



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μαγνητική Θωράκιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τατιάνα Β. Δαματοπούλου

Αθήνα, Απρίλιος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μαγνητική Θωράκιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου  
Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 26<sup>η</sup> Απριλίου 2023

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Δημήτριος Μανωλάκος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ιωάννης Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Χρήστος Χριστοδούλου

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αφροδίτη Κτενά

Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Αθήνα, Απρίλιος 2023

Τατιάνα Β. Δαματοπούλου

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Copyright © Τατιάνα Β. Δαματοπούλου, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, φιλοδοξεί να συνεισφέρει στην τεχνολογία της θωράκισης τόσο του ανθρώπινου οργανισμού όσο και του ηλεκτρικού εξοπλισμού από το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται σε ηλεκτρικά οχήματα, αφενός από την φόρτιση των συσσωρευτών τους και αφετέρου από την τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Η συνεισφορά αυτή έγκειται κατά κύριο λόγο στη βελτίωση της θωράκισης έναντι του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από ρεύματα τροφοδοσίας (κατά κύριο λόγο διακοπτικά ρεύματα) που μπορεί να φτάσουν σε συχνότητες της τάξης των kHz.

Η διατριβή πραγματεύεται τρεις θεματικές ενότητες:

- μελέτη της συμπεριφοράς των μαλακών μαγνητικών υλικών, τα οποία είναι σε θέση να εγκλωβίζουν μαγνητικό πεδίο λόγω της μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας που εμφανίζουν
- προσομοιώσεις διατάξεων θωράκισης με την μέθοδο της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, που μπορούν να μειώσουν τον χρόνο και το κόστος της εν λόγω μελέτης
- μελέτες περίπτωσης, όπου εξετάζονται διαφορετικά μαγνητικά υλικά και τεχνικές προσομοίωσης για την θωράκιση έναντι μαγνητικού (και ηλεκτρικού) πεδίου

Η διατριβή διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.** Παρουσιάζεται λεπτομερής αποτύπωση της διεθνούς βιβλιογραφίας, μελετώντας άρθρα έγκριτων διεθνών περιοδικών, που αφορούν στην θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου. Έμφαση δίνεται στις συνθήκες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και μάλιστα στην ασύρματη φόρτισή τους.
- **Κεφάλαιο 2: Υλικά Μαγνητικής Θωράκισης.** Μελετώνται μαγνητικά υλικά μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας, όπως μονοφασικοί και ηλεκτρικοί χάλυβες φερριτικής δομής, επιστρώσεις μαλακών μαγνητικών υλικών, όπως permalloy, καθώς επίσης και τα πιο σύγχρονα άμορφα και νανοκρυσταλλικά υλικά. Τα υλικά αυτά κατασκευάζονται στο εργαστήριο και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαθέσιμες διατάξεις μέτρησης, μία από τις οποίες συνιστά καινοτομία στο πεδίο των μαγνητικών μετρήσεων. Ως τελικό αποτέλεσμα η μελέτη περιλαμβάνει την μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων (μαγνητική διαπερατότητα), καθώς και στον δομικό και μικροδομικό χαρακτηρισμό τους, τα οποία στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν στη θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων.
- **Κεφάλαιο 3: Θωράκιση Ηλεκτρικών οχημάτων.** Με βάση τα χρησιμοποιούμενα μαγνητικά υλικά εξετάζεται η συνεισφορά της θωράκισης με μαλακά μαγνητικά (αλλά και μη μαγνητικά αγώγιμα) υλικά σε καλωδιώσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προσομοιώνοντας έτσι τις συνθήκες ενσύρματης ή ασύρματης φόρτισης και κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος. Επίσης, μελετάται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στα ηλεκτρικά οχήματα και προτείνεται θωράκιση, η οποία δεν επιτρέπει την υπέρβαση του μαγνητικού πεδίου πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια, σε συγκεκριμένα χωρικά όρια στην καμπίνα των επιβατών.
- **Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.** Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και οι προτάσεις για την μελλοντική έρευνα.

Οι υπολογισμοί του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και η διαστασιολόγηση των αντίστοιχων διατάξεων θωράκισης πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα στο πρόγραμμα ANSYS Maxwell 2D and 3D, Release 17.1 Academic. Οι πειραματικές μετρήσεις, με σκοπό την επαλήθευση των εν λόγω υπολογισμών, πραγματοποιήθηκαν με χρήση πρότυπων πηγών ρεύματος και κατάλληλων διακριβωμένων μετρητικών οργάνων (πεδιόμετρα, αμπερόμετρα) στο εργαστήριο, καθώς επίσης και με μετρήσεις πεδίου.

Λέξεις κλειδιά: μαγνητική θωράκιση, ηλεκτρικό όχημα, μαλακά μαγνητικά υλικά, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων



## **Abstract**

This PhD Thesis aims at contributing towards the technology of human protection against magnetic field in electric vehicles, during battery charging and electric motor supply. The main contribution is related to the magnetic field shielding due to the supplying currents (mainly switching currents) at frequencies in the order of kHz.

The Thesis aims at the contribution of three main issues, that can be technologically used by the manufacturers and facilitators of electric vehicles for the protection of the travelling human bodies, according to the existing standards:

1. Soft magnetic materials, able to trap magnetic field due to their high magnetic permeability
2. Shielding arrangement simulation using finite element analysis, that can reduce the time and cost of the magnetic shielding studies
3. Examples using magnetic materials and simulation techniques for the magnetic (and electric) field shielding

At first, the detailed study of the international literature will be depicted, based on papers of well-respected journals, related to the protection of the human body against magnetic (and electric) fields. Emphasis will be given to the conditions of electric vehicles and especially to their wireless charging. This literature survey is depicted at the Chapter 1 of the Thesis.

The investigation of high magnetic permeability materials will be given next. These soft magnetic materials are single-phase and electric steels of ferritic structure, soft magnetic coatings like permalloys, as well as the more modern amorphous and nano-crystalline materials. The investigation is related to the technology of monitoring their magnetic properties (permeability), as well as to their structural and micro-structural characterization, being indicative of the proposed shielding materials and testing methods. This investigation is presented in Chapter 2.

Using these magnetic materials, the contribution of the shielding based on soft magnetic (but also in non-magnetic conductive) materials in electric energy transmission cablings, simulating the conditions of wired and wireless charging, as well as the operation (movement) of the electric vehicle. The magnetic field distribution in electric vehicles will also be investigated with a corresponding shielding proposal, which does not permit the overpassing of the magnetic field limits in the passenger cabin. This study will be analysed in Chapter 3.

Finally, the conclusions of the Thesis and the proposals for future research will be given in Chapter 4.

The simulating means for the study of magnetic and electric field will be based on finite element analysis, using the ANSYS Maxwell 2D and 3D, Release 17.1 Academic package. The experimental comparison of the simulation will be based on reference current sources and use of calibrated magnetometers and current meters, as well as in field measurements.

Keywords: magnetic shielding, electric vehicle, soft magnetic materials, finite element analysis





<b>Περιεχόμενα</b>	<b>Σελίδα</b>
Περίληψη	5
Abstract	7
Περιεχόμενα	9
Πίνακες και Λεζάντες	11
Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	17
1.1. Επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς	17
1.1.1. Τα σημερινά πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου	20
1.1.2. Επιδράσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε όργανα και ιστούς	22
1.2. Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου	30
1.3. Επιπτώσεις από την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	38
1.4. Το ηλεκτρικό όχημα και οι κρίσιμοι παράγοντες φόρτισής του	52
Κεφάλαιο 2. Υλικά Μαγνητικής Θωράκισης	56
2.1. Τεχνικές μαγνητικού χαρακτηρισμού	56
2.1.1. Επαγωγική μέτρηση οιωρεί-στατικού βρόχου μαγνήτισης	56
2.1.2. Μέτρηση βρόχου με διάταξη Hall	58
2.1.3. Μέτρηση με μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης	61
2.2. Δομικός χαρακτηρισμός	63
2.2.1. Περίθλαση ακτίνων X	63
2.2.2. Ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης	64
2.2.3. Διαφορική θερμιδομετρική ανάλυση	65
2.3. Μελέτη υλικών	66
2.3.1. Μονοφασικά μαγνητικά χαλυβδόφυλα	66
2.3.2. Ανάπτυξη λεπτών υμενίων Ni-Fe	71
2.3.3. Άμορφα και νανοκρυσταλλικά υλικά θωράκισης	75
Κεφάλαιο 3. Θωράκιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	88

3.1. Θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου	88
3.1.1. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	89
3.1.2. Πειράματα	95
3.1.3. Προσομοίωση πραγματικών συνθηκών	102
3.2. Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού πεδίου	104
3.2.1. Εισαγωγή	104
3.2.2. Αρχές προσομοίωσης του ηλεκτρικού πεδίου	104
3.2.3. Αρχική προσομοίωση και μετρήσεις	107
3.3. Μαγνητική θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων	109
3.3.1. Εισαγωγή	109
3.3.2. Υλικά θωράκισης	110
3.3.3. Αξιολόγηση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ)	111
3.3.4. Θωράκιση καλωδίου	111
3.3.5. Η προτεινόμενη μέθοδος θωράκισης	115
3.3.6. Αποκρυσταλλώματα της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης	121
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα και Προτάσεις Μελλοντικής Εργασίας	122
Αναφορές	124

## Πίνακες

Πίνακας 1.1. Σύνοψη των ορίων έκθεσης σε Η/Μ πεδία του ICNIRP.

Πίνακας 2.1. Κραματικές κατά βάρος αναλογίες των υμενίων σε νικέλιο και σίδηρο.

Πίνακας 2.2. Θερμοκρασίες νανοκρυστάλλωσης  $T_x$  και τα μέγιστα θερμοκρασιών κρυστάλλωσης

Πίνακας 2.3. Θερμοκρασία Curie για κάθε σύνθεση.

## Σχήματα

Σχήμα 1.1. Τα βασικά μέρη της ηλεκτρικής κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η ισχύς συνεχούς ρεύματος της μπαταρίας μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα από τον μετατροπέα για τη λειτουργία του κινητήρα [177].

Σχήμα 1.2. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος [180].

Σχήμα 1.3. Ενδεικτική απεικόνιση πραγματικών υποσυστημάτων του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος [181].

Σχήμα 1.4. Πραγματική απεικόνιση αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων. Τα περισσότερα υποσυστήματα ηλεκτρικής κίνησης είναι κάτω από το δάπεδο επιβατών και οδηγού [182].

Σχήμα 1.5. Ενδεικτικό παράδειγμα μεθοδολογίας ασύρματης φόρτισης συσσωρευτή [181].

Σχήμα 1.6. Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος με το δευτερεύον πηνίο στο ελαστικό του ηλεκτρικού οχήματος [181].

Σχήμα 2.1. Η διάταξη χαρακτηρισμού μονού χαλυβδόφυλλου. Το ηλεκτρικό – μαγνητικό σύστημα μέτρησης (αριστερά) και τα ηλεκτρονικά όργανα διέγερσης και μέτρησης (δεξιά).

Σχήμα 2.2. Τυπικό σήμα διέγερσης (αριστερά) και λήψης (δεξιά) του συστήματος μέτρησης.

Σχήμα 2.3 Τυπικό σήμα λήψης μετά το φιλτράρισμα(αριστερά), ψηφιακή ολοκλήρωση του σήματος λήψης (κέντρο) και παραγωγή του βρόχου υστέρησης (δεξιά).

Σχήμα 2.4. Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής μέτρησης και προσδιορισμού του βρόχου υστέρησης των μαγνητικών λεπτών υμενίων.

Σχήμα 2.5. Τυπική καμπύλη μαγνήτισης με βάση την διάταξη μέτρησης του Σχήματος 2.5 σε υμένιο στοιχειομετρίας  $Ni_{80}Fe_{20}$  στον άξονα εύκολης μαγνήτισης.

Σχήμα 2.6. Τυπική καμπύλη μαγνήτισης με βάση την διάταξη μέτρησης του Σχήματος 2.5 σε υμένιο στοιχειομετρίας  $Ni_{80}Fe_{20}$  σε άξονα δύσκολης μαγνήτισης.

Σχήμα 2.7. Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης: (1) πηνίο διέγερσης, (2) MDL, (3) πηνίο λήψης.

Σχήμα 2.8. Παλμική τάση εξόδου συναρτήσσει του χρόνου. Η πρώτη υψίσυχη τάση εξόδου (burst) οφείλεται στο παλμικό πεδίο διέγερσης και την σύζευξή του με το πηνίο λήψης. Ακολουθεί η κύρια παλμική τάση εξόδου. Οι μικρές κυματομορφές που ακολουθούν την κύρια παλμική έξοδο είναι ανακλάσεις του διαδιδόμενου ελαστικού παλμού στα άκρα της MDL (οι τιμές τάσης και ο χρόνος δίνονται σε V και s αντίστοιχα).

Σχήμα 2.9. Η προτεινόμενη συμμετρική διάταξη MDL - αγωγών: (1) MDL, (2) Παλμικοί αγωγοί ρεύματος, (3) Πηνίο λήψης, (4) Φερρομαγνητικό υλικό υπό δοκιμή.

Σχήμα 2.10. Η προτεινόμενη συμμετρική διάταξη MDL - αγωγών με χρήση ηλεκτρομαγνήτη για την δημιουργία του επιθυμητού πεδίου πόλωσης: (1) MDL, (2) Παλμικοί αγωγοί ρεύματος, (3) Πηνίο λήψης, (4) Φερρομαγνητικό υλικό υπό δοκιμή, (5) & (6) Μαλακό μαγνητικό υλικό και πηνίο διέγερσης αντίστοιχα για την δημιουργία του ηλεκτρομαγνήτη πόλωσης.

Σχήμα 2.11. Σχηματική αναπαράσταση δύο ακτίνων X που προσπίπτουν σε παράλληλα επίπεδα.

Σχήμα 2.12. Η διάταξη της περίθλασης ακτίνων X που χρησιμοποιήθηκε: Σχηματική λειτουργία της διάταξης (αριστερά) και η διάταξη που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (δεξιά).

Σχήμα 2.13. TEM (αριστερά). Το δείγμα, αφού αποκτήσει πάχος περίπου 20 μm, εισάγεται στο PIPS (αριστερά - κέντρο) και βομβαρδίζεται από ιόντα Ar. Έτσι, λεπταίνει τόσο που αποκτά μια τρύπα, από όπου στην συνέχεια το πάχος του αρχίζει και μεγαλώνει ώστε να μπορεί να γίνει ηλεκτροπερατό με πάχος μερικά nm (κέντρο - δεξιά). Στην συνέχεια τοποθετείται στο δειγματοφορέα (δεξιά) και στην συνέχεια στο TEM.

Σχήμα 2.14. Η διάταξη DTA/DSC.

Σχήμα 2.15. Τυπική απόκριση χάλυβα low carbon steel όπως παρήχθη (μπλε γραμμή) μετά από θερμική και μαγνητική κατεργασία στους 300°C και 0.1T για μια ώρα και αργή απόψυξη 24 ωρών (πορτοκαλί γραμμή).

Σχήμα 2.16. Μέτρηση μαγνητικής ανισοτροπίας ηλεκτρικού χάλυβα μετά από συγκόλληση. Η ανισοτροπία και η αλλαγή της είναι χαρακτηριστική, τόσο στην ζώνη βάσης (BM) και την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), όσο και στην ζώνη τήξης.

Σχήμα 2.17. Μικροφωτογραφίες TEM του αρχικού δείγματος LCS.

Σχήμα 2.18. Μικροφωτογραφίες TEM του αρχικού δείγματος LCS μετά την θερμική κατεργασία.

Σχήμα 2.19. Μικροφωτογραφίες TEM του LCS μετά από την θερμική & μαγνητική κατεργασία.

Σχήμα 2.20. Μικροφωτογραφίες TEM από λάθος χειρισμό (πιάσιμο) του δείγματος.

Σχήμα 2.21. TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 12.5%.

Σχήμα 2.22. TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 32.5%.

Σχήμα 2.23. TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 62.5%

Σχήμα 2.24. Διάταξη φυσικής εναπόθεσης ατμών με θέρμανση του κράματος σε βάθρο τανταλίου (αριστερά και αριστερά - κέντρο). Διάταξη φυσικής εναπόθεσης ατμών με τη μέθοδο της δέσμης ηλεκτρονίων. Στον υποδοχέα που διακρίνεται, τοποθετείται το μητρικό κράμα.

Σχήμα 2.25. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου εναπόθεσης λεπτών υμενίων με χρήση electron gun.

Σχήμα 2.26. Πλάγια όψη (cross section) υμενίου  $Ni_{85}Fe_{15}$  πάχους 36nm όπου διακρίνεται σαφώς η συνύπαρξη της κάθετης ανισοτροπίας και της ανισοτροπίας στο επίπεδο του υμενίου (αριστερά). Περίθλαση διερχόμενης δέσμης (δεξιά) που δείχνει την νανοκρυσταλλικότητα του εν λόγω υμενίου, καθώς επίσης και τους κρυσταλλογραφικούς του άξονες που επιβεβαιώνουν τον προσανατολισμό της ανισοτροπίας.

Σχήμα 2.27. Διάγραμμα XPS υμενίου  $Ni_{60}Fe_{40}$ .

Σχήμα 2.28. Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης για κράμα  $Ni_{75}Fe_{25}$  πάχους 93,9 nm για επιβαλλόμενο πεδίο σε διεύθυνση παράλληλη (α) και κάθετη (β) στον άξονα εύκολης μαγνήτισης του υμενίου.

Σχήμα 2.29. Μικροδομή του υμενίου από Ni<sub>3</sub>Fe (Permalloy), πάχους 10 μm όπως προσδιορίστηκε από το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης. Οι μικρογραφίες φωτεινού πεδίου και σκοτεινού πεδίου απεικονίζουν την παρουσία σχετικά περιορισμένων διαταραχών, ενώ η ανάστροφη απεικόνιση δείχνει την κρυσταλλικότητα του υμενίου.

Σχήμα 2.30. Διάγραμμα φάσεων Fe-B [183].

Σχήμα 2.31. Σχηματική απεικόνιση της χύτευσης επίπεδης ροής άμορφης μεταλλικής ταινίας.

Σχήμα 2.32. Μετρήσεις DSC για όλα τα δείγματα με γραμμική θέρμανση και ρυθμό 10 K/min.

Σχήμα 2.33. Θερμο-μαγνητο-βαρυτικές μετρήσεις για κάθε δείγμα.

Σχήμα 2.34. Περίθλαση ακτίνων X για όλα τα δείγματα.

Σχήμα 2.35. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Σχήμα 2.36. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Σχήμα 2.37. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Σχήμα 2.38. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>86</sub>B<sub>14</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Σχήμα 2.39. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>88</sub>B<sub>12</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Σχήμα 2.40. Εικόνες TEM για το δείγμα Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> για ποσοστό κρυσταλλικότητας 5% (αριστερά), 50% (κέντρο) και 95% (δεξιά).

Σχήμα 2.41. Εικόνες TEM για το δείγμα Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub>, όπου φαίνεται η άμορφη κατάσταση στο δείγμα όπως παρήχθη (αριστερά), η κρυσταλλική απόκριση περίθλαση ηλεκτρονίων - SAED (κέντρο) και η νανοκρυστάλλωση (δεξιά).

Σχήμα 2.42. Διαδικασία κρυστάλλωσης του δείγματος της ευτηκτοειδούς φάσης Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub>, όπου παρατηρείται νανοκρυστάλλωση 5% στους 700 K (αριστερά), σχεδόν ολική κρυστάλλωση στους 726 K (κέντρο), η οποία επιβεβαιώνεται από περίθλαση ηλεκτρονίων (δεξιά).

Σχήμα 2.43. Εικόνες TEM από το δείγμα Fe<sub>86</sub>B<sub>14</sub>, με πρωτογενή κρυστάλλωση 5% στους 648 K (αριστερά), η οποία συνεχίζεται και στους 681 K.

Σχήμα 2.44. Εικόνες TEM για το δείγμα Fe<sub>88</sub>B<sub>12</sub>, στο οποίο παρατηρούνται νανοκρύσταλλοι ακόμη και στο χυτευμένο υλικό (αριστερά), οι οποίοι ενισχύονται σε κρυσταλλικότητα 50% στους 590 K (κέντρο) και ολοκληρώνονται με 100% κρυστάλλωση στους 671 K.

Σχήμα 2.45. Βρόχοι υστέρησης των δειγμάτων όπως χυτεύθηκαν (πάνω) και μετά την θερμική κατεργασία (κάτω).

Σχήμα 3.1. Το μοντέλο όπως προσομοιώθηκε από το ANSYS Maxwell. Η κυκλική γραμμή και το τετράγωνο στο δεξί μέρος του σχήματος δείχνουν (a) τον αγωγό ηλεκτρικής ισχύος και (b) το υλικό θωράκισης, αντίστοιχα. Ο λεπτός κύλινδρος (c) πάνω από το υλικό θωράκισης περιέχει τα σημεία όπου υπολογίστηκε το μαγνητικό πεδίο και δημιουργήθηκε με σκοπό την πύκνωση του πλέγματος και, συνεπώς, τη μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών.

Σχήμα 3.2. Κατανομή μαγνητικού πεδίου στο χώρο (α) χωρίς θωράκιση και για ένα μονό τετραγωνικό (30 x 30 cm) φύλλο ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS σε (β) 0, (γ) 100, (δ) 200, (ε) 300, (στ) 400, (ζ) 500, (η) 600, (θ) 700 και (ι) 800 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 786 A.

Σχήμα 3.3. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 5 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 577 A.

Σχήμα 3.4. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 37 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 777 A.

Σχήμα 3.5. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 100 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 1055 A.

Σχήμα 3.6. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, που προσφέρει τη δυνατότητα της γραμμικής προσέγγισης στην προσομοίωση. Στη θέση (1) χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής για το εναλλασσόμενο ρεύμα ή ένα τροφοδοτικό για το συνεχές. Ένα καλώδιο τροφοδοσίας βρίσκεται στη θέση (2). Ένα μαγνητόμετρο εναλλασσόμενου ή στατικού μαγνητικού πεδίου στη απεικονίζεται στη θέση (3). Το μέσο θωράκισης (4) αποτελείται από έξι φύλλα μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS.

Σχήμα 3.7. Η θωράκιση από ηλεκτρικό χάλυβα με τον ανιχνευτή του μαγνητικού αισθητήρα εμβαδού επιφάνειας 100 cm<sup>2</sup> της NARDA.

Σχήμα 3.8. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε ένα μικρό τετραγωνικό φύλλο του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα μονό τετραγωνικό φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) σε αποστάσεις 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 και 800 mm από τον ρευματοφόρο αγωγό για (α) 532 A, (β) 786 A, (γ) 1025 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.

Σχήμα 3.9. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 5 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.

Σχήμα 3.10. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 37 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την

Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.

Σχήμα 3.11. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 100 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.

Σχήμα 3.12. Προσομοίωση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου πλησίον μιας μονοφασικής γραμμής μεταφοράς ισχύος, η οποία περνάει σε απόσταση 1 m από την επιφάνεια στην οποία τοποθετείται η θωράκιση. Κατανομή πεδίου χωρίς θωράκιση ( $\alpha_1, \alpha_2$ ), με μονή στρώση θωράκισης ( $\beta_1, \beta_2$ ) και διπλή θωράκιση ( $\gamma_1, \gamma_2$ ).

Σχήμα 3.13. Τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στο ανθρώπινο σώμα τα οποία επάγονται από το ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας ισχύος.

Σχήμα 3.14. Στοιχεία προσομοίωσης και ανάλυσης με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων: διακριτοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε τρισδιάστατη αναπαράσταση σε σχέση με έναν γραμμικό αγωγό υπό τάση 400 kV, που προσομοιώνει τοις συνθήκες πρωτεύοντος κυκλώματος ασύρματης φόρτισης.

Σχήμα 3.15. Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του ανθρώπινου σώματος: (α) κατανομή του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, (β) κατανομή του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο σώμα.

Σχήμα 3.16. Πυκνότητα των επαγόμενων ρευμάτων J κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του ανθρώπινου σώματος, για έναν αγωγό υπό τάση 400 kV.

Σχήμα 3.17. Η σύγκριση αποτελεσμάτων της δισδιάστατης προσομοίωσης (πράσινη γραμμή) και της τρισδιάστατης προσομοίωσης (μπλε και κόκκινη γραμμή) για έναν αγωγό υπό τάση 400 kV.

Σχήμα 3.18. Η σχηματική αναπαράσταση του καλωδίου τροφοδοσίας του ηλεκτρικού οχήματος, συμπεριλαμβανομένων των στρωμάτων μόνωσης, θωράκισης και συσκευασίας.

Σχήμα 3.19. Η θωράκιση για την περίπτωση διέγερσης με εναλλασσόμενο ρεύμα σε λογαριθμική κλίμακα. Τα μαγνητικά πεδία μετρήθηκαν στην ίδια απόσταση (100 mm από το κέντρο του καλωδίου τροφοδοσίας). Απουσία θωράκισης το μέγιστο πεδίο είναι ~7.8 mT. Το άνω διάγραμμα απεικονίζει την περίπτωση θωράκισης με ένα μόνο φύλλο χαλκού (Cu), το οποίο είναι κατάλληλο για τη συχνότητα των 2 kHz (οι μετρήσεις μηδενικού πλάτους δεν εμφανίζονται σε αυτό το γράφημα, καθώς είναι λογαριθμικό). Το κάτω διάγραμμα παριστάνει το μαγνητικό πεδίο για τη διέγερση με συχνότητα 50 Hz. Στην περίπτωση του μονού φύλλου χαλκού (Cu) το πεδίο είναι ~3.5 mT, ενώ ο συνδυασμός φύλλων χαλκού (Cu) και του Permalloy επιφέρει μείωση πεδίου έως ~0.01 mT και αποδεικνύεται να είναι αποτελεσματικός για τα πεδία των εναλλασσόμενων ρευμάτων.

Σχήμα 3.20. Η προσομοίωση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) διπλής θωράκισης (permalloy-permalloy) για την περίπτωση διέγερσης με συνεχές ρεύμα (πάνω αριστερά) και για τις νιφάδες από άμορφη ταινία με τη μορφή στιβάδων (πάνω δεξιά). Τα υλικά είναι πολύ κοντά στο

καλώδιο τροφοδοσίας και βρίσκονται σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού ακόμη και για τις μικρές τιμές έντασης του συνεχούς ρεύματος. Το μεσαίο γράφημα αντιστοιχεί στην περίπτωση διπλής θωράκισης (Permalloy-Permalloy), ενώ το κάτω στη θωράκιση με νιφάδες ή σκόνες από FINAMET.

Σχήμα 3.21. Η προτεινόμενη θωράκιση. Μια επίπεδη πλάκα μαγνητικής θωράκισης σε απόσταση 100 mm από το καλώδιο τροφοδοσίας, κάτω από την οποία υπάρχει χώρος για τις μπαταρίες ή τις κυψέλες καυσίμου.

Σχήμα 3.22. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου γύρω από την επίπεδη μαγνητική θωράκιση, όπως περιγράφεται στο [207]. Ο αγωγός ισχύος ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα 500 A (μπλε κύκλος κοντά στο γράμμα Z) βρίσκεται σε απόσταση 100 mm από τη μαγνητική θωράκιση, η οποία παριστάνεται ως ευθεία γραμμή. Η ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου στις άκρες της θωράκισης είναι εμφανής.

Σχήμα 3.23. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και πειραματικής μέτρησης απουσία οποιουδήποτε υλικού θωράκισης για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό.

Σχήμα 3.24. Το μαγνητικού πεδίο ως συνάρτηση της απόστασης πάνω από ένα φύλλο δομικού χάλυβα (LCS) πάχους 0,8 mm που λειτουργεί ως θωράκιση για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για τις συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και για τη διέγερση συνεχούς ρεύματος ( $\gamma$ ).

Σχήμα 3.25. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα χαλύβδινο (AISI 1010) φύλλο θωράκισης πάχους 0.8 mm για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500mm από τον αγωγό για τις συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και διέγερση συνεχούς ( $\gamma$ ).

Σχήμα 3.26. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα μονό φύλλο Permalloy πάχους 0.8mm για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και για διέγερση συνεχούς ρεύματος ( $\gamma$ ).

Σχήμα 3.27. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα διπλό στρώμα Permalloy πάχους 0.8 mm, για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό, για 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και για διέγερση συνεχούς ρεύματος ( $\gamma$ ).



## Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 1.1. Επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ζώντες οργανισμούς

Το ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει, όπου υπάρχει διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, ακόμη και χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα, μια ηλεκτρική συσκευή, που είναι συνδεδεμένη σε έναν ενεργό ρευματοδότη, βρίσκεται σε ηλεκτρικό πεδίο, ακόμα και όταν είναι απενεργοποιημένη. Όταν η συσκευή είναι ενεργοποιημένη, το κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα και κατά συνέπεια μαγνητικό πεδίο, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από το μέγεθος του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Μια κρίσιμη παράμετρος του ηλεκτρομαγνητικού (H/M) πεδίου είναι η συχνότητά του  $f$  και το αντίστοιχο μήκος κύματος,  $\lambda$ , που συνδέονται με τη σχέση  $c=\lambda f$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός [1].

Τα H/M πεδία φυσικής προέλευσης χωρίζονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει το στατικό ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο της Γης. Το ηλεκτρικό πεδίο οφείλεται στο αρνητικό φορτίο της επιφάνειας της Γης και η έντασή του στο φυσικό περιβάλλον κυμαίνεται από 100 έως 500 V/m. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης ελαττώνεται από τους μαγνητικούς πόλους προς τον μαγνητικό ισημερινό και στην Ελλάδα έχει τιμή 45  $\mu$ T περίπου. Στην δεύτερη ομάδα κατατάσσονται τα ραδιοκύματα που δημιουργούνται από κοσμικές πηγές (Ηλιος, γαλαξίες και άλλες), η τοπική συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων στην ατμόσφαιρα που σχετίζονται με τις εκκενώσεις των κεραυνών, καθώς επίσης και οι ταλαντώσεις στην ιονόσφαιρα της Γης, κ.λπ.. Τα σύννεφα κατά τη διάρκεια του κεραυνού δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο έντασης έως και δεκάδες ή εκατοντάδες kV/m.

Οι ανθρωπογενείς πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χωρίζονται με την σειρά τους σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιέχει εκείνες που παράγουν στατικά ή οιωνεί στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, καθώς και τα εναλλασσόμενα πεδία εξαιρετικά χαμηλών (2-8 Hz έως 50-60 Hz), χαμηλών (3 kHz-30 kHz) και μεσαίων (30-300 kHz) συχνοτήτων. Στις κατηγορίες αυτές υπάγονται οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, ο εξοπλισμός μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι γραμμές μεταφοράς συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας, οι σταθμοί φόρτισης και τα συστήματα ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων, κλπ.. Στην δεύτερη ομάδα συγκαταλέγονται οι πηγές που δημιουργούν H/M πεδία υψηλής συχνότητας (10 MHz - 300 GHz). Οι συχνότητες από 300 MHz ως 300 GHz αποτελούν τα μικροκύματα (πομποί ραδιοφώνου και τηλεόρασης, σταθμοί ραντάρ, τηλεπικοινωνιακά και δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, συστήματα τοποθεσίας και πλοήγησης κλπ.). Όλες αυτές οι κατηγορίες συχνοτήτων συνιστούν μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες, ενώ συχνότητες αρκετά πάνω από αυτές συνιστούν ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Τα φυσικά H/M πεδία υπήρχαν στον πλανήτη μας πολύ πριν από την εμφάνιση της ζωής σε αυτήν. Κατά τη διαδικασία της δημιουργίας και της εξέλιξής της, αυτά τα πεδία, αλληλεπιδρώντας με βιοηλεκτρικές διεργασίες, επηρέασαν την κατάσταση και τη λειτουργία των οργανισμών, οδηγώντας στην ανάπτυξη αμοιβαίων μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Έτσι, οι ζωντανοί οργανισμοί απέκτησαν και τους μηχανισμούς προστασίας από τις ενδεχομένως βλαβερές επιπτώσεις των H/M πεδίων. Σε κάθε ζωντανό οργανισμό, υπάρχουν ηλεκτρικά

ρεύματα που ονομάζονται βιο-ρεύματα. Τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα είναι αμφίδρομοι ρυθμιστές στα όρια των κυτταρικών μεμβρανών, καθορίζοντας έτσι όλες τις βασικές διαδικασίες της ζωτικής δραστηριότητας του κυττάρου. Οι διεργασίες στο νευρικό σύστημα έχουν ηλεκτρικό χαρακτήρα. Η νευρική ώση είναι ηλεκτρικής φύσης και διαδίδεται με τη μορφή δυναμικού ενέργειας και αποτελεί ένα ηλεκτρικό σήμα κατά μήκος των νευρώνων που διαδίδεται σε μεγάλη απόσταση. Με τον τρόπο αυτό η πληροφορία διαβιβάζεται από τα αισθητήρια όργανα στο εγκέφαλο και από εκεί στους μυς και τους αδένες.

Ένα ηλεκτρικό σήμα μπορεί να μετρηθεί με εφαρμογή ηλεκτροδίων σε οποιαδήποτε δύο σημεία του σώματος. Για παράδειγμα, η ηλεκτροεγκεφαλογραφία καταγράφει ένα σχετικά αδύναμο, ταχέως μεταβαλλόμενο σήμα του εγκεφάλου, δηλαδή την ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου. Τα ηλεκτρικά σήματα ρυθμίζουν επίσης και τη λειτουργία της καρδιάς, όπου ένας μεγάλος αριθμός κυττάρων του μυοκαρδίου διεγείρεται και η καρδιά γίνεται μια ισχυρή «ηλεκτρική γεννήτρια». Οι ιστοί του σώματος, έχοντας υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, επιτρέπουν την καταγραφή των ηλεκτρικών σημάτων της καρδιάς από την επιφάνεια του σώματος. Το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) καταγράφει το ηλεκτρικό δυναμικό της καρδιάς και είναι περίπου 100 φορές πιο ισχυρό σε σχέση με αυτό του εγκεφάλου. Ο τρίτος τύπος σήματος, το επιφανειακό ηλεκτρικό δυναμικό, είναι συγκρίσιμο σε μέγεθος με αυτό που παράγεται από τον καρδιακό μυ, αλλά αλλάζει πιο αργά.

Η ζωή στη Γη είχε προσαρμοστεί σε ένα ορισμένο επίπεδο Η/Μ πεδίων, επομένως, μια απότομη και σημαντική αύξηση της έκθεσής της στα τεχνητά Η/Μ πεδία τον 20<sup>ο</sup> και τον 21<sup>ο</sup> αιώνα προκαλεί πίεση στις προσαρμοστικές ικανότητές της.

Τα ηλεκτρικά πεδία χαμηλής συχνότητας επηρεάζουν το ανθρώπινο σώμα επιδρώντας στα φορτισμένα σωματίδια, που υπάρχουν μέσα σ' αυτό. Τα ηλεκτρικά πεδία επηρεάζουν την κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά του σώματος, δημιουργούν ηλεκτρικές τάσεις μέσα στο σώμα και προκαλούν τη ροή του ρεύματος μέσω του σώματος προς το έδαφος. Τα μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας προκαλούν ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Όταν η έντασή τους είναι αρκετά μεγάλη, μπορούν να προκαλέσουν διέγερση των νεύρων και των μυών ή να επηρεάσουν άλλες βιολογικές διεργασίες, όντας όμως πολύ μικρά σε σύγκριση με εκείνα που προκαλούν ηλεκτροπληξία. Η βασικότερη βιολογική επίδραση των Η/Μ πεδίων υψηλότερων συχνοτήτων είναι η θέρμανση του σώματος που εκτίθεται σ' αυτά, λόγω δινορευμάτων.

Ένα ερέθισμα προκαλεί βιολογικές αντιδράσεις στο ανθρώπινο σώμα, οι οποίες δεν είναι απαραίτητα επιβλαβείς. Το σώμα μας διαθέτει εξελιγμένους μηχανισμούς προσαρμογής σε πολλά και ποικίλα ερεθίσματα τα οποία οφείλονται στο φυσικό περιβάλλον. Όμως δεν διαθέτει επαρκείς μηχανισμούς αντιστάθμισης για όλες τις βιολογικές επιδράσεις. Αλλαγές που είναι μη αναστρέψιμες και πιέζουν το σύστημα για μεγάλες χρονικές περιόδους μπορεί να αποτελούν κίνδυνο για την υγεία.

Οι τρέχουσες κατευθυντήριες γραμμές των Διεθνών Οργανισμών έχουν ως στόχο την προστασία των πολιτών από την θέρμανση που προκαλούν οι σχετικά υψηλές συχνότητες,

κυρίως σε μακροχρόνια έκθεση σε Η/Μ πεδία. Στο επίκεντρο αυτών των πεδίων είναι και οι γραμμές μεταφοράς υψηλής και μεσαίας τάσης. Το 1996 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) ξεκίνησε ένα μεγάλο επιστημονικό έργο με συμμετοχή ερευνητών από διάφορους κλάδους και χώρες. Ο στόχος του έργου είναι η μελέτη των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία του ανθρώπου από πολλές και διαφορετικές πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [1]. Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν δημοσιευθεί πάνω από 25.000 άρθρα με θέμα τις επιπτώσεις στην υγεία και ιατρικών εφαρμογών των μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Ο ΠΟΥ ανακοίνωσε ότι δεν υπάρχουν ακόμη επαρκείς ενδείξεις για τις συνέπειες στην υγεία από την έκθεση σε χαμηλά πεδία και επισήμανε ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα που αφορά τις βιολογικές επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Οι μελέτες για την συσχέτιση έκθεσης σε ΗΜΠ με ασθένειες και παθήσεις, με έμφαση σε θέματα του καρκίνου είναι αμφιλεγόμενα. Σε μερικές επιδημιολογικές μελέτες παρατηρήθηκαν μικρές αυξήσεις στον κίνδυνο παιδικής λευχαιμίας σε παιδιά που κατοικούσαν κοντά στις πηγές μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο, δεν έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι αυξήσεις αυτές σχετίζονται με την έκθεση σε πεδία και δεν προέρχονται από άλλες αιτίες. Η έρευνα για την πρόκληση του καρκίνου από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος των επιστημόνων τα τελευταία χρόνια. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 ξεκίνησαν οι μελέτες των πιθανών καρκινογόνων επιδράσεων στον άνθρωπο των πεδίων βιομηχανικών συχνοτήτων (50 και 60 Hz). Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία από υψηλότερες συχνότητες, όπως για παράδειγμα η χρήση κινητών τηλεφώνων σε συχνότητες των MHz.

Οι εργαστηριακές μελέτες σε κύτταρα στοχεύουν να αποσαφηνίσουν τους θεμελιώδεις μηχανισμούς που συνδέουν την έκθεση στο Η/Μ πεδίο με τις βιολογικές επιδράσεις. Προσπαθούν να εντοπίσουν τους μηχανισμούς που προέρχονται από τις μεταβολές σε κυτταρικό ή μοριακό επίπεδο εξαιτίας των Η/Μ πεδίων. Ένας άλλος τύπος μελέτης, που περιλαμβάνει πειράματα με πειραματόζωα, πραγματοποιείται σε συνθήκες που προσομοιάζουν αυτές της πραγματικής ζωής και παρέχουν στοιχεία τον καθορισμό ασφαλών επιπέδων έκθεσης των ανθρώπων στα Η/Μ πεδία.

Οι επιδημιολογικές μελέτες ή οι μελέτες που είναι αφιερωμένες στην ανθρώπινη υγεία είναι άλλη μια άμεση πηγή πληροφοριών σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε Η/Μ πεδία. Αυτές οι μελέτες διερευνούν την αιτία και την κατανομή των ασθενειών σε πραγματικές συνθήκες, σε πληθυσμιακές και επαγγελματικές ομάδες, στην προσπάθεια στατιστικής συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης σε Η/Μ πεδία και της εμφάνισης μιας συγκεκριμένης ασθένειας ή δυσμενούς επίδρασης στην υγεία. Η εύρεση συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης σε Η/Μ πεδία και εμφάνισης μιας συγκεκριμένης ασθένειας δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η έκθεση προκάλεσε την ασθένεια αυτή. Απαιτείται επίσης συνεπής και ισχυρή σχέση μεταξύ έκθεσης και αποτελέσματος, δόσης και απόκρισης, αξιόπιστη βιολογική εξήγηση, ευρήματα μελετών με πειραματόζωα.

### 1.1.1. Τα σημερινά πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου

Τα πρότυπα για τον περιορισμό της υπερβολικής έκθεσής σε Η/Μ πεδίο ποικίλουν από χώρα σε χώρα, όπου η κάθε μία θέτει τα δικά της εθνικά όρια έκθεσης του πληθυσμού σε Η/Μ πεδία. Ωστόσο, η πλειονότητα αυτών των Εθνικών Προτύπων βασίζεται στις κατευθυντήριες γραμμές που ορίζει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP), η οποία είναι μια μη-κυβερνητική οργάνωση, επίσημα αναγνωρισμένη από τον ΠΟΥ. Η ICNIRP αξιολογεί επιστημονικά αποτελέσματα από όλο τον κόσμο. Μετά τη συγκέντρωση όλων των δεδομένων, η ICNIRP εκδίδει οδηγίες που συνιστούν ανώτατα όρια έκθεσης. Οι οδηγίες αυτές επανεξετάζονται και ενημερώνονται εάν είναι απαραίτητο σε δοσμένα χρονικά διαστήματα. Στον Πίνακα 1.1 παρέχεται η σύνοψη των κατευθυντήριων γραμμών έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία του ICNIRP έτσι όπως ίσχυαν το 1998 [2]. Τα όρια της έκθεσης μπορεί να διαφέρουν περίπου  $\pm 10\%$  μεταξύ των πρώην σοσιαλιστικών δημοκρατιών και των χωρών της Δύσης. Με την παγκοσμιοποίηση του εμπορίου και την ταχεία εισαγωγή των τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως, υπάρχει σαφής ανάγκη για ενιαία πρότυπα. Καθώς οι χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης εξετάζουν τώρα νέα πρότυπα, ο ΠΟΥ ξεκίνησε πρόσφατα μια νέα πρωτοβουλία για την εναρμόνιση των κατευθυντήριων γραμμών έκθεσης σε όλες τις χώρες. Τα μελλοντικά πρότυπα θα βασίζονται στα αποτελέσματα του Διεθνούς Έργου για τα Η/Μ πεδία που οργανώνει ο ΠΟΥ.

**Πίνακας 1.1. Σύνοψη των ορίων έκθεσης σε Η/Μ πεδία του ICNIRP (1998)**

	Συχνότητα ισχύος στην Ευρώπη		Συχνότητα σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας		Συχνότητα φούρνου μικροκυμάτων
Συχνότητα	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Μαγνητικό πεδίο ( $\mu\text{T}$ )	Πυκνότητα ισχύος ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Πυκνότητα ισχύος ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Πυκνότητα ισχύος ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
Όρια έκθεσης για το κοινό	5 000	100	4.5	9	10
Όρια έκθεσης για τους εργαζόμενους	10 000	500	22.5	45	

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα όρια έκθεσης στα Η/Μ πεδία δεν αποτελούν ένα οριακό είδος ασφάλειας. Δεν υπάρχουν τιμές πεδίων πάνω από τις οποίες υπάρχει κίνδυνος για την υγεία και κάτω από αυτές δεν υπάρχει. Στην πραγματικότητα ο κίνδυνος αυξάνεται σταδιακά από τις χαμηλές τιμές προς τις υψηλότερες. Οι κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP δείχνουν ότι, κάτω από ένα δεδομένο όριο, η έκθεση στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι ασφαλής σύμφωνα με τις σημερινές επιστημονικές γνώσεις. Ωστόσο, δεν συνεπάγεται αυτόματα ότι πάνω από αυτό το όριο, η έκθεση είναι επιβλαβής.

Για τον προσδιορισμό των ορίων έκθεσης οι επιστημονικές μελέτες πρέπει να ορίζουν το επίπεδο κατωφλίου, στο οποίο παρατηρούνται οι πρώτες επιπτώσεις στην υγεία. Οι κατευθυντήριες γραμμές προκύπτουν από τις μελέτες σε πειραματόζωα, επειδή δεν μπορούν να γίνουν σε ανθρώπους. Οι μικρές αλλαγές στη συμπεριφορά των ζώων σε χαμηλά επίπεδα της έκθεσής τους στα Η/Μ πεδία συχνά προηγούνται των πιο δραστηκών αλλαγών στην υγεία τους σε υψηλότερα επίπεδα [3]. Η μη φυσιολογική συμπεριφορά είναι ένας πολύ ευαίσθητος δείκτης μιας βιολογικής απόκρισης και έχει οριστεί ως η χαμηλότερη παρατηρήσιμη δυσμενής επίδραση στην υγεία. Οι κατευθυντήριες γραμμές

συνιστούν την αποφυγή εκείνων των επιπέδων έκθεσης στα Η/Μ πεδία, στα οποία γίνονται αισθητές οι αλλαγές της συμπεριφοράς των πειραματόζωνων. Αυτό το επίπεδο κατωφλίου που αφορά στη συμπεριφορά των πειραματόζωνων δεν είναι ίσο με το επιτρεπτό όριο. Η ICNIRP εισάγει έναν συντελεστή ασφαλείας ίσο με 10 για τον προσδιορισμό ορίων επαγγελματικής έκθεσης και έναν συντελεστή ίσο με 50 για το ευρύ κοινό. Αυτό γίνεται για να μειωθεί η πιθανότητα σφάλματος συσχέτισης των αποτελεσμάτων σε πειραματόζωα με αυτά που θα εμφανίζονταν στον άνθρωπο.

Οι τεχνικοί (ενήλικες), που εργάζονται σε συνθήκες έκθεσης σε Η/Μ πεδία, γνωρίζουν τους κινδύνους και λαμβάνουν τις κατάλληλες προφυλάξεις ως επαγγελματίες του χώρου. Επίσης, εκτίθενται στα εν λόγω πεδία για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, το ευρύ κοινό, αποτελούμενο από άτομα όλων των ηλικιών και ευπαθών ομάδων δεν έχει τη γνώση για την έκθεση σε Η/Μ πεδία. Εξάλλου, δεν μπορούμε να περιμένουμε από τους πολίτες να λαμβάνουν προφυλάξεις για την ελαχιστοποίηση ή την αποφυγή της έκθεσης σε τέτοια πεδία.

Όταν το ανθρώπινο σώμα εκτίθεται σε Η/Μ πεδία χαμηλής συχνότητας επάγονται ηλεκτρικά ρεύματα στο ανθρώπινο σώμα, τα οποία δεν συνδέονται με τη φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού μας, όπως τα ρεύματα που προκύπτουν από διάφορες βιοχημικές αντιδράσεις [4]. Τα κύτταρα και οι ιστοί μας δεν μπορούν να ανιχνεύσουν τα ρεύματα εξωτερικής προέλευσης όταν είναι μικρότερα από τα φυσιολογικά. Επομένως, σε χαμηλές συχνότητες, οι οδηγίες της ICNIRP για τα όρια έκθεσης διασφαλίζουν ότι η ένταση των ρευμάτων που επάγονται από τα Η/Μ πεδία είναι χαμηλότερη από την ένταση των φυσιολογικών ρευμάτων του σώματος. Η βασική επίδραση των πεδίων των ραδιοσυχνότητων και των μικροκυμάτων είναι η θέρμανση του βιολογικού ιστού. Συνεπώς, οι οδηγίες έκθεσης της ICNIRP για τις συχνότητες αυτές έχουν στόχο την πρόληψη των επιπτώσεων στην υγεία από τοπική ή ολική θέρμανση του σώματος.

Οι κατευθυντήριες γραμμές ορίζονται για το μέσο πληθυσμό και δεν μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα στις ανάγκες όλων των ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού. Οι οδηγίες για την ατμοσφαιρική ρύπανση, για παράδειγμα, δεν βασίζονται στις ειδικές ανάγκες των ασθματικών. Ομοίως, οι κατευθυντήριες γραμμές για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία δεν έχουν σχεδιαστεί για να προστατεύουν τους ανθρώπους με εμφυτευμένες ιατρικές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι καρδιακοί βηματοδότες, από παρεμβολές. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι κατασκευαστές και οι κλινικοί ιατροί θα πρέπει να δίνουν συμβουλές σχετικά με τα επίπεδα έκθεσης που πρέπει να αποφεύγονται.

Οι κρατικές υπηρεσίες και οι τοπικές αρχές έχουν την ευθύνη για τον έλεγχο του επιπέδου των Η/Μ πεδίων γύρω από τις γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, σταθμούς κινητής τηλεφωνίας και οποιαδήποτε άλλη πηγή Η/Μ πεδίων, που έχει πρόσβαση το ευρύ κοινό. Στις υποχρεώσεις τους συμπεριλαμβάνεται η διασφάλιση της συμμόρφωσης με τις οδηγίες. Ο κατασκευαστής των ηλεκτρονικών συσκευών είναι υπεύθυνος για την τήρηση των ορίων έκθεσης για το κοινό. Επιπλέον, πολλές ενώσεις καταναλωτών πραγματοποιούν ελέγχους σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού εκτίθεται σε Η/Μ πεδία που δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια στην καθημερινότητά του και είναι σημαντικά μικρότερα από αυτά. Ωστόσο, υπάρχουν μεμονωμένες υπερβάσεις που διαρκούν μικρά χρονικά διαστήματα. Σύμφωνα με την ICNIRP, για τις εκθέσεις σε ραδιοσυχνότητες και μικροκύματα θα πρέπει να υπολογίζεται η μέση τιμή για αυτό το χρονικό διάστημα με σκοπό την καταγραφή αθροιστικών επιπτώσεων. Η ICNIRP ορίζει τα 6 λεπτά ως αποδεκτή βραχυπρόθεσμη έκθεση σε τέτοια πεδία με τιμή της έντασης πάνω από τα επιτρεπτά όρια [2]. Αντίθετα, για την έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας η ICNIRP δεν συνιστά τον υπολογισμό μέσου όρου στις οδηγίες που εξέδωσε. Στις περιπτώσεις αυτές υπεισέρχεται

ο παράγοντας σύζευξης μεταξύ του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και του ανθρώπινου σώματος. Η αλληλεπίδραση μεταξύ Η/Μ πεδίου και οργανισμού εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του σώματος, τον τύπο του ιστού και τον προσανατολισμό του σώματος σε σχέση με το πεδίο. Η ICNIRP θεωρεί πάντα ότι η σύζευξη του πεδίου με το εκτεθειμένο άτομο πρέπει να θεωρείται ως η μέγιστη δυνατή για τη μεγαλύτερη προστασία του ανθρώπου.

Οι διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές και τα Εθνικά Πρότυπα Ασφάλειας για τα Η/Μ πεδία προκύπτουν από τα επιστημονικά δεδομένα που υπάρχουν μέχρι σήμερα και στοχεύουν στη διασφάλιση ότι τα Η/Μ πεδία που υπάρχουν στο περιβάλλον δεν είναι επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπου. Οι οδηγίες επανεξετάζονται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα και ενημερώνονται εάν είναι απαραίτητο. Υπάρχει πρόταση να ληφθούν πρόσθετα μέτρα για την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων που απομένουν, ενώ η επιστήμη βελτιώνει τις γνώσεις της σχετικά με τις συνέπειες στην υγεία. Ωστόσο, η βαρύτητα των αποδεικτικών στοιχείων για κίνδυνο για την υγεία, καθώς επίσης και το μέγεθος και η φύση των πιθανών συνεπειών διαμορφώνουν την πολιτική που θα εφαρμοστεί για την πρόληψη των συνεπειών της έκθεσης σε πεδία.

Ένας από τους στόχους του Διεθνούς Έργου του ΠΟΥ για τα Η/Μ πεδία είναι να βοηθήσει τις Εθνικές Αρχές να σταθμίσουν τα οφέλη και τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία από τη χρήση τεχνολογιών Η/Μ πεδίων. Επιπλέον, ο ΠΟΥ εκδίδει συστάσεις για προστατευτικά μέτρα, όταν αυτά απαιτούνται. Στην λογική αυτή, ο ΠΟΥ εξέδωσε μια σειρά συστάσεων:

- Αυστηρή τήρηση των υφιστάμενων εθνικών ή διεθνών προτύπων ασφάλειας. Αυτά τα πρότυπα έχουν ως βάση τις σημερινές επιστημονικές γνώσεις και αναπτύσσονται για να προστατεύουν τον πληθυσμό με μεγάλο συντελεστή ασφάλειας.
- Εφαρμογή απλών προστατευτικών μέτρων. Η δημιουργία φρακτών γύρω από τις πηγές ισχυρού Η/Μ πεδίου βοηθά στην αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε περιοχές όπου μπορεί να σημειωθεί υπέρβαση των ορίων έκθεσης.
- Διαβούλευση με τοπικές αρχές και κοινό για τη χωροθέτηση νέων γραμμών μεταφοράς και σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Κατά τη λήψη τέτοιων αποφάσεων απαιτείται να ληφθούν υπόψη η αισθητική του χώρου και οι ευαισθησίες του κοινού.
- Ένα σύστημα πληροφόρησης και επικοινωνίας μεταξύ επιστημόνων, κυβερνήσεων, βιομηχανιών και κοινού για θέματα υγείας, μπορεί να συμβάλει στη ευαισθητοποίηση στην έκθεση σε Η/Μ πεδία, μειώνοντας τυχόν δυσπιστίες και φόβους.

### **1.1.2. Επιδράσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε όργανα και ιστούς**

Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα σχετικά με τη βιολογική επίδραση των Η/Μ πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) και των μικροκυμάτων. Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας ραδιοσυχνότητας (RF) σε ιστούς και συστήματα οργάνων έχουν αποδοθεί σε θερμική δράση αυτής της ακτινοβολίας. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι επιδράσεις των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και των πεδίων χαμηλών συχνοτήτων (ELF) σε κύρια συστήματα οργάνων των ανώτερων οργανισμών με βάση το κατώφλι του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (Specific Absorption Rate ή SAR).

#### **Νευρικό σύστημα**

Για πρώτη φορά στη Σοβιετική Ένωση στις δεκαετίες 1950 και 1960 είχαν πραγματοποιηθεί έρευνες πάνω σε επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον νευρικό ιστό. Στις μελέτες αυτές είχαν

αναφερθεί οι αλλαγές στη συμπεριφορά των ζώων και οι μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των νευρών ως συνέπεια της έκθεσης σε Η/Μ πεδία [5]. Η ακτινοβολία των ραδιοσυχνοτήτων, όπως αναφέρεται, επηρεάζει απομονωμένα παρασκευάσματα νευρικού ιστού, το κεντρικό νευρικό σύστημα, τη χημεία και την ιστολογία του εγκεφάλου, καθώς επίσης και τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό.

Στις μελέτες με παρασκευάσματα νευρών *in vitro* έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στη συχνότητα πυροδότησης των νευρώνων των θαλάσσιων λαγών του γένους “*Aplysia*”, καθώς και στην περίοδο ανερεθιστότητας απομονωμένων ισχιακών νευρών βατράχου που εκτέθηκαν σε μικροκύματα συχνότητας 2,45 GHz με τιμές του SAR που υπερβαίνουν τα 5 W/kg [6-8]. Οι επιδράσεις αυτές συσχετίστηκαν με μεγάλη πιθανότητα με τη θέρμανση παρασκευασμάτων των νευρών, δεδομένου ότι πολύ υψηλότερες τιμές του SAR δεν έχουν βρεθεί να προκαλούν αλλαγές στις ηλεκτρικές ιδιότητες των απομονωμένων νευρών όταν ελέγχεται η θερμοκρασία τους [9, 10]. Οι μελέτες των απομονωμένων παρασκευασμάτων ιστού της καρδιάς έδωσαν ενδείξεις βραδυκαρδίας ως αποτέλεσμα έκθεσης σε ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων σε μη θερμικές πυκνότητες ισχύος [11], αν και ορισμένες από τις αναφερόμενες επιδράσεις μπορεί να ήταν διαφορετικής προέλευσης, όπως ρευμάτων που επάγονται στα ηλεκτρόδια καταγραφής [12-14]. Αρκετές ομάδες ερευνητών έχουν επισημάνει ότι τα πεδία ραδιοσυχνοτήτων που δεν προκαλούν θερμικά αποτελέσματα στους ιστούς μπορούν να αλλάξουν τη δέσμευση των ιόντων ασβεστίου  $Ca^{2+}$  από τις επιφάνειες των νευρικών κυττάρων σε απομονωμένα ημισφαίρια του εγκεφάλου και κύτταρα νευροβλαστώματος καλλιεργημένα *in vitro* [15]. Αυτό το φαινόμενο, ωστόσο, παρατηρείται μόνο όταν το πεδίο RF διαμορφώνεται κατά πλάτος σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες και το μέγιστο αποτέλεσμα εμφανίζεται σε συχνότητα διαμόρφωσης των 16 Hz. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα έχει βρεθεί και σε μεμονωμένες καρδιές βατράχων [16]. Η σημασία των αλλαγών στη δέσμευση  $Ca^{2+}$  για τις λειτουργικές ιδιότητες των νευρικών κυττάρων δεν έχει τεκμηριωθεί και δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις σημαντικού κινδύνου για την υγεία από την έκθεση σε πεδία ραδιοσυχνοτήτων χαμηλής έντασης με διαμόρφωση πλάτους. Τα αποτελέσματα των *in vivo* μελετών επίδρασης τόσο των παλμικών όσο και των ημιτονοειδών σημάτων ραδιοσυχνοτήτων στην ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου έχουν δείξει ότι οι παροδικές επιδράσεις μπορούν να συμβούν όταν οι τιμές του SAR υπερβαίνουν 1 W/kg [17, 18].

Υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που δείχνουν ότι η χολινεργική δραστηριότητα του εγκεφαλικού ιστού επηρεάζεται από τα πεδία ραδιοσυχνοτήτων με πολύ χαμηλές τιμές του SAR όπως 0,45 W/kg [19]. Όταν οι γάτες εκτίθενται σε μη θερμική ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων διαμορφωμένη κατά πλάτος με συχνότητες μικρότερες των 25 Hz, τότε επηρεάζεται το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) τους. Οι συχνότητες αυτές είναι εντός του φάσματος συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στα EEG [20]. Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο ρυθμός ανταλλαγής των ιόντων  $Ca^{2+}$  του εγκεφαλικού ιστού της γάτας *in vivo* αλλάζει ως αποτέλεσμα έκθεσης σε παρόμοια πεδία [21]. Δεν παρατηρήθηκαν ανάλογες επιδράσεις στη δέσμευση ιόντων  $Ca^{2+}$  στον εγκεφαλικό ιστό του αρουραίου από την ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων [22], αν και τα πεδία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παλμικά σε συχνότητες EEG και όχι ημιτονοειδή διαμορφωμένα κατά πλάτος.

Αλλαγές έχουν καταγραφεί στη χημεία και τη δομή του εγκεφάλου μετά την έκθεση των πειραματόζων σε πεδία ραδιοσυχνοτήτων υψηλής έντασης [23]. Συγκεκριμένα, οι μειωμένες συγκεντρώσεις αδρεναλίνης (επινεφρίνης), νοραδρεναλίνης (νορεπινεφρίνης), ντοπαμίνης και 5-υδροξυτρυπταμίνης, οι μεταβολές στη δομή των νευραξόνων, ο μειωμένος αριθμός κυττάρων Purkinje και οι δομικές αλλοιώσεις στον υποθάλαμο. Γενικά, τα αποτελέσματα αυτά έχουν

συσχετιστεί με εκείνες τις εντάσεις ραδιοσυχνοτήτων που προκαλούν σημαντική τοπική θέρμανση στον εγκέφαλο.

Εκτεταμένες μελέτες έχουν διεξαχθεί για την ανίχνευση πιθανών επιδράσεων της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων στον αιματοεγκεφαλικό φραγμό [24, 25]. Σε αρκετές μελέτες υποστηρίζεται η ιδέα ότι η μη θερμική ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να επηρεάσει τη διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού. Όμως, τα περισσότερα πειραματικά ευρήματα δείχνουν ότι τέτοια αποτελέσματα προκύπτουν από τοπική θέρμανση του κεφαλιού σε απόκριση σε τιμές SAR άνω των 2 W/kg.

Αν και αρκετές αναφορές έχουν προτείνει ότι η μη θερμική ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να επηρεάσει τη διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού, τα περισσότερα από τα πειραματικά ευρήματα δείχνουν ότι τέτοια αποτελέσματα προκύπτουν από τοπική θέρμανση στο κεφάλι λόγω της ακτινοβολίας με τιμές του SAR άνω των 2 W/kg. Οι αλλαγές στον ρυθμό της εγκεφαλικής ροής του αίματος, αντί για τις άμεσες αλλαγές στη διαπερατότητα για τα μόρια του ιχνηθέτη, μπορούν επίσης να ερμηνευθούν εσφαλμένα ως αλλαγές στις ιδιότητες του αιματοεγκεφαλικού φραγμού.

Οι επιδράσεις των παλμικών και ημιτονοειδών πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) στην ηλεκτρική δραστηριότητα του νευρικού συστήματος έχουν επίσης μελετηθεί εκτενώς [26, 27]. Γενικά, μόνο τα ημιτονοειδή ηλεκτρικά πεδία υψηλής έντασης ή παλμικά μαγνητικά πεδία μεγάλης συχνότητας προκαλούν σημαντική πυκνότητα ρεύματος στον ιστό (περίπου 0,1-1,0 A/m<sup>2</sup> ή υψηλότερη) ικανή να αλλάξει τη διέγερση των νευρώνων και τη μετάδοση της νευρικής ώσης στη σύναψη ή να δημιουργήσει νευρομυϊκή διέγερση.

Έχει παρατηρηθεί χαμηλότερο κατώφλι για την επαγωγή οπτικών φωσφαινίων (που θα συζητηθούν στην επόμενη ενότητα) και για την επίδραση στην ηλεκτρική δραστηριότητα των νευρώνων (pacemakers) των θαλάσσιων λαγών "Aplysia", όταν η συχνότητα του Η/Μ πεδίου ήταν παραπλήσια με την ενδογενή συχνότητα ενεργοποίησης των νευρώνων [28]. Ωστόσο, αυτά τα αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί μόνο για τις εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (ELF). Πρόσφατες μελέτες με συμμετοχή των εθελοντών που εκτέθηκαν σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 60Hz με εντάσεις συγκρίσιμες με αυτές των γραμμών υψηλής τάσης δεν έδειξαν σταθερές επιδράσεις στα ηλεκτροεγκεφαλογραφήματά τους (EEG) [29]. Μικρές αλλαγές παρατηρήθηκαν στον χρόνο αντίδρασής τους και στον καρδιακό ρυθμό, αλλά οι διακυμάνσεις αυτές ήταν εντός φυσιολογικών ορίων.

### **Σύστημα όρασης του ανθρώπου**

Οι μελέτες ανάπτυξης καταρράκτη εξαιτίας της έκθεσης του ματιού σε ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων (RF) υψηλής έντασης διαρκούν πάνω από 30 χρόνια. Σε πολλά περάματα με κουνέλια έγινε η προσπάθεια να προσδιοριστεί η εξάρτηση της καταρρακτογένεσης από τη συχνότητα, την ένταση των πεδίων ραδιοσυχνοτήτων και τον χρόνο έκθεσης του οργανισμού [30-32]. Γενικά, η χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος κοντινού πεδίου συχνοτήτων 1-10 GHz που οδηγεί σε καταρράκτη είναι 100 mW/cm<sup>2</sup> με διάρκεια έκθεσης μίας ώρας τουλάχιστον. Η πλειονότητα των δεδομένων δείχνει ότι ο μηχανισμός θόλωσης του κρυσταλλοειδούς φακού είναι θερμικός. Τα παλμικά πεδία μικροκυμάτων και τα ημιτονοειδή πεδία φαίνεται να έχουν παρόμοια όρια για την ανάπτυξη του καταρράκτη [23]. Οι επαναλαμβανόμενες εκθέσεις με εντάσεις πεδίου κάτω του ορίου που οδηγεί στη δημιουργία καταρράκτη δεν ήταν επικίνδυνες όταν ο χρόνος μεταξύ των εκθέσεων είναι αρκετά μεγάλος ώστε ο ιστός να επανέλθει στην κανονική του θερμοκρασία [5]. Όταν το μήκος κύματος του πεδίου ραδιοσυχνοτήτων δεν είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις του οφθαλμικού βολβού, τότε δεν



δημιουργείται καταρράκτης ακόμη και σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες ισχύος. Η μεταφορά αυτών των συμπερασμάτων από τα πειραματόζωα στον άνθρωπο εγείρει προβληματισμούς. Όμως, οι δομικές ομοιότητες και συγκρίσιμες διαστάσεις του οφθαλμικού βολβού επιτρέπουν στους επιστήμονες να ισχυριστούν ότι η κατώτατη πυκνότητα ισχύος που απαιτείται για την παραγωγή καταρράκτη αναμένεται να είναι παρόμοια σε κουνέλια και ανθρώπους.

Οι μελέτες σε πιθήκους έδειξαν την πιθανή αύξηση της αγγειακής διαρροής υπό την επίδραση παλμικής ακτινοβολίας συχνότητας 2,45 GHz σχετικά χαμηλής πυκνότητας ισχύος όταν οι οφθαλμικές σταγόνες με μηλεϊνική τιμολόλη εγχύονται στο μάτι. Η ουσία αυτή μειώνει την ενδοφθάλμια πίεση ελαττώνοντας την παραγωγή του υδατοειδούς υγρού. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε για χαμηλή πυκνότητα ισχύος του  $1 \text{ mW/cm}^2$  που αντιστοιχεί σε ενδοφθάλμιο SAR των  $0,26 \text{ W/kg}$  [33]. Συνεπώς, υπάρχει πιθανότητα τέτοια πεδία ραδιοσυχνοτήτων να προκαλέσουν την οφθαλμική βλάβη σε ανθρώπους που υποβάλλονται σε θεραπεία με μηλεϊνική τιμολόλη εξαιτίας του γλαυκώματος.

Αρκετές φορές, αναφέρονται φωτοψίες ή φωσφαίνια, τα οποία παρουσιάζονται σαν απάντηση σε έκθεση σε πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF). Το οπτικό αυτό φαινόμενο είναι γνωστό σχεδόν έναν αιώνα. Οι επιστήμονες έδειξαν ότι χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία με παλμικές ή ημιτονοειδείς κυματομορφές με ρυθμό μεταβολής πάνω από  $1,3 \text{ T/sec}$  και συχνότητα κάτω των  $100 \text{ Hz}$  παράγουν φωσφαίνια [34]. Στην περίπτωση των ημιτονοειδών πεδίων απαιτείται συχνότητα των  $20 \text{ Hz}$ , ενώ η πυκνότητα ροής των  $8 \text{ mT}$  είναι αρκετή για την πιθανή παραγωγή των μαγνητοφωσφαίνιων [35]. Παρόμοια εξάρτηση από τη συχνότητα έχει παρατηρηθεί για τα ηλεκτροφωσφαίνια που παράγονται όταν τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται εφαπτομενικά με το μέτωπο κοντά στα μάτια [36]. Τα στοιχεία των ερευνών υποδηλώνουν ότι τα φωσφαίνια δημιουργούνται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα εξαιτίας των επαγόμενων ρεύματων σε αυτήν την περιοχή τα οποία προκαλούν οπτικές αποκρίσεις παρόμοιες με αυτές που προκύπτουν από τη φωτεινή διέγερση [34]. Επιπλέον, υπάρχουν επιστημονικά δεδομένα για τις αλλαγές στα οπτικά προκλητά δυναμικά (VEP) ως αποτέλεσμα έκθεσης σε μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) με πυκνότητα ροής από 5 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την παραγωγή φωσφαίνιων [7].

### **Ενδοκρινικό σύστημα**

Από πολλές μελέτες σε τρωκτικά και πιθήκους οι επιστήμονες συμπεραίνουν ότι η έκθεση στη ακτινοβολία ραδιοσυχνοτήτων που προκαλεί θέρμανση των ιστών οδηγεί σε ενδοκρινικές μεταβολές, όπως η αύξηση της κορτικοστερόνης στο πλάσμα του αίματος [5, 37, 38]. Η αύξηση αυτή στο αίμα των αρουραίων παρατηρήθηκε για τις τιμές SAR πάνω από τα  $3 \text{ W/kg}$ . Η κορτικοστερόνη εξαρτάται από την έκκριση αδρενοκορτικοτροπικών ορμονών από την υπόφυση [39]. Επιπλέον, χαμηλά επίπεδα θυρεοειδικών ορμονών έχουν επίσης καταγραφεί για τα ίδια επίπεδα της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων και το αποτέλεσμα αυτό έχει συσχετιστεί με αναστολή της έκκρισης θυρεοτροπίνης από την υπόφυση [40, 41]. Γενικά, η συγκέντρωση μιας ορμόνης επανέρχεται στην φυσιολογική τιμή όταν σταματάει η έκθεση της σε ραδιοσυχνότητες. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η θέρμανση των ιστών με πεδία ραδιοσυχνοτήτων μεταβάλλει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υποθαλάμου, της υπόφυσης, των επινεφριδίων και του θυρεοειδούς διαταράσσοντας έτσι τον μηχανισμό της ομοιόστασης [23]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η έκθεση αρουραίων σε παλμικά πεδία μικροκυμάτων συχνότητας 2,45 GHz διάρκειας δύο ετών δεν προκάλεσε ανιχνεύσιμες ενδοκρινικές αλλοιώσεις [41].

