Μαγνητικό πεδίο ΔB στο σημείο A που δημιουργεί το τμήμα ΔI ενός ρευματοφόρου αγωγού έντασης I και σε απόσταση r από το A. Η διεύθυνσή του είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας και η φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα (⊗)	18
Σχήμα 2. 4: Μορφή μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού	19
Σχήμα 2. 5: Κανόνας δεξιού χεριού ή δεξιάς παλάμης	19
Σχήμα 2. 6: Μαγνητικό πεδίο στο σημείο A α. από συνεισφορά όλων των πολύ μικρών τμημάτων ΔI ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, β. γωνίες θ_1 και θ_2 (σχέση 2.4).....	20
Σχήμα 2. 7: Προσομοίωση υπολογισμού έντασης μαγνητικού πεδίου B αγωγού απείρου μήκους	21
Σχήμα 2. 8: Επίδραση κάθε μικρού μήκους (διαφορετικά χρώματα) αγωγού στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, α.- β. κάτοψη και γ.- δ. πλάγια όψη κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και διανύσματος B, β.- γ.- ε. χωρισμένου σε μικρά τμήματα με την αντίστοιχη συνεισφορά τους στο ολικό B	22

Σχήμα 2. 9: Μορφή μαγνητικού πεδίου με ρινίσματα σιδήρου και δυναμικές γραμμές α. κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού σε αντιπαράβολή με αυτή ενός β. ραβδόμορφου μαγνήτη	23
Σχήμα 2. 10: Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και διάνυσμα B	24
Σχήμα 2. 11: Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και υπολογισμού έντασης αυτού με μεταβολή των παραμέτρων του.....	24
Σχήμα 2. 12: Σωληνοειδές α. μήκους L με N σπείρες, διαμέτρου d και μορφή μαγνητικού πεδίου με β. με ρινίσματα σιδήρου κα γ. δυναμικές γραμμές.....	25
Σχήμα 2. 13: Σύγκριση μαγνητικού πεδίου α. σωληνοειδούς με αυτό ενός β. ραβδόμορφου μαγνήτη και γ. προσδιορισμός πόλων και φοράς B με τον κανόνα του δεξιού χεριού	26
Σχήμα 2. 14: Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς με διαδικτυακές εφαρμογές.....	27
Σχήμα 2. 15: <<Ο δίσκος του Φάραντεϊ, η πρώτη ηλεκτρογεννήτρια στην ιστορία, ένας τύπος ομοιοπολικής γεννήτριας>>	30
Σχήμα 2. 16: Κανόνας του Lenz και φορά επαγόμενου ρεύματος (Κανόνας δεξιού χεριού)	31
Σχήμα 2. 17: Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αντιτίθεται στη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, αδράνεια του κυκλώματος στη μεταβολή της κατάστασής του	35
Σχήμα 2. 18: Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αντιτίθεται στη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, αδράνεια του κυκλώματος στη μεταβολή της κατάστασής του	36
Σχήμα 2. 19: Εύρεση φοράς δύναμης Lorentz με τη βοήθεια του δεξιού χεριού	39
Σχήμα 2. 20: Η δύναμη F_{LOR} που ασκείται από ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα α. θετικό ή σε ένα β. αρνητικό φορτίο, όταν $B \neq (\perp \text{ ή } // u)$ και όταν γ. $B // u$	40
Σχήμα 2. 21: Η δύναμη Lorentz F_{LOR} και η δύναμη Laplace F_{LAP}	40
Σχήμα 2. 22: Προσδιορισμός κατεύθυνσης δύναμης Laplace με τον κανόνα του δεξιού χεριού	41
Σχήμα 2. 23: Σχεδίαση διανυσμάτων με διεύθυνση κάθετα από και προς τον αναγνώστη	42

Κεφάλαιο 3^ο :

Σχήμα 3. 1: Δομή και συμβολική παράσταση μετασχηματιστή.....	45
Σχήμα 3. 2: Τύποι M/Σ σε διάφορα μεγέθη	47
Σχήμα 3. 3: Συμβολισμοί M/Σ ως προς την τάση V του επαγόμενου σήματος.....	48
Σχήμα 3. 4: Στιγμιαία ισχύς και τρίγωνο ισχύος.....	50
Σχήμα 3. 5: Παραβολική απεικόνιση τριγώνου ισχύος και αντιστάθμισή του	51
Σχήμα 3. 6: Περιστροφική κίνηση πλαισίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω	53
Σχήμα 3. 7: Βασικά μέρη γεννήτριας - Δομικό διάγραμμα	55
Σχήμα 3. 8: Διαδικασία παραγωγής συνεχούς τάσης με τη χρήση συλλέκτη.....	57
Σχήμα 3. 9: Σήμα εξόδου γεννήτριας DC.....	58
Σχήμα 3. 10: Τύποι γεννητριών DC.....	59
Σχήμα 3. 11: Διαδικασία παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης με τη χρήση δύο δακτυλιδιών	59
Σχήμα 3. 12: Σήμα εξόδου γεννήτριας AC	60
Σχήμα 3. 13 : Τριφασική γεννήτρια AC	61
Σχήμα 3. 14: Τύποι κινητήρων DC	64
Σχήμα 3. 15: Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες.....	66

Κεφάλαιο 4^ο :

Σχήμα 4. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής phet colorado.....	68
Σχήμα 4. 2: Σύνοψη περιγραφής φαινομένου Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και κανόνα του Lenz	75
Σχήμα 4. 3: Περιβάλλον προσομοίωσης φαινομένου Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και κανόνα του Lenz by Sitsanlis Ilias	76
Σχήμα 4. 4: Περιβάλλον προσομοίωσης Εργαστήριο Faraday από το phet colorado	77
Σχήμα 4. 5: Περιβάλλον προσομοίωσης νόμου Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	78

Κεφάλαιο 5^ο :

Σχήμα 5. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Lorentz	79
Σχήμα 5. 2: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Laplace	81
Σχήμα 5. 3: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Laplace και ισορροπία	85

Κεφάλαιο 6^ο :

Σχήμα 6. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C. seilias.gr.....	88
Σχήμα 6. 2: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C. javalab.org.....	89
Σχήμα 6. 3: Παραπλήσιο περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C.	90
Σχήμα 6. 4: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας D.C.	91
Σχήμα 6. 5: Περιβάλλον προσομοίωσης κινητήρα D.C. (1)	92
Σχήμα 6. 6: Περιβάλλον προσομοίωσης κινητήρα D.C. (2)	93

Κεφάλαιο 7^ο :

Σχήμα 7. 1: Ξύλινο εκκρεμές για μέτρηση επαγόμενης τάσης.....	95
Σχήμα 7. 2: Μέτρηση επαγόμενης τάσης με τη βοήθεια παλμογράφου.....	96
Σχήμα 7. 3: Μέτρηση επαγόμενης τάσης στον παλμογράφο με χρήση του arduino από μικρότερο προς μεγαλύτερο ύψος του μαγνήτη του εκκρεμούς	98

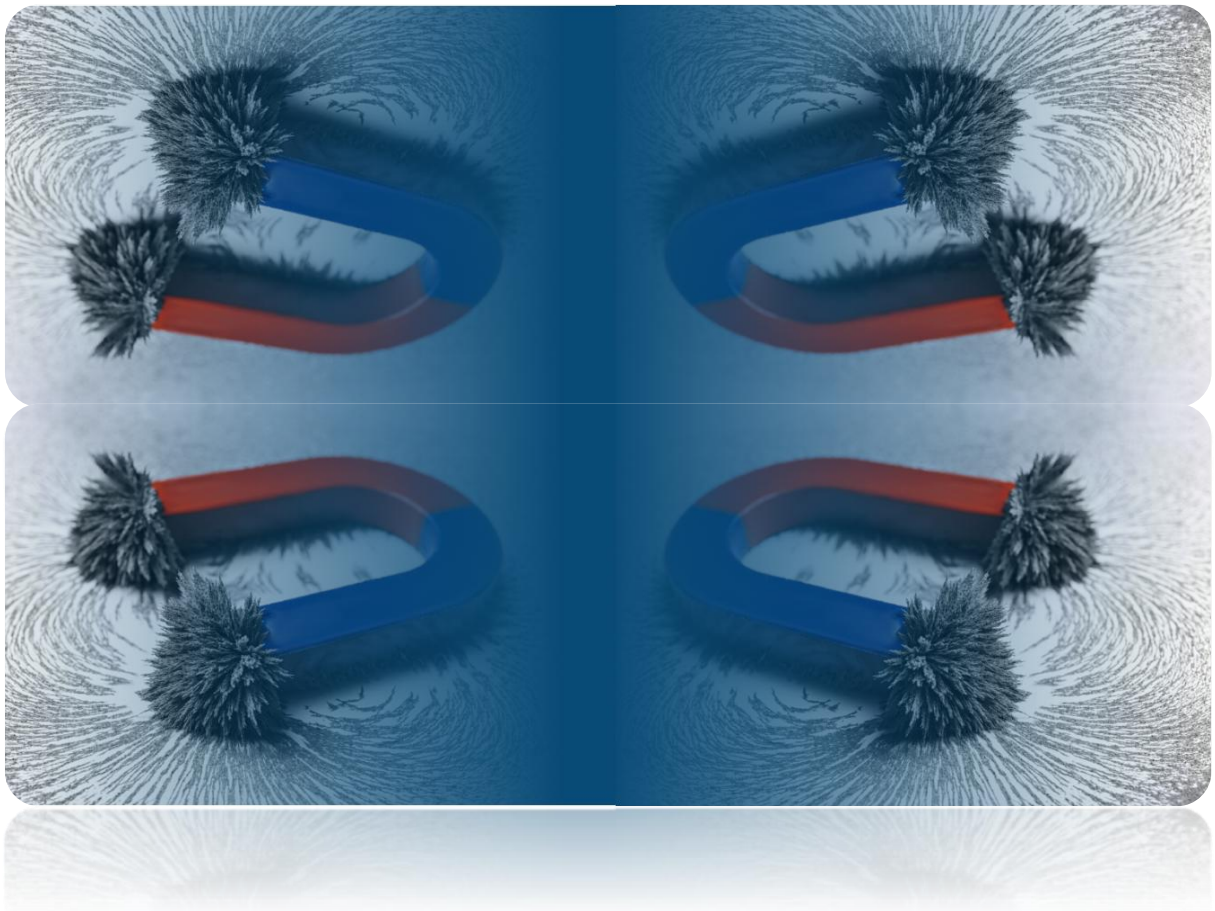
Κεφάλαιο 8^ο :

Σχήμα 8. 1: Εμφάνιση δύναμης Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό.....	100
Σχήμα 8. 2: Πειραματική διάταξη μέτρησης Δύναμης Laplace	102
Σχήμα 8. 3: Πειραματική διάταξη παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης	108
Σχήμα 8. 4: Πειραματική διάταξη παραγωγής d.c. τάσης - Κινητήρας d.c.	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 : Παραδείγματα μαγνητικών πεδίων με το μέτρο έντασής τους.....	10
Πίνακας 2.1 : Είδη μαγνητικών υλικών.....	18
Πίνακας 3.1 : Σχέσεις υπολογισμού ισχύος 1 [~] και 3 [~] Μ/Σ	52

ΜΕΡΟΣ 1^ο : Εισαγωγικές πληροφορίες - Θεωρητικό υπόβαθρο



Κεφάλαιο 1ο : Μαγνητισμός

1.1 Εισαγωγή

Ο μαγνητισμός είναι ένα από τα θεμελιώδη φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται στη φύση και έχει διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας. Από την παρατήρηση των πρώτων μαγνητικών ορυκτών έως τη διατύπωση των σύγχρονων θεωριών του ηλεκτρομαγνητισμού, η μελέτη του μαγνητισμού έχει αποκαλύψει τη βαθιά σύνδεση του με τον ηλεκτρισμό και τις δυνάμεις που κυβερνούν το σύμπαν. Στην καρδιά αυτής της επιστήμης βρίσκονται οι μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι διατηρούν το μαγνητικό τους πεδίο χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Το μαγνητικό πεδίο αυτό περιγράφει την περιοχή όπου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις, και οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οι οποίες οπτικοποιούν την κατεύθυνση και την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τέλος, η έννοια της μαγνητικής ροής αποκαλύπτει τη συνολική "ποσότητα" του μαγνητικού πεδίου που διαπερνά μια επιφάνεια, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη μελέτη των μαγνητικών και, όπως θα φανεί και στο δεύτερο κεφάλαιο, των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.

1.2 Μαγνητισμός

1.2.1 Μαγνητισμός - Μόνιμος Μαγνήτης

Από την καθημερινή μας εμπειρία γνωρίζουμε ότι ορισμένα υλικά, που ονομάζουμε μαγνήτες, έχουν την ικανότητα να έλκουν σιδερένια αντικείμενα, καθώς και να αλληλεπιδρούν (να έλκονται ή να απωθούνται) με άλλους μαγνήτες. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι παλιές και χρονολογούνται από την αρχαιότητα, όταν οι άνθρωποι ανακάλυψαν ότι ορισμένα κομμάτια ορυκτού είχαν την ιδιότητα να προσελκύουν σιδερένια αντικείμενα και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το ορυκτό αυτό ονομάζεται μαγνητίτης - ή μαγνήτης λίθος - και πρόκειται για φυσικό ορυκτό σιδήρου με χημική σύνθεση Fe_3O_4 , Σχ. 1.1.



Σχήμα 1. 1: Πετρώματα μαγνητίτη, τα οποία έλκουν ρινίσματα σιδήρου (Πηγή : [1])

Εκτός από τον μαγνητίτη (Fe_3O_4), που, όπως ειπώθηκε, είναι φυσικός μόνιμος μαγνήτης, υπάρχουν και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, όπως ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co) και το νικέλιο (Ni), καθώς και διάφορα κράματα και οξειδία αυτών, ορισμένα χαρακτηριστικά των οποίων επισημαίνονται παρακάτω:

1. Σίδηρος (Fe): Έχει καλές μαγνητικές ιδιότητες, αλλά είναι πιο επιρρεπής στην απώλεια της μαγνητικής του ιδιότητας.

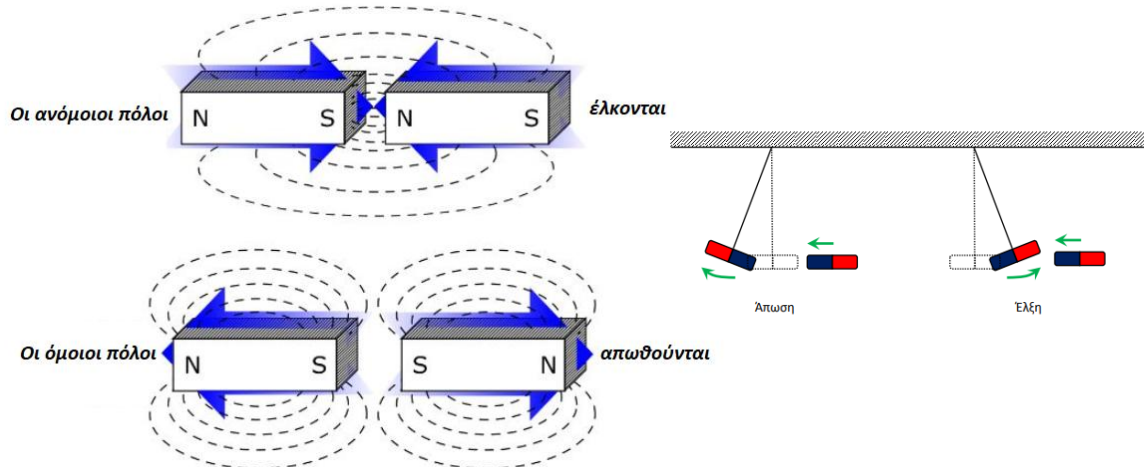
2. Κοβάλτιο (Co): Έχει υψηλή μαγνητική πυκνότητα και χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές, όπως στους μαγνήτες υψηλής απόδοσης.

3. Νικέλιο (Ni): Χρησιμοποιείται κυρίως σε κράματα με άλλους μαγνήτες για την ενίσχυση των μαγνητικών του ιδιοτήτων.

4. Κράματα: Υπάρχουν πολλά κράματα, όπως το NdFeB (Νεοδυμίου- Σιδήρου-Βορίου ή Νέο ή NIB διεθνές μαγνητικό οξείδιο, $Nd_2Fe_{14}B$), που προσφέρουν ισχυρούς μόνιμους μαγνήτες σε μικρό μέγεθος.

Ο μαγνητισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο που σχετίζεται με την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, όπως τα ηλεκτρόνια. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από τη διάταξη των ηλεκτρονίων τους. Ο μαγνητισμός, ωστόσο, μπορεί να είναι είτε μόνιμος (όπως σε έναν μαγνήτη ψυγείου) είτε προσωρινός (όπως στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία). Οι μόνιμοι μαγνήτες διατηρούν τη μαγνητική τους ιδιότητα χωρίς εξωτερική παρέμβαση, ενώ οι προσωρινοί μαγνήτες αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες μόνο όταν εκτίθενται σε ηλεκτρικό πεδίο, όπως θα ειπωθεί αργότερα.

Όταν παρατηρούμε την έλξη που ασκεί ένας μαγνήτης σε ένα σιδερένιο αντικείμενο, διαπιστώνουμε ότι αυτή δεν είναι ομοιόμορφη. Για παράδειγμα, οι άκρες ενός ραβδόμορφου μαγνήτη έλκουν πολύ πιο ισχυρά έναν μικρό σιδερένιο συνδετήρα σε σχέση με την κεντρική του περιοχή. Γι' αυτό το λόγο, θα αναφερόμαστε στις άκρες ενός μαγνήτη ως «πόλους». Οι μαγνήτες έχουν δύο κύριους πόλους: τον βόρειο και τον νότιο. Οι πόλοι αυτοί, λοιπόν, είναι οι περιοχές όπου η μαγνητική δύναμη είναι πιο έντονη. Σύμφωνα με τον νόμο των μαγνητικών πόλων, οι ίδιοι πόλοι (βόρειος με βόρειο ή νότιος με νότιο) απωθούνται, ενώ οι αντίθετοι πόλοι (βόρειος-νότιος) έλκονται μεταξύ τους, Σχ.1.2.



Σχήμα 1. 2: Πόλοι του μαγνήτη - Αλληλεπιδράσεις μαγνητικών πόλων - Συνθήκες έλξης και απόσσης (Πηγή : [2], [3])

Αυτή η αλληλεπίδραση είναι η βάση για πολλές εφαρμογές, από τα απλά μαγνητάκια ψυγείου έως τους ισχυρούς βιομηχανικούς μαγνήτες. Στην περίπτωση ενός μικρού μαγνήτη σε σχήμα κουμπιού (μαγνητάκια ψυγείου), οι πόλοι αντιστοιχούν στις δύο επίπεδες επιφάνειές του, Σχ.1.4.στ.

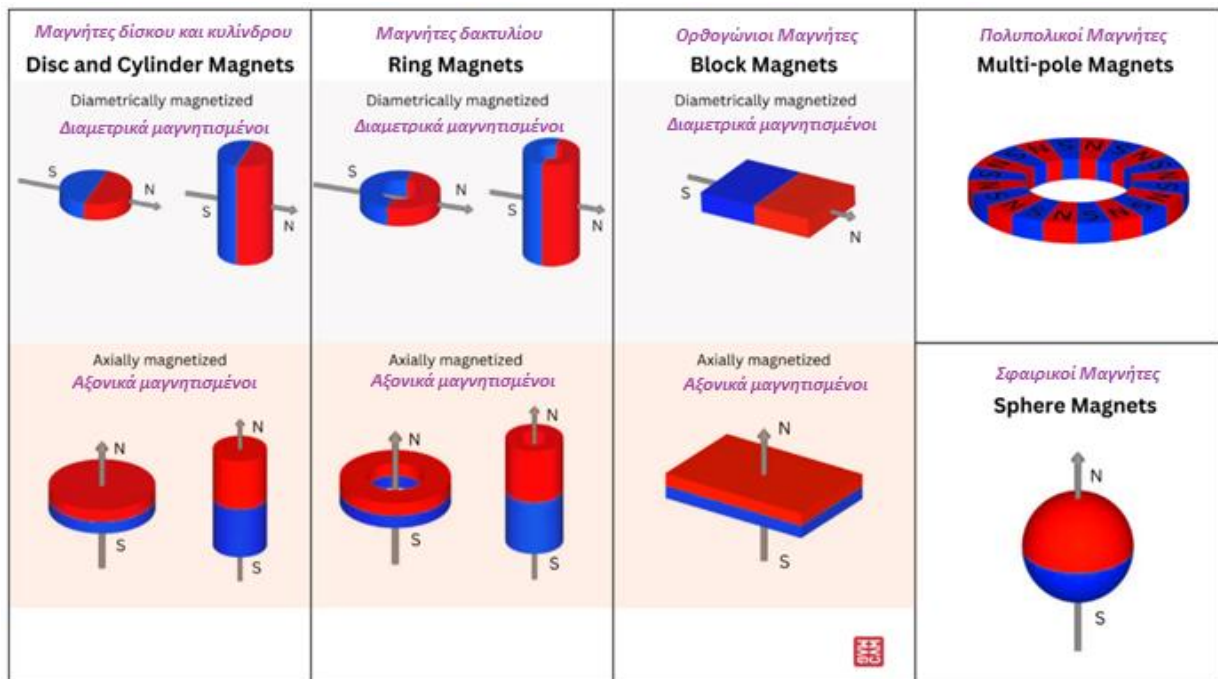
1.2.2 Μόνιμοι μαγνήτες σε διάφορα μεγέθη, σχήματα και τύπους

Το σχήμα και η μορφή κάθε μόνιμου μαγνήτη επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο που χρησιμοποιείται. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθορίζουν πώς διαμορφώνεται το μαγνητικό πεδίο που εκπέμπει ο μαγνήτης και την ένταση αυτού του πεδίου. Γενικά, υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι μαγνητισμού: αξονικός, ακτινικός, διαμετρικός και πολυπολικός.

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την επιδιωκόμενη εφαρμογή, οι πιο συνηθισμένες μορφές μόνιμων μαγνητών απαντώνται σε ορθογώνια, κυλινδρικά, δακτυλιοειδή, σφαιρικά, ραβδωτά και δισκοειδή σχήματα. Αυτές οι μορφές διατίθενται σε διάφορα μεγέθη, από μερικά χιλιοστά έως αρκετά μέτρα.

Οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος μαγνήτες συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερη ισχύ από τους μικρότερους, αλλά αυτό δεν ισχύει πάντα. Η δύναμή τους - αντοχή - εξαρτάται κυρίως από το υλικό κατασκευής. Οι περισσότεροι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευάζονται από ένα από τα τέσσερα κυριότερα υλικά - κράματα: Νεοδύμιο-Σίδηρος-Βόριο (NdFeB, κεραμικό (φερρίτης), Αλουμίνιο-Νικέλιο-Κοβάλτιο (AlNiCo) και Σαμάριο Κοβάλτιο (SmCo). Οι μαγνήτες NdFeB είναι οι πιο διαδεδομένοι τύποι μαγνητών σπάνιων γαιών. Διακρίνονται για την ικανότητά τους να συγκρατούν μεγάλη ροή μαγνητικού πεδίου χωρίς να είναι ιδιαίτερα εύθραυστοι. Είναι και ελαφριόι, επιτρέποντας την εύκολη διαμόρφωσή τους σε διάφορα σχήματα, ενώ ταυτόχρονα αντέχουν και σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στην παρακάτω εικόνα, Σχ.1.3, δίνεται μια ιδέα για τα διάφορα σχήματα και είδη μαγνητισμού που δημιουργούν :



Σχήμα 1. 3: Σχήματα μαγνητών και τύποι μαγνητισμού (Πηγή :[4])

Κάνοντας μια μικρή σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων μαγνητισμού.:

- **Αξονικός μαγνητισμός** (σταθερότητα κατά μήκος του άξονα)
 - **Σχήμα:** συνήθως εφαρμόζεται σε κυλινδρικούς ή δισκοειδείς μαγνήτες.
 - **Προσανατολισμός:** η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλη προς τον άξονα του μαγνήτη.

- **Εφαρμογές:** χρησιμοποιείται σε μηχανισμούς που απαιτούν σταθερή μαγνητική δύναμη κατά μήκος του άξονα,. Αυτό σημαίνει ότι οι πόλοι τους είναι τοποθετημένοι στις άκρες του μαγνήτη, επιτρέποντας την εστίαση του μαγνητικού πεδίου σε μια κατεύθυνση. Αυτοί οι μαγνήτες χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι γεννήτριες.

- **Διαμετρικός μαγνητισμός** (ομοιομορφία σε ολόκληρη την επιφάνεια)

- **Σχήμα:** συχνά χρησιμοποιείται σε κυλινδρικούς μαγνήτες.

- **Προσανατολισμός:** η μαγνητική ροή διατάσσεται διαμετρικά, δηλαδή από τη μία πλευρά στην άλλη.

- **Εφαρμογές:** ιδανικός για εφαρμογές που απαιτούν ομοιόμορφο πεδίο σε ολόκληρη την επιφάνεια, όπως σε μαγνητικά σφραγίσματα.

- **Ακτινικός μαγνητισμός** (κατεύθυνση από το κέντρο προς τα έξω)

- **Σχήμα:** συνήθίζεται σε δακτυλιοειδείς και σφαιρικούς μαγνήτες.

- **Προσανατολισμός:** το μαγνητικό πεδίο εκτείνεται ακτινικά από το κέντρο προς τα έξω.

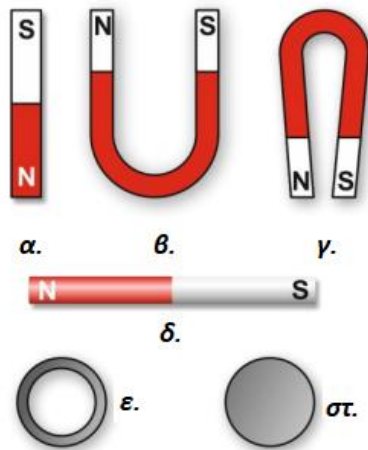
- **Εφαρμογές:** χρησιμοποιείται σε μαγνητικές αντλίες και συστήματα που απαιτούν κατευθυντικότητα.

- **Πολυπολικός μαγνητισμός** (πολυπλοκότητα με πολλούς πόλους)

- **Σχήμα:** συνήθως εμφανίζεται σε πολύπλοκους ή ειδικά σχεδιασμένους μαγνήτες.

- **Προσανατολισμός:** διαθέτει πολλούς πόλους, που σημαίνει ότι έχει πολλαπλά σημεία βόρειου και νότιου πόλου.

- **Εφαρμογές:** χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες τεχνολογίες, όπως σε μαγνητικά δοχεία και σε ορισμένες ηλεκτρονικές εφαρμογές για τη δημιουργία πολύπλοκων πεδίων.



- α. ευθύγραμμος μαγνήτης
- β. μαγνήτης σχήματος U
- γ. πεταλοειδής μαγνήτης
- δ. κυλινδρικός μαγνήτης
- ε. μαγνήτης δακτύλιος
- στ. μαγνήτης κουπί

Σχήμα 1. 4: Διάφορα σχήματα μόνιμων μαγνητών (Πηγή : [1])

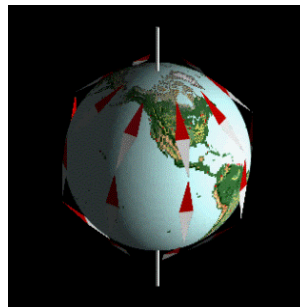
Για τον προσδιορισμό των πόλων ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, Σχ.1.5.γ, μπορούμε απλά να τον κρεμάσουμε με ένα σχοινί, επιτρέποντάς του να περιστραφεί ελεύθερα γύρω από το κέντρο του. Σύντομα, ο μαγνήτης θα σταθεροποιηθεί σε μια συγκεκριμένη θέση, ευθυγραμμισμένος κατά μήκος της κατεύθυνσης Βορρά-Νότου. Ο πόλος που δείχνει προς τον γεωγραφικό Βορρά ($B_{Γης}$) ονομάζεται «Βόρειος - (North)» και ο αντίστοιχος προς τον γεωγραφικό Νότο «Νότιος - (South)».

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο λειτουργεί και η μαγνητική πυξίδα. Σχ.1.5.α. Η βελόνα της δεν είναι τίποτε άλλο από ένας πολύ λεπτός μαγνήτης ικανός να περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα που περνά από το κέντρο της. Έτσι, σε κάθε σημείο της Γης, η μαγνητική βελόνα προσαρμόζεται, ώστε η

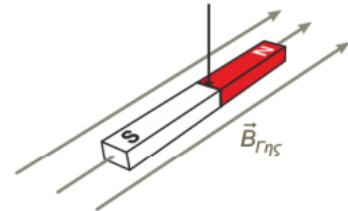
άκρη «N» να δείχνει κάθε φορά προς τον γεωγραφικό Βορρά, Σχ.1.5.β. Από τη στιγμή που οι αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι έλκονται, συνεπάγεται ότι ο νότιος μαγνητικός πόλος της Γης βρίσκεται κάπου κοντά στον βόρειο γεωγραφικό της πόλο.



α.



β.



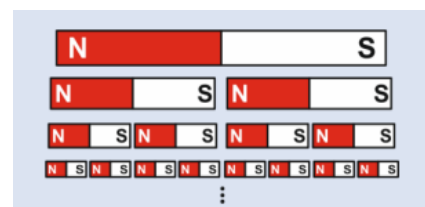
γ.

Σχήμα 1. 5: α. Προσανατολισμός πυξίδας, β. Γεωγραφικοί πόλοι Γης, γ. Προσδιορισμός πόλων ραβδόμορφου μαγνήτη (Πηγή :[1], [5])

Κάτι που αξίζει να σημειωθεί, όσον αφορά στους πόλους του μαγνήτη, είναι ότι αυτοί δεν μπορούν ν' απομονωθούν, δε γίνεται να είναι μόνοι τους στο χώρο, Σχ. 1.6.α, αλλά εμφανίζονται πάντα μαζί. Επομένως, αν κόψουμε σε δύο κομμάτια έναν ραβδόμορφο μαγνήτη, δε θα έχουμε ξεχωριστά τον βόρειο πόλο (όπως υποτίθεται συμβαίνει στο αναφερθέν σχήμα, όπου το ένα κομμάτι που αντιστοιχεί στο βόρειο πόλο παίρνει η πολική αρκούδα) από το νότιο πόλο (που είναι θεωρητικά το κομμάτι του μαγνήτη που κρατάει ο πιγκουίνος). Αυτό που θα συμβεί, φαίνεται στο Σχ.1.6.β : θα πάρουμε δύο μικρότερους μαγνήτες, όπου ο καθένας τους θα έχει και πάλι δύο διαφορετικούς μαγνητικούς πόλους.



α.



β.

Σχήμα 1. 6: α. Οι δύο πόλοι δε γίνεται ν' απομονωθούν, β. Συνύπαρξη μαγνητικών πόλων (Πηγή : [6],[1])

Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναλαμβάνεται και να προκύπτουν περισσότεροι μαγνήτες με ένα ζεύγος αντίθετων μαγνητικών πόλων (μαγνητικό δίπολο) για τον καθένα ξεχωριστά. Βέβαια, αυτοί θα είναι μικρότεροι σε μέγεθος και δύναμη, αφού η μαγνητική δύναμη, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος και το σχήμα των μαγνητών, καθώς και η απόσταση και ο προσανατολισμός τους, κάτι που έχει ως συνέπεια η ακριβής μαθηματική έκφραση που την περιγράφει να είναι αρκετά πολύπλοκη. [1], [4]

1.3 Μαγνητικό πεδίο και μαγνητικές δυναμικές γραμμές

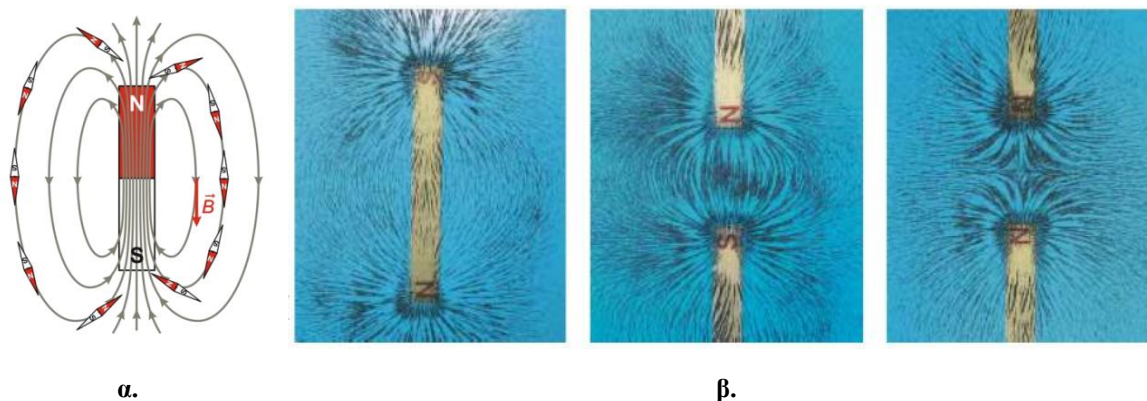
1.3.1 Εισαγωγή

Σαν έναν πρώτο ορισμό, και σε αντιστοιχία με το ηλεκτρικό πεδίο, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ο χώρος μέσα στον οποίο κάνουν την εμφάνισή τους μαγνητικές δυνάμεις. Ένας τέτοιος χώρος μπορεί να δημιουργείται γύρω από έναν μαγνήτη. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια αόρατη δύναμη που περιβάλλει έναν μαγνήτη, επηρεάζοντας την κίνηση άλλων μαγνητικών αντικειμένων και ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, που βρίσκονται κοντά του. Εμφανίζεται ως αποτέλεσμα του προσανατολισμού των ατόμων μέσα στον μαγνήτη και της κίνησης των ηλεκτρονίων, η οποία δημιουργεί μικρές μαγνητικές διπολικές περιοχές. Έτσι, οι μαγνήτες έλκονται ή απωθούνται μεταξύ τους λόγω του μαγνητικού τους πεδίου, το οποίο είναι εμφανές σε φυσικά φαινόμενα και έχει βρει πρακτικές εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως οι ηλεκτροκινητήρες και η μαγνητική αποθήκευση δεδομένων.

1.3.2 Περιγραφή μαγνητικού πεδίου και των δυναμικών του γραμμών

Όπως, λοιπόν και το ηλεκτρικό, έτσι και το μαγνητικό πεδίο είναι ένα διανυσματικό πεδίο, η περιγραφή του οποίου σε κάθε σημείο του χώρου γίνεται από τη διανυσματική ποσότητα, που ονομάζεται ένταση του μαγνητικού πεδίου, συμβολίζεται με το \vec{B} και μετριέται σε Τέσλα - Tesla (T), προς τιμή του Σέρβου φυσικού Nikola Tesla (Νικολά Τέσλα) (1856–1943). Επομένως, το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα αυτό, η ένταση και η φορά του οποίου καθορίζονται από τη δομή του μαγνήτη και την κατανομή των μαγνητικών διπόλων. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς μαγνητική επαγωγή \vec{B} μας δείχνει πόσο ισχυρό ή μη είναι το μαγνητικό πεδίο σε κάποιο σημείο του.

Για την απεικόνιση της κατεύθυνσης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, η πυκνότητα των οποίων αποκαλύπτει και την έντασή του σε κάθε σημείο. Αυτές βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους κοντά στους πόλους του μαγνήτη, άρα γι' αυτόν τον λόγο η ένταση του πεδίου εκεί είναι μεγαλύτερη. Η οπτικοποίηση του πεδίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, είτε τοποθετώντας μία ή πολλές πυξίδες γύρω από το μαγνήτη, Σχ.1.7.α, είτε με τη χρήση ρινισμάτων σιδήρου, Σχ. 1.7.β..

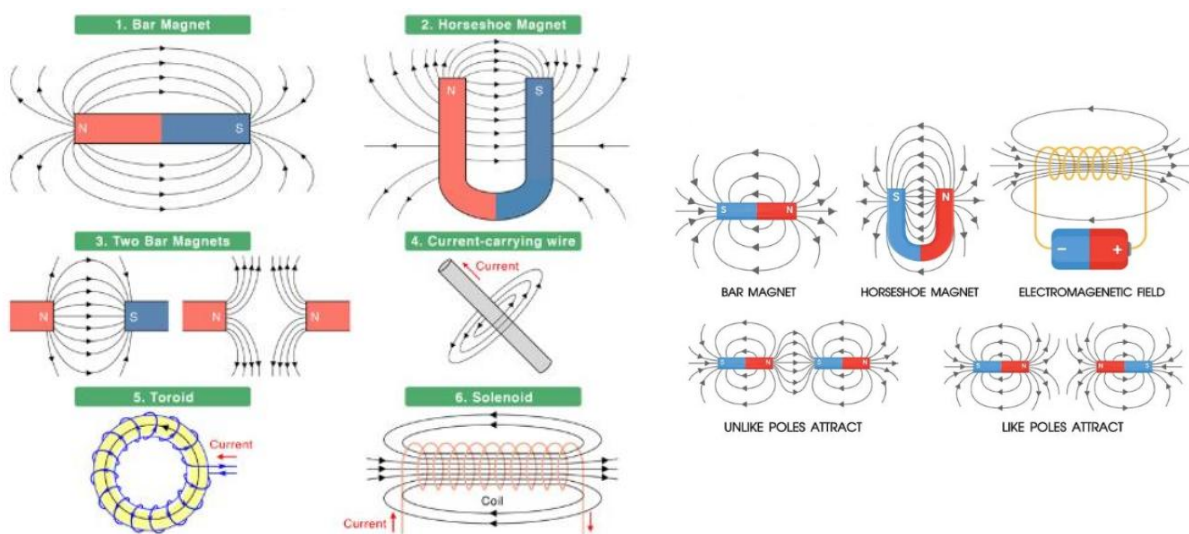


Σχήμα 1. 7: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου : α. με χρήση πυξίδας/ων, β. με χρήση ρινισμάτων σιδήρου (Πηγή : [1]-[7])

Όπως φαίνεται παραπάνω, σε κάθε σημείο του χώρου, ο Βόρειος πόλος (N) του μαγνήτη έλκει το Νότιο πόλο (S) της μαγνητικής βελόνας και ταυτόχρονα απωθεί τον Βόρειο πόλο (N) της. Αντίστοιχα

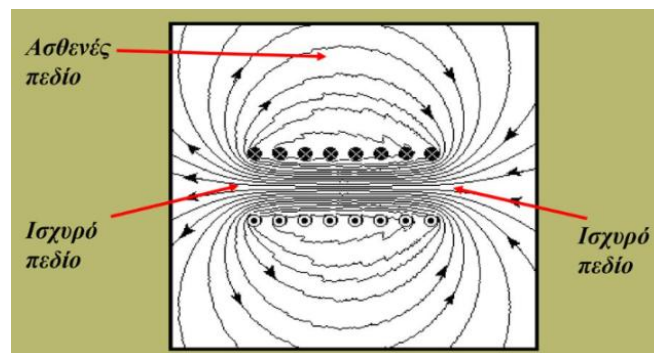
ο νότιος πόλος (S) του μαγνήτη απωθεί το Νότιο πόλο (S) της βελόνας και έλκει τον Βόρειο πόλο (N) της. Αυτή η αλληλεπίδραση των ελκτικών και απωστικών δυνάμεων προκαλεί ροπή στη μαγνητική βελόνα, η οποία την αναγκάζει να περιστραφεί γύρω από τον άξονά της. Με αυτόν τον τρόπο, η βελόνα ευθυγραμμίζεται, έτσι ώστε ο βόρειος πόλος της να δείχνει προς τον νότιο πόλο του μαγνήτη.

Η κατεύθυνση, τώρα, της βελόνας σε κάθε σημείο του χώρου μας δείχνει τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε αυτό το σημείο. Όπως συμβαίνει και με τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι και οι μαγνητικές γραμμές πεδίου (ή μαγνητικές δυναμικές γραμμές) είναι εφαπτόμενες στη βελόνα σε κάθε σημείο. Οι γραμμές αυτές ακολουθούν μια συγκεκριμένη πορεία, ξεκινώντας από τον βόρειο πόλο του μαγνήτη και καταλήγοντας στον νότιο πόλο του, περιγράφοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον μαγνήτη. Στην εικόνα Σχ. 1.8, φαίνονται οι δυναμικές γραμμές για διάφορα σχήματα μαγνητών.



Σχήμα 1. 8: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου διαφόρων σχημάτων μαγνητών και σχετικών θέσεων. (Πηγή :[2])

Όπως μπορούμε, επίσης, να διακρίνουμε, σε κάθε σημείο του χώρου αντιστοιχεί μία μόνο διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου \vec{B} , επομένως, σε κανένα σημείο του χώρου δε γίνεται να τέμνονται δύο μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Σε αντιστοίχιση με τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας είναι ανάλογος με το μέτρο του μαγνητικού πεδίου. Γι' αυτό και κοντά στους πόλους του μαγνήτη το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς, Σχ.1.9. Το σύνολο των δυναμικών γραμμών του πεδίου που δημιουργεί γύρω του ένας μαγνήτης αποτελεί και το μαγνητικό του φάσμα.

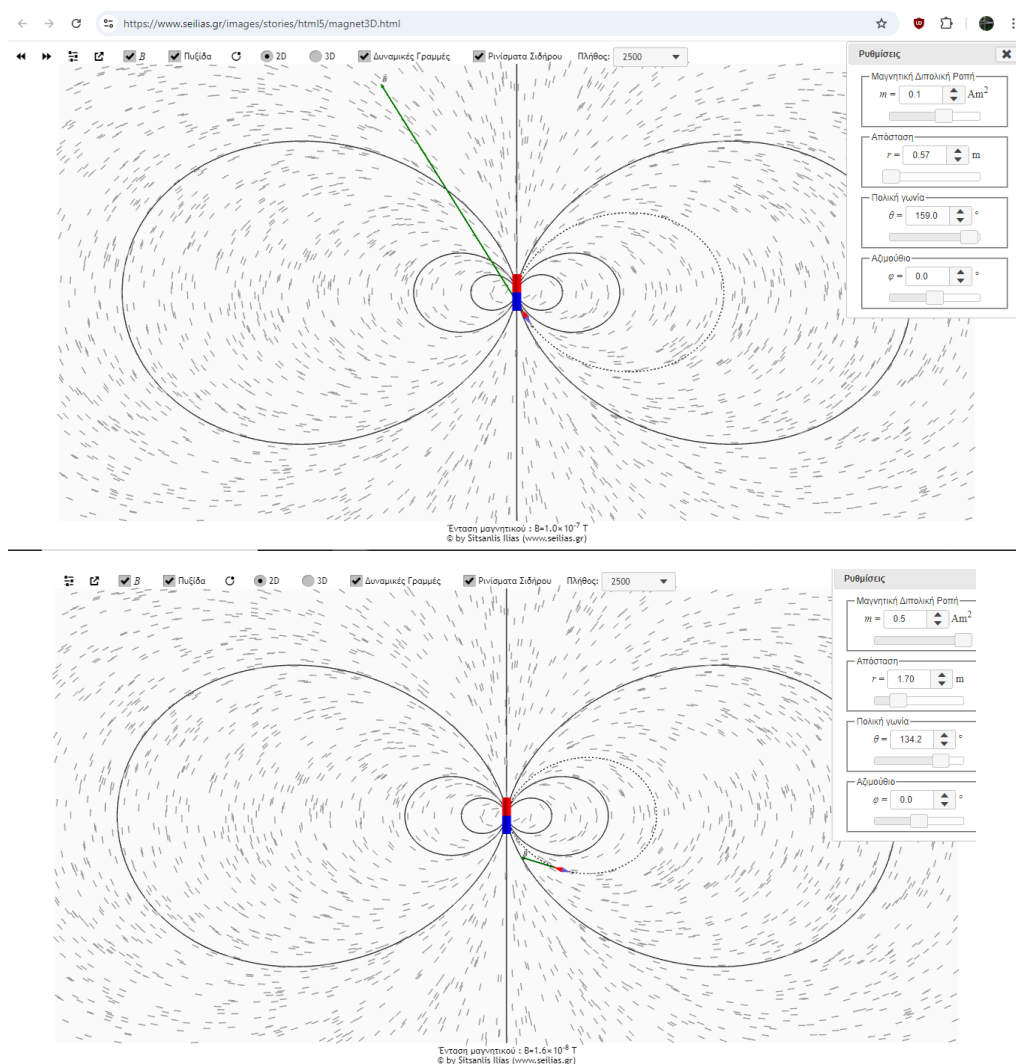


Σχήμα 1. 9: Κοντά στους πόλους του μαγνήτη το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς (Πηγή : [8])

Ρίχνοντας μια ματιά στο εσωτερικό ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, Σχ.1.7 και Σχ.1.8, αντιλαμβανόμαστε ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν ξεκινούν από τον βόρειο πόλο του μαγνήτη και καταλήγουν στον νότιο πόλο, αλλά σχηματίζουν κλειστές διαδρομές χωρίς αρχή και τέλος, διερχόμενοι μέσα στο μαγνήτη και κατευθυνόμενοι από τον νότιο στον βόρειο πόλο. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορούμε να απομονώσουμε τους πόλους του.

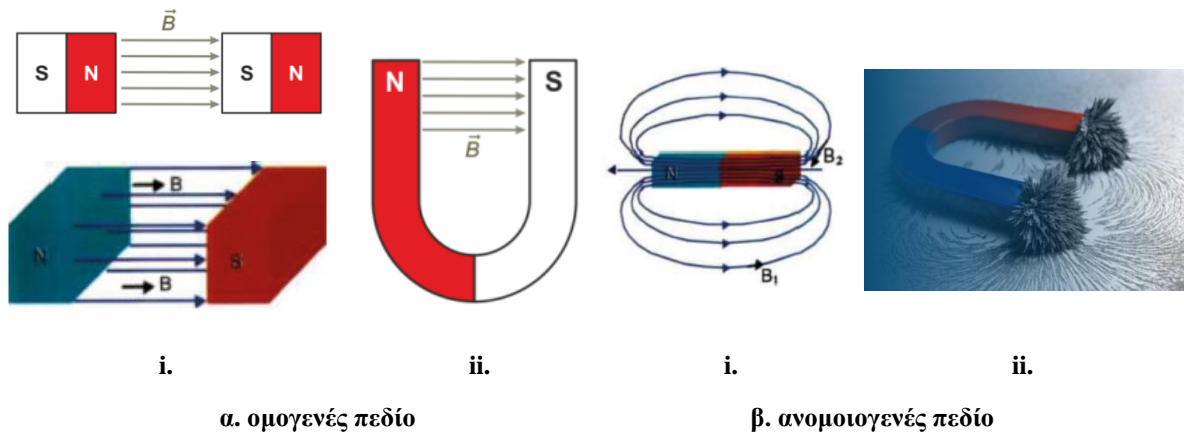
Όλα τα παραπάνω, μπορούν να διαπιστωθούν και να επαληθευτούν με τη χρήση προσομοίωσης, στιγμιότυπα της οποίας δίνονται στο Σχ.1.10, ανοίγοντας τον παρακάτω δοθέν υπερσύνδεσμο : <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magnet3D.html>.

Στην εν λόγω εφαρμογή, μας δίνεται η δυνατότητα να ρυθμίσουμε τη μαγνητική - διπολική ροπή, την απόσταση από το μαγνήτη, την πολική γωνία, καθώς και το αζιμούθιο.



Σχήμα 1. 10: Ένταση μαγνητικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από έναν ραβδόμορφο μαγνήτη (Πηγή :[9])

Το μαγνητικό πεδίο το διακρίνουμε σε δύο τύπους, το ομογενές και το ανομοιογενές. Όταν δύο αντίθετοι πόλοι βρίσκονται απέναντι και σε μικρή απόσταση ο ένας από στον άλλο, τότε στην περιοχή μεταξύ των δύο επίπεδων επιφανειών τους, δημιουργείται κατά προσέγγιση ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο. Σε κάθε σημείο της περιοχής αυτής, το μαγνητικό πεδίο, έχει το ίδιο μέτρο και κατεύθυνση (διεύθυνση και φορά). Έτσι, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές απεικονίζονται παράλληλες και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (ισόπυκνες).



Σχήμα 1. 11: α. ομογενές και β. ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο i. μεταξύ δύο ραβδόμορφων μαγνητών και ii. μαγνήτη σχήματος U (Πηγή : [10], [11])

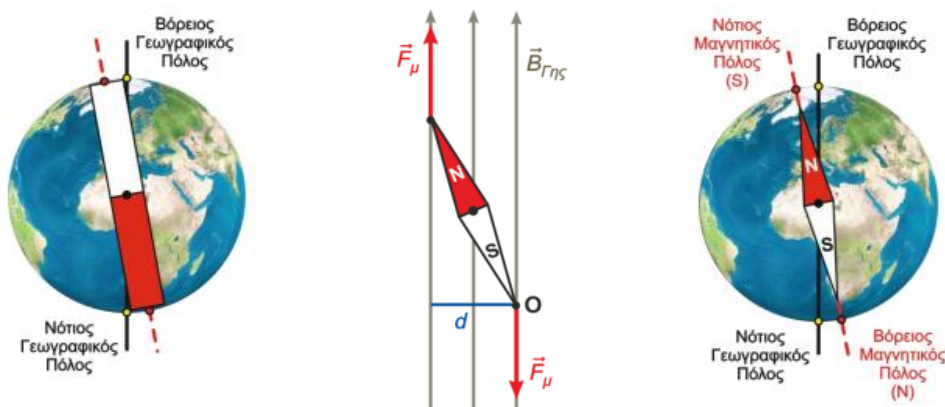
Αντίθετα, στις άλλες περιοχές γύρω από τους δύο μαγνήτες, όπου οι δυναμικές γραμμές δεν είναι παράλληλες, το πεδίο δεν είναι ομογενές και χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενές (με $B_2 > B_1$, Σχ.1.11.β.i,ii). Παρατηρώντας στο Σχ. 1.11. τη μορφή των δυναμικών γραμμών μεταξύ δύο ανόμοιων πόλων ή και ενός πεταλοειδούς, διακρίνονται καθαρά οι περιοχές στις οποίες το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές, καθώς και οι περιοχές στις οποίες δεν είναι ομογενές.

Ας εξετάσουμε πάλι μια μαγνητική βελόνα και τον τρόπο που επιδρά πάνω της ένα μαγνητικό πεδίο, ας πούμε της Γης, Η βελόνα μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από έναν σταθερό άξονα που διέρχεται από το κέντρο μάζας της, έχοντας 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. Με την υπόθεση ότι οι δύο μαγνητικές δυνάμεις \vec{F}_μ είναι ίσες σε μέτρο, στη μαγνητική βελόνα δρα ένα ζεύγος δυνάμεων, η ροπή \vec{M} του οποίου την αναγκάζει να περιστραφεί.

Το μέτρο της συνολικής ροπής του ζεύγους ισούται με το μέτρο των δυνάμεων επί την απόσταση d μεταξύ των φορέων των δυνάμεων, Σχ. 1.12.

$$|\vec{M}| = |\vec{F}_\mu| \cdot d \tag{1.1}$$

Η μαγνητική βελόνα περιστρέφεται έως ότου ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση Βορράς – Νότος. Στην διεύθυνση αυτή η απόσταση μεταξύ των φορέων είναι μηδέν και η ροπή του ζεύγους μηδενική, με αποτέλεσμα η μαγνητική βελόνα να παραμένει ακίνητη.



Σχήμα 1. 12: Μαγνητική βελόνα και μαγνητικό πεδίο της Γης (Πηγή :[1])

Μερικά χαρακτηριστικά και ενδεικτικά παραδείγματα μαγνητικών πεδίων με το αντίστοιχο μέτρο της έντασης του πεδίου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα, Πίνακας 1.1.

Πίνακας 1.1 : Παραδείγματα μαγνητικών πεδίων με το μέτρο έντασής τους (Πηγή : [1])

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

Οι μαγνήτες αποτελούν μια συναρπαστική πτυχή της φυσικής με πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Από την κατανόηση της λειτουργίας τους στην επιστήμη έως την εφαρμογή τους στην τεχνολογία, οι μαγνήτες συνεχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην πρόοδο της ανθρώπινης γνώσης και καινοτομίας. Μελετώντας τους, μπορούμε να αποκτήσουμε καλύτερη κατανόηση των φυσικών νόμων που διέπουν τον κόσμο μας.

Οι μαγνήτες έχουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία:

- **ηλεκτρονικά συστήματα:** χρησιμοποιούνται σε ηχεία, μικρόφωνα και σκληρούς δίσκους υπολογιστών,
- **μηχανές και γεννήτριες:** οι μαγνήτες παίζουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία κινητήρων και γεννητριών,
- **ιατρική:** μαγνητική τομογραφία (MRI) για την απεικόνιση εσωτερικών οργάνων,
- **μαγνητικά παιχνίδια:** χρησιμοποιούνται σε εκπαιδευτικά παιχνίδια για την εισαγωγή των παιδιών στις αρχές της μαγνητικής φυσικής.[1]

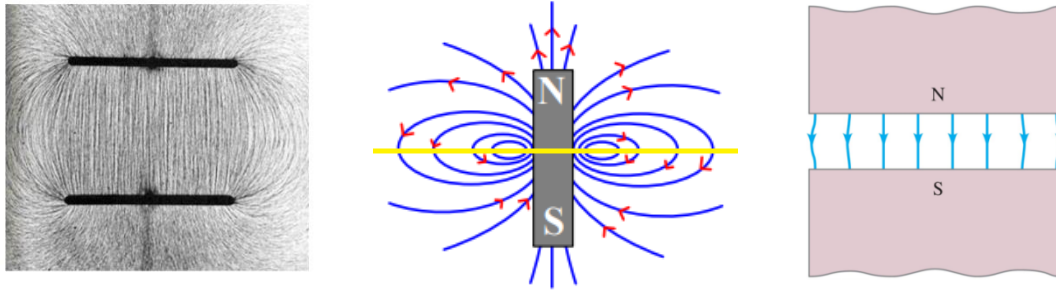
1.3.3 Μαγνητικές δυναμικές γραμμές ραβδοειδούς μαγνήτη αξονικά μαγνητισμένου

Είδαμε παραπάνω, Σχ.1.11, τι μορφής μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένας ραβδοειδής μαγνήτης και πώς σχηματίζονται οι δυναμικές γραμμές του, με τους δύο πόλους αριστερά και δεξιά της μεγάλης του επιφάνειας. Επίσης, ότι το πεδίο αυτό είναι ομογενές μέσα στον μαγνήτη και ανομοιογενές εκτός αυτού. Είδαμε, επιπλέον, και το ομογενές μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ ανόμοιων πόλων.

Στην περίπτωση, όμως, που ο ραβδοειδής μαγνήτης είναι αξονικά μαγνητισμένος, δηλαδή η μία του μεγάλη επιφάνεια αποτελεί τον βόρειο πόλο, π.χ. η πάνω και η κάτω το νότιο πόλο, τα πράγματα είναι κάπως διαφορετικά.

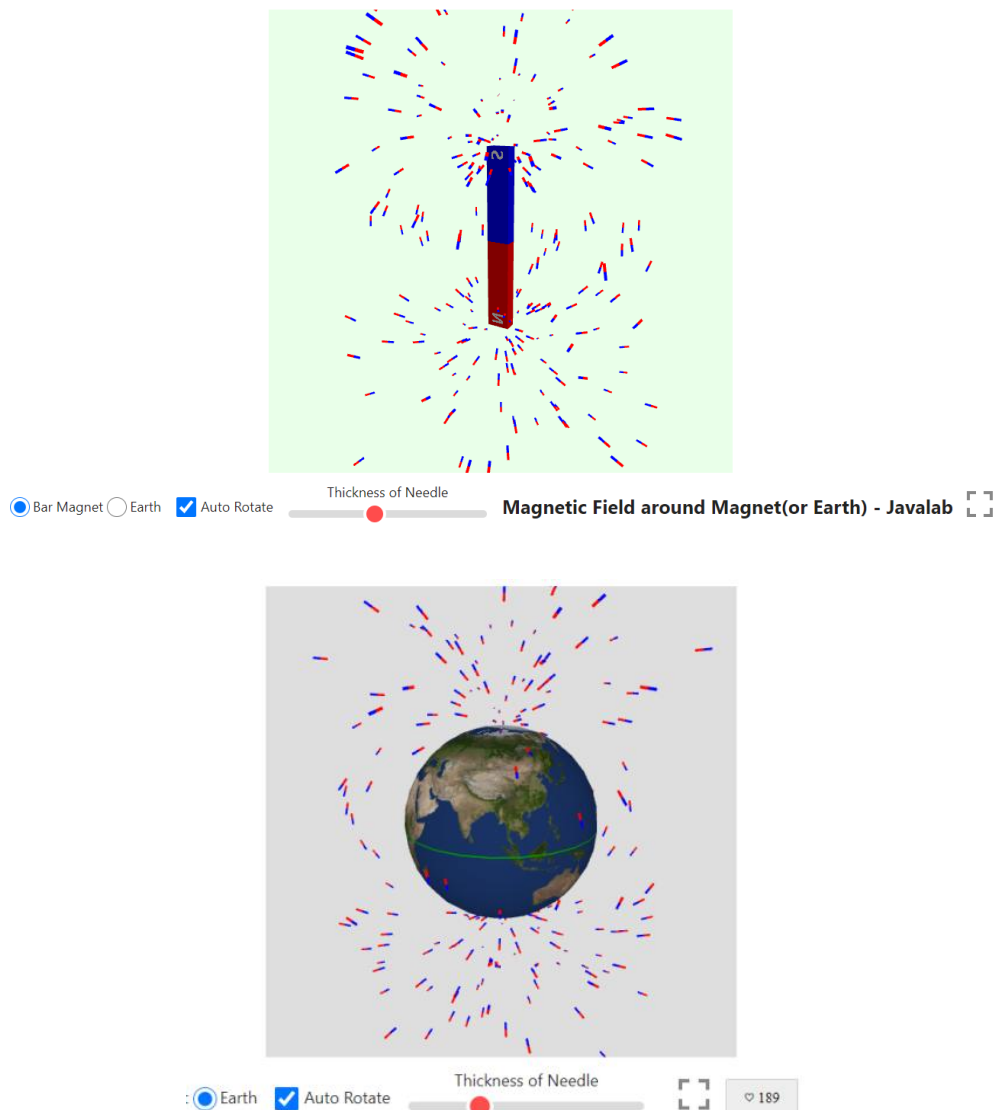
Αν φανταστούμε ότι έχουμε δύο ραβδόμορφους μαγνήτες τον έναν απέναντι στον άλλον, Σχ. 1.13, θα πάρουμε το μαγνητικό πεδίο του αριστερού σχήματος. Πλησιάζοντας συνεχώς τους δύο αυτούς μαγνήτες, μειώνοντας την μεταξύ τους απόσταση, θα φτάσουμε μέχρι το σημείο να τους φέρουμε σε απόλυτη επαφή, οπότε στην ουσία θα έχουμε δημιουργήσει έναν ραβδόμορφο μαγνήτη αξονικά

μαγνητισμένο. Το μαγνητικό πεδίο αυτού του μαγνήτη ως μια κάτοψή του, θα είναι σαν αυτή των εικόνων αριστερά και δεξιά, ελαχιστοποιώντας, όμως, την απόσταση των δύο πόλων του.



Σχήμα 1. 13: Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη αξονικά μαγνητισμένου (Πηγή :[12])

Μια άλλη εφαρμογή προσομοίωσης που παρουσιάζει ενδιαφέρον και μας δείχνει τη μορφή του μαγνητικού πεδίου είναι αυτή του υπερσυνδέσμου: https://javalab.org/en/magnet_en/ , στιγμιότυπα της οποίας παρατίθενται στο Σχ.1.14.



Σχήμα 1. 14: Προσομοίωση δημιουργίας μαγνητικού πεδίου (Πηγή :[13])

1.4 Μαγνητική ροή

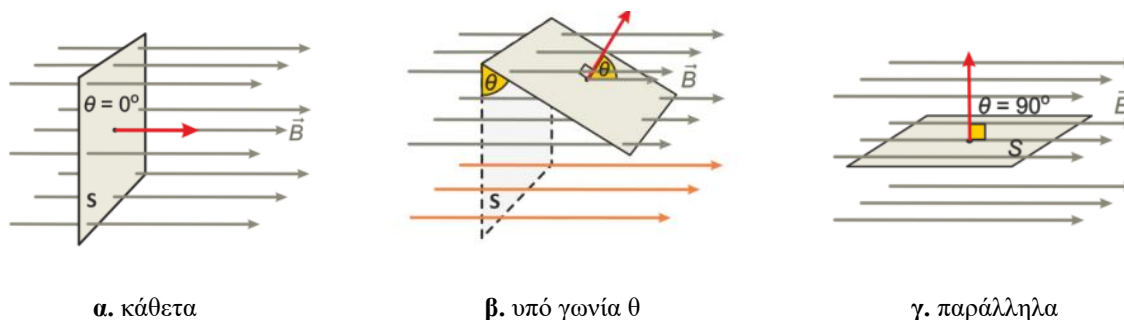
1.4.1. Εισαγωγή

Όπως είναι ήδη γνωστό, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν δείχνουν μόνο τη κατεύθυνση (διεύθυνση και φορά) του μαγνητικού πεδίου, αλλά και το μέτρο του. Στις περιοχές όπου οι γραμμές αυτές βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση η μία από την άλλη (αραιές), η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μικρή. Αντίθετα, σε περιοχές όπου οι γραμμές είναι πιο κοντά μεταξύ τους (πυκνότερες), η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη. Μ' άλλα λόγια, η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών σε μια περιοχή είναι ενδεικτική του πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο σε εκείνο το σημείο.

Η μαγνητική ροή είναι ένα φυσικό μέγεθος που περιγράφει τη συνολική ποσότητα του μαγνητικού πεδίου που διαπερνά μια δεδομένη επιφάνεια. Αποτελεί βασική έννοια στη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, καθώς συνδέει το μαγνητικό πεδίο με τις επιφάνειες που το διαπερνούν και παίζει καθοριστικό ρόλο στη διατύπωση των νόμων του Faraday και του Lenz για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, νόμους με τους οποίους θ' ασχοληθούμε σε επόμενα κεφάλαια.

1.4.2. Ορισμός μαγνητικής ροής Φ

Στην εικόνα που ακολουθεί, Σχ.1.15..α., απεικονίζονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης \vec{B} (διανυσματικό μέγεθος), οι οποίες διέρχονται κάθετα από μια επίπεδη επιφάνεια S με εμβαδόν A . Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διαπερνούν την επιφάνεια S είναι ανάλογος με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση που η γωνία θ μεταξύ του διανύσματος της έντασης B και της κάθετης στην επιφάνεια S είναι 0° , επιτυγχάνεται, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω, η μέγιστη δυνατή μαγνητική ροή Φ μέσω της επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή τη γωνία, όλες οι δυναμικές γραμμές διέρχονται κάθετα από την επιφάνεια, μεγιστοποιώντας τη ροή στην επιφάνεια που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 1. 15: Επίπεδη επιφάνεια S μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο υπό διάφορες γωνίες με τις δυναμικές γραμμές (Πηγή : [1])

Αν η επιφάνεια δεν είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, Σχ.1.15.β., ο αριθμός των γραμμών που την διαπερνούν είναι μικρότερος. Όταν, τέλος, η επιφάνεια βρίσκεται παράλληλα στις δυναμικές γραμμές, Σχ.1.15.γ., αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα καμία από αυτές να μην τη διαπερνά.

Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις, ορίζεται ένα νέο μονόμετρο φυσικό μέγεθος με το γράμμα Φ , η μαγνητική ροή, για να περιγράφεται ποσοτικά η πυκνότητα των μαγνητικών δυναμικών γραμμών διαμέσου μιας επιφάνειας, ως εξής :

<< 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 $|\mathbf{B}|$, 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 >>[1]

ή διαφορετικά

Η μαγνητική ροή Φ μέσα από μια επιφάνεια S ορίζεται ως το γινόμενο του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} και της προβολής της επιφάνειας σε κάθετο επίπεδο προς το πεδίο.

Μαθηματικά, εκφράζεται ως εξής:

$$\Phi = |\mathbf{B}| \cdot A \cdot \cos\theta \quad (1.2)$$

όπου:

Φ : η μαγνητική ροή (Weber, Wb),

\mathbf{B} : η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Tesla, T),

A : το εμβαδόν της επιφάνειας (m^2),

θ : η γωνία μεταξύ του διανύσματος της έντασης \mathbf{B} και της κάθετης στην επιφάνεια S

Η μονάδα της μαγνητικής ροής στο διεθνές σύστημα S.I. είναι το 1 Tm^2 και ονομάζεται Weber (Wb) προς τιμήν του Γερμανού φυσικού Wilhelm Eduard Weber (Βίλχελμ Έντουαρντ Βέμπερ) (1804 – 1891).

Από την παραπάνω εξίσωση, παρατηρείται ότι :

- όταν $\theta = 0^\circ$ - μαγνητικό πεδίο κάθετο στην επιφάνεια, έχουμε $\cos(0^\circ) = 1$ και η μαγνητική ροή είναι μέγιστη $\Phi = |\mathbf{B}|A$,
- όταν $\theta = 90^\circ$ - μαγνητικό πεδίο παράλληλο στην επιφάνεια, έχουμε $\cos(90^\circ) = 0$ και η μαγνητική ροή είναι μηδέν $\Phi = 0$.

Η μαγνητική ροή Φ μπορούμε να πούμε πως μας παρέχει μια μέτρηση του "αριθμού" των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που διαπερνούν μια επιφάνεια. Όσο πυκνότερες - περισσότερες - είναι οι δυναμικές γραμμές σε μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η μαγνητική ροή που διέρχεται από οποιαδήποτε επιφάνεια σε αυτήν την περιοχή. Έτσι, σε περιοχές ισχυρού μαγνητικού πεδίου, όπως κοντά στους πόλους ενός μαγνήτη, η μαγνητική ροή θα είναι υψηλή, ενώ σε περιοχές με ασθενέστερο πεδίο, η μαγνητική ροή αναμένεται μικρότερη.

