



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

H/A  
542

ΑΡΧΕΙΟ

## ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΛΩΒΟΥ FARADAY

### ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ  
ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Επιβλέπων: Καπόγιαννης Γιώργος  
Καθηγητής ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Αθήνα, Μάρτιος 2011

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Πτυχιακή μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ υπό την επίβλεψη του καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής ισχύος Καπόγιαννης Γεώργιος, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες τόσο για την ανάθεση της εργασίας όσο και για τη γενικότερη συμβολή του στη μελλοντική μου επαγγελματική σταδιοδρομία. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δήμο, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που με στήριζαν και με συμβούλευαν σε κάθε βήμα της φοιτητικής μου ζωής.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Faraday Ο καλύτερος πειραματικός φυσικός.....	5
1.2 Λειτουργία κλωβού Faraday.....	9

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΠΛΗΡΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΩΡΙΩΝ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

2.0 Αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού.....	10
2.1 Ηλεκτρομαγνητισμός.....	10
2.2 Ιστορία.....	10
2.3 Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη.....	11
2.4 Κλασσική ηλεκτροδυναμική.....	11
2.5 Η φωτοηλεκτρική επίδραση.....	12
2.5.1 Καθορισμός.....	12
2.5.2 Μονάδες.....	13
2.6 Ηλεκτρισμός.....	13
2.7 Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI.....	14
2.8 Νόμος Coulomb.....	15
A) Μαγνητισμός.....	15
B) Ηλεκτρισμός.....	16
2.9 Ηλεκτρικό φορτίο.....	17
2.10 Ιδιότητες ηλεκτρικού φορτίου.....	17
2.11 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	18
2.12 Το ηλεκτρικό πεδίο.....	18
2.13 Περιγραφή του ηλεκτρικού πεδίου.....	19
2.14 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου.....	20
2.15 Το «βέλος» της έντασης.....	21
2.16 Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου.....	21
2.17 Ηλεκτρική ροή.....	28
2.18 Νόμος του Γκάους.....	29
A) Εφαρμογή στο μαγνητισμό.....	29
B) Εφαρμογή στην βαρύτητα.....	30
2.19 Ηλεκτρικό δυναμικό.....	30
2.20 Ηλεκτρική διπολική ροπή.....	31
2.21 Το μαγνητικό πεδίο.....	33
2.22 Μεγέθη του μαγνητικού πεδίου.....	35
2.23 Μαγνητική αντίσταση – μαγνητικό κύκλωμα.....	37
2.24 Καμπύλη μαγνήτισης.....	38
2.25 Βρόχος υστέρησης.....	40
2.26 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.....	42
2.27 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό.....	44

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ:ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ**

3.0 Εισαγωγή.....	46
3.1 Εντοπισμός ειδών κινδύνου.....	46
3.2 Κίνδυνοι για την υγεία.....	47
3.2.1 Χημικοί παράγοντες.....	48
3.2.2 Βιολογικοί παράγοντες.....	48
3.2.3 Φυσικοί παράγοντες.....	49
3.2.3.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	49
3.3 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς.....	52
3.4 Πρότυπακαι όρια έκθεσης.....	54
3.5 Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας (50Hz) σε βιομηχανικές και οικιακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και μηχανές.....	57
3.6 Ανάλυση μετρήσεων Η-Μακτινοβολίας από Μ/Σ σε βιομηχανικό εργασιακό χώρο Παράδειγμα φαρμογής.....	59
3.7 Αξιολόγηση των μετρήσεων καιλήψη μέτρων ασφαλείας.....	63
3.8 Αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία των ανθρώπων.....	64

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕ ΚΛΩΒΟ FARADAY**

4.0 Γενικά περί κεραυνών.....	66
4.1 Η συχνότητα των καταιγίδων.....	66
4.2 Ο μηχανισμός εκκενώσεως του κεραυνού.....	67
4.3 Μορφή και μέγεθος του ρεύματος των κεραυνών.....	68
4.4 Προστασία της ανθρώπινης ζωής.....	68
4.5 Προστασία κτιρίων.....	69
4.6 Τρόπος υπολογισμού κινδύνου ζημιάς από κεραυνό.....	70
4.7 Σύστημα κλωβού.....	74
4.8 Γενικές οδηγίες για την σχεδίαση ενός συστήματος κλωβού.....	75
4.9 Η εγκατάσταση συλλήψεως.....	76
4.10 Η εγκατάσταση απαγωγών.....	78
4.11 Η εγκατάσταση γείωσης.....	79
4.12 Συλληπτήριοις αγωγός γείωσης.....	79

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΛΩΒΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

5.1 Εφαρμογές του κλωβού στην βιομηχανία.....	81
5.2 Φωτογραφίες κατασκευής κλωβού.....	82

Αναφορές-βιβλιογραφία.....	83
----------------------------	----

## 1.1 Faraday Ο καλύτερος πειραματικός φυσικός

Στις 22 Σεπτεμβρίου το 1791, γεννήθηκε στο Σάρεϋ στο νότιο Λονδίνο ένας από τους μεγαλύτερους πειραματικούς φυσικούς όλων των εποχών, ο Michael Faraday. Ήταν γόνος οικογένειας που ανήκε στην εργατική τάξη της εποχής. Ο πατέρας του ήταν ένας σιδεράς από το



Yorkshire της Αγγλίας.

Ακολουθώντας τη μοίρα όλων των παιδιών της κοινωνικής του τάξης, έλαβε ελάχιστη μόρφωση. Σε ηλικία 14 ετών ξεκίνησε να δουλεύει ως βοηθός ενός βιβλιοδέτη της περιοχής, θέση την οποία διατήρησε για 7 χρόνια. Ήταν μια δίοδος διαφυγής από τη φτώχεια. Όπως διηγούνται σε ένα φίλο του αργότερα στο Λονδίνο του 1810 η βιβλιοδεσία είχε ένα πλεονέκτημα: υπήρχαν πολλά βιβλία και τα διάβαζε. Κατά περιόδους, περνούσε μόνος τα απογεύματα κάτω από το φως των κεριών ή της λάμπας, διαβάζοντας δεμένα φύλλα των δεκαέξι ή τριάντα δυο σελίδων. Σ' αυτό τον ενθάρρυνε και το Αφεντικό του, ενώ ένας πελάτης του έδωσε προσκλήσεις για τις διαλέξεις του Humphry Davy. Ο σερ Χάμφρι Ντέιβι μιλούσε για τον ηλεκτρισμό και για τις κρυφές δυνάμεις που πρέπει να υπήρχαν κάτω από την επιφάνεια του ορατού σύμπαντος μας. Ο Φάραντεϊ πήγε και συνειδητοποίησε ότι του είχε φανερωθεί η φευγαλέα εικόνα μιας καλύτερης ζωής από εκείνη που θα είχε δουλεύοντας στο βιβλιοδετείο. Αλλά πώς μπορούσε να ενταχθεί σ' αυτή; Δεν είχε φοιτήσει στην Οξφόρδη ή στο Κέμπριτζ, στην πραγματικότητα δεν είχε παρακολουθήσει τίποτε περισσότερο από αυτό που εμείς αποκαλούμε δευτεροβάθμιο σχολείο· δεν είχε περισσότερα χρήματα από αυτά που του έδινε ο σιδεράς πατέρας του -δηλαδή δεν είχε καθόλου χρήματα- και οι φίλοι του ήταν το ίδιο φτωχοί μ' αυτόν.

Αλλά μπορούσε να δέσει ένα εντυπωσιακά όμορφο βιβλίο. Ο Φάραντεϊ συνήθιζε πάντα να κρατά σημειώσεις όταν μπορούσε και είχε φέρει στο βιβλιοδετείο σημειώσεις που είχε κρατήσει από τις διαλέξεις του Ντέιβι. Τις αντέγραψε και παρενέβαλε μερικά σχέδια από το μηχανισμό που είχε παρουσιάσει ο Ντέιβι. Στη συνέχεια ξανάγραψε το χειρόγραφο -όλα του τα σχέδια διατηρούνται σήμερα με την προσοχή που αποδίδεται σε ιερά λείψανα στη υπόγεια Αίθουσα Αρχείων του Βασιλικού Ινστιτούτου του Λονδίνου-, χρησιμοποίησε δέρμα, βελόνες και εργαλεία εγχάραξης και το έδεσε σε ένα θαυμάσιο βιβλίο. Έτσι μια χειμωνιάτικη ημέρα του 1812, ένας νεαρός είκοσι ετών παρουσιάστηκε στο Βασιλικό Ίδρυμα του Λονδίνου ζητώντας συνέντευξη από τον διάσημο διευθυντή του, σερ Χάμφρι Ντέιβι. Μαζί του είχε αυτές τις σημειώσεις του Ντέιβι που του έκαναν μεγάλη εντύπωση, ο οποίος είχε κατά τύχη μια κενή θέση βοηθού. Λίγες μέρες μετά τον προσέλαβε.

Οι παλιοί συνάδελφοι του Φάραντεϊ ίσως να εντυπωσιάστηκαν, αλλά η καινούρια δουλειά του δεν ήταν τόσο ιδανική όσο έλπιζε. Μερικές φορές ο Ντέιβι συμπεριφερόταν σαν ένα θερμός μέντορας,

αλλά άλλες φορές, όπως ο Φάραντεϊ έγραψε στους φίλους του, ο Ντέιβι φαινόταν θυμωμένος και τον αποθάρρυνε. Αυτό απογοήτευε πολύ τον Φάραντεϊ, γιατί είχε προσελκυστεί στην επιστήμη κυρίως εξαιτίας των ευγενικών λόγων του Ντέιβι- των υπαινιγμών του ότι εάν μόνο ένας είχε την ικανότητα και μπορούσε να διακρίνει εκείνο που ως τότε ήταν κρυμμένο, τότε όλες οι εμπειρίες μας θα μπορούσαν όντως να συνδεθούν. Το 1813 ο σερ Χάμφρι Ντέιβι και η κυρία του αποφάσισαν να ταξιδέψουν στην Ευρώπη και πήραν μαζί τους τον Φάραντεϊ ως γραμματέα, αλλά και με καθήκοντα οικιακού υπηρέτη. Το ταξίδι διάρκεσε 18 μήνες και είχε μεγάλη εκπαιδευτική σημασία για τον Φάραντεϊ. Συνάντησε πολλούς διάσημους επιστήμονες όπως οι Αμπέρ, Βόλτα, Γκαίθ Λουσακ και έγινε φίλος με τον Γκιστάβ ντε Λα Ριβ ο οποίος λειτούργησε σαν γραφείο διαλογής ιδεών και αλληλογραφούσε σταθερά με τον Φάραντεϊ.

Το 1821 ο επιστημονικός επιμελητής του περιοδικού Χρονικά Φιλοσοφίας (Annals of Philosophy) ζήτησε από τον Φάραντεϊ να συντάξει μια επισκόπηση των πειραμάτων και των θεωριών του ηλεκτρομαγνητισμού που ακολούθησαν την ανακάλυψη του Χανς Κρίστιαν Έρστεντ που είχε γίνει ένα χρόνο νωρίτερα. Ο Φάραντεϊ δεν ήταν ακόμη γνωστός στους επιστημονικούς κύκλους της εποχής, ενδιαφέρθηκε όμως ιδιαίτερα για το ζήτημα.

Μέχρι τότε, όλοι γνώριζαν ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός ήταν τόσο άσχετοι μεταξύ τους όσο μπορούσαν να είναι οποιεσδήποτε δύο δυνάμεις. Ο ηλεκτρισμός ήταν ο θόρυβος και το σύριγμα που έβγαινε από τις μπαταρίες. Ο μαγνητισμός ήταν διαφορετικός, μια μη ορατή δύναμη που έκανε τις βελόνες της πυξίδας των ναυτικών να έλκονται με δύναμη ή τραβούσε τα ρινίσματα του σιδήρου σε ένα μαγνήτη. Ο μαγνητισμός δεν μπορούσε να γίνει νοητός ως τμήμα των μπαταριών και των κυκλωμάτων. Όμως, αυτός ο ερευνητής που έκανε διαλέξεις στην Κοπεγχάγη είχε βρει τώρα ότι εάν διοχετεύσεις ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό καλώδιο, η βελόνα της πυξίδας που τοποθετείται στην κορυφή του καλωδίου στρέφεται ελαφρά προς το πλάι.

Κανείς δεν μπορούσε να το εξηγήσει. Πώς ήταν δυνατό η δύναμη του ηλεκτρισμού σε ένα μεταλλικό καλώδιο να ξεφεύγει και να κάνει τη βελόνα μιας μαγνητικής πυξίδας να στρέφεται; Όταν ζητήθηκε από τον Φάραντεϊ, που τώρα πλησίαζε τα τριάντα, να εργαστεί για να βρει πώς συνδέονταν αυτά τα φαινόμενα, τα γράμματα του έγιναν ξάφνου πολύ πιο χαρούμενα.

Σύντομα διαπίστωσε ότι δεν θα περιοριζόταν σε μια απλή αναφορά των πεπραγμένων των άλλων επιστημόνων: αποφάσισε να επαναλάβει πολλά από τα πειράματα, να επεξεργάζεται δικές του θεωρίες για να ερμηνεύσει τις παρατηρήσεις του και να σχεδιάζει καινούργια πειράματα.

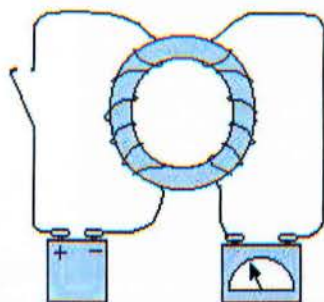
Στα μέσα του 1821, όταν ο Φάραντεϊ ήταν είκοσι εννέα χρονών, παντρεύτηκε. Ο Φάραντεϊ έγινε επίσημα μέλος της εκκλησίας στην οποία ανήκε η οικογένεια του επί χρόνια. Ήταν μια ομάδα πράων και μορφωμένων ανθρώπων που αποκαλούνταν Σαντεμανίτες, από το όνομα του Ρόμπερτ Σάντεμαν, ο οποίος είχε φέρει την αίρεση στην Αγγλία. Περιέργως, η περιορισμένη τυπική εκπαίδευση του Φάραντεϊ αποδείχτηκε το μεγάλο του πλεονέκτημα. Αυτό δεν συμβαίνει συχνά, διότι όταν ένα επιστημονικό αντικείμενο φτάνει σε προηγμένο επίπεδο, η έλλειψη εκπαίδευσης συνήθως εμποδίζει τους μη γνώστες να ασχοληθούν μ' αυτό· οι πόρτες είναι κλειστές και οι εργασίες δεν μπορούν να διαβαστούν. Αλλά σε εκείνες τις πρώιμες εποχές κατανόησης η ενέργεια ήταν μια διαφορετική ιστορία. Οι περισσότεροι φοιτητές είχαν εκπαιδευτεί να αποδεικνύουν ότι οποιαδήποτε πολύπλοκη κίνηση μπορούσε να αναλυθεί σε ένα μείγμα ωθήσεων και έλξεων που λειτουργούσε γραμμικά. Ήταν φυσικό γι' αυτούς, κατά συνέπεια, να προσπαθούν να δουν εάν υπήρχαν οποιεσδήποτε γραμμικές έλξεις μεταξύ μαγνητών και ηλεκτρισμού. Αλλά αυτή η προσέγγιση δεν έδειχνε πώς η δύναμη του ηλεκτρισμού μπορούσε να διοχετευτεί στο χώρο για να επηρεάσει το μαγνητισμό.

Επειδή ο Φάραντεϊ δεν είχε τέτοιες προκαταλήψεις, να σκέφτεται γραμμικά δηλαδή, μπορούσε να στραφεί στη Βίβλο για έμπνευση. Η θρησκευτική ομάδα των Σαντεμανιτών στην οποία ανήκε πίστευε σε ένα διαφορετικό γεωμετρικό πρότυπο: στον κύκλο. Οι άνθρωποι είναι ιεροί, έλεγαν, και όλοι οφείλουμε μια υποχρέωση ο ένας στον άλλο, υποχρέωση που βασίζεται στην ιερότητα της φύσης μας. Θα σε βοηθήσω και εσύ θα βοηθήσεις τον άλλο και αυτός θα βοηθήσει κάποιον άλλο και ούτω καθεξής μέχρις ότου ολοκληρωθεί ο κύκλος. Αυτός ο κύκλος δεν ήταν απλώς μια αφηρημένη ιδέα. Ο Φάραντεϊ είχε ξοδέψει πολύ από τον ελεύθερο χρόνο του επί χρόνια είτε στην

εκκλησία μιλώντας γι' αυτή την κυκλική σχέση είτε ασκώντας τη φιλανθρωπία και την αμοιβαία βοήθεια που χρειάζεται για να εκπληρωθούν τα φιλανθρωπικά καθήκοντα.

Άρχισε να δουλεύει, μελετώντας τη σχέση ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό στα τέλη του καλοκαιριού 1821. Προβληματίστηκε γι' αυτό περίπου 10 χρόνια. Έκανε πολυάριθμα πειράματα, όλα όμως, αρνητικά. Το καλοκαίρι του 1831 όμως όλα άλλαξαν.

Ο Φάραντεϊ στήριξε ένα μαγνήτη. Με αφετηρία τις θρησκευτικές του αντιλήψεις, φαντάστηκε ένα στρόβιλο αόρατων κυκλικών γραμμών να στριφογυρίζει γύρω από αυτόν. Εάν είχε δίκιο, τότε ένα χαλαρά κρεμασμένο σύρμα θα μπορούσε να τραβηχτεί, παγιδευμένο σ' αυτούς τους μυστικιστικούς κύκλους, όπως ένα πλοιάριο παγιδεύεται σε μια δίνη. Συνέδεσε την μπαταρία.



Και αμέσως έκανε την ανακάλυψη του αιώνα.

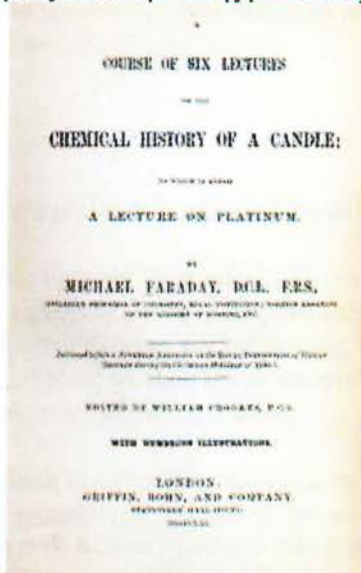
Αργότερα, όπως λέει η απόκρυφη ιστορία -μετά τις ανακοινώσεις, αφότου ο Φάραντεϊ έγινε μέλος της Βασιλικής Εταιρείας- ο πρωθυπουργός της εποχής τον ρώτησε τι καλό θα προκαλούσε αυτή η εφεύρεση και ο Φάραντεϊ απάντησε: «Το ότι, πρωθυπουργέ, κάποτε μπορείτε να τη φορολογήσετε».

Αυτό που είχε ανακαλύψει ο Φάραντεϊ στο υπόγειο εργαστήριο του ήταν η βάση της ηλεκτρικής μηχανής. Ένα μοναδικό κρεμασμένο σύρμα που περιστρέφεται συνεχώς δεν φαίνεται κάτι το σπουδαίο. Αλλά ο Φάραντεϊ είχε μόνο ένα μικρό μαγνήτη και διαχέτευε πολύ μικρή ηλεκτρική δύναμη. Αυξήστε την ταχύτητα περιστροφής του και αυτό το στροβιλιζόμενο σύρμα θα ακολουθεί ακόμη πεισματικά τα κυκλικά πρότυπα που ο Φάραντεϊ χαρτογράφησε σε φαινομενικά κενό αέρα. Τελικά κάποιος θα μπορούσε να προσαρμόξει βαριά αντικείμενα σε ένα παρόμοιο σύρμα και αυτά να έλκονται κατά μήκος του επίσης - έτσι δουλεύει μια ηλεκτρική μηχανή. Δεν έχει σημασία εάν είναι ένας ασήμαντος περιστρεφόμενος δίσκος ενός υπολογιστή ή αντλίες που διοχετεύουν τόνους καυσίμου μέσα σε μια αεριωθούμενη μηχανή.

Ο κουνιάδος του Φάραντεϊ, Τζορτζ Μπάρναρντ, θυμόταν τον Φάραντεϊ τη στιγμή της ανακάλυψης: «Αμέσως άρχισε να ξεφωνίζει "Βλέπεις, βλέπεις, βλέπεις Τζορτζ;", καθώς το σύρμα άρχισε να περιστρέφεται... Δεν θα ξεχάσω ποτέ τον ενθουσιασμό που υπήρχε στο πρόσωπο του και τη λάμψη στα μάτια του!»

Ο Φάραντεϊ έλαμπε γιατί είχε κάνει μια μεγάλη ανακάλυψη και γιατί αυτή φαινόταν να δείχνει πράγματι πως οι βαθύτερες ιδέες της θρησκείας του ήταν αληθινές. Ο θόρυβος του ηλεκτρισμού και τα σιωπηλά δυναμικά πεδία ενός μαγνήτη -και τώρα ακόμη και η επιταχυνόμενη κίνηση ενός χάλκινου σύρματος που περιστρέφεται με ταχύτητα- φαινόταν να συνδέονται. Στο βαθμό που αυξανόταν η ποσότητα του ηλεκτρισμού, έπεφτε ο διαθέσιμος μαγνητισμός. Οι αόρατες στροβιλιζόμενες γραμμές του Φάραντεϊ ήταν η σήραγγα -ο αγωγός- μέσω του οποίου ο μαγνητισμός μπορούσε να ξεχύνεται σε ηλεκτρισμό και αντίστροφα. Η πλήρης έννοια της «Ενέργειας» δεν είχε ακόμη σχηματιστεί, αλλά η ανακάλυψη του Φάραντεϊ ότι αυτά τα δύο διαφορετικά είδη ενέργειας συνδέονταν την έφερε ακόμη πιο κοντά. Το 1825 προτάθηκε για τη θέση του Διευθυντή στο Βασιλικό Ίδρυμα από το σερ Χάμφρεϊ, ο οποίος ένα χρόνο πριν σε μια

στιγμή ζήλιας και ανθρώπινης ματαιοδοξίας αντιτάχθηκε στην εκλογή του ως μέλος της Βασιλικής



εταιρίας.

Τότε ο Faraday, εισήγαγε μια σειρά διαλέξεων κάθε Παρασκευή βράδυ, θεσμός που διατηρείται μέχρι τις μέρες μας. Θέσπισε ειδικές διαλέξεις για τα παιδιά τα Χριστούγεννα στο Βασιλικό Ίδρυμα στο 1826. Σε αυτές τις διαλέξεις βασίστηκε η έκδοση Η Χημική Ιστορία ενός Κεριού ('The Chemical History of a Candle') (1861). Μέχρι τις μέρες μας, μία σειρά διαλέξεων δίνεται κάθε Χριστούγεννα στο Βασιλικό Ίδρυμα, οι οποίες φέρουν το όνομα του Φάραντεϊ. Το 1832 άρχισε να λαμβάνει τιμητικές διακρίσεις για τις σημαντικές συνεισφορές στην επιστήμη. Εκείνη τη χρονιά έλαβε ένα τιμητικό πτυχίο από το Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης. Τον Φεβρουάριο του 1833, εξελέγη καθηγητής Χημείας στο Βασιλικό Ίδρυμα. Περαιτέρω τιμητικές διακρίσεις, όπως το Βασιλικό μετάλλιο και το μετάλλιο Copley, τόσο από τη Royal Society, επρόκειτο να ακολουθήσει. Το 1836 που έγινε μέλος της Συγκλήτου του Πανεπιστημίου του Λονδίνου, που ήταν ένα ραντεβού Crown.

Λόγω της υπερβολικής εργασίας του και το 1839 έπαθε ένα νευρικό κλονισμό που του πήρε μέχρι το 1845 για να συνέλθει πλήρως και να επανακάμψει. Το έργο που ανέλαβε αυτή τη φορά ήταν το αποτέλεσμα του μαθηματικού εξελίξεις στο θέμα. Οι ιδέες του Faraday για τις δυναμικές γραμμές είχαν λάβει μια μαθηματική επεξεργασία από τον William Thomson. Έγραψε λοιπόν στον Faraday, στις 6 Αυγούστου 1845 και να του πει του μαθηματικές προβλέψεις ότι ένα μαγνητικό πεδίο θα πρέπει να επηρεάζει το επίπεδο των πολωμένο φως. Ο Faraday, είχε προσπαθήσει να ανιχνεύσει αυτό το πειραματικά πολλά χρόνια νωρίτερα αλλά χωρίς επιτυχία. Τώρα, με την ιδέα ενισχυμένη από την Thomson, προσπάθησε και πάλι στις 13 Σεπτεμβρίου του 1845 και ήταν επιτυχής. Έδειξε ότι ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο θα μπορούσε να περιστρέψει το επίπεδο της πόλωσης, και, επιπλέον, ότι η γωνία περιστροφής ήταν ανάλογη με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου. Ο Faraday έγραψε:

«ήταν ένα φαινόμενο που προκλήθηκε στο πολωμένο φως κι έτσι αποδείχτηκε ότι η μαγνητική δύναμη και το φως σχετίζονται. Το γεγονός αυτό θα αποδειχτεί, το πιθανότερο, εξαιρετικά καρποφόρο και μεγάλης σημασίας για την έρευνα των καταστάσεων της φυσικής δύναμης...»

Ο διαμαγνητισμός ήταν η επόμενη ανακάλυψη.

Ωστόσο θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο Faraday, σε καμία περίπτωση δεν ήταν μαθηματικός και το σύνολο σχεδόν των βιογράφων του τον περιγράφουν ως "μαθηματικά αναλφάβητο". Ποτέ δεν έμαθε μαθηματικά και τις τυχόν εισφορές για την ηλεκτρική ενέργεια ήταν καθαρά πειραματικές. Παρόλα αυτά το έργο του Faraday, οδήγησε στις βαθιά μαθηματικές θεωρίες του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού. Ειδικότερα οι αξιοσημείωτες μαθηματικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν και οδήγησαν στις εξισώσεις του Maxwell δεν θα ήταν δυνατές χωρίς τον Faraday. Αυτό είναι ένα



σημείο το οποίο ο ίδιος ο Μάξγουελ τόνισε σε αρκετές περιπτώσεις.

Τα τελευταία χρόνια της ζωής του ήταν αδύναμος λόγω της προοδευτικής απώλειας μνήμης. Πέθανε το 1867, σε ηλικία 76 ετών.

## 1.2 Λειτουργία κλωβού Faraday

Ένας κλωβός Faraday είναι καλύτερα κατανοητή ως μια προσέγγιση για μια ιδανική κοίλο αγωγό. Εξωτερικά εφαρμοζόμενες ηλεκτρικά πεδία παράγουν δυνάμεις στην φορέων φορτίου (συνήθως ηλεκτρόνια), στο πλαίσιο της ορχήστρας, δημιουργώντας ένα ρεύμα που αναδιατάσσει τις κατηγορίες. Μόλις τα τέλη έχουν υποστεί αναδιάταξη ώστε να ακυρώσει την εφαρμοζόμενου πεδίου, εντός του τρέχοντος στάσεις.

Αν μια αιτίαση είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα κλουβί ερείσματος Faraday, η εσωτερική όψη του κλωβού θα χρωθεί (με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται για το τέλος εξωτερικού) για να αποτρέψει την ύπαρξη ενός πεδίου μέσα στο σώμα του κλουβιού. Ωστόσο, αυτή η φόρτιση της εσωτερικής επιφάνειας θα αναμεταδίδουν τα έξοδα στο σώμα του κλουβιού. Αυτό επιφορτίζει την εξωτερική επιφάνεια του κλωβού με ένα τέλος ίσο με υπογραφή και της έκτασης με εκείνη που τοποθετείται μέσα στο κλουβί. Δεδομένου ότι η εσωτερική επιβάρυνση και η εσωτερική όψη αλληλοεξουδετερώνονται, η εξάπλωση των επιβαρύνσεων επί της εξωτερικής επιφάνειας δεν επηρεάζεται από τη θέση της εσωτερικής τέλους μέσα στο κλουβί. Έτσι, για όλες τις προθέσεις και τους σκοπούς, το κλουβί θα παράγει το ίδιο ηλεκτρικό πεδίο που θα δημιουργηθούν αν ήταν απλά χρωθεί από την επιβάρυνση που τοποθετούνται μέσα.

Εάν το κλουβί είναι γειωμένο, οι υπερβάλλον χρεώσεις θα πάνε προς το έδαφος, αντί της εξωτερικής επιφάνειας, οπότε η εσωτερική όψη και η εσωτερική επιβάρυνση θα αλληλοεξουδετερώνονται και το υπόλοιπο του κλουβιού θα παραμείνει ουδέτερος.

Αποτελεσματικότητα της θωράκισης ενός στατικού ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τη γεωμετρία του αγωγίμου υλικού. Σε περίπτωση μη γραμμικά ηλεκτρικά διαφορετικό πεδίο, και ως εκ τούτου ένα συνοδευτικό μαγνητικό πεδίο διαφορετικό, τόσο πιο γρήγορα οι διακυμάνσεις είναι (δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα), τόσο καλύτερη είναι η διείσδυση υλικό αντιστέκεται, αλλά από την άλλη πλευρά, τόσο το καλύτερο περνάει μέσα από ένα πλέγμα από τα εν λόγω μέγεθος. Στην περίπτωση αυτή, η θωράκιση εξαρτάται επίσης από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αγωγίμου υλικού που χρησιμοποιούνται στους κλωβούς, καθώς και πάχη τους.

## 2 ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

**2.1 Ηλεκτρομαγνητισμός** είναι φυσική από ηλεκτρομαγνητικός τομέας: α τομέας όποιος ασκεί το α δύναμη όρια που κατέχει την ιδιοκτησία ηλεκτρική δαπάνη, και επηρεάζεται στη συνέχεια από την παρουσία και την κίνηση εκείνων των μορίων.

Μια αλλαγή μαγνητικό πεδίο παράγει ηλεκτρικό πεδίο (αυτό είναι το φαινόμενο ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, η βάση της λειτουργίας για ηλεκτρικές γεννήτριες, μηχανές επαγωγής, και μετασχηματιστές). Ομοίως, ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Λόγω αυτής της αλληλοεξάρτησης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, έχει νόημα για να τους θεωρήσει ως ενιαία συνεπή οντότητα - ο ηλεκτρομαγνητικός τομέας.

Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από την κίνηση ηλεκτρικές δαπάνες, δηλ., ηλεκτρικό ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί τη μαγνητική δύναμη που συνδέεται με μαγνήτες.

Οι θεωρητικές επιπτώσεις **ηλεκτρομαγνητισμός** οδηγημένος στην ανάπτυξη πρόσθετη σχετικότητα από Αλβέρτος Einstein το 1905

### 2.2 Ιστορία

Προετοιμαμένος για μια διάλεξη βραδιού στις 21 Απριλίου 1820, Hans Christian Ørsted ανέπτυξε ένα πείραμα που παρείχε τα στοιχεία που τον εξέπληξαν. Δεδομένου ότι ήταν καθιέρωση τα υλικά του, παρατήρησε μια βελόνα πυξίδων που εκτράπηκε από το μαγνητικό Βορρά όταν ανάφθηκε το ηλεκτρικό ρεύμα από την μπαταρία που χρησιμοποιούσε και μακριά. Αυτή η εκτροπή τον έπεισε ότι τα μαγνητικά πεδία ακτινοβολούν από όλες τις πλευρές ενός καλωδίου που φέρνει ένα ηλεκτρικό ρεύμα, ακριβώς όπως φως και η θερμότητα, και ότι επιβεβαίωσε μια άμεση σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και του μαγνητισμού.

Κατά την διάρκεια της ανακάλυψης, Ørsted δεν πρότεινε οποιαδήποτε ικανοποιητική εξήγηση του φαινομένου, ούτε προσπάθησε να αντιπροσωπεύσει το φαινόμενο σε ένα μαθηματικό πλαίσιο. Εντούτοις, τρεις μήνες αργότερα άρχισε τις εντατικότερες έρευνες. Σύντομα έκτοτε δημόσιευσε τα συμπεράσματά του, παρουσίαση αποδείξεων ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο καθώς διατρέχει ενός καλωδίου. Η μονάδα CGS της μαγνητικής επαγωγής ( $\mathcal{O}$ ) ονομάζεται προς τιμή τις συνεισφορές του στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού.