Μελέτες που αφορούν τον προσδιορισμό των πιθανών ενδοκρινικών επιδράσεων των Η/Μ πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) έχουν αντικρουόμενα αποτελέσματα [26]. Υπάρχουν αναφορές

για την αύξηση όπως και για τη μείωση ή τη σταθερότητα των συγκεντρώσεων των στεροειδών ορμονών στο πλάσμα του αίματος.

Το όριο για την πρόκληση αλλαγών στις συγκεντρώσεις της κορτικοστερόνης ή της τεστοστερόνης στο αίμα των σκύλων και των αρουραίων είναι πάνω από τα 10 kV/m για το ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας 60 Hz [42-44]. Κατά τη χρόνια έκθεση των πιθήκων σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 60 Hz με εντάσεις χαρακτηριστικές για τις περιοχές κοντά σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης παρατηρήθηκε μείωση στις συγκεντρώσεις των νευροδιαβιβαστών [45]. Όμως, δεν σημειώθηκε καμία αλλαγή στη φυσιολογία του σώματος ή τη συμπεριφορά των ζώων που εκτέθηκαν.

Η επίδραση των εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας πεδίων (ELF) στην λειτουργία της επίφυσης έχει μελετηθεί εκτενώς. Η αύξηση της παραγωγής της ορμόνης μελατονίνης κατά τις νυκτερινές ώρες ελαττώνεται [46]. Οι μεταβολές αυτές παρατηρήθηκαν μετά από 2-3 εβδομάδες έκθεσης σε ηλεκτρικά πεδία με εντάσεις που υπερβαίνουν τα 1,7 kV/m στον αέρα. Το φαινόμενο αυτό είναι αναστρέψιμο και οι τιμές της μελατονίνης επανέρχονται σε φυσιολογικά επίπεδα εντός των 3 ημερών από τον τερματισμό της έκθεσης. Παρόμοια επίδραση στη μελατονίνη που παράγεται από την επίφυση έχει παρατηρηθεί μετά την έκθεση των τρωκτικών σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο των 0,05 mT, το οποίο ήταν συνεχώς ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο με κύκλους των 5 λεπτών για 1 ώρα, ξεκινώντας 3,5 ώρες μετά τη δύση του ήλιου [47]. Το ενδιαφέρον για το φαινόμενο αυτό έχει επικεντρωθεί γύρω από τις επιδράσεις της μελατονίνης στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων και τις πιθανές καρκινοστατικές δράσεις της [48-50]. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν ποσοτικές πληροφορίες για τις τιμές κατωφλίου για τα πεδία που προκαλούν την αλλαγή της συγκέντρωσης της μελατονίνης. Δεν είναι επίσης σαφές εάν τα πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας ELF αλλάζουν άμεσα τις λειτουργίες των πενεαλοκυττάρων ή εάν η αναφερόμενη μεταβολή στην παραγωγή μελατονίνης της επίφυσης είναι δευτερογενής στα πλαίσια των επιπτώσεων των πεδίων στο νευρικό σύστημα. Περισσότερες μελέτες πρέπει να πραγματοποιηθούν για την αξιολόγηση της πιθανής επίδρασης των αλλαγών που προκαλούνται από το πεδίο στα επίπεδα της μελατονίνης που παράγεται από την επίφυση στη ρύθμιση φυσιολογικών δραστηριοτήτων του οργανισμού και στον κίνδυνο εκείνων των ειδών καρκίνων η εμφάνιση των οποίων σχετίζονται με το ενδοκρινικό σύστημα. Τα αποτελέσματα των ερευνών για τις επιδράσεις των πεδίων συχνότητας 60 Hz ή των διακοπτόμενων μαγνητικών πεδίων (switching fields) συνεχούς ρεύματος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των πιθανών επιδράσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων υψηλότερων συχνοτήτων.

### **Ανοσοποιητικό σύστημα**

Για τις επιδράσεις των πεδίων ραδιοσυχνότητας (RF) στα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος γνωρίζουμε από τα πειράματα τόσο *in vitro* όσο και *in vivo* [5]. Ο μετασχηματισμός των λεμφοβλαστών και οι αλλαγές στην ανταπόκρισή τους στα μιτογόνα έχουν καταγραφεί, αν και οι επιδράσεις που παρατηρήθηκαν σε διαφορετικά εργαστήρια ήταν διαφορετικές. Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι το όριο του SAR για την αλλαγή των αποκρίσεων των λεμφοκυττάρων στα μιτογόνα είναι μεγαλύτερο από τα 4 W/kg τόσο για τα παλμικά πεδία όσο και για τα ημιτονοειδή [51-53]. Όταν η έκθεση στα πεδία αυτά προκαλεί θέρμανση των ιστών μειώνεται η δραστηριότητα των φυσικών κυττάρων «φονιάδων» και ενεργοποιούνται τα μακροφάγα κύτταρα [54-56]. Οι αλλαγές που παρατηρούνται στα τμήματα του ανοσοποιητικού συστήματος όταν οι πυκνότητες ισχύος ραδιοσυχνότητας προκαλούν την αύξηση της θερμοκρασίας των βιολογικών ιστών είναι συμβατές με τις αναμενόμενες επιδράσεις που προκύπτουν από την αυξημένη έκκριση των στεροειδών ορμονών στα αιμοφόρα αγγεία του σώματος [5, 56, 57]. Από την έκθεση των δίχρονων αρουραίων σε παλμικά

μικροκύματα συχνότητας 2,45 GHz (SAR, 0,4 W/kg) χωρίς κανένα θερμικό αποτέλεσμα για τον οργανισμό τους, δεν βρέθηκαν σημαντικές μόνιμες μεταβολές στις συγκεντρώσεις των λεμφοκυττάρων ή στις αποκρίσεις τους στη μιτογόνο διέγερση.

Πολλές μελέτες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί με σκοπό τον προσδιορισμό των επιδράσεων των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) στα τμήματα του ανοσοποιητικού συστήματος των οργανισμών. Τα in-vivo πειράματα σε πειραματόζωα έδειξαν την απουσία των σημαντικών επιπτώσεων στη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος [26, 29]. Βρέθηκαν μειωμένες αποκρίσεις σε μιτογόνα και μειωμένη τοξικότητα κυττάρων-στόχων για τα λεμφοκύτταρα που εκτέθηκαν in vitro σε παλμικά μαγνητικά πεδία ή σε πεδία ραδιοσυχνοτήτων (RF) ή σε πεδία συχνότητας 60 Hz διαμορφωμένα κατά πλάτος [58-61]. Αυτά τα φαινόμενα μπορεί να προέρχονται από τα ρεύματα που επάγονται στα κυτταρικά εναιωρήματα και έχουν υψηλές τιμές πυκνότητας.

Μια μελέτη ημιτονοειδούς ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου συχνότητας 60 Hz με εντάσεις συγκρίσιμες με εκείνες των πεδίων κοντά σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, δεν παρατηρήθηκαν επιπτώσεις στην φυσιολογική λειτουργία των περιφερικών λεμφοκυττάρων ανθρώπου και σκύλου που ελήφθησαν από δότες. Τα κύτταρα αυτά ήταν είτε φυσιολογικά ή είχαν μολυνθεί με ειδικά αντιγόνα [62].

#### **Αιμοποιητικό και καρδιαγγειακό σύστημα**

Έως σήμερα αρκετές μελέτες έχουν εντυπώσει στο ερώτημα των μακροπρόθεσμων συνεπειών των πεδίων ραδιοσυχνοτήτων με θερμικό ή μη αποτέλεσμα στη χημεία του αίματος, δηλαδή στις χημικές ενώσεις και τον αριθμό των κυττάρων του αίματος. Τα πεδία των μικροκυμάτων συχνότητας 2,45 GHz και ένα μέσο SAR για το ολόκληρο σώμα μικρότερο από 2,5 W/kg δεν προκαλούν σημαντικές αλλαγές στους αιματολογικούς δείκτες [63]. Μια χρόνια έκθεση των κουνελιών σε μικροκύματα συχνότητας 2,45 GHz, 23 ώρες την ημέρα για 180 ημέρες, έδειξε μια μικρή μείωση του αριθμού των ηωσινοφίλων, της συγκέντρωσης αλβουμίνης (λευκωματίνης) ορού και της συγκέντρωσης του ασβεστίου [64]. Όμως, δεν βρέθηκε καμία μεταβολή σε κανένα από τα υπόλοιπα 38 συστατικά του αίματος. Όταν τα επίπεδα των πεδίων ήταν τόσο υψηλά που προκάλεσαν την αύξηση της θερμοκρασίας του ορθού του αίματος κατά 2-4°C, παρατηρήθηκε μειωμένος αριθμός λεμφοκυττάρων και αυξημένος αριθμός ουδετεροφίλων [65]. Οι επιστήμονες θεώρησαν ότι η απελευθέρωση στο αίμα των στεροειδών ορμονών που παράγονται στο φλοιό των επινεφριδίων ως αποτέλεσμα θερμικού στρες θα μπορούσε να έχει προκαλέσει αλλαγές στους αιματολογικούς δείκτες [56, 57]. Η θερμική επίδραση των παλμικών ή των ημιτονοειδών πεδίων των μικροκυμάτων μπορεί να επηρεάσει τη σύσταση του κυττάρου και την πολλαπλασιαστική ικανότητα των αρχέγονων αιμοποιητικών κύτταρων του ερυθρού μυελού των οστών [66, 67]. Τα πειραματόζωα που εκτέθηκαν σε ακτινοβολία των ραδιοσυχνοτήτων, με τιμές SAR άνω των 2,5 W/kg, η οποία προκαλεί θέρμανση των ιστών, παρουσίασαν τόσο βραδυκαρδία όσο και ταχυκαρδία.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι οι μεταβολές στην καρδιακή λειτουργία ήταν παροδικές και συμβατές με τις αναμενόμενες επιδράσεις λόγω της θέρμανσης του σώματος.

Σύμφωνα με αρκετούς συγγραφείς [26, 68-70], το κατώφλι των πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) για την πρόκληση σημαντικών καρδιαγγειακών και αιματολογικών αλλοιώσεων είναι υψηλό. Για παράδειγμα, οι καρδιαγγειακοί δείκτες δεν μεταβλήθηκαν εξαιτίας της έκθεσης σε πεδία συχνότητας 60 Hz με ένταση 100 kV/m [71]. Η έκθεση του ανθρώπου σε ηλεκτρικά πεδία

εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας έντασης έως 200 kV/m και μαγνητικά πεδία έως 5 mT δεν έδειξαν, επίσης, μόνιμες αιματολογικές ή καρδιαγγειακές επιδράσεις [72, 73].

### **Καρκινογένεση στα πειραματόζωα**

Η καρκινογένεση εξαιτίας της ακτινοβολίας των μικροκυμάτων μελετήθηκε σε πειραματόζωα. Τα αρσενικά ελβετικά ποντίκια αλμπίνο εκτέθηκαν για 59 εβδομάδες, 5 ημέρες την εβδομάδα και 4,5 λεπτά την ημέρα σε παλμικά μικροκύματα ραντάρ συχνότητας 9,27 GHz. Οι παλμοί είχαν διάρκεια 2 μsec και η συχνότητα εκπομπής τους έφτανε σε 500/sec. Η ακτινοβολία αυτή, ισχύος 1 kW/m<sup>2</sup>, προκάλεσε αύξηση θερμοκρασίας κατά 3,3° C. Ο εκφυλισμός των όρχεων εμφανίστηκε σε 23 ζώα από τα 57 (40 %) που υποβλήθηκαν στην ακτινοβολία αυτή και σε 3 από τα 37 (8,1 %) της ομάδας ελέγχου. Μονοκυτταρικοί όγκοι ή όγκοι λεμφικών οργάνων ή μυελογενής λευχαιμία παρατηρήθηκε σε 21 από τα 60 (35 %) ζώα που έλαβαν ακτινοβολία και σε 4 από τα 40 (10 %) που δεν έλαβαν. Ωστόσο, η αύξηση αυτή παρατηρήθηκε στα ζώα που θανατώθηκαν στους 16 μήνες, ένα μήνα μετά την έκθεση τους και όχι στους 19 μήνες. Οι πειραματικές αυτές μέθοδοι και η στατιστική ανάλυση αμφισβητήθηκαν επειδή, για παράδειγμα, ως λεύκωση θεωρήθηκε η αύξηση των λευκοκυττάρων στο κυκλοφορικό, ενώ η αύξηση αυτή θα μπορούσε να οφείλεται σε μόλυνση [74-76]. Συνεπώς, η μελέτη αυτή δεν μπορεί με σιγουριά να στηρίξει το ενδεχόμενο της αύξησης του κινδύνου του καρκίνου.

Τα θηλυκά ποντίκια RFM εκτέθηκαν για 35 εβδομάδες, 5 ημέρες την εβδομάδα, 2 ώρες την ημέρα σε ακτινοβολία μικροκυμάτων συχνότητας 0,8 GHz με πυκνότητα ισχύος 430 W/m<sup>2</sup> [77]. Μετρήθηκαν τα επίπεδα των ερυθρών και των λευκών αιμοσφαιρίων, αιμοσφαιρίνης, αιματοκρίτη, καθώς επίσης έγινε έλεγχος της δραστηριότητας, του σωματικού τους βάρους και του χρόνου επιβίωσής τους. Το μοναδικό στατιστικά σημαντικό εύρημα ήταν η αύξηση του σωματικού βάρους των πειραματόζωων ηλικίας άνω των 86 εβδομάδων, τα οποία εκτέθηκαν στην ακτινοβολία σε σχέση με τα ποντίκια της ομάδας ελέγχου.

Στο Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον πραγματοποιήθηκε μελέτη με χρήση της προσομοίωσης της μέγιστης αναρροφούμενης ισχύος 0,4 W/kg της ακτινοβολίας συχνότητας 0,45 GHz [78]. Η συχνότητα αυτή επιλέχθηκε ως τυπική για ένα σύστημα ραντάρ μεσαίας εμβέλειας. Οι αρουραίοι εκτέθηκαν στα 2,45 GHz, επειδή η συχνότητα αυτή έχει την ίδια αναλογία μήκους κύματος προς τη μέγιστη διάσταση σώματος όπως η συχνότητα των 0,45 GHz με το σώμα ενός παιδιού. Το καλοήθες φαιοχρωμοκύττωμα του μυελού των επινεφριδίων ήταν η μόνη βλάβη με στατιστικά σημαντική αύξηση της συχνότητας εμφάνισης. Ωστόσο, η αύξηση αυτή δεν ήταν υψηλότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε σε αρουραίους ομάδας ελέγχου άλλων αποικιών. Ο χρόνος εμφάνισης του πρώτου όγκου ήταν επίσης μικρότερος στους αρουραίους που εκτέθηκαν (457 ημέρες) από ότι στους αρουραίους της ομάδας ελέγχου (540 ημέρες). Όταν συνδυάζονται όλοι οι κακοήθεις όγκοι που παρατηρούνται σε όλα τα σημεία του σώματος, υπάρχει στατιστικά σημαντική αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης στα εκτεθειμένα ζώα. Αυτό ισχύει για τα καρκινώματα και όχι για τα σαρκώματα.

Ορισμένες επιδράσεις στη διαδικασία καρκινογένεσης έχουν αναφερθεί σε αρκετές μελέτες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η ενδοφλέβια έγχυση των καρκινικών κύτταρων ή πειραματόζωα στα οποία χορηγήθηκε κάποιο γνωστό καρκινογόνο σε χαμηλές δόσεις. Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της έκθεσης σε ακτινοβολία μικροκυμάτων συχνότητας 2,45 GHz με πυκνότητα ισχύος 50 και 150 W/m<sup>2</sup> σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο [79]. Σε ποντίκια Balb/C έγινε η ενδοφλέβια έγχυση των κύτταρων του πνευμονικού σαρκώματος και μετά από 1, 2 και 3 μήνες μετρήθηκαν οι όγκοι. Στη ομάδα ελέγχου ο αριθμός των οζιδίων του πνεύμονα ήταν  $3,6 \pm 2,2$  μετά από 3 μήνες από την έναρξη του πειράματος. Στα ποντίκια με χρόνια στρες και στα ποντίκια που εκτέθηκαν στα 50 W/m<sup>2</sup> οι αντίστοιχοι αριθμοί

ήταν  $7,7 \pm 2,0$  και  $6,1 \pm 8$ . Τέλος, σε εκείνα που εκτέθηκαν στα  $150 \text{ W/m}^2$  ο αριθμός των οζιδίων έφτασε σε  $10,8 \pm 2,1$ . Εκτιμήθηκε ο χρόνος της αυθόρμητης εμφάνισης των όγκων του μαστού στα 50% των ποντικών C3H/HeA για τις ίδιες ομάδες. Για την ομάδα ελέγχου ο χρόνος αυτός ήταν 322 ημέρες, για τα ποντίκια με χρόνιο στρες και εκείνα που εκτέθηκαν στα  $50 \text{ W/m}^2$  255 και 261 ημέρες αντίστοιχα. Ενώ στα ποντίκια που εκτέθηκαν στα  $150 \text{ W/m}^2$  ο χρόνος αυτός μειώθηκε στις 219 ημέρες.

Ο χρόνος εμφάνισης των όγκων του δέρματος που προκλήθηκαν από το βενζοπυρένιο μειώθηκε επίσης όταν η έκθεση διάρκειας 1 ή 3 μήνες προηγήθηκε της χορήγησης του καρκινογόνου ή όταν η ακτινοβολία και η καρκινογόνος ουσία χορηγήθηκαν ταυτόχρονα [79]. Όπως και πριν, η ύπαρξη του στρες σχεδόν διπλασίασε την επίδραση της ακτινοβολίας των  $50 \text{ W/m}^2$ . Παρόλο που τα αποτελέσματα της έκθεσης στα  $150 \text{ W/m}^2$  ήταν σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά των συνεπειών του στρες ή της έκθεσης στα  $50 \text{ W/m}^2$ , ίσως η ακτινοβολία των με πυκνότητα ισχύος  $150 \text{ W/m}^2$  προκαλεί θέρμανση των βιολογικών ιστών.

Οι επιστήμονες έχουν ανακαλύψει τόσο τα αρνητικά όσο και τα θετικά αποτελέσματα της έκθεσης στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η επίδραση των ημιτονοειδών ή των παλμικών κυμάτων συχνότητας  $2,45 \text{ GHz}$  με πυκνότητα ισχύος  $10 \text{ W/m}^2$  και τιμή του SAR  $1,2 \text{ W/kg}$  μελετήθηκε σε μαύρα ποντίκια C57/6J με μελάνωμα B16 [80]. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των όγκων ή στην διάρκεια ζωής τους. Ενώ η επαγόμενη υπερθερμία που προερχόταν από την έκθεση στην ακτινοβολία μικροκυμάτων έδωσε ευεργετικά αποτελέσματα [81, 82]. Ο αριθμός των κύτταρων του πνευμονικού σαρκώματος που εγχύθηκαν σε ποντικούς Balb/C μειώθηκε έστω και προσωρινά μετά από έκθεση σε ακτινοβολία συχνότητας  $2,45 \text{ GHz}$ .

Μετά τη διακοπή της έκθεσης σε ακτινοβολία, οι καρκινικοί όγκοι αυξήθηκαν και οι μεταστάσεις στους πνεύμονες ξεπέρασαν αυτές της ομάδας ελέγχου [81]. Κύτταρα σαρκώματος εμφυτεύθηκαν σε νεαρά ποντίκια CFW την 16η ημέρα μετά την γέννησή τους. Τα ποντίκια αυτά είχαν ακτινοβοληθεί σε εμβρυική κατάσταση με μικροκύματα  $2,45 \text{ GHz}$  ( $35 \text{ W/kg}$ ) από την 11<sup>η</sup> έως τη 14<sup>η</sup> ημέρα της κύησης της μητέρας τους. Στη συνέχεια, τα ποντίκια αυτά υποβλήθηκαν σε πρόσθετη έκθεση σε ακτινοβολία μικροκυμάτων. Η έκθεση αυτή προκάλεσε την αύξηση της θερμοκρασίας του παχέος εντέρου της μητέρας τους κατά μέσο όρο  $2,2^\circ \text{ C}$  και αυτό οδήγησε στη μείωση της συχνότητας εμφάνισης του όγκου στα 13 % σε σχέση με 46 % στην ομάδα ελέγχου. Τόσο τα ζώα με καρκινικό όγκο όσο και τα υγιή ζώα που ακτινοβολήθηκαν ως έμβρυα έζησαν περισσότερο, κατά μέσο όρο, από τα ζώα της ομάδας ελέγχου. Ως εξήγηση προτάθηκε η ενίσχυση ικανότητας της ανοσολογικής απόκρισης του οργανισμού που σχετίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν αρκετές μελέτες που καταδεικνύουν πιθανή καρκινογόνο δράση των ακτινοβολιών, ενώ κάποιες άλλες δεν έχουν δείξει καμία επίδραση. Δεν υπάρχουν μελέτες οι οποίες με συνέπεια και επαναληψιμότητα να υποστηρίζουν ότι υπάρχει σχέση αιτίας και αποτελέσματος σε πειραματόζωα και η ερμηνεία αρκετών αποτελεσμάτων περιπλέκεται εξαιτίας του θερμικά επαγόμενου στρες.

Σημαντικό ενδιαφέρον έχει προκύψει σχετικά με την παράλληλη δράση των Η/Μ πεδίων μαζί με άλλους καρκινογόνους παράγοντες και το ρόλο των πεδίων αυτών στη έναρξη της καρκινογένεσης. Οι μελέτες των McLean et al. [83] ερεύνησαν τον πιθανό ρόλο των μαγνητικών πεδίων συχνότητας 60Hz στο ξεκίνημα της διαδικασίας καρκινογένεσης. Στα πειράματά τους χρησιμοποιήθηκαν ποντίκια SENCAR τα οποία, έχουν ευαισθησία στις διεγερτικές επιδράσεις της 12-Ο-τετραδεκανούλοφορβόλης-13- οξικής (TPA). Αρχικά ο καρκίνος προκλήθηκε υπό την επίδραση του διμεθυλοβενζανθρακένιου και στη συνέχεια ενισχύθηκε με δράση της TPA ή του μαγνητικού πεδίου

με πυκνότητα ροής 2 mT ή συνδυασμό TPA και μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη του όγκου παρακολούθηθηκε για 20 εβδομάδες. Δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στην ανάπτυξη όγκου και στις δύο περιπτώσεις (μόνο με την επίδραση της TPA ή TPA μαζί με το μαγνητικό πεδίο). Ωστόσο, τα πιο πρόσφατα αποτελέσματα ενός άλλου πειράματος από την ίδια ομάδα ερευνητών υποδηλώνουν ότι ένα μαγνητικό πεδίο 60 Hz δρα ως συμπροαγωγέας του καρκίνου. Θα χρειαστούν πρόσθετες μελέτες για την τεκμηρίωση αυτών των ευρημάτων. Οι ερευνητική ομάδα Beniashvili et al. [84] παρείχαν νιτρομεθυλουρία σε αρουραίους και στη συνέχεια τους εξέθεσαν είτε σε στατικό πεδίο 0,2 G είτε σε μαγνητικό πεδίο 50 Hz για 0,5 ή 3 ώρες την ημέρα για χρονικό διάστημα έως και δύο χρόνια. Ανακάλυψαν αυξημένη επίπτωση και αυξημένο αριθμό μαστικών όγκων στις ομάδες που εκτέθηκαν στα μαγνητικά πεδία, με το εναλλασσόμενο πεδίο να είναι πιο δραστικό από το στατικό. Κατέγραψαν, επίσης, αυξημένη απόκριση όγκου σε αρουραίους που εκτέθηκαν μόνο στο πεδίο των 50 Hz.

## 1.2. Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου

Η ανασκόπηση της πρόσφατης έρευνας γύρω από την θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, με έμφαση στα ηλεκτρικά οχήματα, είναι αδήριτη ανάγκη στα πλαίσια της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Έτσι, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για το επίπεδο της σημερινής τεχνολογίας, αλλά και την σχετική νομοθεσία και οδηγίες στο εν λόγω πεδίο, η οποία οδηγεί στον καθορισμό των κινήτρων της παρούσης διατριβής.

Κατ' αρχήν το υπουργείο μεταφορών των ΗΠΑ, έχει υλοποιήσει μελέτη καθοριστικής σημασίας για τα επίπεδα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου για συχνότητες από 3 Hz έως 3 kHz, που αφορά σε διάφορα είδη οχημάτων, τόσο ξηράς όσο και θάλασσας [85].

Το 2019 δημοσιεύθηκε η πρώτη μελέτη σχετικά με τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων εντός των ηλεκτρικών οχημάτων [86]. Μετρήθηκε η πυκνότητα μαγνητικής ροής B σε τρία κοινά οχήματα σε διάστημα δύο ετών στα μπροστινά και πίσω καθίσματα, κατά τη λειτουργία επιτάχυνσης, αλλά και της οδήγησης με σταθερή ταχύτητα. Διαπιστώθηκε ότι τα πλάτη και οι φασματικές συνιστώσες της πυκνότητας μαγνητικής ροής B θα μπορούσαν να τροποποιηθούν με αντικατάσταση εξαρτημάτων, ενώ οι τακτικοί τεχνικοί έλεγχοι και η συντήρηση δεν επηρέασαν τις τιμές της πυκνότητας μαγνητικής ροής B εντός του οχήματος. Συνεπώς, η τακτική παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων εντός των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αναγκαία, ειδικά μετά από τις εκτεταμένες επισκευές ή ατυχήματα για την προστασία των επιβαινόντων στα οχήματα αυτά από πιθανή υπερβολική έκθεση στα πεδία αυτά. Τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών λαμβάνονται υπόψη στις διαδικασίες ορισμού νέων προτύπων για την ανθρώπινη έκταση σε μαγνητικά πεδία και σε σχετικές επιδημιολογικές μελέτες.

Τα συστήματα τροφοδοσίας των τρένων (υπεραστικών και μετρό), που βασίζονται σε εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα δημιουργούν μαγνητικά πεδία, τα οποία μπορεί να είναι επικίνδυνα, ειδικά για διακοπτικές συχνότητες τροφοδοσίας. Η μέγιστη και η ελάχιστη έκθεση των μηχανοδηγών στα μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων μετρήθηκε και βρέθηκε 9  $\mu$ T και 0,8  $\mu$ T σε υπεραστικά τρένα εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος αντίστοιχα [87]. Το χαμηλότερο επίπεδο μαγνητικών πεδίων αναφέρθηκε για τα υπεραστικά τρένα AC, ενώ το μέγιστο που μετρήθηκε ήταν 1 mT σε διακοπτικές συχνότητες σε τρένα DC. Ωστόσο, σε καμία από τις περιπτώσεις, η έκθεση των μηχανοδηγών σε όλα τα μαγνητικά πεδία δεν υπερέβη τα όρια που συνιστώνται από το American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) για διακοπτικές συχνότητες.

Σε μία άλλη μελέτη αξιολογήθηκε το μαγνητικό πεδίο μέσα σε οκτώ διαφορετικά ηλεκτρικά οχήματα (μπαταρία, υβριδικό, plug-in υβριδικό και κυψελών καυσίμου) με διαφορετικές τεχνολογίες κινητήρα (συνεχούς ρεύματος, σύγχρονο μονίμων μαγνητών και επαγωγικό) για συχνότητες έως και 10 MHz [88]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η έκθεση των επιβαινόντων σε H/M πεδία έφτασε στο 20% των επιπέδων αναφοράς σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP), ICNIRP 2010, για την έκθεση του κοινού κοντά στην μπαταρία και κοντά στα πόδια κατά την εκκίνηση του οχήματος, αλλά ήταν μικρότερη από 2% στο ύψος του κεφαλιού για θέση συνοδηγού. Μέγιστη έκθεση της τάξης του 10% των επιπέδων αναφοράς της ICNIRP 2010 μετρήθηκε για τα συμβατικά αυτοκίνητα.

Ακόμη, οι τιμές των ΗΕΔ από επαγωγή (AC και DC) εντός του ηλεκτρικού οχήματος εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας (ακινησία, ρελαντί και οδήγηση με ταχύτητες 40 και 80 km/h). Διαπιστώθηκε συσχέτιση μεταξύ των συνιστωσών AC και DC του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία ήταν περίπου 0,5 στο ρελαντί και 0,8 σε ταχύτητες 40 και 80 km/h [89]. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν κάτω από τα όρια που έχουν θέσει οι ρυθμιστικοί φορείς, όπως η (ICNIRP) και το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical & Electronic Engineers – IEEE).

Μια άλλη μελέτη κατέδειξε ότι η έκθεση των μηχανοδηγών των τρένων ήταν 10 φορές υψηλότερη από το μαγνητικό υπόβαθρο [90]. Ωστόσο, δεν βρέθηκε υπέρβαση της έκθεσης ολόκληρου του σώματος του μηχανοδηγού της αμαξοστοιχίας σε σχέση με τα εθνικά επίπεδα επαγγελματικής έκθεσης (η μελέτη έγινε στο Ιράν με επιτρεπτό όριο τα 0.2 mT). Φυσικά, αυτό δεν σημαίνει ότι το επίπεδο έκθεσης είναι απολύτως ασφαλές, γιατί αναφέρθηκαν προβλήματα υγείας ακόμη και σε χαμηλότερες τιμές του μαγνητικού πεδίου.

Τα μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας ( $10^{-3}$  έως  $10^2$  Hz) μέσα σε πολλά βενζινοκίνητα αυτοκίνητα κατά τη διάρκεια της κίνησης σε πολυσύχναστους δρόμους της πόλης βρέθηκαν να είναι μία έως τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερα από τα αντίστοιχα εντός των γραφείων εργασίας [91]. Αυτό εγείρει ένα ερώτημα σχετικά με την πιθανή επίδραση αυτών των πεδίων στην ψυχοσωματική κατάσταση των οδηγών, το οποίο παραμένει αναπάντητο. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ισχύς του μαγνητικού πεδίου συχνότητας από  $10^{-3}$  έως 1 Hz σε ορισμένες τοποθεσίες είναι τρεις φορές υψηλότερη σε σύγκριση με την ισχύ μιας ισχυρής γεωμαγνητικής καταιγίδας, οι οποία επηρεάζει ζωντανούς οργανισμούς.

Λόγω των μικρών φυσικών διαστάσεων των παιδιών, τα κεφάλια τους, γενικά, είναι πιο κοντά στα ηλεκτρικά συστήματα του δαπέδου του ηλεκτρικού αυτοκινήτου όπου η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο είναι η μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά, σχετική έρευνα έδειξε ότι τα μαγνητικά πεδία στα πίσω καθίσματα ήταν πολύ χαμηλότερα από τα επίπεδα αναφοράς της ICNIRP [92]. Επίσης, αν και τα μικρά παιδιά μπορεί να είναι εκτεθειμένα σε ισχυρότερα μαγνητικά πεδία, οι τιμές της έντασης του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου ήταν πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των ενηλίκων λόγω των φυσικών τους διαστάσεων.

Μια άλλη μελέτη αφορούσε στην ηλεκτροδότηση των μεταφορών στο Ιράν. Τέτοια συστήματα δημιουργούν στατικά μαγνητικά πεδία (DC) ή πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (AC), όπου οι μηχανοδηγοί εκτίθενται καθημερινά σε αυτά. Τα πεδία αυτά μετρήθηκαν στα τρένα του μετρό της Τεχεράνης όπως και στα τρένα εθνικού δικτύου [93]. Τα επίπεδα των πεδίων μετρήθηκαν με βάση το BS EN 50500:2008. Οι μέγιστες εκθέσεις στα πεδία αυτά ήταν 0,52 mT σε τρένα DC και 7,90  $\mu$ T σε τρένα AC, τιμές που δεν υπερβαίνουν τα όρια που συνιστώνται από την ACGIH.

Σε παρόμοια λογική, μετρήθηκε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στους χώρους των επιβατών των λεωφορείων, των τραμ και του μετρό που μεταφέρουν εκατομμύρια επιβάτες καθημερινά στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο [94]. Τα υψηλότερα μαγνητικά πεδία βρέθηκαν σε μετρό (μέση τιμή 3  $\mu\text{G}$ , με εύρος από 0.3 έως 10  $\mu\text{T}$ ), ακολουθούμενα από τραμ (μέση τιμή 3  $\mu\text{T}$ , με εύρος από 0.2 έως 10  $\mu\text{T}$ ), λεωφορεία (μέση τιμή 1.1  $\mu\text{T}$ , με εύρος 0.1 έως 5  $\mu\text{T}$ ) και το GO -τρένο (μέσος όρος 0.2  $\mu\text{T}$ , με εύρος από 0.12 έως 0.28  $\mu\text{T}$ ). Το μαγνητικό πεδίο αυξανόταν με την επιτάχυνση και την επιβράδυνση και ποικίλλει ανάλογα με τη θέση των καθισμάτων και αυτό ήταν πιο εμφανές στο μετρό και στο τραμ. Όλες οι θέσεις στο μετρό, το 98% των θέσεων σε τραμ, το 85% στα λεωφορεία και το 38% στο τρένο GO ξεπέρασαν τα 0.2 mT. Τα μαγνητικά πεδία στο σύστημα δημόσιας συγκοινωνίας του Τορόντο είναι υψηλότερα από ό,τι στα περισσότερα οικιακά και επαγγελματικά περιβάλλοντα και προκαλούν ανησυχία, λαμβάνοντας υπόψη ότι αρκετές μελέτες έχουν αναφέρει αυξημένη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου του μαστού, όγκων εγκεφάλου και λευχαιμίας μεταξύ των εργαζομένων. Οι επιβάτες με εμφυτευμένες ηλεκτρικές συσκευές μπορεί να έχουν δυσκολία στη χρήση ορισμένων μορφών δημόσιας συγκοινωνίας έως και το 2% των 1,4 εκατομμυρίων του ημερήσιου πλήθους επιβατών στην ευρύτερη περιοχή του Τορόντο.

Μια άλλη μελέτη δίνει αντίστοιχες μετρήσεις σε ηλεκτρικά οχήματα, όπου τα πεδία που μετρήθηκαν σε όλα τα οχήματα ήταν πολύ μικρότερα από τα όρια έκθεσης. Τα αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν από την ICNIRP και την IEEE [95] και συγκρίνουν τα επίπεδα του μαγνητικού πεδίου στα ηλεκτρικά οχήματα με τα αντίστοιχα των βενζινοκίνητων οχημάτων. Το δείγμα αποτελούνταν από 14 οχήματα, όλα κατασκευασμένα μεταξύ Ιανουαρίου 2000 και Απριλίου 2009. Τα 6 ήταν βενζινοκίνητα οχήματα και τα 8 ηλεκτρικά διαφόρων τύπων. Τα οχήματα οδηγήθηκαν σε δοκιμαστική διαδρομή 16,3 χλμ. με δειγματοληψία κάθε 4 s. Για επτά ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων ήταν 0,095  $\mu\text{T}$ , σε σύγκριση με 0,051  $\mu\text{T}$  για τα μηχανοκίνητα αυτοκίνητα. Όλα τα πεδία που μετρήθηκαν σε όλα τα οχήματα ήταν πολύ μικρότερα από τα όρια έκθεσης της ICNIRP και της IEEE.

Μεταξύ των ηλεκτρικών συσκευών που υπάρχουν στο σύστημα κίνησης, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας είναι ο πιο δύσκολος στην ανάλυση, δεδομένου ότι λειτουργεί με διαφορετικές συχνότητες. Σε μια εργασία, προτείνεται μεθοδολογία για την αξιολόγηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από έναν μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, χρησιμοποιώντας τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων [96]. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συγκρίθηκαν με εργαστηριακές μετρήσεις από έναν πραγματικό μετατροπέα που επικύρωσαν το μοντέλο.

Η ανασκόπηση των μαγνητικών πεδίων εντός των ηλεκτρικών οχημάτων και των πιθανών βιολογικών επιπτώσεων σε μέσα μαζικής μεταφοράς συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος αναλύθηκαν σε μια εργασία, δεδομένου ότι το μαγνητικό και όχι το ηλεκτρικό πεδίο θα μπορούσε να έχει επίδραση στους ζωντανούς οργανισμούς [97]. Οι μέγιστες τιμές του μαγνητικού πεδίου εντός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων κυμαίνονταν από μερικά  $\mu\text{T}$  έως 120  $\mu\text{T}$ . Για το ευρύ κοινό, οι τιμές αυτές είναι συγκρίσιμες με τις τιμές των πεδίων από άλλες πηγές στο περιβάλλον διαβίωσης. Ωστόσο, διαφέρουν αρκετά από τις τιμές των γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και χαρακτηρίζονται από το πολύπλοκο φάσμα συχνοτήτων. Μελετήθηκαν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου που θα μπορούσαν να έχουν τη βιολογική επίδραση, όπως το ευρύ φάσμα συχνοτήτων, η υπέρθεση, η αλληλεπίδραση με το στατικό πεδίο και άλλα. Από τη λεπτομερή χαρτογράφηση των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του οχήματος σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας δόθηκε η δυνατότητα αναγνώρισης των κύριων πηγών των μαγνητικών πεδίων.



Στα ηλεκτρικά οχήματα, οι επιβάτες βρίσκονται πολύ κοντά σε ηλεκτρικά συστήματα μεγάλης ισχύος, συνήθως για μεγάλο χρονικό διάστημα, που αποτελεί κίνδυνο για τους οδηγούς και τους επιβάτες λόγω της έκθεσής των σε υψηλά μαγνητικά πεδία. Επιπλέον, οι κίνδυνοι από την έκθεση στο μαγνητικό πεδίο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ηλεκτρικών οχημάτων και των εξαρτημάτων τους. Για το σκοπό αυτό, τα εργαλεία εκτίμησης που βασίζονται σε προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα. Με τις κατάλληλες κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού, μπορεί να είναι δυνατό να γίνουν τα ηλεκτρικά οχήματα ασφαλή από την άποψη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αποτυπώνεται σε μια πρόσφατη εργασία [98].

Σε μια άλλη σχετική εργασία περιγράφεται η φύση των πιθανών απειλών για την ανθρώπινη υγεία, τις μεθόδους για την αξιολόγησή τους και τα πρακτικά μέτρα θωράκισης για τον περιορισμό της έκθεσης [99].

Σε μια άλλη παρόμοια εργασία αφιερωμένη στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) διαπιστώθηκε ότι εκτός από τη βασική τεχνολογία του συστήματος ισχύος, η χρήση των νέων υλικών αμαξώματος μεγαλύτερης σκληρότητας, μικρότερου βάρους και καλύτερης απόδοσης θωράκισης είναι επίσης ένα από τα σημαντικά ζητήματα που απασχολεί τη βιομηχανία ηλεκτρικών οχημάτων [100]. Μελετήθηκε η κατανομή του πεδίου που επάγεται στον κορμό και στο κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) του οδηγού. Τα υλικά του αμαξώματος του οχήματος ήταν κράματα αλουμινίου, μη μαγνητικός χάλυβας και permalloy. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μέγιστες τιμές της έντασης του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου (πεδίο E) και της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος (πεδίο J) στον κορμό του οδηγού φτάνουν μόνο το 2,27 % και το 67 % των ορίων της ICNIRP, ενώ οι μέγιστες τιμές του πεδίου E και του πεδίου J στο ΚΝΣ του οδηγού φτάνουν μόνο το 0,29 % και το 0,62 % των ορίων της ICNIRP αντίστοιχα. Δηλαδή, το υλικό του αμαξώματος του ηλεκτρικού οχήματος με υψηλότερη ειδική αντίσταση και μαγνητική διαπερατότητα είναι πιο ασφαλές για το σώμα του οδηγού.

Ακόμη, προσομοιώθηκε το ανθρώπινο σώμα και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών [101]. Στη συνέχεια, εξηγήθηκε πώς ορίζονται τα πρότυπα έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και η διαδικασία τυποποίησης για τη συμμόρφωση του κάθε σχετικού προϊόντος με βάση τα πρότυπα αυτά. Επανεξετάσθηκε η ασύρματη μεταφοράς ενέργειας, ως παράδειγμα μελλοντικών ασύρματων συσκευών, όπως και τα περιβαλλοντικά πεδία στην καθημερινή ζωή των πολιτών. Τέλος, αξιολογήθηκε η ασφάλεια των συσκευών μαγνητικού συντονισμού, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των οποίων είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με εκείνα των οικιακών συσκευών.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που εκπέμπονται από τα τραμ, τα τρένα και τα υβριδικά αυτοκίνητα στην Αυστραλία υπό διαφορετικές συνθήκες και σε διαφορετικές τοποθεσίες δείχνουν εν γένει χαμηλές τιμές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [102]. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύονται από τις εργαστηριακές μελέτες των βιολογικών επιδράσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, αν και είναι πολύ χαμηλότερα από τα διεθνή επίπεδα, όπως αυτά που ορίζονται στις κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP.

Σε μια άλλη εργασία [103] εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της θωράκισης των καλωδίων υψηλής τάσης και χαμηλής συχνότητας για τα ηλεκτρικά οχήματα με αναλυτικές μεθόδους. Η βασική θεωρία για τους τρόπους λειτουργίας και τη μοντελοποίηση των καλωδίων συνδυάστηκε με τις μετρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις για την επαλήθευση των μοντέλων και διερευνήθηκε το σύστημα μετάδοσης κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος. Μια παραμετρική μελέτη προσδιόρισε την επίδραση παραμέτρων όπως το ύψος και η απόσταση των καλωδίων και βοήθησε στη δημιουργία μιας διάταξη

με ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Τα μαγνητικά πεδία των καλωδίων υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν με τιμές από τα Διεθνή Πρότυπα Προστασίας της Δημόσιας Υγείας.

Όσον αφορά τη θωράκιση των καλωδίων, οι παράμετροι της κατασκευής τους καθορίζουν την κατανομή ρεύματος μεταξύ της θωράκισης και του εδάφους. Τα ρεύματα αυτά είναι παράγοντα τα μαγνητικά πεδία στα οποία εκτίθενται οι επιβαίνοντες στο όχημα. Η γεωμετρική διάταξη των καλωδίων σε σχέση με άλλα εξαρτήματα και το έδαφος παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση των ρευμάτων που επάγονται μέσα στο υλικό της θωράκισης και των ρευμάτων γείωσης. Η αναλυτική προσέγγιση για την επίτευξη των κατάλληλων ρευμάτων θωράκισης και γείωσης ως συνάρτηση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό του συστήματος ηλεκτροκίνησης δίνεται σε μια εργασία [104].

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μπορεί να επιδρά στους ιστούς του σώματος, όπως αποδείχθηκε με την σύγκριση υπολογισμένων και πειραματικών τιμών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων προερχόμενα από τα σιδηροδρομικά δίκτυα όπως το ICE, το Maglev Transrapid και το JR Maglev [105]. Για να εκτιμηθεί η επίδραση στους επιβάτες ελήφθησαν υπόψη τα πεδία που παράγονται από το σύστημα τροφοδοσίας καθώς και από τα συστήματα κίνησης και ανάρτησης. Για τη σύγκριση ελήφθησαν υπόψη οι μέγιστες τιμές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχουν κίνδυνοι για την υγεία από τα ηλεκτρικά πεδία. Όσον αφορά τις τιμές του μαγνητικού πεδίου οι υπολογισμένες μέγιστες τιμές είναι πολύ μικρότερες από τα όρια των Εθνικών Οργανισμών. Στην περίπτωση των δικτύων Transrapid και JR Maglev, οι μέγιστες τιμές του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον και στο εσωτερικό των οχημάτων εξαρτώνται από την αιώρηση και την τεχνολογία συστήματος οδήγησης και τις γεωμετρικές παραμέτρους. Το δίκτυο JR Maglev απαιτεί αποτελεσματικά μέτρα μαγνητικής θωράκισης που συνδέονται με βαριά υλικά. Δεδομένου ότι τέτοια υλικά μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο και στα οικονομικά της λειτουργίας, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάζονται στη βελτιστοποίηση των υλικών και της δομής της θωράκισης. Όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το τροφοδοτικό και το σύστημα μετάδοσης κίνησης παραμένει πολύ κάτω από τα όρια έκθεσης τα οποία εξαρτώνται από τη συχνότητα. Η κατάσταση είναι διαφορετική για τα συστήματα μαγνητικής αιώρησης και εξαρτάται από την τεχνολογία ανάρτησης και οδήγησης. Ειδικά το JR Maglev απαιτεί αποτελεσματικά μέτρα θωράκισης.

Η σωστή χρήση μεταλλικής θωράκισης εξασθενεί όχι μόνο τα ανθρωπογενή πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που σχετίζονται με προβλήματα υγείας, αλλά και τα φυσικά μη πολωμένα πεδία που είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση των βιολογικών λειτουργιών και την ευημερία των ζωντανών οργανισμών. Ισχυρές αποδείξεις για αυτό παρείχαν πρωτοποριακά πειράματα τη δεκαετία του 1960 και του 1970 όταν εθελοντές έμεναν σε ένα θωρακισμένο υπόγειο διαμέρισμα. Οι φυσικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, η σημασία των φυσικών (ατμοσφαιρικών) H/M πεδίων και οι διαθέσιμες μέθοδοι θωράκισης αναλύθηκαν σε μια εργασία στην οποία προτείνεται μια στρατηγική χρήσης της θωράκισης για ελάχιστα χρονικά διαστήματα, καθώς αυτή είναι θεωρητικά ασφαλέστερη από την εκτεταμένη μόνιμη θωράκιση, με την ταυτόχρονη χρήση γεννητριών που εκπέμπουν ασθενείς παλμούς παρόμοιας συχνότητας, έντασης και κυματομορφής με τους φυσικές ατμοσφαιρικές πηγές [106]. Επίσης, τεκμηριώνεται η αναποτελεσματικότητα συγκεκριμένων λύσεων με μεταλλικά «μπαλώματα» ή ορυκτά που μπορεί να είναι επικίνδυνα.

Σε μια άλλη εργασία αναλύεται το στατικό μαγνητικό πεδίο μέσα σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος [107]. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης

της μαγνητικής θωράκισης που παρέχει το σασί του αυτοκινήτου. Προτείνεται επίσης και ένα ισοδύναμο μοντέλο της μπαταρίας και των καλωδίων τροφοδοσίας. Η μελέτη διαφορετικών διαμορφώσεων της κατασκευής οδηγεί στη μείωση του πεδίου εντός του οχήματος.

Κύτταρα παρόμοια με τους νευρώνες του ανθρώπου εκτέθηκαν σε στατικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz, μαγνητικής επαγωγής 0.2 mT και 0.1 mT αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της έκθεσης διερευνήθηκαν στην περιοχή του μεσαίου υπέρυθρου με τη βοήθεια φασματοσκοπικής ανάλυσης Fourier [108]. Μετά από έκθεση διάρκειας 3 ωρών παρατηρήθηκε σχετική αύξηση λιπιδίων που σχετίζεται με τις αλλαγές στη δομή της κυτταρικής μεμβράνης. Επιπλέον, κάποιες άλλες μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν επιδράσεις στο DNA/RNA. Ειδικότερα, η έκθεση 3 ωρών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία 50 Hz προκάλεσε την κυτταρική απόπτωση ή νέκρωση μέσω της αλλαγής της στερεοδομής των πρωτεϊνών των κυττάρων. Ακόμη, έκθεση 18 ωρών σε στατικό μαγνητικό πεδίο προκάλεσε μεταβολές στη στερεοδομή των πρωτεϊνικών μορίων.

Η δημιουργία μια βάσης δεδομένων για τις επαγγελματικές πηγές έκθεσης σε Η/Μ πεδία δημοσιεύθηκε με βάση διαθέσιμες μετρήσεις [109]. Αυτή η βάση των δεδομένων περιέχει 3000 καταχωρήσεις για 285 πηγές έκθεσης σε ΗΜΠ, οργανωμένες ανά περιοχή συχνοτήτων (0 Hz έως 300 GHz) και τύπο μέτρησης. Επιλέχθηκαν 95 μελέτες, από τις οποίες το 35 % είναι αδημοσίευτες τεχνικές εκθέσεις. Τα δεδομένα προέρχονται από 16 διαφορετικές χώρες και καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1974 – 2013. Αυτή η βάση δεδομένων καλύπτει ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και αντιπροσωπεύει την πιο ολοκληρωμένη πηγή πληροφοριών που βρήκαμε για την επαγγελματική έκθεση σε Η/Μ πεδία.

Οι πιθανές επιπτώσεις για τους ασθενείς με εμφυτευμένες καρδιακές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι βηματοδότες, μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα την δυσλειτουργία της συσκευής. Έτσι, αναπτύχθηκε μελέτη για να αξιολογήσει τον κίνδυνο των Η/Μ πεδίων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη λειτουργία του βηματοδότη [110]. 108 ασθενείς με βηματοδότη που παρουσιάστηκαν για τον καθιερωμένο έλεγχο μεταξύ Μαΐου 2014 και Ιανουαρίου 2015 εντάχθηκαν στη μελέτη. Οι συμμετέχοντες εκτέθηκαν σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα τέσσερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Nissan Leaf, Tesla Model S, BMW i3, VW eUp) κατά τη διάρκεια δοκιμαστικής οδήγησης στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Αυτοκινήτων του Πολυτεχνείου του Μονάχου. Καταγράφηκαν οι τυχόν ανωμαλίες στη λειτουργία του βηματοδότη, όπως η επιβράδυνση της λειτουργίας του, λανθασμένη λειτουργία ή αλλαγή τρόπου λειτουργίας κατά την οδήγηση ή τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι αξιολόγηση έγινε με τη λήψη του ηλεκτροκαρδιογραφήματος των ασθενών και την παρακολούθηση της συσκευής. Τελικά, δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στη λειτουργία ή στις ρυθμίσεις της συσκευής. Οι μεγαλύτερες τιμές του μαγνητικού πεδίου ανιχνεύθηκαν κατά μήκος του καλωδίου φόρτισης κατά τη διάρκεια φόρτισης με υψηλές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου, έως και 116,5  $\mu$ T. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου στην καμπίνα ήταν χαμηλότερη (2,1–3,6  $\mu$ T).

Στα ηλεκτρικά οχήματα οι επιβάτες κάθονται πολύ κοντά σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μεγάλης ισχύος. Τα υψηλά ρεύματα δημιουργούν μεγάλα μαγνητικά πεδία στα οποία μπορούν να εκτεθούν οι επιβάτες. Σε σχετικό άρθρο παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τις μπαταρίες του συστήματος ισχύος [111]. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες ελήφθησαν από μια πραγματική μπαταρία για την επικύρωση του μοντέλου.

Οι πολυάριθμες συσκευές και τα καλώδια υψηλής ισχύος που είναι τοποθετημένα στο μετρό υποβαθμίζουν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, οδηγούν σε κινδύνους εκτροπής από την κανονική λειτουργία του τρένου και ταυτόχρονα μπορούν να απειλήσουν την υγεία των επιβατών με βηματοδότη ή απινιδωτή. Προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά κατανομής του μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας στο μετρό σε ένα πολύπλοκο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, καθώς και η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην ηλεκτρομαγνητική έκθεση των επιβατών, αναλύθηκε η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B μέσα στα βαγόνια που έχουν διαφορετικό υλικό αμαξώματος, με ή χωρίς παράθυρα και θωράκιση [112]. Οι τιμές του ρυθμού ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SAR) έχουν υπολογιστεί για ένα voxel μοντέλο από την έκθεσή του σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας 2,4 GHz, που χρησιμοποιούνται συνήθως από συσκευές Wi-Fi. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B στο βαγόνι από ανοξείδωτο χάλυβα είναι μικρότερη από αυτή του βαγονιού από κράμα αλουμινίου και από ανθρακονήματα (CFRP). Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B σε όχημα χωρίς παράθυρα είναι μικρότερη από αυτή ενός οχήματος με παράθυρα. Ένα φύλλο θωράκισης μειώνει τη μέση τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής από 10,5  $\mu\text{T}$  σε 3  $\mu\text{T}$ . Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B που καταγράφηκε σε ένα βαγόνι είναι περίπου 10  $\mu\text{T}$  που είναι μικρότερη από το όριο αναφοράς πυκνότητας μαγνητικής ροής B των 100  $\mu\text{T}$  του ICNIRP. Όταν η συσκευή Wi-Fi είναι σε απόσταση της τάξης του 1 m από τον άνθρωπο η υψηλότερη τιμή του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) του ανθρώπινου ιστού είναι 0,00749 W/kg που είναι πολύ μικρότερη από το όριο ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης των 1,6 W/kg του προτύπου IEEE.

Μια άλλη μελέτη [113] παρουσιάζει μια μέθοδο σχεδιασμού και ανάλυσης της δομής μαγνητικής θωράκισης μεταξύ ενός αισθητήρα θέσης και ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Στην μελέτη αυτή απαιτήθηκε κατάλληλος σχεδιασμός μαγνητικής θωράκισης για να μειωθεί η διείσδυση της μαγνητικής ροής διαρροής στον αισθητήρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν την εγκυρότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού μαγνητικής θωράκισης.

Οι επιβάτες των υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων κάθονται πολύ κοντά σε ένα ηλεκτρικό σύστημα σημαντικής ισχύος, συνεπώς μπορούν να εκτεθούν μακροχρόνια σε υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μεταξύ των ηλεκτρικών διατάξεων που υπάρχουν στο σύστημα ισχύος, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας παρουσιάζει αρκετή δυσκολία στην ανάλυση, δεδομένου ότι λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες. Στα πλαίσια αυτά προτάθηκε μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος [114]. Το πεδίο αυτό αναλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιβεβαιώνονται με τις εργαστηριακές μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται από έναν πραγματικό μετατροπέα.

Η εμπέδηση του καλωδίου μεταφοράς ισχύος είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος απόδοσής του. Για την ανάλυση και τον σχεδιασμό καλωδίων και συνδέσμων των ηλεκτρικών οχημάτων με καλύτερη αποτελεσματικότητα θωράκισης, απαιτούνται κατάλληλες μέθοδοι μέτρησης και προσομοίωσης. Έτσι, αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη μέθοδος με μια πλάκα γείωσης για τη μέτρηση της εμπέδησης του καλωδίου με χρήση φερριτών για χαμηλές σχετικά συχνότητες με στόχο την αποφυγή των επιδράσεων του βρόχου γείωσης [115]. Επιπλέον, ένας συνδυασμός αναλυτικού μοντέλου με το μοντέλο κυκλώματος εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της απόκρισης συχνότητας. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μελέτες με χρήση του αναλυτικού μοντέλου για την ανάλυση της συμπεριφοράς θωράκισης των καλωδίων υψηλής τάσης.

Το μαγνητοστατικό πεδίο για μια απλοποιημένη γεωμετρία που μοιάζει με ένα ηλεκτρικό όχημα αναλύθηκε με μοντέλο που επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης του σασί και του πλαισίου του αυτοκινήτου στην μαγνητική θωράκιση [116]. Προτείνεται επίσης ένα ισοδύναμο μοντέλο για την μπαταρία και τα καλώδια τροφοδοσίας. Η μελέτη διαφορετικών μεταλλικών διαμορφώσεων οδηγεί στη μείωση του πεδίου μέσα στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Ο ορισμός και η ταξινόμηση, μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων παρουσιάστηκαν σε ένα άρθρο επισκόπησης, επισημαίνοντας τον ρόλο των διεπιστημονικών τεχνολογιών και τις τάσεις ανάπτυξής τους [117], όπου μελετήθηκαν ηλεκτρικοί κινητήρες για ηλεκτρική πρόωση, συστήματα υβριδικής πρόωσης, τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ισχύος για τη σταθερή και τη δυναμική φόρτιση, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και συμβατότητα σε ηλεκτρικά οχήματα, ηλεκτρομηχανικοί σφόνδυλοι για αποθήκευση ενέργειας και μαγνητικοί αισθητήρες απαραίτητων για τη λειτουργία όλων των συστημάτων.

Μια αποτελεσματική μέθοδος προσομοίωσης τρισδιάστατων μαγνητικών πλακών που χρησιμοποιούνται στη μαγνητική θωράκιση πεδίων χαμηλής συχνότητας αναπτύχθηκε, όπου περιγράφεται λεπτομερώς το ισοδύναμο κύκλωμα των πλακών [118]. Η πυκνότητα επαγόμενου ρεύματος και η πυκνότητα μαγνήτισης των πλακών προσεγγίζονται με μια αναλυτική συνάρτηση σε όλο το πάχος της πλάκας. Η προτεινόμενη μέθοδος εξαλείφει την ανάγκη πλέγματος κατά μήκος του πάχους των πλακών και μειώνει σημαντικά τον αριθμό των αγνώστων σε τρισδιάστατα προβλήματα θωράκισης. Η μέθοδος επικυρώνεται αριθμητικά με ένα μικρό σύστημα θωράκισης και πειραματικά με ένα μεγάλο. Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος έχει καλή ακρίβεια και αποτελεσματικότητα στους υπολογισμούς. Συνεπώς, μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατες δομές θωράκισης με μεγάλες λεπτές αγώγιμες μαγνητικές πλάκες.

Ένα νέο σύστημα θωράκισης για τη βελτίωση της απόδοσης μιας πλάκας φερρίτη με προσθήκη μεταλλικών λωρίδων προτάθηκε, μαζί με μια αναλυτική λύση με στόχο την αποτελεσματική και επαρκή ανάλυση της διεξόδου ψευδοστατικού μαγνητικού πεδίου στο σύστημα θωράκισης που προτείνεται [119]. Η επίδραση των μεταλλικών λωρίδων στην απόδοση του συστήματος θωράκισης της πλάκας φερρίτη διερευνήθηκε ως προς τις γεωμετρικές παραμέτρους, όπως οι σχετικές θέσεις των λωρίδων και της πηγής. Για την επαλήθευση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Μια αναλυτική λύση για την ανάλυση μαγνητικής θωράκισης μιας σχισμής σε μια αγώγιμη πλάκα επικαλυμμένη με φύλλο φερρίτη παρουσιάστηκε όπου ο μετασχηματισμός Fourier και η μέθοδος συγχρονισμού των λειτουργιών χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της αναλυτικής λύσης για το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό [120]. Στην εν λόγω εργασία, διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της μαγνητικής θωράκισης ως προς τις γεωμετρικές παραμέτρους μιας σχισμής πάνω σε μια αγώγιμη πλάκα και σε ένα φύλλο φερρίτη. Τα αποτελέσματα επαληθεύθηκαν αριθμητικά από ένα λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων του εμπορίου. Επιπλέον, η προτεινόμενη αναλυτική λύση έχει μορφή μιας γρήγορα συγκλίνουσας σειράς. Συνεπώς, είναι πιο αποτελεσματική σε σχέση με άλλες αριθμητικές τεχνικές.

Η προσομοίωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος μαγνητικής θωράκισης χαμηλής συχνότητας με σχισμή για το κοντινό πεδίο παρουσιάστηκε, συνδυάζοντας αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους, που επικυρώθηκε πειραματικά [121]. Η κατασκευή με σχισμή προορίζεται για τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα. Η τεχνική που αναπτύχθηκε επιτρέπει τη γρήγορη εκτίμηση

της τάξης μεγέθους των ακτινοβολούμενων πεδίων για τις ανάγκες της αντιμετώπισης του θέματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Με την ταχεία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών και δικτύων ισχύος, τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας όλο και περισσότερο απασχολούν την επικαιρότητα. Αυτό το ζήτημα συζητήθηκε παράλληλα με πρόταση διαχείρισης της Η/Μ συμβατότητας [122]. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση μιας πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας 50 Hz σε έναν στόχο που τοποθετήθηκε σε μια ορισμένη απόσταση από την πηγή. Με αυτό το απλό μοντέλο διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ταυτόχρονα εξετάστηκαν διάφορες μέθοδοι για τη μείωση των επιπτώσεων της έκθεσης. Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν παθητικά και ενεργητικά συστήματα θωράκισης. Οι προσομοιώσεις που βασίσθηκαν στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων επιβεβαίωσαν τα πειραματικά ευρήματα.

### **1.3. Επιπτώσεις από την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων**

Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (wireless power transmission – WPT) των ηλεκτρικών οχημάτων κερδίζουν έδαφος λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Ωστόσο, η έκθεση του ανθρώπου σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία προκαλεί σοβαρή ανησυχία όταν απαιτείται μεταφορά μεγάλης ισχύος. Σε μια σχετική εργασία διερευνώνται οι τεχνικές θωράκισης, όπως η χρήση μαγνητικών υλικών, μετάλλων και θωρακίσεων συντονισμού [123]. Η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της θωράκισης, για την εκτίμηση του βάρους του φορτιστή και της απόδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θωράκιση συντονισμού οδηγεί σε χαμηλό επίπεδο Η/Μ πεδίων, καλή απόδοση συστήματος και αποδεκτό βάρος φορτιστή. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν φορτιστές WPT 5 kW με διάκενο αέρα 15 cm, που επικύρωσαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαρροής που επηρεάζει άλλες ηλεκτρονικές συσκευές ή το ανθρώπινο σώμα δημιουργείται αναπόφευκτα από τα πηνία ενός συστήματος WPT και οι απαιτήσεις σχετικά με την καταστολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαρροής αυξάνονται. Για τους λόγους αυτούς προτάθηκε μια νέα τριφασική γραμμή ισχύος αποτελούμενη από έξι γραμμές σε ένα σύστημα WPT για τη μείωση αυτής της διαρροής [124]. Η δομή αυτή συγκρίθηκε με τις συμβατικές κατασκευές γραμμών ισχύος ως προς την επαγόμενη τάση και την κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης έδειξαν ότι η προτεινόμενη γραμμή ισχύος μπορεί να μειώσει σημαντικά το μαγνητικό πεδίο διαρροής από ένα σύστημα WPT. Για επαλήθευση, υλοποιήθηκαν οι προτεινόμενες και οι συμβατικές γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας και μετρήθηκαν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και παρατηρήθηκε μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Σε μια άλλη μελέτη εξετάζονται τα όρια έκθεσης και η ασφάλεια των εκπομπών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενδιάμεσης συχνότητας (IF) για εφαρμογές ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (wireless power transfer - PWT) [125]. Παρέχεται επισκόπηση των τεχνολογιών θωράκισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, συμπεριλαμβανομένων των προτεινόμενων γεωμετριών, υλικών και επιδόσεων των μεθόδων που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Συνοψίζονται τα διαθέσιμα εργαστηριακά αποτελέσματα των εκπομπών, λαμβάνοντας υπόψη μελέτες ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Οι πιθανές τεχνικές μείωσης των πεδίων συζητούνται με πρακτικές θωράκισης και μελέτες του Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Επίσης εξετάζονται οι μέθοδοι ανίχνευσης ζωντανών

αντικειμένων (living object detection, LOD) και ανίχνευσης ξένων αντικειμένων (foreign object detection, FOD).

Επίσης, αξιολογήθηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού μιας πλατφόρμας ισχύος για ένα σύστημα WPT έχουν επίδραση στην έκθεση των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και αναλύθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου θωράκισης του μαγνητικού πεδίου μέσω αγώγιμων πλακών [126]. Ένας μετασχηματιστής με θωράκιση και χωρίς πυρήνα μοντελοποιήθηκε και μελετήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία, σύμφωνα με τις οδηγίες της ICNIRP σχετικά με την έκθεση των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Μια άλλη μελέτη διερεύνησε τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ενός συστήματος WPT Double-D (DD) ισχύος 100 kW [127]. Προτείνεται μια τεχνική θωράκισης για την μείωση των εκπομπών μαγνητικού πεδίου κάτω από τα όρια που έχει θέσει η ICNIRP. Οι παραδοσιακές θωρακίσεις από αλουμίνιο που βασίζονται σε δινορεύματα δεν είναι αποτελεσματικές για την καταστολή αυτού του πεδίου διαρροής. Η συγκεκριμένη μελέτη προτείνει μια τεχνική θωράκισης για πηνία DD χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό θωράκισης αλουμινίου και μαγνητικής θωράκισης χαμηλής μαγνητικής αντίστασης για την καταστολή των εκπομπών μαγνητικού πεδίου. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης αξιολογήθηκε με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και ελέγχθηκε πειραματικά. Ένα πρωτότυπο σύστημα ασύρματης φόρτισης πηνίου DD 11 kW χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση της προτεινόμενης τεχνικής θωράκισης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η θωράκιση αλουμινίου αυξάνει τις εκπομπές των πηνίων DD κατά 25% και η προτεινόμενη μαγνητική θωράκιση μειώνει την εκπομπή κατά 60%.

Ακόμη, μελετήθηκαν οι βασικές αρχές της ασύρματης μεταφοράς ισχύος με χρήση μαγνητικού πεδίου, την μελέτη κατανομής μαγνητικού πεδίου και μεθόδους μείωσης θορύβου του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [128]. Τα πειραματικά αποτελέσματα των συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ευρείας κατανάλωσης συζητούνται σε σχέση με την απόδοσή τους και τον θόρυβο του Η/Μ πεδίου. Επιπλέον, προτάθηκε μέθοδος παθητικής θωράκισης και ακύρωσης μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας βρόχο ανάδρασης ρεύματος και τη χρήση των σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα on-line ηλεκτρικού οχήματος (OLEV), στο οποίο ένα σύστημα πράσινου λεωφορείου μεταφοράς OLEV απορροφά ασύρματη ισχύ από τα καλώδια τροφοδοσίας κάτω από το οδόστρωμα με ελάχιστη χωρητικότητα μπαταρίας.

Τα λεπτά μεταλλικά φύλλα χρησιμοποιούνται συχνά για να προστατεύσουν από τη διαρροή μαγνητικού πεδίου σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως από τα συστήματα WPT που βασίζονται στη σύζευξη των μαγνητικών πεδίων. Ωστόσο, τα μέταλλα που βρίσκονται κοντά στα πηνία του WPT προκαλούν μείωση της αυτεπαγωγής και αμοιβαίας επαγωγής και αύξηση της αντίστασης κυκλώματος σειράς. Ως εκ τούτου, επηρεάζεται η ηλεκτρική απόδοση συμπεριλαμβανομένης της ισχύος μετάδοσης. Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της θωράκισης, ο συσχετισμός της με την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος και η ανάπτυξη βέλτιστης μεθόδου θωράκισης από μαγνητικό πεδίο που προσφέρουν τα μεταλλικά φύλλα στο WPT πραγματοποιήθηκε με πεπερασμένα στοιχεία, δείχνοντας την αποτελεσματικότητά τους [129]. Ξεκινώντας με τον μεγαλύτερο δυνατό συντελεστή σύζευξης των πηνίων WPT εντός του επιτρεπόμενου εύρους και στη συνέχεια μειώνοντας την τιμή μέχρι μια κρίσιμη τιμή απόδοσης, επιτυγχάνεται η βέλτιστη θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του συστήματος, την ισχύ μετάδοσης, την απόσταση μετάδοσης και οι διαστάσεις του συστήματος.