Η σχέση (1.2) ισχύει, όταν το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές - οπότε και το \mathbf{B} είναι σταθερό - και η επιφάνεια S επίπεδη. Σε περιπτώσεις μη ομογενούς μαγνητικού πεδίου – με τις οποίες δε θ' ασχοληθούμε, η μαγνητική ροή υπολογίζεται με ολοκλήρωση :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.3)$$

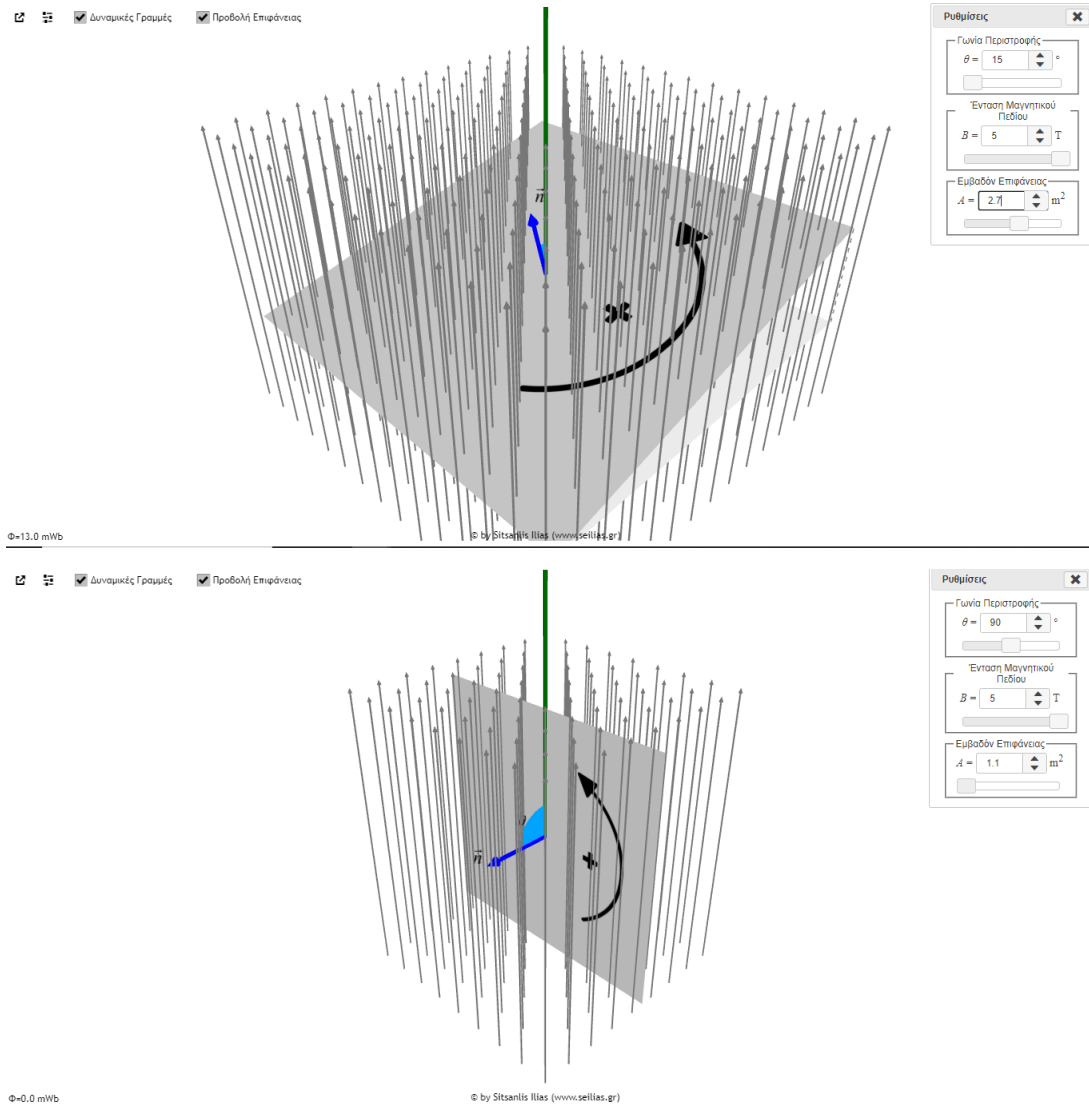
όπου : dA είναι το στοιχειώδες διανυσματικό εμβαδόν της επιφάνειας S .

Μια πολύ καλή εφαρμογή υπολογισμού της μαγνητικής ροής Φ βρίσκεται στον υπερσύνδεσμο <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/flux3D.html>, με τα αντίστοιχα στιγμιότυπα οθόνης να προβάλλονται στο Σχ.1.16.

Κάνοντας χρήση της εφαρμογής αυτής, έχουμε τη δυνατότητα να πειραματιστούμε με διάφορες τιμές που αφορούν τις τρεις μεταβλητές της μαθηματικής έκφρασης της μαγνητικής ροής, δηλ. τη

Κεφάλαιο 1

γωνία περιστροφής, την ένταση του μαγνητικού πεδίου και φυσικά το εμβαδόν της εμπεριεχόμενης στο πεδίο επιφάνειας.



Σχήμα 1. 16: Προσομοίωση υπολογισμού μαγνητικής ροής Φ επιφάνειας A σε μαγνητικό πεδίο πυκνότητας B υπό γωνία θ (Πηγή : [14])

1.5 Επίλογος

Η κατανόηση του μαγνητισμού και των σχετικών του εννοιών, όπως οι μόνιμοι μαγνήτες, το μαγνητικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές και η μαγνητική ροή, αποτελεί θεμέλιο λίθο για την ερμηνεία και την αξιοποίηση του ηλεκτρομαγνητισμού σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από τις καθημερινές χρήσεις, όπως οι πυξίδες και οι μαγνητικές κλειδαριές, μέχρι τις πιο σύνθετες τεχνολογίες, όπως οι ηλεκτρογεννήτριες και οι συσκευές μαγνητικής τομογραφίας, ο μαγνητισμός συνεχίζει να αποτελεί πηγή έμπνευσης και εξέλιξης. Η εμβάθυνση στις έννοιες αυτές δεν αποκαλύπτει μόνο την ομορφιά των φυσικών νόμων αλλά μας επιτρέπει να αξιοποιούμε τις δυνάμεις της φύσης για το όφελος της ανθρωπότητας. Η μαγνητική ροή είναι ένα κεντρικό μέγεθος στον ηλεκτρομαγνητισμό, το οποίο συνδέει το μαγνητικό πεδίο με τις επιφάνειες που αυτό διαπερνά. Παίζει καθοριστικό ρόλο σε πολλές φυσικές και τεχνολογικές εφαρμογές, από την ηλεκτροπαραγωγή έως τη διαγνωστική ιατρική.

Κεφάλαιο 2ο : Ηλεκτρομαγνητισμός

2.1 Εισαγωγή

Ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελεί έναν από τους τέσσερις θεμελιώδεις πυλώνες της φυσικής και περιγράφει τη σχέση μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων. Η ενότητα αυτή αναδεικνύει τη βαθιά σύνδεση ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό, η οποία έγινε αρχικά εμφανής μέσα από τις πρωτοποριακές πειραματικές παρατηρήσεις του Christian Oersted και την εργασία των Ampere, Faraday και Maxwell. Αυτή η σύνδεση δεν παρουσιάζει μόνο αντικείμενο θεωρητικού ενδιαφέροντος, αλλά τυγχάνει να είναι και θεμέλιος λίθος για την κατανόηση και την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών.

Το κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθεί στη μελέτη των ρευματοφόρων αγωγών και των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούν, καθώς και στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και της δύναμης Laplace, που αποτελούν θεμελιώδεις έννοιες του ηλεκτρομαγνητισμού. Αυτές οι αρχές βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα, για τα οποία θα γίνει μνεία στο επόμενο κεφάλαιο, όπως οι ηλεκτρογεννήτριες, οι μετασχηματιστές και οι ηλεκτροκινητήρες, παρέχοντας τη βάση για την παραγωγή και τη μεταφορά ενέργειας. Ο ηλεκτρομαγνητισμός, όπως ειπώθηκε, δεν είναι μόνο θεωρητικός, αλλά και πρακτικός, καθώς διευκολύνει την κατανόηση και την αξιοποίηση της ενέργειας στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή.

2.2 Το πείραμα και η ανακάλυψη του Oersted

<http://photodentro.edu.gr/v/item/ugc/8525/2392>

Ο Δανός φυσικός Christian Oersted (1777-1851), επηρεασμένος από τη φιλοσοφική άποψη ότι όλα τα φυσικά φαινόμενα είναι αλληλένδετα, αναζητούσε τη σχέση μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού μέσα από πειράματα. Κατά τη διάρκεια αυτών των ερευνών, έθεσε ως στόχο να αποδείξει πως τα δύο φαινόμενα συνδέονται με κάποιον τρόπο.

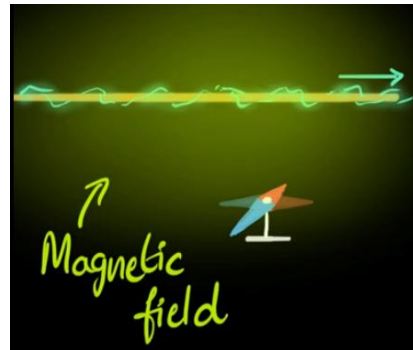
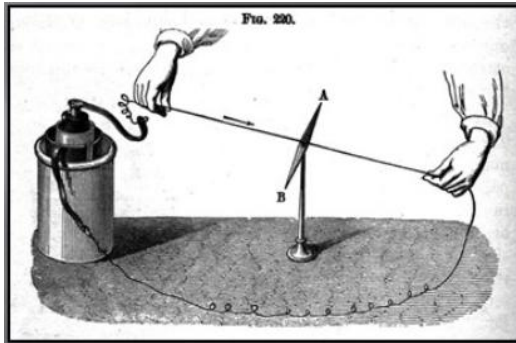
Πολλοί, βέβαια, υποστηρίζουν ότι έφτασε εντελώς τυχαία σ' αυτή του την ανακάλυψη. Όπως και να 'χει, δεν παύει να είναι ένας σπουδαίος επιστήμονας, αφού ακόμα και τυχαία να έκανε τη διαπίστωση, χρειάζεται γνώσεις και ευφυΐα για να μπορέσεις να εξηγήσεις ένα φαινόμενο που συναντάς για πρώτη φορά.

Το 1820, κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης στην Κοπεγχάγη, ο Oersted έκανε μια ανακάλυψη που επιβεβαίωσε τις θεωρίες του. Τοποθέτησε έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό παράλληλα με μια μαγνητική βελόνα, η οποία βρισκόταν στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με τον αγωγό. Όταν διέτρεξε ρεύμα μέσα από τον αγωγό, παρατήρησε ότι η μαγνητική βελόνα εκτρέπονταν από τη θέση ισορροπίας της και σταθεροποιούνταν σε μια νέα θέση. Όταν διέκοπτε τη ροή του ρεύματος, η βελόνα επανερχόταν στην αρχική της θέση, Σχ. 2.1.

Όταν το ρεύμα διέτρεχε τον αγωγό με αντίθετη φορά, η εκτροπή της βελόνας γινόταν επίσης προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επιπλέον, ο Oersted παρατήρησε ότι η εκτροπή της βελόνας αυξανόταν με την αύξηση της έντασης του ρεύματος, αν και όχι ανάλογα.

Ο Oersted κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μαγνητική βελόνα εκτρέπεται επειδή ασκείται πάνω της δύναμη. Επειδή, όμως, ένας μαγνήτης δέχεται δύναμη μόνο όταν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, συμπέρανε ότι γύρω από έναν ρευματοφόρο αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Το

μαγνητικό πεδίο του ρευματοφόρου αγωγού, λοιπόν, ασκεί ζεύγος δυνάμεων στους μαγνητικούς πόλους της βελόνας με αποτέλεσμα αυτή να περιστρέφεται έως ότου ισορροπήσει σε μια νέα θέση.



Σχήμα 2. 1: Το πείραμα του Έρστεντ και η ανακάλυψη δημιουργίας μαγνητικού πεδίου (Πηγή : [15], [16])

Αυτό το πείραμα θεωρείται η πρώτη εμπειρική απόδειξη της σύνδεσης μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού, μια σχέση που μέχρι τότε δεν ήταν καθόλου προφανής. Μέχρι εκείνη τη στιγμή, οι επιστήμονες αντιμετώπιζαν τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα ως δύο ανεξάρτητα πεδία, τα οποία μελετούσαν και ερμήνευαν ξεχωριστά. Η ανακάλυψη του Oersted, όμως, ανέδειξε την ενότητα αυτών των φαινομένων, ανοίγοντας τον δρόμο για τη θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

Μια διαδικτυακή προσομοίωση, όπου παρουσιάζεται εποπτικά το πείραμα του Έρστεντ, είναι η : https://javalab.org/en/oersteds_experiment_en/, εικόνες της οποίας δίνονται στο Σχ. 2.2. Στην εφαρμογή αυτή, έχουμε τη δυνατότητα να αντιστρέψουμε τη φορά του ρεύματος και να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά μιας μαγνητικής βελόνας, που αλλάζει προσανατολισμό και θέση ισορροπίας όποτε μεταβάλλουμε την κατεύθυνση της μπαταρίας.[17]



- α. χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα β. δεξιόστροφη φορά ρεύματος γ. αριστερόστροφη φορά ρεύματος

Σχήμα 2. 2: Το πείραμα του Έρστεντ μέσω προσομοίωσης (Πηγή : [17])

Ένα εκπαιδευτικό βίντεο σχετικά με την εμφάνιση μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό, στην οποία έχουν αποθεθεί και κουίζ και ασκήσεις κατανόησης, βρίσκεται στην ιστοσελίδα : <https://www.khanacademy.org/science/highschool-physics/x6679aa2c65c01e53:electromagnetics/x6679aa2c65c01e53:magnetic-field-due-to-current/v/oersteds-experiment-magnetic-field-due-to-current>. [16]

2.3 Υπολογισμός μαγνητικής επαγωγής B - Νόμος των Biot και Savart και εφαρμογές

Μετά την ανακάλυψη του Oersted ότι το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο, ήταν η σειρά των Biot και Savart (Μπιό και Σαβάρ) να βάλουν και αυτοί το λιθαράκι τους στην εξέλιξη της επιστήμης με τη διατύπωση του νόμου τους που αφορά τον υπολογισμό της μαγνητικής επαγωγής ή έντασης μαγνητικού πεδίου B. Ο νόμος τους αυτός περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο εξαιτίας του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό. Πρόκειται για μια επίσης θεμελιώδη σχέση που επιτρέπει τη μαθηματική περιγραφή της έντασης και της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου γύρω από έναν ρευματοφόρο αγωγό.

Ο εν λόγω νόμος διατυπώνεται ως εξής :

Το μαγνητικό πεδίο dB σε ένα σημείο του χώρου που δημιουργείται από ένα ρεύμα I, το οποίο διαρρέει έναν στοιχειώδη αγωγό μήκους dl, δίνεται από τη σχέση:

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.1)$$

όπου:

- \overrightarrow{dB} : το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το στοιχειώδες ρεύμα I που διαρρέει το στοιχειώδες μήκος dl
- μ_0 : η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} T \cdot \frac{m}{A}$)
- \vec{r} : το διάνυσμα που συνδέει το στοιχειώδες τμήμα dl του αγωγού με το σημείο όπου υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο
- r : το μέτρο του διανύσματος \vec{r}
- $d\vec{l} \times \vec{r}$: το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων dl και r, που καθορίζει την κατεύθυνση του στοιχειώδους μαγνητικού πεδίου dB (το dB είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζεται από το dl και το r και η φορά του δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, Σχ. 2.4).

Μ' άλλα λόγια, «αν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης I, ένα πολύ μικρό τμήμα του, μήκους dl, δημιουργεί σε κάποιο σημείο A που απέχει απόσταση r από το τμήμα dl μαγνητικό πεδίο ΔB μέτρου :

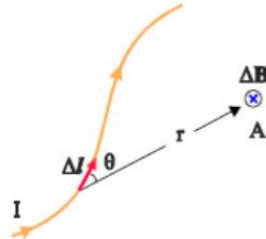
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl}{r^2} \cdot \eta \mu \theta \gg [18] \quad (2.2)$$

όπου θ : η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα dl και r, Σχ. 2.3.

Με τον όρο μαγνητική διαπερατότητα μ εννοούμε την ικανότητα ενός υλικού να μαγνητίζεται και είναι καθαρός αριθμός. Όταν ένα υλικό μαγνητίζεται εύκολα έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα - $\mu \gg 1$ - και λέγεται σιδηρομαγνητικό, ενώ αντίθετα, όταν $\mu < 1$ λέγεται διαμαγνητικό και δε μαγνητίζεται (χρυσός, χαλκός, ορείχαλκος, τα περισσότερα μέταλλα και κράματα). Υπάρχουν και τα παραμαγνητικά υλικά (λευκόχρυσος, αλουμίνιο (αργίλιο-Al), των οποίων ο συντελεστής μ είναι λίγο μεγαλύτερος της μονάδας ($\mu > 1$). Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σιδηρομαγνητικά υλικά, π.χ. ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους, τα οποία διακρίνονται σε μαλακά και σκληρά και χρησιμοποιούνται ως πυρήνες πηνίων και μετασχηματιστών, καθώς και για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, Πίνακας 3.1. Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, π.χ. ο σκληρός χάλυβας, γίνονται μόνιμοι μαγνήτες, εάν, δηλ., μαγνητιστούν, διατηρούν το μαγνητισμό τους, Αντίθετα, τα μαλακά, ενώ μαγνητίζονται όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο, χάνουν το μαγνητισμό

τους, όταν πάψει η επίδραση του πεδίου που τα μαγνήτισε (καθαρός σίδηρος, φερρίτης ψευδαργύρου-μαγγανίου, κ.α.).

Οι παραπάνω σχέσεις, (2.1) και (2.2), δίνουν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένα μόνο πολύ μικρό κομμάτι του αγωγού. Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται σ' ένα σημείο A από ολόκληρο τον αγωγό, πρέπει να χωρίσουμε τον αγωγό σε πολύ μικρά τμήματα Δl και έπειτα να αθροίσουμε διανυσματικά τα πεδία που δημιουργούν όλα τα n μικρά τμήματα του αγωγού στο σημείο A που εξετάζουμε ($B = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 + \dots + \Delta B_n$).



Σχήμα 2. 3: Μαγνητικό πεδίο ΔB στο σημείο A που δημιουργεί το τμήμα Δl ενός ρευματοφόρου αγωγού έντασης I και σε απόσταση r από το A. Η διεύθυνσή του είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας και η φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα (⊗). (Πηγή : [18])

Για να υπολογίσουμε το συνολικό μαγνητικό πεδίο B που δημιουργείται από έναν αγωγό, πρέπει να ολοκληρώσουμε τη συνεισφορά όλων αυτών των στοιχειωδών τμημάτων dB:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.3)$$

Αυτή η ολοκλήρωση εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα του αγωγού. Στις επόμενες ενότητες θα μας απασχολήσουν μόνο οι ευθύγραμμοι και οι κυκλικοί ρευματοφόροι αγωγοί.

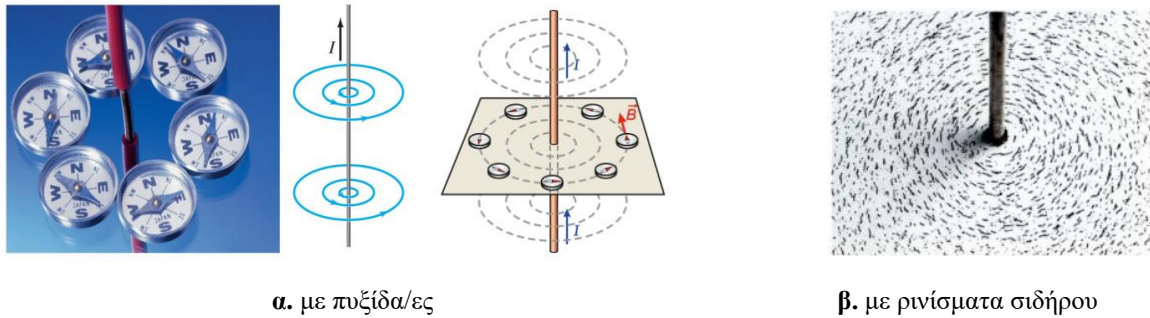
Να σημειωθεί εδώ ότι όταν βλέπουμε σε κάποιο σχήμα ένα X μέσα σε κύκλο (⊗), θα καταλαβαίνουμε ότι η φορά του διανύσματος είναι από τον αναγνώστη προς τη σελίδα - όπως στο Σχ. 2.3 -, ενώ, όταν βλέπουμε μια τελεία στο κέντρο ενός κύκλου (⊙), θα είναι ακριβώς το αντίθετο, δηλ. η φορά θα είναι από τη σελίδα προς τον αναγνώστη. Βασικά, είναι σαν να κοιτάζουμε ένα βέλος. Αν βλέπουμε τη μύτη του βέλους, σημαίνει ότι αυτό έρχεται προς εμάς, ενώ αν βλέπουμε το πίσω μέρος του, αυτό φεύγει από εμάς.

Πίνακας 2.1: Είδη μαγνητικών υλικών (http://users.ntua.gr/eglytsis/EM_B/Magnetic_Materials_p.pdf)

Είδος Μαγνητικού Υλικού	Μαγνητική Δεκτικότητα (χ_m)	Παραδείγματα (σύστημα SI)
Διαμαγνητικό (diamagnetic)	Μικρή και αρνητική	Au ($\chi_m = -34 \times 10^{-6}$) Cu ($\chi_m = -9.63 \times 10^{-6}$)
Παραμαγνητικό (paramagnetic)	Μικρή και θετική	Pt ($\chi_m = +279 \times 10^{-6}$) Mg ($\chi_m = +11.7 \times 10^{-6}$)
Σιδηρομαγνητικό (ferromagnetic)	Πολύ μεγάλη και θετική (εξαρτάται από μαγνητικό πεδίο)	Fe ($\chi_m \approx 5000-200000$)
Αντισιδηρομαγνητικό (antiferromagnetic)	Μικρή και θετική	Cr ($\chi_m \approx 320 \times 10^{-6}$)
Σιδηρμαγνητικό (ferrimagnetic)	Σχετικά μεγάλη και θετική (εξαρτάται από μαγνητικό πεδίο)	Fe ₃ O ₄ ($\chi_m \approx 2.5-16$)

2.3.1 Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού

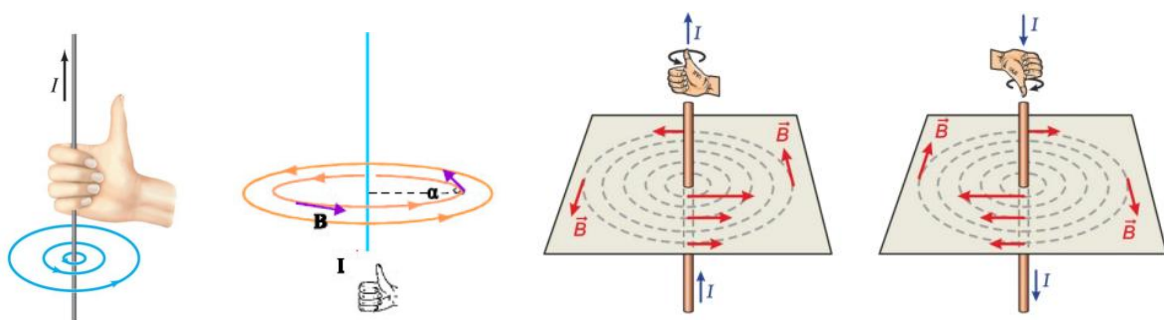
Για την απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί γύρω του ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, μπορούμε, όπως και για τον ραβδόμορφο μαγνήτη, να χρησιμοποιήσουμε είτε μία ή και πολλές μαγνητικές πυξίδες, τοποθετώντας τις σε διάφορες θέσεις κοντά στον αγωγό - για να χαράξουμε τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές - είτε ρινίσματα σιδήρου πάνω σε χαρτόνι, στο οποίο θα έχουμε διαπεράσει κάθετα τον αγωγό, Σχ. 2.4.



Σχήμα 2. 4: Μορφή μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού (Πηγή : [1], [12])

Το αποτέλεσμα, λοιπόν, όπως φαίνεται και παραπάνω, είναι να δημιουργούνται ομόκεντροι, συνεπίπεδοι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό, στους οποίους η κάθε πυξίδα ή ρινίσμα σιδήρου προσανατολίζεται, ώστε η διεύθυνσή της να εφάπτεται σ' αυτούς. Μ' άλλα λόγια, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους με κέντρο τον αγωγό, περιεχόμενους σε επίπεδα κάθετα στον άξονα του αγωγού.

Το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, δηλ., που δεν είναι άλλο από την ένταση B του μαγνητικού πεδίου, εφάπτεται σε κάθε σημείο του κύκλου και η φορά του καθορίζεται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού ή δεξιάς παλάμης, για τον οποίο χρησιμοποιούμε τα γράμματα ΚΔΧ ή ΚΔΠ, Σχ.2.5. ως εξής: τοποθετούμε τον τεντωμένο αντίχειρα του δεξιού χεριού, κατά μήκος του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, έτσι που να δείχνει την συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα υπόλοιπα δάχτυλα τα έχουμε ενωμένα - κλειστή παλάμη - και λυγίζοντάς τα, μας δείχνουν την φορά του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2. 5: Κανόνας δεξιού χεριού ή δεξιάς παλάμης (Πηγή : [12], [18], [1])

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου του αγωγού είναι ανάλογο με την ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό και φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό. Για τον υπολογισμό του B στην περίπτωση αυτή εργαζόμαστε ως εξής : Θεωρούμε ένα ευθύγραμμο σύρμα με μήκος L , σαν αυτό του σχήματος 2.6, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον αγωγό στο

Κεφάλαιο 2

σημείο A, που απέχει απόσταση a από αυτόν, χωρίζουμε τον αγωγό σε πολύ μικρά τμήματα Δl , Σχ. 2.6.α. Κάθε ένα τέτοιο μικρό τμήμα Δl που απέχει απόσταση r από το σημείο A θα δημιουργήσει στο σημείο A μαγνητικό πεδίο μέτρου ΔB , σαν αυτό της εξίσωσης (2.2).

Για να υπολογίσουμε το πεδίο που δημιουργεί ολόκληρος ο αγωγός στο σημείο A, αθροίζουμε τα πεδία όλων των επιμέρους τμημάτων Δl του αγωγού, σχέση (2.3), καταλήγοντας, μετά την ολοκλήρωση, στην εξίσωση :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{a} \cdot (\sigma\upsilon\nu\theta_1 - \sigma\upsilon\nu\theta_2) \quad (2.4)$$

όπου : θ_1 και θ_2 οι γωνίες που απεικονίζονται στο Σχ. 2.6.β.

Θεωρώντας το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού άπειρο, με μήκος, δηλ, πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση a , οι γωνίες θ_1 και θ_2 γίνονται 0° και 180° (π) αντίστοιχα, οπότε η εξίσωση (2.4), για $\sigma\upsilon\nu 0^\circ = 1$ και $\sigma\upsilon\nu 180^\circ = -1$, μας δίνει:

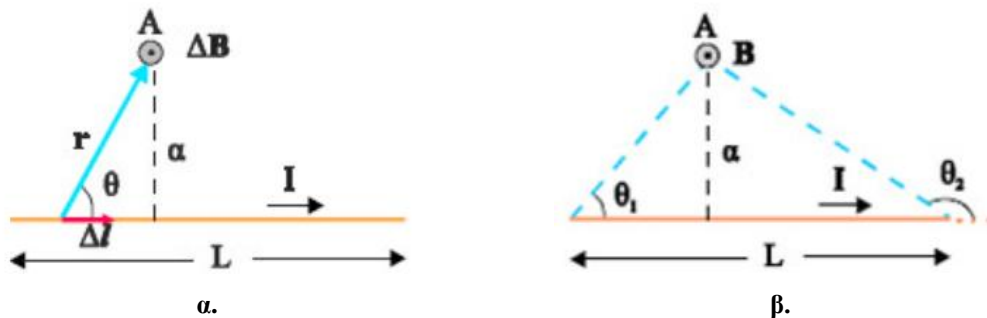
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{a} \quad (2.5)$$

Καταλαβαίνουμε, επομένως, ότι το μέτρο του B είναι το ίδιο - παραμένει σταθερό - σε κάθε σημείο κύκλου ακτίνας a και η διεύθυνσή του, σε κάθε σημείο, κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από τον αγωγό και το σημείο. Το μαγνητικό πεδίο βέβαια γύρω από τον αγωγό δεν είναι ομοιογενές, αλλά μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό - από το κέντρο, δηλ, των ομόκεντρων κύκλων, επομένως, είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης αυτής, ενώ είναι ανάλογο με την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει κάθε φορά τον αγωγό. Όσο, δηλ, μεγαλύτερο είναι το ρεύμα του αγωγού, τόσο πιο ισχυρό είναι και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από αυτόν.

Γενικά, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου ενός ρευματοφόρου αγωγού είναι ασθενές και, όπως είδαμε, φθίνει με την απόσταση από τον αγωγό. Αν υποθέσουμε, π.χ., ότι ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης 25A, τότε σε απόσταση 5cm από τον αγωγό, το μέτρο του μαγνητικού πεδίου θα είναι :

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}}{2\pi} \cdot \frac{25 \text{ A}}{0,05 \text{ m}} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-2}} = 10 \cdot 10^{-5} \text{ T} \\ &= \mathbf{100 \mu T} \text{ ή } \mathbf{0,1 mT} \end{aligned}$$

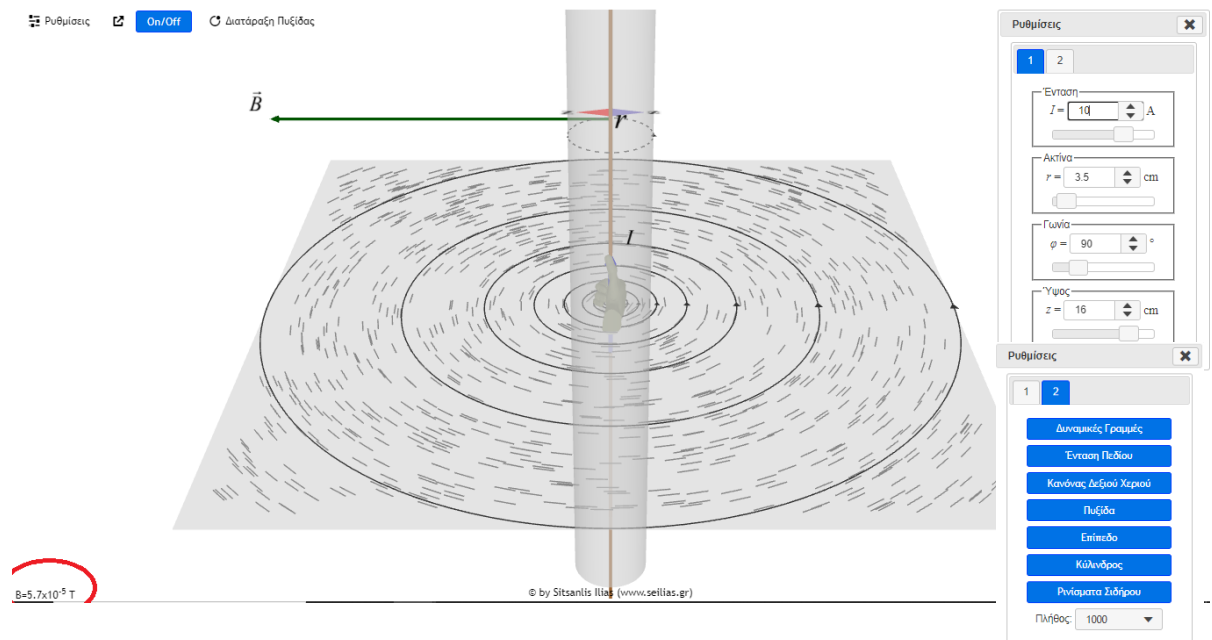
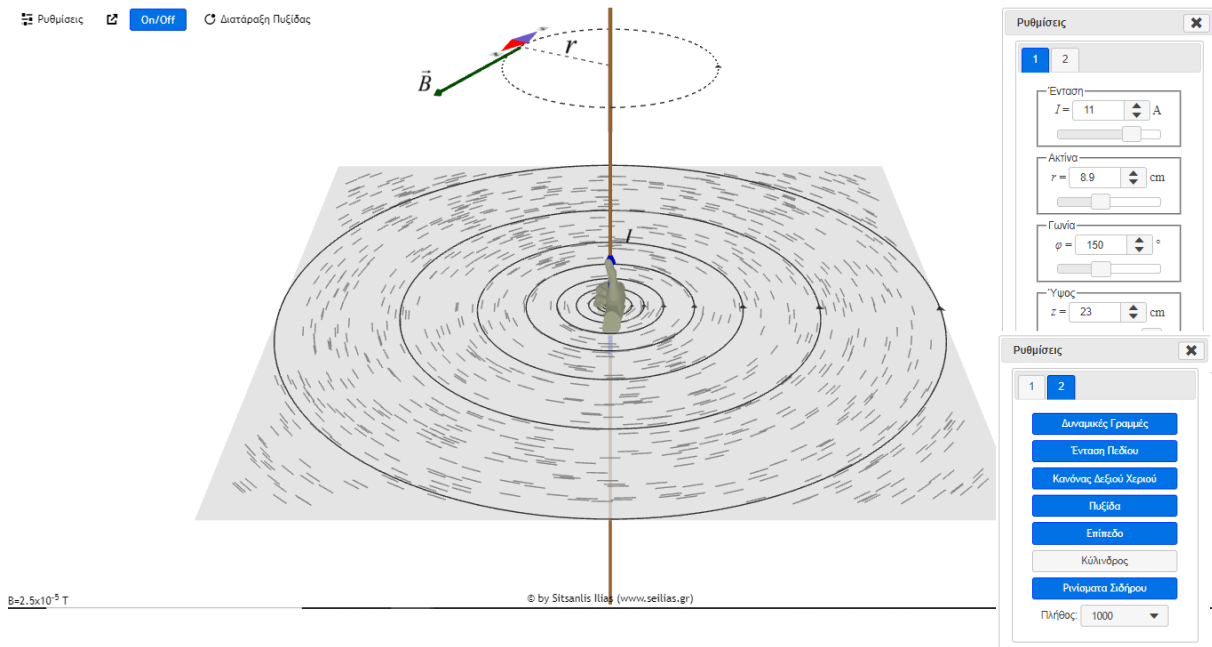
ενώ σε απόσταση 1m θα είναι 5μT (με ένταση μαγνητικού πεδίου Γης κοντά στην επιφάνειά της περίπου 50 μT - Πίνακας 1.1).



Σχήμα 2. 6: Μαγνητικό πεδίο στο σημείο A α. από συνεισφορά όλων των πολύ μικρών τμημάτων Δl ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού, β. γωνίες θ_1 και θ_2 (σχέση 2.4) (Πηγή : [18])

Θέτοντας όπου $\frac{\mu_0}{4\pi} = k_\mu = 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ ή 10^{-7} N/A^2 , την οποία ονομάζουμε μαγνητική σταθερά, η σχέση (2.5) απλοποιείται σε :

$$B = k_\mu \cdot \frac{2 \cdot I}{a} \tag{2.6}$$



Σχήμα 2. 7: Προσομοίωση υπολογισμού έντασης μαγνητικό πεδίου B αγωγού απείρου μήκους (Πηγή : [19])

Για την αναπαράσταση με εικονικό τρόπο όλων των παραπάνω συμπερασμάτων, έχοντας τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε όλες τις παραμέτρους, μπορούμε να επισκεφτούμε την ιστοσελίδα <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldLinear3D.html> και να δούμε τις επιπτώσεις που θα έχουν στην ένταση και κατεύθυνση του B οι αλλαγές που πραγματοποιούμε στην ένταση I του

ρεύματος, στην απόσταση r από τον αγωγό και στη γωνία θ γύρω από αυτόν, καθώς και στο ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς ίδιας βέβαια ακτίνας.

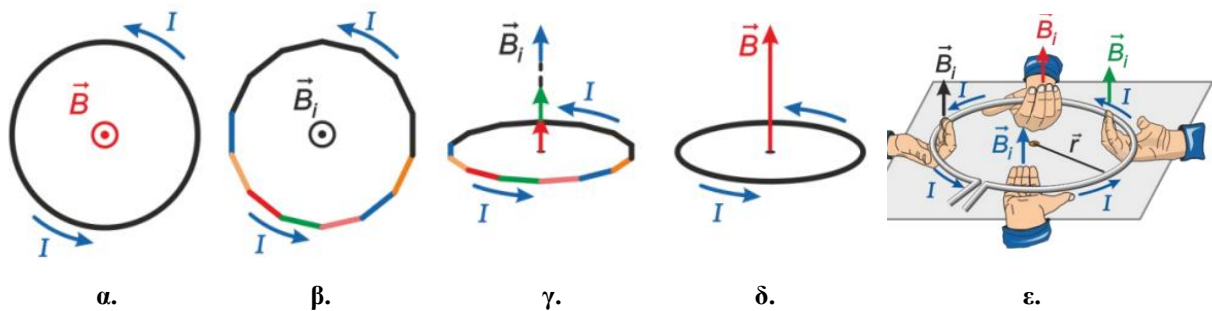
Έχουμε, τέλος, τη δυνατότητα να οπτικοποιήσουμε τις δυναμικές γραμμές, την ένταση του πεδίου, τον κανόνα του δεξιού χεριού, τη μαγνητική βελόνα, το επίπεδο που βρισκόμαστε, την απόσταση από το κέντρο σε μορφή κυλίνδρου, όπως και το πλήθος των ρινισμάτων σιδήρου, για την αισθητοποίηση των δυναμικών γραμμών του ρευματοφόρου αγωγού απείρου μήκους. Στιγμιότυπα της προσομοίωσης αυτής δίνονται παρακάτω στο Σχ. 2.7.

Με μια πρώτη ματιά, παρατηρούμε ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου B είναι ανά πάσα στιγμή διαθέσιμη και αναγράφεται στην κάτω αριστερή γωνία. Η τιμή αυτή μεταβάλλεται ταυτόχρονα με την κάθε μεταβολή που κάνουμε σε οποιαδήποτε μεταβλητή από τον πίνακα ρυθμίσεων. Όπως βλέπουμε στην πάνω δεξιά γωνία, υπάρχουν δύο πίνακες ρυθμίσεων, όπου ο πρώτος αφορά τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν και ο δεύτερος τον τρόπο που θα γίνεται η σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου, όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.[12], [18], [20]

2.3.2 Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού

Αν θεωρήσουμε, τώρα, ότι έχουμε τον παραπάνω ρευματοφόρο αγωγό και τον λυγίσουμε, σχηματίζοντας έναν κύκλο ή βρόχο, Σχ.2.8.α, δ, θα δημιουργηθεί πάλι ένα μαγνητικό πεδίο, αυτή τη φορά εξαιτίας του κυκλικού αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα, η μορφή του οποίου παρόλο που διαφέρει από το αρχικό συνολικά, μπορεί αν εξηγηθεί μέσω αυτού και περιγράφεται παρακάτω.

Για να κατανοήσουμε, λοιπόν, τη μορφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από έναν κυκλικό βρόχο όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, μπορούμε να φανταστούμε τον βρόχο ως μια ακολουθία από πολύ μικρά ευθύγραμμο τμήματα αγωγού, Σχ.2.8.β, γ. Αυτά τα τμήματα είναι συνδεδεμένα το ένα με το άλλο σε σειρά, και κάθε ένα από αυτά διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα έντασης I . Έτσι, η τελική κατάσταση του μαγνητικού πεδίου προκύπτει από τη συνεισφορά κάθε μικρού τμήματος του βρόχου.



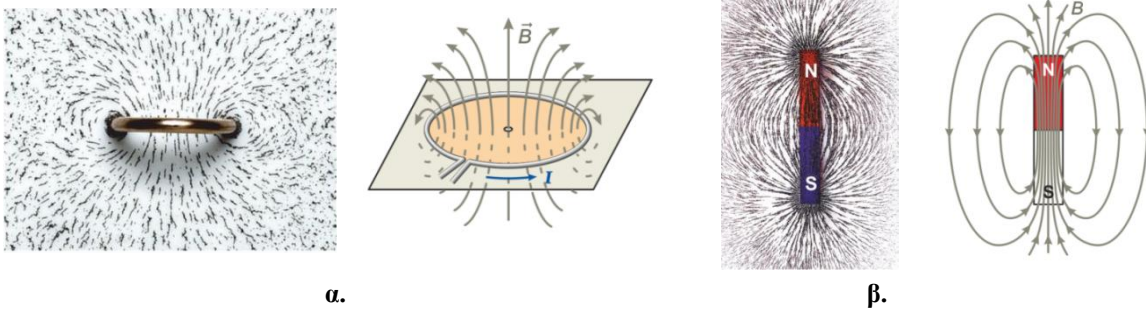
Σχήμα 2. 8: Επίδραση κάθε μικρού μήκους (διαφορετικά χρώματα) αγωγού στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, α.- β. κάτοψη και γ.- δ. πλάγια όψη κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και διανύσματος B , β.- γ.- ε. χωρισμένοι σε μικρά τμήματα με την αντίστοιχη συνεισφορά τους στο ολικό B (Πηγή : [1])

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού για κάθε ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού, Σχ.2.8.ε., μπορούμε να καθορίσουμε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από κάθε τμήμα σε διάφορα σημεία του χώρου. Αν επικεντρωθούμε στα σημεία κατά μήκος του κεντρικού άξονα που διέρχεται κάθετα από το επίπεδο του βρόχου, παρατηρούμε τα εξής: στο επίπεδο του βρόχου οι συνιστώσες των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από όλα τα ευθύγραμμο τμήματα είναι ομόρροπες. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στον κεντρικό άξονα

έχει την ίδια κατεύθυνση και το μέτρο της ισούται με το άθροισμα των μέτρων των επιμέρους συνιστωσών.

Αντίθετα, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετες στον άξονα σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του κεντρικού άξονα μηδενίζονται. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι παράλληλες με το επίπεδο του βρόχου συνιστώσες από τα ευθύγραμμα τμήματα αλληλοαναιρούνται (οι οριζόντιες συνιστώσες των μαγνητικών πεδίων από δύο αντιδιαμετρικά τμήματα του βρόχου έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να αλληλοεξουδετερώνονται).

Χρησιμοποιώντας πάλι τον γνωστό τρόπο με τα ρινίσματα σιδήρου και τοποθετώντας τον κυκλικό αγωγό κάθετα στο επίπεδο ενός χαρτιού (ή και τις πυξίδες), καταλήγουμε στις εικόνες του Σχ. 2.9. Παρατηρούμε ότι και εδώ, Σχ.2.9.α., όπως και στον ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους με κέντρο τον αγωγό και σε επίπεδο κάθετο σ' αυτόν.



Σχήμα 2. 9: Μορφή μαγνητικού πεδίου με ρινίσματα σιδήρου και δυναμικές γραμμές α. κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού σε αντιπαραβολή με αυτή ενός β. ραβδόμορφου μαγνήτη (Πηγή : [1])

Αντιπαραβάλλοντας, εν συνεχεία, τις εικόνες του κυκλικού αγωγού και ενός ραβδόμορφου μαγνήτη και υποθέτοντας ότι ο δεύτερος τοποθετείται στο κέντρο του κύκλου κάθετα στο επίπεδο που σχηματίζει ο κύκλος αυτός, Σχ.2.9.α. και Σχ.2.9.β. αντίστοιχα , καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν και οι δύο είναι πανομοιότυπο. Μάλιστα, αποδεικνύεται ότι, αν έχουμε έναν μικροσκοπικό κυκλικό αγωγό και έναν μικροσκοπικό ραβδόμορφο μαγνήτη, οι μαγνητικές τους γραμμές είναι ολοίδιες, ταυτίζονται μεταξύ τους.

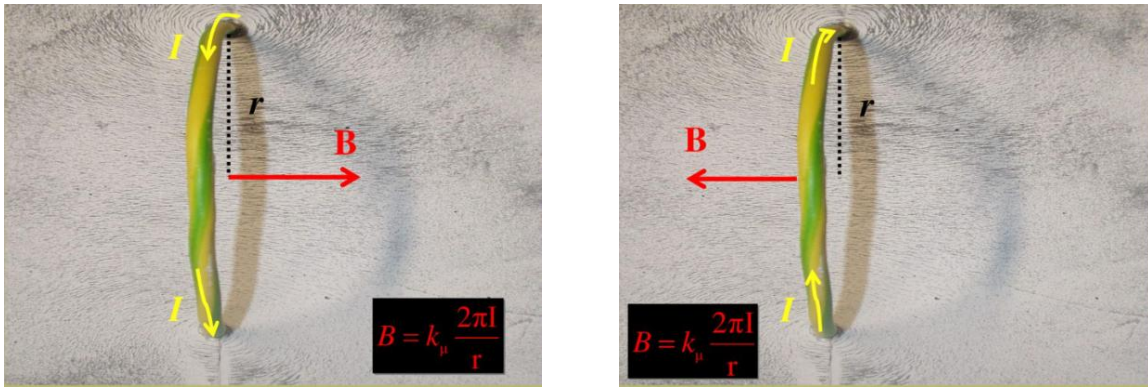
Η κατεύθυνση, της έντασης B του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του κεντρικού άξονα ενός κυκλικού αγωγού προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας και πάλι τον κανόνα του δεξιού χεριού. Αυτή τη φορά, όμως, τα λυγισμένα δάχτυλα του δεξιού χεριού θ' ακολουθούν τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος I στον κυκλικό αγωγό και ο τεντωμένος αντίχειρας θα μας δείχνει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται κατά μήκος του κεντρικού άξονα.

Επιπρόσθετα, καταλαβαίνουμε ότι δημιουργείται ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές που περικλείουν τον αγωγό, πολύ κοντά σε αυτόν είναι περίπου κυκλικές, και το πεδίο είναι ισχυρό, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν μοιάζουν πιο πολύ με έλλειψη παρά με κύκλο και το πεδίο εξασθενεί.

Όσον αφορά, τέλος, στο μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, αυτό αποδεικνύεται ότι στο κέντρο του κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού ακτίνας r υπολογίζεται από τη σχέση :

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2r} = k_\mu \cdot \frac{2\pi \cdot I}{r} \quad (2.7)$$

Όλα τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται συνοπτικά στην επόμενη εικόνα, Σχ. 2.10.

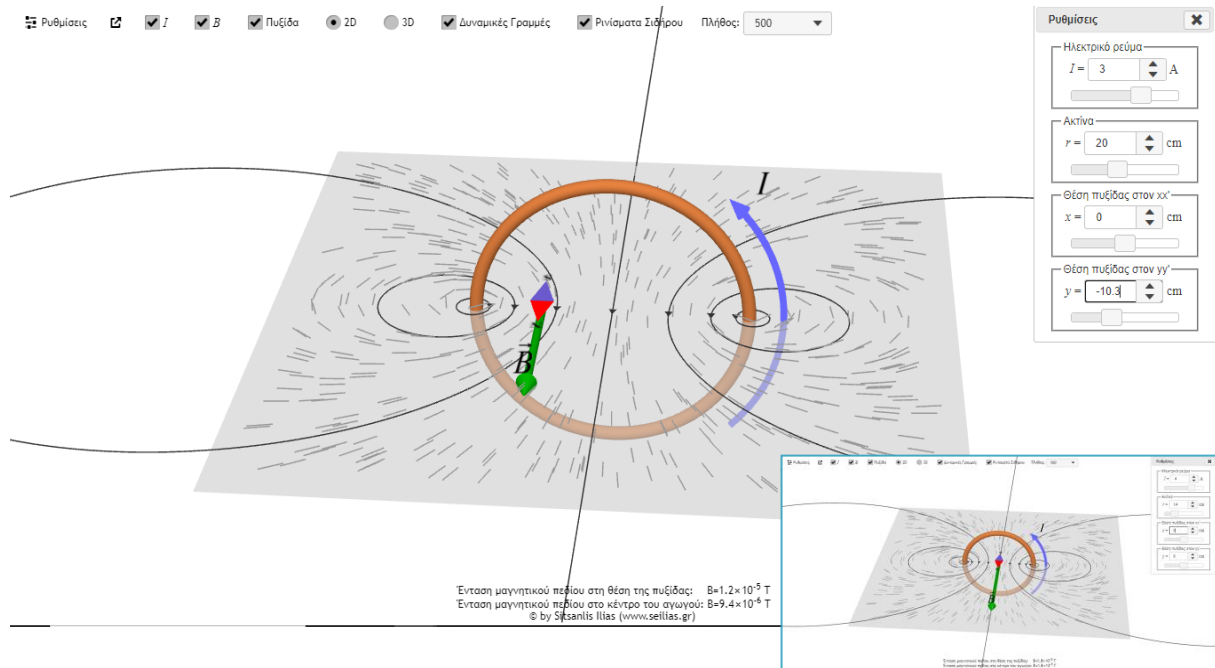


Σχήμα 2. 10: Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και διάνυσμα B (Πηγή : [8])

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (2.6) και (2.7), εξάγουμε ένα πάρα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα : βλέπουμε ότι η μόνη διαφορά στις δύο αυτές σχέσεις είναι ο παράγοντας π , δηλ, μετατρέποντας τον ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό σε κυκλικό, καταφέρνουμε ν' αυξήσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου κατά τρεις φορές περίπου ($\pi = 3.14159.....$).

Βέβαια, και αυτό το μαγνητικό πεδίο εξακολουθεί να είναι ασθενές παρόλο που η έντασή του είναι τριπλάσια του ευθύγραμμου. Μπορούμε, όμως, να φτιάξουμε έναν αγωγό με πολλούς κύκλους που θα δημιουργεί ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο, ο οποίος περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.[2], [8], [22]

Δε λείπει φυσικά και από εδώ κάποια προσομοίωση για την αισθητοποίηση και σχηματική αναπαράσταση του παραπάνω φαινομένου. Έτσι, ο εξάιτερος καθηγητής Φυσικής κος Σιτσανλής Ηλίας, έχει δημιουργήσει και για το συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης μια εξαιρετική εφαρμογή, στην ιστοσελίδα : <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldCircular2-3D.html>. Εικόνες από τη συγκεκριμένη εφαρμογή παρατίθενται στο Σχ.2.11.



Σχήμα 2. 11: Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού και υπολογισμού έντασης αυτού με μεταβολή των παραμέτρων του (Πηγή : [21])

2.3.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Με αφορμή το προηγούμενο συμπέρασμα ότι στον κυκλικό ρευματοφόρο αγωγό το μαγνητικό πεδίο γίνεται τρεις φορές ισχυρότερο, αν είχαμε περισσότερους κύκλους τι θα συνέβαινε άραγε;

Αποδεικνύεται ότι αν υπάρχουν N κυκλικοί αγωγοί παράλληλα τοποθετημένοι ο ένας πάνω στον άλλο, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται κατά N φορές, γίνεται, δηλ. :

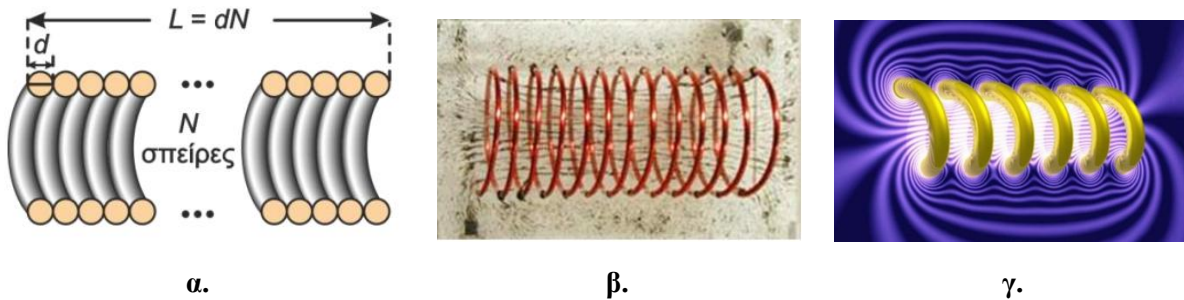
$$B = k_{\mu} \cdot \frac{2\pi \cdot I}{r} \cdot N \quad (2.8)$$

είναι, επομένως, τώρα N φορές μεγαλύτερο το μαγνητικό πεδίο, αφού κάθε ένας κυκλικός αγωγός συνεισφέρει το ίδιο στη δημιουργία του.

Τυλίγοντας έναν αγωγό μεγάλου μήκους ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο τέτοιων κυκλικών αγωγών - βρόχων - έχουμε δημιουργήσει ένα σωληνοειδές ή ελικοειδές ή αλλιώς ένα πηνίο. Οι βρόχοι αυτοί, συνήθως σε κυλινδρική διάταξη, είναι πυκνά τυλιγμένοι και ισαπέχουν μεταξύ τους. Κάθε ένας βρόχος λέμε ότι αποτελεί μία σπείρα. Η ευθεία που ορίζουν τα κέντρα των σπειρών θεωρείται ως ο άξονας του σωληνοειδούς. Αν η μία σπείρα εφάπτεται με την άλλη, δημιουργείται ένα σωληνοειδές μήκους L με N σπείρες, όπου $L = d \cdot N$, με d τη διάμετρο του αγωγού, Σχ. 2.12.α.

Για να φτιάξουμε, λοιπόν, ένα πηνίο δεν έχουμε παρά να τυλίξουμε γύρω από ένα χάρτινο κύλινδρο ένα μονωμένο χάλκινο σύρμα, έτσι ώστε οι σπείρες να εφάπτονται και να είναι παράλληλες μεταξύ τους. Μπορούμε, αν θέλουμε, να κολλήσουμε τις σπείρες για να μην φεύγουν από τον κύλινδρο ή και να στερεώσουμε με κάποιον τρόπο τις δύο άκρες του, τις οποίες ούτως ή άλλως θα πρέπει να ξύσουμε για να είναι αγωγίμες, και το πηνίο μας είναι έτοιμο.

Όταν ένα σωληνοειδές διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που οπτικοποιείται με τα γνωστά ρινίσματα σιδήρου, Σχ.2.12.β. Φυσικά, όταν δε διαρρέεται από ρεύμα, δε δημιουργεί κανένα μαγνητικό πεδίο γύρω του.

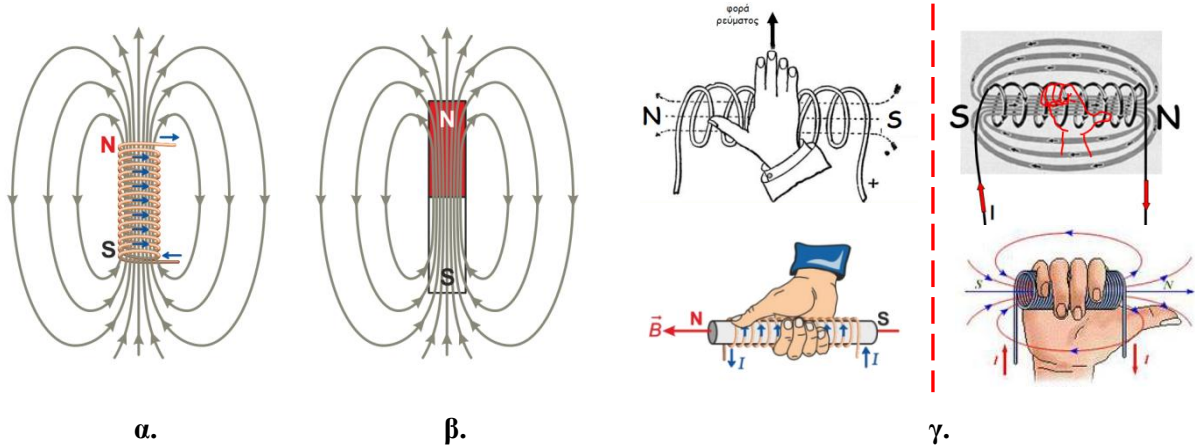


Σχήμα 2. 12: Σωληνοειδές α. μήκους L με N σπείρες, διαμέτρου d και μορφή μαγνητικού πεδίου με β. με ρινίσματα σιδήρου κα γ. δυναμικές γραμμές (Πηγή : [1], [8])

Παρατηρώντας το Σχ.2.12.γ., βλέπουμε ότι στο εσωτερικό του πηνίου οι δυναμικές του γραμμές είναι πολύ πυκνές και σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους, ενώ όσο προχωράμε έξω από αυτό αυτές αραιώνουν και γίνονται ελλειπτικές. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι το μαγνητικό πεδίο μέσα στο σωληνοειδές είναι ομογενές, που σημαίνει ότι η ένταση του πεδίου B έχει σταθερό μέτρο και κατεύθυνση. Έξω από αυτό, το μαγνητικό πεδίο γίνεται ανομοιογενές και πολύ πιο ασθενές. Θεωρώντας το σωληνοειδές ως ιδανικό - έχει μήκος πολύ μεγαλύτερο της διαμέτρου του, το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι ομογενές και μηδενικό εκτός. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου προσδιορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, Σχ.2.13.γ.: αν τα δάχτυλα του δεξιού χεριού δείχνουν τη φορά του ρεύματος στις σπείρες, τότε ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του μαγνητικού πεδίου μέσα στο σωληνοειδές.

Επανερχόμενοι στο Σχ.2.12.β. και με τη βοήθεια μιας μαγνητικής βελόνας, βρίσκουμε ότι το ένα άκρο του σωληνοειδούς συμπεριφέρεται σαν βόρειος πόλος και το άλλο σαν νότιος. Το σημείο απ' όπου εξέρχονται οι δυναμικές γραμμές προσδιορίζει τον βόρειο πόλο, ενώ το άλλο σημείο τον νότιο πόλο. Μολονότι στον ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό δεν εντοπίζουμε πόλους κατά μήκος του, γίνεται φανερό ότι το σωληνοειδές συμπεριφέρεται όπως ένας ευθύγραμμος μαγνήτης.

Κάνοντας, επιπλέον, μια σύγκριση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών ενός σωληνοειδούς και ενός ραβδόμορφου μαγνήτη, Σχ.2.13.α.,β., η ομοιότητά τους είναι οφθαλμοφανής, εξάγοντας το συμπέρασμα ότι το μαγνητικό πεδίο του πρώτου μοιάζει πάρα πολύ μ' αυτό του δεύτερου, τοποθετημένος κατά μήκος του άξονα του σωληνοειδούς.



Σχήμα 2. 13: Σύγκριση μαγνητικού πεδίου α. σωληνοειδούς με αυτό ενός β. ραβδόμορφου μαγνήτη και γ. προσδιορισμός πόλων και φοράς B με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Πηγή : [1], [22], [23])

Έχει αποδειχθεί ότι για ένα σημείο A του άξονα του σωληνοειδούς κοντά στο κέντρο του, το μέτρο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου ισούται με την εξίσωση :

$$B = k_{\mu} \cdot \frac{4\pi I}{L} \cdot N \quad (2.9)$$

όπου :

- k_{μ} : η μαγνητική σταθερά ($k_{\mu} = 10^{-7} T \cdot m/A$ ή $10^{-7} N/A^2$),
- I : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές,
- N : ο αριθμός των σπειρών - τυλιγμάτων του σωληνοειδούς
- L : το μήκος του σωληνοειδούς διαμέτρου d του αγωγού ($L=d \cdot N \rightarrow d = L/N$)

Πολλές φορές χρησιμοποιείται και η μεταβλητή n, που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους, οπότε στη σχέση (2.9), αντικαθιστούμε το N/L με το n.

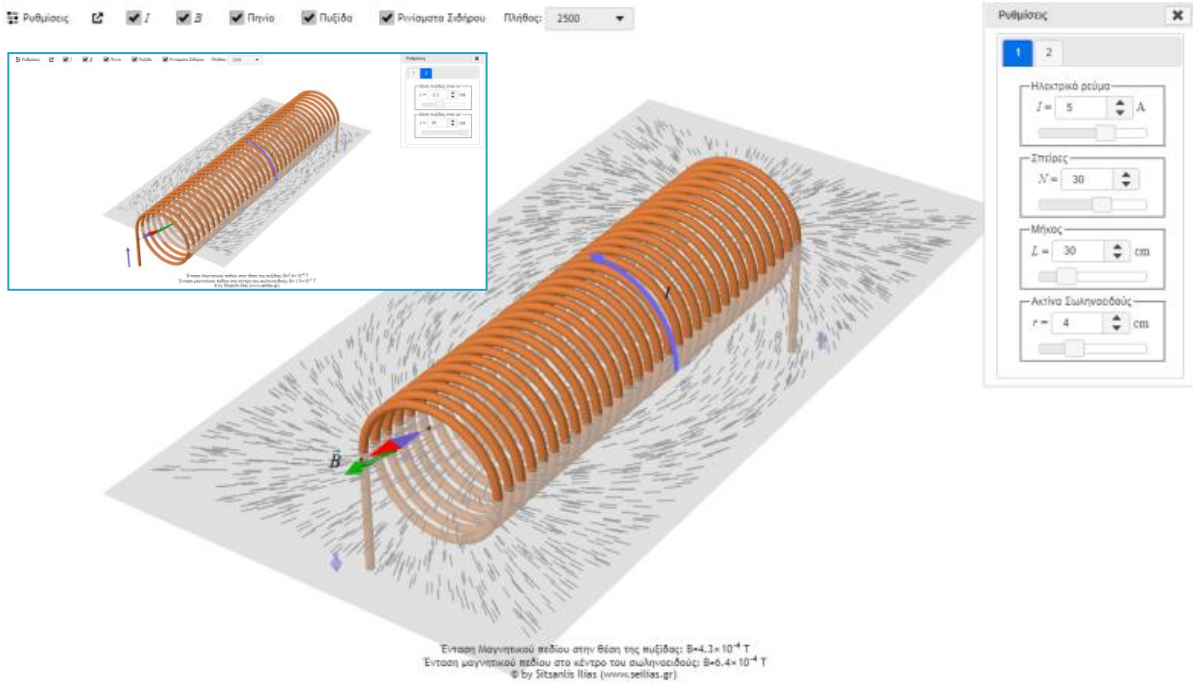
Το μέτρο, π.χ., του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο ενός σωληνοειδούς, ακτίνας 10 cm, με n=100 σπείρες ανά μέτρο (N/L), που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 50 A, είναι περίπου 6 mT, σχεδόν 60 φορές μεγαλύτερο από το μέτρο του μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου αγωγού, στην ίδια απόσταση, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα της ίδιας έντασης.

Παρόλο που η σχέση (2.9) βρέθηκε για σωληνοειδές απείρου μήκους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό οποιουδήποτε σωληνοειδούς μεγάλου μήκους με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Στα άκρα του σωληνοειδούς η τιμή του B είναι μικρότερη, θεωρώντας ότι είναι περίπου η μισή από αυτή στο κέντρο.[1], [18], [20]

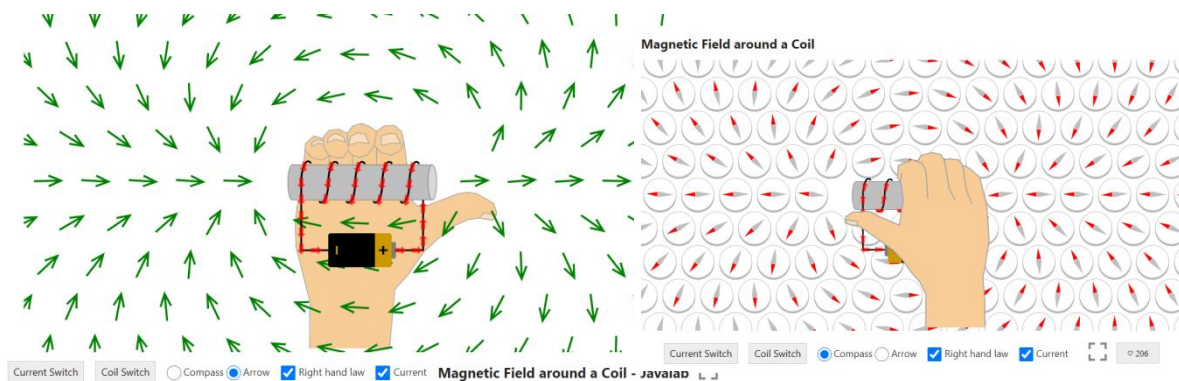
Και για το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο υπάρχουν διαθέσιμες πολλές εφαρμογές στο διαδίκτυο, δύο από τις οποίες αναφέρονται στο Σχ.2,14.

- <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldCoil3D.html>

Με τη συγκεκριμένη προσομοίωση έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, τον αριθμό των σπειρών, καθώς και το μήκος και την ακτίνα του σωληνοειδούς, Σχ.2.14.α.



- α. <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldCoil3D.html>



- β. <https://javalab.org/en/magnetic-field-around-a-coil/en/>

Σχήμα 2. 14: Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς με διαδικτυακές εφαρμογές (Πηγή : [24], [25])

<< Επιλέγοντας "Ρινίσματα Σιδήρου" έχουμε τη δυνατότητα να "δούμε" το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το σωληνοειδές. Αν αυξήσουμε το πλήθος το ρινισμάτων έχουμε καλύτερη εικόνα αλλά χάνουμε σε ταχύτητα. Τις περισσότερες φορές η τιμή 5000 είναι αρκετά ικανοποιητική. Ανάλογα με την μνήμη και την ισχύ του υπολογιστή ο χρόνος απόκρισης μπορεί να γίνει

απαγορευτικός και ενδέχεται να κολλήσει το σύστημα αν το πλήθος ξεπεράσει τις 5000. Οι υπολογισμοί γίνονται κάνοντας χρήση του νόμου Biot - Savart και είναι ιδιαίτερα απαιτητικοί χωρίζοντας την καμπύλη σε πάρα πολλά στοιχειώδη τμήματα dL .>> [26]

- https://javalab.org/en/magnetic_field_around_a_coil_en/

Στην προσομοίωση αυτή μας δίνεται μια εποπτική εικόνα του μαγνητικού πεδίου, χωρίς να υπολογίζεται η έντασή του B . Κάνοντας αλλαγές στη φορά του ρεύματος ή της περιέλιξης του σύρματος, βλέπουμε την επίδραση που έχει στη φορά του B , δίνοντας και τη δυνατότητα να προβάλλεται και ο κανόνας του δεξιού χεριού, Σχ.2.14.β.

Η δημιουργία μαγνητικού πεδίου μέσω σωληνοειδών χρησιμοποιείται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές, όπως:

- **Ηλεκτρομαγνήτες:** με την προσθήκη πυρήνα, χρησιμοποιούνται για την ανύψωση βαρέων αντικειμένων ή στη λειτουργία ηλεκτρικών κλειδαριών.
- **Μετασχηματιστές:** για την παραγωγή ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου.
- **Ηλεκτροκινητήρες και γεννήτριες:** βασίζονται στις αρχές του σωληνοειδούς για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου.

