



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &  
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

## **Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε Κυκλικές Διατάξεις Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Διπλωματική Εργασία

Κορδούλας Ε. Χρήστος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &  
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

### Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε Κυκλικές Διατάξεις Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Κορδούλας Ε. Χρήστος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>η</sup> Μαρτίου 2019

.....	.....	.....
Χατζηαργυρίου	Κορρές	Γεωργιάκης
Νικόλαος	Γεώργιος	Πάυλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019

.....

Κορδούλας Ε. Χρήστος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κορδούλας Ε. Χρήστος, 2019

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

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που αναπτύσσονται σε κυκλικές διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Το σύνολο της ανάλυσης των διατάξεων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα προσομοιώσεων Ansoft Maxwell, η λειτουργία του οποίου παρουσιάστηκε αναλυτικά. Αρχικά, μελετήθηκε η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη φάση και τη μέγιστη τιμή του ρεύματος των τυλιγμάτων. Μέσω μαγνητοστατικής ανάλυσης εξετάστηκε, αρχικά, το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος για διάφορες θέσεις τοποθέτησης του φορτιστή στο όχημα. Επιπλέον, εξετάστηκε εάν το πεδίο είναι εντός των ορίων που καθορίζονται από διεθνείς οδηγίες και συστάσεις, ώστε να μην προκαλεί ανησυχίες σχετικά με κινδύνους για την υγεία των ατόμων που εκτίθενται σε αυτό. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η λειτουργία στην περίπτωση οριζόντιων μετατοπίσεων, μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μαγνητικού συζεύκτη. Εκτός από την περίπτωση της στατικής φόρτισης, όπου το όχημα σταθμεύει πάνω από το φορτιστή, εξετάστηκε, επίσης, η δυναμική φόρτιση όπου το όχημα φορτίζει καθώς κινείται στο δρόμο. Μελετήθηκε, επίσης, η επίδραση του μεγέθους της διάταξης στα αναπτυσσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο επιπλέον κυκλικές διατάξεις, μια με μικρότερο δευτερεύον και μια με μικρότερο πρωτεύον και δευτερεύον, η λειτουργία των οποίων συγκρίθηκε μεταξύ τους και με την αρχική. Τέλος, εφαρμόστηκε ανάλυση με δινορεύματα για την μελέτη της επίδραση της θωράκισης αλουμινίου, αλλά και της θωράκισης που προσφέρει το σασί του οχήματος, στο μαγνητικό πεδίο.

## Λέξεις κλειδιά

Επαγωγική φόρτιση, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, Ansoft Maxwell, κυκλικός συζεύκτης, στατική φόρτιση, δυναμική φόρτιση.



## Abstract

The main aim of this diploma thesis is to study the electromagnetic fields developed in circular inductive charging devices for electric vehicles. The analysis of the magnetic couplers was carried out in the Ansoft Maxwell simulation software, the operation of which was presented in detail. Initially, the effect of the phase and the maximum current of the windings on the magnetic field on was studied. the magnetic field that is expected to be developed on the outside of the vehicle for various positions of the charger on the vehicle was examined relying on magnetostatic analysis. In addition, it has been examined whether the magnetic field is within the limits set by international guidelines and recommendations so as not to raise concerns about the health of persons exposed to it. The electromagnetic fields have also been studied in the case of horizontal displacements encountered in static and dynamic charging. Apart from the case of static charging, where the vehicle remains parked over the charger, the dynamic charging where the vehicle is charging as it moves on the road was also examined. Additionally, the influence of the size of the magnetic coupler on the generated electromagnetic fields was also studied. More specifically, two additional circular arrangements were studied, one with a smaller secondary and one with a smaller primary and secondary, the function of which was compared to each other and the original one. Finally, eddy current analysis was employed in order to study the effect of aluminum shielding and the shielding of the vehicle chassis on the magnetic field.

## Key words

Inductive charging, electric vehicle, Ansoft Maxwell, circular pad, static charging, dynamic charging.





## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα κύριο Ιωάννη Καρακίτσιο για την άψογη συνεργασία, συνέπεια και καθοδήγησή του σε όλα τα καθοριστικά σημεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την αγάπη και την στήριξη που μου παρέχουν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών και ολόκληρης της ζωής μου.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Λέξεις κλειδιά.....	5
Abstract .....	7
Key words .....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή .....	15
Γενική Εισαγωγή.....	15
1.1 Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο .....	15
1.2 Επαγωγική Φόρτιση .....	16
1.3 Στατικοί μαγνητικοί συζεύκτες.....	18
1.3.1 Συζεύκτες διπλής όψης .....	19
1.3.2 Συζεύκτες μονής όψης .....	20
1.4 Δυναμικοί μαγνητικοί συζεύκτες .....	23
1.4.1 Ενιαία διάταξη.....	24
1.4.2 Τμηματική διάταξη.....	25
1.5 Τοπολογίες αντιστάθμισης.....	25
1.6 Τεχνικές Ελέγχου .....	27
1.7 Ηλεκτρομαγνητικά πρότυπα και ασφάλεια.....	28
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Σχεδίαση & ανάλυση μαγνητικών συζευκτών .....	32
2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Περιβάλλον προγράμματος .....	32
2.3 Σχεδίαση Διάταξης .....	35
2.3.1 Θωράκιση αλουμινίου πρωτεύοντος.....	36
2.3.2 Φερρίτες πρωτεύοντος .....	39
2.3.3 Τύλιγμα Πρωτεύοντος.....	43
2.3.4 Δευτερεύον Συζεύκτη .....	44
2.4 Ορισμός υλικών.....	45
2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών.....	47
2.6 Ορισμός ρευμάτων.....	48
2.7 Ορισμός επιφανειών μέτρησης της μαγνητικής ροής .....	50
2.8 Παραμετροποίηση της ανάλυσης .....	52
2.9 Ανάλυση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων.....	56

2.10	Υπολογισμός της μεταφερόμενης ισχύος .....	59
Κεφάλαιο 3° : Λειτουργία του φορτιστή στην περίπτωση της στατικής φόρτισης .....		61
3.1	Εισαγωγή .....	61
3.2	Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη φάση .....	62
3.3	Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την ένταση του ρεύματος.....	67
3.4	Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος .....	72
3.5	Μαγνητικό Πεδίο στο εξωτερικό του οχήματος .....	75
3.5.1	Τοποθέτηση στο μπροστινό μέρος .....	76
3.5.2	Τοποθέτηση στο πίσω μέρος .....	78
3.5.3	Τοποθέτηση στο κέντρο .....	80
Κεφάλαιο 4° : Λειτουργία του φορτιστή στην περίπτωση οριζόντιων μετατοπίσεων & στη δυναμική φόρτιση.....		81
4.1	Εισαγωγή .....	81
4.2	Μελέτη των ΗΜ πεδίων σε οριζόντιες μετατοπίσεις .....	81
4.2.1	Μηδενική μετατόπιση στον άξονα γ.....	82
4.2.2	Μετατόπιση 20cm στον άξονα γ.....	84
4.2.3	Μετατόπιση 40cm στον άξονα γ.....	85
4.2.4	Μετατόπιση 60cm στον άξονα γ.....	86
4.3	Μελέτη των ΗΜ πεδίων στη δυναμική φόρτιση .....	88
Κεφάλαιο 5° : Επίδραση του μεγέθους της διάταξης στα ΗΜ πεδία .....		91
5.1	Εισαγωγή .....	91
5.2	Διάταξη με μικρότερο δευτερεύον .....	91
5.2.1	Μετατόπιση φάσης μεταξύ ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος .....	92
5.2.2	Τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο κέντρο του οχήματος.....	98
5.2.3	Λειτουργία φορτιστή σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης.....	99
5.3	Διάταξη με μικρότερο πρωτεύον και δευτερεύον .....	103
5.3.1	Μετατόπιση φάσης μεταξύ ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ...	104
5.3.2	Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος .....	108
5.3.3	Τοποθέτηση φορτιστή στο κέντρο του οχήματος.....	110
5.3.4	Λειτουργία φορτιστή σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης.....	111
Κεφάλαιο 6° : Επίδραση της θωράκισης στο μαγνητικό πεδίο .....		116
6.1	Εισαγωγή .....	116
6.2	Επίδραση της θωράκισης αλουμινίου του συζεύκτη στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία.....	116
6.3	Επίδραση του σασί του οχήματος στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία.....	118
6.4	Τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο όχημα.....	119

6.5	Θωράκιση & Μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος-δευτερεύοντος.....	121
6.5.1	Λειτουργία του δευτερεύοντος στο άκρο του οχήματος.....	121
6.5.2	Λειτουργία δευτερεύοντος στο κέντρο του οχήματος .....	128
6.6	Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος .....	135
Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και επεκτάσεις.....		138
7.1	Συμπεράσματα .....	138
7.2	Επεκτάσεις.....	139
Αναφορές .....		141
Παράρτημα.....		144
Μετρήσεις 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....		144
Μετρήσεις 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....		144
Μετρήσεις 4 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....		152
Μετρήσεις 5 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....		155
Μετρήσεις 6 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....		170



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

## Γενική Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και της επαγωγικής φόρτισης. Περιγράφονται τα είδη των διατάξεων, διάφορες τοπολογίες αντιστάθμισης και τεχνικές ελέγχου, καθώς και τα θεσπισμένα όρια για την ασφαλή μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

### 1.1 Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο αξιοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών. Αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες.

Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι συνήθως αυτοκίνητα, ελαφριά φορτηγά, ποδήλατα, ηλεκτρικά μηχανικά δίκυκλα, μικρά οχήματα του γκολφ, ανυψωτικά και άλλα παρόμοια. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εμφανίστηκαν από τις πρώτες μέρες της αυτοκίνησης και έχουν υψηλότερο συντελεστή ενεργειακής απόδοσης από τα αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης [1]. Παρόλα αυτά, η διαρκής βελτίωση των μηχανών εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή του πετρελαίου παραγκώνισαν τα ηλεκτρικά οχήματα.

Τον 21<sup>ο</sup> αιώνα τόσο ορισμένες περιβαλλοντικές καταστάσεις όπως η ρύπανση του περιβάλλοντος και η ενεργειακή κρίση, όσο και κάποιες τεχνολογικές ανακαλύψεις, όπως η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και η κατασκευή νέων φθηνότερων συσσωρευτών αυξημένης χωρητικότητας, κατέστησαν την επαναφορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα σχεδιαστικά προγράμματα των αυτοκινητοβιομηχανιών επιτακτική.

Το γεγονός αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει και η συμφωνία του Παρισίου για την κλιματική αλλαγή, βασικός στόχος της οποίας είναι να μειωθούν οι εγχώριες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [2].

Στην επίτευξη αυτού του στόχου δύναται να συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, μιας και ένα βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών αυτοκινήτων είναι η παραγωγή μηδενικών εκπομπών, υπό τον όρο ότι η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 1.1: Μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>

Με αυτή την προϋπόθεση, μπορούν να μετριάσουν την παγκόσμια θέρμανση που προκαλείται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου, γεγονός που είναι ένας επιπλέον στόχος της συνθήκης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν πολλά εμφανή σημεία υπεροχής, σε σύγκριση με τα συμβατικά. Όσον αφορά στο λειτουργικό κομμάτι, είναι πιο αθόρυβα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηχορύπανσης στις πόλεις και τη δημιουργία μικρότερης όχλησης στα φυσικά οικοσυστήματα και είναι επίσης πιο αποδοτικά, καθώς επιτυγχάνουν σχεδόν σταθερή ροπή σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα, χωρίς την καταπόνηση του. Στον οικονομικό τομέα είναι επίσης προσοδοφόρα, μιας και έχουν χαμηλότερο κόστος μετακίνησης, καθώς η τιμή του ρεύματος είναι αρκετά χαμηλότερη ανά μονάδα ενέργειας από τη βενζίνη, η οποία μάλιστα επηρεάζεται από την κάθε τόσο αύξηση της τιμής του πετρελαίου. Επιπλέον το κόστος συντήρησης σε βάθος χρόνου είναι μικρότερο έναντι ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Αντιθέτως ένα ηλεκτρικό όχημα εμφανίζει και σημαντικούς περιορισμούς. Η υψηλή τιμή πώλησης εξαιτίας του ιδιαίτερα αυξημένου κόστους της μπαταρίας, η περιορισμένη αυτονομία και διάρκεια ζωής της είναι κάποια μειονεκτήματα που καλείται να ξεπεράσει. Τελευταίο και πιο σημαντικό είναι ο μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης, ο οποίος ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 6 ώρες για μια πλήρη φόρτιση, σε συνδυασμό με το μικρό δίκτυο ταχείας φόρτισης στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης.

## 1.2 Επαγωγική Φόρτιση

Με τον όρο επαγωγική φόρτιση περιγράφεται η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας ασύρματα. Το όχημα ξεκινάει να φορτίζει όταν τοποθετηθεί πάνω από τον φορτιστή. Η διαδικασία αυτή έχει πολλαπλά οφέλη, με βασικότερο την ασφάλεια του οδηγού, καθώς δεν έρχεται σε επαφή με καλώδια, συνεπώς και αποφεύγεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Το επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος είναι τοποθετημένο υπογείως, επομένως η λειτουργία του εξασφαλίζεται αδιάκοπα σε οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες, με ασφάλεια για το κοινωνικό σύνολο.

Η επαγωγική φόρτιση καλείται να αντιμετωπίσει ένα βασικό πρόβλημα των ηλεκτρικών οχημάτων, το οποίο είναι το υψηλό κόστος των μπαταριών και η περιορισμένη αυτονομία τους. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της τμηματικής φόρτισης ενός αυτοκινήτου ασύρματα όταν αυτό ακινητοποιείται, όπως συμβαίνει κατά την παραμονή του σε μία δημόσια θέση στάθμευσης. Η φόρτιση αυτή ονομάζεται στατική φόρτιση (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Στατική επαγωγική φόρτιση



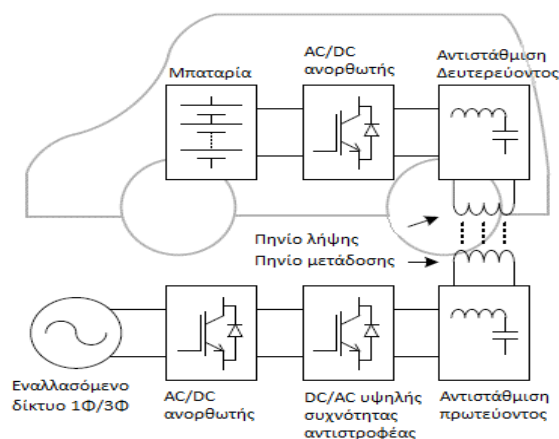
Ένας άλλος τρόπος εξίσου καινοτόμος για την επαγωγική φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι καθώς αυτό κινείται στον δρόμο. Με τον τρόπο αυτό οι συσσωρευτές φορτίζονται σε διάφορα σημεία κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για κάποια στάση σε σταθμούς φόρτισης. Η φόρτιση αυτή ονομάζεται δυναμική φόρτιση (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Δυναμική επαγωγική φόρτιση

Η τμηματική φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος επιτρέπει τη μείωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών, συνεπώς και του βάρους τους. Μελέτες έχουν δείξει πως μέσω της χρήσης επαγωγικών συστημάτων μεταφοράς ισχύος είναι δυνατή η μείωση της μάζας μίας μπαταρίας έως 17,3%, γεγονός που οδηγεί σε μια μείωση του κόστους της μπαταρίας έως και 58% [3].

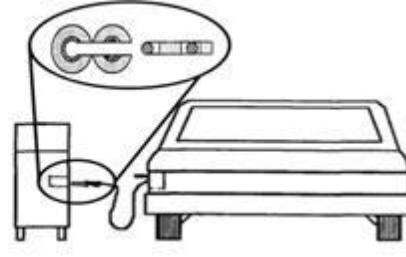
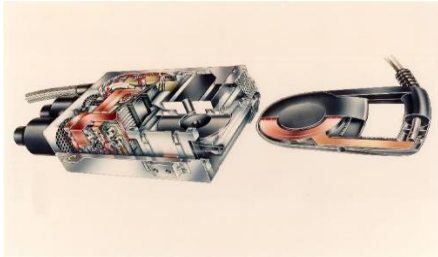
Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης είναι παρόμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή: ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ ενός πρωτεύοντος και ενός δευτερεύοντος πηνίου. Στην επαγωγική φόρτιση, ωστόσο, τα πηνία μετάδοσης και λήψης δεν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους αλλά μεταφέρουν ενέργεια μέσω ενός σχετικά μεγάλου διακένου αέρα. Η δομή ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Το δίκτυο, αρχικά, παρέχει στο σύστημα εναλλασσόμενη τάση, η οποία μετατρέπεται σε συνεχή, μέσω ενός AC/DC ανορθωτή. Αξίζει να σημειωθεί πως για τον AC/DC ανορθωτή απαιτείται συνήθως διόρθωση του συντελεστή ισχύος [4]. Στη συνέχεια, μέσω ενός DC/AC μετατροπέα η τάση ξαναγίνεται εναλλασσόμενη παρέχοντας ταυτόχρονα εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας στο πρωτεύον πηνίο. Μεταξύ του πηνίου και του μετατροπέα μεσολαβεί ένα δίκτυο αντιστάθμισης. Επίσης, για επιπρόσθετη ασφάλεια και προστασία μπορεί να προστεθεί στο πρωτεύον μεταξύ του DC/AC αντιστροφέα και του πηνίου ένας μετασχηματιστής απομόνωσης υψηλής συχνότητας [5]. Στη συνέχεια, το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το υψηλής συχνότητας ρεύμα προκαλεί μία εναλλασσόμενη τάση από επαγωγή στο πηνίο λήψης που βρίσκεται στο δευτερεύον. Για την βελτίωση της απόδοσης και της μεταφερόμενης ισχύος χρησιμοποιείται και στο δευτερεύον κατάλληλο κύκλωμα αντιστάθμισης. Τέλος, η εναλλασσόμενη τάση ανορθώνεται και μετατρέπεται σε συνεχή μέσω ενός AC/DC ανορθωτή, ώστε να φορτιστεί η μπαταρία.



Σχήμα 1.4: Σύστημα επαγωγικής φόρτισης

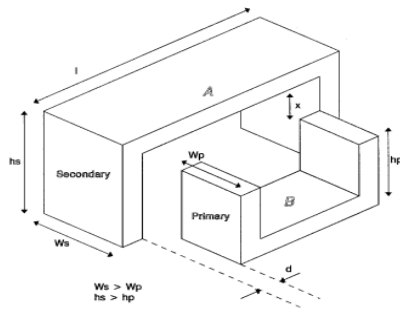
### 1.3 Στατικοί μαγνητικοί συζεύκτες

Μιας και η ιδέα της επαγωγής φόρτισης είναι αρκετά παλιά, στα μέσα της δεκαετίας του '90 δημιουργήθηκαν οι πρώτοι επαγωγικοί συζεύκτες για την φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος [6] [7]. Αποτελούνταν από ένα ειδικό σύστημα, το οποίο έπρεπε να εισέλθει στον φορτιστή για να συνδεθεί με αυτόν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Επομένως, παρόλο που η μεταφορά ισχύος γίνεται με την μέθοδο της επαγωγής, εξαιτίας της χρήσης καλωδίων, οι φορτιστές αυτού του τύπου δεν μπορούν να θεωρηθούν ασύρματοι.



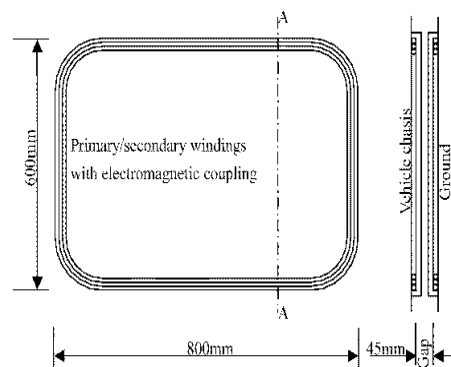
Σχήμα 1.5: Επαγωγικός συζεύκτης της δεκαετίας του '90

Ένας άλλος τύπος πρώιμου μαγνητικού συζεύκτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6 και είναι σχεδόν ίδιος με ένα απλό πυρήνα μετασχηματιστή [8]. Η διάταξη αυτή μπορεί να μεταφέρει ισχύ, όμως αυτό είναι εφικτό εντός ενός πολύ μικρού διακένου, γεγονός που δεν επέτρεπε την αξιοποίηση του από την αυτοκινητοβιομηχανία.



Σχήμα 1.6: Διάταξη πυρήνα μετασχηματιστή

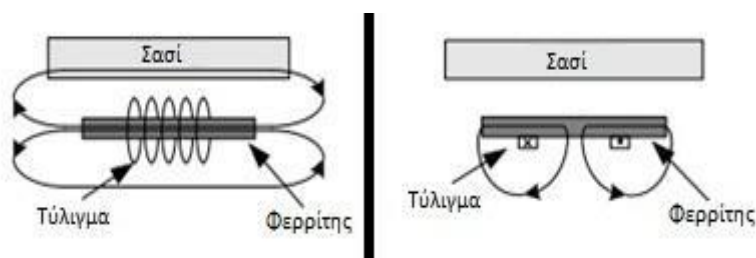
Η διάταξη που προσεγγίζει πιο πολύ τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται σήμερα προτείνεται στην αναφορά [9] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7. Αποτελείται μόνο από πηνία, ενώ δεν γίνεται χρήση φερρίτη, γεγονός που καθιστά την διάταξη πολύ ευαίσθητη στα γύρω σιδηρομαγνητικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα πηνίο χωρίς φερρίτη τοποθετηθεί σε ένα αυτοκίνητο, η μαγνητική ροή ενδέχεται να εισέλθει στο σασί, με αποτέλεσμα υψηλές απώλειες δινορρευμάτων. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης και για να γίνει αποδοτικότερη η φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό φερρίτης, προκειμένου να κατευθύνει την μαγνητική ροή.



Σχήμα 1.7: Διάταξη χωρίς φερρίτη

Επομένως, για την κάλυψη των απαιτήσεων μεταφοράς ισχύος σε μεγαλύτερα διάκενα με στόχο τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος, καθίσταται σαφής η ανάγκη παρουσίας φερρίτη στη σχεδίαση των διατάξεων. Οι μαγνητικοί συζεύκτες με φερρίτη ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες με βάση την διάχυση της μαγνητικής ροής στην περιοχή,

στους «διπλής όψης» (Σχήμα 1.8 α) και στους «μονής όψης» (Σχήμα 1.8 β), για τους οποίους γίνεται αναφορά παρακάτω.



Σχήμα 1.8: Κύρια μαγνητική ροή συζεύκτη (α) διπλής όψης και (β) μονής όψης [4]

(α)

(β)

### 1.3.1 Συζεύκτες διπλής όψης

Βασικό χαρακτηριστικό των συζευκτών διπλής όψης είναι το γεγονός ότι η μαγνητική ροή διαχέεται και στις δύο πλευρές (Σχήμα 1.8 α). Τυπικά παραδείγματα διπλής όψης περιλαμβάνουν στο σχεδιασμό ένα σωληνοειδές πηνίο τυλιγμένο γύρω από μία πλάκα φερρίτη, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.9 [10] [11] [12] [13].

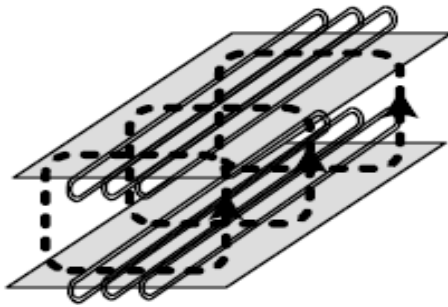
Οι συζεύκτες αυτοί παρουσιάζουν δύο βασικά μειονεκτήματα. Αρχικά, βάσει της αρχής λειτουργίας ενός φορτιστή, απαραίτητη για την μεταφορά ισχύος είναι μόνο η μία εκ των δύο μαγνητικών ροών και πιο συγκεκριμένα, όταν ο φορτιστής τοποθετείται στο όχημα, είναι η κάτω μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή στο πάνω μέρος του συζεύκτη προκαλεί υψηλές μαγνητικές απώλειες, μέσω των δινορρευμάτων στο σασί του αυτοκινήτου. Έχουν προταθεί τρόποι καταστολής του ανεπιθύμητου τμήματος της μαγνητικής ροής όπως με μία θωράκιση αλουμινίου, σε συνδυασμό με έναν πιο περίπλοκο σχεδιασμό της διάταξης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.9 β και γ. Όμως με αυτή την πρακτική, οι απώλειες είναι της τάξης του 10%, πολύ περισσότερες δηλαδή από τον επιθυμητό στόχο που είναι 2% - 4% [12]. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η παραγωγή μίας ισχυρής μαγνητικής ροής, στα πλαϊνά του συζεύκτη η οποία είναι μη ωφέλιμη και δύσκολα περιορίσιμη (Σχήμα 1.8 α). Συνεπώς, τα παραπάνω δύο μειονεκτήματα οδήγησαν στην απομάκρυνση από τους συζεύκτες διπλής όψης, τη θέση των οποίων πήραν οι συζεύκτες μονής όψης στα επαγωγικά συστήματα ισχύος.



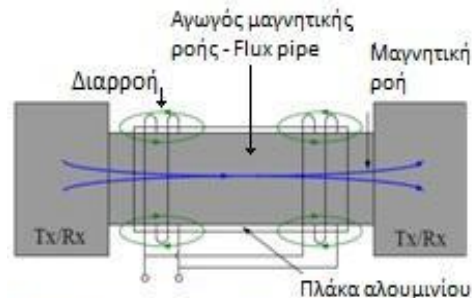
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 1.9: Απλή (α) και σύνθετη (β) διάταξη συζεύκτη διπλής όψης, κυκλική (γ) και οριζόντια (δ) μαγνητική ροή

### 1.3.2 Συζεύκτες μονής όψης

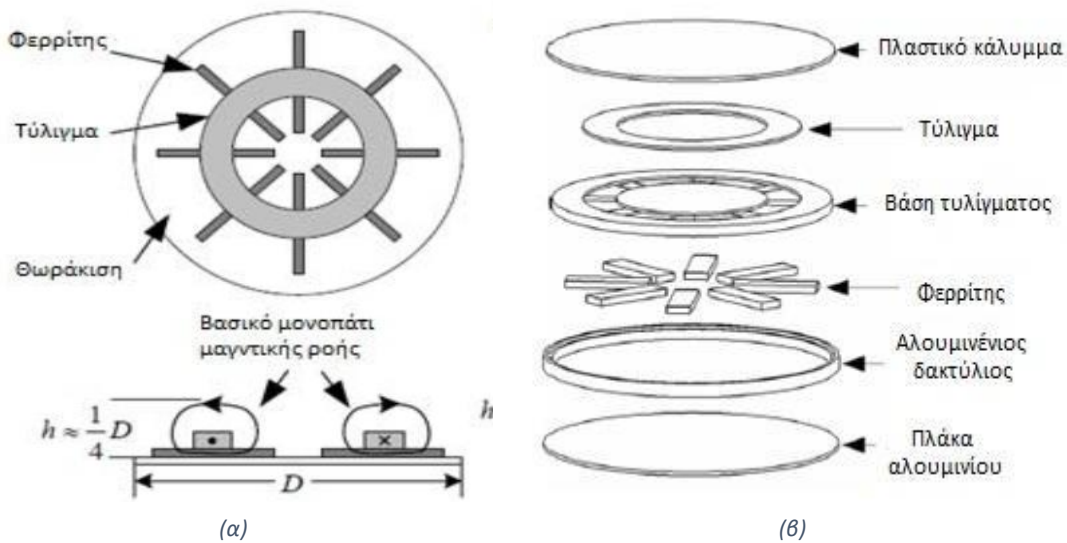
Οι συζεύκτες μονής όψης, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 1.8, περιορίζουν μέσω το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής μόνο στην μια πλευρά του συζεύκτη. Διαρροή μαγνητικής ισχύος υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση, είναι όμως πολύ λιγότερη από την προηγούμενη περίπτωση και ελαχιστοποιείται με την χρήση κατάλληλης θωράκισης. Τέτοιου τύπου συζεύκτες χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στη στατική φόρτιση.

Παραδείγματα διατάξεων είναι η κυκλική, η DD, η DDQ και η BP, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

➤ Κυκλική Διάταξη

Μία τυπική κυκλική διάταξη αποτελείται από ένα κυκλικό πηνίο, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από καλώδιο Litz για καλύτερη απόδοση, τοποθετημένο πάνω σε ράβδους φερρίτη (Σχήμα 1.10 α, β).

Έχει παρατηρηθεί πως μία διάταξη αποτελούμενη από δύο πανομοιότυπους κυκλικούς συζεύκτες στο πρωτεύον και το δευτερεύον αντιστοίχως, συχνότητας λειτουργίας 20kHz και διακένου αέρα 220mm μπορεί να μεταφέρει ισχύ έως 2kW, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει πλευρικές ανοχές  $\pm 150\text{mm}$ , με απόδοση μεγαλύτερη από 85% [14].



Σχήμα 1.10: (α) Κάτοψη και (β) δομικά μέρη κυκλικού συζεύκτη

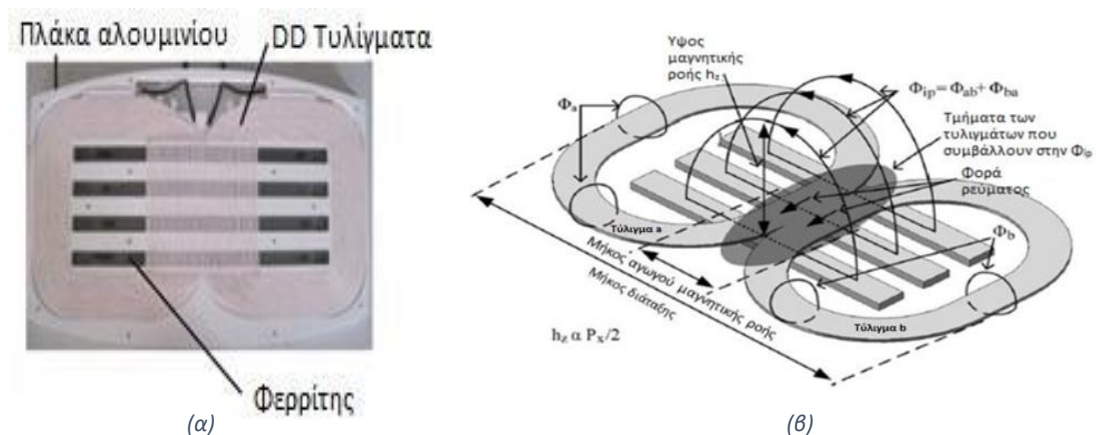
Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι πως μπορεί να προσεγγιστεί από το όχημα από οποιαδήποτε πλευρά, μιας και είναι κυκλική, Επίσης, για μεταφορά ισχύος 2kW, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται σε απόσταση 17cm από το άκρο του φορτιστή και 50cm από το κέντρο του βρίσκονται εντός ασφαλών ορίων [14].

Ωστόσο, η ισχύς που μεταφέρεται σε ένα μεγάλο διάκενο δεν ικανοποιεί πολλές φορές τα επίπεδα που απαιτούνται για την αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η αρκετά χαμηλή ανοχή σε κακή ευθυγράμμιση, καθώς για ευθυγράμμιση που καταλαμβάνει το 40% της διαμέτρου του συζεύκτη, η ισχύς σχεδόν μηδενίζεται [14].

➤ DD Διάταξη

Η Double-D (ή DD) διάταξη, σχεδιάστηκε από το πανεπιστήμιο του Auckland και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.11 [15].

Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μετάδοση ισχύος σε μεγαλύτερα διάκενα απ' ότι η κυκλική διάταξη. Πιο συγκεκριμένα, το ύψος της μαγνητικής ροής είναι περίπου ίσο με το 50% του μήκους του συζεύκτη, σε αντίθεση με την κυκλική, όπου το ύψος φτάνει στο 25% της διαμέτρου της διάταξης [14] [15]. Επιπλέον, εμφανίζει μεγαλύτερη ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις, μέχρι μια μετατόπιση ίση με το 34% του μήκους της διάταξης, όπου η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται [15].



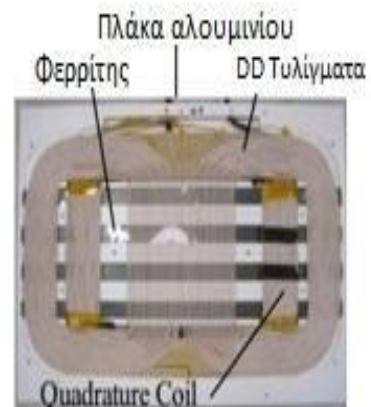
Σχήμα 1.11: (α) Κάτοψη και (β) μαγνητική ροή DD διάταξης

Αξίζει να σημειωθεί πως είναι εφικτό ένας φορτιστής να αποτελείται από ένα κυκλικό συζεύκτη στο πρωτεύον και ένα DD συζεύκτη στο δευτερεύον με αποτελεσματική μετάδοση ισχύος

➤ DDQ Διάταξη

Για ακόμα καλύτερη ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις, τοποθετήθηκε στη DD διάταξη ένα ακόμη πηνίο και σχεδιάστηκε η DDQ διάταξη [16] [17] [18] (Σχήμα 1.12).

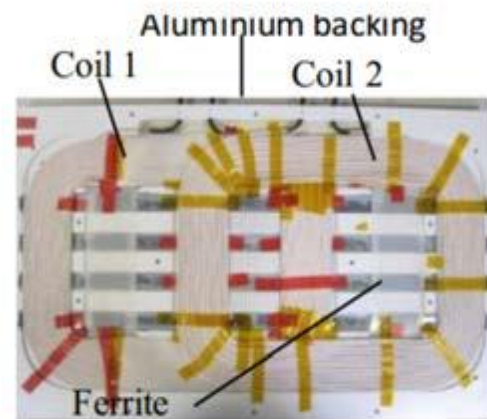
Το επιπλέον πηνίο, Q, προσφέρει στη διάταξη μεγαλύτερη ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις και ικανότητα για μεγαλύτερη μεταφορά ισχύος, σχεδόν τριπλάσια συγκριτικά με τις προηγούμενες διατάξεις. Το Q πηνίο δεν απαιτείται και στα δύο μέρη του συζεύκτη, αλλά μόνο στον δέκτη. Ένα βασικό μειονέκτημα, ωστόσο, αυτής της διάταξης είναι πως χρησιμοποιεί τον διπλάσιο χαλκό, σε σύγκριση με την κυκλική [16].



Σχήμα 1.12: DDQ διάταξη

➤ BP Διάταξη

Η διπολική διάταξη (Bipolar - BP) ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα της DDQ διατάξεως, χρησιμοποιώντας 20-30% λιγότερο χαλκό [17] [18]. Αποτελείται από δύο πηνία, τοποθετημένα στο ίδιο επίπεδο και τμηματικώς επικαλυπτόμενα (Σχήμα 1.13). Η κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων στη διάταξη αυτή έχει ως στόχο τον όσο το δυνατό μεγαλύτερο περιορισμό της αλληλεπαγωγής μεταξύ των πηνίων



Σχήμα 1.13: BP διάταξη

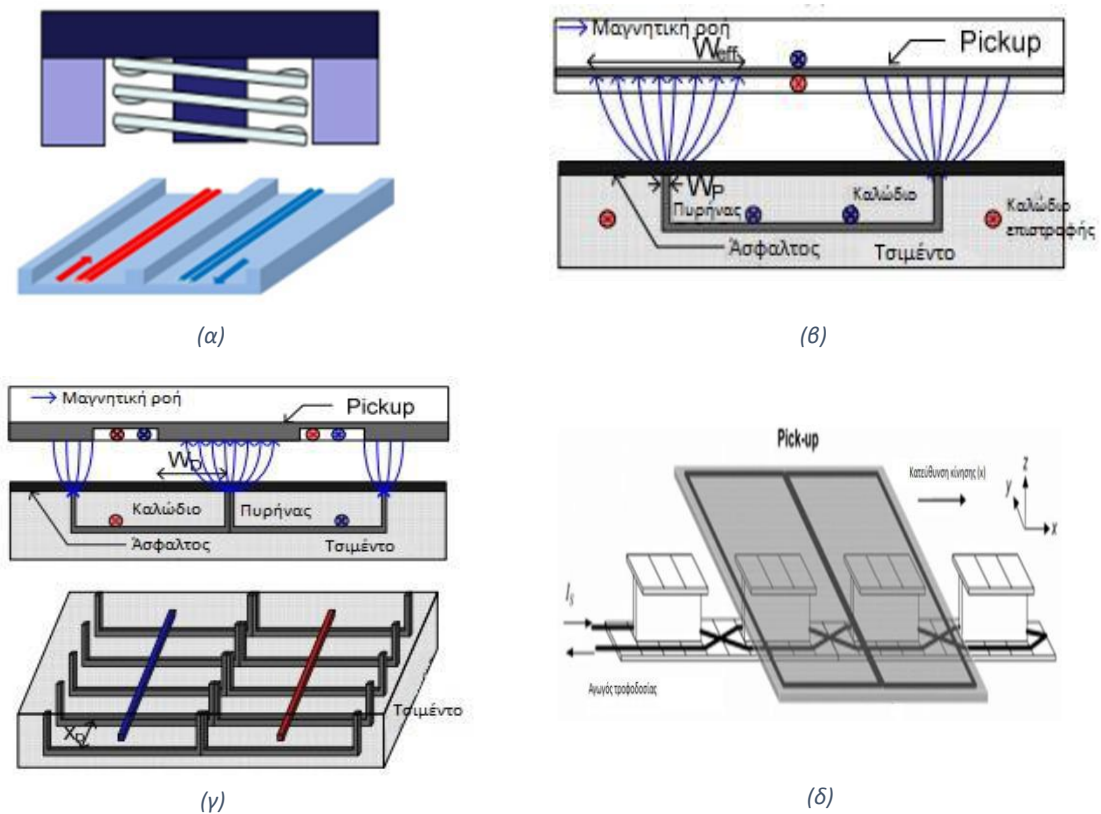
#### 1.4 Δυναμικοί μαγνητικοί συζεύκτες

Η δυναμική επαγωγική φόρτιση προσδίδει τη δυνατότητα σε ένα ηλεκτρικό όχημα να φορτίζει την μπαταρία του ενώ κινείται. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό, καθώς βοηθά στην αντιμετώπιση ενός από τα μεγαλύτερα προβλήματα των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι αυτό της αυτονομίας.

Υπάρχουν δύο ειδών διατάξεις δυναμικών συζευκτών, η ενιαία και η τμηματική διάταξη, για τις οποίες γίνεται αναφορά στη συνέχεια.

### 1.4.1 Ενιαία διάταξη

Στην ενιαία διάταξη, το πρωτεύον είναι ένας μεγάλου μήκους συζεύκτης, αποτελούμενος από καλώδια και φερρίτες, ο σχηματισμός των οποίων προσδίδει και την ονομασία στη διάταξη. Συνήθεις τύποι συζευκτών είναι οι [19]: E-τύπου, U-τύπου, W-τύπου και I-τύπου [20], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14: Ενιαία διάταξη δυναμικού συζεύκτη (α) E-τύπου, (β) U-τύπου, (γ) W-τύπου και (δ) I-τύπου

Το βασικότερο πρόβλημα της ενιαίας διάταξης είναι ότι το πηνίο του δευτερεύοντος καλύπτει ένα πολύ μικρό μέρος του πρωτεύοντος, με αποτέλεσμα να εγείρονται ανησυχίες σχετικά με τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και να παρατηρείται ιδιαίτερα μειωμένη απόδοση.

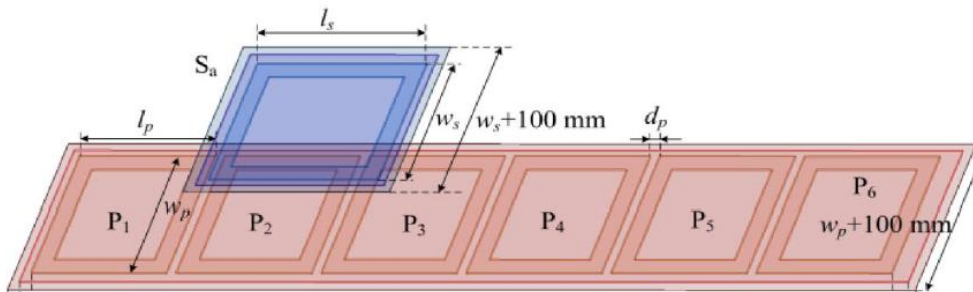
Για την αποφυγή τροφοδότησης ενός ιδιαίτερα μεγάλου καλωδίου στην πλευρά του πρωτεύοντος, η διάταξη χωρίζεται σε τμήματα, τα οποία τροφοδοτούνται από έναν μόνο μετατροπέα ισχύος και μια σειρά από διακόπτες [21] [22] [23]. Επομένως, αναλόγως σε ποια θέση βρίσκεται το ηλεκτρικό όχημα ενεργοποιείται και το αντίστοιχο τμήμα.

Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πάνω από τα ανενεργά τμήματα της διάταξης. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας ρέει συνεχώς μέσω των κοινών καλωδίων του συστήματος, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος.



### 1.4.2 Τμηματική διάταξη

Στη διάταξη αυτή το πρωτεύον αποτελείται από πολλά μικρά τμήματα, παρόμοια με τους συζεύκτες που χρησιμοποιήθηκαν στη στατική φόρτιση (Σχήμα 1.15) [24] [25]. Κάθε τμήμα είναι αυτόνομο, οδηγείται, συνήθως, από έναν ανεξάρτητο μετατροπέα ισχύος και ενεργοποιείται μόνο όταν περάσει ένα ηλεκτρικό όχημα από πάνω του. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει κοινό ρεύμα υψηλής συχνότητας να διαρρέει την διάταξη του πρωτεύοντος, επομένως η απόδοση του συστήματος είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Φυσικό ακόλουθο των ανεξάρτητων τμημάτων είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής, λόγω της απαίτησης ενός ξεχωριστού μετατροπέα DC/AC για κάθε τμήμα του πρωτεύοντος. Ένας τρόπος μείωσης του κόστους είναι ο έλεγχος δύο τμημάτων από έναν κοινό μετατροπέα όπως περιγράφεται στην αναφορά [24]. Υπάρχουν επίσης προτάσεις για οδήγηση ακόμα περισσότερων τμημάτων ταυτόχρονα με έναν μόνο μετατροπέα [25].