Τα συμπεράσματά του οδήγησαν στην εντατική έρευνα σε όλη την επιστημονική κοινότητα μέσα ηλεκτροδυναμική. Επηρέασαν το γαλλικό φυσικό Αμπέρ Ανδρ3ε-Marie «εξελίξεις του  $s$  μιας ενιαίας μαθηματικής μορφής για να αντιπροσωπεύσει τις μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ της τρέχων-μεταφοράς των αγωγών. Η ανακάλυψη του Ørsted αντιπροσώπευσε επίσης ένα σημαντικό βήμα προς μια ενοποιημένη έννοια της ενέργειας.

Το Ørsted δεν ήταν το πρώτο πρόσωπο για να εξετάσει τη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και του μαγνητισμού. Το 1802 Gian Domenico Romagnosi, ένας ιταλικός νομικός μελετητής,

εξέτρεψε μια μαγνητική βελόνα από τις ηλεκτροστατικές δαπάνες. Ερμήνευσε τις παρατηρήσεις του όπως *Η σχέση* μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και του μαγνητισμού. Πραγματικά, κανένα γαλβανικό ρεύμα δεν υπεάρξε στην οργάνωση και ως εκ τούτου κανένας ηλεκτρομαγνητισμός δεν ήταν παρών. Ένας απολογισμός της ανακάλυψης δημοσιεύθηκε το 1802 σε μια ιταλική εφημερίδα, αλλά αγνοήθηκε κατά ένα μεγάλο μέρος από τη σύγχρονη επιστημονική κοινότητα.

Αυτή η ενοποίηση, η οποία παρατηρήθηκε κοντά MichaelFaraday, εκτεταμένος κοντά JamesClerkMaxwell, και μερικώς αναδιατυπωμένος κοντά OliverHeaviside και HeinrichHertz, είναι ένας από τους θριάμβους της φυσικής του 19ου αιώνα. Είχε τις εκτεταμένες συνέπειες, μια από τις οποίες ήταν η κατανόηση της φύσης φως. Όπως βγάζει, τι θεωρείται ως «φως» είναι πραγματικά μια διάδοση ταλαντώσεων διαταραχή στον ηλεκτρομαγνητικό τομέα, δηλ., ένας ηλεκτρομαγνητικός κύμα. Διαφορετικός συχνότητες από την ταλάντωση δώστε αφορμή για τις διαφορετικές μορφές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, από ραδιο κύματα στις χαμηλότερες συχνότητες, στο ορατό φως στις ενδιάμεσες συχνότητες, ακτίνες γάμμα στις υψηλότερες συχνότητες.

### 2.3 Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη

Η δύναμη που ο ηλεκτρομαγνητικός τομέας ασκεί στα ηλεκτρικά χρωμένα μόρια, κάλεσε **ηλεκτρομαγνητική δύναμη**, είναι ένα από τα τέσσερα θεμελιώδεις δυνάμεις. Οι άλλες θεμελιώδεις δυνάμεις είναι ισχυρή πυρηνική δύναμη (που κρατά ατομικοί πυρήνες μαζί), αδύνατη πυρηνική δύναμη (που προκαλεί ορισμένες μορφές ραδιενεργός αποσύνθεση), και βαρύτητας δύναμη. Όλες οι άλλες δυνάμεις προέρχονται τελικά από αυτές τις θεμελιώδεις δυνάμεις.

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι αυτή αρμόδια για σχεδόν όλα τα φαινόμενα που αντιμετωπίζονται στην καθημερινή ζωή, με εξαίρεση τη βαρύτητα. Όλες οι δυνάμεις περιέλαβαν στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ άτομα μπορέστε να επισημανθείτε στην ηλεκτρομαγνητική δύναμη ενεργώντας ηλεκτρικά χρωμένη πρωτόνια και ηλεκτρόνια μέσα στα άτομα. Αυτό περιλαμβάνει τις δυνάμεις που δοκιμάζουμε «στην ώθηση» ή «το τράβηγμα» των συνηθισμένων υλικών αντικειμένων, τα οποία προέρχονται από διαμοριακές δυνάμεις μεταξύ του ατόμου μόρια στους οργανισμούς μας και εκείνοι στα αντικείμενα. Περιλαμβάνει επίσης όλες τις μορφές χημικά φαινόμενα, τα οποία προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τροχιακοί ηλεκτρονίων.

### 2.4 Κλασσική ηλεκτροδυναμική

Ο επιστήμονας WilliamGilbert προτεινόμενος, σε δικό του *DeMagnete* (1600), εκείνοι οι ηλεκτρική ενέργεια και μαγνητισμός, ενώ και ικανός την έλξη και την απέχθεια των αντικειμένων, ήταν ευδιάκριτα αποτελέσματα. Οι ναυτικοί είχαν παρατηρήσει ότι οι απεργίες αστραπής είχαν τη δυνατότητα να ενοχλήσουν μια βελόνα πυξίδων, αλλά η σύνδεση μεταξύ της αστραπής και της ηλεκτρικής ενέργειας δεν επιβεβαιώθηκε μέχρι BenjaminFranklin«προτεινόμενα το s πειράματα το 1752. Ένας από τον πρώτο για να ανακαλύψει και να δημοσιεύσει μια σύνδεση μεταξύ του προκαλούμενων από τον άνθρωπο ηλεκτρικών ρεύματος και του μαγνητισμού ήταν Romagnosi, το οποίο το 1802 παρατήρησε ότι συνδέοντας ένα καλώδιο πέρα από το α Βολταϊκός σωρός εξέτρεψε έναν κοντινό πυξίδα βελόνα. Εντούτοις, η επίδραση δεν έγινε ευρέως γνωστή μέχρι 1820, όταν Ørsted εκτέλεσε ένα παρόμοιο πείραμα. Εργασία Ørsted που επηρεάζεται Αμπέρ για να παραγάγει μια θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού που θέτει το θέμα σε ένα μαθηματικό ίδρυμα.

Μια ακριβής θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, γνωστή όπως κλασσικός ηλεκτρομαγνητισμός, αναπτύχθηκε από διάφορο φυσικοί κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, που καταλήγει στην εργασία JamesClerkMaxwell, το οποίο ενοποίησε τις προηγούμενες εξελίξεις σε μια ενιαία θεωρία

και ανακάλυψε την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός. Στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό, ο ηλεκτρομαγνητικός τομέας υπακούει ένα σύνολο εξισώσεων γνωστών όπως Εξισώσεις Maxwell, και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη δίνεται από Νόμος δύναμης Λορέντζ.

Μια από τις ιδιαιτερότητες του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού είναι ότι είναι δύσκολο να συμφιλιώσει με κλασικοί μηχανικοί, αλλά είναι συμβατό με πρόσθετη σχετικότητα. Σύμφωνα με τις εξισώσεις Maxwell, ταχύτητα του φωτός σε ένα κενό είναι καθολικός ένας σταθερός, εξαρτώμενος μόνο από ηλεκτρικό permittivity και μαγνητική διαπερατότητα από ελεύθερου χώρου. Αυτό παραβιάζει Galilean σταθερότητα, ένας από μακρού υφιστάμενος ακρογωνιαίος λίθος των κλασικών μηχανικών. Μονόδρομη να συμφιλιώσει τις δύο θεωρίες πρόκειται να υποθέσει την ύπαρξη του α luminiferous αιθέρας μέσω το οποίο το φως διαδίδει. Εντούτοις, οι επόμενες πειραματικές προσπάθειες απέτυχαν να ανιχνεύσουν την παρουσία του αιθέρα. Μετά από τις σημαντικές συνεισφορές Hendrik Lorentz και Henri Poincaré, το 1905, Αλβέρτος Einstein έλυσε το πρόβλημα με την εισαγωγή πρόσθετη σχετικότητα, το οποίο αντικαθιστά κλασικό kinematics με μια νέα θεωρία kinematics που είναι συμβατή με τον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό. (Για περισσότερες πληροφορίες, δείτε Ιστορία της πρόσθετης σχετικότητας.)

Επιπλέον, η θεωρία σχετικότητας δείχνει ότι στην κίνηση των πλαισίων της αναφοράς ένα μαγνητικό πεδίο μετασχηματίζεται σε έναν τομέα με ένα διαφορετικό από το μηδέν ηλεκτρικό συστατικό και αντίστροφα κατά συνέπεια δείχνοντας σταθερά ότι είναι δύο πλευρές του ίδιου νομίσματος, και έτσι ο όρος «ηλεκτρομαγνητισμός». (Για περισσότερες πληροφορίες, δείτε Κλασικός ηλεκτρομαγνητισμός και πρόσθετη σχετικότητα.)

## 2.5 Η φωτοηλεκτρική επίδραση

Σε ένα άλλο έγγραφο που δημοσιεύθηκε σε εκείνο το ίδιο έτος, Αλβέρτος Einstein υπονόμωσε τα ίδια τα θεμέλια του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού. Η θεωρία του φωτοηλεκτρική επίδραση (για το οποίο κέρδισε το βραβείο Νόμπελ για τη φυσική) προέβλεπε ότι το φως θα μπορούσε να υπάρξει σε ιδιαίτερες μόνιο-όπως ποσότητες, οι οποίες ήρθαν αργότερα να μαθευτούν όπως φωτόνια. Η θεωρία του Einstein της φωτοηλεκτρικής επίδρασης επέκτεινε τις ιδέες που εμφανίστηκαν στη λύση υπεριώδης καταστροφή παρουσιασμένος κοντά Ανώτατο Planck το 1900. Στην εργασία του, Planck έδειξε ότι τα καυτά αντικείμενα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα ιδιαίτερα πακέτα, το οποίο οδηγεί σε ένα πεπερασμένο σύνολο ενέργεια εκπεμπόμενος όπως μαύρη ακτινοβολία σωμάτων. Και τα δύο αποτελέσματα ήταν σε άμεση αντίφαση με την κλασική άποψη του φωτός ως συνεχές κύμα. Οι θεωρίες του Planck και Einstein ήταν πρόγονοι κβαντικοί μηχανικοί, το οποίο, όταν διατυπώνεται το 1925, απαίτησε την εφεύρεση μιας κβαντικής θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού. Αυτή η θεωρία, που ολοκληρώνεται στη δεκαετία του '40, είναι γνωστή όπως κβαντική ηλεκτροδυναμική (ή «QED»), και είναι μια από τις ακριβέστερες θεωρίες που είναι γνωστές στη φυσική.

### 2.5.1 Καθορισμός

Ο όρος ηλεκτροδυναμική χρησιμοποιείται μερικές φορές για να αναφερθεί στο συνδυασμό ηλεκτρομαγνητισμού με μηχανικοί, και εξετάζει τα αποτελέσματα του ηλεκτρομαγνητικού τομέα στη δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικά χρωμένων μορίων.

## 2.5.2 Μονάδες

**Ηλεκτρομαγνητικές μονάδες** είναι μέρος ενός συστήματος των ηλεκτρικών μονάδων που βασίζονται πρώτιστα στις μαγνητικές ιδιότητες των ηλεκτρικών ρευμάτων, η θεμελιώδης μονάδα cgs που είναι το αμπέρ. Οι μονάδες είναι:

- αμπέρ (ρεύμα)
- Coulomb (δαπάνη)
- farad (ικανότητα)
- Henry (αυτεπαγωγή)
- ωμ (αντίσταση)
- βολτ (ηλεκτρική δυναμότητα)
- Watt (δύναμη)

Στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα cgs, το ηλεκτρικό ρεύμα είναι μια θεμελιώδης ποσότητα που καθορίζεται μέσω Νόμος αμπέρ και παίρνει διαπερατότητα σαν αδιάστατη ποσότητα (σχετική διαπερατότητα) η της οποίας αξία σε ένα κενό είναι ενότητα. Κατά συνέπεια, το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός εμφανίζεται ρητά σε μερικές από τις εξισώσεις που συσχετίζουν τις ποσότητες σε αυτό το σύστημα.

## 2.6 Ηλεκτρισμός

**Ο ηλεκτρισμός είναι μια ιδιότητα της ύλης. Υπάρχουν δυο είδη ηλεκτρισμού ο θετικός και ο αρνητικός.** Όταν ο θετικός και αρνητικός ηλεκτρισμός βρεθούν στο ίδιο φυσικό χώρο αλληλοεξουδετερώνονται και το υλικό παρουσιάζεται χωρίς ηλεκτρικές ιδιότητες. Επειδή δε η υλη στη φυσική της μορφή δεν παρουσιάζει καμία ηλεκτρική ιδιότητα, προκύπτει ότι οι ποσότητες των δυο ειδών ηλεκτρισμού στην κατάσταση αυτή είναι ακριβώς ίσες.

**Η μικτότερη ποσότητα ύλης που διατηρεί τις χημικές της ιδιότητες είναι το άτομο.** Τα δυο είδη του ηλεκτρισμού, ο θετικός και ο αρνητικός, υπάρχουν τόσο στο άτομο όσο και στην υλη στην μακροσκοπική της μορφή. Το κάθε άτομο, εκτός από τα νετρόνια που βρίσκονται στον πυρήνα του και είναι ουδέτερα σωματίδια, περιλαμβάνει και τα εξής φορτισμένα σωματίδια:

**α) τα πρωτόνια που είναι θετικά σωματίδια και βρίσκονται στον πυρήνα του ατόμου και**

**β) τα ηλεκτρόνια που είναι τα αρνητικά σωματίδια και περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα.**

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια μπορούν να θεωρηθούν ως οι μόνιμοι κάτοικοι του ατόμου, επειδή δε μπορούν να αφαιρεθούν, χωρίς το άτομο να χάσει τις χημικές του ιδιότητες. Αντίθετα, ορισμένα ηλεκτρόνια μπορούν να μετακινηθούν από το άτομο. Όταν συμβεί αυτό, το άτομο χάνει την ηλεκτρική του ισορροπία και από ηλεκτρικά ουδέτερο γίνεται ηλεκτρικά θετικό. Όταν το άτομο χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια ονομάζεται θετικό ιόν.

Οι ποσότητες του ηλεκτρισμού του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου είναι όσες και αντίθετες, συμβολίζονται δε με  $-e$  και  $+e$  αντίστοιχα. Αν ένα άτομο χάσει ένα ηλεκτρόνιο από την εξωτερική του στοιβάδα, τότε γίνεται θετικό ιόν με φορτίο  $+e$ .

Τα ηλεκτρόνια που μπορούν να αποσπασθούν είναι εκείνα της εξωτερικής στοιβάδας του ατόμου. Τα μεταλλικά στοιχεία έχουν μοναχά ένα ή δυο ηλεκτρόνια στην εξαιρετική τους στοιβάδα.

Π.χ. ο χαλκός και το ασημί έχουν ένα, ο ψευδάργυρος και ο υδράργυρος έχουν δυο. Το αλουμίνιο αποτελεί μια εξαίρεση και έχει τρία. Όταν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας είναι λίγα, αποσπώνται ευκολότερα, γι' αυτό η ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων είναι πολύ μεγάλη.

Για παράδειγμα σε μια χάλκινη ράβδο το ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας συγκρατείται πολύ χαλαρά από τον πυρήνα του ατόμου, γιατί είναι εύκολο να αποσπασθεί από το άτομο. Το ηλεκτρόνιο που αποσπάται μεταπηδά σε άλλο άτομο με θετικό ηλεκτρισμό.

Η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από το ένα άτομο στο άλλο είναι συνεχείς και δημιουργεί την εντύπωση ότι τα ηλεκτρόνια κουνιούνται ελεύθερα στους σχετικά μεγάλους χώρους που υπάρχουν μεταξύ των ατόμων.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τη θερμοκρασία που βρίσκεται το υλικό και γιατί ονομάζεται θερμική κίνηση. Τα ιόντα, δηλαδή τα θετικά ηλεκτρισμένα άτομα που προκύπτουν μετά από την απόσπαση του ηλεκτρονίου ή των ηλεκτρονίων, δεν μπορούν να περιπλανώνται όπως τα ηλεκτρόνια, επειδή έχουν συγκριτικά πολύ μεγάλο βάρος. Τα ιόντα όμως μπορούν να ταλαντωθούν.

## 2.7 Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI

Το διεθνές σύστημα μονάδων SI (System International d' units) έχει υιοθετηθεί απ' το έτος 1960. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροτεχνία ανήκουν στο σύστημα αυτό. Επειδή όμως η ηλεκτροτεχνία αναφέρεται σε ένα εφαρμοσμένο τεχνολογικό κλάδο, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κι άλλες μονάδες που έχουν καθιερωθεί στην πράξη. Όπως π.χ. η κιλοβατώρα (kwh) αντί του joule για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενεργείας.

Θεμελιώδες φυσικό μέγεθος	Θεμελιώδης μονάδα	Σύμβολο θεμελιώδους μονάδας
Μήκος	Metre	m
Μάζα	Kilogram	Kg
Χρόνος	Second	S
Ένταση ηλεκτρικού	Ampere	A

ρεύματος		
Θερμοκρασία	Kelvin	K
Φωτεινή ένταση	Candela	Cd
Ποσότητα ύλης	mole	Mol

**Πινάκας 1: Θεμελιώδη φυσικά μεγέθη και μονάδες αυτών στο σύστημα SI**

Τα μεγέθη που κυρίως μας ενδιαφέρουν είναι το **ηλεκτρικό φορτίο**, η **μαγνητική ροή**, το **ηλεκτρικό ρεύμα**, η **ηλεκτρική τάση**, η **ισχύς** και η **ενεργεία**.

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Σύμβολο μονάδας
Φορτίο	q, Q	Coulomb	C
Μαγνητική ροή	Φ	Weber	Wb
Ρεύμα	i, I	Ampere	A
Τάση	u, U	Volt	V
Ισχύς	p, P	Watt	W
Ενεργεία	w, W	joule	J

**Πινάκας 2: Παράγωγα ηλεκτρικά μεγέθη και μονάδες αυτών στο σύστημα SI**

## 2.8 Νόμος Coulomb

Ο **Νόμος του Κουλόμπ** που διατυπώθηκε από τον Γάλλο φυσικό Σαρλ Ογκυστέν ντε Κουλόμπ, εκ του οποίου έλαβε και το όνομα, αναφέρεται ομοίως τόσο στον μαγνητισμό όσο και στον ηλεκτρισμό, και είναι αυτός που παρέχει το μέτρο της ασκούμενης κάθε φορά δύναμης μεταξύ δύο ποσοτήτων μαγνητισμού ή ηλεκτρισμού αντίστοιχα.

### A) Μαγνητισμός

Θεωρώντας δύο σημειακές ποσότητες μαγνητισμού  $m_1$  και  $m_2$ , είτε νότιες, είτε βόρειες, (ομώνυμες), είτε η μία βόρεια και η άλλη νότια (ετερόνυμες), και ότι βρίσκονται μεταξύ τους σε μια απόσταση  $r$ , τότε σύμφωνα με τον "Νόμο του Κουλόμπ":

*Το μέτρο της δύναμης (ελκτικής ή απωστικής) που ασκείται μεταξύ των δύο σημειακών ποσοτήτων μαγνητισμού είναι ανάλογο προς το γινόμενο αυτών και αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης.*

$$F = k \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{r^2}$$

Αυτός ο νόμος εκφράζεται με την μαθηματική σχέση:

όπου:  $K$  είναι η σταθερά αναλογίας που εξαρτάται τόσο από το μαγνητικό υλικό που υπάρχει μεταξύ των  $m_1$  και  $m_2$ , και ονομάζεται "σχετική μαγνητική διαπερατότητα", όσο και από το χρησιμοποιούμενο σύστημα μονάδων. Έτσι για μεν το σύστημα HMM ισούται προς  $1/\mu$ , όπου  $\mu$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του παρεμβλλομένου μέσου μεταξύ των ποσοτήτων μαγνητισμού και για δε το σύστημα MKSA ισούται με  $1/4\pi\mu_0$ , όπου  $\mu_0$  η "απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του κενού".

## B) Ηλεκτρισμός

Μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων που βρίσκονται ακίνητα (ή σχεδόν ακίνητα), αναπτύσσονται ηλεκτρικές δυνάμεις που προκαλούνται από αυτά και ονομάζονται *ηλεκτροστατικές*. Η ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ φορτίων με το ίδιο πρόσημο είναι απωστική, ενώ μεταξύ φορτίων με αντίθετο πρόσημο είναι ελκτική.

*Το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης, την οποία ένα σωματίδιο  $q_1$  ασκεί σε ένα άλλο  $q_2$ , είναι ευθέως ανάλογο προς το γινόμενο των φορτίων τους, και αντιστρόφως ανάλογο προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης  $r$ .*

Η μαθηματική διατύπωση του νόμου του Κουλόμπ είναι η εξής:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

Η διεύθυνση της δύναμης είναι κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα δύο σωματίδια, ενώ με  $k$  συμβολίζεται η σταθερά αναλογίας η οποία ονομάζεται και ηλεκτροστατική σταθερά και ισούται με

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8.988 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{Cb^2}$$



☐ Ηλεκτρική απωστική δύναμη που ασκείται από ένα φορτισμένο σωματίδιο  $Q$  σε ένα μικρότερο  $q$  και από το  $q$  στο  $Q$ .

Ανεξάρτητα από το πόσο είναι το φορτίο ή η μάζα καθενός από τα  $q_1$  και  $q_2$ , το μέτρο της δύναμης που ασκεί το πρώτο στο δεύτερο και το μέτρο της δύναμης που ασκεί το δεύτερο στο πρώτο είναι ίσα.

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, όταν τα φορτισμένα σωματίδια είναι παραπάνω από δύο, η ολική δύναμη που δέχεται ένα σωματίδιο είναι το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που θα του ασκούσε καθένα από τα υπόλοιπα φορτία ξεχωριστά.

Κάθε φορτισμένο σώμα είναι η αιτία που δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο γύρω από αυτό. Μάλιστα, όταν θέλουμε να διαπιστώσουμε αν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο σε κάποιο σημείο,



τοποθετούμε ένα φορτισμένο σώμα, που αποκαλούμε *δοκιμαστικό φορτίο*, σε εκείνο το σημείο. Αν στο δοκιμαστικό φορτίο επιδράσει ηλεκτρική δύναμη, τότε γνωρίζουμε πως σε εκείνη την περιοχή υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.

## 2.9 Ηλεκτρικό φορτίο

Με τον όρο ηλεκτρικό φορτίο εννοούμε μια ιδιότητα ορισμένων υποατομικών σωματιδίων, η οποία καθορίζει τις μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Ένα υλικό σώμα που έχει ηλεκτρικό φορτίο, επηρεάζεται και δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Οι πρώτες αναφορές σε φαινόμενα που σχετίζονται με το ηλεκτρικό φορτίο καταγράφονται από τον Θαλή το Μιλήσιο, ο οποίος διαπιστώνει ότι ορισμένα υλικά, όπως για παράδειγμα το ήλεκτρο ή κεχριμπάρι (αν το τρίψουμε με ξηρό ύφασμα) ή το γυαλί (αν το τρίψουμε με μετάξι), έχουν τη ιδιότητα να συγκρατούν ελαφριά αντικείμενα, όπως τρίχες. Στην αρχαία Ελλάδα επίσης, ήταν γνωστό ότι η ιδιαίτερα έντονη τριβή ενός υλικού μπορούσε να προκαλέσει σπινθήρα.

Μέχρι τις μέρες μας, διάφορα πειράματα έχουν δείξει ότι υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου, τα οποία ονομάστηκαν αρνητικό και θετικό (Η επιλογή έγινε από τον Βενιαμίν Φραγκλίνο αυθαίρετα, με την έννοια δηλαδή ότι θα μπορούσαν να είχαν ονομαστεί και ανάποδα - "θετικό" το "αρνητικό" και "αρνητικό" το "θετικό").

## 2.10 Ιδιότητες ηλεκτρικού φορτίου

Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μία ποσότητα που διατηρείται, δηλαδή σε οποιαδήποτε αλληλεπίδραση ο ολικός αριθμός των φορτίων πριν και μετά από αυτήν, διατηρείται σταθερός.

Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μία ποσότητα που είναι κβαντισμένη. Δηλαδή υπάρχει μόνο σε διακριτές οντότητες, ακέραια πολλαπλάσια του θεμελιώδους φορτίου του ηλεκτρονίου ( $e^-$ ) για το αρνητικό φορτίο και του πρωτονίου για το θετικό.

Όταν λέμε ότι ένα σώμα είναι αρνητικά φορτισμένο εννοούμε ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε αυτό είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων. Αντίστοιχα, σε ένα θετικά φορτισμένο σώμα ο αριθμός των ηλεκτρονίων του είναι μικρότερος από τον αριθμό των πρωτονίων. Τέλος, όταν λέμε ότι το σώμα είναι ουδέτερα φορτισμένο, εννοούμε ότι ο αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων.

Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου στο S.I. είναι το Κουλόμπ προς τιμή του Γάλλου φυσικού Τσαρλς Κουλόμπ για το σημαντικό έργο του στον τομέα του ηλεκτρισμού. Το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου είναι κατά απόλυτη τιμή ίσο με το αντίστοιχο του ηλεκτρονίου και ισούται με

$$|e| = 1.6 * 10^{-19} Cb$$

Κατά την περιγραφή της κατανομής του φορτίου σε μακροσκοπικά σώματα, η διακριτή φύση του φορτίου μπορεί να αγνοηθεί και είναι συνήθως αρκετό να θεωρήσουμε το φορτίο ως ένα συνεχές

ρευστό με πυκνότητα φορτίου ( $\frac{Cb}{m^3}$ ) που μεταβάλλεται λίγο ή πολύ ομαλά συναρτήσει της θέσης.

Σε ένα κρυσταλλικό στερεό, όπου ανεξάρτητα άτομα ενώνονται σε μια συμμετρική δομή, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια των ατόμων δεν παραμένουν μοιρασμένα στα άτομα αλλά μπορούν να κινηθούν ελεύθερα σε όλο τον όγκο του στερεού. Έτσι, οι φορείς του φορτίου στα μέταλλα είναι αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία ονομάζονται και *ηλεκτρόνια σθένους*.

Τα θετικά φορτία δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα, όπως συμβαίνει στο γυαλί και σε άλλους μονωτές. Σε ορισμένους αγωγούς, όμως, όπως οι ηλεκτρολύτες (οξέα, βάσεις, άλατα), μπορούν να κινηθούν τόσο τα θετικά όσο και τα αρνητικά φορτία, επειδή η διαλυμένη ουσία μέσα σε αυτούς βρίσκεται σε μορφή ιόντος (όπως για παράδειγμα σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (άλας), έχουμε κατιόντα νατρίου και ανιόντα χλωρίου).

## 2.11 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Το φυσικό μέγεθος που εκφράζει την ευκολία με την οποία ένα υλικό επιτρέπει στα ηλεκτρικά φορτία να κινούνται στο εσωτερικό του, ονομάζεται *ηλεκτρική αγωγιμότητα*. Ανάλογα λοιπόν με την τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως αγωγός, μονωτής ή ημιαγωγός.

*Αγωγός* είναι κάθε υλικό το οποίο αφήνει τα ηλεκτρικά φορτία να περνούν ελεύθερα από μέσα του. Μερικοί αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι τα μέταλλα, το ανθρώπινο σώμα και η γη.

*Μονωτής* (ή διηλεκτρικό) είναι κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από το σώμα του. Τέλειοι μονωτές που να απαγορεύουν εντελώς τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από μέσα τους δεν υπάρχουν, αλλά μερικά υλικά τις περισσότερες φορές συμπεριφέρονται σαν τέλειοι μονωτές. Μερικοί μονωτές είναι τα πλαστικά, το γυαλί και ο εβονίτης.

*Ημιαγωγός* είναι κάθε υλικό που επιτρέπει να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα του με κάποιες προϋποθέσεις, όπως αύξηση της θερμοκρασίας ή πρόσπτωση φωτός. Τέτοια υλικά είναι το γερμάνιο και το πυρίτιο.

## 2.12 Το ηλεκτρικό πεδίο

Η θεωρία του ηλεκτρικού πεδίου είναι ένα τρόπος να περιγράψουμε τον μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρονται οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ των φορτίων.

Πεδίο είναι μια περιοχή του χώρου που έχει μια ξεχωριστή ιδιότητα: Μπορεί να ασκεί δύναμη. Αν είναι δύναμη βαρύτητας μιλάμε για βαρυτικό πεδίο, αν είναι ηλεκτρική για ηλεκτρικό πεδίο, αν είναι μαγνητική για μαγνητικό πεδίο.

Για να γίνει ένας χώρος ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να υπάρχει σε αυτόν ένα τουλάχιστον φορτίο. Αυτό το φορτίο που δημιουργεί το πεδίο, το λέμε πηγή του πεδίου. Αν σε ένα ηλεκτρικό πεδίο βρεθεί ένα άλλο φορτίο τότε ασκείται σε αυτό δύναμη. Το φορτίο που δέχεται την δύναμη το λέμε υπόθεμα.

Έτσι η αλληλεπίδραση δύο φορτίων εξηγείται ως εξής: Το φορτίο 1 δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο το οποίο (πεδίο) ασκεί δύναμη στο φορτίο 2. Και αντίστροφα το φορτίο 2 δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο το οποίο (πεδίο) ασκεί δύναμη στο φορτίο 1.

Η διαδικασία αποτελείται λοιπόν από δύο βήματα:

Βήμα 1ο

: Κάποιο φορτίο-πηγή δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, και

Βήμα 2ο : Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δύναμη σε ένα άλλο φορτίο-υπόθεμα.

Το σημαντικό είναι πως την δύναμη δεν την ασκούν πλέον τα φορτία αλλά τα ηλεκτρικά τους πεδία που απλώνονται στον χώρο γύρω από τα φορτία. Δηλαδή το πεδίο είναι ο «φορέας» της δύναμης και κάθε φορτίο μπορεί να παίξει έναν από τους δύο ρόλους : τον ρόλο της πηγής ή τον ρόλο του υποθέματος.

Αφού ένα υπόθεμα όταν βρεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο θα δεχθεί δύναμη, θα επιταχυνθεί και θα αποκτήσει κινητική ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι η παρουσία του μέσα στο πεδίο το προμηθεύει με ενέργεια που στην συνέχεια μετατρέπεται σε κινητική. Αυτή την ενέργεια που έχει εξαιτίας της θέσης του μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο την λέμε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια. Όσο πιο ισχυρό είναι το πεδίο, τόσο ισχυρότερες δυνάμεις ασκεί και τόσο μεγαλύτερα είναι τα ποσά ενέργειας με τα οποία προμηθεύει τους πελάτες του τα υποθέματα.

## 2.13 Περιγραφή του ηλεκτρικού πεδίου

Υπάρχουν πεδία που είναι ισχυρά και άλλα που είναι ασθενή. Υπάρχουν επίσης σε ένα πεδίο σημεία που το πεδίο είναι ισχυρότερο από άλλες. Όταν μιλάμε για περιγραφή ενός πεδίου αναφερόμαστε στην δυνατότητα που έχουμε όχι μόνο να ξεχωρίζουμε που και πότε το πεδίο είναι ισχυρό ή όχι αλλά και στην δυνατότητα να μετράμε και να υπολογίζουμε την «ισχύ» του. Για να διευκολυνθούμε στην περιγραφή ενός φαινομένου ορίζουμε λοιπόν νέα μεγέθη.

Για να μετρήσουμε την «ισχύ» του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιούμε δύο μεγέθη. Ένα που να σχετίζεται με την ικανότητά του να ασκεί δύναμη που το λέμε ένταση, και ένα με την ικανότητα του να δίνει ενέργεια που το λέμε δυναμικό.

Η ένταση αλλάζει από σημείο σε σημείο γιατί αλλάζει η δύναμη. Κοντά στο φορτίο πηγής οι δυνάμεις είναι εντονότερες άρα η ένταση είναι μεγαλύτερη. Το ίδιο συμβαίνει και με το δυναμικό κατά απόλυτη τιμή.