2.4 Το φαινόμενο της επαγωγής

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι γνωστό ότι δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Το 1831, ο Άγγλος επιστήμονας Michael Faraday (Φαραντέι) αναρωτήθηκε αν το αντίστροφο είναι επίσης δυνατό, δηλαδή αν ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα κλειστό κύκλωμα. Μέσα από μια σειρά πειραμάτων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να δημιουργήσει ρεύμα. Αντίθετα, η μεταβολή της μαγνητικής ροής μέσα από την επιφάνεια που ορίζει το κύκλωμα προκαλεί την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού ρεύματος, φαινόμενο που ήταν απρόσμενο μέχρι τότε.

Είναι γνωστή η φράση του Faraday προς έναν πολιτικό που τον ρώτησε για την πρακτική χρησιμότητα των ανακαλύψεών του: «Προς το παρόν δεν ξέρω, αλλά κάποια μέρα θα μπορείτε να τις φορολογήσετε».

Παράλληλα, την ίδια χρονιά, ο Αμερικανός ερευνητής Joseph Henry (Χένρι) έφτασε ανεξάρτητα στο ίδιο συμπέρασμα.

Το πείραμα του Oersted το 1820, που απέδειξε ότι ένας ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, ενέπνευσε τη μελέτη του αντίστροφου φαινομένου, οδηγώντας τον Faraday, μετά από δέκα χρόνια σχεδόν, στη διατύπωση του **Νόμου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής**, γνωστού και ως **Νόμου της επαγωγής**, το φαινόμενο του οποίου διατυπώνεται ως εξής :

<< Το φαινόμενο της εμφάνισης τάσης στα άκρα κάποιου αγωγού, εξαιτίας της μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει, ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. >>[26]

Η σχέση που υπολογίζει το παραπάνω φαινόμενο, ονομάζεται Νόμος της επαγωγής ή Νόμος του Faraday και είναι :

<< Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σ' ένα κύκλωμα είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει το κύκλωμα. >> [26]

$$E_{EΠ} = \frac{|\Delta\Phi_B|}{\Delta t} \quad (2.10)$$

όπου :

- $\Delta\Phi_B$: η μεταβολή της μαγνητικής ροής σε ένα τύλιγμα – σπείρα και
- Δt : ο χρόνος κατά τον οποίο σημειώθηκε η μεταβολή αυτή.

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

Στην περίπτωση που το κύκλωμα αποτελείται από N σπείρες, ο παραπάνω τύπος γράφεται ως εξής :

$$E_{EΠ} = N \frac{|\Delta\Phi_B|}{\Delta t} \quad (2.11)$$

Η σχέση αυτή – (2.11) – αναφέρεται στη μέση ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται στο κύκλωμα για χρονικό διάστημα Δt . Για να υπολογιστεί, λοιπόν, η δύναμη αυτή στο κύκλωμα κάποια συγκεκριμένη στιγμή t , θα πρέπει ο χρόνος Δt να είναι απειροστά μικρός, να είναι δηλ. dt . Γίνεται επίσης κατανοητό ότι, αν ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι σταθερός, τότε και η επαγόμενη τάση θα παραμένει αμετάβλητη μέσα σ' αυτό το χρονικό διάστημα Δt .

Κεφάλαιο 2

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ο αγωγός γίνεται ηλεκτρική πηγή. Η εν λόγω σχέση υπολογίζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη αυτής της πηγής, όπως αυτή μιας μπαταρίας, δηλαδή την τάση στα άκρα του αγωγού, όταν αυτή δε διαρρέεται από ρεύμα. Αν ο αγωγός συνδεθεί σε κλειστό κύκλωμα, η τάση στα άκρα του δεν θα είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη, αλλά ίση με την πολική τάση μιας πηγής, θα είναι, δηλ. μειωμένη κατά τον παράγοντα IR , που αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην αντίστασή του R .

Η σημασία του φαινομένου, που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, είναι πελώρια στο σύγχρονο κόσμο, μιας και η παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται σ' αυτό. Η ηλεκτρική ενέργεια, που σήμερα παράγεται σχεδόν αποκλειστικά από τις ηλεκτρικές γεννήτριες, επηρέασε και επηρεάζει την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ευημερία των λαών γενικότερα. Ο Faraday ήταν αυτός που κατασκεύασε την πρώτη γεννήτρια και άνοιξε το δρόμο που οδήγησε στην τωρινή κατάσταση, Σχ.2.15. Μια από τις πιο σύγχρονες εφαρμογές του νόμου της επαγωγής είναι και ο βηματοδότης.[26], [27]



Σχήμα 2. 15: <<Ο δίσκος του Φάραντεϊ, η πρώτη ηλεκτρογεννήτρια στην ιστορία, ένας τύπος ομοιοπολικής γεννήτριας>> (Πηγή : [28])

Το φαινόμενο αυτό θα συζητηθεί διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια, όπου θα γίνει η προσομοίωσή του τόσο με διαδικτυακές εφαρμογές όσο και με πειραματικές κατασκευές.

Στο Παράρτημα Β διατίθενται οι υπερσύνδεσμοι για ένα διαδραστικό βίντεο, ένα σταυρόλεξο και ένα κουίζ με ερωτήσεις κατανόησης πάνω στο θέμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (B2, B3. B4).

2.5 Ο Κανόνας του Lenz - Αρχή διατήρησης της ενέργειας στο φαινόμενο της επαγωγής

Όπως είδαμε, η επαγωγική τάση δημιουργείται όταν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής. Ωστόσο, για να προκληθεί επαγωγικό ρεύμα, είναι απαραίτητο το κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει αυτή η μεταβολή να είναι κλειστό. Το ρεύμα αυτό, που ονομάζεται επαγωγικό ρεύμα, συνεχίζεται μόνο για όσο διάστημα μεταβάλλεται η μαγνητική ροή. Εάν ο αγωγός είναι μέρος ενός κλειστού κυκλώματος με συνολική ωμική αντίσταση R , τότε η ένταση του επαγωγικού ρεύματος που ρέει μέσα στο κύκλωμα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον νόμο του Ohm.

Ο Lenz (Λεντς) διατύπωσε έναν κανόνα που μας βοηθά να προσδιορίσουμε τη φορά του ρεύματος που προκύπτει από επαγωγή. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα:

«Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε να αντιστέκεται στην αιτία που το δημιουργήσε.» [26]

Αυτό σημαίνει ότι το επαγωγικό ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που προσπαθεί να ακυρώσει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής που το προκάλεσε. Επομένως, αντιστέκεται σ' αυτή.

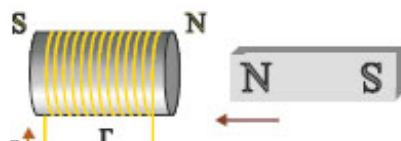
Λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον κανόνα, μπορούμε να καθορίσουμε τη φορά του επαγωγικού ρεύματος και την πολικότητα της επαγωγικής τάσης, και έτσι διατυπώνουμε τον νόμο της επαγωγής με τη μορφή της σχέσης (2.12), αφαιρώντας την απόλυτη τιμή της σχέσης (2.11) :

$$E_{EP} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (2.12)$$

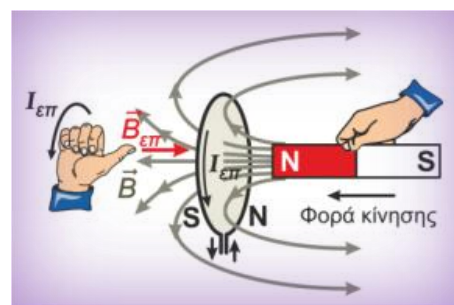
Ο κανόνας του Lenz αποτελεί συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

Ο νόμος του Faraday μας δίνει το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) που δημιουργείται από επαγωγή, αλλά η πολικότητα της ΗΕΔ, και επομένως η κατεύθυνση του επαγωγικού ρεύματος, καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz.

Ας πάρουμε ως παράδειγμα έναν μαγνήτη που πλησιάζει ένα πηνίο, Σχ.2.16. Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει, η μαγνητική ροή μέσω του πηνίου αυξάνεται, προκαλώντας την εμφάνιση επαγωγικής ΗΕΔ. Επειδή το πηνίο σχηματίζει κλειστό κύκλωμα, αυτή η ΗΕΔ δημιουργεί ρεύμα.



Ο μαγνήτης πλησιάζει στο πηνίο. Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, το ρεύμα που επάγεται στο πηνίο έχει τέτοια φορά ώστε απέναντι από το μαγνήτη που πλησιάζει το πηνίο να δημιουργεί όμοιο μαγνητικό πόλο



Σχήμα 2. 16: Κανόνας του Lenz και φορά επαγόμενου ρεύματος (Κανόνας δεξιού χεριού) (Πηγή : [1], [26])

Η φορά αυτού του επαγωγικού ρεύματος καθορίζεται έτσι ώστε να αντιστέκεται στην αύξηση της μαγνητικής ροής. Το επαγόμενο ρεύμα δημιουργεί το δικό του μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει κατεύθυνση αντίθετη από το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη. Για παράδειγμα, η πλευρά του πηνίου προς την οποία πλησιάζει ο βόρειος πόλος (N) του μαγνήτη αποκτά χαρακτηριστικά βόρειου πόλου

(N), ώστε να απωθεί τον μαγνήτη. Για να υπερνικηθεί η άπωση που δέχεται ο μαγνήτης από το πηνίο δαπανάται ενέργεια, που μετατρέπεται σε θερμότητα στους αγωγούς.

Η κατεύθυνση του επαγωγικού ρεύματος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού και το μέτρο του, εφαρμόζοντας το νόμο του $\Omega\mu$:

$$I_{E\Pi} = \frac{E_{E\Pi}}{R} \quad (2.13)$$

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας στο φαινόμενο της επαγωγής είναι μια θεμελιώδης φυσική αρχή, που εξηγεί γιατί η φορά του επαγωγικού ρεύματος, όπως καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz, είναι πάντα τέτοια ώστε να αντιτίθεται στο αίτιο που την προκάλεσε. Ας το εξετάσουμε αναλυτικά:

Αν το πηνίο διαρρεόταν από ρεύμα αντίθετης φοράς, απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη θα δημιουργούσε νότιο μαγνητικό πόλο. Ο νότιος μαγνητικός πόλος θα ασκούσε ελκτική δύναμη στο μαγνήτη, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται καμιά προσπάθεια για να πλησιάσει. Αυτό όμως είναι αντίθετο με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, γιατί χωρίς καμιά προσπάθεια, χωρίς να δαπανάται ενέργεια, στο πηνίο θα παραγόταν ηλεκτρική ενέργεια λόγω του φαινομένου της επαγωγής.

Η κατεύθυνση του επαγωγικού ρεύματος, όπως δίνεται από τον κανόνα του Lenz, εξασφαλίζει ότι δεν παραβιάζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Αν το επαγωγικό ρεύμα ενίσχυε τη μεταβολή που το προκαλεί (αντί να της αντιστέκεται), θα οδηγούσε σε αυτοτροφοδοτούμενη αύξηση της ενέργειας, κάτι που δεν είναι δυνατό σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής.

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

Η ενέργεια που απαιτείται για να μεταβληθεί η μαγνητική ροή (για παράδειγμα, μετακινώντας τον μαγνήτη) είναι ίση με την ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργείται από την επαγωγή.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να πούμε ότι η αρχή διατήρησης της ενέργειας αποτελεί τη βάση του φαινομένου της επαγωγής. Το επαγωγικό ρεύμα, μέσω της κατεύθυνσής του, "εξαναγκάζει" τη φύση να διατηρήσει την ισορροπία ενέργειας, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια ή άλλη μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική, χωρίς να δημιουργείται ή να χάνεται ενέργεια ανεξέλεγκτα από το πουθενά.[1], [26], [27]

2.6 Νόμος της Αυτεπαγωγής

Το φαινόμενο της αυτεπαγωγής αποτελεί μια ειδική περίπτωση του φαινομένου της επαγωγής. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ηλεκτρικό κύκλωμα παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) εξαιτίας της μεταβολής του ρεύματος που το διαρρέει. Ο νόμος της αυτεπαγωγής περιγράφει τη σχέση μεταξύ της μεταβολής του ρεύματος, της μαγνητικής ροής και της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο ίδιο το κύκλωμα. Έτσι, κάθε φορά που θα έχουμε μεταβολή του ρεύματος ενός κυκλώματος, θα δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ αυτεπαγωγής. Επειδή το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο, όταν το κύκλωμα έχει πηνίο, η μελέτη του εστιάζεται εκεί περισσότερο. Έτσι, γενικά :

"Αυτεπαγωγή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη σ' ένα κύκλωμα, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει"

Όταν το ρεύμα σε ένα κύκλωμα μεταβάλλεται, η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το ρεύμα επίσης μεταβάλλεται. Στη συνέχεια, η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) μέσα στο κύκλωμα, η οποία αντιστέκεται στη μεταβολή του ρεύματος (βάσει του κανόνα του Lenz). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αυτεπαγωγή, επειδή η επαγόμενη ΗΕΔ δημιουργείται μέσα στο ίδιο το κύκλωμα.

Ο νόμος της επαγωγής, στην περίπτωση της αυτεπαγωγής γίνεται :

$$E_{AYT} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.14)$$

όπου :

L : ο συντελεστής αυτεπαγωγής ή αυτεπαγωγή πηνίου ή βρόχου σε Henry (H)

ΔI : η μεταβολή της έντασης του ρεύματος

Δt : η χρονική διάρκεια κατά την οποία συνέβη η μεταβολή της έντασης του ρεύματος

- : συνέπεια του κανόνα του Lenz (υποδηλώνει ότι η ΗΕΔ αντιτίθεται στη μεταβολή του ρεύματος)

E_{AYT} : η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σε Volt (V).

Από τη σχέση (2.14), βλέπουμε ότι η επαγόμενη ΗΕΔ είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος και ο συντελεστής αυτεπαγωγής είναι αριθμητικά ίσος με την ΗΕΔ, όταν το ρεύμα μεταβάλλεται με ρυθμό 1 Ampere/sec.

Αν το ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο αυξάνεται, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, στο πηνίο δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη με φορά που αντιτίθεται στην αύξηση του ρεύματος, προσπαθώντας να μειώσει το ρεύμα και λειτουργώντας σαν "αντίσταση" στη μεταβολή. Αν το ρεύμα στο πηνίο μειώνεται, η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει φορά που αντιτίθεται στη μείωση, προσπαθώντας να διατηρήσει το ρεύμα σταθερό. Άρα λοιπόν, **το πηνίο αντιδρά σε κάθε μεταβολή της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Έτσι, η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αντιτίθεται στην όποια μεταβολή της έντασης του ρεύματος.**

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής L ενός κυκλώματος εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες :

- τη γεωμετρία του κυκλώματος (μέγεθος, σχήμα, αριθμός σπειρών αν υπάρχουν),
- το υλικό του κυκλώματος μέσα ή γύρω από αυτό (αν υπάρχει μαγνητικό υλικό μπορεί ν' αυξηθεί η αυτεπαγωγή),
- τη μαγνητική ροή Φ ανά μονάδα ρεύματος (μεγαλύτερο $\Phi \rightarrow$ μεγαλύτερο L)

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής L ενός κυκλώματος υπολογίζεται ως :

$$L = \frac{\Phi}{I} = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A \quad \text{ή} \quad L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A \quad (2.15)$$

όπου :

- Φ : η ολική μαγνητική ροή που διέρχεται από τις σπείρες πηνίου ή του κυκλώματος (Wb)
- I : το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα (A)
- μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- μ : μαγνητική διαπερατότητα υλικού στον πυρήνα του πηνίου (αν υπάρχει)
- N : το πλήθος των σπειρών του πηνίου
- l : το μήκος του πηνίου
- A : το εμβαδόν της σπείρας του πηνίου

Αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό για τον συντελεστή αυτεπαγωγής, αυτός θα ήταν :

"Συντελεστής αυτεπαγωγής L ονομάζεται το πηλίκο της ολικής μαγνητικής ροής που διέρχεται από τις σπείρες πηνίου, προς το ρεύμα που το διαρρέει."

Ο Τζόζεφ Χένρι (Joseph Henry, 17 Δεκεμβρίου 1797 - 13 Μαΐου 1878) ήταν ένας διακεκριμένος Αμερικανός φυσικός, γνωστός για την ανακάλυψη του φαινομένου της αυτεπαγωγής. Επιπλέον, ανακάλυψε το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής περίπου την ίδια χρονική περίοδο με τον Μάικλ Φαραντέι, αν και ο Φαραντέι δημοσίευσε πρώτος τα ευρήματά του.

Ο Χένρι υπήρξε καινοτόμος στην τεχνολογία, καθώς βελτίωσε το ηλεκτρομαγνητικό ρελέ, το οποίο αποτέλεσε κρίσιμο στοιχείο για την εξέλιξη του τηλέγραφου. Επιπλέον, ήταν ο δημιουργός των πρώτων ηλεκτροκινητήρων, θέτοντας τις βάσεις για την ανάπτυξη των σύγχρονων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Στη μνήμη του, λοιπόν, η μονάδα του συντελεστή αυτεπαγωγής στο S.I. είναι το Henry (Χένρι ή Ανρί στα γαλλικά).

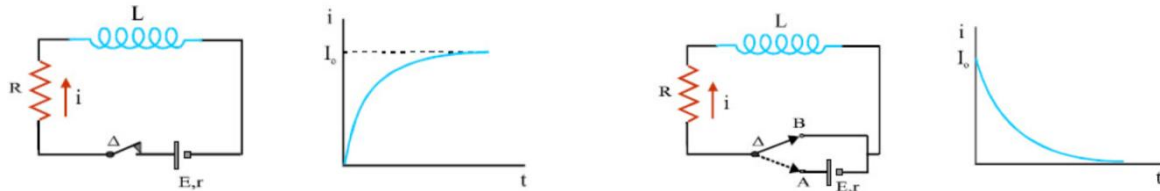
Έτσι, ο συντελεστής αυτεπαγωγής L μετριέται σε Henry (H), που μπορεί να εκφραστεί με πολλούς τρόπους. Αντιστοιχεί σε 1 Weber (Wb) ανά 1 Ampere (A).

$$\left(H = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{A}^2} = \frac{\text{J}}{\text{A}^2} = \frac{\text{T} \cdot \text{m}^2}{\text{A}} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \frac{\text{s}^2}{\text{F}} = \frac{1}{\text{F} \cdot \text{f}^2} = \Omega \cdot \text{s} \right)$$

Ένα πηνίο, καθώς και κάθε κύκλωμα γενικότερα, παρουσιάζει αντίσταση σε οποιαδήποτε μεταβολή της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Μπορούμε να θεωρήσουμε την αυτεπαγωγή ως την ηλεκτρική "αδράνεια" των κυκλωμάτων, αντίστοιχη με την αδράνεια των φυσικών σωμάτων. Όπως τα σώματα αντιστέκονται σε κάθε αλλαγή στην κίνησή τους, έτσι και τα κυκλώματα αντιδρούν σε μεταβολές της έντασης του ρεύματος που τα διαπερνά. Με αυτόν τον τρόπο, όπως η μάζα αποτελεί μέτρο της αδράνειας των σωμάτων, ο συντελεστής αυτεπαγωγής λειτουργεί ως μέτρο της ηλεκτρικής αδράνειας των κυκλωμάτων.

Ας πάρουμε, για παράδειγμα, το κύκλωμα τους Σχ.2.17.α. Αυτό αποτελείται από μια πηγή, έναν διακόπτη, έναν αντιστάτη και ένα πηνίο. Όταν ο διακόπτης κλείσει, το ρεύμα ξεκινά να ρέει στο κύκλωμα. Ωστόσο, λόγω της αντίδρασης του πηνίου στην αύξηση του ρεύματος, η τιμή του ρεύματος δεν φτάνει άμεσα στην τελική του τιμή I_0 , αλλά καθυστερεί και αυξάνεται σταδιακά.

Παρόμοια, στο Σχ.2.17.β, ο μεταγωγέας βρίσκεται αρχικά στη θέση Α, όπου το κύκλωμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα I_0 . Τη χρονική στιγμή μηδέν, ο μεταγωγέας μετακινείται στη θέση Β, όπου δεν υπάρχει πηγή - αίτιο - στο κύκλωμα και κανονικά δε θα πρέπει να υπάρχει και ρεύμα - αποτέλεσμα. Παρόλο, όμως, που η τροφοδοσία διακόπτεται, το κύκλωμα συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα για σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή το πηνίο αντιδρά στη μείωση του ρεύματος, δημιουργώντας ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) που διατηρεί τη ροή ρεύματος στην ίδια κατεύθυνση με την αρχική για λίγο χρόνο.



α. κλείσιμο διακόπτη (τάση στο κύκλωμα)

β. μεταγωγή διακόπτη (σε θέση χωρίς τάση)

Σχήμα 2. 17: Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αντιτίθεται στη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, αδράνεια του κυκλώματος στη μεταβολή της κατάστασής του (Πηγή : [26])

Η αυτεπαγωγή συνδέεται με την αποθήκευση ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο του κυκλώματος. Είναι αποδεδειγμένο ότι ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα έχει αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό του πεδίο. Η ενέργεια W που αποθηκεύεται σε ένα πηνίο εκφράζεται ως:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \tag{2.16}$$

όπου :

W : η αποθηκευμένη ενέργεια σε Joule

L : ο συντελεστής αυτεπαγωγής

I : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο

Η ενέργεια αυτή που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο μπορεί να επιστραφεί στο κύκλωμα, όταν το ρεύμα που το διαρρέει μειωθεί.

Ο νόμος της αυτεπαγωγής είναι μια θεμελιώδης αρχή που περιγράφει με ποιον τρόπο η μεταβολή του ρεύματος σε ένα κύκλωμα δημιουργεί ΗΕΔ που αντιτίθεται στη μεταβολή αυτή. Η αυτεπαγωγή εξασφαλίζει τη διατήρηση της ενέργειας στο ηλεκτρικό κύκλωμα, αποθηκεύοντας την ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο και ελέγχοντας τις μεταβολές του ρεύματος. [Α], [26], [29]

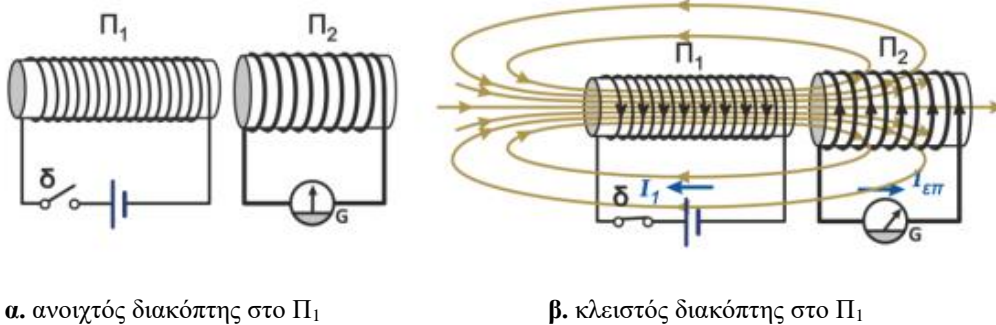
2.7 Αμοιβαία επαγωγή

Η αμοιβαία επαγωγή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα σε ένα κύκλωμα προκαλεί μεταβολή μαγνητικού πεδίου, που με τη σειρά του επάγει ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) σε ένα άλλο, γειτονικό κύκλωμα. Απαντάται σε κυκλώματα που δεν έχουν κάποια φυσική σύνδεση μεταξύ τους, απλά "τυχαίνει" να είναι κοντά το ένα με το άλλο. Το φαινόμενο αυτό είναι κεντρικό στη λειτουργία συσκευών όπως οι μετασχηματιστές και οι επαγωγικοί κινητήρες.

Η αμοιβαία επαγωγή βασίζεται στον νόμο του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, σύμφωνα με τον οποίο:

"Η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη σε ένα κύκλωμα είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από αυτό".

Ας εξετάσουμε την περίπτωση, λοιπόν, που έχουμε δύο κυκλώματα, π.χ. τα πηνία του Σχ.2.18, τα οποία δεν ακουμπάνε ούτε συνδέονται με κάποιον αγωγό μεταξύ τους και κανένα τους αρχικά δε διαρρέεται από ρεύμα. Στο πρώτο (Π_1) υπάρχει πηγή τάσης, ενώ στο δεύτερο μόνο ένα γαλβανόμετρο. Όσο ο διακόπτης στο Π_1 είναι ανοιχτός, Σχ.2.18.α, δεν παρατηρείται τίποτα στο Π_2 και η βελόνα του γαλβανομέτρου παραμένει ακίνητη.



α. ανοιχτός διακόπτης στο Π_1

β. κλειστός διακόπτης στο Π_1

Σχήμα 2. 18: Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή αντιτίθεται στη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, αδράνεια του κυκλώματος στη μεταβολή της κατάστασής του (Πηγή : [1])

Με το που κλείσουμε το διακόπτη, όμως, Σχ.2.18.β, παρατηρούμε ότι η βελόνα του γαλβανομέτρου στο Π_2 μετακινείται, που σημαίνει ότι διαρρέεται από ρεύμα. Επομένως, θα εμφανίστηκε μια τάση στα άκρα του Π_2 . Αν τώρα ανοίξουμε το διακόπτη στο Π_1 , θα παρατηρήσουμε ότι εξακολουθεί να διαρρέει ρεύμα το Π_2 για λίγο χρονικό διάστημα ακόμα.

Το παραπάνω φαινόμενο εξηγείται ως εξής:

Η εμφάνιση ρεύματος I_1 στο πηνίο Π_1 προκαλεί και εμφάνιση μαγνητικού πεδίου B που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του, δηλ. μεταβολή του B , που έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει και η μαγνητική ροή Φ_1 που διέρχεται από αυτό. Δεδομένου ότι το Π_1 βρίσκεται πολύ κοντά με το πηνίο Π_2 , από το δεύτερο θα διέρχονται κάποιες από τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου που δημιουργήθηκε στο Π_1 , η αλλαγή, δηλ., στη μαγνητική ροή του Π_1 μεταδίδεται και στο Π_2 , όπου εμφανίζει και αυτό μια μαγνητική ροή Φ_2 , η οποία με τη σειρά της προκαλεί την εμφάνιση τάσης, και κατά συνέπεια ρεύματος $I_{\epsilon\pi}$, από επαγωγή. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση αμοιβαίας επαγωγής, ο ορισμός της οποίας δίνεται στη συνέχεια.

Τα δύο αυτά πηνία λέμε ότι βρίσκονται σε επαγωγική ή μαγνητική σύζευξη. 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. Το πόσο πολύ είναι συζευγμένα τα δύο πηνία μας

το δείχνει ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής ή η αμοιβαία επαγωγή M , που, όπως και ο συντελεστής αυτεπαγωγής, ορίζεται από το λόγο Φ/I , απλά λίγο διαφορετικά, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Κατά παρόμοιο τρόπο με το συντελεστή αυτεπαγωγής, ένας ορισμός του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής θα είναι :

“Συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M δύο πηνίων, που βρίσκονται σε μαγνητική σύζευξη, ονομάζεται το πηλίκο της ολικής μαγνητικής ροής που περνά από το δευτερεύον, προς την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον.”

Καταλήγοντας, αυτό που συνέβη στα δύο κυκλώματα είναι ότι :

- Π_1 : όταν διαρρέει το κύκλωμα αυτό, το οποίο ονομάζουμε πρωτεύον, ένα ρεύμα I_1 δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω του, μέρος του οποίου περνά μέσα από το κύκλωμα Π_2 , που ονομάζεται δευτερεύον, σε εξάρτηση με το βαθμό σύζευξής τους,
- Π_2 : η μαγνητική ροή του μεταβάλλεται, λόγω της εμφάνισης μαγνητικού πεδίου γύρω του, με αποτέλεσμα να επάγεται σ’ αυτό ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ αμοιβαίας επαγωγής.

<<Αμοιβαία, λοιπόν, επαγωγή ονομάζουμε το φαινόμενο εμφάνισης επαγωγικής τάσης στα άκρα ενός πηνίου, όταν μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα άλλο πηνίο με το οποίο βρίσκεται σε επαγωγική σύζευξη.>> [1]

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι αυτή η επαγωγική τάση εξαρτάται από:

- το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στο πρωτεύον με ανάλογο τρόπο, δηλ., μεγαλύτερος ρυθμός μεταβολής συνεπάγεται εμφάνιση μεγαλύτερης επαγωγικής τάσης,
- τον αριθμό των σπειρών των πηνίων, πάλι με ανάλογο τρόπο (περισσότερες σπείρες => μεγαλύτερη επαγωγική τάση),
- το βαθμό σύζευξης των δύο πηνίων (η επαγωγική τάση είναι ανάλογη του βαθμού σύζευξης ή συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής M) και τέλος
- την ύπαρξη πυρήνα στο εσωτερικό τους, η οποία οδηγεί στην δημιουργία μεγαλύτερης επαγωγικής τάσης.

Στην περίπτωση της αμοιβαίας επαγωγής ο νόμος της επαγωγής του Faraday παίρνει γενικά τη μορφή :

$$E_{E\pi} = -M \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.17)$$

όπου :

- M : ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής σε H (Henry), $1H = 1V \cdot s/A$
- $\Delta I/\Delta t$: ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ρεύματος (A/sec)
- - : εφαρμογή του κανόνα του Lenz

Εάν η επαγωγική σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων είναι ιδανική (τέλεια), τότε η μαγνητική ροή που περνά από το πρωτεύον πηνίο είναι ίση με τη μαγνητική ροή που περνά και από το δευτερεύον.

Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M δύο πηνίων εξαρτάται από τη γεωμετρία τους, τη σχετική τους θέση και προσανατολισμό και τη διαπερατότητα του υλικού μεταξύ τους (π.χ. αν υπάρχει πυρήνας). Το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής είναι έντονο στην περίπτωση δύο πηνίων με κοινό άξονα.

Η ΗΕΔ που επάγεται στο δεύτερο κύκλωμα εξαιτίας του πρώτου δίνεται από τη σχέση:

$$E_{E\Pi_2} = -M_{21} \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad \mu\epsilon \quad M_{21} = \frac{\Phi_{o\lambda_{21}}}{I_1} \quad (2.18)$$

όπου :

- $E_{E\Pi_2}$: η επαγωγική τάση στο δευτερεύον λόγω μεταβολής ρεύματος στο πρωτεύον (Volt)
- M_{21} : ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής από το πρωτεύον στο δευτερεύον
- $\Delta I_1/\Delta t$: ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ρεύματος στο πρωτεύον (A/sec)
- $\Phi_{o\lambda_{21}}$: η ολική μαγνητική ροή που περνά στο δευτερεύον
- I_1 : η ένταση του ρεύματος στο πρωτεύον

Το φαινόμενο που περιγράφηκε είναι αμφίδρομο. Αυτό σημαίνει ότι και το πρωτεύον κύκλωμα θα επηρεαστεί από το μαγνητικό πεδίο του δευτερεύοντος. Έτσι, αν το ρεύμα I_2 στο δευτερεύον μεταβληθεί, θα προκαλέσει επαγωγική ΗΕΔ στο πρωτεύον, η οποία παρόμοια θα είναι :

$$E_{E\Pi_1} = -M_{12} \frac{\Delta I_2}{\Delta t} \quad \mu\epsilon \quad M_{12} = \frac{\Phi_{o\lambda_{12}}}{I_2} \quad (2.19)$$

όπου :

- $E_{E\Pi_1}$: η επαγωγική τάση στο πρωτεύον λόγω μεταβολής ρεύματος στο δευτερεύον (Volt)
- M_{12} : ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής από το δευτερεύον στο πρωτεύον
- $\Delta I_2/\Delta t$: ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ρεύματος στο δευτερεύον (A/sec)
- $\Phi_{o\lambda_{12}}$: η ολική μαγνητική ροή που περνά στο πρωτεύον
- I_2 : η ένταση του ρεύματος στο δευτερεύον

Επίσης, θα περίμενε κανείς οι συντελεστές αμοιβαίας επαγωγής να είναι διαφορετικοί για το κάθε πηνίο, επειδή τα δύο πηνία δεν είναι απαραίτητο να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά ούτε και η ροή που διέρχεται από αυτά είναι η ίδια. Παρόλα αυτά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι πάντα ίσα, γι' αυτό και θα συμβολίζονται με το γράμμα M .

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (2.18) και (2.19) για το πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο, θα έχουμε :

$$E_{E\Pi_2} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad \kappa\alpha\iota \quad E_{E\Pi_1} = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t} \quad (2.20)$$

όπου :

- M : ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής των δύο κυκλωμάτων (Henry)
- - : εφαρμογή του κανόνα του Lenz, όπως σε όλες τις παραπάνω σχέσεις

Αν γνωρίζουμε τους συντελεστές αυτεπαγωγής L_1 και L_2 των δύο πηνίων μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής M ως την τετραγωνική ρίζα του γινομένου $L_1 \cdot L_2$, στην περίπτωση βέβαια της τέλει επαγωγικής σύζευξης, όπου δεν υπάρχει σκέδαση μαγνητικής ροής. Επειδή αυτό είναι σχεδόν αδύνατο, το παραπάνω αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή k , που λέγεται συντελεστής σύζευξης ή βαθμός σύζευξης, ένας αδιάστατος αριθμός που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 το πολύ. Όσο πλησιάζει στη μονάδα αυτός ο αριθμός τόσο ισχυρότερη γίνεται η μαγνητική σύζευξη μεταξύ των πηνίων. Ανάλογα, υπάρχει και ο συντελεστής σκέδασης σ , που αν αθροιστεί με τον συντελεστή σύζευξης μας βγάζει τη μονάδα ($k + \sigma = 1$, $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$).

Η αμοιβαία επαγωγή έχει ευρύτατες εφαρμογές, όπως την επαγωγική φόρτιση, όπου η φόρτιση των συσκευών γίνεται με ασύρματο τρόπο, τους επαγωγικούς κινητήρες για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας από ηλεκτρική και φυσικά τους μετασχηματιστές, οι οποίοι περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο. [1], [26], [A], [B]

2.8 Δύναμη LAPLACE

Επανερχόμενοι στην υποενότητα 2.3.1, που αναφέρεται στο μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού και βασιζόμενοι στα ευρήματα του Lorentz, θα εξετάσουμε στη συνέχεια τη δύναμη Laplace.

Είναι γνωστό πως όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Αν αυτός βρεθεί, στη συνέχεια, σε κάποιο άλλο μαγνητικό πεδίο, όπως αναμένεται, θα υπάρξει μια αλληλεπίδραση ανάμεσα στα δύο αυτά μαγνητικά πεδία, η οποία αρχικά περιγράφηκε από τον Lorentz για ένα φορτισμένο σωματίδιο και γενικεύτηκε αργότερα για το σύνολο των σωματιδίων από τον Laplace.

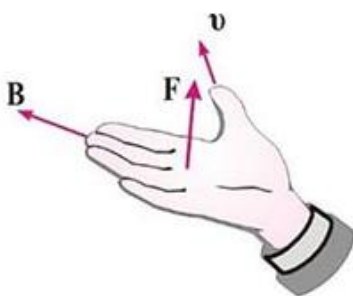
Σύμφωνα με τον Lorentz, λοιπόν, "όταν ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο q βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο θα ασκηθεί πάνω του μια δύναμη F ονόματι Δύναμη Lorentz." Η φορά της δύναμης αυτής εξαρτάται από το πρόσημό του και η μαθηματική έκφραση που μας δίνει το μέτρο της είναι:

$$F_{Lor} = (\vec{B} \times \vec{u}) \cdot |q| = B \cdot u \cdot |q| \cdot \sin \theta \quad (2.21)$$

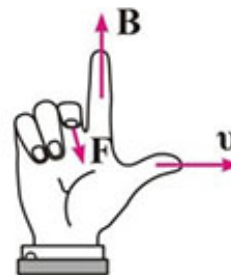
όπου :

- F_{Lor} : η δύναμη Lorentz (Newton, N),
- B : η πυκνότητα μαγνητικής ροής - ένταση μαγνητικού πεδίου (Tesla, T),
- u : η ταχύτητα του φορτίου (m/sec),
- $\vec{B} \times \vec{u}$: το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων \vec{B} και \vec{u} ,
- $|q|$: η απόλυτη τιμή του ηλεκτρικού φορτίου του σωματιδίου (Coulomb, C)
- θ : η γωνία μεταξύ διανυσμάτων \vec{u} και \vec{B} (μοίρες ή ακτίνια).

Για να βρούμε τη φορά της δύναμης, εφαρμόζουμε τον κανόνα δεξιάς παλάμης ή τον κανόνα του δεξιού χεριού (κανόνας τριών δακτύλων), Σχ.2.19. Με τον πρώτο κανόνα, τα δάχτυλα δείχνουν προς την κατεύθυνση του B και ο αντίχειρας προς τα δεξιά μας, αν το πρόσημο του φορτίου είναι θετικό, ή προς τα αριστερά στην αντίθετη περίπτωση, ενώ η παλάμη μας δείχνει τη φορά της δύναμης F , Σχ.2.19.α. Με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, ο αντίχειρας δείχνει την κατεύθυνση της ταχύτητας του φορτίου, ο δείκτης του μαγνητικό πεδίου και ο μέσος τη φορά της δύναμης Lorentz, Σχ.2.19.β.



α. κανόνας δεξιάς παλάμης



β. κανόνας τριών δακτύλων δεξιού χεριού

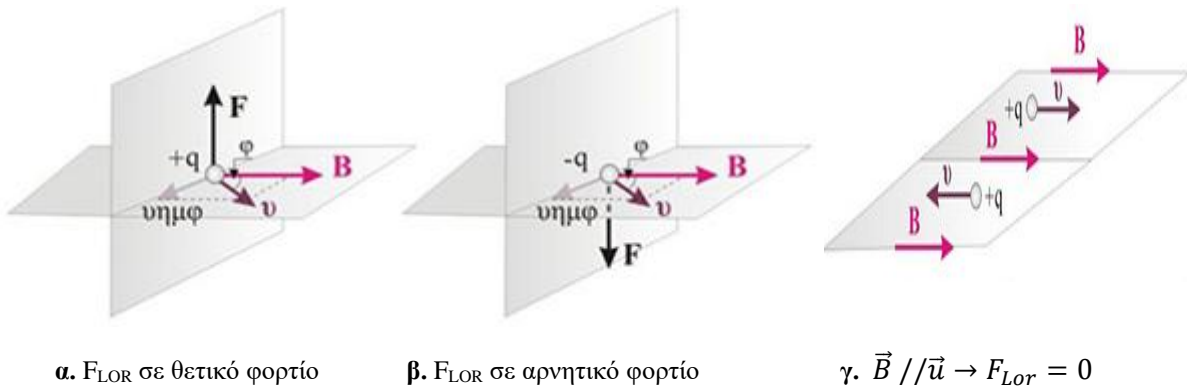
Σχήμα 2. 19: Εύρεση φοράς δύναμης Lorentz με τη βοήθεια του δεξιού χεριού (Πηγή : [30])

Από τη σχέση (2.21) παρατηρούμε ότι η δύναμη Lorentz (μαγνητική) εξαρτάται από την ταχύτητα του σωματιδίου και είναι πάντα κάθετη σε αυτή, που σημαίνει ότι δεν επηρεάζει καθόλου την τιμή

της, αλλά μόνο την κατεύθυνσή της. Επίσης, έχει κατεύθυνση που είναι πάντα κάθετη και στην ένταση B του μαγνητικού πεδίου.

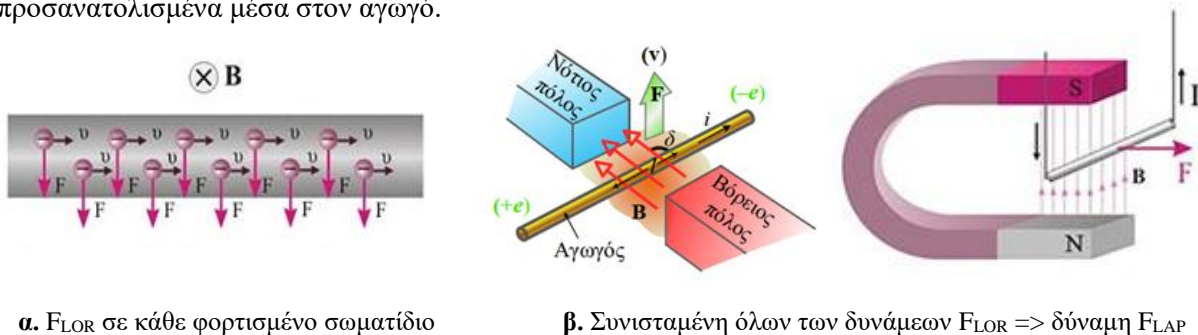
Καταλήγουμε, επομένως, στο συμπέρασμα ότι αν το σωματίδιο είναι ακίνητο δεν ασκείται καμία δύναμη σ' αυτό. Δύναμη ασκείται μόνο σε κινούμενα φορτία των οποίων η ταχύτητα v έχει κάποια συνιστώσα κάθετα στο διάνυσμα B . Ειδικά, αν κινείται παράλληλα στις μαγνητικές δυναμικές, Σχ.2.20.γ, δεν θα υπάρχει μαγνητική δύναμη ($F_{Lor} = 0$, αφού $\sin\theta=0$). Επιπλέον, η δύναμη αυτή δεν μπορεί ν' αλλάξει την κινητική του ενέργεια, αφού δεν παράγει έργο ($F_{Lor} \perp u \rightarrow F_{Lor} \perp \Delta x \rightarrow W_{Lor} = 0$), παρά μόνο τη ροπή του και τη μορφή της κίνησής του ($F_{Lor} = 0$, $\vec{u} // \vec{B} \rightarrow$ ευθύγραμμη ομαλή, $F_{Lor} = F_k \rightarrow$ ομαλή κυκλική, ελικοειδής - μεταφορική κυκλική, κ.α.).

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η δύναμη αυτή, για δεδομένες τιμές ταχύτητας και μαγνητικού πεδίου, θα είναι όταν το φορτίο κινείται κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οπότε η γωνία που σχηματίζει μ' αυτές το διάνυσμα της ταχύτητας θα είναι 90° και επομένως το ημίτονο της γωνίας θα δίνει τη μέγιστη τιμή του, δηλ. θα είναι ίσο με τη μονάδα.



Σχήμα 2. 20: Η δύναμη F_{Lor} που ασκείται από ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα **α.** θετικό ή σε ένα **β.** αρνητικό φορτίο, όταν $\vec{B} \neq (\perp \text{ ή } // \vec{u})$ και όταν **γ.** $\vec{B} // \vec{u}$ (Πηγή : [30])

Είδαμε, λοιπόν, πως όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, δέχεται δύναμη από αυτό το πεδίο. Είναι αναμενόμενο, επομένως, να περιμένουμε ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, θα δεχτεί επίσης δύναμη, μιας και το ηλεκτρικό ρεύμα δεν είναι τίποτα άλλο από ένα πλήθος φορτισμένων σωματιδίων q που κινούνται προσανατολισμένα μέσα στον αγωγό.



Σχήμα 2. 21: Η δύναμη Lorentz F_{Lor} και η δύναμη Laplace F_{LAP} (Πηγή : [31])

Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη Lorentz σε κάθε ένα από αυτά τα σωματίδια, Σχ.2.21.α, οπότε η συνολική δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι η συνισταμένη των δυνάμεων που δέχονται μεμονωμένα τα φορτισμένα σωματίδιά του, Σχ.2.21.β. Συνεπώς, μπορούμε να υπολογίσουμε τη

δύναμη στον αγωγό, βασίζομενοι στη δύναμη που ασκείται σε κάθε σωματίδιο ξεχωριστά, καταλήγοντας στη δύναμη Laplace.

Η δύναμη Laplace, λοιπόν, είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης της μαγνητικής δύναμης Lorentz, η οποία ασκείται σε κινούμενα φορτισμένα σωματίδια μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Όταν αυτά τα φορτία κινούνται μέσα σε έναν αγωγό, η συνδυαστική επίδραση των δυνάμεων Lorentz πάνω στα επιμέρους φορτία παράγει μία καθαρή δύναμη στον αγωγό, τη δύναμη Laplace.

Έτσι, όταν ένας αγωγός οποιουδήποτε σχήματος που διαρρέεται από ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο, ασκείται πάνω του αυτή η δύναμη Λαπλάς.

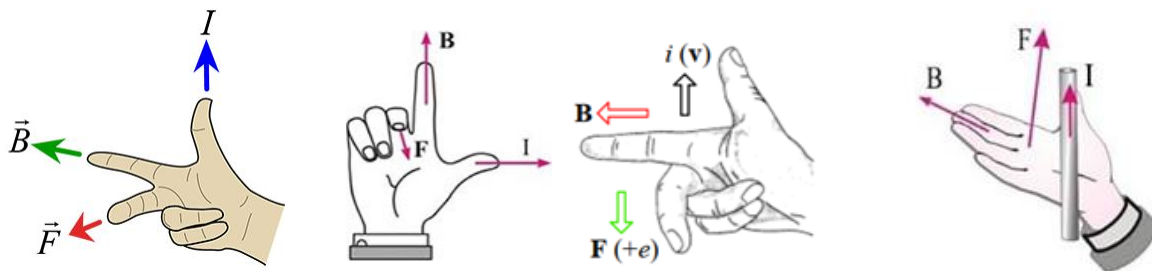
Στην ειδική περίπτωση, που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι ευθύγραμμος και βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης B - χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μαγνητικό πεδίο που παράγει ο αγωγός - αν ο αγωγός αυτός έχει μήκος L , διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και σχηματίζει με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου γωνία θ , τότε η δύναμη Laplace, που ασκείται στον αγωγό έχει μέτρο:

$$F_{Laplace} = (\vec{B} \times \vec{L}) \cdot \vec{I} = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \theta \quad (2.22)$$

όπου :

- $F_{Laplace}$: η δύναμη Laplace (Newton, N),
- B : η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Tesla, T),
- \vec{L} : το διάνυσμα μήκους του αγωγού (m) με κατεύθυνση τη φορά του ρεύματος μέσα στον αγωγό,
- I : η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό (Ampere, A)
- L : το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού (m),
- θ : η γωνία μεταξύ διανυσμάτων \vec{L} και \vec{B} (μοίρες ή ακτίνια).

Σαν διανυσματικό μέγεθος, η δύναμη Laplace εκτός από μέτρο έχει και κατεύθυνση. Έτσι, η διεύθυνσή της θα είναι πάνω σε μια ευθεία κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και του αγωγού, με τέτοια φορά που προσδιορίζεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, Σχ.2.22. ή της δεξιάς παλάμης. Όπως γίνεται φανερό, η δύναμη F_{LAP} είναι κάθετη τόσο στον αγωγό όσο και στο μαγνητικό πεδίο.



α. κανόνας τριών δακτύλων δεξιού χεριού

β. κανόνας δεξιάς παλάμης

Σχήμα 2. 22: Προσδιορισμός κατεύθυνσης δύναμης Laplace με τον κανόνα του δεξιού χεριού (Πηγή :[31],[32])

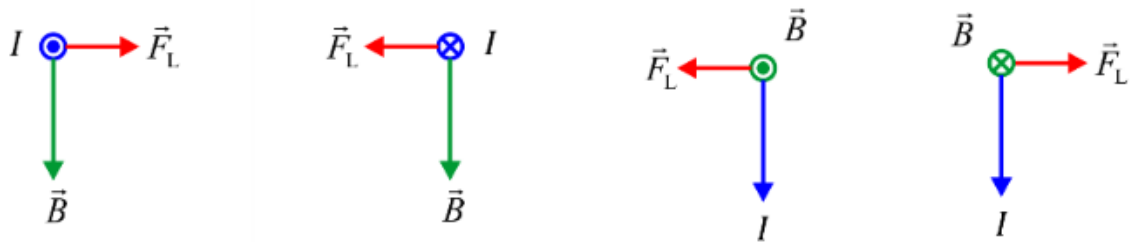
Εάν και ο αγωγός είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο, ο τύπος (2.22) απλοποιείται σε :

$$F = B \cdot I \cdot L$$

αφού η γωνία θ μεταξύ του αγωγού και της μαγνητικής επαγωγής B είναι 90° , τότε το $\eta\mu(90^\circ)$ ισούται με τη μονάδα. Η εν λόγω τιμή αποτελεί και τη μέγιστη τιμή της δύναμης Laplace για το συγκεκριμένο σύστημα ρευματοφόρου αγωγού – μαγνητικού πεδίου. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η δύναμη Laplace θα είναι πάντα μικρότερη, με την ειδική περίπτωση όπου αν ο ρευματοφόρος αγωγός είναι παράλληλος στις δυναμικές γραμμές, οπότε $\theta=0^\circ$ ή 180° , η δύναμη αυτή γίνεται μηδενική και έτσι δεν ασκείται καμιά μαγνητική δύναμη στον αγωγό.

Αν ο αγωγός δεν είναι ευθύγραμμος, τον χωρίζουμε σε τόσο πολύ μικρά τμήματα μήκους $\Delta\ell$, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ευθύγραμμα και μ' αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τη δύναμη που ασκείται σε κάθε ένα από αυτά τα ευθύγραμμα τελικά μήκη. Η δύναμη που δέχεται ολόκληρος ο αγωγός θα είναι η συνισταμένη όλων των δυνάμεων των επιμέρους τμημάτων $\Delta\ell$.

Για να μην δημιουργείται πρόβλημα στον σχεδιασμό των διανυσμάτων και να μπορούμε να τα σχεδιάσουμε εύκολα σε μια κόλλα χαρτί (δύο διαστάσεων) ακολουθούμε τον τρόπο που ειπώθηκε στην ενότητα 2.3 και που αναπαριστάται στο Σχ2.23. Για διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο της σελίδας με φορά από τον αναγνώστη προς το χαρτί χρησιμοποιείται το σύμβολο \otimes υποδεικνύοντας το πίσω μέρος ενός βέλους απομακρυνόμενο από αυτόν. Αντίθετα, όταν το διάνυσμα έχει φορά από το χαρτί προς τον αναγνώστη χρησιμοποιείται το σύμβολο \odot θεωρώντας το ως την μύτη του βέλους που στοχεύει τον αναγνώστη. [1], [26], [30], [31], [32], [Γ], [Δ]



- | | | | |
|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| <p>i. προς τον αναγνώστη</p> <p>α. διάνυσμα έντασης ρεύματος</p> | <p>ii. από τον αναγνώστη</p> | <p>i. προς τον αναγνώστη</p> <p>β. διάνυσμα έντασης μαγνητικού πεδίου</p> | <p>ii. από τον αναγνώστη</p> |
|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|

Σχήμα 2. 23: Σχεδίαση διανυσμάτων με διεύθυνση κάθετα από και προς τον αναγνώστη (Πηγή :[32])

Φυσικά και υπάρχουν προσομοιώσεις για τα παραπάνω φαινόμενα. Επειδή, όμως, για τη δύναμη Laplace συγκεκριμένα, θα γίνει εκτενής αναφορά και περιγραφή στο 2^ο και 3^ο μέρος της εργασίας, στην παρούσα φάση, δε θα δοθούν επιπλέον πληροφορίες.

2.9 Επίλογος

Η μελέτη των ρευματοφόρων αγωγών και της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αναδεικνύει τη δύναμη των φυσικών νόμων που συμβάλλουν στην παραγωγή και τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι αρχές είναι μείζονος σημασίας για την ανάπτυξη τεχνολογιών που υποστηρίζουν τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τα ενεργειακά δίκτυα. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, με την ανακάλυψη του Faraday, έθεσε τα θεμέλια για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, κάτι που αποτελεί τη βάση της σύγχρονης ηλεκτρικής τεχνολογίας.

Ο ηλεκτρομαγνητισμός παραμένει μια κρίσιμη επιστήμη που συνεχίζει να οδηγεί την πρόοδο και την καινοτομία, εξασφαλίζοντας έναν κόσμο με αυξημένες ενεργειακές δυνατότητες. Το σωληνοειδές, εξάλλου, αποτελεί έναν από τους πιο πρακτικούς τρόπους για τη δημιουργία ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου, μιας και επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό της έντασης και της κατεύθυνσής του, ανάλογα με την εφαρμογή.

Η αμοιβαία επαγωγή αποτελεί ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο στον ηλεκτρομαγνητισμό που βασίζεται στη σχέση μεταξύ χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος και μαγνητικών πεδίων. Είναι κεντρικής σημασίας για πολλές τεχνολογικές εφαρμογές και επαληθεύει τη βαθιά σύνδεση μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού.

Η δύναμη Laplace είναι ένα φαινόμενο που βρίσκει εφαρμογές στις ηλεκτρογεννήτριες, τους κινητήρες, σε μετρητικές και άλλες συσκευές, προσφέροντας τη βάση για πολλές σύγχρονες τεχνολογίες, από τα ηλεκτρονικά έως τα συστήματα μεταφοράς ενέργειας, ενοποιώντας τις έννοιες του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού ρεύματος. Με τις παραπάνω συσκευές θα ασχοληθούμε στο επόμενο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 3ο : Ηλεκτρικές μηχανές

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και τα κύρια χαρακτηριστικά που διέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών.

Ο στόχος του κεφαλαίου είναι η γενική κατανόηση της λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών, τόσο στις γεννήτριες όσο και στους κινητήρες, είτε αυτοί λειτουργούν με συνεχές είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Αν είναι να δώσουμε έναν ορισμό για τις ηλεκτρικές μηχανές θα ήταν :

"Ηλεκτρική μηχανή ονομάζεται κάθε διάταξη η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ή αντίστροφα ή μετατρέπει τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού ρεύματος."

Σύμφωνα με τον ορισμό, οι ηλεκτρικές μηχανές κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- **μετασχηματιστές:** παραλαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε άλλη μορφή με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μεταβάλλοντας την τάση (V) και την ένταση (I), χωρίς όμως να αλλάζουν την ισχύ ($P = V \cdot I$),
- **γεννήτριες:** μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική,
- **κινητήρες:** μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική,
- **ανορθωτές:** μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και
- **στρεφόμενοι μετατροπείς:** μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και αντίστροφα.

Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζονται αναλυτικά τα τρία πρώτα είδη ηλεκτρικών μηχανών, καθώς είναι τα πιο συνηθισμένα στην πράξη. Κάθε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας. [Γ]

3.2 Μετασχηματιστές (Μ/Σ)

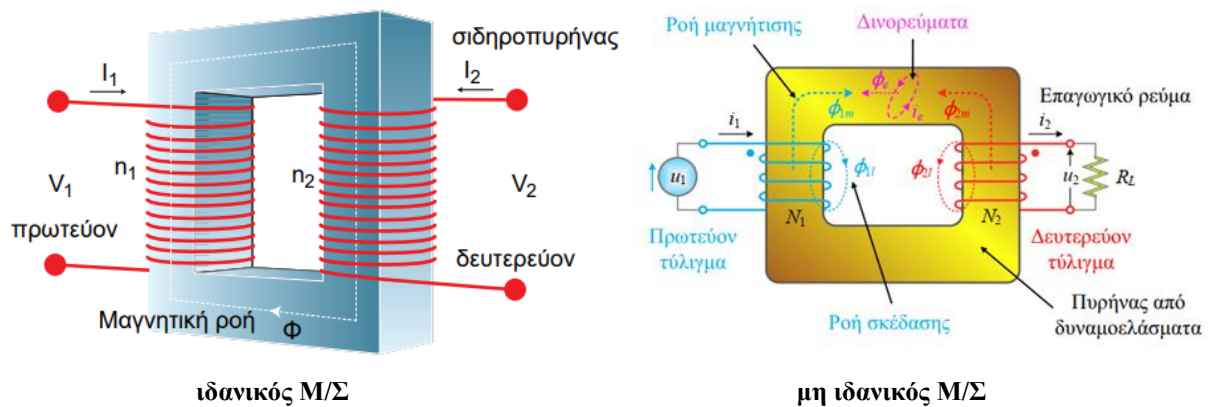
Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται για να αλλάξει τα επίπεδα της τάσης ή της έντασης του ρεύματος σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρικά δίκτυα, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε ηλεκτρονικές συσκευές.

Ένας μετασχηματιστής αποτελεί κλασσικό παράδειγμα αμοιβαίας επαγωγής. Στην πρωτεύουσα περιέλιξη, ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο, το οποίο προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής στη δευτερεύουσα περιέλιξη. Αυτό επάγει τάση στη δευτερεύουσα περιέλιξη, επιτρέποντας τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των δύο κυκλωμάτων. Αποτελείται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον, που είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους και τυλίγονται γύρω από ένα σιδερένιο πυρήνα, για να βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη.

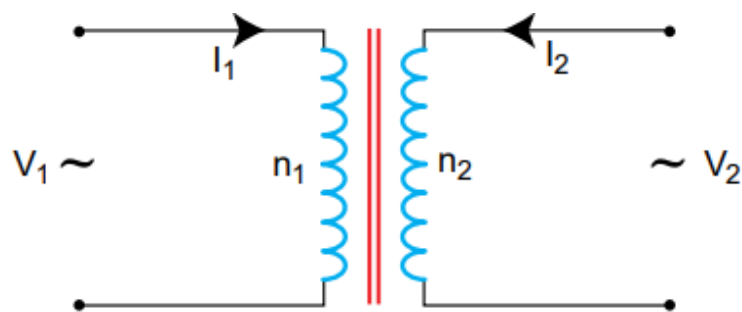
Και τα δύο πηνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρωτεύον ή δευτερεύον ανάλογα με τις ανάγκες που υπάρχουν αρκεί να μπορεί να λειτουργήσει ο Μ/Σ μ' αυτό τον τρόπο, ώστε να μην υπερβαίνουμε τα όρια των τάσεων για τις οποίες είναι κατασκευασμένα.

Τα βασικά στοιχεία, λοιπόν, Σχ.3.1, από τα οποία αποτελείται ένας μετασχηματιστής είναι:

- **ο πυρήνας (core)** : ο οποίος κατασκευάζεται από υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (π.χ. φύλλα σιδήρου), για να διευκολύνει τη μεταφορά του μαγνητικού πεδίου και να επιτευχθεί η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής,
- **το πρωτεύον πηνίο (primary)** : είναι το πηνίο όπου εφαρμόζεται η είσοδος της ηλεκτρικής ενέργειας (τάση και ρεύμα),
- **το δευτερεύον πηνίο (secondary)** : είναι το πηνίο από όπου λαμβάνεται η έξοδος της ηλεκτρικής ενέργειας και
- **το μονωτικό υλικό** : που χρησιμοποιείται για την αποφυγή βραχυκυκλώματος και την ηλεκτρική μόνωση των πηνίων μεταξύ τους.



α. τα βασικά μέρη του Μ/Σ



β. συμβολισμός του Μ/Σ

Σχήμα 3. 1: Δομή και συμβολική παράσταση μετασχηματιστή (Πηγή : [1] , [Γ])

Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή βασίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday και στην αρχή της αμοιβαίας επαγωγής, για τις οποίες έχει γίνει λεπτομερής περιγραφή στις προηγούμενες ενότητες. Εν συντομία, ο Μ/Σ λειτουργεί με την εξής ακολουθία συμβάντων: όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον πηνίο, δημιουργείται μεταβαλλόμενο μαγνητικό

πεδίο γύρω από αυτό, το οποίο διαπερνά τον πυρήνα και επάγει μαγνητική ροή στο δευτερεύον πηνίο. Η αλλαγή της μαγνητικής ροής στο δευτερεύον πηνίο δημιουργεί επαγωγική τάση στα άκρα του, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday.

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι ο μετασχηματιστής δεν λειτουργεί όταν τροφοδοτείται με συνεχή τάση ($\Delta\Phi=0$), παρά μόνο όταν του εφαρμόζουμε εναλλασσόμενη ($\Delta\Phi\neq 0$). Επίσης, η συχνότητα του επαγόμενου σήματος θα είναι ίδια μ' αυτή που το προκάλεσε. Εφόσον, λοιπόν το μαγνητικό πεδίο αλλάζει κατεύθυνση στον πρωτεύον πηνίο με συγκεκριμένη συχνότητα, δημιουργείται ένα εναλλασσόμενο επαγωγικό ρεύμα στο δευτερεύον. Αυτό το ρεύμα του δευτερεύοντος πηνίου έχει - συνήθως - μια άλλη τάση από το αρχικό, το πλάτος της οποίας φαίνεται να εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών των δύο πηνίων.

Όπως όλες οι συσκευές, έτσι και ο Μ/Σ παρουσιάζει απώλειες ενέργειας, οπότε η ισχύς εξόδου του θα είναι σίγουρα μικρότερη από την προσδιδόμενη. Αυτές οφείλονται κυρίως σε απώλειες θερμότητας στο χαλκό και λόγω δινορρευμάτων και υστέρησης. Στην περίπτωση του Μ/Σ, όμως, οι απώλειες αυτές είναι πάρα πολύ μικρές, από τη μια επειδή δεν έχει κινητά μέρη και από την άλλη γιατί το ποσοστό της ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα είναι πολύ μικρό, λόγω της πεπερασμένης αντίστασης του σύρματος των πηνίων. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα η αποδιδόμενη ισχύς να είναι περίπου ίση της προσλαμβάνουσας και ο Μ/Σ να έχει βαθμό απόδοσης που να πλησιάζει πολύ κοντά στη μονάδα.

Ως γνωστόν, ο βαθμός απόδοσης α μιας συσκευής ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου P_{out} προς την ισχύ εισόδου P_{in} . Επειδή αυτός ο λόγος στους Μ/Σ αγγίζει το 90 με 99 %, θεωρούμε τους Μ/Σ ως ιδανικούς, χωρίς απώλειες δηλ. και έτσι τους εξετάζουμε παρακάτω.

Με την παραπάνω υπόθεση, λοιπόν, για $\alpha \cong 1$, θα έχουμε :

$$\alpha = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 \Rightarrow P_{out} = P_{in} \Rightarrow U_{in} \cdot I_{in} = U_{out} \cdot I_{out} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} \Rightarrow \frac{U_{sec}}{U_{pr}} = \frac{I_{pr}}{I_{sec}} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = n \Rightarrow$$

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (3.1)$$

όπου με n συμβολίζουμε το λόγο μετασχηματισμού του Μ/Σ, ο οποίος συνδέεται άμεσα και με τον αριθμό των σπειρών των δύο πηνίων, N_1 και N_2 . Εφαρμόζοντας το Νόμο του Faraday και θεωρώντας την επαγωγική σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων τέλεια και χωρίς σκέδαση, η μαγνητική ροή που περνά από το πρωτεύον θα είναι ίση με αυτή του δευτερεύοντος, οπότε θα έχουν και ίδιες μεταβολές μαγνητικής ροής. Έτσι :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = n \quad (3.2)$$

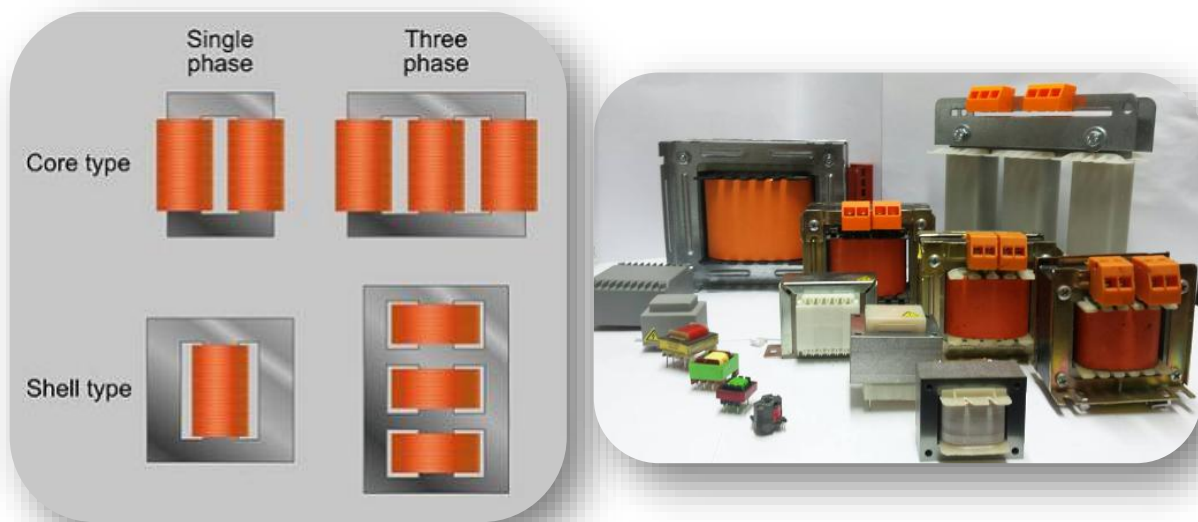
Συνδέοντας τις σχέσεις (3.1) και (3.2), καταλήγουμε στον παρακάτω λόγο, βάσει του οποίου γίνεται και ο διαχωρισμός των Μ/Σ όσον αφορά στο σήμα εξόδου του:

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.3)$$

Υπάρχουν πάρα πολλοί τύποι και παραλλαγές μετασχηματιστών σε διάφορα μεγέθη, αφού η χρήση τους βρίσκεται σχεδόν σε κάθε δραστηριότητα του ανθρώπου στην καθημερινή του ζωή. Σε πολύ γενικές γραμμές τα βασικά είδη μετασχηματιστών είναι :

- σε σχέση με το σήμα που παράγεται στη δευτερεύουσα περιέλιξή του:
 1. **ανύψωσης ή step-up:** στην περίπτωση αυτή η επαγόμενη τάση θα έχει μεγαλύτερο πλάτος από αυτή που το δημιουργεί ($V_2 > V_1$ ή $V_s > V_p$ ή $V_p < V_s$, $N_2 > N_1$, $I_2 < I_1$),
 2. **υποβιβασμού ή step-down:** εδώ η τάση στο δευτερεύον θα είναι μικρότερη της τάσης στο πρωτεύον δημιουργεί ($V_2 < V_1$ ή $V_s < V_p$ ή $V_p > V_s$, $N_2 < N_1$, $I_2 > I_1$),
 3. **απομόνωσης ή isolation ή M/Σ 1:1:** εδώ οι δύο εναλλασσόμενες τάσεις είναι ακριβώς οι ίδιες και ανήκει στην κατηγορία των ειδικών μετασχηματιστών ($V_1 = V_2$ ή $V_p = V_s$, $N_2 = N_1$, $I_2 = I_1$),
- σε σχέση με τη μορφή ή το σχήμα του πυρήνα:
 1. **τύπου πυρήνα (core form),**
 2. **τύπου μανδύα (shell form),**
- σε σχέση με το είδος του δικτύου:
 1. **μονοφασικοί:** χρησιμοποιούνται σε τριφασικά δίκτυα (π.χ. βιομηχανίες),
 2. **τριφασικοί:** χρησιμοποιούνται σε μονοφασικά δίκτυα (π.χ. οικιακές συσκευές).