Οι συστάσεις J2954 του Οργανισμού των Μηχανικών Αυτοκινήτων των ΗΠΑ δημοσιεύθηκαν τον Νοέμβριο 2017 και αφορούν την τυποποίηση της τεχνολογίας WPT για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι συστάσεις αυτές καθορίζουν τα κριτήρια της λειτουργικής και ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθώς και τα θέματα ασφάλειας της έκθεσης των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο στόχος μιας τέτοιας μελέτης ήταν το μαγνητικό πεδίο εντός και εκτός ενός ηλεκτρικού οχήματος κατά την ασύρματη φόρτιση σύμφωνα με τα κριτήρια J2954. Αναλύοντας τα χειρότερα σενάρια διαμορφώσεων των πηνίων και του αμαξώματος κατά την ασύρματη φόρτιση με ένα εξελιγμένο λογισμικό που βασίζεται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων που λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση και τη διάθλαση του πεδίου από το μεταλλικό κέλυφος του οχήματος, εκτιμήθηκαν αριθμητικά τα επίπεδα του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον [130]. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό αυτοκίνητο πόλης με σύστημα ασύρματης φόρτισης 7,7 kVA με τα πηνία του σε μέγιστη αποδεκτή απόσταση από το έδαφος και τη μέγιστη δυνατή μετατόπιση, προσομοιώνοντας τις χειρότερες συνθήκες ασύρματης φόρτισης. Σημειώθηκε υπέρβαση των επιπέδων αναφοράς της ICNIRP όσον αφορά την πυκνότητα μαγνητικής ροής B κάτω και δίπλα από το όχημα. Για τη μείωση του μαγνητικού πεδίου ρυθμίστηκαν τα ρεύματα που διέρρεαν τα πηνία του συστήματος ασύρματης φόρτισης με χρήση της αντιστάθμισης τύπου αυτεπαγωγή-πυκνωτής-πυκνωτής (LCC) αντί της παραδοσιακής αντιστάθμισης σειράς- σειράς (SS). Με αυτή την διόρθωση, το μαγνητικό πεδίο που υπολογίστηκε ήταν εντός των ορίων έκθεσης της ICNIRP του 2010, αλλά με περιορισμένη υπέρβαση των ορίων της ICNIRP του 1998. Τέλος, αποδείχθηκε ότι οι τιμές του πεδίου στο περιβάλλον του οχήματος αυξήθηκαν τόσο με την αύξηση της απόστασης από το έδαφος όσο με τη μείωση του πλάτους του αμαξώματος.

Τα νανοκρυσταλλικά κράματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά θωράκισης σε συστήματα WPT με υψηλή πυκνότητα ισχύος. Οι ιδιότητες ενός τέτοιου συστήματος προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για πυρήνα από φερρίτη και τέσσερις τύπους νανοκρυσταλλικών πυρήνων [131]. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης προτάθηκε ένα νέο προστατευτικό «μαξιλαράκι» που αποτελείται από νανοκρυσταλλικό κράμα και φερρίτη για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναδεικνύεται σε ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση νέων υλικών, όπως τα νανοκρυσταλλικά κράματα. Για την επιβεβαίωση της προσομοίωσης κατασκευάστηκε πειραματικό σύστημα ασύρματης φόρτισης για συχνότητα 85 kHz και ισχύος 1,5 kW με διάκενο αέρα 24 cm μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σημαντικά μεγαλύτερη θωράκιση όταν χρησιμοποιούνται τα νανοκρυσταλλικά κράματα σε σχέση με τον συμβατικό πυρήνα από φερρίτη παρόλο που παρατηρείται μια μικρή μείωση στην απόδοση μετάδοσης.

Η δοσιμετρία (μέτρηση H/M πεδίου) για ένα σύστημα WPT αναλύθηκε βασιζόμενη σε συντονισμό για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [132]. Το σύστημα που λειτουργεί σε συχνότητα 13,56 MHz με μεταφερόμενη ισχύ 5,3 kW είναι τοποθετημένο κάτω από το κέντρο του αμαξώματος του οχήματος. Ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (SAR) σε ανατομικά ανθρώπινα μοντέλα Duke και Ella με και χωρίς ιατρικό εμφύτευμα αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τέσσερα σενάρια έκθεσης: (i) χωρίς εμφύτευμα, (ii) με εμφύτευμα του νευροδιεγέρτη InterStim, (iii) με εμφύτευμα του προσθετικού ισχίου και (iv) με εμφύτευμα του καρδιακού βηματοδότη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αλλαγή στην απορρόφηση ενέργειας ραδιοσυχνότητας (RF) συμβαίνει όταν τα αγωγίμα εμφυτεύματα τοποθετούνται στο εγγύς πεδίο μιας πηγής ραδιοσυχνότητας. Από την ICNIRP προβλέπεται μεγαλύτερη τιμή SAR κοντά στα εμφυτεύματα. Ο μέγιστος μέσος όρος SAR για 10 g ιστών υπερβαίνει την τυπική οριακή τιμή που



ορίζεται από τις διεθνείς κατευθυντήριες οδηγίες, εκτός από τον μη-αγώγιμο βηματοδότη. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνει ποτέ το όριο τοπικής αύξησης θερμοκρασίας των 2°C. Η συμμόρφωση με τα όρια του SAR της ICNIRP στο χειρότερο σενάριο έκθεσης απαιτεί τον περιορισμό της μεταφερόμενης ισχύος.

Η επίδραση στο κεντρικό νευρικό σύστημα της ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης εξαιτίας ενός συστήματος WPT μαγνητικού συντονισμού για τα ηλεκτρικά οχήματα μελετήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού COMSOL Multiphysics [133]. Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα ήταν κατασκευασμένο από ανθρακονήματα (CFRP), το αμάξωμα του δεύτερου ήταν από κράμα αλουμινίου και του τρίτου από χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Αναλύθηκε και προσομοιώθηκε η θωράκιση διαφορετικού πάχους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι και τα τρία οχήματα μπορούν να θωρακίσουν αποτελεσματικά έναντι των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η θωράκιση του πρώτου και του δεύτερου αυτοκινήτου βελτιώνεται με την αύξηση του πάχους του υλικού του αμαξώματος, ενώ του τρίτου χειροτερεύει. Για το χειρότερο σενάριο θωράκισης, η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κεφάλι του ανθρώπου είναι 0,9  $\mu\text{T}$  και 0,18 V/m αντίστοιχα, το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης στο ανθρώπινο κεφάλι είναι μικρότερο από το όριο δημόσιας έκθεσης των 27  $\mu\text{T}$  και 2,97 V/m που ορίστηκε από την ICNIRP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού ενός ηλεκτρικού οχήματος δεν θα βλάψει το ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα στο όχημα.

Η ιδέα ενός OLEV και του μηχανισμού ασύρματης μεταφοράς ισχύος, όπου αναλύθηκαν και τα χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας δημοσιεύτηκε, δεδομένης της κρισιμότητας για την προστασία του ανθρώπινου σώματος, από μαγνητικά πεδία που μεταφέρουν 100 kW ισχύος στο όχημα [134]. Όσον αφορά τον θόρυβο ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, δεν έχει ακόμη καθιερωθεί μια αποδεκτή μέθοδος μέτρησης για τα συστήματα της μεγάλης ισχύος και ταυτόχρονα χαμηλής συχνότητας. Παρουσιάστηκαν επίσης οι μέθοδοι θωράκισης του μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας, καθώς και εφαρμογές σε OLEV.

Σε μια άλλη εργασία περιγράφεται η ιδέα και η μεθοδολογία σχεδιασμού μιας διάταξης συντονισμού για τη μείωση της διαρροής του μαγνητικού πεδίου από συστήματα WPT [135]. Χρησιμοποιώντας το φαινόμενο του συντονισμού, η θωράκιση αυτή μπορεί να δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο μειώνει το μαγνητικό πεδίο των πηνίων WPT και έτσι το συνολικό μαγνητικό πεδίο να είναι μικρό χωρίς την κατανάλωση της πρόσθετης ισχύος. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης αυτής και η επίδρασή της στην απόδοση του WPT αναλύθηκαν με τις προσομοίωση και τις πειραματικές μετρήσεις. Για την πρακτική εφαρμογή σε συστήματα ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, προτάθηκε και εφαρμόστηκε ένα σύστημα αυτόματης ρύθμισης της θωράκισης συντονισμού. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης συντονισμού επαληθεύτηκε με πειράματα σε ένα ηλεκτρικό λεωφορείο ασύρματης φόρτισης.

Τα εξωτερικά πεδία κοντά σε συστήματα WPT ηλεκτρικών οχημάτων που απαιτούν υψηλή ισχύ ενδέχεται να υπερβαίνουν τα όρια των διεθνών οδηγιών ασφάλειας. Τα αποτελέσματα μέτρησης πεδίων ενός τέτοιου συστήματος συχνότητας 85 kHz αποτυπώθηκαν σε μια εργασία, όπου αξιολογήθηκαν διάφορα σενάρια έκθεσης, όπως ένα ανθρώπινο σώμα μπροστά από το σύστημα WPT χωρίς θωράκιση, με θωράκιση, με καλή και κακή ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη και με μια μεταλλική πλάκα στο δάπεδο του οχήματος [136]. Οι ελάχιστες αποστάσεις πρόσβασης από τον άνθρωπο εξετάστηκαν για τις διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής ισχύος φόρτισης. Οι τιμές του πεδίου

κατά τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ φόρτισης συγκρίθηκαν με τα όρια των διεθνών κατευθυντήριων γραμμών ασφαλείας.

Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου EMPIR-16ENG08 MICEV, διεξήχθη μια διευρυμένη πειραματική και αριθμητική μελέτη για την αξιολόγηση της έκθεσης του κοινού σε μαγνητικά πεδία του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος (inductive power transfer – IPT) για δύο διαφορετικά σενάρια έκθεσης [137]. Το πρώτο για ένα μοντέλο του συστήματος IPT κατασκευασμένο σύμφωνα με το πρότυπο SAE J2954 που λειτουργεί στα 85 kHz για ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα. Το δεύτερο σενάριο αφορούσε ένα μοντέλο του συστήματος IPT με μέγιστη ονομαστική ισχύ 50 kW στα 27,8 kHz για ένα μικρό λεωφορείο. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά εργαλεία 3D προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), το λογισμικό Opera 3D και το CST. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο σταθμό φόρτισης μικρών λεωφορείων για να επικυρωθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο για τα ευθυγραμμισμένα όσο και μη ευθυγραμμισμένα πηνία του συστήματος IPT, από όπου προέκυψε ότι το αμάξωμα του οχήματος αποτελεί αποτελεσματική θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου και προκαλεί μείωση του πεδίου κατά τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους κοντά στα πηνία. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίσθηκε η χωρική κατανομή του πεδίου η οποία στην συνέχεια αξιοποιήθηκε στο λογισμικό Sim4Life για τη μελέτη της έκθεσης τριών ανθρώπινων ανατομικών μοντέλων του εικονικού πληθυσμού (ένας ενήλικας, ένα παιδί και ένα νεογέννητο). Τα τρία αυτά μοντέλα τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές στάσεις και θέσεις και ερευνήθηκαν δύο σενάρια έκθεσης. Υπέρβαση των ορίων έκθεσης που καθορίζονται από τις ισχύουσες κατευθυντήριες γραμμές δεν σημειώθηκε ποτέ εντός των οχημάτων. Ωστόσο, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου ξεπέρασαν τα όρια που θέτουν οι Διεθνείς Οργανισμοί όταν ένας ενήλικας έσκυψε έξω από το λεωφορείο, δηλαδή κοντά στα πηνία, καθώς επίσης και όταν ένα νεογέννητο τοποθετήθηκε στην ίδια θέση. Στο αυτοκίνητο παρατηρήθηκαν τιμές του μαγνητικού πεδίου στα όρια των διεθνών κανονισμών. Στην περίπτωση του λεωφορείου τα όρια που προβλέπουν οι οδηγίες της IEEE δεν ξεπεράστηκαν σε καμία μέτρηση, ενώ παρατηρήθηκε η υπέρβαση των ορίων της ICNIRP έως και 12 % για έναν ενήλικα και έως 38 % για ένα νεογέννητο.

Ακόμη, προτάθηκε μια νέα μέθοδος θωράκισης για την αντιμετώπιση των προβλημάτων μεγάλου όγκου και βάρους, καθώς επίσης και του τρόπου εγκατάστασης του συστήματος θωράκισης ενός πηνίου ασύρματης φόρτισης που είναι εγκατεστημένο εντός του ηλεκτρικού οχήματος [138]. Λαμβάνοντας υπόψη την οριζόντια τοποθέτηση του πηνίου φόρτισης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του σιδηρομαγνητικού υλικού θωράκισης, χρησιμοποιήθηκε ένας μόνο μεταλλικός δακτύλιος θωράκισης χαμηλής μαγνητικής διαπερατότητας, γύρω από το πηνίο εκπομπής. Με τη βοήθεια λογισμικού προσομοίωσης σχεδιάστηκε το μοντέλο σύζευξης μαγνητικού συντονισμού του πηνίου και του οχήματος, καθώς επίσης και το μοντέλο του σώματος πεζού στο σημείο παρατήρησης και αξιολογήθηκε η επίδραση του μεταλλικού δακτυλίου θωράκισης στις τιμές της αυτοεπαγωγής και της αμοιβαίας επαγωγής του πηνίου. Η νέα μέθοδος συγκρίθηκε με την παλιά, η οποία συνίσταται στην απλή προσθήκη σιδηρομαγνητικού υλικού στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η μέγιστη τιμή της B εντός του κορμού του ανθρώπινου σώματος μειώθηκε κατά 43 % με την ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης τιμής του E κατά 44 %. Τα αντίστοιχα ποσοστά μείωσης στο κεφάλι του ανθρώπου είναι 44 % για τη B και 39 % για την E. Μετά την προσθήκη του δακτυλίου, οι μέγιστες τιμές των B και E στον κορμό του ανθρώπου μειώθηκαν από 86 % και 23 % από το όριο ορίου έκθεσης της ICNIRP σε 49 % και 13%. Για το κεφάλι από 0,2 % και 0,09 % του ορίου έκθεσης της ICNIRP σε 0,09 % και 0,05 %, αντίστοιχα.

Τα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης φόρτισης WPT χρησιμοποιούν μια συμπαγή μεταλλική πλάκα αλουμινίου για την προστασία από την ηλεκτρομαγνητική διαρροή. Αν και έχει καλή απόδοση θωράκισης εν τούτοις μειώνει αισθητά την απόδοση μετάδοσης των συστημάτων ασύρματης φόρτισης. Η χρήση φύλλου αλουμινίου σε μορφή πλέγματος με οπές διαφορετικών διαμέτρων για την απόσβεση των δινορεύματων, ελαχιστοποιώντας την μεταβολή των ηλεκτρικών παραμέτρων του WPT, χωρίς σημαντική μεταβολή της θωράκισης [139]. Το λογισμικό Ansys Maxwell χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της απόδοσης μεταφοράς ισχύος και της θωράκισης.

Η αξιολόγηση των H/M πεδίων στα οποία εκτίθεται το ανθρώπινο σώμα λόγω του WPT αναλύθηκε επίσης, εξετάζοντας την δυνατότητα συμμόρφωσης με τα όρια έκθεσης του ανθρώπου σε αυτά τα πεδία [140]. Χρησιμοποιήθηκε ένα υψηλής ανάλυσης μοντέλο του ανθρώπινου σώματος το οποίο δημιουργήθηκε με τη μέθοδο απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού, στο οποίο εκτιμήθηκαν τα επαγόμενα πεδία. Η αριθμητική ανάλυση σε ένα όρθιο ανθρώπινο μοντέλο πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και έδειξε ότι τα όρια έκθεσης σε H/M πεδία δεν ξεπεράστηκαν ακόμη και όταν το πηνίο του πομπού βρισκόταν σε απόσταση εκατοστών από το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος.

Μια πειραματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του ηλεκτρικού πεδίου εντός του ανθρώπινου σώματος για την αξιολόγηση της έκθεσής του στα H/M πεδία που προέρχονται από συστήματα WPT προτάθηκε, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων του εγγύς μαγνητικού πεδίου [141]. Για τις ανάγκες των μετρήσεων κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα WPT, το ένα χωρίς και το άλλο με φύλλο από φερρίτη μαζί με μεταλλική πλάκα. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν το πλάτος και η φάση του κοντινού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή του WPT χρησιμοποιώντας μαγνητόμετρα και ένα σύστημα μέτρησης κοντινού πεδίου. Η δοσιμετρία της ανθρώπινης έκθεσης υπολογίστηκε με βάση το μετρούμενο εγγύς πεδίο ως προσπίπτον πεδίο με τη μέθοδο της σύνθετης αντίστασης για την εύρεση της έντασης του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε αριθμητικά ανθρώπινα μοντέλα. Η εγκυρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης αποδείχθηκε κατόπιν σύγκρισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τα αντίστοιχα των αριθμητικών προσομοιώσεων. Επιπλέον, υπολογίστηκε ο παράγοντας σύζευξης, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του προσπίπτοντος μαγνητικού πεδίου και του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ανθρώπινο σώμα για διαφορετικές αποστάσεις.

Ακόμη, αξιολογήθηκε η επίδραση του μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από ένα ασύρματο σύστημα μεταφοράς ισχύος που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [142]. Χρησιμοποιήθηκε μια πρωτότυπη προσέγγιση για τη μείωση του βήματος πλέγματος του τρισδιάστατου μοντέλου της WPT. Το διαφορετικό σχήμα των πηνίων λήψης – διέγερσης και μια κακή ευθυγράμμιση θεωρήθηκαν ως πιθανές πηγές διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου στο οποίο θα μπορούσε να εκτεθεί ένας άνθρωπος. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  γύρω από το WPT υπολογίστηκε και συγκρίθηκε με τα όρια της ICNIRP. Το προτεινόμενο τρισδιάστατο μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου με υψηλή ακρίβεια παρά την παρουσία αγώγιμου σιδηρομαγνητικού υλικού, δηλαδή του χάλυβα από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σασί του αυτοκινήτου και το οποίο χρειάζεται ένα πολύ λεπτό πλέγμα με μεγάλο αριθμό στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell.

Μια ανασκόπηση της τεχνολογίας WPT για εφαρμογές στα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρει την παρουσίαση της τεχνικής προσόδου, τον χαρακτηρισμό των συστημάτων WPT για τα ηλεκτρικά οχήματα στο αστικό περιβάλλον και την αξιολόγηση της βιώσιμης απόδοσης με τον εντοπισμό

προκλήσεων και ευκαιριών για βελτίωση [143]. Από τεχνικής πλευράς εξετάστηκαν η πρόοδος στον σχεδιασμό πηνίων, οι τοπολογίες αντιστάθμισης, τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι μέθοδοι ελέγχου.

Για να αξιολογηθεί η ασφάλεια ανθρώπινης έκθεσης σε ΗΜ πεδία που δημιουργούν τα συστήματα WPT πολλαπλών οχημάτων όταν φορτίζονται ταυτόχρονα και να διερευνηθούν απλές και αποτελεσματικές μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής προστασίας, δημιουργήθηκαν μοντέλα αυτοκινήτου, ασύρματου φορτιστή και ανθρωπίνων σωμάτων με το λογισμικό COMSOL Multiphysics [144]. Μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών σχετικών θέσεων δύο ασύρματων φορτιστών στην τιμή της μαγνητικής επαγωγής  $B$  όταν δύο αυτοκίνητα φορτίζονται ταυτόχρονα, καθώς επίσης και η συμβολή των διαφορετικών υλικών του αμαξώματος του αυτοκινήτου στην τιμή της  $B$  που καταγράφεται στην επιφάνεια του σώματος του οδηγού και η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου  $E$  εντός του σώματος του ανθρώπου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι όταν λειτουργούν ταυτόχρονα δύο ασύρματοι φορτιστές, η μέγιστη τιμή της  $B$  μέσα στο αυτοκίνητο είναι 1,3 φορές μεγαλύτερη από αυτή που καταγράφεται στην περίπτωση φόρτισης μόνο ενός αυτοκινήτου. Η μέγιστη τιμή της  $B$  στον χώρο προσομοίωσης θα μπορούσε να μειωθεί κατά 24,23 % μεταβάλλοντας την θέση των δύο ασύρματων φορτιστών. Η χρήση κράματος αλουμινίου για την κατασκευή του αμαξώματος θα μπορούσε να μειώσει τη μέγιστη τιμή της  $B$  της επιφάνειας του σώματος του οδηγού εντός του αυτοκινήτου κατά 99.76%. Στην περίπτωση αυτή και σε συνδυασμό με την τοποθέτηση τύπου σκακιέρας των δύο φορτιστών, η τιμή της  $B$  στην επιφάνεια του σώματος του οδηγού βρέθηκε κατά 42,86 % μικρότερη σε σχέση με μια τυχαία τοποθέτηση των δύο φορτιστών.

Η τεχνολογία WPT αντιμετωπίζει προκλήσεις σε σχέση με την ασφάλεια των ανθρώπων και την ομαλή λειτουργία των συσκευών που έχουν μεταλλικά εξαρτήματα λόγω του εκπεμπόμενου Η/Μ πεδίου. Ο σχεδιασμός του επαγωγικού ζεύκτη που περιλαμβάνει τη διαμόρφωση πηνίου και τη σχεδίαση μαγνητικής θωράκισης, αναλύθηκε με τρεις τεχνικές θωράκισης, την παθητική, την ενεργητική και την τεχνική συντονισμού [145].

Δεδομένου ότι οι ασύρματοι σταθμοί φόρτισης λειτουργούν χωρίς μεγάλα καλώδια ή σταθμούς, μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν σε δημόσιους χώρους χωρίς τον κίνδυνο βανδαλισμού ή ζημιών από τις καιρικές συνθήκες, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό τη διάρκεια ζωής του σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, μελετώντας πάντα τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση στα ισχυρά Η/Μ πεδία που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία φόρτισης. Οι πιθανοί κίνδυνοι για την ανθρώπινη ασφάλεια, οι παρεμβολές στη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών και οι επιπτώσεις της θέρμανσης των συστημάτων WPT μελετήθηκαν, κάνοντας χρήση ενός πρωτότυπου συστήματος WPT ισχύος 3,3 kW [146]. Οι αλλαγές στην απόδοση ασύρματης μεταφοράς ισχύος λόγω της κακής ευθυγράμμισης του πηνίου διερευνήθηκαν, χρησιμοποιώντας μια αυτοματοποιημένη πλατφόρμα τριών αξόνων, δίνοντας σχετικές λύσεις για το σχεδιασμό του συστήματος ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Δεδομένου ότι το σύστημα ασύρματης φόρτισης εν κινήσει (on-line electric vehicle – OLEV) μεταφέρει από και προς το όχημα ισχύ μεγαλύτερη του 1 kW, το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μελετήθηκε αναδεικνύοντας την επαγωγική θωράκιση ως πιθανή λύση για τη μείωση του μαγνητικού πεδίου σε εφαρμογές τέτοιες εφαρμογές [147].

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παραδοσιακή μέθοδος ελαχιστοποίησης του μαγνητικού πεδίου που βασίζεται στην προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι χρονοβόρα και απαιτεί πόρους, προτάθηκε μια αντίστοιχη αριθμητική μέθοδος για τη μείωση του μαγνητικού πεδίου γύρω από τα ασύμμετρα πηνία ασύρματης μεταφοράς ισχύος διατηρώντας σταθερή την ισχύ

μετάδοσης, όπου παρουσιάστηκαν οι μαθηματικές εκφράσεις για τις τιμές του πεδίου γύρω από τα πηνία WPT και αναλύθηκαν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της κατανομής του [148]. Το μαγνητικό πεδίο που διαφεύγει στο περιβάλλον γύρω από τα ασύμμετρα πηνία ασύρματης μεταφοράς ισχύος βελτιστοποιήθηκε με την αριθμητική μέθοδο και προσδιορίστηκε ο αριθμός των σπειρών για τα πηνία WPT που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ένταση αυτού του πεδίου. Η αποτελεσματικότητα της αριθμητικής μεθόδου επαληθεύθηκε μέσω του λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων JMAG και αποδείχθηκε ότι η αριθμητική μέθοδος απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από την προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν επίσης την εγκυρότητα της αναλυτικής προσέγγισης.

Μια μέθοδος μείωσης του μαγνητικού πεδίου διαρροής από ένα σύστημα WPT με τη βοήθεια φερριμαγνητικού υλικού και μεταλλικής θωράκισης ανέδειξε τα πλεονεκτήματα αυτής της υβριδικής δομής [149]. Στην εν λόγω εργασία διερευνήθηκαν οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου και η ηλεκτρική απόδοση τριών διαφορετικών πηνίων μέσω του επιλύτη τρισδιάστατου H/M πεδίου του λογισμικού προσομοίωσης SPICE. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος μειώνει σημαντικά το μαγνητικό πεδίο διαρροής στην περιοχή του συστήματος WPT χωρίς σημαντική απώλεια της ηλεκτρικής του απόδοσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της προτεινόμενης δομής πηνίου επαληθεύονται πειραματικά με ένα σύστημα WPT των 100 W που προορίζεται για τηλεόραση LED.

Σε μια άλλη εργασία προτείνεται ένας βελτιστοποιημένος σχεδιασμός θωράκισης για μείωση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από το σύστημα WPT [150]. Εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις σχεδιασμού θωράκισης ως προς την ένταση του H/M πεδίου και την αμοιβαία επαγωγή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την απόδοση μεταφοράς ισχύος. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι όταν χρησιμοποιούνται τόσο φύλλα από φερρίτη όσο και αγώγιμα φύλλα ως θωράκιση των πηνίων πομπού και δέκτη το μαγνητικό πεδίο διαρροής μπορεί να μειωθεί σημαντικά με αμελητέα μεταβολή της αμοιβαίας επαγωγής. Επιπλέον, εξετάζονται οι επιδράσεις του μεγέθους και του πάχους του αγώγιμου φύλλου στο πλάτος του πεδίου και στην αμοιβαία επαγωγή.

Η θωράκιση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα δύο επίπεδα πηνία ενός συστήματος WPT σε συχνότητα δεκάδων kHz που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης μελετήθηκε και εξετάστηκαν διαφορετικές τεχνικές θωράκισης με χρήση αγώγιμων και μαγνητικών υλικών, επισημαίνοντας τα δυνατά και αδύναμα σημεία του καθενός [151]. Η προτεινόμενη διάταξη θωράκισης αποτελείτο από ένα συνδυασμό αγώγιμου και μαγνητικού υλικού και εφαρμόστηκε στη προσομοίωση ηλεκτρικού οχήματος εξοπλισμένου με σύστημα WPT. Με αυτή τη διαμόρφωση, η συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να επιτευχθεί εντός ή εκτός του οχήματος.

Η επίδραση μη σιδηρομαγνητικού μετάλλου της θωράκισης στην απόδοση μεταφοράς ισχύος του συστήματος WPT με μελετήθηκε με προσομοίωση και πειραματική ανάλυση [152]. Παράλληλα αναλύθηκε και η επίδραση σιδηρομαγνητικού υλικού θωράκισης στην απόδοση μεταφοράς ισχύος συστημάτων WPT και υλοποιήθηκε δομή μεταλλικής θωράκισης διπλής στρώσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι με την εφαρμογή της νέας μεθόδου θωράκισης μετάλλου διπλής στρώσης η απόδοση μεταφοράς ισχύος του συστήματος αυξάνεται σημαντικά ενώ το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των συστημάτων WPT μειώνεται δραματικά.

Μια περιεκτική επισκόπηση που εστιάζει στις δομές των πλακών αλληλεπίδρασης πομπού και δέκτη προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με τον τύπο των περιελίξεων, τα μαγνητικά υλικά (όπως

ο φερρίτης, τα νανοσωματίδια, το μαγνητιζόμενο σκυρόδεμα και ο εύκαμπτος πυρήνας) και η θωράκιση (όπως παθητική, ενεργητική και επαγωγική) [153]. Επιπλέον, διαφορετικές μορφές των πλακών των πηνίων, όπως κυκλική, ορθογώνια, διπλή δισδιάστατη, τετραγωνική διπλή δισδιάστατη, διπολική, τριπολική, ομοιογενής με πολλαπλά πηνία, τετραπολική, διπλή δισδιάστατη σταυρωτή, τετραγωνική τετραδιάστατη και πολυφασική μελετήθηκαν όσον αφορά την απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση μετάδοσης, το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου διαρροής, τη συμβατότητα σε συνθήκες λειτουργίας, την απόκριση στην περίπτωση της κακής ευθυγράμμισης, τη μαγνητική ροή και την επίδραση της θωράκισης. Επίσης, η εργασία παρουσιάζει την τελευταία επιτεύγματα στην ανάπτυξη πρωτοτύπων του επαγωγικού φορτιστή, τα εμπορικά προϊόντα που διατίθενται στην αγορά και τα διεθνή πρότυπα που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία.

Μια άλλη ολοκληρωμένη ανασκόπηση όλων των συστημάτων WPT, δίνει τα χαρακτηριστικά και τα πρότυπα που είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία, καθώς επίσης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε συνδυασμό με τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας [154]. Μια συγκριτική επισκόπηση της συμβατικής και της ασύρματης φόρτισης ακολουθείται από μια λεπτομερή περιγραφή της στατικής ασύρματης φόρτισης, της δυναμικής ασύρματης φόρτισης και της οιωνοί-δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Περιγράφονται οι προκλήσεις, όπως ο σχεδιασμός των πηνίων ισχύος, η συχνότητα, οι περιορισμοί στο επίπεδο ισχύος, η κακή ευθυγράμμιση και οι πιθανές λύσεις. Επιπλέον, εξετάζεται η αναγκαιότητα και η πρόοδος στην τυποποίηση των συστημάτων ασύρματης φόρτισης. Η εφαρμογή του δικτύου της ασύρματης φόρτισης επανεξετάζεται ακολουθούμενη από μια επισκόπηση της οικονομικής ανάλυσης, των κοινωνικών επιπτώσεων, της βιωσιμότητας και της ασφάλειας για την αξιολόγηση της εμπορικής αξιοποίησης της ασύρματης φόρτισης.

Παρόλο που τα περισσότερα από τα οχήματα αυτά φορτίζονται χρησιμοποιώντας τα ηλεκτρικά καλώδια, οι εταιρείες όπως η Tesla, η BMW και η Nissan έχουν προχωρήσει στον σχεδιασμό των αυτοκινήτων με ασύρματη φόρτιση χωρίς ογκώδη καλωδίωση. Αντίθετα από την καλωδιακή σύνδεση, η επαγωγική σύνδεση αποτρέπει αποτελεσματικά τους σπινθηρισμούς κατά την σύνδεση και αποσύνδεση. Επιπλέον, η ασύρματη φόρτιση ανοίγει νέες δυνατότητες για δυναμική φόρτιση, δηλαδή τη φόρτιση εν κινήσει. Όταν εφαρμοστεί, η αυτονομία του οχήματος δεν θα περιορίζεται πλέον από την χωρητικότητα της μπαταρίας, συνεπώς η απαίτηση για αυτήν θα μειωθεί σημαντικά. Το θέμα αυτό αποκτά προτεραιότητα ιδιαίτερα στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία και την Κορέα, ενώ προωθείται και παγκοσμίως. Όλα αυτά παρουσιάζονται σε μια διεξοδική βιβλιογραφική ανασκόπηση της τεχνολογίας ασύρματης φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα όπου συνοψίζονται και συγκρίνονται τα βασικά τεχνικά στοιχεία της ασύρματης φόρτισης, όπως οι τοπολογίες αντιστάθμισης, ο σχεδιασμός πηνίου και η επικοινωνία [155]. Για να ενισχυθεί η ισχύς φόρτισης διερευνάται μια καινοτόμος προσέγγιση για τη χρήση υπεραγωγίου υλικού στον σχεδιασμό των πηνίων και συζητείται η πιθανή επίδρασή τους στην ασύρματη φόρτιση. Επιπλέον, αντιμετωπίζονται οι ανησυχίες για την υγεία και την ασφάλεια της ασύρματης φόρτισης, συζητώντας τα σχετικά πρότυπα. Τέλος παρουσιάζεται το οικονομικό κόστος μιας ευρείας σειράς συστημάτων ασύρματης φόρτισης.

Αντίστοιχα, μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των πρόσφατων τάσεων στις τεχνολογίες και τις εφαρμογές του συστήματος WPT μελετήθηκε, όπου αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές του συστήματος, διερευνώντας λεπτομερώς την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στον τομέα αυτόν, συμπεριλαμβανομένης της σταθερής και της δυναμικής ασύρματης φόρτισης, καθώς επίσης και των μεθόδων θωράκισης έναντι αυτών των πεδίων [156].

Ένας νέος σχεδιασμός ενεργής θωράκισης πηνίων για τη μείωση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν τα ρεύματα που διαρρέουν τα πηνία ενός συστήματος WPT προτείνει την διαίρεση του παραδοσιακού ενεργού βρόχου που χρησιμοποιείται για τη θωράκιση μιας πηγής σε δύο ξεχωριστά πηνία θωράκισης, ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση του WPT [157]. Για τη θωράκιση των πηνίων WPT τα ενεργά πηνία τοποθετήθηκαν στο έδαφος παράλληλα με το κύριο πηνίο του συστήματος WPT και μερικά άλλα κάτω από το όχημα στο ίδιο επίπεδο με το δευτερεύον πηνίο. Τα ρεύματα στα ενεργά πηνία είναι προσεκτικά επιλεγμένα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή που είναι προσβάσιμη από τον άνθρωπο, δηλαδή εκτός του οχήματος και μέσα στην καμπίνα.

Ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο του συστήματος WPT που περιλαμβάνει έναν διπολικό πομπό και έναν τετράγωνο δέκτη και βασίζεται στην υπέρθεση δύο αναλυτικών μοντέλων των δισδιάστατων (2D) περιοχών αναπτύχθηκε, όπου τα φύλλα θωράκισης από φερρίτη και αλουμίνιο τοποθετήθηκαν στην πλευρά του πομπού και του δέκτη [158]. Στη συνέχεια υπολογίσθηκε αναλυτικά η αμοιβαία επαγωγή σε σχέση με τις κύριες παραμέτρους του συστήματος WPT, δηλαδή τις διαστάσεις των πηνίων, την αγωγιμότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα των υλικών θωράκισης. Τρία παραδείγματα που παρουσιάστηκαν αναδεικνύουν πώς η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών με το προτεινόμενο μοντέλο συγκρίνονται τόσο με τα αντίστοιχα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων όσο και με τις πειραματικές μετρήσεις, αποδεικνύοντας ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι 9 φορές ταχύτερο από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στις περισσότερες περιπτώσεις το υπολογιστικό σφάλμα του προτεινόμενου μοντέλου δεν υπερβαίνει το 6% σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Επίσης, μια τεχνική ασύρματης μεταφοράς ισχύος βασιζόμενη στη σύζευξη των πεδίων των πηνίων με κατάλληλη σύνθετη αντίσταση είναι σε θέση να ρυθμίσει την σύνθετη αντίσταση του WPT με προσαρμογή της τιμής της αυτεπαγωγής του κάθε πηνίου [159]. Μια μεταλλική πλάκα τοποθετημένη στο κάτω μέρος του ηλεκτρικού οχήματος προτάθηκε για τη μεγιστοποίηση της σύζευξης. Η μέγιστη απόδοση μεταφοράς ισχύος ήταν περίπου 78 %.

Ένας ομοαξονικός μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας (HFCT) με απόδοση ισχύος >99,5 % και συχνότητα λειτουργίας μεταξύ 100-300 kHz, κατάλληλος για WPT, απέδωσε ονομαστική ισχύ από 2,5 έως 20 kW ρυθμίζοντας την συμμετρική δομή του [160]. Ο HFCT είναι κατάλληλος για χρήση σε μετατροπείς συστημάτων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και πληροί τις σχεδιαστικές προϋποθέσεις οι οποίες απαιτούν να είναι ελαφρύς, συμπαγής και να έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος και μειωμένο κατά 75 % όγκο σε σύγκριση αντίστοιχους του εμπορίου. Επιπλέον, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, για την αντιμετώπιση των οποίων τοποθετείται χάλκινη θωράκιση τύπου κλωβού Faraday, με την οποία επετεύχθη μείωση της χωρητικότητας εντός της περιέλιξης κατά 80,6 %. Επίσης, παρουσιάσθηκε ανάλυση θωράκισης, με έμφαση στις απώλειες, η οποία πραγματοποιήθηκε με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Στα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων, το H/M πεδίο πρέπει να μειωθεί για την ασφάλεια των πεζών. Γενικά, τα πεδία αυτά πρέπει να εξουδετερώνονται κατά τη διάρκεια της οποιασδήποτε μεταφοράς ισχύος στον χώρο που πραγματοποιείται. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν μέθοδοι σχεδιασμού για την εξουδετέρωση του H/M πεδίου των ηλεκτρικών οχημάτων ασύρματης φόρτισης [161]. Η πρώτη μέθοδος αφορά στην εξουδετέρωση του H/M πεδίου του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου με την τοποθέτηση των κατάλληλων «πηνίων ακύρωσης» σε κάθε πηνίο του συστήματος. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για οποιοδήποτε

σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος τύπου συντονισμού. Η πτώση της μεταφερόμενης ισχύος ελαχιστοποιείται εάν τα πηνία «ακύρωσης» τοποθετηθούν εκτός της μαγνητικής διαδρομής ζεύξης. Παρουσιάζονται παραδείγματα σχεδίασης των συστημάτων IPTS τύπου U και W, καθώς και του σταθερού ασύρματου φορτιστή του ηλεκτρικού οχήματος. Οι πειραματικές μετρήσεις επιβεβαιώνουν τη λειτουργικότητα του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος που έχει σχήμα ράγας μικρού πλάτους και εναλλασσόμενη μαγνητική πολικότητα σε σχέση με το οδόστρωμα. Υπολογίστηκε η βέλτιστη απόσταση των πηνίων «ακύρωσης» από τα κύρια πηνία και ο βέλτιστος αριθμός σπειρών. Πρόσθετες τεχνικές μείωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, προτάθηκαν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι, το πεδίο σε απόσταση 1 m από το κέντρο του ανορθωτή είναι κάτω από 4,4  $\mu\text{T}$  ακόμη και για τη μέγιστη ισχύ των 12 kW.

Τα ηλεκτρικά οχήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν τα ηλεκτρικά οχήματα με φόρτιση εν κινήσει (RPEV), ενώ στην δεύτερη ηλεκτρικά οχήματα σταθερής φόρτισης (SCEVs). Τα RPEV δεν απαιτούν μεγάλες, βαριές και ακριβές συστοιχίες μπαταριών και μεγάλο χρόνο φόρτισης, επειδή τροφοδοτούνται απευθείας από το δρόμο κατά τη διάρκεια της κίνησης. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος, η απόδοση, η οριζόντια εκτροπή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το διάκενο αέρα, το μέγεθος, το βάρος και το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων ασύρματης φόρτισης έχουν βελτιωθεί χάρη στους καινοτόμους διακόπτες ημιαγωγών, στους καλύτερους σχεδιασμούς πηνίων, στις τεχνικές κατασκευής δρόμων και στην υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας. Αυτές οι εξελίξεις στον τομέα των οχημάτων με φόρτιση εν κινήσει συνοψίζονται σε σχετική εργασία ανασκόπησης, μαζί με την μελέτη των OLEV [162]. Επιπλέον, αναλύονται η δομή των πηνίων, τα σχήματα τροφοδοσίας ισχύος και οι τεχνικές μεταγωγής του επαγωγικού συστήματος μεταφοράς ισχύος εν κινήσει.

Ο πυρήνας από φερρίτη του πηνίου του συστήματος WPT παίζει ουσιαστικό ρόλο στη βελτίωση της σύζευξης και στη μαγνητική θωράκιση για τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, ο φερρίτης έχει εμφανή μειονεκτήματα, όπως χαμηλό σημείο κορεσμού και ευθραυστότητα. Ένας εύκαμπτος νανοκρυσταλλικός πυρήνας, ο οποίος έχει υψηλή ελαστικότητα και υψηλά όρια κορεσμού προτάθηκε για να λύσει αυτό το πρόβλημα [163]. Ωστόσο, στον νανοκρυσταλλικό πυρήνα δημιουργούνται ισχυρά δινορεύματα κατά τη διέγερση με συχνότητα 85 kHz, που μπορεί να μειωθούν με τη διαδικασία σύνθλιψης και τη χρήση των ενώσεων χωρίς ραφές. Από τις προσομοιώσεις με Πεπερασμένα Στοιχεία προέκυψαν τέσσερις κατηγορίες νανοκρυσταλλικών πυρήνων με διαφορετική μαγνητική διαπερατότητα. Οι πυρήνες αυτοί έδειξαν εξαιρετική συμπεριφορά μέσω των μετρήσεων στατικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια δοκιμών φόρτωσης ισχύος 7,7 kW. Ένας εκ των τεσσάρων νανοκρυσταλλικών πυρήνων με την καλύτερη απόδοση μελετήθηκε περαιτέρω για τον προσδιορισμό του σημείου κορεσμού και την μέτρηση μαγνητικού πεδίου διαρροής κατά τη μεταφορά ισχύος 11 kW. Ακόμη και όταν το πάχος του υλικού μειωθεί στα 2 mm, η απόδοση του συστήματος παραμένει στα 97%. Η μέγιστη θερμοκρασία πυρήνα διατηρείται στους 81°C και το μαγνητικό πεδίο που διαφεύγει στο περιβάλλον ικανοποιεί τους περιορισμούς της ICNIRP.

Μια μέθοδος προσομοίωσης κοντινού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και προσδιορισμού του μεγέθους μαγνητικής θωράκισης για ένα σύστημα WPT που βασίζεται σε στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα τα οποία παράγουν το ίδιο πεδίο με το πραγματικό πηνίο συστήματος WPT δημοσιεύθηκε πρόσφατα [164]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του μεγέθους μιας πλάκας από μαγνητικό υλικό που μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από το δάπεδο του οχήματος για την προστασία του ανθρώπινου σώματος από μαγνητικά πεδία. Η πλάκα αυτή προσφέρει καλή θωράκιση,



μειώνοντας το μαγνητικό πεδίο κατά 43 dB, διαμορφώνοντας το μέγεθος του πεδίου εντός των ορίων που θέτουν οι Διεθνείς Οργανισμοί. Η προσέγγιση αυτή επικυρώνεται πειραματικά.

Επίσης, δημοσιεύθηκε μια ανασκόπηση των τεχνολογιών αιχμής στον τομέα ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει παρουσιαστεί, επαναλαμβάνοντας την γενική ομολογία ότι οι τεχνολογίες κοντινού πεδίου είναι προτιμητέες από τις τεχνολογίες μακρινού πεδίου [165]. Οι τεχνολογίες επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και τα συστήματα μαγνητικού συντονισμού με πολύ καλή σύζευξη επιλέγονται για λεπτομερή εξέταση. Επιπλέον, συζητούνται ειδικά ζητήματα που σχετίζονται με εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, όπως αποτελεσματική τροφοδοσία, όρια κακής ευθυγράμμισης, ταυτόχρονη μετάδοση ισχύος και δεδομένων, καθώς επίσης και τρόποι θωράκισης.

Ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού ισχύος 3,7 kW προτάθηκε για την υλοποίηση της μετάδοσης ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα [166]. Εκτός από τον σχεδιασμό των λειτουργικών ηλεκτρικών μονάδων, τα πηνία ζεύξης σχεδιάσθηκαν και συγκρίθηκαν με πρωτότυπα για τον έλεγχο της ακρίβειας του σχεδιασμού και των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια, η μελέτη εστίασε στην κατανομή του μαγνητικού πεδίου των πηνίων ζεύξης στο περιβάλλον του οχήματος. Τέσσερα σημεία (A1, A2, A3, A4) σε διαφορετικές θέσεις του οχήματος και τρία σημεία (το κεφάλι B1, το στήθος B2 και τη λεκάνη B3) στο κάθισμα οδηγού επιλέχθηκαν για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου των πηνίων για πέντε μετατοπίσεις των 60 mm, 120 mm, 180 mm, 240 mm και 300 mm αναλύθηκε θεωρητικά και προσομοιώνεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στα σημεία που επιλέχθηκαν ήταν εντός των ορίων, εκτός από την τιμή στο σημείο A3 η οποία είναι μεγαλύτερη από 30,4 A/m που απαιτείται από το SAE J2954 για τη μετατόπιση 40 % και 50 %. Παρουσιάζεται επίσης η κατανομή του μαγνητικού πεδίου λόγω της πλευρικής ζώνης και των περιττών αρμονικών. Ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού ισχύος 3,7 kW κατασκευάστηκε για την επικύρωση της προσομοίωσης, που επετεύχθη με καλή ακρίβεια.

Ένας τρόπος βελτιστοποίησης του συστήματος ενεργής θωράκισης που αποτελείται από πολλαπλά πηνία με στόχο τη μείωση του μαγνητικού πεδίου διαφυγής στο WPT που λειτουργεί στα 85 kHz χρησιμοποιήθηκε, όπου κάθε πηνίο τροφοδοτείται ανεξάρτητα και η καταλληλότερη διέγερση επιτυγχάνεται με μια διαδικασία βελτιστοποίησης που βασίζεται στον αλγόριθμο Gradient Descent [167]. Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόσθηκε για τη θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου δίπλα σε ένα ηλεκτρικό όχημα εξοπλισμένο με πηνία προτύπου SAE κατά τη διάρκεια της ασύρματης φόρτισης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι το μαγνητικό πεδίο στην πιο κρίσιμη περιοχή είναι μειωμένο στο μισό με περιορισμένη επίδραση στην ηλεκτρική απόδοση.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος WPT αναπτύχθηκε μια καινοτόμα σχεδίαση πηνίου μαζί με τη μαγνητική θωράκιση [168], που έχει πλεονέκτημα στη μείωση της διαρροής του μαγνητικού πεδίου και στη συγκέντρωσή του. Με βάση τον θεωρητικό υπολογισμό της συγκέντρωσης της μαγνητικής ροής του πηνίου, την ανάλυση των ιδιοτήτων του συστήματος, καθώς και δυνατότητα της πρακτικής εφαρμογής, αναπτύχθηκε λεπτομερώς μια πλήρης μαγνητική θωράκιση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πηνίο με τη συγκεκριμένη δομή θωράκισης έχει τη μέγιστη απόδοση μετάδοσης ενέργειας. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή δομή θωράκισης, το βάρος της νέας είναι αρκετά μειωμένο, κατά περίπου 41 %. Τέλος, η προτεινόμενη δομή θωράκισης κατασκευάστηκε και πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για την επαλήθευση της ορθότητας και των πλεονεκτημάτων της.

Τα προβλήματα έκθεσης των ανθρώπων σε μαγνητικά πεδία εμφανίζονται αναπόφευκτα κατά τη λειτουργία του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος με μαγνητικό συντονισμό (MR-WPT) και η επίλυσή του επιτυγχάνεται με τα συστήματα μαγνητικής θωράκισης τα οποία βελτιώνουν τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά τους [169]. Στη μελέτη αναλύθηκε θεωρητικά με χρήση των τύπων Moser και Schelkunoff η αποτελεσματικότητα διαφορετικών υλικών θωράκισης για ένα σύστημα MR-WPT δύο πηνίων. Στη συνέχεια προτάθηκε ένα σύστημα μαγνητικής θωράκισης διπλής στρώσης, το οποίο προσφέρει τη βέλτιστη θωράκιση και ταυτόχρονα έχει τον καλύτερο συντελεστή σύζευξης των πηνίων. Τέλος, τα αποτελέσματα προσομοίωσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων επιβεβαίωσαν την ορθότητα της θεωρητικής ανάλυσης και την αποτελεσματικότητα του συστήματος θωράκισης διπλής στρώσης η οποία είναι κατά 30 dB μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μονής στρώσης.

Η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης στην παραγωγή θερμότητας και την επίδρασή της στη συνολική απόδοση του συστήματος μελετήθηκε, εξετάζοντας τις μεταβολές των ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει της συχνότητας και της θερμοκρασίας [170]. Για τις προσομοιώσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS. Για ταχύτερη επακόλουθη βελτιστοποίηση, προσομοιώθηκε ένα μοντέλο του συστήματος μικρότερης τάξης μεγέθους. Οι δοκιμές έδειξαν καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου μικρότερου μεγέθους και των προσομοιώσεων συζευγμένων πεδίου. Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό των απωλειών διαφορετικών τμημάτων του συστήματος. Επιπλέον, τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Επίσης, τα θέματα σχεδιασμού ενός συστήματος WPT για ηλεκτρικά οχήματα με χρήση των επαγωγικών βρόχων συνδεδεμένων με τον μετατροπέα συντονισμού μελετήθηκαν, περιλαμβάνοντας την λειτουργία του συστήματος και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του, αποδεικνύοντας ότι η επίδραση του σασί του αυτοκινήτου οδηγεί σε διπλό συντονισμό και έχει ισχυρή συνεισφορά στα ακτινοβολούμενα πεδία [171].

Ένα πηνίο ενεργής θωράκισης διπλού βρόχου που συνδέεται σε σειρά με το πρωτεύον πηνίο για να μειώσει το μαγνητικό πεδίο διαρροής, ενώ ταυτόχρονα εξαλείφει την πρόσθετη σύζευξη μεταξύ του πηνίου θωράκισης και του πηνίου λήψης ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων προτάθηκε, μαζί με μια στρατηγική σχεδίασης παραμέτρων με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και τη μείωση του κόστους του πηνίου θωράκισης χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης [172]. Επίσης, παρουσιάστηκε ένα πρωτότυπο ισχύος 1,5 kW με διάκενο αέρα 19 cm που κατασκευάστηκε για την επαλήθευση των αναλυτικών λύσεων και τη διερεύνηση της επίδρασης του πηνίου θωράκισης στις παραμέτρους του συστήματος. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο πηνίο ενεργής θωράκισης έδειξε πλεονεκτήματα στην απόδοση του συστήματος και στην αποτελεσματικότητα θωράκισης σε σύγκριση με τη συμβατική θωράκιση αλουμινίου.

Σε ένα άλλο άρθρο επισκόπησης παρουσιάστηκε η τελευταία λέξη της τεχνολογίας των συστημάτων WPT και διερευνήθηκε η καταλληλότητα της για την ασύρματη φόρτιση μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων [173]. Η ανασκόπηση ανέδειξε τα πλεονεκτήματα του συστήματος σταθερής φόρτισης (σταθμευμένο όχημα), φόρτισης «ευκαιρίας» (σταματημένο όχημα σύντομο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα, σε στάση λεωφορείου) και της δυναμικής φόρτισης (όταν όχημα κινείται κατά μήκος μιας λωρίδας εξοπλισμένης με σύστημα WPT). Η δυναμική ασύρματη φόρτιση υπόσχεται μερική ή πλήρη εξάλειψη της ολονύκτιας φόρτισης μέσω ενός συμπαγούς δικτύου δυναμικών φορτιστών εγκατεστημένων στους δρόμους που θα κρατούσαν τις μπαταρίες των οχημάτων φορτισμένες ανά

πάσα στιγμή, αυξάνοντας κατά συνέπεια την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Η δυναμική φόρτιση μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της τιμής των ηλεκτρικών αυτοκινήτων εξαιτίας του μικρού μεγέθους της απαιτούμενης μπαταρίας, να αυξήσει την αυτονομία οδήγησης και να μειώσει το μέγεθος της μπαταρίας.

Ένα σύνολο από λειτουργικά πηνία προτάθηκε για την εξουδετέρωση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα σύστημα WPT που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών οχημάτων εν κινήσει [174]. Η εφαρμογή αυτού του συστήματος εξετάστηκε για έναν δρόμο με πολλές λωρίδες φόρτισης μικρού μήκους. Αναπτύχθηκε μια μαθηματική διαδικασία για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της διαμόρφωσης των πηνίων και της διέγερσής τους. Χάρη την προτεινόμενη προσέγγιση το μαγνητικό πεδίο δεν υπερβαίνει τα επίπεδα αναφοράς της ICNIRP 2010 εντός της καμπίνας των ηλεκτρικών οχημάτων και κατά μήκος του ηλεκτροδούμενου οδοστρώματος.

Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα ασύρματα συστήματα μεταφοράς ισχύος βρίσκονται στο επίκεντρο ενδιαφέροντος του κοινού. Τα θέματα ασφάλειας και υγείας του ανθρώπου απασχολούν τους επιστήμονες, καθώς και τους Διεθνείς Οργανισμούς. Το αλουμίνιο και ο φερρίτης είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα παθητικής θωράκισης και στοχεύουν στη μείωση των πεδίων αυτών. Η επίδραση αυτών των υλικών στην χωρική κατανομή του πεδίου διερευνήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Comsol για τις τέσσερις πιθανές γεωμετρίες, όπως χωρίς θωράκιση, με φερρίτη, με αλουμίνιο και πλήρη θωράκιση [175]. Καθώς η σύνθετη αντίσταση ποικίλλει για τις τέσσερις γεωμετρίες, το ρεύμα του πρωτεύοντος πηνίου ρυθμίζεται έτσι ώστε η μεταφορά ισχύος στο δευτερεύον να διατηρείται σταθερή. Οι γραφικές παραστάσεις της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στην κατακόρυφη διεύθυνση δείχνουν ότι οι μέγιστες τιμές των πεδίων των δύο πηνίων για γεωμετρία χωρίς θωράκιση βρίσκονται κεντραρισμένα εντός των πηνίων, ενώ για τα υπόλοιπα τρία σενάρια είναι μετατοπισμένα και εντοπίζονται πιο κοντά το ένα στο άλλο, που οδηγεί στη συμβολή των πεδίων των πηνίων στον χώρο και στις αυξημένες τιμές του συνολικού πεδίου. Αυτή η εγγύτητα ποικίλλει ανάλογα με την οριζόντια απόσταση και το κατακόρυφο κενό μεταξύ των πηνίων.

Η απόσταση ασφαλείας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του συστήματος φόρτισης όταν το ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται ασύρματα υπολογίσθηκε και κατασκευάστηκαν διάφορα συστήματα ασύρματης φόρτισης με διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και διαφορές στην ισχύ εξόδου μαζί με ένα μοντέλο ανθρώπινου σώματος για τις ανάγκες του εγχειρήματος [176]. Στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν και τα θερμικά αποτελέσματα των πεδίων αυτών. Η εργασία εστιάζει στο επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο εντός του ανθρώπινου σώματος και των κύριων οργάνων του κατά τη στατική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας με ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πρότυπα που έχει θεσπίσει η ICNIRP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν το σύστημα λειτουργεί σε συχνότητα 85 kHz με ισχύ εξόδου 3,7 kW, 7,7 kW, 22 kW, 33 kW, 66 kW και 150 kW, η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του συστήματος ασύρματης φόρτισης είναι 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, 1,0 m, 1,2 m και 1,7 m αντίστοιχα. Όταν το σύστημα λειτουργεί με ισχύ εξόδου 66 kW με συχνότητα 85 kHz, 300 kHz, 500 kHz και 700 kHz, η αντίστοιχη ελάχιστη απόσταση ασφαλείας είναι 1,2 m, 0,9 m, 0,8 m και 0,6 m αντίστοιχα. Επιπλέον, υπολογίσθηκε και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται εντός των ανθρώπινων οργάνων σε διαφορετική ισχύ εξόδου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου στο ήπαρ και στους νεφρούς είναι υψηλότερη σε σχέση με τις τιμές στα υπόλοιπα όργανα. Όταν το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται στην ελάχιστη ασφαλή απόσταση, οι αλλαγές θερμοκρασίας που προκαλούνται από την ηλεκτρομαγνητική επίδραση σε διάφορα όργανα

βρίσκονται εντός των ορίων αντιμετώπισης από τον ομοιοστατικό μηχανισμό, υποδεικνύοντας την ανάγκη οριοθέτησης της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας.

#### 1.4. Το ηλεκτρικό όχημα και οι κρίσιμοι παράγοντες φόρτισής του

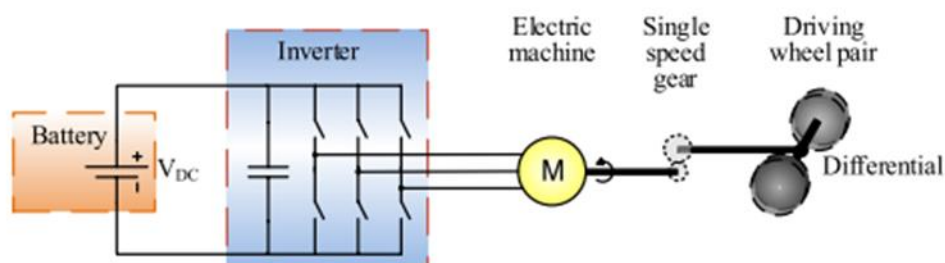
Στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα η παροχή ρεύματος στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης γίνεται με συσσωρευτές (μπαταρίες). Επειδή τα οχήματα αυτά βασίζονται αποκλειστικά στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες τους, η αυτονομία τους εξαρτάται άμεσα στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Συνήθως μπορούν να καλύψουν 100 km – 250 km με μία φόρτιση, ενώ τα κορυφαία μοντέλα μπορούν να διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις, από 300 km έως 500 km [177]. Οι αποστάσεις αυτές εξαρτώνται από την οδική συμπεριφορά του οδηγού, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, τις συνθήκες του δρόμου, τις καιρικές συνθήκες, τον τύπο της μπαταρίας και την διάρκεια ζωής της.

Η συμβατική φόρτιση της μπαταρίας παίρνει πολύ χρόνο σε σύγκριση με τον ανεφοδιασμό ενός συμβατικού οχήματος. Μπορεί να χρειαστούν έως και 36 ώρες για την πλήρη φόρτιση των μπαταριών [178, 179], υπάρχουν επίσης πολύ λιγότερο χρονοβόρες διαδικασίες ασύρματης φόρτισης, αλλά καμία δεν μπορεί να συγκριθεί με τον ελάχιστο χρόνο που απαιτείται για την αναπλήρωση μιας δεξαμενής καυσίμου.

Ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από τη διαμόρφωση του φορτιστή, την υποδομή και το επίπεδο ισχύος λειτουργίας του, καθώς και την ισχύ που δέχεται η μπαταρία. Τα πλεονεκτήματα των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων είναι η απλή κατασκευή, η λειτουργία τους και η ευκολία στη οδήγηση «με ένα πεντάλ». Επίσης, δεν παράγουν αέρια θερμοκηπίου και είναι αθόρυβα, άρα είναι ευεργετικά για το περιβάλλον.

Η ηλεκτρική πρόωση παρέχει στιγμιαίες και υψηλές ροπές, ακόμα και σε χαμηλές στροφές. Αυτά τα πλεονεκτήματα, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα πρόσβασης σε ζώνες χαμηλών εκπομπών ρύπων, έχουν τεθεί ήδη σε εφαρμογή σε περισσότερες από 200 πόλεις, όπως το Λονδίνο, το Άμστερνταμ, τη Στουτγάρδη, τη Στοκχόλμη, και αλλού καθιστώντας τα το τέλειο όχημα για χρήση σε αστικές περιοχές.

Η οδήγηση στην πόλη απαιτεί λειτουργία σε χαμηλές ή μεσαίες ταχύτητες και αυτές απαιτούν σημαντική ροπή την οποία προσφέρει ο ηλεκτρικός κινητήρας. Το Σχήμα 1.1 δείχνει τη βασική διαμόρφωση για τα ηλεκτρικά οχήματα: οι τροχοί κινούνται από ηλεκτρικό κινητήρα(ες), ο οποίος τροφοδοτείται από μπαταρίες μέσω ενός κυκλώματος μετατροπείας ισχύος.



Σχήμα 1.1. Τα βασικά μέρη της ηλεκτρικής κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η ισχύς συνεχούς ρεύματος της μπαταρίας μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα από τον μετατροπέα για τη λειτουργία του κινητήρα [177].

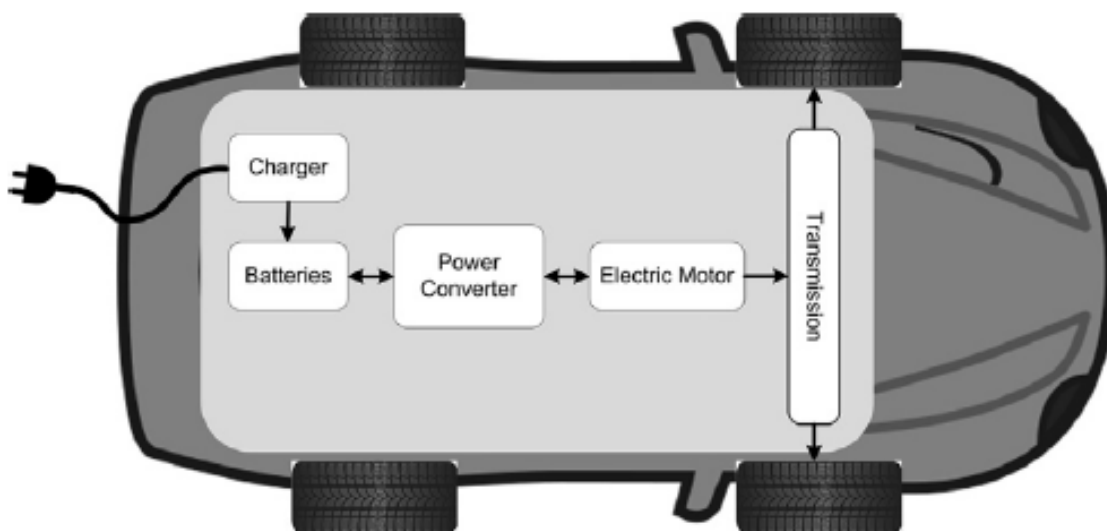
Η θωράκιση των επιβατών ενός ηλεκτρικού οχήματος έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος, τόσο στην φόρτιση όσο και στην κίνησή του, ήτοι έναντι του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται την ώρα της φόρτισης ή κατά την διάρκεια της κίνησης, σχετίζεται με την τοπολογία των υποσυστημάτων που απαρτίζουν το σύστημα κίνησής του. Τα υποσυστήματα αυτά είναι πρακτικά τέσσερα:

- Ο (ηλεκτρονικός) φορτιστής των συσσωρευτών, που είναι παίρνει το ρεύμα από την εξωτερική πηγή φόρτισης, που ρυθμίζει τις παραμέτρους φόρτισης των συσσωρευτών και που συνοδεύεται από το καλώδιο και τις μεταφορές ενέργειας
- Οι συστοιχίες συσσωρευτών (για τα battery electric vehicles, τα οποία κυριαρχούν στα σημερινά ηλεκτρικά οχήματα), που είναι το κρίσιμότερο υποσύστημα του, δεδομένου του βάρους, του χρόνου ζωής και της ανάγκης ψύξης του
- Ο μετατροπέας ισχύος (από συνεχές σε εναλλασσόμενο ή παλμικό-διακοπτικό ρεύμα), που είναι ένα σύστημα ηλεκτρονικών διατάξεων που μεταφέρει την ενέργεια των συσσωρευτών στον ηλεκτρικό κινητήρα με τα καλώδια μεταφοράς
- Ο ηλεκτρικός κινητήρας, που υπάρχει σε κάθε ηλεκτρικό όχημα και είναι υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος. Μια ενδιαφέρουσα σημερινή τάση είναι η τοποθέτησή του στους τροχούς κίνησης για την αποφυγή μηχανικής μετάδοσης

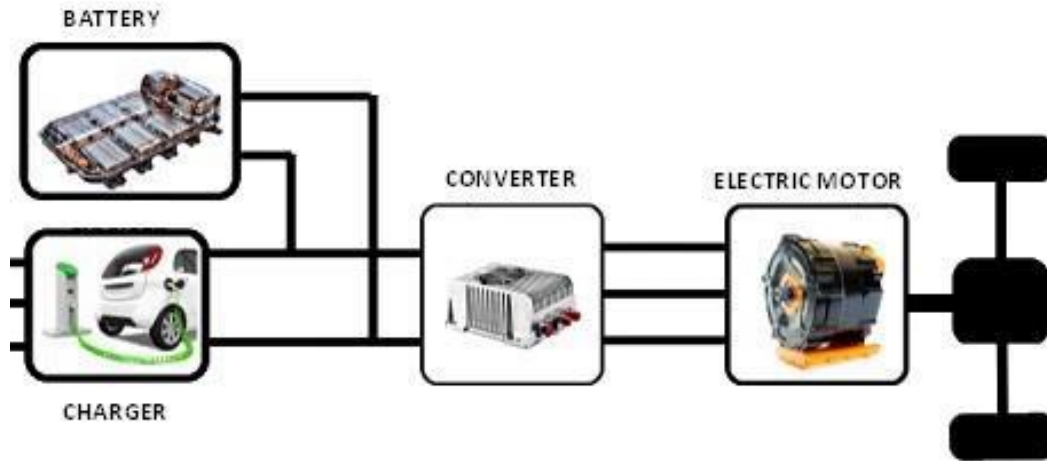
Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται η σχηματική διάταξη του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης [180], ενώ στο Σχήμα 1.3 απεικονίζονται ενδεικτικά πραγματικές διατάξεις τέτοιων συστημάτων [181]. Στο Σχήμα 1.4 δείχνεται ένα πραγματικό τέτοιο σύστημα [182].

Από τις διατάξεις αυτές είναι εύλογο το συμπέρασμα ότι οι συσσωρευτές, τα ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπείς και φορτιστές), καθώς επίσης και οι καλωδιώσεις του ηλεκτρικού οχήματος είναι κάτω από το δάπεδο των επιβατών και του οδηγού, ενώ η καλωδίωση του φορτιστή βρίσκεται είτε στο εμπρός ή το πίσω μέρος του οχήματος, περίπου στην θέση της τάπας βενζίνης.

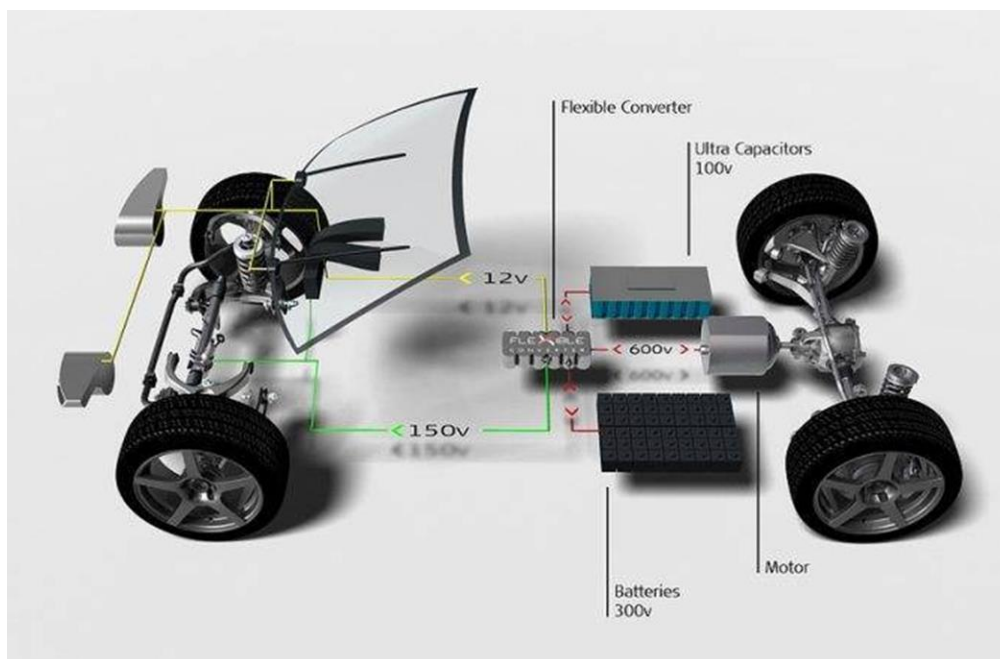
Τέλος, σημειώνεται η συνεχής εξέλιξη που αφορά στο θέμα της θέσης των ηλεκτρικών κινητήρων, ώστε να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στους τροχούς κίνησης (2 ή 4), για την αποφυγή μηχανικού διαφορικού και την σταδιακή μετατροπή του σε ηλεκτρονικό.



Σχήμα 1.2. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος [180].



Σχήμα 1.3. Ενδεικτική απεικόνιση πραγματικών υποσυστημάτων του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος [181].



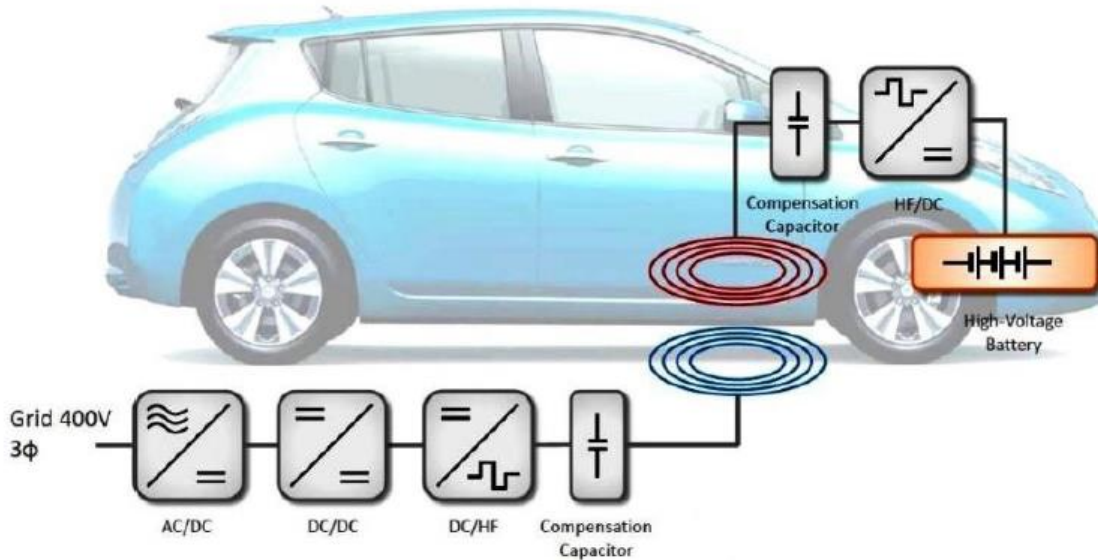
Σχήμα 1.4. Δείγμα πραγματικής απεικόνισης αμιγώς συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων [182]. Τα περισσότερα υποσυστήματα είναι κάτω από το δάπεδο επιβατών και οδηγού.