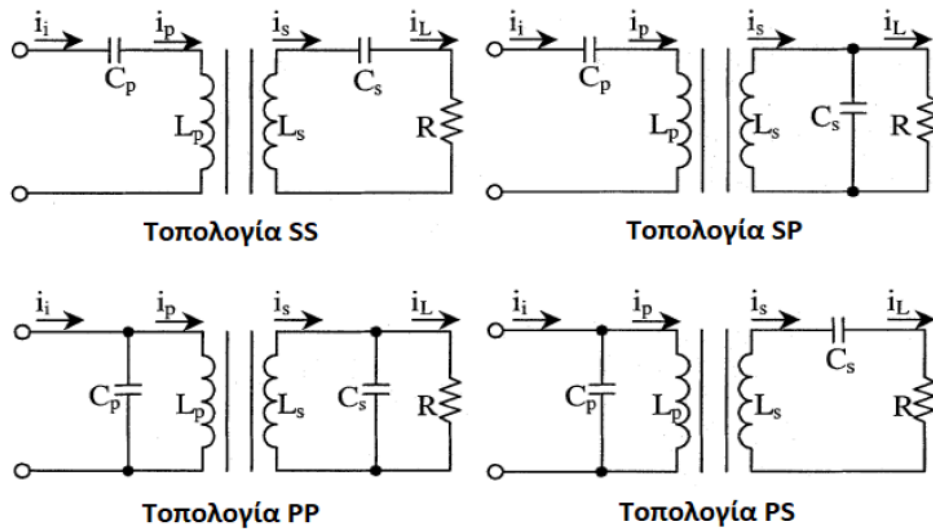


Σχήμα 1.15: Τμηματική διάταξη δυναμικού συζεύκτη

### 1.5 Τοπολογίες αντιστάθμισης

Σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος είναι αναγκαία για τη μείωση της άεργου ισχύος που καταναλώνεται από τα πηνία η εγκατάσταση στοιχείων αντιστάθμισης, τόσο στην πλευρά του δικτύου, όσο και στη πλευρά του δευτερεύοντος.

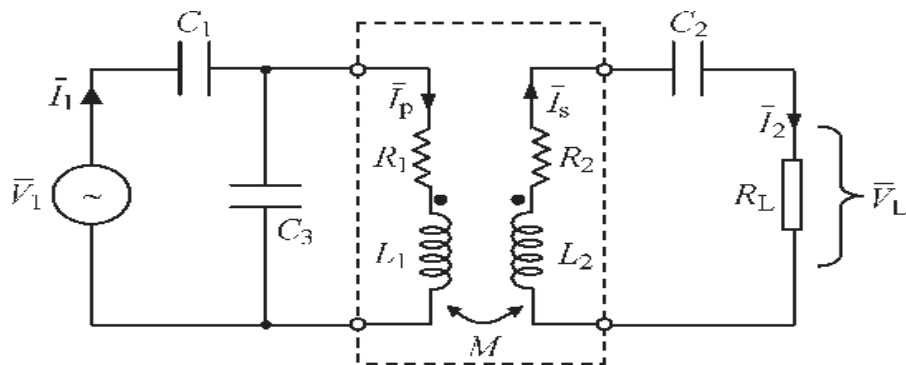
Η πιο απλή μορφή αντιστάθμισης είναι η προσθήκη ενός πυκνωτή σε κάθε πλευρά, είτε σε σειρά είτε παράλληλα με το πηνίο. Συνεπώς, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των πυκνωτών, δημιουργούνται τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί τοπολογιών αντιστάθμισης [9], οι οποίοι είναι οι εξής (Σχήμα 1.16): Σειρά-Σειρά (SS), Παράλληλα-Παράλληλα (PP), Παράλληλα-Σειρά (PS) και Σειρά-Παράλληλα (SP).



Σχήμα 1.16: Βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης

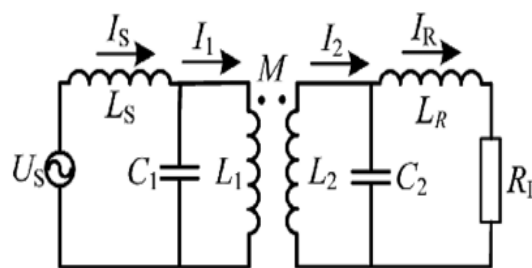
Στην πλευρά του δευτερεύοντος επιλέγεται κατάλληλος πυκνωτής, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς. Στη μείωση της άεργου ισχύος συμβάλλει ο πυκνωτής αντιστάθμισης που βρίσκεται στην πλευρά του πρωτεύοντος και έχει ως στόχο την δημιουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος.

Εκτός από τη χρήση ενός μόνο πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος και ενός στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός στοιχείων αντιστάθμισης. Για παράδειγμα, μία ειδική τοπολογία αντιστάθμισης είναι η Σειρά-Παράλληλα-Σειρά (SPS) (Σχήμα 1.17), η οποία συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των τοπολογιών Σειρά-Σειρά (SS) και Παράλληλα-Σειρά (PS) και παρουσιάζει ικανοποιητική μεταφορά ισχύος ακόμη και για μεγάλες μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος [26].



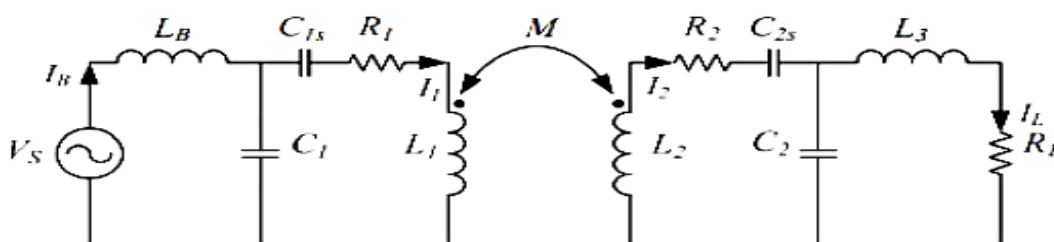
Σχήμα 1.17: Τοπολογία αντιστάθμισης SPS

Μία επιπλέον ειδική τοπολογία είναι η LCL, η οποία αποτελείται από έναν πυκνωτή παράλληλα με το πηνίο και μία επαγωγή σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμο, τόσο στο πρωτεύον, όσο και στο δευτερεύον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18 [27]. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι στη συχνότητα συντονισμού λειτουργεί ως πηγή ρεύματος, γεγονός που καθιστά πιο εύκολο τον χειρισμό στο πρωτεύον. Επιπρόσθετα, με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων, επιτυγχάνεται πλήρης αντιστάθμιση της αέργου ισχύος.



Σχήμα 1.18: Τοπολογία αντιστάθμισης LCL

Τέλος, μία παραλλαγή της LCL τοπολογίας αντιστάθμισης είναι η LCCL, ή αλλιώς LCC, η οποία είναι όμοια με την LCL, με μια προσθήκη ενός πυκνωτή σε σειρά με το πηνίο τόσο στο πρωτεύον, όσο και στο δευτερεύον, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.19 [28]. Με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης στη συγκεκριμένη τοπολογία, τόσο το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και το ρεύμα εξόδου μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα του φορτίου [29].



Σχήμα 1.19: Τοπολογία αντιστάθμισης LCCL

## 1.6 Τεχνικές Ελέγχου

Εκτός από τα στοιχεία αντιστάθμισης, απαραίτητες σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι τεχνικές ελέγχου στην πλευρά πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Υπάρχουν τρεις επιλογές ελέγχου: ο έλεγχος στη πλευρά του δευτερεύοντος, στη πλευρά του πρωτεύοντος και τέλος, και στις δύο πλευρές.

### ➤ Έλεγχος στη πλευρά του δευτερεύοντος

Είτε στην περίπτωση δυναμικής φόρτισης, είτε σε άλλες περιπτώσεις όπου πραγματοποιείται μεταφορά ισχύος από ένα πρωτεύον σε πολλαπλά δευτερεύοντα, ο έλεγχος γίνεται συνήθως στην πλευρά του δευτερεύοντος.

Συνήθης πρακτική ελέγχου είναι το πρωτεύον να διατηρεί σταθερό το ρεύμα και την συχνότητα, ενώ το κάθε δευτερεύον ξεχωριστά ρυθμίζει την ισχύ που χρειάζεται το εκάστοτε φορτίο του [30].

➤ Έλεγχος στη πλευρά του πρωτεύοντος

Σε εφαρμογές φόρτισης όπου υπάρχει μια παροχή για κάθε συζεύκτη, χρησιμοποιείται συνήθως έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος. Με αυτή την πρακτική, ο έλεγχος ρυθμίζει το ρεύμα και/ή τη συχνότητα στο πρωτεύον, αναλόγως των απαιτήσεων ισχύος του δευτερεύοντος, το οποίο αποτελείται συνήθως από έναν ανορθωτή και ένα φίλτρο [31]. Ο έλεγχος αυτός είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλά δευτερεύοντα που εξυπηρετούνται από ένα κοινό πρωτεύον, καθώς οποιαδήποτε ρύθμιση στο πρωτεύον θα επηρέαζε ταυτόχρονα και τις παραμέτρους λειτουργίας (μεταφορά ισχύος κλπ.) σε όλα τα δευτερεύοντα.

➤ Έλεγχος στη πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος

Η καλύτερη επιλογή ελέγχου φαίνεται να είναι η χρήση ελέγχου και στις δύο πλευρές του συστήματος, επιτρέποντας τον έλεγχο παραμέτρων τόσο στο πρωτεύον όσο και το δευτερεύον.

## 1.7 Ηλεκτρομαγνητικά πρότυπα και ασφάλεια

Είναι γενικά παραδεκτό πώς η ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος είναι μια νέα τεχνολογία με πολλά πλεονεκτήματα. Κατά την επαγωγική μεταφορά ισχύος, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Πέρα όμως από το πεδίο μεταξύ της διάταξης, υπάρχει και διαρροή πεδίου στον χώρο γύρω από τον φορτιστή, το οποίο θα πρέπει να βρίσκεται μέσα σε ασφαλή όρια για τον άνθρωπο.

Συνεπώς για κάθε σύστημα μετάδοσης πρέπει να διαβεβαιώνεται ότι τηρούνται τα όρια ασφαλείας σε κάθε πιθανή κατάσταση, όπως για παράδειγμα όταν κάποιος άνθρωπος στέκεται έξω από το αυτοκίνητο, το οδηγεί ή είναι επιβάτης.

Μια σειρά από οδηγίες και συστάσεις έχουν δημοσιευτεί σχετικά με τα όρια ασφαλείας αναφορικά με τις εκπομπές χρονομεταβλητών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, τόσο για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό, όσο και για το ευρύ κοινό. Τα όρια αυτά είναι διαφορετικά, καθώς ο επαγγελματικά εκτιθέμενος πληθυσμός αποτελείται από ενήλικες που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία κάτω από γνωστές συνθήκες και είναι εκπαιδευμένοι ώστε να γνωρίζουν πιθανούς κινδύνους και να παίρνουν τις ανάλογες προφυλάξεις.

Το ευρύ κοινό, αντιθέτως, αποτελείται από άτομα όλων των ηλικιών, διαφόρων καταστάσεων υγείας, και επίσης περιλαμβάνει ιδιαίτερα ευάλωτες κοινωνικές ομάδες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αυστηρότερα όρια τίθενται στην περίπτωση έκθεσης του ευρύ κοινού, σε σχέση με τα ανάλογα όρια για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό.

Στην επαγωγική φόρτιση οι συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που λαμβάνουν χώρα μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος κυμαίνονται περίπου μεταξύ 20 και 100kHz. Στο εύρος αυτών των συχνοτήτων και στο πλαίσιο της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάλυση τους οι ακόλουθες παράμετροι: πυκνότητα μαγνητικής ροής, ρεύμα επαφής, ένταση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου και πυκνότητα ρεύματος.

Όσον αφορά το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, λαμβάνονται υπόψη τα όρια για το ευρύ κοινό, μιας και το αυτοκίνητο χρησιμοποιείται από όλες τις κοινωνικές ομάδες. Επίσης, η παράμετρος που εξετάζεται ενδελεχώς στην παρούσα διπλωματική είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής, εστιάζοντας στα μαγνητικά πεδία λόγω του μαγνητικού συζεύκτη που χρησιμοποιείται για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ οχήματος και φορτιστή.

Κατευθυντήριες οδηγίες δίνονται και από διεθνώς αναγνωρισμένες επιτροπές, μια εκ των οποίων είναι η ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Σε οδηγία που εξέδωσε το 1998 [32], ορίζονται οι βασικοί περιορισμοί και τα όρια αναφοράς για το εύρος συχνοτήτων 0 έως 300GHz.

Οι βασικοί περιορισμοί είναι περιορισμοί που αφορούν στην έκθεση σε χρονο-μεταβλητά ηλεκτρικά μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία και βασίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία και βιολογικές μελέτες, ενώ τα όρια αναφοράς παρέχονται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ώστε να καθορισθεί εάν οι βασικοί περιορισμοί αναμένεται να παραβιασθούν.

Σε κάθε περίπτωση έκθεσης, οι μετρούμενες ή υπολογισθείσες τιμές των μεγεθών του πεδίου μπορούν να συγκριθούν με τα ανάλογα όρια αναφοράς. Σε περίπτωση που κάποιο μέγεθος είναι εντός των ορίων αναφοράς αυτό σημαίνει ότι θα είναι και εντός των αντίστοιχων βασικών περιορισμών. Αν όμως η μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπτό όριο αναφοράς, αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι ο βασικός περιορισμός δε θα ισχύει. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να εκτιμηθεί κατά πόσον τα επίπεδα έκθεσης είναι χαμηλότερα από τους βασικούς περιορισμούς.

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη οδηγία, το όριο αναφοράς της πυκνότητας μαγνητικής ροής για το ευρύ κοινό ανέρχεται σε 6,25μT και για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό σε 30,7μT για συχνότητες 2,5 έως 65kHz και σε 2000/f για συχνότητες 65 έως 100kHz, όπου f είναι η συχνότητα σε kHz.

Το 2010, η ICNIRP εξέδωσε αναθεωρημένη οδηγία σχετικά με την περιορισμένη έκθεση σε χρονομεταβλητά ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία για το εύρος συχνοτήτων 1-100 kHz, σύμφωνα με την οποία το όριο αναφοράς της πυκνότητας μαγνητικής ροής αυξήθηκε σε 27μT για το ευρύ κοινό και 100μT για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό [33].

Σχετικά με την κατάσταση που επικρατεί στην Ευρώπη για την ασφάλεια λόγω των ΗΜ πεδίων, έχει εκδοθεί η σύσταση 1999/519/EC του ευρωπαϊκού συμβουλίου [34], η οποία ισχύει μέχρι και σήμερα. Στη σύσταση αυτή ορίζονται τα όρια αναφοράς και οι βασικοί περιορισμοί για το ευρύ κοινό για το εύρος συχνοτήτων 0 έως 300GHz. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη σύσταση το όριο της πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι ίσο με 6,25μΤ, και ταυτίζεται με το αντίστοιχο όριο της οδηγίας της ICNIRP που εκδόθηκε το 1998.

Σχετικά με τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό, εκδόθηκε το 2004 η οδηγία 2004/40/EC [35] που θέτει το όριο της μαγνητικής ροής σε 30,7μΤ για συχνότητες 2,5 έως 65kHz και σε 2000/f για συχνότητες 65 έως 100kHz, όπου f είναι η συχνότητα σε kHz. Το όριο αυτό συμβαδίζει με το αντίστοιχο όριο που τίθεται από την οδηγία της ICNIRP που εκδόθηκε το 1998. Η οδηγία 2004/40/EC αντικαταστάθηκε το 2013 με την οδηγία 2013/35/EU [36], η οποία βρίσκεται σήμερα σε ισχύ. Η οδηγία αυτή υιοθετεί το όριο για τη μαγνητική ροή που τίθεται από την οδηγία της ICNIRP που εκδόθηκε το 2010 και είναι ίσο με 100μΤ.

Όλες οι διαθέσιμες κατευθυντήριες γραμμές, οδηγίες και συστάσεις που καθορίζουν τα όρια αναφοράς για το ευρύ κοινό παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Αντίστοιχα ο Πίνακα 1.2 παρουσιάζει τη συνοπτική εικόνα για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό. Οι τιμές αναφέρονται σε RMS μεγέθη και η συχνότητα σε Hz.

	Εύρος συχνοτήτων	Όρια Αναφοράς			
		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου - E (V/m)	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου - H (A/m)	Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής - B (μΤ)	Μέγιστο ρεύμα επαφής - I (mA)
<i>ICNIRP 1998</i>	3-100kHz	87	5	6,25	$0,2 * 10^{-3}f$
<i>Σύσταση 1999/519/EC του Συμβουλίου</i>	3-100kHz	87	5	6,25	$0,2 * 10^{-3}f$
<i>ICNIRP 2010</i>	3kHz-10MHz	83	21	27	$0,2 * 10^{-3}f$

Πίνακας 1.1: Όρια ακτινοβολίας για ευρύ κοινό

	Εύρος συχνοτήτων	Όρια Αναφοράς			
		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου - E (V/m)	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου - H (A/m)	Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής - B (μΤ)	Μέγιστο ρεύμα επαφής - I (mA)
<i>ICNIRP 1998</i>	0,82 - 65kHz	610	24,4	30,7	$0,4 * 10^{-3}f$
	65 - 100kHz	610	$1,6/10^{-6}f$	$2/10^{-6}f$	$0,4 * 10^{-3}f$
<i>Σύσταση 2004/40/EC του Κοινοβουλίου</i>	2,5 - 65kHz	610	24,4	30,7	$0,4 * 10^{-3}f$
	65 - 100kHz	610	$1,6/10^{-6}f$	$2/10^{-6}f$	$0,4 * 10^{-3}f$
<i>ICNIRP 2010</i>	3kHz-10MHz	170	80	100	40
<i>Σύσταση 2013/35/EU του Κοινοβουλίου</i>	3kHz-10MHz	610		100	$0,4 * 10^{-3}f$

Πίνακας 1.2: Όρια ακτινοβολίας για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως, σύμφωνα με το πρότυπο AAMI/ISO 14117-2012 [37], στο φάσμα συχνοτήτων που καταλαμβάνεται από την επαγωγική φόρτιση λειτουργούν επίσης ορισμένες εμφυτεύσιμες συσκευές, όπως ο βηματοδότης και οι νευροδιεγέρτες. Πιο συγκεκριμένα, οι συσκευές αυτές λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων 81.38kHz έως 90kHz και σύμφωνα με το πρότυπο, για την αποφυγή παρεμβολών και δυσλειτουργιών των συσκευών, προτείνεται η έκθεση σε ένα μαγνητικό πεδίο με μέγιστη RMS τιμή 15μΤ ή 11,9 A/m.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Σχεδίαση & ανάλυση μαγνητικών συζευκτών

### 2.1 Εισαγωγή

Για την πραγματοποίηση της μελέτης των μαγνητικών διατάξεων που θα μελετηθούν στη συνέχεια της διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ansoft Maxwell. Το πρόγραμμα αυτό είναι ένα εργαλείο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, είτε στατικών, είτε μεταβαλλόμενων.

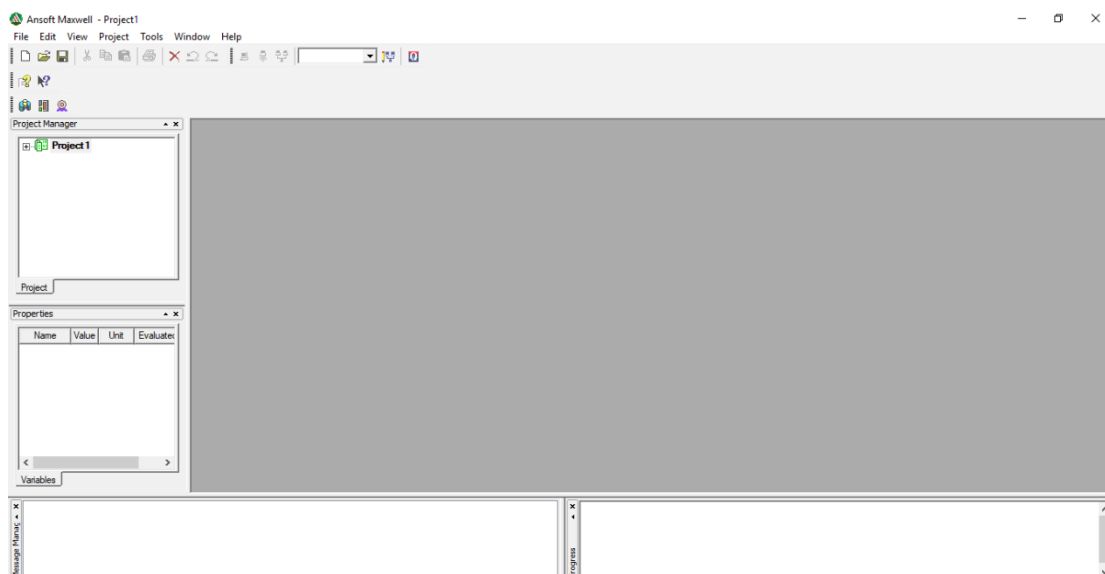
Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στον κλάδο των μηχανικών, στη σχεδίαση και την ανάλυση συσκευών, όπως για παράδειγμα ηλεκτρικών κινητήρων, αισθητήρων, μετασχηματιστών και άλλων ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών [38].

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Σε διάφορα σύνθετα τεχνικά προβλήματα, η εύρεση αναλυτικής λύσης είναι πολλές φορές αδύνατη. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας σχεδιασμού, θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό βήμα προς βήμα, η σχεδίαση και η ανάλυση ενός κυκλικού συζεύκτη, διάταξη η οποία θα μελετηθεί διεξοδικά στην παρούσα διπλωματική.

### 2.2 Περιβάλλον προγράμματος

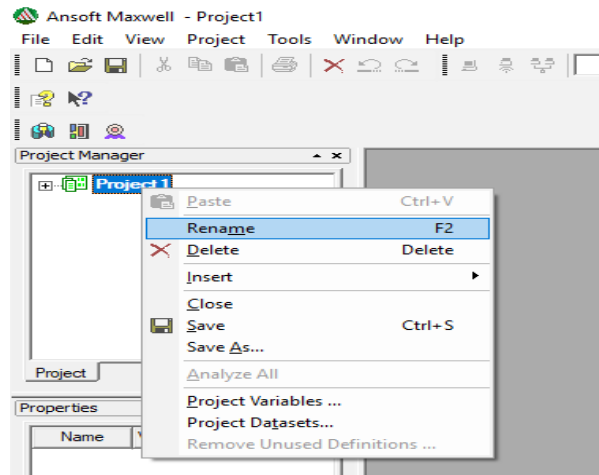
Κατά την έναρξη του προγράμματος, ο χρήστης αντικρίζει το παρακάτω περιβάλλον εργασίας (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Περιβάλλον εργασίας Ansoft Maxwell



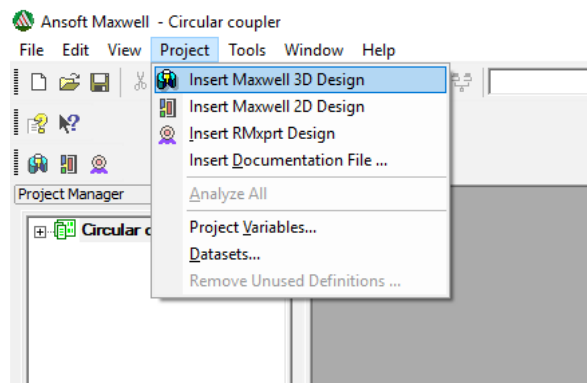
Μετονομάζουμε το πρόβλημα από Project σε Circular coupler, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Μετονομασία προβλήματος

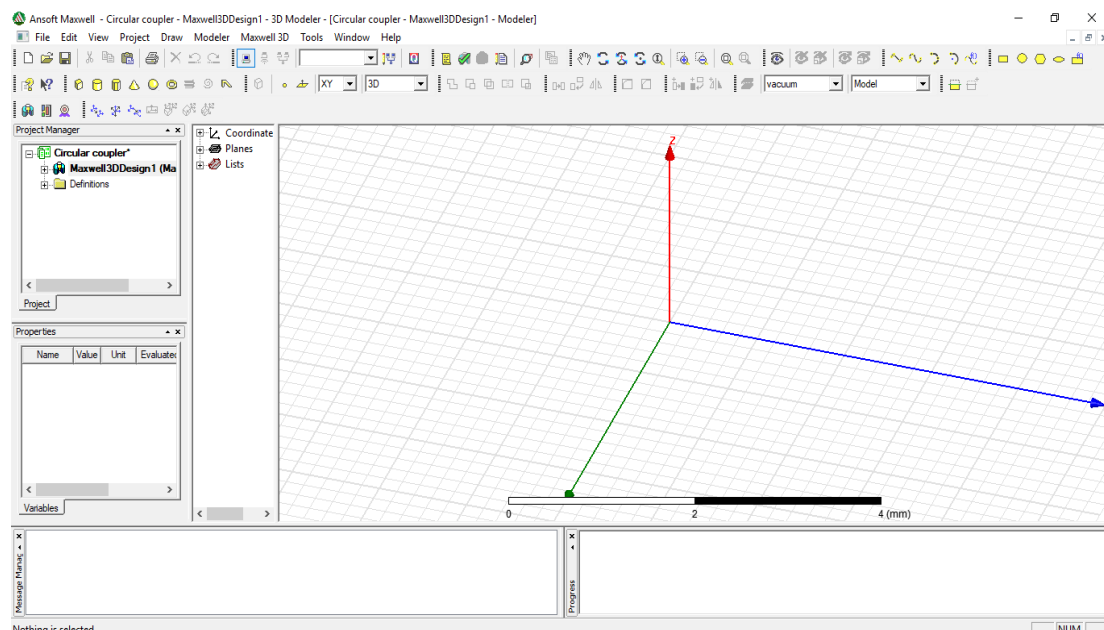
Το πρόβλημα του κυκλικού συζεύκτη είναι ένα τρισδιάστατο πρόβλημα, επομένως επιλέγουμε (Σχήμα 2.3):

- Project -> Insert Maxwell 3D Design



Σχήμα 2.3: Εισαγωγή τρισδιάστατης διάταξης

Με το βήμα αυτό το τελικό περιβάλλον εργασίας, όπου θα γίνει η σχεδίαση, είναι διαθέσιμο (Σχήμα 2.4).



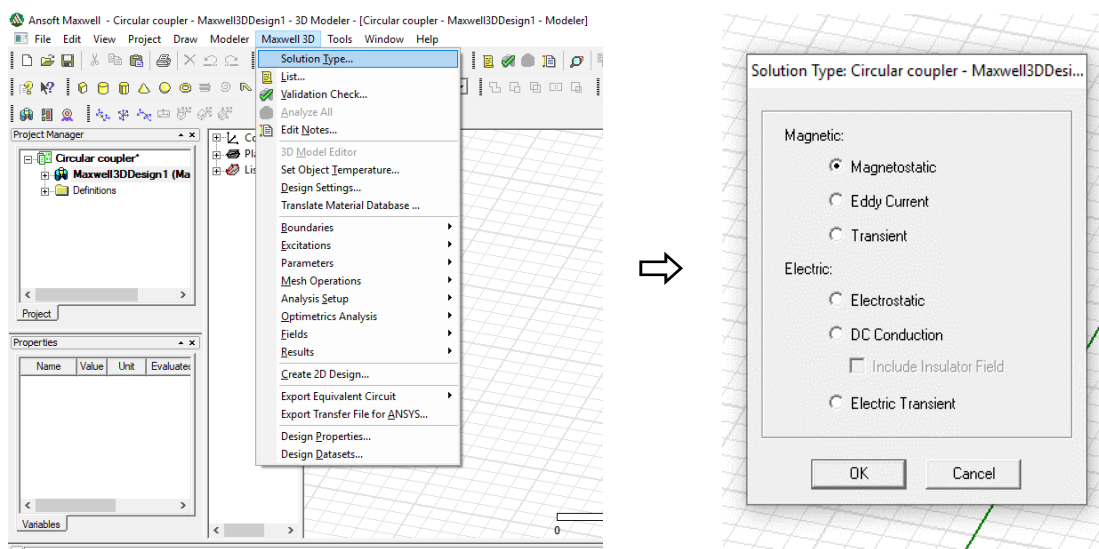
Σχήμα 2.4: Περιβάλλον σχεδίασης 3D διάταξης

Το περιβάλλον χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές, όπως η γραμμή εντολών, η γραμμή συμβόλων, ο διαχειριστής της σχεδίασης, τα παράθυρα μεταβλητών, μηνυμάτων, προόδου και τέλος, το παράθυρο σχεδίασης.

Πριν προχωρήσουμε στη σχεδίαση της διάταξης, πρέπει να αρχικοποιήσουμε το πρόγραμμα.

Έχοντας επιλέξει τρισδιάστατη διάταξη, πρέπει να επιλέξουμε και τον τύπο της επίλυσης του προβλήματος. Το Maxwell δίνει διάφορες επιλογές μεθόδου επίλυσης, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.5. Στη συγκεκριμένη διάταξη επιλέγουμε αρχικά μαγνητοστατική λύση, επομένως επιλέγουμε:

- Maxwell 3D -> Solution Type -> Magnetostatic

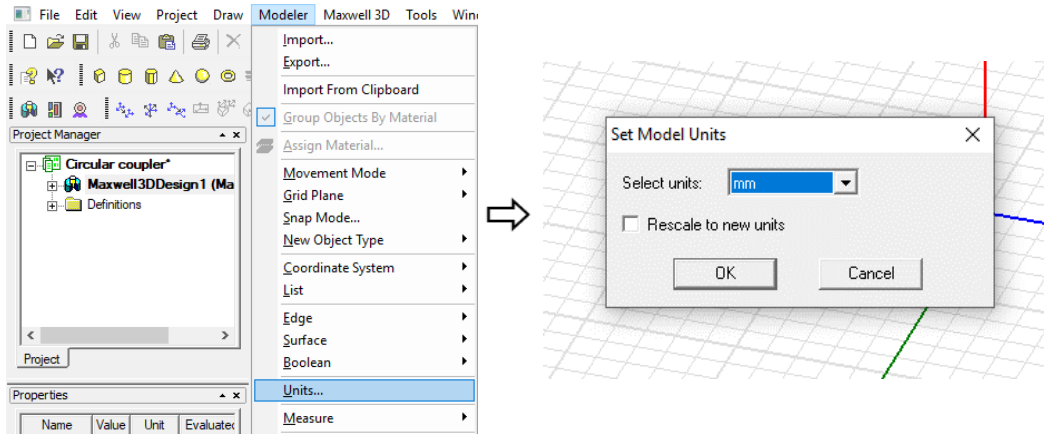


Σχήμα 2.5: Επιλογή λύσης μαγνητοστατικού τύπου

Το μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται σε μαγνητοστατική ανάλυση, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα μίας σύντομης χρονικά επίλυσης με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια. Ωστόσο, όπως θα περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 6, για να ληφθεί υπόψιν και η επίδραση θωράκισης αλουμινίου στη διάταξη, αλλά και για την καλύτερη ανάλυση ως προς την επίδραση που έχει το σασί του αυτοκινήτου στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία, δύναται επίσης, να επιλεγθεί η ανάλυση “Eddy Current”.

Ένα τελευταίο βήμα που απομένει είναι να ορίσουμε μια κοινή μονάδα μέτρησης, όπως για παράδειγμα τα mm (Σχήμα 2.6). Αυτό το βήμα δεν είναι απαραίτητο, αλλά για αποφυγή λαθών στη σχεδίαση καλό είναι να εφαρμόζεται. Επομένως, επιλέγουμε:

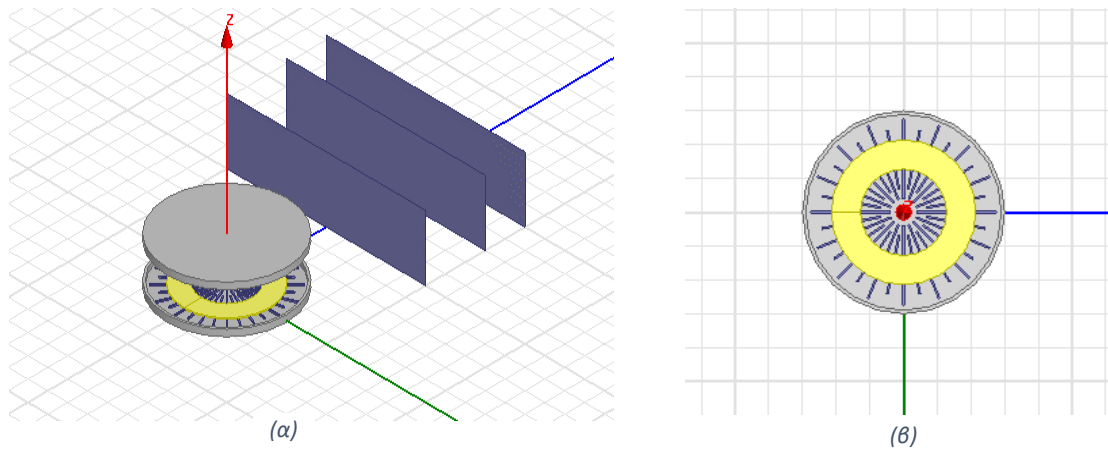
- Modeler -> Units -> mm -> OK



Σχήμα 2.6: Ορισμός κοινής μονάδας μέτρησης

### 2.3 Σχεδίαση Διάταξης

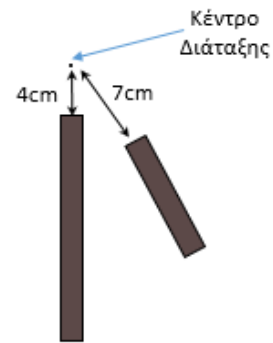
Η διάταξη που θέλουμε να σχεδιάσουμε, με τις επιφάνειες μέτρησης του πεδίου τοποθετημένες και η κάτοψη του πρωτεύοντος, φαίνονται στο Σχήμα 2.7. Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές για αντίστοιχες κυκλικές διατάξεις με ράβδους φερρίτη, όπως αυτές περιγράφονται αναλυτικά στην αναφορά [14].



Σχήμα 2.7: (α) Τελική διάταξη και (β) κάτοψη πρωτεύοντος

Ο συζεύκτης αποτελείται από ένα κυκλικό πρωτεύον και ένα πανομοιότυπο κυκλικό δευτερεύον, συνολικής διαμέτρου 60cm. Το διάκενο μεταξύ τους ορίζεται στα 15cm.

Κάθε ένα μέλος του φορτιστή περιέχει 16 μεγάλες ράβδους φερρίτη, διαστάσεων 236mm X 5mm X 5mm και 16 μικρότερες ράβδους, διαστάσεων 177mm X 5mm X 5mm, οι οποίες απέχουν από το κέντρο της διάταξης 4cm και 7cm αντίστοιχα (Σχήμα 2.8).

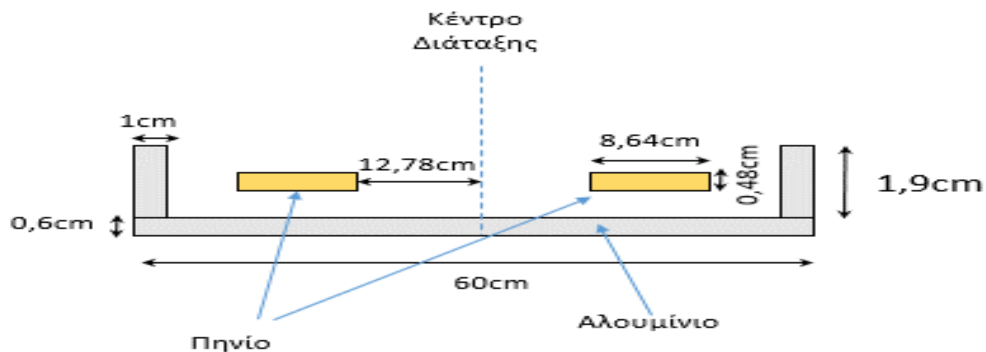


Η διάταξη αποτελείται επίσης από ένα πηνίο 18 ελιγμάτων, σχήματος κυκλικού δακτυλίου, εσωτερικής ακτίνας 12,78cm, εξωτερικής ακτίνας 21,42cm και ύψους 0,48cm, το οποίο τοποθετείται πάνω στις ράβδους φερρίτη.

Η διάταξη περιβάλλεται από ασπίδα αλουμινίου διαμέτρου 60cm, ύψους 2,5cm, ύψους βάσης 0,6cm και «πλάτους» 1cm.

Σχήμα 2.8: Τοπολογία ράβδων φερρίτη

Για καλύτερη κατανόηση της διάταξης, παρουσιάζεται η τομή της στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Τομή του πρωτεύοντος

### 2.3.1 Θωράκιση αλουμινίου πρωτεύοντος

Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση της μαγνητοστατικής ανάλυσης η θωράκιση αλουμινίου δε λαμβάνεται υπόψιν στην επίλυση από το Maxwell. Τοποθετείται, ωστόσο, για να υποδείξει τη χωροταξική τοποθέτηση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Λαμβάνεται, βέβαια, υπόψιν στην ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 6.

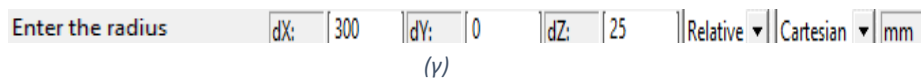
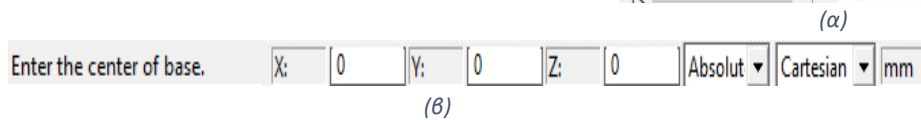
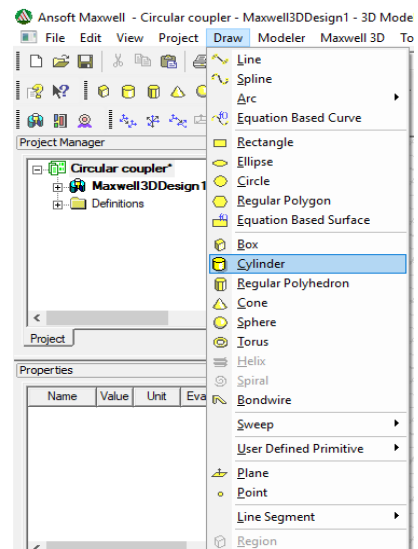
Η σχεδίαση της θωράκισης αλουμινίου θα κατασκευαστεί σε 2 μέρη, διότι η μορφή της δεν παραπέμπει σε κάποιο γνωστό σχήμα. Η φιλοσοφία της κατασκευής θα είναι να κατασκευάσουμε πρώτα τον εξωτερικό κύλινδρο, ύστερα τον εσωτερικό και αφαιρώντας τους θα προκύψει η ασπίδα.

➤ Εξωτερικός κύλινδρος

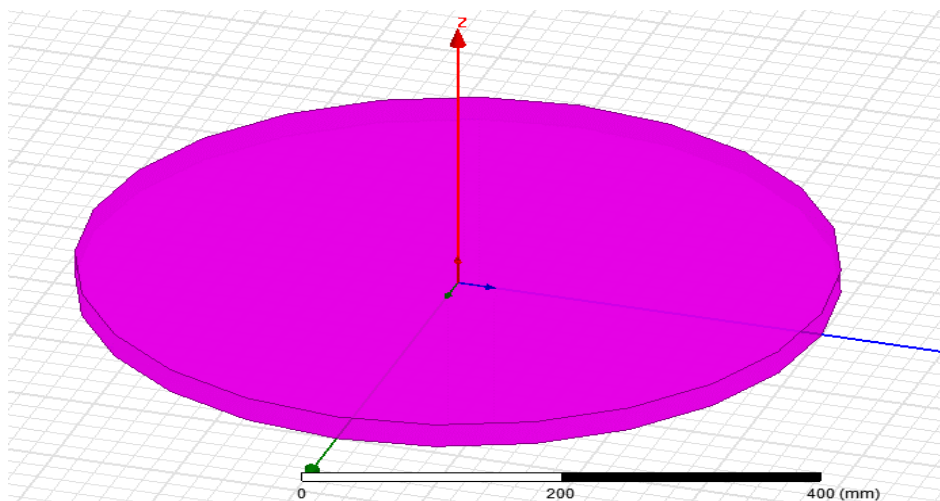
Ο κύλινδρος αυτός θα έχει ακτίνα 30cm και ύψος 2,5cm. Η δημιουργία ενός κυλίνδρου στο πρόγραμμα γίνεται ως εξής:

- Draw -> Cylinder

Πρέπει να ορίσουμε το κέντρο της διάταξης, που στην συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι το  $X = 0, Y = 0, Z = 0$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10 β, και πατάμε Enter. Έπειτα, ορίζουμε τις διαστάσεις του κυλίνδρου, όπου dX είναι η ακτίνα και dZ είναι το ύψος. Επομένως, βάζουμε  $dX = 300\text{mm}$   $dY = 0$  και  $dZ = 25\text{mm}$  και πατάμε Enter (Σχήμα 2.10 γ).



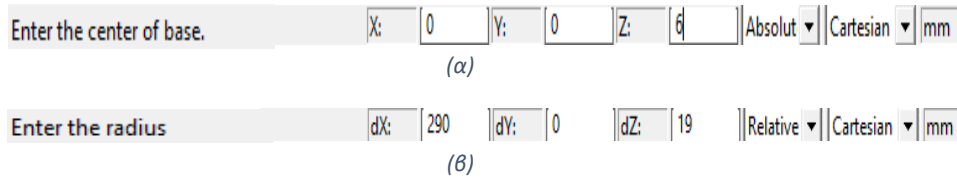
Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ο εξωτερικός κύλινδρος (Σχήμα 2.10 δ).



Σχήμα 2.10: (α), (β), (γ) Βήματα κατασκευής και (δ) τελική μορφή εξωτερικού κυλίνδρου

➤ Εσωτερικός κύλινδρος

Ο εσωτερικός κύλινδρος θα έχει ακτίνα 29cm και ύψος 1,9cm. Ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία, κατασκευάζεται ο κύλινδρος, με διαστάσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.11.