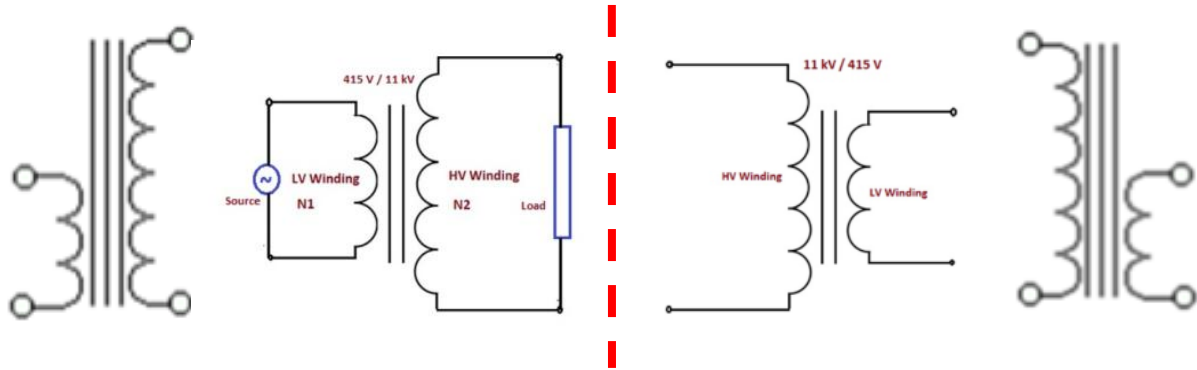
Στο παρακάτω σχήμα, Σχ.3.2 φαίνονται διάφοροι τύποι και μεγέθη μετασχηματιστών, ενώ στις επόμενες υποενότητες περιγράφονται λίγο πιο αναλυτικά οι Μ/Σ της πρώτης κατηγορίας.



Σχήμα 3. 2: Τύποι Μ/Σ σε διάφορα μεγέθη (Πηγή : [33])

3.2.1 Μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης (step up)

Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας για μεγάλες αποστάσεις, κατά τις οποίες είναι αναγκαία η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών $I^2 \cdot R$ πάνω στις γραμμές μεταφοράς. Αφού, λοιπόν, χρειαζόμαστε πολύ μικρό ρεύμα και σύμφωνα με την εξίσωση (3.3), η τάση στο δευτερεύον πρέπει να είναι πολλαπλάσιο της τάσης που εφαρμόζεται στο πρωτεύον. Αυτό πετυχαίνεται με την κατασκευή δευτερεύοντος που θα έχει πολλαπλάσιο αριθμό σπειρών σε σχέση με αυτές του πρωτεύοντος. Το σύμβολο του Μ/Σ αυτού φαίνεται στο Σχ.3.3.α, υπονοώντας ότι υπάρχει ανύψωση τάσεως αφού οι σπείρες του δευτερεύοντος είναι περισσότερες από αυτές του πρωτεύοντος, χωρίς αυτό να σημαίνει φυσικά ότι ισχύει για κάθε σύμβολο μετασχηματιστή.

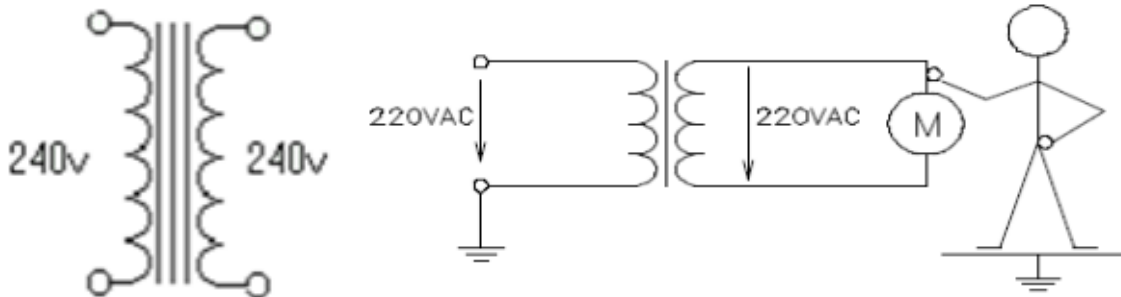


step-up

α. ανύψωσης τάσης

step-down

β. υποβιβασμού τάσης



isolation

γ. απομόνωσης

Σχήμα 3. 3: Συμβολισμοί Μ/Σ ως προς την τάση V του επαγόμενου σήματος (Πηγή : [34])

3.2.2 Μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης (step down)

Η υπερυψηλή τάση που μεταφέρεται από της γραμμές μεταφοράς είναι πολύ επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Σαν καταναλωτές, επομένως, είναι απαραίτητο να διαχειρίζονται την ισχύ σε χαμηλή τάση κυρίως για λόγους ασφαλείας, αλλά και για μεγαλύτερη απόδοση λειτουργίας των συσκευών που χρησιμοποιούν. Έτσι, στο τύπο αυτό η τάση στο δευτερεύον είναι υποπολλαπλάσια της τάσης στο πρωτεύον, αυξάνοντας απ' την άλλη την τιμή του επαγόμενου ρεύματος, οπότε και ο αριθμός των σπειρών στο δευτερεύον θα είναι μικρότερος των αντίστοιχων του πρωτεύοντος. Το σύμβολό του φαίνεται στο Σχ.3.3.β., παρομοίως με αυτό του ανύψωσης τάσης.

3.2.3 Μετασχηματιστής απομόνωσης

Ο μετασχηματιστής της δεν επιφέρει καμία αλλαγή στις τιμές της τάσης και του ρεύματος στο δευτερεύον πηνίο. Ο λόγος μετασχηματισμού του ισούται με 1, τα δύο πηνία, πρωτεύον και δευτερεύον έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών, $N_1 = N_2$, οπότε αν τροφοδοτήσουμε το πρωτεύον με ενεργό τιμή τάσης 220 – 240 V θα πάρουμε την ίδια τάση στο δευτερεύον. Πλέον, η τιμή της ενεργούς τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι στα 230 V. Αφού ο Μ/Σ απομόνωσης δε μεταβάλλει κανένα χαρακτηριστικό των σημάτων που επάγονται στο δευτερεύον, ο μοναδικός λόγος που χρησιμοποιείται είναι, όπως το φανερώνει άλλωστε και η ονομασία του, απλά μεν, ουσιαστικά δε, να απομονώσει το κύκλωμα εισόδου του - πρωτεύον - από το κύκλωμα εξόδου του - δευτερεύον -. Αυτό επιτυγχάνεται με το να μην υπάρχει καμία σύνδεση του δευτερεύοντος ως προς τη γη - ανοιχτό κύκλωμα - και έτσι να υπάρχει ηλεκτρικός διαχωρισμός ανάμεσα στα δύο μέρη του Μ/Σ. Με τον τρόπο αυτό αν κάποιος ακουμπήσει κατά λάθος την τάση του δευτερεύοντος ως προς τη γη δεν θα κινδυνεύσει, αφού δεν υπάρχει κλειστό κύκλωμα για να περάσει το ρεύμα. Από κει πήρε και το όνομα Μ/Σ απομόνωσης ή προστασίας, Σχ.3.3.γ. [1], [33], [34], [B], [Γ], [E]

3.2.4 Ισχύς Μ/Σ

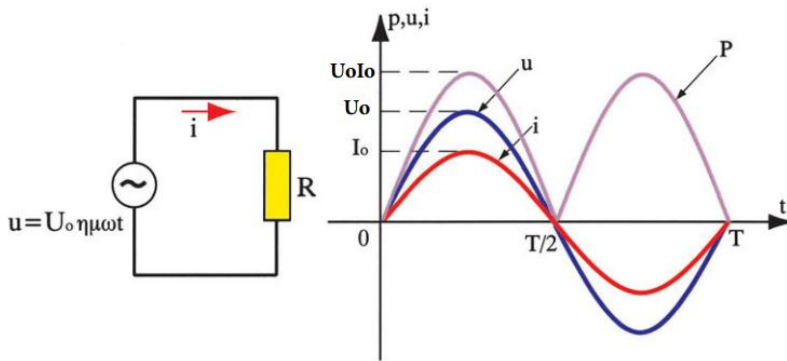
Η ισχύς που εμφανίζεται στο δευτερεύον τύλιγμα ενός Μ/Σ στην ουσία δεν είναι το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα του κυκλώματος, που εφαρμόζεται κυρίως στο συνεχές δηλ. το $P = V \cdot I$. Η σχέση αυτή είναι πολύ γενική, εφαρμόζεται σε κάθε κύκλωμα ή μέρος αυτού και στο εναλλασσόμενο αποτελεί τη λεγόμενη φαινόμενη ισχύ, με την έννοια ότι είναι η θεωρητική τιμή, αυτή που φαίνεται να έχει ένα κύκλωμα ή μια συσκευή. Με άλλα λόγια, η φαινόμενη ισχύς δείχνει το τι φαίνεται να καταναλώνει το κύκλωμα, αλλά δεν αντιστοιχεί πλήρως στην ωφέλιμη κατανάλωση.

Στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος – αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στα κυκλώματα συνεχούς – το ρεύμα και η τάση είναι ημιτονικές συναρτήσεις, με αποτέλεσμα η τιμή και η φορά τους να μεταβάλλεται περιοδικά σε κάθε χρονική στιγμή. Επομένως, και η ισχύς θα μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου, ως το γινόμενο στιγμιαίας τάσης και ρεύματος. Στο παρακάτω σχήμα, Σχ.3.4, φαίνεται η χρονική αυτή μεταβολή των ηλεκτρικών μεγεθών, στην περίπτωση που έχουμε καθαρά ωμική, επαγωγική και χωρητική αντίσταση, Σχ.3.4.α, καθώς και στην περίπτωση σύνθετης – μικτής - αντίστασης, Σχ.3.4.β.

Όταν έχουμε να κάνουμε με το εναλλασσόμενο ρεύμα της ενδιαφέρει η ενεργός τιμή της ισχύος ή αλλιώς η πραγματική ή η ωφέλιμη ισχύς. Αυτή είναι πάντα μικρότερη της φαινόμενης κατά έναν συντελεστή, που δεν είναι της από το συνημίτονο της γωνίας φ που σχηματίζεται μεταξύ των δύο μεγεθών τάσης και έντασης ρεύματος. Μιας και πλέον, δεν έχουμε καθαρά ωμική αντίσταση της Μ/Σ, αλλά σύνθετη, λόγω των πηνίων βασικότερα, προκαλείται μια διαφορά φάσης μεταξύ των ηλεκτρικών της μεγεθών, τα οποία σχεδιάζονται με διανυσματικές ευθείας σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων x-y.

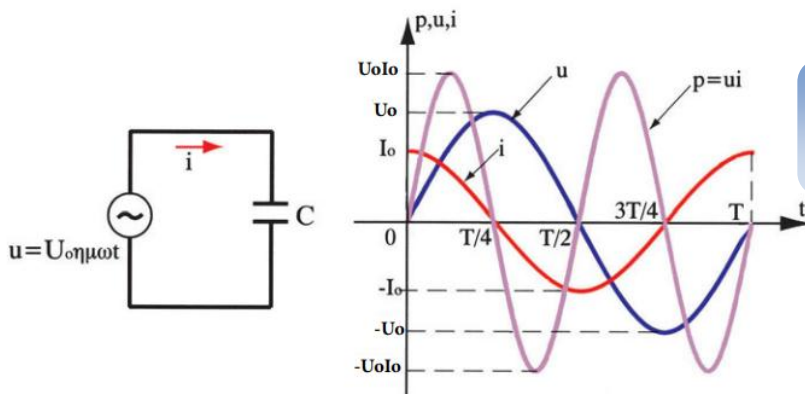
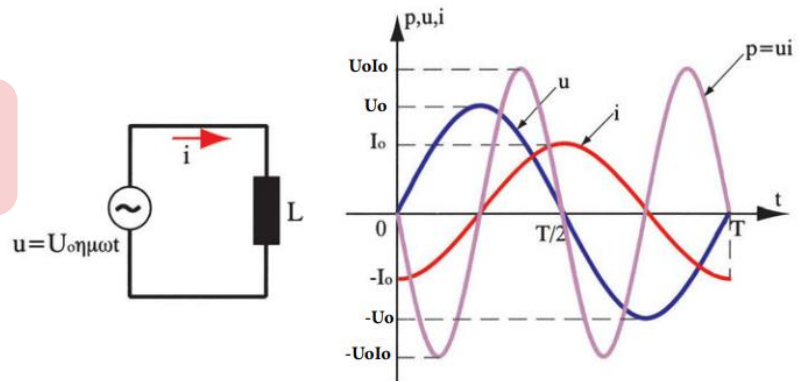
Έτσι, η πραγματική ισχύς στο εναλλασσόμενο διαφέρει από αυτή του συνεχούς κατά τον παράγοντα $\cos \varphi$, ο οποίος ονομάζεται συντελεστής ισχύος και παίρνει φυσικά τιμές από 0 έως 1 (καθαρός αριθμός). Όσο μικραίνει το $\cos \varphi$ τόσο μικραίνει και η πραγματική ισχύς, για δεδομένες τιμές τάσης και ρεύματος, ενώ για δεδομένη τάση και πραγματική ισχύ, το ρεύμα του κυκλώματος αυξάνεται όσο μειώνεται ο συντελεστής της.

Η διανυσματική διαφορά των δύο παραπάνω μεγεθών ισχύος, δίνουν την λεγόμενη άεργο ισχύ, η οποία, της προδίδει και το όνομά της, δεν παράγει κανένα ωφέλιμο έργο.



ωμική αντίσταση
R

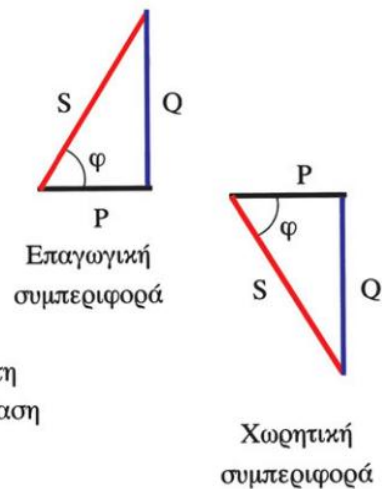
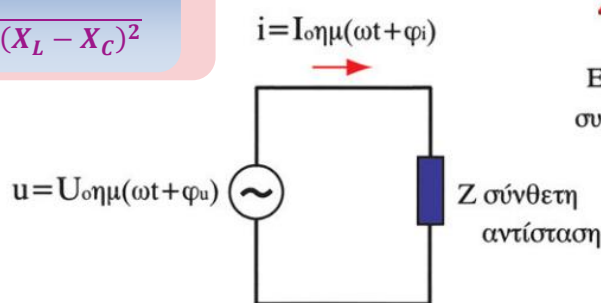
επαγωγική αντίσταση
 $X_L = \omega \cdot L$



χωρητική αντίσταση
 $X_C = 1/(\omega \cdot C)$

α. σε κύκλωμα με καθαρά ωμική, επαγωγική και χωρητική αντίσταση

σύνθετη αντίσταση
 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$



β. σε κύκλωμα με σύνθετη αντίσταση Z - τρίγωνο ισχύος

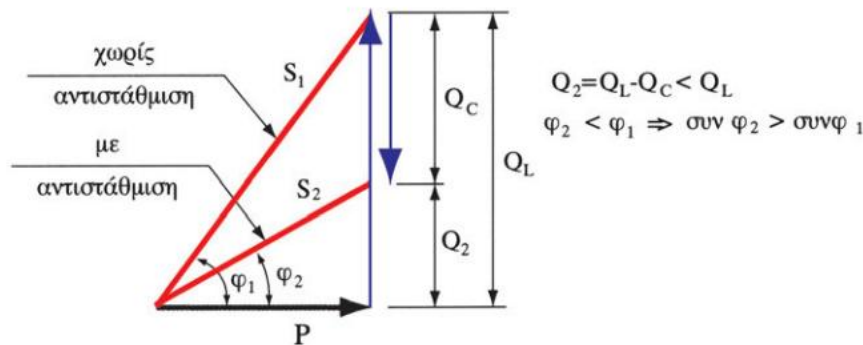
Σχήμα 3. 4: Στιγμιαία ισχύς και τρίγωνο ισχύος (Πηγή : [Δ1])

Για να διαχωρίζονται και να διακρίνονται ξεκάθαρα τα τρία διαφορετικά είδη ισχύος, έχουν δοθεί σε κάθε μία από αυτές και διαφορετικές μονάδες μέτρησης, Αν είναι να της δοθεί κάποιος ορισμός, θα μπορούσαν να είναι οι παρακάτω :

- **Πραγματική ή ωφέλιμη ισχύς P :** είναι η χρήσιμη ισχύς, η ισχύς που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο μέσα στο κύκλωμα, που καταναλώνεται στο ωμικό του μέρος. Εξαρτάται από τις συνθήκες του δικτύου και το είδος του καταναλωτή, που στην ουσία ορίζουν την τιμή του συντελεστή ισχύος, ο οποίος δείχνει το ποσοστό της φαινόμενης ισχύος που θα μετατραπεί σε ωφέλιμη. Δίνεται από τη σχέση $P = P_{\varphi} \cdot \text{συν}\varphi$ ή $P = V_{\text{εV}} \cdot I_{\text{εV}} \cdot \text{συν}\varphi$ και μετριέται σε **Watt**.
- **Άεργος ισχύς P_α ή Q:** είναι η μη ωφέλιμη ισχύς, αυτή που δεν παράγει κάποιο έργο, είναι, όμως, απαραίτητη για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών με επαγωγικά ή χωρητικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές και οι κινητήρες. Παρουσιάζεται στο επαγωγικό ή στο χωρητικό μέρος της σύνθετης αντίστασης. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια ισχύς που ταλαντεύεται μεταξύ του δικτύου και της εγκατάστασης ή απλά ως ο αφρός σε ένα ποτήρι μπίρας ή καφέ, Σχ.3.5.α. Η ισχύς αυτή επηρεάζει τη συνολική απόδοση του συστήματος και απαιτείται αντιστάθμιση. π.χ. με πυκνωτές, για την αύξηση του συντελεστή ισχύος και τη μείωση της ενεργειακής σπατάλης, Σχ.3.5.β. Δίνεται από τη σχέση $P_{\alpha} = P_{\varphi} \cdot \eta\mu\varphi$ ή $P_{\alpha} = V_{\text{εV}} \cdot I_{\text{εV}} \cdot \eta\mu\varphi$ και μετριέται σε Volt-Ampere reactive (**VAr**).
- **Φαινόμενη ισχύς P_φ ή S :** είναι η συνολική ισχύς που παρέχει μια πηγή στο ηλεκτρικό κύκλωμα και αντιστοιχεί στην περίπτωση που τα μεγέθη τάση – ρεύμα είναι συμφασικά, οπότε $\varphi=0^{\circ}$ και επομένως $\text{συν}\varphi = 1$. Εναλλακτικά, αποτελεί τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να καταναλωθεί, για συγκεκριμένες τιμές τάσης και ρεύματος. Διανυσματικά, βρίσκεται με το άθροισμα της πραγματικής και της άεργης ισχύος, ενώ το μέτρο της δίνεται από τον γνωστό τύπο της ισχύος $P_{\varphi} = V_{\text{εV}} \cdot I_{\text{εV}}$. Συνήθως είναι η τιμή που αποτελεί ένα από τα ονομαστικά μεγέθη μιας συσκευής, με μονάδα μέτρησης το Volt-Ampere (**VA**).



α. παρομοίωση τριγώνου ισχύος κυκλώματος σύνθετης αντίστασης με ποτήρι μπίρας ή καφέ



β. τρίγωνο ισχύος χωρίς και με αντιστάθμιση

Σχήμα 3. 5: Παραβολική απεικόνιση τριγώνου ισχύος και αντιστάθμισή του (Πηγή : [4])

Τα τρία παραπάνω μεγέθη σχηματίζουν ένα ορθογώνιο τρίγωνο, το λεγόμενο τρίγωνο ισχύος. Σχ.3.4.β. Κάθε πλευρά του αντιστοιχεί και σε μία ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς είναι η υποτεινούσα του τριγώνου, η πραγματική είναι στον οριζόντιο άξονα του συστήματος αξόνων και είναι πάντα θετική, ενώ η άεργος είναι η κάθετη στην πραγματική και μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Έτσι, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις :

- αν $Q > 0$, το κύκλωμα παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά Q_L και η τάση προηγείται του ρεύματος κατά γωνία φ . Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής ισχύος του κυκλώματος λέγεται επαγωγικός ή μεταπορείας,
- αν $Q < 0$, το κύκλωμα παρουσιάζει χωρητική συμπεριφορά Q_C και η τάση έπεται του ρεύματος κατά γωνία φ Ο συντελεστής ισχύος τώρα ονομάζεται χωρητικός ή προπορείας.

Για το τρίγωνο ισχύος και εφαρμόζοντας το Πυθαγόρειο θεώρημα, προκύπτει ότι $P_{\varphi}^2 = P^2 + P_a^2$ ή $S^2 = P^2 + Q^2$, ενώ για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης του συστήματος εφαρμόζουμε τον τύπο $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Η πραγματική ισχύς που ο Μ/Σ απορροφά απ' το δίκτυο και που δίνει στο δευτερεύον του, όταν τροφοδοτεί κατανάλωση με ενεργό τάση U, ενεργό ένταση I και συντελεστή ισχύος συνφ, είναι διαφορετική, αν αυτός είναι μονοφασικός (1~Μ/Σ) ή τριφασικός (3~Μ/Σ). Οι τιμές των τριών αυτών ειδών ισχύος, για 1~ και 3~Μ/Σ, δίνονται από τον υπολογισμό των σχέσεων του παρακάτω πίνακα. [1], [33], [34], [B], [Γ], [E]

Πίνακας 3.1 : Σχέσεις υπολογισμού ισχύος 1~ και 3~ Μ/Σ (Πηγή : [E])

	Για 1~ Μ/Σ	Για 3~ Μ/Σ	Για 1~ και 3~ Μ/Σ
Φαινόμενη ισχύς (VA)	$P_s = U \cdot I$	$P_s = 1,73 \cdot U \cdot I$	$P_s = \sqrt{P^2 + P_b^2}$ $P_s = \frac{P}{\text{συν}\varphi}$
Πραγματική ισχύς (W)	$P = U \cdot I \cdot \text{συν}\varphi$	$P = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \text{συν}\varphi$	$P = \sqrt{P_s^2 - P_b^2}$ $P = P_s \cdot \text{συν}\varphi$
Άεργη ισχύς (VAr)	$P_b = U \cdot I \cdot \eta\mu\varphi$	$P_b = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \eta\mu\varphi$	$P_b = \sqrt{P_s^2 - P^2}$ $P_b = P_s \cdot \eta\mu\varphi$

3.3 Ηλεκτρογεννήτριες

Οι έννοιες της μαγνητικής ροής και της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αποτελούν τη βάση της αρχής λειτουργίας των γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές.

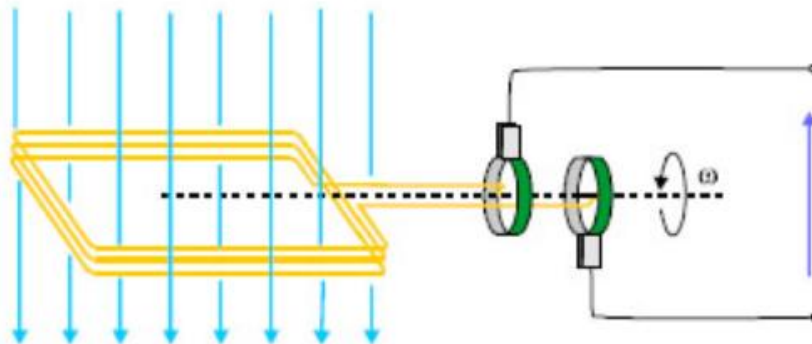
Ανάλογα, τώρα, με το είδος της τάσης – ρεύματος που παράγουν οι γεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **γεννήτριες D.C.** (Direct Current : συνεχούς τάσης – ρεύματος), οι οποίες παράγουν συνεχής τάση – συνεχές ρεύμα και
- **γεννήτριες A.C.** (Alternating Current : εναλλασσόμενης τάσης - ρεύματος), που παράγουν εναλλασσόμενη τάση - ρεύμα.

Θεωρώντας γνωστές τις βασικές έννοιες και τα χαρακτηριστικά της εναλλασσόμενης τάσης και του ρεύματος που προκαλεί, παρακάτω θα γίνει ανάλυση του τρόπου παραγωγής της και μια συνοπτική - επαναληπτική - περιγραφή της.

3.3.1 Στρεφόμενο πλαίσιο – Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα ορθογώνιο πλαίσιο εμβαδού S που διαρρέεται από ρεύμα και το οποίο περιστρέφεται σταθερά με γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από έναν άξονα μέσα σε ένα ομογενές (σταθερό και ομοιόμορφο) μαγνητικό πεδίο. Ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το πλαίσιο και είναι κάθετος της γραμμής του μαγνητικού πεδίου, Σχ.3.6.



Σχήμα 3. 6: Περιστροφική κίνηση πλαισίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω (Πηγή : [26])

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις, την αρχική του θέση, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα και στη συνέχεια την συνεχή και περιοδική του περιστροφή με γωνιακή ταχύτητα ω :

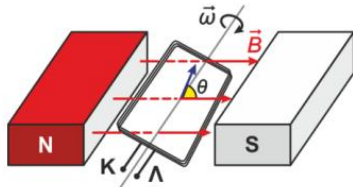
- **αρχική θέση** (χρονική στιγμή $t=0$) : στη θέση αυτή το πλαίσιο είναι τοποθετημένο κάθετα της δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, οπότε και οι γραμμές αυτές το διαπερνούν κάθετα, σχηματίζοντας – μεταξύ του διανύσματος της έντασης B και της κάθετης στην επιφάνεια S με αυτό – γωνία 0° . παρέχοντας τη μέγιστη μαγνητική ροή $\Phi = B \cdot S \cdot \sin 0^\circ = B \cdot S$,

- **περιστροφική κίνηση** : κατά την περιστροφική του κίνηση, η γωνία που σχηματίζει το πλαίσιο με τη μαγνητική επαγωγή B του πεδίου αλλάζει διαρκώς και επαναλαμβανόμενα. Έτσι, για κάποια χρονική στιγμή t , η γωνία του πλαισίου είναι $\theta = \omega \cdot t$ και η μαγνητική του ροή $\Phi = B \cdot S \cdot \sin \omega t$, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο, αφού αλλάζει και η γωνία θ . Κατά συνέπεια, αυτή η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί την εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής

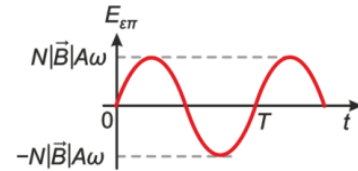
δύναμης - ηλεκτρικής τάσης εξ επαγωγής - στο πλαίσιο, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday. Παραγωγίζοντας τη σχέση της μαγνητικής ροής ως της το χρόνο, βρίσκουμε την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη :

$$E_{EΠ} = \frac{d\Phi}{dt} = \omega BS\eta\mu\omega t$$

Στην περίπτωση που το πλαίσιο έχει N σπείρες, ο τύπος αυτός, κατά τα γνωστά, γίνεται :



$$E_{EΠ} = N \frac{d\Phi}{dt} = N\omega BS\eta\mu\omega t$$

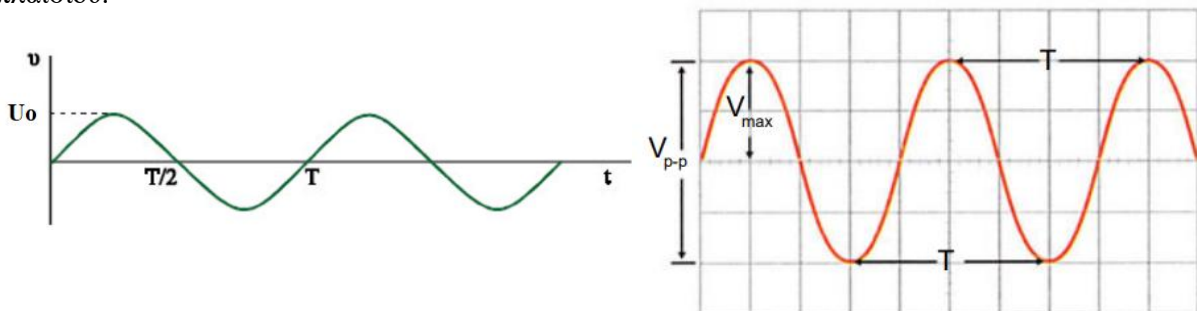


Με άλλα λόγια, η ηλεκτρεγερτική δύναμη γίνεται πλέον περιοδική και εξαρτάται από τη συχνότητα περιστροφής και της ιδιότητες του πλαισίου και του μαγνητικού πεδίου.

Θέτοντας, στη συνέχεια $U_0 = N\omega BS$ και $E_{EΠ} = U$, προκύπτει η γνωστή μορφή της τάσης :

$$U = U_0 \eta \mu \omega t \quad (3.4)$$

η οποία είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου και ονομάζεται εναλλασσόμενη τάση (ac), αφού η πολικότητά της εναλλάσσεται - μεταβάλλεται περιοδικά - στο χρόνο T μιας περιστροφής του πλαισίου.



Με άλλα λόγια, η ηλεκτρεγερτική δύναμη γίνεται πλέον περιοδική και εξαρτάται από τη συχνότητα περιστροφής και της ιδιότητες του πλαισίου και του μαγνητικού πεδίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της εναλλασσόμενης τάσης - σχέση (3.4) - περιγράφονται ως εξής :

- **το πλάτος U_0 ή V_{max} ή V_p** : είναι η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να πάρει η τάση, η κορυφή (peak) της κυματομορφής και μετριέται σε Volt,
- **η στιγμιαία φάση ωt** : το γινόμενο ωt είναι γωνία, μετριέται σε rad και αποτελεί τη φάση της τάσης για τον χρόνο t. Το ω ονομάζεται γωνιακή συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, είναι ίσο με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου που παρήγαγε την τάση και μετριέται σε rad/sec, ενώ το t είναι ο στιγμιαίος κάθε φορά χρόνος περιστροφής και μετριέται σε sec,
- **η περίοδος T** : είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο η τάση κάνει μια πλήρη εναλλαγή τιμών, έναν κύκλο, δηλ., μετριέται σε sec και συνδέεται με τη γωνιακή συχνότητα ω με τη σχέση $\omega = 2\pi/T$,
- **η συχνότητα f** : είναι η τιμή που μας δείχνει τον αριθμό των κύκλων που κάνει το σήμα σε χρόνο ενός δευτερολέπτου. Η συχνότητα f του εναλλασσόμενου σήματος υπολογίζεται έμμεσα από την περίοδο T, μέσω της σχέσης $f = 1/T$, μετριέται σε Hertz (Hz) ή sec^{-1} και συνδέεται με τη γωνιακή συχνότητα με τη σχέση $\omega = 2\pi f$.

Η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με εναλλασσόμενη τάση. Στην Ελλάδα, το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης, στην κατανάλωση, είναι $U_0 = 230\sqrt{2}$ Volt και η

συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$. Για την απεικόνιση και τον υπολογισμό των βασικών της χαρακτηριστικών, χρησιμοποιείται κυρίως ως όργανο μέτρησης ο παλμογράφος. [26], [Γ], [Δ], [Ε]

3.3.2 Κατασκευή και λειτουργία γεννήτριας

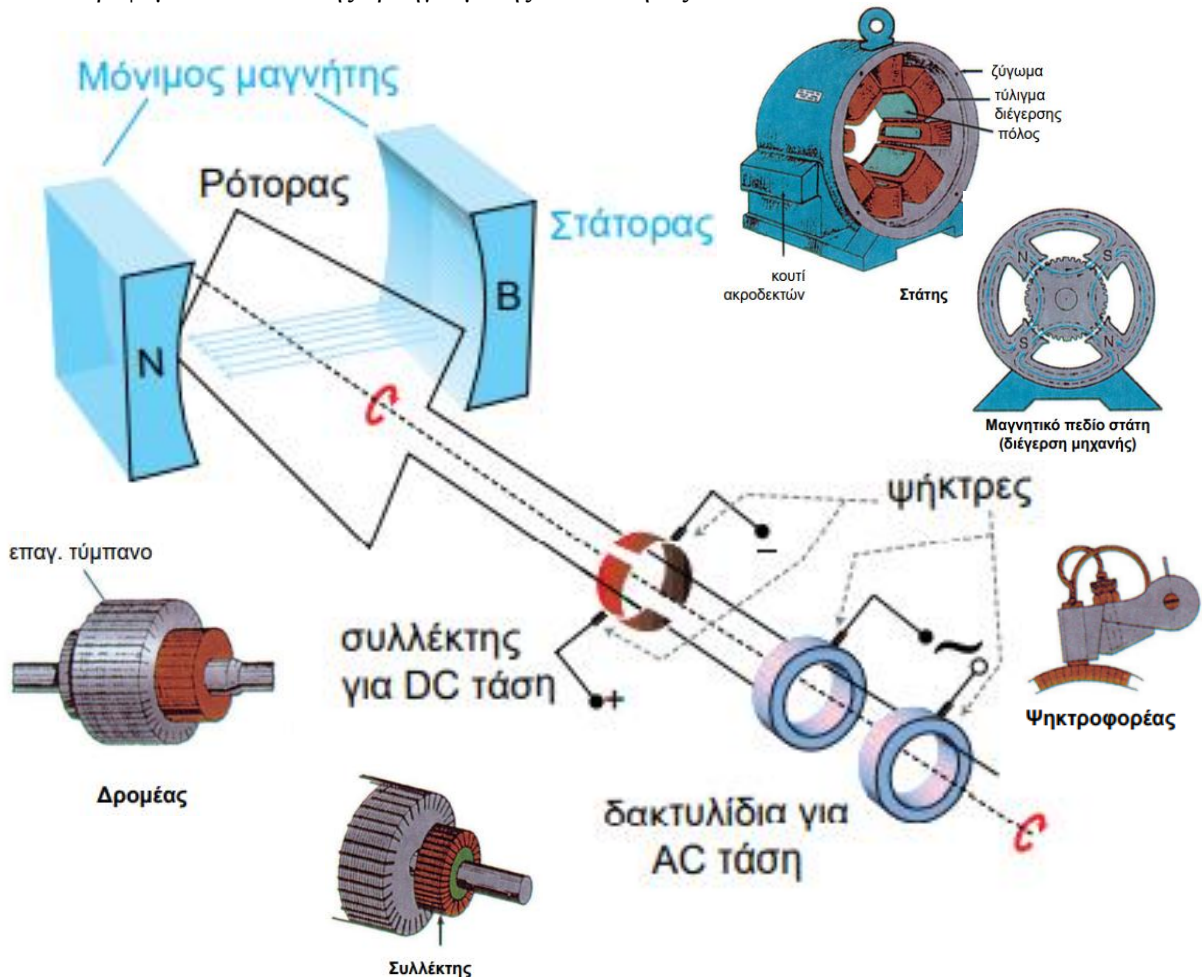
Η προηγούμενη διάταξη αποτελεί τη βάση της αρχής λειτουργίας κάθε γεννήτριας. Όλες οι γεννήτριες, ανεξάρτητα από τον τύπο τους, έχουν δύο βασικά μέρη:

- τον **στάτορα ή στάτη** - σταθερό μέρος

Είναι το ακίνητο μέρος της γεννήτριας. Σκοπός του είναι να δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που χρειάζεται για τη λειτουργία της γεννήτριας και, για το λόγο αυτό, αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες, συνήθως στις μεγάλες μηχανές.

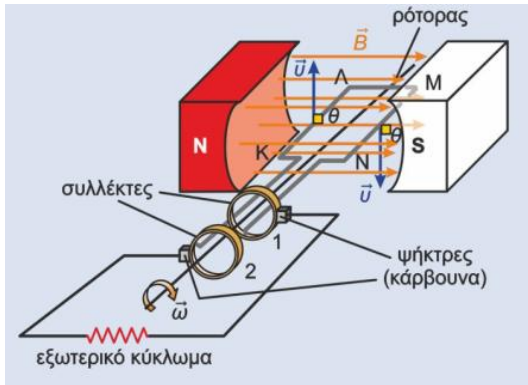
- τον **ρότορα ή δρομέα** - κινητό μέρος

Είναι το μέρος της γεννήτριας που περιστρέφεται. Έχει τυλίγματα από αγωγικό υλικό (π.χ. χαλκό), και, καθώς περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη, αναπτύσσει τάση στις άκρες των τυλιγμάτων αυτών, ως αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, όπως ακριβώς και το στρεφόμενο πλαίσιο της προηγούμενης υποενότητας.



Σχήμα 3. 7: Βασικά μέρη γεννήτριας - Δομικό διάγραμμα (Πηγή : [Γ], [Ε])

Με άλλα λόγια, ο στάτης δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο, ο δρομέας περιστρέφεται μέσα σε αυτό το πεδίο και με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής παράγεται εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση, ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου. Αυτός ο απλός τρόπος αποτελεί το βασικό μηχανισμό λειτουργίας κάθε γεννήτριας, ανεξαρτήτως τύπου. Το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα θα έχουμε αν διατηρήσουμε το πλαίσιο σταθερό και περιστρέφουμε το μαγνήτη που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο.



Ονοματίζοντας το πλαίσιο ως ΚΛΜΝ του Σχ.3.7 (αριστερά), ας δούμε λίγο πιο αναλυτικά το τι συμβαίνει στο πλαίσιο : Στα τμήματα ΚΛ και ΜΝ του περιστρεφόμενου πλαισίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο, ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις που κάνουν τα ηλεκτρικά φορτία να διαχωρίζονται. Αρχικά, το τμήμα ΚΛ κινείται προς τα πάνω και το ΛΜ προς τα κάτω.

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού για το τμήμα ΚΛ, βλέπουμε ότι στο σημείο Κ συγκεντρώνονται τα αρνητικά φορτία και στο Λ τα θετικά, δημιουργώντας, έτσι, μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων Κ και Λ. Το ίδιο συμβαίνει και στο τμήμα ΜΝ, με το σημείο Μ να συγκεντρώνει τα αρνητικά φορτία και το Ν τα θετικά. Τέλος, υπάρχει μια μικρή διαφορά δυναμικού στα τμήματα ΛΜ και ΚΝ (λόγω του πάχους του αγωγού), αλλά επειδή είναι πολύ μικρή, θεωρείται αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη. Στους συλλέκτες, τώρα, λόγω του διαχωρισμού των φορτίων στα άκρα του πλαισίου, ο συλλέκτης 1 φορτίζεται θετικά και ο συλλέκτης 2 αρνητικά.

Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν κατά τη μισή περιστροφή του πλαισίου. Μετά, όταν το πλαίσιο ολοκληρώσει τον μισό κύκλο, το τμήμα ΚΛ αρχίζει να κινείται προς τα κάτω και το ΜΝ προς τα πάνω. Αυτό, έχει ως επακόλουθο, να αντιστραφεί και η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης και μαζί της να αντιστραφεί και ο διαχωρισμός των φορτίων στα άκρα του πλαισίου. Έτσι, τώρα, ο συλλέκτης 1 γίνεται αρνητικός και ο 2 θετικός. Από κει και πέρα, η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται, όποτε στο εξωτερικό κύκλωμα, που συνδέεται με τους συλλέκτες μέσω των ψηκτρών, ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα, που αλλάζει φορά κάθε μισή περίοδο, λόγω της αλλαγής της πολικότητας στους συλλέκτες.

Η σχέση που δίνει την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) στην έξοδο της γεννήτριας σε Volt είναι :

$$E = B \cdot l \cdot u \cdot \sin \alpha \tag{3.5}$$

όπου :

- **E** : η παραγόμενη τάση στην έξοδο της γεννήτριας (Volt, V),
- **B** : η ένταση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου ή μαγνητική επαγωγή (Tesla, T),
- **l** : το ενεργό μήκος του αγωγού, το μήκος του τμήματος που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και υπό την επίδραση αυτού (m),,
- **u** : η ταχύτητα μεταβολής της κίνησης του αγωγού ίση με $v=2\pi \cdot r \cdot n$ (m/s),
- **n** : ο αριθμός των στροφών του πλαισίου ανά δευτερόλεπτο (στρ/s)
- **α** : η γωνία μεταξύ της κάθε κατεύθυνσης της κίνησης του πλαισίου και του μαγνητικού πεδίου (μοίρες ή ακτίνια).

Η παραγωγή της εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης γίνεται με κάπως διαφορετικό τρόπο, όπως είναι λογικό και φαίνεται και στο Σχ.3.7, οπότε και αναλύονται ξεχωριστά.

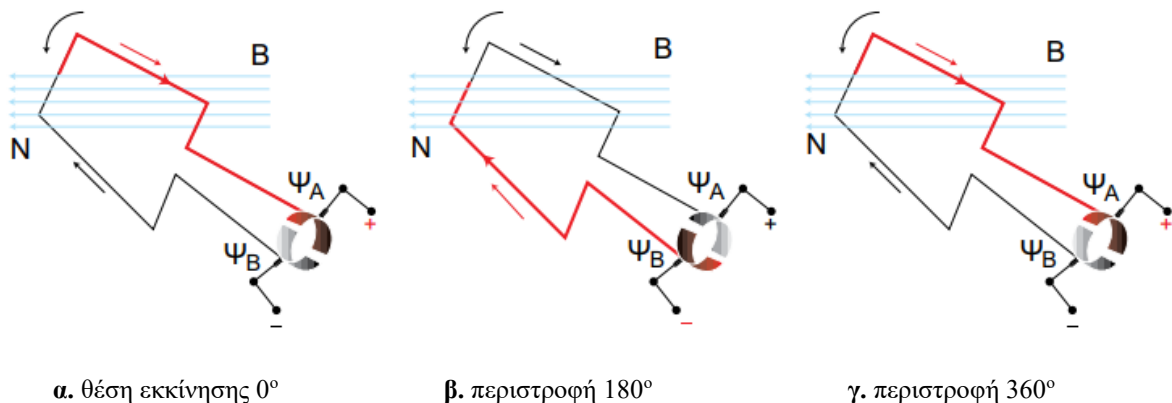
3.3.3 Παραγωγή συνεχούς τάσης (DC) - Γεννήτριες DC

Παρατηρώντας το σχήμα αυτό, βλέπουμε τη λέξη συλλέκτης για DC τάση, οπότε, για να μετατρέψουμε την εναλλασσόμενη τάση (AC) που παράγεται από τη γεννήτρια σε συνεχή τάση (DC) χρησιμοποιούμε έναν συλλέκτη. Αυτός ουσιαστικά είναι ένας μηχανικός ανορθωτής, όπως μια γέφυρα διόδων που μετατρέπει το σήμα από AC σε DC.

Αποτελείται από τους τομείς και τις ψήκτρες. Οι τομείς είναι αγωγικές επιφάνειες - κατά βάση λεπτά χάλκινα ελάσματα - τοποθετημένοι κυκλικά και μονωμένοι μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχει βραχυκύκλωμα. Πάνω από αυτούς είναι τοποθετημένες σταθερά - ακίνητες - οι ψήκτρες, σε τέτοια απόσταση ώστε να μπορούν να εφάπτονται στους τομείς του συλλέκτη, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται. Είναι και αυτές φτιαγμένες από αγωγικό υλικό, π.χ. χάλκινο ή γραφίτη. Ο ρόλος τους είναι να μεταφέρουν το ρεύμα από τον συλλέκτη στο εξωτερικό κύκλωμα χωρίς να εμποδίζουν την κίνηση του δρομέα, γι' αυτό και είναι ακίνητες. Στο Σχ.3.8 αναπαριστάται η παραγωγή της συνεχούς τάσης από το συλλέκτη.

Το παραπάνω σύστημα λειτουργεί ως εξής : καθώς ο δρομέας περιστρέφεται, οι τομείς του συλλέκτη αλλάζουν περιοδικά τη σύνδεσή τους με τις ψήκτρες, με αποτέλεσμα η κάθε ψήκτρα να διαρρέεται από ρεύμα με τη ίδια φορά. Όπως φαίνεται και στο Σχ.3.8, η ψήκτρα Α έχει πάντα θετική πολικότητα και η ψήκτρα Β πάντα αρνητική.

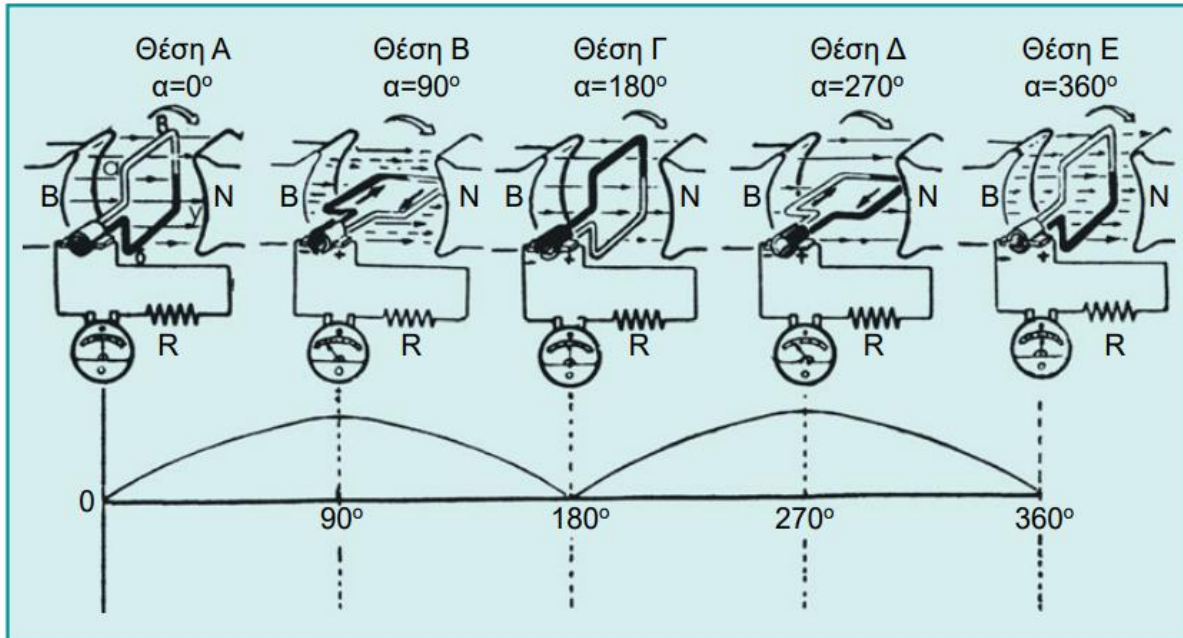
Αυτός ο συνδυασμός περιστροφής και αλλαγής συνδέσεων αντιστρέφει τη ροή του ρεύματος στις σπείρες, με τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα που βγαίνει από τις ψήκτρες να είναι πάντα συνεχές (DC). Ο συλλέκτης, επομένως, ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση που παράγεται από τις σπείρες του δρομέα και τροφοδοτεί πλέον το εξωτερικό κύκλωμα με συνεχή τάση. Με άλλα λόγια, ο συλλέκτης λειτουργεί σαν αυτόματος διακόπτης που αλλάζει τις συνδέσεις ανάμεσα στους τομείς και τις ψήκτρες τόσο γρήγορα ώστε η τάση που παίρνουμε από τη γεννήτρια να φαίνεται πάντα συνεχής (DC), ίδιας πολικότητας.



Σχήμα 3. 8: Διαδικασία παραγωγής συνεχούς τάσης με τη χρήση συλλέκτη (Πηγή : [Γ])

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή για τους στάτες, σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως στις μεγάλες γεννήτριες, το αναγκαίο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από ηλεκτρομαγνήτες. Αυτοί, έχουν το δικό τους τύλιγμα (σπείρες) από αγωγικό υλικό, από το οποίο χρειάζεται να περάσει ρεύμα, ώστε να αποκτήσει μαγνητικές ιδιότητες και να παράγει το επιθυμητό μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα αυτό δεν παρέχεται απευθείας από την ίδια τη γεννήτρια, αλλά δημιουργείται από μια μικρότερη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες, που ονομάζεται διεγέρτρια. Η διεγέρτρια είναι αυτή που τροφοδοτεί τους ηλεκτρομαγνήτες με το απαραίτητο ρεύμα.

Το σήμα που βγάζει η γεννήτρια DC, έχει τελικά τη μορφή του παρακάτω σχήματος, Σχ.3.9. για μια πλήρη περιστροφή. Φαίνονται αναλυτικά τα στάδια από τα οποία περνάει η επαγόμενη τάση σε σχέση με την περιστροφική και περιοδική κίνηση του πλαισίου μέσα στο σταθερό μαγνητικό πεδίο. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η ανόρθωση του εναλλασσόμενου σήματος και η μετατροπή του σε συνεχές από το συλλέκτη.

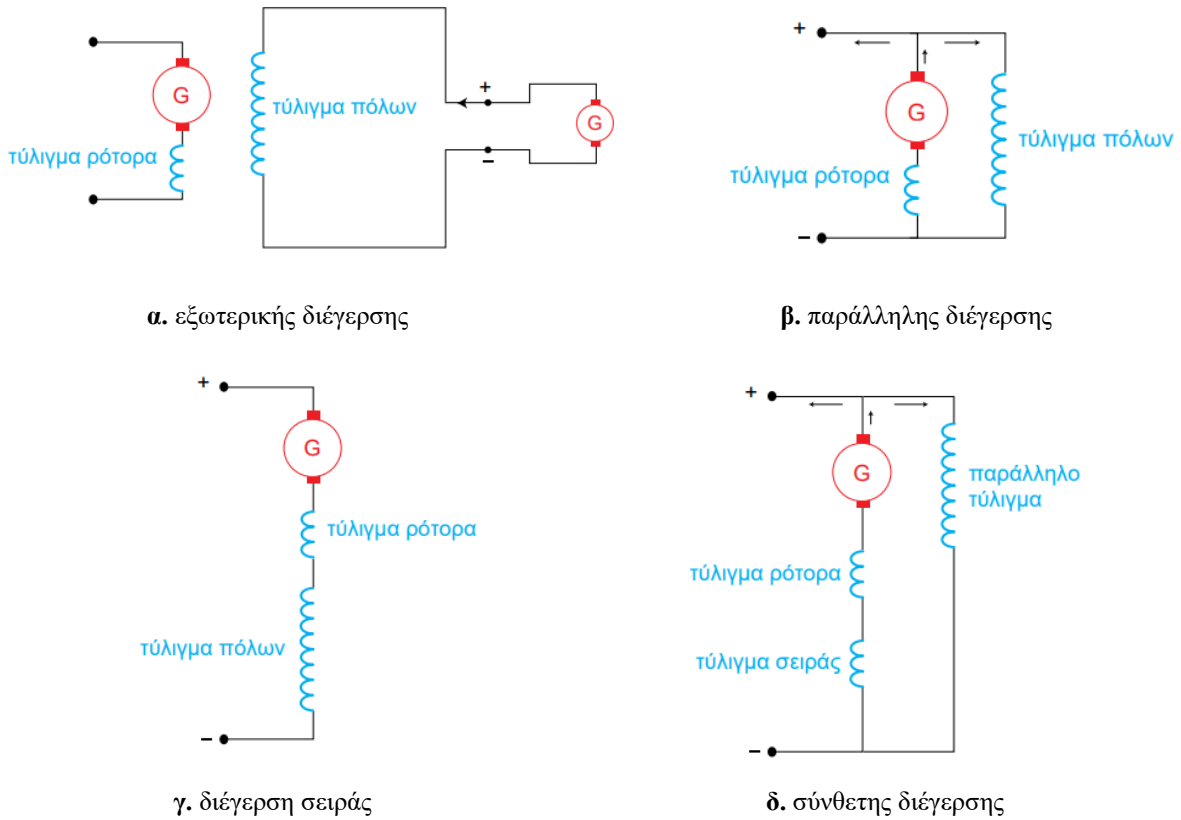


Σχήμα 3. 9: Σήμα εξόδου γεννήτριας DC (Πηγή : [E])

Ανάλογα με το πώς συνδέονται τα τυλίγματα των ηλεκτρομαγνητών (πόλων) με το τύλιγμα του δρομέα, καθορίζεται και ο τρόπος λειτουργίας της γεννήτριας καθώς και τα χαρακτηριστικά της. Ο τρόπος σύνδεσης πόλων και δρομέα καθορίζει τον τύπο της γεννήτριας. Με αυτό, λοιπόν το κριτήριο οι τύποι γεννητριών DC διαχωρίζονται ως εξής :

- **γεννήτριες DC ξένης ή εξωτερικής διέγερσης :** το τύλιγμα των πόλων, αποτελούμενο από πολλές σπείρες λεπτού σύρματος τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή π.χ. μια μικρή γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, Σχ.3.10.α,
- **γεννήτριες DC παράλληλης διέγερσης :** το τύλιγμα των πόλων, πάλι με πολλές και λεπτές σπείρες, είναι παράλληλα συνδεδεμένο με τα άκρα της μηχανής, οπότε τροφοδοτείται από την ίδια τάση που παράγει η τελευταία, Σχ.3.10.β,
- **γεννήτριες DC με διέγερση σειράς :** το τύλιγμα των πόλων, αποτελούμενο αυτή τη φορά από λίγες σπείρες χοντρού σύρματος, συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του τυμπάνου του δρομέα, οπότε, διαρρέεται από το ρεύμα που παράγει η μηχανή, Σχ.3.10.γ,
- **γεννήτριες DC σύνθετης διέγερσης :** το τύλιγμα των πόλων συνδέεται μικτά με το δρομέα, με συνδυασμό παράλληλης και εν σειρά συνδεσμολογίας, με ένα τύλιγμα σειράς λίγων και χοντρών σπειρών και με ένα τύλιγμα πολλών και λεπτών σπειρών παράλληλα, Σχ.3.10.δ.

Μια σχηματική παράσταση όλων των τύπων που αναφέρθηκαν, δίνεται στο Σχ.3.10 :

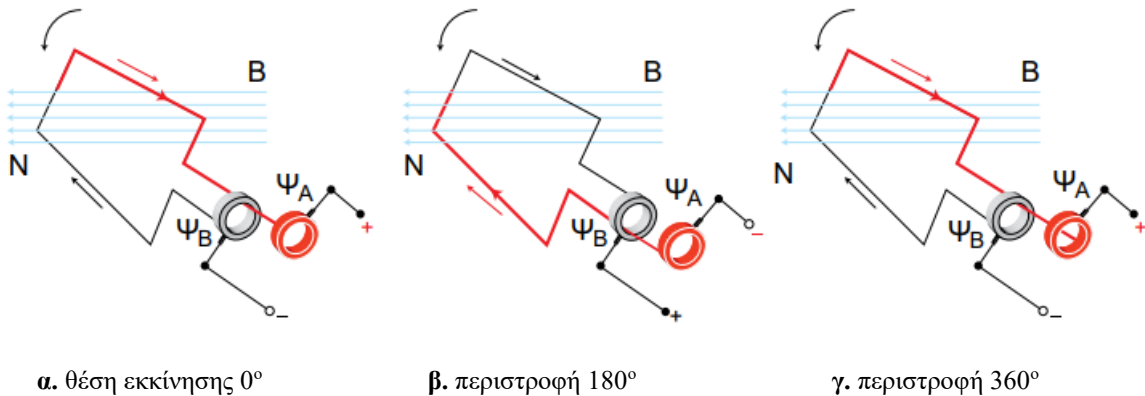


Σχήμα 3. 10: Τύποι γεννητριών DC (Πηγή : [Γ])

3.3.4 Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης (AC) - Γεννήτριες AC

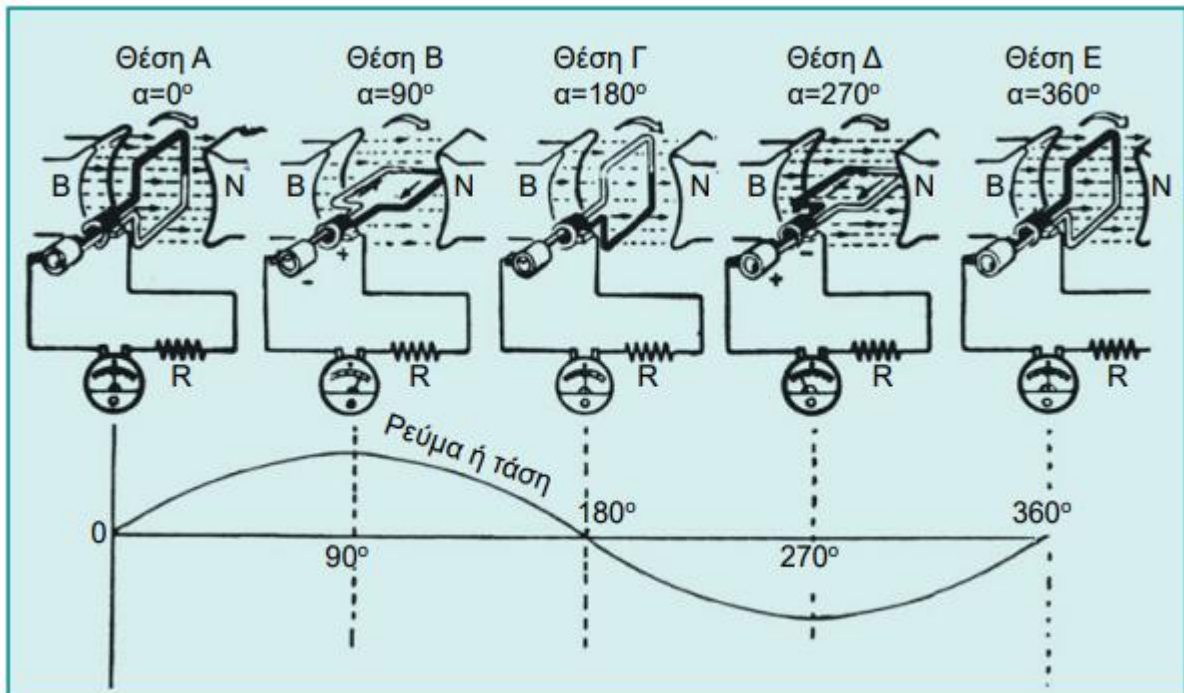
Ρίχνοντας, τώρα, μια ματιά στο Σχ.3.7., διακρίνουμε δύο δακτυλίδια που χρησιμεύουν στην παραγωγή της εναλλασσόμενης τάσης. Τα δακτυλίδια αυτά είναι φυσικά αγωγίμα, κατασκευασμένα από χαλκό, πάνω στα οποία εφάπτονται πάλι εξωτερικά οι ψήκτρες, ώστε να είναι δυνατή η ελεύθερη περιστροφή. Για να παραχθεί η εναλλασσόμενη τάση, να έχουμε δηλ, τώρα αλλαγή στην πολικότητα της φοράς του ρεύματος, οι ψήκτρες δεν αλλάζουν σημείο σύνδεσης, εφάπτονται πάντα στο ίδιο δακτυλίδι και έτσι θα διαρρέονται από ρεύμα, η πολικότητα του οποίου αντιστρέφεται περιοδικά, δημιουργώντας ένα ημιτονικό σήμα.

Όλα αυτά απεικονίζονται στο Σχ.3.11 που ακολουθεί, όπου φαίνεται ότι τόσο η ψήκτρα Α, που συνδέεται με το κόκκινο δακτυλίδι, όσο και η ψήκτρα Β, εμφανίζουν στο άκρο τους περιοδικά ανεστραμμένη πολικότητα.



Σχήμα 3. 11: Διαδικασία παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης με τη χρήση δύο δακτυλιδιών (Πηγή : [Γ])

Στο Σχ.3.12 φαίνεται η εναλλασσόμενη μορφή του παραγόμενου σήματος, καθώς το πλαίσιο περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο ακολουθώντας την ίδια πορεία όπως και στο Σχ.3.9.



Σχήμα 3. 12: Σήμα εξόδου γεννήτριας AC (Πηγή : [E])

Οι γεννήτριες AC χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του σήματος που παράγουν, αλλά και ανάλογα με τη συχνότητα του παραγόμενου σήματος.

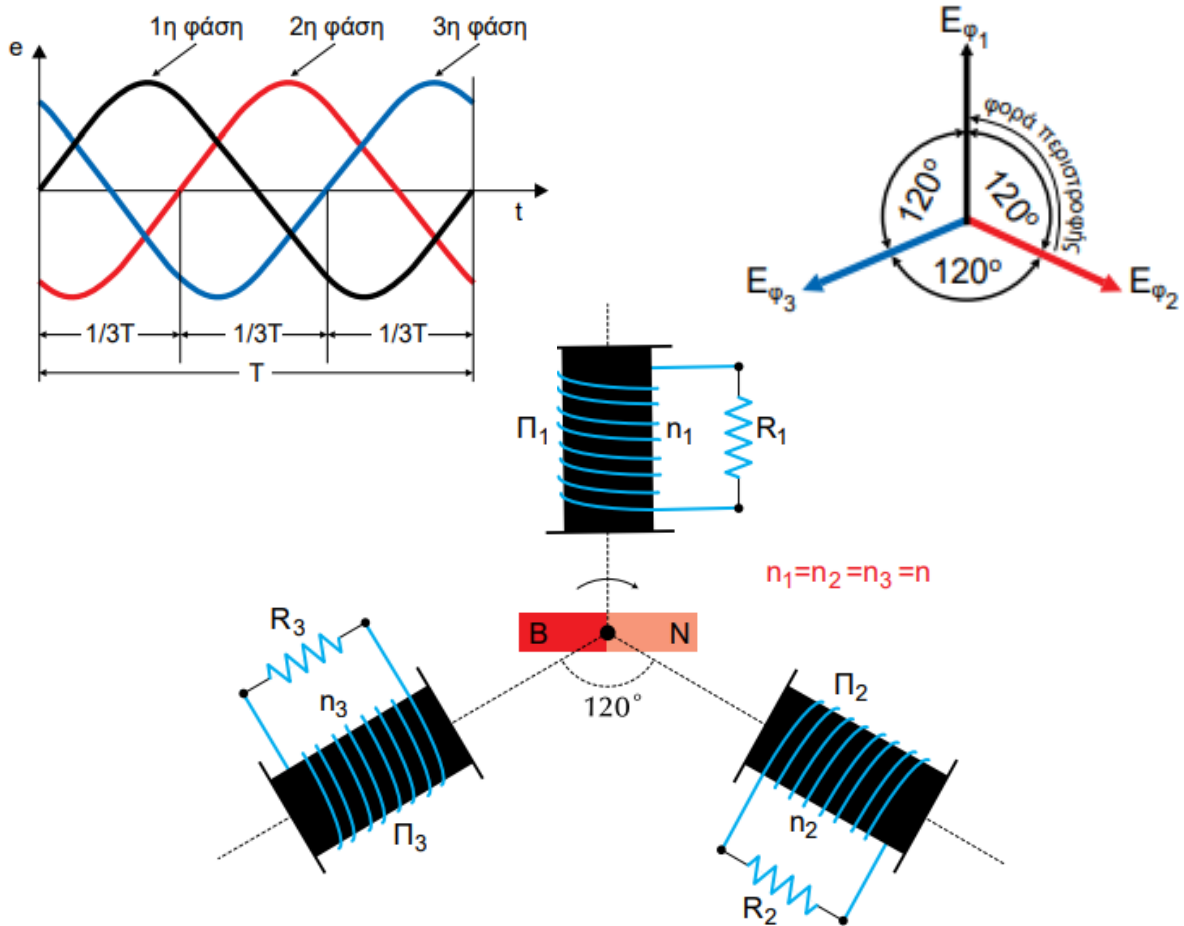
Έτσι, σε σχέση με το είδος του παραγόμενου ημιτονικού σήματος, τις διακρίνουμε σε :

- **μονοφασικές γεννήτριες** : είναι οι γεννήτριες που παράγουν μονοφασικό ρεύμα, δηλαδή στην έξοδο της γεννήτριας λαμβάνουμε μία μόνο εναλλασσόμενη τάση. Η δομή και η λειτουργία τους είναι παρόμοια με τις γεννήτριες (DC), απλά αντί να παράγουν συνεχή τάση, παράγουν εναλλασσόμενη,
- **τριφασικές γεννήτριες** : είναι οι γεννήτριες που παράγουν τριφασικό ρεύμα, δηλαδή τρία διαφορετικά εναλλασσόμενα ρεύματα, οπότε στην έξοδο της γεννήτριας θα πάρουμε τρεις διαφορετικές τάσεις, ίδιου πλάτους και συχνότητας, αλλά με διαφορά φάσης 120° . Τα τρία αυτά ρεύματα δημιουργούνται από τρία ξεχωριστά πηνία, Σχ.3.13, τα οποία βρίσκονται στο στάτη, τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε οι άξονές τους να σχηματίζουν γωνία 120° μεταξύ τους και έτσι να παράγουν τα τρία ρεύματα με τις διαφορετικές φάσεις.

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τον δρομέα, ο οποίος λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, προερχόμενο από μια μικρή γεννήτρια DC, η οποία παίζει το ρόλο της διεγέρτριας. Η διεγέρτρια αυτή είναι συνήθως γεννήτρια παράλληλης διέγερσης. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται μια τριφασική γεννήτρια AC, με τους άξονες των τριών πηνίων που παράγουν τα τρία ρεύματα να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 120° . Ο αριθμός των τυλιγμάτων τους είναι ο ίδιος και για τα τρία, γι' αυτό και παράγουν σήματα ίδιου πλάτους (και συχνότητας φυσικά).

Οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γιατί είναι πιο αποδοτικές όταν πρόκειται να μεταφέρουμε την ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Ο λόγος που τις κάνει πιο αποδοτικές είναι ότι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με τριφασικό ρεύμα χρειάζεται σχεδόν τους μισούς αγωγούς (καλώδια) σε σχέση με τη μεταφορά της ίδιας ποσότητας ενέργειας με

μονοφασικό ρεύμα. Γεγονός που συνεπάγεται πολύ λιγότερο κόστος υλικών (καλώδια κ.α.), με ταυτόχρονη υψηλή αποδοτικότητα μεταφοράς.