Η ένταση σε ένα σημείο συμβολίζεται με  $E$  μετριέται σε  $N/C$  και δείχνει την δύναμη που θα δεχθεί φορτίο-υπόθεμα  $1C$  αν τοποθετηθεί στο σημείο αυτό. Αν δηλαδή η ένταση σε κάποιο σημείο είναι  $10N/C$ , σημαίνει ότι ένα υπόθεμα  $1C$  θα δεχθεί δύναμη  $10C$ . Άρα φορτίο  $2C$  θα δεχθεί  $20N$ ,  $3C$  θα δεχθεί  $30N$  και πάει λέγοντας. Οπότε μπορούμε να πούμε ότι αν πολλαπλασιάσουμε την ένταση  $E$  με το φορτίο-υπόθεμα  $q$  βρίσκουμε την δύναμη που δέχεται :

$$F = q E$$

Το δυναμικό σε ένα σημείο συμβολίζεται με  $V$ , μετριέται σε Volt και δείχνει την δυναμική ενέργεια που θα έχει φορτίο-υπόθεμα  $1C$  αν βρεθεί στο σημείο αυτό. Δηλαδή αν το δυναμικό σε ένα σημείο είναι  $10V$ , σημαίνει ότι ένα φορτίο  $1C$  θα αποκτήσει δυναμική ενέργεια  $10J$ ,  $2C$   $20J$ ,  $3C$   $30J$  και πάει λέγοντας. Οπότε μπορούμε να πούμε ότι αν πολλαπλασιάσουμε το δυναμικό με το φορτίο-υπόθεμα βρίσκουμε την δυναμική ενέργεια του φορτίου:  $U = q V$

Μέχρι εδώ η ένταση και το δυναμικό μοιάζουν λίγο. Έχουν όμως μια σημαντική διαφορά. Η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος ενώ το δυναμικό είναι μονόμετρο. Λογικό, θα πει κάποιος, αφού η ένταση σχετίζεται με την δύναμη που είναι διάνυσμα, ενώ το δυναμικό σχετίζεται με την ενέργεια που είναι μονόμετρο.

## 2.14 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

**Ένταση  $\vec{E}$**  σε ένα σημείο ηλεκτρικού πεδίου, ονομάζουμε το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης που ασκείται σε φορτίο  $q$  που βρίσκεται σε αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό και κατεύθυνση την κατεύθυνση της δύναμης, αν αυτή ασκείται σε θετικό φορτίο.

Δηλαδή η ένταση σε ένα σημείο έχει την εξής κατεύθυνση: Διεύθυνση την ευθεία που ενώνει τα δύο σημειακά φορτία και φορά προς το φορτίο-πηγή αν είναι αρνητικό, αλλιώς την ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά (που "βλέπει" αντίθετα του φορτίου-πηγής). Αυτό συμβαίνει γιατί το δοκιμαστικό φορτίο θεωρείται (διεθνής σύμβαση) μικρό και θετικό.

Έτσι βλέπουμε ότι η ένταση έχει το πλεονέκτημα να είναι ανεξάρτητη του δοκιμαστικού φορτίου, αλλά διατηρεί το μειονέκτημα του διανύσματος.

Αν αντικαταστήσουμε στον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τον τύπο με τον οποίο υπολογίζουμε τη δύναμη από το νόμο του Coulomb, έχουμε:

$$\vec{E} = \frac{F}{|q_2|} \iff \vec{E} = \frac{k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}}{|q_2|} \iff \vec{E} = k \frac{|q_1|}{r^2}$$

Εάν έχουμε πολλά φορτία-πηγές, τότε το ηλεκτρικό πεδίο στο τυχαίο σημείο  $R$  θα είναι

$$\vec{E}(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Ο παραπάνω ορισμός αφορά το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από έναν αριθμό σημειακών φορτίων. Μερικές φορές, ωστόσο, χρειάζεται να μελετήσουμε *συνεχείς* κατανομές φορτίου, όπως για παράδειγμα μια σφαίρα με φορτίο κατανεμημένο στην επιφάνειά της, ή ένας κύλινδρος με κατανεμημένο το φορτίο στο εσωτερικό του. Στην περίπτωση αυτή, το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\vec{E}(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\vec{r}}{r^2} \rho d\tau$$

όπου με  $\rho$  συμβολίζεται η χωρική πυκνότητα φορτίου, και το ολοκλήρωμα εκτελείται σε όλον τον όγκο στον οποίο εμπεριέχεται το φορτίο. Αντίστοιχες σχέσεις υπάρχουν και για επιφανειακές ή γραμμικές πυκνότητες φορτίου, όπου τα αντίστοιχα ολοκληρώματα είναι επιφανειακά και απλά, αντί για τριπλά που έχουμε στην παραπάνω σχέση. Υπάρχει, επίσης, και άλλος ένας τρόπος υπολογισμού των ηλεκτρικών πεδίων, σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα διέπεται από κάποια συμμετρία. Η μέθοδος αυτή, γίνεται με τη βοήθεια του νομού του Gauss που θα δούμε παρακάτω.

## 2.15 Το «βέλος» της έντασης

Αφού η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος πρέπει να συμφωνήσουμε για τον τρόπο που θα σχεδιάζουμε το «βέλος» της: Οι φυσικοί λοιπόν αποφάσισαν χωρίς να μας ρωτήσουν πως τα διανύσματα της έντασης και της δύναμης που ασκείται σε ένα θετικό φορτίο-υπόθεμα θα έχουν την ίδια φορά. Αντίθετη φορά θα έχουν για αρνητικό υπόθεμα.

Αυτό δεν σημαίνει ότι η φορά της έντασης εξαρτάται από την δύναμη, αλλά το ανάποδο. Η φορά της δύναμης εξαρτάται από την ένταση. Ο λόγος είναι ότι η ένταση κατά κάποιο τρόπο «προηγείται» και η φορά του βέλους της εξαρτάται από το φορτίο-πηγή που την «παράγει», που παράγει δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο.

Πρέπει να καταλάβουμε πως η ένταση και το δυναμικό αναφέρονται στα σημεία του ηλεκτρικού πεδίου και όχι στο υπόθεμα. Η ένταση και το δυναμικό ενός σημείου υπάρχουν χωρίς να υπάρχει υπόθεμα. Προϋπάρχουν δηλαδή. Και όταν το υπόθεμα «περάσει» από το σημείο υφίσταται τις «συνέπειες», που είναι να δεχθεί δύναμη και να αποκτήσει δυναμική ενέργεια.

## 2.16 Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου

1. Τι είναι αλήθεια οι δυναμικές γραμμές;
2. Είναι φυσικό μέγεθος;
3. Και αν δεν είναι γιατί τις χρησιμοποιούμε στην εκπαιδευτική διαδικασία;
4. Πόσες δυναμικές γραμμές ξεκινάνε από ένα φορτίο;
5. Γιατί αφήνοντας ένα φορτίο δεν κινείται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών;

Αυτές τις ερωτήσεις και άλλες πολλές γύρω από τις δυναμικές γραμμές θα προσπαθήσουμε ν' απαντήσουμε σ' αυτό το άρθρο. Θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι τις δυναμικές γραμμές τις εισήγαγε για πρώτη φορά ο Faraday, θέλοντας με αυτό το τρόπο να περιγράψει ένα διανυσματικό πεδίο. Η περιγραφή ενός διανυσματικού πεδίου γίνεται καθαρά μαθηματικά από μια διανυσματική συνάρτηση πχ  $\vec{E} = \vec{E}(x, y, z)$  η οποία μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συναρτήσεις στις τρεις συνιστώσες του διανύσματος. Ο Faraday όμως, επιστήμονας καθαρά πειραματικός με ελάχιστες γνώσεις θεωρίας, δεν μπορούσε με τον καθαρά μαθηματικό τρόπο που περιγράψαμε προηγούμενα,

να αντιληφθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Γι' αυτό εισήγαγε τις δυναμικές γραμμές. Πίστευε μάλιστα την υλική υπόσταση των δυναμικών γραμμών. Θεωρούσε ότι οι δυναμικές γραμμές υπάρχουν όπως υπάρχουν και τα φορτία. Ο ορισμός των δυναμικών γραμμών ( δηλαδή οι οδηγίες για τη σωστή σχεδίασή τους ) είναι ο ακόλουθος:

1. η εφαπτόμενη μιας δυναμικής γραμμής σε οποιοδήποτε σημείο της, δίνει τη διεύθυνση της έντασης στο σημείο αυτό.
2. οι δυναμικές γραμμές σχεδιάζονται έτσι που ο αριθμός τους σε κάθε μονάδα εμβαδού σε μια κάθετη διατομή, να είναι ανάλογος του μέτρου της έντασης. Έτσι εκεί που οι δυναμικές γραμμές είναι πυκνές το μέτρο της έντασης είναι μεγάλο, ενώ εκεί που είναι αραιές, το μέτρο της έντασης είναι μικρό.

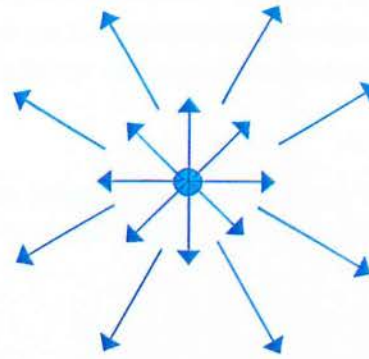
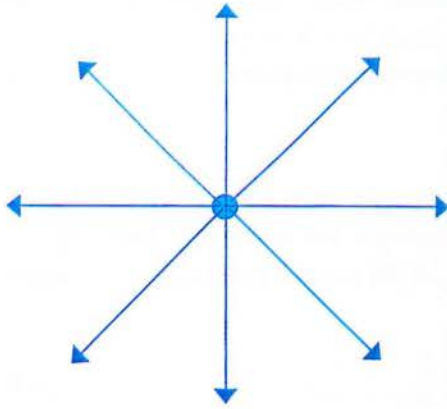
Τώρα μπορούμε να αρχίσουμε τις παρατηρήσεις. Κατ' αρχήν πρέπει να επισημάνουμε ότι οι δυναμικές γραμμές δεν αποτελούν φυσικό μέγεθος, με την έννοια ότι δεν είναι δυνατό να μετρηθούν. Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που σχεδιάζουμε είναι αυθαίρετος. Βέβαια όσο περισσότερες δυναμικές γραμμές σχεδιάζουμε τόσο περισσότερο προσεγγίζουμε το πεδίο, με την έννοια ότι τόσο με μεγαλύτερη λεπτομέρεια μπορούμε να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του διανύσματος της έντασης στα διάφορα σημεία του χώρου. Υπάρχει όμως ένα φυσικό μέγεθος, η ηλεκτρική ροή, η οποία ορίζεται ως :

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{\eta} \cdot dS \quad (1)$$

Η φυσική σημασία αυτού του μεγέθους σύμφωνα με τη δεύτερη συνθήκη του ορισμού των δυναμικών γραμμών, θα είναι ανάλογη του πλήθους των δυναμικών γραμμών που περνάνε από μια επιφάνεια. Έτσι αφού η ηλεκτρική ροή αποτελεί ένα φυσικό μέγεθος ( αφού μπορεί να μετρηθεί σε κάθε περιοχή του χώρου ) γιατί ισχυριζόμαστε ότι οι δυναμικές γραμμές δεν αποτελούν φυσικό μέγεθος;. Η απάντηση στο ερώτημα βρίσκεται στον ισχυρισμό ότι η ηλεκτρική ροή είναι ανάλογη του πλήθους των δυναμικών γραμμών που περνάνε από μια επιφάνεια. Ο ισχυρισμός αυτός είναι λανθασμένος, αφού έτσι το μέγεθος της ηλεκτρικής ροής θα έπρεπε να είναι κβαντισμένο μέγεθος αφού το πλήθος των δυναμικών γραμμών είναι πάντα ακέραιος αριθμός. Η σταθερά αναλογίας, είναι δική μας επιλογή και όσο μεγαλύτερη είναι με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια περιγράφουμε το πεδίο.

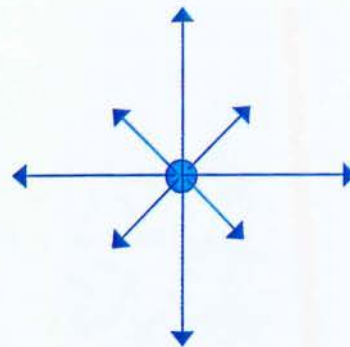
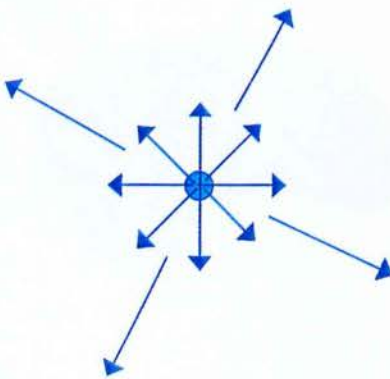
Άρα οι δυναμικές γραμμές δεν αποτελούν φυσικό μέγεθος γιατί η ηλεκτρική ροή δεν είναι κβαντισμένο μέγεθος. Απλά αποτελούν μια προσεγγιστική γραφική αναπαράσταση του πεδίου. Όσο μεγαλύτερη η σταθερά αναλογίας που επιλέγουμε, τόσο καλύτερη και η αναπαράσταση του πεδίου.

Από την άλλη θα αποδείξουμε ότι σύμφωνα με τον ορισμό που δώσαμε, δεν μπορεί να είναι καν συνεχείς γραμμές. Συνεχείς γραμμές μπορεί να είναι μόνο στο πεδίο Coulomb που η ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Πράγματι έστω ένα σημειακό φορτίο  $q$ . Τότε οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί το φορτίο, μπορούν να σχεδιαστούν όπως και παρακάτω, χωρίς αυτός ο σχεδιασμός να αντιβαίνει στον ορισμό των δυναμικών γραμμών που δώσαμε αρχικά.



Ένας τέτοιος σχεδιασμός των δυναμικών γραμμών μπορεί να μην είναι συνηθισμένος, αλλά δεν είναι λάθος. Συνήθως σχεδιάζουμε τις δυναμικές γραμμές συνεχείς, χωρίς να διερωτόμαστε, αν έχουμε το δικαίωμα πάντα για έναν τέτοιο σχεδιασμό.

Για να προσπαθήσουμε να σχεδιάσουμε τις δυναμικές γραμμές από ένα πεδίο με σφαιρική συμμετρία, του οποίου όμως η ένταση δεν είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, αλλά απλά, αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Σ' αυτή την περίπτωση θα διαπιστώσουμε έκπληκτοι, ότι δεν μπορεί οι δυναμικές γραμμές να είναι συνεχείς. Πράγματι αν διπλασιάσουμε την ακτίνα μιας νοητής σφαίρας, τότε η ένταση θα γίνει η μισή. Έστω λοιπόν ότι οι δυναμικές γραμμές είναι συνεχείς. Από την άλλη, επειδή θα τετραπλασιαστεί το εμβαδόν της επιφάνειας της σφαίρας, η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών θα γίνει 4 φορές μικρότερη, αφού θα περνάει ο ίδιος αριθμός δυναμικών γραμμών από τετραπλάσια επιφάνεια, άρα άτοπο. Σ' αυτή τη περίπτωση οι δυναμικές γραμμές δεν μπορεί να είναι συνεχείς. Με άλλα λόγια δεν μπορεί ένα τέτοιο πεδίο να αναπαρασταθεί με συνεχείς γραμμές. Σε αυτή την περίπτωση η ασυνέχεια των δυναμικών γραμμών είναι επιβεβλημένη είτε αν τις σχεδιάσουμε όπως στο σχήμα (α) είτε όπως στο σχήμα (β)



Παρόλο τον «μπακαλίστικο» όπως αποδείξαμε ρόλο των δυναμικών γραμμών, η εκπαιδευτική τους αξία είναι πολύ μεγάλη και γι' αυτό επιμένουμε να τις χρησιμοποιούμε ακόμη εδώ και 200 περίπου χρόνια. Την τεράστια εκπαιδευτική τους αξία θα την αποδείξουμε παρακάτω:

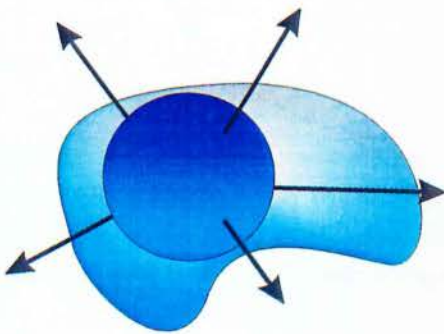
Έστω ότι θέλουμε να βρούμε τη ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια σφαιρική επιφάνεια στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ένα σημειακό φορτίο  $q$ . Λόγω συμμετρίας, σε όλα τα σημεία της επιφάνειας η ένταση είναι η ίδια και ίση με:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

Χωρίζοντας την επιφάνεια της σφαίρας σε στοιχειώδεις ( πολύ μικρές ) επιφάνειες, στη κάθε τέτοια επιφάνεια η ένταση είναι κάθετη. Έτσι εφαρμόζοντας τον ορισμό της ηλεκτρικής ροής, έχουμε,:

$$\Phi_E = \sum E \Delta S \cos\varphi = \sum E \Delta S = \sum \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \Delta S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \sum \Delta S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Ο υπολογισμός της ροής εδώ έγινε σχετικά εύκολα. Αν όμως μας ζητούσαν να υπολογίσουμε τη ροή που περνάει από μια τυχαία κλειστή επιφάνεια που περιβάλλει το φορτίο  $q$ , τότε τα πράγματα αυτομάτως γίνονται πολύ πιο δύσκολα. Τότε χωρίζοντας την επιφάνεια σε στοιχειώδεις επιφάνειες, η ένταση δεν είναι πλέον η ίδια σε κάθε μια από αυτές, ούτε και κάθετη στην κάθε στοιχειώδη επιφάνεια. Τα πράγματα γίνονται τόσο δύσκολα που φαίνεται σχεδόν αδύνατο να μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ροή από αυτή την επιφάνεια. Αν όμως σκεφτούμε ότι η ροή είναι ανάλογη του αριθμού των δυναμικών γραμμών και δούμε ότι αφού υπάρχει μόνο ένα ηλεκτρικό φορτίο, όλες οι δυναμικές γραμμές θα πηγάζουν ή θα καταλήγουν σ' αυτό. Έτσι όσες δυναμικές γραμμές περνάνε από την σφαιρική επιφάνεια, τόσες θα περνάνε και από οποιαδήποτε επιφάνεια που περιβάλλει το σημειακό φορτίο. Ακόμη μπορούμε με τη βοήθεια των δυναμικών γραμμών να αντιληφθούμε αρκετά εύκολα, ότι όση ένταση δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο σε απόσταση  $r$  από αυτό, τόση ακριβώς θα δημιουργεί και μια σφαιρική κατανομή φορτίων.





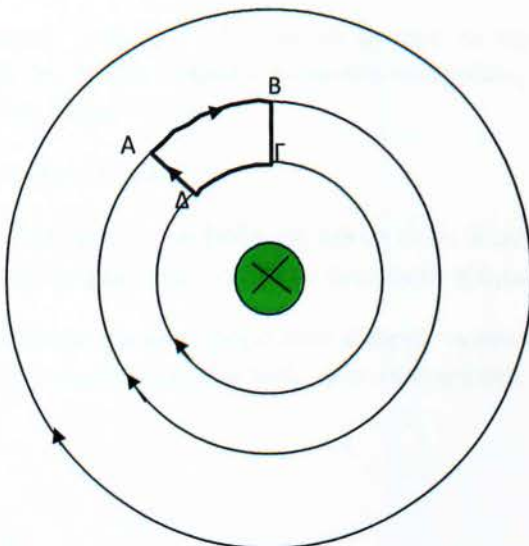
Αυτή η διαπίστωση είναι πολύ δύσκολο να αποδειχθεί αυστηρά μαθηματικά και το αντίστοιχο πρόβλημα για το βαρυντικό πεδίο, παίδεψε ακόμα και τον μεγάλο Νεύτωνα, όταν ήθελε να αποδείξει ότι η Γη έλκει τη Σελήνη με τόση ακριβώς δύναμη όσο θα την έλκυε μια σημειακή μάζα τοποθετημένη στο κέντρο της Γης με την ίδια μάζα που έχει η Γη.

## ΜΕΡΙΚΕΣ ΑΠΟΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗ ΣΥΝΤΗΡΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ.

Ας αρχίσουμε με τον ορισμό ενός συντηρητικού πεδίου.

*Συντηρητικό ονομάζεται ένα πεδίο δυνάμεων όταν οι δυνάμεις που εμφανίζονται σ' αυτό είναι συντηρητικές. Συντηρητική ονομάζεται μια δύναμη όταν το έργο της για οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή είναι μηδέν.*

Πολλά βιβλία δεν αναφέρουν το για οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή. Αυτό είναι λάθος, αφού μπορούμε να βρούμε μια κλειστή διαδρομή για την οποία το έργο μιας δύναμης να είναι μηδέν, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει ότι η δύναμη είναι συντηρητική, αφού μπορεί να υπάρχει κάποια άλλη κλειστή διαδρομή για την οποία το έργο είναι διάφορο του μηδενός. Ας αναφέρουμε ένα παράδειγμα. Έστω ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο περιορίζεται σε ένα κυλινδρικό



χώρο. Γύρω από αυτό το πεδίο ως γνωστό, θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές λόγω συμμετρίας, είναι ομόκεντροι κύκλοι γύρω από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο όπως στο σχήμα. Εάν θελήσουμε να βρούμε το έργο γύρω από τη κλειστή διαδρομή ABΓΔ τότε θα διαπιστώσουμε ότι αυτό είναι μηδέν. Πράγματι:

$$W_{ολ} = W_{AB} + W_{B\Gamma} + W_{\Gamma\Delta} + W_{\Delta A} = W_{AB} + W_{\Gamma\Delta} = F_1 \cdot \widehat{AB} - F_2 \cdot \widehat{\Gamma\Delta} = q(E_1 \cdot R_1 \cdot \varphi - E_2 \cdot R_2 \cdot \varphi)$$

εφαρμόζοντας το τύπο που δίνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη προκειμένη περίπτωση:

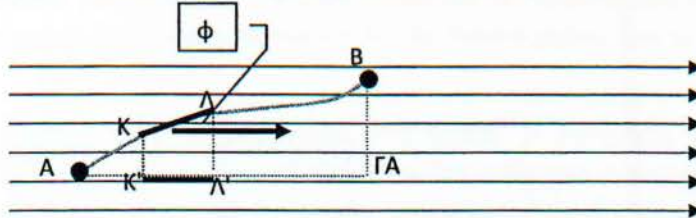
$$E = -\frac{1}{2\pi R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Συμπεραίνουμε ότι το συγκεκριμένο έργο είναι ίσο με μηδέν. Βέβαια από αυτό δεν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πεδίο είναι συντηρητικό αφού επιλέγοντας μια άλλη κλειστή διαδρομή, όπως τη διαδρομή ενός κύκλου, δηλαδή μιας δυναμικής γραμμής, πολύ εύκολα αποδεικνύουμε ότι το έργο για αυτή τη διαδρομή είναι διάφορο του μηδενός.

**ΠΡΟΤΑΣΗ 1<sup>H</sup>:**

**Οποιοδήποτε ομογενές πεδίο είναι και συντηρητικό:**

Οι δυναμικές γραμμές του ομογενούς πεδίου είναι ως γνωστό παράλληλες και ισαπέχουσες. Αν πάρουμε μια κλειστή γραμμή οποιοδήποτε σχήματος, εύκολα αποδεικνύεται ότι το έργο είναι



μηδέν. Ας αρχίσουμε με μια

ανοικτή γραμμή, έστω την AB. Για να βρούμε το έργο κατά μήκος αυτής της γραμμής τη χωρίζουμε σε στοιχειώδη τμήματα. Έστω ένα στοιχειώδες τμήμα από αυτά το ΚΛ. Το στοιχειώδες έργο σε αυτό το τμήμα θα είναι

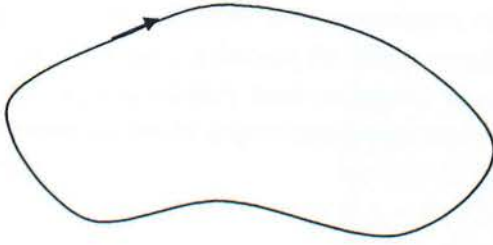
$$\Delta W = F(K\Lambda) \cos\phi = F(K'\Lambda')$$

Έτσι το συνολικό έργο για τη διαδρομή AB θα είναι:  $W_{ολ} = \sum F(K'\Lambda') = F \sum (K'\Lambda') = F(A\Gamma) = \text{Δύναμη επί τη προβολή της τροχιάς κατά μήκος των δυναμικών γραμμών.}$

Έτσι συμπεραίνουμε ότι αν η τροχιά ήταν κλειστή, το έργο θα ήταν μηδέν (για οποιαδήποτε σχήμα της τροχιάς) και επομένως το ομογενές είναι συντηρητικό.

**ΠΡΟΤΑΣΗ 2<sup>H</sup>:**

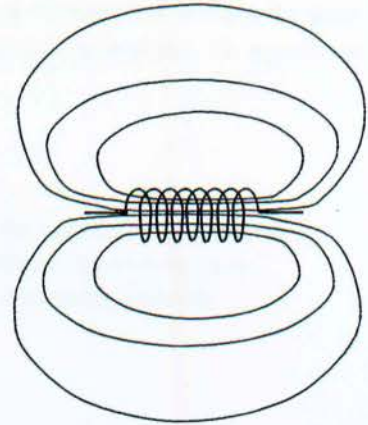
**Οποιοδήποτε πεδίο με κλειστές δυναμικές γραμμές είναι μη συντηρητικό:**



Πράγματι αν πάρουμε το έργο κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής, επειδή η δύναμη είναι εφαπτόμενη της γραμμής σε κάθε σημείο της, χωρίζοντας πάλι τη γραμμή σε στοιχειώδη τμήματα, για το κάθε τμήμα, το έργο θα είναι για όλη τη γραμμή είτε θετικό αν η δύναμη είναι ίδιας φοράς με τη μετατόπιση είτε αρνητικό αν συμβαίνει το αντίθετο. Έτσι και το συνολικό έργο θα προκύπτει στο τέλος είτε θετικό είτε αρνητικό. Σε καμία περίπτωση δεν θα βγαίνει μηδέν, άρα το πεδίο δεν θα είναι συντηρητικό.

Από αυτή τη πρόταση μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι επειδή οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι κλειστές ( και αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα ώστε ν' αποτελούν την αρχή ή το τέλος των δυναμικών γραμμών) γι' αυτό το μαγνητικό πεδίο γενικά είναι μη συντηρητικό. Μπορεί βέβαια κατά τόπους να είναι ομογενές, άρα και συντηρητικό, αλλά σε όλο το χώρο είναι πάντα μη συντηρητικό. Εδώ θα αναφέρουμε ένα ωραίο παράδειγμα για το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σωληνοειδές.

Στη περίπτωση αυτή το μαγνητικό πεδίο μέσα στο σωληνοειδές είναι ομογενές άρα και συντηρητικό. Έξω από το πηνίο το μαγνητικό πεδίο είναι ακριβώς το ίδιο με το ηλεκτρικό πεδίο ενός ηλεκτρικού διπόλου. Έτσι είναι και έξω συντηρητικό. Συνολικά όμως σε όλο το χώρο το μαγνητικό πεδίο δεν είναι συντηρητικό, αφού οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές.

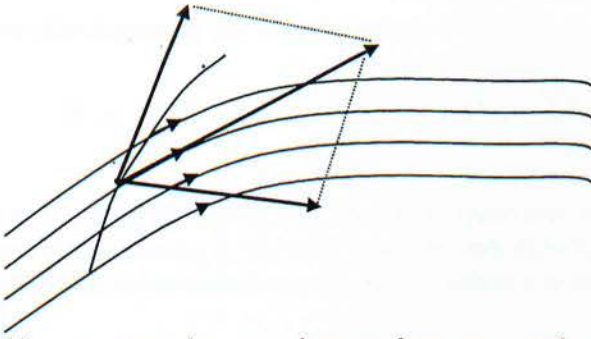


Και στα μαθηματικά μια συνάρτηση μπορεί να είναι γνησίως φθίνουσα στο διάστημα  $-\infty, 0$  γνησίως φθίνουσα στο  $0, \infty$  και να μην είναι μονότονη στο διάστημα  $-\infty, \infty$ . Π.χ η συνάρτηση  $y=1/x$

**Γιατί αφήνοντας ένα φορτίο σ' ένα ηλεκτρικό πεδίο δεν ακολουθεί τη καμπύλη της δυναμικής γραμμής;**

Η εξήγηση μπορεί να δοθεί με τη μέθοδο της ατόπου επαγωγής. Δηλαδή ας υποθέσουμε ότι αφήνοντας ένα φορτίο πάνω σε μια δυναμική γραμμή, η τροχιά του ταυτίζεται με τη δυναμική γραμμή. Τότε προφανώς μετά από λίγο το φορτίο επιταχυνόμενο από την επιτρόχια δύναμη που

ασκείται πάνω του, θα αποκτήσει κάποια ταχύτητα. Η συνολική δύναμη που ασκείται στο φορτίο είναι η δύναμη του πεδίου, η οποία είναι εφαπτόμενη της τροχιάς αφού η τροχιά ταυτίζεται με τη δυναμική γραμμή. Άρα αυτή η δύναμη θα παίζει το ρόλο της επιτρόχιας. Έτσι δεν θα υπάρχει η απαιτούμενη κεντρομόλα δύναμη ώστε το φορτίο να αλλάξει τη διεύθυνση της ταχύτητάς του. Εύκολα συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ακολουθεί τη δυναμική γραμμή, μόνο στη περίπτωση που αυτή είναι ευθεία.



Αλήθεια τι μπορούμε να κάνουμε ώστε το φορτίο να ακολουθήσει τη δυναμική γραμμή; Η απάντηση είναι να επιβάλουμε μια μεγάλη τριβή ανάλογη της ταχύτητας ή κάποιας δύναμης της ταχύτητας. Τότε όταν το φορτίο αποκτούσε κάποια πολύ μικρή ταχύτητα, η συνιστώσα του πεδίου πάνω στην τροχιά θα εξουδερευόταν από την τριβή και η επιτρόχια δύναμη θα μηδενιζόταν, κρατώντας έτσι τη ταχύτητα του σώματος πολύ μικρή. Τότε όμως η κεντρομόλα δύναμη θα ήταν και αυτή πολύ μικρή και έτσι η δύναμη του πεδίου θα ήταν εφαπτόμενη της τροχιάς. Το φορτίο σε αυτή τη περίπτωση θα ακολουθούσε σχεδόν τη δυναμική γραμμή.

## 2.17 Ηλεκτρική ροή

Η ηλεκτρική ροή είναι φυσικό μέγεθος που δηλώνει τον αριθμό των δυναμικών γραμμών ενός ηλεκτρικού πεδίου που διαπερνούν μια επιφάνεια. Ισούται με το γινόμενο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επί το εμβαδόν μίας επιφάνειας που είναι κάθετη στο πεδίο, δηλαδή:

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A}$$

(όπου  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $A$  η επιφάνεια)

Στην περίπτωση που το διάνυσμα της επιφάνειας σχηματίζει γωνία  $\theta$  με το πεδίο τότε η ηλεκτρική ροή ισούται με:

$$\Phi_E = E \cdot A \cdot \sigma\upsilon\nu\theta$$

Ενώ στην γενικότερη περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι επίπεδη η ηλεκτρική ροή δίνεται από το παρακάτω επιφανειακό ολοκλήρωμα:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

## 2.18 Νόμος του Γκάους

Στη φυσική και στη μαθηματική ανάλυση, ο Νόμος του Γκάους είναι η εφαρμογή του γενικευμένου θεωρήματος της απόκλισης στην ηλεκτροστατική, δίνοντας την σχέση ισοδυναμίας μεταξύ μιας οποιαδήποτε ροής, όπως ενός υγρού, της ηλεκτρικής ή της βαρυτικής, που ρέει έξω από μια οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια και το αποτέλεσμα των εσωτερικών πηγών, όπως το ηλεκτρικό φορτίο ή η μάζα, που περιέχονται στον όγκο που περικλείει η επιφάνεια. Ο νόμος αναπτύχθηκε από τον Καρλ Φρίντριχ Γκάους.