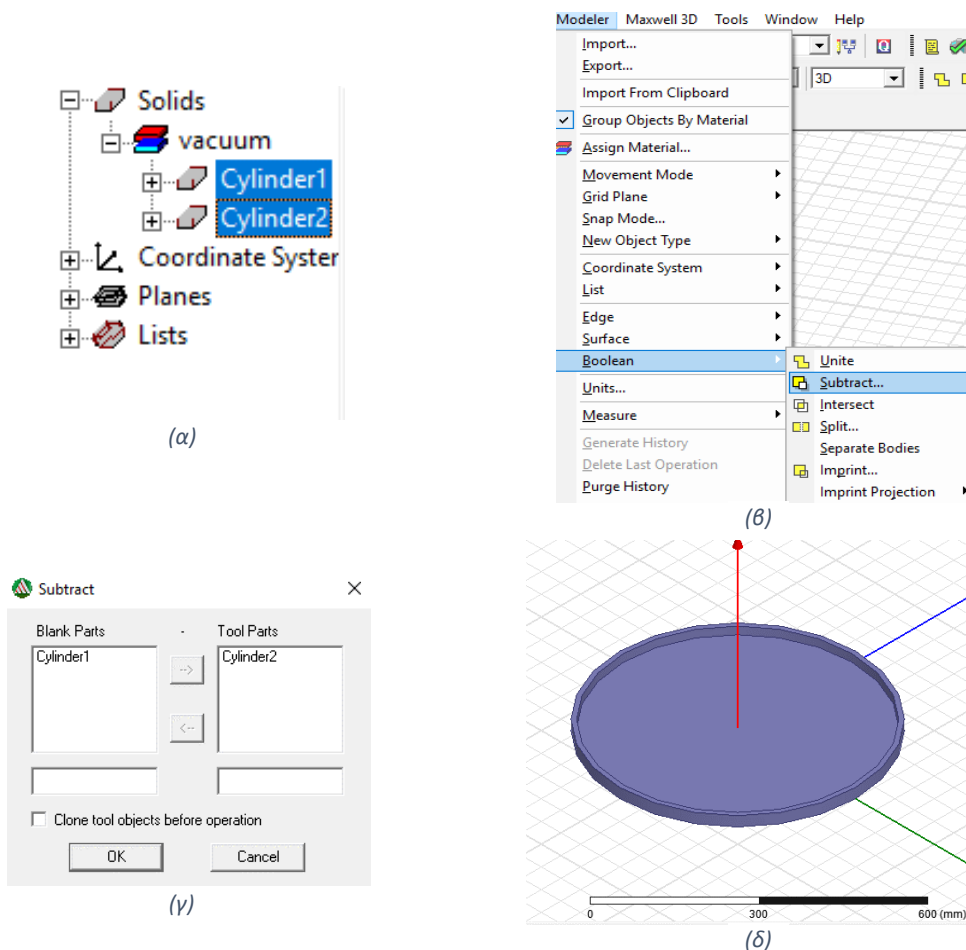


Σχήμα 2.11: (α) Συντεταγμένες και (β) διαστάσεις κατασκευής εσωτερικού κυλίνδρου

➤ Θωράκιση αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τελική μορφή της θωράκισης (Σχήμα 2.12) θα προκύψει από την αφαίρεση των κυλίνδρων. Αυτό γίνεται ως εξής:

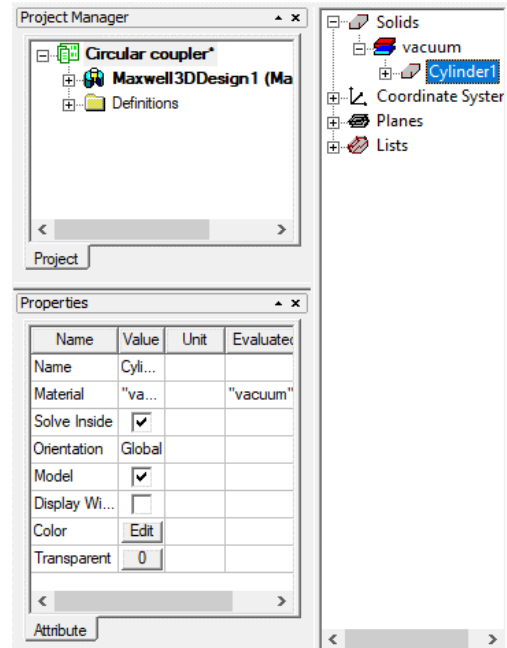
- i. Επιλέγουμε τους κυλίνδρους
- ii. Modeler -> Boolean -> Subtract
- iii. Επιβεβαιώνουμε πως στο Tool Parts είναι ο Cylinder2 και πατάμε OK



Σχήμα 2.12: (α), (β), (γ) Βήματα κατασκευής και (δ) τελική μορφή ασπίδας αλουμινίου

Επιλέγοντας το Cylinder1 εμφανίζεται το παράθυρο των ιδιοτήτων, όπου μπορούμε να τροποποιήσουμε το όνομα, το υλικό, το χρώμα και τη διαφάνεια.

Μιας και η θωράκιση θα είναι από αλουμίνιο, επιλέγουμε στη σχεδίαση χρώμα γκρι.



Σχήμα 2.13: Πίνακας ιδιοτήτων

### 2.3.2 Φερριτες πρωτεύοντος

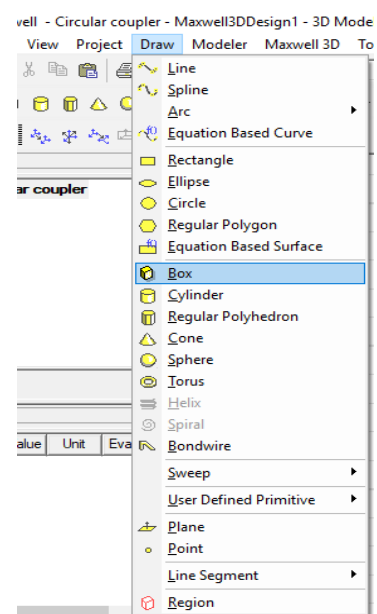
Το πρωτεύον αποτελείται από 16 ράβδους φερριτη διαστάσεων 236mm X 5mm X 5mm και 16 μικρότερες ράβδους φερριτη διαστάσεων 177mm X 5mm X 5mm. Οι ράβδοι εφάπτονται πάνω στην ασπίδα αλουμινίου και απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους.

#### ➤ Μεγάλες ράβδοι

Για τον σχηματισμό της πρώτης ράβδου φερριτη ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

##### i. Draw -> Box

Αρχικά εισάγουμε τα σημεία της αρχής των αξόνων (Σχήμα 2.14 β). Οι ράβδοι απέχουν 4cm από την αρχή των αξόνων, ο άξονα xx' περνά από το κέντρο της κάτω ακμής τους και εφάπτονται στην ασπίδα. Έπειτα πατάμε Enter. Στη συνέχεια ορίζουμε τις διαστάσεις, όπου dX είναι το μήκος dy το πλάτος και dZ είναι το ύψος (Σχήμα 2.14 γ). Ξαναπατάμε Enter και σχηματίζεται η πρώτη ράβδος φερριτη.



(α)

Enter the box position. X: 40 Y: -2.5 Z: 6 Absolut Cartesian mm  
(β)

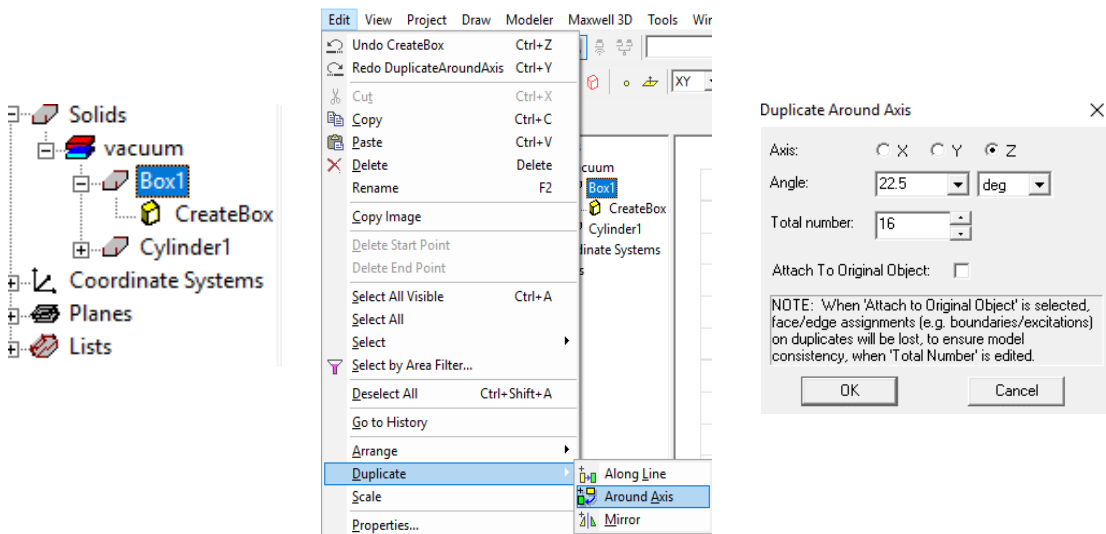
Enter the opposite corner of the base rectangle. dX: 236 dY: 5 dZ: 5 Relative Cartesian mm  
(γ)

Σχήμα 2.14: (α), (β), (γ) Βήματα σχεδιασμού της πρώτης μεγάλης ράβδου φερρίτη

Ένας τρόπος να σχηματίσουμε τις υπόλοιπες ράβδους είναι να υπολογίσουμε σε κάθε μία την θέση της ράβδου και με δεδομένες τις διαστάσεις της, να την κατασκευάσουμε. Μια τέτοια πρακτική όμως θα εμπειρείχε μεγάλο σφάλμα, καθώς οι ράβδοι βρίσκονται υπό γωνία μεταξύ τους.

Το Maxwell μας δίνει τη δυνατότητα να το κάνουμε αυτό αυτόματα, δημιουργώντας αντίγραφα της ράβδου γύρω από έναν άξονα, ορίζοντας μόνο την μεταξύ τους γωνία. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, ο κύκλος χωρίζεται γύρω από τον άξονα zz' σε 16 τόξα, όσα και οι ράβδοι, με το κάθε τόξο να ισούται με  $360^\circ / 16 = 22,5^\circ$ . Η διαδικασία έχει ως εξής (Σχήμα 2.15):

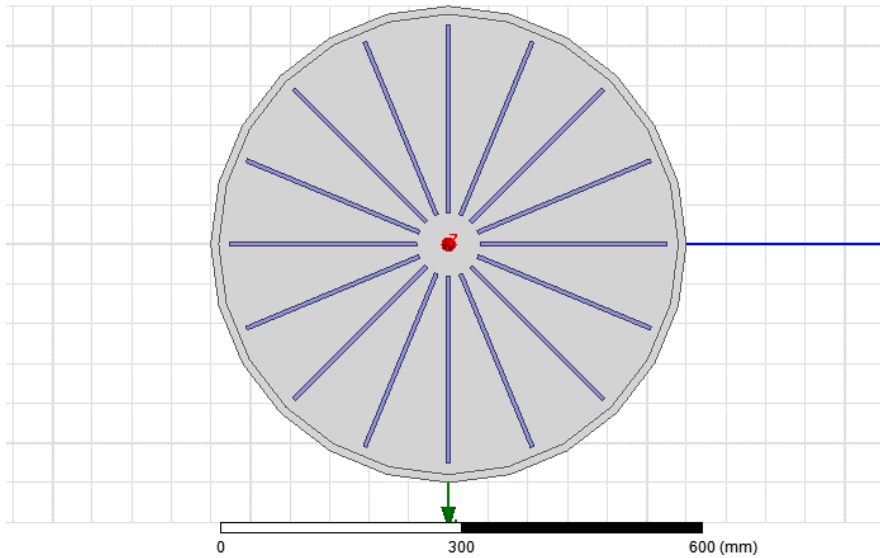
- ii. Επιλέγουμε την ράβδο
- iii. Edit -> Duplicate -> Around Axis
- iv. Axis -> Z, Angle = 22.5 deg, Total number = 16



Σχήμα 2.15: Κατασκευή όλων των μεγάλων ράβδων φερρίτη



Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16 , οι μεγάλες ράβδοι φερριτή έχουν πλέον δημιουργηθεί.



Σχήμα 2.16: Κάτοψη ασπίδας αλουμινίου και μεγάλων ράβδων φερριτή

#### ➤ Μικρές ράβδοι

Οι μικρές ράβδοι βρίσκονται ανάμεσα στις μεγάλες ράβδους. Μεταξύ τους απέχουν  $22,5^\circ$ , όπως και οι μεγάλες, ενώ κάθε μικρή ράβδος απέχει από την διπλανή της μεγάλη ράβδο  $22,5^\circ/2 = 11,25^\circ$ .

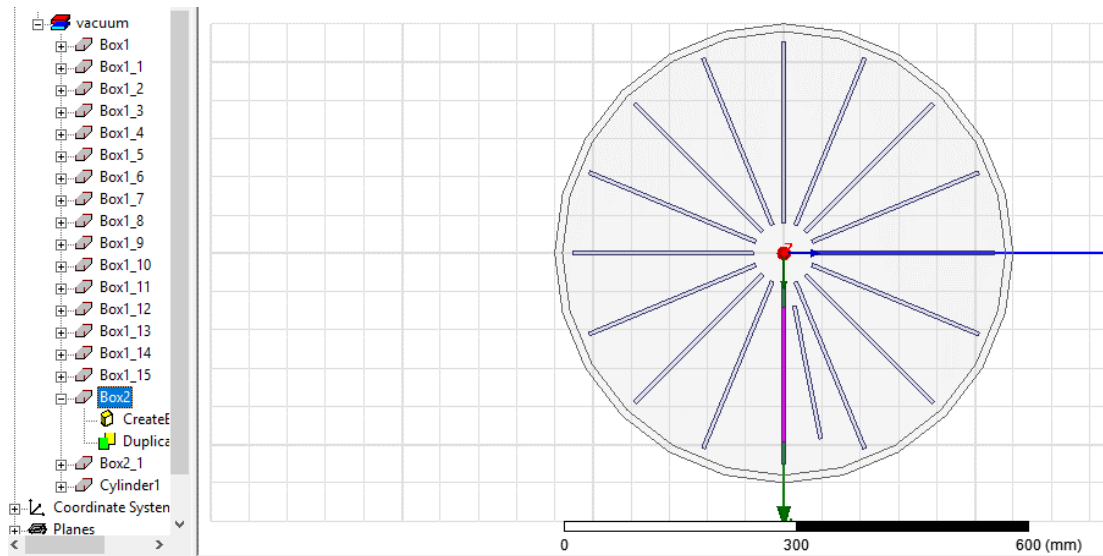
Η λογική της κατασκευής τους θα βασιστεί στην διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για τις μεγάλες ράβδους, με μια διαφορά. Όπως αναφέρθηκε, η εύρεση της θέσης της πρώτης ράβδου στην γωνία  $11,25$ , εμπεριέχει τον κίνδυνο σφάλματος. Για αυτό το λόγο, θα κατασκευαστεί πρώτα στην αρχή των αξόνων μία ράβδος αναφοράς, όπως και προηγουμένως, θα μεταφερθεί κατά  $11,25^\circ$ , στη συνέχεια θα σβηστεί η ράβδος αναφοράς και τέλος, θα δημιουργηθούν οι υπόλοιπες 15 με την μορφή αντιγράφων γύρω από άξονα. Η διαδικασία αυτή στο πρόγραμμα Maxwell φαίνεται παρακάτω:

##### i. Draw -> Box

Για την ράβδο αναφοράς ορίζουμε τις παραμέτρους  $X = 70\text{mm}$ ,  $Y = -2,5\text{mm}$ ,  $Z = 6\text{mm}$  και  $dX = 177\text{mm}$ ,  $dY = 5\text{mm}$ ,  $dZ = 5\text{mm}$ .

##### ii. Edit -> Duplicate -> Around Axis

Εισάγουμε τα στοιχεία: Axis -> Z, Angle =  $11.25 \text{ deg}$ , Total number = 2 και πατάμε OK. Στο σημείο αυτό έχει δημιουργηθεί η πρώτη ράβδος στη θέση με γωνία  $11.25^\circ$  (Σχήμα 2.17). Επομένως μπορούμε να σβήσουμε τη ράβδο αναφοράς που βρίσκεται στη θέση 0. Αυτό γίνεται επιλέγοντας τη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17, και πατώντας Delete.



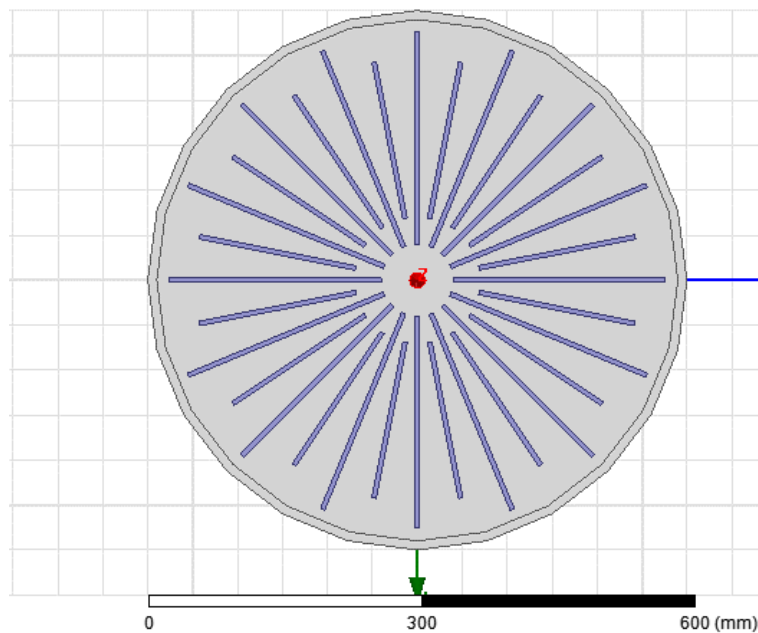
Σχήμα 2.17: Κατασκευή πρώτης μικρής ράβδου φερρίτη

iii. Επιλέγουμε την ράβδο στη θέση με γωνία  $11.25^\circ$ , η οποία εδώ έχει όνομα Box2\_1, με σκοπό να δημιουργήσουμε αντίγραφα γύρω από τον άξονα.

iv. Edit -> Duplicate -> Around Axis

Εισάγουμε τα στοιχεία: Axis -> Z, Angle =  $22,5 \text{ deg}$ , Total number = 16 και στη συνέχεια πατάμε OK.

Η διάταξη με όλες τις ράβδους φερρίτη τοποθετημένες έχει την εξής μορφή.



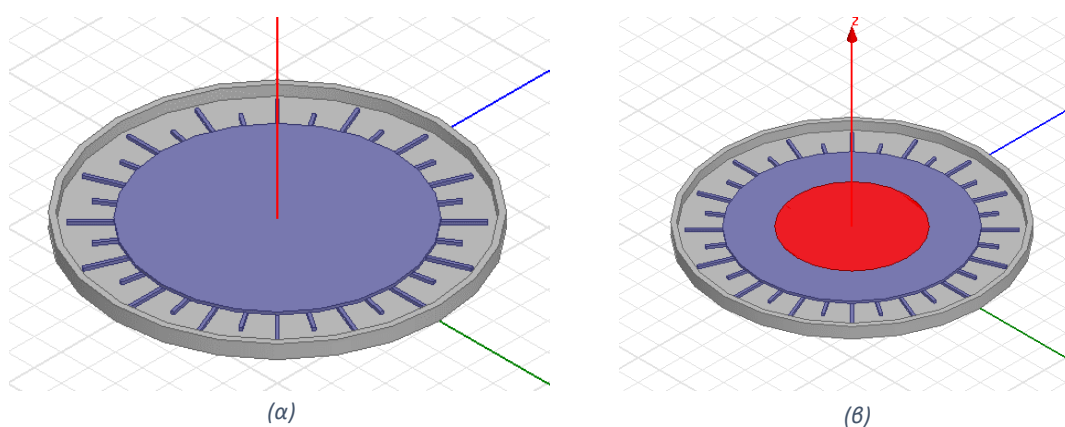
Σχήμα 2.18 Κάτοψη ασπίδας αλουμινίου και ράβδων φερρίτη

### 2.3.3 Τύλιγμα Πρωτεύοντος

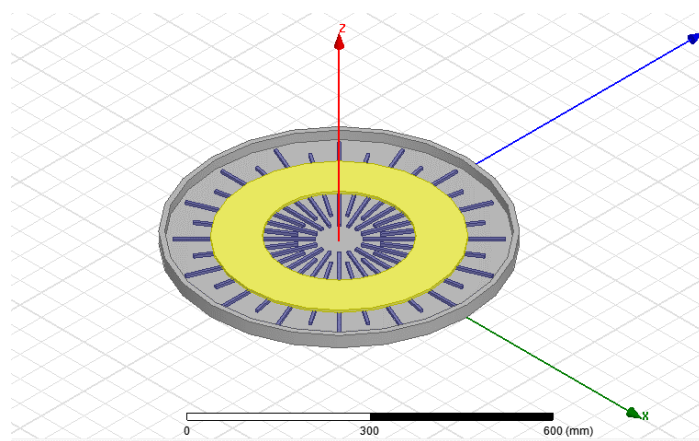
Η λογική κατασκευής του τυλίγματος στο πρωτεύον έχει πολλές ομοιότητες με την κατασκευή της ασπίδας αλουμινίου. Περιγραφικά, θα δημιουργηθεί ένας εξωτερικός και στη συνέχεια ένας εσωτερικός κύλινδρος που θα τοποθετηθούν πάνω στους φερρίτες και η τελική μορφή του πηνίου θα προκύψει από την μεταξύ τους αφαίρεση. Τα βήματα σχεδίασης είναι τα εξής:

- i. Draw -> Cylinder  
Για τον εξωτερικό κύλινδρο ορίζουμε τις παραμέτρους ως  $X = 0\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$ ,  $Z = 11\text{mm}$  και  $dX = 214,2\text{mm}$ ,  $dY = 0\text{mm}$ ,  $dZ = 4,8\text{mm}$  (Σχήμα 2.19 α)
- ii. Draw -> Cylinder  
Για τον εσωτερικό κύλινδρο ορίζουμε τις παραμέτρους ως  $X = 0\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$ ,  $Z = 11\text{mm}$  και  $dX = 127,8\text{mm}$ ,  $dY = 0\text{mm}$ ,  $dZ = 4,8\text{mm}$  (Σχήμα 2.19 β, κόκκινο χρώμα)
- iii. Επιλέγουμε τους κυλίνδρους
- iv. Modeler -> Boolean -> Subtract

Για να μην έχει το πηνίο το ίδιο χρώμα με τους φερρίτες, επιλέγουμε κίτρινο χρώμα. Η τελική διάταξη του πρωτεύοντος φαίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.19: (α), (β) Διαδικασία σχεδίασης τυλίγματος



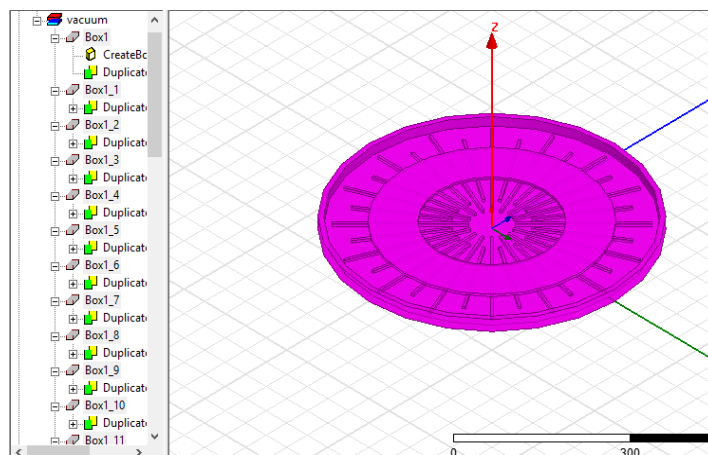
Σχήμα 2.20: Πρωτεύον συζεύκτη

### 2.3.4 Δευτερεύον Συζεύκτη

Μια μέθοδος για την σχεδίαση της ασπίδας αλουμινίου, των φερρίτων και του τυλίγματος του δευτερεύοντος θα ήταν να το κατασκευάσουμε με την ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στο πρωτεύον, με την διαφορά ότι τα στοιχεία θα είναι αντεστραμμένα και μετατοπισμένα κατά 15cm προς τα πάνω, όσο είναι και το διάκενο.

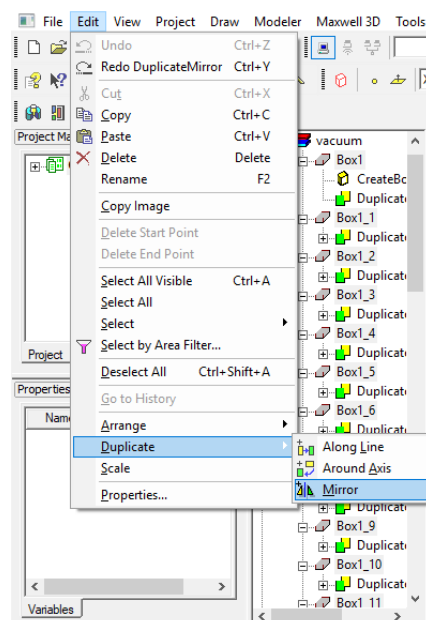
Το Maxwell διαθέτει αυτοματοποιημένα εργαλεία τα οποία διευκολύνουν την σχεδίαση. Συνεπώς, εκμεταλλευόμενοι την συμμετρία που παρουσιάζει η διάταξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, θα κατασκευάσουμε το πρωτεύον αυτόματα. Αυτό θα γίνει με την μέθοδο του καθρεπτισμού, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω:

- i. Επιλέγουμε όλα τα στοιχεία της διάταξης. Αυτό γίνεται είτε ένα ένα, είτε πιο σύντομα με την συντόμευση του πληκτρολογίου Ctrl + A.



(α)

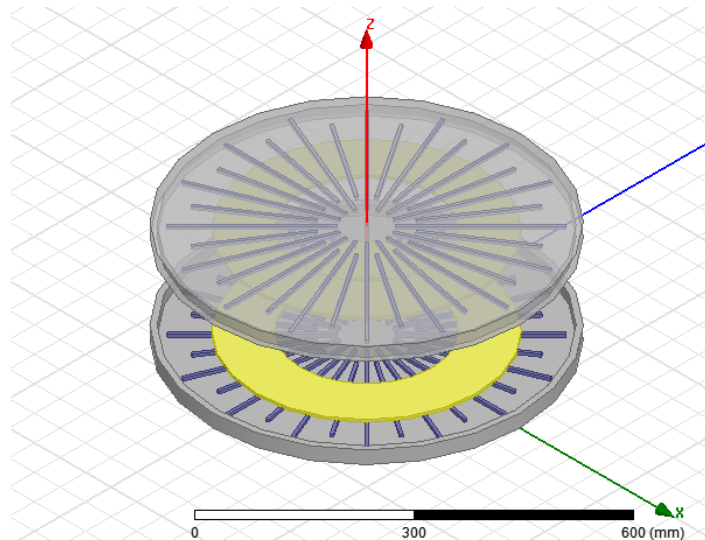
- ii. Edit -> Duplicate -> Mirror  
Με την εντολή αυτή θα δημιουργηθεί το δευτερεύον αντεστραμμένο πάνω από το πρωτεύον, αρκεί να ορίσουμε τις σωστές παραμέτρους. Αυτές είναι:  $X = 300\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$ ,  $Z = 100\text{mm}$  και  $dX = 0\text{mm}$ ,  $dY = 0\text{mm}$ ,  $dZ = 75\text{mm}$ .



(β)

Σχήμα 2.21: Βήματα δημιουργίας δευτερεύοντος

Ο φορτιστής έχει λάβει πλέον την τελική του μορφή.



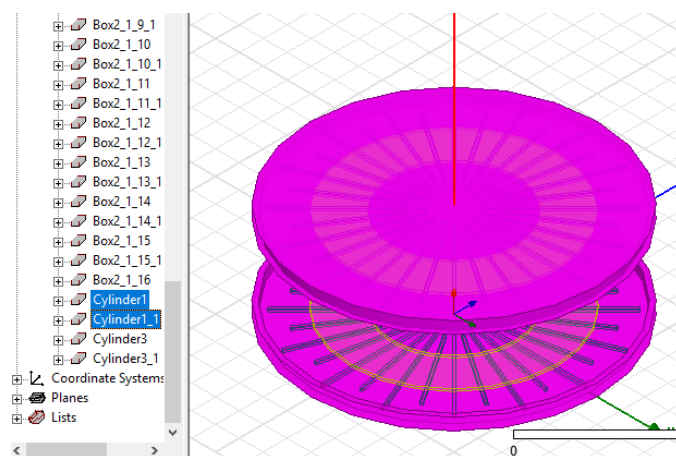
Σχήμα 2.22: Τελική μορφή φορτιστή

## 2.4 Ορισμός υλικών

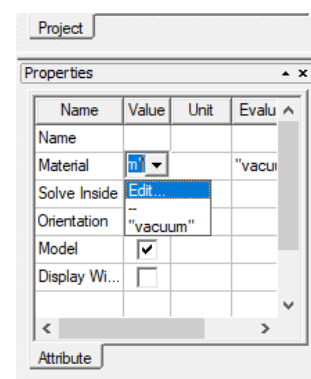
Για τον ορισμό των υλικών πρέπει να επιλέγονται κάθε φορά οι γεωμετρίες που θέλουμε να ορίσουμε. Στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιούνται τέσσερις κατηγορίες υλικών, αλουμίνιο, χαλκός, φερρίτης και αέρας.

### ➤ Θωράκιση αλουμινίου

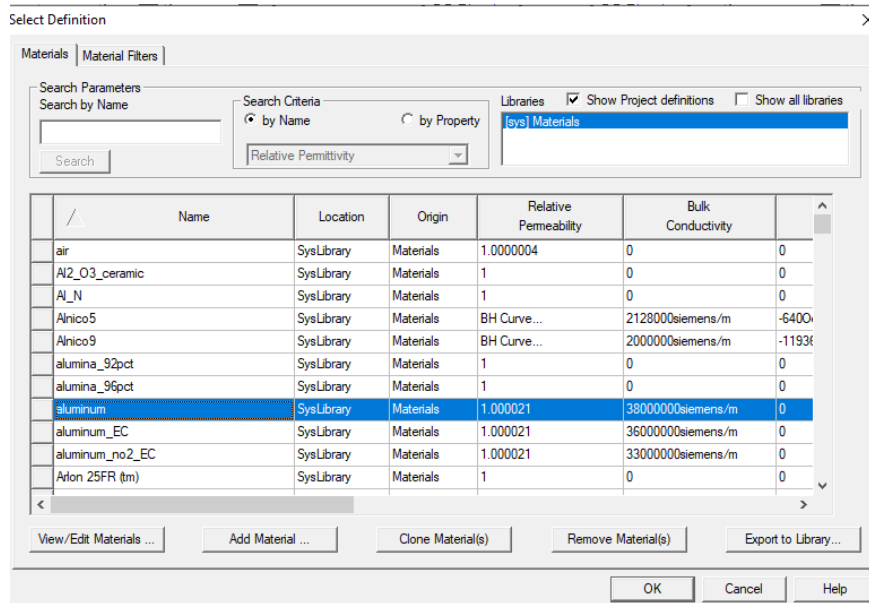
Αρχικά επιλέγουμε τις δύο κυλινδρικές γεωμετρίες που αποτελούν τις ασπίδες αλουμινίου. Από τον πίνακα ιδιοτήτων κάνουμε κλικ στο Material -> Edit και στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε το υλικό, το οποίο θα είναι το aluminum και πατάμε OK. Η διαδικασία στο Maxwell φαίνεται στο Σχήμα 2.23



(α)



(β)

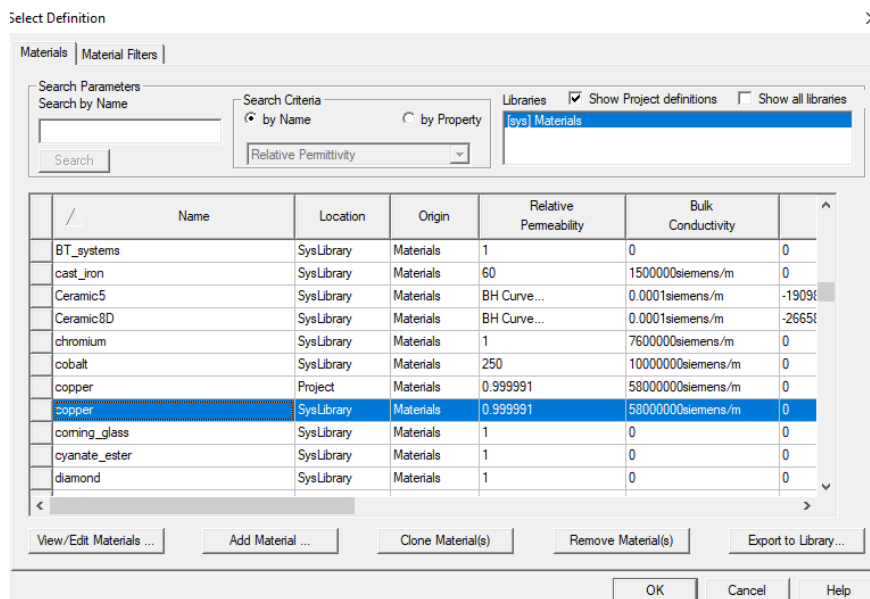


(γ)

Σχήμα 2.23: (α), (β), (γ) Ορισμός αλουμινίου στη θωράκιση

### ➤ Τυλίγματα

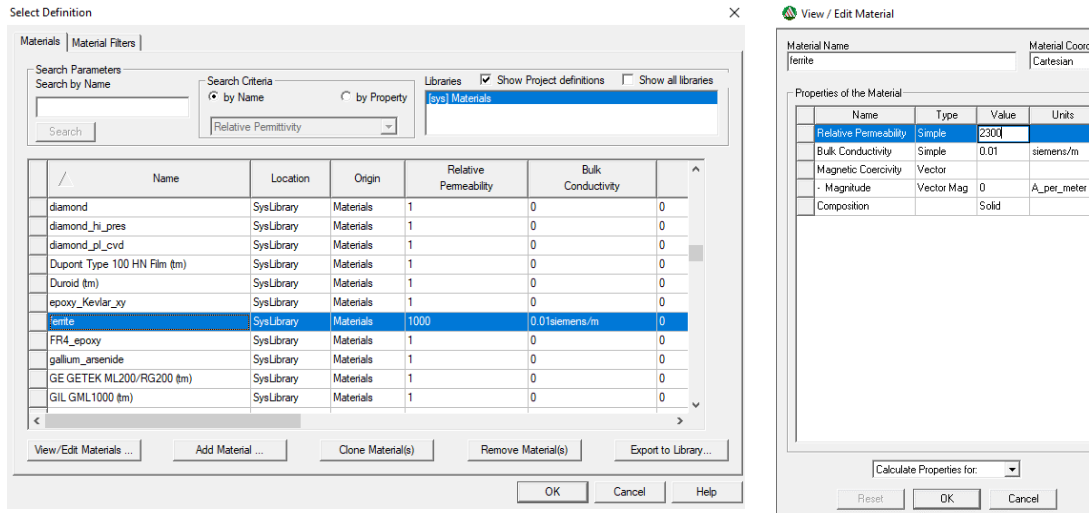
Για την επιλογή των τυλιγμάτων ακολουθείται ίδια διαδικασία, με μόνη διαφορά ότι στην επιλογή του υλικού επιλέγουμε Copper (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.24: Ορισμός χαλκού στα τυλίγματα

## ➤ Ράβδοι φερρίτη

Για τον ορισμό του υλικού των ράβδων, ομοίως με πριν, στην λίστα υλικών βρίσκουμε το υλικό με ονομασία ferrite. Όμως δεν το επιλέγουμε αυτούσιο, αλλά πρέπει να κάνουμε μία τροποποίηση στην μαγνητική διαπερατότητα (relative permeability). Για να γίνει αυτό επιλέγουμε View/Edit Materials και στο πεδίο Value αλλάζουμε την τιμή σε 2300, σύμφωνα με την αναφορά [14] η οποία ορίζει τις προδιαγραφές για τη σχεδίαση της διάταξης.



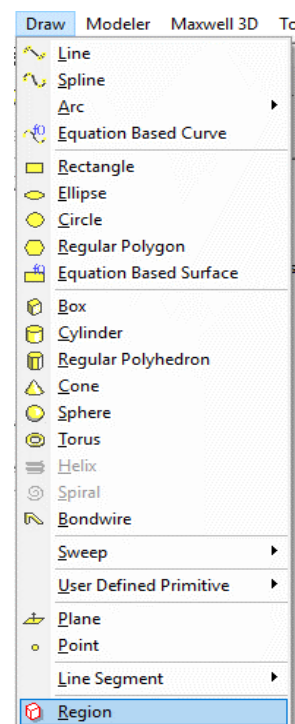
Σχήμα 2.25: Ορισμός υλικού στις ράβδους φερρίτη

## 2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών

Σε προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ορισθούν οι οριακές συνθήκες στα «όρια σχεδιασμού» της διάταξης. Με την επιλογή Region το Maxwell ορίζει αυτόματα τις απαραίτητες οριακές συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος.

Για το σχεδιασμό της περιοχής αυτής επιλέγουμε: Draw -> Region και στη συνέχεια επιλέγουμε Absolute Offset ίσο με 700mm (Σχήμα 2.26). Η περιοχή λειτουργίας δεν πρέπει να οριστεί πολύ μικρή, διότι θα μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά ούτε και πολύ μεγάλη, διότι θα αυξάνεται χωρίς μεγάλο όφελος ο χρόνος προσομοίωσης.

Αφού σχεδιάστηκε η περιοχή λειτουργίας, απομένει να οριστεί το υλικό της, δηλαδή ο αέρας. Αυτό γίνεται όπως και πριν ως εξής: Material -> Edit -> Air.



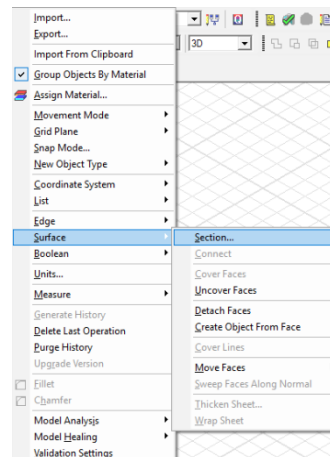
Σχήμα 2.26: Ορισμός περιοχής λειτουργίας

## 2.6 Ορισμός ρευμάτων

Ο ορισμός των ρευμάτων γίνεται σε κάθε πηνίο ξεχωριστά. Ξεκινώντας με το πρωτεύον έχουμε την εξής διαδικασία:

- i. Επιλέγουμε το κάτω πηνίο και πατάμε:

Modeler -> Surface -> Section (Σχήμα 2. 27 α)



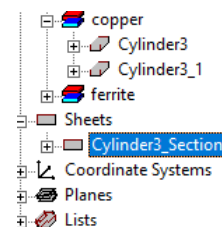
Σχήμα 2.27 (α)

- ii. Στο παράθυρο που αναδύεται επιλέγουμε ως Section Plane το YZ και πατάμε OK (Σχήμα 2.27 β)



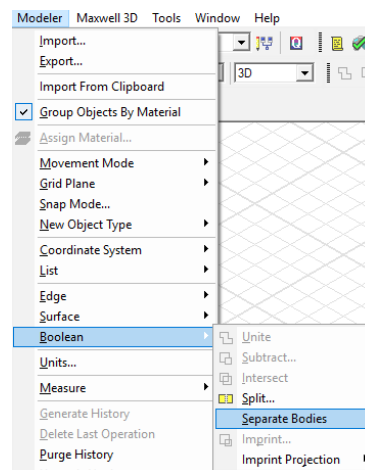
Σχήμα 2.27 (β)

- iii. Το λογισμικό εντοπίζει δύο τομές του πηνίου στο YZ επίπεδο. Μόνο η μία από τις δύο είναι χρήσιμη για την διεξαγωγή των υπολογισμών, επομένως επιλέγουμε το section που δημιουργήθηκε (Σχήμα 2.27 γ) και έπειτα:



Σχήμα 2.27 (γ)

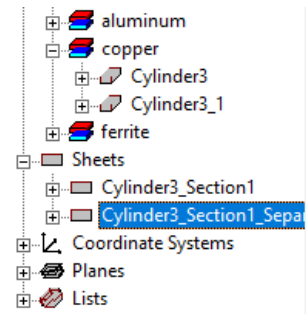
- iv. Modeler>Boolean>Separate Bodies (Σχήμα 2.27 δ)



Σχήμα 2.27 (δ)



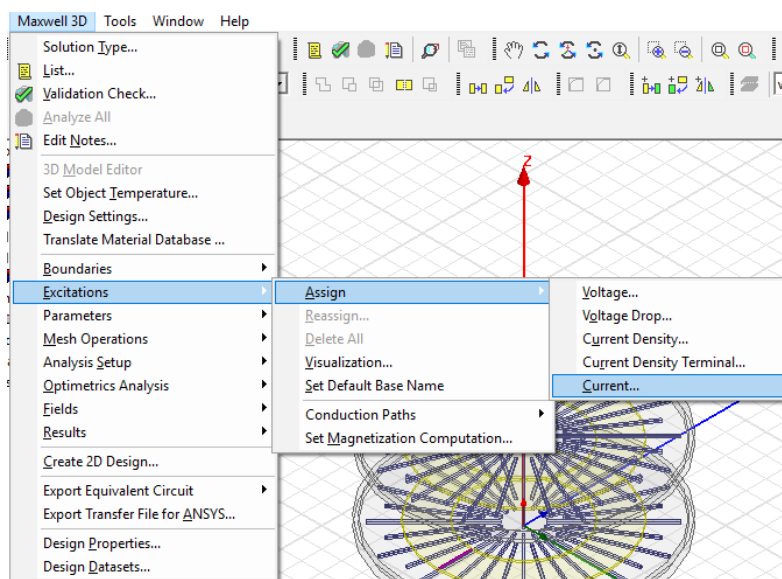
- v. Έπειτα αφού επιλέξουμε το ένα από τα δύο section, το διαγράφουμε πατώντας το πλήκτρο delete (Σχήμα 2.27 ε)



Σχήμα 2.27 (ε)

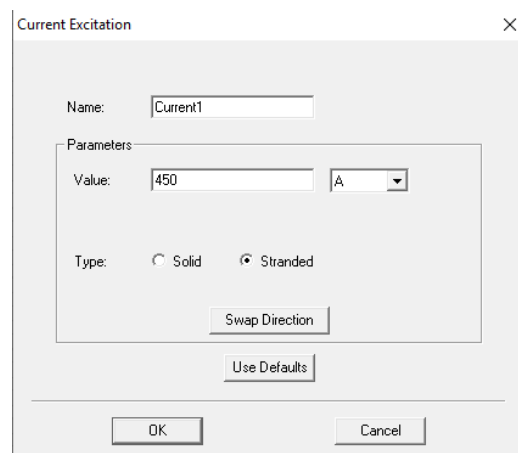
- vi. Επιλέγουμε το Section που αφήσαμε και ορίζουμε το ρεύμα ως εξής (Σχήμα 2.27 στ)

Maxwell 3D>Excitations>Assign>Current



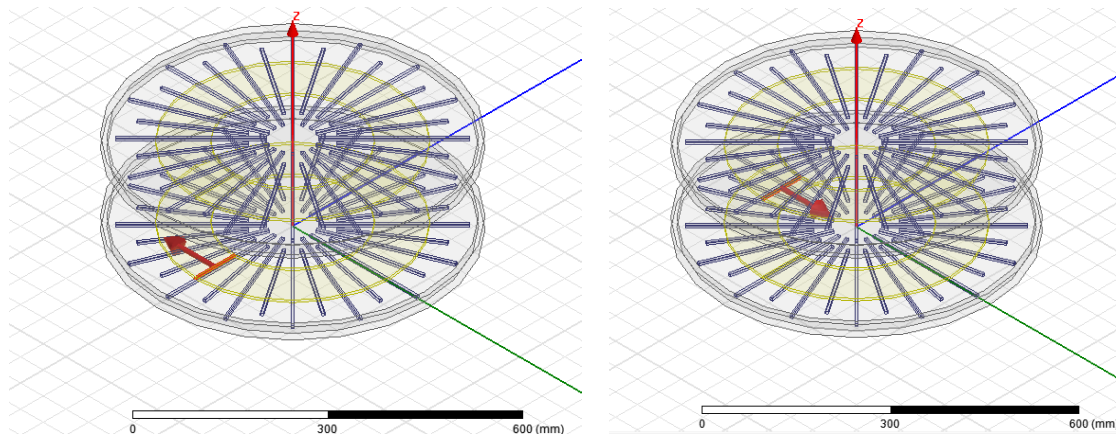
Σχήμα 2.27 (στ)

- vii. Στο παράθυρο που αναδύεται ορίζουμε το ρεύμα  $25 \cdot 18A$  και επιλέγουμε Stranded. Ορίζουμε την τιμή του συνολικού εγκάρσιου ρεύματος του πηνίου, δηλαδή 450A, διότι είναι 18 τα ελίγματα και 25 το μέγιστο ρεύμα του κάθε ελίγματος. Στο ίδιο παράθυρο μπορούμε επίσης να το μετονομάσουμε και να του αλλάξουμε κατεύθυνση (Σχήμα 2.27 ζ).