Τα προβλήματα που διέπουν τον χρόνο ζωής, το μέγεθος και το βάρος των συσσωρευτών οδηγούν σε δύο διακριτές λύσεις:

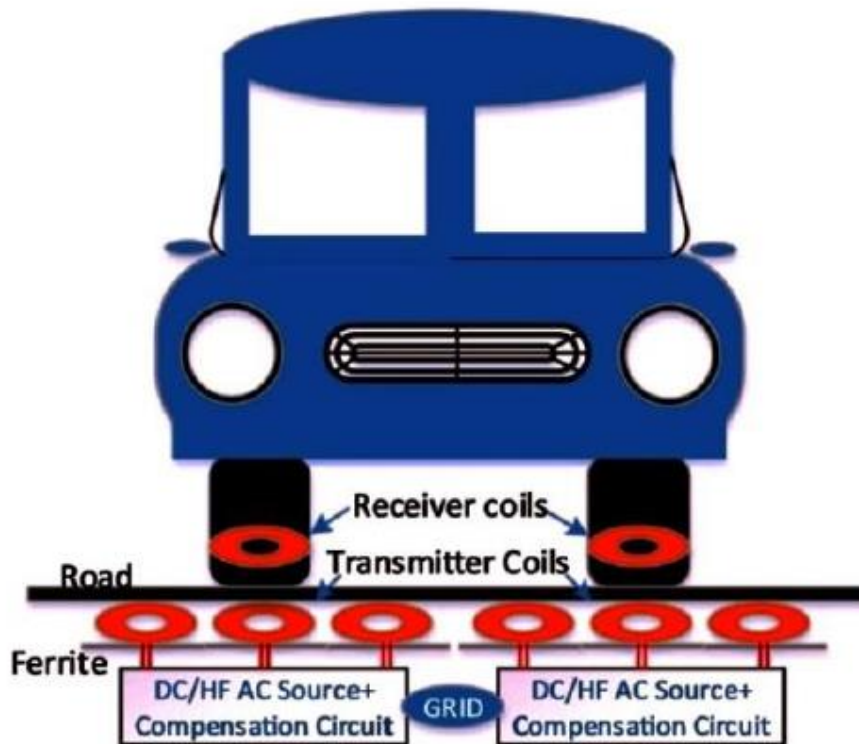
- Η πρώτη σχετίζεται με την ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, που είναι κατορθωτή με μετασχηματιστές που δουλεύουν με το πρωτεύον του μετασχηματιστή στο οδόστρωμα και το δευτερεύον στο ηλεκτρικό όχημα. Η συχνότητα λειτουργίας αυτών των μετασχηματιστών είναι της τάξης των δεκάδων kHz, με τυπική τιμή τα 100 kHz. Με τον τρόπο αυτό είναι πιθανή η χρήση λιγότερου αριθμού συσσωρευτών επί του ηλεκτρικού οχήματος, γεγονός που μειώνει το κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος.
- Η δεύτερη σχετίζεται με την χρήση υπερπυκνωτών ισχύος στην είσοδο και την έξοδο της συστοιχίας των συσσωρευτών. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει δυνατός ο έλεγχος της ενέργειας που δίνει ο συσσωρευτής στον ηλεκτρικό κινητήρα.

Και τα δύο ηλεκτρικά στοιχεία (το δευτερεύον του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης και η συστοιχία υπερπυκνωτών ισχύος) σχετίζονται με υπερρεύματα, για τα οποία απαιτείται η μαγνητική τους θωράκιση.

Στο Σχήμα 1.5 δίνεται μια ενδεικτική και κλασσική απεικόνιση μιας τέτοιας ασύρματης φόρτισης. Στο Σχήμα 1.6 δίνεται μια ενδιαφέρουσα ιδέα για την πιθανή τοποθέτηση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης στον τροχό, λόγω γειννίαςης του τροχού με το έδαφος, όπου βέβαια αυτό είναι υλοποιήσιμο, λόγω αυξημένου βάρους του ελαστικού.



Σχήμα 1.5. Ενδεικτικό παράδειγμα μεθοδολογίας ασύρματης φόρτισης συσσωρευτή [181].



Σχήμα 1.6. Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος με το δευτερεύον πηνίο στο ελαστικό του ηλεκτρικού οχήματος [181].

## Κεφάλαιο 2. Μαγνητικά υλικά θωράκισης ηλεκτρικών οχημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα μαλακά μαγνητικά υλικά, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, με στόχο την θωράκιση της καμπίνας επιβατών του ηλεκτρικού οχήματος από εξωτερικά ηλεκτρικά και (κυρίως) μαγνητικά πεδία, που προέρχονται είτε από τα ρεύματα τροφοδοσίας της ηλεκτροκίνησης ή από τα ρεύματα φόρτισης.

Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι:

- Χαλυβδόφυλλα μαλακά μαγνητικά υλικά, πάχους μικρότερου και ίσου του 1 mm
- Επιστρώσεις (coatings) μαλακών μαγνητικών υλικών, πάχους της τάξης του 1 μm
- Άμορφες και νανοκρυσταλλικές ταινίες, πάχους της τάξης των 25 μm

### 2.1. Τεχνικές μαγνητικού χαρακτηρισμού

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις βασικές τεχνικές χαρακτηρισμού των μαγνητικών ιδιοτήτων, η επαγωγική μέτρηση, η μέτρηση με αισθητήρες Hall και μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης.

#### 2.1.1. Επαγωγική μέτρηση οιωνεί-στατικού βρόχου μαγνήτισης

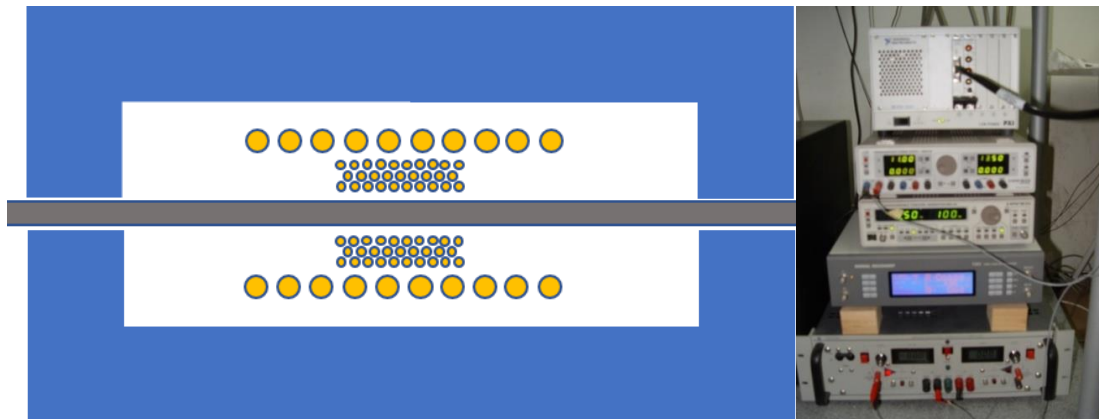
Η διάταξη μέτρησης στηρίζεται στις αρχές της τεχνικής χαρακτηρισμού μονού χαλυβδόφυλλου (single sheet tester) [183]. Η διάταξη είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε συχνότητες από 10 mHz έως 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10A/m έως και 10kA/m, με διακριτική ικανότητα 0.1A/m. Η βαθμονόμηση της διάταξης στηρίζεται στην διεργαστηριακή σύγκριση βρόχων υστέρησης υλικών με γνωστά χαρακτηριστικά. Η τεχνική μέτρησης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό, ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα. Δυο διατάξεις τύπου Π χρησιμοποιούνται για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα του χαλυβδόφυλλου, όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.1.

Η διέγερση και η λήψη της απόκρισης με πηνίο εφαρμοζόμενο στο υπό δοκιμή υλικό και ένα τέτοιο κλειστό μαγνητικό κύκλωμα για την αποφυγή εκτροπής μαγνητικών γραμμών έξω από αυτό, επιτρέπει τον υπολογισμό του πεδίου με ακρίβεια. Η εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προαναφερθείσα διάταξη, αλλά είναι αρκετή για να χαρακτηρίσει με ακρίβεια και αξιόπιστα το μαλακό μαγνητικό υλικό. Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης (Σχήμα 2.1) περιλαμβάνει, ένα σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ), ένα διπολικό ενισχυτή ρεύματος με χαρακτηριστικά  $\pm 70$  V,  $\pm 6$  A της Kerco, έναν lock-in amplifier, μια γεννήτρια σήματος της Hameg, έναν αισθητήρα Hall για την μέτρηση του πεδίου στην επιφάνεια του υλικού.

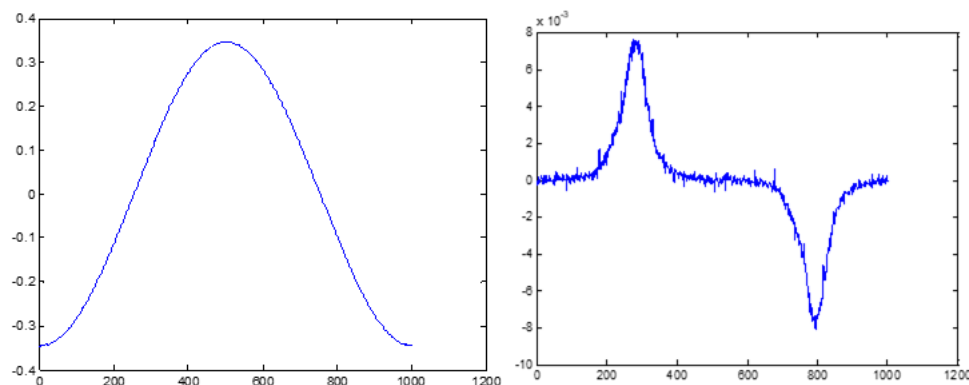
Το σήμα διέγερσης (Σχήμα 2.2) δημιουργείται μέσω συνάρτησης από το Matlab με δυνατότητα επιλογής των επιθυμητών τιμών του πλάτους και της συχνότητας (από τον χρήστη), ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα. Το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος (Kerco) που τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης, ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο, που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (Σχήμα 2.2). Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης και της απόκρισης του αισθητήρα Hall. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιείται το ψηφιακό φιλτράρισμα, η ολοκλήρωση και ο προσδιορισμός του βρόχου



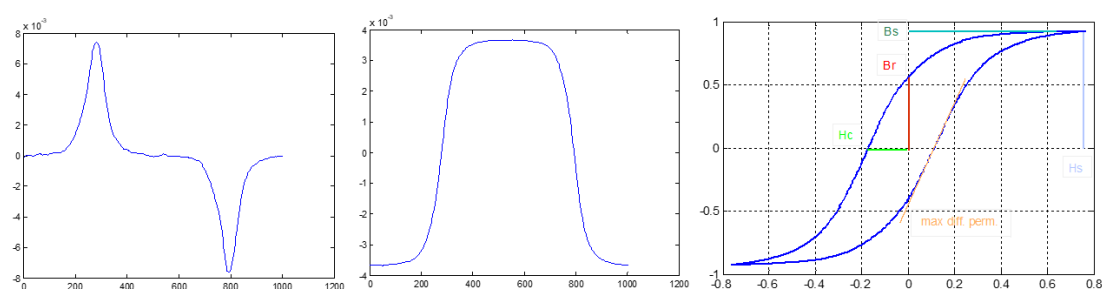
υστέρησης (Σχήμα 2.3). Η ποιότητα του βρόχου υστέρησης είναι αποδεκτή από τα 10 mHz, λαμβάνοντας υπόψη την επαναληψιμότητά του, την συμμετρία του και το κλείσιμό του στις δύο ακραίες του τιμές.



**Σχήμα 2.1.** Η διάταξη χαρακτηρισμού μονού χαλυβδόφυλλου. Το ηλεκτρικό – μαγνητικό σύστημα μέτρησης (αριστερά) και τα ηλεκτρονικά όργανα διέγερσης και μέτρησης (δεξιά).



**Σχήμα 2.2.** Τυπικό σήμα διέγερσης (αριστερά) και λήψης (δεξιά) του συστήματος μέτρησης (οι μονάδες σε V).



**Σχήμα 2.3.** Τυπικό σήμα λήψης μετά το φιλτράρισμα(αριστερά), ψηφιακή ολοκλήρωση του σήματος λήψης (κέντρο) και παραγωγή του βρόχου υστέρησης (δεξιά).

Το μετρητικό σύστημα διαθέτει δυνατότητα απομαγνήτισης, διεγείροντας το υπό δοκιμή μαγνητικό υλικό με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος, το σύστημα έχει την δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά. Για τον προσδιορισμό της πραγματικής τιμής του μαγνητικού πεδίου διέγερσης μπορούν να χρησιμοποιηθεί ο εξής τύπος:

$$H = NI/(L1 + L2) \quad (2.1)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των σπειρών,  $I$  το ρεύμα του πηνίου διέγερσης και  $(L1, L2)$  το μήκος του υλικού χαρακτηρισμού και το μήκος των δύο μαγνητικών υλικών παγίδευσης των μαγνητικών γραμμών αντίστοιχα. Μετά από δοκιμές που έλαβαν χώρα στο κέντρο σωληνοειδούς με τη βοήθεια αισθητήρα πεδίου Hall (με ευαισθησία 25V/T, διαπιστώθηκε ότι οι πραγματικές τιμές του πεδίου συμφωνούσαν με τις υπολογισμένες τιμές από τον πρώτο τύπο. Η περεταίρω διαδικασία προσδιορισμού του πεδίου διέγερσης, σε κάθε περίπτωση κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη σχέση (2.1).

Για τον υπολογισμό της μαγνητικής επαγωγής του υπό δοκιμή υλικού χρησιμοποιούνται οι τύποι επαγωγικής απόκρισης της μαγνητικής ροής που στηρίζονται στο νόμο του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και εξαρτούν την τάση που δημιουργείται στο κύκλωμα από το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

με δεδομένη  $A$  την διατομή του δείγματος και  $N$  τις σπείρες του πηνίου προκύπτει:

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \quad (2.3)$$

Όταν το πηνίο λήψης παραμένει σταθερό, η μαγνητική επαγωγή υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της τάσης εξόδου του πηνίου λήψης ως προς τον χρόνο:

$$B = -\frac{1}{NA} \int V dt \quad (2.4)$$

Η συνιστώσα συνεχούς τάσης λόγω της ψηφιακής ολοκλήρωσης διορθώνεται με μια σταθερά αριθμητική τιμή η οποία αφαιρείται από την τιμή του ολοκληρώματος.

Οι παράγοντες αξιοπιστίας των μαγνητικών μετρήσεων είναι:

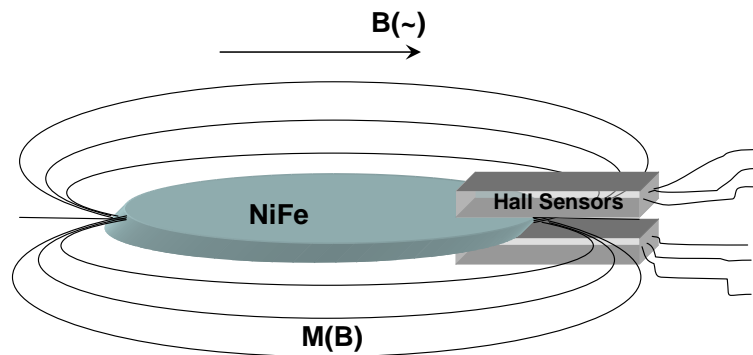
- Ο βαθμός πλήρωσης των πηνίων λήψης: τα πηνία λήψης πρέπει να γετινιάζουν όσο γίνεται περισσότερο στο υπό μέτρηση μαγνητικού υλικού
- Η διαρροή μαγνητικών γραμμών από το κύκλωμα μαγνήτισης: απαιτείται φροντίδα για κλειστό μαγνητικό κύκλωμα, ακόμη και με την χρήση μαγνητικών ρευστών (μαγνητικά σωματίδια σε ολεϊκό οξύ)
- Η ελαχιστοποίηση της συχνότητας διέγερσης: όσο μικρότερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερη είναι η συμμετοχή των δινορευμάτων στην τάση επαγωγής του πηνίου λήψης. Το όριο είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο που μικραίνει ότι μικραίνει η συχνότητα. Η ελάχιστη συχνότητα που επετεύχθη είναι 0,1Hz. Η αντιμετώπιση του φαινομένου του μαγνητικού ιξώδους σχετίζεται και αυτή με την συχνότητα και αφορά στην κινητικότητα των μαγνητικών τοιχωμάτων. Και σ' αυτή την περίπτωση η συχνότητα πρέπει να είναι όσο μικρότερη γίνεται.

### 2.1.2. Μέτρηση με αισθητήρες Hall

Για τη μέτρηση του βρόγχου υστέρησης λεπτών φύλλων μαλακών μαγνητικών υλικών και λεπτών υμενίων αναπτύχθηκε και μια άλλη διάταξη, που προσέφερε αξιόπιστα αποτελέσματα, συγκρίσιμα με την τεχνική που περιγράφηκε προηγουμένως και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκεί που δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η προηγούμενη για λόγους γεωμετρίας του υλικού ή του υποστρώματός

του. Για παράδειγμα, υπάρχουν διατάξεις απόθεσης υμενίων από permalloy, όπου δεν είναι δυνατόν να κάνουμε περιέλιξη πρωτεύοντος και δευτερεύοντος γύρω από το υλικό.

Στην περίπτωση αυτή και για να επιτευχθεί ορθή μέτρηση του βρόγχου υστέρησης, τοποθετείται το υπό μέτρηση υλικό εντός διάταξης πηνίων Helmholtz για την ομογενή μαγνήτιση του υλικού, με τροφοδοσία είτε συνεχούς είτε εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα άκρα του υπό μέτρηση υμενίου ή επίστρωσης ή λεπτού χαλυβδόφυλλου τοποθετούνται αισθητήρες Hall, πάνω και κάτω από το υλικό, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4. Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής μέτρησης και προσδιορισμού του βρόγχου υστέρησης των μαγνητικών λεπτών υμενίων.**

Λόγω της θέσης των αισθητήρων Hall, οι μαγνητικές γραμμές, που εξέρχονται από το μαγνητικό υλικό, επιστρέφουν στην αντιδιαμετρική πλευρά του υλικού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εκμετάλλευση του φαινομένου της απομαγνήτισης για να μετρηθεί η μαγνήτιση του υλικού: οι μαγνητικές γραμμές, που εξέρχονται του μαγνητικού υλικού, περνώντας πάνω και κάτω από το υλικό, διαπερνούν και τους αισθητήρες Hall, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου των να είναι ανάλογη του πεδίου που τα διαπερνά.

Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου διέγερσης, όντας παράλληλες στο επίπεδο μέτρησης των Hall δεν συνεισφέρουν τη μέτρηση τους. Η απομάκρυνση των αισθητήρων Hall από το γεωμετρικό όριο του υλικού μειώνει το μαγνητικό πεδίο που τα διαπερνά, μέχρις ότου το πεδίο αυτό μηδενισθεί. Μηδενισμός πεδίου στην περίπτωση αυτή είναι η τιμή του πεδίου κάτω από την οποία η ευαισθησία του αισθητήρα Hall δεν επιτρέπει μέτρηση και η οποία στην περίπτωση της εν λόγω διάταξης είναι 1μΤ. Έτσι, το άθροισμα των επιτόπου μαγνητικών πεδίων σε διακριτές θέσεις του αισθητήρα Hall είναι σε θέση να δώσει την εσωτερική μαγνήτιση του προς χαρακτηρισμό υλικού.

Αυτή η άθροιση ενέχει τον κίνδυνο της πολλαπλής μέτρησης ή της μη-μέτρησης μαγνητικών γραμμών και σε κάθε περίπτωση, η συνιστάμενη μέθοδος μέτρησης της μαγνήτισης είναι η σύγκριση με πρότυπο μεταφορά, ήτοι με μαγνητικό υμένιο πιστοποιημένου βρόγχου μαγνήτισης. Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση του πιστοποιημένου δοκιμίου επιτρέπει την διόρθωση της μέτρησης με γραμμική προσέγγιση πρώτης τάξης:

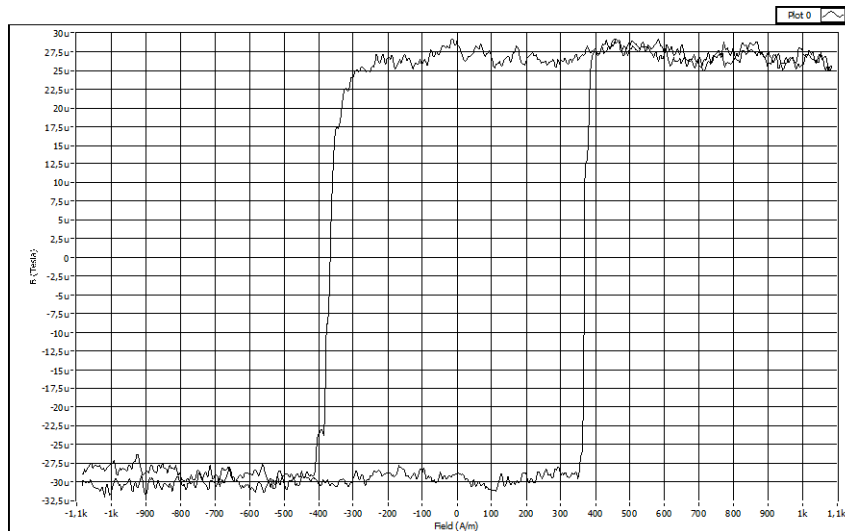
$$M_{xi}(H_i) = aM_{ci}(H_i) \quad (2.5)$$

όπου  $H_i$  η τιμή του πεδίου μαγνήτισης, η οποία υπολογίζεται από την τιμή του πεδίου που παράγουν τα πηνία Helmholtz:

$$B = 0,71\mu_o \frac{nI}{R} \quad (2.6)$$

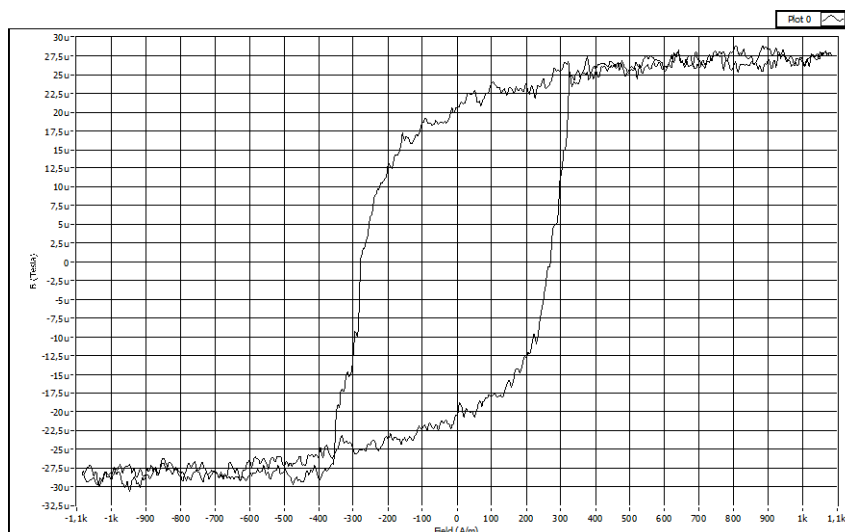
και  $M_{xi}(H_i)$  η εκάστοτε μετρούμενη τιμή μαγνήτισης από τους αισθητήρες Hall και  $M_{ci}(H_i)$  η τιμή αναφοράς της μαγνήτισης του πιστοποιημένου υλικού αναφοράς για το δοσμένο πεδίο  $H_i$ .

Μια ενδεικτική μέτρηση τέτοιου πεδίου δίνεται στο Σχήμα 2.5, όπου το υλικό αναφοράς (πρότυπο μεταφοράς) ήταν φύλλο νικελίου που πιστοποιήθηκε στο NIST (National Institute for Standards & Technology). Στα πειράματά μας, ο συντελεστής διόρθωσης της απόκρισης του αισθητήρα Hall για τοποθέτηση του 1 mm πάνω και κάτω και 1 mm μακριά από το προς μέτρηση υλικό ήταν  $\alpha = 2,45$ .



**Σχήμα 2.5. Τυπική καμπύλη μαγνήτισης με βάση την διάταξη μέτρησης του Σχήματος 2.4 σε υμένιο στοιχειομετρίας  $Ni_{80}Fe_{20}$  στον άξονα εύκολης μαγνήτισης**

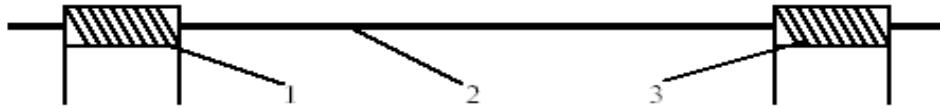
Με την διάταξη αυτή είναι δυνατή η μέτρηση του βρόχου μαγνήτισης σε διαφορετικούς άξονες ανισοτροπίας, με αποτέλεσμα να μπορεί να βρεθεί και υπολογισθεί η ανισοτροπία του μαλακού «δισδιάστατου» μαγνητικού υλικού σε διαφορετικούς άξονες πάνω στο επίπεδό του. Αυτή η πληροφορία είναι πολύτιμη για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης του υλικού σε σχέση με την εφαρμογή που προορίζεται, τόσο για τις ανάγκες θωράκισης της παρούσας διατριβής όσο και για τις ανάγκες χρήσης σε άλλες εφαρμογές, όπως η ανάπτυξη ηλεκτρικών μηχανών. Ένα παράδειγμα μέτρησης μαγνήτισης σε σκληρό άξονα ανισοτροπίας δίνεται στο Σχήμα 2.6.



**Σχήμα 2.6. Τυπική καμπύλη μαγνήτισης με βάση την διάταξη μέτρησης του Σχήματος 2.4 σε υμένιο στοιχειομετρίας  $Ni_{80}Fe_{20}$  σε άξονα δύσκολης μαγνήτισης**

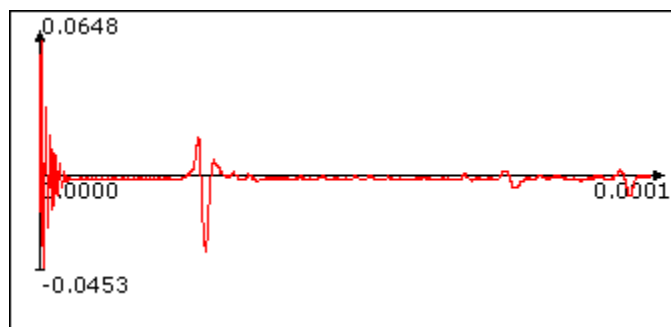
### 2.1.3. Μέτρηση με μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης

Η βασική διάταξη της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης αποτελείται από ένα μικρό μήκος πηνίο διέγερσης και ένα άλλο πηνίο λήψης. Τα δύο πηνία τοποθετούνται σε απόσταση μεγαλύτερη των 5 cm κατά μήκος ενός μαγνητοσυστολικού υλικού με ομοιόμορφη διατομή (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7. Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης: (1) πηνίο διέγερσης, (2) MDL, (3) πηνίο λήψης.

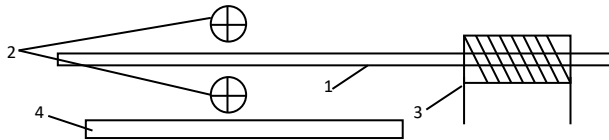
Η μετάδοση παλμικού ρεύματος  $H_e(t)$  στο πηνίο διέγερσης, προκαλεί παλμικό μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του άξονα του μαγνητοσυστολικού υλικού. Κατά συνέπεια, προκαλείται δυναμική επιμήκυνση  $\delta l(t)$  στον όγκο του υλικού αυτού που βρίσκεται μέσα στο πηνίο διέγερσης, λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής. Η ομοιόμορφη διατομή του υλικού αυτού επιτρέπει την διαμήκη μετάδοση της δυναμικής επιμήκυνσης  $\delta l(t)$  ως ελαστικού παλμού στις δύο διευθύνσεις, που ορίζει η γεωμετρία του εν λόγω υλικού. Έτσι, η δυναμική επιμήκυνση  $\delta l(t)$  ταξιδεύει στο μαγνητοσυστολικό υλικό, μεταβάλλοντας τοπικά η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο υλικό, λόγω του αντίστροφου φαινομένου μαγνητοσυστολής. Έτσι, είναι δυνατή η μέτρηση της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου σε συγκεκριμένους όγκους του υλικού αυτού με την χρήση ενός πηνίου λήψης. Στα κλασικά μαγνητοελαστικά υλικά, το βέλτιστο εύρος του πεδίου παλμών είναι της τάξης των 1-3  $\mu\text{s}$ . Με αυτόν τον τρόπο, το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος είναι της τάξης αρκετών mm (η διαμήκης ταχύτητα του ήχου στα σιδηρούχα κράματα είναι της τάξης των 5 km/s). Ως εκ τούτου, δεδομένου ότι η διατομή της MDL είναι  $\sim 0.1 \text{ mm}^2$ , το διαδιδόμενο κύμα είναι τύπου Lamb. Μια τυπική απόκριση του πηνίου λήψης δίνεται στο Σχήμα 2.8, όπου η χρονική καθυστέρηση του σήματος λήψης οφείλεται και εξαρτάται από την διαμήκη ταχύτητα του ήχου.



Σχήμα 2.8. Παλμική τάση εξόδου συναρτήσει του χρόνου. Η πρώτη υψίσυχη τάση εξόδου (burst) οφείλεται στο παλμικό πεδίο διέγερσης και την σύζευξή του με το πηνίο λήψης. Ακολουθεί η κύρια παλμική τάση εξόδου. Οι μικρές κυματομορφές που ακολουθούν την κύρια παλμική έξοδο είναι ανακλάσεις του διαδιδόμενου ελαστικού παλμού στα άκρα της MDL (οι τιμές τάσης και ο χρόνος δίνονται σε V και s αντίστοιχα).

Αυτή η διάταξη ονομάζεται μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης (magnetostrictive delay line – MDL). Το διαδιδόμενο ελαστικό κύμα, στην πορεία του, αλλάζει την τοπική μαγνητική συνιστώσα κατά μήκος του MDL, με την προϋπόθεση ότι το MDL είναι τοπικά μαγνητισμένο. Κατά συνέπεια το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του πηνίου λήψης καθορίζει το πεδίο μαγνητικής πόλωσης και το

μέγεθος της πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι ανάλογη της τάσης εξόδου. Έτσι, η τάση εξόδου είναι ανάλογη της πρώτης παραγώγου της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και κατά συνέπεια ανάλογη της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu(t)$ . Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται ο μαγνητικός βρόχος υστέρησης του μαγνητοσυστολικού υλικού σε διαφορετικά σημεία του. Η μέτρηση του υλικού μπορεί να υλοποιηθεί σε υλικά με μορφή ταινίας ή ίνας. Για να γίνει η μέτρηση της διαπερατότητας σε δισδιάστατα υλικά, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διάταξη που δίνεται στο Σχήμα 2.9.



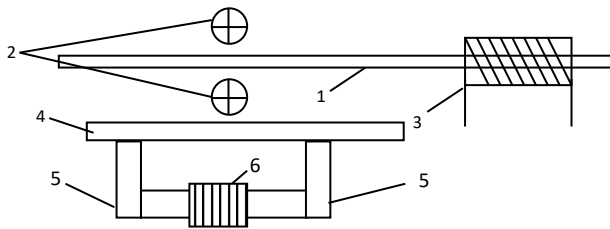
**Σχήμα 2.9. Η προτεινόμενη συμμετρική διάταξη MDL - αγωγών: (1) MDL, (2) Παλμικοί αγωγοί ρεύματος, (3) Πηνίο λήψης, (4) Φερρομαγνητικό υλικό υπό δοκιμή.**

Δύο αγωγοί παλμικού ρεύματος είναι συμμετρικά τοποθετημένοι πάνω και κάτω από την MDL, η οποία είναι απαλλαγμένη από μηχανικές τάσεις. Παλμικό ρεύμα  $I_e$  μεταδίδεται στην ίδια διεύθυνση και στους δύο αγωγούς. Στην απουσία κάποιου άλλου μαγνητικού σώματος σ' αυτή την περιοχή του MDL, οι μαγνητικές ροές των δύο αγωγών αλληλοαναιρούνται και κατά συνέπεια η απουσία παλμικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα την μη δημιουργία ελαστικού κύματος, το οποίο με την σειρά του δεν δημιουργεί παλμική τάση εξόδου (στην πραγματικότητα ελαφρές διαφοροποιήσεις στην μαγνητική ροή και κυρίως στην γεωμετρία της διάταξης επιτρέπουν την δημιουργία χαμηλών παλμικών τάσεων εξόδου στα όρια της ενεργούς απόστασης ενεργοποίησης της MDL).

Αντίθετα, με την παρουσία ενός φερρομαγνητικού υλικού είτε πάνω είτε κάτω από την διάταξη αγωγών – MDL θα επηρεάσει την μαγνητική συμμετρία. Αυτό οφείλεται στην μερική διαρροή μαγνητικών γραμμών που προέρχονται από τον αγωγό που βρίσκεται από την άλλη πλευρά της MDL (η οριακή συνθήκη της παρουσίας του αγωγού δεν επιτρέπει την έξοδο σημαντικής ποσότητας μαγνητικής ροής του άλλου αγωγού). Αυτή η ασυμμετρία δημιουργεί ένα ελαστικό κύμα που μεταδίδεται στην MDL και έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία παλμικής τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης. Η ποσότητα της μαγνητικής διαρροής από την MDL προς το φερρομαγνητικό υλικό και κατά συνέπεια η λαμβανόμενη τάση εξόδου  $V_0$ , εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα του φερρομαγνητικού υλικού, την απόσταση μεταξύ των αγωγών παλμικού ρεύματος, καθώς επίσης και την lift-off απόσταση μεταξύ MDL και φερρομαγνητικού υλικού. Έτσι, θεωρώντας την διάταξη παλμικών αγωγών – MDL δεδομένη αναφορικά με τις σχετικές αποστάσεις αγωγών και MDL και διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ MDL και φερρομαγνητικού υλικού, η παλμική τάση εξόδου της MDL εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα του φερρομαγνητικού υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μόνο η επιφάνεια του υπό δοκιμή φερρομαγνητικού υλικού συμμετέχει πρακτικά στο μαγνητικό κύκλωμα, η λαμβανόμενη παλμική τάση εξόδου σχετίζεται με την επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα του φερρομαγνητικού υλικού.

Χρησιμοποιώντας την διάταξη αυτή, στην απουσία άλλου μαγνητικού πεδίου πόλωσης, που θα μπορούσε να δημιουργηθεί από έναν ηλεκτρομαγνήτη, η μετρούμενη συνεισφορά της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας του φερρομαγνητικού υλικού στην παλμική τάση εξόδου οφείλεται στην παραμένουσα διαπερατότητα ή στην επιφανειακή διαφορική μαγνητική διαπερατότητα της παραμένουσας μαγνήτισης. Έτσι, τυχαίες αλλαγές του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου, μπορούν

να προκαλέσουν αυθαίρετες αλλαγές της τοπικής μαγνήτισης και κατά συνέπεια λαθεμένες μετρήσεις. Αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.10.



**Σχήμα 2.10.** Η προτεινόμενη συμμετρική διάταξη MDL - αγωγών με χρήση ηλεκτρομαγνήτη για την δημιουργία του επιθυμητού πεδίου πόλωσης: (1) MDL, (2) Παλμικοί αγωγοί ρεύματος, (3) Πηνίο λήψης, (4) Φερρομαγνητικό υλικό υπό δοκιμή, (5) & (6) Μαλακό μαγνητικό υλικό και πηνίο διέγερσης αντίστοιχα για την δημιουργία του ηλεκτρομαγνήτη πόλωσης.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μετρηθεί ο βρόχος μαγνητικής διαπερατότητας, με την προϋπόθεση ότι το *lift off effect* έχει ελαχιστοποιηθεί ή μηδενισθεί. Ο βρόχος μαγνητικής διαπερατότητας σχετίζεται με το μέρος του υλικού που ευρίσκεται πλησίον της MDL. Έτσι, είναι δυνατή η μέτρηση του επιφανειακού βρόχου μαγνήτισης. Ακόμη, μετακινώντας την διάταξη αγωγών-MDL στην επιφάνεια του υπό δοκιμή φερρομαγνητικού υλικού, μπορεί να προσδιορισθεί η ομοιομορφία των τοπικών βρόχων μαγνήτισης. Οι μετρήσεις με την μέθοδο αυτή συνάδουν με τις δύο προηγούμενες μεθόδους μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας.

## 2.2. Δομικός χαρακτηρισμός

### 2.2.1. Περίθλαση ακτίνων Χ

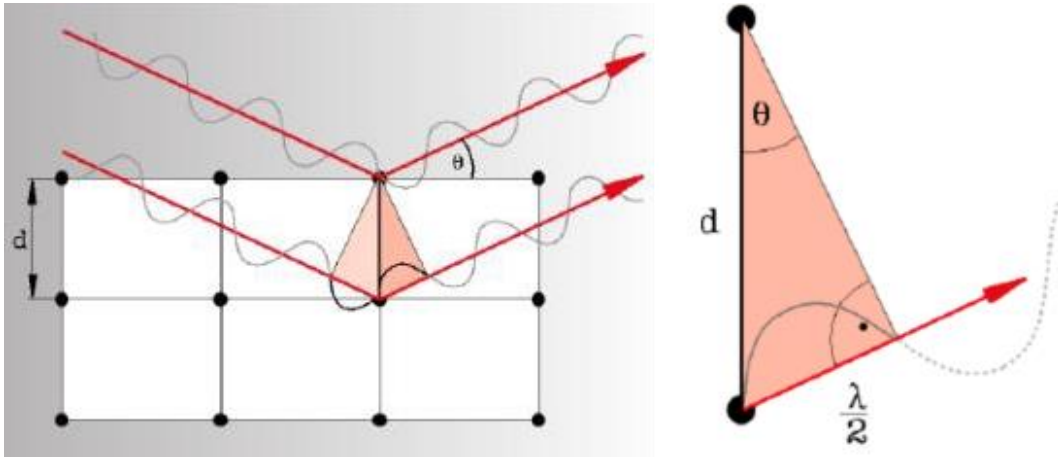
Η περίθλαση είναι φαινόμενο της σκέδασης Η/Μ κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις, όταν αυτά προσπίπτουν σε ένα φράγμα ή οπή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματος. Στην περίπτωση της περίθλασης ακτίνων Χ, το φράγμα αποτελείται από παράλληλες σχισμές (δηλαδή κενά μεταξύ των ατόμων) ίσου πλάτους  $d$  ( $d \leq \lambda$ ).

Μια δέσμη ακτίνων Χ θα μπορούσε να υποστεί σκέδαση, να απορροφηθεί και να εκπεμφθεί εκ νέου, από μεμονωμένα άτομα του κρυστάλλου [184]. Ο Bragg παρατήρησε ότι ο συνδυασμός μήκους κύματος και διεύθυνσης πρόσπτωσης των ακτίνων Χ επιφέρει έντονες κορυφές (συμβολή) στην παρατηρούμενη σκεδαζόμενη ακτινοβολία.

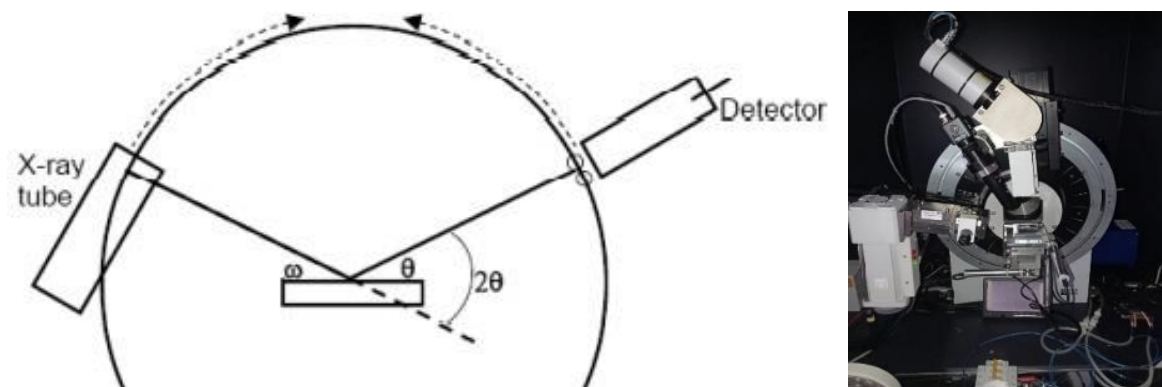
Κάθε κρυσταλλικό υλικό αποτελείται από παράλληλα πλεγματικά επίπεδα, τα οποία ισαπέχουν απόσταση  $d$ . Επίσης, θεώρησε ότι οι ακτίνες Χ ανακλώνται από τα κρυσταλλικά αυτά επίπεδα και συμβάλλουν ενισχυτικά για μία συγκεκριμένη γωνία  $\theta$  που αντιστοιχεί στην απόσταση  $d$ . Η προϋπόθεση για ενισχυτική συμβολή είναι η διαφορά του οπτικού δρόμου δύο ή περισσότερων ακτίνων Χ, ανάμεσα σε δύο παράλληλα επίπεδα να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Η σχηματική αναπαράσταση αυτής της μέτρησης δίνεται στο Σχήμα 2.11.

Το δοκίμιο περιστρέφεται με την βοήθεια γωνιόμετρου, όπου με τον τρόπο αυτό, η επιφάνεια του δοκίμιου εκτίθεται μονίμως στη μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ , ενώ η γωνία  $\theta$  αυξάνεται συνεχώς, με προεπιλεγμένα το βήμα και τις οριακές συνθήκες της.

Έτσι, καταγράφεται η ένταση σε φωτόνια στην μονάδα του χρόνου που προσπίπτει σε φωτοδίοδο λήψης των φωτονίων, που μετατρέπει τα προσπίπτοντα φωτόνια σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η διάταξη δίνεται στο Σχήμα 2.12. Στην διατριβή χρησιμοποιήθηκε το περιθλασιόμετρο του Εργαστηρίου Μεταλλικών Υλικών της Σλοβάκις Ακαδημίας Επιστημών.



Εικόνα 2.11. Σχηματική αναπαράσταση δύο ακτίνων Χ που προσπίπτουν σε παράλληλα επίπεδα.



Σχήμα 2.12. Η διάταξη της περίθλασης ακτίνων-Χ που χρησιμοποιήθηκε: Σχηματική λειτουργία της διάταξης (αριστερά) και η διάταξη που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (δεξιά).

### 2.2.2. Ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης

Σε ένα Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διερχόμενης Δέσμης (Σχήμα 2.13), η δέσμη των ηλεκτρονίων εστιάζεται στο δείγμα χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συγκεντρωτικών (ηλεκτρομαγνητικών) φακών. Η παραγόμενη εικόνα εστιάζεται μέσω του αντικειμενικού φακού/πηνίου σε ένα σημείο. Στη συνέχεια, αυτή η εικόνα μεγεθύνεται από μια σειρά προβολικών φακών/πηνίων, το αντίστοιχο μέγεθος της οποίας αποτυπώνεται σε μία φθορίζουσα οθόνη. Η αλλαγή του ρεύματος ενός ηλεκτρομαγνητικού φακού αλλάζει το εστιακό του μήκος αλλάζοντας τη μεγέθυνση.

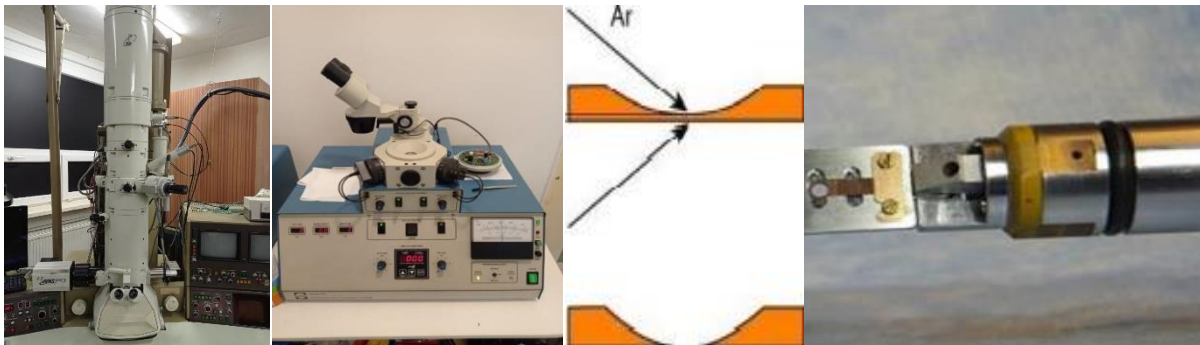
Η πηγή δέσμης ηλεκτρονίων προέρχεται από θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου που τροφοδοτείται με ρεύμα, ικανό να προκαλέσει έργο εξόδου σε κενό της τάξης των  $10^{-3}$  mbar. Το σύστημα συγκέντρωσης δέσμης ηλεκτρονίων είναι ουσιαστικά ένας Η/Μ φακό, που εστιάζει τη δέσμη ηλεκτρονίων σε ένα σημείο συγκέντρωσης, η οποία στην συνέχεια επιταχύνεται λόγω του εφαρμοζόμενου δυναμικού επιτάχυνσης.



Ο πρώτος συγκεντρωτικός φακός συγκεντρώνει την διατομή της δέσμης, ώστε να σχηματιστεί μια περισσότερο συγκεντρωμένη ακτινοβολία και είναι γνωστός ως C1 ή Spot Size. Ο δεύτερος συγκεντρωτικός φακός (C2) χρησιμοποιείται είτε για τη σύγκλιση (converge) της δέσμης ηλεκτρονίων είτε για την εξάπλωση της δέσμης στο δείγμα (ένταση φωτεινότητας).

Η λειτουργία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης (Transmission Electron Microscope - TEM) στηρίζεται στην μεγάλη τάση πόλωσης των ηλεκτρονίων, καθώς επίσης και στην λέπτυνση του δείγματος. Η δέσμη ηλεκτρονίων μεγάλης ταχύτητας επιβραδύνεται γρήγορα ή ακόμα και σταματά όταν περνάει μέσα από ένα σώμα πάχους, μεγαλύτερου από λίγα nm.

Στην περίπτωση της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Διερχόμενης Δέσμης το δείγμα πρέπει να είναι εξαιρετικά λεπτό, της τάξης των λίγων nm. Τα δείγματα έχουν συνήθως κυκλική διατομή διαμέτρου 3mm, τα οποία ασφαρίζονται στο εμπρόσθιο τμήμα ενός δειγματοφορέα που εισάγεται στον θάλαμο του μικροσκοπίου μέσω ειδικής θυρίδας που εξασφαλίζει τη διατήρηση του κενού και τοποθετείται σε διάταξη μικρομετρικών μετατοπίσεων. Το πάχος του δείγματος μπορεί να μειωθεί με λείανση δέσμης ιόντων Ar, η οποία βομβαρδίζει και έτσι εκλεπτύνει το κεντρικό τμήμα του δείγματος, ώστε να δημιουργηθεί μια οπή από την οποία θα ξεκινούν ηλεκτροπερατές περιοχές πάχους της τάξης των nm. Η λείανση των δειγμάτων έγινε με το μηχάνημα GATAN Precision Ion Polishing System (PIPS).



**Σχήμα 2.13. TEM (αριστερά). Το δείγμα, αφού αποκτήσει πάχος περίπου 20 μm, εισάγεται στο PIPS (αριστερά - κέντρο) και βομβαρδίζεται από ιόντα Ar. Έτσι, λεπταίνει τόσο που αποκτά μια τρύπα, από όπου στην συνέχεια το πάχος του αρχίζει και μεγαλώνει ώστε να μπορεί να γίνει ηλεκτροπερατό με πάχος μερικά nm (κέντρο - δεξιά). Στην συνέχεια τοποθετείται στο δειγματοφορέα (δεξιά) και στην συνέχεια στο TEM.**

### 2.2.3. Διαφορική θερμιδομετρική ανάλυση

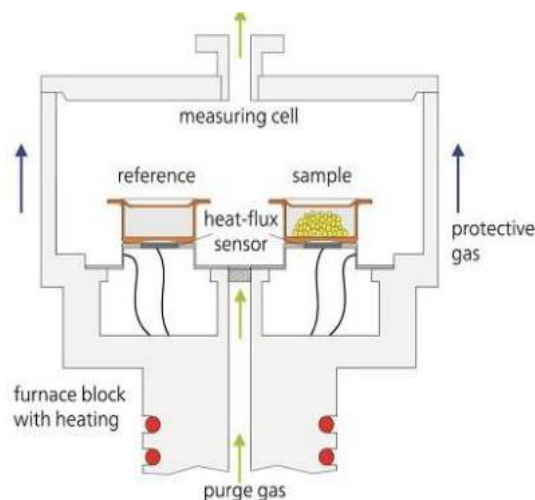
Οι μέθοδοι θερμικής ανάλυσης εκμεταλλεύονται τον τρόπο που μεταβάλλονται οι κρυσταλλικές φάσεις των υλικών, καθώς επίσης και οι αντιδράσεις στερεάς κατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι μεταβολές αυτές είναι πολύτιμες διότι καθορίζουν την θερμοκρασία, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία του μαγνητικού υλικού, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες, όπως είδος αντίδρασης, θερμοκρασία υάλωσης κλπ.

Η διαφορική θερμική ανάλυση (Differential thermal analysis-DTA) είναι η πιο απλή μέθοδος θερμικής ανάλυσης. Αφορά στη μέτρηση της θερμοκρασία που επιτυγχάνεται η αλλαγή φάσης ή μια αντίδραση στερεάς κατάστασης. Έτσι, σε διαδικασίες ψύξης ή θέρμανσης, προκύπτει αντίστοιχο διάγραμμα που υποδεικνύει ενδόθερμες ή εξώθερμες αντιδράσεις σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry - DSC) δίνει την δυνατότητα της μέτρησης και καταγραφής της διαφοράς ροής θερμότητας μεταξύ του προς μελέτη υλικού και ενός υλικού αναφοράς, συναρτήσει της θερμοκρασίας και του χρόνου. Η ηλεκτρική ισχύς του

συστήματος αυξάνεται ή μειώνεται, ώστε να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του εξεταζόμενου δοκιμίου που βρίσκεται σε ένα καψίδιο συναρτήσεως του χρόνου και κατ' επέκταση η θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται. Η μέθοδος αυτή μελετά ποσότητες της τάξης των mg σε μεταβολές ισχύος της τάξης των mW. Οι ρυθμοί ψύξης ή θέρμανσης είναι 0,3-300 K/min.

Η διάταξη DTA/DSC αποτελείται από το θερμιδόμετρο, τον φούρνο, την υπολογιστική μονάδα και μια φιάλη αδρανούς αερίου (Σχήμα 2.14). Το υπό μελέτη καψίδιο και το καψίδιο με το υλικό αναφοράς τοποθετούνται στο εσωτερικό του φούρνου μέσα στις θερμαινόμενες υποδοχές. Η ουσία αναφοράς πρέπει να είναι ένα υλικό που δεν παρουσιάζει μεταβολή φάσης για τις υπό μελέτη θερμοκρασίες. Στην περίπτωση μας είναι σκόνη  $Al_2O_3$ . Στην συνέχεια, μέσω της υπολογιστικής μονάδας, ορίζεται η θερμότητα που αρχίζει να ρέει στο σύστημα. Η φιάλη αδρανούς αερίου χρησιμεύει για την αποφυγή οξειδωσης ή νιτρίδωσης του προς μελέτη υλικού. Η διάταξη αυτή καταγράφει την τιμή  $\Delta Q$ , που μπορεί να είναι είτε θετική ή αρνητική, ανάλογα με την δέσμευση ή αποβολή θερμότητας από το υλικό συναρτήσεως της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 2.14. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης DTA/DSC.**

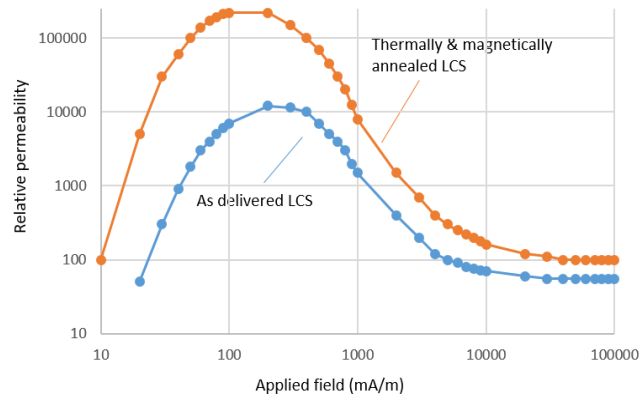
Η σημασία του δομικού και μικροδομικού χαρακτηρισμού, αφορά στην συσχέτιση της δομής (περίθλαση ακτίνων X) και μικροδομής (ηλεκτρονική μικροσκοπία) με τις μαγνητικές ιδιότητες του υπό δοκιμή μαγνητικού υλικού, που είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό και την βελτιστοποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων και της ανισοτροπίας του.

## **2.3. Μελέτη υλικών**

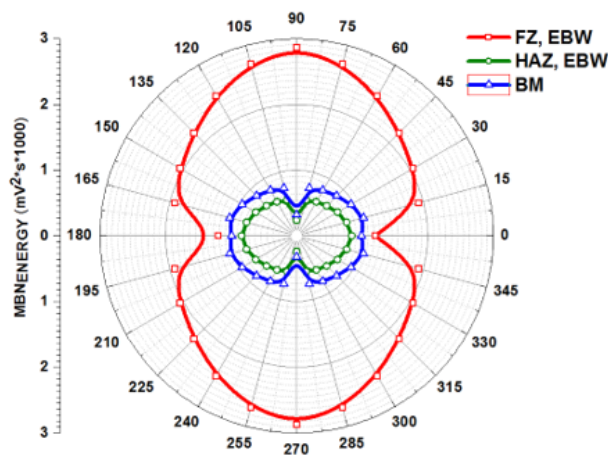
### **2.3.1. Μαγνητικά χαλυβδόφυλα**

Τα μαγνητικά χαλυβδόφυλα που μελετήθηκαν ήταν φερριτικοί χάλυβες υψηλής καθαρότητας, ήτοι προσανατολισμένοι και μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες (oriented & non-oriented electric steels), χάλυβες AISI 1008, καθώς επίσης χάλυβες μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα (low carbon steel - LCS) και κράμα  $Ni_3Fe_1$  (permalloy). Το μεγάλο ενδιαφέρον υπάρχει και τον χάλυβα LCS μιας και είναι το υλικό που χρησιμοποιείται ούτως ή άλλως σαν δομικό υλικό του οχήματος, στα οποία επικεντρώνεται αυτή η ενότητα της διατριβής. Τα υλικά αυτά μελετήθηκαν όπως κατασκευάστηκαν και μετά από θερμική αποτατική ανόπτηση για την μείωση των μηχανικών τάσεων και μαγνητική – θερμική ανόπτηση για την βελτίωση της μαγνητικής ανισοτροπίας του υλικού. Μια τυπική αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας σε χάλυβα low carbon steel (LCS) όπως παρήχθη και μετά από θερμική

κατεργασία στους 300°C σε αδρανή ατμόσφαιρα και εν συνεχεία αργή απόψυξη 24 ωρών, και θερμική κατεργασία στους 300°C παρουσία μαγνητικού πεδίου 0.1T σε αδρανή ατμόσφαιρα και εν συνεχεία αργή απόψυξη 24 ωρών παρουσία μαγνητικού πεδίου στο Σχήμα 2.15, όπου διακρίνεται η αρχική διαπερατότητα (μπλε γραμμή) και η μαγνητική διαπερατότητα μετά από τις δύο κατεργασίες (πορτοκαλί γραμμή), όπου διακρίνεται η αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας, που ευνοεί την βελτιωμένη θωράκιση. Στο Σχήμα 2.16, δείχνεται η μαγνητική ανισοτροπία του ίδιου χάλυβα μετά από συγκόλληση με TIG (ηλεκτρόδιο βολφραμίου). Από αυτές τις δύο μετρήσεις γίνεται σαφές ότι είναι δυνατή η προσαρμογή των μαγνητικών ιδιοτήτων σε κάποιον από τους άξονες του υλικού.



**Σχήμα 2.15.** Τυπική απόκριση χάλυβα low carbon steel όπως παρήχθη (μπλε γραμμή) μετά από θερμική και μαγνητική κατεργασία στους 300°C και 0.1T για μια ώρα και αργή απόψυξη 24 ωρών (πορτοκαλί γραμμή).



**Σχήμα 2.16.** Μέτρηση μαγνητικής ανισοτροπίας ηλεκτρικού χάλυβα μετά από συγκόλληση. Η ανισοτροπία και η αλλαγή της είναι χαρακτηριστική, τόσο στην ζώνη βάσης (BM) και την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), όσο και στην ζώνη τήξης: η μπλέ γραμμή αφορά στο μέταλλο βάσης, η κόκκινη στην ζώνη τήξης και η πράσινη στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Η αξία αυτών των μετρήσεων έχει πραγματικό νόημα όταν συσχετίζεται με την μελέτη της δομής και της μικροδομής των χαλύβων. Στην περίπτωση των φερριτικών χαλύβων και του permalloy θα δώσουμε έμφαση στην ανάλυση μικροδομής, ήτοι τον μικροδομικό χαρακτηρισμό με TEM, διότι εκεί καταδεικνύεται η ύπαρξη και η πυκνότητα των διαταραχών στο υλικό. Με μια τέτοια μέτρηση, γίνεται καταφανές τι πρέπει να γίνει για την βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού, δηλαδή την μεγιστοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας σε κάποιον ή σε κάθε άξονα. Στην ενότητα αυτή δεν θα ασχοληθούμε με την ανάλυση της δομής, δεδομένου ότι οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν είναι

μονοφασικοί και δεν υπάρχει λόγος ελέγχου της φάσης τους, δηλαδή της δομής τους, διότι το μόνο που μπορεί να αλλάξει από μια τέτοια κατεργασία είναι το μέγεθος και ο προσανατολισμός των κόκκων.

Η μελέτη των δειγμάτων με TEM (JEOL με λειτουργία στα 220 kV) έγινε με στόχο την εποπτεία των δομών διαταραχών που δημιουργούνται στον χάλυβα AISI 1008 μετά από καταπόνηση σε εφελκυσμό και ψυχρή έλαση σε σύγκριση βέβαια με την μικδορομή τους.

Η προετοιμασία των δειγμάτων περιλαμβάνει:

- αρχική κοπή από τα δείγματα της εκάστοτε καταπόνησης με μικροτόμο
- λόγω του μεγάλου αρχικού πάχους των 2mm ακολούθησε εμβάπτιση σε έντονα όξινο περιβάλλον μέχρι τα ~20 μm, όπου παρατηρήθηκε σχετικά ομοιόμορφη μείωση του πάχους (τραχύτητα της τάξης των  $\pm 1$  μm)
- περαιτέρω μείωση του πάχους για την διάνοιξη της χαρακτηριστικής οπής στο κέντρο του δοκιμίου και βαθμιαία αύξηση του πάχους του υλικού με τη χρήση του ion beamer.

Τελικά το πάχος του υπό εξέταση δείγματος ήταν ~5 nm στα όρια της οπής και ~100 nm σε απόσταση 500nm μακριά από αυτή. Τα ενδεχόμενα μη συστηματικά σφάλματα, που πιθανόν να υπεισέρχονται κατά την προετοιμασία, δημιουργώντας ενδείξεις, που δεν αντιστοιχούν στις διαταραχές, είναι:

- η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων κατά τα στάδια της χημικής προσβολής
- η πρόκληση δευτερογενών ατελειών με την εμφάνιση διαταραχών διακόσμησης (*decoration faults*) από τη διαχείριση του δείγματος, όταν το πάχος του είναι αρκετά μικρό, δηλαδή πριν και μετά την χρήση του ion beamer.

Οι μετρήσεις αυτές προσδιορίζουν την κατανομή και την πυκνότητα των διαταραχών στο υλικό λόγω:

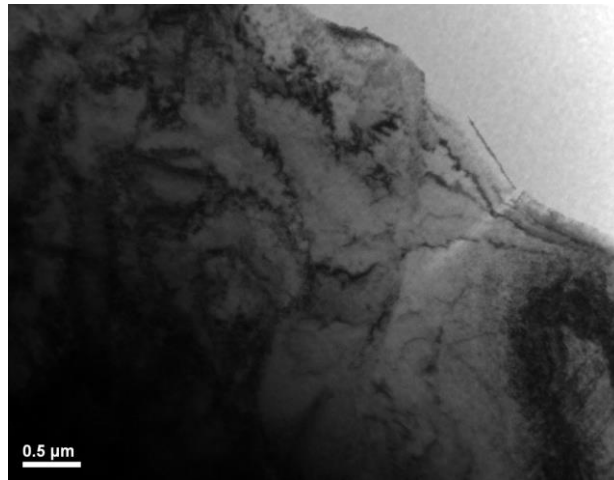
- αυξομείωσης διαταραχών στη διαδικασία προετοιμασίας
- μη δυνατότητας υπολογισμού της πυκνότητας των διαταραχών, λόγω δυσκολίας στην ακριβή μέτρηση του πάχους των τελικών δοκιμίων στο σημείο της μέτρησης, και
- του σημειακού χαρακτήρα των μετρήσεων της τάξης των εκατοντάδων nm<sup>2</sup> οι οποίες δεν ολοκληρώνονται στην αντίστοιχη επιφάνεια του υλικού όπου λαμβάνουν χώρα οι μαγνητικές μετρήσεις (η επιφάνεια που καλύπτει μια μαγνητική μέτρηση είναι από 1 mm<sup>2</sup> έως 100 mm<sup>2</sup>)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται Σχήματα στα οποία απεικονίζονται δομές διαταραχών για τα εξής δείγματα LCS:

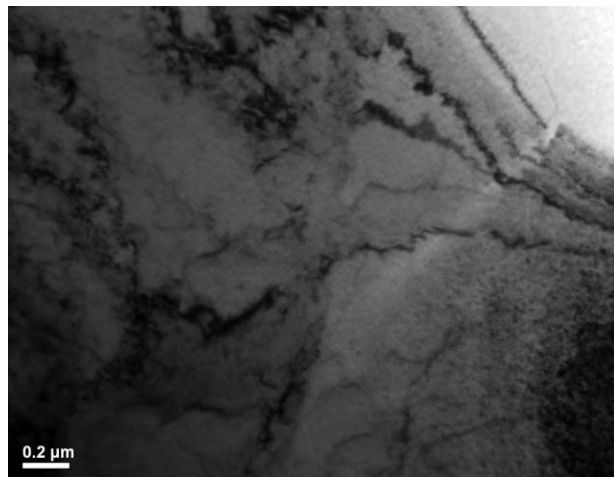
- Δείγμα όπως ελήφθη
- Μετά την θερμική κατεργασία, όπως αναλύθηκε προηγουμένως και
- Μετά από θερμική & μαγνητική κατεργασία

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζονται αποτελέσματα από το αρχικό δείγμα LCS, όπου παρατηρείται μεγάλη παρουσία διαταραχών. Στο Σχήμα 2.18 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά την θερμική κατεργασία και στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά και την θερμική – μαγνητική κατεργασία. Είναι σαφής η μείωση των διαταραχών μετά από την θερμική και μαγνητική κατεργασία, που επιτρέπει την αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας.

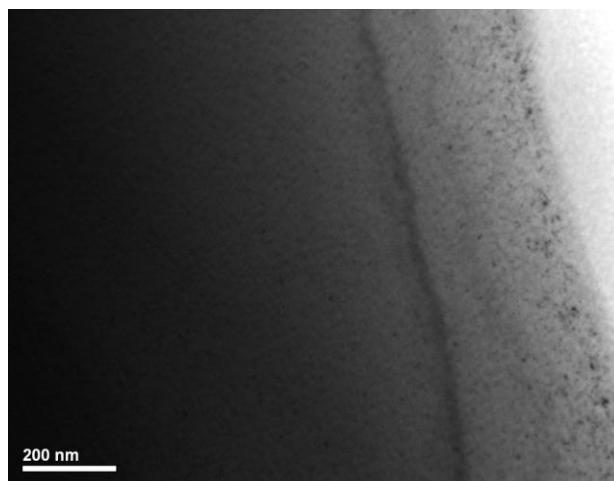
Στο Σχήμα 2.20, δίνεται μια ακραία περίπτωση έντονων δασών διαταραχών (*dislocation forests*) που οφείλονται σε λάθος πιάσιμο των δειγμάτων και που απαιτείται να διακρίνονται από τις διαταραχές εξαιτίας των παραμενουσών.



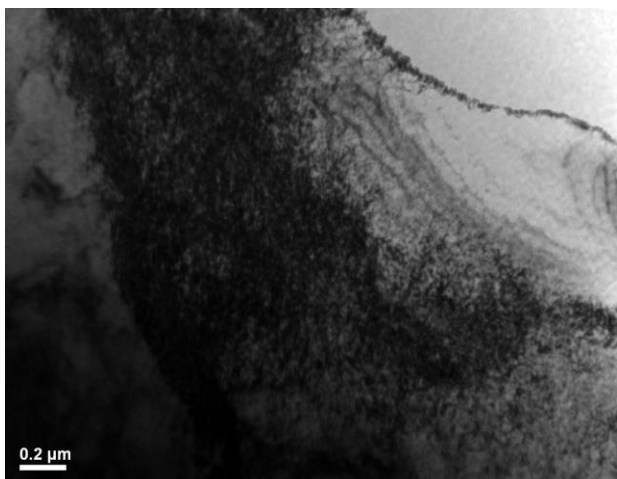
**Σχήμα 2.17.** Μικροφωτογραφίες TEM του αρχικού δείγματος LCS.



**Σχήμα 2.18.** Μικροφωτογραφίες TEM του αρχικού δείγματος LCS μετά την θερμική κατεργασία.



**Σχήμα 2.19.** Μικροφωτογραφίες TEM του LCS μετά από την θερμική & μαγνητική κατεργασία.

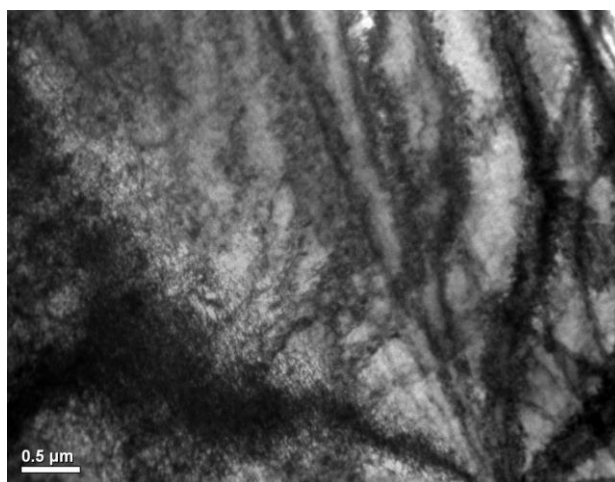


**Σχήμα 2.20. Μικροφωτογραφίες TEM από λάθος χειρισμό (πιάσιμο) του δείγματος.**

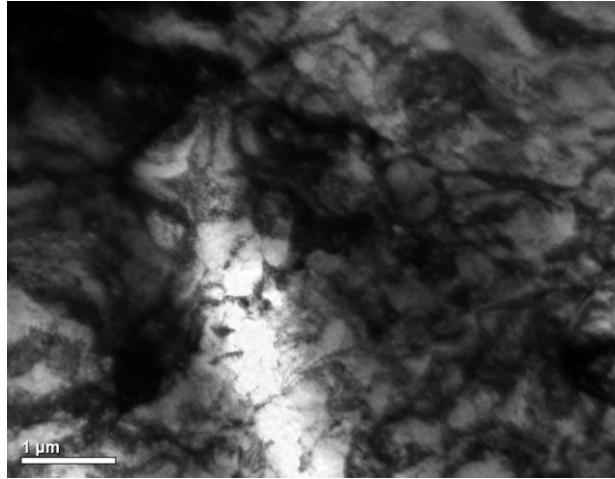
Στην συνέχεια, μετρήθηκαν και δείγματα από τον ίδιο χάλυβα μετά από ψυχρή έλαση. Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά την παραμόρφωση από ψυχρή έλαση με μείωση πάχους 12,5 %. Παρατηρείται έντονη παρουσία δασών διαταραχών. Στην περίπτωση της έλασης η δημιουργία και κίνηση των διαταραχών απεικονίζεται δραματικά αυξημένη και χωρίς να χαρακτηρίζεται από κάποια τάση στη διάταξή τους. Ακόμη και για 12,5 % μείωση πάχους, σχηματίζονται τοπικά δένδρα και συστοιχίες κάθετα διασταυρούμενων διαταραχών.

Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά την παραμόρφωση από ψυχρή έλαση με μείωση πάχους 32,5 %. Η παρουσία δασών διαταραχών αρχίζει να κυριαρχεί στον κόκκο. Στο Σχήμα 2.23 παρουσιάζονται αποτελέσματα μετά την παραμόρφωση από ψυχρή έλαση με μείωση πάχους 62,5 %. Εδώ πλέον η παρουσία δασών διαταραχών αρχίζει να δίνει και μικρο-ρωγματώσεις στον κόκκο.

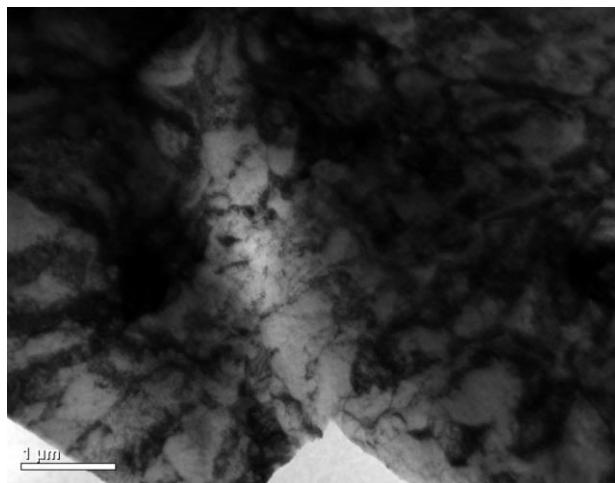
Η διαφορά στη δομή και την πυκνότητα των διαταραχών για τα δύο είδη παραμόρφωσης αντικατοπτρίζεται ξεκάθαρα στους βρόχους υστέρησης. Αποδεικνύεται δηλαδή ότι ο αριθμός αλλά και η διάταξη των διαταραχών επηρεάζουν καθοριστικά τις αποκρίσεις των μαγνητικών μετρήσεων.



**Σχήμα 2.21. TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 12,5 %.**



**Σχήμα 2.22.** TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 32,5 %.



**Σχήμα 2.23.** TEM φωτογραφίες του δείγματος από έλαση με μείωση πάχους 62,5 %

### **2.3.2. Ανάπτυξη λεπτών υμενίων Ni-Fe**

Τα κράματα FeNi αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα αποστειρωμένης και αποκαρβιδιωμένης πλάκας φερριτικού χάλυβα προσομοιώνοντας τις τεχνικές θωράκισης. Για την εναπόθεση του κράματος σε μορφή λεπτού υμενίου επιλέχθηκε κατ' αρχήν η μέθοδος φυσικής εναπόθεσης ατμών με την μέθοδο του θρυμματισμού (sputtering). Διαπιστώθηκε, ότι με τον θρυμματισμό δεν μπόρεσε να επιτευχθεί η επιθυμητή στοιχειομετρική απόθεση.

Έτσι, έγινε σαφές ότι η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος παρασκευής των λεπτών υμενίων ήταν αυτή της θερμικής εξάχνωσης και ακόμη καλύτερα απόθεσης με δέσμη ηλεκτρονίων (e-gun). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, δημιουργήθηκαν αρχικά κράματα στερεού διαλύματος νικελίου – σιδήρου σε φούρνο τόξου υπό κενό στις επιθυμητές κατά βάρος αναλογίες. Στην συνέχεια σε θάλαμο υψηλού κενού ( $10^{-7}$  mbar) ένα σύρμα βολφραμίου παρήγαγε πλήθος ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια με κατάλληλα προσανατολισμένους ηλεκτρομαγνήτες συγκεντρώνονταν σε δέσμη και οδηγούνταν πάνω στο συμπαγές μητρικό κράμα που είχε τοποθετηθεί στον θάλαμο κενού. Το κράμα εξαχνώνεται<sup>1</sup> τοπικά εκεί που προσπίπτει η δέσμη και οι ατμοί λόγω του υψηλού κενού προσκολλούν σε κάθε ελεύθερη

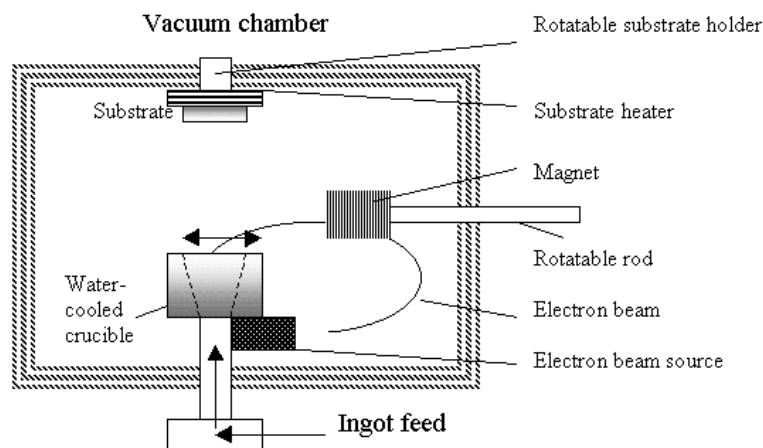
<sup>1</sup> Το νικέλιο και ο σίδηρος έχουν παραπλήσια θερμοκρασία εξάχνωσης και εξαχνώνονται σχεδόν ταυτόχρονα. Αναφέρεται πως σε κανονική πίεση το νικέλιο έχει θερμοκρασία εξάχνωσης 3005 K και ο σίδηρος 3023 K.

επιφάνεια που υπάρχει σε ευθεία γραμμή από το σημείο εξάχνωσης. Σε ευθεία πάνω από το μητρικό κράμα έχει τοποθετηθεί το σιδηρούχο υπόστρωμα. Έτσι το υλικό προσκολλάει και στο υπόστρωμα και σχηματίζει λεπτό υμένιο διατηρώντας τις αναλογίες του μητρικού κράματος. Δίπλα από το υπόστρωμα είχε τοποθετηθεί πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας μονοκρυστάλλου χαλαζία, συνδεδεμένος με γεννήτρια σημάτων και μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, με στόχο την μέτρηση του πάχους του επικαθήμενου υμενίου. Στο Σχήμα 2.24 δείχνονται οι τεχνικές θερμικής εξάχνωσης και e-beam, ενώ στο Σχήμα 2.25 δίνεται η σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του e-beam.

Στη συνέχεια τα μαγνητικά λεπτά υμένια χαρακτηρίστηκαν με στόχο την συσχέτιση δομής και μαγνητικών ιδιοτήτων, ώστε να εξηγηθεί η συμπεριφορά του υλικού. Παρόλο που το κράμα νικελίου – σιδήρου έχει σημαντικές μαγνητικές ιδιότητες, η αναλογία νικελίου – σιδήρου ως στερεού διαλύματος ήταν και είναι θέμα μελέτης. Ένας από τους στόχους είναι η βελτιστοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας του κράματος. Γι' αυτό αναπτύχθηκαν υμένια διαφόρων κραματικών αναλογιών, που δίνονται στο Πίνακα 2.1 (περιεκτικότητας κατά βάρος).



Σχήμα 2.24. Διάταξη φυσικής εναπόθεσης ατμών με θέρμανση του κράματος σε βάθρο τανταλίου (αριστερά και αριστερά – κέντρο). Διάταξη φυσικής εναπόθεσης ατμών με τη μέθοδο της δέσμης ηλεκτρονίων. Στον υποδοχέα που διακρίνεται, τοποθετείται το μητρικό κράμα.



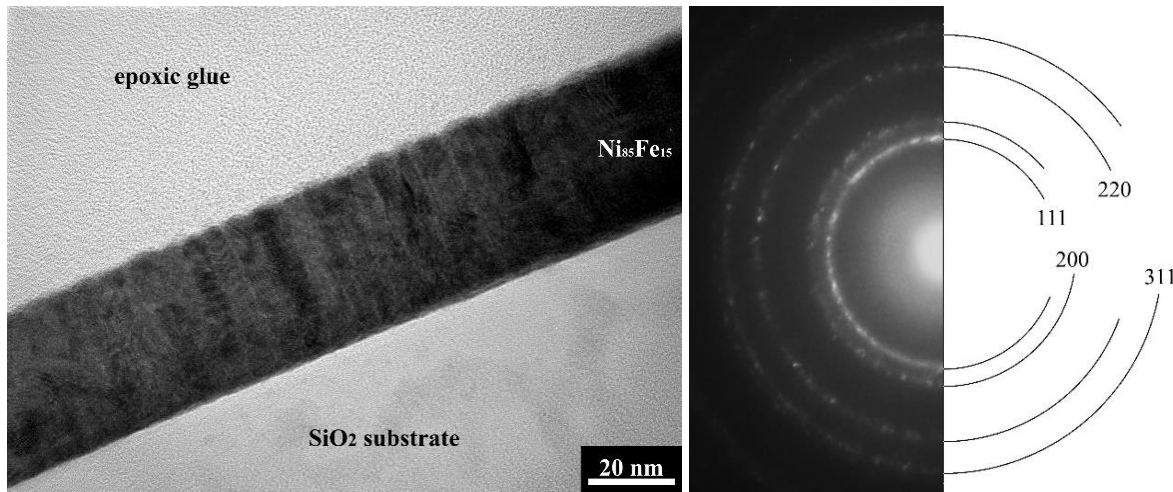
Εικόνα 2.25. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου εναπόθεσης λεπτών υμενίων με χρήση electron gun.

Πίνακας 2.1. Κραματικές κατά βάρος αναλογίες των υμενίων σε νικέλιο και σίδηρο

$\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$	$\text{Ni}_{60}\text{Fe}_{40}$	$\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$	$\text{Ni}_{85}\text{Fe}_{15}$
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------



Το πάχος των υμενίων, εκτός από την μέτρηση με τον μονοκρύσταλλο χαλαζία σε πραγματικό χρόνο, ελεγχόταν και με τη μέτρηση της διαφοράς του βάρους του υποστρώματος πριν και μετά την εναπόθεση σε ζυγαριά υψηλής ακριβείας. Τα αποτελέσματα επαλήθευσαν τη μέτρηση με τη μέθοδο του χαλαζία. Ένα υμένιο πάχους 36 nm μελετήθηκε με ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης (TEM) και είναι καθαρή η συνύπαρξη της κάθετης ανισοτροπία της δομής, καθώς επίσης και της ανισοτροπίας στο επίπεδο (Σχήμα 2.26). Αύξηση του πάχους των υμενίων εγγυάται την διατήρηση αυτών των ανισοτροπικών ιδιοτήτων.

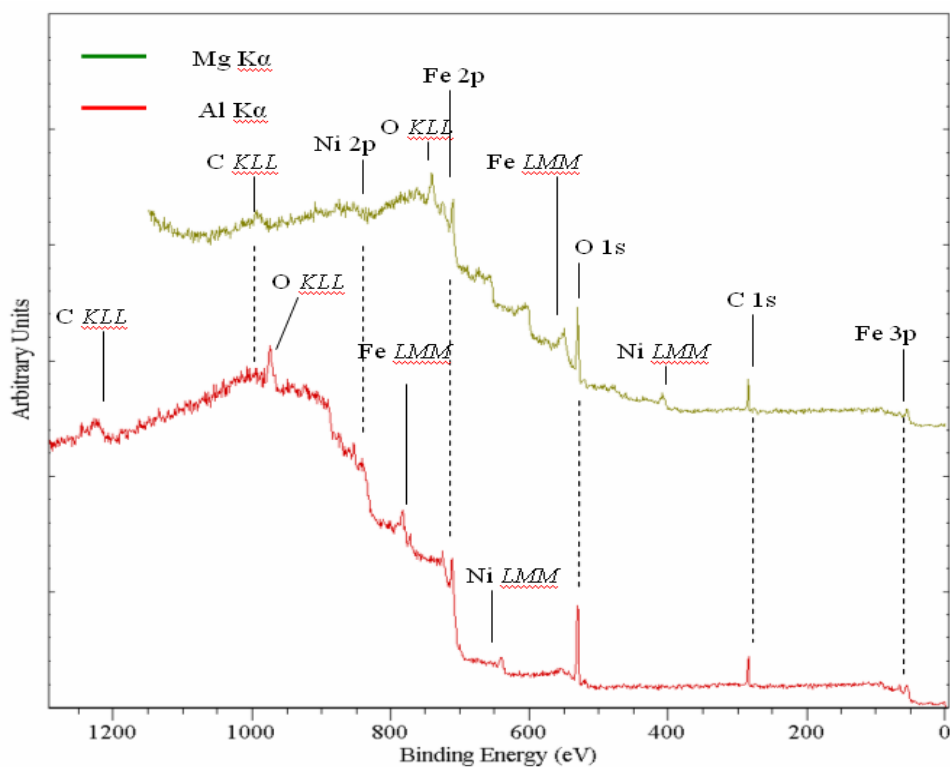


**Σχήμα 2.26.** Πλάγια όψη (cross section) υμενίου  $\text{Ni}_{85}\text{Fe}_{15}$  πάχους 36nm όπου διακρίνεται σαφώς η συνύπαρξη της κάθετης ανισοτροπίας και της ανισοτροπίας στο επίπεδο του υμενίου (αριστερά). Περίθλαση διερχόμενης δέσμης (δεξιά) που δείχνει την νανο-κρυσταλλικότητα του εν λόγω υμενίου, καθώς επίσης και τους κρυσταλλογραφικούς του άξονες, που επιβεβαιώνουν τον προσανατολισμό της ανισοτροπίας.

Τέλος, διεξήχθησαν συμπληρωματικά πειράματα χαρακτηρισμού επιφανείας με τη μέθοδο φασματοσκοπίας φωτοηλεκτρονίων ακτίνων Χ (X-ray photoelectron spectroscopy – XPS). Χρησιμοποιώντας διαφορετικές πηγές εκπομπής ακτίνων Χ, μία αλουμινίου και μία μαγνησίου<sup>2</sup>, μελετήθηκαν διαφορετικά βάθη της επιφάνειας του υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα υμένια έχουν υποστεί οξειδωση στα πρώτα 20 – 30 Å της επιφάνειάς τους, αποτέλεσμα λογικό καθώς έρχονται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, ενώ για μεγαλύτερα βάθη το υλικό έχει ελάχιστα οξείδια. Τα αποτελέσματα και από τις δύο πηγές εκπομπής παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.27.

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υμενίων ορίζουν τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται η επιτυχία στην θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου. Η μεγιστοποίηση της μαγνήτισης, η ελαχιστοποίηση του συνεκτικού πεδίου και, τέλος, η ισοτροπία του υλικού είναι ζωτικής σημασίας για την θωράκιση έναντι μαγνητικών πεδίων. Σε κάθε δείγμα, πρώτα προσδιοριζόταν η διεύθυνση του άξονα εύκολης μαγνήτισης. Έχοντας προσδιορισμένο τον άξονα εύκολης μαγνήτισης, οι βρόχοι υστέρησης προσδιορίζονταν με πεδίο παράλληλο στον άξονα εύκολης μαγνήτισης και με πεδίο κάθετο σε αυτόν. Έτσι έγινε δυνατή η μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των υμενίων, αλλά και η μελέτη της διαφοράς ενέργειας μαγνήτισης σε διευθύνσεις κατά τον άξονα.

<sup>2</sup> Η λυχνία Al εκπέμπει στα 1486,6 eV και η λυχνία μαγνησίου στα 1253,6 eV



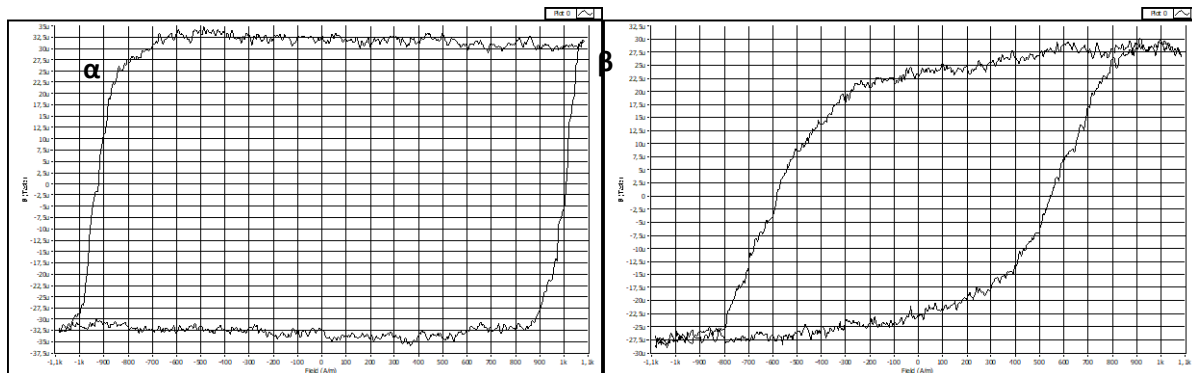
**Σχήμα 2.27. Διάγραμμα XPS υμενίου  $\text{Ni}_{60}\text{Fe}_{40}$ .**

Τυπικοί βρόχοι μαγνητικής υστέρησης, που ελήφθησαν δίνονται στα Σχήματα 2.28 (α και β). Το υμένιο των εν λόγω βρόχων είναι κράμα  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  πάχους 100 nm. Η απόκριση του Σχήματος 2.28α εξήχθη από πείραμα με πεδίο εφαρμοσμένο στον άξονα εύκολης μαγνήτισης, ενώ η απόκριση του Σχήματος 2.28β για πεδίο κάθετο στον άξονα εύκολης μαγνήτισης. Από το Σχήμα 2.28α φαίνεται ότι το συνεκτικό πεδίο είναι 367 mA/m, το πεδίο κορεσμού του υλικού  $H_s$  είναι 402 mA/m και η μαγνήτιση κορεσμού ίση με 275.5 mT. Ο βρόχος είναι αρκετά τετραγωνικός εμφανίζοντας έντονο άλμα Barkhausen από τη μία διεύθυνση στη αντιδιαμετρική της. Η απόκριση του Σχήματος 2.28β για το ίδιο υλικό είναι διαφορετική. Τα μετρήσιμα στοιχεία είναι συνεκτικό πεδίο  $H_c$  ίσο με 271 A/m και το πεδίο κορεσμού του υλικού  $H_s$  είναι 337 A/m, ενώ η μαγνήτιση κορεσμού  $B_s$  είναι 275 mT, ίση με την προηγούμενη περίπτωση. Στη περίπτωση του Σχήματος 2.28β, το εξωτερικό πεδίο επιβάλλεται κάθετα στον άξονα εύκολης μαγνήτισης.

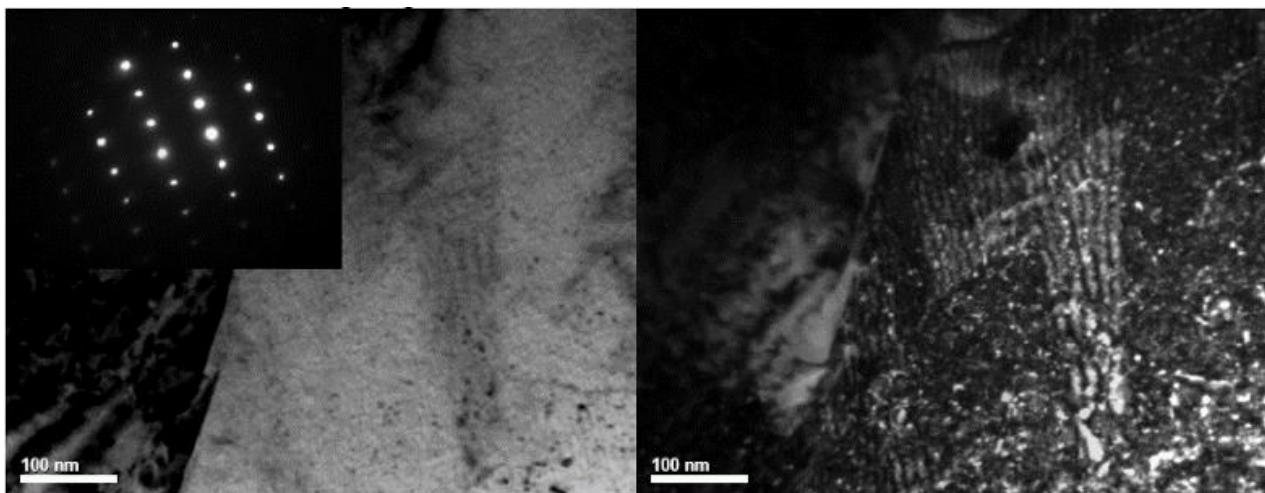
Με άλλα λόγια το εξωτερικό πεδίο προσπαθεί να περιστρέψει τα μαγνητικά δίπολα στις  $90^\circ$  σε σχέση με την ενεργειακά επιθυμητή τους θέση. Για τον λόγο αυτό η μορφή του βρόχου δεν είναι τετραγωνική όπως προηγουμένως, αλλά σιγμοειδής. Αυτό σημαίνει πως δεν λαμβάνει χώρα ένα άλμα Barkhausen, αλλά σταδιακά τα δίπολα περιστρέφονται κατά τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Παρόλα αυτά όμως, το υλικό δεν εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις στις ιδιότητες του (συνεκτικό πεδίο και πεδίο κορεσμού) σε σχέση με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης.

Οι μαγνητικές ιδιότητες και η μικροδομή του υμενίου από permalloy σε πάχη της τάξης του 1-10  $\mu\text{m}$  μελετήθηκαν διεξοδικά και έδειξαν μαγνητική διαπερατότητα που ξεπερνά τα  $10^5$ , με συνεκτικό πεδίο της τάξης των mA/m. Μια τυπική απόκριση στο TEM δίνεται στο Σχήμα 2.29, δείχνοντας την κρυσταλλικότητα του υμενίου σε τέτοια (σχετικά) μεγάλα πάχη. Η διαμόρφωση του σχήματος του βρόχου του permalloy ήταν δυνατόν να προσφέρει μεγάλο άλμα Barkhausen με ελάχιστη κλίση, μετά από θερμική ανόπτηση στους  $380^\circ\text{C}$  σε αδρανή ατμόσφαιρα για 1 ώρα και απόψυξη για 24 ώρες και

εν συνεχεία μαγνητική ανόπτηση στις ίδιες συνθήκες με την παρουσία μαγνητικού πεδίου 0,1 T και απόψυξη παρουσία πεδίου (field cooling).



**Σχήμα 2.28.** Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης για κράμα  $Ni_{75}Fe_{25}$  πάχους 93,9 nm για επιβαλλόμενο πεδίο σε διεύθυνση παράλληλη (α) και κάθετη (β) στον άξονα εύκολης μαγνήτισης του υμενίου.



**Σχήμα 2.29.** Μικροδομή του υμενίου από  $Ni_3Fe$  (Permalloy), πάχους 10 nm όπως προσδιορίστηκε από το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης. Οι μικρογραφίες φωτεινού πεδίου και σκοτεινού πεδίου απεικονίζουν την παρουσία σχετικά περιορισμένων διαταραχών, ενώ η ανάστροφη απεικόνιση δείχνει την κρυσταλλικότητα του υμενίου.

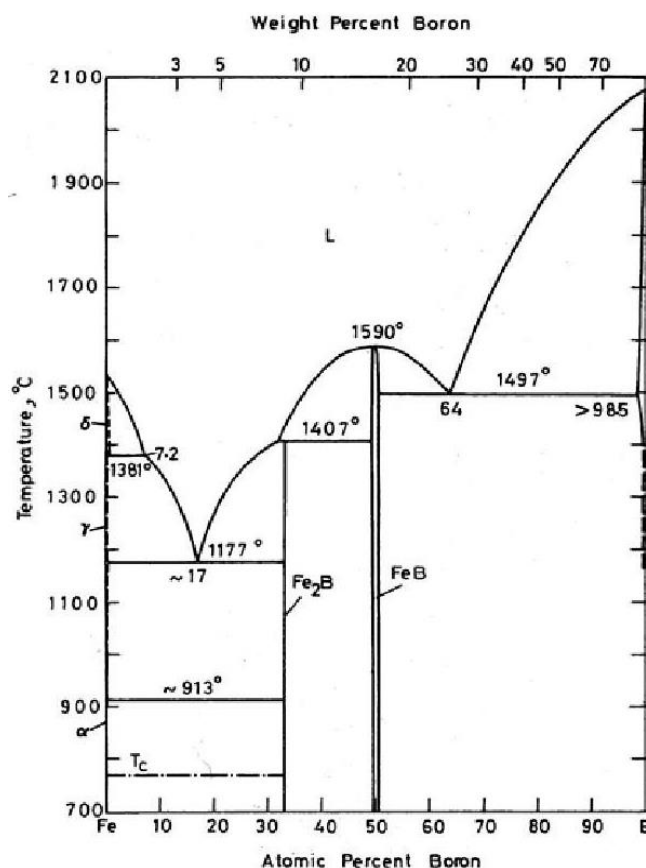
### 2.3.3. Άμορφα και νανοκρυσταλλικά υλικά θωράκισης

Λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή των άμορφων και νανοκρυσταλλικών υλικών σε ενεργειακά συστήματα, όπως μετασχηματιστές, κινητήρες κλπ., διαφαίνεται ότι η εφαρμογή τους στην θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων, τόσο στην ηλεκτροκίνηση όσο και στην φόρτιση και την ασύρματη φόρτιση είναι σημαντική. Έτσι, σ' αυτή την ενότητα θα μελετηθούν τα εν λόγω υλικά, τόσο σε σχέση με την κατασκευή τους όσο και με τον μαγνητικό και δομικό τους χαρακτηρισμό. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί μια νέα οικογένεια υλικών που ανέπτυξε το Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων του ΕΜΠ σε συνεργασία με το Εργαστήριο Μεταλλικών Υλικών του Ινστιτούτου Φυσικής της Σλοβάκικης Ακαδημίας Επιστημών: τις άμορφες και νανοκρυσταλλικές ταινίες Fe-B με διαφορετική περιεκτικότητα βορίου από 12 % έως 25 %, καλύπτοντας έτσι το εκτεταμένο όριο σχηματισμού υάλου στις υποευτηκτοειδείς συνθέσεις μέχρι το υπερευτηκτικό όριο. Τα κράματα Fe-B παρασκευάστηκαν με χύτευση επίπεδης ροής (planar flow casting) σε μορφή κορδέλας με περίπου 20μm πάχος και 6mm πλάτος. Οι χημικές συνθέσεις που αναπτύχθηκαν είναι οι:  $Fe_{75}B_{25}$ ,  $Fe_{80}B_{20}$ ,  $Fe_{86}B_{14}$  και  $Fe_{88}B_{12}$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.30 στο διάγραμμα φάσεων Fe-B το ευτηκτικό σημείο (που δείχνει την

ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας τήξης) αντιστοιχεί στο 17% βόριο, χωρίζοντας έτσι τα παραπάνω δείγματα σε υποευτηκτοιειδή και υπερευτηκτοιειδή.

Τα κράματα με περιεκτικότητα βορίου 25% και 20% είναι γνωστό ότι μπορούν να κατασκευαστούν, αποτελώντας το benchmark της τεχνολογίας. Σε αντίθεση με αυτά τα κράματα, τα κράματα με περιεκτικότητα βορίου 14% και 12% δεν έχουν παρασκευασθεί και μελετηθεί μέχρι στιγμής και κατά συνέπεια αποτελούν ένα κρίσιμο αντικείμενο μελέτης και έρευνας.

Οι μαλακές μαγνητικές ιδιότητες των κραμάτων Fe-B ερευνήθηκαν μέσω μετρήσεων του βρόχου υστέρησης πριν και μετά την ανόπτηση. Μετρήσεις XRD, DSC-TGA και TEM αποτύπωσαν τους μηχανισμούς της διαδικασίας κρυστάλλωσης. Η κρυστάλλωση των άμορφων κραμάτων  $Fe_{100-x}B_x$  που περιέχουν λιγότερο από 17% βόριο εμφανίζουν δύο στάδια κρυστάλλωσης. Επίσης, μελετήθηκαν η κρυστάλλωση και η θερμοκρασία Curie των κραμάτων  $Fe_{100-x}B_x$  ( $12 < x < 25$ ) μελετώνται. Οι μεταλλικές ταινίες που έχουν πάνω από 12% βόριο διαπιστώθηκε πως είναι πλήρως άμορφα, ενώ στο as-cast κράμα με 12 % βόριο υπάρχει μικρή ποσότητα ναοκρυσταλλικότητας. Σε κάθε σύνθεση έγινε διαδικασία ανόπτηση προκειμένου να επιτευχθεί 5 %, 50 % και 95 % ποσοστό κρυσταλλικότητας. Σε αντίθεση με τα κρυσταλλικά υλικά, τα άμορφα ή τα γυάλινα υλικά έχουν σαν χαρακτηριστικό τους την τυχαία διευθέτηση των ατόμων. Λόγω της ιδιάζουσας δομής τους δεν εμφανίζουν όρια και κόκκους με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένη αντοχή στην διάβρωση και επίσης να παρουσιάζουν ελαστικές ιδιότητες και σκληρότητα μεταξύ αυτής των μεττάλλων και των κεράδικών [185, 186].



Σχήμα 2.30. Διάγραμμα φάσεων Fe-B [183].

Η σύνθεση ναοκρυσταλλικών υλικών είναι ένα από τα σύγχρονα προβλήματα που στην σύγχρονη επιστήμη των υλικών. Τις τελευταίες δεκαετίες, το ενδιαφέρον για το πρόβλημα αυτό έχει αυξηθεί εντυπωσιακά, καθώς διαπιστώθηκε ότι οι ιδιότητες των ναοκρυσταλλικών υλικών μεταβάλλονται

σημαντικά όταν το μέγεθος των κρυσταλλιτών-κόκκων μειώνεται κάτω από μια οριακή τιμή. Τέτοιες αλλαγές προκύπτουν όταν το μέσο μέγεθος των κόκκων δεν υπερβαίνει τα 100nm και είναι πιο έντονες όταν οι κόκκοι έχουν μέγεθος μικρότερο από 10nm. Η χημική σύνθεση, η μικροδομή, η κατανομή του μεγέθους των κόκκων και κατά συνέπεια οι ιδιότητες των νανοϋλικών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο παραγωγής τους [187]. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των νανοϋλικών διαφέρουν σημαντικά από εκείνες των συμπαγών υλικών της ίδιας σύνθεσης [188].

Στα κρυσταλλικά υλικά το συνεκτικό πεδίο μειώνεται και η μαγνητική διαπερατότητα αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου των κόκκων  $D$ . Στα ταχέως στερεοποιημένα υλικά με αρχικά άμορφη δομή, είναι απαραίτητη η κατάλληλη αλληλουχία ατόμων, ώστε μια επακόλουθη θερμική επεξεργασία να δώσει σημαντικά βελτιωμένες μαγνητικές ιδιότητες, διατηρώντας το μέγεθος των νανο-κόκκων μέσα στην άμορφη μήτρα κάτω από περίπου 30nm [188]. Οι βελτιωμένες ηλεκτρικές, οπτικές, φυσικές, χημικές, μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες τους είναι το κίνητρο για την έρευνα, που γίνεται πάνω σε αυτά, ενώ οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής και βελτιστοποίησης είναι ακόμη σε χαμηλό επίπεδο.

Πολλές από τις σημαντικές ιδιότητες των κραμάτων μπορούν να εξηγηθούν με βάση την κρυσταλλική τάξη ή, σε πολλές περιπτώσεις, με βάση των ατελειών στη κρυσταλλική τάξη. Ένα άμορφο μέταλλο είναι ένα μεταλλικό υλικό με ποσοστό μεταλλοειδών ~20% με άτακτη δομή σε ατομική κλίμακα. Υλικά στα οποία μια τέτοια αταξία παράγεται απευθείας από την υγρή κατάσταση κατά την ψύξη ονομάζονται "γυαλιά", και έτσι τα άμορφα μέταλλα αναφέρονται συνήθως ως "μεταλλικά γυαλιά" ή "υαλώδη μέταλλα". Κανονικά, όταν ένα κράμα ψύχεται από την υγρή κατάσταση, μπορεί να στερεοποιηθεί με δύο τρόπους. Εάν ο ρυθμός ψύξης είναι κάτω από κάποιο κρίσιμο ρυθμό, το υγρό μπορεί να παγώσει και να σχηματίσει ένα πολυκρυσταλλικό ή μονοκρυσταλλικό στερεό. Από την άλλη πλευρά, εάν ο ρυθμός ψύξης είναι ταχύτερος από μια κρίσιμη τιμή και ταυτόχρονα η θερμοκρασία τήξης του  $T_m$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ , τότε στερεοποιείται σε άμορφη δομή. Η διαφορά στην ιοντική ακτίνα των συμμετεχόντων στοιχείων είναι η τρίτη παράμετρος, που επιτρέπει την άμορφη δομή σε συνθήκες ταχείας ψύξης.

Για τα σιδηρούχα κράματα, ο σχηματισμός υαλώδους δομής είναι σχετικά δύσκολος και απαιτεί ρυθμούς ψύξης της τάξης των  $10^6$  K/s. Το 1960, ο Pol Duwez και οι συνεργάτες του δημιούργησαν το πρώτο μεταλλικό γυαλί που ήταν το κράμα  $Au_{80}Si_{20}$  με ταχεία ψύξη στους  $\sim 10^6$  K/s [189]. Λίγα χρόνια αργότερα, οι Cohen και Turnbull συνέθεσαν άμορφες σφαίρες από Pd-Si-M (M=Ag, Cu, Au) και έδειξαν ότι το κράμα  $Pd_{77.5}Cu_6Si_{16.5}$  μπορεί να γίνει άμορφο με διάμετρο 0.5mm [190].

Είναι δύσκολο να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των πραγματικά άμορφων στερεών και των κρυσταλλικών στερεών στα οποία το μέγεθος των κρυστάλλων είναι πολύ μικρό (μικρότερο από 2nm). Ακόμη και τα άμορφα υλικά διαθέτουν τάξη μικρής εμβέλειας (σε κλίμακες μήκους περίπου 1nm), όπου η δυνατότητα διάκρισης μεταξύ τους είναι δύσκολη ακόμη και με τις πιο σύγχρονες τεχνικές δομικού χαρακτηρισμού. Τα άμορφα κράματα χρησιμοποιήθηκαν ως πρόδρομες ουσίες για την παραγωγή νανοκρυσταλλικών κραμάτων.

Η μελέτη της νανοκρυστάλλωσης και κρυστάλλωσης των άμορφων κραμάτων επιτυγχάνεται με ποικιλία πειραματικών τεχνικών, όπως η ισοθερμική-γραμμική ανόπτηση ακολουθούμενη από παρατηρήσεις μικροδομής, μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, θερμιδομετρικές μετρήσεις DSC-DTA και θερμομαγνητική ανάλυση σε μαγνητικά κράματα. Αυτές οι πειραματικές τεχνικές μπορούν να προσδιορίσουν το κλάσμα όγκου, που έχει μετατραπεί σε κρυσταλλική φάση, καθώς επίσης και η

χρονική εξέλιξη αυτής της παραμέτρου: Ο βασικός μηχανισμός της νανοκρυστάλλωσης είναι η βραχείας ή μακράς κλίμακας μετακίνηση ατόμων [191], σε αποστάσεις κατάλληλες για το σχηματισμό σταθερών πυρήνων. Οι πιθανοί τρόποι μετασχηματισμού της άμορφης σε κρυσταλλική φάση:

**Πρωτογενής κρυστάλλωση:** κόκκοι κρυσταλλικής φάσης με διαφορετική χημική σύσταση από αυτή της άμορφης μήτρας κατακρημνίζονται δημιουργώντας νανοκρυσταλλικές φύτρες. Κατά συνέπεια, η πρωτογενής κρυστάλλωση ενέχει βάθμωση περιεκτικότητας των στοιχείων της, μπροστά από τη διεπιφάνεια της φύτρας με την υπολειπόμενη άμορφη φάση, η οποία εμπλουτίζεται στα υπόλοιπα συστατικά του κράματος. Περαιτέρω κρυστάλλωση διακόπτεται εφόσον επιτευχθεί η μετασταθής ισορροπία στην άμορφη φάση ή μαλακή πρόσκρουση (soft impingement) των φύτρων. Τα άμορφα υπολείμματα μπορούν να κρυσταλλωθούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ η κρυσταλλική φάση λειτουργεί σαν προτιμώμενη θέση ετερογενούς πυρήνωσης. Οι ρυθμοί μεγέθυνσης της φύτρας κατά την πρωτογενή κρυστάλλωση είναι παραβολικοί στο χρόνο, με την διάχυση όγκου (ατομική διάχυση μακράς κλίμακας) να είναι το στάδιο που ελέγχει τη διεργασία.

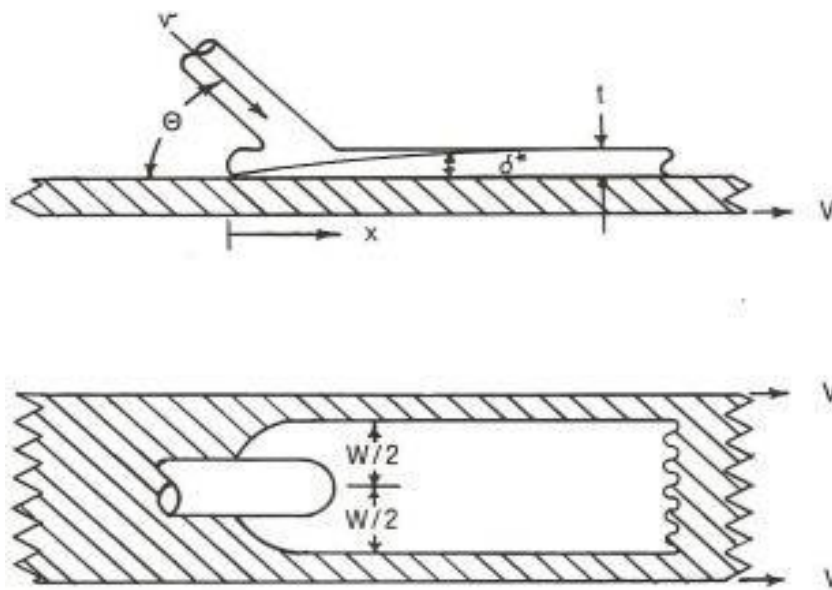
**Ευτηκτοειδής κρυστάλλωση:** δύο κρυσταλλικές φάσεις μεγαλώνουν ταυτόχρονα από την άμορφη μήτρα με μια ασυνεχή αντίδραση. Κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού δεν υπάρχει διαφορά στη συγκέντρωση εκατέρωθεν του μετώπου αντίδρασης. Τα συστατικά χωρίζονται σε δυο φάσεις μέσα πριν ή μετά το πεδίο αντίδρασης, έχοντας σαν αποτέλεσμα οι ρυθμοί μεγέθυνσης της ευτηκτοειδούς αντίδρασης να είναι χαμηλότεροι αυτών της πολυμορφικής αντίδρασης που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η μεγέθυνση των φύτρων ελέγχεται από την διάχυση στη διεπιφάνεια και εξαρτάται από το πάχος του πεδίου αντίδρασης.

**Πολυμορφική κρυστάλλωση:** περιλαμβάνει το σχηματισμό μιας κρυσταλλικής φάσης από την όμορφη μήτρα χωρίς καμία αλλαγή στη συγκέντρωση. Η παραγόμενη φάση κρυστάλλωσης είναι υπέρκορο κρυσταλλικό κράμα μετασταθούς ή σταθερής κρυσταλλικής φάσης που αργότερα μπορεί να μετασχηματιστεί με επακόλουθες αντιδράσεις σε πιο σταθερές φάσεις. Η αντίδραση αυτή λαμβάνει χώρα σε συγκεντρώσεις κοντά στη συγκέντρωση καθαρού μετάλλου, ή ένωσης. Η πολυμορφική κρυστάλλωση είναι μαζική με μεγάλους γραμμικούς ρυθμούς μεγέθυνσης. Ο μηχανισμός είναι ενδιάμεσος, μεταξύ αντιδράσεων ισορροπίας και μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, δηλαδή περιλαμβάνει τοπική αναδιάταξη ατόμων ή ομάδων ατόμων στο χώρο.

**Περιτηκτοειδής κρυστάλλωση:** μια σταθερή φάση  $\beta$  μεγαλώνει σ' αυτήν την αντίδραση στη διεπιφάνεια της μετασταθούς φάσης  $\gamma$  η οποία υπάρχει στην άμορφη φάση  $\alpha$ . Η μικροδομή που προκύπτει είναι σωματίδια της φάσης  $\gamma$  που περικλείονται από ένα στρώμα της φάσης  $\beta$  και είναι εγκιβωτισμένα στην φάση  $\alpha$ . Οι ρυθμοί μεγέθυνσης είναι παραβολικοί και μειώνονται με αύξηση του πάχους του στρώματος της φάσης  $\beta$  ενώ το στάδιο που ελέγχει τη διεργασία είναι η διάχυση διαμέσου του στρώματος αυτού.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν παρήχθησαν με τη μέθοδο χύτευσης επίπεδης ροής (Planar Flow Casting, PFC), που είναι η βέλτιστη μέθοδος ταχείας ψύξης λεπτών ταινιών πάχους 25 $\mu\text{m}$  (Σχήμα 2.31). Η χύτευση αυτή είναι η στερεοποίηση τήγματος από έναν περιστρεφόμενο χάλκινο τροχό που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου και διαθέτει υψηλή θερμική αγωγιμότητα για την επίτευξη επαρκούς ρυθμού εξαγωγής θερμότητας. Το λιωμένο κράμα εξωθείται μέσω ενός στομίου με τη βοήθεια πίεσης αδρανούς αερίου. Το τήγμα παρασύρεται από τον περιστρεφόμενο χάλκινο τροχό και εκεί στερεοποιείται για να σχηματίσει μια λεπτή ταινία. Η θερμοκρασία χύτευσης είναι 150-200K πάνω από τη θερμοκρασία τήξης. Το τυπικό πάχος της λαμβανόμενης άμορφης μεταλλικής ταινίας είναι από 20  $\mu\text{m}$  έως 30  $\mu\text{m}$  και το πλάτος 6 mm-10 mm. Η ρύθμιση της πίεσης χύτευσης στην

περιστρεφόμενη κυλίνδρου γίνεται με τη μεταβολή της πίεσης του αδρανούς αερίου (Ar). Ο πίδακας ακτίνας  $\alpha$  είναι υπό κλίση γωνίας  $\theta$  ως προς το εφαπτόμενο επίπεδο της επιφάνειας ψύξης εξαπλώνεται σε μια επιφάνεια πλάτους  $w$ . Ο στρεφόμενος χαλκός κινείται με ταχύτητα 100 km/h, δημιουργώντας μια κορδέλα πάχους 20  $\mu\text{m}$ -25  $\mu\text{m}$ , το πλάτος της οποίας είναι το ίδιο με το πλάτος  $w$ . Η διατήρηση των παραμέτρων που περιγράφηκαν επιτρέπουν την παραγωγή ταινίας. Αντίθετα, η μη τήρηση αυτών των παραμέτρων οδηγεί σε αποτυχία παραγωγής ταινίας και υποβιβάζεται στην παραγωγή φλούδας κράματος, συνήθως πολυκρυσταλλικής μικροδομής. Μια παρόμοια τεχνική είναι η μέθοδος chill block casting, που περιγράφει μια διαδικασία κατά την οποία ένας ελεύθερος πίδακας λιωμένου κράματος προσπίπτει σε ένα κινούμενο ψυχρό υπόστρωμα, όπως ένα περιστρεφόμενο τύμπανο χαλκού ή περιστρεφόμενος σωλήνας νερού, που παράγει άμορφες ταινίες και σύρματα αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.31. Σχηματική απεικόνιση της χύτευσης επίπεδης ροής άμορφης μεταλλικής ταινίας [183].**

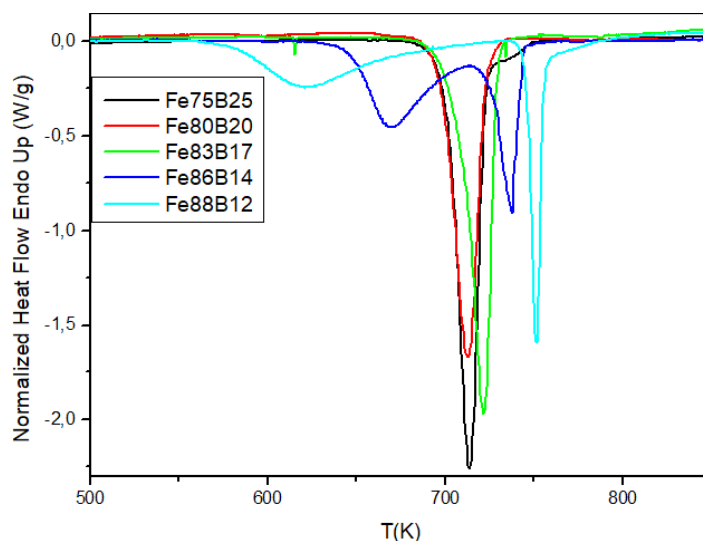
Ο G Herzer βρήκε ότι η εξάρτηση του συνεκτικού πεδίου από την διάμετρο των κόκκων του ναοκρυσταλλικού υλικού εξαρτάται από την έκτη δύναμη του  $D$  [192]. Η επίδραση της μείωσης της συνολικής μαγνητικής ανισοτροπίας στην μαγνητική αποσκλήρυνση είναι πιο έντονη σε άμορφα υλικά, εφόσον η απουσία τάξης μέσης ή μακράς κλίμακας έχει σαν αποτέλεσμα την ευρύτερη κατανομή των τοπικών αξόνων ανισοτροπίας. Στην περίπτωση των ναοκρυσταλλικών υλικών με μεγέθη κόκκων κάτω από το σιδηρομαγνητικό μήκος ανταλλαγής, οι σχετικά πιο τοπικά συγκεντρωμένοι άξονες ανισοτροπίας και στατιστικά μεγαλύτερες αποκλίσεις από τον μέσο όρο της συνολικής ανισοτροπίας έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλότερη ανισοτροπία από αυτή των αντίστοιχων άμορφων κραμάτων. Κατά συνέπεια, η συνολική ανισοτροπία είναι συνάρτηση του μεγέθους και του όγκου της ναοκρυσταλλικής φάσης. Επιπλέον, στα ναοκρυσταλλικά υλικά του προέρχονται από μερική κρυστάλλωση των άμορφων προδρόμων κραμάτων, η μέση απόσταση μεταξύ ναοκρυστάλλων είναι εξαιρετικής σημασίας, καθώς οι κόκκοι είναι μερικώς συζευγμένοι με τη φτωχή σε σιδηρομαγνητικά στοιχεία άμορφη φάση. Ταυτόχρονα όμως με την ελαφρά μαγνητική σκλήρυνση (αύξηση του συνεκτικού πεδίου  $H_c$ ), η μερική κρυστάλλωση του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της μέσης μαγνητικής διαπερατότητας σε σχέση με τους αντίστοιχους σύστασης άμορφους προδρόμους. Επομένως, με κατάλληλη επιλογή της κραματικής σύστασης και της τελικής μικροδομής είναι δυνατή η βελτιστοποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των ναοκρυσταλλικών υλικών.

Για να προσδιορισθούν οι θερμοκρασίες νανοκρυστάλλωσης και κρυστάλλωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις DSC, οι οποίες έγιναν με ρυθμό 10 K/min και πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δείγματα. Στον Πίνακα 2.2 δίνονται οι θερμοκρασίες κρυστάλλωσης νανοκρυστάλλωσης και κρυστάλλωσης και στο Σχήμα 2.32 αποτυπώνεται η απόκριση DSC σε κάθε μια από τις συνθέσεις που αναπτύχθηκαν.

Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν με θερμο-μαγνητο-βαρυτική ανάλυση, η οποία είναι συμπληρωματική μέθοδος της DSC-DTA και βασίζεται στην δύναμη έλξης του προς εξέταση μαγνητικού υλικού από έναν μόνιμο μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, έτσι μπορεί να προσδιορισθεί το σημείο Curie (το σημείο μετάβασης από την φερρομαγνητική στην παραμαγνητική φάση) του εξεταζόμενου υλικού, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η θέρμανση γίνεται με ελεγχόμενο ρυθμό και η θερμοκρασία αλλάζει γραμμικά με το χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η συγκριτική αλλαγή της δύναμης έλξης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

**Πίνακας 2.2. Θερμοκρασίες νανοκρυστάλλωσης  $T_x$  και τα μέγιστα θερμοκρασιών κρυστάλλωσης**

Σύνθεση	$T_x$ (K)	$T_{p1}$ (K)	$T_{p2}$ (K)
Fe <sub>75</sub> B <sub>25</sub>	689	713	-
Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	688	712	-
Fe <sub>83</sub> B <sub>17</sub>	685	721	-
Fe <sub>86</sub> B <sub>14</sub>	643	669	742
Fe <sub>88</sub> B <sub>12</sub>	577	618	751



**Σχήμα 2.32. Μετρήσεις DSC για όλα τα δείγματα με γραμμική θέρμανση και ρυθμό 10 K/min.**

Η μέτρηση γίνεται με την χρήση ζυγού ακριβείας, κάτω από τον οποίο τοποθετείται ένας μόνιμος μαγνήτης. Το δείγμα θερμαίνεται γραμμικά και η φαινόμενη μάζα, που μετρά ο ζυγός είναι το άθροισμα της πραγματικής μάζας του δείγματος και της μαγνητικής δύναμης, που ασκείται στο δείγμα.

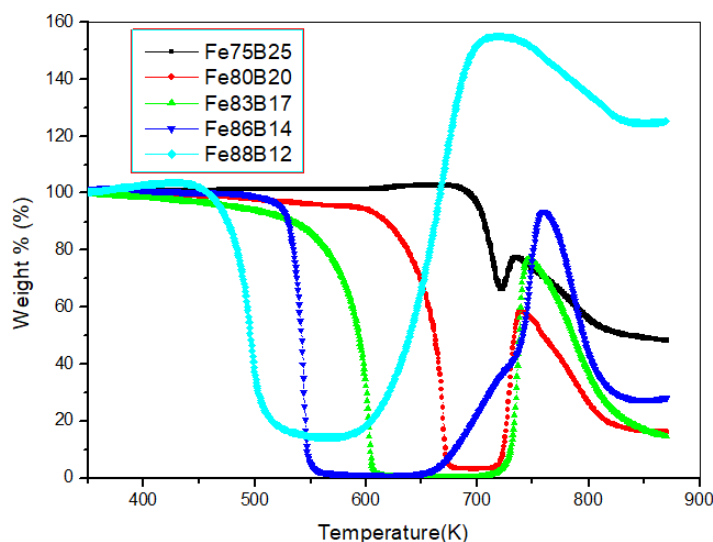


Η χρήση ηλεκτρομαγνήτη για την μαγνήτιση του δοκιμίου επιτρέπει την διακοπή της μαγνητικής έλξης, έτσι ώστε να επιβεβαιώνεται το πραγματικό βάρος σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η διάταξη αυτή αναπτύχθηκε στο εργαστήριο με βάση τον θερμοβαρυμετρικό αναλυτή TGS7 της Perkin Elmer. Η ακρίβεια ζύγισης ήταν 0,1 μg και η ακρίβεια θερμοκρασίας είναι ~1 K. Ο κλίβανος είναι τοποθετημένος κάτω και κατακόρυφα στη θέση του δείγματος.

Ο μηχανισμός ισορροπίας γίνεται με την προσθήκη ενός μη μαγνητικού διαφράγματος ακριβώς πάνω από τον κλίβανο. Ο κλίβανος καλύπτεται με λεπτή στρώση πλατίνας για να διατηρείται η θερμοκρασία γύρω από το φούρνο και να αποφεύγεται η υπερθέρμανση της λεπτής ωμικής στρώσης πλατίνας. Η θερμοκρασία του δείγματος ανιχνεύεται από ένα θερμοστοιχείο chromel-alumel που βρίσκεται περίπου 1 mm κάτω από το δείγμα πλατίνας.

Το όριο λειτουργίας του κλιβάνου είναι 1100 K, που είναι αρκετά πάνω από τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις του πειράματος. Ο ρυθμός θέρμανσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 10 K/min. Η ανάγνωση του βάρους μηδενίσθηκε (taring) πριν εφαρμοστεί το μαγνητικό πεδίο για να ληφθεί μόνο η μαγνητική έλξη ως μετρούμενη τιμή. Η δύναμη της μαγνητικής έλξης ήταν ~2,5 mg για κάθε δείγμα.

Στο Σχήμα 2.33 δίνεται η θερμο-μαγνητο-βαρυτική μέτρηση συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπου οι μετρήσεις βάρους είναι κανονικοποιημένες με βάση το αρχικό taring. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίσθηκε η θερμοκρασία Curie της άμορφης, της ναοκρυσταλλικής και κρυσταλλικής φάσης του κάθε δείγματος, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3. Η θερμοκρασίες Curie των μεταλλικών γυαλιών είναι στην περιοχή από 500 K έως 800 K και είναι σχετικά χαμηλές σε σύγκριση με τα κρυσταλλικά αντίστοιχά τους. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του σιδήρου οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας Curie.



**Σχήμα 2.33. Θερμο-μαγνητο-βαρυτικές μετρήσεις για κάθε δείγμα.**

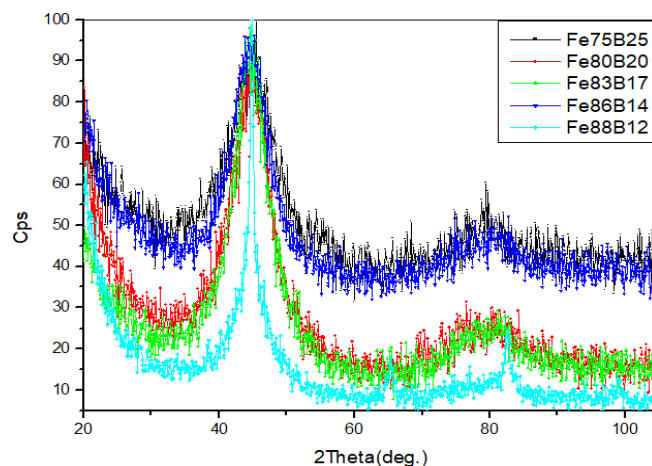
**Πίνακας 2.3. Θερμοκρασία Curie για κάθε σύνθεση.**

Σύνθεση	Fe <sub>75</sub> B <sub>25</sub>	Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	Fe <sub>83</sub> B <sub>17</sub>	Fe <sub>86</sub> B <sub>14</sub>	Fe <sub>88</sub> B <sub>12</sub>
T <sub>c</sub> (K)	709	670	605	553	497

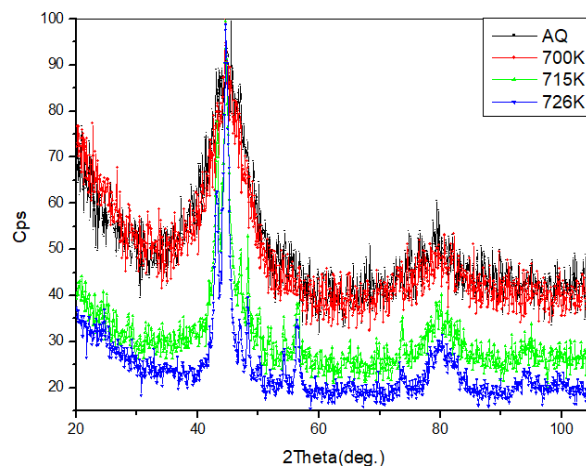
Με βάση αυτές τις μετρήσεις που είναι σε σχετική αρμονία (οι μετρήσεις DSC/DTA θεωρούνται μετρήσεις αναφοράς) έγινε δυνατή η επιλογή της θερμοκρασίας για την θερμική κατεργασία των

υλικών με στόχο την νανοκρυσταλλοποίησή τους. Διακρίνεται η καλύτερη ευαισθησία του θερμομαγνητικού ζυγού που αναπτύχθηκε με κόστος της τάξης των 3,000€, όπου διακρίνονται ευκρινώς οι περιοχές νανοκρυστάλλωσης και κρυστάλλωσης, κάτι που δεν είναι καθαρό στις αποκρίσεις του DSC/DTA, όργανου με κόστος της τάξης των 30,000€. Στην συνέχεια, μετά την θερμική κατεργασία των δειγμάτων που υπέδειξαν οι μετρήσεις DSC/DTA και θερμομαγνητοβαρυτικές μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις XRD και TEM στα δείγματα που ήταν σε άμορφη κατάσταση (as-cast) και μετά από θερμική κατεργασία (annealing). Οι θερμοκρασίες που επελέγησαν ήταν οι εκάστοτε μεγαλύτερες σε κάθε περιοχή θερμοκρασιών (συγκριτικά μεταξύ της DSC/DTA και της θερμομαγνητοβαρυτικής μεθόδου).

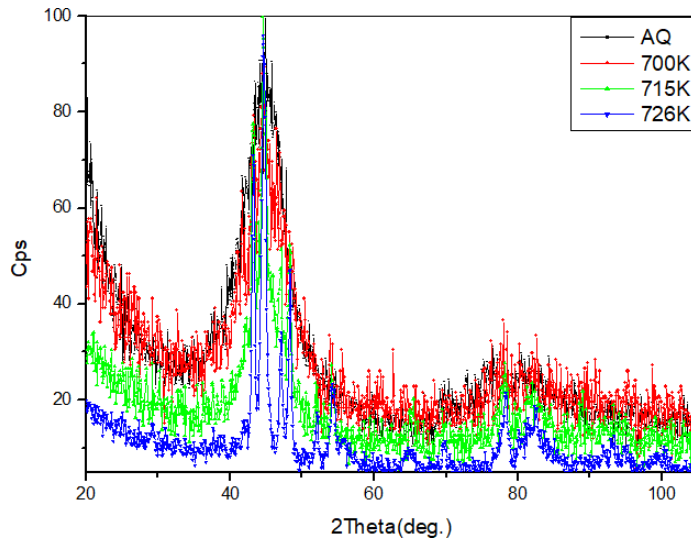
Στο Σχήμα 2.34 δίνεται η απόκριση της περίθλασης ακτίνων X στις χυτευμένες ταινίες. Παρατηρείται η χαρακτηριστική απόκριση άμορφης κατάστασης γύρω από την κορυφή του  $\alpha$ -Fe ( $2\theta$  μεταξύ  $40^\circ$ - $50^\circ$ ). Επίσης παρατηρείται η δεύτερη κορυφή ( $2\theta$  μεταξύ  $70^\circ$ - $90^\circ$ ) γύρω από την φάση  $Fe_2B$ . Επιβεβαιώνεται πως όλες οι συνθέσεις βρίσκονται σε άμορφη κατάσταση εκτός από τη σύνθεση  $Fe_{88}B_{12}$ . Στη συγκεκριμένη σύνθεση υπάρχουν μικρές κορυφές που δηλώνουν την παρουσία νανοκρυσταλλικότητας. Στα Σχήματα 2.35, 2.36, 2.37, 2.38 και 2.39 δίνεται η περίθλαση ακτίνων X πριν και μετά την ανόπτηση σε διαφορετικές θερμοκρασίες (οι τιμές της θερμοκρασίας ανόπτησης δίνονται σε Κ) για τα δείγματα  $Fe_{75}B_{25}$ ,  $Fe_{80}B_{20}$ ,  $Fe_{83}B_{17}$ ,  $Fe_{86}B_{14}$  και  $Fe_{88}B_{12}$ , αντίστοιχα. Είναι ευδιάκριτη η δημιουργία μικρών κρυσταλλικών κορυφών με απλωμένο εύρος απόκρισης γύρω από το μέγιστο των κορυφών της φάσης του  $\alpha$ -Fe και του  $Fe_2B$ .



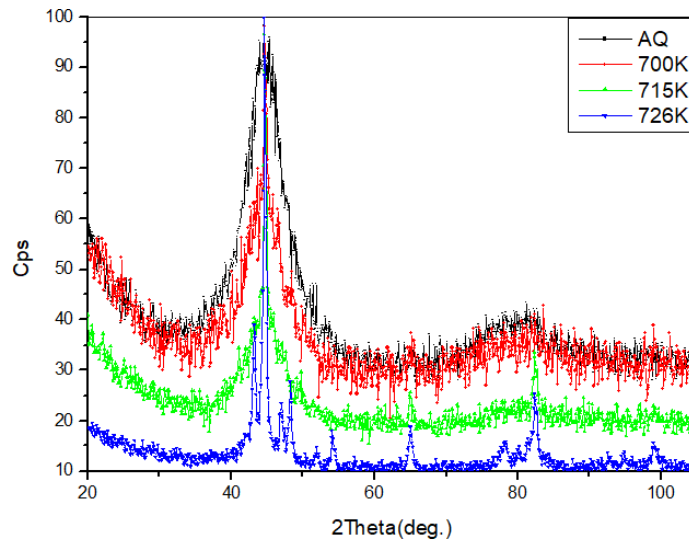
Σχήμα 2.34. Περίθλαση ακτίνων X για όλα τα δείγματα.



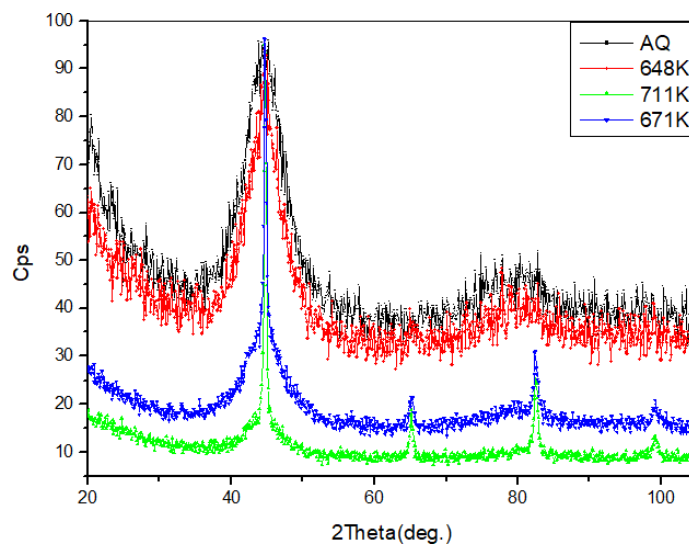
Σχήμα 2.35. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση  $Fe_{75}B_{25}$  πριν και μετά την ανόπτηση.



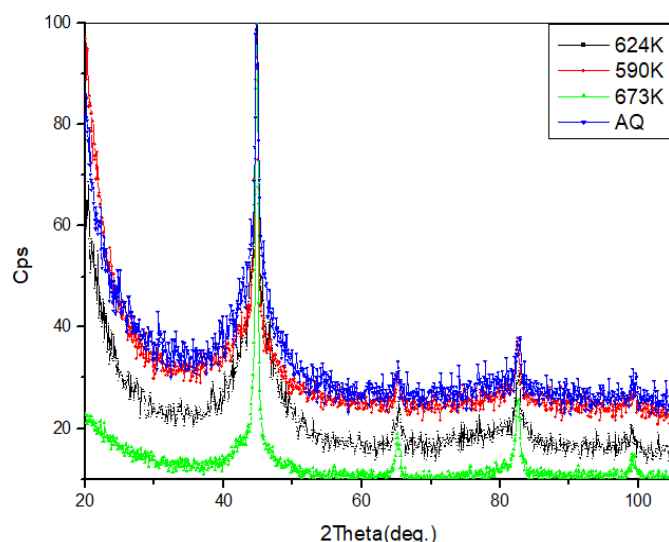
Σχήμα 2.36. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.



Σχήμα 2.37. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

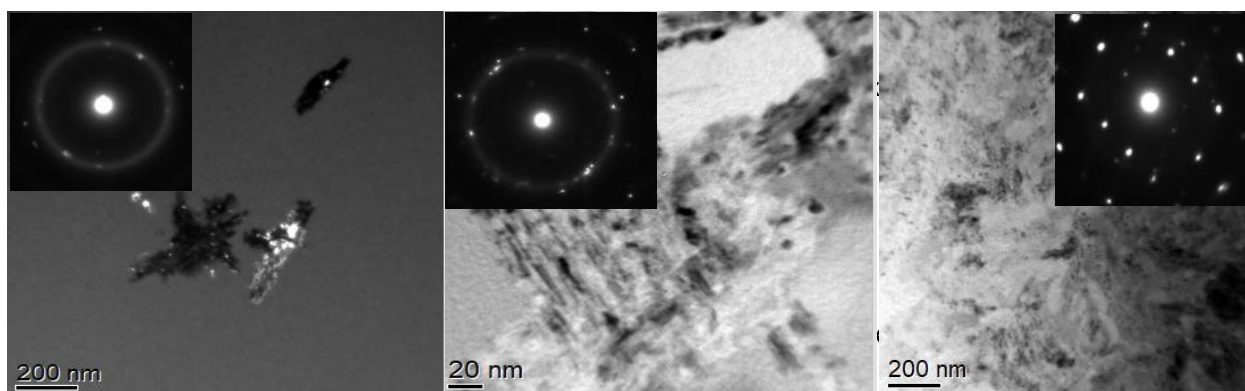


Σχήμα 2.38. Περίθλαση ακτίνων X για τη σύνθεση Fe<sub>86</sub>B<sub>14</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.



**Σχήμα 2.39.** Περιθλάση ακτίνων Χ για τη σύνθεση Fe<sub>88</sub>B<sub>12</sub> πριν και μετά την ανόπτηση.

Στην συνέχεια τα δείγματα χαρακτηρίστηκαν με την ηλεκτρονική μικροσκοπία διερχόμενης δέσμης. Στο Σχήμα 2.40 δίνεται εικόνα TEM του κράματος Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> για ποσοστά κρυσταλλικότητας 5 %, 50 % και 95 %. Στην κρυστάλλωση 5 % παρατηρούνται κρυσταλλίτες Fe<sub>3</sub>B που περικλείονται από άμορφη μήτρα. Στην κρυστάλλωση 50 % (715 K) αυξάνεται το πλήθος και το μέγεθος των κρυσταλλιτών. Σε κατεργασία στους 726 K παρατηρείται σχεδόν ολική κρυστάλλωση (95 %). Σε τέτοια μεγάλα ποσοστά κρυσταλλικότητας οι φάσεις είναι πιο σταθερές. Αυτό αναδεικνύεται και από τις περιθλάσεις των ηλεκτρονίων (ένθετα). Στην κρυστάλλωση 5 % κυριαρχεί το χαρακτηριστικό άμορφο δαχτυλίδι, το οποίο αδυνατίζει σε όφελος της κρυσταλλικής φάσης στην κρυστάλλωση 50 % και εξαφανίζεται στην κρυστάλλωση 95 %.



**Σχήμα 2.40.** Εικόνες TEM για το δείγμα Fe<sub>75</sub>B<sub>25</sub> για ποσοστό κρυσταλλικότητας 5% (αριστερά), 50% (κέντρο) και 95% (δεξιά).

Στο Σχήμα 2.41 δείχνεται η διαδικασία κρυστάλλωσης στο δείγμα Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub>, όπου επιβεβαιώνεται η άμορφη κατάσταση του δείγματος (αριστερά) καθώς δεν υπάρχουν κόκκοι, ενώ στην κρυστάλλωσή της εμφανίζει ευτηκτοειδή κρυστάλλωση με α-Fe και Fe<sub>3</sub>B, οι οποίες μάλιστα έχουν σχήμα σφαιρουλίτη.

Στο Σχήμα 2.42 δίνονται οι εικόνες TEM στο δείγμα Fe<sub>83</sub>B<sub>17</sub>, όπου παρατηρείται ευτηκτοειδής κρυστάλλωση και δενδριτική ανάπτυξη της φάσης α-Fe με τετραγωνικές φάσεις Fe<sub>3</sub>B. Οι κόκκοι α-Fe σε ποσοστό κρυσταλλικότητας 5 % είναι περίπου 60-80 nm ενώ σε ποσοστό κρυσταλλικότητας 95 % είναι περίπου 100-150 nm. Σε θερμοκρασία 700 K (5% κρυσταλλικότητα) υπάρχουν λίγοι νανοκόκκοι,

που περικλείονται από την άμορφη μήτρα ενώ σε θερμοκρασία 726 K (95% κρυσταλλικότητα) τα κλάσματα όγκων των φάσεων  $\alpha$ -Fe και  $\text{Fe}_3\text{B}$  αυξηθεί σημαντικά καλύπτοντας πάνω από το 80 % του όγκου του δείγματος.