Στην ολοκληρωτική του μορφή, ο νόμος λέει:

$$\Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV = \frac{Q_A}{\epsilon_0}$$

όπου  $\Phi$  είναι η ηλεκτρική ροή,  $\mathbf{E}$  είναι το ηλεκτρικό πεδίο,  $d\mathbf{A}$  είναι η απειροστή περιοχή της κλειστής επιφάνειας  $S$ ,  $Q_A$  είναι το φορτίο που περικλείει η επιφάνεια,  $\rho$  είναι η ηλεκτρική πυκνότητα σε ένα σημείο του όγκου  $V$ ,  $\epsilon_0$  είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού χώρου και  $\oint_S$  είναι το ολοκλήρωμα πάνω στην κλειστή επιφάνεια  $S$ , που περικλείει τον όγκο  $V$ .

Σε διαφορική μορφή, η εξίσωση γίνεται:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{free}}$$

όπου  $\nabla$  είναι το ανάδελα,  $D$  είναι το ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης (σε μονάδες  $C/m^2$ ), και  $\rho_{\text{free}}$  είναι η ελεύθερη πυκνότητα ηλεκτρικών φορτίων (σε μονάδες  $C/m^3$ ), που δε συμπεριλαμβάνει τα δέσμια διπολικά φορτία σε ένα υλικό.

Για γραμμικά υλικά, η εξίσωση γίνεται:

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho_{\text{free}}$$

όπου  $\epsilon$  είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα.

### A) Εφαρμογή στο μαγνητισμό

Στη στατική περίπτωση ενός μαγνήτη, ή άλλη κατάσταση όπου η πηγή του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με τον παρατηρητή, η ολοκληρωτική μορφή του νόμου του Γκάους μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας την αναλογία της ροής με τον αριθμό των δυναμικών γραμμών του πεδίου που εισέρχονται και εξέρχονται από μια Γκαουσιανή επιφάνεια.

Χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο επιχείρημα, μπορεί ναδειχθεί πως σε όλες τις στατικές περιπτώσεις, η συνολική μαγνητική ροή είναι μηδενική. Όσες δυναμικές γραμμές εισέρχονται μια Γκαουσιανή επιφάνεια, άλλες τόσες εξέρχονται από αυτήν, οπότε δεν περικλείεται κάποια "πηγή" του μαγνητικού πεδίου.

$$\Phi_B = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Η διαφορική μορφή αυτής της εξίσωσης, αποτελεί και μία από τις τέσσερις Εξισώσεις Μάξγουελ, που είναι συνέπεια της μη ύπαρξης μαγνητικών μονοπόλων στη φύση.

## B) Εφαρμογή στη βαρύτητα

Αν και η βαρυντική μορφή του νόμου του Γκάους έχει περισσότερο θεωρητικό ενδιαφέρον, μπορεί να εφαρμοστεί σε αναλογία με την ηλεκτροστατική μορφή του νόμου του Γκάους για να δειχθεί ότι η βαρυντική δύναμη ενός σώματος σε ένα άλλο μπορεί να υπολογιστεί όπως στην περίπτωση όπου και οι δύο μάζες θα ήταν συγκεντρωμένες στα κέντρα των σωμάτων.

$$\Phi_g = \oint_S \mathbf{g} \cdot d\mathbf{A} = 4\pi G \int_V \rho_m dV = 4\pi GM$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω μορφή του νόμου του Γκάους για να αποδείξουμε, για παράδειγμα, ότι η δύναμη που ασκεί η Γη στη Σελήνη δεν εξαρτάται από τη λεπτομερή σύσταση της Γης, εμπερικλείουμε τη Γη σε μια σφαιρική Γκαουσιανή επιφάνεια, με εμβαδόν  $4\pi r^2$ .

Από τη στιγμή που οι δυναμικές γραμμές της Γης επεκτείνονται ισοδύναμα σε όλες τις κατευθύνσεις και μειώνονται ως  $\frac{1}{r^2}$ , το βαρυντικό πεδίο πρέπει να είναι σταθερό για δεδομένη ακτίνα.

$$\oint_S \mathbf{g} \cdot d\mathbf{A} = 4\pi GM$$

$$\mathbf{g} \oint_S \cdot d\mathbf{A} = 4\pi GM$$

$$\mathbf{g} 4\pi r^2 = 4\pi GM$$

$$\mathbf{g} = \frac{GM}{r^2}$$

Τετριμμένα, πολλαπλασιάζοντας με  $m$ , παίρνουμε τη γνωστή εξίσωση για τη δύναμη.

## 2.19 Ηλεκτρικό δυναμικό

Το **ηλεκτρικό δυναμικό**, ή απλά **δυναμικό** όπως συνηθίζεται, είναι η *δυναμική ενέργεια ανά μονάδα φορτίου*. Η μονάδα μέτρησης του δυναμικού στο σύστημα SI είναι το βολτ (*volt*), προς τιμήν του Ιταλού επιστήμονα *Alessandro Volta*. Το βολτ ορίζεται ως 1 τζάουλ ανά coulόμπ

$$1\text{Volt} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}}$$

Το δυναμικό ορίζεται μαθηματικά ως

$$V(R) = - \int_O^R \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

όπου το Ο είναι το σημείο αναφοράς, όπου συνήθως το δυναμικό είναι εκεί μηδενικό. Η διαφορά δυναμικού ορίζεται ως

$$V(B) - V(A) = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Το δυναμικό συνδέεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσω της σχέσης

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

Το βασικό πλεονέκτημα της εισαγωγής του δυναμικού έγκειται στο ότι αυτό είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, εν αντιθέσει με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, και κατά συνέπεια πιο δύσχρηστο στους υπολογισμούς. Υπάρχει μια ασάφεια στον ορισμό του δυναμικού, που αφορά το σημείο αναφοράς Ο, καθώς μετακινώντας αυτό το σημείο, αλλάζει η τιμή του δυναμικού. Γι' αυτό λέμε πως το δυναμικό αυτό καθαυτό δεν έχει κάποια φυσική σημασία. Ουσιαστική σημασία έχει μόνο η διαφορά δυναμικού, αφού τα δύο δυναμικά στα σημεία Α και Β έχουν υπολογιστεί με κοινό σημείο αναφοράς Ο.

Θέτοντας το σημείο αναφοράς στο άπειρο, βρίσκουμε εύκολα πως το δυναμικό ενός σημειακού φορτίου q είναι

$$V(r) = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^r \frac{q}{r'^2} dr' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

ενώ για μια συνεχή κατανομή φορτίου έχουμε ότι

$$V(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r} d\tau$$

Τέλος, το δυναμικό υπακούει στην αρχή της επαλληλίας.

## 2.20 Ηλεκτρική διπολική ροπή

Στη φυσική, η ηλεκτρική διπολική ροπή αποτελεί ένα μέτρο της πόλωσης ενός συστήματος ηλεκτρικών φορτίων. Ορίζουμε την ηλεκτρική διπολική ροπή p που έχει φορτία +q και -q ως

$$\mathbf{p} = q \mathbf{r}.$$

όπου με  $\mathbf{r}$  συμβολίζουμε το διάνυσμα από το αρνητικό στο θετικό φορτίο. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τη στιγμή που το  $\mathbf{r}$  είναι διάνυσμα με συγκεκριμένη διεύθυνση, το ίδιο ισχύει και για την  $p$ .

Επειδή συχνά είναι βολικό να μπορούμε να αντιμετωπίσουμε πολύπλοκες κατανομές ηλεκτρικών φορτίων στο κατά πόσο η συμπεριφορά τους μοιάζει με εκείνη ενός διπόλου, γενικεύουμε τους ορισμούς μας ως εξής: σε περιπτώσεις όπου κάποιος θέλει να βρει την ηλεκτρική διπολική ροπή μιας κατανομής  $N$  διακριτών φορτίων, η διπολική ροπή ορίζεται ως

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N q_i \mathbf{r}_i.$$

όπου το κάθε  $\mathbf{r}_i$  είναι ένα διάνυσμα από κάποια σταθερή αρχή αξόνων στο αντίστοιχο  $q_i$ , με μέτρο ίσο με το φορτίο του  $q_i$ . Το παραπάνω άθροισμα μπορεί να μετατραπεί σε ολοκλήρωμα στην περίπτωση μιας συνεχούς κατανομής φορτίων:

$$\mathbf{p} = \int \rho(\mathbf{r}') \mathbf{r}' d\tau'$$

Η διπολική ροπή χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα με ουδέτερο συνολικό φορτίο. Για παράδειγμα, ένα ζευγάρι αντίθετων φορτίων, ή ένας ουδέτερος αγωγός σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Για τέτοια συστήματα, η τιμή της ηλεκτρικής διπολικής ροπής είναι ανεξάρτητη από την αρχή του συστήματος αξόνων. Για μη ουδέτερα συστήματα, εμφανίζεται μια εξάρτηση από την επιλογή της αρχής των αξόνων. Για να ανακτηθεί η χρησιμότητα της ηλεκτρικής διπολικής ροπής στον υπολογισμό διάφορων ποσοτήτων, η αρχή των αξόνων λαμβάνεται συχνά ως το κέντρο του απόλυτου φορτίου,  $\vec{R}$ , του συστήματος, που ορίζεται όπως το κέντρο μαζας και είναι, για αρκετά συστήματα, το ίδιο.

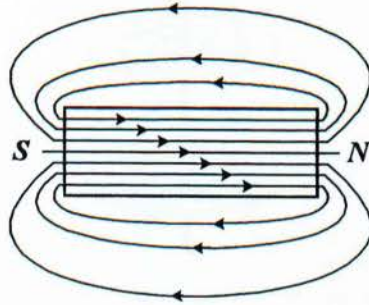
$$\vec{R} = \frac{1}{Q} \sum_i |q_i| \vec{x}_i, \quad Q = \sum_i |q_i|$$

Το  $\mathbf{r}_i$  για τη διακριτή περίπτωση, ή το  $\mathbf{r}'$  για τη συνεχή, λαμβάνονται τότε σε σχέση με την αρχή των αξόνων που ορίζεται από το  $\vec{R}$ .



## 2.21 Το μαγνητικό πεδίο

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Έτσι, απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου είναι η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι αυτό που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα του άτονου και τον άξονά τους. Αυτές οι κινήσεις των ηλεκτρονίων ισοδυναμούν με στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία αναπτύσσουν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία. Έτσι, κάθε άτομο οποιοδήποτε υλικού παράγει κάποιο μαγνητικό πεδίο και είναι ένας στοιχειώδης μαγνήτης με βόρειο και νότιο πόλο.



Σχ. 1.1 Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη σε σχήμα ράβδου

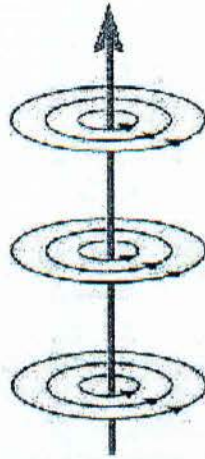
Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες, τα μαγνητικά πεδία των ατόμων του υλικού είναι προσανατολισμένα μέσα σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται περιοχές *Weiss* και κάθε μια αποτελεί ένα μικροσκοπικό μαγνήτη. Όταν οι περιοχές *Weiss* του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, το υλικό έχει τα χαρακτηριστικά ενός μαγνήτη. Αν οι περιοχές *Weiss* είναι τυχαία προσανατολισμένες, τότε το υλικό δεν παρουσιάζει μακροσκοπικά μαγνητικό πεδίο και εμφανίζεται αμαγνήτιστο.

Ένας ρευματοφόρος αγωγός ή ένας μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, δηλαδή ένα χώρο γύρω του στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Η μορφή του μαγνητικού πεδίου παριστάνεται με τις *μαγνητικές ή δυναμικές γραμμές*. Στο Σχ. 1.1 εικονίζεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα μαγνήτη σε σχήμα ράβδου. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές καμπύλες. Οι μαγνητικές γραμμές έχουν φορά από το βόρειο προς το νότιο πόλο του μαγνήτη. Οι μαγνητικές γραμμές συνεχίζονται και στο εσωτερικό του μαγνήτη, με φορά από το νότιο προς το βόρειο πόλο, σχηματίζοντας κλειστές διαδρομές. Οι δυναμικές γραμμές, εκτός από τη φορά και τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται ακόμη στην παράσταση του μέτρου του (ένταση). Όσο πυκνότερες είναι οι μαγνητικές γραμμές, τόσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο, όπως εικονίζεται στο Σχ. 1.1, είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους.

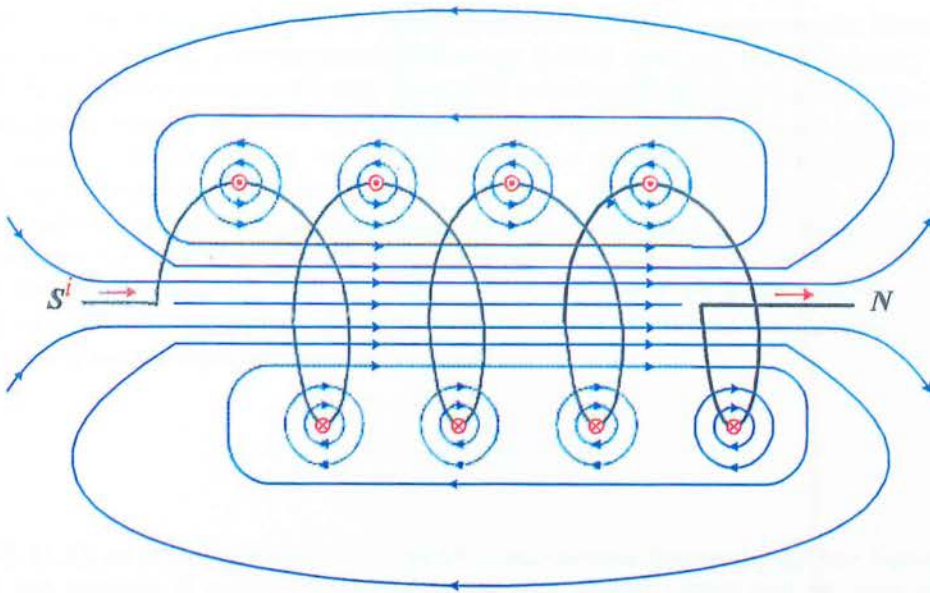
Στο Σχ. 1.2 παρουσιάζεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται από ένα ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό. Ακόμη, οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες ως προς αγωγό. Η φορά των

μαγνητικών γραμμών εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος στον αγωγό. Αν στο Σχ. 1.2 η φορά του ρεύματος αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά των δυναμικών γραμμών.

του



Σχ.1.2 Το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού



Σχ. 1.3 Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου μεγάλου μήκους

Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου με μεγάλο μήκος, σε σχέση με τη διάμετρό του, εικονίζεται στο Σχ. 1.3. Παρατηρούμε ότι, η μορφή του πεδίου είναι όμοια μ' εκείνη του ραβδόμορφου μαγνήτη. Το πεδίο στο εσωτερικό του πηνίου είναι *ομοιόμορφο*, δηλαδή οι μαγνητικές γραμμές είναι παράλληλες μεταξύ τους και ο αριθμός τους είναι σταθερός. Οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται από το ένα άκρο του πηνίου, το οποίο είναι ο βόρειος πόλος του. Το άκρο του πηνίου όπου εισέρχονται οι μαγνητικές γραμμές είναι ο νότιος πόλος. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου υφίσταται, όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ροή του ρεύματος.

## 2.22 Μεγέθη του μαγνητικού πεδίου

Θεωρούμε ένα πηνίο με  $N$  σπείρες, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση  $i$ . Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του (Σχ. 1.4). Στην περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από το πηνίο περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο εσωτερικό του πυρήνα. Ο νόμος του Ampere ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με τη σχέση

$$Hl = Ni \quad (1.1)$$

Στην Εξ. (1.1) με  $H$  συμβολίζεται το μέτρο ενός διανυσματικού μεγέθους, το οποίο ονομάζεται ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$ . Η διεύθυνση και η φορά της  $\mathbf{H}$  ταυτίζονται με τη διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα (Σχ. 1.4), από την Εξ. (1.1), είναι

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1.2)$$

Ο αριθμητής στην Εξ. (1.2) ονομάζεται *μαγνητογενετική δύναμη M (magnetomotive force, MMF)*. Μονάδα μέτρησης της μαγνητογενετικής δύναμης (ΜΕΔ) είναι οι αμπεροστροφές [At]. Η μαγνητογενετική δύναμη είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγενετικής δύναμης στον ηλεκτρισμό. Όπως η ηλεκτρεγενετική δύναμη προκαλεί την κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι και η ΜΕΔ είναι η αιτία για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου με ένταση  $H$ . Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι οι At/m.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζει το έργο του καταβάλλει το ηλεκτρικό ρεύμα  $i$  για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα. Η “ισχύς” του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα και εκφράζεται από το διανυσματικό μέγεθος της *μαγνητικής επαγωγής (flux density) B*. Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.3)$$

Στην Εξ. (1.3), με  $\mu$  συμβολίζεται η *μαγνητική διαπερατότητα (permeability)* του υλικού κατασκευής του πυρήνα. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών εκφράζεται ως προς αυτή του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$ , είναι σταθερή και ίση με

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Atm} \quad (1.4)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε υλικού  $\mu$ , συνδέεται μ’ εκείνη του κενού μέσω της *σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r$*

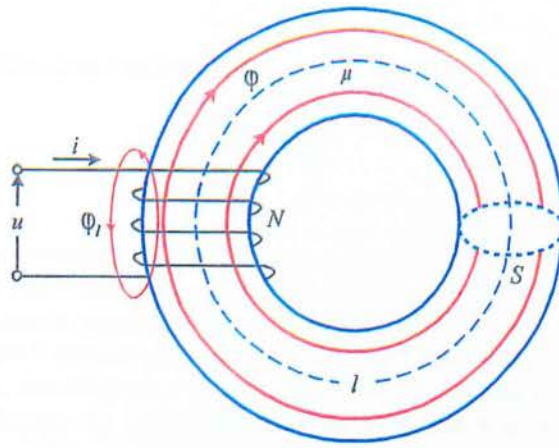
$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.5)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το *Tesla [T]*. Από τις Εξ. (1.3)–(1.4) προκύπτει ότι,

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \quad (1.6)$$

Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που περνούν κάθετα από μια επιφάνεια  $1\text{m}^2$ . Ο ολικός αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνά από μια επιφάνεια  $S$ , εκφράζεται από το μέγεθος της *μαγνητικής ροής  $\Phi$* , σύμφωνα με τη σχέση

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{i} \, d\mathbf{S} \quad (1.7)$$



Σχ. 1.4 Πηνίο με πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό

Αν το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι σταθερό σ' όλη την επιφάνεια  $S$  και το διάνυσμά της είναι κάθετο στην επιφάνεια, η Εξ. (1.7) απλοποιείται στην παρακάτω μορφή

$$\Phi = BS \quad (1.8)$$

Η Εξ. (1.8) ισχύει στη διάταξη του Σχ. 1.4. Επομένως, η μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα  $i$  στον πυρήνα του Σχ. 1.4, με διατομή  $S$  και μέσο μήκος  $l$ , είναι ίση με

$$\Phi = \mu \frac{NiS}{l} \quad (1.9)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το weber [Wb] ή ισοδύναμα το volt-second [Vs].

## 2.23 Μαγνητική αντίσταση – μαγνητικό κύκλωμα

Στο Σχ. 1.4, όταν το πηνίο διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση  $i$ , δημιουργείται στον πυρήνα ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική ροή  $\Phi$  και την εικονιζόμενη φορά. Η φορά της  $\Phi$  δεικνύετε από τον αντίχειρα του δεξιού χεριού, αν τυλίξουμε τα υπόλοιπα δάκτυλα κατά τη φορά του ρεύματος στο πηνίο. Το μέτρο της μαγνητικής ροής από την Εξ. (1.9), γράφεται στη μορφή

$$\Phi = \frac{Ni}{(l/\mu S)} \quad (1.10)$$

Ο παρονομαστής στην Εξ. (1.10) εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαστάσεις και το υλικό του πυρήνα και ονομάζεται *μαγνητική αντίσταση (reluctance)  $R_m$* . Επομένως, η μαγνητική αντίσταση είναι ίση με

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1.11)$$

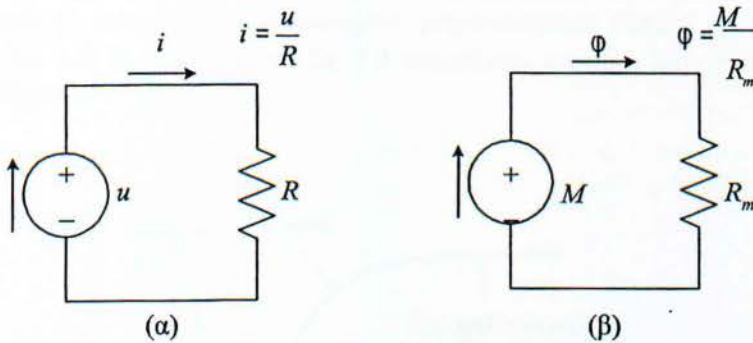
και μαγνητική ροή εκφράζεται από τη σχέση

$$\Phi = \frac{Ni}{R_m} \quad (1.12)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής αντίστασης είναι,  $\text{At/Vs} = \text{t}/\Omega\text{s} = \text{At/Wb}$ .

Από την Εξ. (1.12) προκύπτει ότι, η διάταξη του Σχ. 1.4 αντιστοιχεί σ' ένα ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο περιγράφεται από σχέσεις ανάλογες μ' εκείνες των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα του Σχ. 1.5α, η τάση της πηγής ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής  $u$ , προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος  $i$  μέσω της αντίστασης  $R$ . Η ροή του ρεύματος είναι το αποτέλεσμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και η μεταξύ τους σχέση ορίζεται από το νόμο του Ohm

$$i = \frac{u}{R} \quad (1.13)$$



Σχ. 1.5 Ηλεκτρικό κύκλωμα (α). Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με πυρήνα στο Σχ. 1.4 (β)

Στο Σχ. 1.5β εικονίζεται το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με σιδηροπυρήνα του Σχ. 1.4. Η μαγνητική ροή  $\Phi$  θεωρείται ως ένα μαγνητικό ρεύμα, το οποίο ρέει στον πυρήνα υπερνικώντας τη μαγνητική του αντίσταση  $R_m$ . Η μαγνητική ροή προκαλείται από τη μαγνητρεγερτική δύναμη, η οποία είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Επομένως, η Εξ. (1.12) αποτελεί το νόμο του Ohm στα μαγνητικά κυκλώματα. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ορίζεται η αγωγιμότητα ως το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίστοιχα, στα μαγνητικά κυκλώματα ορίζεται η *μαγνητική αγωγιμότητα (permeance)*, ως το αντίστροφο της μαγνητικής αντίστασης.

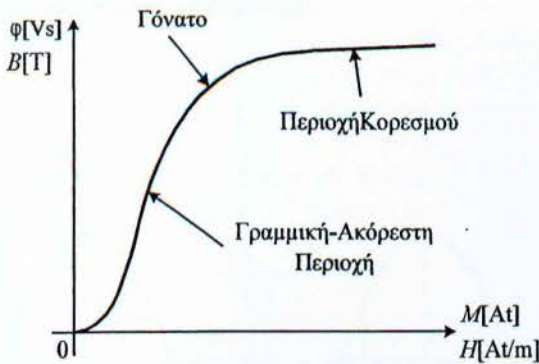
## 2.24 Καμπύλη μαγνήτισης

Τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μαγνητική τους συμπεριφορά: σε *διαμαγνητικά*, *παραμαγνητικά* και *σιδηρομαγνητικά*. Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μικρότερη της μονάδος. Η μαγνητική διαπερατότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδος.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα πολύ μεγαλύτερη της μονάδος. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών έχουν  $\mu_r$  στην περιοχή από 2000 έως 6000. Επομένως, για ορισμένη μαγνητεγερτική δύναμη, η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται σ' ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι πολλαπλάσια της ροής που παράγεται στον αέρα. Επειδή η τάση που παράγει μια γεννήτρια, ή αντίστοιχα η ροπή που αναπτύσσει ένας κινητήρας εξαρτώνται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής, οι ηλεκτρικές μηχανές κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά με υψηλό  $\mu_r$ .

Στο Σχ. 1.4 έχουμε θεωρήσει ότι η μαγνητική ροή είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα, επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα. Επομένως, η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι πολύ μικρότερη της αντίστασης του αέρα. Η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι περίπου ίση μ' εκείνη του κενού ( $\mu_r^{air} \approx 1$ ). Βέβαια, ένα πολύ μικρό τμήμα της ροής δεν ρέει στον πυρήνα, αλλά κυκλοφορεί μέσω του αέρα. Αυτή η ροή ονομάζεται *ροή σκέδασης (leakage flux)  $\Phi_l$* .

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή. Η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται έντονα από το μέγεθος της μαγνητικής ροής. Για να διευκρινίσουμε τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας θεωρούμε ότι, ο πυρήνας στο Σχ. 1.4 είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι μεταβάλουμε το συνεχές ρεύμα στο πηνίο από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αν σχεδιάσουμε σ' ένα διάγραμμα τη μεταβολή της παραγόμενης στον πυρήνα μαγνητικής ροής  $\Phi$ , ως προς την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη  $M = Ni$ , προκύπτει η καμπύλη του Σχ. 1.6. Η καμπύλη του Σχ. 1.6 ονομάζεται *καμπύλη μαγνήτισης (magnetization curve)* του σιδηρομαγνητικού υλικού.



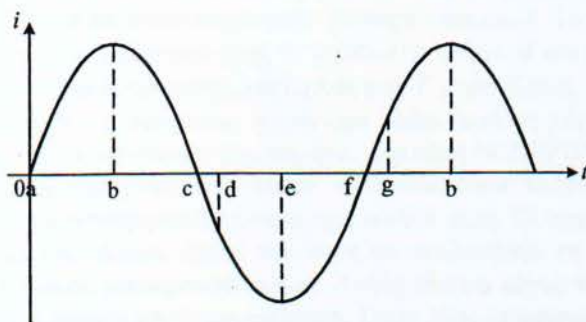
Σχ. 1.6 Τυπική καμπύλη μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών

Από την καμπύλη μαγνήτισης παρατηρούμε ότι, η μαγνητική ροή αυξάνει αρχικά αργά με το ρεύμα. Κατόπιν, έχουμε μια σχεδόν γραμμική μεταβολή της ροής. Στη συνέχεια η μεταβολή της μαγνητικής ροής ως προς τη μαγνητεγερτική δύναμη περιορίζεται σταδιακά και τελικά πέρα από κάποια τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης η ροή παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται *περιοχή κορεσμού*. Στην περιοχή κορεσμού η μαγνητική ροή έχει φθάσει τη μέγιστη τιμή της και μεταβάλλεται ελάχιστα με την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη. Η γραμμική περιοχή της καμπύλης ονομάζεται *ακόρεστη περιοχή*. Στην ακόρεστη περιοχή η ροή μεταβάλλεται γραμμικά με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Η περιοχή μετάβασης από τη γραμμική περιοχή στην περιοχή κορεσμού, ονομάζεται *γόνατο* της καμπύλης. Οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν κοντά στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης. Έτσι, η μαγνητική τους ροή δεν μεταβάλλεται γραμμικά με τη διέγερση.

Από την Εξ. (1.2) προκύπτει ότι, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Από την Εξ. (1.8), η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής. Επομένως, η καμπύλη του Σχ. 1.6 δίνει υπό άλλη κλίμακα, τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $B = f(H)$ . Όμως, από την Εξ. (1.3) τα μεγέθη  $B$  και  $H$  συνδέονται με τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Έτσι, η καμπύλη του Σχ. 1.6 απεικονίζει τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ανάλογα με την ένταση του πεδίου. Η κλίση της καμπύλης ορίζει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε κάθε τιμή της έντασης του πεδίου. Είναι φανερό ότι, η μαγνητική διαπερατότητα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές, όταν ο πυρήνας λειτουργεί με ισχυρό κορεσμό.

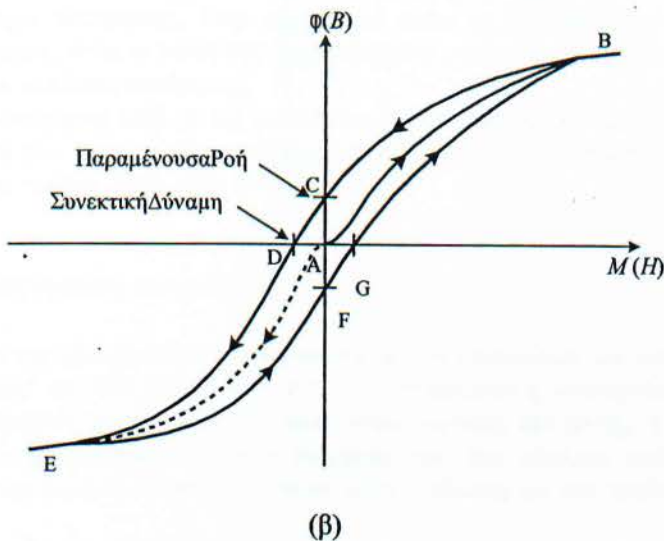
## 2.25 Βρόχος υστέρησης

Στο Σχ. 1.4 θεωρούμε ότι, ο πυρήνας είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι το πηνίο τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα (Σχ. 1.7α). Όταν το ρεύμα μεταβάλλεται στην περιοχή  $ab$ , λαμβάνουμε την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού  $AB$ . Καθώς το ρεύμα μειώνεται, στο τμήμα  $bc$ , η μαγνητική ροή δεν ακολουθεί την καμπύλη μαγνήτισης. Η μεταβολή της ροής  $BC$ , είναι διαφορετική από εκείνη κατά την αύξηση του ρεύματος  $ab$ . Στο τμήμα  $bc$  του ρεύματος, ο πυρήνας απομαγνητίζεται. Στο σημείο  $c$ , όπου το ρεύμα και η μαγνητεγερτική δύναμη μηδενίζονται, η μαγνητική ροή δεν είναι μηδέν αλλά έχει μια τιμή  $C$ . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *μαγνητική υστέρηση*. Η μαγνητική ροή στο σημείο  $C$  ονομάζεται *παραμένουσα ροή (residual flux)*. Το μέγεθος του παραμένουσας ροής εξαρτάται από το είδος του σιδηρομαγνητικού υλικού. Στα υλικά κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών ο παραμένον μαγνητισμός είναι 2–3% της ονομαστικής τιμής. Αντίθετα, στην κατασκευή των τεχνιτών μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σιδηρομαγνητικά υλικά, με υψηλό παραμένον μαγνητισμό.



(α)





Σχ. 1.7 Εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο του Σχ. 1.4 (α). Τυπικός βρόχος υστέρησης του πυρήνα (β)

Για να απομαγνητίσουμε τον πυρήνα, δηλαδή για το μηδενισμό της ροής, πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα του ρεύματος, άρα και της μαγνητεγερτικής δύναμης. Η μαγνητεγερτική δύναμη που απομαγνητίζει τον πυρήνα D και η οποία αντιστοιχεί στο ρεύμα d, ονομάζεται *συνεκτική (coercive) δύναμη*.

Ο πυρήνας μαγνητίζεται κατά την αντίθετη φορά καθώς το ρεύμα αυξάνεται σε αρνητικές τιμές, μέχρι την τιμή E, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή κορεσμού. Το σημείο E είναι συμμετρικό ως προς το B. Το ρεύμα μειώνεται προς το μηδέν στο τμήμα ef και μαζί του ελαττώνεται η μαγνητική ροή. Η παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή F μηδενίζεται, όταν το ρεύμα λάβει τη θετική τιμή g. Στο σημείο b του ρεύματος, η ροή έχει λάβει ξανά τη μέγιστη θετική τιμή της B. Έτσι ολοκληρώνεται ο *βρόχος υστέρησης* του πυρήνα, καμπύλη BCDEFGB.