Σχήμα 2.27: (α), (β), (γ), (δ), (ε), (στ), (ζ) Βήματα ορισμού ρεύματος πηνίου

Με την ίδια διαδικασία ορίζεται και το ρεύμα στο δευτερεύον. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 2.28.



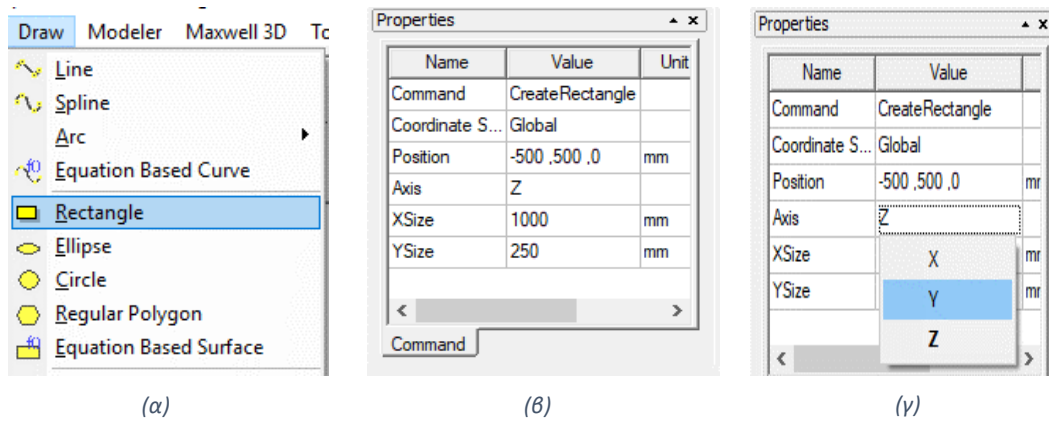
Σχήμα 2.28: Τελική μορφή ρευμάτων συζεύκτη

## 2.7 Ορισμός επιφανειών μέτρησης της μαγνητικής ροής

Για τη μέτρηση της μαγνητικής ροής σε σημεία ενδιαφέροντος μπορούν να τοποθετηθούν ειδικές επιφάνειες οι οποίες δεν επηρεάζουν την ανάλυση αλλά χρησιμοποιούνται μόνο για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Το σύνολο της διαδικασίας έχει ως απώτερο σκοπό, τον υπολογισμό της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής στις επιφάνειες αυτές. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, θα ορίσουμε τρεις επιφάνειες προς εξέταση σε απόσταση 20cm, 50cm και 70cm μακριά από το άκρο του φορτιστή, μήκους 100cm και ύψους 25cm.

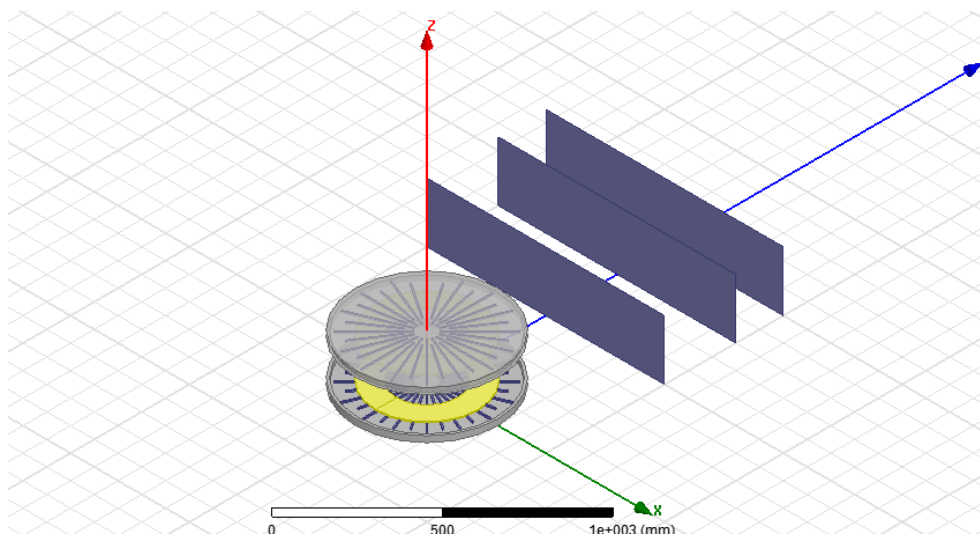
Η πρώτη επιφάνεια σχεδιάζεται ως εξής:

- i. Draw -> Rectangle (Σχήμα 2.29 α)
- ii. Ορίζουμε  $X = -500\text{mm}$ , για να είναι η επιφάνεια στο κέντρο της διάταξης,  $Y = 500\text{mm}$ , που είναι η θέση της επιφάνειας και  $Z = 0\text{mm}$ , για να ξεκινά στο ίδιο επίπεδο με την διάταξη.
- iii. Ορίζουμε επίσης  $dX = 1000\text{mm}$ , που είναι το μήκος της επιφάνειας,  $dY = 250$  και  $dZ = 250\text{mm}$ , που είναι το ύψος της (Σχήμα 2.29 β).
- iv. Το Maxwell δημιουργεί την επιφάνεια στο επίπεδο  $XY$ , ενώ στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρειάζεται να είναι κάθετα σε αυτό. Αυτό γίνεται επιλέγοντας στο Axis την επιλογή  $Y$  (Σχήμα 2.29 γ) και στη συνέχεια εναλλάσσοντας τις τιμές των  $Xsize$  <->  $Zsize$ .



Σχήμα 2.29: Σχεδίαση επιφάνειας προσομοίωσης

Με ανάλογο τρόπο δημιουργούνται και οι άλλες δύο επιφάνειες στα 50cm και στα 70cm. Το μόνο που αλλάζει είναι η τιμή Y που γίνεται 800mm και 1000mm αντίστοιχα. Οι τρεις επιφάνειες μαζί με τον συζεύκτη φαίνονται στο Σχήμα 2.30.



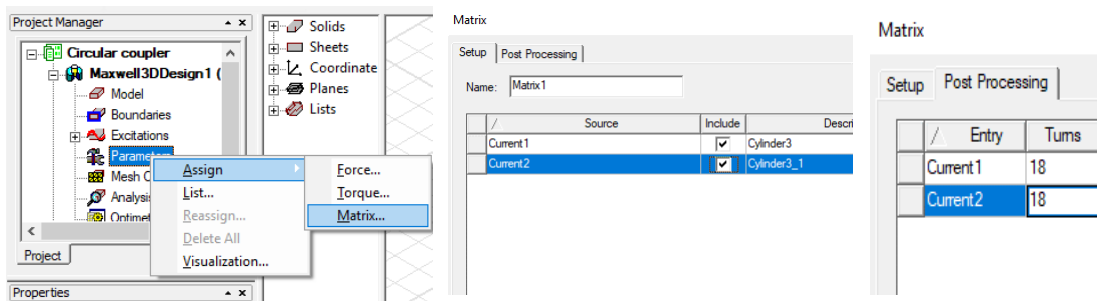
Σχήμα 2.30: Τελική μορφή διάταξης

## 2.8 Παραμετροποίηση της ανάλυσης

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει τη σχεδίαση της διάταξης και με τοποθετημένες τις επιφάνειες προς ανάλυση, το μόνο που απομένει είναι να καθοριστούν οι τελικές παράμετροι της ανάλυσης.

Αρχικά πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό στροφών των τυλιγμάτων των πηνίων, ο αριθμός των οποίων είναι 18 στο καθένα.

- i. Επιλέγουμε Parameters -> Assign -> Matrix
- ii. Στο παράθυρο που ανοίγει κάνουμε επιλέγουμε και τα δυο ρεύματα, κάνοντας κλικ στη στήλη Include
- iii. Στην καρτέλα Post Processing, ορίζουμε τον αριθμό των στροφών, αλλάζοντας την τιμή από 1 σε 18 και πατάμε OK.



Σχήμα 2.31: Ορισμός τυλιγμάτων των πηνίων

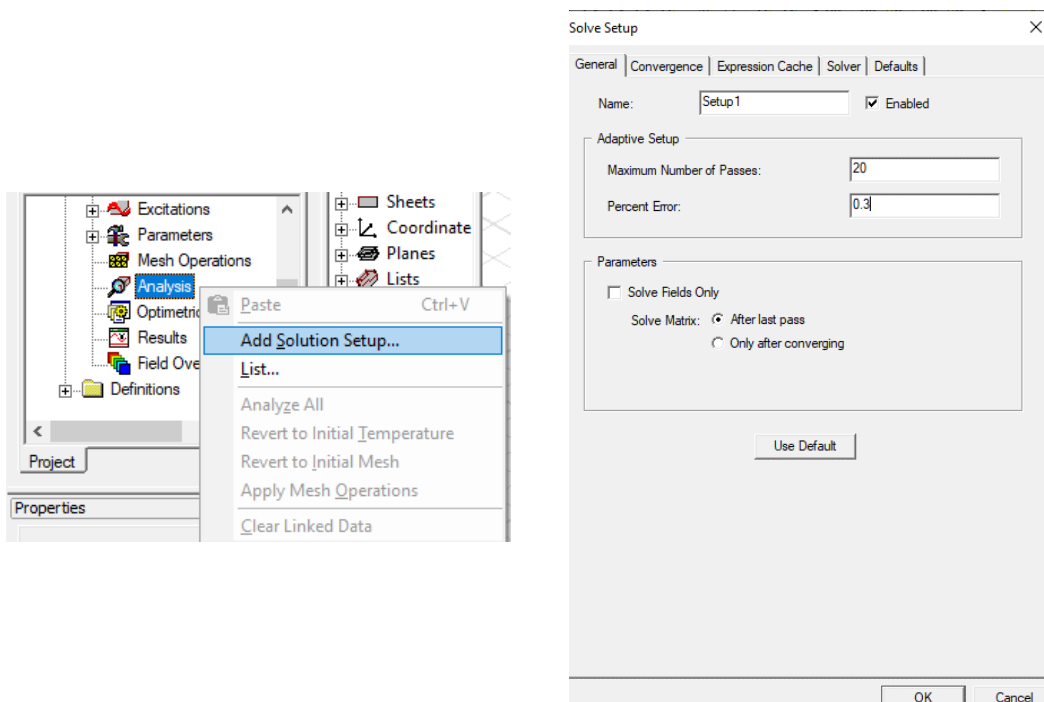
Στη συνέχεια πρέπει να ορίζουμε τις παραμέτρους της λύσης.

- i. Επιλέγουμε Analysis -> Add Solution Setup και ανοίγει το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 2.32, στο οποίο κάνουμε δύο αλλαγές.
- ii. Αλλάζουμε το Maximum Number of Passes από 10 σε 20, ώστε να δώσουμε στο πρόγραμμα τη δυνατότητα να κάνει περισσότερες επαναλήψεις για να πετύχει μεγαλύτερη ακρίβεια.
- iii. Αλλάζουμε το Percent Error από 1 σε 0.3. Ο συντελεστής αυτός δείχνει την σύγκλιση που επιθυμούμε να πετύχουμε, σε ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των λύσεων των τελευταίων επαναλήψεων. Υπενθυμίζουμε πως το λογισμικό Ansoft Maxwell δεν υπολογίζει ακριβή λύση, αλλά προσεγγιστική. Πολύ μεγάλη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας ένα πολύ μικρό Percent Error, γεγονός που θα οδηγήσει, ωστόσο, σε μεγάλη αύξηση του χρόνου υλοποίησης της κάθε προσομοίωσης. Συνεπώς στην επιλογή των παραμέτρων της λύσης προσπαθούμε να βρούμε μια «χρυσή τομή» μεταξύ ακρίβειας και χρόνου προσομοίωσης. Για παράδειγμα μια αλλαγή του Percent Error από 0.2 σε 0.1, αυξάνει τον χρόνο προσομοίωσης σε δύο ώρες περίπου, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει ιδιαίτερα την ακρίβεια που επιτυγχάνεται. Μετά από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση της μαγνητικής ροής, διαπιστώθηκε ότι ένα Percent Error ίσο με 0.3 αποτελεί έναν ιδιαίτερα ικανοποιητικό συνδυασμό τόσο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο

και για τη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την πραγματοποίηση της κάθε προσομοίωσης. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής σε συνδυασμό με τον χρόνο προσομοίωσης για τις διάφορες επιλογές percent error και για ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος 25A.

- iv. Αν θέλουμε να υπολογίσουμε μόνο την κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στις επιφάνειες, επιλέγουμε το Solve Fields Only. Με τον τρόπο αυτό δεν υπολογίζεται το μέγεθος των αυτεπαγωγών των πηνίων και ο χρόνος προσομοίωσης μειώνεται περαιτέρω.

Τα αντίστοιχα βήματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στο Σχήμα 2.32



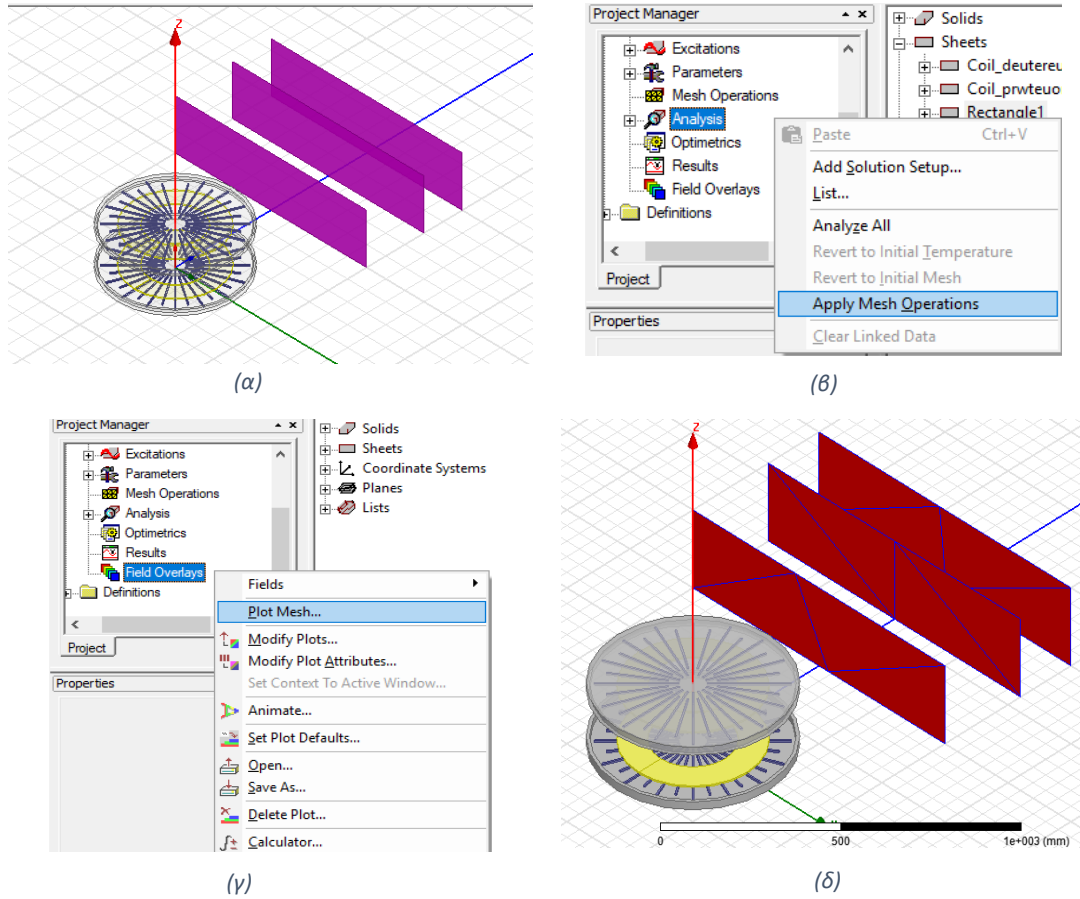
Σχήμα 2.32: Παραμετροποίησης της λύσης

Το Maxwell, υπολογίζει τα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, σε έναν αριθμό κατάλληλα επιλεγμένων σημείων (ή αλλιώς κόμβων) και όχι σε όλα τα σημεία του πεδίου ορισμού. Για το λόγο αυτό το Maxwell καταμερίζει το χώρο σε μικρότερους, επιλύοντας το πρόβλημα σε κάθε επιμέρους χωρικό τμήμα, μία διαδικασία που περιγράφεται ως “meshing”. Σαφώς η διαχώριση σε ιδιαίτερα μικρά τμήματα θα οδηγήσει σε μια πιο ακριβή λύση, αυξάνοντας ωστόσο το χρόνο πραγματοποίησης των προσομοιώσεων. Βέβαια, στην περίπτωση της ανάλυσης που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία ενδιαφέρει ιδιαίτερα το μαγνητικό πεδίο στις επιφάνειες μέτρησης.

Οι κόμβοι που ορίζει αυτόματα το Maxwell στις επιφάνειες μέτρησης μπορούν να φανούν ως εξής:

- i. Επιλέγουμε τις τρεις επιφάνειες (Σχήμα 2.33 α)

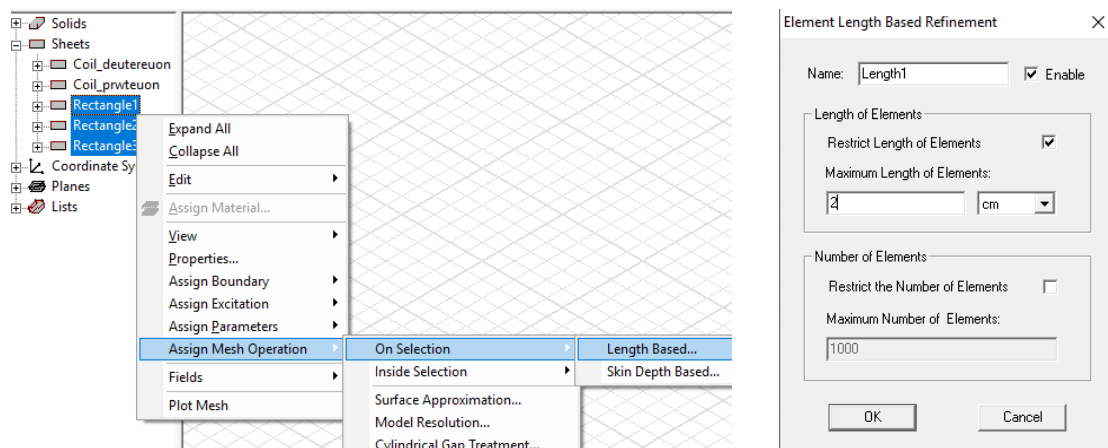
- ii. Κάνοντας δεξί κλικ στο Analysis, επιλέγουμε Apply Mesh Operations (Σχήμα 2.33 β)
- iii. Το πρόγραμμα κατασκευάζει τους κόμβους στο χώρο, οι οποίοι για να εμφανιστούν, έχοντας επιλεγμένες τις επιφάνειες, κάνουμε δεξί κλικ στο Field Overlays, έπειτα Plot Mesh (Σχήμα 2.33 γ) και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε Done. Οι κόμβους που έχουν δημιουργηθεί φαίνονται στο Σχήμα 2.33 δ.



Σχήμα 2.33: (α), (β), (γ) Βήματα και (δ) αναπαράσταση των προκαθορισμένων κόμβων

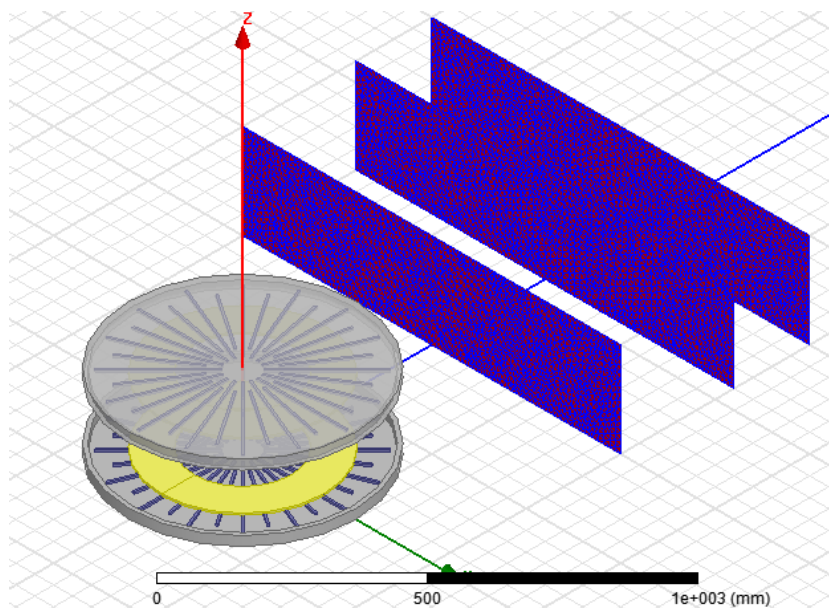
Οι κόμβοι που έχουν δημιουργηθεί αποτελούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.33 δ, από γραμμές σύγκλισης, οι οποίες όμως είναι μεγάλου μήκους και απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Το Maxwell μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε εμείς την απόσταση μεταξύ των κόμβων, καθώς όσο μικρότερη είναι αυτή η απόσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της λύσης. Για να γίνει αυτό:

- i. Επιλέγουμε τις τρεις επιφάνειες
- ii. Με δεξί κλικ, επιλέγουμε Assign Mesh Operation -> On Selection -> Length Based
- iii. Στο παράθυρο που ανοίγει, αλλάζουμε την τιμή του Maximum Length of Elements σε 2cm.



Σχήμα 2.34: Ορισμός της απόστασης μεταξύ των κόμβων

Οι επιφάνειες πλέον, ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία αναπαράστασης των κόμβων, φαίνονται ως εξής



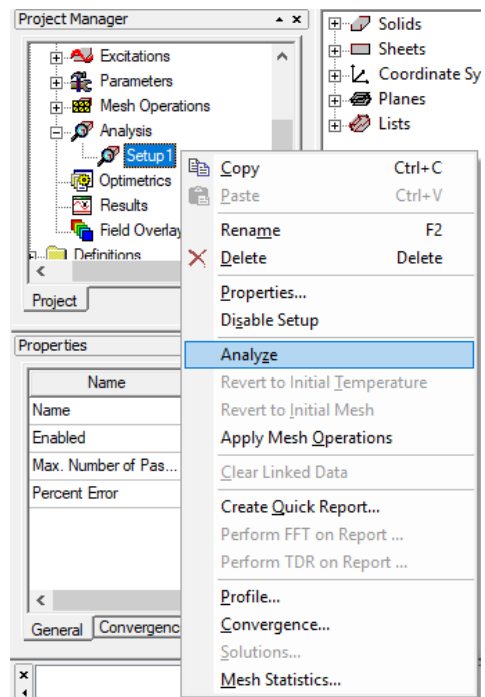
Σχήμα 2.35: Αναπαράσταση των πυκνότερων κόμβων

## 2.9 Ανάλυση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει όλα τα προαπαιτούμενα βήματα για την επιτυχή διεξαγωγή της ανάλυσης, το μόνο που απομένει είναι να επιλυθεί το πρόβλημα και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα.

Για να ξεκινήσει η ανάλυση, επιλέγουμε

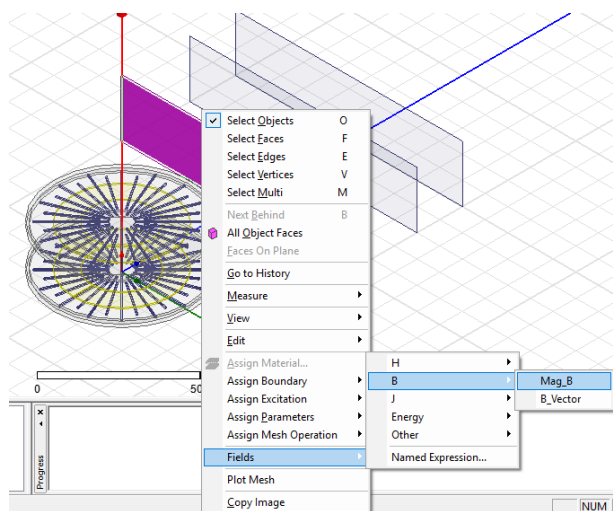
- Project Manager -> Analysis -> Setup1 -> Analyse.



Σχήμα 2.36: Έναρξη μαγνητοστατικής ανάλυσης της διάταξης

Το Maxwell, αφού ολοκληρώσει την επίλυση, μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε και να αναπαραστήσουμε στις επιφάνειες που ορίσαμε διάφορα μεγέθη, όπως την τιμή και την κατεύθυνση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, την πυκνότητα ρεύματος και άλλα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή μας ενδιαφέρει η κατανομή και η μέγιστη πυκνότητα μαγνητική ροής. Για να την αναπαραστήσουμε, επιλέγουμε την επιφάνεια, κάνουμε δεξί κλικ και στη συνέχεια (Σχήμα 2.37):

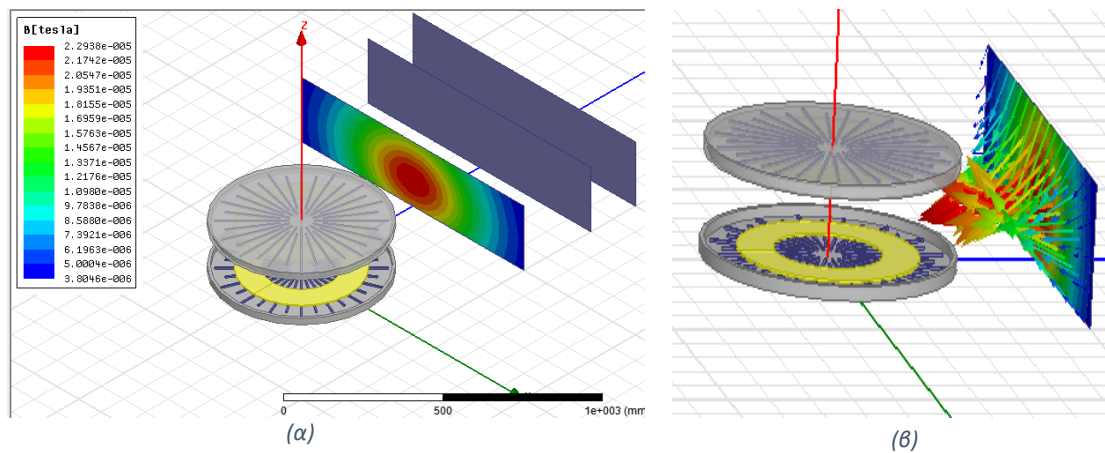
- Fields -> B -> Mag\_B



Σχήμα 2.37: Διαδικασία αναπαράστασης πυκνότητας μαγνητικής ροής

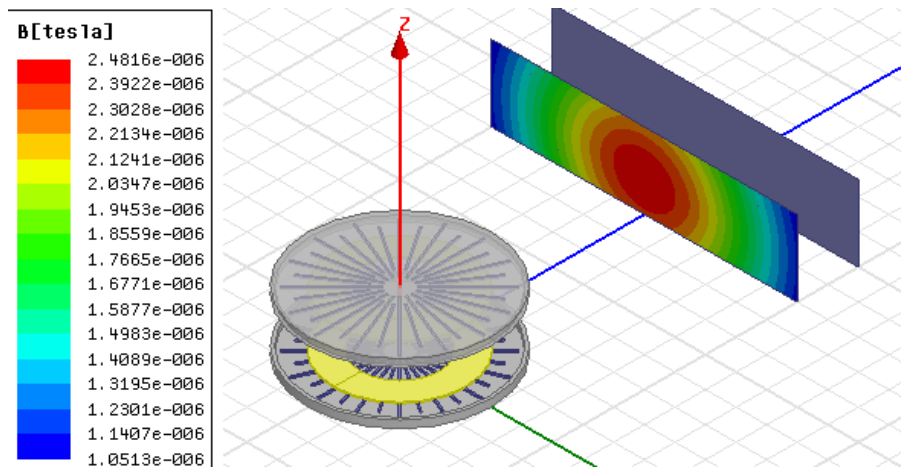


Η κατανομή και η κατεύθυνση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στην πρώτη επιφάνεια φαίνονται στο Σχήμα 2.38.

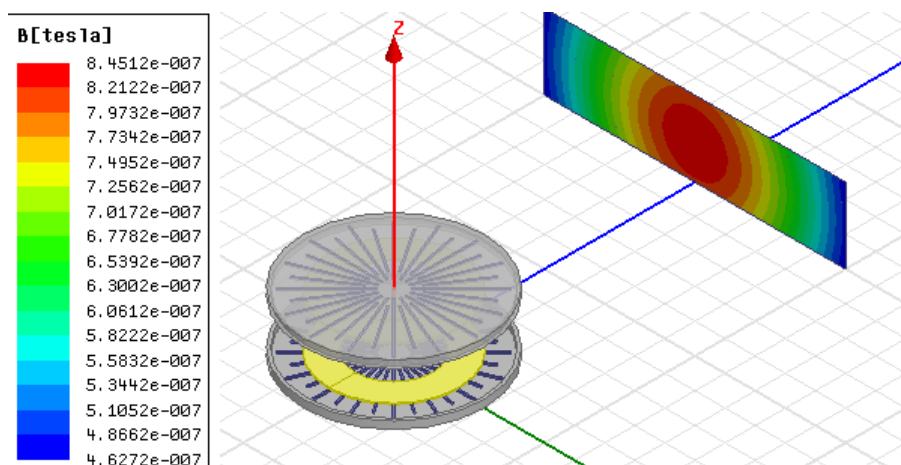


Σχήμα 2.38: (α) Πυκνότητα και (β) κατεύθυνση μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm

Για τις άλλες δυο επιφάνειες ακολουθείται παρόμοια διαδικασία και τα αποτελέσματα διακρίνονται στα Σχήματα 2.39 και 2.40.

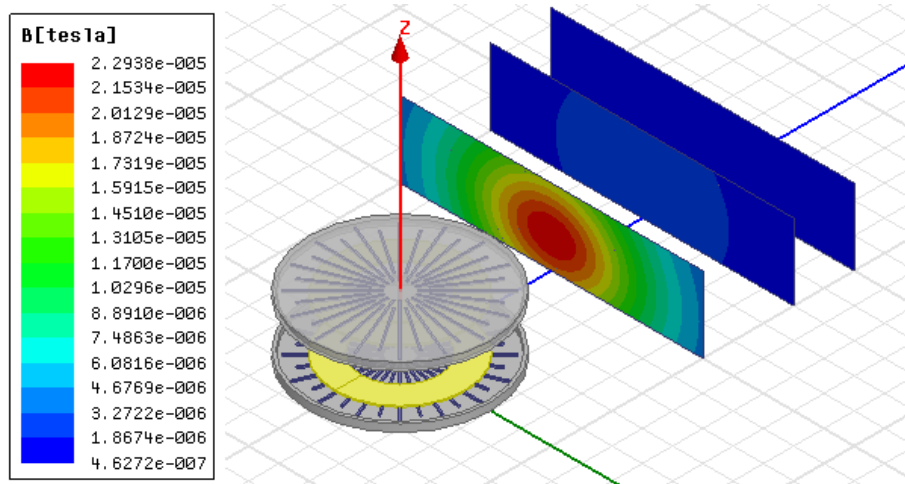


Σχήμα 2.39: Πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 50cm



Σχήμα 2.40: Πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 70cm

Και οι τρεις επιφάνειες μαζί φαίνονται στο Σχήμα 2.41.



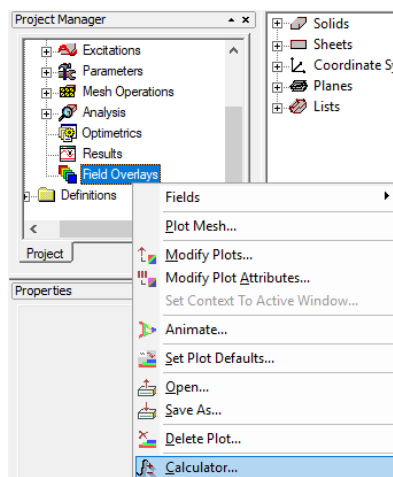
Σχήμα 2.41: Πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm, 50cm, 70cm

Αξίζει να σημειωθεί πως στις προσομοιώσεις για 50cm και 70cm, οι επιφάνειες που δεν φαίνονται δεν διαγράφηκαν, αλλά για λόγους καλύτερης εμφάνισης αποκρύφθηκαν. Η απόκρυψη γίνεται επιλέγοντας την γεωμετρία και πατώντας:

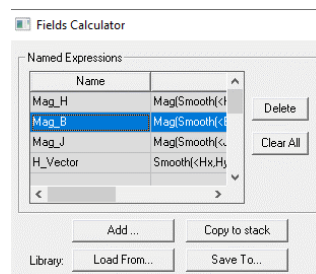
- δεξί κλικ -> View -> Hide Selection

Για τον υπολογισμό του μεγίστου της πυκνότητας μαγνητικής ροής, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια συνάρτηση που θα το επιστρέφει με ακρίβεια. Αυτό γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα (Σχήμα 2.42):

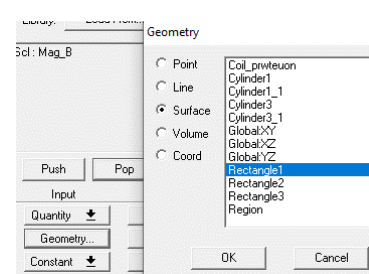
- i. Κάνοντας δεξί κλικ στο Field Overlays και επιλέγοντας Calculator
- ii. Mag\_B -> Copy to Stack
- iii. Geometry -> Surface -> Rectangle1
- iv. Max -> Value
- v. Πατώντας το Eval αναγράφει το μέγιστο, στην συγκεκριμένη περίπτωση  $B_{max} = 2,29382222803541E-005$  T



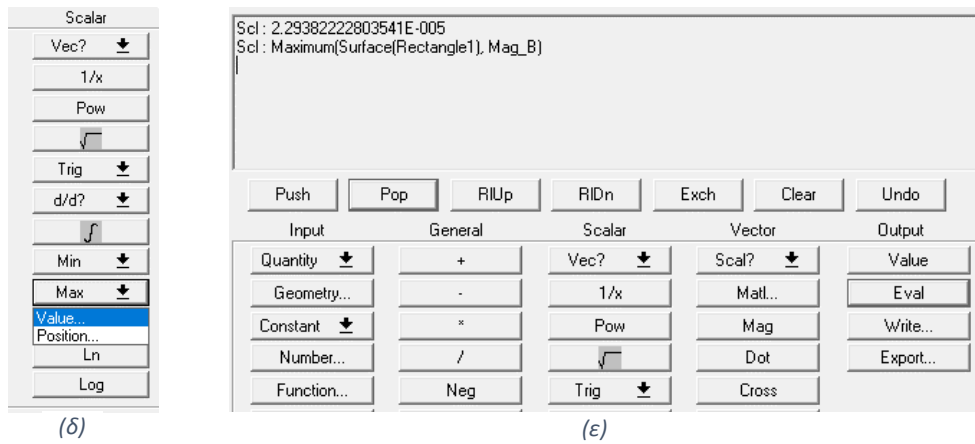
(α)



(β)



(γ)

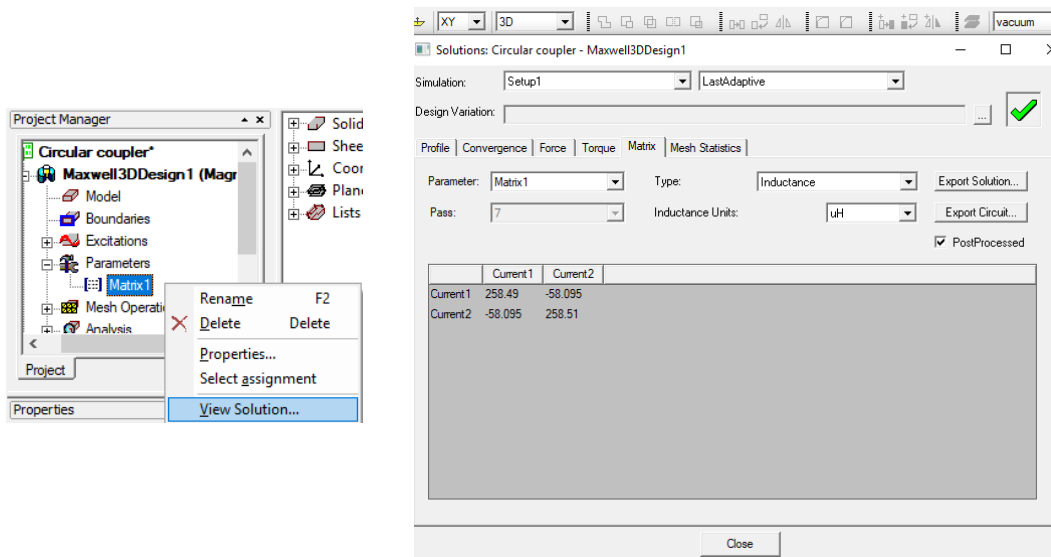


Σχήμα 2.42: Δημιουργία συνάρτησης για υπολογισμό μεγίστου μαγνητικής ροής

## 2.10 Υπολογισμός της μεταφερόμενης ισχύος

Για τον υπολογισμό της ικανότητας μεταφοράς ισχύος της διάταξης είναι ιδιαίτερα σημαντικό να προσδιορισθούν οι τιμές των αυτεπαγωγών και της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων. Αυτό γίνεται με τον παρακάτω τρόπο (Σχήμα 2.43):

- i. Project Manager -> Parameters -> Matrix1 -> View Solution
- ii. Επιλέγοντας το PostProcessed, βλέπουμε τις αυτεπαγωγές σε μΗ. Στην περίπτωση αυτή έχουμε  $L1 = 258,49\mu\text{H}$ ,  $L2 = 258,51\mu\text{H}$ ,  $M = -58,095\mu\text{H}$ , όπου  $L1$  η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος,  $L2$  η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος και  $M$  η αμοιβαία επαγωγή.



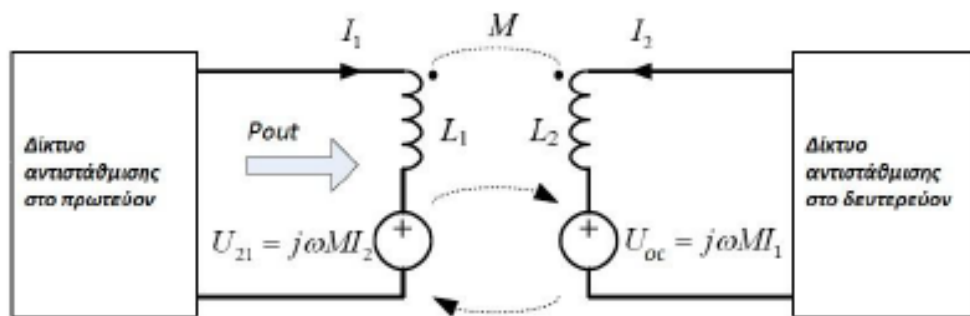
Σχήμα 2.43: Υπολογισμός αυτεπαγωγών και αμοιβαίας επαγωγής των πηνίων

Για τον υπολογισμό της μεταφερόμενης ισχύος χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.44 [4]. Σύμφωνα με την αναφορά [15] με ρεύμα πρωτεύοντος, ίσο με  $I_1$  και συχνότητα  $\omega$ , η τάση ανοικτού κυκλώματος που επάγεται στο  $L_2$  από το  $L_1$  είναι  $V_{oc} = j * \omega * M * I_1$  και με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με

$$I_{sc} = V_{oc} / j\omega * L_2 = M * I_1 / L_2$$

Σύμφωνα επίσης με την αναφορά [15], Πολλαπλασιάζοντας την τάση ανοικτού κυκλώματος με το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει η μεταφερόμενη μη αντισταθμισμένη ισχύς, η οποία ισούται με:

$$P_{su} = \frac{\omega * I_1^2 * M^2}{L_2}$$



Σχήμα 2.44: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού συζεύκτη

Η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με:

$$P_{out} = P_{su} * Q$$

όπου ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  εξαρτάται από την τοπολογία αντιστάθμισης που χρησιμοποιείται, τον ελεγκτή που επιλέγεται στη διάταξη, καθώς και την τιμή της ισοδύναμης αντίστασης φορτίου της μπαταρίας στην πλευρά του οχήματος [5]. Συνηθισμένες τιμές του συντελεστή ποιότητας  $Q$  είναι 4-6 [16].

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Λειτουργία του φορτιστή στην περίπτωση της στατικής φόρτισης

### 3.1 Εισαγωγή

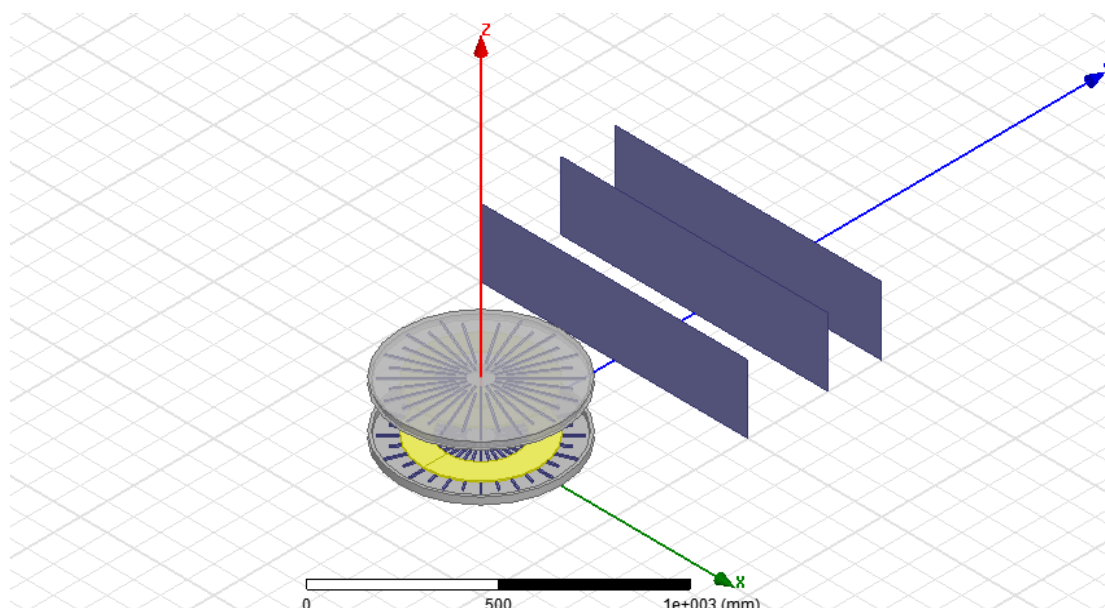
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί μέσα από προσομοιώσεις, η επίδραση της μετατόπισης φάσης και της τιμής του ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος στην τιμή της μέγιστη πυκνότητας μαγνητικής ροής. Στη συνέχεια θα μελετηθεί η λειτουργία του πρωτεύοντος όταν λειτουργεί χωρίς κάποιο δευτερεύον στην ευρύτερη περιοχή και στο τέλος του κεφαλαίου υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος, με τον φορτιστή τοποθετημένο σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του σασί.

Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο κυκλικός συζεύκτης που κατασκευάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Το μέγιστο ρεύμα ορίζεται στα 25A, το διάκενο του συζεύκτη στα 15cm, η διάμετρος του στα 60cm και οι επιφάνειες προς ανάλυση τοποθετούνται σε απόσταση 20cm, 50cm, 70cm μακριά από το άκρο του.

Επισημαίνεται ότι αν και η μαγνητοστατική ανάλυση προσφέρει ιδιαίτερα ικανοποιητική ακρίβεια, επιτρέποντας την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα, δε λαμβάνει ωστόσο υπόψιν το περιορισμό της μαγνητική ροή κάτω και κυρίως πάνω από μαγνητικό συζεύκτη, λόγω της θωράκισης αλουμινίου.

Η μαγνητοστατική ανάλυση, ωστόσο, επιτρέπει τον προσδιορισμό με μεγάλη ακρίβεια του μαγνητικού πεδίου γύρω από το συζεύκτη, επιτρέποντας την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων, οι οποίες είναι απαραίτητες όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Η ακριβής επίδραση της θωράκισης αλουμινίου θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 6.

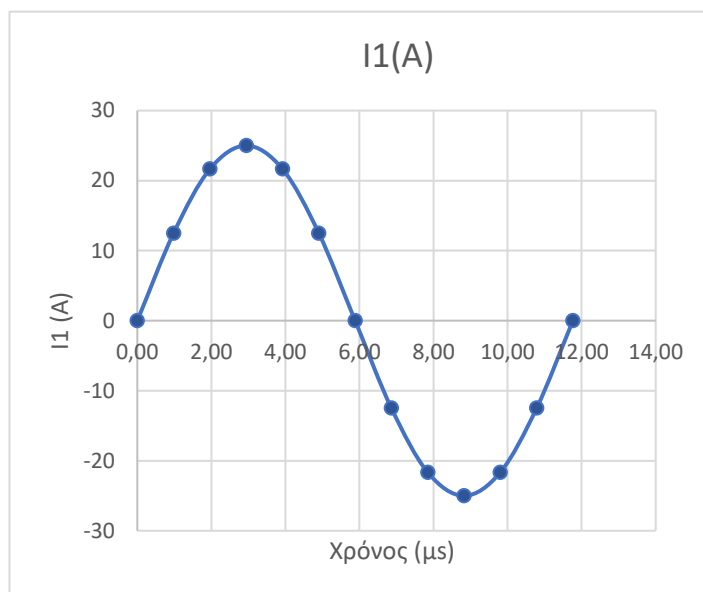


Σχήμα 3.1: Διάταξη προς ανάλυση

### 3.2 Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη φάση

Τα ρεύματα τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον είναι ημιτονοειδή ίδιας συχνότητας. Το λογισμικό Ansoft Maxwell προσφέρει μαγνητοστατική λύση της τρισδιάστατης διάταξης, ενώ σε πραγματικές συνθήκες, στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου, συμμετέχουν χρονομεταβλητά πεδία. Η δυνατότητα ανάλυσης δινορευμάτων προσφέρεται επίσης στο Maxwell, λαμβάνοντας υπόψιν τα χρονομεταβλητά ημιτονοειδή ρεύματα, ωστόσο, αυξάνει αρκετά το χρόνο προσομοιώσεων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χωρίζουμε το ρεύμα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος σε πολλά στιγμιότυπα λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, για το ρεύμα πρωτεύοντος, χωρίζοντας το ημίτονο σε χρονικά διαστήματα ανά  $T/12$  (όπου  $T$  είναι η περίοδος του σήματος) και για συχνότητα λειτουργίας 85kHz, προκύπτουν τα στιγμιότυπα του Σχήματος 3.2 για χρόνο μίας περιόδου, 11,765μs, τα δεδομένα του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 3.1.



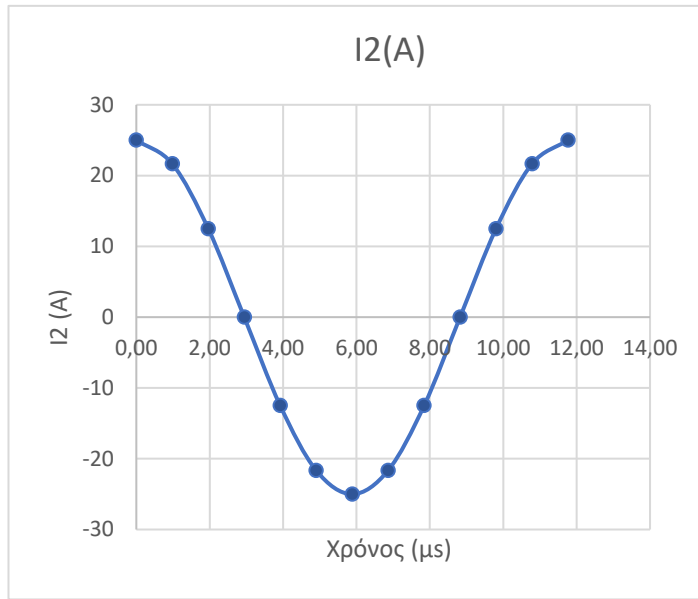
Σχήμα 3.2: Χρονικά στιγμιότυπα ρεύματος πρωτεύοντος

Χρόνος (μs)	I1 (A)
0,00	0
0,98	12,5
1,96	21,65
2,94	25
3,92	21,65
4,90	12,5
5,88	0
6,86	-12,5
7,84	-21,65
8,82	-25
9,80	-21,65
10,78	-12,5
11,76	0

Πίνακας 3.1: Καταστάσεις λειτουργίας πρωτεύοντος

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων θα εξετασθεί ρεύμα στο δευτερεύον που είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το πρωτεύον κατά  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $330^\circ$ ,  $360^\circ$ .

Ενδεικτικά, για μετατόπιση φάσης ίση με  $90^\circ$ , χωρίζοντας το ρεύμα δευτερεύοντος επίσης ανά  $T/12$ , δηλαδή ανά 0,98μs, προκύπτει το στιγμιότυπο του Σχήματος 3.3, τα δεδομένα του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 3.2

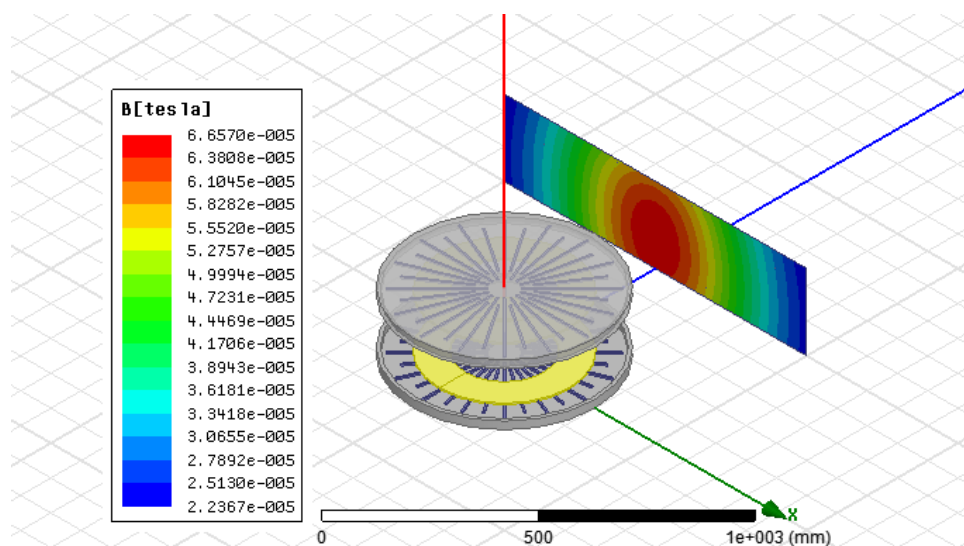


Σχήμα 3.3: Χρονικά στιγμιότυπα ρεύματος πρωτεύοντος ρεύματος δευτερεύοντος για μετατόπιση φάσης 90°

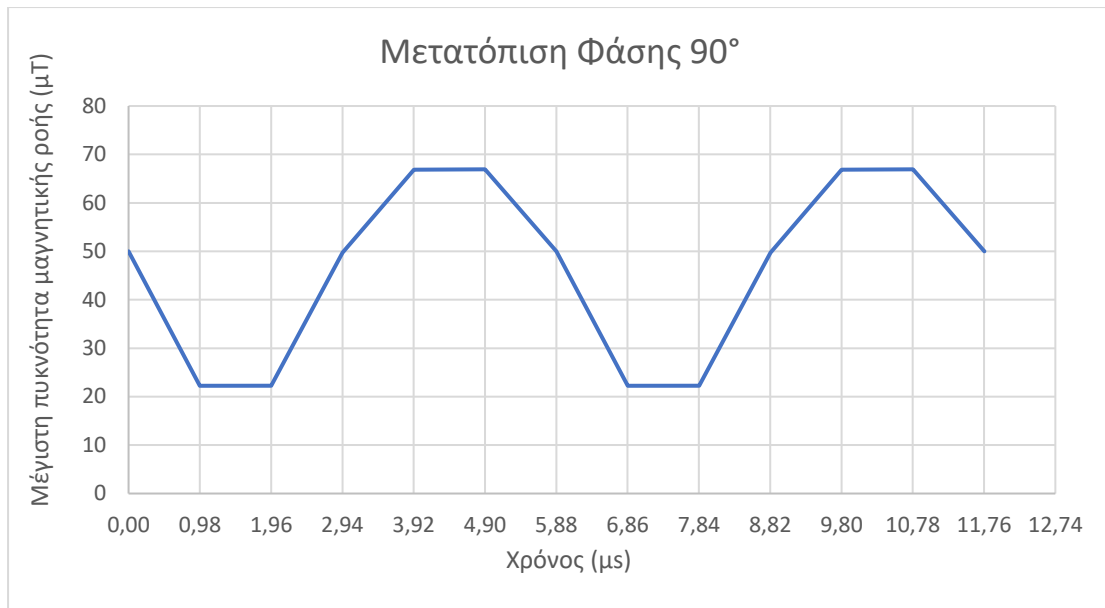
Χρόνος (μs)	I2 (A)
0,00	25
0,98	21,65
1,96	12,5
2,94	0
3,92	-12,5
4,90	-21,65
5,88	-25
6,86	-21,65
7,84	-12,5
8,82	0
9,80	12,5
10,78	21,65
11,76	25

Πίνακας 3.2: Καταστάσεις λειτουργίας δευτερεύοντος για μετατόπιση φάσης 90°

Ο συνδυασμός των ρευμάτων που ενεργούν στον φορτιστή μια δεδομένη χρονική στιγμή προκύπτει από τους Πίνακες 3.1 και 3.2. Για παράδειγμα, τη χρονική στιγμή 9,80μs, το ρεύμα πρωτεύοντος I1 ισούται με -21,65A και το ρεύμα δευτερεύοντος I2 ισούται με 12,5A. Τη χρονική αυτή στιγμή, εξετάζοντας την επιφάνεια που βρίσκεται στα 20cm από το φορτιστή (Σχήμα 3.4) η μέγιστη μαγνητική ροή προσδιορίζεται ίση με 66,570μT. Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις χρονικές στιγμές για μία μετατόπιση φάσης 90 μοίρες μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, το μέγιστο της μαγνητικής ροής για κάθε στιγμιότυπο δίνεται στο Σχήμα 3.5.

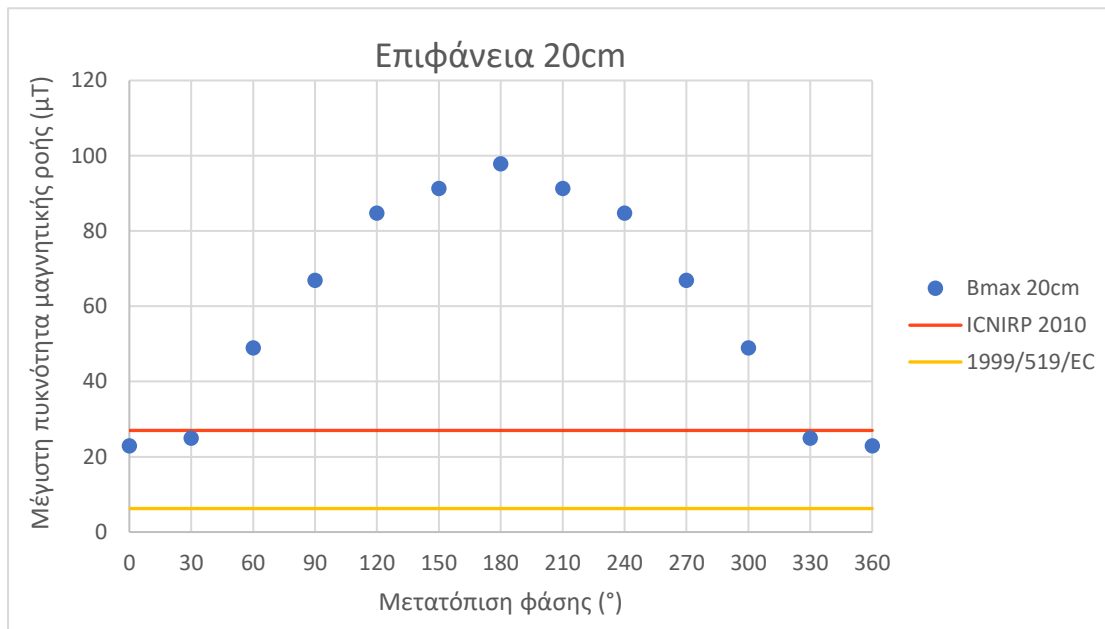


Σχήμα 3.4: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm από το φορτιστή για μετατόπιση φάσης 90°



Σχήμα 3.5: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 90°

Στο Σχήμα 3.5, παρατηρούμε ότι για μία μετατόπιση φάσης ίσης με 90 μοίρες, η μέγιστη μαγνητική ροή είναι ίση με 66,570μT και παρατηρείται για τα χρονικά στιγμιότυπα 3,92μs και 9,80μs. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για μετατοπίσεις φάσης από 0 μέχρι και 360 μοίρες, το μέγιστο της μαγνητικής ροή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Ο αναλυτικός πίνακας με τα αποτελέσματα υπάρχει στο Παράρτημα.

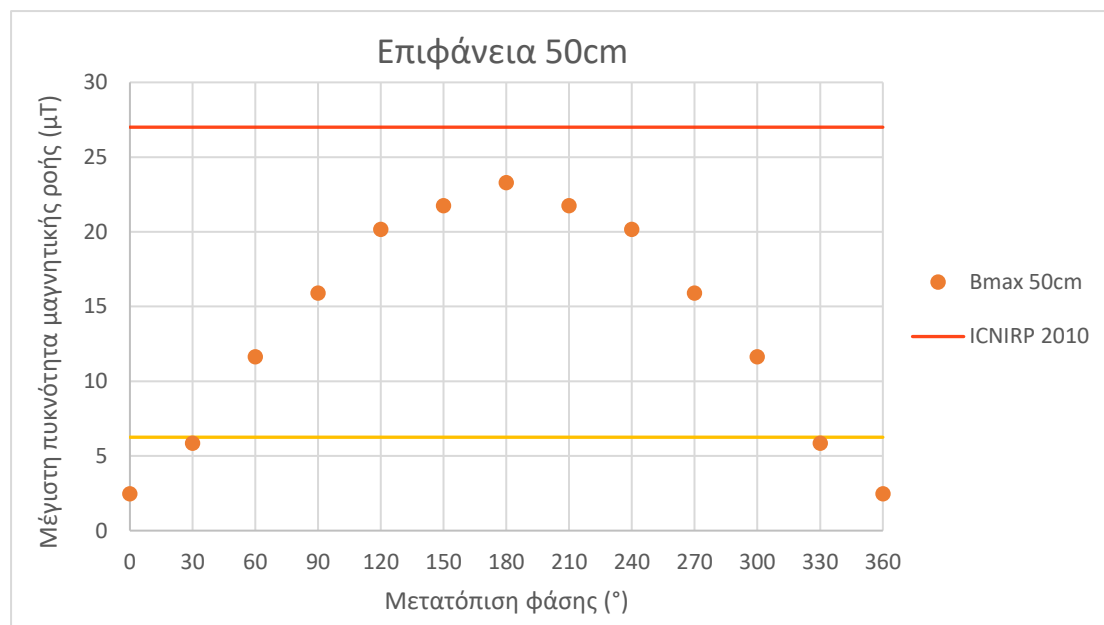


Σχήμα 3.6: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm

Για την επιφάνεια των 20cm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρούμε πως μόνο δύο μετατοπίσεις φάσης, 0° και 30°, βρίσκονται εντός των ορίων που θέτει η επιτροπή ICNIRP, ενώ καμία κατάσταση δεν συμμορφώνεται με τον περιορισμό που θέτει το ευρωπαϊκό συμβούλιο. Σημειώνεται πως ο περιορισμός αυτός είναι 27μT και 6,25μT αντιστοίχως.

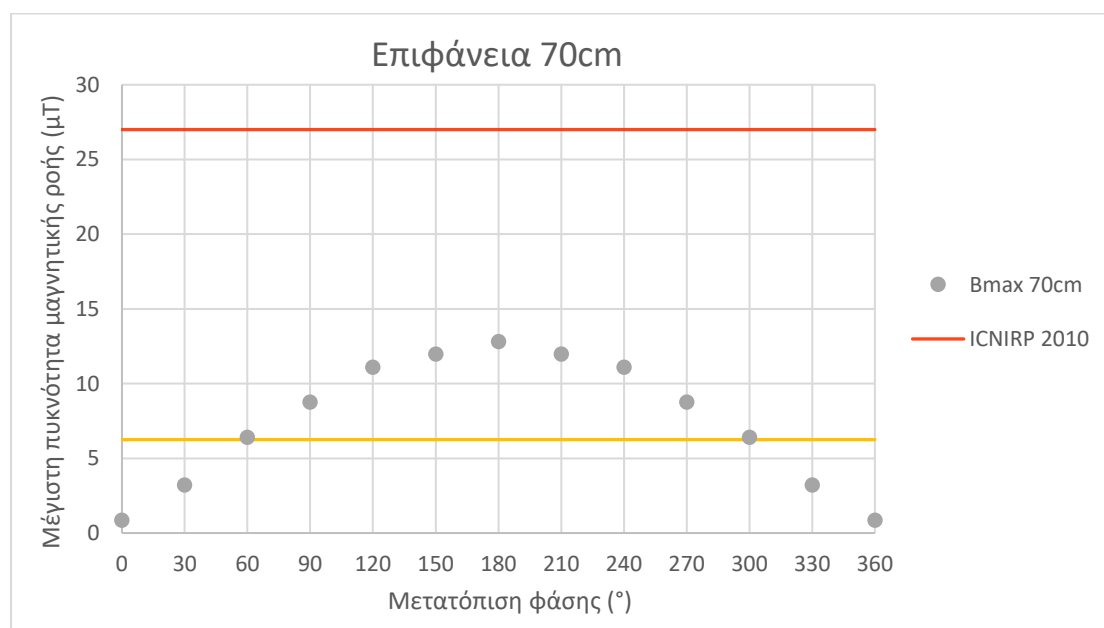


Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, αλλά για την επιφάνεια των 50cm, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται πως για 50cm από το άκρο του φορτιστή, το πεδίο παρουσιάζει σημαντική μείωση. Πλέον, όλες οι περιπτώσεις βρίσκονται εντός των ορίων τις ICNIRP, ενώ μόνο για δύο μετατοπίσεις φάσεις, 0° και 30°, επαληθεύονται τα όρια που θέτει το ευρωπαϊκό συμβούλιο.



Σχήμα 3.7: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 50cm

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα της επιφάνειας των 70cm παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8. Και σε αυτή την περίπτωση το όριο της ICNIRP επαληθεύεται, ενώ το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου εφαρμόζεται για τις μετατοπίσεις φάσεις, 0° και 30°, ενώ για μετατόπιση φάσης 60° είναι οριακά εκτός.



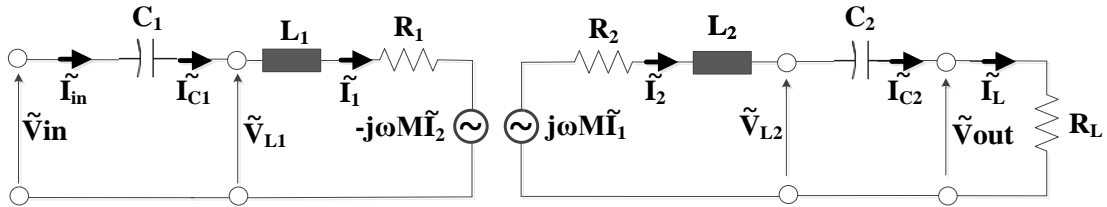
Σχήμα 3.8: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 70cm

Είναι φανερό ότι όσο απομακρυνόμαστε από το φορτιστή, το πεδίο εξασθενεί σημαντικά. Κάτι που επίσης παρατηρείται είναι πως η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, και στις τρεις επιφάνειες που εξετάζονται, εντοπίζεται για μετατόπιση φάσης  $180^\circ$ . Συγκεκριμένα αντιστοιχεί στην περίπτωση που τα ρεύματα σε πρωτεύον και δευτερεύον είναι ομόρροπα και έχουν απόλυτη τιμή ίση με 25A. Τότε η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής υπολογίζεται 97,89μT, 23,29μT και 12,81μT σε απόσταση 20cm, 50cm και 70cm αντιστοίχως.

Παρατηρούμε στα Σχήματα 3.7 και 3.8 ότι η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και για τις τρεις επιφάνειες που εξετάζονται, εντοπίζεται για μία μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων σε πρωτεύον και δευτερεύον ίση με  $180$  μοίρες, ενώ η ελάχιστη παρατηρείται για μετατόπιση φάσης ίση με  $0$  μοίρες.

Η πραγματική μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων στο πρωτεύον και το δευτερεύον σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης μπορεί να προσδιορισθεί μελετώντας το αντίστοιχο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα (Σχήμα 3.9).

Για παράδειγμα για την τοπολογία σειρά-σειρά (με έναν πυκνωτή συνδεδεμένο εν σειρά στο πρωτεύον και το δευτερεύον του συστήματος), η οποία είναι μία τοπολογία που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων τόσο στη στατική φόρτιση [39] όσο και στη δυναμική φόρτιση [40], [41], [42], το ισοδύναμο κύκλωμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Όπου  $R_1$  και  $R_2$  είναι η αντίσταση των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος,  $L_1$  και  $L_2$  είναι οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα και  $M$  η αμοιβαία επαγωγή.  $C_1$  και  $C_2$  είναι οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, ενώ η αντίσταση φορτίου της μπαταρίας του οχήματος είναι ίση με  $R_L$ .



Σχήμα 3.9: Σειρά-Σειρά Τοπολογία αντιστάθμισης

Η τάση στα άκρα των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι:

$$\tilde{V}_{L_1} = j\omega L_1 \tilde{I}_1 + R_1 \tilde{I}_1 - j\omega M \tilde{I}_2 \quad (1)$$

$$\tilde{V}_{L_2} = j\omega M \tilde{I}_1 - R_2 \tilde{I}_2 - j\omega L_2 \tilde{I}_2 \quad (2)$$

Στο δευτερεύον θα ισχύει:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{C_2} = \tilde{I}_L \quad (3)$$

$$\tilde{V}_{L_2} = \frac{1}{j\omega C_2} \tilde{I}_{C_2} + R_L \tilde{I}_L \quad (4)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας την (4) στην (2) και λαμβάνοντας υπόψιν την (3):

$$\tilde{I}_L = \tilde{I}_2 = \frac{j\omega M}{R_L + R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} \tilde{I}_1 \quad (5)$$

Για την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, συνηθισμένη πρακτική [43], ιδιαίτερα στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, είναι η επιλογή του πυκνωτή C2, έτσι ώστε:

$$C_2 = \frac{1}{j\omega L_2} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή του πυκνωτή C2 στην (5), προκύπτει:

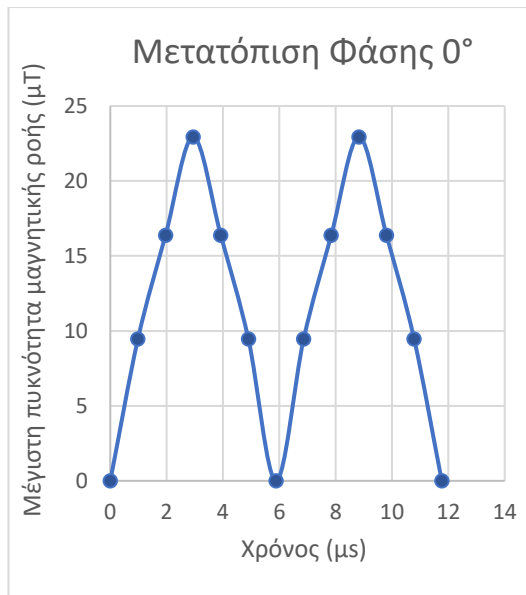
$$\tilde{I}_2 = \frac{j\omega M}{R_L + R_2} \tilde{I}_1 = j\left(\frac{\omega M}{R_L + R_2}\right) \tilde{I}_1 \quad (7)$$

Είναι επομένως, φανερό σύμφωνα με την (7) ότι το ρεύμα I2 είναι μετατοπισμένο κατά 90 μοίρες σε σχέση με το πρωτεύον, σε περίπτωση που ο πυκνωτής C2 επιλέγεται σύμφωνα με την (6).

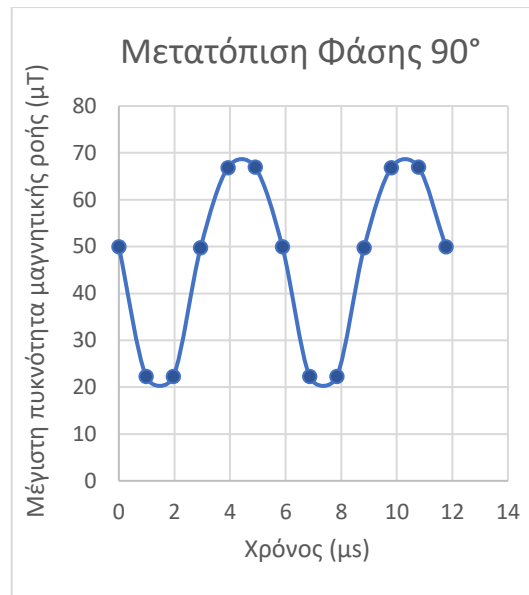
Σαφώς, η (6) μπορεί να ισχύει σε περίπτωση κατάλληλης επιλογής της τιμής του C2 σύμφωνα με την τιμή της αυτεπαγωγής L2. Στη στατική φόρτιση ωστόσο, με το δευτερεύον σε σταθερή θέση πάνω από το πρωτεύον, η αυτεπαγωγή L2 μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επομένως, ιδιαίτερα στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, μία μετατόπιση φάσης ίση με 90 μοίρες μεταξύ των ρευμάτων στα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος μπορεί να θεωρηθεί ως μία συνηθισμένη κατάσταση.

### 3.3 Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την ένταση του ρεύματος

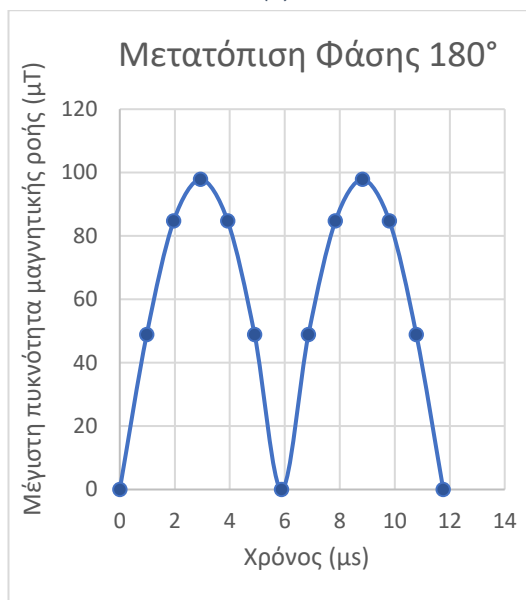
Στην προηγούμενη ενότητα παρατηρείται ότι η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και για τις τρεις επιφάνειες που εξετάζονται, εντοπίζεται για μία μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων σε πρωτεύον και δευτερεύον ίση με 180 μοίρες, ενώ η ελάχιστη παρατηρείται για μετατόπιση φάσης ίση με 0 μοίρες. Επίσης, μία συνηθισμένη μετατόπιση φάση σύμφωνα με τη μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος, είναι ίση με 90 μοίρες. Λαμβάνοντας υπόψιν τις τρεις αυτές μετατοπίσεις φάσεις και προσδιορίζοντας το ρεύμα σε πρωτεύον και δευτερεύον για διάφορα χρονικά στιγμιότυπα, π.χ. για μετατόπιση φάσης 90 μοιρών μεταξύ I1 και I2 τα αντίστοιχα χρονικά στιγμιότυπα δίνονται στα Σχήματα 3.2 και 3.3. Για αυτή τη μετατόπιση φάσης η πυκνότητα μαγνητικής ροής για την επιφάνεια σε απόσταση 20 εκατοστών από το φορτιστή δίνεται στο Σχήμα 3.10-β. Παρατηρείται ότι η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής παρατηρείται τη χρονική στιγμή 3,92μs. Τη χρονική αυτή στιγμή, σύμφωνα με τα Σχήματα 3.2 και 3.3 το ρεύμα στο πρωτεύον και το δευτερεύον έχει τιμή I1 = 12,5A και I2 = -21,65A.



(α)



(β)



(γ)

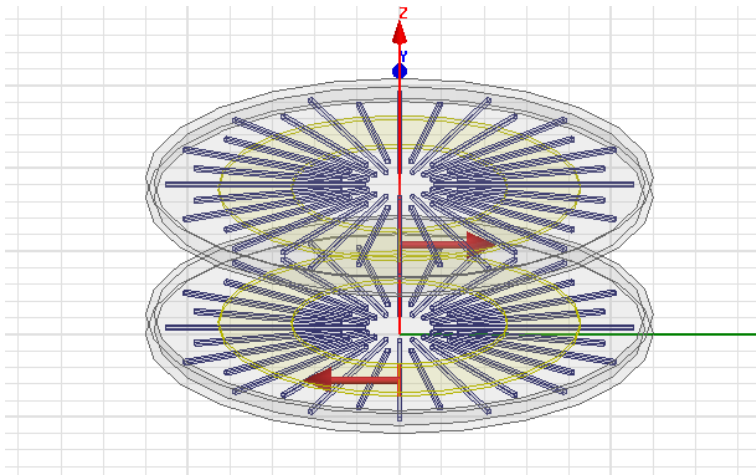
Σχήμα 3.10: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής σε επιφάνεια 20cm για μετατόπιση φάσης 0° (α), 90° (β) και 180° (γ)

Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, ανάλογα με την περίπτωση της μετατόπισης φάσης 90 μοιρών, προσδιορίζεται επίσης για την περίπτωση μετατόπισης φάσης 0 και 180 μοιρών στα Σχήματα 3.10-α και 3.10-γ αντίστοιχα. Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, προκύπτει το συμπέρασμα πως για μετατόπιση φάσης 0°, η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής παρατηρείται τη χρονική στιγμή 3,92μs. Προσδιορίζεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που δίνονται στον Πίνακα του κεφαλαίου 3 του παραρτήματος ότι ο φορτιστής τότε διαρρέεται από ρεύματα  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ . Για μετατόπιση 180°, η χρονική στιγμή ταυτίζεται με αυτή των 0° και ο συνδυασμός ρευμάτων είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = -25A$ . Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.3.

Μετατόπιση Φάσης (°)	I1(A)	I2(A)	Μέγιστη Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής (μΤ)
0	25	25	22,938
90	12,5	-21,65	66,933
180	25	-25	97,890

Πίνακας 3.3: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής για μετατόπιση φάσης 0 , 90 & 180 μοιρών

Η προκαθορισμένη φορά ρευμάτων όπως ορίστηκε στο Maxwell είναι η αντίρροπη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Θετικό πρόσημο επομένως στο ρεύμα πρωτεύοντος υποδηλώνει ωρολογιακή φορά, ενώ θετικό πρόσημο στο ρεύμα του δευτερεύοντος υποδηλώνει αντιωρολογιακή φορά.



Σχήμα 3.11: Προκαθορισμένη φορά ρευμάτων συζεύκτη

Η μελέτη της εξάρτησης του μαγνητικού πεδίου από την ένταση του ρεύματος θα πραγματοποιηθεί στη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη μελέτη. Οι επιφάνειες που θα χρησιμοποιηθούν θα απέχουν 20cm, 50cm και 70cm από το άκρο του φορτιστή.

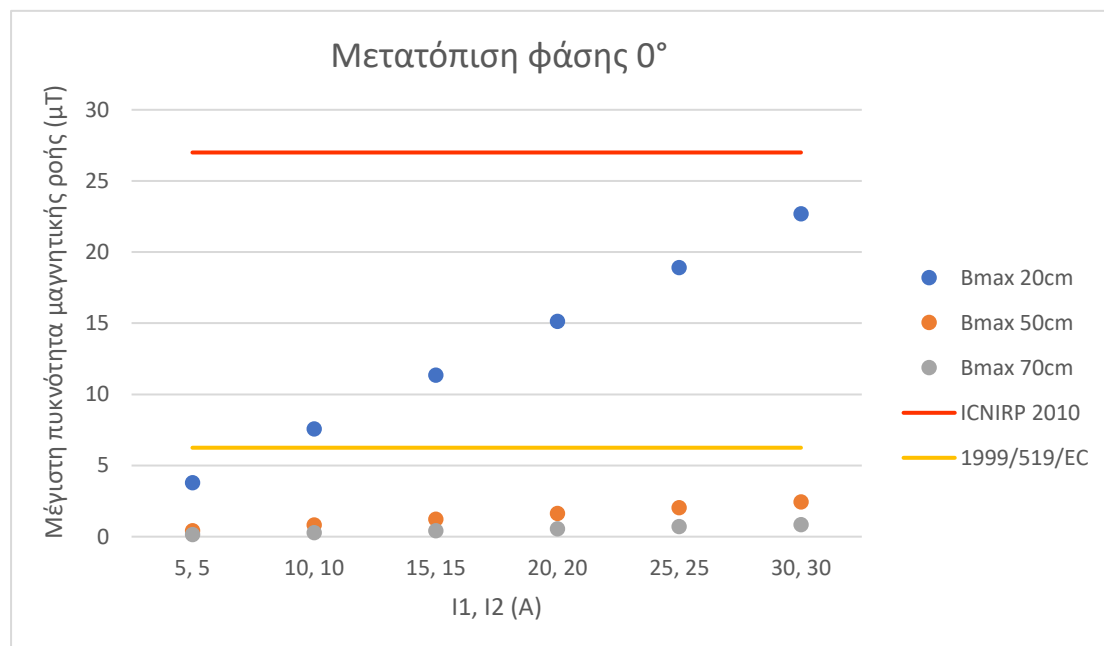
Οι συνδυασμοί των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα γίνουν με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προηγούμενη μελέτη. Πιο συγκεκριμένα θα επιλεγεί για μετατόπιση φάσης 0°, 90°, 180° ο συνδυασμός που έδωσε την μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο Πίνακας 3.4.

I <sub>max</sub> (A)	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μετατόπιση Φάσης 90°		Μετατόπιση Φάσης 180°	
	I1 (A)	I2 (A)	I1 (A)	I2 (A)	I1 (A)	I2 (A)
5	5	5	2,5	-4,33	5	-5
10	10	10	5	-8,66	10	-10
15	15	15	7,5	-12,99	15	-15
20	20	20	10	-17,32	20	-20
25	25	25	12,5	-21,65	25	-25
30	30	30	15	-25,98	30	-30

Πίνακας 3.4: Συνδυασμοί ρευμάτων διαφορετικής μέγιστης έντασης

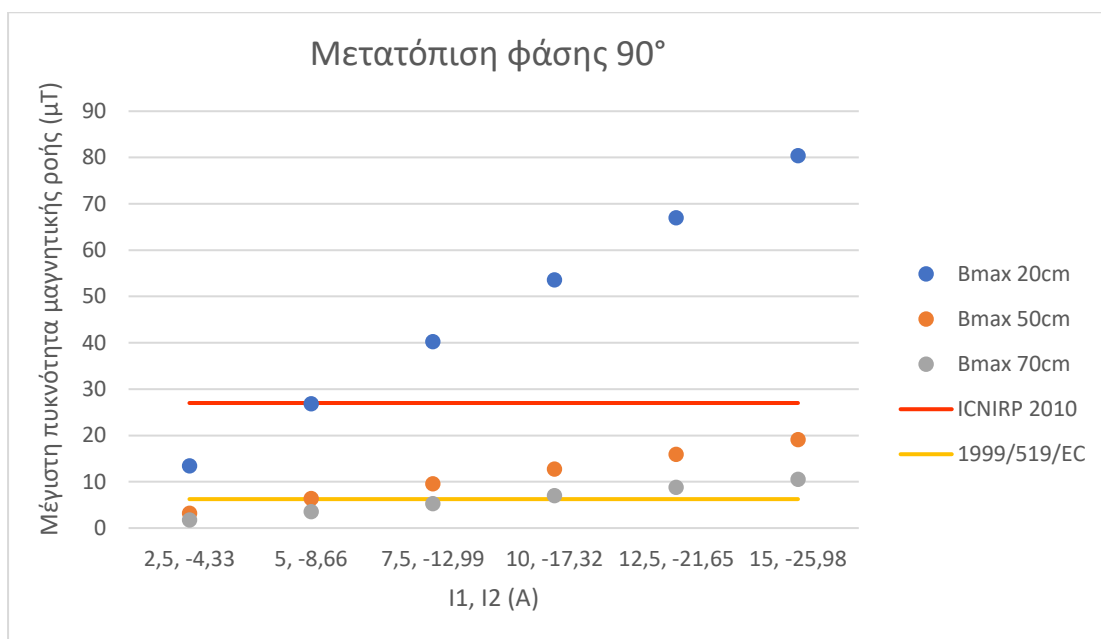
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των συνδυασμών του Πίνακα 3.4 φαίνονται στο επόμενο σχήματα. Στον οριζόντιο άξονα έχει χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός του ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που εφαρμόστηκε και στον κατακόρυφο άξονα η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με μέγιστο ρεύμα 5A, ο συνδυασμός για μετατόπιση φάσης 0° είναι I1 = 5A, I2 = 5A, αλλά για μετατόπιση φάσης 90°, ο συνδυασμός είναι I1 = 2,5A, I2 = -4,33A.

Για μετατόπιση φάσης ίση με 0°, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 3.12):



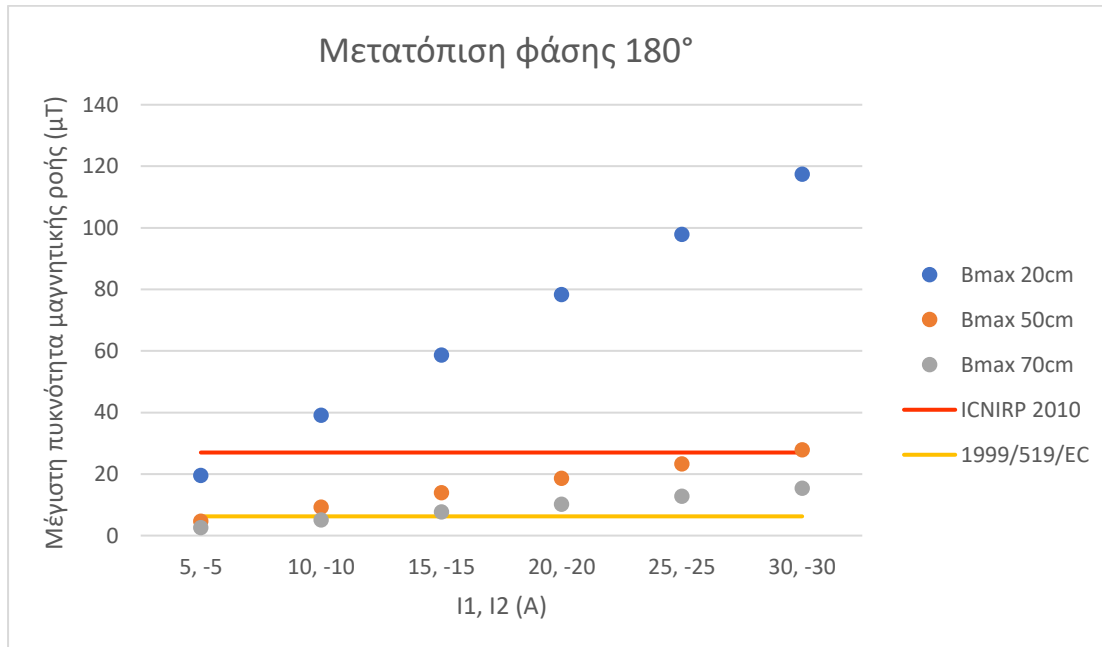
Σχήμα 3.12: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης 0°

Για μετατόπιση φάσης ίση με  $90^\circ$ , τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης  $90^\circ$

Τέλος, για μετατόπιση φάσης ίση με  $180^\circ$ , τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης  $180^\circ$

Αρχικά, παρατηρείται πώς για ένα εύρος ρευμάτων λειτουργίας μέχρι 30A, η μαγνητική ροή είναι εντός των ορίων ασφαλείας που θέτει η ICNIRP σε απόσταση 50cm. Τα όρια του ευρωπαϊκού συμβουλίου επιτυγχάνονται σε απόσταση 70cm και για μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 10A.

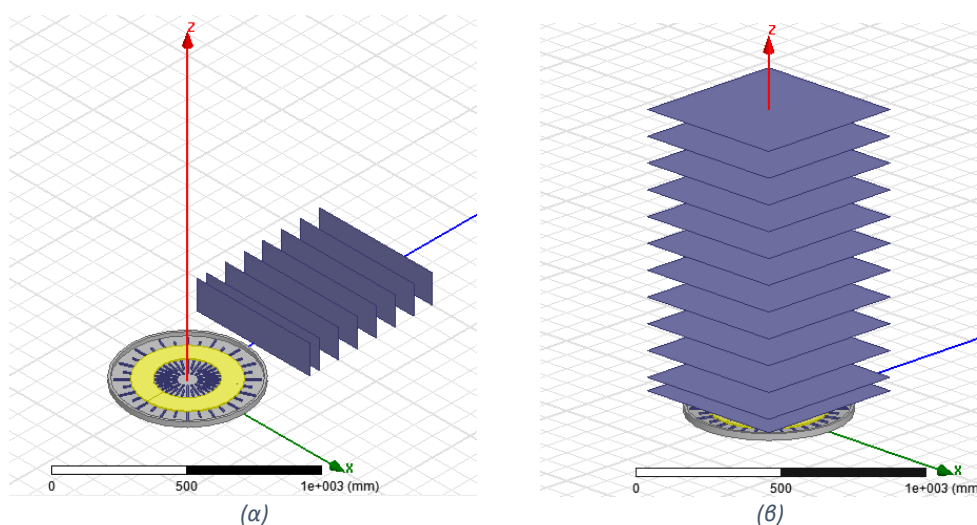
Επίσης, καθώς αυξάνεται το ρεύμα λειτουργίας, αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο, όπως είναι αναμενόμενο. Η αύξηση μάλιστα κινείται αναλογικά, σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας.