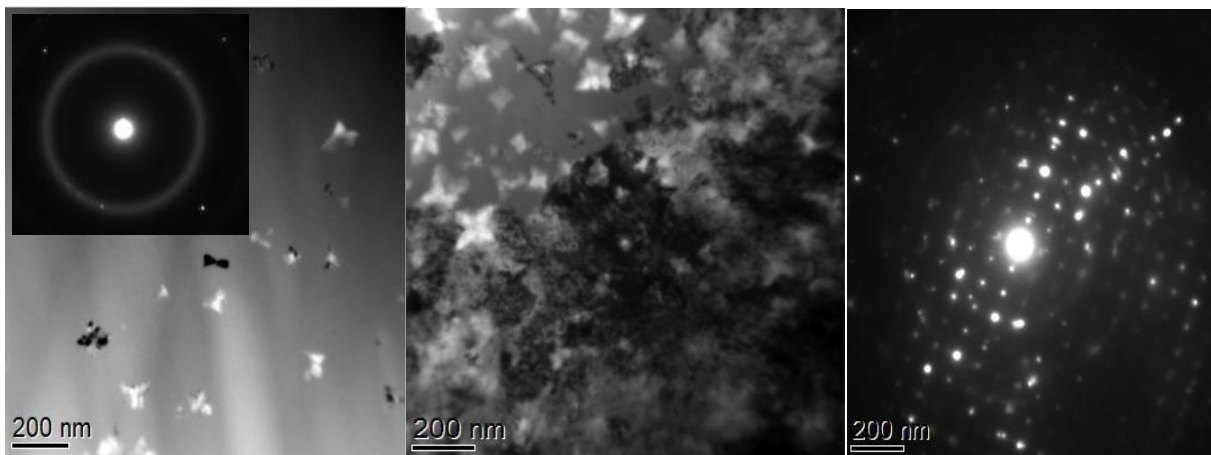
Στο Σχήμα 2.43 δίνονται οι εικόνες TEM στο δείγμα  $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ , όπου παρατηρείται πρωτογενής κρυστάλλωση 5 % από τους 648 K (αριστερά), ενώ η πρωτογενής κρυστάλλωση συνεχίζεται και στους 681 K.

Στο Σχήμα 2.44 δίνονται οι εικόνες TEM για το δείγμα  $\text{Fe}_{88}\text{B}_{12}$ , το οποίο χυτεύθηκε σαν ταινία για πρώτη φορά και στο οποίο παρατηρούνται νανοκρυσταλλοί από το χυτευμένο υλικό πριν την θερμική του κατεργασία (αριστερά).

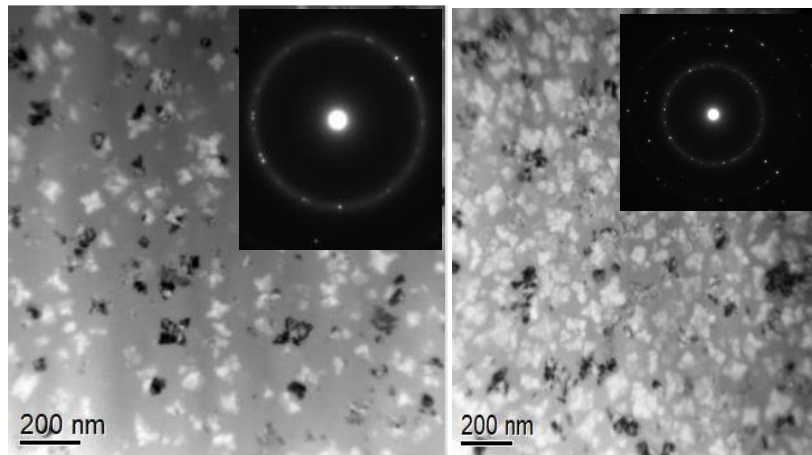
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται σφαιρικοί κόκκοι φάσης  $\alpha$ -Fe και  $\text{Fe}_2\text{B}$ , οι οποίοι περικλείονται στην άμορφη μήτρα. Σε υψηλότερα ποσοστά κρυσταλλικότητας το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται και κυριαρχεί η φάση  $\alpha$ -Fe. Μάλιστα σε ποσοστό 95 % κρυσταλλικότητας το δείγμα είναι κορεσμένο, καθώς οι κόκκοι καλύπτουν περίπου το 85-90 % του όγκου του δείγματος. Ομοίως με τη σύνθεση  $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$  οι περισσότεροι κόκκοι είναι φάση  $\alpha$ -Fe, ενώ υπάρχουν πολύ λίγοι φάσης  $\text{Fe}_2\text{B}$ .



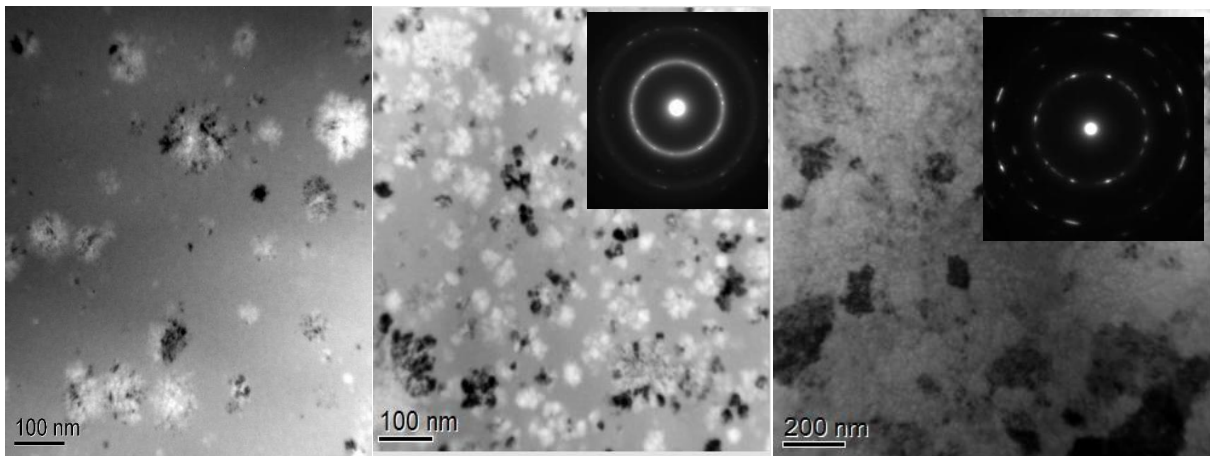
**Σχήμα 2.41.** Εικόνες TEM για το δείγμα  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ , όπου φαίνεται η άμορφη κατάσταση στο δείγμα όπως παρήχθη (αριστερά), η κρυσταλλική απόκριση περίθλαση ηλεκτρονίων - SAED (κέντρο) και η νανοκρυστάλλωση (δεξιά).



**Σχήμα 2.42.** Διαδικασία κρυστάλλωσης του δείγματος της ευτηκτοειδούς φάσης  $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ , όπου παρατηρείται νανοκρυστάλλωση 5 % στους 700 K (αριστερά), σχεδόν ολική κρυστάλλωση στους 726 K (κέντρο), η οποία επιβεβαιώνεται από περίθλαση ηλεκτρονίων (δεξιά).



Σχήμα 2.43. Εικόνες TEM από το δείγμα  $Fe_{86}B_{14}$ , με πρωτογενή κρυστάλλωση 5 % στους 648 K (αριστερά), η οποία συνεχίζεται και στους 681 K.

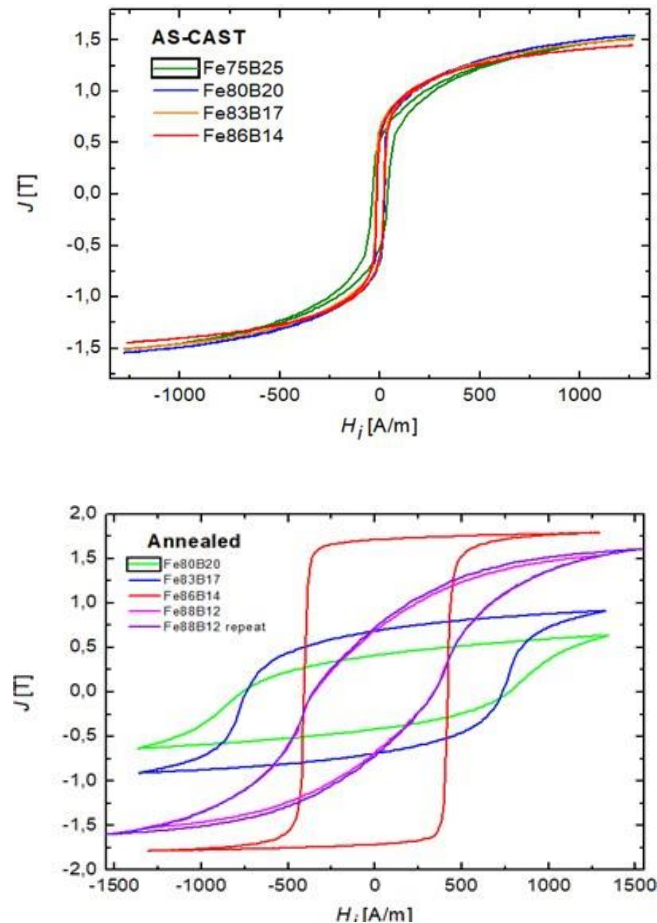


Σχήμα 2.44. Εικόνες TEM για το δείγμα  $Fe_{88}B_{12}$ , στο οποίο παρατηρούνται νανοκρύσταλλοι ακόμη και στο χυτευμένο υλικό (αριστερά), οι οποίοι ενισχύονται σε κρυσταλλικότητα 50 % στους 590 K (κέντρο) και ολοκληρώνονται με 100 % κρυστάλλωση στους 671 K.

Από τον χαρακτηρισμό δομής (XRD) και μικροδομής (TEM) παρατηρήθηκε ότι:

- Στη σύνθεση  $Fe_{75}B_{25}$  και  $Fe_{80}B_{20}$  παρατηρείται ευτηκτοειδής κρυστάλλωση και έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται  $\alpha$ -Fe φάσεις και τετραγωνικές φάσεις  $Fe_3B$ . Στο 95 % κρυσταλλικότητας εμφανίζεται ένα μικρό κλάσμα όγκου φάσης  $Fe_2B$ , όπου αυτό γίνεται καθώς σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες το σύστημα μετασχηματίζεται σε σταθερές φάσεις. Το δείγμα βρίσκεται στη λεγόμενη μετασταθή ισορροπία.
- Η συγκέντρωση 17 % σε βόριο αποτελεί το ευτηκτικό σημείο στο διάγραμμα φάσεων και επομένως είναι και το όριο υποευτηκτοειδών και υπereυτηκτοειδών κραμάτων. Στη συγκεκριμένη σύνθεση παρατηρείται ευτηκτοειδής κρυστάλλωση όπως και με τις συνθέσεις  $Fe_{75}B_{25}$  και  $Fe_{80}B_{20}$ . Οι φάσεις που παρατηρούνται είναι  $\alpha$ -Fe και  $Fe_3B$  φάσεις και το δείγμα βρίσκεται σε μετασταθή ισορροπία.
- Στις συνθέσεις  $Fe_{75}B_{14}$  και  $Fe_{80}B_{12}$  παρατηρείται πρωτογενής κρυστάλλωση. Η κρυστάλλωση μπορεί να συνοψιστεί από τις ακόλουθες αντιδράσεις στερεάς κατάστασης: *amorphous phase*  $\rightarrow Fe_3B + \alpha\text{-Fe} \rightarrow Fe_3B \rightarrow Fe_2B + \alpha\text{-Fe} \rightarrow Fe_2B \rightarrow \alpha Fe$ .

Τέλος, προσδιορίστηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες με μετρήσεις των βρόχων υστέρησης στα δείγματα. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με την μέθοδος του single sheet tester. Στο Σχήμα 2.45 (πάνω) δίνεται ο βρόχος υστέρησης των δειγμάτων όπως χυτεύθηκαν, ενώ στο Σχήμα 2.45 (κάτω) δίνονται οι βρόχοι μετά από την θερμική κατεργασία. Οι μαγνητικές μετρήσεις μετά την θερμική κατεργασία δεν είναι ιδανικές καθώς παρατηρείται αύξηση του συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , γεγονός που αποδίδεται στην ισχυρή παρουσία της φάσης  $Fe_2B$ . Σε κάθε περίπτωση, οι ταινίες  $Fe_{88}B_{12}$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και από την χύτευσή τους, μιας και έχουν μεγάλη μαγνήτιση κόρου και ελεγχόμενα μικρό συνεκτικό πεδίο. Είναι σαφές ότι αυτές οι άμορφες ταινίες θέλουν περαιτέρω βελτίωση. Για τον λόγο αυτό, στα πειράματα και τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν εμπορικές ταινίες νανοκρυσταλλικού FINAMET.



Σχήμα 2.45. Βρόχοι υστέρησης των δειγμάτων όπως χυτεύθηκαν (πάνω) και μετά την θερμική κατεργασία (κάτω).

## Κεφάλαιο 3. Θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων

### 3.1. Θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου

Η προστασία από τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται γύρω από τις καλωδιώσεις μεταφοράς υψηλών ρευμάτων και τάσεων, είναι ένα ζήτημα μεγάλης σημασίας, που αφορά και στην θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων.

Η μελέτη ξεκίνησε με την ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε ηλεκτρικά οχήματα. Παρουσιάστηκαν τεχνικές, που περιλαμβάνουν γεωμετρία σωληνοειδούς αγωγού με βάση την αναλυτική λύση της εξίσωσης διάχυσης σε συνδυασμό με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), για την ανάλυση της αποτελεσματικότητας της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης σε καλώδια ισχύος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του στατικού μετατροπέα ισχύος. Με κατάλληλες προσομοιώσεις υπολογίστηκαν τα επίπεδα έκθεσης των ανθρώπινων μοντέλων σε μαγνητικά πεδία μεταβλητής συχνότητας. Τα μοντέλα αυτά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον καμπίνας ηλεκτρικού οχήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τα πειραματικά και τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, ξεκίνησε η μελέτη των Η/Μ πεδίων και η αντίστοιχη θωράκιση έναντι ρευμάτων (μαγνητικών πεδίων) και τάσεων (ηλεκτρικών πεδίων) σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι η μεθοδολογία προσομοίωσης και μέτρησης των εν λόγω πεδίων είναι παρόμοια με αυτή των ηλεκτρικών οχημάτων.

Εντός του ηλεκτρικού οχήματος, αυτά τα πεδία μπορεί να λάβουν τιμές μεγαλύτερες από τα θεσμοθετημένα όρια για ανθρώπους και συσκευές (βλέπε Κεφ. 1). Έτσι, μελετήθηκε η χρήση μαγνητικών φύλλων υψηλής διαπερατότητας για σκοπούς θωράκισης, μαζί με την ανάλυση με τη ΜΠΣ για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της παθητικής θωράκισης έναντι υψηλών ρευμάτων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με εργαστηριακές μετρήσεις προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επάρκεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της ΜΠΣ και των πειραματικών αποτελεσμάτων επιβεβαίωσε την αξία χρήσης της μεθόδου για το σχεδιασμό των μέσων θωράκισης έναντι εναέριων ή υπόγειων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που έχει άμεση συσχέτιση και εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα.

Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς και η κατασκευή-χρήση θωρακισμένων καλωδίων βοηθά στην αντίληψη και στην αντιμετώπιση των συνθηκών της ασύρματης φόρτισης, η οποία προσομοιάζει αρκετά στην θωράκιση έναντι μαγνητικών πεδίων από εναέριες γραμμές μεταφοράς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά τα καλώδια περιέχουν μια μεταλλική θωράκιση από χαλκό ή αλουμίνιο, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία δινορευμάτων, καθώς επίσης και μαγνητικές ταινίες ή μεμβράνες ή σύρματα για την παγίδευση του μαγνητικού πεδίου, μαζί με τα αντιδιαβρωτικά πολυμερή υποστρώματα. Τα μαγνητικά πεδία των δινορευμάτων της μεταλλικής θωράκισης αντιτίθενται στο μαγνητικό πεδίο του ρεύματος της γραμμής μεταφοράς, ενώ τα μαγνητικά υλικά παγιδεύουν αυτό το μαγνητικό πεδίο. Κατά την άποψή μας, η θωράκιση διαμέσου παγίδευσης του μαγνητικού πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας 50 Hz της γραμμής μεταφοράς από μαγνητικό υλικό, υπερτερεί συγκριτικά με αυτή που βασίζεται σε δινορεύματα αγωγίμων υλικών, με την προϋπόθεση ότι το μαγνητικό υλικό έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, είναι προσιτό οικονομικά και είναι τοποθετημένο πάνω από μια κρίσιμη απόσταση από την πηγή του πεδίου.



Μια λύση στην παθητική θωράκιση για βιομηχανικά και ερευνητικά περιβάλλοντα αποτελούν οι ανηχοϊκοί θάλαμοι, εξοπλισμένοι με μεταλλικές μεμβράνες (συνήθως από αλουμίνιο) για τη δημιουργία δινορευμάτων, τα οποία με τα δικά τους μαγνητικά πεδία εξουδετερώνουν τα μαγνητικά πεδία υψηλότερων συχνοτήτων, καθώς και με μαγνητικές μεταλλικές μεμβράνες (συνήθως από Ni<sub>3</sub>Fe – permalloy) για την παγίδευση μαγνητικού πεδίου. Οι θάλαμοι αυτοί παρά το αυξημένο κόστος προσφέρουν ικανοποιητική θωράκιση. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι λύσεις που χρησιμοποιούνται είναι ενεργητικές, δηλαδή δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο αντίθετο από αυτό που μετρείται εντός του ανηχοϊκού θαλάμου, με στόχο να το εξουδετερώσει. Αυτές οι τεχνικές, αποτέλεσαν παράδειγμα για την θωράκιση έναντι καλωδιώσεων λειτουργίας ή φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην περίπτωση μας, προτιμήθηκε η παθητική θωράκιση, ήτοι η χρήση διαφόρων τύπων χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (LCS), κραμάτων permalloy και άμορφων νανοκρυσταλλικών κραμάτων, που προσφέρουν μια βιώσιμη λύση λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους και των υψηλών τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας και θωράκισης που μπορούν να προσφέρουν. Σε αρκετές περιπτώσεις, προτιμάται και η λύση του συνδυασμού μεταλλικού και μαγνητικού υλικού για την θωράκιση με δινορεύματα και απορρόφηση πεδίου.

Ένα επιπλέον κίνητρο αποτέλεσε η δημιουργία ενός αλγορίθμου, που επιτρέπει τον σωστό σχεδιασμό παθητικής θωράκισης με βάση την ανάλυση με τη ΜΠΣ, μαζί με την αντίστοιχη πειραματική επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθοδολογίας. Η σύγκριση και η καλή συμφωνία μεταξύ των συγκεκριμένων εργαλείων της ΜΠΣ και των πειραματικών αποτελεσμάτων, επιτρέπουν την αξιόπιστη χρήση της, που επιλέχθηκε μετά τον σωστό προσδιορισμό των αβεβαιοτήτων κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Ως εκ τούτου, η ΜΠΣ μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σχεδιασμού για τα μέσα θωράκισης ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς επίσης και των εναέριων ή υπόγειων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μελέτη αφορά σε ηλεκτρικό χάλυβα, δεδομένου ότι η μαγνητική διαπερατότητα και ανιστροπία του είναι παρόμοια με αυτή του χάλυβα μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα (Low Carbon Steel – LCS), που έχει υποστεί θερμική και θερμο-μαγνητική κατεργασία. Κατά συνέπεια, όπου αναφέρεται ηλεκτρικός χάλυβας, θα εννοείται και LCS μετά από θερμική και θερμο-μαγνητική κατεργασία.

### **3.1.1. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων**

Το περιβάλλον εργασίας που επιλέχθηκε είναι το ANSYS Maxwell 2D and 3D, Release 17.1 Academic. Το ANSYS Maxwell είναι ένα διαδραστικό λογισμικό υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιεί την ανάλυση με τη ΜΠΣ για την ερμηνεία των φαινομένων, που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία. Αυτό το λογισμικό επιλύει προβλήματα H/M πεδίου μιας διάταξης υλικών παίρνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες και τις συνθήκες τροφοδοσίας και επιλύοντας τις εξισώσεις Maxwell σε μια οριοθετημένη περιοχή. Για το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης δινορευμάτων μαγνητικού πεδίου (The Magnetic Field Eddy Current solver), ο οποίος υπολογίζει την κατανομή του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, το οποίο εμφανίζεται σε μια καθορισμένη περιοχή λόγω της κατανομής του εναλλασσόμενου ρεύματος. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ρεύματος λαμβάνεται υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το φαινόμενο εγγύτητας (proximity effect). Ο επιλύτης αυτός υπολογίζει τα μαγνητικά πεδία για μια καθορισμένη ημιτονοειδή συχνότητα. Προκειμένου να ληφθεί το σύνολο των προς επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων, η γεωμετρία της περιοχής υπό προσομοίωση διακριτοποιείται σε μικρά στοιχεία (π.χ. τρίγωνα στην περίπτωση του δισδιάστατου, 2D, μοντέλου). Για όλα τα στερεά σώματα του μοντέλου εφαρμόζεται αυτόματα το κατάλληλο πλέγμα, καθώς το ANSYS Maxwell επιλέγει τη βέλτιστη μορφή του πλέγματος

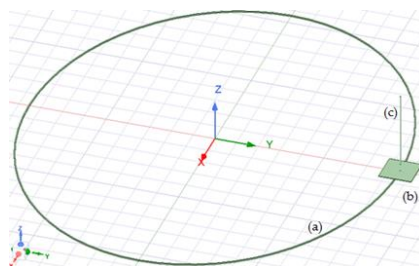
προσαρμόζοντάς το στις απαιτήσεις του προβλήματος. Το πεδίο στόχευσης σε κάθε στοιχείο προσεγγίζεται με ένα δευτεροβάθμιο πολυώνυμο δεύτερης τάξης για την βελτίωση της ακρίβειας της προσομοίωσης:

$$A_z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (3.1)$$

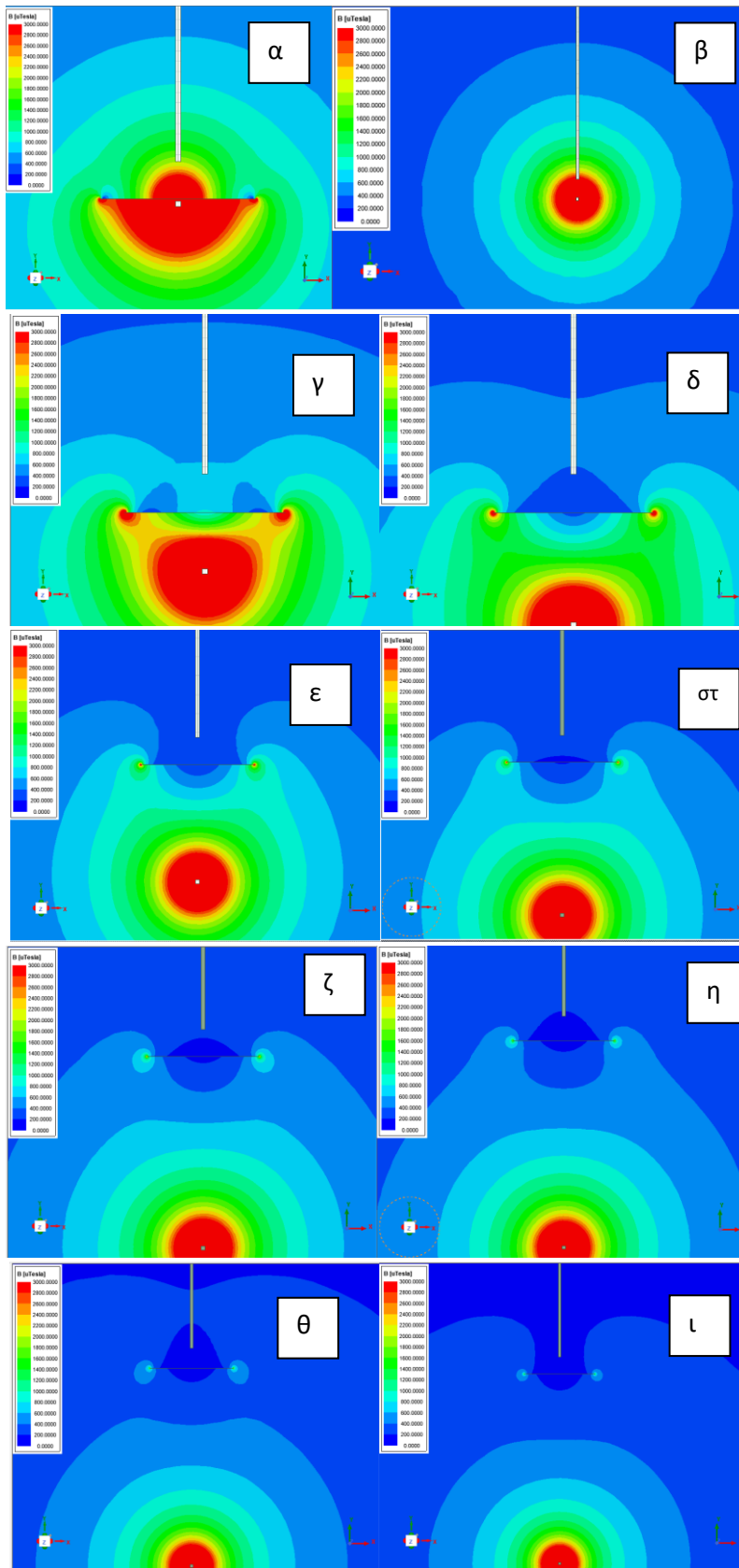
Στο δισδιάστατο μοντέλο, τα φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το πεδίο υπολογίζονται σε έξι σημεία, ήτοι στις τρεις κορυφές του τριγώνου και στα τρία μέσα των πλευρών του. Η μεθοδολογία του χρονικού βήματος (step effect) δεν εφαρμόστηκε, καθώς έχει αμελητέα επίδραση στον επιλύτη δινορευμάτων, που χρησιμοποιείται συνήθως στον ειδικό επιλύτη για μεταβατικά φαινόμενα (Magnetic Field Transient solver). Οι εξισώσεις που λύθηκαν ήταν οι εξισώσεις Maxwell σε μιγαδική μορφή, ενώ οι οριακές συνθήκες προσδιορίστηκαν ως άπειρες (Balloon). Δηλαδή οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου βγαίνουν από την περιοχή προσομοίωσης και μετά επιστρέφουν στην περιοχή αυτή.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για έναν κυκλικό αγωγό μεγάλης διαμέτρου, που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα 100 A έως 1200 A, συχνότητας 50 Hz. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο τοποθετήθηκε ένα μικρό τετραγωνικό φύλλο από ηλεκτρικό χάλυβα διαστάσεων 30 cm x 30 cm, με πάχος 0,25 mm για τη θωράκιση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον αγωγό κυκλικού ρεύματος. Το φύλλο αυτό από ηλεκτρικό χάλυβα τοποθετήθηκε σε αποστάσεις από 0 cm έως 80 cm από τον αγωγό ρεύματος, ενώ το μαγνητικό πεδίο υπολογίστηκε πάνω από το φύλλο σε αποστάσεις από 0 cm έως 80 cm. Εκτός από το μονό τετραγωνικό φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα, εφαρμόστηκε και ένα είδος «σάντουιτς» από δύο φύλλα του ίδιου υλικού με τις ίδιες διαστάσεις (30 x 30 cm, με πάχος 0,2 mm), όπου η απόσταση μεταξύ των δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ήταν 5 mm, 37 mm και 100 mm. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η γεωμετρία του μοντέλου που προσομοιώθηκε από το ANSYS Maxwell.

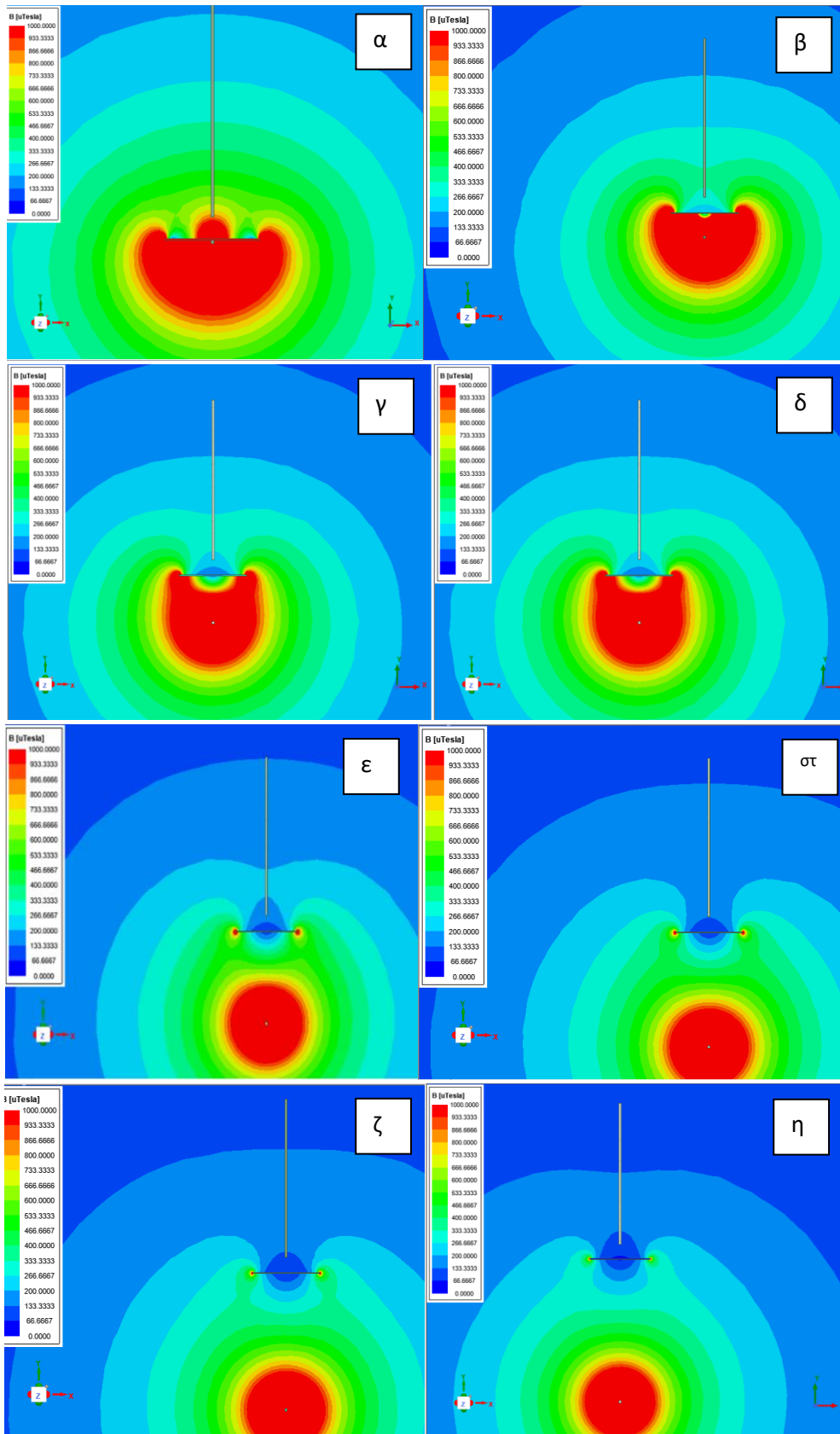
Η προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου στον χώρο γύρω από τον κυκλικό αγωγό ισχύος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2α. Τα Σχήματα 3.2β έως και 3.2η απεικονίζουν την κατανομή μαγνητικού πεδίου στο χώρο για ένα μονό τετραγωνικό φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα διαστάσεων 30 cm x 30 cm και πάχους 0,25 mm, σε αποστάσεις 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 και 800 mm από τον αγωγό ηλεκτρικής ισχύος για ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 786 A. Τα Σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 απεικονίζουν την κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό «σάντουιτς» δύο στρώσεων με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το προηγούμενο, σε αποστάσεις 5 mm, 37 mm και 100 mm μεταξύ των δύο στρώσεων, σε αποστάσεις 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm από τον αγωγό ηλεκτρικής ισχύος για ηλεκτρικά ρεύματα έντασης 577 A, 777 A και 1055 A, αντίστοιχα.



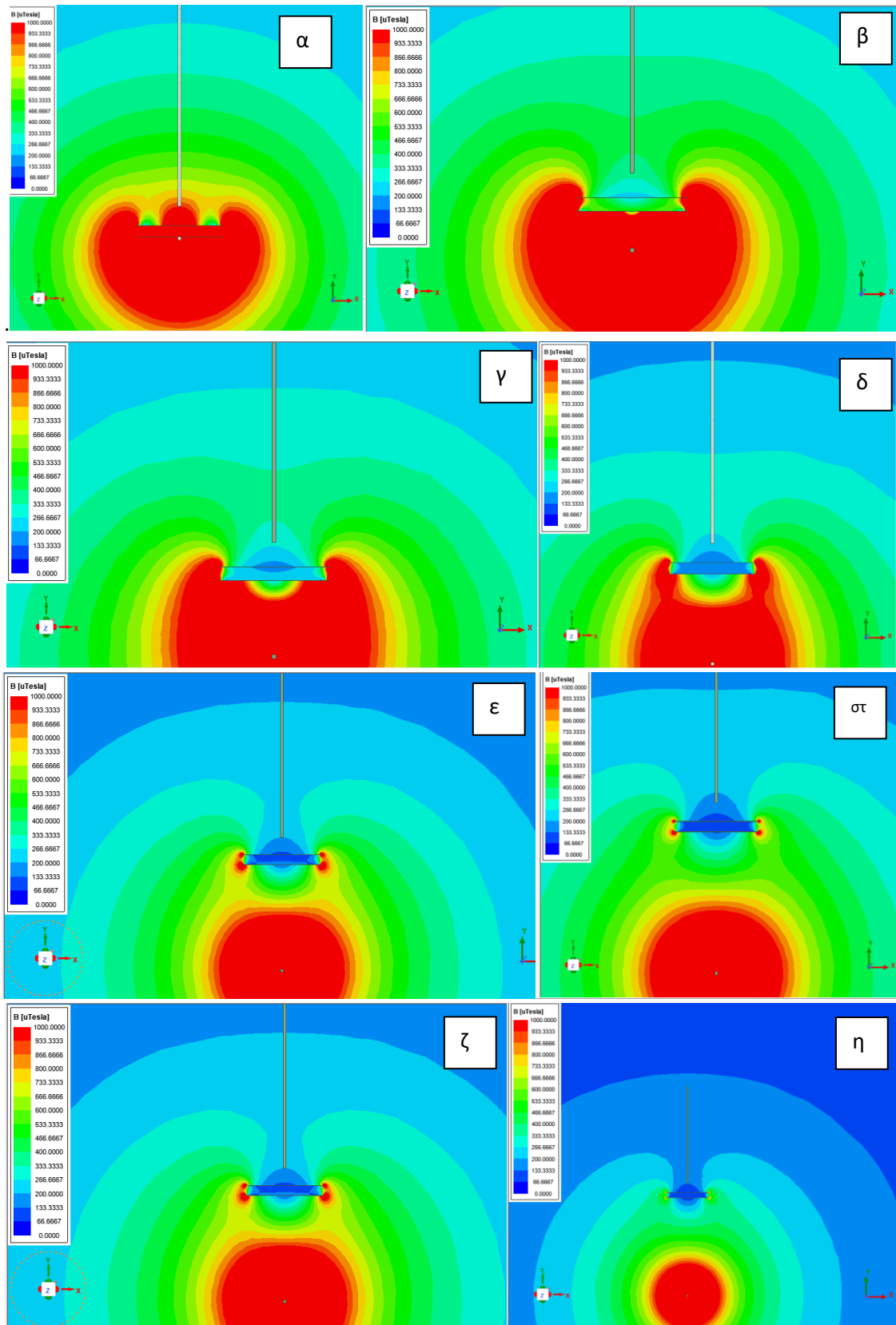
**Σχήμα 3.1.** Το μοντέλο όπως προσομοιώθηκε από το ANSYS Maxwell. Η κυκλική γραμμή και το τετράγωνο στο δεξί μέρος του σχήματος δείχνουν (a) τον αγωγό ηλεκτρικής ισχύος και (b) το υλικό θωράκισης, αντίστοιχα. Ο λεπτός κύλινδρος (c) πάνω από το υλικό θωράκισης περιέχει τα σημεία όπου υπολογίστηκε το μαγνητικό πεδίο και δημιουργήθηκε με σκοπό την πύκνωση του πλέγματος και, συνεπώς, τη μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών.



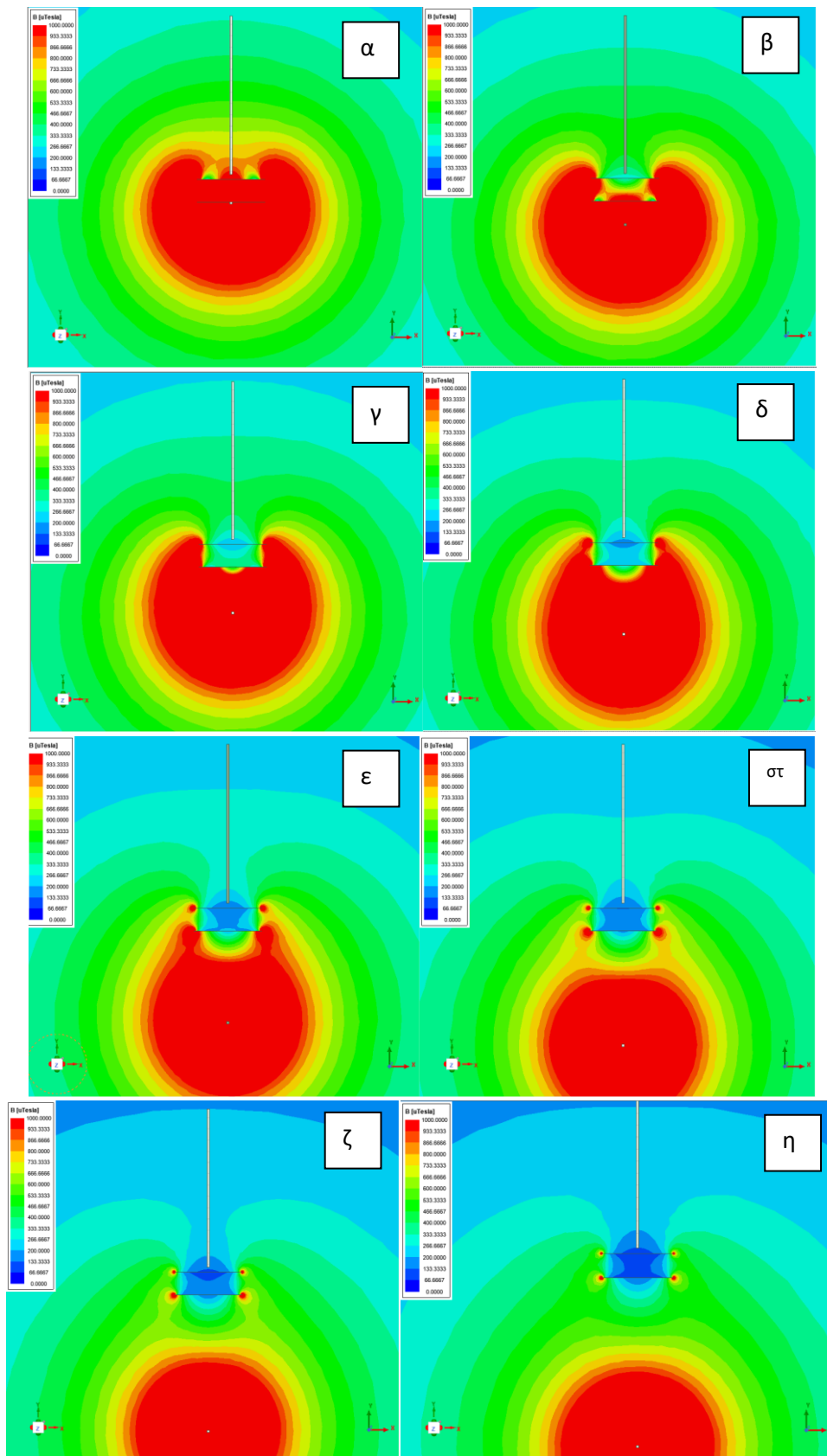
Σχήμα 3.2. Κατανομή μαγνητικού πεδίου στο χώρο (α) χωρίς θωράκιση και για ένα μονό τετραγωνικό (30 x 30 cm) φύλλο ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS σε (β) 0, (γ) 100, (δ) 200, (ε) 300, (στ) 400, (ζ) 500, (η) 600, (θ) 700 και (ι) 800 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 786 A.



Σχήμα 3.3. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 5 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 577 A.



Σχήμα 3.4. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 37 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 777 A.



Σχήμα 3.5. Κατανομή πεδίου στο χώρο για ένα τετραγωνικό (30 x 30 cm το κάθε φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS) «σάντουιτς» δύο στρώσεων απόστασης 100 mm μεταξύ των στρώσεων σε (α) 0, (β) 100, (γ) 200, (δ) 300, (ε) 400, (στ) 500, (ζ) 600, (η) 700 mm απόσταση από τον αγωγό με ρεύμα έντασης 1055 A

Η εξάρτηση της μαγνητικής επαγωγής από την απόσταση από την θωράκιση δεν είναι μονοτονική. Αυτό οφείλεται στην παγίδευση μαγνητικών γραμμών και από τα δύο φύλλα του μαγνητικού υλικού. Έτσι, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής πάνω από τη θωράκιση μειώνεται κάτω από μια περιοχή επειδή οι μαγνητικές γραμμές παγιδεύονται από τα φύλλα του ηλεκτρικού χάλυβα, ενώ πάνω από το σημείο αυτό η συμβολή του μαγνητικού πεδίου από ολόκληρο τον αγωγό οδηγεί σε αύξηση της τιμής της μαγνητικής επαγωγής. Η κύρια απόδειξη της εγκυρότητας της διαδικασίας της προσομοίωσης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

### 3.1.2. Πειράματα

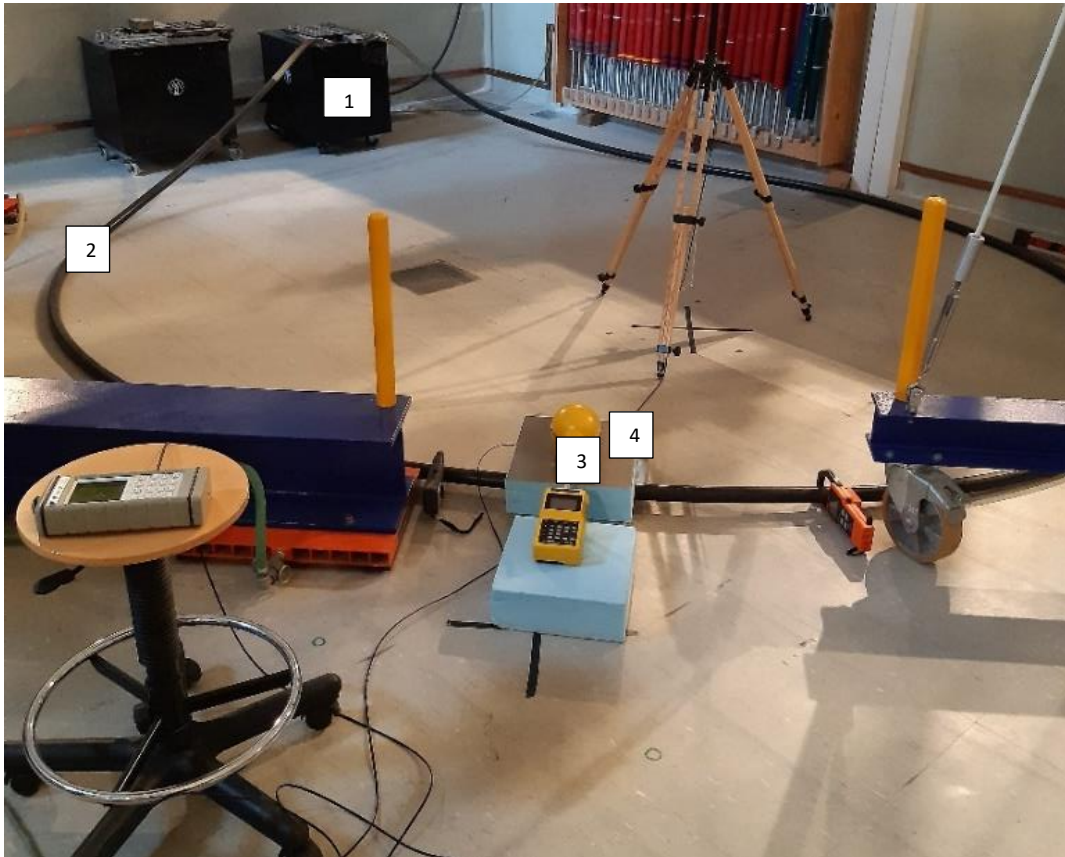
Το Σχήμα 3.6 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της προσομοίωσης η οποία βασίστηκε στην ΜΠΣ. Η πειραματική διαδικασία ακολούθησε τις θεωρητικές μελέτες και τους υπολογισμούς των τιμών της μαγνητικής επαγωγής. Ένας μετασχηματιστής ρεύματος (με εύρος 0–6000 A χρησιμοποιήθηκε για την παροχή της απαιτούμενης τιμής του ρεύματος (από 500 A έως 1100 A). Ένα μονοπολικό καλώδιο μέσης τάσης ( $1 \times 240 \text{ mm}^2$ ) συνδέθηκε στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή. Η διακύμανση του παραγόμενου ρεύματος ελεγχόταν από ένα ρυθμιζόμενο αυτό-μετασχηματιστή VARIAC, ο οποίος συνδέθηκε μεταξύ του δικτύου χαμηλής τάσης και του πρωτεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή. Το ρεύμα του καλωδίου μετρήθηκε κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου μετρήσεων με διακριβωμένο αμπερόμετρο (αμπεροτσιμπίδα). Η διακύμανση του ρεύματος τροφοδοσίας ήταν μικρότερη από  $\pm 0,5 \%$  κατά τη διάρκεια της κάθε μέτρησης. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το καλώδιο μέσης τάσης μετρήθηκε με κατάλληλο αισθητήρα και μετρητή πεδίου.

Οι μονές και διπλές στρώσεις ηλεκτρικού χάλυβα 30 cm x 30 cm με πάχος 0,25 mm αποτελούνταν από έξι ορθογώνια κομμάτια με πλάτος και μήκος 10 cm και 15 cm, αντίστοιχα (Σχήμα 3.6). Στο ίδιο σχήμα, απεικονίζεται και ο μετρητής του υπό μελέτη πεδίου με τον αισθητήρα (NARDA/EFA 300 με ανιχνευτή εμβαδού επιφάνειας  $100 \text{ cm}^2$ ) ο οποίος διακριβώθηκε 1 μήνα πριν τις μετρήσεις, αποδίδοντας τυπική αβεβαιότητα στην μετρούμενη μαγνητική επαγωγή μικρότερη από το  $\pm 3 \%$ . Ο αισθητήρας μαγνητικού πεδίου δίνεται στο Σχήμα 3.7.

Οι κύριες παράμετροι της αβεβαιότητας ήταν η ακρίβεια του αισθητήρα πεδίου, η διακύμανση του παρεχόμενου ρεύματος, η επαναληψιμότητα και η ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η θερμοκρασία ήταν  $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  και η σχετική υγρασία ήταν  $44 \% \pm 4 \%$ . Ο αισθητήρας ήταν ρυθμισμένος στην μέτρηση μαγνητικού πεδίου. Η ελάχιστη απόσταση του αισθητήρα από την αγωγίμη επιφάνεια ήταν μικρότερη από 1 mm. Ωστόσο, η επιφάνεια ανίχνευσης του αισθητήρα ήταν μεγάλη, μερικών τετραγωνικών εκατοστών. Ως εκ τούτου, ο αισθητήρας υπολόγισε το μέσο όρο του πεδίου εντός της επιφάνειας ανίχνευσης, η οποία ήταν κάθετη στην επιφάνεια του φύλλου από μαλακό μαγνητικό υλικό.

Το Σχήμα 3.8 απεικονίζει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο χώρο, όπως μετρήθηκε πειραματικά και υπολογίστηκε από το ANSYS Maxwell για ένα μεμονωμένο τετραγωνικό φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα (30 cm x 30 cm με πάχος 0,25 mm) σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον ρευματοφόρο αγωγό. Τα Σχήματα 3.9-3.11 παρουσιάζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο, όπως μετρήθηκαν πειραματικά και υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα τα οποία απέχουν 5 mm, 37 mm και 100 mm, αντίστοιχα, σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος. Σε αυτά τα σχήματα, η συμφωνία μεταξύ των υπολογισμένων τιμών με τη ΜΠΣ και των

πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ποιοτικά σαφής. Δεν επιχειρήθηκε η προσαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς ο σκοπός της σύγκρισης ήταν η συμφωνία μεταξύ των υπολογισμένων και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

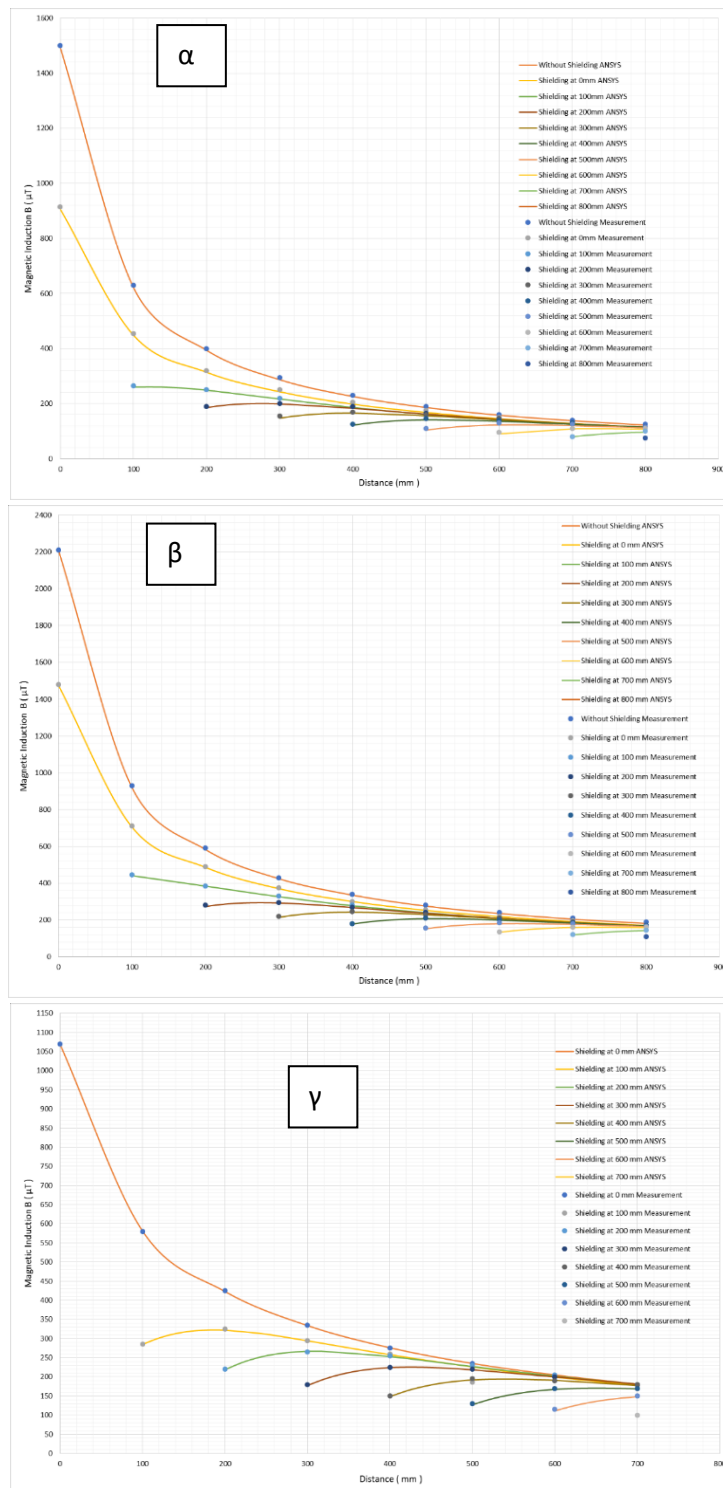


Σχήμα 3.6. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, που προσφέρει τη δυνατότητα της γραμμικής προσέγγισης στην προσομοίωση. Στη θέση (1) χρησιμοποιήθηκε ένας μετασχηματιστής για το εναλλασσόμενο ρεύμα ή ένα τροφοδοτικό για το συνεχές. Ένα καλώδιο τροφοδοσίας βρίσκεται στη θέση (2). Ένα μαγνητόμετρο εναλλασσόμενου ή στατικού μαγνητικού πεδίου στη απεικονίζεται στη θέση (3). Το μέσο θωράκισης (4) αποτελείται από έξι φύλλα μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS.

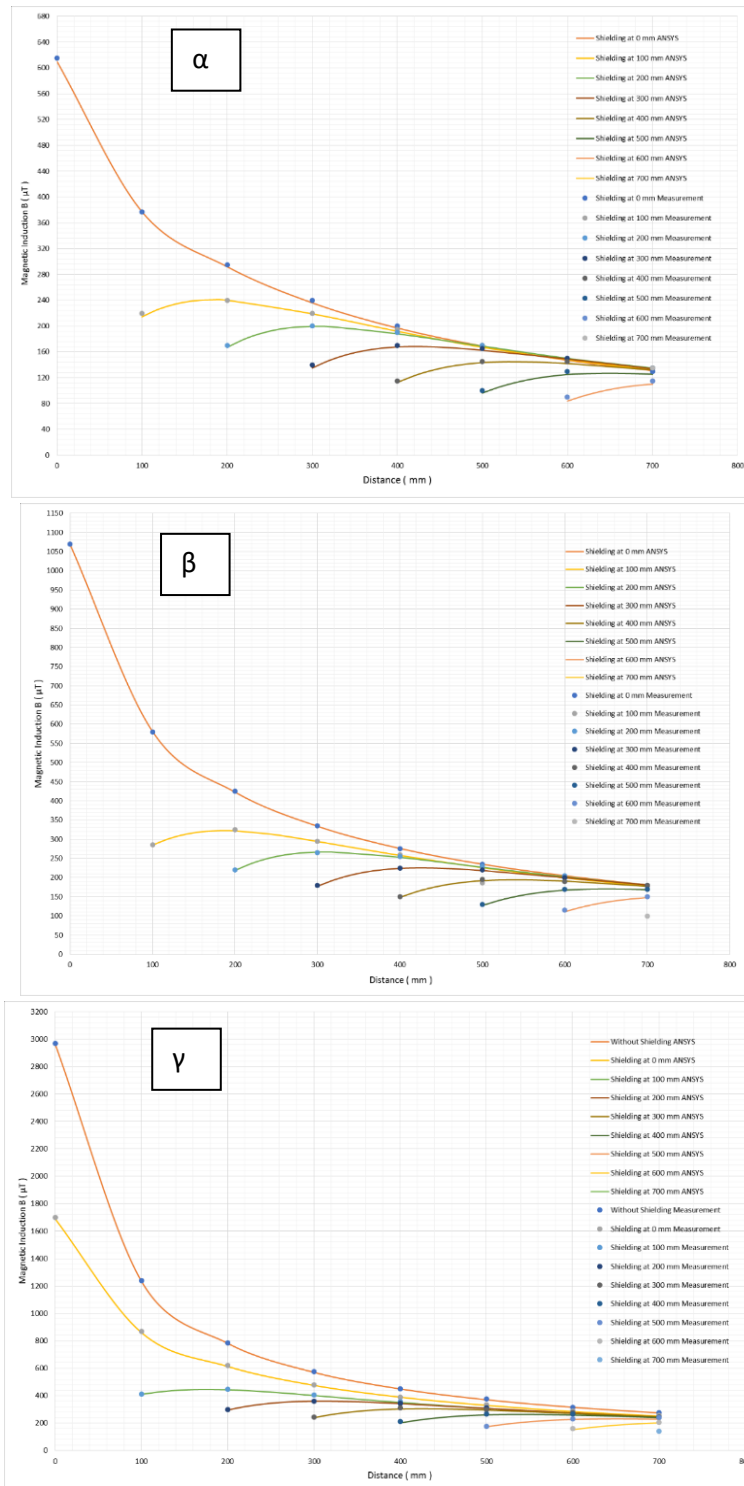


Σχήμα 3.7. Η θωράκιση από ηλεκτρικό χάλυβα με τον ανιχνευτή του μαγνητικού αισθητήρα εμβαδού επιφάνειας  $100 \text{ cm}^2$  της NARDA.

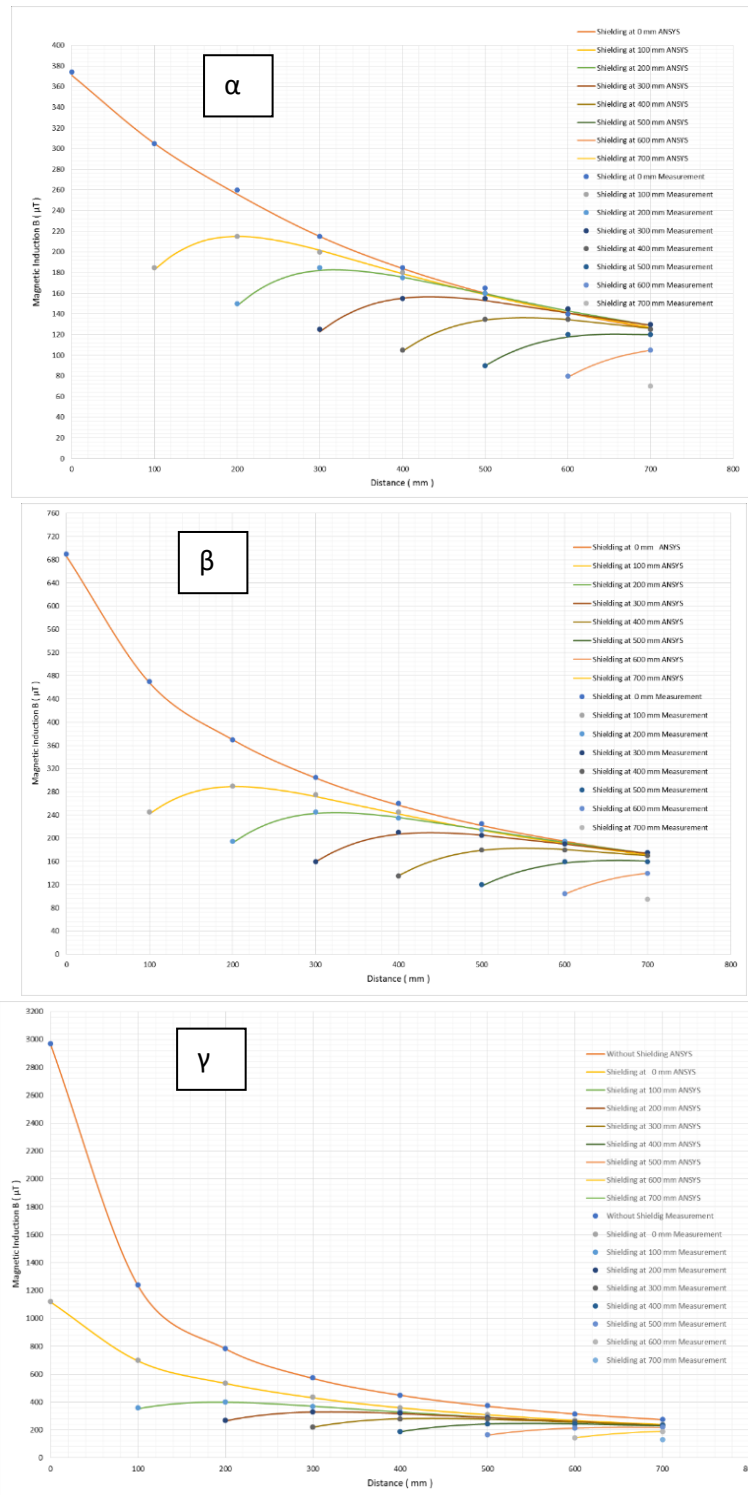




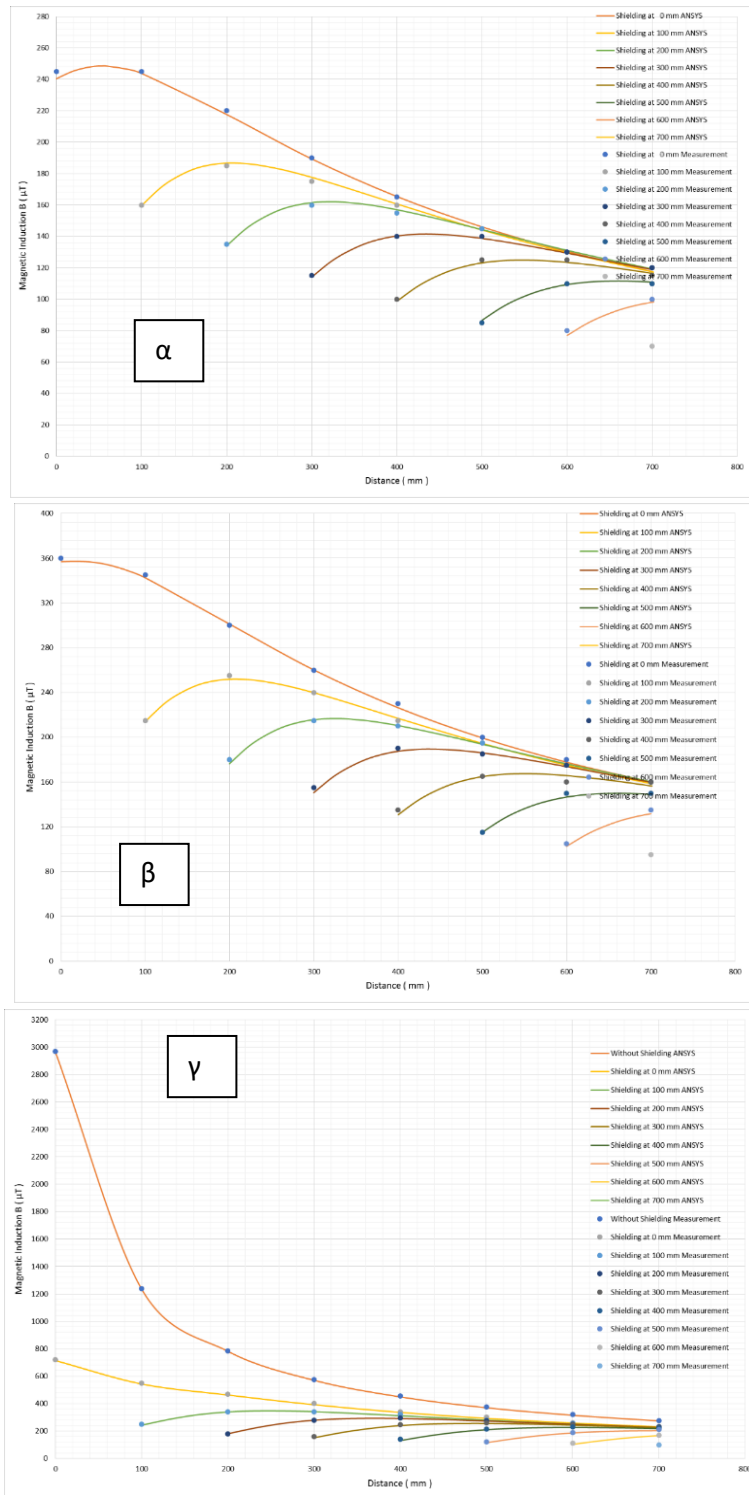
**Σχήμα 3.8.** Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε ένα μικρό τετραγωνικό φύλλο του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα μονό τετραγωνικό φύλλο του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) σε αποστάσεις 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 και 800 mm από τον ρευματοφόρο αγωγό για (α) 532 A, (β) 786 A, (γ) 1025 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.



Σχήμα 3.9. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 5 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.



Σχήμα 3.10. Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 37 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.



**Σχήμα 3.11.** Το αποτέλεσμα της θωράκισης που οφείλεται σε δύο μικρά τετραγωνικά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού. Τα γραφήματα απεικονίζουν τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο όπως υπολογίστηκαν από το ANSYS Maxwell και μετρήθηκαν πειραματικά για ένα «σάντουιτς» δύο φύλλων του ηλεκτρικού χάλυβα ή κατεργασμένου LCS (30 x 30 cm) τα οποία απέχουν 100 mm σε 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 mm απόσταση από τον αγωγό ισχύος, για (α) 577 A, (β) 777 A, (γ) 1055 A. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε τιμές υπολογισμένες με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και τα σημεία υποδεικνύουν τις πειραματικές τιμές του πεδίου.

Η σαφής συμφωνία μεταξύ των πειραμάτων και των υπολογισμών επιτρέπει τη χρήση της ΜΠΣ με βάση τους κώδικες του ANSYS Maxwell για το σχεδιασμό, τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της επίδρασης της θωράκισης που προσφέρουν μαγνητικοί χάλυβες με εξαιρετικές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας. Η ίδια μη μονοτονική εξάρτηση των τιμών του πεδίου από την απόσταση παρατηρήθηκε τόσο στις υπολογισμένες τιμές πεδίου όσο και στα πειραματικά αποτελέσματα. Η εξήγηση της μη μονότονης απόκρισης είναι η παγίδευση πεδίου κοντά στο μαγνητικό φύλλο με εξαιρετικές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας. Οι μαγνητικές γραμμές παγιδεύονται στο μαλακό μαγνητικό υλικό του φύλλου και, επομένως, το πεδίο μειώνεται στη γειτονιά του.

Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας και του σφάλματος των μετρήσεων προσδιορίστηκε η συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων. Αυτή η αβεβαιότητα οφείλεται στα ακόλουθα:

- Στην αβεβαιότητα του αισθητήρα. Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα προσδιορίστηκε να είναι ίση με 3,09 % στην τελευταία διακρίβωση που πραγματοποιήθηκε .
- Στην αβεβαιότητα παροχής ρεύματος. Η μέγιστη παρατηρήσιμη αβεβαιότητα της μετάδοσης του ρεύματος προσδιορίστηκε να είναι ίση με 3 A ανά 1 kA, με αποτέλεσμα τη αβεβαιότητα να ισούται με 0,3 %. Λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα του αμπερομέτρου, η οποία προσδιορίστηκε ίση με 1,5 % στην τελευταία διακρίβωση του οργάνου, η συνολική αβεβαιότητα λόγω της μετάδοσης του ρεύματος ήταν ίση με 1,8 %.
- Στην αβεβαιότητα της θέσης του υλικού θωράκισης και η αβεβαιότητα της θέσης του αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου. Καθεμία από αυτές τις αβεβαιότητες προσδιορίστηκε ότι είναι ίση με 1 mm σε εύρος των 10 cm (100 mm), με αποτέλεσμα μια σχετική αβεβαιότητα λανθασμένη τοποθέτηση ισούται με 2 %.

Έτσι, η συνολική εκτιμώμενη αβεβαιότητα των μετρήσεων προσδιορίστηκε ίση με 6,89 %. Οι πηγές της αβεβαιότητας, που αποδίδονται στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου, που ελήφθησαν υπόψη για την ανάλυση περιγράφονται στο Παράρτημα C (Annex C) και στον Πίνακα D.1 (Table D.1) του προτύπου IEC 61786-2:2014 [193]. Η μέση απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των υπολογισμένων τιμών πεδίου προσδιορίστηκε ίση με 7,2 %, που φαίνεται να είναι λογικό εντός των ορίων της πειραματικής διάταξης. Ωστόσο, προσδιορίστηκε ότι η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογισμένων τιμών πεδίου είναι ίση με 9,5 %, ιδιαίτερα στην περίπτωση της πολύ κοντινής τοποθέτησης του υλικού θωράκισης στον ρευματοφόρο αγωγό. Αυτή η μεγάλη απόκλιση αποδίδεται αφενός στους μηχανικούς κραδασμούς των χαλύβδινων φύλλων, οι οποίοι συμβάλλουν στην απόκριση του μαγνητόμετρου, και αφετέρου στην αύξηση του σφάλματος της μέτρησης λόγω της εγγύτητας του αισθητήρα μέτρησης προς τον ρευματοφόρο αγωγό. Η αύξηση της αβεβαιότητας μέτρησης καθώς πλησιάζουμε τον αισθητήρα μέτρησης στον αγωγό (λόγω της ανομοιομορφίας του πεδίου) εξηγείται και στην §C.3.1 του προτύπου IEC 61786-2:2014.

Αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η συμφωνία τους με τις υπολογισμένες τιμές του πεδίου αποτελούν τη πραγματική απόδειξη ότι η ΜΠΣ του ANSYS Maxwell είναι επαρκώς κατάλληλη για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στις δεδομένες συνθήκες θωράκισης, όντας ένα αξιόπιστο εργαλείο σχεδιασμού θωράκισης.

Τόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσο και της πειραματικής διαδικασίας δείχνουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού του συστήματος θωράκισης με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) παρέχει ακριβή αποτελέσματα, όπως διαπιστώνεται από την ποιοτική και ποσοτική συμφωνία μεταξύ της προσομοίωσης και των πειραμάτων. Το πιο σπουδαίο αποτέλεσμα είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της μη μονοτονικής εξάρτησης της μαγνητικής επαγωγής από την απόσταση

του φύλλου του ηλεκτρικού χάλυβα. Οι ποσοτικές διαφορές οφείλονται στην ύπαρξη των εναπομείναντων τάσεων (residual stresses) στα φύλλα του ηλεκτρικού χάλυβα, καθώς και στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια του (10 cm x 15 cm) και όχι ένα ενιαίο χαλυβδόφυλλο. Ωστόσο, καμία καμπύλη πειραματικών αποτελεσμάτων δεν τέμνει την αντίστοιχη καμπύλη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αποδεικνύοντας και για ακόμη έναν λόγο την αξιοπιστία της μεθόδου.

Τα λεπτά φύλλα του μαλακού μαγνητικού υλικού μπορούν να τοποθετούνται μαζί με τα φύλλα αλουμινίου για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι να αποφευχθεί η παραμόρφωση των φύλλων από μαγνητικό υλικό, η οποία θα μείωνε τη μαγνητική διαπερατότητά του. Ο δεύτερος λόγος είναι η θωράκιση εξαιτίας των δινορευμάτων, τα οποία επάγονται εντός των φύλλων αλουμινίου στις υψηλές συχνότητες.

Οι πειραματικές διαδικασίες και οι διαδικασίες προσομοίωσης υποδεικνύουν ότι η καλύτερη θωράκιση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας επιτυγχάνεται με δύο φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα αποτελούμενα από κομμάτια ή ταινίες με τέτοια διάταξη ώστε να προσεγγίζουν μια συνεχή επιφάνεια. Η απόσταση μεταξύ των δύο φύλλων θωράκισης αποδείχθηκε μικρής σημασίας, ωστόσο η βέλτιστη θωράκιση παρατηρήθηκε για την απόσταση των 100 mm. Όμως, η απόσταση αυτή είναι αρκετά μεγάλη και δεν επιτρέπει την καθολική εφαρμογή.

Επιπλέον, η προσομοίωση και οι πειραματικές διαδικασίες περιορίστηκαν σε μονοφασικό και όχι τριφασικό ρεύμα, δεδομένου ότι αυτό ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα της λειτουργίας και της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Όσον αφορά την χρήση τριφασικού ρεύματος, το συνολικό μαγνητικό πεδίο που προκύπτει είναι μικρότερο από το μονοφασικό και αυτό οφείλεται στη διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ των τριών συμβαλλόμενων πεδίων.

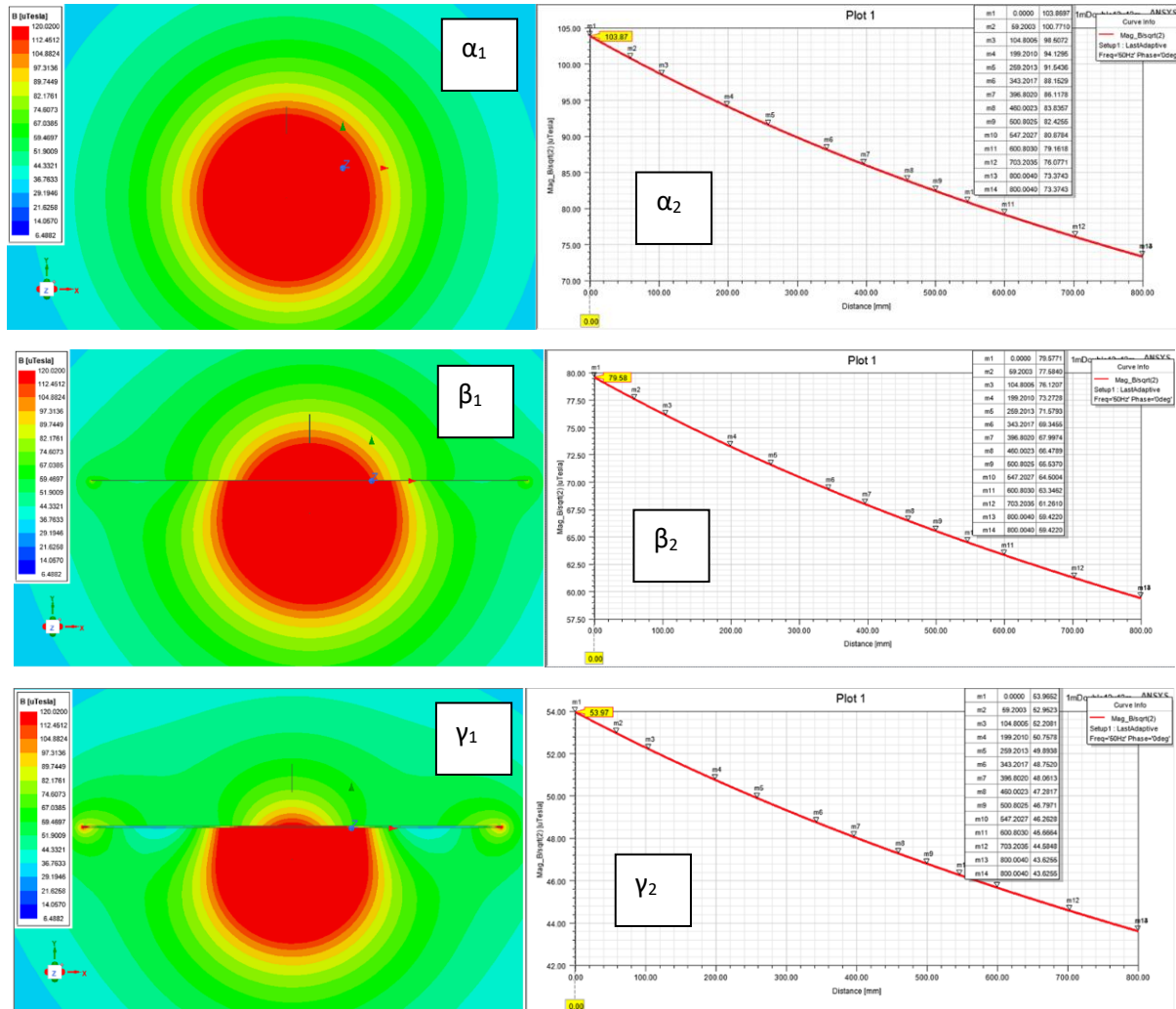
Επομένως, ο κατάλληλος αλγόριθμος για την απόκτηση της βέλτιστης θωράκισης για πεδία χαμηλής συχνότητας είναι ο ακόλουθος:

- Αρχικά, προσδιορίζεται ο χώρος που θα θωρακιστεί.
- Στη συνέχεια, η θωράκιση πρέπει να σχεδιάζεται για τις επιφάνειες που γειτνιάζουν με τις καλωδιώσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η θωράκιση αυτή πρέπει να αποτελείται από δύο φύλλα μαλακού μαγνητικού χάλυβα με απόσταση μεταξύ τους από 10 mm έως 100 mm. Στην πραγματικότητα, για τις ανάγκες της κατασκευής της θωράκισης, τα φύλλα του ηλεκτρικού χάλυβα μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε θερμομονωτικό αφρό πολυουρεθάνης, ο οποίος έχει συνήθως πάχος από 37 mm έως 100 mm. Ο αφρός της πολυουρεθάνης έχει, επίσης, και θερμομονωτικές ιδιότητες, οι οποίες είναι χρήσιμες για τους χώρους παραμονής των ανθρώπων.
- Τέλος, η ανάλυση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων επιτρέπει τον προσδιορισμό της ελάχιστης απόστασης από τη θωράκιση, όπου είναι δυνατή η παρουσία ανθρώπων, όπως και των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών.

### **3.1.3. Προσομοίωση πραγματικών συνθηκών**

Στην συνέχεια, αποτυπώθηκε το μαγνητικό πεδίο από μονοφασική γραμμή, η οποία προσομοιώνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την θωράκιση από ρεύματα φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος από σταθερό σημείο. Για τις ανάγκες της θωράκισης χρησιμοποιήθηκαν φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα με διαστάσεις 10 m x 10 m σε απόσταση 1 m από τη γραμμή ισχύος. Το πάχος και το πλάτος των φύλλων είναι 0,25 mm και 1500 mm αντίστοιχα. Το μήκος ρυθμίζεται ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής, που πρέπει να θωρακιστεί. Μεταξύ των φύλλων διπλής θωράκισης υπάρχει πολυουρεθάνη πάχους 100 mm. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι τα δύο φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα που

διαχωρίζονται με πολυουρεθάνη έχουν την καλύτερη ικανότητα θωράκισης έναντι του μαγνητικού πεδίου. Το πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος καθορίζει την απόσταση ασφαλείας για τον άνθρωπο. Κατά τις περιόδους μεγάλης ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, η ένταση του ρεύματος φτάνει στο 1 kA. Σε αυτή την περίπτωση, το μαγνητικό πεδίο μικρότερο από 100  $\mu\text{T}$  παρατηρείται σε απόσταση μικρότερη από 3 m από την επιφάνεια της θωράκισης. Στην περίπτωση του ενός φύλλου του χάλυβα, η απόσταση ασφαλούς παραμονής πρέπει να αυξηθεί στα 10 m. Οι προσομοιώσεις δίνονται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12. Προσομοίωση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου πλησίον μιας μονοφασικής γραμμής μεταφοράς ισχύος, η οποία περνάει σε απόσταση 1 m από την επιφάνεια στην οποία τοποθετείται η θωράκιση. Κατανομή πεδίου χωρίς θωράκιση ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ), με μονή στρώση θωράκισης ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) και διπλή θωράκιση ( $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ).

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα για τη σωστή απόδοση του υλικού θωράκισης είναι η απουσία των παραμενουσών τάσεων σε αυτό το μαλακό μαγνητικό υλικό. Οι τάσεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις εξαιρετικές τιμές της μαγνητικής τους διαπερατότητας. Η χρήση των μαλακών (ως προς τη μαγνητική τους συμπεριφορά) υλικών αποτελεί προϋπόθεση για να εξασφαλιστεί η απουσία των τάσεων σε αυτά τα μαγνητικά φύλλα. Το ενδιάμεσο προστατευτικό υλικό, για παράδειγμα πολυουρεθάνη, είναι κατάλληλο για το πακετάρισμα όλης της διάταξης, καθώς επίσης και για τη θερμομόνωση των χώρων.

## **3.2. Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού πεδίου**

### **3.2.1. Εισαγωγή**

Μετά τον επιτυχή έλεγχο της θωράκισης έναντι μαγνητικών πεδίων, μελετήθηκε η προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσία ανθρώπινου σώματος, που μεταβάλλει την κατανομή του πεδίου στον χώρο, καθώς επίσης και η προτεινόμενη αντίστοιχη θωράκιση, που ισχύει και στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρόβλημα της θωράκισης έναντι ηλεκτρικού πεδίου έχει μικρότερες τεχνικές δυσκολίες από αυτό του μαγνητικού πεδίου, με εξαίρεση την εξάρτηση της κατανομής του από την παρουσία ανθρώπου ή ανθρώπων και αγώγιμων αντικειμένων στον χώρο, που γίνεται η μελέτη (προσομοίωση ή μέτρηση).

Ένα μοντέλο του ανθρώπινου σώματος, που χαρακτηρίζεται από τις ίδιες ηλεκτρικές ιδιότητες για όλους τους ιστούς του, χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για τη δισδιάστατη προσομοίωση και τον υπολογισμό της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος και του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο σώμα [194]. Στην παρούσα διατριβή προτιμήθηκε η τρισδιάστατη προσομοίωση με τα πεπερασμένα στοιχεία (ΜΠΣ), ως πιο ρεαλιστική σε σχέση με την αντίστοιχη δισδιάστατη, η οποία παρέχει συμπληρωματικά την απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου εντός του σώματος και στον χώρο πλησίον του ανθρώπινου σώματος και ως συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης από το έδαφος. Ο αυχέννας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η διατομή του είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος να είναι μεγάλη. Λόγω της διαφοράς στην αγωγιμότητα μεταξύ του λαιμού και του νωτιαίου μυελού, η πυκνότητα ρεύματος στον νωτιαίο μυελό είναι χαμηλότερη από τη μέση πυκνότητα ρεύματος στον αυχένα.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη στις περιοχές που υπάρχει ανθρώπινη παρουσία [195]. Το μοντέλο μας έδειξε το «διαχωρισμό» του ηλεκτρικού πεδίου όταν περισσότερα από ένα αγωγίμα αντικείμενα, όπως τα δέντρα, τα ανθρώπινα σώματα κλπ. βρίσκονται κοντά στο σημείο μέτρησης. Δοκιμαστικές προσομοιώσεις, τοποθετώντας γειωμένα χάλκινα αντικείμενα με σχήμα κυλίνδρου, κώνου και σωλήνα δίπλα στο ανθρώπινο σώμα, δεν έδειξαν αξιοσημείωτη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στον άνθρωπο (από 145 kV/m σε 125 kV/m). Έτσι, υιοθετήθηκε η λύση της μαγνητικής θωράκισης έναντι μαγνητικού πεδίου (βλέπε ενότητα 3.1).

Όπως θα δειχθεί στην παρούσα ενότητα, οι μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς επίσης και η αντίστοιχη προσομοίωση δείχνουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο «μοιράζεται» σε όλα τα αγωγίμα υλικά τα οποία βρίσκονται στην γειτονιά του. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων επέτρεψαν τον κατάλληλο σχεδιασμό θωράκισης και οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οδήγησαν στην εύρεση των συνθηκών κατά τις οποίες το ηλεκτρικό πεδίο ελαχιστοποιείται.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, τα οποία επαληθεύονται από πειραματικές μετρήσεις. Για πρακτικούς λόγους δεν παρουσιάζονται στο σώμα της Διδακτορικής Διατριβής, αλλά δίνονται σε Παράρτημα.

### **3.2.2. Αρχές προσομοίωσης του ηλεκτρικού πεδίου**

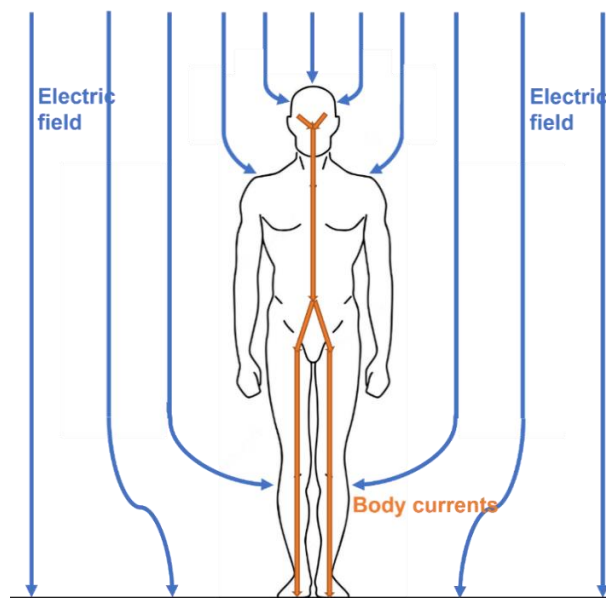
Για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιήθηκε και πάλι το λογισμικό ANSYS (Release 17.1) Maxwell 3D Electrostatic Solver [196]. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος μέσα στο ανθρώπινο σώμα και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με έμφαση το κεφάλι και τον αστράγαλο. Η πυκνότητα ρεύματος μέσα σε ανθρώπινο σώμα είναι αντιστρόφως



ανάλογη με τη διατομή του σώματος [197]. Επομένως, η κατανομή της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος είναι σχετικά υψηλή στον αυχένα και τους αστραγάλους.

Τα όρια της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος  $2 \text{ mA/m}^2$  στο λαιμό και τον κορμό του σώματος προέρχονται από την έκθεση του ανθρώπου στο ηλεκτρικό πεδίο έντασης  $5 \text{ kV/m}$  σε περίπτωση που το διάνυσμα ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο προς τον άξονα του σώματος, σύμφωνα με τη Διεθνή Οργάνωση Εργασίας (ILO) και της ICNIRP [197, 198]. Οι οδηγίες για τον περιορισμό της έκθεσης των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία αναφέρουν ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι ο νωτιαίος μυελός του αυχένα. Ο αυχέννας έχει μικρή διατομή, με αποτέλεσμα τη διέλευση του ρεύματος υψηλής πυκνότητας μέσω αυτού [197, 199].

Το Σχήμα 3.13 απεικονίζει τα επαγόμενα ρεύματα μέσα σε ανθρώπινο σώμα εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος συχνότητας 50 ή 60 Hz [200]. Το ανθρώπινο σώμα παραμορφώνει τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες γίνονται κάθετες στην επιφάνεια του ανθρώπινου μοντέλου [201]. Χωρίς το ανθρώπινο σώμα ή μακριά από αυτό, οι γραμμές ηλεκτρικού πεδίου δεν αλλάζουν κατεύθυνση και παραμένουν παράλληλες.



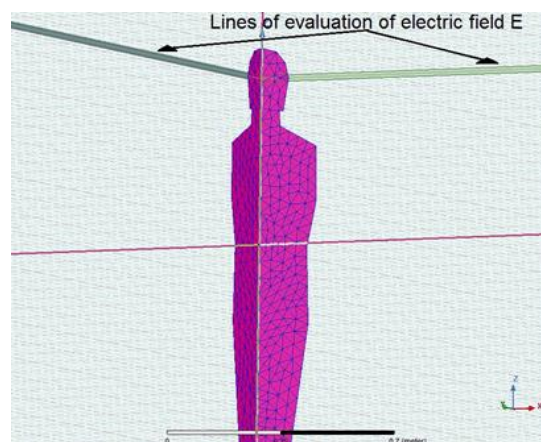
**Σχήμα 3.13. Τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στο ανθρώπινο σώμα τα οποία επάγονται από το ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας ισχύος.**

Όταν δεν υπάρχουν αγώγιμα αντικείμενα στην περιοχή του εδάφους, το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή αυτή είναι ομοιόμορφο με δυναμικές γραμμές παράλληλες μεταξύ τους. Στην περίπτωση παρουσίας του ανθρώπου ή οποιουδήποτε αγώγιμου υλικού στον χώρο, όπου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, το τελευταίο παραμορφώνεται και οι γραμμές του γίνονται κάθετες στην επιφάνεια του αγώγιμου σώματος. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής του ηλεκτρικού πεδίου και του αγώγιμου σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου και η αλλαγή του προσανατολισμού των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου.

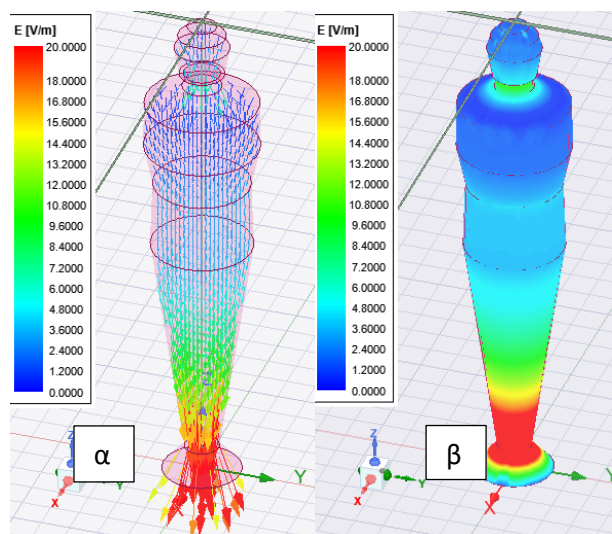
Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Maxwell και λαμβάνεται υπόψη η σχέση που συνδέει την επαγόμενη πυκνότητα ρεύματος μέσα στο ανθρώπινο μοντέλο,  $J$ , με την ένταση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου  $E_i$  και την αγωγιμότητα  $\sigma$  του ιστού σώματος που εξετάζουμε, δηλαδή

$$J = \sigma \cdot E_i \quad (3.1)$$

Τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά πεδία προκαλούν τη μετατόπιση των ηλεκτρικών φορτίων, που υπάρχουν μέσα στα σώματα των ζωντανών οργανισμών. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτού του ρεύματος εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα του σώματος, τις ιδιότητες του αδιατάρακτου ηλεκτρικού πεδίου, τη συχνότητα του πεδίου και την αγωγιμότητα διαφορετικών ανθρώπινων ιστών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μέσα σε ομογενή υλικά, η πυκνότητα ρεύματος, που επάγεται από τα ηλεκτρικά πεδία είναι ανεξάρτητη της αγωγιμότητάς τους. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ανθρώπινου σώματος, περιστρέφοντας το προαναφερθέν δισδιάστατο μοντέλο γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z. Τα βασικά του χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου περιλαμβάνουν το ύψος, το σχήμα και τις διαστάσεις του λαιμού του. Η διακριτοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε τρισδιάστατη αναπαράσταση απεικονίζονται στο Σχήμα 3.14. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του ανθρώπινου σώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15. Το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται στο έδαφος, στο κέντρο της συμμετρίας της κάτω έδρας.



**Σχήμα 3.14. Στοιχεία προσομοίωσης και ανάλυσης με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων: διακριτοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε τρισδιάστατη αναπαράσταση σε σχέση με έναν γραμμικό αγωγό υπό τάση 400 kV, που προσομοιώνει τοις συνθήκες πρωτεύοντος κυκλώματος ασύρματης φόρτισης.**



**Σχήμα 3.15. Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του ανθρώπινου σώματος: (α) κατανομή του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, (β) κατανομή του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο σώμα.**

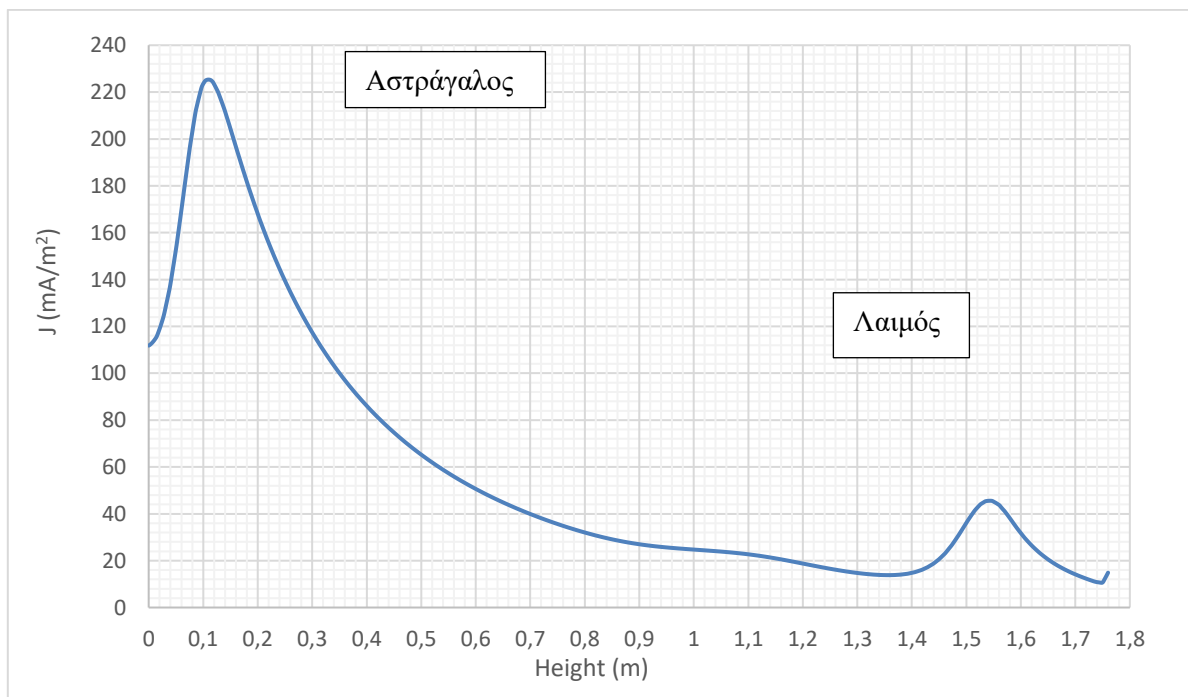
### 3.2.3. Αρχική προσομοίωση και μετρήσεις

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μιας τυπικής κατανομής του επαγόμενου ρεύματος μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν κατά το μήκος του κατακόρυφου άξονα (άξονας Z) του μοντέλου. Η μονάδα μέτρησης της πυκνότητας του επαγόμενου ρεύματος  $J$  είναι  $\text{mA}/\text{m}^2$ . Η πυκνότητα του επαγόμενου ρεύματος είναι μεγαλύτερη όπου η διατομή του μοντέλου είναι μικρή (αστράγαλος ή λαιμός). Οι τιμές της εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία του ομοιογενούς ανθρώπινου σώματος.

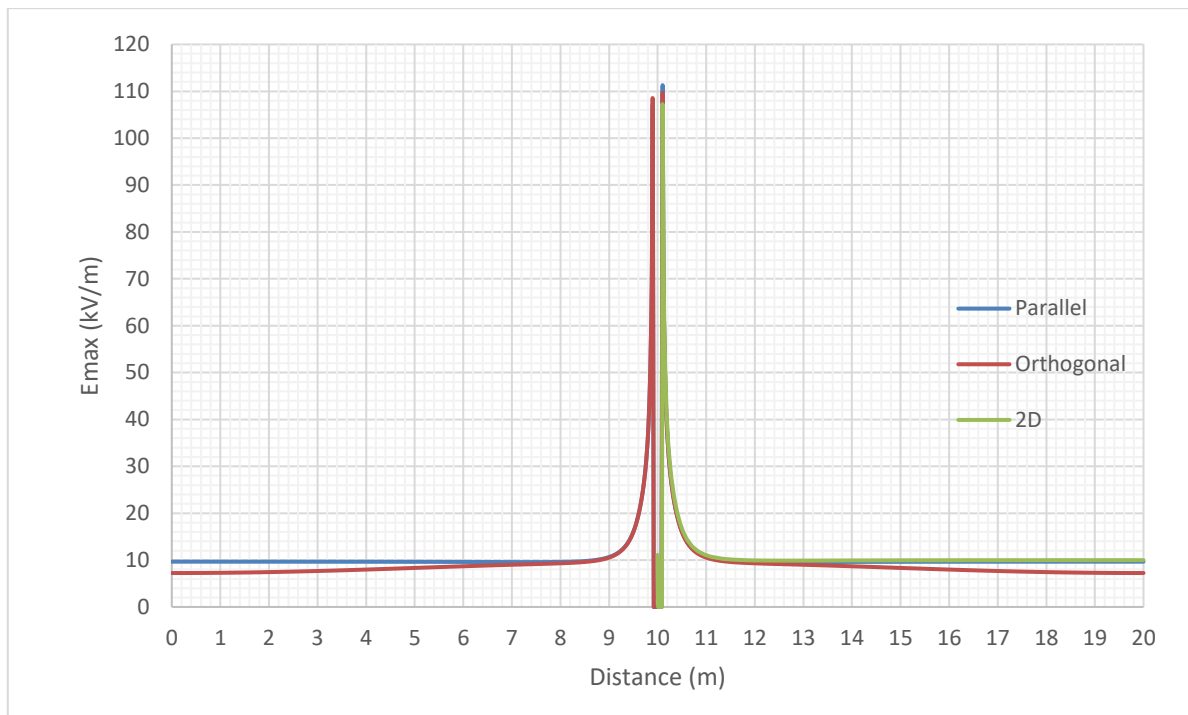
Ωστόσο, σε ένα μη ομοιογενές σώμα, η πυκνότητα του ρεύματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις διαφορές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων μεταξύ των παρακείμενων ιστών. Υπενθυμίζεται, ότι σύμφωνα με τις οδηγίες της ICNIRP (1998), το ηλεκτρικό πεδίο έντασης  $5 \text{ kV}/\text{m}$  (όριο για το ευρύ κοινό), στις χειρότερες συνθήκες, επάγει μια πυκνότητα ρεύματος περίπου ίση με  $2 \text{ mA}/\text{m}^2$  στο λαιμό και τον κορμό του σώματος, όταν το διάνυσμα της έντασης του πεδίου είναι παράλληλο προς τον άξονα του σώματος.

Στο Σχήμα 3.17 απεικονίζονται τυπικά αποτελέσματα του δισδιάστατου μοντέλου, που παρουσιάζεται στο [194] σε σύγκριση με το τρισδιάστατο μοντέλο, που αναπτύχθηκε στην τρέχουσα εργασία για την ίδια απόσταση του μοντέλου ανθρώπινου σώματος. Παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων, με το τρισδιάστατο μοντέλο να υπερτερεί ως προς την κατανομή του πεδίου στον χώρο γύρω από το ανθρώπινο μοντέλο, κάτι που δεν είναι δυνατό στην περίπτωση της δισδιάστατης προσομοίωσης.

Το βασικό συμπέρασμα από τις προσομοιώσεις αυτές είναι η επιβεβαίωση ότι το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο εντός του ανθρώπινου σώματος είναι υψηλότερο, όπου η διατομή του μοντέλου είναι μικρή (αστράγαλος ή λαιμός). Οι οριακές συνθήκες, που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ομοιογενείς συνθήκες Neumann [202], οι οποίες καθορίζουν την εφαπτομενική συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου στα όρια της περιοχής προσομοίωσης.



**Σχήμα 3.16.** Πυκνότητα των επαγόμενων ρευμάτων  $J$  κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα του ανθρώπινου σώματος, για έναν αγωγό υπό τάση  $400 \text{ kV}$ .



**Σχήμα 3.17. Η σύγκριση αποτελεσμάτων της δισδιάστατης προσομοίωσης (πράσινη γραμμή) και της τρισδιάστατης προσομοίωσης (μπλε και κόκκινη γραμμή) για έναν αγωγό υπό τάση 400 kV.**

Στην συνέχεια καταγράφηκαν οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην παρουσία και απουσία ανθρωπίνων σωμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε γραμμές παροχής ισχύος. Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν το PMM μοντέλο 8053A μαζί με τον αισθητήρα EHP-50C για την μέτρηση τόσο του μαγνητικού όσο και του ηλεκτρικού πεδίου. Η ευαισθησία του οργάνου είναι 0,01 V/m για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και 1 nT για την μαγνητική επαγωγή. Η αβεβαιότητα προσδιορισμού του μετρούμενου μεγέθους κατά τη διακρίβωση του εν λόγω οργάνου είναι 5,3 %.

Οι μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στις περιπτώσεις παρουσίας και απουσίας του ανθρώπινου σώματος επαναλήφθηκαν 5 φορές σε 5 διαφορετικές θέσεις του ανθρώπινου σώματος σε σχέση με την καλωδίωση ισχύος. Το όργανο μέτρησης τοποθετήθηκε πάνω από το κεφάλι του ανθρώπου και κοντά σε αυτό. Η διακύμανση των μετρήσεων ήταν μικρότερη από το  $\pm 45$  V/m. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν 5,5 φορές αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή πλησίον του κεφαλιού του ανθρώπινου σώματος από 0,815 kV/m  $\pm 5,3$  % έως 4,471 kV/m  $\pm 5,3$  %. Παρατηρείται μια διαφορά μεταξύ της προσομοίωσης (13 φορές) και πειράματος (5,5 φορές), η οποία αποδίδεται στο γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη συμμετοχή δύο ανθρώπων και ενός συστήματος παρακολούθησης. Όλα αυτά τα αντικείμενα έχουν μη μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επομένως, το καθένα από αυτά συμβάλλει στην διαταραχή των ισοδυναμικών επιφανειών του ηλεκτρικού πεδίου και, συνεπώς, στη μείωση της ένδειξης του οργάνου μέτρησης. Με βάση αυτές τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις γειτνίασης του ανθρώπινου μοντέλου με αγωγίμα υλικά, όπως κώνος, κύλινδρος και σωλήνας χαλκού. Από τις προσομοιώσεις αυτές προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται, όταν ένα αγωγίμο αντικείμενο βρίσκεται κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Οι πειραματικές μετρήσεις επιβεβαιώνουν αυτό το γεγονός, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, με την διαφορά μεταξύ των μετρήσεων και των προσομοιώσεων να είναι μικρότερη από 5 %, που θεωρείται αποδεκτή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των μετρήσεων, καθώς και την πύκνωση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή των αγωγικών υλικών, επιλέξαμε τη χρήση των γειωμένων λεπτών μεταλλικών φύλλων λαμαρίνας υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας για τις ανάγκες της θωράκισης. Τα ίδια μεταλλικά φύλλα χρησιμοποιήθηκαν και για τη μαγνητική θωράκιση [203] από μαγνητικά πεδία ρευμάτων συχνότητας 50 Hz. Η γείωση δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού της λαμαρίνας, οι οποίες σχετίζονται με τη μαγνητική θωράκιση. Το ηλεκτρικό πεδίο κοντά σε μοντέλο ανθρώπινου σώματος, το οποίο βρίσκεται σε γειτνίαση με καλωδίωση μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 400 kV και 150 kV με ένα γειωμένο λεπτό φύλλο μεταλλικής μαγνητικής λαμαρίνας πάχους 0,25 mm, ενδιάμεσα της καλωδίωσης και του ανθρώπινου μοντέλου, προσομοιώθηκε με πολλές παραμετρικές αλλαγές.

Στην περίπτωση του απλού κυκλώματος 150 kV, η διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου παρουσία ανθρώπινου σώματος είναι μικρή ακόμη και όταν δεν υπάρχει θωράκιση, όπως και αναμενόταν. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται δραματικά με καλωδίωση 400 kV. Στην περίπτωση αυτή, το ηλεκτρικό πεδίο και η αντίστοιχη θωράκιση δεν είναι δυνατόν να επιτύχουν πεδία σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διεθνών προτύπων.

Με βάση τα παραπάνω, έχοντας υπόψη την βασική εφαρμογή των παραπάνω ευρημάτων στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων από τον δρόμο κίνησης, όπου απαιτείται η χρήση επαγωγικής φόρτισης δευτερεύοντος μετασχηματιστή, που βρίσκεται πάνω στο ηλεκτρικό όχημα και πρωτεύοντος μετασχηματιστή που είναι θαμμένο στο οδόστρωμα, το βασικό συμπέρασμα είναι ότι προτείνεται η χρήση πρωτεύοντος σε τάση 150 kV για τον εκμηδενισμό προβλημάτων υπέρβασης της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου. Η γειωμένη λεπτή μαγνητική λαμαρίνα μονής στρώσης παρέχει πολύ καλή θωράκιση έναντι του ηλεκτρικού πεδίου προερχόμενου από τέτοια γραμμή, ακόμα και έξω από την περιοχή θωράκισης, πόσο δε μάλλον η διπλή μαγνητική θωράκιση.

### **3.3. Μαγνητική θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων**

#### **3.3.1. Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη διαφορετικών υλικών μαγνητικής θωράκισης για τα καλώδια ισχύος ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην οποία χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση με την ΜΠΣ. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν από τα πειραματικά δεδομένα. Η σύνθετη διαμόρφωση φάσματος, όπως η διαμόρφωση πλάτους του παλμού (PWM), απαιτεί θωράκιση του μαγνητικού πεδίου συχνότητας έως και 2 kHz. Μελετήθηκε η μαγνητική θωράκιση για συχνότητες 2 kHz και 50 Hz, καθώς και για το μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος. Στα υλικά της μαγνητικής θωράκισης που μελετήθηκαν συμπεριλαμβάνονται μεταλλικά φύλλα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, όπως το Permalloy, καθώς και τα σύνθετα υλικά με βάση τη μήτρα ρητίνης μέσα στην οποία τοποθετήθηκαν νιφάδες ή σκόνη από νανοκρυσταλλικές κορδέλες, όπως οι νανοκρυσταλλικές κορδέλες FINAMET. Αποδείχθηκε ότι ο χαλκός σε συνδυασμό με φύλλα Permalloy παρέχει αποτελεσματική θωράκιση καλωδίων για τις συχνότητες έως 2 kHz. Η θωράκιση του δαπέδου του ηλεκτρικού οχήματος με φύλλα από Permalloy αποτελεί μια καλή λύση έναντι των μαγνητικών πεδίων, που δημιουργούν τα καλώδια ισχύος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρειάζονται καλώδια υψηλής έντασης ρεύματος [112]. Το εύρος των ρευμάτων είναι της τάξης των πολλών εκατοντάδων A, όταν η ηλεκτρική τάση είναι σχετικά χαμηλή.

Τα επιτρεπτά όρια των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εντός του ηλεκτρικού οχήματος αποτελούν αντικείμενο συνεχούς συζήτησης μεταξύ της επιστημονικής και βιομηχανικής κοινότητας. Τα δεδομένα του Πίνακα 1.1 παρουσιάζουν τα όρια για τον γενικό πληθυσμό και τους εργαζόμενους. Το χαμηλότερο αποδεκτό όριο για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι 4,2 kV/m και 0,083 mT αντίστοιχα για την πρώτη κατηγορία, ενώ είναι διπλάσιο για τη δεύτερη [204, 205, 2]. Αυτά τα επίπεδα πεδίων ισχύουν για όλους τους χώρους, συνεπώς, και για την καμπίνα των ηλεκτρικών οχημάτων.

Έχοντας υπόψη ότι η τάση τροφοδοσίας των ηλεκτρικών κινητήρων είναι της τάξης μερικών V έως μερικών δεκάδων και εκατοντάδων V, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ηλεκτρικό όχημα είναι αρκετά χαμηλότερη από το αυστηρό όριο των 5 kV/m. Επομένως, δεν απαιτείται η θωράκιση έναντι του ηλεκτρικού πεδίου.

Αντίθετα, σε αρκετές περιπτώσεις, όπως η ασύρματη φόρτιση ή η τροφοδοσία των ηλεκτρικών κινητήρων σε μεγάλες επιταχύνσεις, το μαγνητικό πεδίο λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης μπορεί να υπερβεί τα αποδεκτά όρια έκθεσης για τον οδηγό και τους επιβάτες του οχήματος. Ακόμη, ο τρόπος παροχής ρεύματος με σύνθετη διαμόρφωση φάσματος, όπως η διαμόρφωση πλάτους του παλμού (PWM), απαιτεί μαγνητική θωράκιση για συχνότητες από 0 έως 2 kHz. Τα ρεύματα προς τους μετατροπείς και τους κινητήρες είναι μερικές φορές της τάξης των 500 A, ενώ τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια ισχύος του ηλεκτρικού οχήματος της τάξης των 100 A [206].

Τα μέσα θωράκισης προσφέρουν εξασθένηση του μαγνητικού πεδίου, που παράγουν τα καλώδια ισχύος. Επομένως, είναι απαραίτητα για την ασφάλεια των επιβατών και τη σωστή λειτουργία όλων των συστημάτων του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών μεθόδων θωράκισης με χρήση μερικών μαγνητικών υλικών, καθώς και των πειραματικών μετρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια των κατάλληλων μαγνητόμετρων. Μετά τη διαπίστωση της ακριβούς συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της προσομοίωσης των μαγνητικών πεδίων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, η κύρια ανάλυση της θωράκισης βασίστηκε στο λογισμικό ANSYS Maxwell 2D & 3D, Release 17.1 Academic [207].

Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις θωράκισης καλωδίου τροφοδοσίας. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί σωλήνες, που περιβάλλουν το καλώδιο τροφοδοσίας σε συνδυασμό με σωλήνες από μαλακά μαγνητικά υλικά. Στη δεύτερη τοποθετήθηκε ένα προστατευτικό φύλλο πάνω από το καλώδιο τροφοδοσίας και κάτω από το δάπεδο του αυτοκινήτου. Έχουν επιλεγεί και δοκιμαστεί διαφορετικά φύλλα από υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας.

### **3.3.2. Υλικά θωράκισης**

Για τους σκοπούς της μελέτης θωράκισης χρησιμοποιήθηκε ένα μονόκλωνο καλώδιο μέσης τάσης διατομής  $\sim 79 \text{ mm}^2$ , το οποίο επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος έντασης μέχρι και 500 A. Δεν εξετάστηκε η θωράκιση έναντι του ηλεκτρικού πεδίου του καλωδίου τροφοδοσίας, καθώς ο σκοπός της έρευνας ήταν η θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν ταινίες από χαλκό (Cu) του εμπορίου, πάχους 100  $\mu\text{m}$  – 1 mm είτε ως μονή είτε ως διπλή θωράκιση. Επιπλέον, ένα υμένιο από  $\text{Ni}_3\text{Fe}$  (Permalloy), πάχους 10  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  εναποτέθηκε ηλεκτρικά στην χάλκινη ταινία και τυλίχθηκε γύρω από το καλώδιο τροφοδοσίας [206, 207].

Ένας χυτός σωλήνας από Ni<sub>3</sub>Fe (Permalloy), πάχους 1 mm χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος. Οι μαγνητικές του ιδιότητες προσδιορίστηκαν με μαγνητομετρία εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας και τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα [207].

Επιπλέον, ορισμένα σύνθετα υλικά μαγνητικής θωράκισης έχουν δοκιμαστεί με βάση τη μήτρα ρητίνης. Για παράδειγμα, άμορφες και νανοκρυσταλλικές ταινίες σε μορφή νιφάδων με διαστάσεις 6mmx6mm, καθώς επίσης σκόνης με μέσο μέγεθος κόκκων 20-25 μm από νανοκρυσταλλικές ταινίες. Οι νιφάδες και οι σκόνης ήταν δύο ειδών, συγκεκριμένα, από διαθέσιμο στο εμπόριο FINAMET [208] και από άμορφες και νανοκρυσταλλικές ταινίες Fe<sub>88</sub>B<sub>12</sub>, που αναπτύχθηκαν πρόσφατα και παρουσιάζονται στο Κεφ. 2 της παρούσης διατριβής.

Οι μαγνητικές ιδιότητες της σκόνης FINAMET προσδιορίστηκαν από το μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (VSM). Το υλικό αυτό παρουσιάζει υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα που υπερβαίνει το 10<sup>5</sup>, ενώ το κράμα Fe<sub>88</sub>B<sub>12</sub> το πολύ 10<sup>4</sup>. Προσδιορίστηκαν επίσης και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών αυτών. Η ειδική αντίσταση του Ni<sub>3</sub>Fe δεν υπερβαίνει τα 16 μΩcm ενώ η ειδική αντίσταση άμορφων και νανοκρυσταλλικών κραμάτων κυμαίνεται από 40 μΩcm έως 160 μΩcm.

### **3.3.3. Αξιολόγηση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ).**

Αρκετά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση της διαδικασίας προσομοίωσης με την ΜΠΣ. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Μια ηλεκτρική πηγή (AC ή DC) τροφοδοτούσε έναν αγωγό ισχύος διαμέτρου 10 mm με ρεύμα έντασης έως και 500A.

Το διακριβωμένο μαγνητόμετρο χρησιμοποιήθηκε και εδώ, για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του εναλλασσόμενου και του συνεχούς ρεύματος. Η αβεβαιότητα μέτρησης του εναλλασσόμενου ρεύματος και μαγνητικού πεδίου ήταν 2 % και 5 % αντίστοιχα [203]. Τα μέσα θωράκισης τοποθετήθηκαν μεταξύ του καλωδίου ισχύος και του μαγνητόμετρου.

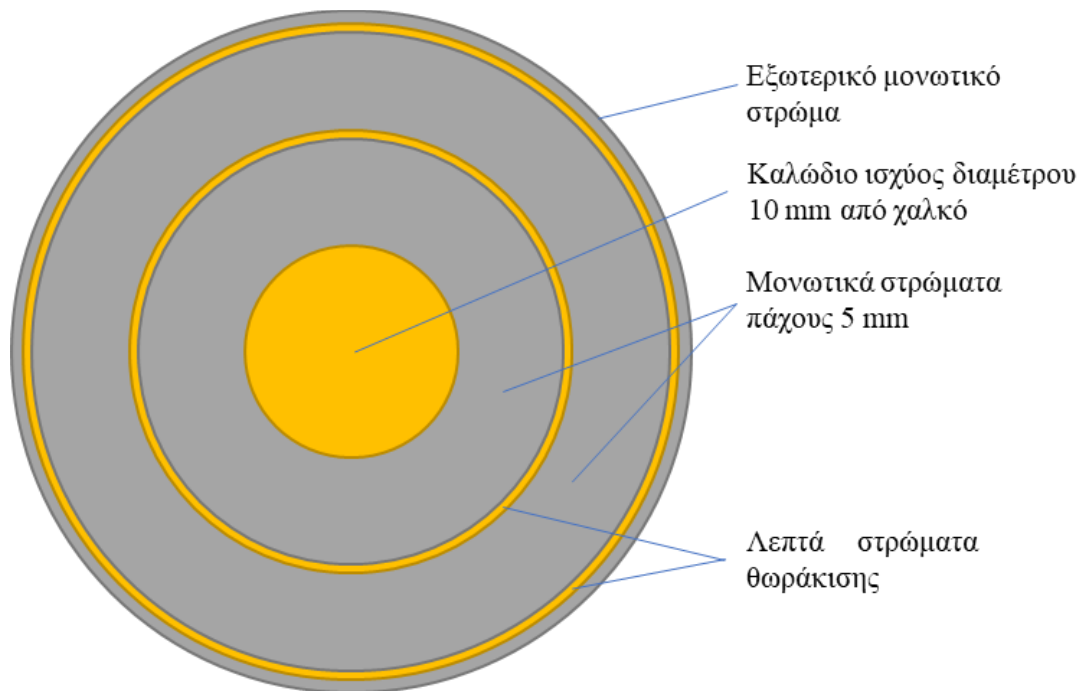
Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας τέσσερα φύλλα ενός μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα πάχους 0,15 mm, μήκους 150 mm και πλάτους 100 mm τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο για να σχηματιστεί ένα τετράγωνο πλευράς 30 cm [203].

Με το λογισμικό ANSYS Maxwell προσομοιώθηκαν όλα τα μαγνητικά πεδία. Με τον επιλύτη Magnetic Field Eddy Current solver υπολογίστηκαν οι τιμές του μαγνητικού πεδίου των εναλλασσόμενων ρευμάτων συχνότητας 50 Hz και 2 kHz [209], ενώ ο Magnetic Field Magnetostatic solver προσδιόρισε τις τιμές του μαγνητικού πεδίου του συνεχούς ρεύματος. Η συμφωνία μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν και τιμών, που μετρήθηκαν, είχαν απόκλιση από 3 % έως 6 %, συμπεριλαμβανομένης και της αβεβαιότητας του μαγνητόμετρου. Συνεπώς, η χρήση του λογισμικού ANSYS Maxwell για τον προσδιορισμό του μαγνητικού πεδίου κοντά στο καλώδιο τροφοδοσίας αποδείχθηκε δικαιολογημένη.

### **3.3.4. Θωράκιση καλωδίου**

Στο Σχήμα 3.18 απεικονίζεται η διάταξη της θωράκισης του καλωδίου ισχύος. Δεν μελετάται άλλου είδους μόνωση του αγωγού, καθώς η μελέτη αφορά τη θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου. Ο αγωγός τροφοδοσίας είναι καλυμμένος με ένα στρώμα πολυμερούς πάχους 5 mm, το οποίο θεωρείται κενό για τους σκοπούς της προσομοίωσης. Πάνω από το πολυμερές τοποθετείται ένας σωλήνας από μέταλλο ή μαγνητικό υλικό. Ένα δεύτερο μονωτικό στρώμα πάχους 5 mm σε συνδυασμό με έναν δεύτερο μεταλλικό ή μαγνητικό σωλήνα βελτιώνει την ικανότητα θωράκισης έναντι του μαγνητικού πεδίου. Μελετήθηκαν αρκετοί συνδυασμοί υλικών θωράκισης, όπως του χαλκού με

μαλακά μαγνητικά φύλλα, καθώς και σύνθετα υλικά σε μορφή νανοκρυσταλλικών νιφάδων και κόνεων. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ήταν 500 A, τιμή που αποτελεί ένα από τα δυσμενέστερα σενάρια τροφοδοσίας ή ασύρματης φόρτισης, ενώ οι συχνότητες ρεύματος που εξετάστηκαν ήταν 2 kHz και 50 Hz, καθώς και το συνεχές.

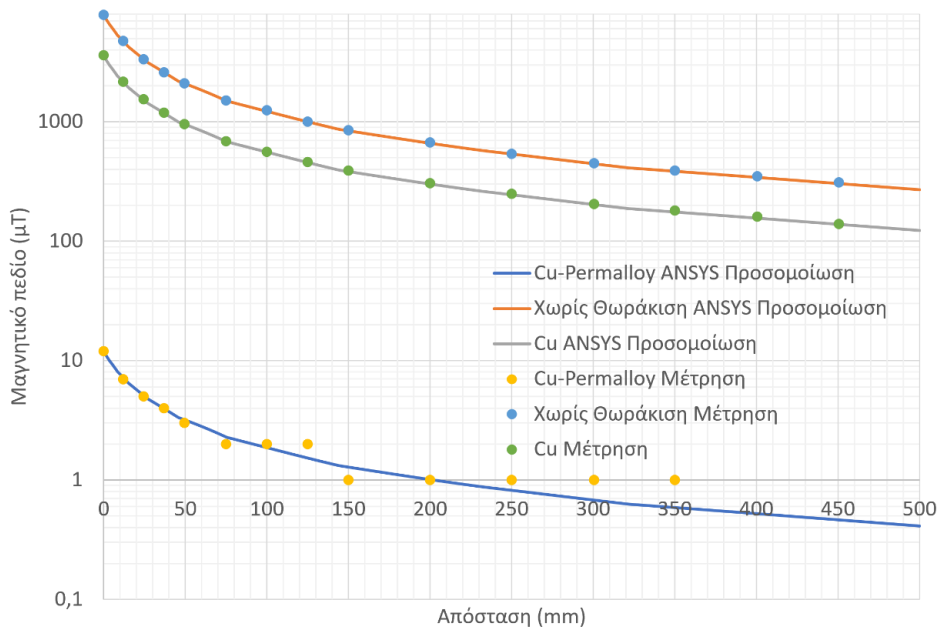
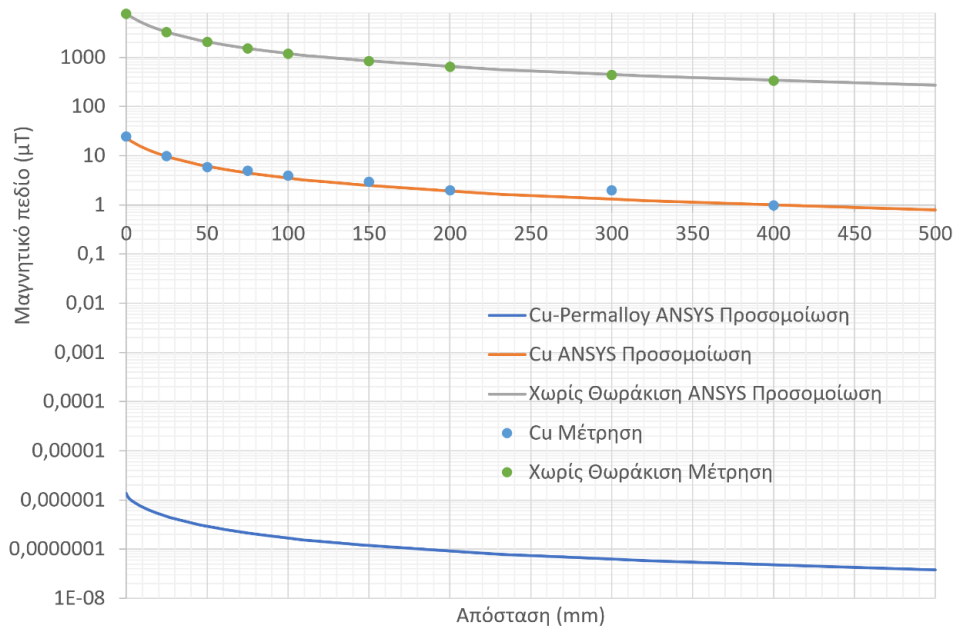


**Σχήμα 3.18.** Η σχηματική αναπαράσταση του καλωδίου τροφοδοσίας του ηλεκτρικού οχήματος, συμπεριλαμβανομένων των στρωμάτων μόνωσης, θωράκισης και συσκευασίας.

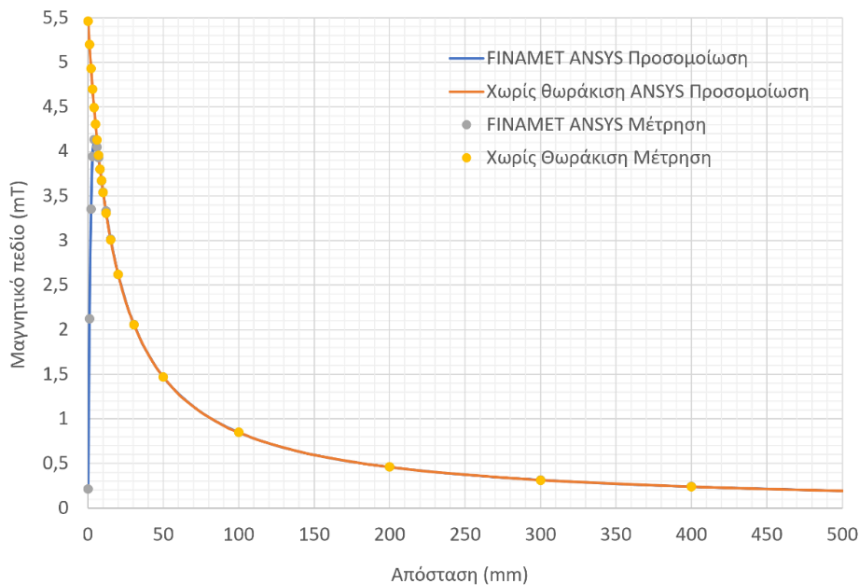
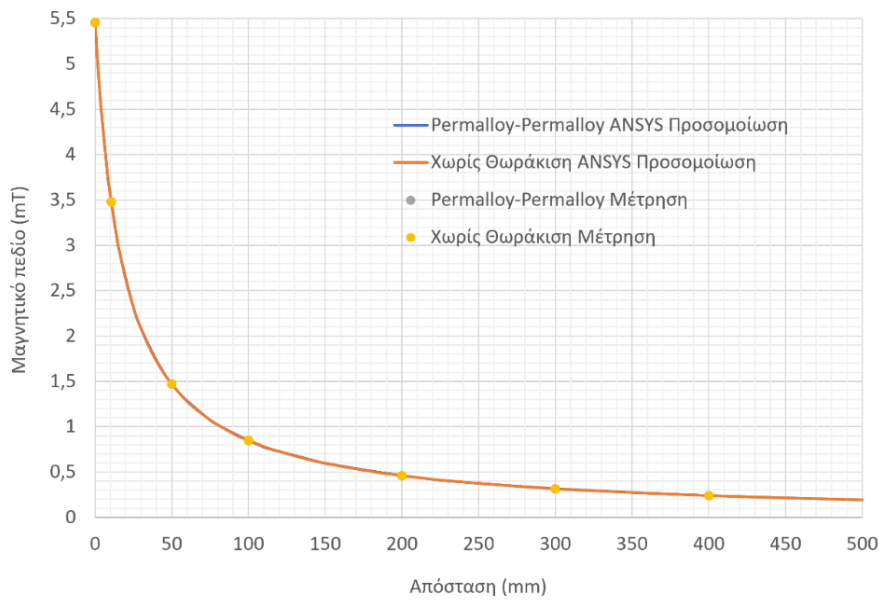
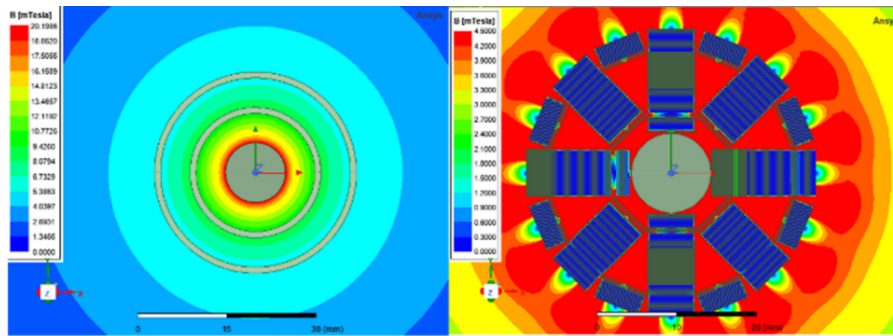
Για τη διέγερση με εναλλασσόμενο ρεύμα, συμπεριλαμβανομένης και της πολυφασματικής διέγερσης, τα βέλτιστα αποτελέσματα προέκυψαν για την περίπτωση της εσωτερικής θωράκισης από χαλκό και της εξωτερικής από Permalloy. Στην περίπτωση αυτή το μαγνητικό πεδίο μειώνεται σημαντικά και ελάχιστες τιμές του πεδίου μετρήθηκαν στο γύρω χώρο του καλωδίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μέτρησης για αυτή τη βέλτιστη περίπτωση θωράκισης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.19. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου για 50 Hz απουσία θωράκισης είναι ~7,8 mT, παρουσία του ενός μόνο φύλλου χαλκού (Cu) ~3,5 mT, ενώ για τον συνδυασμό του χαλκού (Cu) στο εσωτερικό και του Permalloy στο εξωτερικό ~0,012 mT. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην ίδια απόσταση από το κέντρο του καλωδίου τροφοδοσίας. Για την περίπτωση διέγερσης με 2 kHz, το πεδίο χωρίς θωράκιση είναι επίσης ~7,8 mT, για ένα μονό φύλλο χαλκού (Cu) ~0,023 mT, ενώ για την περίπτωση συνδυασμού του εσωτερικού φύλλου από χαλκό (Cu) και εξωτερικού από το Permalloy καθίσταται αμελητέο (της τάξης των pT), εκτός του εύρους μέτρησης του μαγνητόμετρου που χρησιμοποιήθηκε. Ωστόσο, για την περίπτωση διέγερσης με συνεχές ρεύμα τα ίδια υλικά θωράκισης γύρω από το καλώδιο δεν πρόσφεραν σημαντικά αποτελέσματα. Τα μεταλλικά φύλλα δεν μπορούν να προσφέρουν επαρκή θωράκιση λόγω δινορευμάτων, ενώ τα μαγνητικά υλικά φτάνουν γρήγορα στη κατάσταση κορεσμού. Συνεπώς, οι δυνατότητες θωράκισης με συνεχές ρεύμα διέγερσης της τάξης των 500 A είναι μηδαμινές (Σχήμα 3.20). Για τη διέγερση με συνεχές ρεύμα μελετήθηκαν διάφορα υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Για παράδειγμα, το permalloy ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) πάχους 1 mm καθώς και ισοδύναμου πάχους νιφάδες ή σκόνες από FINAMET και  $\text{Fe}_{88}\text{B}_{12}$  μέσα σε μια μήτρα ρητίνης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά ακόμη και για ρεύματα μικρότερης έντασης, για παράδειγμα έντασης 50 A. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των νανοκρυσταλλικών



νιφάδων ή κόνεων από FINAMET και  $Fe_{88}B_{12}$  προσφέρει καλύτερη θωράκιση σε σχέση με το κράμα  $Ni_3Fe$  (permalloy).



Σχήμα 3.19. Η θωράκιση για την περίπτωση διέγερσης με εναλλασσόμενο ρεύμα σε λογαριθμική κλίμακα. Τα μαγνητικά πεδία μετρήθηκαν στην ίδια απόσταση (100 mm από το κέντρο του καλωδίου τροφοδοσίας). Απουσία θωράκισης το μέγιστο πεδίο είναι ~7,8 mT. Το άνω διάγραμμα απεικονίζει την περίπτωση θωράκισης με ένα μόνο φύλλο χαλκού (Cu), το οποίο είναι κατάλληλο για τη συχνότητα των 2 kHz (οι μετρήσεις μηδενικού πλάτους δεν εμφανίζονται σε αυτό το γράφημα, καθώς είναι λογαριθμικό). Το κάτω διάγραμμα παριστάνει το μαγνητικό πεδίο για τη διέγερση με συχνότητα 50 Hz. Στην περίπτωση του μονού φύλλου χαλκού (Cu) το πεδίο είναι ~3,5 mT, ενώ ο συνδυασμός φύλλων χαλκού (Cu) και του Permalloy επιφέρει μείωση πεδίου έως ~0,01 mT και αποδεικνύεται να είναι αποτελεσματικός για τα πεδία των εναλλασσόμενων ρευμάτων.



**Σχήμα 3.20.** Η προσομοίωση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) διπλής θωράκισης (permalloy-permalloy) για την περίπτωση διέγερσης με συνεχές ρεύμα (πάνω αριστερά) και για τις νιφάδες από άμορφη ταινία με τη μορφή σιτβάδων (πάνω δεξιά). Τα υλικά είναι πολύ κοντά στο καλώδιο τροφοδοσίας και βρίσκονται σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού ακόμη και για τις μικρές τιμές έντασης του συνεχούς ρεύματος. Το μεσαίο γράφημα αντιστοιχεί στην περίπτωση διπλής θωράκισης (Permalloy-Permalloy), ενώ το κάτω στη θωράκιση με νιφάδες ή σκόνες από FINAMET.

### 3.3.5. Η προτεινόμενη μέθοδος θωράκισης

Εξαιτίας του χαμηλού κόστους, υιοθετήθηκε η διάταξη που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.21, όπου τα στρώματα θωράκισης αποτελούν μια επίπεδη επιφάνεια πάνω από το καλώδια τροφοδοσίας και κάτω από το δάπεδο του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

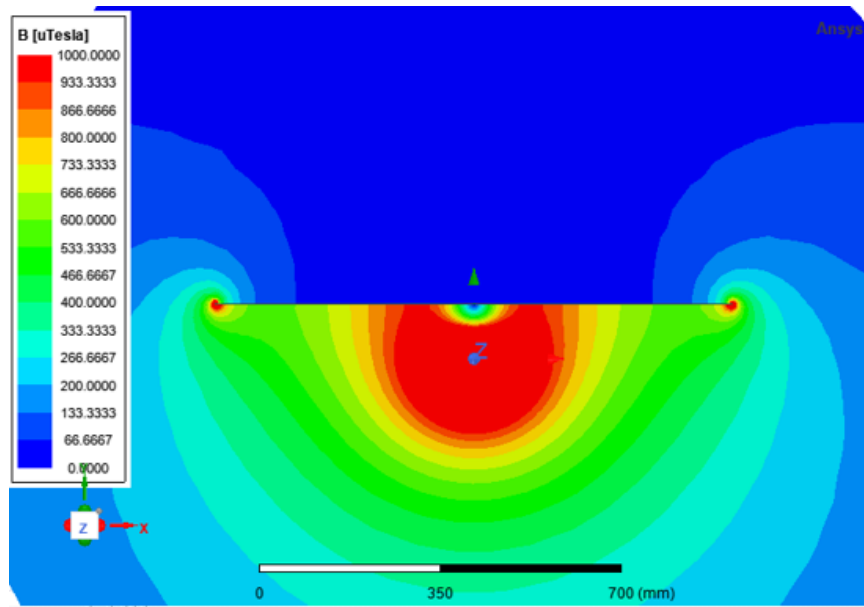


**Σχήμα 3.21. Η προτεινόμενη θωράκιση. Μια επίπεδη πλάκα μαγνητικής θωράκισης σε απόσταση 100 mm από το καλώδιο τροφοδοσίας, κάτω από την οποία υπάρχει χώρος για τις μπαταρίες ή τις κυψέλες καυσίμου.**

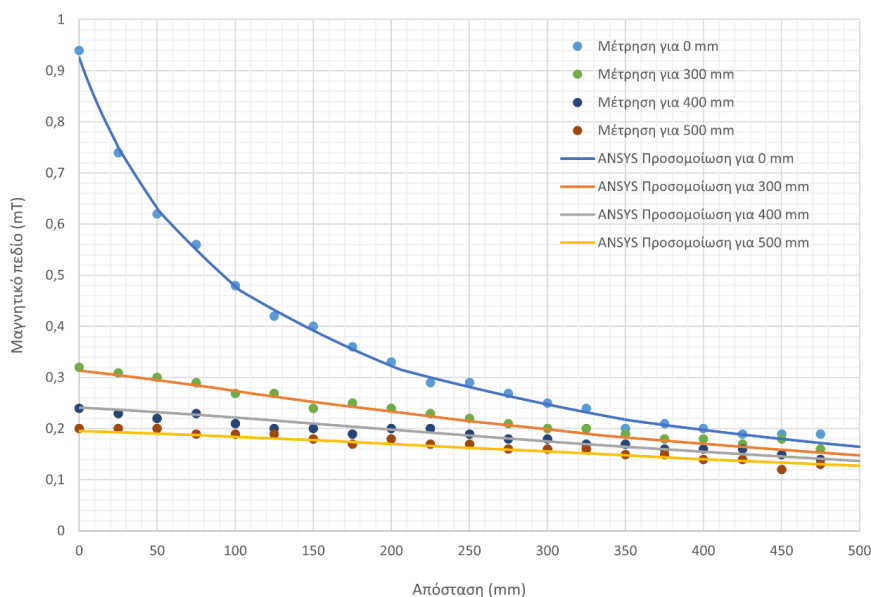
Μια τέτοια λύση βασίζεται στην θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου, που προτάθηκε στο παρελθόν [203,210], και προσφέρει αποτελεσματική θωράκιση έναντι ισχυρών μαγνητικών πεδίων, όταν τα υλικά μαγνητικής θωράκισης δεν τοποθετούνται κοντά στο καλώδιο τροφοδοσίας. Η τοποθέτηση αυτή επιτρέπει στα μαγνητικά υλικά να μη φτάνουν σε συνθήκες κορεσμού. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φύλλα Permalloy ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) πάχους 0,8 mm, ισοδύναμου πάχους νιφάδες ή σκόνες από FINAMET και από  $\text{Fe}_{88}\text{B}_{12}$  μέσα σε μια μήτρα ρητίνης. Μελετήθηκε, επίσης, ο χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (LCS) πάχους 0,8 mm, ο οποίος αποτελεί υλικό κατασκευής των αυτοκινήτων. Η ένταση του ρεύματος ήταν 500 A. Τα μέσα θωράκισης βρίσκονταν 100 mm πάνω από το καλώδιο τροφοδοσίας, συνεπώς κάτω από αυτά υπάρχει χώρος για τις μπαταρίες ή για τις κυψέλες καυσίμου.

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου ως αποτέλεσμα της ανάλυσης με την ΜΠΣ γύρω από το υλικό θωράκισης αποτελούμενο από νιφάδες ή σκόνες από FINAMET και το  $\text{Fe}_{88}\text{B}_{12}$  ισοδύναμου πάχους 1 mm. Από την κατανομή αυτή προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο πάνω από τα μέσα θωράκισης είναι σημαντικά μικρότερο, δηλαδή αρκετά κάτω από τα αυστηρά όρια των κατευθυντήριων γραμμών, που αναφέρονται στο πρώτο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 3.23 απεικονίζονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες είναι σχεδόν ανεξάρτητες από τη συχνότητα, από την προσομοίωση και τη μέτρηση, απουσία οποιουδήποτε υλικού θωράκισης για τις αποστάσεις σε οριζόντιο επίπεδο 0 mm, 300 mm, 400 mm και 500 mm από τον αγωγό. Ομοίως, στο σχήμα 3.24 παριστάνεται η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την απόσταση στην περιοχή πάνω από έναν φύλλο ανοπτημένου δομικού χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (LCS) πάχους 0.8mm που λειτουργεί ως θωράκιση για τις οριζόντιες θέσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για τις συχνότητες 2 kHz (Σχ. 3.24α), 50 Hz (Σχ. 3.24β) και για τη διέγερση συνεχούς ρεύματος 500 A (Σχ.