Ο κορεσμός των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στον πλήρη προσανατολισμό των περιοχών *Weiss*, όταν η μαγνητεγερτική δύναμη έχει υψηλή τιμή. Οι αρχικά τυχαία προσανατολισμένες περιοχές *Weiss* του υλικού, έχουν την τάση να ακολουθούν τη διεύθυνση και τη φορά του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτός είναι ο λόγος που τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Όταν όλες οι περιοχές *Weiss* προσανατολιστούν στο επιβαλλόμενο πεδίο, κάθε παραπέρα αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί μια ασήμαντη αύξηση της ροής, όση θα είχαμε στον αέρα (κορεσμός).

Με την απομάκρυνση της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης, οι περιοχές *Weiss* δεν ξαναπαίρνουν τις αρχικές τυχαίες κατευθύνσεις τους. Έτσι, το υλικό παραμένει μαγνητισμένο, δηλαδή γίνεται μόνιμος μαγνήτης. Για την πλήρη απομαγνήτιση του υλικού πρέπει να εφαρμοστεί μια μαγνητεγερτική δύναμη με την αντίθετη φορά. Επομένως, πρέπει να προσφερθεί στο υλικό ενέργεια για την απομαγνήτισή του, όπως έγινε και κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η παραμένουσα ροή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απαιτείται για

την απομαγνήτιση του υλικού (συνεκτική δύναμη). Η ενέργεια της απομαγνήτισης, εκτός από τη μαγνητεγερτική δύναμη, μπορεί να έχει τη μορφή θερμότητας ή μηχανικού χτυπήματος.

Η απαίτηση παροχής ενέργειας στα σιδηρομαγνητικά υλικά για την απομαγνήτισή τους, προκαλεί τις απώλειες υστέρησης. Οι απώλειες υστέρησης ενός υλικού εξαρτώνται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Όσο μικρότερο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης, δηλαδή όσο μικρότερες είναι οι τιμές της παραμένουσας ροής και της συνεκτικής δύναμης, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες υστέρησης.

Οι απώλειες υστέρησης μαζί με τις απώλειες εξαιτίας των δινορευμάτων (παρ. 1.7), προκαλούν τη θέρμανση του πυρήνα. Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων ονομάζονται μαζί απώλειες σιδήρου ή πυρήνα (*iron, core losses*).

## 2.26 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ανακαλύφθηκε και διατυπώθηκε μαθηματικά από το *Faraday* το 1831. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η λειτουργία όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ή νόμο του *Faraday*, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από ένα πλαίσιο, επάγεται στα άκρα του πλαισίου μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.14)$$

Στην Εξ. (1.14),  $N$  είναι ο αριθμός των σπειρών του πλαισίου (πηνίου) και  $\Phi$  η μαγνητική ροή που διέρχεται απ' αυτές. Στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών και των μετασχηματιστών, η Εξ. (1.14) γράφεται στη μορφή

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (1.15)$$

όπου,  $\lambda$  είναι η *πεπλεγμένη ροή* (*linkage flux*). Η πεπλεγμένη ροή ορίζεται από τη σχέση

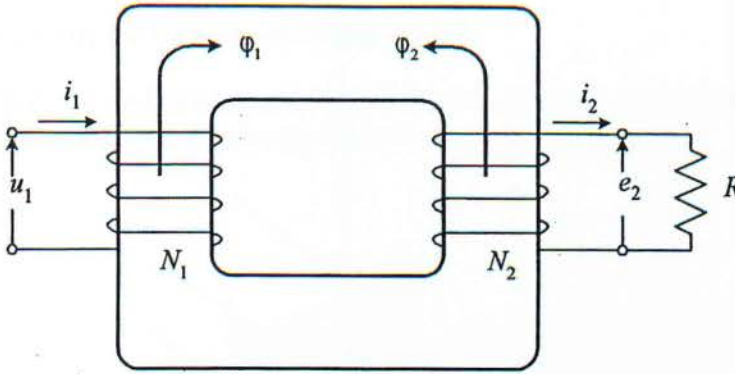
$$\lambda = N\Phi \quad (1.16)$$

όταν η ίδια ροή διέρχεται από όλες τις σπείρες του πλαισίου, ή από τη σχέση

$$\lambda = \sum_{j=1}^N \Phi_j \quad (1.17)$$

όταν η ροή σε κάθε σπείρα είναι διαφορετική  $\Phi_j$ .

Το αρνητικό πρόσημο στις Εξ. (1.14), (1.15) οφείλεται στο νόμο του *Lenz*. Σύμφωνα με το νόμο του *Lenz*, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης στο πλαίσιο είναι τέτοια ώστε, εάν τα άκρα του πλαισίου τροφοδοτούν ένα φορτίο το ρεύμα που θα κυκλοφορήσει να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο να αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε. Το ρεύμα στο πλαίσιο ονομάζεται *επαγωγικό ρεύμα*. Ο προσδιορισμός της φοράς του επαγωγικού ρεύματος γίνεται φανερός από τη διάταξη του Σχ. 1.8, η οποία είναι ένας μετασχηματιστής.



Σχ. 1.8 Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τους νόμους του Faraday και του Lenz

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή  $N_1$  διαρρέεται από το ρεύμα  $i_1$  και προκαλεί τη ροή  $\Phi_1$  στον πυρήνα. Η ροή  $\Phi_1$  διέρχεται από τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος  $N_2$ , με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της τάσης από επαγωγή  $e_2$ . Όταν το δευτερεύον τύλιγμα είναι κλειστό, μέσω της αντίστασης φορτίου  $R$ , το επαγωγικό ρεύμα  $i_2$  έχει τη σημειωμένη φορά. Το ρεύμα  $i_2$  προκαλεί τη μαγνητική ροή  $\Phi_2$ , με φορά αντίθετη της  $\Phi_1$ , η οποία το προκάλεσε.

Όταν η ροή στον πυρήνα του Σχ. 1.8 μεταβάλλεται χρονικά, όπως απαιτεί η λειτουργία του μετασχηματιστή, επάγονται τάσεις εκτός από το δευτερεύον τύλιγμα και μέσα στο υλικό του πυρήνα. Αυτές οι τάσεις προκαλούν την κυκλοφορία ρευμάτων μέσα στον πυρήνα. Τα ρεύματα αυτά, επειδή ακολουθούν διαδρομές που μοιάζουν με δίνες, ονομάζονται *δινορεύματα* (eddy current). Τα δινορεύματα προκαλούν απώλειες στον πυρήνα, με συνέπεια τη θέρμανσή του. Οι απώλειες λόγω των δινορευμάτων είναι ανάλογες με το μήκος της διαδρομής των ρευμάτων αυτών μέσα στον πυρήνα. Προκειμένου το μήκος της διαδρομής των δινορευμάτων να είναι μικρό, οι πυρήνες των μετασχηματιστών και των ηλεκτρικών μηχανών κατασκευάζονται από *ελάσματα* (laminations) μικρού πάχους, μονωμένα μεταξύ τους με ρητίνες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση στον πυρήνα για τον περιορισμό των δινορευμάτων, χωρίς να αυξάνεται η μαγνητική του αντίσταση.

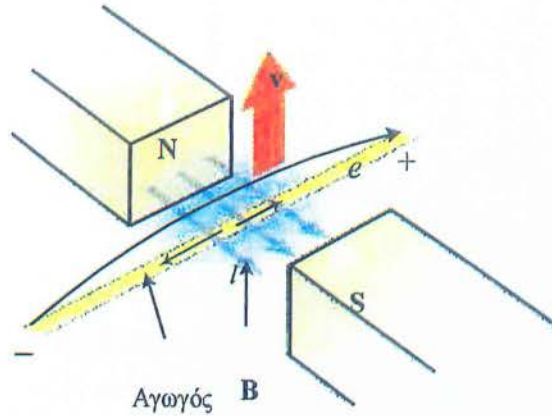
Αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι η ανάπτυξη τάσης από επαγωγή στα άκρα ενός αγωγού, ο οποίος κινείται μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο (Σχ. 1.9). Η επαγόμενη τάση υπολογίζεται από τη διανυσματική εξίσωση

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (1.18)$$

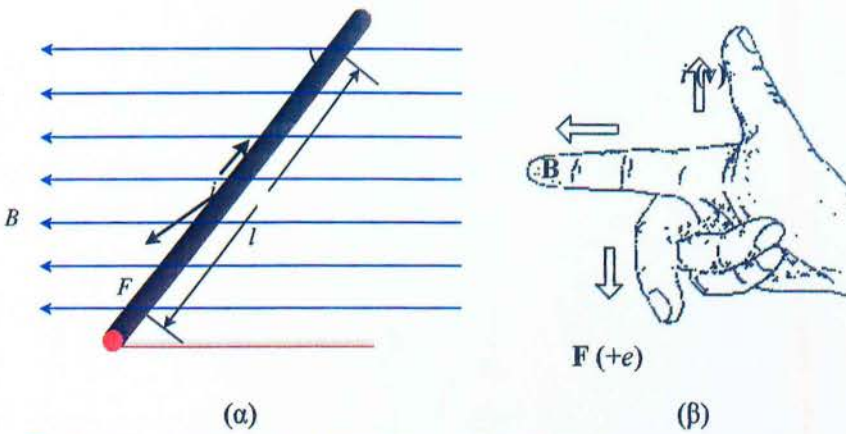
όπου,  $\mathbf{v}$  είναι το άνυσμα της ταχύτητας του αγωγού,  $\mathbf{B}$  η μαγνητική επαγωγή και  $\mathbf{l}$  το άνυσμα με μέτρο το μήκος του αγωγού. Η πολικότητα της επαγόμενης τάσης ορίζεται από τη φορά του διανύσματος  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Η φορά του διανύσματος  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  δείχνει στο άκρο του αγωγού με το θετικό δυναμικό. (Αν στο Σχ. 1.10β αντικαταστήσουμε το ρεύμα με την ταχύτητα, τότε ο μέσος μας δείχνει το θετικό άκρο της επαγόμενης τάσης).

## 2.27 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό

Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στον αγωγό ασκείται μια δύναμη  $F$ , η οποία ονομάζεται δύναμη Laplace (Σχ. 1.10α).



Σχ.1.9 Τάση από επαγωγή στα άκρα αγωγού κινούμενου μέσα σε μαγνητικό πεδίο



Σχ. 1.10 Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό από το μαγνητικό πεδίο (α). Κανόνας του δεξιού χεριού (β)

Η δύναμη Laplace εξαρτάται από το μήκος του αγωγού  $l$ , την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει  $i$  και τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου  $B$ , σύμφωνα με τη διανυσματική εξίσωση

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (1.19)$$

Η φορά της δύναμη Laplace ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Σύμφωνα μ' αυτόν, ο αντίχειρας του δεξιού χεριού δείχνει τη φορά του ρεύματος, ο δείκτης τη φορά του μαγνητικού πεδίου και ο μέσος τη φορά της δύναμης (Σχ. 1.10β). Το μέτρο της δύναμη Laplace είναι ίσο με

$$F = ilB \sin \theta \quad (1.20)$$

όπου  $\delta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του αγωγού και του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής. Η δύναμη *Laplace* είναι μέγιστη όταν ο αγωγός είναι κάθετος στο πεδίο,  $\delta = 90^\circ$ . Αντίστοιχα, η δύναμη *Laplace* και μηδενική όταν ο αγωγός είναι παράλληλος προς το μαγνητικό πεδίο,  $\delta = 0^\circ$ .

# Επίδραση των Φυσικών Παραγόντων στο Εργασιακό Περιβάλλον: Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

## 3.0 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής εξετάζεται η επίδραση των φυσικών παραγόντων και συγκεκριμένα η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο εργασιακό περιβάλλον. Για την ανάπτυξη του θέματος, στηρίζομαστε στο θεωρητικό υπόβαθρο της επιστημονικής βιβλιογραφίας σε συνδυασμό με την αποτύπωση της ισχύουσας νομοθεσίας και τα αποτελέσματα της ανάλυσης πραγματικών μετρήσεων (για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) που πραγματοποιήσαμε σε βιομηχανικό εργασιακό χώρο, ως παράδειγμα εφαρμογής.

## 3.1 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΝ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Οι επαγγελματικοί κίνδυνοι που πηγάζουν από κάθε επαγγελματική δραστηριότητα μπορούν να ταξινομηθούν (βλ. [1]) σε τρεις μεγάλες ομάδες:

ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ
ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΔΟΜΕΣ	ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΗΧΑΝΕΣ
ΗΛΕΚΤΡ. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΨΥΧΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ
ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ-ΕΚΡΗΞΕΙΣ	ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΕΡΓΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ		ΑΝΤΙΘΕΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

## 3.2 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Οι κίνδυνοι αυτοί περικλείουν την πιθανότητα να προκληθεί αλλοίωση στη βιολογική ισορροπία των εργαζομένων (ασθένεια), ως συνέπεια της συμμετοχής τους σε παραγωγικές διαδικασίες που επιτρέπουν την έκθεση σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς βλαπτικούς παράγοντες του εργασιακού περιβάλλοντος. Βασική έννοια στη Βιομηχανική Υγιεινή είναι αυτή της έκθεσης. Με τον όρο αυτό εννοούμε τις συνθήκες υπό τις οποίες βλαπτικοί παράγοντες έρχονται αρχικά σε επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό και στη συνέχεια εισέρχονται σ' αυτόν με τους εξής τρεις

μηχανισμούς:

- δια της εισπνοής
- μέσω του δέρματος ή των οφθαλμών
- δια της κατάποσης

Μέτρο της έκθεσης ενός ανθρώπου σε έναν βλαπτικό παράγοντα, (π.χ. μια τοξική ουσία) είναι η δόση η οποία είναι το ποσό της ουσίας που προσλαμβάνεται από το σώμα με την έκθεσή του στον βλαπτικό παράγοντα. Η δόση είναι ανάλογη τόσο της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης της ουσίας όσο και του χρόνου έκθεσης σε αυτήν. Στις περισσότερες περιπτώσεις προβλημάτων υγείας, υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της ποσότητας της προσλαμβανόμενης τοξικής ουσίας (της δόσης) και των βλαβών που προκαλούνται στην υγεία από την έκθεση. Όσο δηλαδή μεγαλύτερη είναι η τιμή συγκέντρωσης ενός βλαπτικού παράγοντα στον αέρα του εργασιακού χώρου και όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έκθεσης, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι βλάβες αλλά και τόσο περισσότεροι θα είναι οι εργαζόμενοι που θα εκδηλώσουν τα συμπτώματα μιας επαγγελματικής ασθένειας. Είναι κατά συνέπεια, απαραίτητο να ελεγχθούν οι υψηλές συγκεντρώσεις χημικών ουσιών. Στην προσπάθεια αυτή, εισάγονται διάφορες οριακές τιμές έκθεσης που θέτουν φραγμούς στις συγκεντρώσεις των χημικών βλαπτικών ουσιών στον αέρα των εργασιακών χώρων.

Η Αμερικανική Εταιρία Κυβερνητικών Υγιεινολόγων Βιομηχανίας (ACGIH), έχει καθορίσει τις εξής εκφράσεις οριακών τιμών:

- Οριακή Τιμή-Χρονιά Σταθμισμένη Μέση Τιμή (TLV-TWA)

Είναι η χρονικά σταθμισμένη μέση τιμή της συγκέντρωσης ουσίας για μια συνηθισμένη ημέρα εργασίας 8 ωρών και για εβδομάδα 40 ωρών, στην οποία όλοι οι εργαζόμενοι μπορούν να εκτεθούν κατ' επανάληψη, χωρίς αρνητικές συνέπειες στην υγεία τους.

- Οριακή Τιμή - Οριακή Τιμή Έκθεσης Μικράς Διάρκειας (TLV-STEL)

Είναι η συγκέντρωση στην οποία οι εργαζόμενοι μπορούν να εκτίθενται συνεχώς για μια σύντομη χρονική περίοδο χωρίς να υποφέρουν από καμία αρνητική συνέπεια.

- Οριακή Τιμή Οροφής (TLV-C) Είναι η συγκέντρωση, υπέρβαση της οποίας δεν πρέπει να γίνει

ουδεμία στιγμή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 3.2.1 Χημικοί Παράγοντες

Σήμερα, ο συνολικός αριθμός των χημικών ενώσεων (ουσιών), που είναι γνωστές στον άνθρωπο, έχει φθάσει τις 18.500.000 και υπολογίζεται ότι περίπου 4.000 νέες χημικές ενώσεις προστίθενται καθημερινά στον κατάλογο απογραφής. Πολλές από τις ιδιότητες αυτών των ουσιών, θεωρούνται υπεύθυνες για την επικινδυνότητά τους όσον αφορά τον ανθρώπινο οργανισμό. Συνεπώς, οι επικίνδυνες αυτές ενώσεις, κατατάσσονται ανάλογα με τις ιδιότητές τους σε τοξικές, εύφλεκτες, διαβρωτικές, καρκινογόνες κ.τ.λ. Η οδηγία 67/548/ΕΟΚ για την ταξινόμηση, τη συσκευασία και την επισήμανση των επικίνδυνων ουσιών, καθώς και η ανάλογη οδηγία 88/379/ΕΟΚ για τα παρασκευάσματα (μίγματα ουσιών) έχουν θέσει τις βάσεις για μian ενοποιημένη αντίληψη αντιμετώπισης των κινδύνων που προκύπτουν από τη χρήση χημικών. Οι ορισμοί που χρησιμοποιούνται είναι απλοί και γενικοί και σκοπό έχουν την ταχεία κατάταξη. Εκρηκτικές είναι, για παράδειγμα, «ουσίες και παρασκευάσματα που δύνανται να εκραγούν υπό την επίδραση φλογός ή που είναι πλέον ευαίσθητα σε κρούσεις ή τριβές από το δινιτροβενζόλιο». Τοξικές είναι οι «ουσίες και παρασκευάσματα που δια της εισπνοής, καταπόσεως ή δια της διεισδύσεως δια του δέρματος, δύνανται να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, οξείς ή χρόνιους, ακόμη και το θάνατο». Όταν μία ουσία παρουσιάζει ταυτόχρονα περισσότερες ιδιότητες, θα την συνοδεύει ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός (π.χ. εύφλεκτη και επιβλαβής) και το αντίστοιχο σήμα κατηγορίας (ένα τετράγωνο σε πορτοκαλί φόντο με ένα σχέδιο που απεικονίζει ή συμβολίζει τη δράση των χημικών της ομάδας. Το σήμα συνοδεύεται από ένα λατινικό γράμμα, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις ακολουθείται από ένα δείκτη ή το σύμβολο +(π.χ. οι εξαιρετικά εύφλεκτες ουσίες φέρουν το F+, οι επιβλαβείς το Xn, οι διαβρωτικές το C κ.τ.λ.). Τα σήματα αποτελούν το πρώτο επίπεδο πληροφοριών που είναι δυνατόν να αντλήσει ένας εργαζόμενος για τη δράση ενός χημικού.

### 3.2.2 Βιολογικοί Παράγοντες

Ο όρος «βιολογικοί παράγοντες» προσδιορίζει εκείνους τους κινδύνους για την υγεία που προέρχονται από την επαγγελματική έκθεση σε παθογόνους οργανισμούς ή μικροοργανισμούς (βακτηρίδια, μύκητες, ιοί, πρωτόζωα, μετάζωα κ.τ.λ.). Είναι δύσκολο να κατανοηθούν σήμερα τα κλινικά και επιδημιολογικά χαρακτηριστικά των ασθενειών που προκαλούνται από τους βιολογικούς (μολυσματικούς) παράγοντες, αν δεν εκτιμηθούν πρώτα οι καταστάσεις έκθεσης του περιβάλλοντος ζωής και δουλειάς των ανθρώπων. Η εργασιακή ρύπανση από τους βιολογικούς παράγοντες, παρουσιάζει σήμερα μια ιδιαίτερη έξαρση, αφ' ενός μεν λόγω της ανάπτυξης των βιοτεχνολογικών εφαρμογών, αφ' ετέρου δε λόγω της παρουσίας των βιολογικών ρύπων σε διάφορους εργασιακούς χώρους και εξαιτίας της ασύστολης χρήσης των κεντρικών κλιματιστικών συστημάτων. Είναι γνωστό ότι οι εργαζόμενοι σε κτίρια, όπου υπάρχει κεντρικό σύστημα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας, παρουσιάζουν μια σειρά από συμπτώματα τα οποία εν μέρει αποδίδονται στην εισπνοή αέρα που εμπεριέχει μολυσματικούς ή/και αλλεργιογόνους βιολογικούς παράγοντες (σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου). Η έκθεση σε «βιολογικούς παράγοντες» στους εργασιακούς χώρους, προκαλεί κυρίως ερεθιστικές και αλλεργικές παθολογικές εκδηλώσεις του δέρματος και



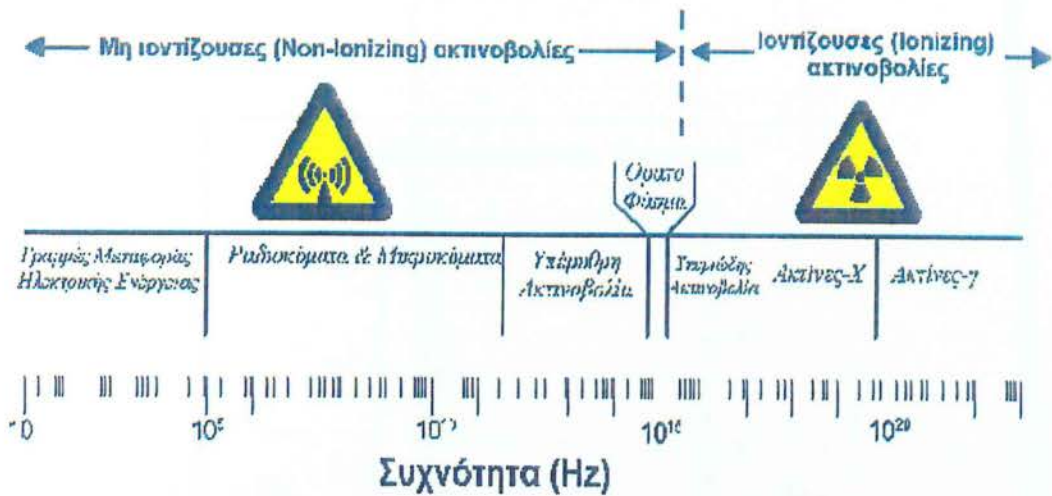
του αναπνευστικού συστήματος εκτός από τα κλασικά επαγγελματικά λοιμώδη νοσήματα όπως η φυματίωση, η ιογενής ηπατίτιδα, η σαλμονέλλωση, η αγκυλοστομίαση, το τοξόπλασμα, το AIDS καθώς και οι ζωνοοσίες (άνθρακας, μάλις, λεπτοσπείρωση, βρουκέλλωση, πυρετός Q κ.τ.λ.).

## 3.2.3 Φυσικοί Παράγοντες

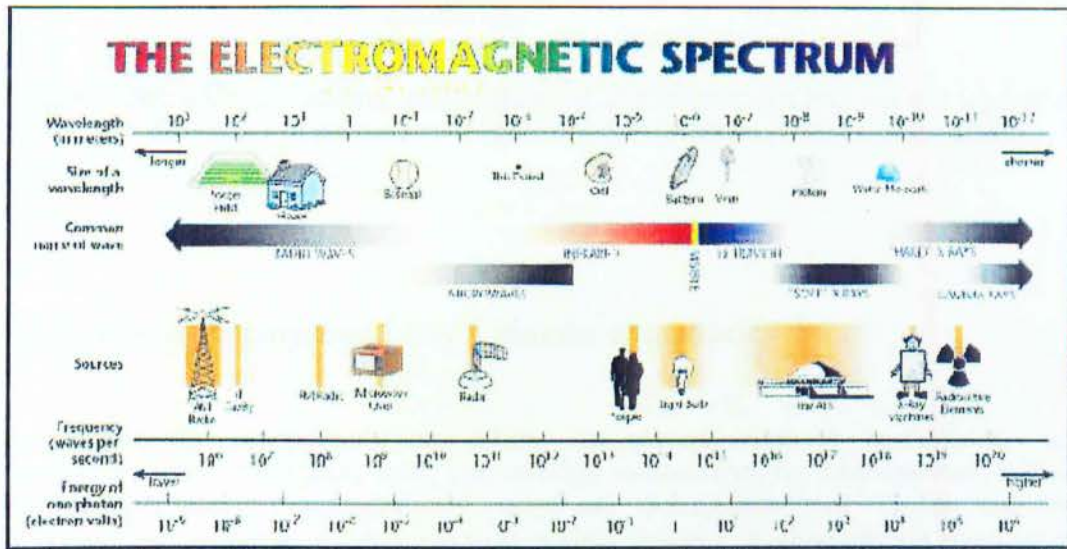
### 3.2.3.1 Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

Ο Ηλεκτρομαγνητισμός είναι σήμερα ίσως ο πιο κλασσικός κλάδος της Φυσικής. Οι αρχές του βρίσκονται γύρω στα 600 π.Χ. στην αρχαία Ελλάδα, τότε που ο Θαλής ο Μιλήσιος έκανε λόγο για το ήλεκτρον και τον ηλεκτρισμό. Από τότε και επί 22 περίπου αιώνες οι γνώσεις για τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό έμειναν σχεδόν στάσιμες. Ταυτόχρονα όμως με την βιομηχανική επανάσταση αρχίζει και η ραγδαία πρόοδος σ' αυτούς τους τομείς της επιστήμης. Μεταξύ 1750 και 1900, ο Ηλεκτρομαγνητισμός συμπληρώνει και πλησιάζει την κλασσική μορφή [2a]. Μία πρώτη βασική έννοια που έγινε αποδεκτή στην Φυσική θεωρία για την οργάνωση των φυσικών φαινομένων ήταν ότι τα υλικά σωματίδια παράλληλα με την ιδιότητα της μάζας έχουν και ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο θεωρήθηκε ως θεμελιώδη ιδιότητα που δεν ανάγεται σε άλλες φυσικές ιδιότητες. Οι αρχές του Ηλεκτρισμού περιγράφουν ποσοτικά τις ηλεκτρικές δυνάμεις, που οι πηγές τους οφείλονται στα ηλεκτρικά φορτία (πρβλ. το πείραμα έλξης φορτίων του Coulomb το 1785). Κατ' αναλογία ο Μαγνητισμός περιγράφει τις μαγνητικές δυνάμεις, οι οποίες, θεωρήθηκε αρχικά ότι, έχουν πηγές υποτιθέμενα μαγνητικά φορτία. Σύντομα όμως αναγνωρίστηκε ότι δεν υπάρχουν μεμονωμένα μαγνητικά φορτία, ενώ παράλληλα η πρώτη σχέση μεταξύ Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού εμφανίζεται με την παρατήρηση από τον Oersted (1819) των δυνάμεων που ασκούν ρευματοφόροι αγωγοί σε μαγνητικά σώματα. Στη συνέχεια ο Ampere ερμήνευσε τις μαγνητικές δυνάμεις ως αποτέλεσμα της κινήσεως ηλεκτρικών φορτίων κι έτσι φθάνουμε στην ενοποίηση ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων. Σύμφωνα δε, και με τον Einstein (1905) ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός αποτελούν δύο διαφορετικούς τρόπους θεώρησης των δυνάμεων μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων. Με το νόμο της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής του Faraday (1831) και το ρεύμα μετατόπισης του Maxwell (1865) συμπληρώθηκε η περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών δράσεων μεταξύ φορτίων. Ο Maxwell καθιέρωσε με κομψό τρόπο την αλληλεξάρτηση του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού. Στην κλασσική του 1873 μελέτη του, δημοσίευσε την πρώτη ενοποιημένη θεωρία του ηλεκτρισμού και μαγνητισμού θεμελιώνοντας την επιστήμη του Ηλεκτρομαγνητισμού [2b]. Διατύπωσε δε, την αρχή ότι η φύση του φωτός είναι ηλεκτρομαγνητική και ότι είναι δυνατόν να υπάρξει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και σε άλλα μήκη κύματος. Αργότερα (το 1888), είχαμε

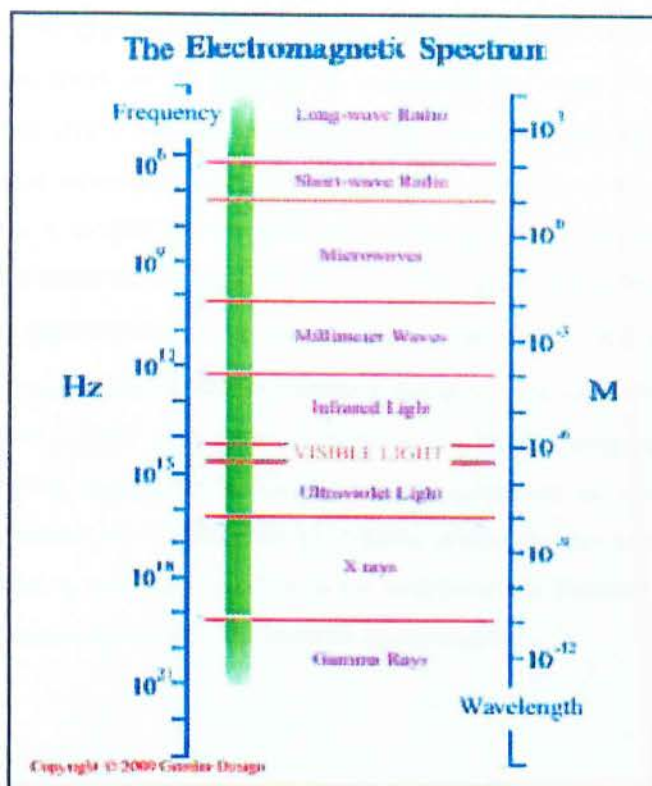
από τον H.Hertz την πειραματική επιβεβαίωση της θεωρίας για τον Ηλεκτρομαγνητισμό, καθώς κατόρθωσε να παράγει και να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Σήμερα θεωρούμε ότι ο φορέας των ηλεκτρομαγνητικών δράσεων είναι το **ηλεκτρομαγνητικό “πεδίο”** που έχει συνυφασμένη μ’ αυτό **ηλεκτρομαγνητική ενέργεια** και αποτελεί μία νέα φυσική οντότητα, η οποία υπάρχει παράλληλα με τα φορτία με τα οποία αλληλεπιδρά και μεταφέρεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Με άλλα λόγια, **ηλεκτρομαγνητικό κύμα** είναι η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (σημειωτέον με την ταχύτητα του φωτός) και **ηλεκτρομαγνητική (H-M) ακτινοβολία** ονομάζεται το σύνολο των ακτινοβολιών που μεταφέρουν ενέργεια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στα σχήματα 1, 2 και 3, απεικονίζονται με διάφορους τρόπους τα διάφορα τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz) και του μήκους κύματος (σε m). Αξίζει να σημειώσουμε (βλ. σχήμα 1), ότι μία πρώτη και βασική διαίρεση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος συνίσταται στην ικανότητα (ή μη) της ακτινοβολίας να προκαλέσει ιονισμό ενός ατόμου, δηλ. απομάκρυνση ηλεκτρονίων, οπότε οι ακτινοβολίες που προκαλούν ιονισμό καλούνται **ιονίζουσες** ή **ιοντίζουσες** (ionizing radiation), και όσες δεν προκαλούν ιονισμό **μη-ιονίζουσες** ή **μη-ιοντίζουσες** (non- ionizing radiation) (βλ. [3], [4]). Σύμφωνα με τον **νόμο του Planck** (βλ. [3], [4]), η **ενέργεια (E)** της ηλεκτρομαγνητικής -ακτινοβολίας είναι ανάλογη της **συχνότητας (f)** και δίνεται από τη σχέση  $E=hf$  (όπου  $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$ ), η σταθερά του Planck). Ακόμα η απαιτούμενη ενέργεια φωτονίου για να προκαλέσει ιονισμό (βλ. [3]) είναι:  $E_{ion} > 12 \text{ eV}$ . Οπότε από τη σχέση του Planck βρίσκουμε ότι η αντίστοιχη συχνότητα είναι  $f > E_{ion}/h = 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$ , δηλ. ιονισμός προκαλείται από ακτινοβολίες του υπεριώδους (ultraviolet) και πέραν αυτού, ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πράγματι, για μικρότερες συχνότητες π.χ.  $f=10 \text{ GHz} \Rightarrow E=41.36 \times 10^{-6} \text{ eV} < 12 \text{ eV}$ . Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην πράξη (σύμφωνα και με την ισχύουσα ελληνική νομοθεσία (βλ. [5a], [5b]), για την εφαρμογή περιορισμών οι οποίοι βασίζονται στην εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων στην υγεία από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, είναι: α) η **ένταση (E)** του **ηλεκτρικού πεδίου** (σε V/m), β) η **ένταση (H)** του **μαγνητικού πεδίου** (σε A/m), γ) η **μαγνητική επαγωγή (B)** (σε Tesla), δ) η **πυκνότητα ισχύος (S)**, η οποία καθορίζει την ισχύ ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην μοναδιαία επιφάνεια και μετριέται σε  $\text{Watt/m}^2$ , ε) η **ειδική απορρόφηση (Specific Absorption) ενέργειας (SA)**, σε  $\text{Joule/kg}$ , που ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα βάρους βιολογικού ιστού και στ) ο **ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR** (Specific Absorption Rate), σε  $\text{Watt/kg}$ , που ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία η ενέργεια απορροφάται ανά μονάδα βάρους από ιστούς του σώματος, και υπολογίζεται ως μέσος όρος για όλο το σώμα ή για μέρη αυτού. Από τα μεγέθη αυτά, η μαγνητική επαγωγή, οι εντάσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και η πυκνότητα ισχύος μπορούν να μετρηθούν άμεσα με κατάλληλα όργανα μέτρησης (βλ. [6]).