Η ιδιότητα αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από το κύκλωμα ελέγχου, διότι μπορεί να ρυθμίσει το πεδίο που αναπτύσσεται με μία μεταβολή στο ρεύμα κρατώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που απαιτείται υποδιπλασιασμός του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται, αυτό επιτυγχάνεται άμεσα μέσω του υποδιπλασιασμού του ρεύματος λειτουργίας πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

### 3.4 Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον φορτιστή, δεν εντοπίζεται μόνο όταν έχει την μορφή συζεύκτη, αλλά παρατηρείται και όταν το πρωτεύον, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο στο έδαφος διαρρέεται από ρεύμα. Επομένως, πρέπει να καθοριστεί η ελάχιστη δυνατή απόσταση που, βάσει των προτύπων, καθίσταται ο φορτιστής ασφαλής.

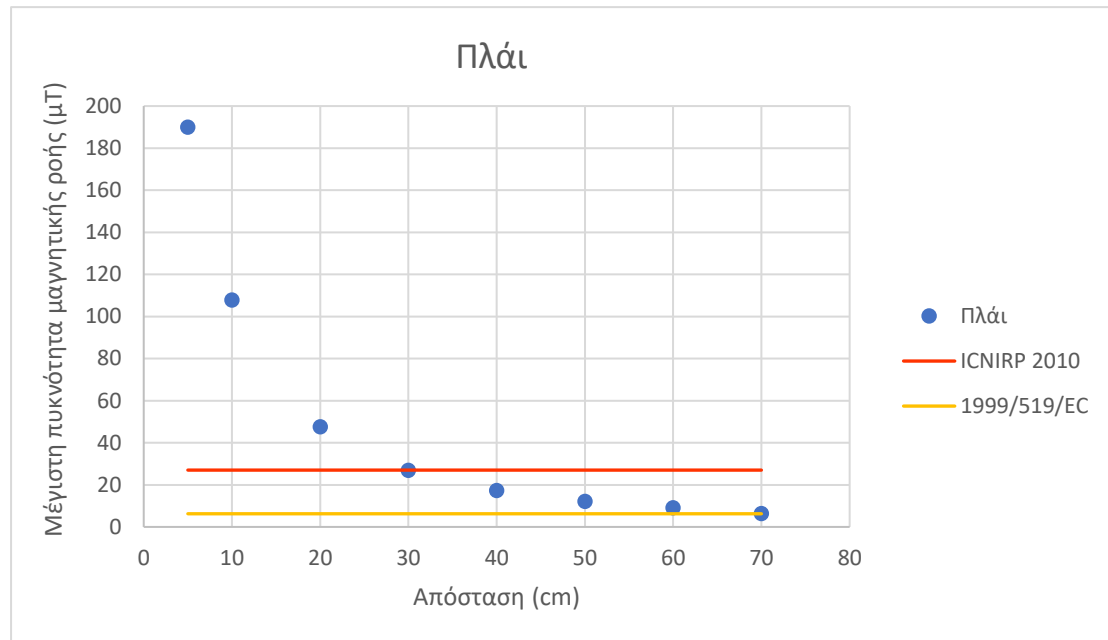
Για την μελέτη της συγκεκριμένης λειτουργίας, θα χρησιμοποιηθεί το πρωτεύον του κυκλικού συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών, το οποίο θα διαρρέεται από ρεύμα 25A. Οι επιφάνειες που θα μελετηθούν θα βρίσκονται τόσο στο πλάι του πρωτεύοντος, όσο και πάνω από αυτό. Οι επιφάνειες προς ανάλυση φαίνονται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Διάταξη λειτουργίας μόνο πρωτεύοντος με επιφάνειες προς ανάλυση (α) στο πλάι και (β) από πάνω

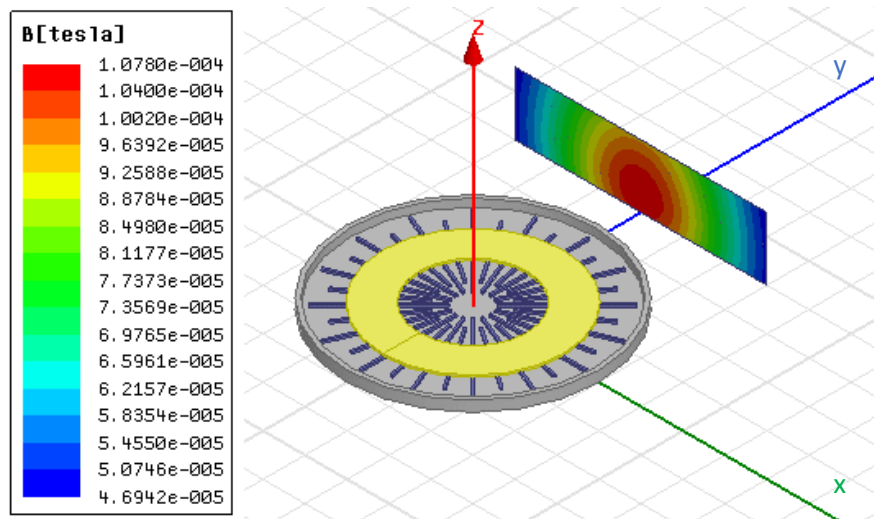


Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την μέγιστη μαγνητική ροή που αναπτύσσεται στο πλάι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.16.



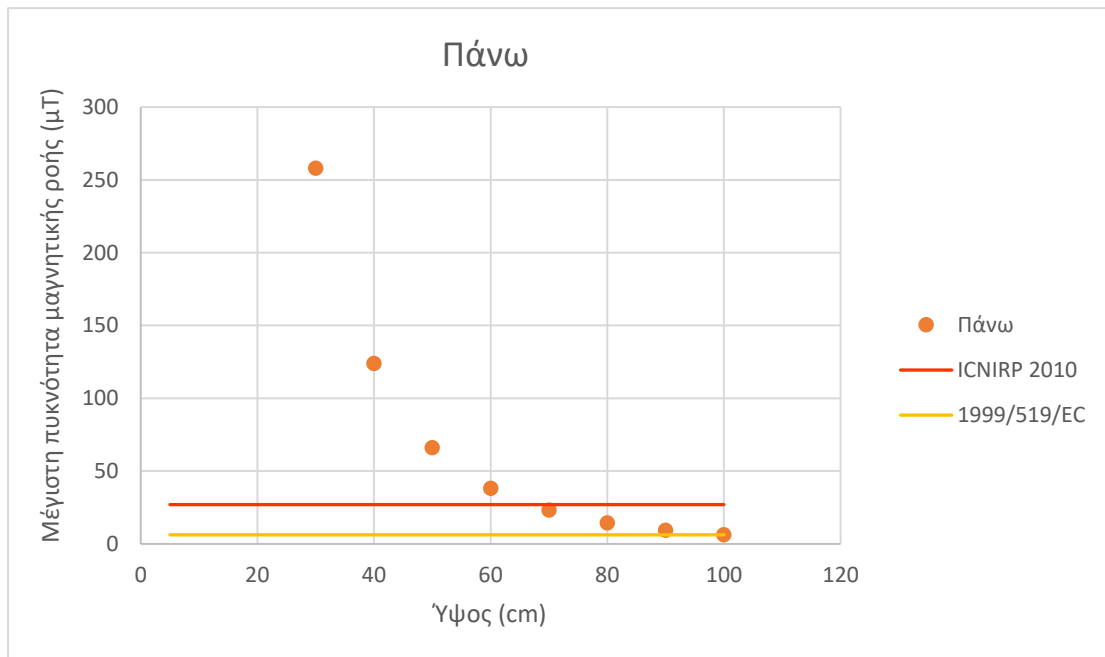
Σχήμα 3.16: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής πλάι του πρωτεύοντος

Σύμφωνα με τα όρια της ICNIRP, η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας ορίζεται στα 30cm από το άκρο του φορτιστή, ενώ με βάση το ευρωπαϊκό συμβούλιο, η απόσταση αυτή αυξάνεται στα 70cm. Παρατηρείται πως η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής συναρτῆσει της απόστασης μεγιστοποιείται πλησιάζοντας το πρωτεύον. Επίσης, η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής παρουσιάζει μια συμμετρία ως προς τον άξονα x (Σχήμα 3.17), γεγονός που απορρέει από την συμμετρική κατασκευή του πρωτεύοντος.



Σχήμα 3.17: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 10cm από το άκρο του πρωτεύοντος

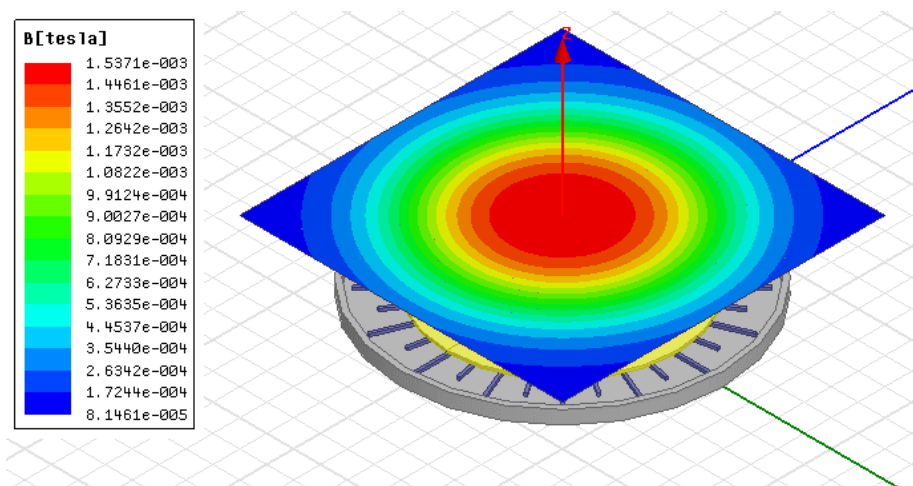
Η γραφική παράσταση της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής πάνω από το πρωτεύον παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής πάνω από το πρωτεύον

Πάνω από το πρωτεύον, το όριο ασφάλειας εντοπίζεται σε ύψος 70cm και 100cm, με βάση την ICNIRP και το ευρωπαϊκό συμβούλιο αντιστοιχώς. Το μαγνητικό πεδίο πάνω από το πρωτεύον είναι αυξημένο σε σχέση με το πεδίο που εντοπίζεται στο πλάι.

Συνεπώς, θα πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία του πρωτεύοντος δίχως το δευτερεύον, για λόγους ασφάλειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα αισθητήρια όργανα που βρίσκονται τοποθετημένα στο πρωτεύον και/ή στο δευτερεύον, επιτρέποντας τη λειτουργία μόνο σε περίπτωση που το όχημα βρίσκεται πάνω από το φορτιστή.



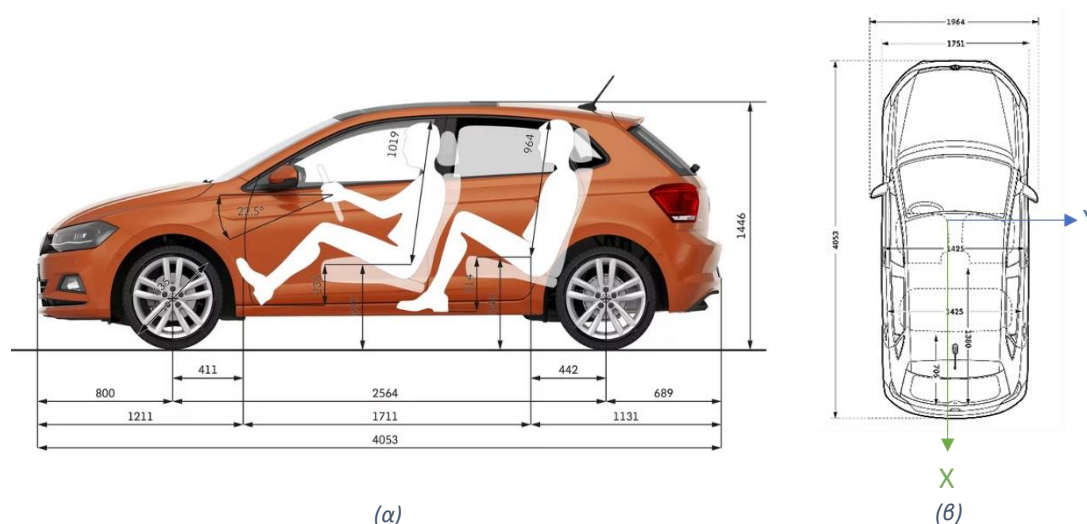
Σχήμα 3.19: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε ύψος 10cm πάνω από το πρωτεύον

### 3.5 Μαγνητικό Πεδίο στο εξωτερικό του οχήματος

Για την βέλτιστη τοποθέτηση του φορτιστή στο όχημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξεταστεί μέσα από προσομοιώσεις η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος.

Ο φορτιστής, όσον αφορά το πλάτος του αυτοκινήτου (άξονας  $\gamma$  στο Σχήμα 3.20-β), θα τοποθετηθεί κεντρικά, έτσι ώστε να περιορίζει σημαντικά το μαγνητικό πεδίο στα πλαϊνά του αυτοκινήτου..

Για την κατάλληλη επιλογή της θέσης του φορτιστή κατά τον διαμήκη άξονα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο σημείο αυτό να καθορισθούν οι διαστάσεις ενός οχήματος, ώστε να τοποθετηθούν κατάλληλες επιφάνειες εκτός του οχήματος που θα επιτρέπουν τον προσδιορισμό των μαγνητικών πεδίων. Οι επιφάνειες αυτές θα οριστούν με βάση το πρότυπο ενός μεσαίου αυτοκινήτου, τύπου hatchback, οι διαστάσεις του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 3.20.

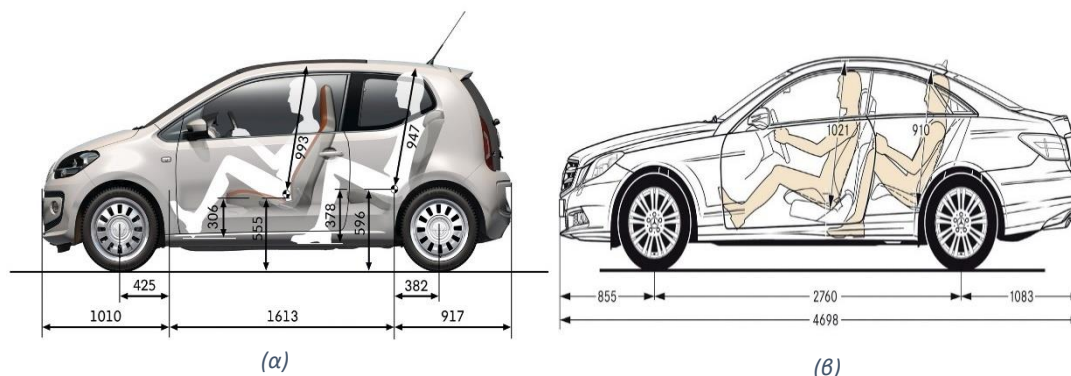


Σχήμα 3.20: (α) Πλάγια όψη και (β) κάτοψη αυτοκινήτου τύπου hatchback

Σαφώς, βέβαια ένα αυτοκίνητο τύπου mini, περιορίζει ακόμη περισσότερο την τοποθέτηση του φορτιστή, ενώ ένα τύπου sedan, λόγω των μεγάλων διαστάσεων, επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην εύρεση ιδανικής θέσης (Σχήμα 3.21).

Θεωρούμε ότι το δευτερεύον θα προσαρμοσθεί στο σασί του αυτοκινήτου, το οποίο σύμφωνα με το Σχήμα 3.20 μπορεί να θεωρηθεί ίσο με περίπου 3 X 1,5 μέτρα. Επισημαίνεται ότι στο παρόν κεφάλαιο οι ιδιότητες του σασί ως μέσο θωράκισης και περιορισμού του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του οχήματος δε λαμβάνονται υπόψιν, λόγω της

μαγνητοστατικής ανάλυσης. Το θέμα αυτό, ωστόσο, θα διερευνηθεί στο Κεφάλαιο 6 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 3.21: Ενδεικτικές διαστάσεις αυτοκινήτου τύπου (α) mini και (β) sedan

### 3.5.1 Τοποθέτηση στο μπροστινό μέρος

Θεωρώντας την τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο μπροστινό μέρος του οχήματος, μπορούμε να ορίσουμε το μήκος του σασί ίσο με 2 μέτρα αντί για 3, καθώς το μαγνητικό πεδίο εξασθενεί σημαντικά σε μεγάλες αποστάσεις από το μαγνητικό συζεύκτη. Μία τέτοια μείωση στο μήκος του σασί επιτρέπει επίσης τη μείωση του χρόνου προσομοιώσεων. Το πλάτος του σασί παραμένει ίσο με 1.5 μέτρα.

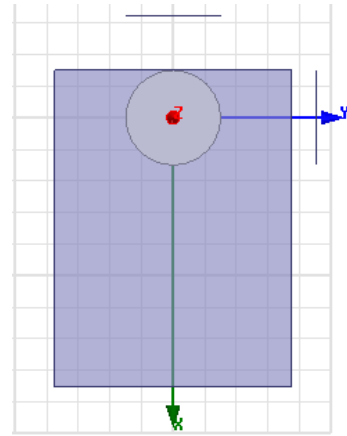
Τίθενται προς ανάλυση δύο εξωτερικές επιφάνειες, μία τοποθετημένη 35cm από το σημείο που τελειώνει το σασί, όσο περίπου δηλαδή αναμένεται το μήκος του μπροστινού προφυλακτήρα, και μία επιφάνεια στο πλάι, 90cm μακριά από το κέντρο του σασί.

Αρχικά τοποθετήθηκε ο φορτιστής 35cm από την άκρη του προφυλακτήρα, εκεί περίπου, δηλαδή, που αρχίζει το σασί (Σχήμα 3.22). Η θέση αυτή ορίζεται ως θέση 0cm. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.2.3, η καλύτερη και χειρότερη δυνατή κατάσταση σχετικά με τα ΗΜ πεδία παρατηρείται όταν η μετατόπιση φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίση με 0 και 180 μοίρες αντίστοιχα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 και για μετατόπιση φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με 0 μοίρες η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής παρατηρείται για ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος 25A και φορά αντίρροπη. Αντίστοιχα, η χειρότερη κατάσταση σχετικά με τα ΗΜ πεδία η οποία δίνει τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και για μετατόπιση φάσης 180 μοίρες, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 είναι για ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος 25A και φορά ομόρροπη.

Τα αποτελέσματα για τη θέση 0cm παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)	
Θέση φορτιστή 0cm	Εξωτερικό	
Μετατόπιση φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι
0	7,654	0,822
180	47,923	28,149

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 0cm

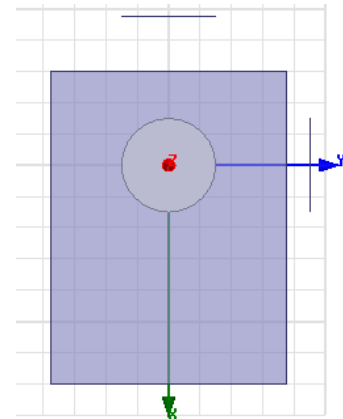


Σχήμα 3.22: Κάτοψη αυτοκινήτου με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 0cm

Για μετατόπιση φάσης μεταξύ ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με 180 μοίρες η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής υπερβαίνει στο εξωτερικό του αυτοκινήτου τα όρια που τίθενται και από την ICNIRP και από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Για να μειωθεί το μαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται μπροστά, μετατοπίζουμε τον φορτιστή κατά 30cm προς το κέντρο του οχήματος (Σχήμα 3.23) και έχουμε τα εξής αποτελέσματα (Πίνακας 3.6).

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)	
Θέση φορτιστή 30cm	Εξωτερικό	
Μετατόπιση φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι
0	0,643	0,810
180	16,855	23,472

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 30cm



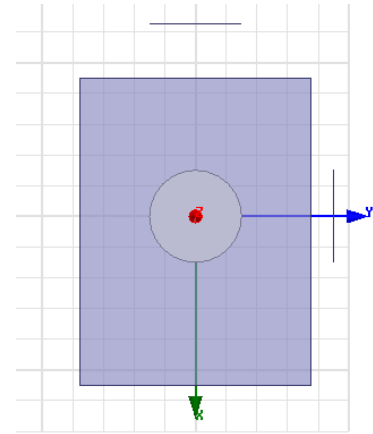
Σχήμα 3.23: Κάτοψη αυτοκινήτου με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 30cm

Με τον φορτιστή τοποθετημένο στην θέση 30cm, παρατηρείται πως το πεδίο που αναπτύσσεται εκτός του αυτοκινήτου ξεπερνά το ασφαλές όριο των 6,25μΤ που θέτει το ευρωπαϊκό συμβούλιο, ενώ ικανοποιεί το αντίστοιχο της ICNIRP των 27μΤ.

Με επιπλέον μετακίνηση του φορτιστή κατά 30cm προς το κέντρο του οχήματος τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται στον Πίνακα 3.7. Παρατηρείται πως ακόμα και για μια μετατόπιση της τάξης των 60cm, το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου για την χειρότερη περίπτωση, η οποία είναι για μετατόπιση ρευμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος ίσης με 180 μοίρες συνεχίζει να μην ικανοποιείται. Σαφώς βέβαια μία τέτοια περίπτωση θεωρείται ως ακραία και θα πρέπει να αποφεύγεται.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)	
Θέση φορτιστή 60cm	<b>Εξωτερικό</b>	
Μετατόπιση φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι
0	0,144	0,798
180	8,118	22,935

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 60cm



Σχήμα 3.24: Κάτοψη αυτοκινήτου με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 60cm

Επομένως, με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η βέλτιστη θέση τοποθέτησης του φορτιστή, θα βρίσκεται 30cm ή και περισσότερα από το άκρο του σασί και για την ικανοποίηση του ορίου του ευρωπαϊκού συμβουλίου, θα πρέπει η μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων να μην παίρνει την τιμή των 180° και ιδανικά να περιορίζεται στο εύρος 0° έως 90°.

### 3.5.2 Τοποθέτηση στο πίσω μέρος

Έχοντας και στην περίπτωση αυτή ως σημείο αναφοράς τις διαστάσεις ενός αυτοκινήτου μεσαίας κατηγορίας, τύπου hatchback (Σχήμα 3.20), ορίστηκαν στο εξωτερικό 2 συνολικά επιφάνειες προς ανάλυση.

Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκε μια επιφάνεια στο πίσω μέρος, 30cm από το σημείο που τελειώνει το σασί, απόσταση η οποία ταυτίζεται περίπου με το άκρο του πίσω προφυλακτήρα, και μία επιφάνεια στο πλάι, 90cm μακριά από το κέντρο του σασί. Λαμβάνονται έτσι υπόψιν τα εξωτερικά σημεία όσο το δυνατό πιο κοντά στο όχημα, όπου είναι δυνατό να βρεθεί κάποιος χρήστης του οχήματος.

Εξετάστηκαν και σε αυτή τη περίπτωση δύο καταστάσεις λειτουργίας, για μετατοπίσεις φάσης 0 και 180 μοίρες, λαμβάνοντας υπόψιν την καλύτερη και τη χειρότερη δυνατή κατάσταση σχετικά με τα αναπτυσσόμενα ΗΜ πεδία. Ο προσδιορισμός των ρευμάτων για τις δύο αυτές καταστάσεις σε πρωτεύον και δευτερεύον γίνεται με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.3 και σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3.

Ως θέση 0cm ορίζεται η θέση του φορτιστή όταν είναι τοποθετημένος 30cm από το άκρο του προφυλακτήρα, στο σημείο δηλαδή όπου τελειώνει το σασί (Σχήμα 3.25). Ελέγχθηκαν διάφορες θέσεις τοποθέτησης του φορτιστή, όπως στις θέσεις 0, 10, 20 και 30cm. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Μετατόπιση φάσης 0°		Μετατόπιση φάσης 180°	
Θέση φορτιστή	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
0cm	10,692	0,725	60,529	27,295
10cm	3,843	0,782	39,063	24,954
20cm	1,673	0,805	26,857	23,904
30cm	0,572	0,717	23,874	19,771

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο πίσω μέρος στις θέσεις 0cm, 10cm, 20cm και 25cm

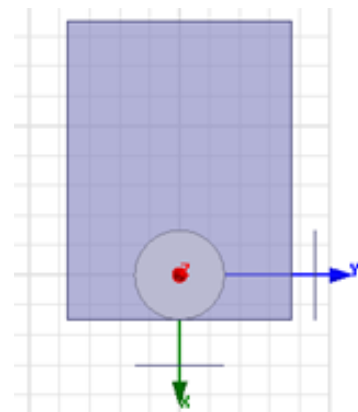
Στην περίπτωση των 0cm, παρατηρείται πως για την λειτουργία όπου τα ρεύματα έχουν μετατόπιση φάσης 180 μοίρες το πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας. Τα ΗΜ πεδία λαμβάνουν επίσης μεγάλες τιμές σε περίπτωση που επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή κατάσταση με τα ρεύματα να έχουν μετατόπιση φάσης ίση με 0 μοίρες.

Για την εύρεση του ιδανικού σημείου τοποθέτησης, προσομοιώνουμε τις θέσεις 10, 20 και 30cm, για τις ίδιες καταστάσεις λειτουργίας, με στόχο την μείωση του πεδίου κυρίως στο πίσω μέρος του οχήματος.

Παρατηρείται πως στις θέσεις 10cm, 20cm και 30cm και για ρεύματα αντίρροπα, τα εξωτερικά σημεία είναι εντός ορίων και μέχρι την οριακή τιμή έχουν ένα περιθώριο ασφαλούς λειτουργίας.

Ο συνδυασμός ομόρροπων και μέγιστων ρευμάτων δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερης έντασης, το οποίο υπερβαίνει τα όρια του ευρωπαϊκού συμβουλίου και είναι εντός των ορίων της ICNIRP στις θέσεις 20cm και 30cm.

Συμπερασματικά, ο φορτιστής επιλέγεται να τοποθετηθεί στην θέση 20cm, διότι στην θέση 10cm το εξωτερικό πεδίο είναι εκτός ορίων και σε θέση μεγαλύτερη των 20cm, ο φορτιστής πλησιάζει προς το κέντρο της διάταξης, θέση η οποία θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα



Σχήμα 3.25: Κάτοψη αυτοκινήτου με φορτιστή στο πίσω μέρος στη θέση 0cm

### 3.5.3 Τοποθέτηση στο κέντρο

Στην ενότητα αυτή επιλέγεται ως θέση τοποθέτησης του φορτιστή το κέντρο του σασί. Δεδομένου των διαστάσεων του σασί 3x1,5m και της διαμέτρου του φορτιστή 60cm, ο φορτιστής ισαπέχει από το μπροστά και το πίσω άκρο του σασί 120cm και από το πλάι 45cm. Η κάτοψη του αυτοκινήτου με τον φορτιστή τοποθετημένο στο κέντρο φαίνεται στο Σχήμα 3.26.

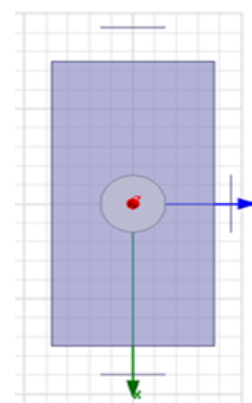
Μελετήθηκαν 3 επιφάνειες γύρω από το σασί, μια μπροστινή σε απόσταση 35cm από το άκρο του, μια στο πίσω μέρος σε απόσταση 30cm και μια στο πλάι σε απόσταση 15cm. Οι παραπάνω αποστάσεις ισοδυναμούν με το μήκος του μπροστινού προφυλακτήρα, του πίσω προφυλακτήρα και της πόρτας αντίστοιχα.

Τα ρεύματα λειτουργίας και σε αυτή την περίπτωση ορίστηκαν ως  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$  και ως  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = -25A$ , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3.

Στον Πίνακα 3.9 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων καταστάσεων λειτουργίας.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
Θέση φορτιστή στο κέντρο	Εξωτερικό		
Μετατόπιση φάσης (°)	Μπροστά	Πίσω	Πλάι
0	0,026	0,032	0,798
180	2,288	2,616	22,603

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με το φορτιστή στο κέντρο



Σχήμα 3.26: Κάτοψη αυτοκινήτου με το φορτιστή στο κέντρο

Παρατηρείται πως η θέση αυτή σε σύγκριση με τις προηγούμενες τοποθετήσεις παρουσιάζει το μικρότερο πεδίο. Συγκεκριμένα, το πεδίο που αναπτύσσεται για μετατόπιση φάσης  $0^\circ$  έχει τιμή η οποία δεν ξεπερνά το  $1\mu T$ , ικανοποιεί επομένως το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου έχοντας παράλληλα ικανοποιητικό περιθώριο ασφαλούς λειτουργίας.

Για την περίπτωση μετατόπισης φάσης  $180^\circ$  μεταξύ των ρευμάτων, το πεδίο στην μπροστινή και την πίσω επιφάνεια παραμένει σε χαμηλές τιμές, όχι όμως και το πεδίο που εντοπίζεται στο πλάι του οχήματος. Η τιμή του υπερβαίνει κατά πολύ το όριο που θέτει το ευρωπαϊκό συμβούλιο, αλλά ικανοποιεί το όριο που ορίζει η ICNIRP.

Συμπερασματικά, η τοποθέτηση στο κέντρο μοιάζει να είναι αρκετά ικανοποιητική επιλογή εξαιτίας του μειωμένου πεδίου. Στο Κεφάλαιο 6, μελετάται περαιτέρω και το πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του οχήματος μέσω της ανάλυσης με δινορεύματα.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Λειτουργία του φορτιστή στην περίπτωση οριζόντιων μετατοπίσεων & στη δυναμική φόρτιση

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί μέσα από προσομοιώσεις το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος για τις διάφορες δυνατές θέσεις μετατόπισης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, οι οποίες συναντώνται στη στατική και στη δυναμική φόρτιση.

### 4.2 Μελέτη των ΗΜ πεδίων σε οριζόντιες μετατοπίσεις

Για την συγκεκριμένη μελέτη θα χρησιμοποιηθεί ο φορτιστής που κατασκευάστηκε στο Κεφάλαιο 2, ο οποίος έχει διάμετρο 60cm και διάκενο 15cm. Ο φορτιστής τοποθετείται ενδεικτικά στο πίσω μέρος 20cm από την άκρη του σασί.

Στην ιδιανική περίπτωση, όσων αφορά στα αναπτυσσόμενα ΗΜ πεδία, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, η μετατόπιση φάσης αρκεί να είναι μηδενική. Για μηδενική μετατόπιση φάσης η χειρότερη κατάσταση ως προς τα ΗΜ πεδία είναι όταν τα ρεύματα λειτουργίας είναι ίσα με  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ , όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3.

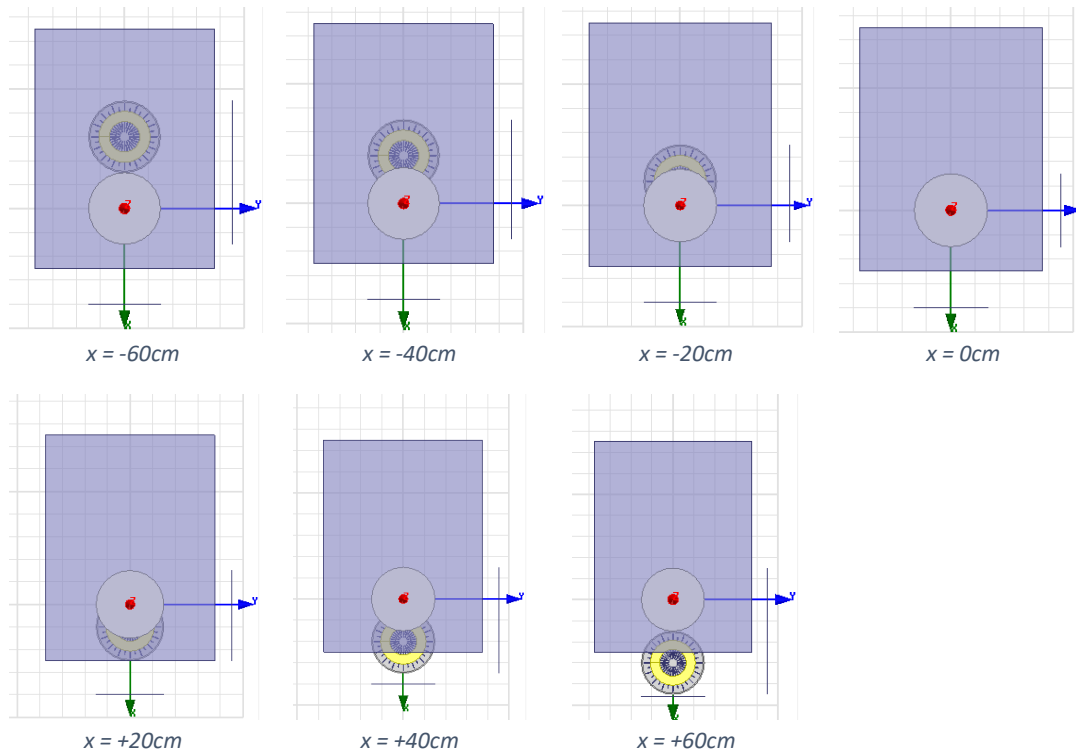
Όπως εξηγήθηκε και στην ενότητα 3.2, μία συνηθισμένη κατάσταση στη στατική φόρτιση είναι τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος να έχουν μία μετατόπιση φάσης ίση με 90 μοίρες. Στην περίπτωση αυτή, η χειρότερη δυνατή κατάστασή σχετικά με τα ΗΜ πεδία είναι όταν τα ρεύματα έχουν τιμές  $I_1 = 12,5A$ ,  $I_2 = -21,65A$ , όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3.

Η χειρότερη κατάσταση σχετικά με τα αναπτυσσόμενα ΗΜ πεδία παρατηρείται όταν η μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίση με 180 μοίρες. Μάλιστα, η χειρότερη περίπτωση για τις τιμές των ρευμάτων στην κατάσταση αυτή είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = -25A$ , όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα με βάση τα οποία κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα βρίσκονται στο Παράρτημα.

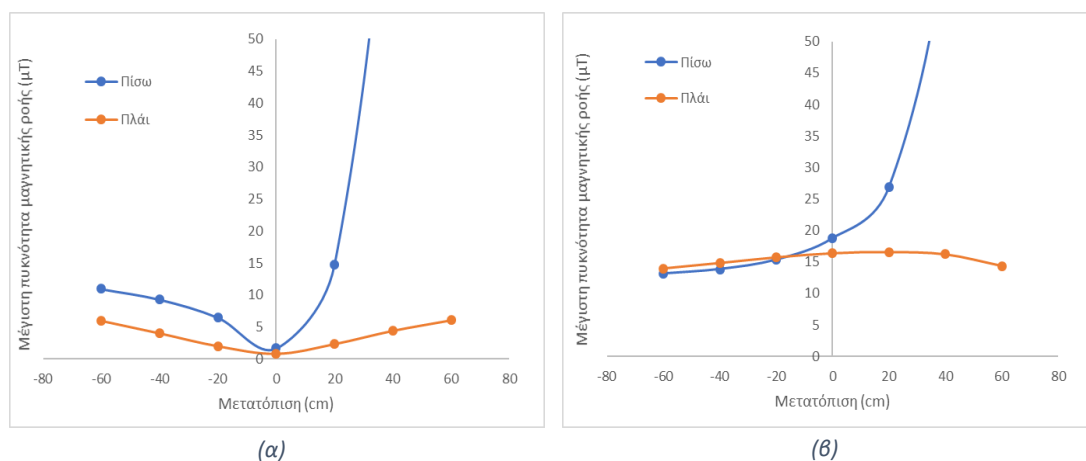
#### 4.2.1 Μηδενική μετατόπιση στον άξονα y

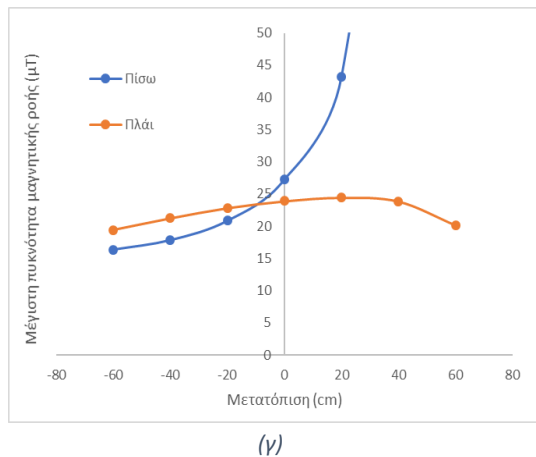
Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης θεωρώντας αρχικά μία μηδενική μετατόπιση ως προς τον οριζόντιο άξονα (άξονα y). (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Μετατόπιση πρωτεύοντος στον κατακόρυφο άξονα

Τα αποτελέσματα της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής των περιπτώσεων με μετατόπισης φάσης 0, 90 και 180 μοίρες φαίνονται στο Σχήμα 4.2.





Σχήμα 4.2: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $\gamma = 0\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης ( $\alpha$ ) 0 μοίρες, ( $\beta$ ) 90 μοίρες και ( $\gamma$ ) 180 μοίρες.

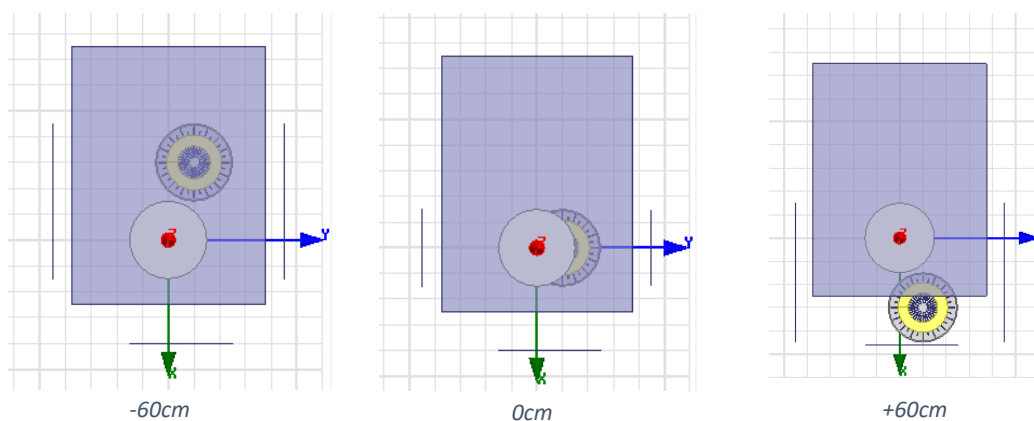
Όσον αφορά τα εξωτερικά σημεία του οχήματος, το μαγνητικό πεδίο που συναντάται στο πλάι δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, μιας και η απόσταση μεταξύ του άκρου του πρωτεύοντος και της πλαϊνής επιφάνειας, όπου εξετάζεται το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερή και ίση με 60cm για κάθε περίπτωση μετατόπισης που εξετάζεται. Όμως, το πεδίο που υπολογίζεται στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου, καθώς το πρωτεύον μετατοπίζεται από το κέντρο προς τα πίσω, λαμβάνει μεγάλες τιμές, ξεπερνώντας τα όρια ακόμα και για μικρές μετατοπίσεις. Επισημαίνεται πως για περιπτώσεις μετατοπίσεων μεγαλύτερες από +50cm, το πρωτεύον βγαίνει εκτός των ορίων του αυτοκινήτου. Συνεπώς, στις περιπτώσεις αυτές, η πίσω επιφάνεια τοποθετήθηκε στο άκρο του φορτιστή (Σχήμα 4.1).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ο φορτιστής δύναται να χρησιμοποιηθεί σε ρεαλιστικές εφαρμογές, ωστόσο, θα πρέπει να καθοριστεί το εύρος της μετατόπισης που προϋποθέτει ότι τα ΗΜ πεδία είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Στην περίπτωση που εξετάσθηκε, παρατηρείται ότι τα όρια ξεπερνούνται σημαντικά για μεγάλο εύρος μετατοπίσεων σε περίπτωση που η μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίση με 180 μοίρες. Για το λόγο αυτό μία τέτοια κατάσταση λειτουργίας θα πρέπει να αποφεύγεται. Ωστόσο, θεωρώντας μία μετατόπιση φάσης ίση με περίπου 90 μοίρες, που είναι συνήθως ενδεικτική στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, ένα εύρος μετατοπίσεων -60 μέχρι και 20 εκατοστά είναι αποδεκτό. Ακόμη καλύτερη, βέβαια, είναι η κατάσταση όπου επιτυγχάνεται μηδενική μετατόπιση φάσης, όπου επιτρέπεται ένα εύρος μετατοπίσεων -60 μέχρι και 30 εκατοστά στον άξονα  $x$ . Τα παραπάνω εύρη μετατοπίσεων ορίστηκαν με βάση το όριο της ICNIRP. Το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου επαληθεύεται μόνο για μετατόπιση φάσης ίση με 0 μοίρες και στο διάστημα -20 έως 10cm.

#### 4.2.2 Μετατόπιση 20cm στον άξονα γ

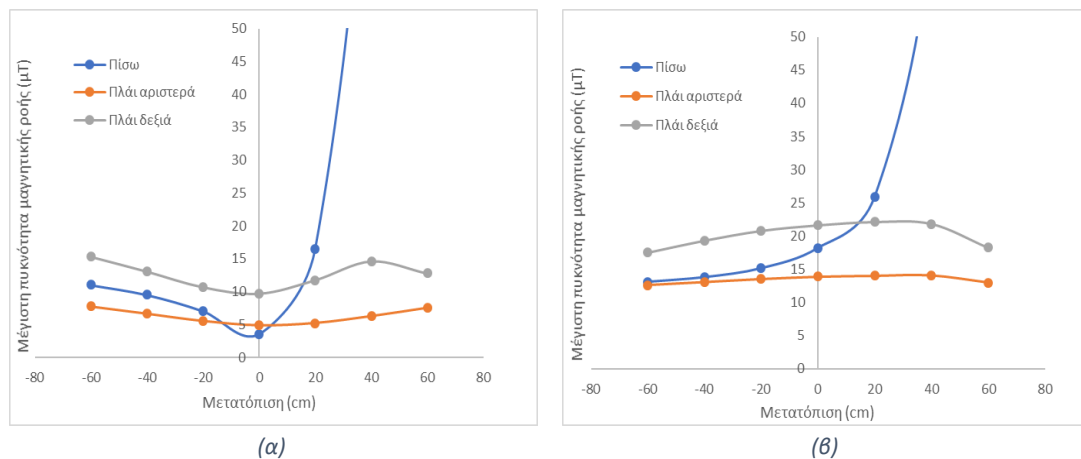
Η μετατόπιση κατά την φόρτιση είναι δυνατόν να συμβεί τόσο στον άξονα x του Σχήματος 4.2, όπως παρουσιάστηκε πριν, όσο και στον άξονα γ. Στην ενότητα αυτή, θα μετατοπιστεί το πρωτεύον κατά 20cm ως προς τον άξονα γ και θα εξεταστούν οι περιπτώσεις σε όλο το μήκος του φορτιστή από -60cm έως +60cm με βήμα 20cm.