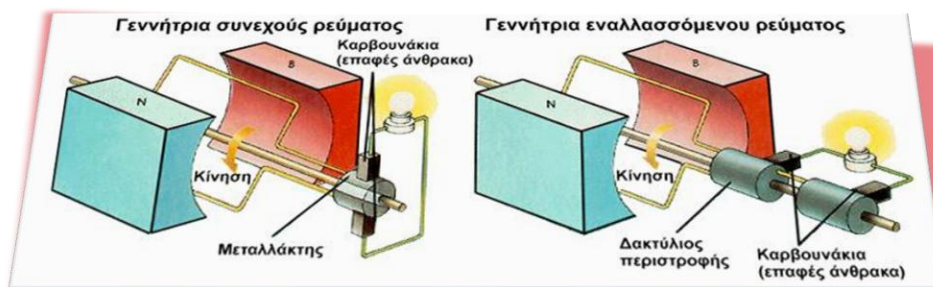


Σχήμα 3. 13 : Τριφασική γεννήτρια AC (Πηγή : [Γ])

Σε σχέση, τώρα, με τη **συχνότητα του παραγόμενου ημιτονικού σήματος**, οι γεννήτριες AC διακρίνονται σε :

- **σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες** : είναι οι γεννήτριες που η συχνότητα του ρεύματος που παράγουν εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα - δρομέα,
- **ασύγχρονες γεννήτριες** : είναι οι γεννήτριες που η συχνότητα του ρεύματος που παράγουν δεν εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

[Γ], [Ε]



Για την παραγωγή της εναλλασσόμενης και της συνεχούς τάσης υπάρχουν πολλές προσομοιώσεις, τις οποίες θα δούμε στο 2^ο μέρος αυτής της εργασίας.

Στο λινκ <https://youtu.be/coWQ1R2r5MY> υπάρχει διαθέσιμο ένα βίντεο για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στην ιστοσελίδα <https://photodentro.edu.gr/v/item/ds/8521/8581> του Φωτόδεντρου παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας ενός κινητήρα D.C.

Τέλος, στο Παράρτημα Β (B1), δίνονται κάποιες οδηγίες για την επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας.

Υποσημείωση : Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού μαγνητικής επαγωγής

Παράδειγμα [1]

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 διαγράφουν κυκλική τροχιά ακτίνας $w/2$ συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου μέσω της σχέσης $|v^{\rightarrow}| = |\omega^{\rightarrow}|w/2$

Το πηνίο της παραπάνω ηλεκτρογεννήτριας περιστρέφεται με συχνότητα $f = 60 \text{ Hz}$, 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:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \text{ rad} \cdot 60 \text{ Hz} = 376,8 \text{ rad/sec} \cong 377 \text{ rad/s}$$

Λύνοντας τη σχέση της μέγιστης επαγωγικής τάσης ως προς το μέτρο του μαγνητικού πεδίου, μπορούμε να υπολογίσουμε το B :

$$\left. \begin{aligned} V_{E\pi_{KL}} &= V_{E\pi_{MN}} = |B| \cdot L \cdot \frac{w}{2} |\omega| \cdot \eta\mu(\omega t) \\ V_{E\pi_{total}} &= 2 \cdot V_{E\pi_{MN}} = 2 \cdot |B| \cdot L \cdot \frac{w}{2} |\omega| \cdot \eta\mu(\omega t) = |B| \cdot L \cdot w \cdot |\omega| \cdot \eta\mu(\omega t) \xrightarrow{L \cdot w \cong A} \\ &= |B| \cdot A \cdot |\omega| \cdot \eta\mu(\omega t) \xrightarrow{\text{για } N \text{ σπείρες}} \end{aligned} \right\}$$

$$V_{E\pi_{total_{max}}} = N \cdot |B| \cdot A \cdot |\omega| \Rightarrow 170 \text{ V} = 500 \cdot |B| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 377 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \Rightarrow B \cong 0,3 \text{ T}$$

3.4 Ηλεκτροκινητήρες

Οι γεννήτριες με τις οποίες ασχοληθήκαμε πριν μπορούν, όπως ειπώθηκε, να εργαστούν και ως κινητήρες, όπως και οι κινητήρες ως γεννήτριες.

Η δύναμη Laplace αποτελεί τη βάση της αρχής λειτουργίας των κινητήρων. Πιο σωστά οι δυνάμεις Laplace που ασκούνται στους αγωγούς των κινούμενων μερών τους.

Ανάλογα, τώρα, με το είδος του ρεύματος που χρησιμοποιούν για να τη μετατρέψουν σε κίνηση, χωρίζονται και αυτούς σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **κινητήρες D.C** : οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα και
- **κινητήρες A.C.** που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα.

Το κεφάλαιο των κινητήρων είναι και αυτό τεράστιο, οπότε θα γίνει μια πολύ συνοπτική περιγραφή τους, αφού έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά και με τις γεννήτριες.

Οι κινητήρες έχουν την ίδια βασική κατασκευή με τις γεννήτριες και αποτελούνται και αυτοί από τον ρότορα ή δρομέα και τον στάτη ή στάτορα. Ομοίως, ο δρομέας αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα και οι άκρες του συνδέονται με τον συλλέκτη. Η μόνη διαφορά τώρα είναι ότι ο συλλέκτης δεν παρέχει, αλλά παίρνει ρεύμα από τις ψήκτρες και το διοχετεύει στο εσωτερικό πλαίσιο του δρομέα. Απ' την άλλη, ο στάτης συνεχίζει να είναι το ακίνητο μέρος του κινητήρα, ο οποίος δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο όπου και περιστρέφεται ο δρομέας. Μπορεί φυσικά, πάλι να είναι είτε μόνιμος μαγνήτης είτε ηλεκτρομαγνήτης.

3.4.1 Κινητήρες DC

Επιγραμματικά, ο κινητήρας λειτουργεί με τη ροπή που προκαλεί το ρεύμα στον δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Ακόμα και όταν η ροπή γίνεται μηδέν, ο συλλέκτης εξασφαλίζει ότι η περιστροφή συνεχίζεται.

Για να μην υπάρχει ποτέ κίνδυνος να σταματήσει, χρησιμοποιούνται περισσότερα πηνία, και στους ισχυρούς κινητήρες πολλά πλαίσια, ώστε να διατηρείται η κίνηση και να παράγεται μεγάλη δύναμη.

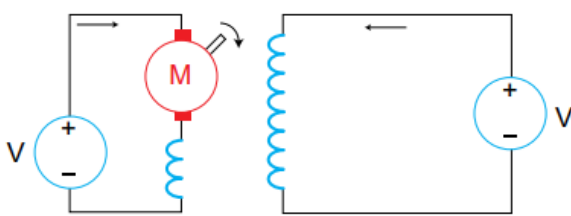
Πιο αναλυτικά, όταν περνάει ρεύμα μέσα από το πλαίσιο του δρομέα, δημιουργούνται δυνάμεις Laplace, οι οποίες ασκούν μια ροπή στο πλαίσιο, κάνοντάς το να αρχίσει να περιστρέφεται. Στο σημείο, όμως, που ο μαγνητικός άξονας του πλαισίου ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο, η ροπή που ασκείται πάνω του γίνεται μηδέν. Παρόλα αυτά, το πλαίσιο συνεχίζει να περιστρέφεται, επειδή έχει ήδη κινητική ενέργεια - λόγω αδράνειας.

Ενώ συνεχίζει να περιστρέφεται, δέχεται νέα ώθηση χάρη στον συλλέκτη, ο οποίος ανοιγοκλείνει το κύκλωμα του δρομέα αυτόματα και διατηρεί την κίνηση. Στην περίπτωση που ο κινητήρας συναντήσει κάποια αντίσταση τη στιγμή που η ροπή είναι μηδενική, υπάρχει, βέβαια, η πιθανότητα να σταματήσει. Για να αποφευχθεί αυτό, τοποθετούνται δύο πηνία κάθετα μεταξύ τους, Με αυτόν τον τρόπο, η ροπή δεν μηδενίζεται ποτέ, μιας και πάντα υπάρχει κάποιο πηνίο που δέχεται δύναμη. Σε ισχυρούς κινητήρες, χρησιμοποιούνται πολλά πλαίσια αντί για ένα, ώστε να δημιουργείται μεγαλύτερη ροπή στον δρομέα και να είναι πιο αποδοτικός ο κινητήρας.

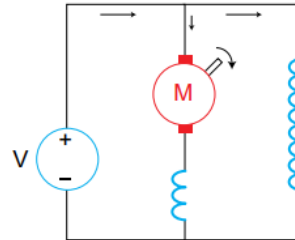
Ανάλογα με το πώς τροφοδοτούνται τα τυλίγματα των πόλων σε σχέση με την τροφοδοσία του δρομέα, διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες, ομοίως με τις γεννήτριες :

- **κινητήρες DC ξένης ή εξωτερικής διέγερσης** : το τύλιγμα των πόλων τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή, Σχ.3.14.α, διαφορετική από αυτή του δρομέα, με δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής σε μεγάλο εύρος τιμών,
- **κινητήρες DC παράλληλης διέγερσης** : το τύλιγμα των πόλων και ο δρομέας τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή Σχ.3.14.β, προκαλώντας μια μικρή πτώση της ταχύτητας περιστροφής μιας και αυξάνεται το φορτίο, οπότε και μπορούν να εργαστούν σε αντίστοιχες εφαρμογές, που δε θα απαιτούν υψηλές ταχύτητες,
- **κινητήρες DC με διέγερση σειράς** : το τύλιγμα των πόλων, αποτελούμενο αυτή τη φορά από λίγες σπείρες χοντρού σύρματος, συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, οπότε, διαρρέεται από ρεύμα μεγάλης έντασης, Σχ.3.14.γ. Για το λόγο αυτό έχουν μεγάλη ροπή και χρησιμοποιούνται σε μεγάλα φορτία και ηλεκτρικά οχήματα,
- **κινητήρες DC σύνθετης διέγερσης** : το τύλιγμα των πόλων και του δρομέα συνδυάζουν παράλληλη και σε σειρά συνδεσμολογία και έτσι, έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τους δύο προηγούμενους κινητήρες, Σχ.3.14.δ. [Γ]

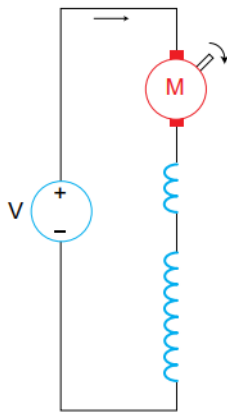
Μια σχηματική παράσταση όλων των τύπων που αναφέρθηκαν, δίνεται στο Σχ.3.14 :



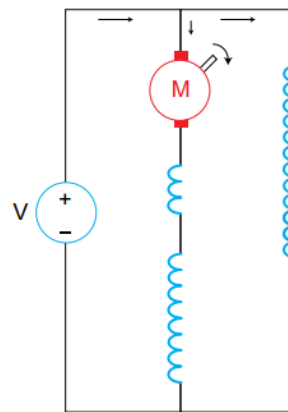
α. εξωτερικής διέγερσης



β. παράλληλης διέγερσης



γ. διέγερση σειράς



δ. σύνθετης διέγερσης

Σχήμα 3. 14: Τύποι κινητήρων DC (Πηγή : [Γ])

3.4.2 Κινητήρες AC

Οι κινητήρες AC χωρίζονται και αυτοί σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του σήματος που χρησιμοποιούν, αλλά και ανάλογα με το αν συνδέεται η περιστροφή του δρομέα με τη συχνότητα του χρησιμοποιούμενου σήματος.

Έτσι, σε σχέση με το είδος του χρησιμοποιούμενου ημιτονικού σήματος, τους διακρίνουμε σε :

- **μονοφασικούς κινητήρες** : χρησιμοποιούν μονοφασικό ρεύμα,
- **τριφασικούς κινητήρες** : χρησιμοποιούν τριφασικό ρεύμα. Τα τρία αυτά ρεύματα τροφοδοτούν τα τρία ξεχωριστά πηνία, τα οποία βρίσκονται στον στάτη, Σχ.3.13, ακριβώς όπως και στις γεννήτριες AC.

Υπάρχει η δυνατότητα τα τρία αυτά πηνία φάσης να συνδεθούν με δύο τρόπους, ανάλογα με την τάση που χρειάζονται για να λειτουργήσουν σωστά και την τάση που παρέχει η πηγή τροφοδοσίας. Έτσι, έχουμε τη **σύνδεση σε αστέρα (Y)** και τη **σύνδεση σε τρίγωνο (Δ)**.

Αυτό που συμβαίνει, όταν τροφοδοτηθούν τα πηνία με τριφασικό ρεύμα, είναι να δημιουργηθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον στάτη, με όποια σύνδεση και να έχουν. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη στον δρομέα πάνω στον οποίο αναπτύσσεται μια ροπή που τον αναγκάζει να περιστραφεί και εν τέλει να παράγει κίνηση.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο κινείται με ταχύτητα που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ στροφές/ min} \quad \text{ή} \quad n = \frac{f}{p} \text{ στροφές/ sec} \quad (3.5)$$

όπου :

- **f** : συχνότητα τροφοδοσίας (Hertz, Hz)
- **p** : πλήθος ζευγών πόλων

Σε σχέση με τη συσχέτιση της ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας, χωρίζονται στους :

- **σύγχρονους κινητήρες**, στους οποίους η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου που υπολογίζεται από τη σχέση (3.5) και στους
- **ασύγχρονους κινητήρες**, όπου η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα δεν εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα του ρεύματος, αλλά κυρίως από το φορτίο που εφαρμόζεται.

Τόσο οι σύγχρονοι κινητήρες όσο και ασύγχρονοι, λειτουργούν με την ίδια αρχή, είτε είναι μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Έχουν κάποιες μικρές διαφορές, οι οποίες εντοπίζονται στο τύλιγμα του στάτη και για μεν τις σύγχρονες στον τρόπο που αυτό τροφοδοτείται, για δε τις ασύγχρονες στον αριθμό των τυλιγμάτων του στάτη.

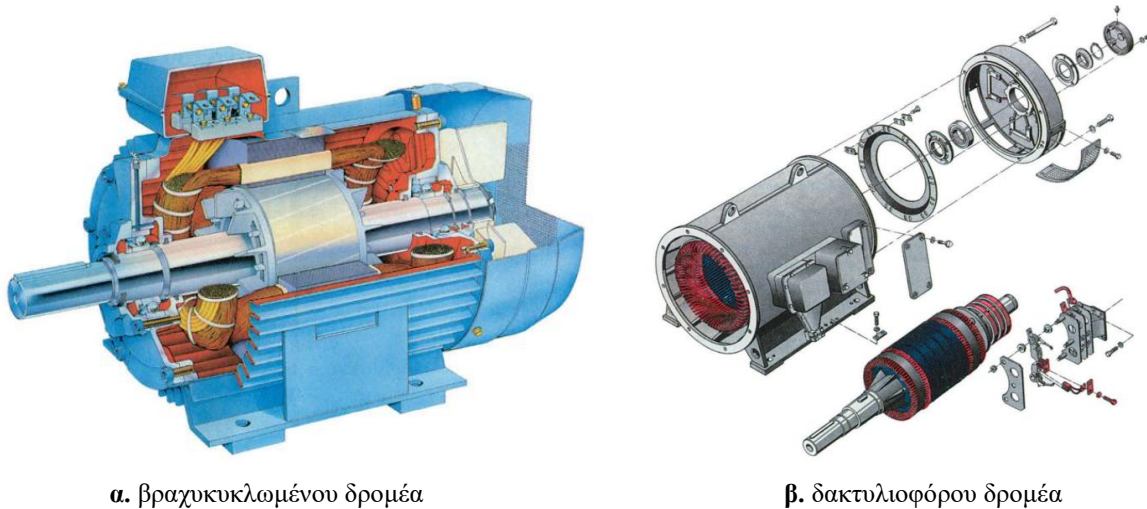
Οι μονοφασικοί κινητήρες έχουν στον στάτη δύο τυλίγματα, το κύριο τύλιγμα και ένα βοηθητικό, ενώ οι τριφασικοί έχουν εκεί μόνο τα κύρια τυλίγματα των τριών φάσεων.

Γενικά, οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βιομηχανία, επειδή προσφέρουν ισχυρά πλεονέκτημα, όπως απλότητα κατασκευής και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης αυτής, υψηλή συγκέντρωση ισχύος, άρα και μεγάλη απόδοση, με τελευταίο, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, το χαμηλό κόστος. Χαρακτηριστικά που τους κατατάσσει στους δημοφιλέστερους για πολλές εφαρμογές. Ονομάζονται επίσης και επαγωγικοί, επειδή το ρεύμα στο

δρομέα τους δεν παρέχεται απευθείας μέσω κάποιας ηλεκτρικής σύνδεσης, αλλά δημιουργείται επαγωγικά από το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Ειδικά για τους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, τους χωρίζουμε σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο του δρομέα, στους :

- **κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα**, Σχ.3.15.α, όπου ο δρομέας είναι απλός, χωρίς να χρειάζεται εξωτερικές συνδέσεις και
- **κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα**, Σχ.3.15.β, όπου ο δρομέας περιλαμβάνει δακτυλίους, που επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία στη λειτουργία του κινητήρα. [E]



α. βραχυκυκλωμένου δρομέα

β. δακτυλιοφόρου δρομέα

Σχήμα 3. 15: Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες (Πηγή : [E])

3.5 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια μιας πολύ συνοπτικής και συγχρόνως περιεκτικής αναφοράς και περιγραφής των ηλεκτρικών μηχανών, δίνοντας έμφαση στους μετασχηματιστές και στις ηλεκτρογεννήτριες - ηλεκτροκινητήρες. Συνιστούν αυτοτελή ζητήματα και υπάρχουν πάρα πολλά που θα μπορούσαν να ειπωθούν. Η ουσία είναι ότι αποτελούν αναπόσπαστα κομμάτια της σύγχρονης τεχνολογίας και βιομηχανίας. Η καθεμία εξυπηρετεί συγκεκριμένες λειτουργίες, απαραίτητες για τη μεταφορά, τη μετατροπή και τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας "τροφή" στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου και στην ευημερία του γενικότερα.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, αναμένονται περαιτέρω καινοτομίες, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των μηχανών αυτών, ακολουθώντας την πορεία για μια πιο «πράσινη» και ενεργειακά αποδοτικότερη κοινωνία.

Εδώ κλείνει και το πρώτο μέρος της εργασίας, παρέχοντας όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από το μαγνητισμό και τον ηλεκτρομαγνητισμό για την κατανόηση των βασικών εννοιών και φαινομένων που τους αφορούν, χωρίς να υπεισέρχεται σε εξειδικευμένες λεπτομέρειες, που ίσως κουράσουν τον αναγνώστη.

Ακολουθούν δύο ακόμη μέρη, που έχουν ως σημείο εκκίνησης την αποσαφήνιση των θεωρητικών εννοιών του ηλεκτρομαγνητισμού που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια,, εστιάζοντας σε δύο μόνο από αυτές, όπου, μέσα από προσομοιώσεις και πειραματικές διατάξεις, θα γίνει απόπειρα εμβάθυνσης και εμπέδωσης των φαινομένων της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής Faraday και της δύναμης Laplace

Κεφάλαιο 4ο : Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

4.1 Εισαγωγή

Για να αποδειχθεί ο νόμος της επαγωγής του Faraday, που περιγράφηκε στην ενότητα 2.4, θα πραγματοποιηθούν, αρχικά, κάποια απλά πειράματα με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης, τα οποία, στο πειραματικό μέρος, θα επαναληφθούν με πειραματικές διατάξεις – κατασκευές.

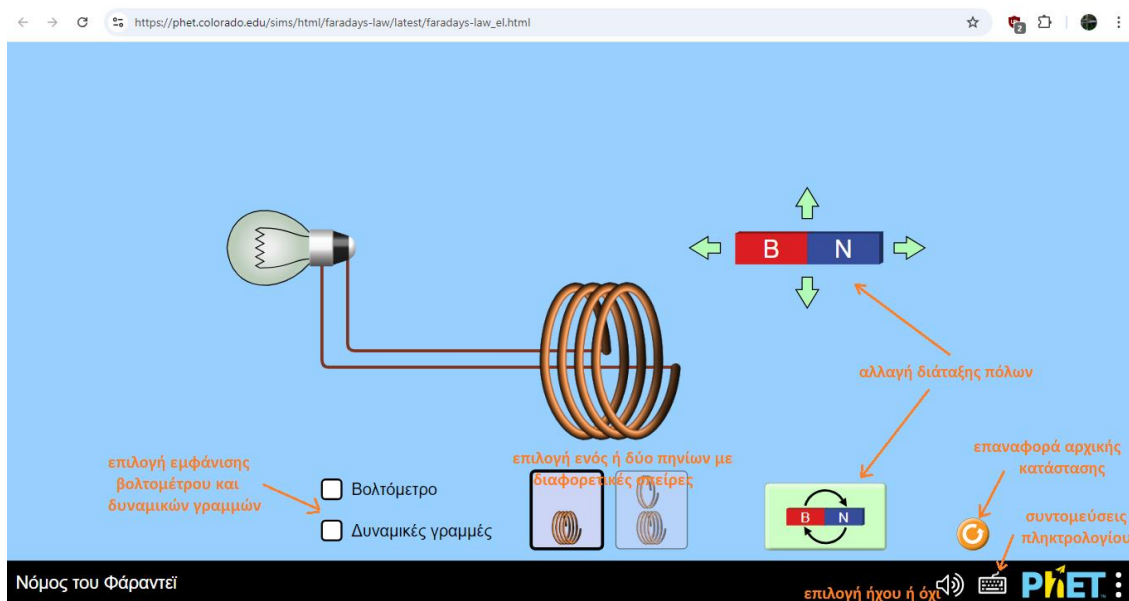
Μέσω αυτής της διαδικασίας, ο αναγνώστης θα αντιληφθεί καλύτερα και με παραστατικό τρόπο το εν λόγω φαινόμενο και θα επιλύσει τυχόν προκύπτουσες απορίες, επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα τον πολύ σημαντικό νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

4.2 1^ο πείραμα :

Μετακίνηση μόνιμου μαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο N σπειρών

Για το πείραμα αυτό, θα χρειαστούμε ένα πηνίο, έναν μόνιμο μαγνήτη, καλώδια σύνδεσης, ένα βολτόμετρο ή γαλβανόμετρο και έναν λαμπτήρα. Υπενθυμίζεται για το γαλβανόμετρο ότι είναι ένα πολύ ευαίσθητο όργανο μέτρησης έντασης ρεύματος, οπότε μ' αυτό, μπορούμε να δούμε πολύ μικρές μεταβολές της τιμής αυτής. Επίσης, ότι το βολτόμετρο συνδέεται παράλληλα στο κύκλωμα και στα σημεία που θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού, ενώ το γαλβανόμετρο, σε σειρά, ώστε το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα να περάσει μέσα από το όργανο μέτρησης. Το συγκεκριμένο πείραμα θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός προγράμματος προσομοίωσης από την ιστοσελίδα του phet colorado (https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_el.html [35]), όπου όταν το χρησιμοποιήσουμε, μπορούμε να αντλήσουμε και τα αντίστοιχα στιγμιότυπα οθόνης, που παρουσιάζονται παρακάτω πολύ αναλυτικά:

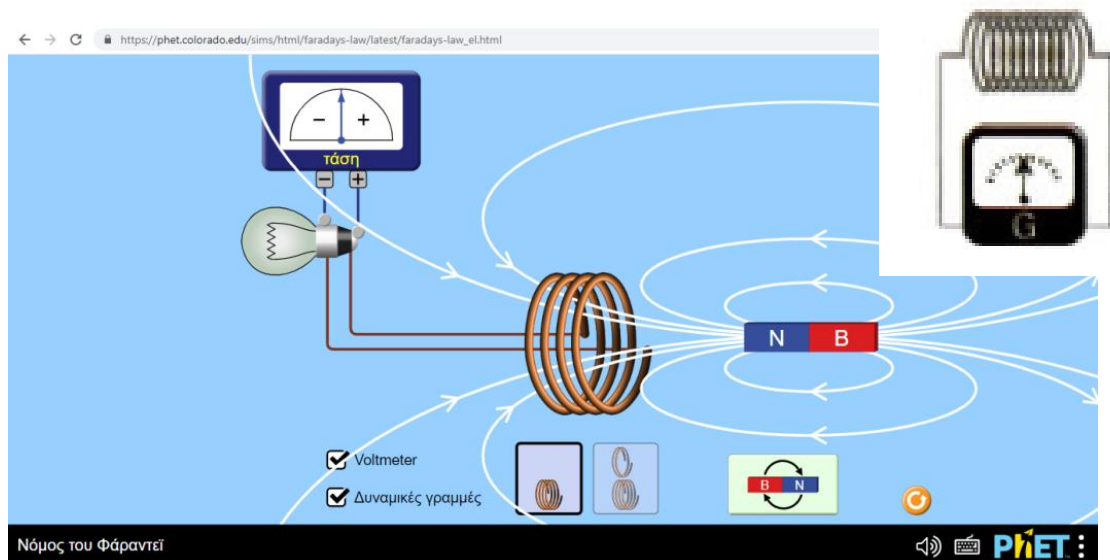
- Ανοίγοντας τη συγκεκριμένη προσομοίωση, διακρίνουμε τα άκρα ενός πηνίου να συνδέονται με έναν λαμπτήρα και έναν μαγνήτη που μπορεί να μετακινηθεί κοντά στο πηνίο



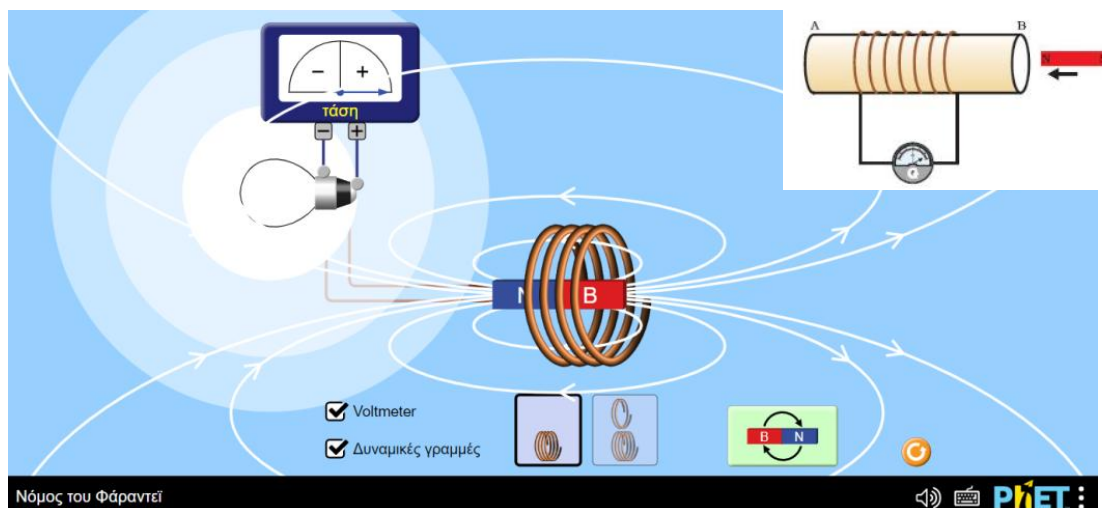
Σχήμα 4. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής phet colorado (Πηγή : [35])

Στην εικόνα, παρατηρούμε ότι έχουμε τη δυνατότητα να προσθέσουμε και ένα βολτόμετρο - που στην ουσία είναι γαλβανόμετρο - και να απεικονίσουμε τις δυναμικές γραμμές του μαγνήτη μας, επιλέγοντας τα αντίστοιχα λευκά τετραγωνάκια στα αριστερά. Μπορούμε, επίσης, να εμφανίσουμε ένα ή δύο πηνία στην οθόνη, να αλλάξουμε τη διάταξη των πόλων του μαγνήτη, να έχουμε ήχο ή όχι στην προσομοίωση και να επαναφέρουμε την προσομοίωση στην αρχική της κατάσταση. Για τη μετακίνηση του μαγνήτη, μπορούμε απλά να χρησιμοποιήσουμε το ποντίκι του υπολογιστή μας, αφού πατήσουμε το αριστερό πλήκτρο του πάνω στο μαγνήτη ή, αν δε διαθέτουμε, καταφεύγουμε στη χρήση πληκτρολογίου, οι συντομεύσεις του οποίου μας παρέχονται πατώντας απλά πάνω στο εικονίδιο του πληκτρολογίου ή με συνδυασμό των πλήκτρων Tab και Enter.

- Επιλέγουμε το βολτόμετρο και τις δυναμικές γραμμές, για καλύτερη οπτικοποίηση του φαινομένου και αφήνουμε τον ήχο ενεργοποιημένο. Αρχικά, χωρίς να ακουμπήσουμε το μαγνήτη, παρατηρούμε το όργανο μέτρησης και βλέπουμε ότι ο δείκτης του δεν αποκλίνει από το 0, οπότε καταλαβαίνουμε ότι δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου και δεν διαρρέεται από ρεύμα, συνεπώς, ο λαμπτήρας παραμένει σβηστός.

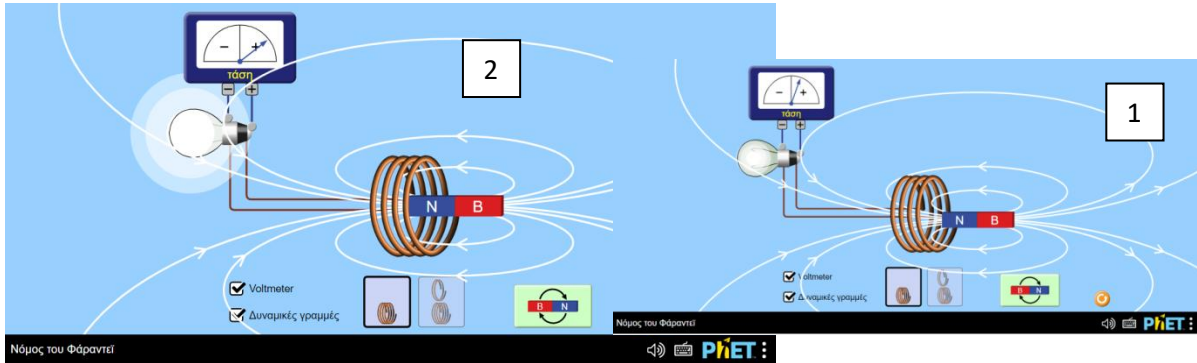


- Στη συνέχεια, πλησιάζουμε στο πηνίο τον ραβδοειδή μαγνήτη, ώστε ο άξονάς του να ταυτίζεται με τον άξονα του πηνίου και παρατηρούμε την ένδειξη του γαλβανομέτρου :



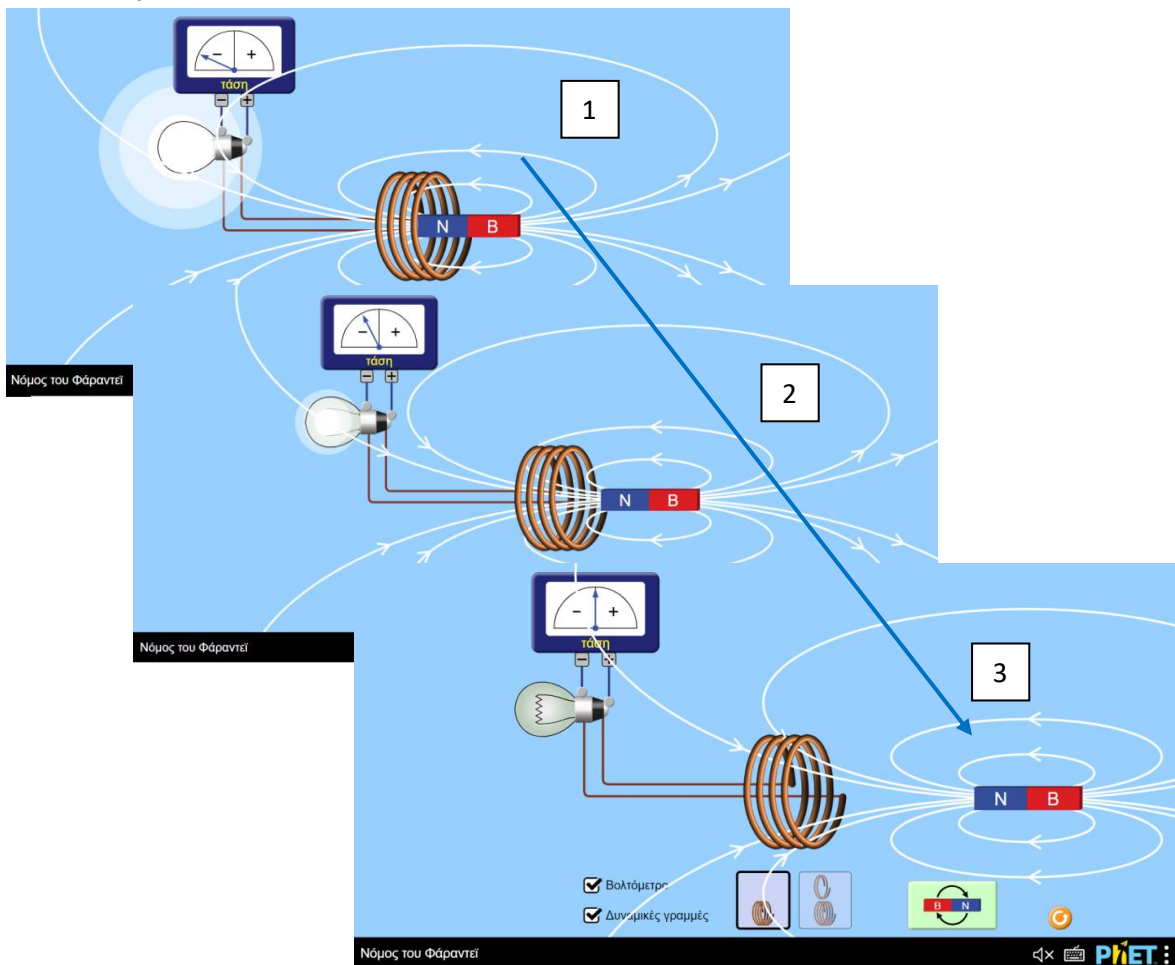
Παρατηρούμε ότι το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα, χωρίς να έχουμε εφαρμόσει πουθενά εξωτερική πηγή τάσης. Αυτή τη φορά, ο λαμπτήρας ανάβει, φωτοβολεί.

Επίσης, παρατηρούμε ότι το ρεύμα αυτό αυξάνεται όσο πιο πολύ πλησιάζει ο μαγνήτης στο πηνίο (κίνηση του μαγνήτη προς τ' αριστερά) και παίρνει τη μέγιστη τιμή του, όταν έχει τοποθετηθεί ολόκληρος ο μαγνήτης στο εσωτερικό του πηνίου. Ο λαμπτήρας φωτοβολεί ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και δείχνει το γαλβανόμετρο.



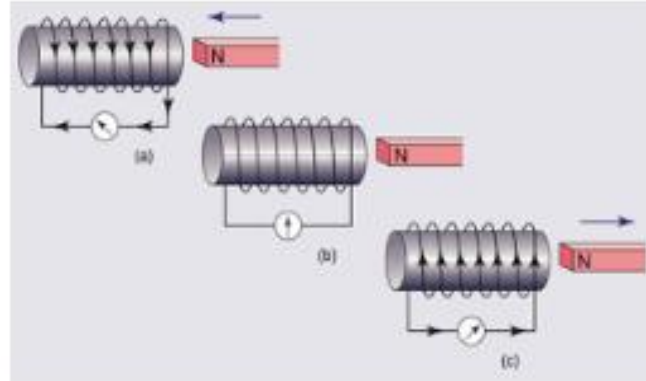
κίνηση μαγνήτη προς τα αριστερά, πλησιάζοντας το πηνίο

- Απομακρύνοντας τώρα το μαγνήτη από το πηνίο (κίνηση προς τα δεξιά), παίρνουμε τις παρακάτω εικόνες :

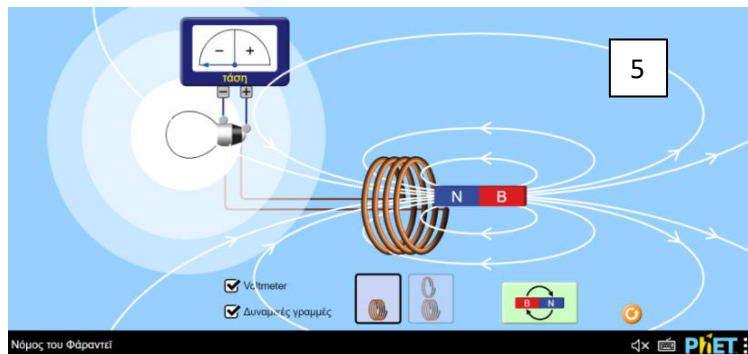
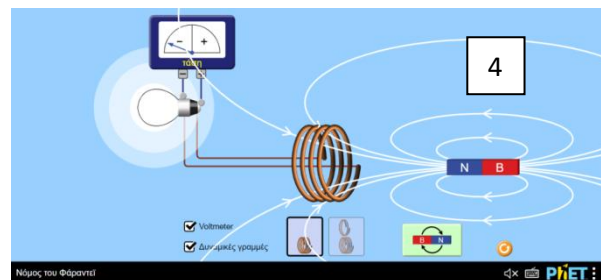
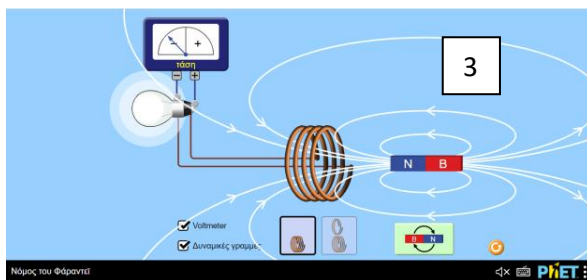
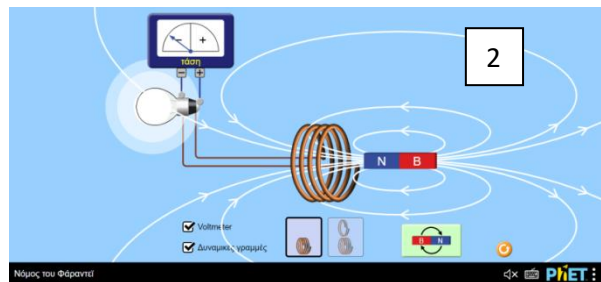
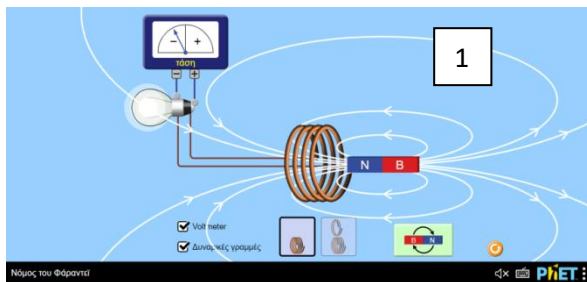


κίνηση μαγνήτη προς τα δεξιά, καθώς απομακρύνεται από το πηνίο

Από αυτές, παρατηρώντας πάλι το γαλβανόμετρο και το λαμπτήρα, εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τώρα το πηνίο διαρρέεται πάλι από ρεύμα, το οποίο μειώνεται όσο απομακρύνεται ο μαγνήτης από το πηνίο. Σ' αυτή την περίπτωση, όμως, δημιουργείται ένα ρεύμα αντίθετης φοράς από το προηγούμενο, γι' αυτό το γαλβανόμετρο δείχνει από τ' αριστερά, στο μείον, δηλαδή. Συνοπτικά, η κίνηση του μαγνήτη και προς τις δύο κατευθύνσεις, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

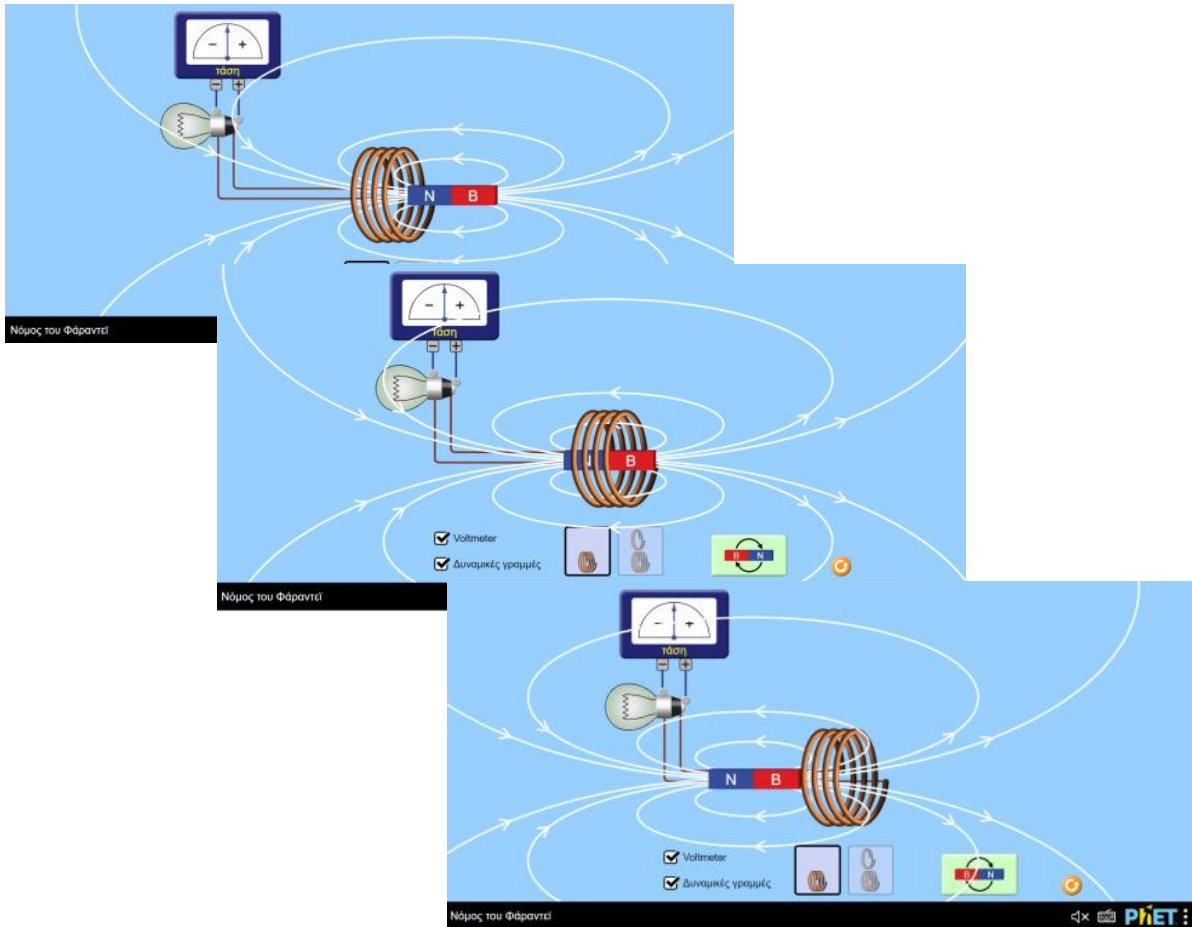


- Ένα άλλο που παρατηρούμε από τις παρακάτω εικόνες, οι οποίες έχουν ληφθεί με διαφορετική ταχύτητα απομάκρυνσης του μαγνήτη (από πιο μικρή σε μεγαλύτερη – απότομη μετακίνηση) είναι ότι το ρεύμα που επάγεται είναι τόσο μεγαλύτερο όσο πιο απότομη είναι η κίνηση του μαγνήτη. Το ίδιο φυσικά ισχύει και όταν ο μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο.



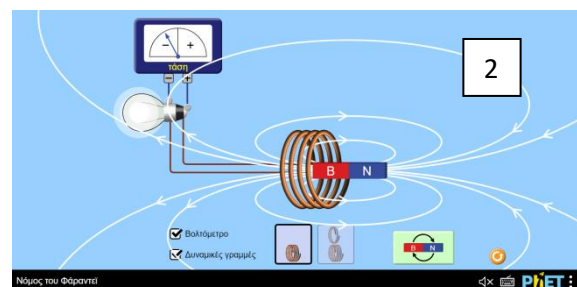
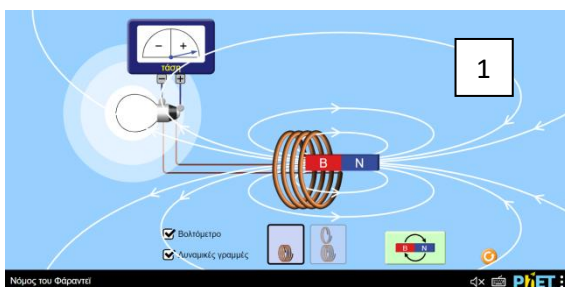
κίνηση μαγνήτη προς τα δεξιά, καθώς απομακρύνεται από το πηνίο, με φθίνον dt

- Τέλος, παρατηρούμε ότι όταν ο μαγνήτης παραμένει ακίνητος, ανεξαρτήτου απόστασης από το πηνίο - ακόμα και να είναι ολόκληρος στο εσωτερικό του πηνίου -, η βελόνα του γαλβανομέτρου δεν μετακινείται, επομένως, σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ρεύμα στο πηνίο μας.



ο μαγνήτης παραμένει ακίνητος ($\Phi = \sigma \tau \Rightarrow \Delta\Phi = 0 \Rightarrow E_{επ} = 0$)

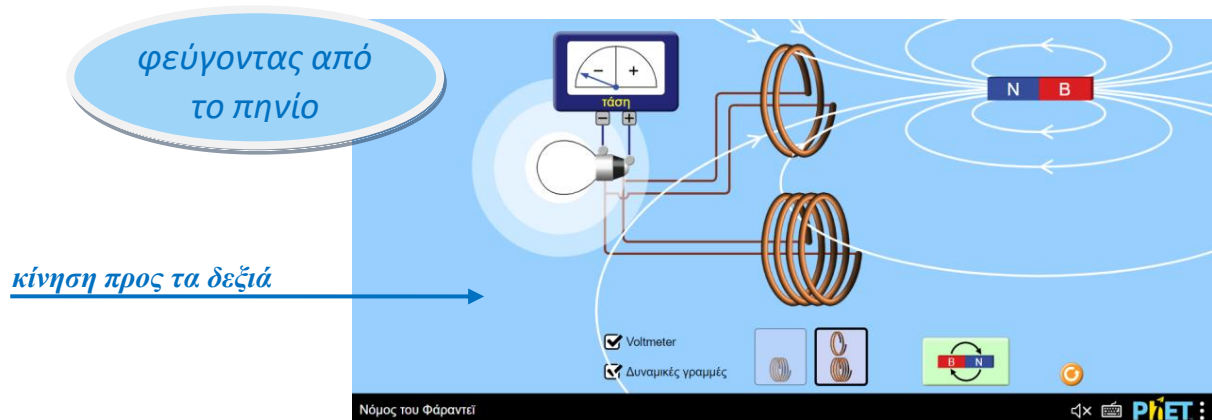
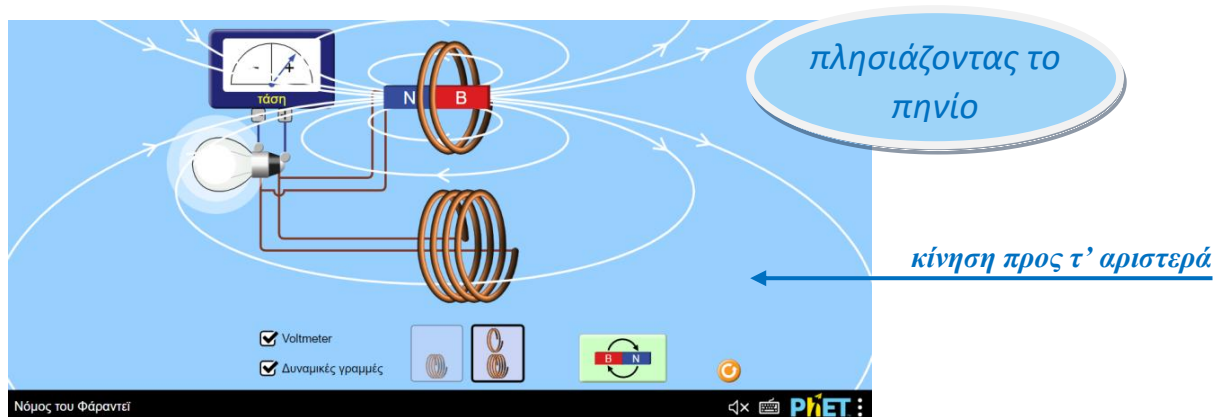
- Εκτελώντας τα ίδια με προηγουμένως βήματα, αλλάζοντας μόνο τη διάταξη των πόλων του μαγνήτη, παίρνουμε ακριβώς τα ίδια στιγμιότυπα, αλλά με αντίθετη πολικότητα στην επαγόμενη τάση. Εμφανίζεται θετική όταν απομακρύνεται ο μαγνήτης από το πηνίο (στιγμιότυπο 1) και αρνητική όταν αυτός πλησιάζει τις σπείρες (στιγμιότυπο 2), επιβεβαιώνοντας τον κανόνα του Lenz και επαληθεύοντας το μείον της εξίσωσης του νόμου του Faraday. Είναι μηδενική, όταν ο μαγνήτης παραμένει ακίνητος και αυξάνεται με τη μείωση του χρόνου μεταβολής της μαγνητικής ροής.



4.3 2ο πείραμα

Μετακίνηση μόνιμου μαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο σπειρών < N

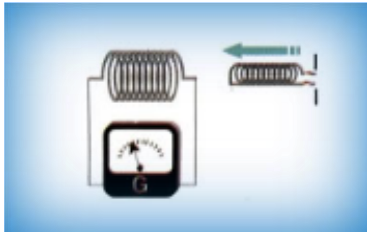
Με τη χρήση της συγκεκριμένης προσομοίωσης, μπορούμε επίσης να επαναλάβουμε το παραπάνω πείραμα χρησιμοποιώντας τώρα ένα πηνίο με λιγότερες σπείρες.



- Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς την ίδια διαδικασία - η οποία, για λόγους απλότητας, δεν απεικονίζεται με τα αντίστοιχα στιγμιότυπα -, παρατηρούμε πανομοιότυπη συμπεριφορά και αποτελέσματα. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στην ποσότητα της επαγόμενης τάσης. Έτσι, φαίνεται ότι η τάση που επάγεται, επομένως και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και το λαμπτήρα, έχει χαμηλότερη τιμή στην περίπτωση αυτή. Αυτό είναι, φυσικά, αναμενόμενο, αφού τώρα ο αριθμός N των σπειρών του πηνίου είναι μικρότερος. Οπότε, από τη σχέση του νόμου του Faraday, η τάση επαγωγής θα είναι και αυτή μικρότερη, με τον ίδιο ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής. Αν, τέλος, χρησιμοποιούσαμε ισχυρότερο μαγνήτη με μεγαλύτερο B, το φαινόμενο θα διαδραματιζόταν με τον ίδιο τρόπο, έχοντας σαν μόνη διαφορά την πιο έντονη εμφάνιση επαγωγικής τάσης, με μεγαλύτερη τιμή, μιας και το $\Delta\Phi$ θα ήταν μεγαλύτερο. [3]

4.4 3^ο πείραμα

Μετακίνηση ηλεκτρομαγνήτη από και προς ακίνητο πηνίο N σπειρών

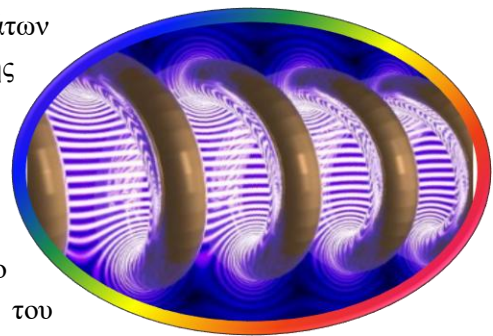


Μπορούμε να επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία, με τη διαφοροποίηση, τώρα, ότι αντί για μόνιμο μαγνήτη, θα πλησιάζουμε προς το πηνίο ένα σωληνοειδές, το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα – με σταθερή, δηλ. ένταση -. Αυτό που θα παρατηρούσαμε είναι ότι θα είχαμε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα που εμφανίστηκαν με τη χρήση του μόνιμου μαγνήτη.

Αν, στη συνέχεια, ακινητοποιήσουμε το σωληνοειδές μέσα στο πηνίο ή πολύ κοντά σ' αυτό και μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει, θα παρατηρήσουμε πάλι την εμφάνιση τάσης στο πηνίο μας.

Τέλος, και επειδή η κίνηση είναι σχετική, θα έχουμε τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα, αν αντί να κινούμε το μαγνήτη ή το σωληνοειδές, να μετακινούμε το πηνίο. Το ζήτημα είναι να έχουμε μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο μας.

Αυτό που συνέβη, λοιπόν, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν ότι μεταβλήθηκε η μαγνητική ροή, λόγω μεταβολής της έντασης του μαγνητικού πεδίου στις σπείρες του πηνίου. Αξίζει, εδώ, να σημειωθεί, ότι για την εμφάνιση της τάσης δεν είναι αναγκαίο να υπάρχει πηνίο ή πλαίσιο με πολλές σπείρες. Το μόνο που χρειάζεται είναι να μεταβληθεί η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει ο αγωγός, οπότε και θα έχουμε τάση εξ επαγωγής στα άκρα του αγωγού. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι :



“η μεταβολή με οποιονδήποτε τρόπο της μαγνητικής ροής που περνά από τις σπείρες του πηνίου προκαλεί σ' αυτό ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης, η οποία διαρκεί τόσο χρόνο όσο και η μεταβολή της μαγνητικής ροής”. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή** ή **τάση εξ επαγωγής**.

Η μεταβολή με οποιονδήποτε τρόπο της μαγνητικής ροής που περνά από τις σπείρες του πηνίου προκαλεί σ' αυτό ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης, η οποία διαρκεί τόσο χρόνο όσο και η μεταβολή της μαγνητικής ροής

4.5 Επίλογος

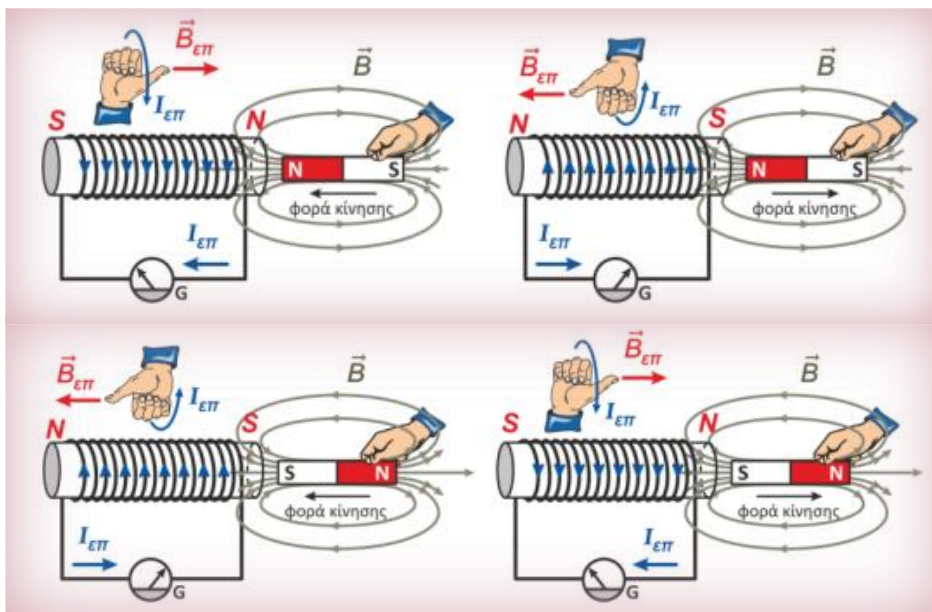
Εν κατακλείδι, με όλα τα παραπάνω πειράματα αποδείχθηκε ότι :

- i. μεταβολή μαγνητικού πεδίου, προκαλεί εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης,
- ii. μεγαλύτερος ρυθμός μεταβολής μαγνητικού πεδίου – απότομη μετακίνηση του μαγνήτη – προκαλεί μεγαλύτερη εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης,
- iii. μεταβολή του αριθμού των τυλιγμάτων του πηνίου, προκαλεί ανάλογη μεταβολή της επαγόμενης ηλεκτρικής τάσης,
- iv. επιβεβαίωση του νόμου του Lenz, αφού η τάση που επάγεται αντιτίθεται στη μεταβολή της κατάστασης του πηνίου,
- v. αν χρησιμοποιούσαμε ισχυρότερο μαγνήτη, θα παρατηρούσαμε επίσης μεγαλύτερη τάση εξ επαγωγής, αφού το μαγνητικό πεδίο θα είχε μεγαλύτερη ένταση και οι δυναμικές του γραμμές θα ήταν πιο πυκνές.

Αν είναι να δώσουμε κάποιον ορισμό για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, μπορούμε να πούμε ότι:

“Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ονομάζεται το φαινόμενο της εμφάνισης τάσης στα άκρα κάποιου αγωγού, εξαιτίας της μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει αυτός”

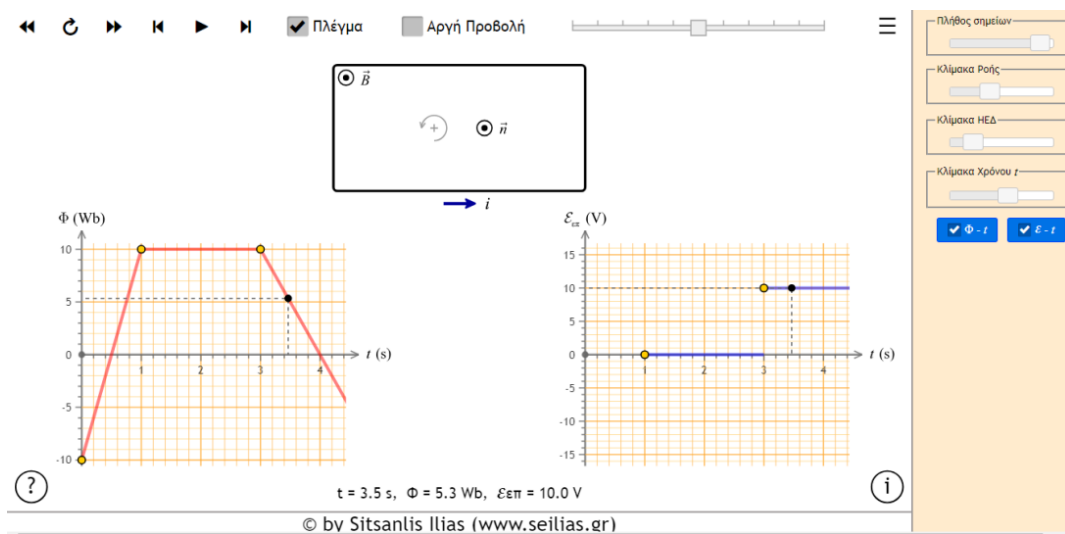
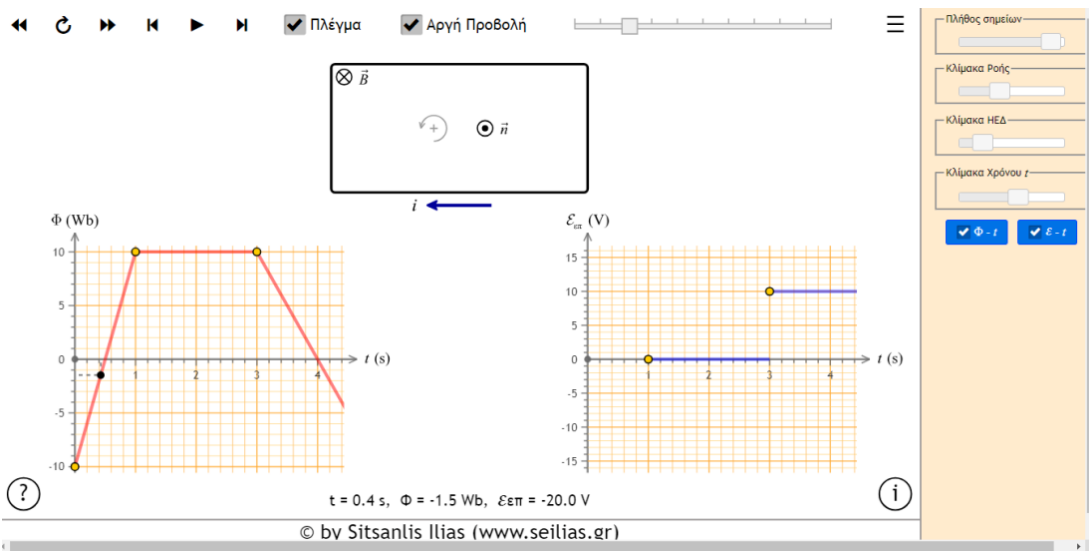
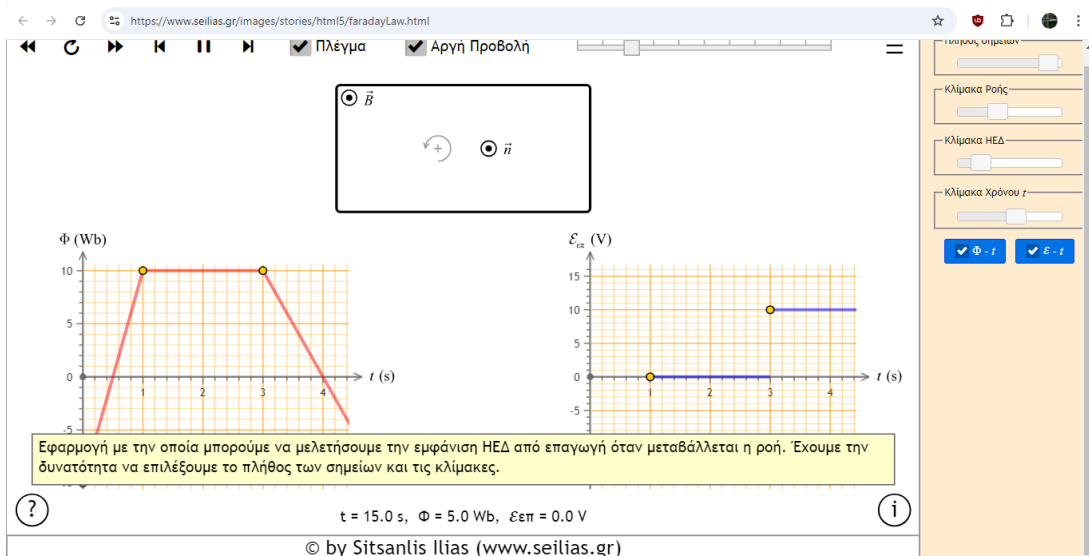
Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, με το παρακάτω σχέδιο, Σχ.4.2, μπορούμε να δούμε με μια εικόνα τα αποτελέσματα της μεταβολής της μαγνητικής ροής σ' ένα κλειστό κύκλωμα :



Σχήμα 4. 2: Σύνοψη περιγραφής φαινομένου Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και κανόνα του Lenz (Πηγή : [1])

ΥΠΟΣΗΜΕΙΩΣΗ : Μια επίσης πολύ καλή εφαρμογή σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι και αυτή του κυρίου Σιτσανλή Ηλία, με γραφική αναπαράσταση των μεταβλητών Φ και τάσης από επαγωγή, Σχ.4.3.