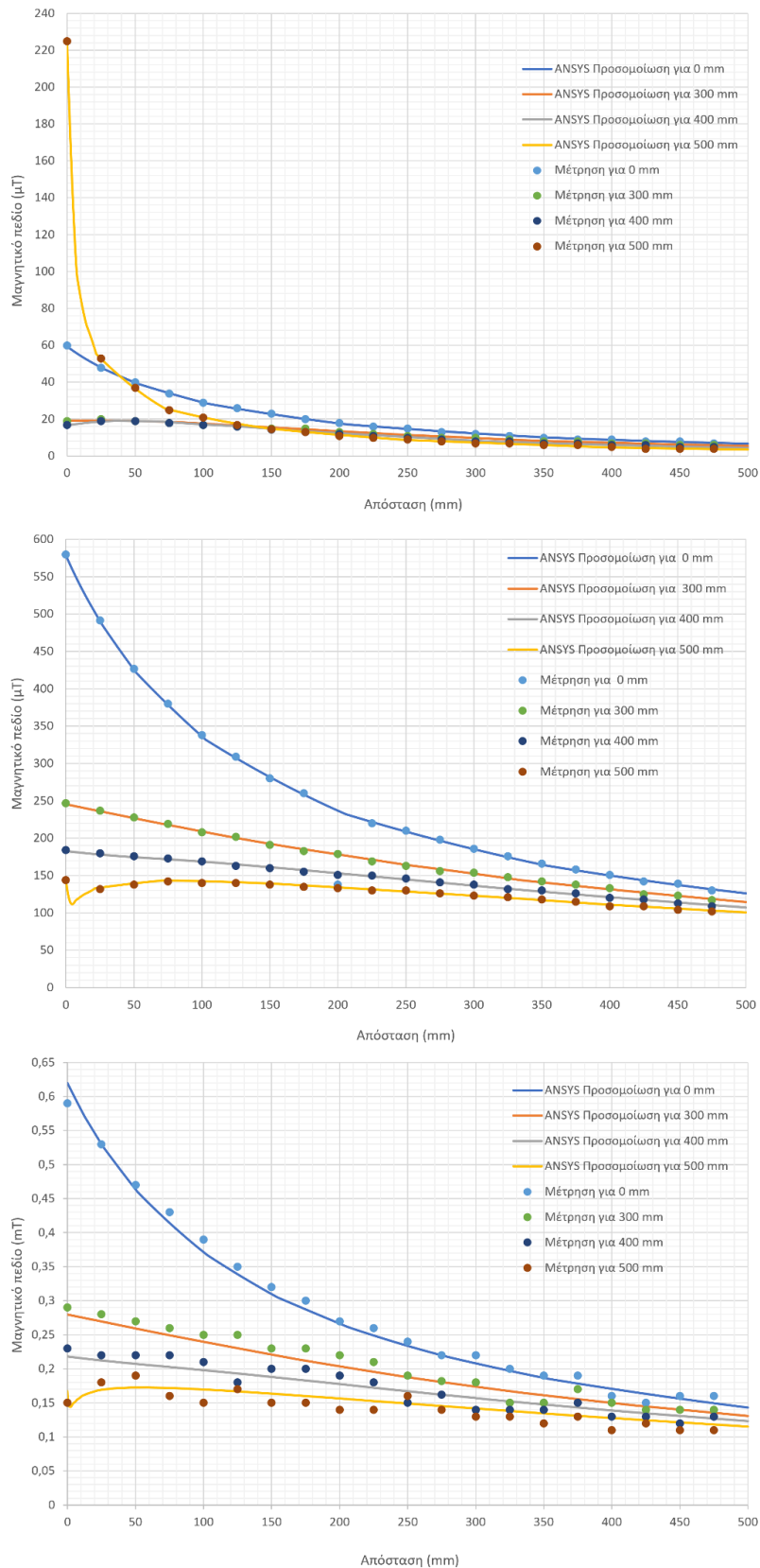
3.24γ). Τέλος, για τον χάλυβα AISI 1010 πάχους 0,8 mm, μονό φύλλο Permalloy πάχους 0,8 mm και διπλό φύλλο Permalloy πάχους 0,8 mm στα Σχήματα 3.25, 3.26 και 3.27. Η καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και της μέτρησης οφείλεται στην ομογένεια της αγωγιμότητας και της μαγνητικής διαπερατότητας σε όλη τη μάζα των μαγνητικών υλικών, καθώς και των φύλλων χαλκού (Cu). Όπως αναμενόταν, η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου απουσία οποιουδήποτε μέσου θωράκισης εντοπίστηκε στη θέση της ελάχιστης απόστασης από το καλώδιο τροφοδοσίας.



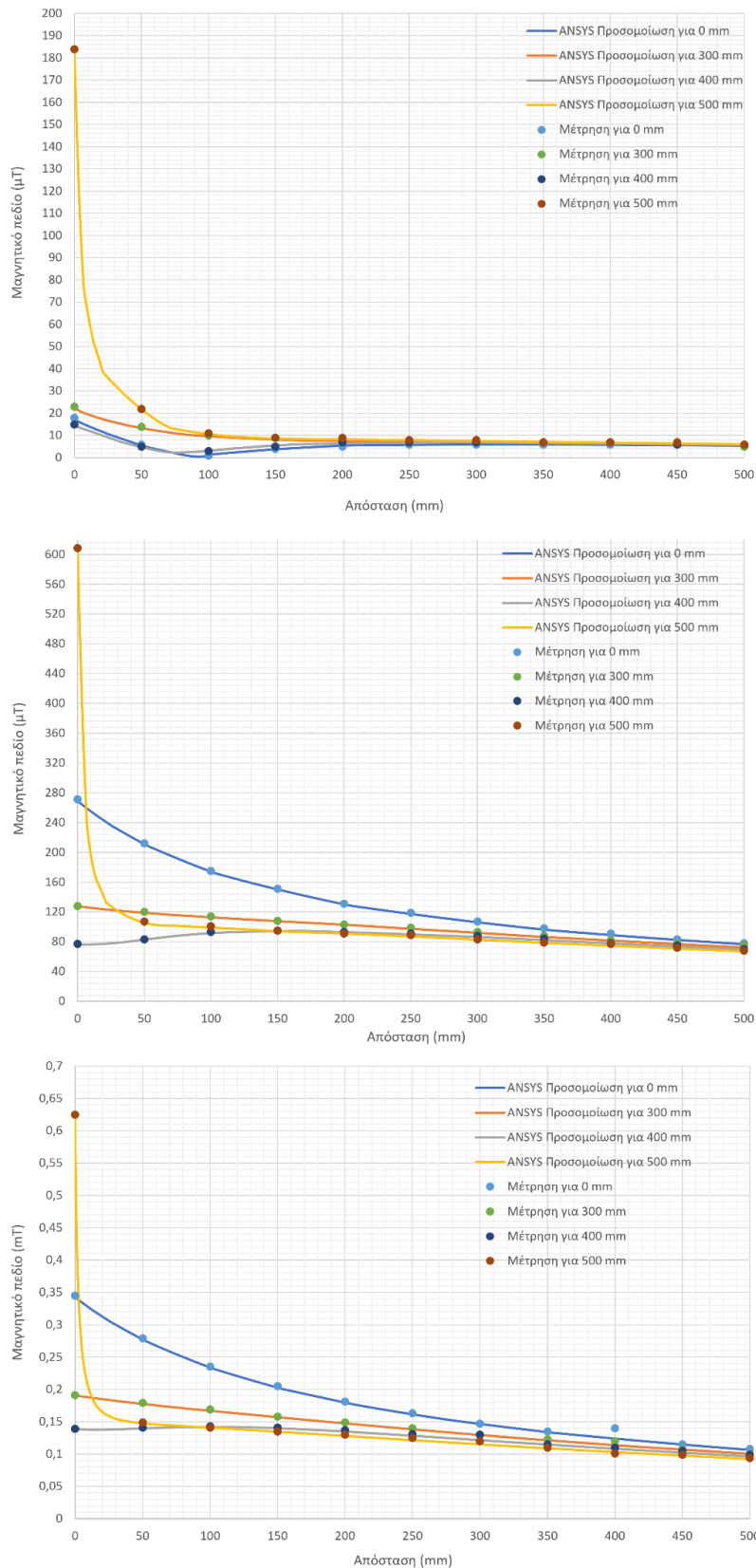
Σχήμα 3.22. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου γύρω από την επίπεδη μαγνητική θωράκιση, όπως περιγράφεται στο [203]. Ο αγωγός ισχύος ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα 500 A (μπλε κύκλος κοντά στο γράμμα Z) βρίσκεται σε απόσταση 100 mm από τη μαγνητική θωράκιση, η οποία παριστάνεται ως ευθεία γραμμή. Η ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου στις άκρες της θωράκισης είναι εμφανής.



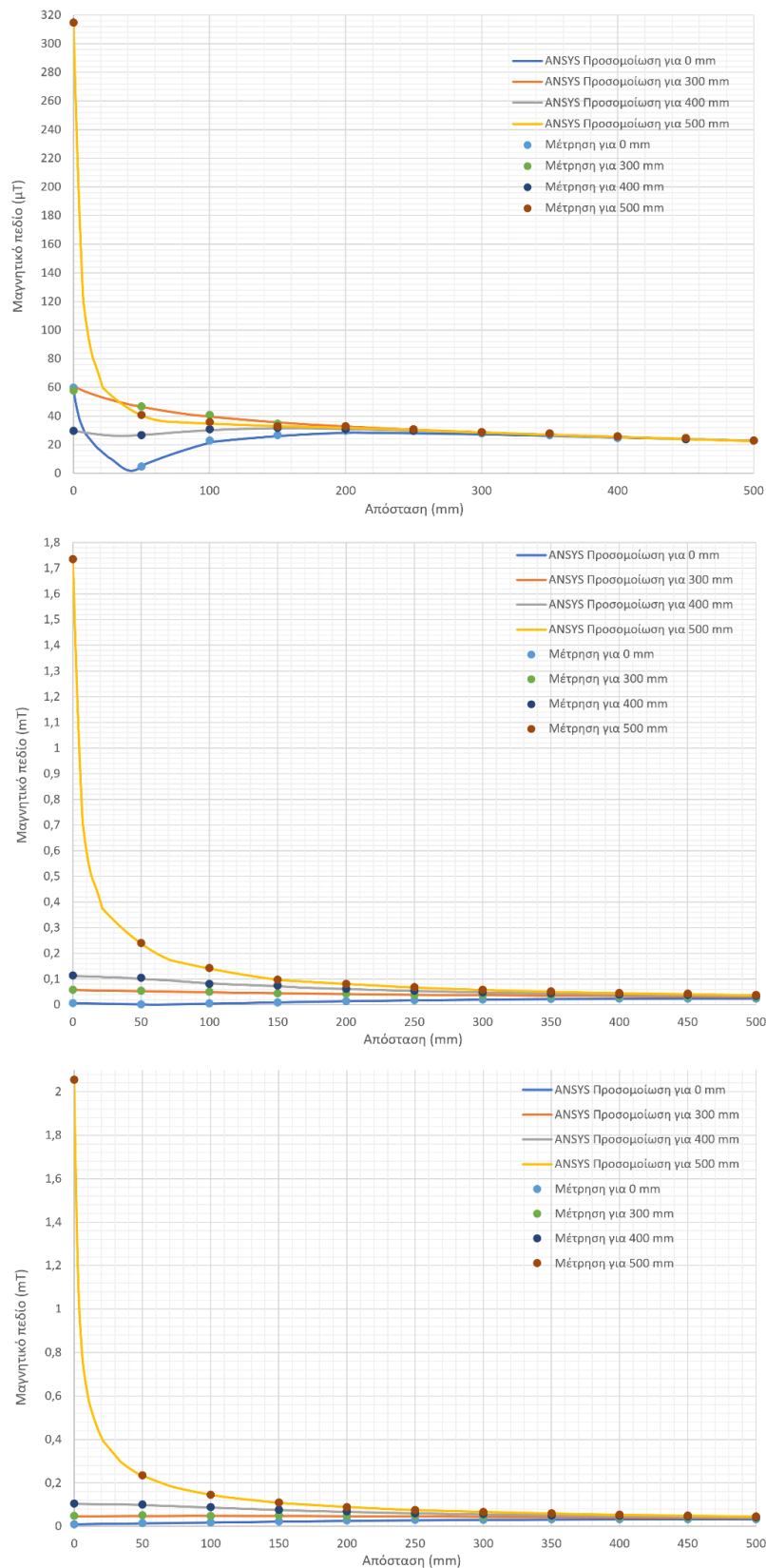
Σχήμα 3.23. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και πειραματικής μέτρησης απουσία οποιουδήποτε υλικού θωράκισης για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό.



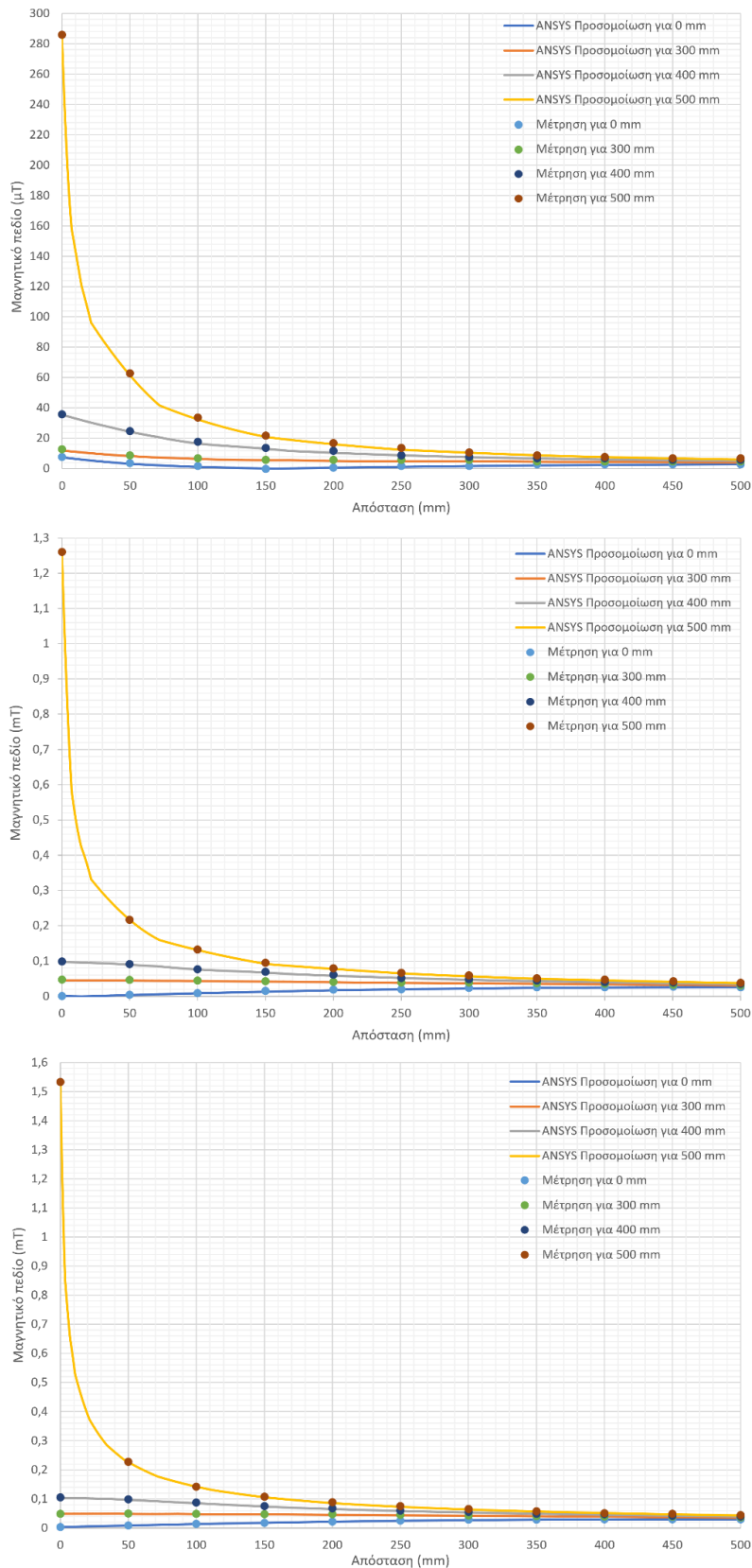
**Σχήμα 3.24.** Το μαγνητικού πεδίο ως συνάρτηση της απόστασης πάνω από ένα φύλλο κατεργασμένου δομικού χάλυβα (LCS) πάχους 0,8 mm που λειτουργεί ως θωράκιση για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για τις συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και για τη διέγερση συνεχούς ρεύματος ( $\gamma$ ).



**Σχήμα 3.25.** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρηση του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα χαλύβδινο (AISI 1010) φύλλο θωράκισης πάχους 0,8 mm για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για τις συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και διέγερση συνεχούς ( $\gamma$ ).



**Σχήμα 3.26.** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα μονό φύλλο Permalloy πάχους 0,8 mm για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό για συχνότητες 2 kHz ( $\alpha$ ), 50 Hz ( $\beta$ ) και για διέγερση συνεχούς ρεύματος ( $\gamma$ ).



**Σχήμα 3.27.** Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης του μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα διπλό στρώμα Permalloy πάχους 0,8 mm, για τις οριζόντιες αποστάσεις 0, 300, 400 και 500 mm από τον αγωγό, για 2 kHz (α) , 50 Hz (β) και για διέγερση συνεχούς ρεύματος (γ).



Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση του χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (LCS) είναι εκτός των ορίων των προδιαγραφών για τα 2 kHz και τα 50 Hz. Οι σχετικά καλές ιδιότητες θωράκισης του LCS μετρήθηκαν μετά την μαγνητική του ανόπτηση, διαδικασία η οποία βελτιστοποιεί τη μαγνητική του διαπερατότητα. Η μαγνητική ανόπτηση επιτυγχάνεται σε δύο στάδια:

1. Θερμική κατεργασία του υλικού σε θερμοκρασία  $\sim 1/3$  της θερμοκρασίας τήξης του για 1 ώρα σε αδρανές περιβάλλον και αργή απόψυξη ( $\sim 24$  ώρες) στο ίδιο περιβάλλον, και
2. Επανάληψη της ίδιας θερμικής κατεργασίας, παρουσία μαγνητικού πεδίου  $\sim 0,1$  T στον άξονα που απαιτείται η μαγνητική θωράκιση

Έτσι, ο χάλυβας LCS, που χρησιμοποιείται σαν δομικό στοιχείο του οχήματος, μπορεί να αποτελέσει και λειτουργικό στοιχείο, με την έννοια της χρήσης του ως υλικού θωράκισης.

Όμως, αξίζει να σημειωθεί ότι για τον χάλυβα AISI 1010, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ κάτω από τα όρια που ορίζονται από τους κανονισμούς που αναφέρονται στο πρώτο κεφάλαιο για όλες τις θέσεις εκτός από τα άκρα του φύλλου θωράκισης. Σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με 100 mm από το άκρο η κατανομή του πεδίου έχει αποδεκτές τιμές. Έχοντας υπόψη ότι η απόσταση του οδηγού και των επιβατών από το εξωτερικό μέρος της κάθε πόρτας του οχήματος είναι πάντα μεγαλύτερη από τα 100 mm, η περίπτωση αυτή αποτελεί λύση για τη θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου εντός της καμπίνας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Η μη μονοτονική απόκριση του μονού και του διπλού φύλλου Permalloy αποδίδεται στη σχετικά χαμηλή μαγνήτιση κορεσμού του υλικού αυτού, παρά την υψηλή μαγνητική διαπερατότητά του [211]. Από τα δεδομένα της προσομοίωσης και της πειραματικής μέτρησης γίνεται σαφές, ότι για τις αποστάσεις μεταξύ των καλωδίων τροφοδοσίας και του δαπέδου της καμπίνας ίσες και μεγαλύτερες από 100 mm, η χρήση των υλικών θωράκισης με υψηλές τιμές μαγνητικού κορεσμού και της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας αποτελεί μια καλή λύση στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου θωράκισης.

### **3.3.6. Συμπεράσματα για την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση**

Ο στόχος αυτού του Κεφαλαίου ήταν ο προσδιορισμός των κατάλληλων μέσων θωράκισης για τα καλώδια κίνησης και τροφοδοσίας ηλεκτρικών οχημάτων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο καταδεικνύουν ότι η ταυτόχρονη χρήση χαλκού και Permalloy εξασφαλίζει την επαρκή θωράκιση των καλωδίων κίνησης και τροφοδοσίας έναντι μαγνητικών πεδίων εναλλασσόμενων ρευμάτων συχνοτήτων 50 Hz έως 2 kHz.

Ωστόσο, η λύση αυτή δεν είναι εφικτή στην ασύρματη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, όταν το ηλεκτρικό όχημα είναι εν κινήσει. Για την περίπτωση αυτή, προτάθηκε το σύστημα θωράκισης πάνω από το δευτερεύον του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος. Αυτός ο χώρος μπορεί να περιορισθεί στα 10 mm-20 mm για την εγκατάσταση των διατάξεων, που προαναφέρθηκαν. Αυτός ο τύπος θωράκισης προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούνται ειδικά υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, που δεν έχουν υψηλό κόστος. Επίσης, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, ο χάλυβας LCS θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί μετά από μαγνητική ανόπτηση.

Μελλοντικές εργασίες βρίσκονται σε εξέλιξη για την εφαρμογή και των δύο προτεινόμενων μεθόδων θωράκισης για την καμπίνα του ηλεκτρικού οχήματος και άλλες εφαρμογές.

## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα και Προτάσεις Μελλοντικής Εργασίας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, πραγματεύεται τον υπολογισμό και την μέτρηση του μαγνητικού (και ηλεκτρικού) πεδίου, που προέρχεται από αγωγούς που προσομοιώνουν την φόρτιση και λειτουργία ηλεκτρικών οχημάτων σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες (50 ή 60 Hz έως και μερικά kHz), με τελικό στόχο τη θωράκιση με μαγνητικά υλικά έναντι των επιδράσεων αυτών.

Κύρια συμβολή της διατριβής είναι η χρήση μονών ή διπλών ελασμάτων μαγνητικών υλικών ως επιφανειών θωράκισης, που τοποθετούνται σε απόσταση 10-20 cm από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να μειώνουν το μαγνητικό (και ηλεκτρικό) πεδίο στην καμπίνα επιβατών του ηλεκτρικού οχήματος. Αυτά τα μαγνητικά υλικά μπορεί να είναι είτε φερριτικοί ή ηλεκτρικοί χάλυβες, είτε επιστρώσεις μαλακών μαγνητικών κραμάτων (permalloy) σε χάλκινες επιφάνειες, είτε άμορφα και ναοκρυσταλλικά υλικά, τα οποία προσφέρουν την βέλτιστη ηλεκτρομαγνητική θωράκιση. Στο πλαίσιο της διατριβής εξετάστηκαν συνδιασμοί υλικών ώστε να καταλήξουμε στην πρόταση υιοθέτησης κάποιο από αυτών.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η κλασική λαμαρίνα του αυτοκινήτου (low carbon steel – LCS), που συνεχίζει και χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένους τύπους ηλεκτρικών οχημάτων, μπορεί να αποτελέσει μια λύση θωράκισης, με την προϋπόθεση ότι θα υποστεί θερμική αποστατική ανόπτηση και εν συνεχεία μαγνητική ανόπτηση με αποθέρμανση παρουσία μαγνητικού πεδίου, με αποτελέσματα που είναι σχετικά ικανοποιητικά, αλλά όχι βέλτιστα σε σχέση με τα προαναφερθέντα μαλακά μαγνητικά υλικά. Οπότε μπορεί να εξεταστεί αν η προτεινόμενη λύση αποτελεί μια οικονομική λύση για την μείωση των επιπτώσεων του μαγνητικού πεδίου.

Σημαντικό αποτέλεσμα της διατριβής αποτέλεσε η πρόταση συγκεκριμένων τεχνικών μέτρησης λεπτών μαγνητικών υλικών, όπως αυτή της χρήσης αισθητήρων Hall, που επιτρέπει την ταχεία και αξιόπιστη μέτρηση μαγνητικών χαρακτηριστικών μαγνητικών υμενίων πάνω σε μη μαγνητικά υλικά. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάσθηκαν οικονομικά συμφέρουσες λύσεις για την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων μετρήσεων. Γεγονός, που μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων υλικών με ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά

Τέλος, παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των υπολογισμών μαγνητικής και ηλεκτρικής θωράκισης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων *ANSYS Maxwell 2D and 3D, Release 17.1 Academic* και των πειραματικών μετρήσεων, γεγονός που επιβεβαιώνει την καταλληλότητα των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο ως άνω λογισμικό. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε πρώτα τις προσομοιώσεις και να κάνουμε λιγότερες μετρήσεις πραγματοποιώντας οικονομία σε πόρους και σε χρόνο.

Τα ως άνω αποτελέσματα επιτρέπουν τον ισχυρισμό επίτευξης θωράκισης έναντι μαγνητικού (και ηλεκτρικού) πεδίου σε ηλεκτρικά οχήματα με επίπεδο τεχνικής ετοιμότητας 3 (TRL 3: in principle verification of the methodology in the lab).

Η αποδοχή των αποτελεσμάτων από δύο δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά, ένα εκ των οποίων στο *Energies* [203] του MDPI και το άλλο στο *IEEE Transactions on Magnetics* [210], συμβάλλει στην σχετική έρευνα. Στην δεύτερη δημοσίευση αναλύεται η μαγνητική θωράκιση σε ηλεκτρικό όχημα, που πρακτικά συνεισφέρει σε τεχνικές θωράκισης ασύρματης φόρτισης, ενώ στη πρώτη δημοσίευση αναλύεται η θωράκιση κτηρίου, που πρακτικά προσομοιώνει την καλωδιωμένη ηλεκτρική φόρτιση από σταθερό σταθμό, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσης διατριβής.

Εργασία έχει υποβληθεί σε περιοδικό του MDPI [ ] η οποία συνοψίζει την μελέτη μαλακών μαγνητικών υλικών θωράκισης από μαγνητικό πεδίο. Επίσης, έχει εγκριθεί προφορική παρουσίαση στο InterMag 2023 [ ], Sendai που αφορά στην θωράκιση με LCS μετά από θερμική και μαγνητική ανόπτηση, με προοπτική την υποβολή ανεξάρτητης εργασίας στο IEEE Transactions of Magnetics. Επίσης, προετοιμάζονται παρουσιάσεις στο JAPMED 2023, Olympiad for engineering technology 2023, SMM 2023, και άλλα συνέδρια.

Όλα τα παραπάνω πεδία έρευνας, και συγκεκριμένα η ανάπτυξη μαλακών μαγνητικών υλικών και τεχνικών θωράκισης, καθώς επίσης και η προσομοίωση της λειτουργίας τους μπορούν και πρέπει να εξελιχθούν στην συνέχεια, σε συνεργασία με βιομηχανία κατασκευής εξαρτημάτων ηλεκτρικών οχημάτων ή με αυτοκινητοβιομηχανία που σχεδιάζει και κατασκευάζει ηλεκτρικά οχήματα, με τους εξής στόχους:

- επίτευξη TRL 7 στα υλικά και τεχνολογίες μαγνητικής θωράκισης που παρουσιάστηκαν (TRL 7: verification of the methodology in the field)
- ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνικών μαγνητικής θωράκισης, όπως για παράδειγμα υλικά υψηλής εντροπίας (πάνω από 7 στοιχεία στο κράμα του μαγνητικού υλικού) και
- ενδεχόμενη επανασχεδίαση της διάταξης των υποσυστημάτων του ηλεκτρικού οχήματος, που σχετίζονται με την φόρτιση και την θωράκιση.

Εκτός των θεμάτων θωράκισης, από την διατριβή προέκυψε μεγάλο ενδιαφέρον στα θέματα της μελέτης της ασύρματης φόρτισης σε στάση αλλά και σε κίνηση. Έτσι, σαν περαιτέρω ερευνητική δουλειά, προτείνονται:

- η μελέτη διαφορετικών τύπων μετασχηματιστών σύζευξης με διάφορα μαγνητικά υλικά μετασχηματιστή, όπως φερρίτες και νανοκόκκους Fe-Co καλυμμένους με οξείδιο για ελαχιστοποίηση απωλειών με στόχο την βέλτιστη σύζευξη πρωτεύοντος – δευτερεύοντος.
- η μελέτη διαφόρων γεωμετριών και υλικών θωράκισης τόσο στο πρωτεύον και δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης, όσο και στο τμήμα του ηλεκτρικού οχήματος, πάνω από το δευτερεύον του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης.
- η πιλοτική εφαρμογή αυτών των μελετών σε ηλεκτρικό όχημα (για την περίπτωση αυτή, προτείνεται η λύση της μετατροπής συμβατικού οχήματος σε ηλεκτρικό, έτσι ώστε μελετηθούν πλείστες εφαρμογές σε συνθήκες πεδίου).

Οι προτεινόμενες μελλοντικές εργασίες αποτελούν την φυσική συνέχεια της διδακτορικής διατριβής και εκτιμάται ότι θα ενισχύσουν την διείδυση της Σχολής ΗΜΜΥ στην ηλεκτροκίνηση και συγκεκριμένα στα υλικά για ηλεκτρικά οχήματα.

## Κεφάλαιο 6. Αναφορές

1. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields>
2. ICNIRP, EMF guidelines, Health Physics 74, pp. 494-522, 1998.
3. Dlugosz T., Influence of quasi-spherical polarization on results of bioelectromagnetic studies, Electromagnetic Biology and Medicine, 34(4), pp. 376-380, 2015.
4. Sokal P., Świtońska M., Kierońska S., Rudaś M., Harat M., The impact of electrical stimulation of the brain and spinal cord on iron and calcium-phosphate metabolism, Brain Sciences, 11(2),156, pp. 1-14, 2021.
5. Michaelson S. M., Interaction of unmodulated radiofrequency fields with living matter: Experimental results, Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, Boca Raton FL, pp. 339-423, 1986.
6. McRee D. I., Wachtel H., The effects of microwave radiation on the vitality of isolated frog sciatic nerves. Radiation research, 82(3), pp. 536-546, 1980.
7. McRee D. I., Wachtel H., Pulse microwave effects on nerve vitality, Radiation research, 91(1), pp. 212-218, 1982.
8. Wachtel H., Seaman R., Joines W., Effects of low-intensity microwaves on isolated neurons, Annals of the New York Academy of Sciences, 247(1), pp. 46-62, 1975.
9. Chou C. K., Guy A.W., Effect of 2450 MHz microwave fields on peripheral nerves, Digest of Technical Papers, IEEE International Microwave Symposium, pp. 310-318, 1973.
10. Courtney K. R., Lin J. C., Guy A. W., Chou C., Microwave effect on rabbit superior cervical ganglion, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 23(10), pp. 809-813, 1975.
11. Liddle C. G., Blackman C. F., Endocrine, physiological and biochemical effects, Biological Effects of Radiofrequency Radiation, Report No. EPA-600/8-83-026F, United States Environmental Protection Agency, pp. 579-593, 1984.
12. Clapman R. M., Cain C. A., Absence of heart-rate effects in isolated frog heart irradiated with pulse modulated microwave energy, Journal of Microwave Power, 10(4), pp. 412-416, 1975.
13. Yee K. C., Chou C. K., Guy A. W., Effect of microwave radiation on the beating rate of isolated frog hearts, Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association, 5(2), pp. 263-270, 1984.
14. Yee K. C., Chou C. K., Guy A. W., Influence of microwaves on the beating rate of isolated rat hearts, Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association, 9(2), pp. 175-181, 1988.
15. World Health Organization Environmental Health Criteria, Electromagnetic Fields (300 Hz-300 GHz), Geneva, Switzerland, WHO, 1991.

16. Schwartz J. L., House D. E., Mealing G. A., Exposure of frog hearts to CW or amplitude-modulated VHF fields: Selective efflux of calcium ions at 16 Hz, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 11(4), pp. 349-358, 1990.
17. Johnson C. C., Guy A. W., Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems, *Proceedings of the IEEE*, 60(6), pp. 692-718, 1972.
18. Servantie B., Servantie A. M., Etienne J., Synchronization of cortical neurons by a pulsed microwave field as evidenced by spectral analysis of electrocorticograms from the white rat, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 247(1), pp. 82-86, 1975.
19. Lai H., Carino M. A., Horita A., Guy A. W., Low-level microwave irradiation and central cholinergic activity: A dose-response study, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 10(2), pp. 203-208, 1989.
20. Bawin S. M., Gavalas-Medici R. J., Adey W. R., Effects of modulated very high frequency fields on specific brain rhythms in cats. *Brain Research*, 58(2), pp. 365-384, 1973.
21. Adey W. R., Bawin S. M., Lawrence A. F., Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 3(3), pp. 295-307, 1982.
22. Merritt J. H., Chamness A. F., Shelton W. W., Attempts to alter  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  binding to brain tissue with pulse-modulated microwave energy, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 3(4), pp. 475-478, 1982.
23. Lin J. C., Michaelson S. M., *Biological effects and health implications of radiofrequency radiation*, Springer Science & Business Media, 2013.
24. Justesen D. R., Microwave irradiation and the blood-brain barrier, *Proceedings of the IEEE*, 68(1), pp. 60-67, 1980.
25. Williams W. M., Lu S. T., Del Cerro M., Michaelson S.M., Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. D. Brain temperature and blood-brain barrier permeability to hydrophilic tracers, *Brain Research*, 319(2), pp. 191-212, 1984.
26. Anderson L. E., Phillips R. D., Biological effects of electric fields: an overview, *Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields*, pp. 345-378, 1985.
27. Tenforde T. S., Budinger T. F., Biological effects and physical safety aspects of NMR imaging and in vivo spectroscopy, *NMR in Medicine: Instrumentation and Clinical Applications, Medical Physics Monograph No. 14, American Association of Physicists in Medicine*, pp. 493-548, 1986.
28. Wachtel H., Firing-pattern changes and transmembrane currents produced by low frequency fields in pacemaker neurons, *Proceedings of the 18th Annual Hansford Life Science Symposium, Technical Information Center, US Department of Energy, Richland*, pp. 132-147, 1978.

29. Graham C., Cook M. R., Cohen H. D., Immunological and Biochemical Effects of 60-Hz Electric and Magnetic Fields in Humans, Midwest Research Institute Final Report for Contract No. DE-FCO1-84-CE76246 (Order No. DE90006671), U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, 1990.
30. Carpenter R. L., Ummersen C. A. V., The action of microwave radiation on the eye, *Journal of Microwave Power*, 3(1), 3-19, 1968.
31. Guy A. W., Lin J. C., Kramar P. O., Emery A. F., Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 23(6), pp. 492-498, 1975.
32. Kramar P., Harris C., Emery A. F., Guy A. W., Acute microwave irradiation and cataract formation in rabbits and monkeys, *Journal of microwave power*, 13(3), pp. 239-249, 1978.
33. Monahan J. C., Kues H. A., McLeod D. S., D'Anna S. A., Luty, G. A., Lowering of microwave exposure threshold for induction of primate ocular effects by timolol maleate, Tenth Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Abstract B-07-1, p. 48, 1988.
34. Tenforde T. S., Biological effects of extremely low frequency magnetic fields, *Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: The Question of Cancer*, Battelle Press, pp. 291-315, 1990.
35. Lövsund P., Öberg P. Å., Nilsson S. E. G., Reuter T., Magnetophosphenes: a quantitative analysis of thresholds, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 18(3), pp. 326-334, 1980.
36. Lövsund P., Öberg P. Å., Nilsson S. E. G., Magneto- and electrophosphenes: a comparative study, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 18(6), pp. 758-764, 1980.
37. Silny J., The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism, *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields*, Munich, Germany, MMV Medizin Verlag, pp. 105-112, 1986.
38. Lotz W. G., Michaelson S. M., Temperature and corticosterone relationships in microwave-exposed rats, *Journal of applied physiology*, 44(3), pp. 438-445, 1978.
39. Lotz W. G., Michaelson S. M., Effects of hypophysectomy and dexamethasone on rat adrenal response to microwaves, *Journal of Applied Physiology*, 47(6), pp. 1284-1288, 1979.
40. Lu S. T., Lotz W. G., Michaelson S. M., Advances in microwave-induced neuroendocrine effects: the concept of stress, *Proceedings of the IEEE*, 68(1), pp. 73-77, 1980.
41. Lu S. T., Lebeda N., Pettit S., Michaelson S. M., Delineating acute neuroendocrine responses in microwave-exposed rats, *Journal of Applied Physiology*, 48(6), pp. 927-932, 1980.
42. Gann, D. S., Biological effects of exposure to high voltage electric fields, final report, *Electric Power Research Institute report RP98-02*, Electric Power Research Institute, pp. 6-22, 1976.
43. Free M. J., Kaune W. T., Phillips R. D., Cheng H. C. Endocrinological effects of strong 60-Hz electric fields on rats, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 2(2), pp. 105-121, 1981.
44. Lymangrover J. R., Keku E., Seto Y. J., 60-Hz electric field alters the steroidogenic response of rat adrenal tissue, *in vitro*, *Life Sciences*, 32(7), pp. 691-696, 1983.

45. Wolpaw J. R., Seegal R. F., Satya-Murti S. Chronic effects of 60-Hz electric and magnetic fields on primate central system function, Technical report prepared for the New York State Power Lines Project. Wadsworth Labs, E-297, 1987.
46. Wilson B. W., Anderson L. E., Ian Hilton D., Phillips R. D., Chronic exposure to 60-Hz electric fields: Effects on pineal function in the rat, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 2(4), pp. 371-380, 1981.
47. Lerchl A., Nonaka K. O., Stokkan K. A., Reiter R. J., Marked rapid alterations in nocturnal pineal serotonin metabolism in mice and rats exposed to weak intermittent magnetic fields, *Biochemical and biophysical research communications*, 169(1), pp. 102-108, 1990.
48. Tamarkin L., Baird C. J., Almeida O. F. X., Melatonin: a coordinating signal for mammalian reproduction?, *Science*, 227(4688), pp. 714-720, 1985.
49. Blask D. E., Hill S. M. Effects of melatonin on cancer: studies on MCF-7 human breast cancer cells in culture, *Journal of neural transmission, Supplementum*, 21, pp. 433-449, 1986.
50. Stevens R. G., Electric power use and breast cancer: a hypothesis, *American Journal of Epidemiology*, 125(4), pp. 556-561, 1987.
51. Roberts N. J., Lu S. T., Michaelson S. M., Human leukocyte functions and the US safety standard for exposure to radio-frequency radiation, *Science*, 220(4594), pp. 318-320, 1983.
52. Roberts N. J., Michaelson S. M., Lu S. T., Exposure of human mononuclear leukocytes to microwave energy pulse-modulated at 16 or 60 Hz, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 32(8), pp. 803-808, 1984.
53. Smialowicz R. J., Riddle M. M., Brugnolotti P. L., Sperazza J. M., Kinn J. B., Evaluation of lymphocyte function in mice exposed to 2450 MHz (CW) microwaves, *Electromagnetic Fields in Biological Systems*, pp. 122-152, 1979.
54. Yang H. K., Cain C. A., Lockwood J., Tompkins W. A. F., Effects of microwave exposure on the hamster immune system. I. Natural killer cell activity, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 4(2), pp. 123-139, 1983.
55. Rao G. R., Cain C. A., Lockwood J., Tompkins W. A. F., Effects of microwave exposure on the hamster immune system. II. Peritoneal macrophage function, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 4(2), pp. 141-155, 1983.
56. Liburdy R. P., Radiofrequency radiation alters the immune system: Modulation of T-and B-lymphocyte levels and cell-mediated immunocompetence by hyperthermic radiation, *Radiation research*, 77(1), pp. 34-46, 1979.
57. Liburdy R. P., Radiofrequency radiation alters the immune system: II. Modulation of in vivo lymphocyte circulation, *Radiation research*, 83(1), pp. 66-73, 1980.
58. Smialowicz R. J., Hematologic and immunologic effects of extremely low frequency electromagnetic fields, *Biological and Human Health Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*, American Institute of Biological Sciences, pp. 203-225, 1985.

59. Conti P., Gigante G. E., Cifone M. G., Alesse E., Ianni G., Reale M., Angeletti P. U., Reduced mitogenic stimulation of human lymphocytes by extremely low frequency electromagnetic fields., *FEBS letters*, 162(1), pp. 156-160, 1983.
60. Conti P., Gigante G. E., Cifone M. G., Alesse E., Fieschi C., Bologna M., Angeletti P. U., Mitogen dose-dependent effect of weak pulsed electromagnetic field on lymphocyte blastogenesis, *FEBS letters*, 199(1), pp. 130-134, 1986.
61. Lyle D. B., Ayotte R. D., Sheppard A. R., Adey W. R., Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to 60-Hz sinusoidal electric fields, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 9(3), pp. 303-313, 1988.
62. Winters, W. D., Biological Functions of Immunologically Reactive Human and Canine Cells Influenced by In Vitro Exposure to 60-Hz Electric and Magnetic Fields, Technical report prepared for the New York State Power Lines Project, Wadsworth Laboratories (E-297), 1987.
63. Smialowicz R. J., Hematologic and immunologic effects, *Biological Effects of Radiofrequency Radiation*, U.S. Environmental Protection Agency Report No. EPA-600/8-83-026F, Health Effects Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, p. 513-528, 1984.
64. McRee D. I., Galvin M. J., Mitchell C. L., Microwave effects on the cardiovascular system: A model for studying the responsivity of the automatic nervous system to microwaves, *Electromagnetic Fields and Neurobehavioral Function*, Alan R. Liss, pp. 153-177, 1988.
65. Liburdy R. P., Effects of radiofrequency radiation on inflammation, *Radio Science*, 12, pp. 179-183, 1977.
66. Huang A. T. F., Mold N. G., Immunologic and hematopoietic alterations by 2,450-MHz electromagnetic radiation, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 1(1), pp. 77-87, 1980.
67. Ragan H. A., Phillips R. D., Buschbom R. L., Busch R. H., Morris J. E., Hematologic and immunologic effects of pulsed microwaves in mice, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 4(4), pp. 383-396, 1983.
68. Phillips R. D., Hunt E. L., Castro R. D., King N. W., Thermoregulatory, metabolic, and cardiovascular response of rats to microwaves, *Journal of Applied Physiology*, 38(4), pp. 630-635, 1975.
69. Chou C. K., Han L. F., Guy A. W., Microwave Radiation and Heat-Beat Rate of Rabbits, *Journal of Microwave Power*, 15(2), 88-93, 1980.
70. Tenforde T. S., Interaction of ELF magnetic fields with living matter, *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 197-225, 1986.
71. Hilton D. I., Phillips R. D., Growth and metabolism of rodents exposed to 60-Hz electric fields, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical*



- Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association, 2(4), pp. 381-390, 1981.
72. Hauf R., Hematological and biochemical effects of ELF fields in man: Laboratory experiments, *Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields*, Plenum Press, pp. 525-537, 1985.
  73. Sander R., Brinkmann J., Kuhne B., Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields, CIGRE, Paper No. 36-01, 1982.
  74. Prausnitz S., Sutsskind C., Effects of chronic microwave irradiation on mice, *IRE Transactions on Bio-Medical Electronics*, 9(2), pp. 104-108, 1962.
  75. Heynick L. N., Critique of the literature on bioeffects of radiofrequency radiation: a comprehensive review pertinent to Air Force operations, USAFSAM-TR-87-3, 1987.
  76. Roberts, N. J., Michaelson S. M., Microwaves and neoplasia in mice: Analysis of a reported risk, *Health Physics*, 44, pp. 430-433, 1983.
  77. Spalding J. F., Freyman R. W., Holland L. M., Effects of 800-MHz electromagnetic radiation on body weight, activity, hematopoiesis and life span in mice, *Health Physics*, 20(4), pp. 421-424, 1971.
  78. Kunz L. L., Johnson R. B., Thompson D., Crowley J., Chou C.-K., Guy A.W., Effects of long-term low-level longevity, cause of death and histopathological findings, University of Washington, USAMSAM-TR-85-11-8, 1985.
  79. Szmigielski S., Szudzinski A., Pietraszek A., Bielec M., Janiak M., Wrembel J. K., Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 3(2), pp. 179-191, 1982.
  80. Santini R., Hosni M., Pacheco H., Deschaux P., B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation, *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*, 9(1), pp. 105-107, 1988.
  81. Roszkowski W., Wrembel J. K., Roszkowski K., Janiak M., Szmigielski S., Does whole-body hyperthermia therapy involve participation of the immune system?, *International Journal of Cancer*, 25(2), pp. 289-292, 1980.
  82. Preskorn S. H., Edwards W. D., Justesen D. R., Retarded tumor growth and greater longevity in mice after fetal irradiation by 2450-MHz microwaves, *Journal of Surgical Oncology*, 10(6), pp. 483-492, 1978.
  83. McLean J. R., Stuchly M. A., Mitchel R. E., Wilkinson D., Yang H., Goddard M., ... & Morrison D., Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response, *Bioelectromagnetics*, 12(5), pp. 273-287, 1991.
  84. Beniashvili D. Sh., Bilanishvili V. G., Menabde M. Z., Low-frequency electromagnetic radiation enhances the induction of rat mammary tumors by nitrosomethyl urea, *Cancer Letters*, 61(1), pp.75-79, 1991.

85. Dietrich, F. M., Jacobs, W. L., Survey and assessment of electric and magnetic field (EMF) public exposure in the transportation environment (No. PB-99-130908/XAB), Electric Research and Management, Inc., State College, PA (United States); John A. Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA (United States), 1999.
86. Yang L., Lu M., Lin J., Li C., Zhang C., Lai Z., Wu T., Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3765, 2019.
87. Jalilian H., Najafi K., Monazzam M. R., Khosravi Y., Zamanian Z., Assessment of static and extremely low-frequency magnetic fields in the electric-powered trains, *International Journal of Occupational Hygiene*, 9(2), pp.105-112, 2017.
88. Vassilev A., Ferber A., Wehrmann C., Pinaud O., Schilling M., Ruddle A. R., Magnetic field exposure assessment in electric vehicles, *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 57(1), pp.35-43, 2015.
89. Enegbuma N.A., Kim S., Analyzing DC and AC Magnetic Field Intensity, Distribution, and Relationship in a Hyundai IONIQ 2016 Electric Vehicle, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 21 (4), pp. 282-290, 2021.
90. Monazzam M., Jalilian H., Najafi K., Khosravi Y., Zokaie M., Zamanian Z., Measurement of train's driver occupational exposure to static magnetic field, *Occupational Medicine Quarterly Journal*, 9(2), pp.40-49, 2017.
91. Sarimov R., Binhi V., Low-frequency magnetic fields in cars and office premises and the geomagnetic field variations, *Bioelectromagnetics*, 41(5), pp.360-368,2020.
92. Lin J., Lu M., Wu T., Yang L., Wu T., Evaluating extremely low frequency magnetic fields in the rear seats of the electric vehicles, *Radiation protection dosimetry*, 182(2), pp.190-199, 2018.
93. Jalilian H., Najafi K., Monazzam M. R., Khosravi Y., Jamali J., Occupational exposure of train drivers to static and extremely low frequency magnetic fields in Tehran subway, *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 9(4), 2017.
94. Havas M., Shum S., Dhalla R., Passenger exposure to magnetic fields on go trains and on buses, streetcars, and subways run by the Toronto transit commission, Toronto, Canada, *Biological Effects of EMFs*, 3rd International Workshop, Kos, Greece, pp.1065-1071, 2004.
95. Tell R. A., Sias G., Smith J., Sahl J., Kavet R., ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles, *Bioelectromagnetics*, 34(2), pp.156–161, 2013.
96. Moreno-Torres P. C., Lourd J., Lafoz M., Arribas J. R., Evaluation of the magnetic field generated by the inverter of an electric vehicle, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(2), pp.837-844, 2012.
97. Ptitsyna N. G., Ponzetto A., Kopytenko Y. A., Ismagilov V. S., Korobeinikov A. G., Electric vehicle magnetic fields and their biological relevance, *Journal of Scientific Research & Reports*, 3(13), pp.1753-1770, 2014.
98. Moreno-Torres P.C., Lafoz M., Blanco M., Arribas J. R., Passenger exposure to magnetic fields in electric vehicles, *Modeling and simulation for electric vehicle applications*, pp.47-71, 2016.

99. Ruddle A. R., Low L., Armstrong R., Dawson L., Rowell A., Recommendations for mitigating low frequency magnetic field exposure in hybrid/electric vehicles, International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), pp. 86-91, IEEE,2014.
100. Dong X. W., Lu M., Influence of different materials of electric vehicle body on low frequency electromagnetic exposure for driver, Journal of Physics: Conference Series,1777(1), 012058, 2021.
101. Hirata A., Diao Y., Onishi T., Sasaki K., Ahn S., Colombi D., Chen J., Assessment of human exposure to electromagnetic fields: review and future directions, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 63(5), pp. 1619-1630, 2021.
102. Halgamuge M. N., Abeyrathne C. D., Mendis P., Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. Radiation protection dosimetry, 141(3), pp. 255-268, 2010.
103. Feldhues K., Diebig M., Frei S., Analysis of the low frequency shielding behaviour of high voltage cables in electric vehicles, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 408-413, IEEE, 2014.
104. Murthy M. S., Rasek G. A., Analytical determination of current distributions in shielded hv cables and ground systems of electric automotive power trains, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 61(3), pp. 911-918, 2018.
105. Roland K., Johannes K., Ryszard P., Eckert F., Kenji E., Michael W., Electromagnetic fields related to high speed transportation systems, Инновационные транспортные системы и технологии, 4(2), pp. 152-166, 2018.
106. Panagopoulos D. J., Chrousos G. P., Shielding methods and products against man-made Electromagnetic Fields: Protection versus risk, Science of the total environment, 667, pp. 255-262, 2019.
107. Pinaud O., Chadebec O., Rouve L., Guichon J., Vassilev, A., Forward model computation of magnetostatic fields inside electric vehicles, IEEE transactions on magnetics, 50(2), pp. 985-988, 2014.
108. Calabrò E., Condello S., Magazù S., Ientile R., Static and 50 Hz electromagnetic fields effects on human neuronal-like cells vibration bands in the mid-infrared region, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 3(2), pp. 69-78, 2011.
109. Vila Rodríguez J., Bowman J. D., Richardson L., Kincl L., Conover D. L., McLean D., Mann S., Vecchia P., Tongeren van M., Cardis E., A source-based measurement database for occupational exposure assessment of electromagnetic fields in the INTEROCC study: a literature review approach, The Annals of Occupational Hygiene, 60 (2), pp. 184-204, 2016.
110. Lennerz C., Horlbeck L., Weigand S., Grebmer C., Blazek P., Brkic A., ... & O'Connor M., Patients with pacemakers or defibrillators do not need to worry about e-Cars: an observational study, Technology and Health Care, 28(1), pp. 1-12, 2020.
111. Wen F., Huang X., Optimal magnetic field shielding method by metallic sheets in wireless power transfer system, Energies, 9(9), 733, 2016.

112. Concha P. M. T., Velez P., Lafoz M., Arribas J. R., Passenger exposure to magnetic fields due to the batteries of an electric vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), pp. 4564-4571, 2015.
113. Wang Z., Liu W., Influence of materials, windows and shielding layers on low-frequency electromagnetic environment of subway vehicle and human exposure research, *Progress In Electromagnetics Research M*, 105, pp. 151-160, 2021.
114. Kim K. C., Jin C. S., Lee J., Magnetic shield design between interior permanent magnet synchronous motor and sensor for hybrid electric vehicle, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(6), pp. 2835-2838, 2009.
115. Concha P. M. T., Lourd J., Lafoz M., Arribas J. R., Evaluation of the magnetic field generated by the inverter of an electric vehicle, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(2), pp. 837-844, 2013.
116. Campi T., Cruciani S., Maradei F., Feliziani M., Magnetic field during wireless charging in an electric vehicle according to standard SAE J2954, *Energies*, 12(9), 1795, 2019.
117. Mushtaq A., Frei S., Transfer impedance simulation and measurement methods to analyse shielding behaviour of HV cables used in Electric-Vehicles and Hybrid-Electric-Vehicles, *Advances in Radio Science*, 14, pp. 139-145, 2016.
118. Zhang W., Yang Q., Li Y., Lin Z., Yang M., Mi M., Comprehensive analysis of nanocrystalline ribbon cores in high-power-density wireless power transfer pads for electric vehicles, *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 3092173, 2022.
119. Chau K. T., Jiang C., Han W., Lee C. H., State-of-the-art electromagnetics research in electric and hybrid vehicles, *Progress In Electromagnetics Research*, 159, pp. 139-157, 2017.
120. Park H. H., Kwon J. H., Kwak S. I., Ahn S., Effect of air-gap between a ferrite plate and metal strips on magnetic shielding, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 2432102, 2015
121. Xia N., Du Y., An efficient modeling method for 3-D magnetic plates in magnetic shielding, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(3), pp. 608-614, 2014
122. Park H. H., Kwon J. H., Kwak S. I., Ahn S., Magnetic shielding analysis of a ferrite plate with a periodic metal strip, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(8), 2425796, 2015.
123. Park H. H., Kwon J. H., Ahn S., Magnetic shielding analysis of a slit on a conducting plate coated with a ferrite sheet: Transverse incidence, *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(9), 2314716, 2014.
124. Frikha A., Bensetti M., Pichon L., Lafon F., Duval F., Benjelloun N., Magnetic shielding effectiveness of enclosures in near field at low frequency for automotive applications, *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 57(6), pp. 1481-1490, 2015.
125. Azizi D., Heydari H., Gholami A., Analysis of the shielding effectiveness of several magnetic shields, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 4(11), pp. 1582-1586, 2010.
126. Tan L., Elnail K. E. I., Ju M., Huang X., Comparative analysis and design of the shielding techniques in WPT systems for charging EVs. *Energies*, 12(11), 2115, 2019.

127. Kim M., Kim H., Kim D., Jeong Y., Park H. H., Ahn S., A three-phase wireless-power-transfer system for online electric vehicles with reduction of leakage magnetic fields, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(11), pp. 3806-3813, 2015.
128. Asa E., Mohammad M., Onar O. C., Pries J., Galigekere V., Su G. J., Review of safety and exposure limits of electromagnetic fields (EMF) in wireless electric vehicle charging (WEVC) applications, *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, pp. 17-24, IEEE, 2020.
129. Dolara A., Leva S., Longo M., Castelli-Dezza F., Mauri M., Coil design and magnetic shielding of a resonant wireless power transfer system for electric vehicle battery charging, *IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 200-205, IEEE, 2017.
130. Mohammad M., Pries J., Onar O., Galigekere V. P., Su G. J., Anwar S., ... & Patil D., Design of an EMF suppressing magnetic shield for a 100-kW DD-coil wireless charging system for electric vehicles, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1521-1527, IEEE, 2019.
131. Kim J., Kim J., Kong S., Kim H., Suh I. S., Suh N. P., ... & Ahn S., Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system, *Proceedings of the IEEE*, 101(6), pp. 1332-1342, 2013.
132. Shah I. A., Yoo H., Assessing human exposure with medical implants to electromagnetic fields from a wireless power transmission system in an electric vehicle, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(2), pp. 338-345, 2020.
133. Mou W., Lu M., Dosimetry simulation research on electromagnetic exposure of wireless charging electric vehicle to human central nervous system, *IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 609-614, IEEE, 2021.
134. Chun Y., Park S., Kim J., Kim J., Kim H., Kim J., ... & Ahn S., Electromagnetic compatibility of resonance coupling wireless power transfer in on-line electric vehicle system, *IEICE Transactions on Communications*, 97(2), pp. 416-423, 2014.
135. Kim S., Park H. H., Kim J., Kim J., Ahn S., Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle, *IEEE Transactions on Microwave theory and techniques*, 62(4), pp. 1057-1066, 2014.
136. Park S., Evaluation of electromagnetic exposure during 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles, *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(1), 2748498, 2018.
137. Liorni I., Bottauscio O., Guilizzoni R., Ankarson P., Bruna J., Fallahi A., ... & Zucca M., Assessment of exposure to electric vehicle inductive power transfer systems: Experimental measurements and numerical dosimetry, *Sustainability*, 12(11), 4573, 2020.
138. Mou W., Lu M., Research on Shielding and Electromagnetic Exposure Safety of an Electric Vehicle Wireless Charging Coil, *Progress In Electromagnetics Research C*, 117, pp. 55-73, 2021.
139. Wang K, Zuo Z, Sang L, Zhu X. Comprehensive Analysis for Electromagnetic Shielding Method Based on Mesh Aluminium Plate for Electric Vehicle Wireless Charging Systems, *Energies*, 15(4), 1546, 2022.

140. Ding P. P., Bernard L., Pichon L., Razek A., Evaluation of electromagnetic fields in human body exposed to wireless inductive charging system, *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2), pp. 1037-1040, 2014.
141. Chakarothai J., Wake K., Arima T., Watanabe S., Uno T., Exposure evaluation of an actual wireless power transfer system for an electric vehicle with near-field measurement, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(3), pp. 1543-1552, 2017.
142. Bertoluzzo M., Di Barba P., Forzan M., Mognaschi M. E., Sieni E., Field models for the electromagnetic compatibility of wireless power transfer systems for electric vehicles, *Engineering Computations*, 39(7), pp. 2802-2819, 2022.
143. Bi Z., Kan T., Mi C. C., Zhang Y., Zhao Z., Keoleian G. A., A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility, *Applied Energy*, 179, pp. 413-425, 2016.
144. Mou W, Lu M., Research on Electric Vehicle Electromagnetic Protection Considering Radiation of Two Wireless Chargers, *World Electric Vehicle Journal*, 13(6), 95, 2022.
145. Mohamed A. A., Shaier A. A., Shielding Techniques of IPT System for Electric Vehicles' Stationary Charging, *Electric Vehicle Integration in a Smart Microgrid Environment*, pp. 279-293, CRC Press, 2021.
146. Gao Y., Farley K. B., Ginart A., Tse Z. T. H., Safety and efficiency of the wireless charging of electric vehicles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 230(9), pp. 1196-1207, 2016.
147. Ahn S., Shielding of Magnetic Field, *The On-line Electric Vehicle*, Springer, Cham, pp. 197-206, 2017.
148. Zhang W., Song J., Lin L., Ren H., Zheng L., Gao Y., Song Y., A Numerical Method to Reduce the Stray Magnetic Field around the Asymmetrical Wireless Power Transfer Coils for Electric Vehicle Charging, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(3), pp. 1859-1871, 2022.
149. Kim H., Cho J., Ahn S., Kim J., Kim J., Suppression of leakage magnetic field from a wireless power transfer system using ferrimagnetic material and metallic shielding, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 640-645, 2012.
150. Ahn S., Hwang C., Park H. H., Optimized shield design for reduction of EMF from wireless power transfer systems. *IEICE electronics express*, 11(2), 20130930, 2014.
151. Campi T., Cruciani S., De Santis V., Maradei F., Feliziani M., Wireless power transfer (WPT) system for an electric vehicle (EV): How to shield the car from the magnetic field generated by two planar coils, *Wireless Power Transfer*, 5(1), 1, 2018.
152. Li J., Huang X., Chen C., Tan L., Wang W., Guo J., Effect of metal shielding on a wireless power transfer system. *AIP Advances*, 7(5), 056675, 2017.
153. Mohamed A. A., Shaier A. A., Metwally H., Selem S. I., A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Applied Energy*, 262, 114584, 2020.
154. Ahmad A., Alam M. S., Chabaan R., A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), pp. 38-63, 2018.

155. Machura P., Li Q., A critical review on wireless charging for electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, pp. 209-234, 2019.
156. Sun L., Ma D., Tang H., A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, pp. 490-503, 2018.
157. Campi T., Cruciani S., Maradei F., Feliziani M., Magnetic field mitigation by multicoil active shielding in electric vehicles equipped with wireless power charging system, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(4), pp. 1398-1405, 2020.
158. Luo Z., Nie S., Pathmanathan M., Han W., Lehn P. W., 3-D analytical model of bipolar coils with multiple finite magnetic shields for wireless electric vehicle charging systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), pp. 8231-8242, 2021.
159. Kim J., Bien F., Electric field coupling technique of wireless power transfer for electric vehicles, *IEEE Tencon-Spring*, pp. 267-271, 2013.
160. Water W., Lu J., Shielding analysis of high-frequency coaxial transformers used for electric vehicle on-board charging systems, *IEEE transactions on magnetics*, 49(7), pp. 4005-4008, 2013.
161. Choi S. Y., Gu B. W., Lee S. W., Lee W. Y., Huh J., Rim, C. T., Generalized active EMF cancel methods for wireless electric vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(11), pp. 5770-5783, 2013.
162. Mi C. C., Buja G., Choi S. Y., Rim C. T., Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), pp. 6533-6545, 2016.
163. Xiong M., Wei X., Huang Y., Luo Z., Dai H., Research on novel flexible high-saturation nanocrystalline cores for wireless charging systems of electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9), pp. 8310-8320, 2020.
164. Kadem K., Benyoubi F., Bensetti M., Le Bihan Y., Labouré E., Debbou M., An efficient method for dimensioning magnetic shielding for an induction electric vehicle charging system, *Progress In Electromagnetics Research*, 170, pp. 153-167, 2021.
165. Qiu C., Chau K.T., Ching T. W., Liu C., Overview of wireless charging technologies for electric vehicles, *Journal of Asian Electric Vehicles*, 12(1), pp. 1679-1685, 2014.
166. Zhai L., Zhong G., Cao Y., Hu G., Li X., Research on magnetic field distribution and characteristics of a 3.7 kW wireless charging system for electric vehicles under offset, *Energies*, 12(3), 392, 2019.
167. Cruciani S., Campi T., Maradei F., Feliziani M., Active Shielding Design and Optimization of a Wireless Power Transfer (WPT) System for Automotive, *Energies*, 13(21), 5575, 2020.
168. Dai Z., Wang J., Long M., Huang H., Sun M., Magnetic shielding structure optimization design for wireless power transmission coil, *AIP Advances*, 7(9), 095013, 2017.
169. Lu W. G., Li H. R., Chen W. M., Liu L. H., Numerical analysis of magnetic-shielding effectiveness for magnetic resonant wireless power transfer system, *Chinese Physics Letters*, 34(8), 088801, 2017.

170. Alsayegh M., Saifo M., Clemens M., Schmuelling B., Magnetic and thermal coupled field analysis of wireless charging systems for electric vehicles, *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(6), 2896780, 2019.
171. Ibrahim M., Pichon L., Bernard L., Raze, A., Houivet J., Cayol O., Advanced modeling of a 2-kW series–series resonating inductive charger for real electric vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(2), pp. 421-430, 2015.
172. Mi M., Yang Q., Li Y., Zhang P., Zhang W., Multi-objective active shielding coil design for wireless electric vehicle charging system, *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 3094721, 2022.
173. Lukic S., Pantic Z., Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles, *IEEE Electrification Magazine*, 1(1), pp. 57-64, 2013.
174. Cruciani S., Campi T., Maradei F., Feliziani M., Active shielding applied to an electrified road in a dynamic wireless power transfer (WPT) system, *Energies*, 13(10), 2522, 2020.
175. Batra T., Schaltz E., Passive shielding effect on space profile of magnetic field emissions for wireless power transfer to vehicles, *Journal of Applied Physics*, 117(17), 17A739, 2015.
176. Zhao J., Wu Z. J., Li N. L., Yang T., Study on safe distance between human body and wireless charging system of electric vehicles with different power and frequencies, *Electrical Engineering*, 102(4), pp. 2281-2293, 2020.
177. Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L., Mollah M.N., Hossain E., A Comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development, *Energies*, 10, 1217, 2017.
178. SAE International, SAE Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, in SAE Standard J1772, Society of Automotive Engineers (SAE): Warrendale, PA, USA, 2010.
179. Yilmaz M., Krein P.T., Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), pp. 2151–2169, 2013.
180. Yong J. Y., Ramachandaramurthy V. K., Tan K. M., and Mithulananthan N., A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, *Renewable and sustainable energy reviews*, 49, pp. 365-385, 2015.
181. Skouras T.A., Gkonis P.K., Ilias C.N., Trakadas P.T., Tsampasis E.G., Zahariadis T.V., *Electrical Vehicles: Current State of the Art, Future Challenges, and Perspectives*, *Clean Technologies*, 2(1), pp. 1-16, 2020.
182. <https://avtoran.ru/avtomobili-s-elektriceskim-dvigatelem-plusy-i-minusy-elektromobila/>
183. Coey, J. M., *Magnetism and magnetic materials*, Cambridge university press, 2010
184. C. Kittel και H. Fan, «Introduction to Solid State Physics», *American Journal of Physics*, 25, pp. 330-330, 2004.
185. Egami T., Flanders P. J., Graham Jr C. D., Low– field magnetic properties of ferromagnetic amorphous alloys. *Applied Physics Letters*, 26(3), pp. 128-130, 1975.



186. Warlimont H., The impact of amorphous metals on the field of soft magnetic materials, *Materials Science and Engineering*, 99(1-2), pp. 1-10, 1988.
187. Hilzinger H. R., Recent advances in rapidly solidified soft magnetic materials., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 83(1-3), pp. 370-374, 1990.
188. McHenry M.E., Willard M.A., Laughlin D. E., Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets, *Progress in Materials Science*, 44(4), pp. 291-433, 1999.
189. Duwez P., Willens R. H., Rapid quenching of liquid alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 227(2), 362, 1963.
190. Cohen M. H., Turnbull D., Composition requirements for glass formation in metallic and ionic systems, *Nature*, 189(4759), pp. 131-132, 1961.
191. Deanko M., Kepaptsoglou D. M., Muller D., Janickovic D., Skorvanek I., Hristoforou E., Svec P., Identification and quantification of microstructures formed during nanocrystallization of amorphous (Fe, Co)-Nb-(Si, B) systems, *Journal of microscopy*, 223(3), pp. 260-263, 2006.
192. Herzer G., Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets, *IEEE Transactions on magnetics*, 26(5), pp. 1397-1402, 1990.
193. IEC 61786-2:2014, Measurement of DC Magnetic, AC Magnetic and AC Electric Fields from 1 Hz to 100 kHz with Regard to Exposure of Human Beings—Part 2: Basic Standard for Measurements, 2014.
194. IEC 62226-3-1:2007. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body, Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models (European Standard EN 62226-3-1, pp. 1-54), 2007.
195. Fontgalland G., de Andrade H. D., de Figueiredo A. L., Queiroz Jr I. D. S., De Oliveira A. H., Paiva J. L., Sousa, M. E., Estimation of electric and magnetic fields in a 230 kV electrical substation using spatial interpolation techniques, *IET Science, Measurement & Technology*, 15(4), pp. 411-418, 2021.
196. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
197. Rasoulpoor M., Mirzaie M., Mirimani S. M., Effects of non-sinusoidal current on current division, ampacity and magnetic field of parallel power cables, *IET Science, Measurement & Technology*, 11(5), pp. 553-562, 2017.
198. Djekidel R., Bessedik S. A., Akef S., 3D Modelling and simulation analysis of electric field under HV overhead line using improved optimisation method, *IET Science, Measurement & Technology*, 14(8), pp. 914-923, 2020.
199. International Labour Organization, Occupational Safety and Health Series No. 7, Visual display units: Radiation protection guidance, 1994.
200. <https://www.emf-portal.org/en/cms/page/home/effects/low-frequency>
201. ICNIRP Statement, General approach to protection against non-ionizing radiation, *Health Physics*, 82(4), pp. 540-548, 2002.

202. Ng M. K., Chan R. H., Tang W. C. A fast algorithm for deblurring models with Neumann boundary conditions, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 21(3), pp. 851-866, 1999.
203. Damatopoulou T., Angelopoulos S., Christodoulou C., Gonos I., Hristoforou E., Kladas A., On the Power Lines—Electromagnetic Shielding Using Magnetic Steel Laminates, *Energies*, 14(21), 7215, 2021.
204. ICNIRP Statement, Gaps in Knowledge Relevant to the Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), *Health Physics*, 118(5), pp. 533-542, 2020.
205. IEEE C95.1, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, 2019.
206. Ruddle A. R., Low L., Impact of bodyshell on low frequency magnetic fields due to electric vehicle power cables, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, IEEE., pp. 1-6, 2012.
207. Wang H., Liu F., Lou S., Simulation analysis of one degree of freedom motion of electromagnetic spherical joint based on maxwell, *Journal of Physics: Conference Series*, 2085(1), 012014, 2021.
208. Yin Q., Chen G., Ma Y., (...), Zhang B., Leng X., Microstructure evolution and magnetic shielding effect of permalloy deposition on molybdenum substrate by electron beam freeform fabrication, *Additive Manufacturing*, 56, 102936, 2022.
209. Yu Y., Gao K., Theodoulidis T., Yuan F., Analytical solution for magnetic field of cylindrical defect in eddy current nondestructive testing, *Physica Scripta*, 95(1), 015501, 2020.
210. Damatopoulou T., Angelopoulos S., Christodoulou C., Gonos I., Kladas A. and Hristoforou E., Magnetic Shielding for Electric Car Power Cables, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022.
211. Hristoforou E., Ktena A. and Gong S., Magnetic Sensors: Taxonomy, Applications, and New Trends, *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(7), pp. 1-14, 2019.