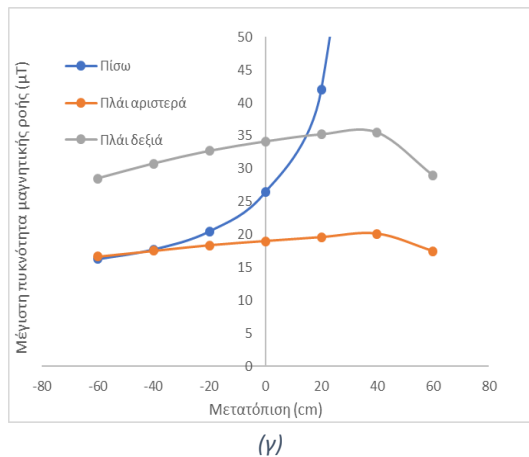
Εξετάζονται και πάλι οι μετατοπίσεις φάσης 0,90 & 180, ενώ στις επιφάνειες προς ανάλυση θα προστεθεί επιπλέον μία επιφάνεια στο πλάι, 90cm από το κέντρο, καθώς εξαιτίας της μετατόπισης του φορτιστή, το πεδίο εκατέρωθεν του οχήματος θα είναι διαφορετικό. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται 3 πιθανές θέσεις του πρωτεύοντος.



Σχήμα 4.3: Μετατοπίσεις πρωτεύοντος στις θέσεις -60cm, 0cm, +60cm για  $x = 20cm$

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής για μετατόπιση φάσης 0,90 και 180 μοίρες και για διάφορες μετατοπίσεις κατά τον άξονα x.





Σχήμα 4.4: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 20\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης ( $\alpha$ ) 0 μοίρες, ( $\beta$ ) 90 μοίρες και ( $\gamma$ ) 180 μοίρες

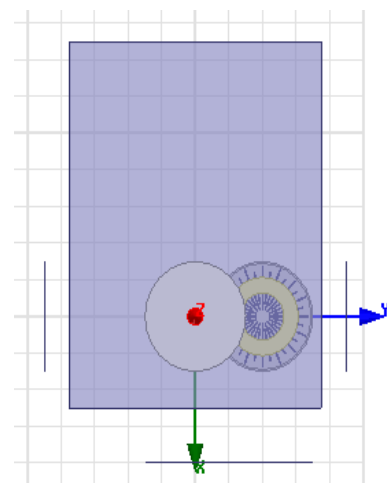
Συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις με τις προηγούμενες του Σχήματος 4.2, παρατηρείται πως το πεδίο που αναπτύσσεται για μετατόπιση κατά 20cm ως προς τον άξονα  $y$ , έχει σχεδόν την ίδια τιμή που είχε και το πεδίο στην περίπτωση για  $y = 0\text{cm}$ .

Πιο συγκεκριμένα, τα περιθώρια λειτουργίας αναφορικά με το εξωτερικό πεδίο με βάση το όριο της ICNIRP, στην πρώτη και στην δεύτερη περίπτωση είναι εντός των ορίων ασφαλείας για μετατοπίσεις στο εύρος -60cm έως 20cm, ενώ στην τρίτη περίπτωση το πεδίο που ανιχνεύεται στο πλάι είναι συνεχώς εκτός ορίων, επομένως η λειτουργία με μετατόπιση φάσης ρευμάτων ίση με 180° πρέπει να αποφεύγεται. Το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου δεν τηρείται σε καμία εκ των τριών περιπτώσεων, καθώς το πεδίο που εντοπίζεται στο πλάι ή/και πίσω υπερβαίνει συνεχώς την τιμή των 6,25μT

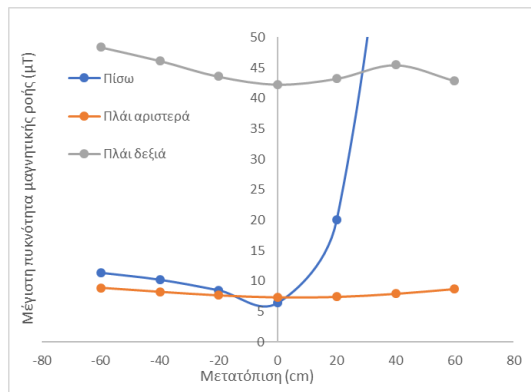
#### 4.2.3 Μετατόπιση 40cm στον άξονα $y$

Παρόμοια διαδικασία που ακολουθήθηκε στην περίπτωση για μετατόπιση 20cm ως προς  $y$ , θα εφαρμοστεί και για μετατόπιση ίση με 40cm. Ως παράδειγμα της συγκεκριμένης περίπτωσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5, η κατάσταση όπου το πρωτεύον βρίσκεται στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 40\text{cm}$ .

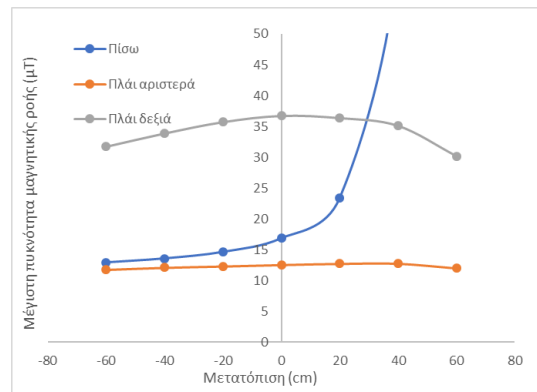
Το πρωτεύον, όντας μετατοπισμένο κατά 40cm, είναι μόλις 5cm από το άκρο του σασί και 20cm από το πλάι του αυτοκινήτου, επομένως αναμένεται το μαγνητικό πεδίο στο πλάι να είναι αυξημένο. Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης, εξετάζονται τρεις μετατοπίσεις φάσης, 0, 90 και 180 μοίρες. Για την κάθε περίπτωση εφαρμόζουμε στο συζεύκτη τον συνδυασμό ρευμάτων που έδωσε την μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 και την ανάλυση της ενότητας 3.3. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στο Σχήμα 4.6.



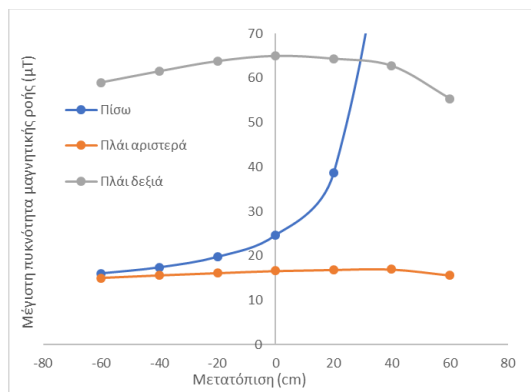
Σχήμα 4.5: Μετατόπιση πρωτεύοντος στη θέση 0cm για  $x = 40\text{cm}$



(α)



(β)



(γ)

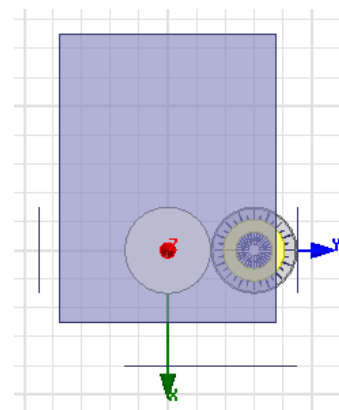
Σχήμα 4.6: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 40\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες

Παρατηρούμε πως σε αυτή τη περίπτωση, η πυκνότητα μαγνητικής ροής που εντοπίζεται στη δεξιά πλαϊνή επιφάνεια, ξεπερνά ακόμα και τα όρια που θέτει η ICNIRP και για τις τρεις περιπτώσεις μετατοπίσεις φάσης μεταξύ των ρευμάτων, συνεπώς, η λειτουργία του φορτιστή για αυτή τη μετατόπιση δε φαίνεται να καθίσταται δυνατή.

#### 4.2.4 Μετατόπιση 60cm στον άξονα $y$

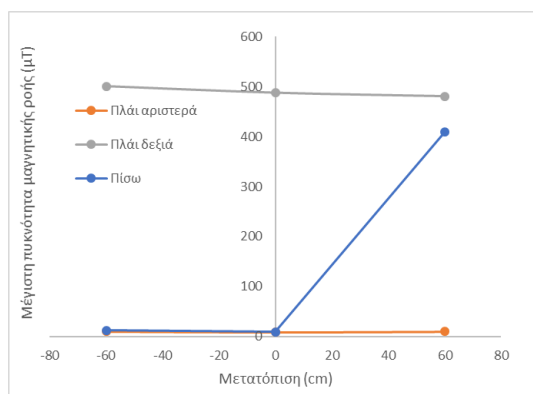
Στην περίπτωση αυτή θα εξεταστούν μόνο οι ακραίες καταστάσεις που είναι πιθανό να βρεθεί το πρωτεύον, δηλαδή στις θέσεις  $-60\text{cm}$ ,  $0\text{cm}$  και  $+60\text{cm}$ . Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κάτοψη με το πρωτεύον στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 60\text{cm}$ .

Ο συνδυασμός ρευμάτων που θα εφαρμοστεί στο συζεύκτη προκύπτει, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, με βάση τον Πίνακα 3.3 και την ανάλυση της Ενότητας 3.3 και είναι ο συνδυασμός ρευμάτων ο οποίος για την κάθε μετατόπιση φάσης προκάλεσε το μέγιστο μαγνητικό πεδίο.

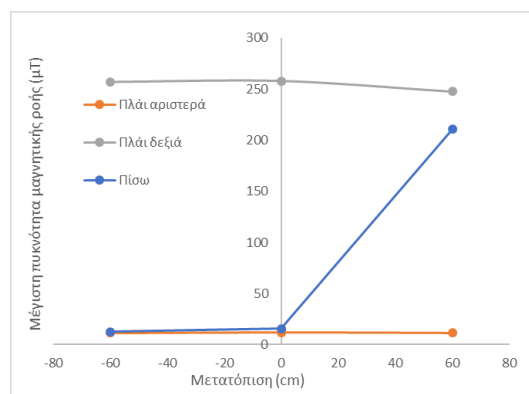


Σχήμα 4.7: Μετατόπιση πρωτεύοντος στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 60\text{cm}$

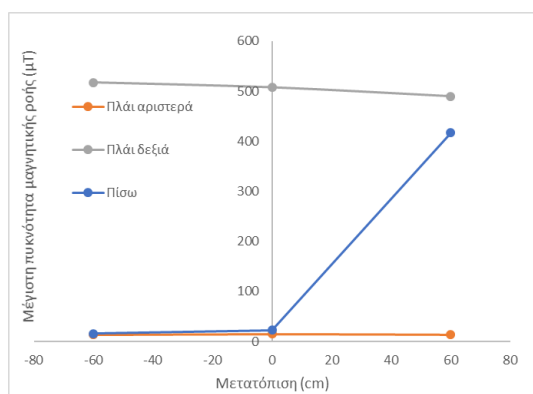
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής καθώς το πρωτεύον κινείται κατά τον άξονα  $x$ .



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.8: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 60\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες

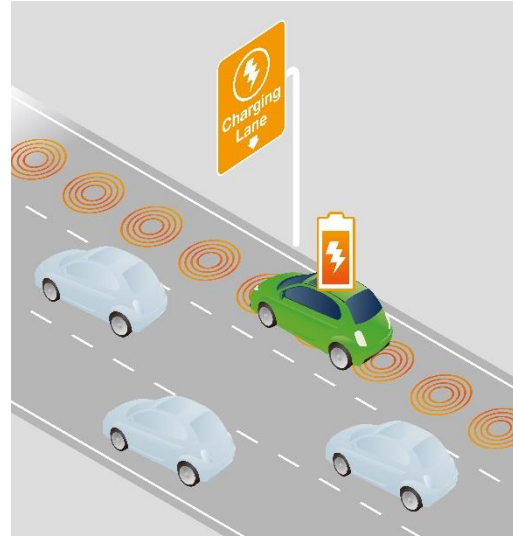
Η λειτουργία σε τόσο μεγάλες μετατοπίσεις, όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις, δεν είναι ασφαλής, καθώς το πεδίο που εντοπίζεται στα εξωτερικά σημεία του οχήματος βρίσκεται εκτός ορίων, ακόμα και αν ληφθούν υπόψιν τα όρια που θέτει η ICNIRP.

Συμπερασματικά, για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων ίση με 90 μοίρες, όπως συχνά συναντάται στην στατική φόρτιση, ο φορτιστής μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια σύμφωνα με την ICNIRP, σε ένα εύρος μετατοπίσεων  $-60\text{cm}$  έως  $+20\text{cm}$  στον άξονα  $x$  και  $-20\text{cm}$  έως  $+20\text{cm}$  στον άξονα  $y$ . Με βάση το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου, δεν ορίζεται διάστημα για μετατόπιση φάσης 90 μοιρών. Το μόνο διάστημα που είναι εντός ορίων με βάση το αυστηρότερο όριο είναι για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων 0 μοίρες και για  $y = 0$  και  $x$  μεταξύ  $-20\text{cm}$  και  $+10\text{cm}$ .

### 4.3 Μελέτη των ΗΜ πεδίων στη δυναμική φόρτιση

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετασθεί η λειτουργία του φορτιστή για δυναμική φόρτιση. Με τον όρο δυναμική φόρτιση ορίζεται η φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου εν κινήσει. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως, αναφορικά με την διάταξη που εξετάζεται, μια λωρίδα κυκλοφορίας θα αποτελείται από πολλά κυκλικά πρωτεύοντα, το ένα μετά το άλλο.

Τα κυκλικά πρωτεύοντα είναι τοποθετημένα στο κέντρο της λωρίδας, επομένως το όχημα θα λαμβάνει πλέον όλες τις πιθανές μετατοπίσεις από -60 μέχρι και 60 εκατοστά. Σαφώς, βέβαια, θα πρέπει να εξετασθούν και σημεία κίνησης πριν το όχημα εισέλθει στην περιοχή του φορτιστή (π.χ. με μετατόπιση -70cm), καθώς και σημεία κίνησης με το όχημα να έχει εξέλθει από την περιοχή του φορτιστή (π.χ. με μετατόπιση +70cm). Για τη συγκεκριμένη μελέτη το εύρος μετατοπίσεων ορίζεται από το σημείο -70cm, έως το σημείο, +70cm, με βήμα 10cm. Ενδεικτικά παρουσιάζονται 5 καταστάσεις λειτουργίας του φορτιστή, για μετατόπιση -70cm, -30cm, 0cm, +30cm, +70cm (Σχήμα 4.10).

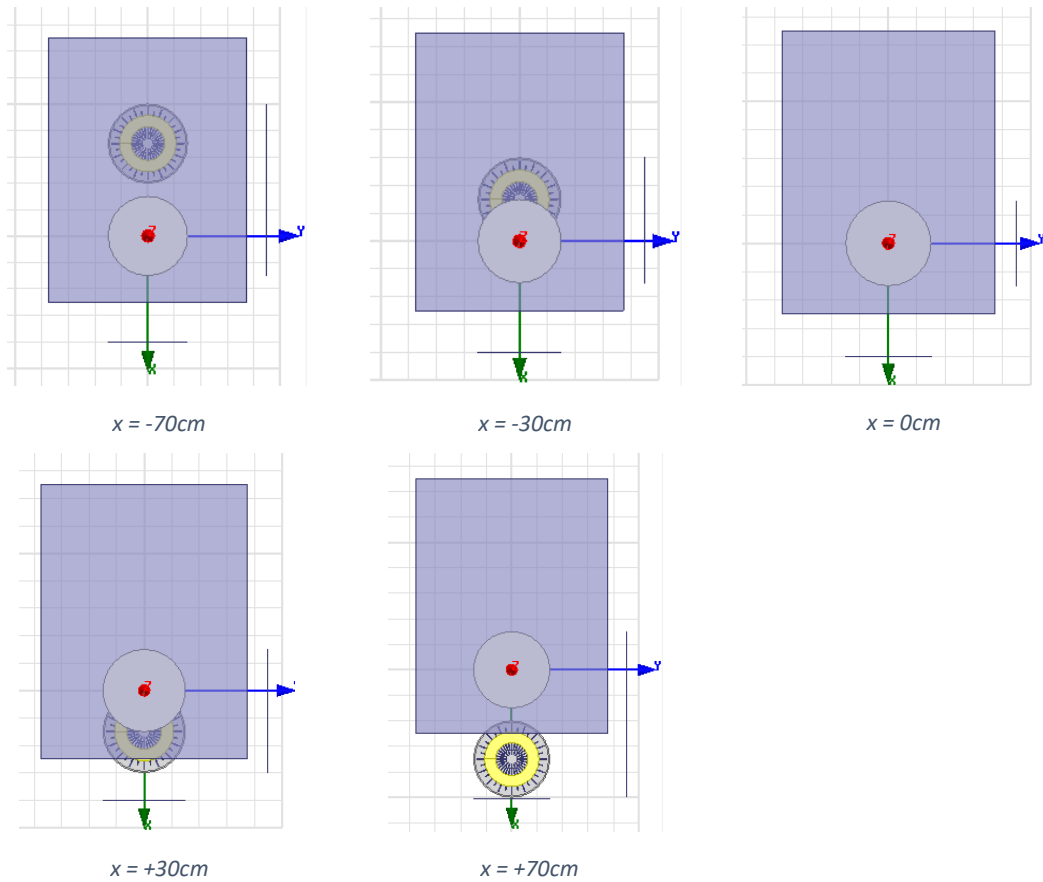


Σχήμα 4.9: Δυναμική φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Η επιφάνεια προς εξέταση θα είναι η πλαϊνή στο όχημα επιφάνεια, σε περίπτωση που βρίσκεται για παράδειγμα κάποιος άνθρωπος στο πεζοδρόμιο πλάι της λωρίδας. Επιφάνειες πίσω ή μπροστά από το όχημα δεν εξετάζονται, θεωρώντας ότι καθώς το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα δεν θα επιτρέπει τη διέλευση πεζών ακριβώς πίσω από αυτό.

Εξετάζονται και πάλι οι περιπτώσεις για μετατόπιση φάσης 0,90 & 180 μοίρες, με το συνδυασμό ρευμάτων I1 & I2 σε κάθε περίπτωση να υπολογίζεται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες.

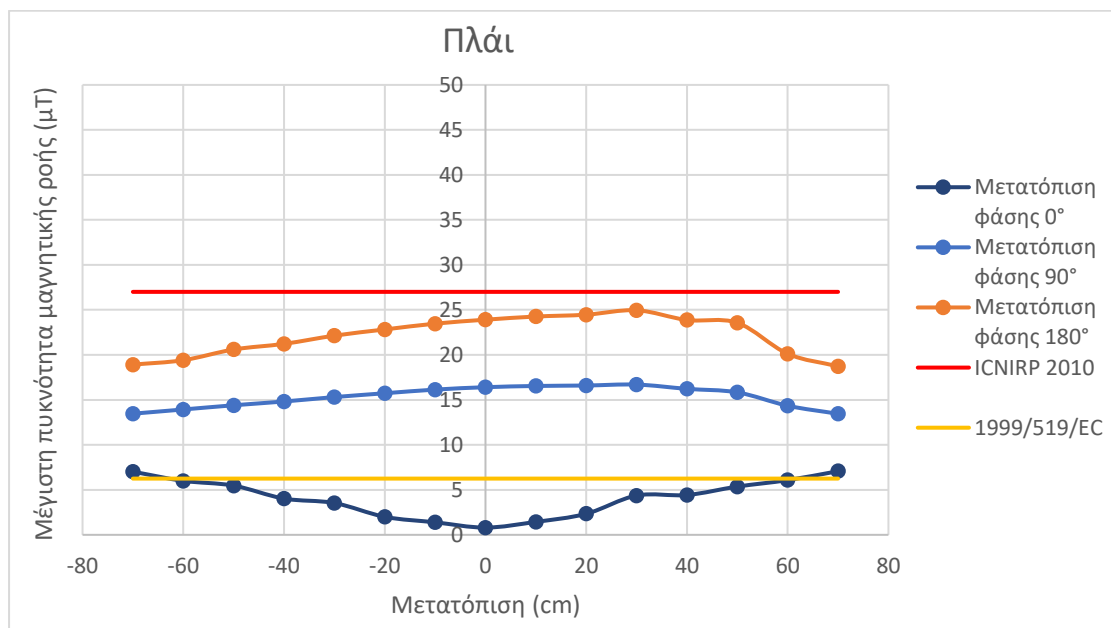




Σχήμα 4.10: Μετατόπιση πρωτεύοντος στον άξονα x

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται στην πλαινή επιφάνεια για τις διάφορες μετατοπίσεις ως προς τον άξονα x και για τα 3 ρεύματα λειτουργείας φαίνεται στο Σχήμα 4.11.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

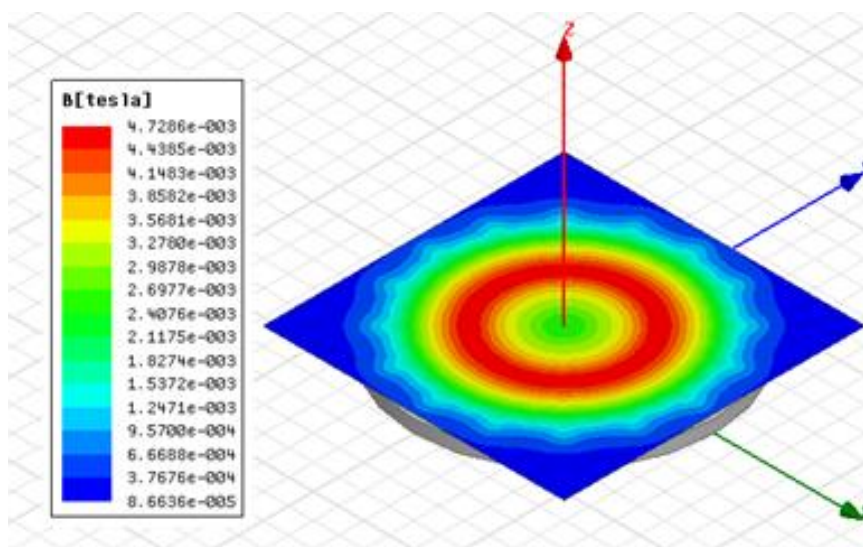


Σχήμα 4.11: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο πλάι κατά την δυναμική φόρτιση

Παρατηρείται πως ο φορτιστής δύναται να λειτουργήσει ικανοποιητικά όσον αφορά στα αναπτυσσόμενα ΗΜ πεδία σε περίπτωση που θεωρηθούν ως επιβαλλόμενα τα όρια που θέτει η ICNIRP. Σε περίπτωση, ωστόσο, που επιβάλλονται τα όρια που προτείνονται από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, τότε η μόνη αποδεκτή περίπτωση φαίνεται να είναι για μικρές μετατοπίσεις φάσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Πιο συγκεκριμένα για μία μηδενική μετατόπιση φάσης τα ΗΜ πεδία είναι εντός ορίων για μετατοπίσεις -60cm έως +60cm.

Καθώς, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2, μία τυπική μετατόπιση φάσης για τη λειτουργία ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι ίση με 90 μοίρες, είναι σαφές ότι θα πρέπει να ληφθούν μέτρα σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η συμμόρφωση με την οδηγία του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου που θέτει ιδιαίτερα αυστηρά όρια για το μαγνητικό πεδίο. Τέτοια μέτρα θα μπορούσαν να είναι η θωράκιση με αλουμίνιο του συζεύκτη που θα αναλυθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 6 .

Κλείνοντας, πρέπει να επισημανθεί πως η συνεχής λειτουργία του πρωτεύοντος δημιουργεί στο χώρο ένα μεγάλο ΗΜ πεδίο ακριβώς πάνω από αυτό. Όπως προέκυψε από την ενότητα 3.4, το ελάχιστο ασφαλές όριο πάνω από το πρωτεύον βρίσκεται σε απόσταση 70cm σύμφωνα με το όριο της ICNIRP και 100cm με βάση το ευρωπαϊκό συμβούλιο, ενώ για την ελάχιστη ασφαλή απόσταση στο πλάι, αυτή ορίζεται στα 30cm και 70cm αντίστοιχα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως σε απόσταση 1cm πάνω από τον φορτιστή η πυκνότητα μαγνητικής ροής έχει την τιμή 4728,6mT, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.12. Είναι επομένως σαφές πως πρέπει το πρωτεύον να απενεργοποιείται όταν δεν βρίσκεται σε σύζευξη με το δευτερεύον, διαφορετικά η διέλευση πεζών καθίσταται επικίνδυνη. Εναλλακτικά το πρωτεύον θα πρέπει να τοποθετείται σε σημεία του δρόμου που δεν επιτρέπουν τη διέλευση πεζών.



Σχήμα 4.12: Επιφάνεια 1cm πάνω από το πρωτεύον

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Επίδραση του μεγέθους της διάταξης στα ΗΜ πεδία

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της διάταξης στο παραγόμενο ΗΜ πεδίο. Θα εξεταστούν δύο διατάξεις, μια με μικρότερο δευτερεύον και μια με μικρότερο πρωτεύον και δευτερεύον. Για την ανάλυση της λειτουργίας αρχικά θα εξεταστεί για κάθε μια η εξάρτηση του πεδίου από την μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Στη συνέχεια θα ελεγχθούν τα πιθανά σημεία τοποθέτησης του δευτερεύοντος στο όχημα και τέλος θα προσομοιωθεί η λειτουργία του φορτιστή σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

### 5.2 Διάταξη με μικρότερο δευτερεύον

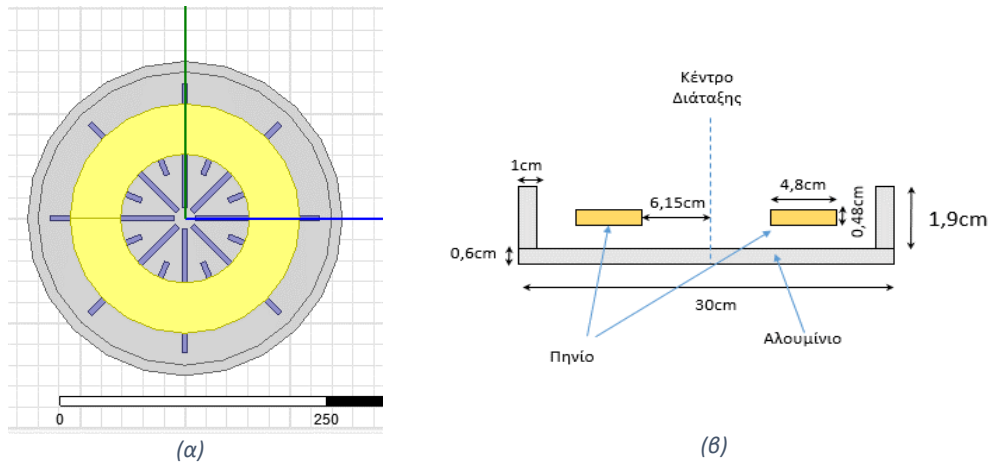
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται, ένας συζεύκτης όπου το πρωτεύον έχει τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και στην διάταξη που κατασκευάζεται στο Κεφάλαιο 2. Το δευτερεύον θα τροποποιηθεί κατάλληλα ούτως ώστε να έχει μικρότερες διαστάσεις και να επιτυγχάνεται ικανοποιητική μεταφορά ισχύος. Οι βασικές διαφορές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Η κατασκευή του δευτερεύοντος πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στην αναφορά [14]. Το μήκος του διακένου μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα οριστεί στα 10cm από 15cm, ενώ το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τα ελίζματα θα παραμείνει 25A. Για την κατασκευή του δευτερεύοντος θεωρείται και πάλι καλώδιο Litz διαμέτρου 0,48cm. Η κάτοψη και η τομή του δευτερεύοντος φαίνονται στο Σχήμα 5.1.

		Πρωτεύον	Δευτερεύον
Διάμετρος		60cm	30cm
Μικρές ράβδοι φερρίτη	Ποσότητα	16 ράβδοι	8 ράβδοι
	Διαστάσεις	17,7cm X 0,5cm X 0,5cm	5,9cm X 0,5cm X 0,5cm
	Απόσταση από το κέντρο	7cm	4,5cm
Μεγάλες ράβδοι φερρίτη	Ποσότητα	16 ράβδοι	8 ράβδοι
	Διαστάσεις	23,6cm X 0,5cm X 0,5cm	11,8cm X 0,5cm X 0,5cm
	Απόσταση από το κέντρο	4cm	1cm

Πίνακας 5.1: Κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

Η συγκεκριμένη διάταξη για ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίσο με 25A και συχνότητα λειτουργίας 85kHz, εμφανίζει αυτεπαγωγή πρωτεύοντος  $L1 = 254,12\mu\text{H}$ , αυτεπαγωγή δευτερεύοντος  $L2 = 32,904\mu\text{H}$  και αμοιβαία επαγωγή  $M = -14,562\mu\text{H}$ , όπως

προκύπτει από την ανάλυση του λογισμικού Maxwell. Σύμφωνα με τη σχέση της ενότητας 2.10, προκύπτει πως ο συγκεκριμένος φορτιστής μπορεί να μεταφέρει ισχύ 2,15kW, ποσότητα η οποία με σωστή επιλογή μεθόδου αντιστάθμισης και τεχνικών ελέγχου πολλαπλασιάζεται με ένα μέγιστο συντελεστή ποιότητας 6 και δύναται να φτάσει τα 12,9kW.

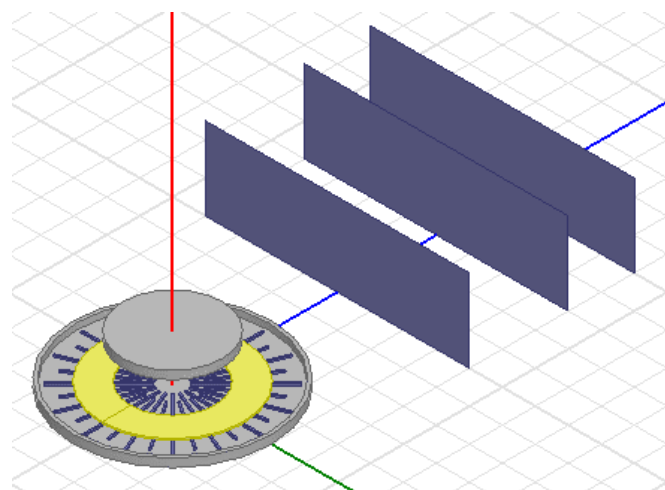


Σχήμα 5.1: (α) Κάτοψη και (β) τομή του δευτερεύοντος

### 5.2.1 Μετατόπιση φάσης μεταξύ ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

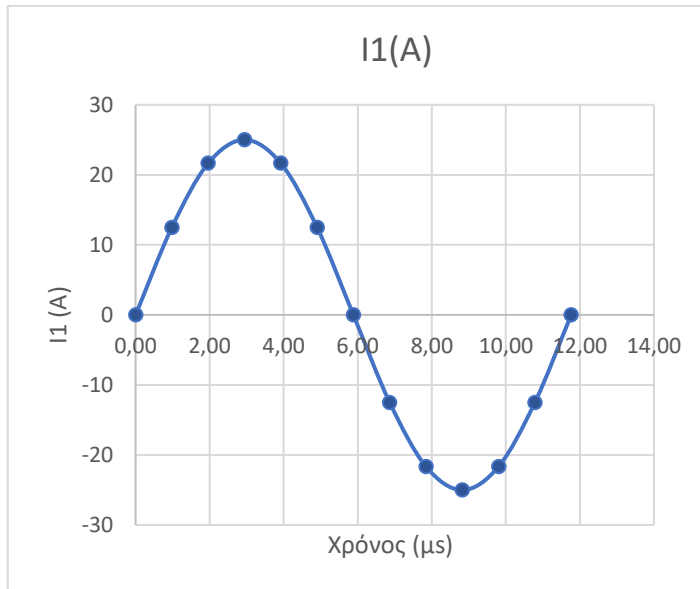
Για την μελέτη της επίδρασης της διαφοράς φάσης των ρευμάτων στην τιμή του μαγνητικού πεδίου, εφαρμόστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ρευμάτων για γωνίες 0°, 90° και 180°. Οι γωνίες επιλέχθηκαν με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 3.2.3, όπου στις 0° εμφανίζεται η καλύτερη δυνατή κατάσταση, οι 90° αποτελούν μια συνηθισμένη κατάσταση, ιδιαίτερα στη περίπτωση της στατικής φόρτισης, ενώ στις 180° το μαγνητικό πεδίο μεγιστοποιείται.

Οι επιφάνειες που μελετήθηκαν τοποθετήθηκαν σε απόσταση 20cm, 50cm και 70cm μακριά από το άκρο του πρωτεύοντος (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Διάταξη προς ανάλυση της μετατόπισης φάσης

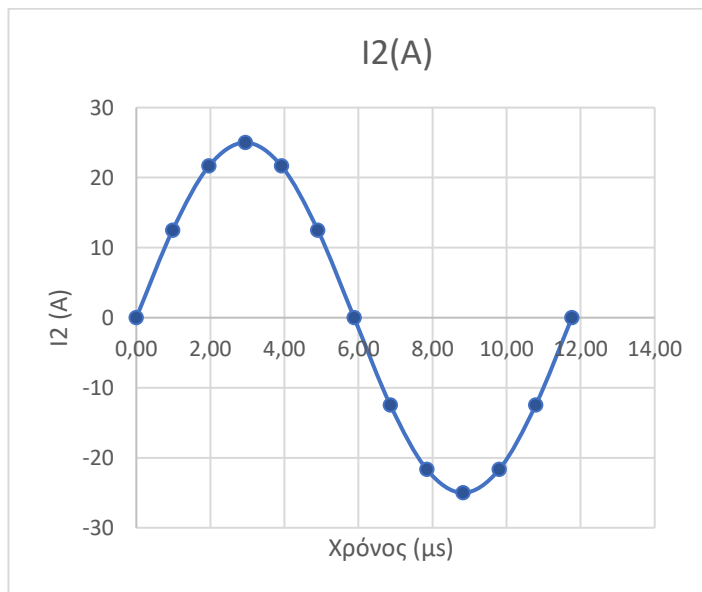
Για μετατόπιση φάσης 0 μοίρες, παρουσιάζονται στη συνέχεια οι τιμές των ρευμάτων, οι γραφικές παραστάσεις τους για διάρκεια μιας περιόδου και τέλος η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής που εντοπίζεται στην επιφάνεια των 20cm. Η μέγιστη τιμή των ρευμάτων είναι 25A και η συχνότητα ορίζεται 85kHz.



(α)

Χρόνος (μs)	I1 (A)
0,00	0
0,98	12,5
1,96	21,65
2,94	25
3,92	21,65
4,90	12,5
5,88	0
6,86	-12,5
7,84	-21,65
8,82	-25
9,80	-21,65
10,78	-12,5
11,76	0

(α)



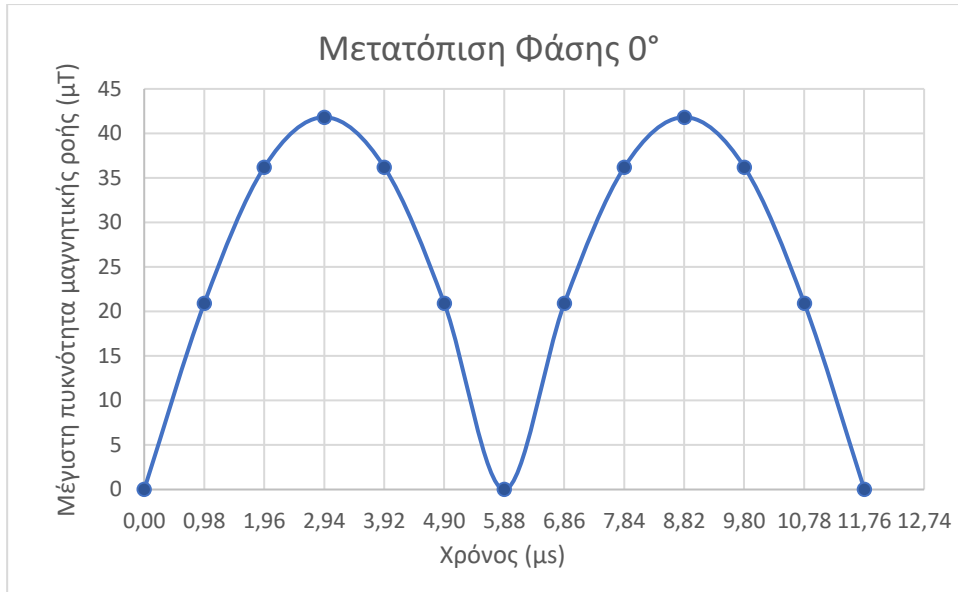
(β)

Χρόνος (μs)	I1 (A)
0,00	0
0,98	12,5
1,96	21,65
2,94	25
3,92	21,65
4,90	12,5
5,88	0
6,86	-12,5
7,84	-21,65
8,82	-25
9,80	-21,65
10,78	-12,5
11,76	0

(β)

Σχήμα 5.3: Γραφική παράσταση ρεύματος (α) πρωτεύοντος και (β) δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 0°

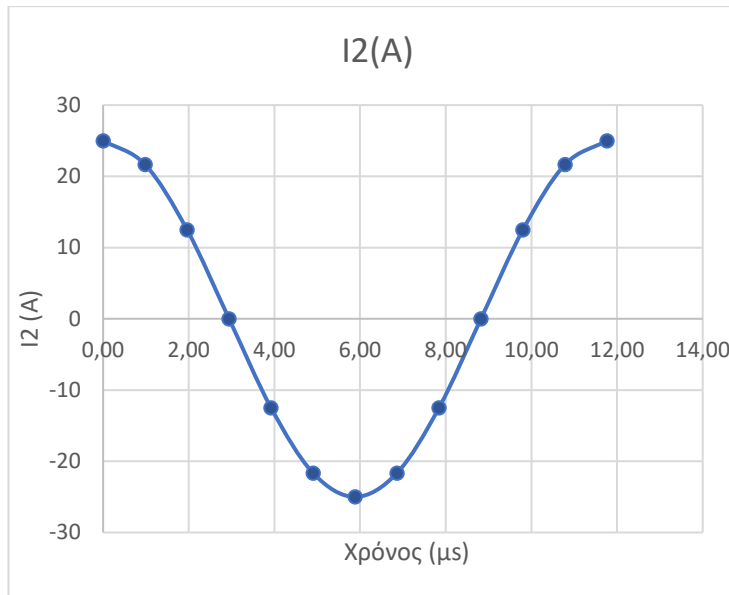
Πίνακας 5.2: Τιμές ρεύματος (α) πρωτεύοντος και (β) δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 0°



Σχήμα 5.4: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 0°

Με βάση τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής εντοπίζεται τις χρονικές στιγμές 2,94μs και 8,85μs, μισή περίοδο αργότερα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ημιτονοειδούς μορφής των ρευμάτων. Επομένως ο συνδυασμός ρευμάτων που δημιουργεί το μέγιστο μαγνητικό πεδίο για μετατόπιση φάσης 0 μοίρες είναι ο  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ . Οι αναλυτικές τιμές της πυκνότητας μαγνητικής ροής παρατίθενται στο Παράρτημα.

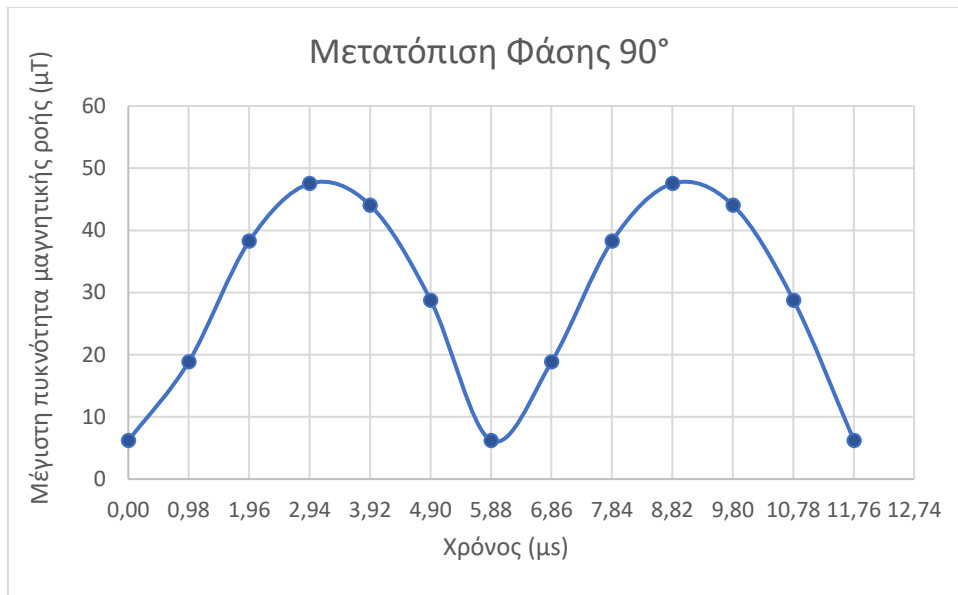
Στη συνέχεια θα μελετηθεί η περίπτωση για μετατόπιση φάσης 90 μοίρες. Το ρεύμα πρωτεύοντος παραμένει το ίδιο ενώ το ρεύμα δευτερεύοντος μετατοπίζεται κατά 90 μοίρες.



Σχήμα 5.5: Γραφική παράσταση ρεύματος δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 90°

Χρόνος (μs)	I2 (A)
0,00	25
0,98	21,65
1,96	12,5
2,94	0
3,92	-12,5
4,90	-21,65
5,88	-25
6,86	-21,65
7,84	-12,5
8,82	0
9,80	12,5
10,78	21,65
11,76	25

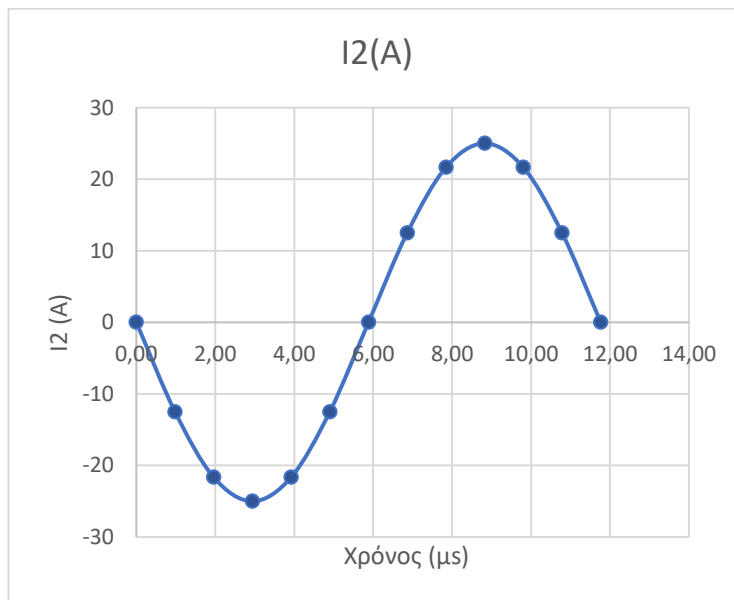
Πίνακας 5.3: Τιμές ρεύματος δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 90°



Σχήμα 5.6: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 90°

Στην περίπτωση μετατόπισης φάσης 90 μοιρών, η οποία συναντάται συχνά στην στατική φόρτιση, παρατηρείται πως το μέγιστο της μαγνητικής ροής εντοπίζεται τις χρονικές στιγμές 2,94μs και 8,82μs, όπου τα ρεύματα είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 0$  και τα αντίστοιχα αρνητικά.