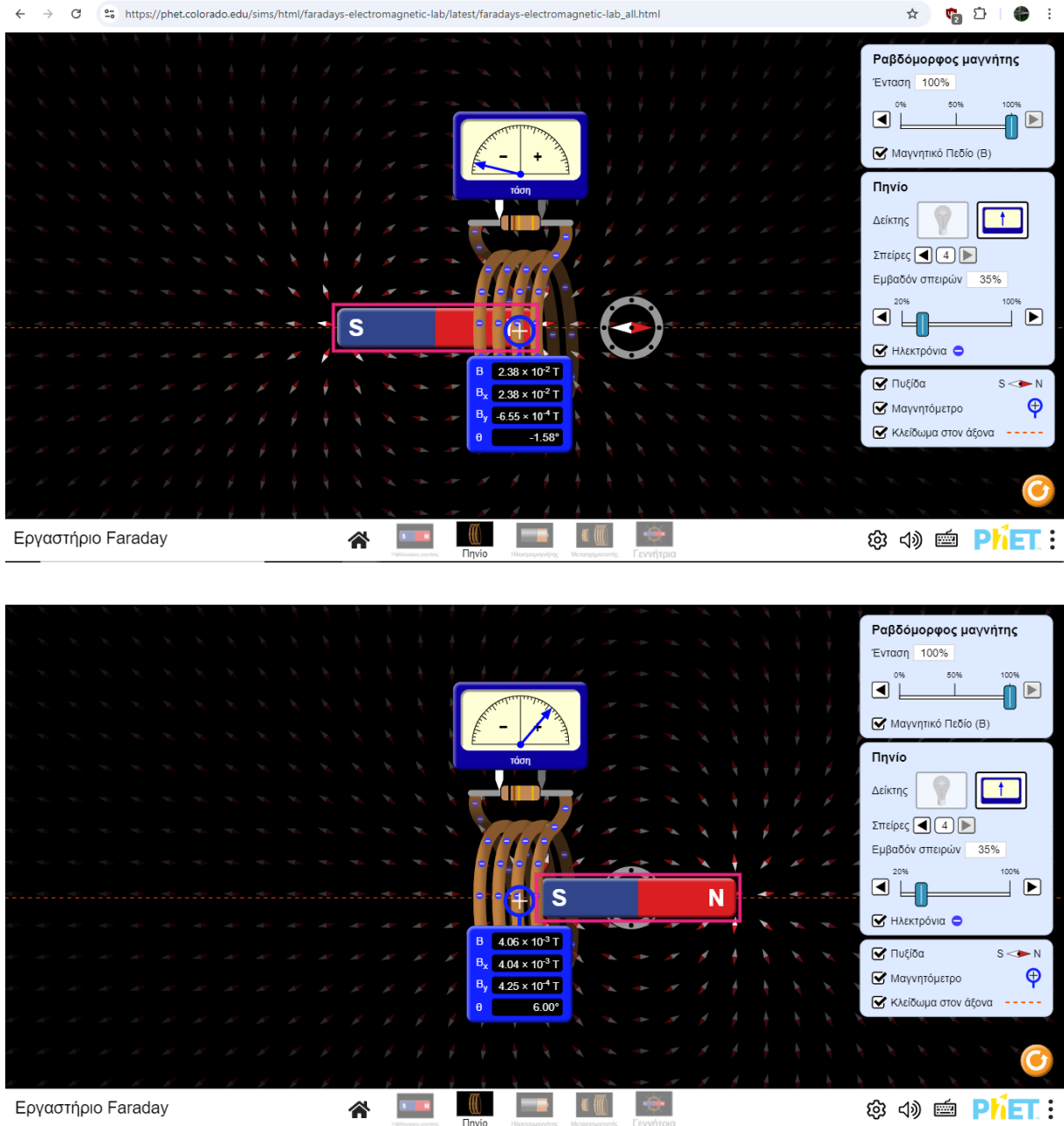
Την βρίσκουμε στον υπερσύνδεσμο <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/faradayLaw.html> [36], στην οποία μάλιστα μπορούμε να έχουμε και τις αριθμητικές τιμές των συσχετιζόμενων μεταβλητών για κάθε χρονική στιγμή. Οι τιμές που αποδίδονται γραφικά είναι συγκεκριμένες, δεν μπορούν να αλλαχθούν. Όπως μας ενημερώνει και η εφαρμογή, μπορούμε να επιλέξουμε το πλήθος των σημείων και τις κλίμακες χρόνου, ροής και επαγωγικής τάσης. Μερικά στιγμιότυπα οθόνης παρατίθενται παρακάτω :



Σχήμα 4. 3: Περιβάλλον προσομοίωσης φαινομένων Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής και κανόνα του Lenz by Sitsanlis Ilias (Πηγή : [36])

Κεφάλαιο 4

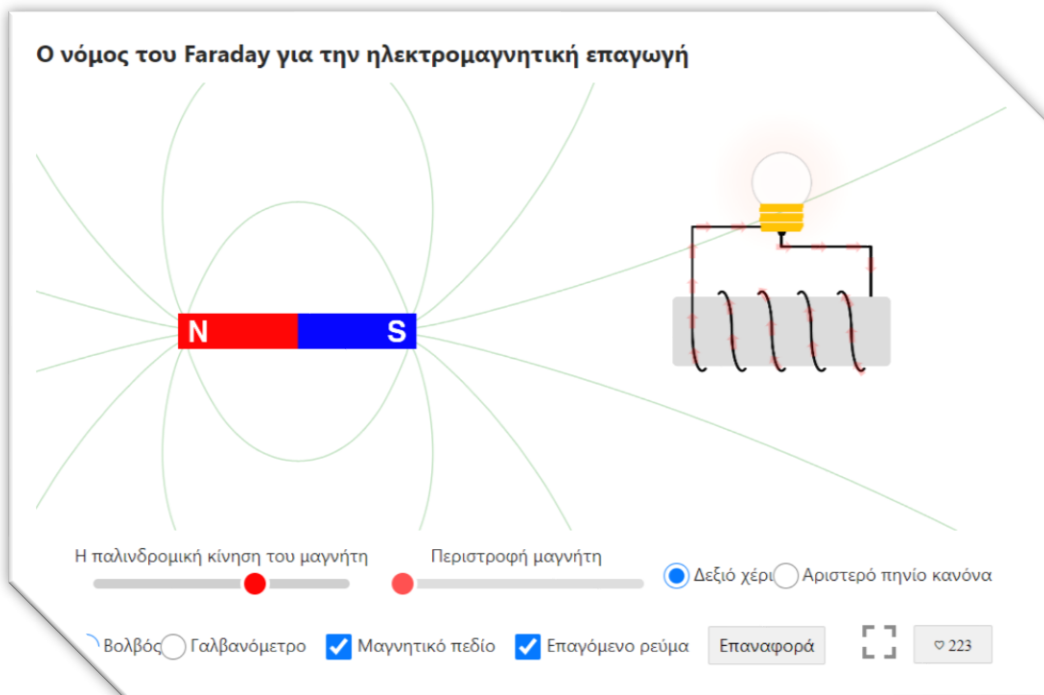
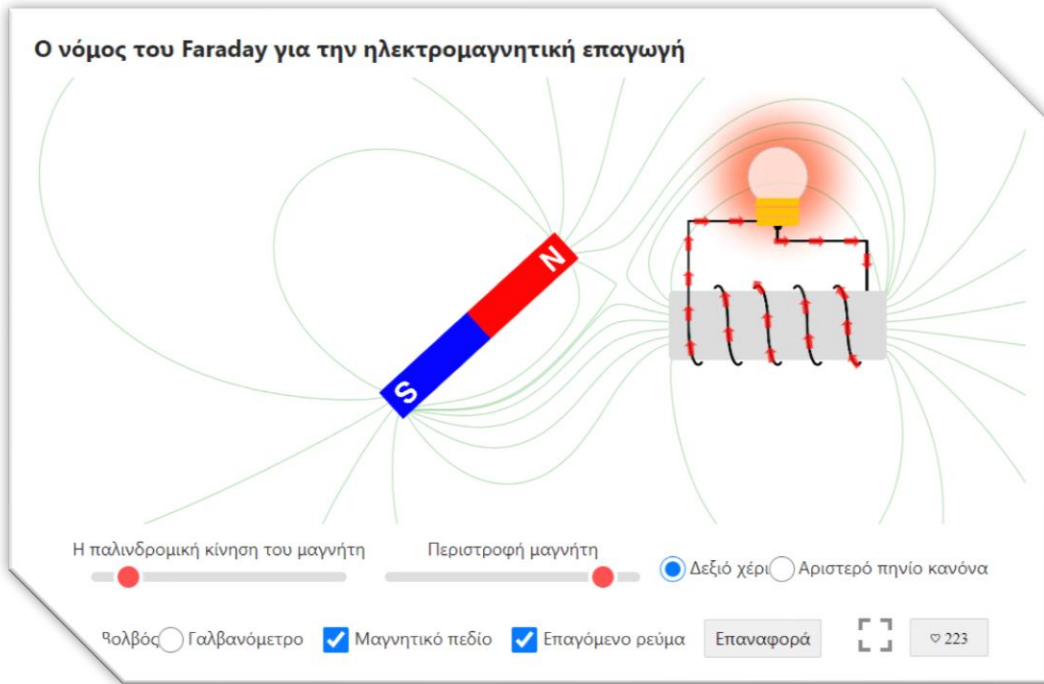
Υπάρχει και μια ακόμη πολύ ενδιαφέρουσα προσομοίωση, Σχ.4.4 που την απαντάμε στον υπερσύνδεσμο https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-electromagnetic-lab/latest/faradays-electromagnetic-lab_all.html [37], όπου μας δίνεται η δυνατότητα να δούμε και να διαμορφώσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου, να μεταβάλλουμε τον αριθμό και το εμβαδό των σπειρών του πηνίου, καθώς και να οπτικοποιήσουμε το επαγόμενο ρεύμα είτε με λαμπτήρα είτε με γαλβανόμετρο, χωρίς, όμως, να έχουμε ενδεικτική τιμή αυτής και της επαγόμενης τάσης. Σχετικά στιγμιότυπα οθόνης και γι' αυτή την εφαρμογή δίνονται παρακάτω :



Σχήμα 4. 4: Περιβάλλον προσομοίωσης Εργαστήριο Faraday από το phet colorado (Πηγή : [37])

Τέλος, για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και το νόμο του Faraday, είναι διαθέσιμη και μια τελευταία ίσως προσομοίωση, που μας παρουσιάζει το φαινόμενο, ανάλογα με τις ρυθμίσεις που κάνουμε, χωρίς εμείς να χρειάζεται να μετακινούμε το μαγνήτη.

Η ιστοσελίδα της βρίσκεται στη διεύθυνση https://javalab.org/en/faradays_law_en/ [38] και αντίστοιχες εικόνες φαίνονται στην επόμενη σελίδα, Σχ.4.5:



Σχήμα 4. 5: Περιβάλλον προσομοίωσης νόμου Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (Πηγή : [38])

Η μετακίνηση του μαγνήτη γύρω από τον επαγωγέα θα αλλάξει το μαγνητικό του πεδίο, το οποίο θα προκαλέσει τη ροή του ρεύματος μέσω του. Το επαγόμενο ρεύμα ρέει όταν ο μαγνήτης κινείται και το μαγνητικό πεδίο αλλάζει. Όταν ο μαγνήτης σταματά, το μαγνητικό πεδίο δεν ρέει. Η ένταση του επαγόμενου ρεύματος είναι ανάλογη με το μέγεθος της αλλαγής στο μαγνητικό πεδίο.

Μέσα στο πηνίο, προκαλείται ένα μαγνητικό πεδίο που εμποδίζει την κίνηση του μαγνήτη. Επομένως, όταν ο μαγνήτης πλησιάζει ή απομακρύνεται, η κατεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος αντιστρέφεται.

Κεφάλαιο 5ο : Δύναμη Laplace

5.1 Εισαγωγή

Κατά αναλογία με το προηγούμενο κεφάλαιο, στο παρόν θα αποδειχθεί η εμφάνιση της δύναμης Laplace, το θεωρητικό υπόβαθρο της οποίας παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.8, με τη βοήθεια προγραμμάτων προσομοίωσης, τα οποία, στο πειραματικό μέρος, θα επαναληφθούν με πειραματικές διατάξεις – κατασκευές.

Με τον τρόπο αυτό, θα γίνει καλύτερα αντιληπτό το φαινόμενο και θα αποσαφηνιστούν τυχόν απορίες. Μέσω της προσομοίωσης, θα επαληθευτεί η εμφάνιση της δύναμης αυτής και η ποσότητά της, καθώς και η εξάρτησή της με τις ανεξάρτητες μεταβλητές που την επηρεάζουν.

Τέλος, θα επιβεβαιωθεί και ο κανόνας του δεξιού χεριού, με τον οποίο βρίσκουμε τη διεύθυνση και τη φορά της προκύπτουσας δύναμης, παρέχοντάς μας τη δυνατότητα να τη χρησιμοποιήσουμε σε πολλές εφαρμογές.

5.2 Δύναμη Lorentz (Ηλεκτρομαγνητική ταλάντευση)

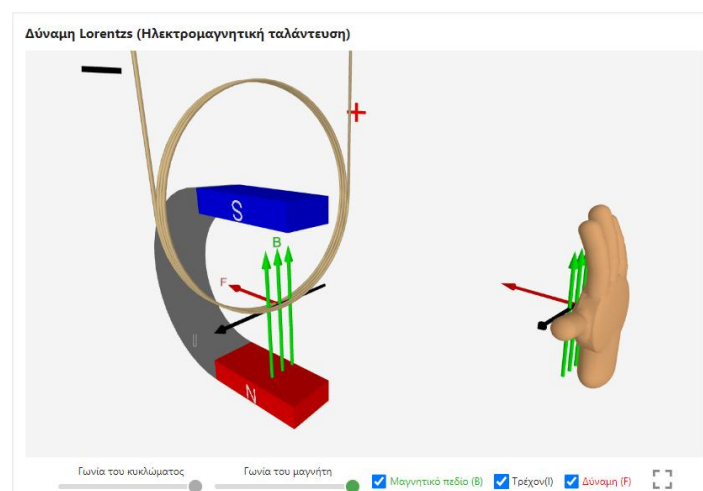
Με τη βοήθεια της προσομοίωσης αυτής θα δούμε την κατεύθυνση της δύναμης Lorentz, Σχ.5.1. Την βρίσκουμε στο διαδίκτυο στην διεύθυνση https://javalab.org/en/lorentzs_force_3d_en/ [39].

Είδαμε, ότι η δύναμη Laplace είναι η συνισταμένη των δυνάμεων Lorentz, όπου όταν ένα ρεύμα ρέει μέσω ενός αγωγού τοποθετημένου σε μαγνητικό πεδίο, ο αγωγός αναγκάζεται να κινηθεί. Η κατεύθυνση αυτής της δύναμης είναι κάθετη στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο.

Για να βρούμε την κατεύθυνση αυτή, ακολουθούμε την εξής διαδικασία :

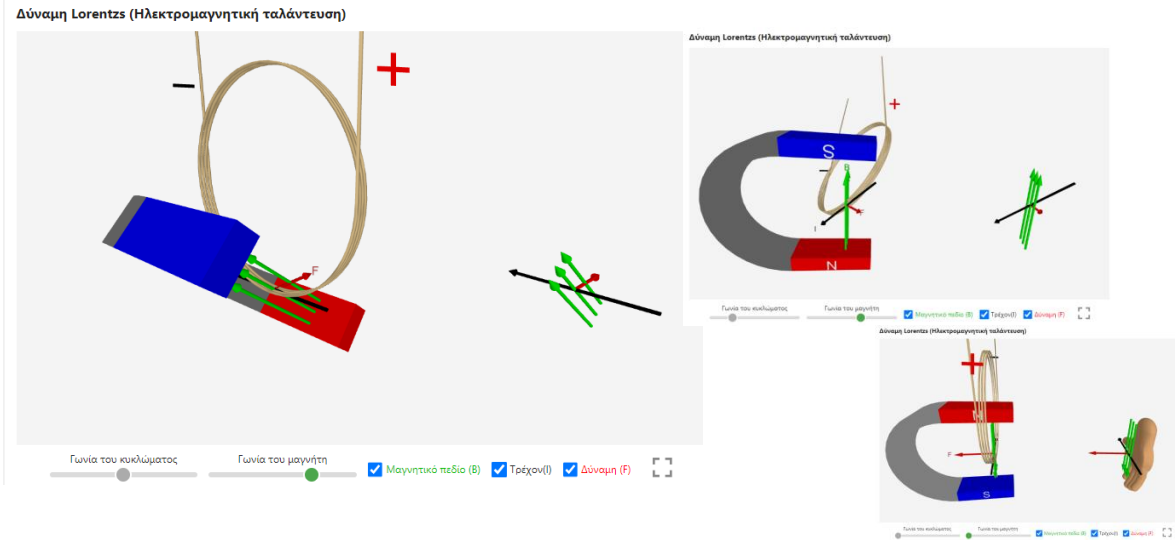
- Χρησιμοποιώντας το δεξί μας χέρι και ανοίγοντάς το, αντιστοιχίζουμε την κατεύθυνση των δακτύλων μας με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου,
- ταιριάζουμε τον αντίχειρά μας με την κατεύθυνση του ρεύματος και
- αυτή τη στιγμή, η κατεύθυνση έξω από την παλάμη μας είναι η κατεύθυνση της δύναμης.

Δίνοντας μερικές αντιπροσωπευτικές εικόνες της εν λόγω προσομοίωσης, μπορεί να γίνει αντιληπτή η χρησιμότητά της.



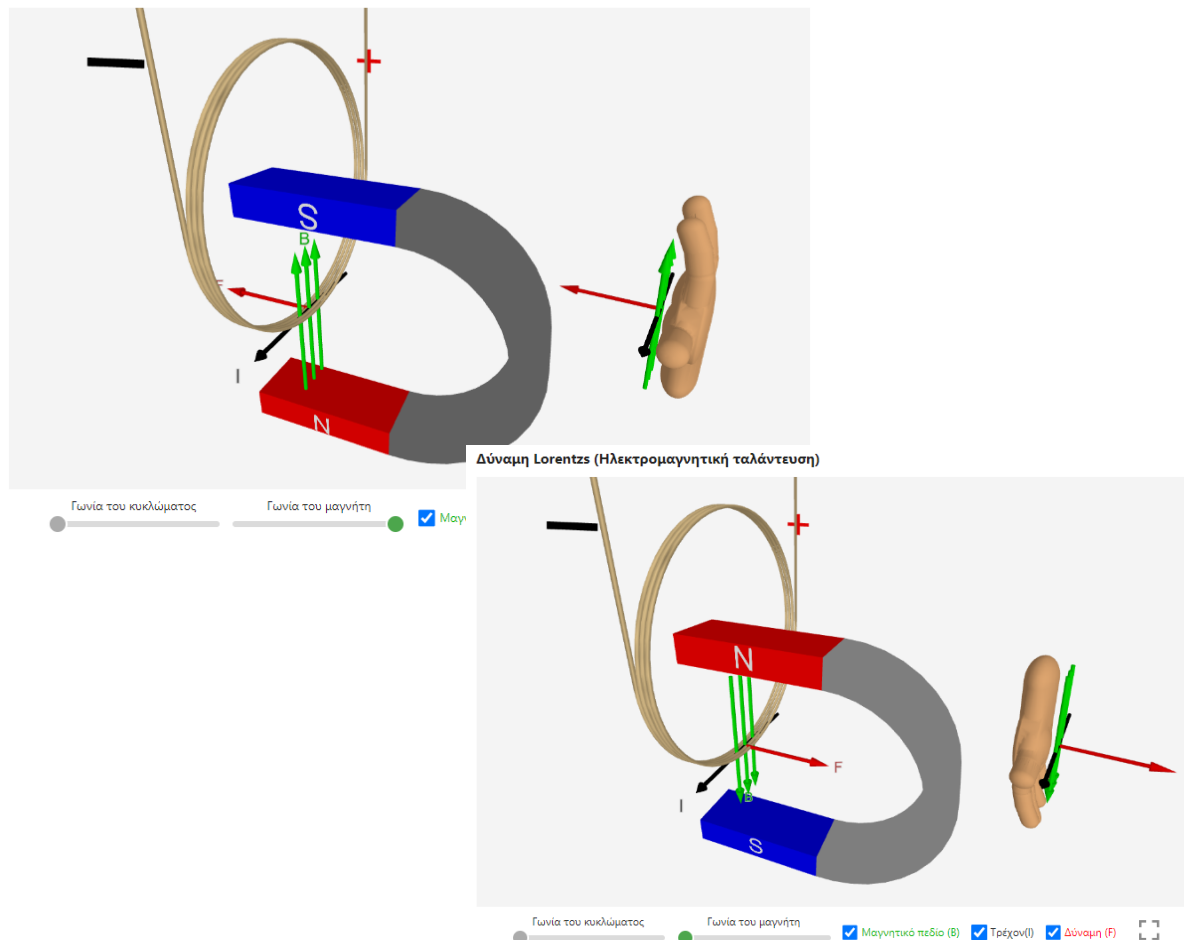
Σχήμα 5. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Lorentz (Πηγή : [39])

Όπως φαίνεται, το μόνο που μπορούμε να μεταβάλλουμε είναι στην ουσία η σχετική γωνία του σημειακού φορτίου με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές και να παρακολουθήσουμε την επίδρασή της στο μέτρο και την κατεύθυνση της δύναμης Lorentz.



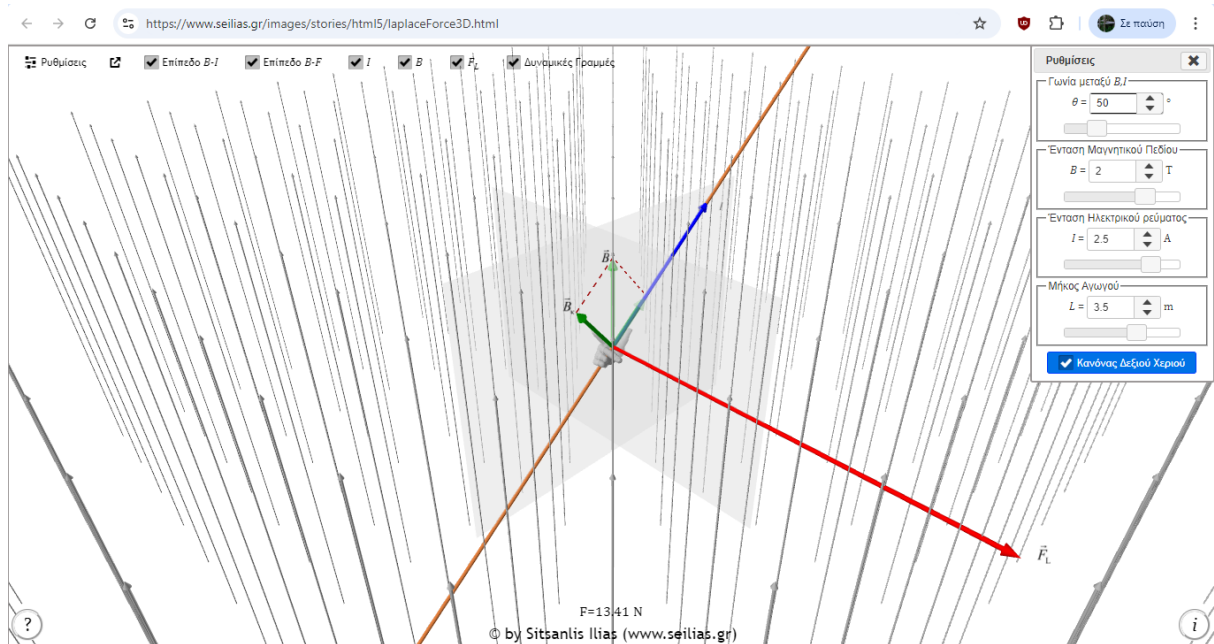
Η δύναμη Lorentz είναι ανάλογη με την ισχύ του ρεύματος και του γύρω μαγνητικού πεδίου, μεγέθη που παραμένουν σταθερά στην εφαρμογή αυτή. Αν η κατεύθυνση του ρεύματος είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο, είναι η ισχυρότερη. Εάν η κατεύθυνση του ρεύματος είναι παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο, η δύναμη Lorentz είναι μηδέν. Αλλάζοντας, επομένως, τη μεταξύ τους γωνία, κατανοούμε και τον τρόπο μεταβολής της ασκούμενης δύναμης.

Δύναμη Lorentz (Ηλεκτρομαγνητική ταλάντευση)



5.3 Δύναμη Laplace

Μια από τις καλύτερες εφαρμογές προσομοίωσης, προσφέροντας ακριβείς υπολογισμούς και ολοκληρωμένη ανάλυση της δύναμης του Laplace, ενσωματώνοντας παράλληλα όλους τους παράγοντες που την επηρεάζουν και παρέχοντας αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι αυτή του κυρίου Σιτσανλή Ηλία, στον υπερσύνδεσμο <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/laplaceForce3D.html> [40], Σχ.5.2. Είναι πολύ φιλική προς τους χρήστες και ιδανική για την περιγραφή και ανάλυση του φαινομένου αυτού. Στη συνέχεια, γίνεται μια παρουσίαση των επιλογών που διαθέτει.



Σχήμα 5. 2: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Laplace (Πηγή : [40])

- Πατώντας το ερωτηματικό παρέχεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο και βοήθεια για τον τρόπο χρήσης της.

Βοήθεια

Κάνε κλικ και σύρε για να έχεις μια διαφορετική γωνία θέασης. Με την ροδέλα στο ποντίκι μπορείς να μεγεθύνεις την εικόνα.

Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο τότε δέχεται δύναμη η οποία ονομάζεται δύναμη Laplace. Αν υποθέσουμε πως αγωγός είναι ευθύγραμμος μήκους ℓ και σε κάθε σημείο του αγωγού η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερή και το μέτρος της ίσο με B τότε το μέτρο της δύναμης που δέχεται ο αγωγός είναι

$$F_L = I\ell B \eta \mu \theta$$

όπου θ η γωνία μεταξύ της έντασης του ρεύματος και της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Η δύναμη είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν η ένταση του μαγνητικού πεδίου και ο αγωγός.



Η δύναμη είναι μέγιστη είναι όταν ο αγωγός είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο ($\theta = 90^\circ$)

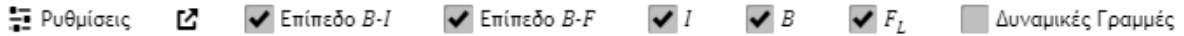
$$F_{Lmax} = I\ell B$$

και μηδενική όταν ο αγωγός είναι παράλληλος με την ένταση του μαγνητικού πεδίου ($\theta = 0^\circ$ ή $\theta = 180^\circ$).

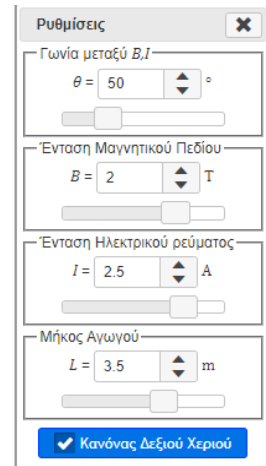
Η φορά της δύναμης βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Αν τοποθετήσουμε τα δάκτυλά του δεξιού μας χεριού όπως φαίνεται στο σχήμα με τον αντίχειρα να αντιστοιχεί στην φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, τον δείκτη την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου τότε ο μέσος μας δείχνει την κατεύθυνση της δύναμης. F (μέσος)- B (δείκτης)- I (αντίχειρας).

Ok

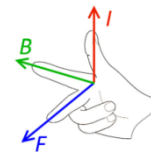
- Στο πάνω αριστερά μέρος, έχουμε τη δυνατότητα:
 - α. να εμφανίσουμε τις ρυθμίσεις ( Ρυθμίσεις),
 - β. να πάμε σε πλήρη οθόνη (),
 - γ. να εμφανίσουμε ή να αποκρύψουμε τα επίπεδα B-I και B-F (Επίπεδο B-I Επίπεδο B-F), καθώς και τα διανύσματα I, B και F (I B F_L), επιλέγοντας τα αντίστοιχα τετράγωνα και τέλος, με τον ίδιο τρόπο,
 - δ. να δείξουμε ή όχι την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών (Δυναμικές Γραμμές).



- Επιλέγοντας τις Ρυθμίσεις, εμφανίζεται ένα άλλο παράθυρο επιλογής, απ' όπου μπορούμε να μεταβάλλουμε όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν το μέτρο και τη φορά της δύναμης Laplace, καθώς και να παρουσιάσουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού. Έτσι, αυξομειώνοντας κάθε φορά έναν από τους παράγοντες αυτούς και διατηρώντας τους υπόλοιπους σταθερούς, παρατηρούμε την επίδραση των αλλαγών στη δύναμη F_L. Στη συνέχεια, μεταφέροντας τις τιμές σε ένα υπολογιστικό φύλλο, θα μπορούσαμε να χαράζουμε τις χαρακτηριστικές της F_L για καθεμία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές της. Η γωνία θ μεταβάλλεται από 0° έως και 180°, η ένταση B του μαγνητικού πεδίου και I του ηλεκτρικού ρεύματος από -5 έως +5 σε Tesla και Ampere, ενώ το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού από 1 έως 5 μέτρα.



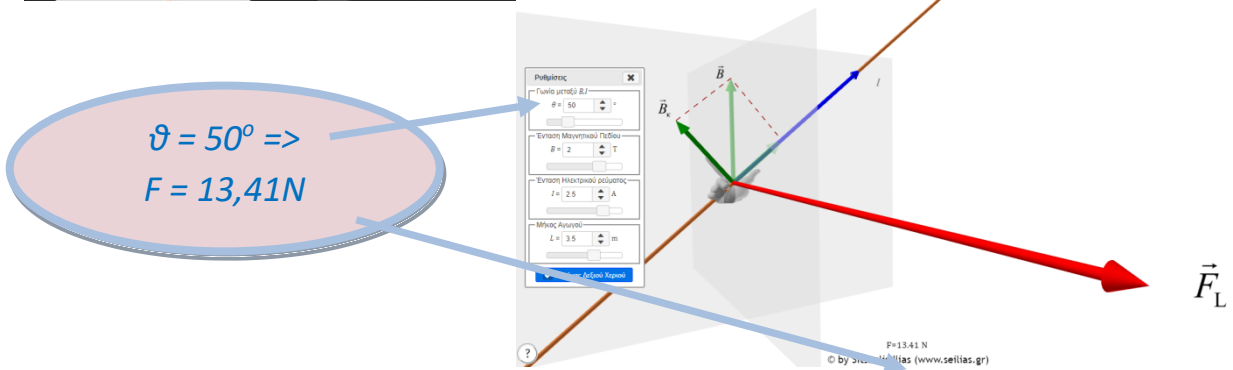
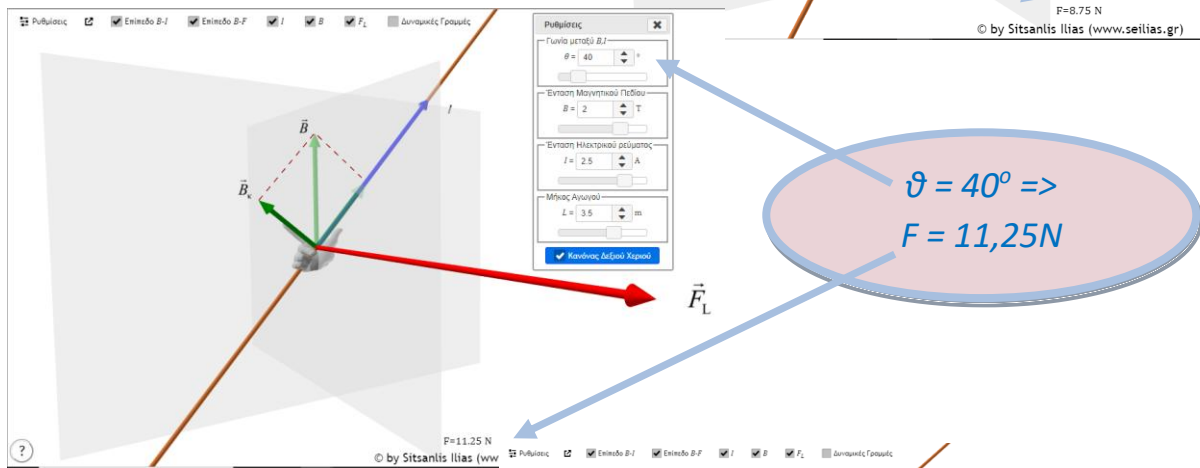
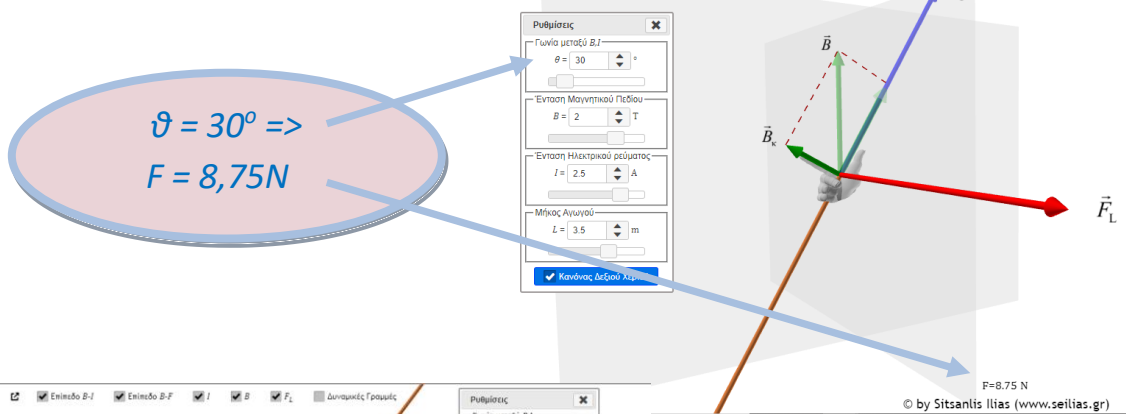
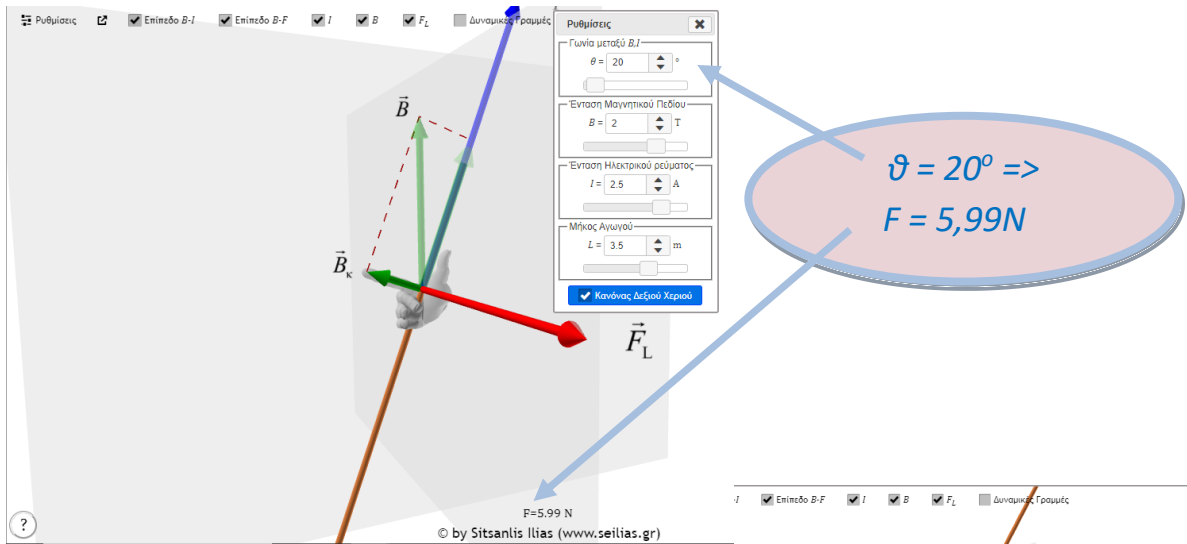
- Ενδεικτικά, θα γίνει η προσομοίωση διατηρώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές εκτός από τη γωνία μεταξύ B και I, η οποία θα παίρνει διάφορες τιμές μέσα στο εύρος τιμών της. Έτσι, για τιμές B = 2T, I = 2,5A και L = 3,5m, μεταβάλλοντας την τιμή της γωνίας ανά 10° κάθε φορά, λαμβάνουμε τα εξής στιγμιότυπα και αποτελέσματα:



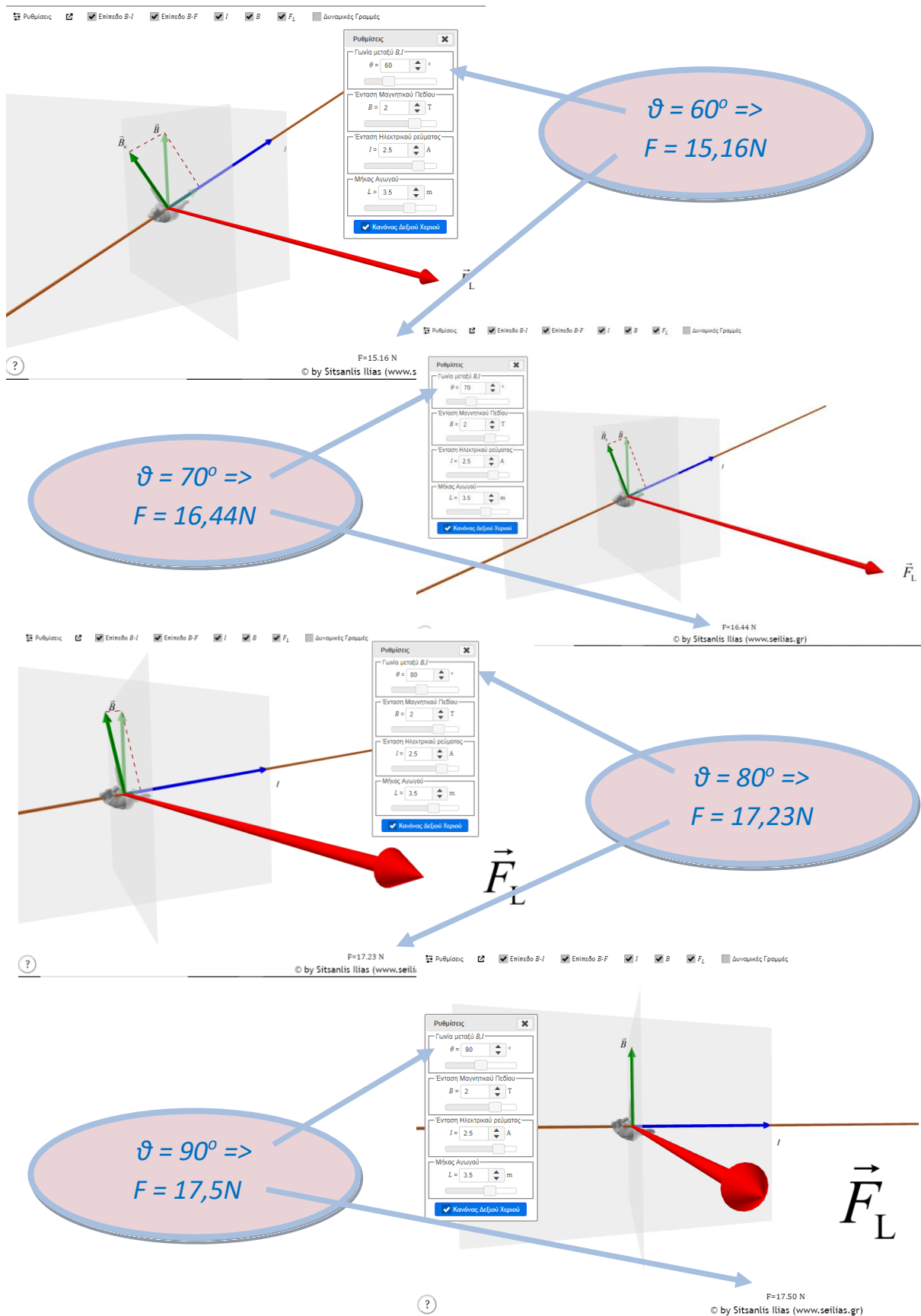
© by Sitsanlis Ilias (www.setlias.gr)

$\theta = 0^\circ \Rightarrow F = 0N$

$\theta = 10^\circ \Rightarrow F = 3,04N$

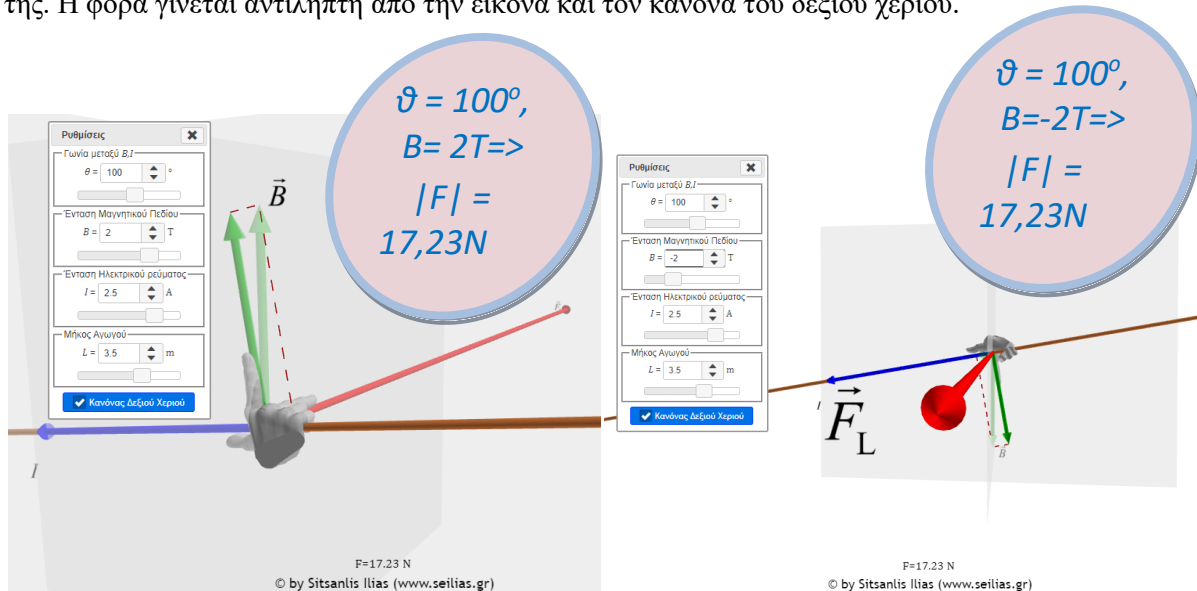


Κεφάλαιο 5



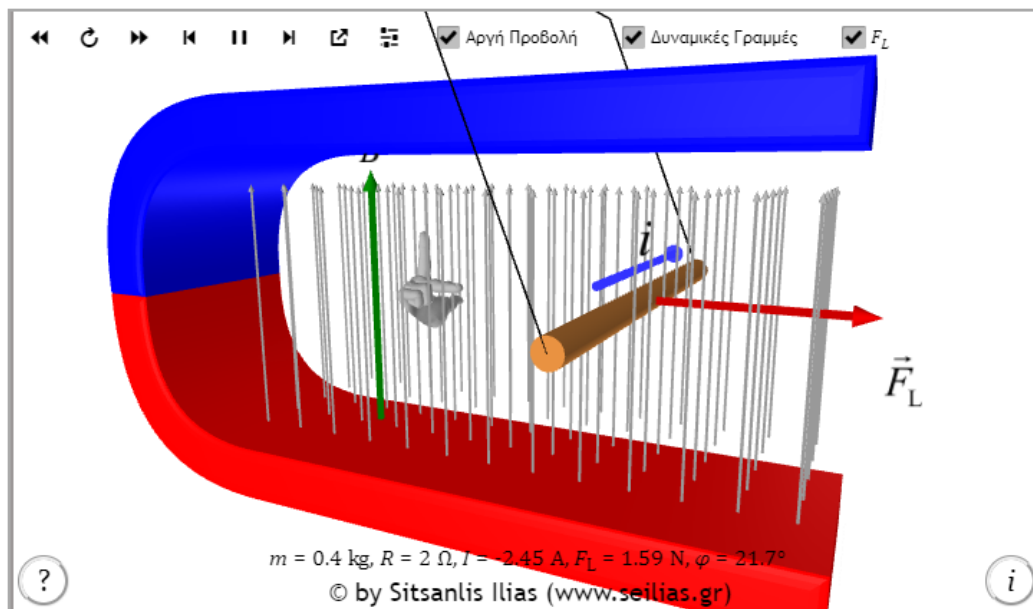
Συνεχίζοντας την αύξηση της γωνίας ανά 10° μέχρι τις 180° , βλέπουμε την τιμή της δύναμης να μειώνεται σταδιακά και να παίρνει τις ίδιες τιμές που είχε με τις αντίστοιχες των παραπληρωματικών τους γωνιών.

Αν ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία, μεταβάλλοντας ένα πάντα μέγεθος και διατηρώντας τα υπόλοιπα σταθερά, επαληθεύουμε την εξίσωση της δύναμης Laplace, καθώς και τον κανόνα του δεξιού χεριού. Ενδεικτικά πάλι, παρουσιάζονται δύο οπτικοποιήσεις με γωνία 100° , απλά στη δεύτερη περίπτωση η ένταση B θα πάρει αρνητική τιμή, αλλάζοντας έτσι και τη φορά της δύναμης Laplace. Στην προσομοίωση, αναγράφεται μόνο το μέτρο της δύναμης, χωρίς πρόσημο, με την απόλυτη τιμή της. Η φορά γίνεται αντιληπτή από την εικόνα και τον κανόνα του δεξιού χεριού.



5.4 Δύναμη Laplace και ισορροπία

Μια παραλλαγή της παραπάνω προσομοίωσης, από τον ίδιο πάλι δημιουργό βρίσκεται στην ιστοσελίδα <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/laplaceForce3D-2.html> [41].

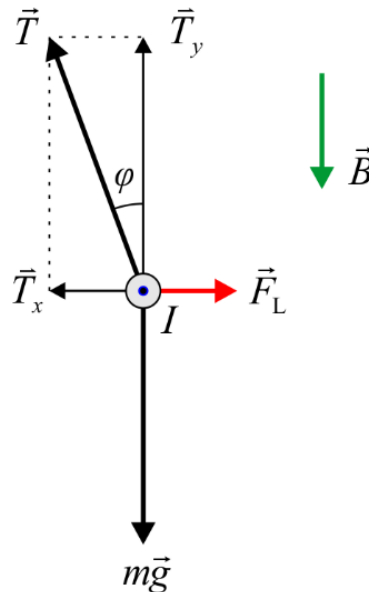


Σχήμα 5. 3: Περιβάλλον προσομοίωσης δύναμης Laplace και ισορροπία (Πηγή : [41])

Στον ιστότοπο αυτό, παρουσιάζεται το φαινόμενο της εμφάνισής της και της επίδρασής της σε ρευματοφόρο αγωγό με τη μορφή κινούμενης εικόνας, βίντεο, μέχρι τη στιγμή που θα επέλθει ισορροπία. Έτσι, σύμφωνα και με τα λεγόμενα του εμπνευστή της, κ. Σιτσανλή Ηλία :

" Με την συγκεκριμένη προσομοίωση μπορούμε να μελετήσουμε την δύναμη Laplace και την ισορροπία ενός αγωγού όταν βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο και σε πεδίο βαρύτητας. Έχουμε την δυνατότητα να μεταβάλλουμε την ένταση του μαγνητικού, την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής και το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Η Μάζα του αγωγού είναι 0.4 kg και η ολική αντίσταση του κυκλώματος 2 Ω. " [41]

Όταν ο αγωγός, λοιπόν, βρεθεί μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο θα δεχθεί δύναμη Laplace η οποία θα τον αναγκάσει να κινηθεί και τελικά να ισορροπήσει σε μια συγκεκριμένη θέση. Η τάση T του νήματος μαζί με το βάρος και την δύναμη Laplace θα πρέπει να έχουν συνισταμένη μηδέν για να εξασφαλίζεται η ισορροπία.



Από την ισορροπία στην οποία καταλήγει ο αγωγός, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_L + (-T_x) = 0 \Rightarrow F_L - T \cdot \sin \varphi = 0 \Rightarrow T \sin \varphi = B \cdot I \cdot L$$

και
$$\sum F_y = 0 \Rightarrow T_y + (-mg) = 0 \Rightarrow T \cdot \cos \varphi = mg$$

Διαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις κατά μέλη και εφαρμόζοντας και το νόμο του Ωμ :

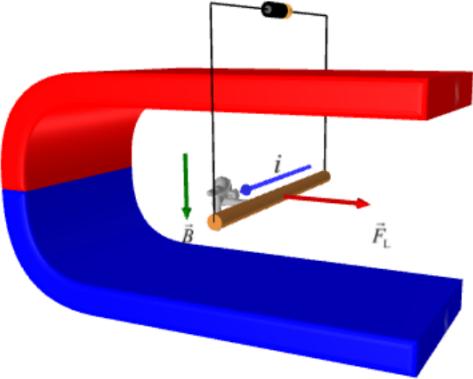
$$\frac{T \sin \varphi}{T \cos \varphi} = \frac{BIL}{mg} \xrightarrow{I=E/R} \tan \varphi = \frac{BEL}{mgR}$$

Αν, για παράδειγμα, έχουμε τις τιμές E=6V , L=1m, B=0,5T, m=0,4Kg, g=10m/s², R=2Ω , η γωνία όπου θα ισορροπούσε ο αγωγός θα ήταν:

$$\tan \varphi = \frac{BEL}{mgR} = \frac{0,5T \cdot 6V \cdot 1m}{0,4Kg \cdot 10m/s^2 \cdot 2\Omega} = \frac{3}{8} = 0,375 \Rightarrow \varphi = 20,6^\circ$$

Αργή Προβολή Δυναμικές Γραμμές F_L

Αρχική κατάσταση, χωρίς εφαρμογή τάσης, με $\varphi=0^\circ$



Ρυθμίσεις

Ένταση Μαγνητικού Πεδίου
 $B = 0.5$ T

ΗΕΔ
 $\mathcal{E} = 6$ V

Μήκος Αγωγού
 $L = 1$ m

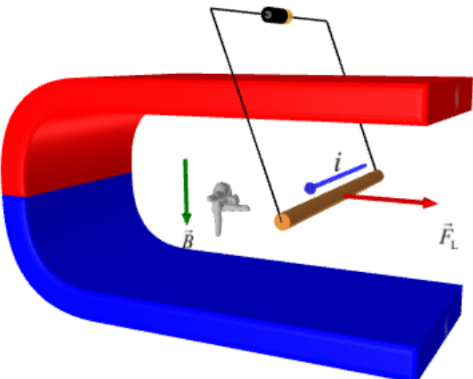
Κανόνας Δεξιού Χεριού

Κλίμακα Διαγραμμάτων

$m = 0.4 \text{ kg}, R = 2 \ \Omega, I = 3 \text{ A}, F_L = 1.5 \text{ N}, \varphi = 0^\circ$
 © by Sitsanlis Ilias (www.seilias.gr)

Αργή Προβολή Δυναμικές Γραμμές F_L

Τελική κατάσταση ισορροπίας, με εφαρμογή τάσης και $\varphi=20,6^\circ$



Ρυθμίσεις

Ένταση Μαγνητικού Πεδίου
 $B = 0.5$ T

ΗΕΔ
 $\mathcal{E} = 6$ V

Μήκος Αγωγού
 $L = 1$ m

Κανόνας Δεξιού Χεριού

Κλίμακα Διαγραμμάτων

$m = 0.4 \text{ kg}, R = 2 \ \Omega, I = 3 \text{ A}, F_L = 1.5 \text{ N}, \varphi = 20.6^\circ$
 © by Sitsanlis Ilias (www.seilias.gr)

5.5 Επίλογος

Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι το μέτρο της δύναμης που δέχεται ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός, κάθετος μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο 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:

$$|\vec{F}_L| = |\vec{B}| \cdot I \cdot L$$

Η δύναμη Laplace βρίσκεται σε πολλές εφαρμογές της καθημερινότητας, κυρίως στους ηλεκτροκινητήρες και τις γεννήτριες, αφού χάρη σε αυτή γίνεται η παραγωγή του εναλλασσομένου ρεύματος.

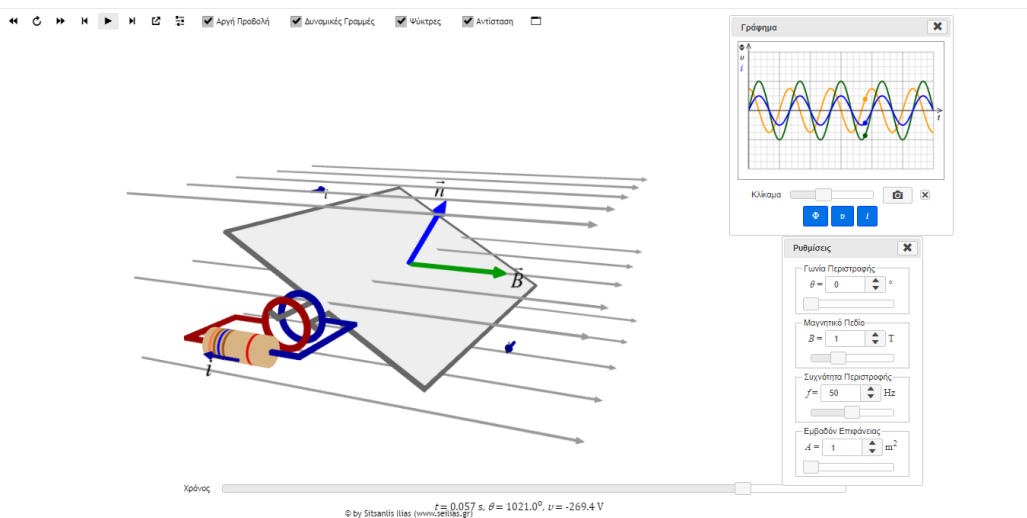
Κεφάλαιο 6ο : Παραγωγή εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης

6.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα 3.3 του αντίστοιχου κεφαλαίου έγινε αναφορά και περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής τόσο της εναλλασσόμενης τάσης όσο και της συνεχούς. Επειδή στις πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν υπάρχουν και για την παραγωγή της εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης - γεννήτριες, στο παρόν κεφάλαιο θα προσομοιωθεί ο τρόπος δημιουργίας τους με τη χρήση διαδικτυακών εφαρμογών. Και επειδή οι γεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν και ως κινητήρες, θα γίνει προσομοίωση και γι' αυτούς.

6.2 Γεννήτρια A.C.

Στην ιστοσελίδα <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/generator3D.html>, [42], μπορούμε να περιηγηθούμε σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης, όπου χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο, το οποίο περιστρέφεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, Σχ.6.1. Παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής των εμπλεκόμενων παραμέτρων, όπως τη γωνία και την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής θ και f αντίστοιχα, την ένταση του μαγνητικού πεδίου B μέσα στο οποίο βρίσκεται και περιστρέφεται το πλαίσιο, καθώς και το εμβαδόν A του πλαισίου. παρατηρούμε τις μεταβολές που προκύπτουν στη παραγόμενη τάση με τη μορφή βίντεο.



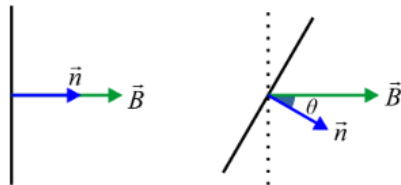
Σχήμα 6. 1: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C. seilias.gr (Πηγή : [42])

Είναι, επίσης, εφικτή η αναπαράσταση της κυματομορφής της τάσης u σε γράφημα, καθώς και της μαγνητικής ροής Φ και του ρεύματος i , εφόσον έχουμε επιλέξει από το μενού να συνδεθεί μια αντίσταση στα άκρα του περιστρεφόμενου πλαισίου.

Στο κάτω μέρος της προσομοίωσης, παρατηρούμε το χρόνο που διανύεται, τη γωνία περιστροφής και την τιμή της στιγμιαίας παραγόμενης τάσης.

Το διάνυσμα \vec{n} , είναι η κάθετη στο επίπεδο του πλαισίου γραμμή, της οποίας η γωνία που σχηματίζει με την ένταση B , είναι και αυτή που καθορίζει την τιμή της τάσης στα άκρα του πλαισίου, για δεδομένες τιμές έντασης \vec{B} και εμβαδού A . Η αλλαγή της γωνίας περιστροφής θ στο παράθυρο διαλόγου των ρυθμίσεων, στην ουσία αλλάζει τη χρονική στιγμή απ' όπου θα ξεκινήσει η χάραξη της κυματομορφής των μεταβλητών u , i και Φ σε γραφική παράσταση και αποτελεί την αρχική φάση.

Παρακάτω δίνεται μια κάτοψη του πλαισίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Φαίνονται καθαρά τόσο η κάθετη στο επίπεδο του πλαισίου διανυσματική γραμμή \vec{n} όσο και το διάνυσμα της έντασης \vec{B} , μαζί με τη περιεχόμενη σε αυτά τα διανύσματα γωνία θ .

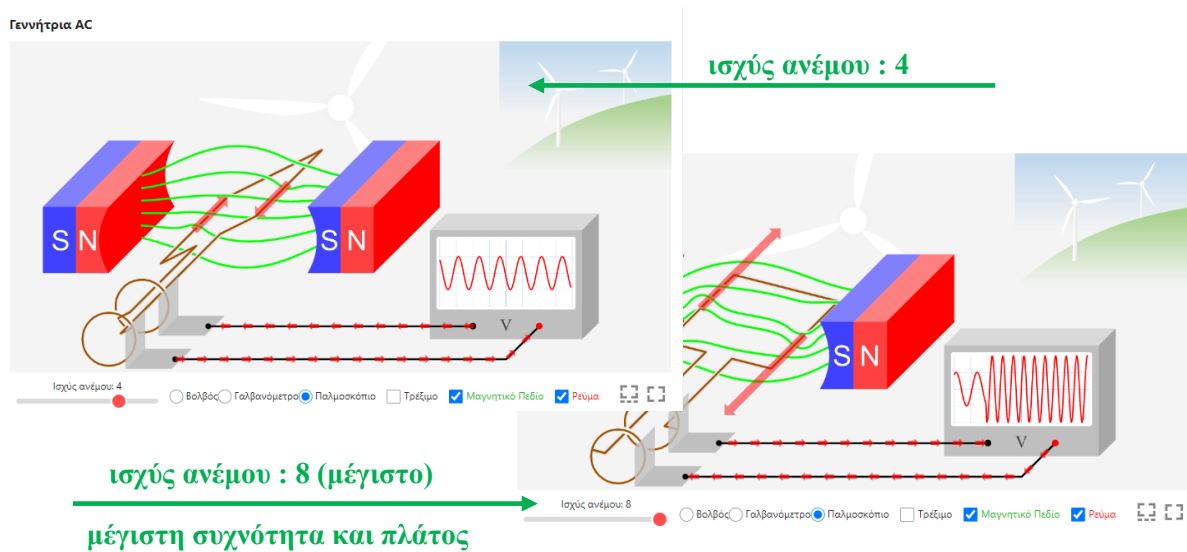


Κατά τα γνωστά, από τις υποενότητες 1.4, 2.4 και 2.5 της παρούσας εργασίας, μετά από χρονικό διάστημα t το πλαίσιο θα έχει περιστραφεί κατά γωνία $\theta = \omega t$, η ροή που θα διέρχεται από το πλαίσιο θα είναι ίση με $\Phi = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$ ή $\Phi = NBA \cos \theta = NBA \cos \omega t$, στην περίπτωση που θα έχουμε περισσότερα τυλίγματα στο πλαίσιο, οπότε η ηλεκτρεγερτική δύναμη που θα επάγεται υπολογίζεται από το Νόμο του Faraday $E_{επ} = -N\omega BA \sin \omega t$.

Η κατεύθυνση του διανύσματος n καθορίζει, σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, τη θετική φορά διαγραφής του πλαισίου. Όταν, λοιπόν, η ΗΕΔ από επαγωγή είναι θετική τότε η πηγή δίνει ρεύμα ομόρροπο με τη θετική φορά περιστροφής. Η τάση στα άκρα της αντίστασης (αν το πλαίσιο δεν παρουσιάζει αντίσταση) είναι $u = V \sin \omega t$, όπου $V = N\omega BA$. Η τελευταία εξίσωση μας πληροφορεί ότι η επαγωγική τάση στα άκρα του πλαισίου μεταβάλλεται αρμονικά με τον χρόνο. Είναι μια εναλλασσόμενη τάση με περίοδο $T = 2\pi/\omega$.

Αυξομειώνοντας κάθε φορά μία από τις ελεγχόμενες μεταβλητές και διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές, αντιλαμβανόμαστε ότι η τιμή της επαγόμενης τάσης είναι ανάλογη με όλες αυτές, ακολουθεί τον τρόπο μεταβολής τους. [42]

Μια ωραία, επίσης, προσομοίωση απαντάται στην https://javalab.org/en/ac_generator_en/ [43], όπου η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από ανεμογεννήτριες, η οποία περιστρέφει το πλαίσιο μέσα στο μαγνητικό πεδίο και παράγεται η εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του πλαισίου αυτού, Σχ.6.2. Η προσομοίωση αυτή είναι επίσης σε μορφή βίντεο :

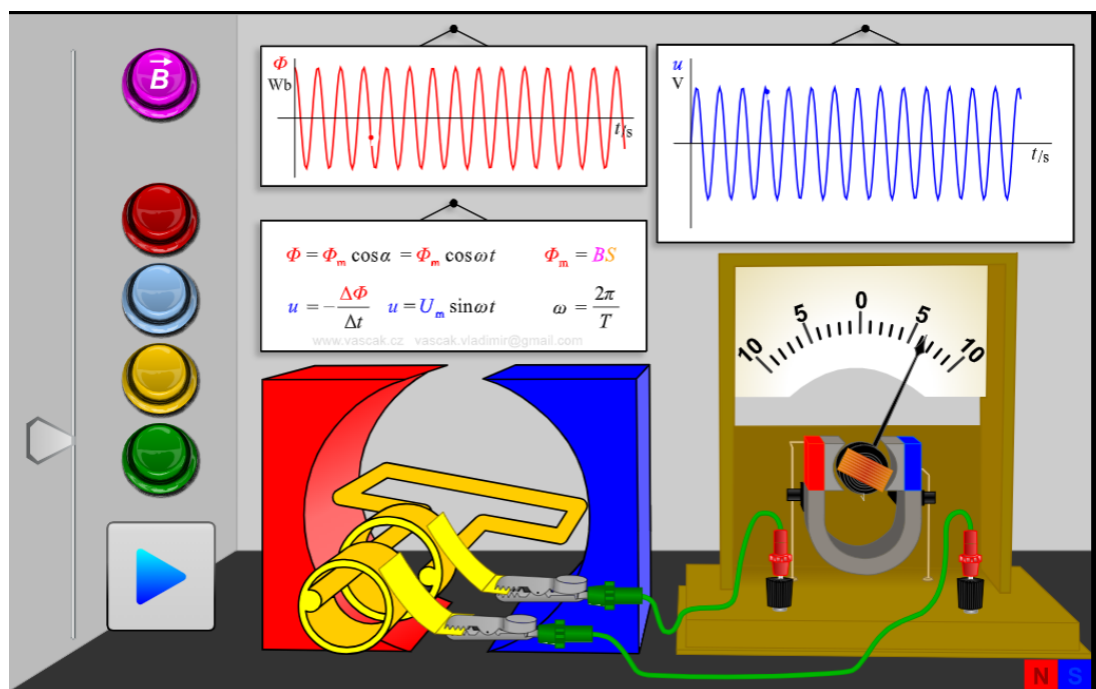


Σχήμα 6. 2: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C. javalab.org (Πηγή : [43])

Όπως διαπιστώνεται και από τα προηγούμενα στιγμιότυπα, η αλλαγή που μπορεί να κάνει ο χρήστης είναι στην ισχύ που δίνει η ανεμογεννήτρια, οπότε και η παραγόμενη τάση μεταβάλλεται

ανάλογα σε πλάτος, συχνότητα και φάση. Η απεικόνιση της τάσης αυτής γίνεται είτε με λαμπτήρα, που φωτοβολεί αναλόγως, είτε με γαλβανόμετρο, η βελόνα του οποίου κινείται με διαφορετική ταχύτητα αριστερά ή δεξιά, ακολουθώντας τη μεταβολή της τάσης, είτε με παλμογράφο. Δεν υπάρχει η δυνατότητα αποτύπωσης συγκεκριμένων αριθμητικών τιμών, οπότε τα εξαγόμενα συμπεράσματα προκύπτουν μόνο με την οπτική παρατήρηση των οργάνων ένδειξης συναρτήσει της μεταβολής στην ισχύ της ανεμογεννήτριας. Παρόλα ταύτα, γίνεται κατανοητός στο χρήστη ο τρόπος παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης.

Τέλος, Σχ.6,3, μια ακόμα εφαρμογή για απλή παρατήρηση της όλης παραπάνω διαδικασίας είναι η https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mag_alternator&l=gr [44] :



Σχήμα 6. 3: Παραπλήσιο περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας A.C. (Πηγή : [44])

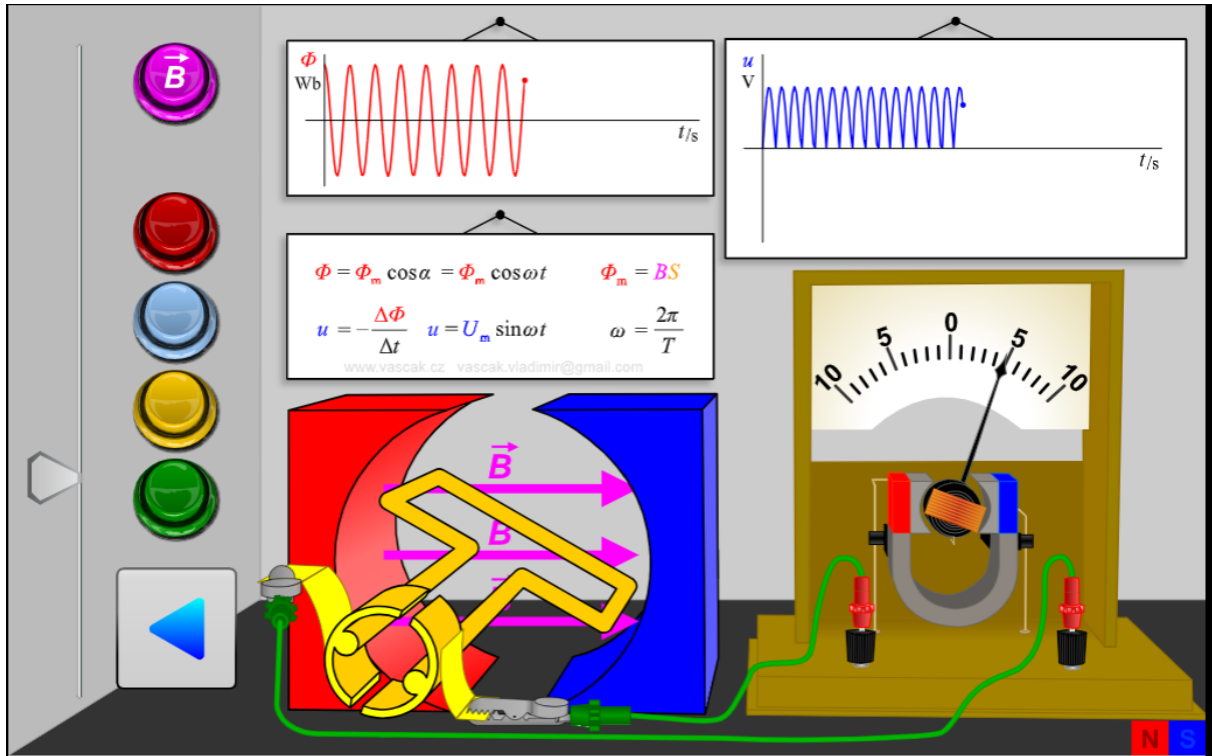
Βλέπουμε τις κυματομορφές μαγνητικής ροής Φ και επαγόμενης τάσης u , τις μαθηματικές εξισώσεις που συσχετίζουν τις δύο αυτές έννοιες, καθώς και την οθόνη ενός γαλβανόμετρου.

Στα αριστερά, υπάρχουν πέντε κουμπιά επιλογής : πατώντας το μωβ κουμπί, εμφανίζονται στην εικόνα οι δυναμικές μαγνητικές γραμμές και η φορά τους, το B δηλ, όπως αναγράφει και πάνω του το κουμπί. Με το κόκκινο κουμπί γίνεται αρχικοποίηση των μεταβλητών και μηδενισμός της διαδικασίας (Reset), ενώ με το γαλάζιο μπορούμε να βλέπουμε τις μεταβολές Φ και u σε αργή κίνηση, οπότε κάθε φορά που το πατάμε περιστρέφεται πολύ λίγο το πλαίσιο και αλλάζουν οι τιμές στις κυματομορφές και στο όργανο μέτρησης. Το κίτρινο κουμπί λειτουργεί σαν το Pause (και Continue) σε βίντεο ή μουσική, δηλ. γίνεται παύση εάν πατηθεί ενώ περιστρέφεται το πλαίσιο και αν ξαναπατηθεί, συνεχίζει να κινείται από το σημείο που είχε σταματήσει προηγουμένως. Τέλος, πατώντας το πράσινο κουμπί κάνουμε επανεκκίνηση της όλης διαδικασίας (Restart).