**Σχήμα 1.** Απεικονίζονται συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz) τα διάφορα τμήματα του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον παρουσιάζεται η διαίρεση του εν λόγω φάσματος με βάση την ικανότητα πρόκλησης ιοντισμού στα άτομα, σε μη-ιοντίζουσες (non-ionizing) και σε ιοντίζουσες (ionizing) ακτινοβολίες.



**Σχήμα 2.** Απεικονίζονται συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz), του μήκους κύματος (σε m) και της ενέργειας φωτονίου (σε eV) βάσει της εξίσωσης  $E=h \cdot f$  του Planck, τα διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (electromagnetic spectrum). Επιπλέον παρουσιάζονται σχηματικά: α) αντιπροσωπευτικές πηγές εκπομπής της ακτινοβολίας σε αντιπαραβολή της συχνότητας και β) διάφορα αντικείμενα, ώστε να υπάρχει άμεση σύγκριση του μεγέθους τους με το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.** Μία άλλη απεικόνιση, συναρτήσεως της συχνότητας (σε Hz) και του μήκους κύματος (σε m), των διαφόρων τμημάτων του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

### 3.3 Βασικοί Περιορισμοί και Επίπεδα αναφοράς

Για την εφαρμογή περιορισμών στην έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο στηρίζεται, μετά από ενδελεχή ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας, στην εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων στην υγεία από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ενώ συγχρόνως λαμβάνεται ως υπόβαθρο η διαφοροποίηση μεταξύ *βασικών περιορισμών* και *επίπεδων αναφοράς*. Οι περιορισμοί έκθεσης σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που βασίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία και σε βιολογικές μελέτες, ορίζονται ως *βασικοί περιορισμοί*. Από την άλλη πλευρά τα επίπεδα τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης, προκειμένου να διαπιστωθεί ενδεχόμενο υπέρβασης των βασικών περιορισμών, καλούνται *επίπεδα αναφοράς*. Τα επίπεδα αυτά

είναι τα ανώτερα επιτρεπτά όρια έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ορισμένα επίπεδα αναφοράς προέρχονται από σχετικούς βασικούς περιορισμούς με τη χρήση μετρήσεων ή/και διαδικασιών υπολογισμού, ενώ άλλα περιλαμβάνουν την αντίληψη και τις δυσμενείς έμμεσες επιπτώσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ανάλογα με την συχνότητα του πεδίου, τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται (βλ. [5a]) για να προσδιορίσουν τους βασικούς περιορισμούς είναι η μαγνητική επαγωγή (B), η πυκνότητα ρεύματος (J), ο ρυθμός SAR, και η πυκνότητα ισχύος (S). Σχετικά με τα επίπεδα αναφοράς, τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται (βλ. [5a]) για τον προσδιορισμό τους, είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E), η ένταση μαγνητικού πεδίου (H), η μαγνητική επαγωγή (B); η πυκνότητα ισχύος (S) και το ρεύμα άκρων ( $I_L$ ). Τα μεγέθη που ορίζουν την αντίληψη και άλλες έμμεσες επιδράσεις είναι το ρεύμα επαφής ( $I_C$ ) και για παλμικά πεδία, η ειδική απορρόφηση ενέργειας (SA). Σε κάθε κατάσταση έκθεσης, οι μετρούμενες ή υπολογιζόμενες τιμές πολλών από αυτά τα μεγέθη μπορούν να συγκριθούν με το αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς. Η συμμόρφωση με το επίπεδο αναφοράς εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τον αντίστοιχο βασικό περιορισμό. Εάν η μετρούμενη τιμή υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς, δεν έπεται κατ' ανάγκη ότι στο σημείο που μετρήθηκε η τιμή θα σημειώνεται και υπέρβαση του βασικού περιορισμού. Σε μία τέτοια περίπτωση, γίνεται άμεσος έλεγχος του βασικού περιορισμού.

**Πίνακας 1.** Βασικοί περιορισμοί για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz-300 GHz) που αφορούν το γενικό πληθυσμό, σύμφωνα με το πρότυπο L199-1999/519/EC της Ε.Ε. και την ΚΥΑ 53571/3839 (ΦΕΚ 1105/6.9.2000), καθώς και την ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/ΦΕΚ512/25.4.2002 (για συχνότητες 0 Hz - 100 kHz).

Ζώνη συχνότητων	Μαγνητική επαγωγή (mT)	Πυκνότητα ρεύματος ( $\text{mA/m}^2$ ) (rms)	Μέσος ρυθμός ειδικής απορρόφησης για όλο το σώμα SAR (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR (κεφάλι κορμός) (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR (άκρα) (W/kg)	Πυκνότητα Ισχύος, S ( $\text{W/m}^2$ )
0 Hz	40					
> 0 – 1 Hz		8				
1 - 4 Hz		8/f				
4 – 1 kHz		2				
1-100 kHz		f/500				
100kHz -10 MHz		f/500	0.08	2	4	
10MHz - 10 GHz			0.08	2	4	
10 – 300 GHz						10

**Πίνακας 2.** Επίπεδα Αναφοράς για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz- 300 GHz) που αφορούν το γενικό πληθυσμό, σύμφωνα με το πρότυπο L199-1999/519/EC της Ε.Ε. και την ΚΥΑ 53571/3839 (ΦΕΚ 1105/6.9.2000), καθώς και την ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/ ΦΕΚ512/25.4.2002 (για συχνότητες 0 Hz - 150 kHz) .

Ζώνη συχνοτήτων	Ένταση ηλεκ/κού πεδίου E (V/m)	Ένταση μαγν. πεδίου H (A/m)	Μαγνητική επαγωγή B ( μT)	Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επιπέδου κύματος $S_{eq}(W/m^2)$
0 - 1 Hz		$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1 - 8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8 - 25 Hz	10,000	4,000/f	5,000/f	
0.025 – 0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0.8 - 3 kHz	250/f	5	6.25	
3 - 150 kHz	87	5	6.25	
0.15 - 1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	
1 - 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0.73/f	0.92/f	
10 - 400 MHz	28	0.073	0.092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	f/200
2 - 300 GHz	61	0.16	0.20	10

**Πίνακας 3.** Επίπεδα αναφοράς για ρεύματα επαφής από αγωγίμα σώματα σύμφωνα με την ΚΥΑ 53571/3839/ΦΕΚ 1105/6.9.2000, για συχνότητες 0 Hz- 110 MHz και την ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/ ΦΕΚ 512/25.4.2002 (για συχνότητες 0 Hz – 100 kHz) .

Ζώνη Συχνοτ. (kHz)	Μέγ. ρεύμα επαφής (mA)
0 Hz – 2.5 kHz	0.5
2.5 - 100 kHz	0.2 f
0.1 – 110 MHz	20

### 3.4 Πρότυπα και όρια έκθεσης

Τα όρια έκθεσης τα οποία καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα, διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες (βλ. [5a]), που εξαρτώνται από τον εκτιθέμενο πληθυσμό. Έτσι η πρώτη κατηγορία σχετίζεται με τον γενικό πληθυσμό ή γενικά το “κοινό”, και συμπεριλαμβάνει όλους τους ανθρώπους ανεξάρτητα από το αν είναι ή δεν είναι εκπαιδευμένοι στο πως πρέπει να προσεγγίζουν μία πηγή ακτινοβολίας. Η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με τους επαγγελματικά εκτιθέμενους οι οποίοι είναι εκπαιδευμένοι στον τρόπο προσέγγισης μίας πηγής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

### Πρότυπα σχετικά με την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), τα όρια στην έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

καθορίζονται από το πρότυπο **L199-1999/519/EC**, το οποίο αποτελεί την **Σύσταση του Συμβουλίου** της «*Σχετικά με τον Περιορισμό της Έκθεσης του Κοινού σε Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία με συχνότητα 0Hz – 300 GHz*» (βλ. [8a]). Το πρότυπο αυτό βασίστηκε στα όρια που εξέδωσε το 1998, η *Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη-Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες ICNIRP* (International Commission of Non-Ionizing Radiation), και αφορά τόσο στον γενικό πληθυσμό όσο και στους επαγγελματικά εκτιθέμενους. Αργότερα, ειδικά για την επαγγελματική απασχόληση θεσπίστηκαν νέα όρια βάσει της οδηγίας **L159-2004/EC** “*Περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία με συχνότητα 0Hz – 300 GHz)*” (βλ. [8b]).

Στη χώρα μας, σύμφωνα με την **ΚΥΑ 53571/3839 (ΦΕΚ 1105/6.9.2000)** (βλ. [5a]), υιοθετήθηκαν για την έκθεση του γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τα αντίστοιχα όρια του προτύπου L199-1999/519/EC, μειωμένα όμως (βάσει του άρθρου 6, εδάφιο 5) στο 80 % των τιμών του εν λόγω προτύπου, κάτι που τα καθιστά αυστηρότερα. Επιπλέον, ειδικά για την έκθεση του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων (0Hz-150 kHz) θεσπίστηκε η **ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238 (ΦΕΚ 512/25.4.2002)** (βλ. [5b]).

Να σημειωθεί ότι τα όρια, αφορούν μόνο την έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία(βλ. [7]) και όχι την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, οπότε η συμμόρφωση ως προς την συμβατότητα θα πρέπει να εξετάζεται με άλλα πρότυπα (EMC Compliance).

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι **βασικοί περιορισμοί** που αφορούν το **γενικό πληθυσμό**, σύμφωνα με το πρότυπο L199-1999/519/EC της Ε.Ε., την ΚΥΑ 53571/3839 (ΦΕΚ 1105/6.9.2000), καθώς και την ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238 /ΦΕΚ512/25.4.2002 (για συχνότητες 0 Hz - 100 kHz). Να σημειωθεί ότι στην κατάστρωση των τιμών του Πίνακα 1, λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες που υπάρχουν όσο αφορά στην ατομική ευαισθησία, στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στην ηλικία και στην κατάσταση υγείας του κοινού.

Τα επίπεδα αναφοράς για τον περιορισμό της έκθεσης προέρχονται από τους βασικούς περιορισμούς, υπό συνθήκες μέγιστης σύζευξης του πεδίου με το εκτιθέμενο σ' αυτό άτομο, παρέχοντας έτσι το μέγιστο βαθμό προστασίας. Στους Πίνακες 2 και 3, παρουσιάζονται τα **επίπεδα αναφοράς** που αφορούν το **γενικό πληθυσμό**, σύμφωνα με το πρότυπο L199-1999/519/EC της Ε.Ε., την ΚΥΑ 53571/3839 (ΦΕΚ 1105/6.9.2000), καθώς και την ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238 /ΦΕΚ512/25.4.2002. Τα επίπεδα αναφοράς αποτελούν γενικά μέσες τιμές για όλο το σώμα του εκτιθέμενου ατόμου, με τη σημαντική όμως προϋπόθεση ότι δεν θα γίνεται υπέρβαση των βασικών περιορισμών τοπικής έκθεσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν η έκθεση επικεντρώνεται σε ένα σημείο, όπως π.χ. με τα κινητά τηλέφωνα και το ανθρώπινο κεφάλι, η χρήση των επιπέδων αναφοράς δεν ενδείκνυται. Στις περιπτώσεις αυτές θα αξιολογείται άμεσα η συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς τοπικής έκθεσης.

Για συχνότητες μέχρι 110 MHz και προκειμένου να αποφευχθούν οι κίνδυνοι που οφείλονται σε ρεύματα επαφής, συνιστώνται πρόσθετα επίπεδα αναφοράς, που για το *ρεύμα επαφής* παρουσιάζονται στον Πίνακα 3

## Πρότυπα σχετικά με την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην Αμερική

Στην Αμερική (Η.Π.Α.), οι «πομποί» ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπόκεινται στις απαιτήσεις πιστοποίησης του κυβερνητικού οργανισμού FCC (Federal Communications Commission). Οι απαιτήσεις κατά FCC εδράζονται στις υποδεικνυόμενες οδηγίες έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οι οποίες καθορίζονται από το *Εθνικό Συμβούλιο για την Προστασία από Ακτινοβολίες και για τις Μετρήσεις NCRP* (National Council on Radiation Protection and Measurements). Στην περιοχή συχνοτήτων 100-1500 MHz, τα όρια έκθεσης για την ένταση του πεδίου και την πυκνότητα ισχύος καθορίζονται από τις συστάσεις του *Αμερικανικού Ινστιτούτου Προτυποποίησης ANSI* (American National Standards Institute), σύμφωνα με το πρότυπο *ANSI/IEEE C95.1-1991*, “Πρότυπο του IEEE για τα Επίπεδα Ασφάλειας της Ανθρώπινης Έκθεσης σε RF Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, 3 kHz – 300 GHz” [9].

Να σημειωθεί ότι σε σχέση με το Ευρωπαϊκό πρότυπο, όπου στην εφαρμογή περιορισμών χρησιμοποιείται ο *ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR*, ένα φυσικό μέγεθος με ιδιαίτερη βαρύτητα, στο Αμερικανικό πρότυπο ιδιαίτερη σπουδαιότητα αποκτά η *μέγιστη επιτρεπτή έκθεση MPE* (Maximum Permissible Exposure).

Στον Πίνακα 4, συγκρίνονται τα *επίπεδα αναφοράς* με τα *όρια έκθεσης* σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που ισχύουν αντίστοιχα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Αμερική (Η.Π.Α.), και αφορούν στον γενικό πληθυσμό (βλ. [10]). Τα Ευρωπαϊκά *επίπεδα αναφοράς* αφορούν τις τιμές των πεδίων οι οποίες προκύπτουν από τον μέσο όρο των μετρούμενων rms τιμών ανά χρονικές περιόδους **6 min**, ενώ τα Αμερικανικά *όρια έκθεσης* τον μέσο όρο ανά χρονικές περιόδους **30 min**.

**Πίνακας 4.** Σύγκριση των επιπέδων αναφοράς και των ορίων έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αντίστοιχα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Αμερική (Η.Π.Α.), που αφορούν στον γενικό πληθυσμό.



Ζώνη συχνοτήτων	Ευρωπαϊκά – Επίπεδα Αναφοράς			Μέγιστα Επιτρεπτά Επίπεδα Έκθεσης κατά FCC (ΗΠΑ) για τον Γενικό Πληθυσμό		
	Ένταση ηλεκ/κού πεδίου E (V/m)	Ένταση μαγν. πεδίου H (A/m)	Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επιπέδου κύματος $S_{eq}(W/m^2)$	Ένταση ηλεκ/κού πεδίου E (V/m)	Ένταση μαγν. πεδίου H (A/m)	Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επιπέδου κύματος ( $mW/cm^2$ )
0 - 1 Hz		$3.2 \times 10^4$		614	1.63	100
1 - 8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$		614	1.63	100
8 - 25 Hz	10,000	$4,000/f$		614	1.63	100
0.025-0.8 kHz	$250/f$	$4/f$		614	1.63	100
0.8 - 3 kHz	$250/f$	5		614	1.63	100
3 - 150 kHz	87	5		614	1.63	100
0.15 - 1 MHz	87	$0.73/f$		614	1.63	100
1 - 1.34 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$		614	1.63	100
1.34 - 10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$		$842/f$	$2.19/f$	$180f^2$
10 - 30 MHz	28	0.073	2	$842/f$	$2.19/f$	$180f^2$
30 - 300 MHz	28	0.073	2	27.5	0.073	0.2
300 - 400 MHz	28	0.073	2			$f/1500$
400-1500MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$f/200$			$f/1500$
1,5-2 GHz	$1,375 f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$f/200$			1
2 - 100 GHz	61	0.16	10			1
100- 300 GHz	61	0.16	10			

Σημ. : Οι μονάδες της συχνότητας  $f$  όπως ακριβώς δηλώνονται στην στήλη «Ζώνη συχνοτήτων»

### 3.5 Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας (50 Hz) σε βιομηχανικές και οικιακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και μηχανές

Η τάση προκαλεί το ηλεκτρικό πεδίο, χαρακτηριστικό μέγεθος του οποίου είναι η έντασή του E (με μονάδα μέτρησης το Volt/m), ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί το μαγνητικό πεδίο, χαρακτηριστικό μέγεθος του οποίου είναι η μαγνητική επαγωγή B (με μονάδα μέτρησης το  $\mu$ Tesla ή mGauss και  $1\mu T=10mG$ ). Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, των οικιακών και βιοτεχνικών-βιομηχανικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, συσκευών, μηχανών και υποσταθμών, αποτελούν περιβαλλοντικούς παράγοντες, για τους οποίους πρέπει βάσει κανονισμών να μην ξεπερνιούνται οι επιτρεπόμενες οριακές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής, ώστε να παρέχεται η προστασία στο κοινό. Στις εξισώσεις Maxwell που περιγράφουν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανεξαρτήτως συχνότητας, η μαγνητική επαγωγή B και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E εμφανίζονται ως αλληλένδετα μεγέθη. Στις χαμηλές όμως συχνότητες, όπως των 50 Hz όπου το μήκος κύματος είναι 6000 km, δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά δύο ανεξάρτητα πεδία, το μαγνητικό και το ηλεκτρικό, δηλ δεν υπάρχει ζεύξη των πεδιακών μεγεθών B και E. Τα ηλεκτρικά πεδία παραμορφώνονται από την αγωγή των διατάξεων. Με αγωγή επένδυση ενός χώρου μπορεί να επιτευχθεί η θωράκισή του έναντι εξωτερικών ηλεκτρικών πεδίων (κλωβός Faraday). Η αγωγιμότητα των συνηθισμένων δομικών υλικών είναι επαρκής ώστε να επέρχεται μέσα στα κτίρια δραστικός περιορισμός των

ηλεκτρικών πεδίων (με συντελεστή υποβάθμισης >10), που προέρχονται από εξωτερικές πηγές. Τα ηλεκτρικά πεδία παραμορφώνονται από την εισαγωγή του ανθρώπου σ' αυτά. Η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζεται στην κεφαλή του ανθρώπου σε όρθια στάση και είναι περίπου 14 φορές μεγαλύτερη από την ένταση του ομογενούς αδιατάρακτου πεδίου. Τα χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία διαπερνούν πρακτικά χωρίς παραμόρφωση τα μη μαγνητικά υλικά. Η αποτελεσματική θωράκιση κτιρίων είναι πρακτικά αδύνατη. Η θωράκιση ακόμη και σχετικά μικρών χώρων είναι δυσχερής και μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ειδικών μαγνητικών υλικών σε κατάλληλη διάταξη. Τα μαγνητικά πεδία διαπερνούν το ανθρώπινο σώμα χωρίς παραμόρφωση [βλ. 11α].

Στον Πίνακα 5 φαίνεται η μαγνητική επαγωγή στο περιβάλλον ηλεκτρικών συσκευών και εργαλείων συναρτήσει της απόστασης από την πηγή, ενώ στον Πίνακα 6 η μαγνητική επαγωγή κοντά σε συσκευές επαγγελματικής χρήσης. Οι εν λόγω τιμές προέρχονται από την Οδηγία Νο 27/1989, Magnetic Fields-Health and Safety Guide (=Μαγνητικά Πεδία – Οδηγία Υγείας και Ασφάλειας) του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO).

Στον Πίνακα 7, παρουσιάζονται τα επίπεδα αναφοράς και τα όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας 50 Hz που συναντάται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακή, βιοτεχνική και βιομηχανική χρήση, τα οποία ισχύουν στην Ελλάδα (ΚΥΑ 53571/3839/2000 και ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/2002)), Ευρώπη και Αμερική (Η.Π.Α.), και αφορούν στον γενικό πληθυσμό.

**Πίνακας 5.** Μαγνητική επαγωγή στον περιβάλλοντα χώρο οικιακών συσκευών και εργαλείων συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

Πηγή	Μαγνητική επαγωγή σε $\mu\text{T}$ συναρτήσει της απόστασης από την πηγή		
	3 cm	30 cm	1m
Ηλεκτρικές εστίες μαγειρέματος	6-200	0.35-4	0.01-0.1
Ηλεκτρικοί φούρνοι	1-50	0.15-0.5	0.01-0.04
Φούρνοι μικροκυμάτων	75-200	4-8	0.25-0.6
Ψυγεία	0.5-1.7	0.01-0.25	<0.01
Πλυντήρια πιάτων	3.5-20	0.6-3	0.07-0.3
Πλυντήρια ρούχων	0.8-50	0.15-3	0.01-0.15
Στεγνωτήρια ρούχων	0.3-8	0.08-0.3	0.02-0.06
Ανεμιστήρες	2-30	0.03-4	0.01-0.35
Ηλεκτρικά σίδερα	8-30	0.12-0.3	0.01-0.25
Φορητές θερμάστρες	10-180	0.15-5	0.01-0.25
Καφετιέρες	1.8-25	0.08-0.15	<0.01
Τοστιέρες	7-18	0.06-0.7	<0.01
Ηλεκτρικές σκούπες	200-800	2-20	0.13-2
Μίξερ	60-700	0.6-10	0.02-0.25
Τηλεοράσεις	2.5-50	0.04-2	<0.01-0.15
Λάμπες φθορισμού γραφείου	40-400	0.5-2	0.02-0.25

Λάμπες φθορισμού οροφής	15-200	0.2-4	0.01-0.3
Στεγνωτήρες μαλλιών	6-2000	<0.01-7	<0.01-0.3
Ξυριστικές μηχανές	15-1500	0.08-9	<0.01-0.3
Δράπανα	400-800	2-3.5	0.08-0.2
Ηλεκτρικά πριόνια	250-1000	1-25	0.01-1

**Πίνακας 6.** Μαγνητική επαγωγή στον περιβάλλοντα χώρο συσκευών επαγγελματικής χρήσης σε σχέση με την απόσταση από την πηγή.

Πηγή	Απόσταση από την πηγή	Μαγνητική επαγωγή σε $\mu\text{T}$
Ηλεκτροσυγκολλήσεις	0.2-0.9 m	500-1700 $\mu\text{T}$
Ηλεκτρικοί κλίβανοι	2m	Μέχρι 1000 $\mu\text{T}$
Επαγωγικές θερμάστρες	0.1-1 m	900-65000 $\mu\text{T}$

**Πίνακας 7.** Επίπεδα αναφοράς και όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας 50 Hz, τα οποία ισχύουν στην Ελλάδα (ΚΥΑ 53571/3839/2000 και ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/2002), Ευρώπη και Αμερική (Η.Π.Α.), που αφορούν στον γενικό πληθυσμό.

Πρότυπο	Συχνότητα ακτινοβολίας (Hz)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου-E (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου-H (A/m)	Πυκνότητα μαγνητικής ροής πεδίου-B ( $\mu\text{Tesla}$ )
Ελληνικό	50	4000	64	80
Ευρωπαϊκό	50	5000	80	100
Αμερικανικό (Η.Π.Α.)	50	614	1,63	-

### 3.6 Ανάλυση μετρήσεων Η-Μ ακτινοβολίας από Μ/Σ σε βιομηχανικό εργασιακό χώρο. Παράδειγμα Εφαρμογής

Λαμβάνοντας υπόψη σύμφωνα με τα παραπάνω, τις επιπτώσεις της Η-Μ ακτινοβολίας στην υγεία των ανθρώπων, τα επίπεδα ασφαλείας στην Η-Μ ακτινοβολία (όπως αυτά καθορίζονται επιστημονικά με διάφορα πρότυπα και επιβάλλονται με νομικούς κανόνες) και τα στοιχεία της θεωρίας και χρήσης των Μετασχηματιστών (Μ/Σ), και συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι στις συνηθισμένες βιοτεχνικές και βιομηχανικές μονάδες χρησιμοποιούνται Μ/Σ διανομής “υψηλής” ισχύος (συνήθως μεγαλύτερης των 1000 kVA) για τον υποβιβασμό της μέσης τάσης (20 kVolt) σε χαμηλή (380 Volt), γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να λαμβάνουν ιδιαίτερη μέριμνα οι υπεύθυνοι των επιχειρήσεων (όπως π.χ. οι Διευθυντές, οι Τεχνικοί Ασφαλείας & Γιατροί Εργασίας) για την διασφάλιση της υγείας των εργαζομένων με την διεξαγωγή απαραίτητων μετρήσεων Η-Μ ακτινοβολίας και λήψη μέτρων ασφαλείας..

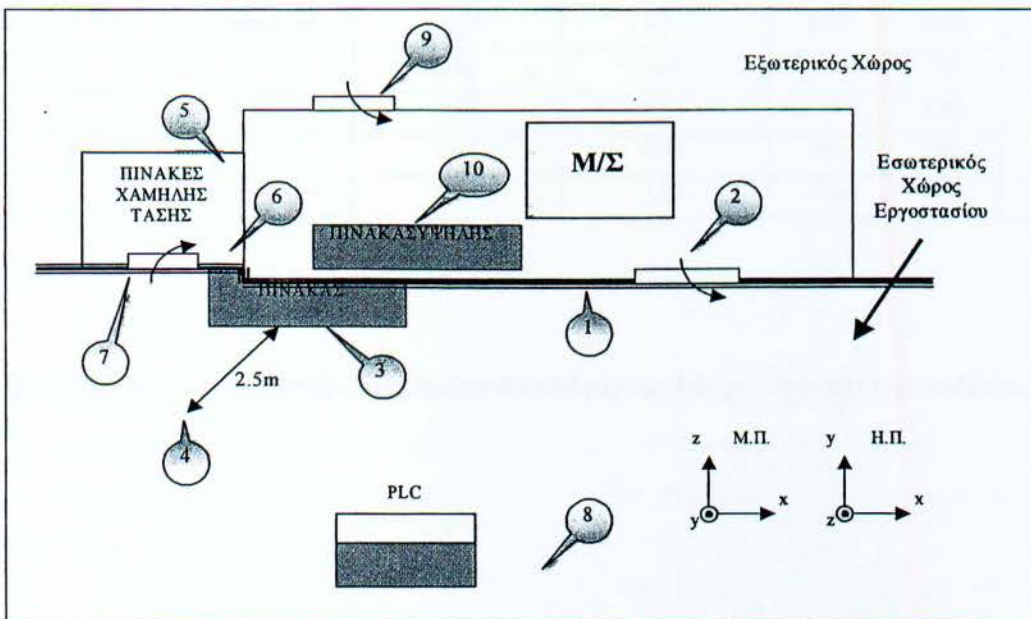
Στη συνέχεια παρουσιάζονται, αναλύονται και αξιολογούνται μετρήσεις Η-Μ ακτινοβολίας κοντά σε Μ/Σ Υψηλής-προς-Μέση Τάση (20 kV/380 V), ισχύος 1000 kVA, οι οποίες διεξήχθησαν από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Η/Υ του Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης στο πλαίσιο ερευνητικού έργου (βλ. [12b], [12c]), σε Βιομηχανία Διέλασης

Αλουμινίου, μετά από σχετικό αίτημα των υπευθύνων της επιχείρησης (του Διευθυντού, του Τεχνικού Ασφαλείας, του Γιατρού Εργασίας) και της ΕΥΑΕ των εργαζομένων (Επιτροπή Υγιεινής & Ασφάλειας Εργαζομένων).

Ο μετασχηματιστής βρίσκεται εγκατεστημένος σε έναν κλειστό και ασφαλισμένο ισόγειο χώρο, παραπλεύρως των κτιριακών εγκαταστάσεων του εργοστασίου, στον οποίο η πρόσβαση επιτρέπεται μόνο σε εξειδικευμένο προσωπικό (για παράδειγμα του Τμήματος Συντήρησης). Οι μετρήσεις ακτινοβολίας έγιναν σε σημεία του εργασιακού χώρου στον οποίο έχουν πρόσβαση σε καθημερινή βάση οι εργαζόμενοι (θέσεις εργασίας), καθώς και περιστασιακά άλλα άτομα. Η συχνότητα στην οποία αναμενόταν η μεγαλύτερη ακτινοβολία είναι τα 50Hz. Επιπλέον όμως μετρήθηκε και η ακτινοβολία σε υψηλότερες συχνότητες ώστε να εξασφαλισθεί ότι δεν υπάρχει κάποια ισχυρή αρμονική σε άλλη υψηλότερη συχνότητα.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους χώρους του εργοστασίου, και συγκρίνονται με τις τιμές του Πίνακα 7, όπως αυτές καθορίζονται από το Ευρωπαϊκό και Αμερικανικό πρότυπο και την Ελληνική νομοθεσία.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα του χώρου όπου είναι εγκατεστημένος ο μετασχηματιστής, στο οποίο αποτυπώνονται τα σημεία όπου έγιναν οι μετρήσεις αλλά και το σύστημα συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της συνεισφοράς της κάθε συνιστώσας της έντασης του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου και της πυκνότητας ροής του συνολικού μαγνητικού πεδίου.



**Πίνακας 7b.** Πυκνότητα ροής μαγνητικού πεδίου συχνότητας 50Hz

Συχνότητα (Hz)	Σημείο	Σχόλιο	Πυκνότητα Ροής Μαγνητ. Πεδίου (μTesla)		x-συνιστ.	y-συνιστ.	z-συνιστ.	Υπολογιζόμενη Ένταση Μαγνητ. Πεδίου-H (A/m)
			Στιγμιαία	Μέγιστη				
50	1	Ύψος Ανθρώπου	2,10	2,18	59%	43%	1%	1,73
50	2	Ύψος Ανθρώπου	1,67	2,00	2%	92%	6%	1,59
50	3	Ύψος Ανθρώπου	18,00	26,00	12%	32%	57%	20,69
50	4	Ύψος Ανθρώπου	0,90	0,97	26%	52%	21%	0,77
50	5	30σταπόπινακα	14,00	16,30	6%	57%	36%	12,97
50	6	1σταπόπινακα	3,70	3,94	23%	6%	71%	3,14
50	7	Ύψος Ανθρώπου	0,95	0,97	61%	8%	31%	0,77
50	8	Ύψος Ανθρώπου	0,13	0,13	59%	37%	4%	0,10
50	9	Ύψος Ανθρώπου	0,30	0,30	75%	21%	4%	0,24
50	10	Ύψος Ανθρώπου	0,70	0,70	30%	20%	50%	0,56

**Πίνακας 7c.** Ένταση ηλεκτρικού πεδίου συχνότητας 50Hz

Συχνότητα (Hz)	Σημείο	Σχόλιο	Τιμές (V/m)		x-συνιστ.	y-συνιστ.	z-συνιστ.
			Στιγμιαία	Μέγιστη			
50	1	50σταπόέδαφος	0,10	0,12	15%	45%	40%
50	3		0,20	0,26	10%	70%	20%
50	9	έδαφος	0,12	0,14	7%	83%	10%
50	10		0,41	0,42	1%	98%	1%
50	8	Ύψος Ανθρώπου	0,73	1,08	2%	98%	0%

**Πίνακας 7d.** Μετρήσεις ακτινοβ. (μέση τιμή ανά 6min) σε μεγαλύτερες συχνότητες των 50Hz.

Ζώνη Συχνότητας	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου-Ε <i>Μέση Τιμή</i> (V/m)	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου-Η <i>Μέση Τιμή</i> (A/m)	Σημείο	Παρατηρήσεις
30kHz–30MHz		0.0019	Τυχαίο	Δεν βρέθηκε άλλο σημείο στο οποίο να υπάρχει περισσότερη ακτινοβολία (HotSpot)
100kHz–3GHz	0.09		Τυχαίο	Δεν βρέθηκε άλλο σημείο στο οποίο να υπάρχει περισσότερη ακτινοβολία (HotSpot)

Στους Πίνακες 7b και 7c, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της πυκνότητας ροής του μαγνητικού πεδίου και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη συχνότητα 50Hz.