Με το γκρι βελάκι τέρμα αριστερά, έχουμε τη δυνατότητα να αυξήσουμε (μετακινώντας το προς τα κάτω) ή να μειώσουμε (πηγαίνοντας το προς τα πάνω) την ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου, άρα και της συχνότητας και πλάτους της επαγόμενης τάσης.

6.3 Γεννήτρια D.C.

Για την προσομοίωση της παραγωγής συνεχούς τάσης θα χρησιμοποιηθεί πάλι η ίδια ιστοσελίδα https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mag_alternator&l=gr [44], όπου πατώντας το τετράγωνο κουμπί με το μπλε βελάκι που δείχνει προς τα δεξιά, μεταφερόμαστε στη γεννήτρια DC, Σχ.6.4:



Σχήμα 6. 4: Περιβάλλον προσομοίωσης γεννήτριας D.C. (Πηγή : [44])

Γίνεται αντιληπτό ότι τα δύο δακτυλίδια που υπήρχαν για το AC έγιναν ένα και κομμένο στη μέση, οπότε με την εναλλαγή των άκρων του πλαισίου, έχουμε παραγωγή τάσης και ρεύματος με την ίδια φορά, δηλ. DC. Όλα τα υπόλοιπα, έχουν ακριβώς την ίδια λειτουργία που περιγράφηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Αν πατήσουμε τώρα το βελάκι που δείχνει προς τ' αριστερά, μας μεταφέρει πίσω στη γεννήτρια AC.

6.4 Κινητήρες

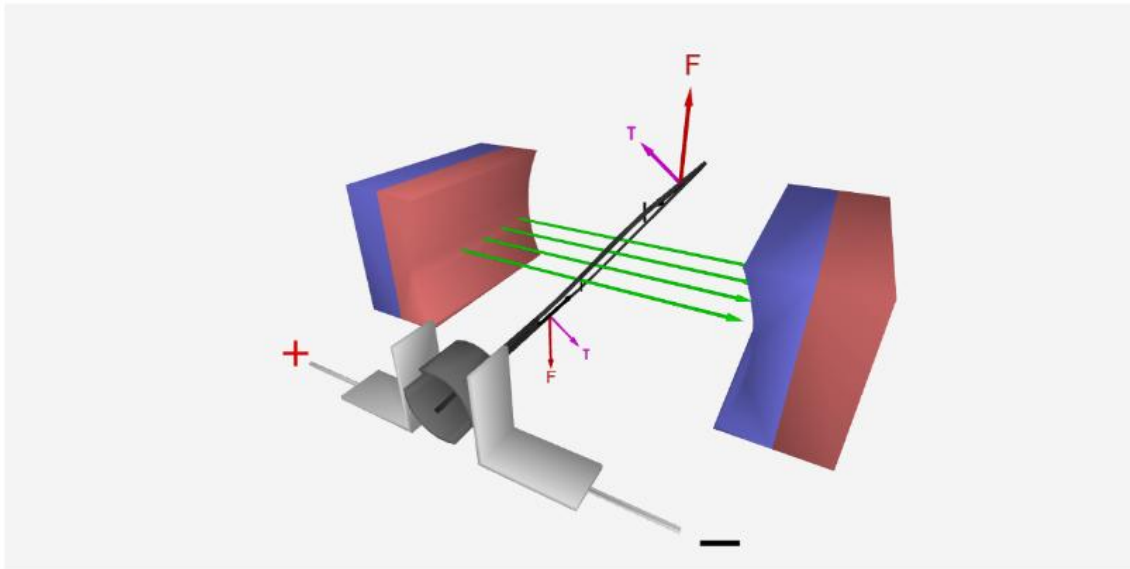
Όπως είναι ήδη γνωστό, οι γεννήτριες μπορούν να εργαστούν και σαν κινητήρες, αντιστρέφοντας την όλη διαδικασία. Έτσι, αντί να κινείται το πλαίσιο παράγοντας τάση στα άκρα του, τώρα, εφαρμόζοντας τάση στα άκρα του, το αναγκάζουμε να κινηθεί και αυτό, δίνοντας την κίνησή του, σε εξωτερικά εξαρτήματα με τα οποία είναι συνδεδεμένο.

Θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά την εφαρμογή https://javalab.org/en/dc_motor_en/ [45], η οποία έχει παρόμοια λειτουργία με την τελευταία της ενότητας 6.2, απλά, τώρα παράγεται κίνηση με παροχή συνεχούς τάσης. Σε αυτήν, μπορούμε μόνο θα δούμε τους ακροδέκτες με τους δύο πόλους (+ και -) της dc τάσης, τα διανύσματα B, I, F και ροπής T, καθώς και της φοράς του ηλεκτρικού ρεύματος στα δύο τμήματα του πλαισίου. Υπενθυμίζεται ότι όταν εφαρμόζεται ρεύμα στο πλαίσιο, η κατεύθυνση

του ρεύματος που ρέει στα τμήματα αυτά είναι αντίθετη, άρα, η κατεύθυνση της δύναμης που δέχεται το πλαίσιο αντιστρέφεται και το αναγκάζει να περιστρέφεται.

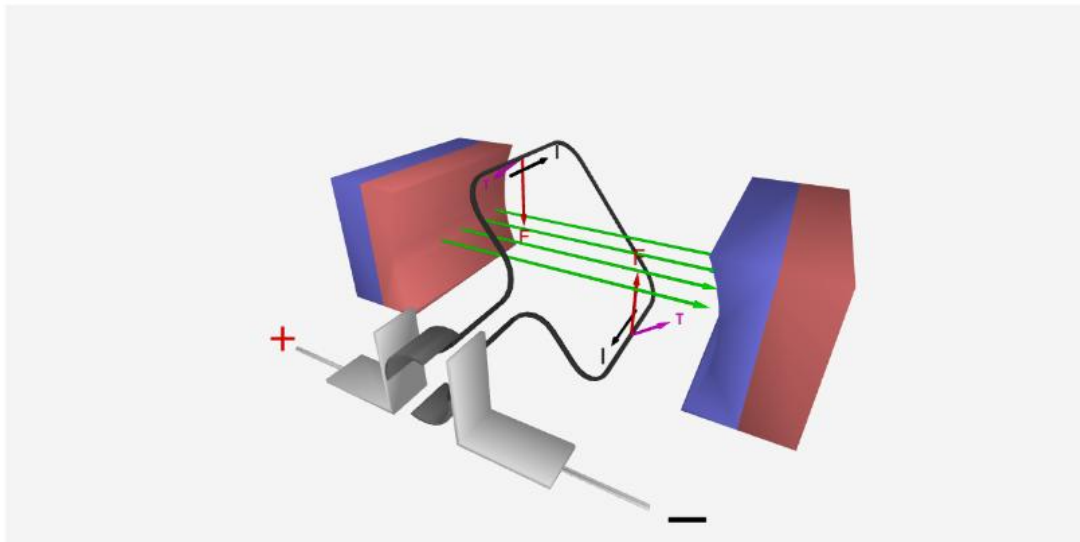
Η τρέχουσα κατεύθυνση αλλάζει από τον μεταγωγέα - μισά δακτυλίδια - κάθε μισή στροφή του πλαισίου, κάνοντάς το να περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση. Μερικές στιγμές από αυτή τη διαδικασία δίνονται παρακάτω :

DC Motor



Magnetic Field (B) Current (I) Force, Electromagnetic Force (F) Torque (τ) Run 206

DC Motor

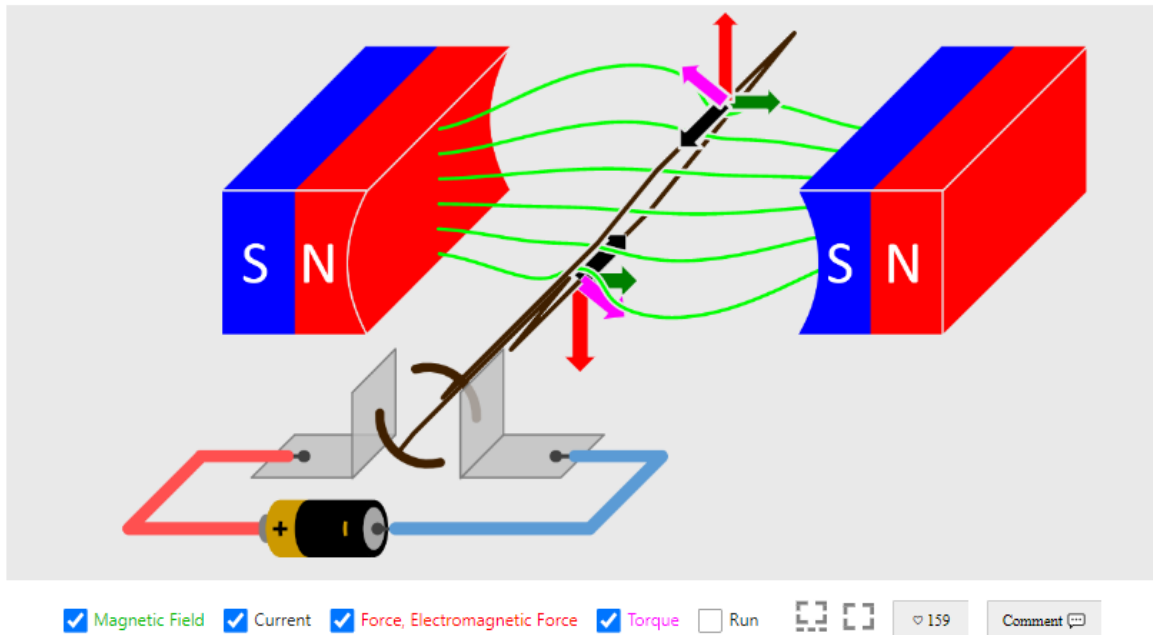


Magnetic Field (B) Current (I) Force, Electromagnetic Force (F) Torque (τ) Run 206

Σχήμα 6. 5: Περιβάλλον προσομοίωσης κινητήρα D.C. (1) (Πηγή : [45])

Μια μικρή παραλλαγή έχουμε στην https://javalab.org/en/dc_motor_2_en/ [46] όπου βλέπουμε να εφαρμόζεται μια πηγή συνεχούς τάσης (μπαταρία) στα άκρα του πλαισίου, Σχ.6,6:

DC Motor 2



Σχήμα 6. 6: Περιβάλλον προσομοίωσης κινητήρα D.C. (2) (Πηγή : [46])

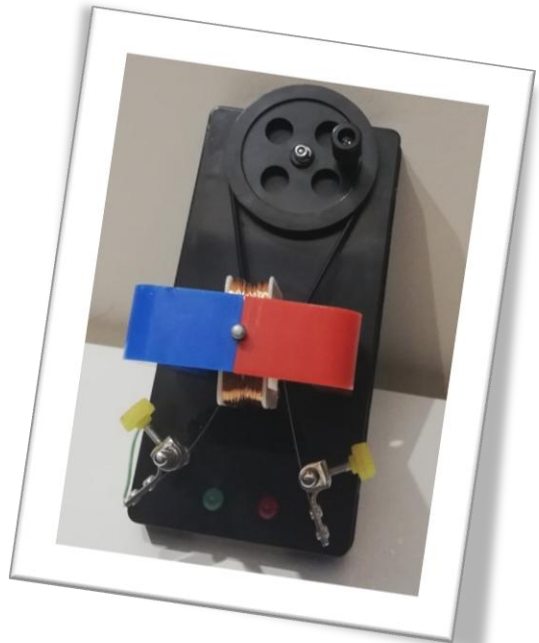
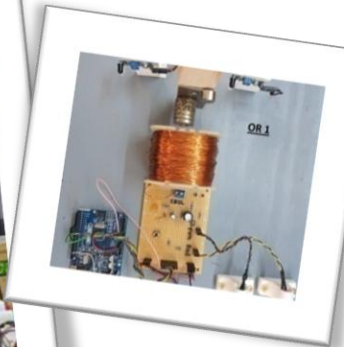
Ο τρόπος λειτουργίας και αυτά που μπορούμε να δούμε είναι ακριβώς τα ίδια με την προηγούμενη προσομοίωση.

6.5 Επίλογος

Συνδυάζοντας, εν κατακλείδι, τα φαινόμενα της εμφάνισης και μεταβολής της μαγνητικής ροής και της συνισταμένης δύναμης Laplace και περιστρεφόμενο πλαίσιο με αρκετά τυλίγματα, παράγουμε την εναλλασσόμενη και τη συνεχή τάση, που τόσο πολύ μας έχει γίνει απαραίτητη και αναντικατάστατη σε όλες μας τις καθημερινές δραστηριότητες και που μας έχει βοηθήσει στην τεχνολογική και όχι μόνο εξέλιξή μας.

ΜΕΡΟΣ 3^ο : Πειραματική διαδικασία – Κατασκευές

Απόδειξη των νόμων με πειραματικές διατάξεις



Κεφάλαιο 7ο : Πειραματική διάταξη ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

7.1 Εισαγωγή

Το 3^ο μέρος της εργασίας εστιάζει στην τεκμηρίωση των σχέσεων του νόμου του Faraday και της δύναμης Laplace, με τη βοήθεια πειραματικών, πλέον, διατάξεων και κατασκευών, χωρίς εικονικά περιβάλλοντα. Στόχος είναι φυσικά, τα εξαγόμενα αποτελέσματα να συμπίπτουν τόσο με τα θεωρητικά ειπωμένα όσο και με αυτά των προσομοιώσεων.

Ξεκινώντας με το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, με χρήση αντίστοιχης κατασκευής, θα γίνει η απόπειρα απόδειξης του νόμου της επαγωγής του Faraday.

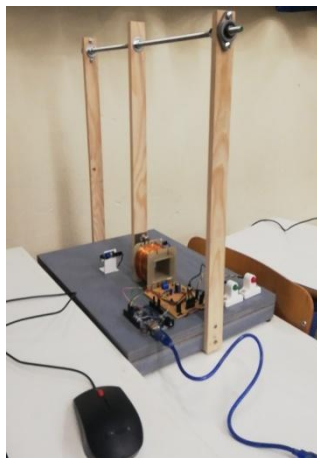
7.2 πειραματική διάταξη : Κίνηση ραβδόμορφου μαγνήτη μπροστά από πηνίο

Στο 1^ο πείραμα αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε πηνία με διαφορετικά τυλίγματα το καθένα (με 115, 1200 και 1300 σπείρες), μόνιμους μαγνήτες με μαγνητική επαγωγή B που θ' αλλάζει, καλώδια σύνδεσης, πλακέτα ενδείξεων και πολύμετρο ή παλμογράφο. Με τον παλμογράφο και την πλακέτα ενδείξεων, θα μπορούμε να έχουμε καλύτερη απεικόνιση των μεταβολών της τάσης και της έντασης του επαγόμενου ρεύματος, καθώς και του κανόνα του Lenz.

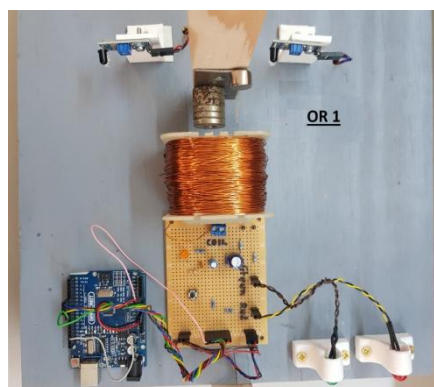
Θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι ο ραβδοειδής μαγνήτης που διαθέτουμε είναι με τέτοιο τρόπο κατασκευασμένος, όπου η μία επιφάνειά του αποτελεί τον βόρειο πόλο και η άλλη το νότιο. Έτσι, οι δυναμικές του γραμμές κατανέμονται με τον τρόπο που αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.3.3.

Στο 1^ο αυτό πείραμα, θα ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία:

- Υλοποιούμε το κύκλωμα του Σχ.7.1, συνδέοντας τον παλμογράφο στα δύο pin της διάτρητης πλακέτας.



α. πλάγια όψη κατασκευής



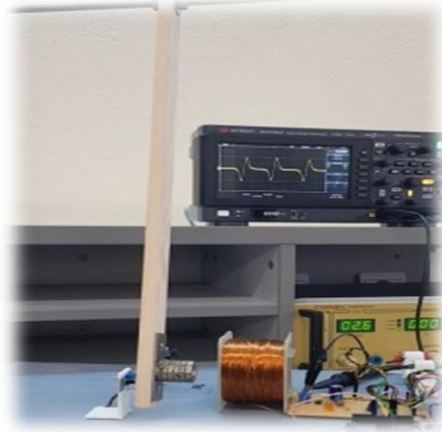
β. κάτοψη βάσης

Σχήμα 7. 1: Ξύλινο εκκρεμές για μέτρηση επαγόμενης τάσης

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μια ξύλινη βάση, στην οποία στηρίζονται τρία ξύλινα κομμάτια σχηματίζοντας ένα Π. Εκεί κρέμεται ένα άλλο ξύλο με μια μεταλλική πλάκα στο κάτω άκρο του, πάνω στην οποία τοποθετείται ο μόνιμος μαγνήτης μας. Μ' άλλα λόγια, έχουμε ένα ξύλινο εκκρεμές. Στην ξύλινη βάση είναι στερεωμένα μια πλακέτα arduino uno, μια διάτρητη πλακέτα που συνδέεται μ' αυτό, δύο πλαστικές βάσεις για τα Led και δύο για τους ανιχνευτές εμποδίων,

καθώς και το πηνίο, το οποίο συνδέουμε στη διάτρητη πλακέτα στις αντίστοιχες κλέμμες. Λεπτομέρειες για την πλακέτα και τον τρόπο λειτουργίας του κυκλώματος, δίνονται στο Παράρτημα Α, όπου υπάρχει και έτοιμο τυπωμένο κύκλωμα για εμφάνιση σε φωτοευαίσθητη πλακέτα.

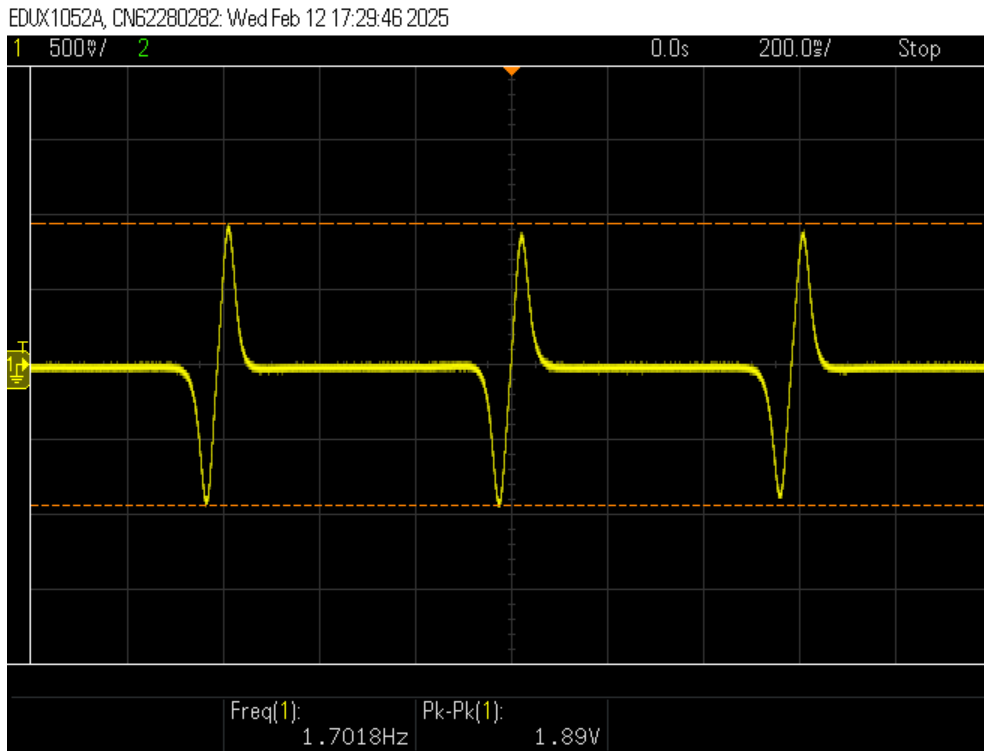
- Έχοντας κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις στον παλμογράφο και παρατηρώντας τον, χωρίς να προβούμε ακόμα σε καμιά ενέργεια, βλέπουμε ότι δεν εμφανίζει κάποια τάση στην οθόνη του, οπότε καταλαβαίνουμε ότι το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα και συνεπώς, δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου. Έτσι, αφού δεν υπάρχει μεταβολή μαγνητικής ροής στις σπείρες του πηνίου, στα άκρα του φυσικά δεν εμφανίζει τάση εξ επαγωγής, $E_{\text{ΕΠ}} = 0\text{V}$
- Στη συνέχεια, υψώνουμε τον μόνιμο μαγνήτη και τον αφήνουμε να κινηθεί ελεύθερα, εκτελώντας ταλαντώσεις, παράλληλα στο επίπεδο σπειρών του. Παρατηρώντας τώρα την οθόνη του παλμογράφου, βλέπουμε ότι παράγεται εναλλασσόμενη τάση, το πλάτος της οποίας βέβαια, αρχίζει σιγά σιγά να μειώνεται καθώς ο μαγνήτης επιβραδύνει τις ταλαντώσεις του και τελικά, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, σταματά να κινείται μπροστά από το πηνίο.



Σχήμα 7. 2: Μέτρηση επαγόμενης τάσης με τη βοήθεια παλμογράφου

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα, χωρίς να έχουμε εφαρμόσει πουθενά εξωτερική πηγή τάσης.

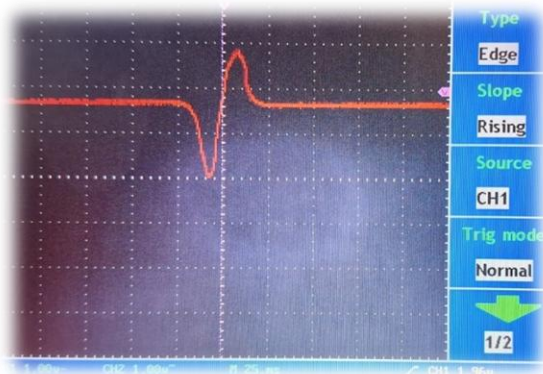
- Μπορούμε να διαπιστώσουμε τη μεταβολή της επαγόμενης τάσης και κατ' επέκταση του επαγόμενου ρεύματος, από τη μια βλέποντας την αλλαγή στην ένδειξη του παλμογράφου και από την άλλη στη μεταβολή της έντασης της φωτεινότητας στα led. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι το ρεύμα αυτό αυξάνεται αρνητικά όσο πιο πολύ πλησιάζει ο μαγνήτης στο πηνίο και παίρνει τη μέγιστη αρνητική τιμή του, όταν έχει φτάσει ακριβώς μπροστά σε αυτό.
- Παρακολουθώντας την πορεία του μαγνήτη, όταν αυτός απομακρύνεται από το πηνίο, και βλέποντας πάλι τον παλμογράφο και τα led, εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τώρα το πηνίο διαρρέεται πάλι από ρεύμα, το οποίο μειώνεται όσο απομακρύνεται ο μαγνήτης από το πηνίο. Αυτή τη φορά, όμως, δημιουργείται ένα ρεύμα αντίθετης φοράς από το προηγούμενο, γι' αυτό ο παλμογράφος δείχνει θετικές τιμές τάσης. Αφού ο παλμογράφος δείχνει θετικές τάσεις, τώρα ανάβει το άλλο led της πλακέτας, επαληθεύοντας και τον κανόνα του Lenz, Τα δύο led έχουν συνδεθεί παράλληλα, αλλά ανάστροφα (η άνοδος του πρώτου με την κάθοδο του δεύτερου και η κάθοδος του πρώτου με την άνοδο του δεύτερου), οπότε ένα μόνο θ' ανάβει πάντα, οπτικοποιώντας τη μεταβολή της φοράς του επαγόμενου ρεύματος. Βέβαια, λόγω της γρήγορης μεταβολής, πολύ πιθανό να μη γίνεται αισθητή η διαφορά και να νομίζουμε ότι είναι αναμμένα και τα δύο ταυτόχρονα.



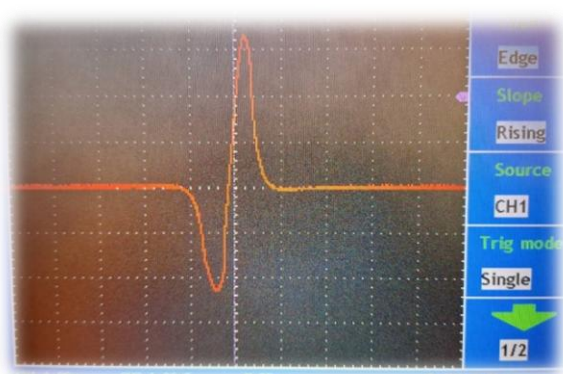
- Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, αλλάζοντας το ύψος στο οποίο φτάνει ο μαγνήτης του εκκρεμούς, λαμβάνοντας έτσι διαφορετικές τιμές δυναμικής ενέργειας, γίνεται φανερό ότι όσο πιο ψηλά πάει το εκκρεμές τόσο πιο μεγάλη σε απόλυτη τιμή είναι η επαγόμενη τάση, αφού μεγαλώνει η μεταβολή της μαγνητικής ροής, μιας και το χρονικό διάστημα Δt γίνεται μικρότερο.
- Εξάγουμε τα ίδια συμπεράσματα, ακολουθώντας τα ίδια βήματα, αυτή τη φορά με τη χρήση πηνίων με διαφορετικό αριθμό σπειρών - τυλιγμάτων. Από τις μετρήσεις, επιβεβαιώνεται ο Νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, αφού όσο αυξάνεται ο αριθμός των σπειρών, με τον ίδιο μαγνήτη τόσο αυξάνεται και η ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής.
- Αν τοποθετήσουμε έναν άλλο μαγνήτη, μικρότερης ή μεγαλύτερης πυκνότητας μαγνητικής επαγωγής B , για τις ίδιες χρονικές διαφορές μεταβολής της μαγνητικής ροής και στο ίδιο πηνίο, θα δούμε ότι η επαγωγική τάση στα άκρα του πηνίου θα είναι ανάλογη του B , αφού αυτό συμβάλλει θετικά στην αύξηση της μαγνητικής ροής και κατά συνέπεια, στην μεγαλύτερη μεταβολή της.
- Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο, όταν δεν υπάρχει κίνηση του μαγνήτη, δεν εμφανίζεται καθόλου τάση ούτε ανάβει κάποιο led. Κάτι απόλυτα λογικό, αφού δεν υπάρχει μεταβολή μαγνητικής ροής.

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμος παλμογράφος ή για να γίνει περισσότερο αντιληπτή η μεταβολή της τιμής και της φοράς της τάσης που επάγεται, φτιάχνοντας ταυτόχρονα και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα είτε σε breadboard είτε σε διάτρητη ή και τυπωμένη πλακέτα, μπορούμε να συνδέσουμε τα άκρα του πηνίου που χρησιμοποιούμε κάθε φορά σε μία αναλογική είσοδο μιας πλακέτας arduino και να παίρνουμε στην έξοδο τις αναλογικές τιμές τάσης. Τις τιμές αυτές μπορούμε να τις μετατρέψουμε σε μια κυματομορφή για να την αναλύσουμε πιο διεξοδικά. Το πρόγραμμα που έχει περαστεί στη μνήμη του arduino παρουσιάζεται στη συνέχεια του Παραρτήματος Α.

Με το πρόγραμμα του arduino και όπως αυτό έχει γραφτεί, μπορούμε να μετρήσουμε μόνο μία περίοδο ταλάντωσης του μαγνήτη, με τις αντίστοιχες εικόνες στον παλμογράφο.



α. μικρότερο ύψος μαγνήτη



β. μεγαλύτερο ύψος μαγνήτη

Σχήμα 7. 3: Μέτρηση επαγόμενης τάσης στον παλμογράφο με χρήση του arduino από μικρότερο προς μεγαλύτερο ύψος του μαγνήτη του εκκρεμούς

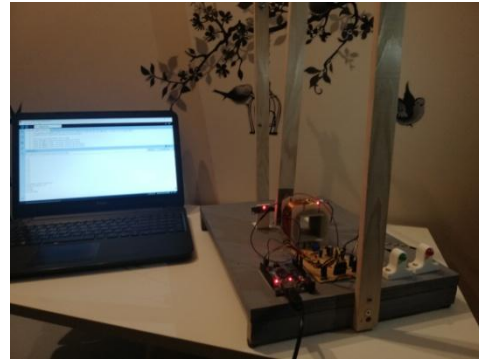
Συνδέοντας το arduino υπο σε κάποια σειριακή θύρα usb του υπολογιστή και ανοίγοντας το εργαλείο του Serial Monitor, αφού έχουμε πατήσει το μπουτόν επίτρεψης της έναρξης μετρήσεων, θα πάρουμε στην οθόνη του τις παρακάτω εικόνες :

```
Vstep=0.00461      Vcc=4.72000
K1=0.65574         Vc=3.09508
K2=0.00923         sizeof(ADValues/2)=400
```

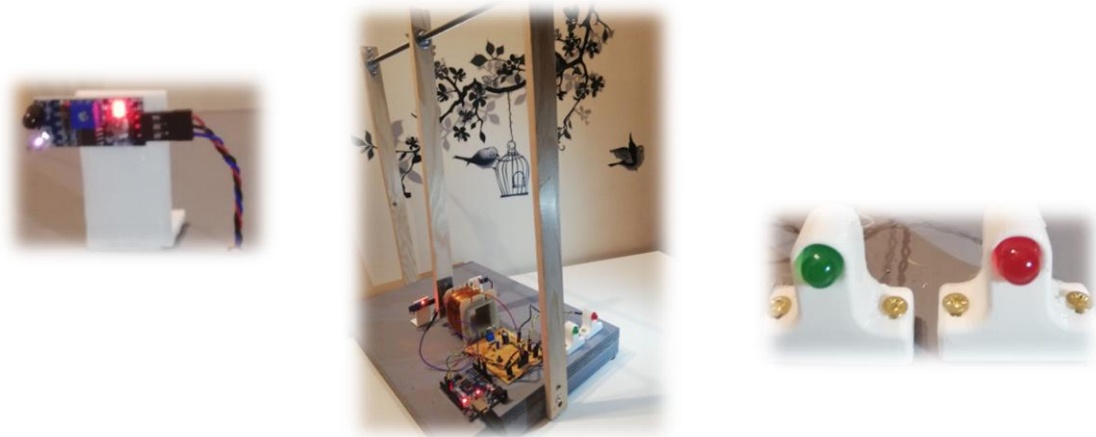
Πιέστε το πλήκτρο επίτρεψης των μετρήσεων
 Έναρξη των μετρήσεων
 Νέο Σύνολο μετρήσεων. Οι τιμές είναι οι τάσεις εισόδου σε volts

katInduc	katInduct	Serial M	-1.90	0.92	3.12	-1.25	Message	-1.88	0.79	2.96	2.07
14	14	Message	-1.85	1.01	3.14	-1.32	-2.30	-1.84	0.88	3.00	1.81
Serial M	Serial M	Message	-1.79	1.11	3.17	-1.41	-2.33	-1.78	0.97	3.03	1.72
Message	Message	Message	-1.74	1.21	3.19	-1.48	-2.35	-1.73	1.06	3.05	1.63
Vstep=0	-1.22	-2.32	-1.68	1.32	3.20	-1.54	-2.37	-1.67	1.15	3.07	1.55
K1=0.65	-1.30	-2.35	-1.54	1.42	3.21	-1.58	-2.38	-1.52	1.24	3.09	1.46
K2=0.00	-1.37	-2.37	-0.87	1.53	3.21	-1.62	-2.40	-0.89	1.34	3.10	1.38
Vcc=4.7	-1.30	-2.37	-0.78	1.64	3.20	-1.65	-2.40	-0.81	1.45	3.11	1.31
Vc=3.09	-1.44	-2.38	-0.70	1.76	3.20	-1.67	-2.41	-0.72	1.56	3.11	1.23
sizeof(-1.51	-2.39	-0.61	1.87	3.20	-1.67	-2.41	-0.64	1.67	3.11	1.17
Πιέστε	-1.55	-2.40	-0.53	1.87	3.18	-1.71	-2.41	-0.64	1.67	3.10	1.10
Έναρξη	-1.59	-2.40	-0.45	1.99	3.18	-1.71	-2.41	-0.56	1.77	3.09	1.04
Νέο Σύν	-1.63	-2.41	-0.45	2.09	3.16	-1.74	-2.41	-0.56	1.89	3.09	1.04
-0.39	-1.66	-2.41	-0.36	2.16	3.13	-1.78	-2.40	-0.48	2.00	3.07	0.98
-0.42	-1.68	-2.41	-0.29	2.16	3.13	-1.78	-2.40	-0.48	2.00	3.07	0.98
-0.45	-1.71	-2.39	-0.29	2.23	3.11	-1.80	-2.39	-0.41	2.09	3.06	0.93
-0.47	-1.75	-2.38	-0.21	2.29	3.07	-1.84	-2.38	-0.34	2.16	3.03	0.88
-0.50	-1.78	-2.38	-0.13	2.29	3.03	-1.87	-2.36	-0.26	2.21	3.00	0.83
-0.53	-1.81	-2.37	-0.06	2.36	3.03	-1.87	-2.36	-0.26	2.21	3.00	0.83
-0.57	-1.84	-2.35	0.01	2.43	2.99	-1.90	-2.34	-0.19	2.28	2.97	0.78
-0.59	-1.88	-2.33	0.10	2.51	2.93	-1.94	-2.31	-0.11	2.35	2.93	0.73
-0.63	-1.90	-2.30	0.17	2.58	2.88	-1.98	-2.29	-0.05	2.41	2.88	0.70
-0.68	-1.94	-2.27	0.25	2.64	2.82	-2.02	-2.26	0.02	2.48	2.84	0.66
-0.71	-1.98	-2.25	0.32	2.71	2.76	-2.04	-2.23	0.10	2.55	2.79	0.62
-0.76	-2.02	-2.22	0.40	2.78	2.67	-2.08	-2.20	0.17	2.61	2.73	0.59
-0.81	-2.09	-2.18	0.49	2.84	2.61	-2.12	-2.16	0.25	2.67	2.66	0.55
-0.85	-2.12	-2.14	0.57	2.84	2.61	-2.14	-2.13	0.32	2.74	2.59	0.52
-0.92	-2.15	-2.11	0.65	2.89	2.52	-2.18	-2.09	0.39	2.78	2.52	0.49
-0.97	-2.19	-2.06	0.73	2.95	2.42	-2.21	-2.05	0.47	2.84	2.44	0.47
-1.03	-2.22	-2.02	0.83	3.00	2.32	-2.22	-2.01	0.55	2.88	2.35	0.44
-1.09	-2.25	-1.98	0.92	3.04	2.20	-2.25	-1.97	0.63	2.93	2.26	0.41
-1.16	-2.27	-1.93	1.01	3.09	1.80	-2.27	-1.92	0.71	2.96	2.26	0.38
-1.22	-2.30	-1.90	1.10	3.12	1.69	-2.30	-1.88	0.79	2.96	2.07	0.38
	-1.85	-1.01	1.14	3.12	1.60	-2.33	-1.84	0.79	2.96	2.07	0.38
			1.14	1.60						1.81	Ολοκλήρ

```
0.41  
0.38  
Ολοκλήρωση Συνόλου Μετρήσεων  
Πλήθος Μετρήσεων: 354  
T1=51ms  
T2=39ms  
T=T1+T2=90ms
```



Τις μετρήσεις αυτές τις αντιγράφουμε στον κειμενογράφο, εκεί αντικαθιστούμε τις τελείες με κόμμα, τις αντιγράφουμε εκ νέου και ανοίγουμε ένα φύλλο επεξεργασίας excel. Στο φύλλο αυτό, αφού επικολλήσουμε τις τιμές μας με τα κόμματα, μπορούμε να σχεδιάσουμε πλέον την κυματομορφή μας, επιλέγοντας τα διαγράμματα με τις γραμμές.



7.3 Επίλογος

Με την παραπάνω πειραματική διάταξη, καταφέρνουμε να επαληθεύσουμε τα συμπεράσματα του Faraday, που τον οδήγησαν στη διαμόρφωση της εξίσωσης της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Γίνεται επίσης αντιληπτή και η αρχή διατήρησης της ενέργειας με τον κανόνα του Lenz, με τις θετικές και αρνητικές τιμές της επαγόμενης τάσης.

Χάρη, λοιπόν, στους δύο αυτούς μεγάλους επιστήμονες, μπορούμε σήμερα να εφαρμόζουμε τους νόμους τους και να εκτελούμε συνεχώς βήματα τεχνολογικής προόδου.

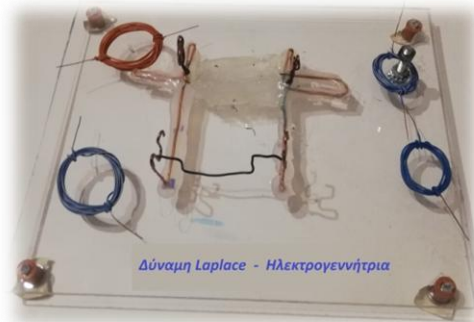
Κεφάλαιο 8ο : Πειραματικές διατάξεις δύναμης Laplace

8.1 Εισαγωγή

Συνεχίζοντας το 3^ο μέρος της εργασίας, θα γίνει η επίδειξη και η τεκμηρίωση της σχέσης της δύναμης Laplace, μέσω δύο κατασκευών, από τις οποίες η 1^η είναι αρκετά απλή, ενώ η 2^η λίγο πιο σύνθετη. Στόχος και εδώ είναι να υπάρξει ταύτιση μεταξύ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και των θεωρητικά και εικονικά ειπωμένων.

8.2 1^η πειραματική διάταξη : Απλό κύκλωμα με χρήση μικρών κομματιών καλωδίου, τροφοδοτικό και μαγνήτη

Σ' αυτό το 1^ο πείραμα, θα χρησιμοποιήσουμε απλά χάλκινα καλώδια διαφορετικού μήκους l , μόνιμους μαγνήτες με μαγνητική επαγωγή B που θ' αλλάζει, οι οποίοι θα κινούνται πλησιάζοντας ή απομακρυνόμενοι από τα καλώδια και ένα τροφοδοτικό ή μπαταρία. Μέσα από αυτό το πείραμα θα γίνει μια επίδειξη της εμφάνισης δύναμης Laplace, η τιμή ποιοτικά και η φορά αυτής, σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Επειδή το εργαστήριο διαθέτει μηχανήμα μέτρησης μαγνητικής επαγωγής, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε προσεγγιστικά την τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο κάθε μαγνήτης γύρω του.



Σχήμα 8. 1: Εμφάνιση δύναμης Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό

Ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα :

- Τροφοδοτούμε με συνεχή τάση, π.χ. 5V τους ακροδέκτες που φαίνονται πίσω στην εικόνα.
- Πλησιάζουμε το μαγνήτη στον αγωγό που κρέμεται σε δύο αγωγούς, οι οποίοι συνδέονται με αυτούς της παροχής τάσης.
- Παρατηρούμε την κίνηση του ελεύθερου καλωδίου και καταγράφουμε την τελική θέση ισορροπίας του, φτιάχνοντας ένα σχεδιάγραμμα με τη φορά της έντασης B , του ρεύματος I και της δύναμης Laplace..
- Αντιστρέφουμε την παροχή τάσης και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία.
- Συγκρίνουμε τις παρατηρήσεις μας και εξάγουμε τα συμπεράσματά μας.
- Η ίδια διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί, αλλάζοντας κάθε φορά μία από τις συσχετιζόμενες μεταβλητές, διατηρώντας τις υπόλοιπες σταθερές, επαληθεύοντας επίσης και τον κανόνα του δεξιού χεριού ή, εκτελώντας τα βήματα της προσομοίωσης για τη δύναμη Laplace και ισορροπία - υποενοότητα 5.4 - , να μετρηθεί η τελική γωνία θέσης του καλωδίου και να συγκριθεί με την αντίστοιχη θεωρητική.

8.3 2^η πειραματική διάταξη : Κατασκευή με χρήση μικρών καλωδίων ή πηνίων σε πλαίσιο, ζυγαριά ακριβείας, τροφοδοτικό και μαγνήτη

Σκοπός της διάταξης αυτής είναι η εξέταση της δύναμης που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό όταν αυτός βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο (μη συμπεριλαμβανομένης της γωνίας), για να επιβεβαιώσουμε τη θεωρητική έκφραση της δύναμης Laplace (και της δύναμης Lorentz), εφαρμόζοντας και τον 3^ο νόμο του Νεύτωνα (Νόμος δράσης - αντίδρασης)

Η αρχή στην οποία στηρίζεται περιγράφεται αμέσως παρακάτω :

Χρησιμοποιούμε τα μαγνητικά πεδία από έναν μόνιμο μαγνήτη που τοποθετείται σε μια ψηφιακή ζυγαριά. Σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Νεύτωνα, η δύναμη στον μαγνήτη και η δύναμη στον αγωγό είναι ίσου μεγέθους, αλλά αντίθετης κατεύθυνσης - φοράς. Η ανάγνωση της ένδειξης της ζυγαριάς μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στον αγωγό.

Πιο συγκεκριμένα, ο 3ος νόμος του Νεύτωνα που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα είναι :

$$\mathbf{F}_M = - \mathbf{F}_L \quad (8.1)$$

Η παραπάνω σχέση μας δείχνει ότι η δύναμη από το μαγνήτη προς τον αγωγό κατευθύνεται αντίθετα από τη δύναμη του αγωγού προς το μαγνήτη. Τα μεγέθη τους είναι ίσα.

Μία απορία που μπορεί να γεννηθεί θα είναι πως θα μπορούσε μια ζυγαριά να λειτουργεί ως μετρητής δύναμης, η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Η απάντηση δίνεται παρακάτω :

Η δύναμη της βαρύτητας σε μάζα m δίνεται από τον τύπο :

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \quad (8.2)$$

Η ζυγαριά δείχνει m όταν δέχεται τη δύναμη F . Όπου $g=9,8\text{m/s}^2$ ή N/Kg .

Προσοχή με τις μονάδες παντού! Μπορεί να είναι καλύτερα να μετατρέψετε πρώτα όλες τις μονάδες στο σύστημα SI.

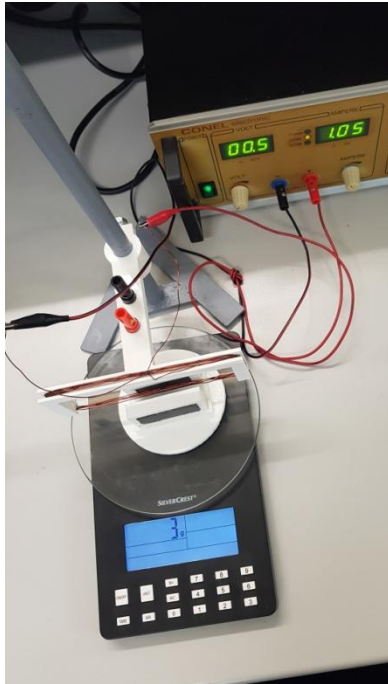
Ο εξοπλισμός που θα χρειαστούμε κατά βάση, πέρα από τους μαγνήτες, είναι ένα τροφοδοτικό και μια ψηφιακή ζυγαριά όσο μεγαλύτερης ακρίβειας γίνεται, με τη βοήθεια της οποίας θα μετράμε τη δύναμη της βαρύτητας, π.χ. $200\text{g} / 0,01\text{g}$.

Το κοντό κομμάτι αγωγού που χρησιμοποιείται έχει πολύ χαμηλή αντίσταση, λειτουργώντας αποτελεσματικά ως βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα διαβάζεται στην οθόνη του τροφοδοτικού. Σε περίπτωση που το τροφοδοτικό δεν έχει ενσωματωμένο αμπερόμετρο, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα εξωτερικό όργανο μέτρησης. Τέλος, μπορεί να χρειαστεί να προστεθεί μια αντίσταση σειράς μεταξύ του τροφοδοτικού και του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή, καλό είναι να χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση με τιμή $1\Omega/50\text{W}$.

Πορεία εργασίας

1. Μεταβολή του ρεύματος

- Πραγματοποιούμε το κύκλωμα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, Σχ.8.2. Σε περίπτωση που η ζυγαριά που χρησιμοποιείται είναι ευαίσθητη σε μαγνητικά πεδία, πρέπει ν' αυξήσουμε την απόσταση από το μαγνητικό σύστημα με π.χ. ένα μικρό κομμάτι αφρού πολυστυρενίου (πολυφαινυλαιθένιο - αρωματικός υδρογονάνθρακας).



α. 5 τυλιγμάτων, με $B=110\text{mT}$



β. 15 τυλιγμάτων, με $B=300\text{mT}$

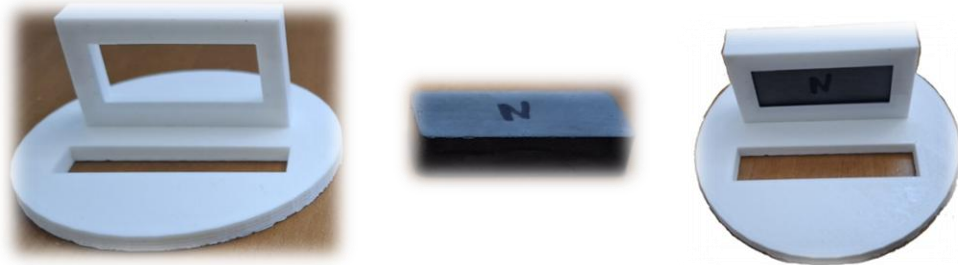
Ρευματοφόρος αγωγός- πλήθος αγωγών κάθετα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο

Σχήμα 8. 2: Πειραματική διάταξη μέτρησης Δύναμης Laplace

- Η εμφανιζόμενη δύναμη Laplace με έναν μόνο αγωγό δεν φέρει μεγάλες μεταβολές στις ενδείξεις της ζυγαριάς. Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιηθούν 5 και 15 αγωγοί, τυλιγμένοι σε ένα πλαίσιο, ώστε να έχουμε ορατά αποτελέσματα και μεγαλύτερες μεταβολές στην ένδειξη της ζυγαριάς. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται η κατασκευή αυτή, εκτός από τη ζυγαριά, είναι ;
 - ♦ μια μεταλλική βάση, για καλή στήριξη των αγωγών στο σωστό σημείο,
 - ♦ μια πλαστική βάση για κάθε πλειάδα αγωγών που έχουν τυλιχθεί (η πλαστική αυτή βάση μπορεί να προσαρτηθεί και να στηριχθεί στην μεταλλική βάση σε όποιο σημείο επιθυμούμε με ασφάλεια),



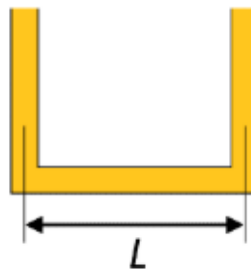
- ♦ μια ακόμα πλαστική βάση για τους μαγνήτες που θα χρησιμοποιηθούν αρχικά, ώστε να είναι εφικτή η διατήρηση της απόστασης μεταξύ τους, για να δημιουργηθεί το σχεδόν ομογενές μαγνητικό πεδίο που επιθυμούμε. Στο κενό του ορθογώνιου πλαισίου τοποθετείται ο μαγνήτης, ενώ στην υποδοχή της στρογγυλής βάσης, το άλλο πλαίσιο με τον δεύτερο μαγνήτη.



Εν τέλει, η εν λόγω κατασκευή περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα της παρακάτω εικόνας :



- Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής :
 1. Ξεκινάμε με το πλαίσιο που φέρει 5 τυλίγματα αγώγιμου υλικού. Ούτως ή άλλως, η δύναμη που θα εμφανιστεί, περιμένουμε να ασκηθεί στο μέρος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Μετράμε, λοιπόν, το μήκος (L) του οριζόντιου τμήματος, μέσα σε αυτό (που στην ουσία είναι το μήκος των μαγνητών) και το βρίσκουμε 5cm .



2. Ρυθμίζουμε το ύψος της πλαστικής βάσης των αγωγών ώστε να βρίσκονται στο ύψος του κέντρου των πόλων του μαγνήτη.
3. Μειώνουμε εντελώς το Current Adjust και γυρίζουμε το κουμπί της ρύθμισης τάσης (Voltage Adjust) στο μέσο περίπου. Και οι δύο μετρητές του τροφοδοτικού πρέπει να δείχνουν 0 με τις παραπάνω ρυθμίσεις. Μηδέν («απόβαρο») θα δείχνει και η ψηφιακή ζυγαριά.
4. Αυξάνουμε το ρεύμα I περίπου στο 1 A – διαβάζουμε την ακριβή τιμή. Διαβάζουμε και την ένδειξη της ζυγαριάς : m (μάζα σώματος).
5. Καταγράφουμε τις μετρήσεις σε έναν πίνακα όπως ο παρακάτω :

L =		mm
Measured		Calculated
I / A	m / g	F / mN

6. Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα με ρεύματα περίπου. 2, 3, 4 και 5 A.
7. Αντιστρέφουμε το ρεύμα εναλλάσσοντας τα καλώδια στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Μετράμε άλλη μια φορά για τις πέντε διαφορετικές τιμές του ρεύματος - θυμόμαστε το σημάδι.

Σημείωση: Εάν η ζυγαριά δείχνει αρνητικό αριθμό, καταγράφουμε και το ρεύμα με αρνητικό πρόσημο.

Ενδεικτικά :

Μετρώντας αρχικά με το μαγνητόμετρο την ένταση του μαγνητικού πεδίου για τους συγκεκριμένους μαγνήτες, το βρίσκουμε περίπου 110mT.

Εφαρμόζοντας τους τύπους της θεωρίας, (8.1), (8.2) και της δύναμης Laplace ($F=BIL$), για $B=110mT$, $I=1A$, μήκος κάθε αγωγού $l=5cm$ με αριθμό αγωγών $N=5$ και $g \cong 10N/Kg$ έχουμε:

$$F = BIL = 0,11T \cdot 1A \cdot 0,05m \cdot 5 = 0,0275N$$

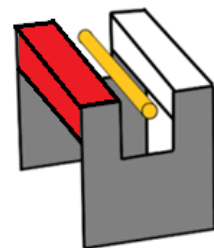
$$F = mg \Rightarrow m = \frac{F}{g} = \frac{0,0275N}{10N/Kg} = 0,00275Kg \text{ ή } 2,75gr$$

Η μετρούμενη τιμή με τη βοήθεια της ζυγαριάς είναι 3gr (Σχ.8.2.α).

2. Η κατεύθυνση της δύναμης

- Το μαγνητικό πεδίο - οι δυναμικές του γραμμές - εκτείνεται από τον (κόκκινο) βόρειο πόλο προς το (λευκό) νότιο πόλο. Το ρεύμα μετακινείται από το συν στο μείον.

1. Σχεδιάζουμε ένα σκίτσο σαν αυτό του συστήματος μαγνήτη και οριζόντιου τμήματος του αγωγού. Ρυθμίζουμε το ύψος για να βρίσκεται ο αγωγός στο ύψος του κέντρου των πόλων του μαγνήτη.
2. Υποδεικνύουμε τους μαγνητικούς πόλους, την κατεύθυνση του ρεύματος και αν η ζυγαριά διάβαζε θετικό ή αρνητικό στην κατάσταση αυτή. Στην περίπτωσή μας, έδειξε θετική τιμή.



3. Μεταβολή του μήκους του αγωγού

- Χρησιμοποιούμε το ίδιο είδος ρύθμισης όπως στο μέρος 1. Επιλέγουμε την κατεύθυνση του ρεύματος που δίνει θετικές ενδείξεις στη ζυγαριά.
- Σε αυτό το τμήμα, το ρεύμα πρέπει να είναι περίπου 5 A - καταγράφουμε την ακριβή τιμή και χρησιμοποιούμε το ίδιο ρεύμα μέσω όλων των μετρήσεων.
- Χρησιμοποιούμε κάθε ένα από τα τυλίγματα και συμπληρώνουμε παράλληλα έναν πίνακα σαν τον παρακάτω:

I =		A
Measured		Calculated
L / mm	m / g	F / mN

Σημείωση : Να μην ξεχάσουμε να μηδενίσουμε τη ζυγαριά (χωρίς να διαρρέεται από ρεύμα το πηνίο) κάθε φορά που αλλάζουμε τον αγωγό.

- Συνεχίζουμε την ίδια διαδικασία με το δεύτερο πηνίο, πολλαπλασιάζοντας το μετρούμενο μήκος επί 15 για να ληφθεί το L (αφού το μήκος είναι το ίδιο και στα δύο τυλίγματα του πλαισίου).
- Συμπληρώνουμε πάλι τους πίνακες σαν τους παραπάνω και για το πηνίο αυτό.

Ενδεικτικά :

Για τους ίδιους μαγνήτες, εφαρμόζοντας τους τύπους της θεωρίας, (8.1), (8.2) και της δύναμης Laplace ($F=BIL$), για $B=110\text{mT}$, $I=1\text{A}$, μήκος κάθε αγωγού $l=5\text{cm}$ με αριθμό αγωγών $N=15$ και $g \cong 10\text{N/Kg}$ έχουμε:

$$F = BIL = 0,11\text{T} \cdot 1\text{A} \cdot 0,05\text{m} \cdot 15 = 0,0825\text{N}$$

$$F = mg \Rightarrow m = \frac{F}{g} = \frac{0,0825\text{N}}{10\text{N/Kg}} = 0,00825\text{Kg} \text{ ή } 8,25\text{gr}$$

Η μετρούμενη τιμή με τη βοήθεια της ζυγαριάς είναι 8gr.

Για να μην χρησιμοποιούμε συνεχώς τον τύπο της δύναμης Laplace (αφού οι τιμές είναι ίδιες) και αφού τριπλασιάσαμε το μήκος l , λογικά θα τριπλασιαστεί και η δύναμη F_L ($3 \cdot 0,0275 = 0,0825\text{N}$).

4. Αλλαγή πεδίου

- Επιστρέφουμε στο πρώτο κύκλωμα μαγνήτη – πλαισίου πέντε τυλιγμάτων.
- Πραγματοποιούμε μια σειρά μετρήσεων με τον αγωγό που χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο μέρος και με ρεύμα 1A, μεταβάλλοντας τη μαγνητική επαγωγή B του πεδίου, τοποθετώντας μέσα στην υποδοχή κάποιους άλλους μαγνήτες από διαφορετικό υλικό και μαγνητικές ιδιότητες.

Ενδεικτικά :

Η νέα ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι 270mT (ένας μαγνήτης νεοδυμίου 10cm). Για $B=300\text{mT}$, $I=1\text{A}$, μήκος κάθε αγωγού $l=10\text{cm}$ με αριθμό αγωγών $N=5$ και $g \cong 10\text{N/Kg}$ θα έχουμε:

$$F = BIL = 0,3\text{T} \cdot 1\text{A} \cdot 0,1\text{m} \cdot 5 = 0,15\text{N}$$

$$F = mg \Rightarrow m = \frac{F}{g} = \frac{0,015\text{N}}{10\text{N/Kg}} = 0,015\text{Kg} \text{ ή } 15\text{gr}$$

Η μετρούμενη τιμή με τη βοήθεια της ζυγαριάς είναι 14gr.

Για 15 τυλίγματα, άρα τριπλάσιο μήκος, θεωρητικά θα έχουμε και τριπλάσια δύναμη, δηλ.

$$F = 0,15\text{N} \cdot 3 = 0,45\text{N} \Rightarrow m = 45\text{gr}$$

Η μετρούμενη τιμή με τη βοήθεια της ζυγαριάς είναι 44gr (Σχ.8.2.β).

Τοποθετώντας έναν ακόμα μαγνήτη στο μεταλλικό πλαίσιο, φτάνοντας την τιμή του B πλέον στα 520mT, επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις, ενδεικτικά για τα 15 τυλίγματα, έχουμε:

$$F = BIL = 0,52\text{T} \cdot 1\text{A} \cdot 0,1\text{m} \cdot 15 = 0,78\text{N}$$

$$F = mg \Rightarrow m = \frac{F}{g} = \frac{0,78\text{N}}{10\text{N/Kg}} = 0,078\text{Kg} \text{ ή } 78\text{gr}$$

Η μετρούμενη τιμή με τη βοήθεια της ζυγαριάς είναι 86gr.

ΥΠΟΣΗΜΕΙΩΣΗ: Κάποιες επιπλέον οδηγίες για την υλοποίηση του παραπάνω πειράματος

• **Υπολογισμοί κλπ.**

Μπορεί να είναι πλεονέκτημα η χρήση υπολογιστή με ένα υπολογιστικό φύλλο. Παντού, το «βάρος» πρέπει να μετατραπεί σε δύναμη.

1. Μεταβαλλόμενο ρεύμα

- Σχεδιάζουμε τη δύναμη ως συνάρτηση του ρεύματος.
- Χαράσσουμε τη βέλτιστη ευθύγραμμη προσέγγιση στα δεδομένα σημεία και βρίσκουμε την κλίση της γραμμής. Από αυτήν, υπολογίζουμε την τιμή του B (το πιο πιθανό είναι μην διαθέτουμε μαγνητόμετρο).

2. Κατεύθυνση της δύναμης

- Εξηγούμε την κατεύθυνση της δύναμης στον αγωγό με βάση το σκίτσο και τις σημειώσεις. Ταιριάζει με τη θεωρία?

3. Μεταβλητό μήκος

- Ως αρχή, εργαζόμαστε με το πρώτο πλαίσιο, των πέντε τυλιγμάτων.
- Σχεδιάζουμε τη δύναμη σε συνάρτηση με το μήκος του αγωγού, ενώνουμε τα σημεία με μια ευθεία συμπεριλαμβανομένου του $(0,0)$ και προσδιορίζουμε την κλίση του, βρίσκοντας έτσι το $B (=B1)$.
- Επαναλαμβάνουμε το ίδιο και για το τυλίγμα των 15 σπειρών. Καλούμε τη νέα τιμή του B που βρήκαμε σε $B2$.

4. Μεταβαλλόμενο πεδίο

- Σχεδιάζουμε τη δύναμη σε συνάρτηση με τον τύπο των μαγνητών.
- Τα σημεία βρίσκονται σε ευθεία γραμμή που περνάει από την αρχή των αξόνων $(0,0)$;

Συζήτηση και αξιολόγηση

- Σχολιάζουμε τη συσχέτιση μεταξύ θεωρίας και παρατηρήσεων.
- Δεν έχουμε αναφέρει τα κάθετα μέρη του αγωγού μέχρι τώρα. Γιατί δεν έχουν σημασία;
- Εξηγούμε λεπτομερώς ποιος τύπος γραφήματος αναμένεται στα μέρη 1 και 3 και περιγράφουμε πόσο ταιριάζει με τα μετρούμενα αποτελέσματα. Πώς ταιριάζει το μέγεθος του B στο μέρος 1 και μέρος 3;
- Στο Μέρος 3 βρήκαμε επίσης μια τιμή για το πεδίο, το οποίο ονομάστηκε B_2 . Συγκρίνετε αυτό με την προηγούμενη τιμή του $B(B_1)$. Εξηγούμε μια πιθανή απόκλιση.
- Συζητάμε το αποτέλεσμα του Μέρους 4.

Σημειώσεις δασκάλου

1. Έννοιες που χρησιμοποιούνται

- Ρεύμα
- Πυκνότητα μαγνητικής ροής (ένταση μαγνητικού πεδίου B)
- Δύναμη
- 3ος νόμος του Νεύτωνα
- Κανόνας του δεξιού χεριού
- Μαθηματικές δεξιότητες
- Γραμμική σχέση
- Χρήση υπολογιστικού φύλλου

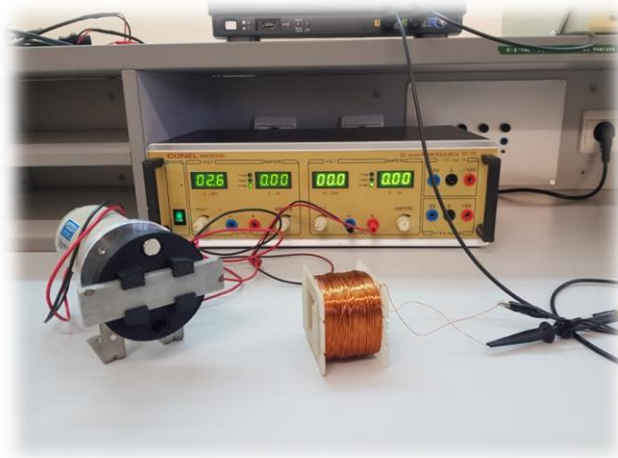
2. Σχετικά με τον εξοπλισμό

- Το κύκλωμα έχει ένα ονομαστικό μέγιστο ρεύμα 5 A , αλλά αυτό μπορεί να υπερβεί χωρίς κίνδυνο για σύντομο χρονικό διάστημα.
- Για να μάθουμε εάν μια συγκεκριμένη ψηφιακή ζυγαριά είναι κατάλληλη για το πείραμα πειραματιζόμαστε, δοκιμάζοντας τα εξής:
 - ◆ πραγματοποιούμε τη συνδεσμολογία που αναφέρθηκε αρχικά,
 - ◆ μηδενίζουμε τη ζυγαριά (με μηδενικό ρεύμα),
 - ◆ χρησιμοποιούμε ρεύμα περίπου 5 A , διαβάζουμε την κλίμακα και μετά αντιστρέφουμε την κατεύθυνση του ρεύματος χωρίς να της αλλάξουμε την τιμή. Ξαναδιαβάζουμε την ένδειξη της ζυγαριάς,
 - ◆ τα δύο βάρη που διαβάζονται πρέπει να είναι περίπου το ίδιο ακριβώς με αντίθετα πρόσημα. Αποκλίσεις από 1 έως 2 % είναι αποδεκτές.
- Εάν είναι απαραίτητο, τοποθετούμε φελιζόλ πάχους 2 έως 3 cm μεταξύ της ζυγαριάς και των μαγνητών.[47]

8.4 Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης

Για την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης, συνδυάζονται όλα τα προηγούμενα. Με την εφαρμογή, λοιπόν, των φαινομένων της μαγνητικής ροής Φ , της ηλεκτρομαγνητικής τάσης εξ επαγωγής και της δύναμης Laplace, και με τη χρήση ενός κινητήρα dc, θα παραχθεί στο πείραμα αυτό, το οποίο είναι και αυτό εποπτικό περισσότερο, εναλλασσόμενη τάση.

Πάνω στον κινητήρα μας (24Vdc) εφάπτεται ένας μόνιμος μαγνήτης και μπορεί να εκτελεί ελεύθερη κυκλική περιστροφή, όταν ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία, Σχ.8.3.



Σχήμα 8. 3: Πειραματική διάταξη παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης

Για την προσάρτηση του μαγνήτη πάνω στον κινητήρα με τη δυνατότητα της ελεύθερης περιστροφής έχει κατασκευαστεί με τη βοήθεια 3d εκτυπωτή, κατάλληλος πλαστικός αντάπτορας. Πάνω σ' αυτόν, μπορεί να συγκρατηθεί με ασφάλεια ένας ραβδόμορφος μαγνήτης, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα τοποθέτησης και δύο κυλινδρικών.

Εκτός από τον κινητήρα και τους μαγνήτες, θα χρειαστούμε επίσης και πηνία με διαφορετικά τυλίγματα, στα άκρα των οποίων θα συνδέσουμε έναν ψηφιακό παλμογράφο για την απεικόνιση του επαγόμενου σήματος και την αποθήκευση της κυματομορφής.

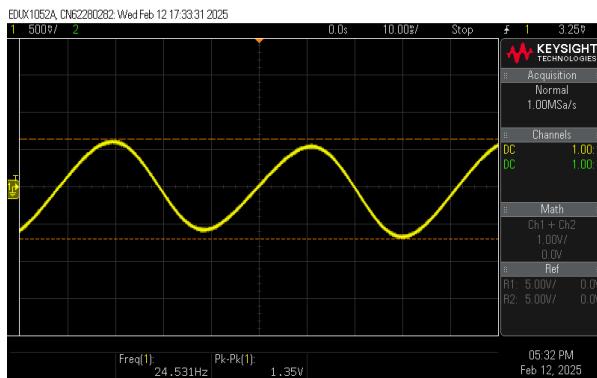
Για την εκτέλεση του πειράματος αυτού θα υλοποιήσουμε την παραπάνω συνδεσμολογία και θα ακολουθήσουμε τα εξής βήματα:

- Με τη χρήση του ραβδόμορφου μαγνήτη αρχικά, τροφοδοτούμε τον κινητήρα με τάση 2Volt. Παρατηρούμε την εικόνα στον παλμογράφο και την αποθηκεύουμε, καταγράφοντας το πλάτος και την περίοδο της.
- Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία, αυξάνοντας σταδιακά την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα και καταγράφοντας τις αντίστοιχες τάσεις και περιόδους του σήματος.
- Αφαιρώντας τον ραβδόμορφο μαγνήτη και με τη χρήση τώρα των δύο κυλινδρικών, ακολουθούμε πάλι την ίδια πορεία εργασίας με πην.
- Καταγράφουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε πίνακα, τα μελετάμε και εξάγουμε τα συμπεράσματά μας.

	Τάση τροφοδοσίας κινητήρα (προερ.)	Πλάτος τάσης στον παλμογράφο	Περίοδος σήματος στον παλμογράφο
Ραβδοειδής μαγνήτης			
Κυλινδρικοί μαγνήτες			

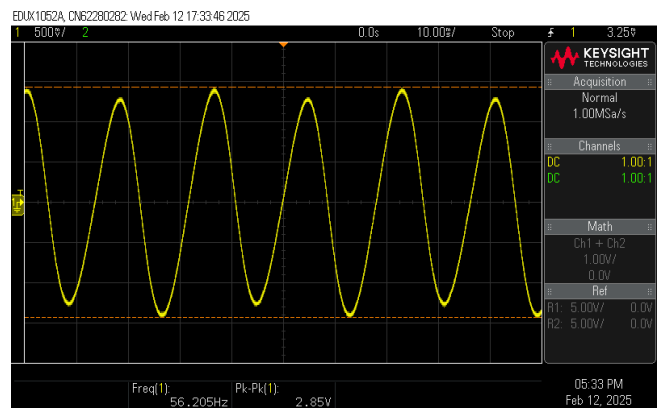
Ενδεικτικά :

Μόνο για το ραβδοειδή μαγνήτη, έγινε λήψη τριών στιγμιότυπων στον παλμογράφο, όσο αυξανόταν η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, τα οποία παρατίθενται παρακάτω :

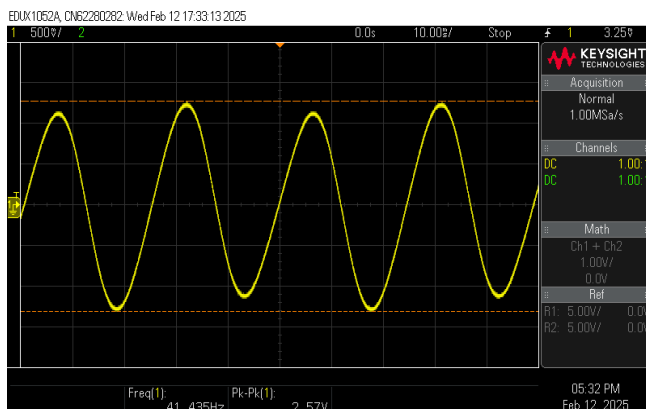


$V_{p-p} = 1,35V$
 $F = 24,531Hz$

$V_{p-p} = 2,57$
 $F = 41,435Hz$

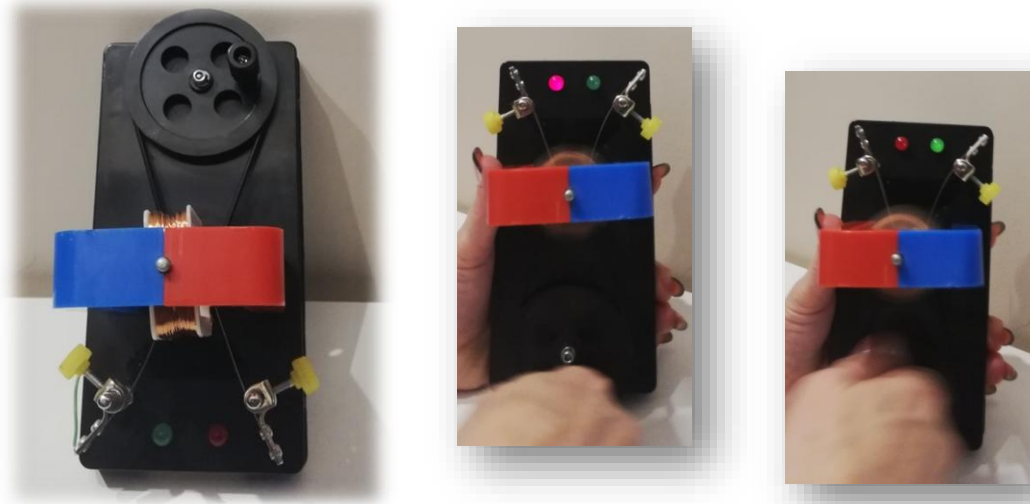


$V_{p-p} = 2,85V$
 $F = 56,205Hz$



8.5 Παραγωγή D.C. τάσης - Κινητήρας D.C.

Τέλος, η συγκεκριμένη κατασκευή αναπαριστά με τον καλύτερο τρόπο την δημιουργία συνεχούς τάσης από στρεφόμενο πλαίσιο μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, Σχ.8.4. Η περιστροφή του πλαισίου γίνεται χειροκίνητα, με ιμάντα, που το αναγκάζει να περιστρέφεται ανάλογα με την εξωτερική κυκλική ταχύτητα του χεριού. Υπάρχει και ένδειξη με δύο led, όπου ανάλογα με την φορά περιστροφής ανάβει ένας μόνο φωτεινός ενδείκτης.



Σχήμα 8. 4: Πειραματική διάταξη παραγωγής d.c. τάσης - Κινητήρας d.c.

Περιστρέφοντας τον ιμάντα δεξιόστροφα, ανάβει το κόκκινο led, ενώ κατά την αντίστροφη φορά, ανάβει το πράσινο led.

Η κατασκευή αυτή μπορεί να λειτουργήσει και ως κινητήρας, αντιστρέφοντας με τον τρόπο αυτό την όλη διαδικασία, απλά παρέχοντας τάση στα άκρα του στρεφόμενου πλαισίου, όπου μετά την εφαρμογή ορισμένης τιμής, το πλαίσιο αρχίζει και περιστρέφεται.

8.6 Επίλογος

Με τις παραπάνω πειραματικές διατάξεις κλείνει το τρίτο και τελευταίο μέρος της εργασίας, μέσα από τις οποίες οι εμπλεκόμενοι μαθητές θα είναι σε θέση να αντιληφθούν με τον καλύτερο και πιο παραστατικό και αντιπροσωπευτικό τρόπο όλα τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται με την αλληλεξάρτηση και την αλληλεπίδραση του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού, βάζοντάς τους βαθιά στις έννοιες και αρχές που διέπουν πλέον τον ηλεκτρομαγνητισμό.

Κεφάλαιο 9ο : Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

9.1 Εισαγωγή

Μετά την πολυετή μου διδακτική εμπειρία θεωρώ ότι ο καλύτερος και αποτελεσματικότερος τρόπος για να μπορέσουν οι μαθητές να εστιάσουν στη μάθηση και να έχουν όρεξη για γνώση είναι αναγκαίο ο τρόπος διδασκαλίας να γίνεται με περισσότερο οπτικοποιημένο και διαδραστικό τρόπο, μιας και όσο περνούν τα χρόνια το ενδιαφέρον τους για γνώση κεντρίζεται με πιο ευφάνταστα και εντυπωσιακά μέσα διδασκαλίας.

Με τις προσομοιώσεις των θεωρητικών εννοιών, οι μαθητές είναι σε θέση, τις περισσότερες φορές, ν' αντιληφθούν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους. Με τις πειραματικές, όμως, διατάξεις και την φυσική τους εμπλοκή βιώνουν με τον καλύτερο τρόπο την πορεία εξέλιξής τους και μπορούν να συνειδητοποιήσουν και να εμπεδώσουν τον λόγο για τον οποίο γίνονται κάποια συμβάντα. Με βιωματικό πλέον τρόπο, μπορούν να κατανοήσουν εις βάθος τις έννοιες και τους νόμους που διέπουν ένα φαινόμενο ή φαινόμενα, θέτοντας τα θεμέλια για την ανάδειξη νέων επιστημόνων και, ποιος ξέρει, εφευρετών.

9.2 Συμπεράσματα

Οι διατάξεις που παρουσιάστηκαν στη διπλωματική αυτή εργασία και με τις οποίες διερευνήθηκαν τα φαινόμενα για τα οποία κατασκευάστηκαν, καλύπτουν, κατά τη γνώμη μου, με απλό και κατανοητό, τρόπο τις έννοιες και τις αρχές στις οποίες βασίζονται, προσφέροντας με τον πιο παραστατικό τρόπο τη δυνατότητα στο μαθητή ν' αλληλεπιδράσει με αυτές και να εξάγει τα δικά του συμπεράσματα. Τα εξαγόμενα αυτά συμπεράσματα σαφώς και συμφωνούν με αυτά στα οποία κατέληξαν οι σπουδαίοι αυτοί επιστήμονες που τα μελέτησαν και τα διατύπωσαν αρχικά.

9.3 Προτάσεις βελτίωσης

Οι πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ναι, μεν, καλύπτουν με σαφή, θεωρώ, τρόπο τις έννοιες και τα φαινόμενα για τα οποία κατασκευάστηκαν, αλλά σίγουρα θα μπορούσαν να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν και κάποιες πιο εξελιγμένες, καλύπτοντας μεγαλύτερες πιθανόν ανάγκες.

Ξεκινώντας από την κατασκευή του ξύλινου εκκρεμούς, θα μπορούσαν να γίνουν οι παρακάτω βελτιώσεις :

- Να κατασκευαστεί ένας άξονας, πάνω στον οποίο θα κινείται το πηνίο σε συγκεκριμένες θέσεις, οπότε θα φαινόταν και η αντίστοιχη διαφορά στην επαγόμενη τάση.
- Η πλακέτα του Arduino Uno δεν είναι σε θέση ν' αποθηκεύσει πολλές εναλλαγές και ταλαντώσεις του μαγνήτη, γι' αυτό και με τον προγραμματισμό του, μετράει μία μόνο περιοδική ταλάντωση, η οποία όμως, λόγω τριβών, φθίνει. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας άλλος μικροεπεξεργαστής ή μικροϋπολογιστής. π.χ. Raspberry Pi.
- Μέσα από την εμφάνιση του τυπωμένου κυκλώματος του συστήματος προσαρμογής και τάσης και της φωτεινής ένδειξης, οι μαθητές θα εμπλακούν ακόμα περισσότερο στην πειραματική διαδικασία, έχοντας επιπλέον τη χαρά της δημιουργίας και της ανταπόδοσης των κόπων τους, την ηθική ικανοποίηση της υλοποίησης ενός κυκλώματος που όντως

λειτουργεί στο τέλος, έτσι όπως ήταν αρχικά σχεδιασμένο στο μυαλό του καθενός. Μπορεί ο κάθε μαθητής να σκεφτεί το δικό του σενάριο λειτουργίας και να μπει στη διαδικασία να το υλοποιήσει. Σίγουρα, προβλήματα και αδιέξοδα θα υπάρχουν, αλλά αυτός, ευτυχώς ή δυστυχώς, είναι ο μοναδικός δρόμος προς νέες ανακαλύψεις και καινοτόμες κατασκευές.

Όσον αφορά στην κατασκευή με τη ζυγαριά, αυτό που δεν φαίνεται καθαρά και με ακριβείς υπολογισμούς είναι η επίδραση της γωνίας θ - και πιο συγκεκριμένα το ημίτονο αυτής - μεταξύ των διανυσμάτων B και I , στην τιμή της εμφανιζόμενης συνισταμένης δύναμης Laplace.

Για το λόγο αυτό, θα μπορούσε να προσαρμοστεί στην πλαστική βάση των τυλιγμάτων ένα μοιρογνωμόνιο, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα μηχανικής περιστροφής της, ώστε να είναι εφικτή και η αντίστοιχη κίνηση των αγωγών μέσα στο μαγνητικό πεδίο των δύο μαγνητών, μετρώντας εκ νέου τη συνισταμένη δύναμη Laplace για συγκεκριμένες γωνίες θ , εξάγοντας τελικά και τη δική της εξάρτηση στην τελική δύναμη Laplace που ασκείται στους ρευματοφόρους αγωγούς, όταν αυτοί βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Τέλος, μια πολύ καλή ιδέα θα ήταν να γίνουν πειραματισμοί με την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, π.χ. ασύρματη φόρτιση που είναι και ένα επίκαιρο θέμα με την είσοδο στους δρόμους των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που λειτουργούν με μπαταρίες.

9.4 Επίλογος

Όλα στη φύση είναι μαγικά και αρμονικά φτιαγμένα. Η επαφή του ανθρώπου με αυτή και η προσπάθεια κατανόησης και επεξήγησης των φαινομένων που παρατηρούνται ήταν, είναι και θα είναι η έναρκτήριος δύναμη για σπουδαίες ανακαλύψεις. Δεν έχουμε λοιπόν, να κάνουμε τίποτε άλλο από το να πειραματιστούμε, με αγάπη φυσικά και σεβασμό προς το περιβάλλον.

Έτσι, όπως είναι γνωστό, οι επιστήμονες έχουν πλέον στραφεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αειφόρο ανάπτυξη, με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και των απογόνων μας..

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Ιστοσελίδες

- [1] https://sch.cy/sm/343/fysiki_c_lyk_prosanatol_kef4_ilektromagnitismos.pdf
- [2] <https://bemagnet.com/permanent-magnets/>
- [3] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2165/magnets.pdf>
- [4] <https://www.magcam.com/blog/inspection-of-magnetic-field-distributions>
- [5] <https://physics.info/magnetism/slide-north-seeking.html>
- [6] <https://www.scientificamerican.com/article/can-a-magnet-ever-have-only-one-pole/>
- [7] <http://users.math.uoc.gr/~taroud/Lecture%206p.pdf>
- [8] <https://slideplayer.gr/slide/15738875/>
- [9] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magnet3D.html>
- [10] https://physiclessons.blogspot.com/2013/04/blog-post_3.html
- [11] <https://online-learning-college.com/knowledge-hub/gcses/gcse-physics-help/magnetism/>
- [12] https://tccc.iesl.forth.gr/education/local/Physics_I/Magnetism-1.pdf
- [13] https://javalab.org/en/magnet_en/
- [14] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/flux3D.html>
- [15] <https://slideplayer.gr/slide/1901435/>
- [16] <https://www.khanacademy.org/science/highschool-physics/x6679aa2c65c01e53:electromagnetics/x6679aa2c65c01e53:magnetic-field-due-to-current/v/oersteds-experiment-magnetic-field-due-to-current>
- [17] https://javalab.org/en/oersteds_experiment_en/
- [18] http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4712/Fysiki-Teuxos-B_G-Lykeiou-ThSp-SpYg_html-apli/index4.html
- [19] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldLinear3D.html>
- [20] http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4710/Fysiki-Teuxos-A_G-Lykeiou-ThSp-SpYg_html-empl/index4_2.html
- [21] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldCircular2-3D.html>
- [22] <https://slideplayer.gr/slide/2911792/>
- [23] <https://slideplayer.gr/slide/3645393/>
- [24] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/magneticFieldCoil3D.html>
- [25] https://javalab.org/en/magnetic_field_around_a_coil_en/
- [26] http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4712/Fysiki-Teuxos-B_G-Lykeiou-ThSp-SpYg_html-apli/index5.html
- [27] http://physiclessons.blogspot.com/2013/02/blog-post_7326.html
- [28] https://el.wikipedia.org/wiki/Νόμος_της_επαγωγής_του_Φαραντέι
- [29] https://physiclessons.blogspot.com/2013/01/blog-post_28.html
- [30] https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=63#3
- [31] https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=64#3
- [32] https://www.seilias.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=412&Itemid=32&catid=20
- [33] <https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM111/13η%20εβδομάδα%20ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.pdf>
- [34] https://4sek-g-athin.att.sch.gr/images/Hlektronikoi/AC_DC_CIRCUITS/Transformers.pdf
- [35] https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_el.html
- [36] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/faradayLaw.html>

- [37] https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-electromagnetic-lab/latest/faradays-electromagnetic-lab_all.html
- [38] https://javalab.org/en/faradays_law_en/
- [39] https://javalab.org/en/lorentzs_force_3d_en/
- [40] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/laplaceForce3D.html>
- [41] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/laplaceForce3D-2.html>
- [42] <https://www.seilias.gr/images/stories/html5/generator3D.html>,
- [43] https://javalab.org/en/ac_generator_en/
- [44] https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mag_alternator&l=g
r
- [45] https://javalab.org/en/dc_motor_en/
- [46] https://javalab.org/en/dc_motor_2_en/
- [47] <https://catalogues.frederiksen.eu/uk/experiments/?page=24>
- [48] <https://sites.google.com/site/elektrikoikineteres/elektrogennetria---elektrokineteras>

Βιβλία

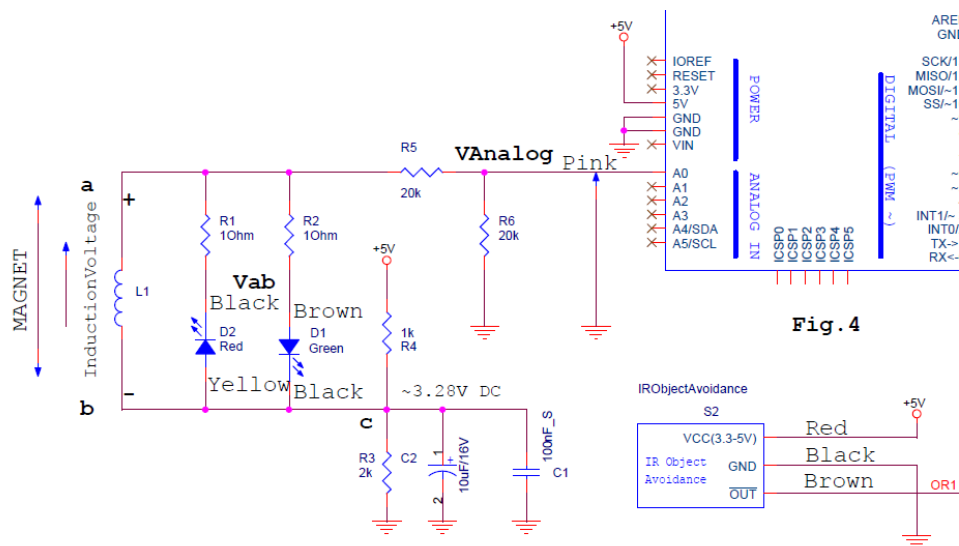
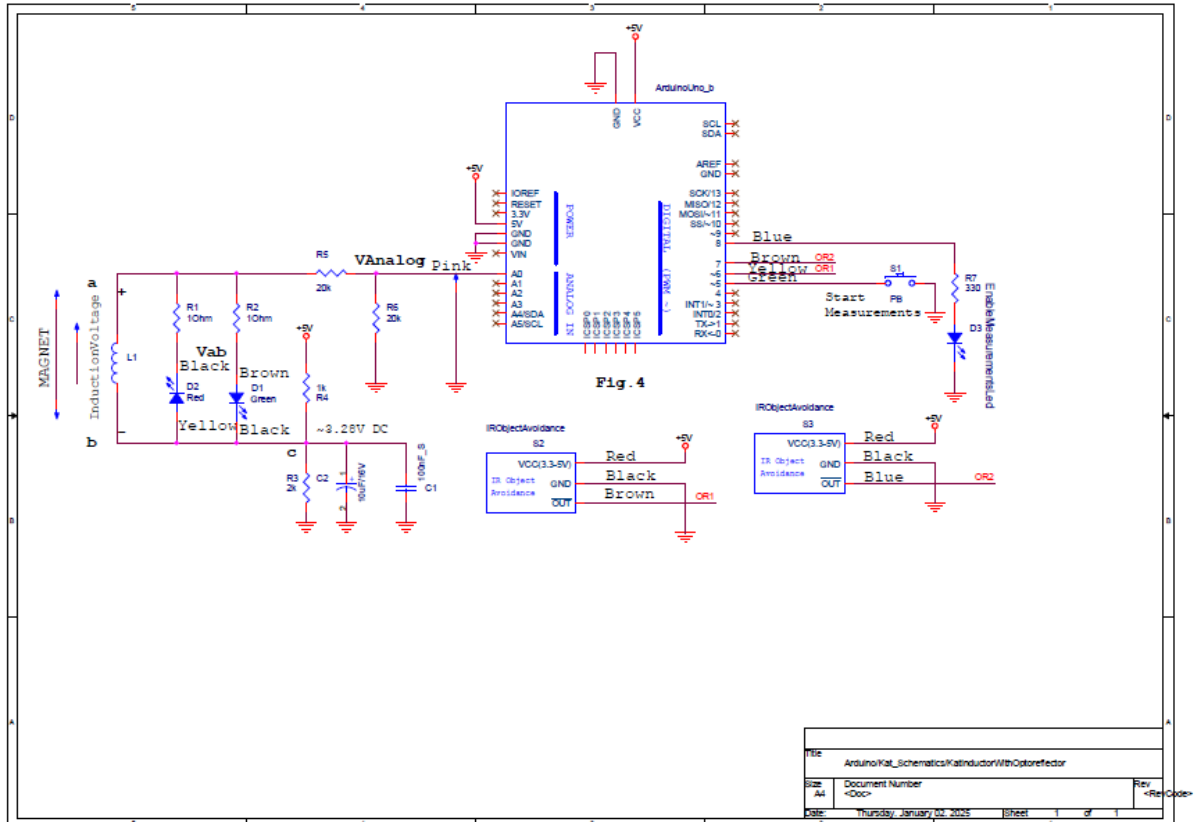
- A. ΝΙΚΟΣ ΚΟΛΛΙΟΠΟΥΛΟΣ, ΗΛΙΑΣ ΛΟΗΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ 1, 3^η έκδοση, Εκδόσεις "ΙΩΝ", 1993,90, σελ.145-174, 221-238.
- B. Serway R. A., Jewett J. W., *ΦΥΣΙΚΗ ΓΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ - Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός Φως και Οπτική Σύγχρονη Φυσική*, Όγδοη αμερικανική έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2013, σελ. 245-261, 283-298, 319-339. 359-361, 369-370, 408-410
- Γ. Χαράλαμπος Κανελλόπουλος Γεώργιος Παληός Γεώργιος Χατζαράκης, *ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ*, Αθήνα, Εκδόσεις ΟΕΔΒ, 2000, σελ.186-187, 234-240, 342-354
- Δ. Βουρνάς Κω/νος Δαφέρμος Ολύμπιος Πάγκαλος Σταύρος Χατζαράκης Γεώργιος, *Ηλεκτροτεχνία*, Αθήνα, Εκδόσεις ΟΕΔΒ, 2001, σελ 222-230, 252-256, 342-344
- Ε. Γιαντζούδης Σωτήρης Λαγουδάκος Μιχαήλ Μπινιάρης Αθανάσιος, *ηλεκτρικές μηχανές*, Αθήνα, Εκδόσεις ΟΕΔΒ, 2001, σελ. 21-28, 76-80

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 Κύκλωμα πλακέτας και οπτο-ανακλαστήρας

Για την υλοποίηση του κυκλώματος ελέγχου και σύνδεσης με τη πλακέτα του arduino uno, σχεδιάστηκε τυπωμένο κύκλωμα με τη βοήθεια του προγράμματος σχεδιασμού Orcad και Eagle. Τα σχέδια δίνονται παρακάτω. Στη συγκεκριμένη πειραματική κατασκευή έχει υλοποιηθεί το κύκλωμα σε διάτρητη πλακέτα, χωρίς να γίνει η τυπωμένη πλακέτα.

- Σχέδιο στο πρόγραμμα Orcad

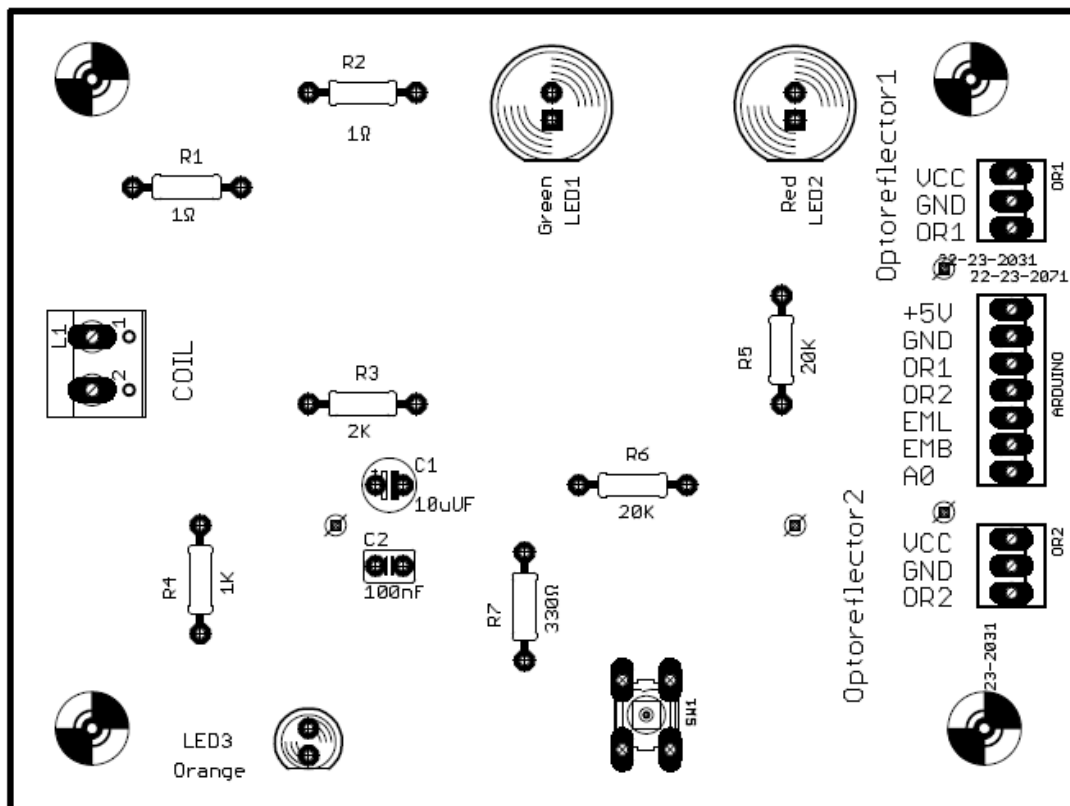


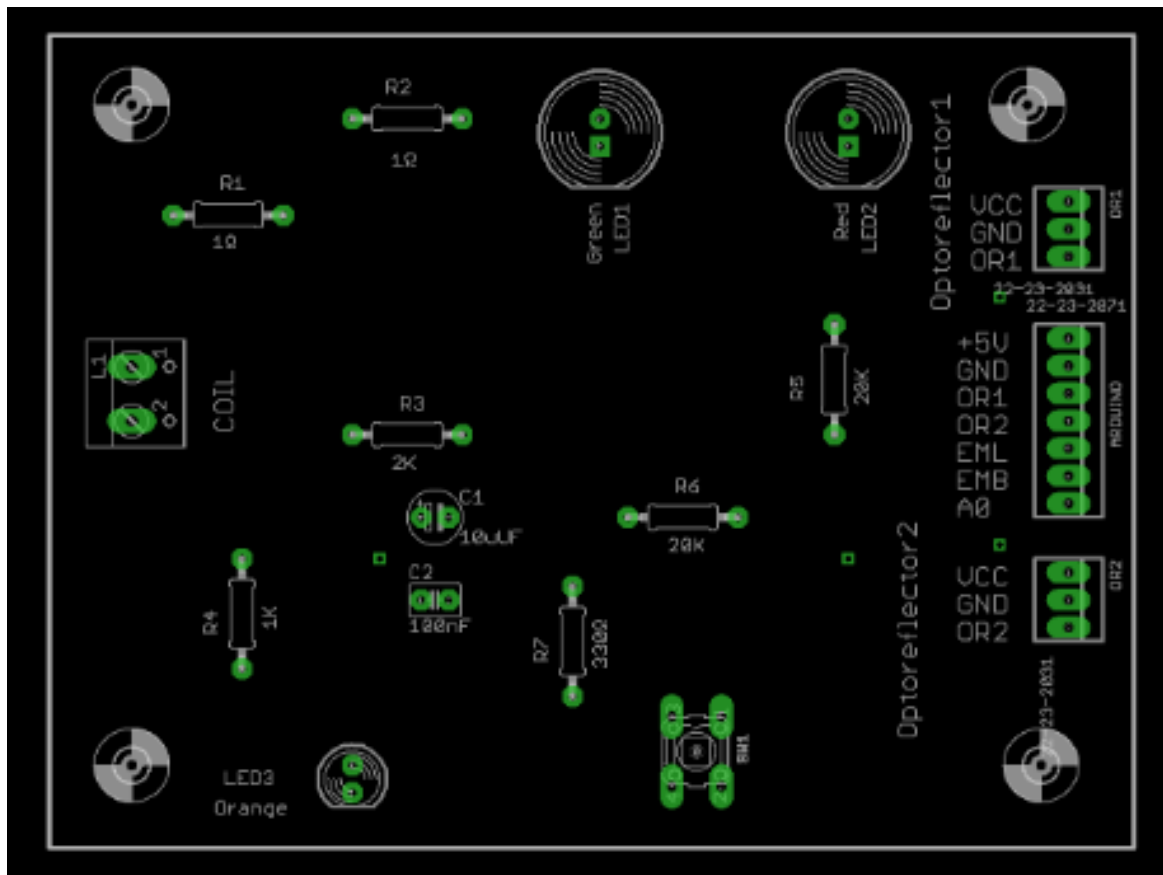
Σχήμα Π.1 : Κύκλωμα προσαρμογής επαγόμενης τάσης για σύνδεση με το Arduino

- ◆ Η πάνω όψη της πλακέτας με τις οπές της (φαίνονται και κάποια βραχυκυκλώματα)

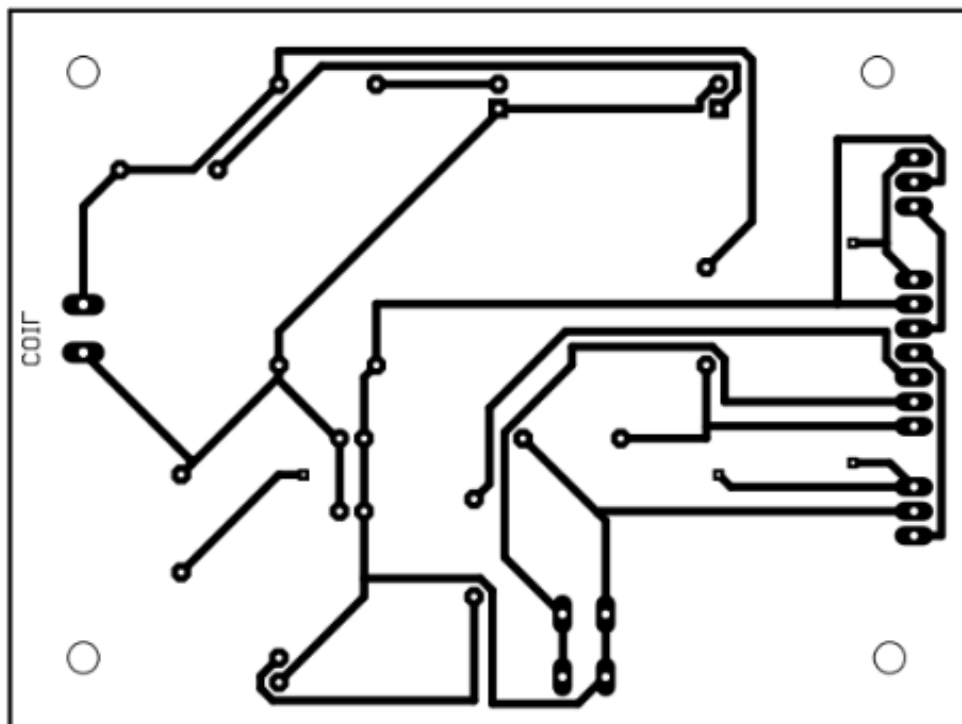


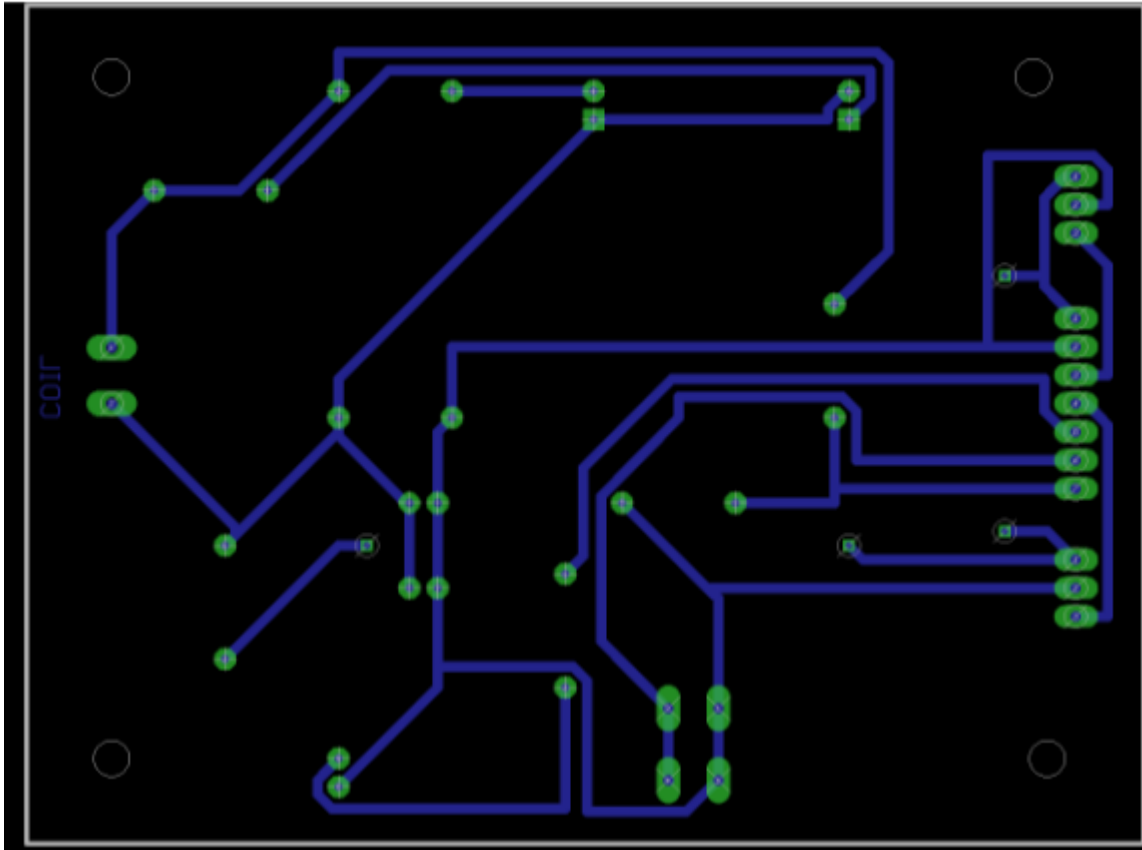
- ◆ Η πάνω όψη της πλακέτας με τα εξαρτήματα – διαφάνεια που μπορεί να κολληθεί πάνω στην πλακέτα για ευκολία.





- ◆ Η κάτω όψη της πλακέτας, με τις χαλκοδιαδρομές και τις σπές της..





- ◆ Λίγα λόγια για τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης με το συγκεκριμένο κύκλωμα :

Για τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης θα χρησιμοποιήσουμε μία από τις αναλογικές εισόδους του Arduino Uno. Οι εισοδοί του αυτές μπορούν να μετρήσουν τάσεις στην περιοχή 0 - 5Volt.

Η επαγόμενη, όμως, στο πηνίο εναλλασσόμενη τάση από κορυφή σε κορυφή (V_{p-p}) πολύ πιθανό να υπερβαίνει τα $6 V_{p-p}$, ανάλογα με την ταχύτητα του μαγνήτη ή την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, για να μετρήσουμε την τάση του πηνίου, κάνουμε τα εξής :

- αρχικά, την προσθέτουμε πάνω σε μια θετική συνεχή τάση ($DC_{off-set}$), για να έχουμε μόνο θετικές τιμές,
- ενώ, έπειτα, πριν την οδηγήσουμε στην αναλογική είσοδο, την περνάμε από έναν διαιρέτη τάσης, με κατάλληλη διαίρεση, όπως εξηγείται στη συνέχεια, ώστε να βρίσκεται στην περιοχή 0 – 5Volt και να μην την υπερβαίνει.

Έστω, π.χ. ότι V_{ab} είναι η επαγόμενη τάση πάνω στο πηνίο, όταν ο μαγνήτης περνάει από δίπλα του, Σχ.Π.1. Η τάση V_{ab} οδηγείται στο διαιρέτη που σχηματίζουν οι αντιστάσεις R_5 και R_6 , οπότε η τάση V_{Analog} (αναλογική είσοδος A0 του A/D στο Arduino) που οδηγείται στο μετατροπέα είναι :

$$V_{Analog} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot V_a = K_a \cdot V_a \quad (II.1)$$

όπου K_a : ο λόγος του διαιρέτη τάσης ($K_a = \frac{R_6}{R_5 + R_6}$)

Η τάση όμως V_a , όπως αυτή προκύπτει από τη συνδεσμολογία, είναι :

$$V_a = V_{ab} + V_c \quad (II.2)$$

όπου : V_C η τάση του διαιρέτη τάσης στο σημείο C, που αποτελεί τη dc τάση στην οποία "κάθεται" η επαγόμενη τάση V_{ab} .

Μ' άλλα λόγια, η επαγόμενη τάση μετατοπίζεται προς τα θετικά κατά V_C . Η τιμή της V_C επιλέγεται έτσι ώστε η τάση V_a να είναι πάντα θετική και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$V_C = \frac{R_3 // (R_5 + R_6)}{R_4 + R_3 // (R_5 + R_6)} \cdot V_{CC} = K_1 \cdot V_{CC} \quad (\text{Π.3})$$

όπου : K_1 : ο συντελεστής της V_{CC} , που υπολογίζεται παρακάτω, αντικαθιστώντας στη σχέση (Π.3) τις τιμές των αντιστάσεων της συνδεσμολογίας μας :

$$\begin{aligned} \frac{R_3 // (R_5 + R_6)}{R_5 + R_6} &\rightarrow \frac{R_3 \cdot (R_5 + R_6)}{R_3 + (R_5 + R_6)} = \frac{2K\Omega \cdot (20K\Omega + 20K\Omega)}{2K\Omega + (20K\Omega + 20K\Omega)} = \frac{2K\Omega \cdot 40K\Omega}{2K\Omega + 40K\Omega} \\ &= \frac{80K\Omega^2}{42K\Omega} \cong 1,905K\Omega \end{aligned}$$

Άρα,

$$K_1 = \frac{1,905K\Omega}{1K\Omega + 1,905K\Omega} = \frac{1,905KV}{2,905K\Omega} = 0,656 \quad \text{και} \quad V_C = 0,656 \cdot V_{CC} \quad (\text{Π.4})$$

Η τάση V_a , όπως ειπώθηκε, οδηγείται στην είσοδο του A/D μετατροπέα, αφού περάσει από το διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν οι αντιστάσεις R_5 και R_6 και υπολογίζεται από τη σχέση (Π.1) :

$$\begin{aligned} V_{Analog} &= \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot V_a = \frac{20K\Omega}{20K\Omega + 20K\Omega} \cdot V_a = \frac{1}{2} \cdot V_a = K_2 \cdot V_a \Rightarrow \\ K_2 &= \frac{1}{2} \quad \text{και} \quad V_a = 2 \cdot V_{Analog} \end{aligned} \quad (\text{Π.5})$$

Το βήμα κβάντισης του ADC με τα 10 bit που έχει είναι :

$$V_{step} = \frac{V_{CC}}{2^n - 1} = \frac{V_{CC}}{2^{10} - 1} = \frac{V_{CC}}{1023} \quad (\text{Π.6})$$

Η τιμή ADValue (από 0 έως 1023) που δίνει ο ADC για κάθε αναλογική τάση που δέχεται στην είσοδό του είναι :

$$ADValue = \frac{V_{Analog}}{V_{step}} \Rightarrow$$

$$V_{Analog} = ADValue \cdot V_{step} = ADValue \cdot \frac{V_{CC}}{1023} \quad (\text{Π.7})$$

Σύμφωνα με τη σχέση (Π.5), η V_a θα είναι :

$$V_a = 2 \cdot V_{Analog} = 2 \cdot ADValue \cdot \frac{V_{CC}}{1023} = K_2 \cdot ADValue \quad (\text{Π.8})$$

όπου : K_2 : ο συντελεστής της ADValue, που ισούται με :

$$K_2 = \frac{2 \cdot V_{CC}}{1023} \quad (\text{Π.9})$$

Από την εξίσωση (Π.2) προκύπτει ότι η ζητούμενη τάση V_{ab} που επάγεται στο πηνίο είναι :

$$V_{ab} = V_a - V_c = K_2 \cdot ADValue - V_c \quad (\text{Π.10})$$

Τη σχέση αυτή θα τη χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα για τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης V_{ab} , οπότε για τάση $V_{CC}=5V$, έχουμε :

$$K_2 = \frac{2.5V}{1023} = \frac{10V}{1023} = 9,775 \cdot 10^{-3} = 0,009775 \cong 0,0098 \quad (\text{Π.11})$$

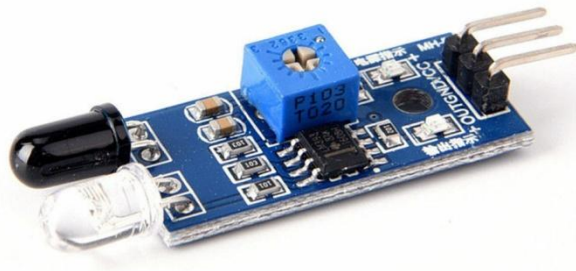
Για να μη μετρά ο ADC όσο ο βραχίονας με το μαγνήτη είναι στις περιοχές που δεν επάγεται τάση στο πηνίο (ή είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα), τοποθετούνται δύο οπτο-ανακλαστήρες απέναντι από το πηνίο και στις άκρες αυτού, οι οποίοι θα εντοπίζουν τον βραχίονα μόλις αυτός φτάσει στο πηνίο και μόλις απομακρύνεται από αυτό.

Με τη μέθοδο αυτή, οι μετρήσεις θα ξεκινούν μόλις ο μαγνήτης φτάσει στο πηνίο και θα σταματούν μόλις απομακρυνθεί από αυτό. Θα μετράμε μία μόνο περίοδο T που θα είναι το άθροισμα των δύο χρόνων T_1 και T_2 . Ως T_1 ορίζεται ο χρόνος από τη στιγμή που θα περάσει ο βραχίονας από τον 1^ο οπτο-ανακλαστήρα (**Start1**) έως να φτάσει στον 2^ο εκτελώντας την πρώτη του ταλάντωση (**Stop1**) και ως T_2 ο χρόνος από τη στιγμή που επιστρέφει (**Start2**), κάνοντας τώρα τη δεύτερη ταλάντωση, μέχρι να φτάσει στον δεύτερο οπτο-ανακλαστήρα (**Stop2**).



- ♦ Λίγα λόγια για τον οπτο-ανακλαστήρα (opto-reflector)

Πρόκειται για έναν ανιχνευτή αντικειμένων με υπέρυθη ακτινοβολία. Μπορεί να ανιχνεύσει αντικείμενα σε απόσταση από 1 έως 3 εκατοστά από το υπέρυθρο Led.

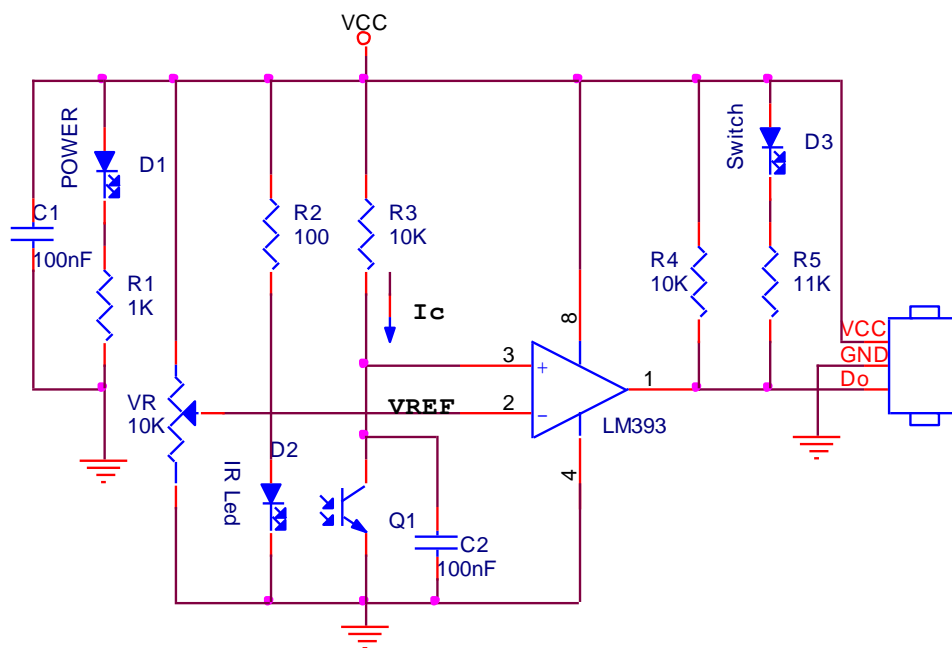


Φωτογραφία Shield οπτοανακλαστήρα

Αποτελείται από ένα Led υπέρυθρου φωτός (το σκουρόχρωμο) και ένα φωτοτρανζίστορ (το διαφανές). Το υπέρυθρο φως που εκπέμπει το υπέρυθρο Led ανακλάται από το προς ανίχνευση αντικείμενο και πέφτει στη βάση του φωτοτρανζίστορ.

Το ρεύμα του συλλέκτη I_c του τρανζίστορ εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη βάση του. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα της βάσης.

Η τάση V_c του συλλέκτη του τρανζίστορ συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_{REF} που ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο V_R (P103-10K Ω). Το ποτενσιόμετρο ρυθμίζει την τάση αναφοράς και επομένως την μέγιστη απόσταση ανίχνευσης.



Κύκλωμα Shield οπτοανακλαστήρα

Υπενθυμίζεται ότι το ρεύμα προς την είσοδο του τελεστικού ενισχυτή είναι αμελητέο. Δηλ. το ρεύμα που διαρρέει την R_3 είναι το ίδιο με το ρεύμα του συλλέκτη του τρανζίστορ. Έτσι, η τάση του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$V_c = V_{CC} - I_c \cdot R_3$$

Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα συλλέκτη I_c , τόσο μικραίνει η τάση V_c του συλλέκτη φωτοτρανζίστορ. Η ένταση I_c του ρεύματος σχετίζεται με την ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στο φωτοτρανζίστορ. Πιο συγκεκριμένα η ένταση αυτή επηρεάζεται από:

- την απόσταση του IR Led από το προς ανίχνευση αντικείμενο,
- από την ανακλαστικότητα του αντικειμένου και
- από την απόσταση του φωτοτρανζίστορ από το αντικείμενο.

Η τάση του συλλέκτη του φωτοτρανζίστορ συγκρίνεται με την τάση αναφοράς V_{REF} , που ρυθμίζεται με το ποτενσιόμετρο στην περιοχή τιμών από 0 έως V_{CC} . Όταν η V_c πέσει κάτω από την τάση αναφοράς, η έξοδος γίνεται LOW, γεγονός που σημαίνει ότι έχει ανιχνευτεί αντικείμενο. Τότε και το Led D_3 , που χαρακτηρίζεται στο παραπάνω σχέδιο σαν Switch, ανάβει.

Επομένως:

- όταν $V_C > V_{REF}$ η έξοδος είναι HIGH (μη ανίχνευση), ενώ
- όταν $V_C < V_{REF}$ η έξοδος είναι LOW (ανίχνευση).

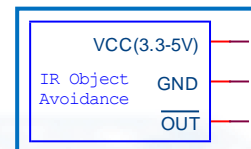
Επομένως, η έξοδος είναι ενεργή LOW, δηλ. γίνεται LOW, όταν ανιχνεύει αντικείμενο.

Από τον τρόπο λειτουργίας του shield προκύπτει ότι μπορούμε να αυξήσουμε την ευαισθησία του, αυξάνοντας με το ποτενσιόμετρο την τάση αναφοράς V_{REF} . Δεν μπορούμε όμως να αυξήσουμε την τάση V_{REF} , και συνεπώς την ευαισθησία, υπερβολικά, επειδή τότε υπάρχει ο κίνδυνος να διεγείρεται από τις διακυμάνσεις του περιβάλλοντος φωτισμού.

Υποσημείωση: Ο συγκριτής δεν έχει υστέρηση και για τον λόγο αυτό παρουσιάζει μία ευαισθησία στο θόρυβο, όταν η V_C είναι γύρω από το V_{REF} .

Χαρακτηριστικά του shield

- Ο ακροδέκτης εξόδου πηγαίνει σε κατάσταση Low, όταν ανιχνεύεται αντικείμενο.
- Δύο Led:
 - ✓ ένα για την τροφοδοσία ισχύος (POWER) και
 - ✓ ένα (SWITCH) που δείχνει ότι έχει ανιχνευτεί κάποιο αντικείμενο.
- Τρεις ακροδέκτες (V_{CC} , GND, Έξοδος)
- Ρυθμιζόμενη αντίσταση ανίχνευσης από 1 έως 3cm
- Συγκριτής κατασκευασμένος με το LM393
- Γωνία ανίχνευσης περίπου 35 μοίρες
- Τάση τροφοδοσίας από 3.3V έως 5V
- Διαστάσεις πλακέτας: 32mm x 14mm



Μπλοκ διάγραμμα Shield

A.2 Πρόγραμμα στο arduino uno

```
//Το παρακάτω πρόγραμμα μετράει την τάση στην αναλογική είσοδο A0 και την εμφανίζει, σε Volts, στη σειριακή οθόνη.
//Σχέδιο Orcad: Arduino/Kat_Schenatics/Induction/Fig.4

//Οι τιμές των αντιστάσεων είναι σε Ohm
float R3=2000.0;//Κάτω αντίσταση διαιρέτη DC offset
float R4=1000.0;//Πάνω αντίσταση διαιρέτη DC offset
float R5=20000.0;//Πάνω αντίσταση διαιρέτη AD μετατροπέα
float R6=20000.0;//Κάτω αντίσταση διαιρέτη AD μετατροπέα

float R3parallelR5plusR6=R3*(R5+R6)/(R3+R5+R6);//Παράλληλη αντίσταση των R3 και(R5+R6)
float K1=R3parallelR5plusR6/(R4+R3parallelR5plusR6);//Λόγος του διαιρέτη των αντιστάσεων R3parallelR5plusR6 και R4
String myString="";

//Μετατροπή της τιμής ADValue (=0..1023) σε τάση: VAnalog=ADValue*Vstep=ADValue*(Vcc/1023).
//VAnalog=(R6/(R5+R6))*Va-->Va=((R5+R6)/R6)*VAnalog=2*ADValue*(Vcc/1023)=(2*Vcc/1023)*ADValue=K2*ADValue,
// όπου K2=(2*Vcc/1023)

float K2;//Συντελεστής μετατροπής της ADValue σε τάση:VAnalog=K2*ADValue
float Vcc=5;//Η τάση τροφοδοσίας σε Volt,όπως προκύπτει από μέτρησή της
float Vc=K1*Vcc;//Η τάση του διαιρέτη πάνω στην οποία "κάθεται" η επαγόμενη τάση (DC Offset)
float Vstep;//Το βήμα του AD μετατροπέα: Vstep=VRef/(2*n-1),όπου n=10 το πλήθος των bit του μετατροπέα και
//VRef=Vcc

byte startMeasurementsPin=5;//Στον ακροδέκτη αυτό συνδέεται ένα μπουτόν που ενεργοποιεί τη λειτουργία μετρήσεων
byte enableMeasurementLedPin=8;//Στον ακροδέκτη αυτό συνδέεται ένα Led που ανάβει όταν είναι ενεργοποιημένη (επιτετραμμένη) η
λειτουργία μετρήσεων
byte optoReflector1Pin=6;//Στον ακροδέκτη αυτό συνδέεται ο πρώτος οπτοανακλαστήρας. Όταν ανιχνεύσει το βραχίονα γίνεται Low
byte optoReflector2Pin=7;//Στον ακροδέκτη αυτό συνδέεται ο δεύτερος οπτοανακλαστήρας. Όταν ανιχνεύσει το βραχίονα γίνεται Low

//byte optoReflector1Flag=0;//Γίνεται 1, όταν ο οπτο-ανακλαστήρας 1 ανιχνεύει τον βραχίονα και μηδέν, όταν δεν τον ανιχνεύει
//byte optoReflector2Flag=0;//Γίνεται 2, όταν ο οπτο-ανακλαστήρας 1 ανιχνεύει τον βραχίονα και μηδέν, όταν δεν τον ανιχνεύει

int ADValue;//Στη μεταβλητή αυτή αποθηκεύεται η τιμή του AD μετατροπέα. Δυνατές τιμές 0..1023
int ADValues[400];//Ορίζουμε έναν ακέραιο πίνακα 400 στοιχείων (800 bytes). Δηλ. θα κάνουμε το μέγιστο τετρακόσιες μετρήσεις.
//Στον πίνακα αποθηκεύουμε αυτούσιες τις τιμές του AD μετατροπέα (0.. 1023)
//Μπορούμε να αυξήσουμε το πλήθος των μετρήσεων, αν χρειάζεται, και εφ'όσον το επιτρέπει το μέγεθος της
μνήμης RAM
//Το Arduino Uno έχει μνήμη RAM 2K. Αν χρησιμοποιήσουμε το MEGA 2560 έχει μνήμη RAM 8K
int measurementNo;//Στη μεταβλητή αυτή μετράμε το πλήθος των μετρήσεων που γίνονται ανά περίοδο. Σαν περίοδο ορίζουμε στην
περίπτωσή μας το
//χρονικό διάστημα που ο βραχίονας βρίσκεται ανάμεσα στους δύο οπτοανακλαστήρες, κατά τη διάρκεια μιας
ταλάνωσης.

float voltageInputVolt;//Κρατάει την τάση εισόδου σε Volt
unsigned long T1;//Η μία "ημιπερίοδος",
unsigned long T2;//Η άλλη "ημιπερίοδος"
unsigned long timeStamp;//Βοηθητική μεταβλητή για τον υπολογισμό των ημιπεριόδων

void setup() {
  Serial.begin(115200);//Ρύθμιση ταχύτητας επικοινωνίας με τη σειριακή οθόνη

  //Ρύθμιση εισόδων
  pinMode(startMeasurementsPin,INPUT_PULLUP);//Ενεργοποιούμε την εσωτερική pull up αντίσταση. Το μπουτόν είναι ενεργό Low
  pinMode(optoReflector1Pin, INPUT);
  pinMode(optoReflector2Pin, INPUT);

  //Ρύθμιση εξόδων
  pinMode(enableMeasurementLedPin, OUTPUT);
  //Αρχικές συνθήκες
  digitalWrite(enableMeasurementLedPin,LOW);//Αρχικά το Led επίτρεψης των μετρήσεων είναι σβηστό
  //analogReference(EXTERNAL);
  Vstep=Vcc/1023.0;//Υπολογισμός βήματος AD μετατροπέα
  K2=(2*Vcc/1023.0);//Va=K2*ADValue,

  Serial.print("Vstep=");Serial.println(Vstep,5);//Εμφάνιση βήματος στη σειριακή οθόνη

  //Παρακάτω εμφανίζουμε τις τιμές με πέντε δεκαδικά ψηφία
  Serial.print("K1=");Serial.println(K1,5);
  Serial.print("K2=");Serial.println(K2,5);
  Serial.print("Vcc=");Serial.println(Vcc,5);
  Serial.print("Vc=");Serial.println(Vc,5);
  Serial.print("sizeof(ADValues/2)=");Serial.println(sizeof(ADValues)/2);
}
```

```

void loop() {
  measurementNo=0;//Μηδενισμός μετρητή πλήθους μετρήσεων. Μετράει το πλήθος των μετρήσεων σε κάθε περίοδο 50ms
  Serial.println("Πιέστε το πλήκτρο επίτρησης των μετρήσεων");//Μήνυμα προς τον χρήστη
  while(digitalRead(startMeasurementsPin)==1){//Κάνε βρόχο περιμένοντας να πατηθεί το πλήκτρο εκκίνησης των μετρήσεων. Γίνεται
  0, όταν πατηθεί
  }
  Serial.println("Έναρξη των μετρήσεων");//Μήνυμα προς τον χρήστη
  digitalWrite(enableMeasurementLedPin,HIGH);//Πατήθηκε το πλήκτρο επίτρησης των μετρήσεων. Άναψε το Led σήμανσης
  //while(digitalRead(startMeasurementsPin)==0);//Κάνε βρόχο (χρονοκαθυστέρηση)μέχρι να αφηθεί το μπουτόν
  //0 βραχίονας ξεκινά από την πλευρά του οπτοανακλαστήρα 1
  while(digitalRead(optoReflector1Pin)==1);//Κάνε βρόχο χωρίς να μετράς μέχρι να φτάσει ο βραχίονας στον οπτοανακλαστήρα 1
  //Έφτασε στον οπτοανακλαστήρα 1. Ξεκινά τις μετρήσεις μέχρι να φτάσει στον OptoReflector2
  timeStamp=millis();//Ξεκινά η μέτρηση της ημιπεριόδου T1
  while(digitalRead(optoReflector2Pin)==1){//Μέτρα μέχρι να φτάσει στο OptoReflector2, δηλ. η στάθμη να γίνει Low
  readADValue();//Διάβασε την τιμή του AD μετατροπέα. Η υπορουτίνα τις αποθηκεύει στον πίνακα
  }
  T1=millis()-timeStamp;//Ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις της ημιπεριόδου T1. Εύρεση του T1
  while(digitalRead(optoReflector2Pin)==0);//Αναμονή μέχρι ο βραχίονας να προσπεράσει τον OR2. Δεν γίνονται μετρήσεις
  // 0 βραχίονας έχει προσπεράσει τον OR2, κινούμενος (σε αντίθετη κατεύθυνση από τον OR1) μέχρι το υψηλότερο σημείο του
  //Από εκεί επιστρέφει πάλι προς τον OR2. Μέχρι να επιστρέψει είναι optoReflector2Pin==1
  //Επιστροφή
  while(digitalRead(optoReflector2Pin)==1);//Κάνε βρόχο-χρονοκαθυστέρηση (χωρίς να κάνεις τίποτα, ούτε μετρήσεις δηλ.) μέχρι
  να επιστρέψει στον OptoReflector2

  while(digitalRead(optoReflector2Pin)==0);//Όσο βρίσκεται μπροστά μή μετράς (λόγω της θέσης του OR2). Ο μαγνήτης του βραχίονα
  δεν έφτασε ακόμη το πηνίο
  //Προσπέρασε τον OR2. Ο μαγνήτης έφτασε στο πηνίο. Ξεκινά να μετράς

  timeStamp=millis();//Ξεκινά η ημιπερίοδος T2
  while(digitalRead(optoReflector1Pin)==1){//Μέτρα μέχρι να φτάσει τον OR1
  readADValue();
  }
  while(digitalRead(optoReflector1Pin)==0){//Μέτρα και μέχρι να ξεπεράσει τον OR1. Τονίζεται ότι παίζει ρόλο η θέση του OR1
  readADValue();
  }
  T2=millis()-timeStamp;//Ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις της ημιπεριόδου T2
  digitalWrite(enableMeasurementLedPin,LOW);//Ολοκλήρωση των μετρήσεων, σβήσε το Led
  displayMeasurements();//Εμφάνιση των μετρήσεων στη σειριακή οθόνη
  while(true);//Εδώ εγκλωβίζεται ο μ.κ. Βγαίνει μόνο με reset
}

//*****void readADValue()*****
//*****
//Διαβάζει τις μετρήσεις από τον AD μετατροπέα και τις αποθηκεύει σε έναν πίνακα
void readADValue()
{
  if(measurementNo>(sizeof(ADValues)/2)){//
  Serial.println("Ξεπεράστηκε το μέγιστο επιτρεπτό πλήθος των 400 μετρήσεων");
  Serial.println("Αυξήστε το πλήθος, εφ'όσον η μνήμη το επιτρέπει");
  return;//Αφού εκτυπώσεις τα μηνύματα λάθους στη σειριακή οθόνη, επιστρέψε
  }

  ADValue=analogRead(A0);//Διάβασε την αναλογική τάση και
  ADValues[measurementNo]=ADValue;//αποθήκευσέ την στον πίνακα
  measurementNo++;//Αύξησε τον μετρητή του πλήθους μετρήσεων
  delayMicroseconds(100);
}
//*****displayMeasurements()*****
//Εμφάνιση μετρήσεων στο σειριακό μόνιτορ
void displayMeasurements(){
  Serial.println("Νέο Σύνολο μετρήσεων. Οι τιμές είναι οι τάσεις εισόδου σε volts");
  for(int i=0;i<measurementNo-1;i++){
  voltageInputVolt=K2*float(ADValues[i])-Vc;//Υπολογισμός τάσεως εισόδου σε millivolt
  Serial.println(voltageInputVolt);
  }

  Serial.println("Ολοκλήρωση Συνόλου Μετρήσεων");
  Serial.print("Πλήθος Μετρήσεων: "); Serial.println(measurementNo);
  measurementNo=0;
  Serial.print("T1="); Serial.print(T1);Serial.println("ms");
  Serial.print("T2="); Serial.print(T2);Serial.println("ms");
  Serial.print("T=T1+T2="); Serial.print(T1+T2);Serial.println("ms");

  Serial.println();Serial.println();Serial.println();
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

B.1 Επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας

Για να επιλέξουμε την κατάλληλη γεννήτρια για την εφαρμογή μας, θα πρέπει να γνωρίζουμε τα ακόλουθα:

1. Κατ' αρχήν, την απαιτούμενη ισχύ για να λειτουργήσουν οι συσκευές που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε σε Watt ή KWatt. Αυτό αναγράφεται σε ειδική πλακέτα ή ειδικό σημείο των συσκευών μας. Εάν δεν αναγράφεται, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση: $\text{Ισχύς (KWatt)} = \text{Volt} \times \text{Ampere}$.

2. Τον αριθμό των συσκευών που θέλουμε να λειτουργήσουν ταυτόχρονα, τροφοδοτούμενες από τη γεννήτρια. Αυτό σημαίνει ότι, αν θέλουμε να λειτουργήσουν ταυτόχρονα 4 λάμπες των 100Watt, μία τηλεόραση των 150Watt και παράλληλα να ανάβουμε και το θερμοσίφωνο (3KWatt), θα αποκτήσουμε συνολική πραγματική ισχύ: $3.000\text{Watt} + 4 \times 100\text{Watt} + 150\text{Watt} = 3.550\text{Watt}$ τουλάχιστον.

3. Την έννοια του συντελεστή ισχύος, ο οποίος εάν δεν αναγράφεται στη γεννήτρια έχει την τιμή 0,75-0,80 συνήθως.

4. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσκευών μας, όπως:

- τάση λειτουργίας (Volt) - π.χ.220Volt
- συχνότητα ρεύματος που απαιτείται (Hz) – π.χ.50Hz
- απαιτούμενη ένταση ρεύματος (Ampere)

5. Το γεγονός ότι πολλές συσκευές, για να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους, απαιτούν ισχύ μεγαλύτερη από την πραγματική, όπως:

- ηλεκτρικές αντλίες, ψυγεία που απαιτούν για την εκκίνησή τους ισχύ τουλάχιστον τριπλάσια από την ονομαστική τους,
- ηλεκτρικά εργαλεία (όπως τρυπάνια, τριβεία, κλπ.), που απαιτούν για την εκκίνησή τους ισχύ τουλάχιστον 5-10% μεγαλύτερη από την ονομαστική τους,
- λάμπες, σόμπες, κουζίνες και ό,τι έχει σχέση με ηλεκτρικές αντιστάσεις, απαιτούν για την εκκίνησή τους ισχύ ίση με την ονομαστική τους.

6. Τέλος, άλλες συσκευές (όπως π.χ. ηλεκτροσυγκολλήσεις) παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες για τη λειτουργία τους, για την κατανόηση των οποίων καλό είναι να απευθυνθούμε σε ειδικούς τεχνικούς.

Άρα, λοιπόν, η επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας δεν είναι τόσο απλή υπόθεση, αλλά χρειάζεται κάποιους απλούς υπολογισμούς, τους οποίους πρέπει να κάνουμε, αν θέλουμε να μείνουμε ευχαριστημένοι από την απόδοσή της, επενδύοντας πραγματικά τα χρήματα που θα διαθέσουμε για την αγορά της.[48]

B.2 Λιγκ διαδραστικού βίντεο για ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

https://content.e-me.edu.gr/wp-admin/admin-ajax.php?action=h5p_embed&id=1219119

B.3 Σταυρόλεξο για ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

<https://crosswordlabs.com/view/2022-12-22-90> (abcd)

Crossword Labs

[Make a Crossword](#) [Find a Crossword](#) [About](#) [Login/Sign Up](#)

ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ
ΕΞ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

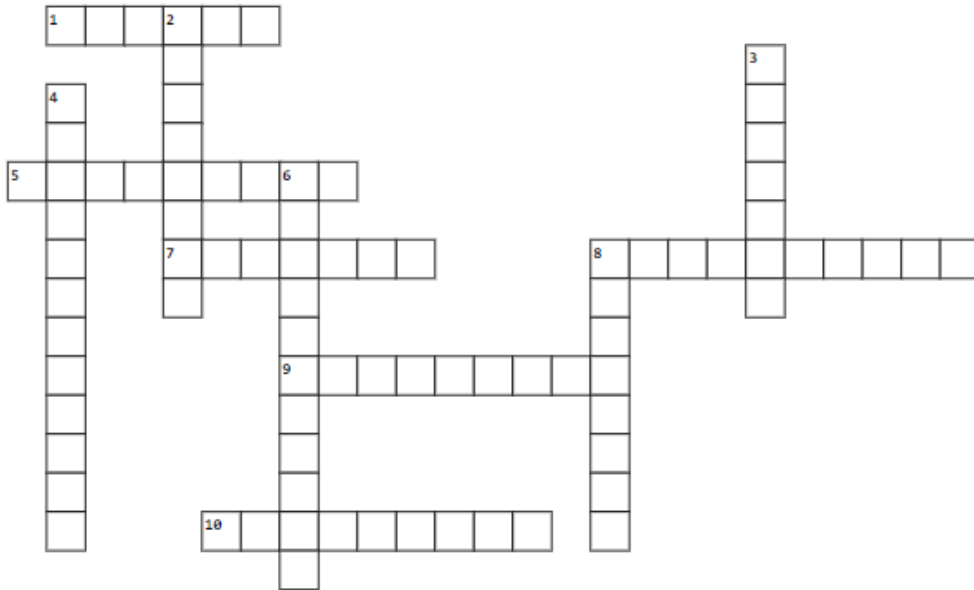
Edit

Share

Focus Mode

Print

[Instructions](#) | [Embed](#)



Across

1. Όσο μεγαλύτερος είναι ο μεταβολής της μαγνητικής ροής, τόσο αυξάνεται και η επαγωγική τάση.
5. Όσο το πλήθος των σπειρών ενός πηνίου, τόσο μεγαλύτερη τάση εξ επαγωγής παράγεται.
7. Η κίνηση του σύρματος, στο πείραμα του Faraday, είναι.....
8. Η πυκνότητα δυναμικών γραμμών εξαρτάται από την ένταση του πεδίου.
9. Μαγνητική ροή Φ ονομάζεται το πλήθος των δυναμικών γραμμών που διέρχονται μέσα από μια
10. Λόγω των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, έχουμε παραγωγή τάσης, η οποία αντιτίθεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής τους κατάσταση.

Down

2. Από έργο, μπορώ να παράξω ηλεκτρικό ρεύμα.
3. Η γωνία θ στον τύπο της μαγνητικής ροής, αναφέρεται σ' αυτή που σχηματίζεται μεταξύ των δυναμικών γραμμών και της στην επιφάνεια απ' όπου διέρχονται.
4.αγωγός παράγει μαγνητικό πεδίο.
6. Στο πείραμα του Faraday, το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη με το μαγνητικό πεδίο του σύρματος και το σύρμα τίθεται σε κίνηση.
8. μαγνητικής ροής δημιουργεί τάση εξ επαγωγής.

B.4 Κουίζ ηλεκτρομαγνητισμού

<https://www.khanacademy.org/science/highschool-physics/x6679aa2c65c01e53:electromagnetics/x6679aa2c65c01e53:magnetic-field-due-to-current/quiz/x6679aa2c65c01e53:electromagnetics-quiz-1?referrer=upsell>