Για την εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης μαγνητικού (Μ.Π.) και ηλεκτρικού πεδίου (Η.Π.) στην περιοχή 5Hz-30kHz, το οποίο αποτελούνταν από το όργανο μέτρησης, τα αισθητήρια μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου και το απαραίτητο λογισμικό H/Y (software). Η περιοχή μέτρησης για το Μ.Π. ήταν 5nT–10mT, και για το Η.Π. 0.1V/m -100 kV/m. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική μέτρησης ήταν η RMS και η ακρίβεια μέτρησης καλύτερη από  $\pm 5\%$ . Ακόμα, το σύστημα είχε ενσωματωμένες λειτουργίες επιλογής φίλτρων, με δυνατότητα χωρισμού του εύρους των συχνοτήτων σε υπο-περιοχές, καθώς και χρήση ζωνοπερατών φίλτρων γύρω από τα 50/60 Hz. Το όργανο μέτρησης ήταν βαθμονομημένο σύμφωνα με τα αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα και συνοδευόταν από πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

Επιπλέον, στον Πίνακα 7b, έχουμε προσθέσει μία επιπλέον στήλη, η οποία περιέχει τις υπολογιζόμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H), χρησιμοποιώντας την στήλη με τις μέγιστες τιμές για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B), καθώς και τη σχέση  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ), για να μπορούμε να συγκρίνουμε τις μετρήσεις και με το αμερικανικό πρότυπο, το οποίο για την συχνότητα των 50 Hz δεν αναφέρει το μέγιστο επιτρεπτό όριο έκθεσης για την πυκνότητα μαγνητικής ροής (B), παρά μόνο για την ένταση του μαγνητικού πεδίου (H).

Στη συνέχεια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μετρήθηκε η ακτινοβολία και στις υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα η μέση τιμή σε χρόνο 6 λεπτών του μαγνητικού πεδίου

στην περιοχή 30kHz έως 30MHz μετρήθηκε σε 0.0019A/m και του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή 100kHz έως 3GHz σε 0.09V/m (βλ. Πίν. 7d). Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε κάποιο τυχαίο σημείο του χώρου, αφού μετά από έρευνα που έγινε δεν βρέθηκε κάποιο άλλο σημείο στο οποίο να υπάρχει περισσότερη ακτινοβολία (*Hot Spot*).

### 3.7 Αξιολόγηση των μετρήσεων και λήψη μέτρων ασφαλείας

Συγκρίνοντας τις τιμές μέτρησης των Πινάκων 7b και 7c με τις αντίστοιχες των επιπέδων αναφοράς ή των ορίων έκθεσης του Πίνακα 7 (για συχνότητα ακτινοβολίας 50 Hz) διαπιστώνουμε τα εξής:

- Η μεγαλύτερη τιμή που κατέγραψαν τα όργανα μέτρησης για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ήταν πολύ χαμηλότερη από τα επίπεδα αναφοράς (Ευρώπη, Ελλάδα) και τα μέγιστα επιτρεπτά όρια έκθεσης (Η.Π.Α.) (τουλάχιστον 4600 φορές χαμηλότερη από την τιμή του Ευρωπαϊκού προτύπου, 3700 φορές χαμηλότερη από την τιμή του Ελληνικού, και 568 φορές χαμηλότερη από την τιμή του Αμερικανικού), και κατά συνέπεια τα επίπεδα ακτινοβολίας όσο αφορά το ηλεκτρικό πεδίο, δεν δημιουργούν καμία ανησυχία για την υγεία των εργαζομένων.
- Η μετρηθείσα τιμή της πυκνότητας ροής του μαγνητικού πεδίου ήταν τουλάχιστο 3 φορές χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς που υπαγορεύει η Ελληνική νομοθεσία, και 4 φορές χαμηλότερη σε σχέση με την τιμή αναφοράς του Ευρωπαϊκού προτύπου. Όμως η υπολογιζόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου ξεπερνάει την μέγιστη επιτρεπτή τιμή του Αμερικανικού προτύπου στα σημεία-θέσεις 3, 5, 6. Αυτό σημαίνει, ότι για παν ενδεχόμενο και προκειμένου να διασφαλισθεί από ακτινοβολία η υγεία όλων, δεν πρέπει να υπάρχει πρόσβαση ατόμων στα σημεία 3, 5, και 6. Να σημειωθεί ότι τα σημεία 5 και 6 σχετίζονται με τον κλειστό χώρο στον οποίο υπάρχουν οι πίνακες χαμηλής τάσης (380 V), στον οποίο δεν υπάρχει ούτως ή άλλως πρόσβαση από τους εργαζόμενους, παρά μόνο από εξειδικευμένους τεχνίτες στη διάρκεια προγραμματισμένης συντήρησης, ή απρόβλεπτης βλάβης. Τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν όμως είναι: α) σήμανση της επικινδυνότητας του χώρου, β) ασφάλιση (κλείδωμα) του χώρου για αποτροπή της διέλευσης ατόμων, γ) χρήση μέσων ατομικής προστασίας (ΜΑΠ) από τους τεχνίτες-

συντηρητές στη διάρκεια της συντήρησης και συγκεκριμένα χρήση προστατευτικού ρουχισμού. Ο προστατευτικός ρουχισμός να συνίσταται από ολόσωμες φόρμες εργασίας, γάντια και ειδική καλύπτρα κεφαλής, όλα κατασκευασμένα από ειδικό υλικό (Naptex) (βλ. [7]). Σε ότι αφορά το σημείο 3, το οποίο σχετίζεται με τον πίνακα αυτοματισμού μίας πολύ μεγάλης πρέσας, θα πρέπει να απαγορευτεί η διέλευση ατόμων πολύ κοντά στον εν λόγω πίνακα, με την τοποθέτηση προστατευτικού κιγκλιδώματος. Επειδή στο σημείο 4 (σημείο όπου υπάρχει κάποια θέση εργασίας) το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 2.5 m από τον πίνακα αυτοματισμού της πρέσας, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (0,77 A/m) πέφτει κάτω από το μισό της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής (1,63 A/m), γι' αυτό πρέπει η απόσταση των 2.5 m να καταστεί απόσταση ασφαλείας από τον προαναφερθέντα πίνακα. Δηλ. η τοποθέτηση του κιγκλιδώματος να εξασφαλίσει ότι οι εργαζόμενοι δεν θα βρεθούν πλησιέστερα από τα 2.5 m, στον πίνακα αυτοματισμού.

Από την άλλη πλευρά, συγκρίνοντας τις τιμές μέτρησης του Πίνακα 7d, με τις αντίστοιχες των επιπέδων αναφοράς ή των ορίων έκθεσης του Πίνακα 4, για ακτινοβολίες στην περιοχή συχνοτήτων 30kHz-30MHz για το μαγνητικό πεδίο και 100kHz-3GHz για το ηλεκτρικό πεδίο, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές μέτρησης είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες των επιπέδων αναφοράς ή των ορίων έκθεσης και συγκεκριμένα, για το μαγνητικό πεδίο είναι 856 φορές μικρότερη, ενώ για το ηλεκτρικό πεδίο 6822 φορές μικρότερη. Κατά συνέπεια τα επίπεδα ακτινοβολίας του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου για τις εν λόγω περιοχές συχνοτήτων δεν δημιουργούν καμία ανησυχία για την υγεία των εργαζομένων.

### **3.8 Αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία των ανθρώπων**

Οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων [7] από την έκθεση σε ΗΜ- ακτινοβολία έχουν μελετηθεί για παραπάνω από μισό αιώνα. Οι επιστημονικές ομάδες καθόρισαν αρχικά τα επίπεδα ΗΜ-ακτινοβολίας πάνω από τα οποία η ενέργεια της ακτινοβολίας πιθανώς να προκαλεί ανεπιθύμητες βλάβες στην υγεία. Το μόνο αποδεδειγμένο ανεπιθύμητο βιολογικό φαινόμενο που προκαλεί η ΗΜ-ακτινοβολία είναι η **θέρμανση των ιστών**. Οι



διεθνείς επιτροπές που καθορίζουν τις προδιαγραφές συνέστησαν όρια έκθεσης που θα ήταν σημαντικά χαμηλότερα από τα επίπεδα ΗΜ- ακτινοβολίας στα οποία

παρατηρούνται αυτά τα βιολογικά αποτελέσματα, συνυπολογίζοντας στις τιμές των ορίων ένα παράγοντα ασφαλείας (risk assessment factor). Στις προδιαγραφές που εξέδωσε η ICNIRP και οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση της Σύστασης της Ε.Ε., ο παράγοντας αυτός ασφαλείας καθορίστηκε για το γενικό πληθυσμό σε 50 (δηλαδή τα όρια που θεσπίστηκαν είχαν τιμές έκθεσης σε ΗΜ- ακτινοβολία κατά 50 φορές χαμηλότερες από αυτές στις οποίες παρατηρήθηκαν οι ελάχιστες βιολογικές επιπτώσεις).

Θεσπίζοντας τόσο μεγάλο περιθώριο ασφαλείας, αυτά τα όρια αποτελούν αξιόπιστες επιστημονικά προδιαγραφές για την έκθεση των ανθρώπων σε ΗΜ-ακτινοβολία.

Σχετικά με τους βασικούς περιορισμούς στην έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που θέτει ο Πίνακας 1, χρησιμοποιούνται διαφορετικά *δοσιμετρικά* ή *εκθεσιμετρικά* μεγέθη [5a], ανάλογα με την συχνότητα της ακτινοβολίας. Έτσι:

- Για συχνότητες 0-1 Hz, προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για τη *μαγνητική επαγωγή στατικών μαγνητικών πεδίων* (0 Hz) και για την *πυκνότητα ρεύματος χρονικά μεταβαλλόμενων πεδίων* (έως 1 Hz), για την πρόληψη επιπτώσεων στο *καρδιαγγειακό* και στο *κεντρικό νευρικό σύστημα*.
- Για συχνότητες 1 Hz – 10 MHz, προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την *πυκνότητα του ρεύματος*, για την πρόληψη επιπτώσεων σε λειτουργίες του *νευρικού συστήματος*.
- Για συχνότητες 100 kHz – 10 GHz, προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την *πυκνότητα ισχύος*, για την πρόληψη *θερμοπληξίας ολόκληρου του σώματος* και την πρόληψη υπερβολικής *τοπικής θέρμανσης των ιστών*.

## 4 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕ ΚΛΩΒΟ FARADAY

### 4.0 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΕΡΑΥΝΩΝ

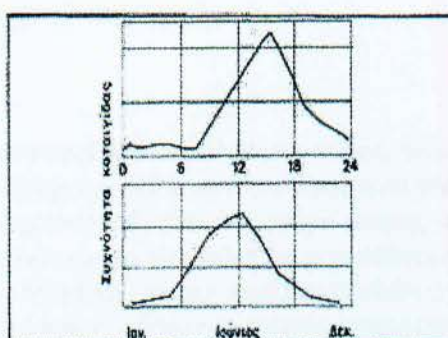
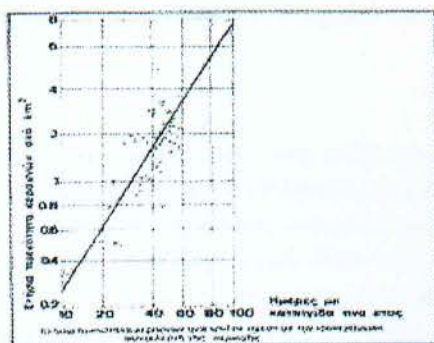
Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ νέφους και γης λέγεται κεραυνός. Το φαινόμενο αυτό, αν και είναι τόσο παλαιό όσο και ο πλανήτης μας, μπόρεσε να εξηγηθεί μόνο κατά τους τελευταίους δύο αιώνες. Από το 1753 όπου ο B. FRANKLIN απέδειξε την ύπαρξη ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού μέχρι σήμερα, με πολλές μοντέρνες μεθόδους και πειράματα έχει αποκτηθεί αρκετή γνώση επάνω στο φαινόμενο αυτό και κατά συνέπεια έχουν αναπτυχθεί αρκετά ασφαλείς τρόποι προστασίας από τους κινδύνους ενός κεραυνού. Όσο είναι δυνατόν πιο σύντομα θα εξηγήσουμε παρακάτω τη δημιουργία της καταιγίδας, των ηλεκτρικών φορτίων που δημιουργούνται από αυτήν, όπως και τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που μπορεί να προέλθουν αυτά.

### 4.1 Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ

Η συχνότητα των καταιγίδων μετριέται σε ημέρες καταιγίδων το χρόνο. Υπολογίζεται ότι κάθε χρόνο λαμβάνουν χώρα πάνω στην επιφάνεια της γης 15.000.000 καταιγίδες και ότι ο αριθμός των ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ νεφών (αστραπές) ή μεταξύ νεφών και γης (κεραυνοί) ανέρχεται στην υψήλιο σε 100 το δευτερόλεπτο.

Η πυκνότητα των καταιγίδων δεν είναι η ίδια σε όλα τα μέρη της γης, εξαρτάται δε από το γεωγραφικό πλάτος, το είδος της επιφανείας της γης (ξηρά, θάλασσα, νησιά) ή της μορφής του εδάφους (πεδιάδα, βουνό, οροπέδιο). Στην Ελλάδα κυμαίνεται από 30 έως 60.

Η πιθανότητα εμφανίσεως μιας καταιγίδας κατά την διάρκεια του χρόνου, καθώς και κατά τη διάρκεια μιας ημέρας μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Έτσι η μεγαλύτερη πιθανότητα εμφανίζεται τους καλοκαιρινούς μήνες κατά τις μεσημβρινές ώρες. Σε χώρες όπως η δική μας, τα μέγιστα αυτά μετατίθενται κατά τις απογευματινές ώρες και κυρίως κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο.

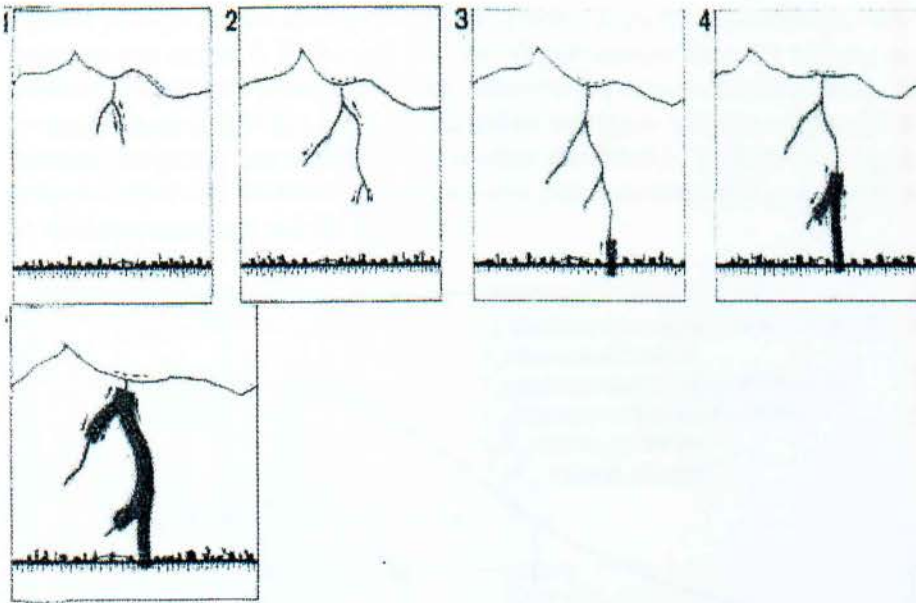


Μεταβολή της συχνότητας καταιγίδων κατά την διάρκεια της ημέρας (επάνω) και κατά την διάρκεια του έτους (κάτω).

## 4.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΣ ΤΟΥ ΚΕΡΑΥΝΟΥ

Βασικά υπάρχουν δυο τύποι κεραυνού. Ο γραμμικός, ο οποίος είναι και ο πιο συνηθισμένος και ο σφαιρικός για τη φύση του οποίου τίποτε δεν είναι γνωστό ακόμα.

Οι σφαιρικοί κεραυνοί εμφανίζονται με μορφή σφαιρικής μάζας αερίων διαμέτρου περί τα 20 εκατοστά του μέτρου, είναι τις περισσότερες φορές ακίνδυνοι για τον άνθρωπο, προκαλούν μόνο υλικές ζημιές μεγάλης εκτάσεως. Ο πιο συνηθισμένος τύπος κεραυνού είναι ο γραμμικός. Η εκκένωση αυτή η οποία ονομάζεται και ολισθαίνουσα εκκένωση έχει την ιδιότητα ότι, για τον αρχικό σχηματισμό της αρκεί μια τιμή εντάσεως ηλεκτρικού πεδίου από 8 μέχρι 10 KV/m.



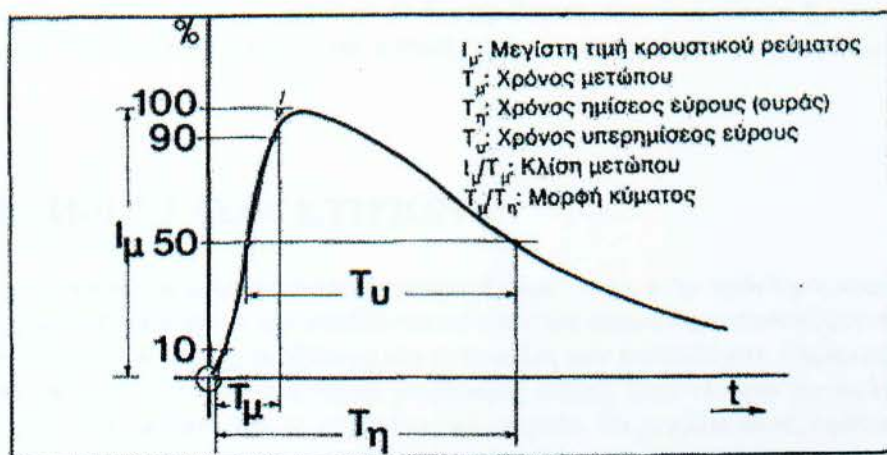
Σχηματισμός του οδηγού οχετού και του οχετού επιστροφής.

Μετά την κυρία εκκένωση, άλλα φορτία που ευρίσκονται μέσα στο νέφος, αλλά σχετικά μακριά από το σημείο της δημιουργίας του αρχικού οχετού, φθάνουν εκεί αργότερα και περνούν από την αγωγή οδό της κυρίας εκκενώσεως και δημιουργούν έτσι ένα ρεύμα μικρής έντασης και μεγάλης διάρκειας. Το ρεύμα αυτό είναι το πιο επικίνδυνο και προκαλεί τις περισσότερες υλικές ζημιές, εξ' αιτίας της μεγάλης ενέργειας που περιέχει. Μετά την πρώτη κυρία εκκένωση σχηματίζονται πολλές φορές μέσα στο νέφος νέοι αγωγιμοί δρόμοι που συνδέουν το σημείο σχηματισμού του αρχικού οχετού με άλλα φορτία μέσα στο νέφος. Ακολουθούν έτσι νέες εκκενώσεις συνολικής διάρκειας 1 sec. Οι εκκενώσεις αυτές είναι από μία μέχρι δεκαπέντε, συνήθως όμως είναι από τέσσερις έως πέντε.

Έχουν σημειωθεί περιπτώσεις όπου το φαινόμενο της εκκενώσεως μεταξύ νέφους και εδάφους έχει λάβει χώρα κατ' αντίστροφη φορά, δηλαδή ο αρχικός οχετός ξεκινά από το έδαφος και πηγαίνει προς το νέφος. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε πολύ ψηλά κτίρια και σε πολύ ψηλά βουνά πλην όμως κατά τα άλλα το φαινόμενο παραμένει το ίδιο. Η μορφή του εδάφους δεν ασκεί καμιά επίδραση στη δημιουργία του αρχικού οχετού. Μόνο όταν ο οδηγός οχετός φθάσει κοντά στο έδαφος, ξεπηδά κατά κανόνα από μια φυσική ή τεχνητή έξαρση (εξαιτίας της σημαντικής αυξήσεως της πεδιακής εντάσεως) ένας δεύτερος οχετός, ο οχετός επιστροφής, ο οποίος πάει να συναντήσει τον πρώτο, όταν δε πραγματοποιηθεί η συνάντηση αυτή λαμβάνει χώρα η κυρία εκκένωση. Γι' αυτό τον λόγο επιζητούμε πάντοτε να δημιουργήσουμε τεχνητές εξάρσεις (όπως τις ράβδους των αλεξικέραυνων) για να προκαθορίσουμε το σημείο πτώσεως του κεραυνού.

### 4.3 ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΚΕΡΑΥΝΩΝ

Το ρεύμα της κυρίας εκκενώσεως του κεραυνού έχει τη μορφή μιας απεριοδικής ταλάντωσης, δηλαδή μοιάζει με ένα κρουστικό ρεύμα. Τυπική μορφή της μεταβολής ενός κρουστικού ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 6. Ενώ το ρεύμα του οδηγού οχετού είναι της τάξεως των μερικών Amperes, η μέγιστη τιμή του ρεύματος της κυρίας εκκενώσεως παίρνει μεγάλες τιμές. Έτσι έχει μετρηθεί ένταση ρεύματος 200 KA και πιθανολογείται ότι έχουν υπάρξει κεραυνοί 500 KA. Κατά κανόνα οι εντάσεις ρεύματος των κεραυνών είναι κάτω από 20 KA. Τα 85% των περιπτώσεων παρουσιάζουν ρεύματα κάτω από 60 KA. Τα δευτερεύοντα ρεύματα διαρκούν μερικά δέκατα του δευτερολέπτου με εντάσεις συνήθως από 20 έως 100 A.



Σχήμα 6. Τυπική μορφή μεταβολής κρουστικού ρεύματος.

### 4.4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΖΩΗΣ

Εάν ένα μέρος του ρεύματος του κεραυνού περάσει από το ανθρώπινο σώμα παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα όταν το σώμα βρεθεί κάτω από διαφορά δυναμικού μιας συνηθισμένης ηλεκτρικής εγκαταστάσεως αλλά σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα κατά το ατύχημα της κεραυνοπληξίας παρατηρούνται, σοβαρές οργανικές ανωμαλίες όπως καρδιακή μαρμαρυγή, απώλεια αισθήσεων, στάση της καρδιάς, shock με νευρική παράλυση, βαριά εγκαύματα κ.λ.π.

Στην περίπτωση όπου το ατύχημα της κεραυνοπληξίας δεν έχει θανατηφόρο αποτέλεσμα εμφανίζονται κατά κανόνα παραλύσεις νεύρων ή μυών χωρίς παρενέργειες μέσα σε μερικές ώρες ή το πολύ μέσα σε μερικές μέρες, επανέρχεται η φυσιολογική τους λειτουργία.

Επικίνδυνη είναι επίσης η παρουσία ατόμου σε μέρος όπου κοντά πέφτει κεραυνός και αυτό γιατί το σώμα με την εκκένωση χάνει ξαφνικά το ηλεκτρικό φορτίο που είχε πάρει από επαγωγή από το νέφος, αλλά κυρίως διότι η βηματική τάση που αναπτύσσεται μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές. Σε κλειστούς χώρους ο άνθρωπος είναι κατά μεγάλο ποσοστό εξασφαλισμένος όταν το κτίσμα έχει καλή αντικεραυνική προστασία. Στο ύπαιθρο υπάρχει κίνδυνος όταν σε ώρα καταιγίδας σταθεί κανείς όρθιος σε ανοικτό πεδίο, εξ' αιτίας της αυξημένης πεδιακής εντάσεως που δημιουργείται πάνω από το σώμα του. Επικίνδυνη είναι επίσης και η παραμονή ατόμων κοντά σε δένδρα ή ψηλούς τοίχους, όπου κατά την κακοκαιρία τα άτομα καταφεύγουν για να προφυλαχθούν από την βροχή. Οι τοίχοι είναι επικίνδυνοι γιατί είναι δυνατό κάπου κοντά να υπάρχει γείωση αλεξικέρανου. Πρακτικά βρίσκεται κανείς σε ασφάλεια σε απόσταση 30 m από το σημείο εισόδου του κεραυνού στην γη.

Επίσης όταν κανείς στέκεται σε ώρα κακοκαιρίας πρέπει να έχει τα πόδια του κλειστά, για να αποφύγει την δημιουργία βηματικής τάσεως. (Βηματική τάσης είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των πελμάτων, όταν αυτά απέχουν 1m μεταξύ τους, την στιγμή εισόδου του ρεύματος του κεραυνού στο έδαφος).

Στην πράξη πρέπει να έχει ο καθένας υπ' όψη του, ότι όταν η χρονική διαφορά μεταξύ κεραυνού και βροντής είναι μικρότερη από 10 δευτερόλεπτα, τότε η καταιγίδα βρίσκεται σε απόσταση το πολύ 3 χιλιομέτρων και από την στιγμή εκείνη βρίσκεται σε περιοχή αυξημένου κινδύνου.

## 4.5 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΩΝ

Οι κίνδυνοι των κτιρίων συνίστανται κατά κύριο λόγο, στην πρόκληση πυρκαγιών αλλά και σε εκρηκτικά φαινόμενα που οφείλονται σε απότομη ατμοποίηση ποσοτήτων νερού. Τέτοιο κίνδυνο διατρέχουν οι στέγες, οι εξώστες και οι κεφαλές των καπνοδόχων. Πυρκαγιές από κεραυνούς σημειώνονται σε αγροτικά σπίτια με ελαφρές στέγες. Στον κίνδυνο της απότομης ατμοποίησης νερού είναι εκτεθειμένα τα αρχαιολογικά μνημεία. Τα μνημεία αυτά, άφθονα στην χώρα μας, βρίσκονται τις περισσότερες φορές πάνω σε υψώματα. Το πρόβλημα της προστασίας των μνημείων αυτών, έγκειται στην σχεδίαση αντικεραυνικής εγκαταστάσεως, αόρατης από τους επισκέπτες, το οποίο παρουσιάζει σημαντική δυσκολία.

## 4.6 ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΖΗΜΙΑΣ ΑΠΟ ΚΕΡΑΥΝΟ

Ο τύπος:

$$R = A + B + C + D + F + G$$

δίδει το μέγεθος του κινδύνου ζημιάς από την πτώση κεραυνού και την αναγκαιότητα εγκαταστάσεως αντικεραυνικής προστασίας. Για τον υπολογισμό του ανωτέρου δίδονται τα πιο κάτω στοιχεία που ανάλογα με την περίπτωση τίθεται ο αντίστοιχος αριθμός. Σε περίπτωση όπου το άθροισμα R είναι:

- 1)  $R < 40$  δεν είναι αναγκαία η αντικεραυνική προστασία.
- 2)  $R \leq 50$  συνίσταται αντικεραυνική προστασία.
- 3)  $R > 50$  αντικεραυνική προστασία αναγκαία.

### A. ΧΡΗΣΗ

### ΜΕΓΕΘΟΣ A

Σπίτια και κτίρια μικρών διαστάσεων	2
Ομοίως αλλά με εξωτερικούς χώρους	4
Εργοστάσια, Εργαστήρια	6
Γραφεία, =ενοδοχεία, Πολυκατοικίες	7
Εκκλησίες, Θέατρα, Μουσεία, Αεροδρόμια	8
Σχολεία, Νοσοκομεία, Παιδικοί Σταθμοί	10

### B. ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

### ΜΕΓΕΘΟΣ B

Μεταλλικός σκελετός με οροφή όχι μεταλλική	1
Οπλισμένο σκυρόδεμα με οροφή όχι μεταλλική	2
Πλινθοδομή χωρίς σκυρόδεμα με οροφή όχι μεταλλική	4
Μεταλλικός σκελετός και οροφή	5
Πλινθοδομή με μεταλλική οροφή	8
Κτίριο με ξύλινη οροφή και κεραμίδια	10

### C. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

#### ΜΕΓΕΘΟΣ C

Κατοικίες, Εργοστάσια, Μηχανήματα	2
Αγροτικά προϊόντα-ξύλα κ.λ.π.	5
Σταθμοί ενεργείας, Τηλεφωνικά κέντρα	6
Ιστορικά μνημεία, Μουσεία	8
Σχολεία, Νοσοκομεία, Καύσιμα	10

### D. ΣΤΑΘΜΗ ΓΕΙΤΝΙΑΣΕΩΣ

#### ΜΕΓΕΘΟΣ D

Κτίρια γειτονεύοντα με άλλα κτίρια-δέντρα	2
Κτίριο σε αραιή περιοχή δομήσεως	5
Μεμονωμένο κτίριο	10

### E. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

#### ΜΕΓΕΘΟΣ E

Πεδιάδα	2
Λόφος	6

Βουνό ως 1000m και παραλίες	8
Βουνό πάνω από 1000m	10

<b>F. ΥΨΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ (ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ)</b>	<b>ΜΕΓΕΘΟΣ F</b>
-------------------------------------	------------------

Μέχρι 9m	2
Μέχρι 15m	4
Μέχρι 18m	5
Μέχρι 24m	8
Μέχρι 30m	11
Μέχρι 38m	16
Μέχρι 46m	22
Μέχρι 53m	30

<b>G. ΙΣΟΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ</b>	<b>ΜΕΓΕΘΟΣ G</b>
--------------------------------	------------------

Μέχρι 20m	20
Μέχρι 24m	24
Μέχρι 27m	27
Μέχρι 30m	30
Μέχρι 35m	35
Μέχρι 40m	40
Μέχρι 45m	45
Μέχρι 50m	50
Μέχρι 60m	60



Γεωγραφικά στον Ελλαδικό χώρο οι ισοκεραυνικές περιοχές κατανέμονται με τα μέχρι σήμερα στοιχεία ως κατωτέρω:

Μέχρι 30: Ανατολική Πελοπόννησος, Αν. Στερεά, Εύβοια, Αν. Κρήτη

Μέχρι 40: Κεντρική Πελοπόννησος, Κεντρική Μακεδονία, Αν. Μακεδονία,

Θράκη, Β. Σποράδες, Κυκλάδες.

Μέχρι 50: Δυτική Μακεδονία, Κρήτη, Αν. Νησιά Αιγαίου, Ν. Πελοπόννησος.

Μέχρι 60: Νησιά Ιονίου, Ήπειρος, Δυτική και Κεντρική Στερεά, Δυτική Πελοπόννησος.

Με το παραπάνω ερωτηματολόγιο θα υπολογίσουμε την ανάγκη ύπαρξης Σ.Α.Π. στην κατασκευή μας:

A: Εργοστάσια, εργαστήρια	6
B: Σκυρόδεμα οπλισμένο με όχι μεταλλική οροφή	2
C: Μηχανήματα	2
D: Μεμονωμένο κτίριο	10
E: Λόφος	6
F: Μέχρι 8 μέτρα	2
G: Κρήτη	50

Οπότε το  $R=78$  αυτό είναι μεγαλύτερο από 50 οπότε το Σ.Α.Π. στην κατασκευή μας είναι αναγκαίο.

## 4.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΩΒΟΥ

Ιδεώδης προστασία θα ήταν ο εγκλωβισμός ενός κτιρίου δηλαδή η τοποθέτηση ενός μεταλλικού κλωβού γύρω από αυτό ο οποίος θα απομόνωνε το εσωτερικό από κάθε εξωτερική ηλεκτρική επίδραση. Επειδή αυτό δεν είναι δυνατό, και μπορεί μερικά να γίνει μόνο σε κτίρια που έχουν μεταλλική στέγη ή σε περίπτωση μεταλλικών κτιρίων, σχεδιάζεται μια εγκατάσταση η οποία προσφέρει σχετική προστασία πλην όμως επαρκή. Μια πλήρης αντικεραυνική εγκατάσταση με σύστημα κλωβού αποτελείται από:

- 1) Την εξωτερική εγκατάσταση προστασίας.
- 2) Την εσωτερική εγκατάσταση προστασίας.
- 3) Την προστασία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως.

Η εξωτερική εγκατάσταση προστασίας αποτελείται από:

- a) Την εγκατάσταση συλλήψεως.
- b) Την εγκατάσταση απαγωγών.
- c) Την εγκατάσταση γειώσεως.

Επιπλέον πρέπει να προστεθούν και οι απαιτήσεις της εσωτερικής προστασίας κτιρίων.

- 1) Η εγκατάσταση συλλήψεως τοποθετείται στο υψηλότερο μέρος του κτιρίου και αποτελείται από αγωγούς, ράβδους ακίδες και άλλα αντικείμενα που έχουν σκοπό την δημιουργία ικανής πεδιακής εντάσεως ώστε να προσελκύουν πάνω σε αυτά τον οχετό του κεραυνού που κατεβαίνει.
- 2) Η εγκατάσταση των απαγωγών, συνδέει την εγκατάσταση συλλήψεως με την εγκατάσταση γειώσεως και αποτελείται από:
  - Τους αγωγούς στέγης.
  - Τους κύριους και δευτερεύοντες απαγωγούς.
  - Τα εξαρτήματα συνδέσεως.

- 3) Η εγκατάσταση γειώσεως χρησιμεύει στο να απάγει το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος αποτελείται δε από αγωγούς και ράβδους γειώσεως.

#### **4.8 ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΠΑ ΤΗΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΛΩΒΟΥ**

- 4) Όλοι οι αγωγοί της εγκαταστάσεως πρέπει να είναι προσιτοί για επιθεώρηση. Μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, που καθορίζονται από κανονισμούς, μπορεί το 50% των κυρίων απαγωγών να σκεπάζονται από επίχρισμα ή τοιχοποιία. Οι συνδέσεις ελέγχου της εγκαταστάσεως πρέπει πάντα να είναι προσιτές. Οι αγωγοί στέγης μπορούν να τοποθετηθούν κάτω από την στέγη μόνο σε περίπτωση χαλύβδινης στέγης και όταν κάτω από αυτή δεν υπάρχουν εύφλεκτες ύλες ή κατοικήσιμος χώρος.
- 5) Η εγκατάσταση συλλήψεως πρέπει να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να συλλαμβάνει όλους τους κεραυνούς χωρίς κατά το δυνατό, να έρχεται σε επαφή με τα αντικείμενα που προστατεύει, για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα
- 6) Οι απαγωγοί πρέπει να σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγούν από την εγκατάσταση συλλήψεως στην εγκατάσταση γειώσεως από τον συντομότερο δρόμο.
- 7) Πρέπει να αποφεύγεται η δυνατότητα υπερπηδήσεως μεταξύ των στοιχείων της αντικεραυνικής εγκαταστάσεως και των μεταλλικών μερών του κτιρίου. Η αιτία αυτών των υπερπηδήσεων είναι οι σημαντικές υπερτάσεις που δημιουργούνται εξ' αιτίας της μεγάλης τιμής του ρεύματος καθώς και από τις μεγάλες ταχύτητες μεταβολής του ρεύματος και ενδεχομένως των σημαντικών τιμών επαγωγικής αντιστάσεως.
- 8) Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ αγωγών της αντικεραυνικής εγκαταστάσεως και μεταλλικών μερών ηλεκτρικών συσκευών ισχύουν οι παραπάνω κανόνες πλην όμως επειδή η γεφύρωση επιτρέπεται μόνον σε ορισμένες περιπτώσεις που ορίζουν κανονισμοί είναι προτιμότερο να τηρείται ο όρος της αρκετής αποστάσεως.
- 9) Στην περίπτωση όπου δύο ακίδες της εγκαταστάσεως συλλήψεως απέχουν λιγότερο από το 1/10 του μήκους των αγωγών που τις συνδέουν, πρέπει να γεφυρωθούν. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ενός ενδιάμεσου κυρίου ή βοηθητικού στοιχείου συλλήψεως υπό τον όρο ότι θα τηρηθούν όλοι οι κανόνες που εξασφαλίζουν την ύπαρξη αρκετά ελαττωμένων επαγωγικών αντιστάσεων.

## 4.9 Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΛΛΗΨΕΩΣ

Τα σημεία ενός κτιρίου που προσβάλλονται από κεραυνούς είναι συνήθως:

- Κορυφές αετωμάτων και πύργων.
- Στηθαία και κορυφές στεγών.
- Καπνοδόχοι και ειδικές εξάρσεις στέγης.
- Οι γωνίες των αετωμάτων από την κορυφή μέχρι την υδροροφή.
- Οι γωνίες των τοίχων και της στέγης στις οριζόντιες στέγες.

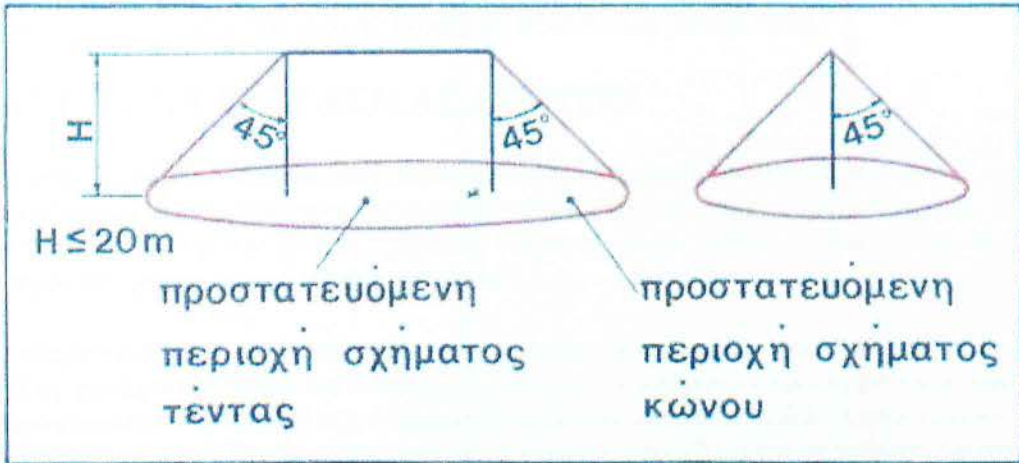
Τα σημεία αυτά, ανάλογα με την κατασκευή της στέγης πρέπει να φέρουν τα στοιχεία της εγκαταστάσεως συλλήψεως ή και σε ορισμένες περιπτώσεις αν είναι μεταλλικά με αρκετή διατομή, να αποτελούν στοιχεία της. Συρμάτινοι αγωγοί που τοποθετούνται πάνω στην στέγη σαν συλληπτήριοι αγωγοί διατάσσονται σε δικτυωτή μορφή. Οι συλληπτήριοι αγωγοί που διατάσσονται σε δικτυωτή μορφή πάνω σε μία στέγη μαζί με τα υπάρχοντα τυχόν μεταλλικά στοιχεία της στέγης πρέπει να έχουν τέτοια διάταξη ώστε κανένα σημείο της στέγης να βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 5 ΙΟ από κάποιο συλληπτήριο αγωγό.

Η διάσταση του κάθε βρόγχου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 x 20πι η δε τοποθέτηση του μπορεί να εκλεγεί ελεύθερα, αν και πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην κάλυψη των ακμών και αιχμών από συλληπτήριο αγωγό σε συνδυασμό πάντα με υπάρχοντα μεταλλικά αντικείμενα πάνω στη στέγη. Στην περίπτωση κτιρίων με συνολικό ύψος μέχρι 20μ μετρούμενη μέχρι το υψηλότερο σημείο συλληπτηρίου στοιχείου, η εγκατάσταση συλλήψεως μπορεί να αποτελείται από μία συλληπτήριο ράβδο αν η προστατευόμενη περιοχή είναι αρκετά μεγάλη.

Σαν προστατευόμενη περιοχή ορίζεται ο χώρος που σχηματίζεται υπό γωνία 45° ως προς την κατακόρυφο (βλ. Εικόνα 14). Εξάρσεις στέγης που αποτελούνται από μη ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό, θεωρούνται ασφαλείς, αν προεξέχουν μέχρι 0,30 Γ.Τ.Ι. από την προστατευόμενη περιοχή. Μεταλλικές αγείωτες εξάρσεις δεν χρειάζεται να συνδεθούν με τους συλληπτηρίου αγωγούς αν:

- a) Προεξέχουν από την προστατευόμενη περιοχή μέχρι 0,30m
- b) Περικλείουν μία επιφάνεια το πολύ 1 m<sup>2</sup> ή έχουν μήκος το πολύ 2m
- c) Απέχουν το πολύ 0.5m από ένα συλληπτήριο αγωγό.

Αν οι εξάρσεις στέγης δεν πληρούν τους παραπάνω όρους τότε πρέπει να προβλεφθούν συλληπτήριοι αγωγοί ή να συνδεθούν με αυτούς.



Εικόνα 14. Περιοχή προστασίας ενός συλλεκτηρίου αγώγιου.

ΜΗΚΟΣ m	ΠΛΑΤΟΣ m	ΠΛΗ- ΘΟΣ ΑΠΛ- ΓΩΓΩΝ	ΜΟΡΦΗ ΣΤΕΓΗΣ		
έως 20	έως 10	2			
έως 20	10 ÷ 20	4			
20 ÷ 40	10 ÷ 20	6			
20 ÷ 40	20 ÷ 40	8			
40 ÷ 60	10 ÷ 20	8			
40 ÷ 60	20 ÷ 40	10 · 1			
40 ÷ 60	40 ÷ 60	12 · 1			
60 ÷ 80	20 ÷ 40	12 · 1			

Οι συλληπτήριои αγωγοί αποτελούνται από «κατακόρυφους ράβδους, ακίδες, ύψους τουλάχιστον 0,30 m πάνω από την ακμή και σε απόσταση το πολύ 5 m μεταξύ τους.

#### 4.10 Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΑΓΩΓΩΝ

Για κάθε 20 M μήκους εξωτερικής περιφέρειας στέγης προβλέπεται ένας απαγωγός. Αν προκύπτει περιττός αριθμός, ο αριθμός των απαγωγών αυξάνεται κατά 1 για συμμετρικά κτίρια. Όταν η προβολή της στέγης στο έδαφος σχήματος τετραγώνου έχει πλάτος ή μήκος 12 M περιττός αριθμός απαγωγών μπορεί να ελαττωθεί κατά 1.

Οι απαγωγοί διανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του κτιρίου, αρχίζοντας από τις γωνίες του κτιρίου. Τα διαστήματα μεταξύ των απαγωγών προσαρμόζονται στις ιδιαιτερότητες κάθε κτιρίου π.χ. όπως στην περίπτωση πλατειών, πυλών ή ανοιγμάτων, εντούτοις τα διαστήματα αυτά δεν θα πρέπει να είναι μικρότερα από 10μ. Στην περίπτωση δικτυωτών συλλεκτριών αγωγών, οι απαγωγοί διατάσσονται στις γωνίες και διασταυρώσεις σαν προέκταση των συλλεκτριών στοιχείων στην ακμή της στέγης.

Όταν τα κτίρια έχουν εσωτερική αυλή ένας απαγωγός προβλέπεται για περιφέρεια αυλής από 30 M για κάθε 20 M επί πλέον, με ελάχιστο αριθμό 2 απαγωγών.

Σε κτίρια με επιφάνεια μεγαλύτερη από 40x40μ. προβλέπονται εσωτερικοί απαγωγοί εφ' όσον το επιτρέπει η διάταξη του κτιρίου. Η μέση απόσταση μεταξύ των εσωτερικών απαγωγών καθώς και μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών απαγωγών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 40μ. Αν δεν είναι δυνατό να προβλεφτούν εσωτερικοί απαγωγοί αυξάνεται ο αριθμός των εξωτερικών απαγωγών, η δε μεταξύ τους απόσταση δεν είναι ανάγκη να είναι μικρότερη από 10μ.

Συστήματα που περιλαμβάνουν συλλεκτριούς ράβδους, ακίδες, στην στέγη απαιτούν ένα απαγωγό ανά συλλεκτήριο ράβδο τουλάχιστον. Καπνοδόχοι εργοστασίων, πυργοειδή κτίρια υψηλότερα από 40μ κωδωνοστάσια εκκλησιών απαιτούν δύο απαγωγούς. Για μικρότερα ύψη αρκεί ένας απαγωγός κωδωνοστάσια εκκλησιών ψηλότερα από 20μ όπως και ξύλινες κατασκευές πυργοειδούς μορφής απαιτούν πάντοτε δύο απαγωγούς. Στους πύργους ψύξεως για τον αριθμό των απαγωγών υπολογίζεται η άνω περιφέρεια. Οι απαγωγοί πρέπει να διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν φυσική συνέχεια της εγκαταστάσεως συλλήψεως.

Οι απαγωγοί διατάσσονται σε απόσταση τουλάχιστον 0,5μ από πόρτες, παράθυρα και άλλα ανοίγματα κατά το δυνατόν.

Σε κάθε απαγωγό πρέπει να υπάρξει μια διάταξη αποσυνδέσεως της συνεχείας του που λέγεται «σύνδεση ελέγχου» έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν μετρήσεις. Η προστασία των απαγωγών για μηχανικούς λόγους μέσα σε σωλήνα πρέπει να αποφεύγεται. Η διάταξη αυτή πρέπει να μην είναι προσιτή σε μέρη που μπορεί εύκολα να υποστεί ζημιές (π.χ. σε ένα σχολείο). Οι συνδέσεις ελέγχου πρέπει να γίνονται με ειδικούς συνδέσμους και να αντέχουν στις διαβρώσεις.

## 4.11 Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ

Η καλή λειτουργία της αντικεραυνικής εγκαταστάσεως εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη σωστή διάταξη και λειτουργία της γειώσεως και ιδιαίτερα των στοιχείων γειώσεως. Αν το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας δεν περιλαμβάνει και σύστημα ισοδυναμικής προστασίας τότε δεν προδιαγράφεται και συγκεκριμένη τιμή αντιστάσεως γειώσεως. Στην μελέτη μας δεν κάνουμε ισοδυναμική προστασία οπότε δεν μετράμε αντίσταση γειώσεως.

Τα στοιχεία γειώσεως είναι οι ράβδοι και οι ταινίες γειώσεως. Η θεμελιακή γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αντικεραυνική προστασία αν προβλεφθούν οι κατάλληλοι αγωγοί συνδέσεως με τους απαγωγούς. Οι ταινίες γειώσεως αποτελούνται από μεταλλικές ταινίες ή καλώδια χωρίς κανένα περιορισμό ως προς το σχήμα που τοποθετούνται μέσα στο έδαφος με ελάχιστες διατομές και υλικό όπως στον πίνακα 2. Οι ράβδοι γειώσεως αποτελούνται από στρογγυλούς ράβδους επιχλωμένους ή μορφοτεμάχια σχήματος σταυρού που τοποθετούνται μέσα στο έδαφος. Όσον αφορά την γεωμετρική διάταξη των ταινιών γειώσεως υπάρχουν διάφοροι τύποι:

- Μεμονωμένες ταινίες γειώσεως που τοποθετούνται κατά μήκος μέσα στο έδαφος.
- Ακτινωτές ταινίες γειώσεως που τοποθετούνται μέσα στο έδαφος κατά μήκος και ακτινικά γύρω από ένα κεντρικό σημείο συνδέσεως, η γωνία των ακτινών πρέπει να μην είναι μικρότερη από 60°.
- Δακτυλιοειδείς ταινίες γειώσεως που αποτελούνται από ταινίες σε σχήμα δακτύλιου χωρίς καμιά απαίτηση κανονικού γεωμετρικού σχήματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι ταινίες πρέπει να τοποθετούνται με κατακόρυφη την μεγαλύτερη επιφάνεια τους.

## 4.12 ΣΥΛΛΗΠΤΗΡΙΟΣ ΑΓΩΓΟΣ ΓΕΙΩΣΕΩΣ

Αυτός αποτελείται από ένα υπόγειο αγωγό χωρίς μόνωση που συνδέει τα διάφορα στοιχεία γειώσεως. Είναι προτιμότερο να αποτελεί κλειστό δακτύλιο και χρησιμεύει για την ελάττωση της αντιστάσεως γειώσεως. Σε μερικές περιπτώσεις εάν παρουσιάζει μικρή αντίσταση γειώσεως μπορεί να συνδέει τους απαγωγούς χωρίς πρόσθετα στοιχεία γειώσεως. Η διατομή του δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη διατομή των κυρίων ή δευτερευόντων απαγωγών, τοποθετείται δε σε βάθος τουλάχιστον 0,50 m και σε απόσταση 1 m περίπου από το εξωτερικό περίγραμμα της θεμελιώσεως.

Όλοι οι κύριοι και δευτερεύοντες απαγωγοί μιας εγκαταστάσεως πρέπει να συνδέονται με τον συλληπτήριο αγωγό γειώσεως προς τον οποίο πρέπει να συνδέονται και όλα τα άλλα στοιχεία γειώσεως, δίκτυα υδρεύσεως (όχι δίκτυα φωταερίου) ή άλλα μεταλλικά αντικείμενα. Αν ο συλληπτήριο αγωγός, γειώσεως δεν μπορεί να αποτελέσει κλειστό δακτύλιο, τότε πρέπει να συμπληρωθεί για το μήκος που του λείπει με πρόσθετα στοιχεία γειώσεως. Στην περίπτωση που οι

κύριοι και δευτερεύοντες απαγωγοί δεν μπορούν να συνδεθούν με τον συλληπτήριο αγωγό τότε γειώνονται με ιδιαίτερα στοιχεία γειώσεως ως εξής:

Για κάθε απαγωγό χρησιμοποιούνται σε απόσταση 1 πι περίπου από το κτίριο

- a) Ταινία γειώσεως μήκους τουλάχιστον 20m ή
- b) Μία ράβδος γειώσεως βάθους 9 m.

Αν χρησιμοποιηθούν μικρότερα κομμάτια ράβδων με το ίδιο συνολικό μήκος τότε αυτά μπορούν να ενωθούν παράλληλα μεταξύ τους η δε μεταξύ τους απόσταση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το βάθος που βρίσκονται αυτά.

Σε περίπτωση ακτινικής γειώσεως η μεταξύ τους γωνία δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 60°.

Υπόγεια μεταλλικά αντικείμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν στοιχεία γειώσεων αν έχουν τουλάχιστο την ίδια αντίσταση γειώσεως με κάθε ηλεκτρόδιο γειώσεως ανά απαγωγό, και καλύπτουν τις απαιτήσεις του πίνακα 2.

Σε κτίρια ιδιαίτερα εκτεθειμένα σε πτώση κεραυνού και συγχρόνως προσπελάσιμα από το ευρύ κοινό όπως, πύργοι τηλεοράσεως, εκκλησίες, γέφυρες, κ.λ.π. χρειάζεται ιδιαίτερος σχεδιασμός της θέσεως των ηλεκτροδίων γειώσεως για την αποφυγή από το κοινό, τάσεων εξ' επαφής ή βηματικών τάσεων.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος της αντιστάσεως γειώσεως επιτρέπεται σε ορισμένες περιπτώσεις κτιρίων η γείωση να αποτελείται μόνον από τον συλληπτήριο αγωγό γειώσεως χωρίς ιδιαίτερα στοιχεία γειώσεως. Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι εξής:

- Κτίσματα χωρίς ογκώδη γειωμένα μεταλλικά μέρη και εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση που να μην συνδέεται με το εξωτερικό δίκτυο όπως, αγροτικές αποθήκες, ανεμόμυλοι, εξοχικά ή αγροτικά σπιτάκια κ.λ.π.
- Κτίσματα με ογκώδη γειωμένα μεταλλικά μέρη και με εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση που να συνδέεται με το εξωτερικό δίκτυο υπό την προϋπόθεση ότι έχουν τηρηθεί οι κανόνες της αρκετής αποστάσεως των απαγωγών από τα διάφορα μεταλλικά μέρη και ότι έχουν ληφθεί όλα τα μέτρα για την προστασία των ηλεκτρικών συσκευών.

Στα κατασκευαστικά σχέδια των αντικεραυνικών εγκαταστάσεων πρέπει πάντα να προδιαγράφεται η τιμή της αντιστάσεως γειώσεως που πρέπει να επιτευχθεί. Κατά τις δοκιμές παραλαβής της αντικεραυνικής εγκαταστάσεως η μετρούμενη τιμή της αντιστάσεως γειώσεως δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά κανένα τρόπο την τιμή που έχει υπολογισθεί σύμφωνα με τα παραπάνω. Κατά διαδοχικές δε μετρήσεις δεν επιτρέπεται παρέκκλιση μετρήσεως από μέτρηση μεγαλύτερη από 10%. Η τιμή της αντιστάσεως γειώσεως εξαρτάται από το είδος του εδάφους και την υγρασία του



## 5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΛΩΒΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

### 5.1 Εφαρμογές του κλωβού στην βιομηχανία

Το κλουβί Faraday μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η διέλευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τα ηλεκτρικά πεδία, που είτε περιέχουν τους ή τον αποκλεισμό τους από το εσωτερικό του χώρου.

Πάρτε παρατηρήσετε ότι Faraday κλουβιά ασπίδα, επίσης, το εσωτερικό από την εξωτερική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, εκτός από τα ηλεκτρικά πεδία, αν ο αγωγός ή τοίχος είναι αρκετά παχιά και τυχόν τρύπες είναι σημαντικά μικρότεροι από ό, τι μήκος κύματος της ακτινοβολίας του.

Αυτή η θωράκιση αποτέλεσμα χρησιμοποιείται για την προστασία ηλεκτρονικού εξοπλισμού από κεραυνούς και άλλες ηλεκτροστατικές εκκενώσεις, για RF (ραδιοσυχνότητα) θωράκιση και θωρακισμένα καλώδια τηλεπικοινωνιών.

Πρακτική κλωβούς Faraday μπορεί να γίνει από τη διεξαγωγή των ματιών αντί για ένα σταθερό αγωγό. Ωστόσο, αυτό μειώνει την αποτελεσματικότητά του κλωβιού του ως RF (RadioFrequency) ασπίδα.

Ορισμένες δομές του πραγματικού κόσμου, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, συμπεριφέρονται περίπου όπως ένα κλουβί Faraday. Για παράδειγμα: Εάν χτυπήσει κεραυνός κοντά σε ένα αυτοκίνητο, δεν επηρεάζει οι άνθρωποι που κάθονται στο αυτοκίνητο.

Μερικά παραδοσιακά αρχιτεκτονικά υλικά δρουν ως ασπίδες Faraday στην πράξη. Αυτές περιλαμβάνουν σοβά με συρματόπλεγμα, και οπλισμού σκυροδέματος. Αυτά θα επηρεάσουν τη χρήση των ασύρματων τηλεφώνων και ασύρματων δικτύων στο εσωτερικό κτιρίων και κατοικιών.

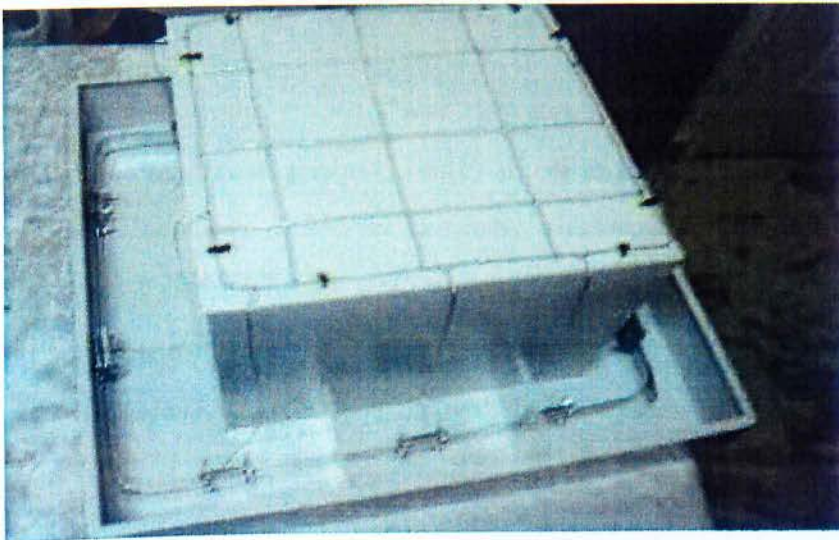
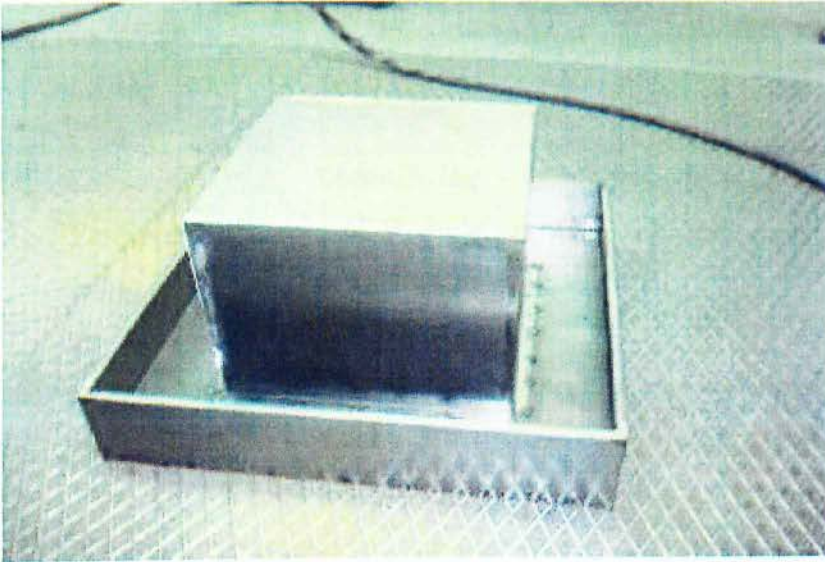
Η ασπίδα του με θωρακισμένο καλώδιο, όπως είναι το ομοαξονικό που χρησιμοποιείται για την καλωδιακή τηλεόραση, προστατεύει την εσωτερική αγωγούς από ηλεκτρικό θόρυβο.

Μια τσάντα για ψώνια με επένδυση από φύλλο αλουμινίου ενεργεί ως ένα κλουβί Faraday. Είναι συχνά χρησιμοποιείται από κλέφτες να κλέψουν με ετικέτες RFID στοιχεία (μην το δοκιμάσετε!).

Για τα βαρέα καθήκοντα καθήκον συνιστάται να δικαιολογήσει την ασπίδα, προκειμένου να λάβει καλύτερα αποτελέσματα.

Προστατευτικές στολές για επόπτες γραμμών: επόπτης γραμμών φορούν συχνά στολές που λειτουργούν ως Faraday κλουβιά για την ασφάλεια τους, ενώ συνεργάζεται με υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς ενέργειας.. Αυτές οι στολές τους προστατεύουν από το να πάθουν ηλεκτροπληξία.

## 5.2 Φωτογραφίες κατασκευής κλωβού



## Αναφορές- Βιβλιογραφία

- [1] Δρίβας Σ., Ζορμπά Κ., Κουκουλάκη Θ., «*Μεθοδολογικός οδηγός για την εκτίμηση και πρόληψη του επαγγελματικού κινδύνου*», ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα 2001
- [2a] Σαρρής Ε.Θ., «*Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία*», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 1984.
- [2b] Kraus J.D., K.R. Carver, «*Electromagnetics*», McGraw-Hill, Kogakusha LTD, 2<sup>nd</sup> Edition, 1973.
- [3] Κυριακού Γεώρ., «*Ακτινοβολίες – Έκθεση ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία*», Εισήγηση στην ημερίδα Υγιεινής και Ασφάλειας που συνδιοργάνωσαν το ΤΕΕ Θράκης και το ΕΛΙΝΥΑΕ, Ξάνθη, 20/6/2004.
- [4] Δελιχάς Μιλτ., «*Οι μη-ιοντίζουσες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες (NIR) στον εργασιακό χώρο*», Περιοδικό «Υγιεινή & Ασφάλεια της Εργασίας», Έκδοση του ΕΛ.ΙΝ.Α.Ε., Σελ. 7-10, τεύχος 13, 2003.
- [5a] ΚΥΑ 53571/3839, Φύλλο της Εφημερίδας της Κυβερνήσεως 1105 της 6<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2000 «*Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία κεραιών στην ξηρά*», Αθήνα 6/9/2000.
- [5b] ΚΥΑ 3060(ΦΟΡ)238/2002, ΦΕΚ 512/Β/25.4.2002, «*Μέτρα προφύλαξης του κοινού από την λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων*», Αθήνα 25/4/2002.
- [6] Κυριακού Γεώρ., «*Μετρήσεις Ασφάλειας - Χαρτογράφηση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας*», Τελική Ερευνητική Έκθεση του ομώνυμου ερευνητικού έργου (με κωδικό ΚΕ-607) που εκτελέστηκε από το Εργαστήριο Μικροκυμάτων του Δημοκρίτειου

Πανεπιστήμιου Θράκης (Δ.Π.Θ.), Ανάδοχος: Δ.Π.Θ., Φορέας Χρηματοδότησης: Περιφ. Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης (ΑΜΘ), Δράση: ΠΕΠ/ΑΜΘ 1994-99, Καταχώρηση της Τελ. Ερ. Εκθεσης: Βιβλιοθήκη Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, Ιανουάριος 2000.

[7] Μακρόπουλος Βασ., Κων. Χαλκιώτης, "Αξιολόγηση & Διαχείριση της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας για Επαγγελματικά Εκτιθέμενους", Έκδοση του ΕΛ.ΙΝ.Α.Ε., Αθήνα 2002.

[8a] L199-1999/519/EC Council, "*Recomentation of European Communities of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*", 12/7/1999.  
([http://europa.eu.int/eur-lex/en/archive/1999/1\\_19919990730en.html](http://europa.eu.int/eur-lex/en/archive/1999/1_19919990730en.html))

[8b] Οδηγία 2004/40/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, «Περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία)», Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L159-2004/30.4.2004 EC Council, σελ. 1-26, 30/4/2004.

[9] IEEE Standards Coordinating Committee 28 on Non-Ionising Radiation Hazards: *Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz* (ANSI/IEEE C95.1-1991), The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 1992.

[10] Dillingham St. and N. Cobb, "*Radio-Frequency Radiation for Transmitters: A comparison of U.S. and E.U. Requirements*", RFI Global Services Ltd, <http://www.rfi-wireless.com/services/index.html>, September 2001.

- [11] Τσανάκας Δημ., Μίμος Ευάγγελος, *“Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας”*, Δελτίο του Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, σελ. 16-22, Οκτώβριος 2006.
- [12a] Κυριακού Γ., Σαφιγιάννη Αν. *“Μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας σε Μετασχηματιστή Υψηλής-προς-Μέση Τάση, σε Εργοστάσιο Βιομηχανίας Διέλασης Αλουμινίου”*, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Η/Υ, Δημοκρίτειο Πανεπ. Θράκης, 4/7/2001.
- [12b] Ερευνητικό Έργο: *“Μετρήσεις ασφάλειας και χαρτογράφηση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας”*, κωδ. ΚΕ-853, με υπεύθυνους τους Αναπλ. Καθηγ. Γ. Κυριακού, Αν. Σαφιγιάννη, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Η/Υ, Δημοκρίτειο Πανεπ. Θράκης, Ξάνθη, 2001.
- [13] Διεθνές Γραφείο Εργασίας (ILO) με τη συνεργασία του Συμβουλίου Βιομηχανικής Ασφάλειας της Σουηδίας, *“Υγιεινή & Ασφάλεια στους χώρους εργασίας”* Μετάφραση και προσαρμογή στα Ελληνικά του "SAFETY AND HEALTH AT WORK", 1992.
- [14] Edward M. Purcell *“Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός”* Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα 2004
- [15] Κουλιόπουλος Νίκος *“βασική ηλεκτρολογία”* εκδόσεις Ιων Αθήνα 2001
- [16] <http://el.wikipedia.org>