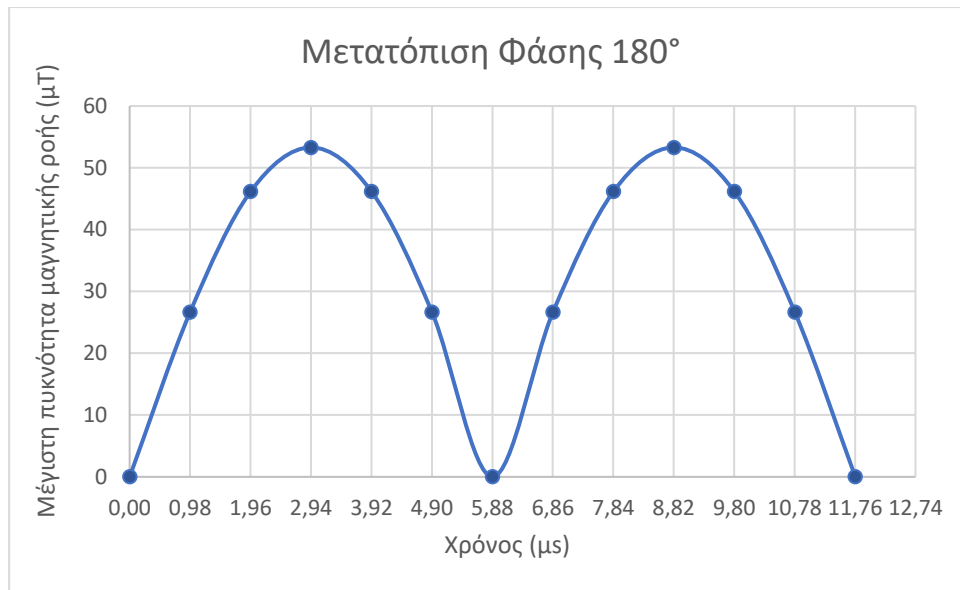
Για την περίπτωση μετατόπισης φάσης 180 μοιρών, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7 η συνάρτηση του ρεύματος δευτερεύοντος και στο Σχήμα 5.8 η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Και σε αυτή τη περίπτωση, το ρεύμα πρωτεύοντος παραμένει το ίδιο, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.3.



Χρόνος (μs)	I2 (A)
0,00	0
0,98	-12,5
1,96	-21,65
2,94	-25
3,92	-21,65
4,90	-12,5
5,88	0
6,86	12,5
7,84	21,65
8,82	25
9,80	21,65
10,78	12,5
11,76	0

Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση ρεύματος δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 180°

Πίνακας 5.4: Τιμές ρεύματος δευτερεύοντος με μετατόπιση φάσης 180°



Σχήμα 5.8: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 180°

Παρατηρείται πως και στην περίπτωση μετατόπισης φάσης 180 μοιρών, το μέγιστο εντοπίζεται τις χρονικές στιγμές 2,94μs και 8,82μs, όπου τα ρεύματα είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = -25A$  και τα αντίστοιχα με αντίθετα πρόσημα.

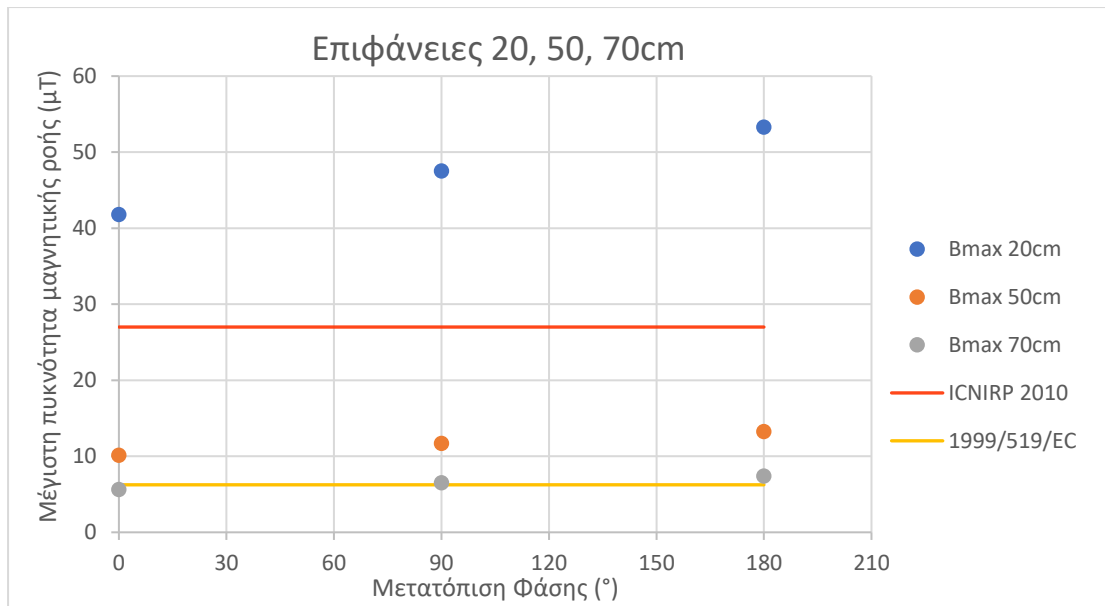
Λαμβάνοντας υπόψιν την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ο Πίνακας 5.5 που απεικονίζει το συνδυασμό ρευμάτων που δίνει το μέγιστο της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 0, 90 & 180 μοίρες.

Μετατόπιση Φάσης (°)	$I_1(A)$	$I_2(A)$	Μέγιστη Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής (μΤ)
0	25	25	41,811
90	25	0	47,522
180	25	-25	53,294

Πίνακας 5.5: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής για μετατόπιση φάσης 0, 90 & 180 μοιρών

Στη συνέχεια αυτής της ενότητας εξετάζεται η μέγιστη πυκνότητας μαγνητικής ροής που προκύπτει για μετατόπιση φάσης 0°, 90° και 180° στις επιφάνειες 20cm, 50cm και 70cm από το άκρο του φορτιστή (Σχήμα 5.9). Η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής για κάθε μετατόπιση φάσης προκύπτει από το συνδυασμό των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του Πίνακα 5.5.

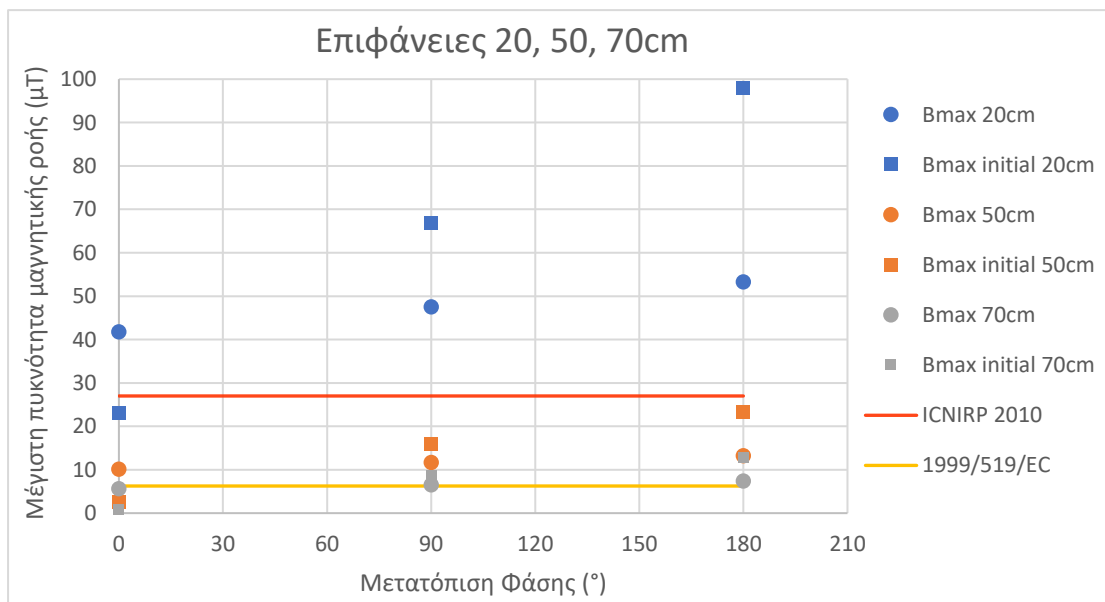




Σχήμα 5.9: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm

Μια πρώτη παρατήρηση είναι πως σε απόσταση 20cm το πεδίο είναι εκτός ορίων, τόσο σύμφωνα με τις οδηγίες της ICNIRP όσο και με τις προτάσεις του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου. Δεδομένου ότι το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο θέτει ιδιαίτερα αυστηρά όρια, αυτά ξεπερνούνται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Εντός ορίων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.9, αναμένονται να είναι τα όρια σε σημεία απόστασης μεγαλύτερης των 70cm από το φορτιστή. Βέβαια, σύμφωνα με τα όρια που θέτει η ICNIRP είναι δυνατόν να βρισκόμαστε εντός ορίων ακόμα και για αποστάσεις ίσες με 50cm.

Η σύγκριση με την προηγούμενη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση μεγίστων πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm

Από την παραπάνω σύγκριση, συμπεραίνει κανείς πως το πεδίο που δημιουργείται από την νέα διάταξη είναι μειωμένο, ωστόσο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα ικανοποιητική μείωση των ΗΜ πεδίων ώστε να ικανοποιούνται τα επιθυμητά όρια. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η μόνη περίπτωση όπου ικανοποιούνται τα επιθυμητά όρια όσον αφορά την οδηγία 1999/519/EC του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, είναι για μετατόπιση φάσης 0 και 90 μοίρες και μόνο για αποστάσεις ιδιαίτερα μακριά από το φορτιστή. Σχετικά με τα όρια που τίθενται από την οδηγία ICNIRP 2010, η λειτουργία και των δύο φορτιστών επιτυγχάνεται με ασφάλεια σε απόσταση 50cm για οποιαδήποτε μετατόπιση φάσης ρευμάτων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως στην επιφάνεια των 20cm για μηδενική μετατόπιση φάσης, το πεδίο που εντοπίζεται στην περίπτωση του αρχικού φορτιστή είναι εντός των ορίων της ICNIRP, σε αντίθεση με τον φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον.

## 5.2.2 Τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο κέντρο του οχήματος

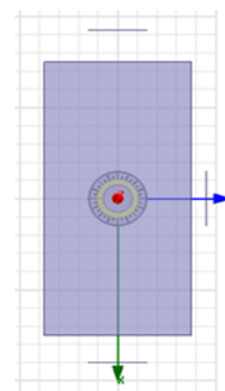
Στην ενότητα αυτή θα εξετασθεί το ΗΜ πεδίο στο εξωτερικό του οχήματος, θεωρώντας την τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο κέντρο του σασί. Εξετάστηκαν επίσης οι θέσεις του δευτερεύοντος στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του οχήματος, οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Με ορισμένες τις διαστάσεις του σασί 3x1,5m, το δευτερεύον του φορτιστή θα ισαπέχει από το μπροστινό και πίσω άκρο του σασί 135cm και από το αντίστοιχο στο πλάι 60cm. Οι επιφάνειες που θα εξεταστούν θα τοποθετηθούν γύρω από το όχημα και θα είναι μια μπροστά, 35cm μακριά από το σασί, μια πίσω, 30cm από το σασί και μια στο πλάι, 15cm από το άκρο. Και σε αυτή την περίπτωση θα εξετασθεί μετατόπιση φάσης 0,90 & 180 μοίρες, με τις τιμές των ρευμάτων να εξετάζονται για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5.

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η κάτοψη του οχήματος με τον φορτιστή τοποθετημένο στο κέντρο και στον Πίνακα 5.7 απεικονίζονται οι τιμές της πυκνότητας μαγνητικής ροής.

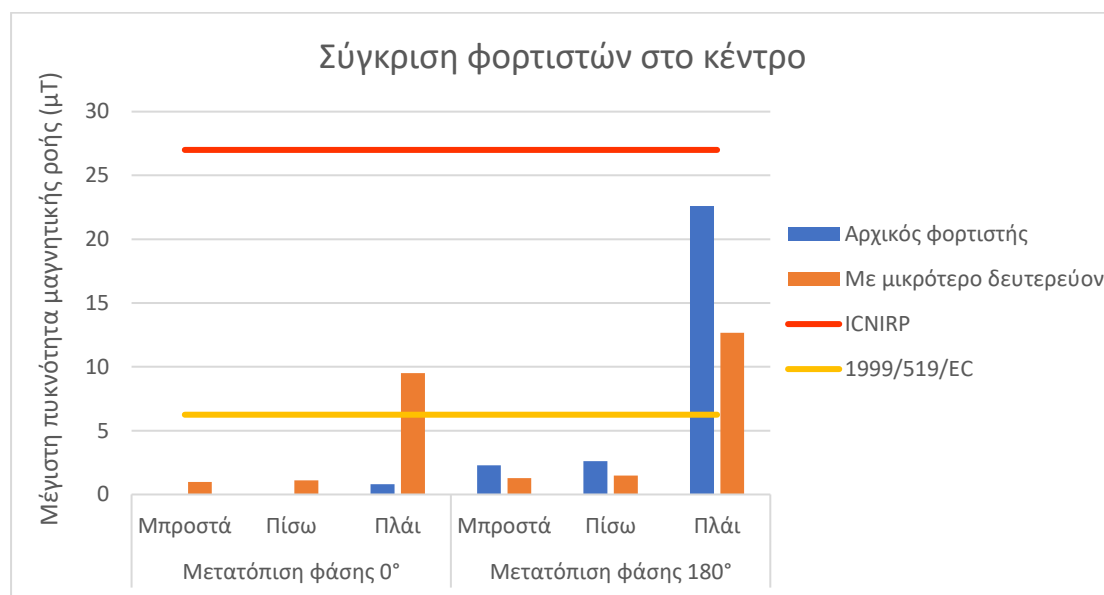
	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
Θέση φορτιστή στο κέντρο	Εξωτερικό		
Μετατόπιση φάσης (°)	Μπροστά	Πίσω	Πλάι
0	0,969	1,117	9,506
90	1,132	1,299	11,073
180	1,291	1,481	12,678

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με το φορτιστή στο κέντρο



Σχήμα 5.11: Κάτοψη αυτοκινήτου με το φορτιστή στο κέντρο

Η σύγκριση της λειτουργίας των δύο φορτιστών όντας τοποθετημένοι στο κέντρο της διάταξης για ρεύματα λειτουργίας με μετατόπιση φάσης 0 και 180 μοίρες φαίνεται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση αρχικού φορτιστή και φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον εξετάζοντας μετατόπιση φάσης 0 και 180 μοίρες

Αυτό που παρατηρείται είναι πως ο μεγαλύτερος φορτιστής παρουσιάζει μειωμένο πεδίο για μικρές μετατοπίσεις φάσης μεταξύ των ρευμάτων, σε αντίθεση με τις μεγάλες μετατοπίσεις φάσης, όπου ο φορτιστής με μικρότερο δευτερεύον δημιουργεί μικρότερο ΗΜ πεδίο.

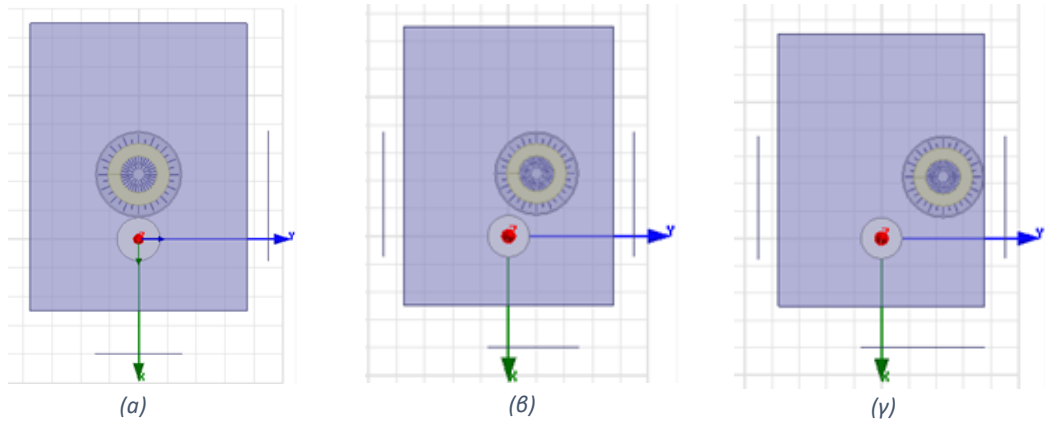
Αναφορικά με τα όρια λειτουργίας, και οι δύο φορτιστές ικανοποιούν το όριο της ICNIRP, ενώ το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου στην περίπτωση του φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον δεν γίνεται να εφαρμοστεί, εξαιτίας του πεδίου που αναπτύσσεται στο πλάι.

### 5.2.3 Λειτουργία φορτιστή σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης

Στην ενότητα αυτή θα εξετασθούν οριζόντιες μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Όπως έχει φανεί και από τα προηγούμενα κεφάλαια, η λειτουργία του φορτιστή με το πρωτεύον μετατοπισμένο σε σχέση με το δευτερεύον, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερης τιμής από την κατάσταση όπου τα μέλη του συζεύκτη είναι ευθυγραμμισμένα.

Και σε αυτή την περίπτωση θα εξετασθεί μετατόπιση φάσης 0,90 & 180 μοίρες, με τις τιμές των ρευμάτων να εξετάζονται για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5 .

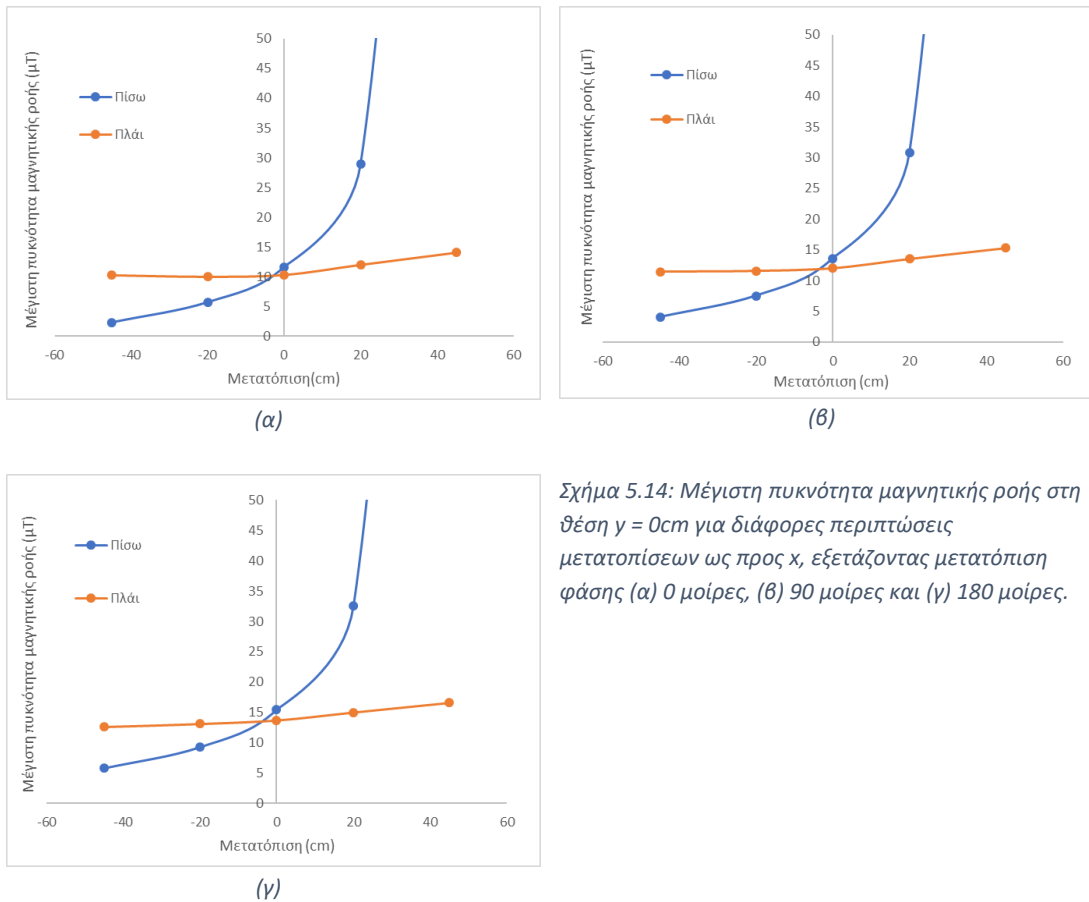
Ενδεικτικά, στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται κάποιες από τις πιθανές θέσεις του πρωτεύοντος σε κάτοψη.



Σχήμα 5.13: Κάτοψη με το πρωτεύον μετατοπισμένο κατά  $x = -45\text{cm}$  στους άξονες (α)  $y = 0\text{cm}$ , (β)  $y = 20\text{cm}$  και (γ)  $y = 45\text{cm}$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για όλες τις μετατοπίσεις. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, με βάση τα οποία κατασκευάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις βρίσκονται στο Παράρτημα.

Τα αποτελέσματα της μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής των περιπτώσεων με μετατόπισης φάσης 0, 90 και 180 μοίρες για μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα  $y$  φαίνονται στο Σχήμα 5.14.

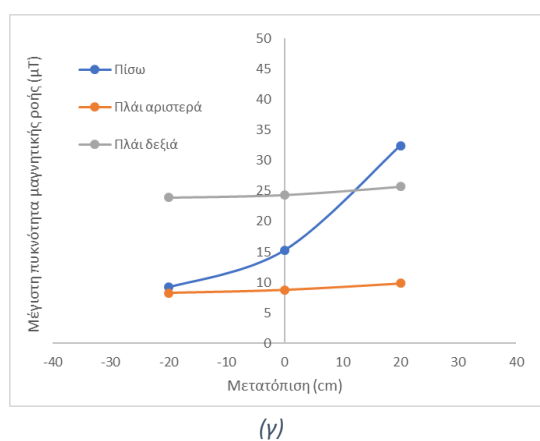
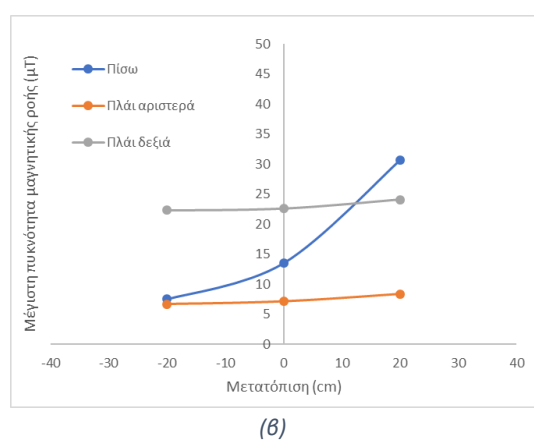
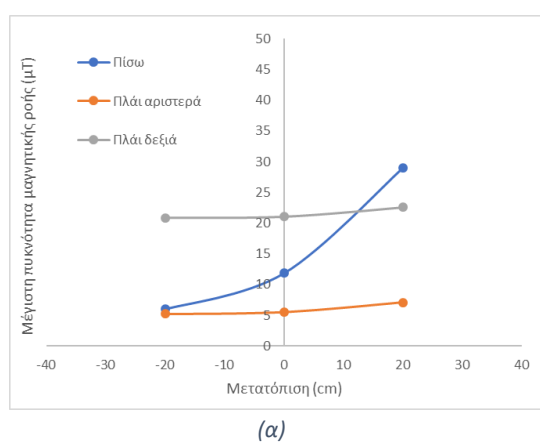


Σχήμα 5.14: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 0\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Παρατηρείται πως στην περίπτωση μηδενικής μετατόπισης ως προς τον άξονα  $y$  (Σχήμα 5.14), το πεδίο που εντοπίζεται στο πίσω μέρος γίνεται ιδιαίτερα υψηλό σε περίπτωση που το πρωτεύον πλησιάζει την άκρη του οχήματος. Παρόμοια αναμένεται η κατάσταση και σε περίπτωση που το δευτερεύον τοποθετηθεί στο μπροστινό μέρος του οχήματος. Καλύτερη αναμένεται βέβαια να είναι η κατάσταση σε περίπτωση τοποθέτησης του δευτερεύοντος στο κέντρο του οχήματος.

Το πεδίο στο πλάι του οχήματος βρίσκεται συνεχώς εντός των ορίων της ICNIRP, ωστόσο το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, ακόμα και για μηδενική μετατόπιση φάσης όπου το πεδίο έχει ελάχιστη τιμή, δεν επιτυγχάνεται.

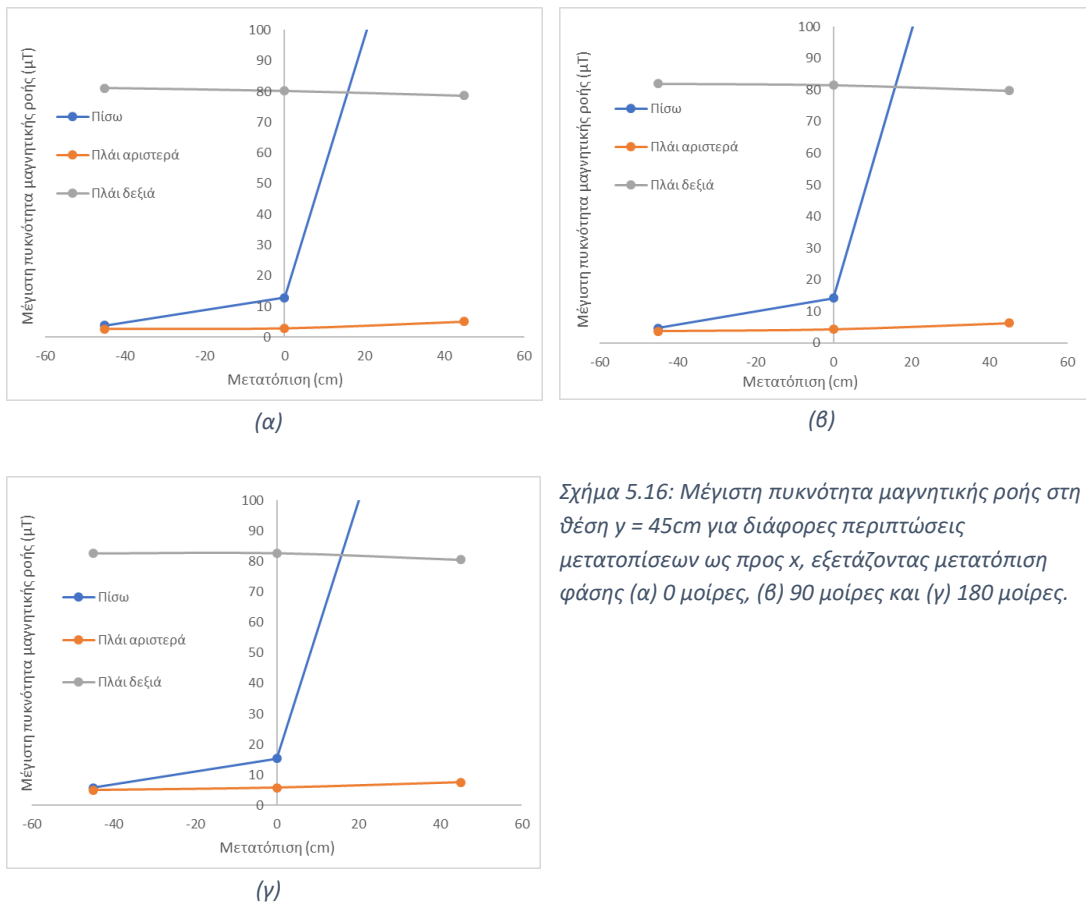
Στη συνέχεια, μετατοπίζοντας το πρωτεύον στη θέση  $y = 20\text{cm}$ , έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 20\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Το πεδίο που εντοπίζεται στο πίσω μέρος έχει παρόμοια κατανομή με την περίπτωση για μηδενική μετατόπιση και πιο συγκεκριμένα λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές καθώς το πρωτεύον κινείται προς την άκρη του οχήματος. Όσον αφορά το πεδίο στο πλάι, αυτό έχει αυξημένες τιμές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση αλλά βρίσκεται συνεχώς εντός των ορίων της ICNIRP για οποιαδήποτε μετατόπιση φάσης. Το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου και σε αυτή την περίπτωση δεν επιτυγχάνεται.

Μετατοπίζοντας το πρωτεύον στη θέση  $y = 45\text{cm}$ , τα αποτελέσματα είναι τα εξής (Σχήμα 5.16):



Σχήμα 5.16: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $y = 45\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Παρατηρείται πως στη θέση  $y = 45\text{cm}$  το πεδίο που αναπτύσσεται τόσο στο πλάι όσο και στο πίσω μέρος του οχήματος είναι ιδιαίτερα αυξημένο, ξεπερνώντας αρκετά τόσο το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου όσο και αυτό της ICNIRP .

Συμπερασματικά, τα όρια που τίθενται από την ICNIRP ικανοποιούνται όταν αποφεύγεται η λειτουργία με το πρωτεύον τοποθετημένο σε ακραίες θέσεις όπως είναι η  $y = 45\text{cm}$  ή όταν το πρωτεύον πλησιάζει τα όρια του αμαξώματος του οχήματος. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το όριο ικανοποιείται για όλες τις μετατοπίσεις φάσεις μεταξύ των ρευμάτων. Το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου παρατηρήθηκε πως δεν ικανοποιείται σε καμία κατάσταση, ακόμα και για μηδενική μετατόπιση φάσης, εξαιτίας κυρίως του πεδίου που δημιουργείται στο πλάι.

Αξίζει να σημειωθεί πως το πρωτεύον πρέπει να απενεργοποιείται κατά την μη σύζευξη με δευτερεύον, διότι το πεδίο που δημιουργείται 1cm από πάνω είναι της τάξης των 4728,6μΤ, σύμφωνα με την ενότητα 3.4.

Πριν την ολοκλήρωση της ενότητας θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση του φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον και του αρχικού φορτιστή.

Όσον αφορά την ανοχή σε μετατοπίσεις, για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων ίση με 90 μοίρες, όπως συχνά συναντάται στην στατική φόρτιση, παρατηρείται πως και οι δύο φορτιστές μπορούν να λειτουργήσουν με ασφάλεια σύμφωνα με την ICNIRP, υπό την προϋπόθεση ότι αποφεύγονται οι ακραίες θέσεις του πρωτεύοντος, όπου είτε η επικάλυψη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τείνει να μηδενιστεί, είτε το πρωτεύοντος πλησιάζει τα όρια του οχήματος. Το πεδίο που εντοπίζεται στον φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον, είναι σαφώς περιορισμένο, αλλά όχι τόσο ούτως ώστε να ικανοποιείται το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου, όπως συνέβαινε και στην προηγούμενη περίπτωση.

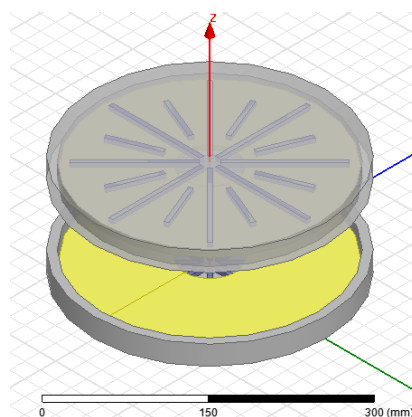
### 5.3 Διάταξη με μικρότερο πρωτεύον και δευτερεύον

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η λειτουργία ενός επαγωγικού κυκλικού συζεύκτη μικρότερων διαστάσεων, θα τοποθετηθεί στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο και θα εξεταστεί το πεδίο που αναπτύσσεται με το πρωτεύον μετατοπισμένο.

Η διάταξη που θα κατασκευαστεί στη συγκεκριμένη ενότητα εφαρμόζεται σε αυτοκίνητα μικρότερων διαστάσεων, τύπου micro ή mini ή και σε μεγαλύτερα οχήματα, με μικρότερη, ωστόσο, ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Το πρωτεύον στην περίπτωση αυτή επιλέγεται πανομοιότυπο με το δευτερεύον. Και πάλι η κατασκευή της διάταξης πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προδιαγραφές κυκλικών διατάξεων με ράβδους φερρίτη που ορίζονται στην αναφορά [14]. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας παραμένει 25A, η διάμετρος της διάταξης ορίζεται 30cm και το κατακόρυφο διάκενο 8cm. Ο αριθμός των ελιγμάτων του πηνίου σε πρωτεύον και δευτερεύον ορίζεται σε 22.

Έπειτα από μαγνητοστατική ανάλυση, υπολογίστηκε πως για συχνότητα λειτουργίας 85kHz, ο φορτιστής εμφανίζει αυτεπαγωγή πρωτεύοντος  $L1 = 97,305\mu\text{H}$ , αυτεπαγωγή δευτερεύοντος  $L2 = 97,304\mu\text{H}$  και αμοιβαία επαγωγή  $M = -21,287\mu\text{H}$ .

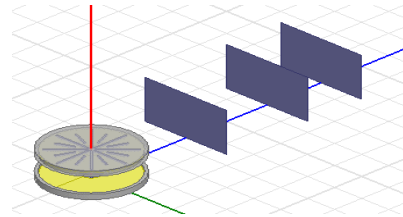
Σύμφωνα με την σχέση της ενότητας 2.10, προκύπτει πως ο συγκεκριμένος φορτιστής μπορεί να μεταφέρει μη αντισταθμισμένη ισχύ 1,55kVA. Με την κατάλληλη επιλογή μεθόδου αντιστάθμισης και τεχνικής ελέγχου η ισχύς αυτή μπορεί να πολλαπλασιαστεί με ένα μέγιστο συντελεστή ποιότητας  $Q = 6$  και δύναται να φτάσει τα 9,3kW.



Σχήμα 5.17: Κυκλικός συζεύκτης

### 5.3.1 Μετατόπιση φάσης μεταξύ ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

Η μελέτη της μετατόπισης φάσης θα γίνει για όλους τους συνδυασμούς ρευμάτων για γωνίες 0, 90 και 180 μοιρών. Οι επιφάνειες για τη μέτρηση των ΗΜ πεδίων θα τοποθετηθούν σε απόσταση 20cm, 50cm και 70cm μακριά από το φορτιστή (Σχήμα 5.18).

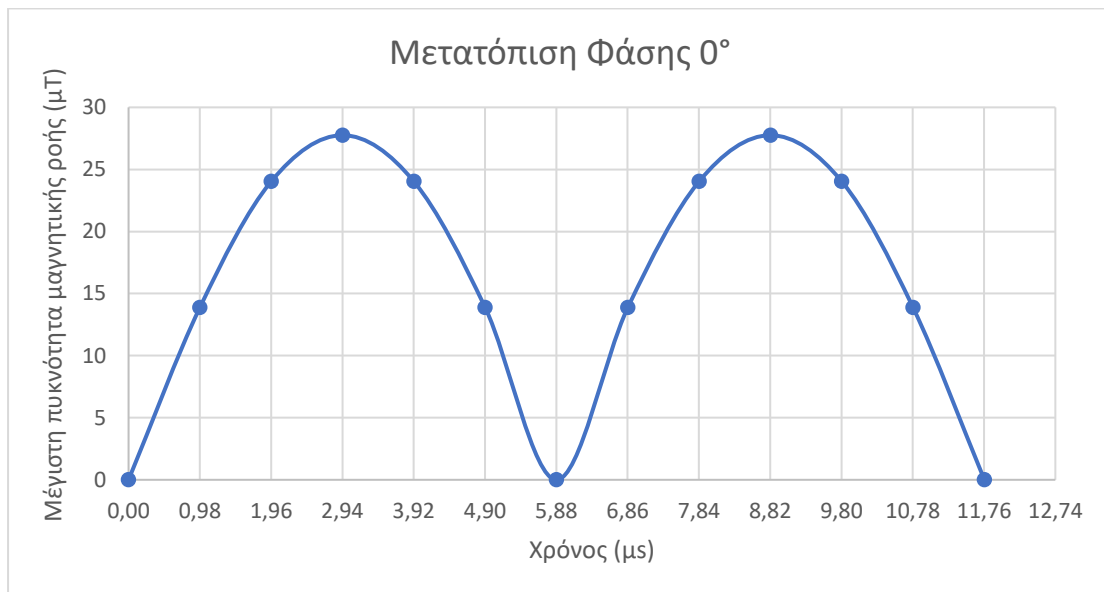


Σχήμα 5.18: Διάταξη προς ανάλυση της μετατόπισης φάσης

Για μετατόπιση φάσης 0 μοίρες τα ρεύματα θα είναι συμφασικά, για μετατόπιση φάσης 90 μοιρών το ρεύμα δευτερεύοντος θα προηγείται του ρεύματος πρωτεύοντος κατά 90 μοίρες και τέλος, για μετατόπιση φάσης 180 μοιρών, το ρεύμα του δευτερεύοντος θα προηγείται αντιστοίχως του ρεύματος πρωτεύοντος 180 μοίρες. Αναλυτικά οι γραφικές παραστάσεις και οι τιμές των ρευμάτων παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.2.1.

Στην συνέχεια θα απεικονιστεί η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται σε απόσταση 20cm για χρονική διάρκεια μιας περιόδου και για τις 3 μετατοπίσεις φάσης. Η συχνότητα λειτουργίας έχει οριστεί στα 85kHz.

Αρχικά, για μηδενική μετατόπιση φάσης έχουμε τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 5.19).

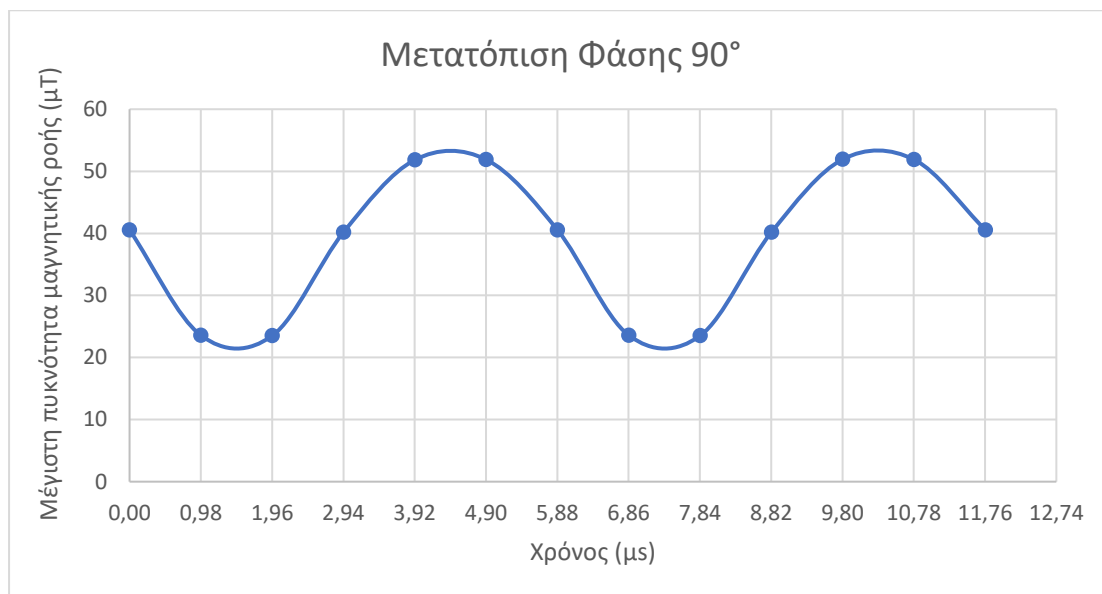


Σχήμα 5.19: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 0°

Παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής, 27,751μT, εμφανίζεται την χρονική στιγμή 2,94μs. Τα ρεύματα που ενεργούν τη δεδομένη χρονική στιγμή στον φορτιστή είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ . Οι αναλυτικές τιμές της πυκνότητας μαγνητικής ροής παρατίθενται στο Παράρτημα.



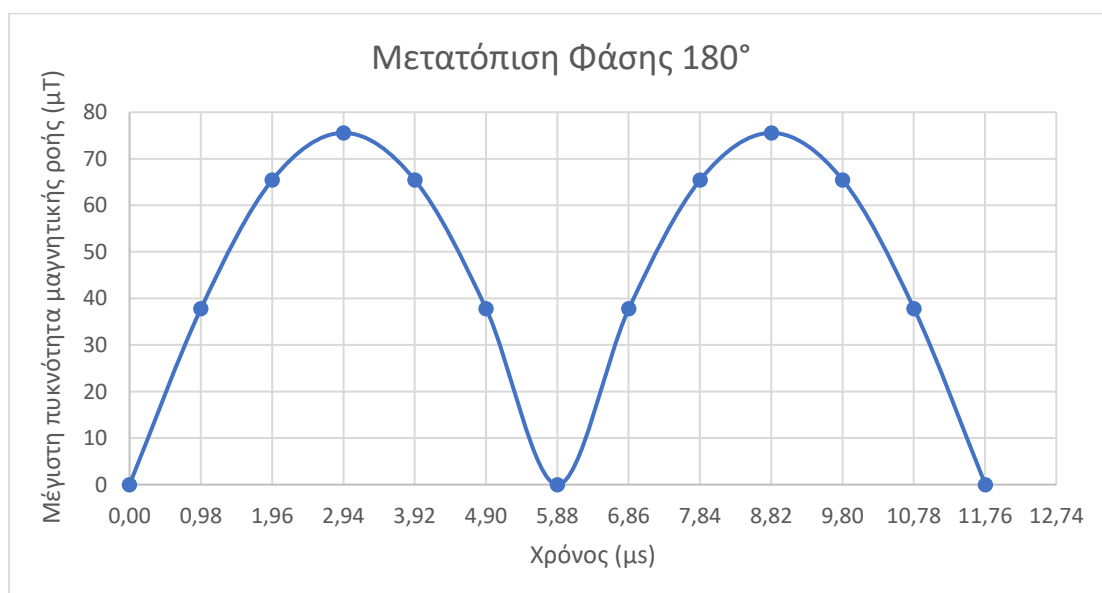
Για μετατόπιση φάσης 90 μοίρες, έχουμε (Σχήμα 5.20):



Σχήμα 5.20: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 90°

Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής λαμβάνει την τιμή 51,886μT την χρονική στιγμή 4,90μT. Την δεδομένη στιγμή, τα ρεύματα του φορτιστή έχουν την τιμή  $I_1 = 12,5A$  και  $I_2 = -21,65A$ . Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει πως η φορά τους είναι ομόρροπη, όπως προκύπτει από το Σχήμα 3.11 της ενότητας 3.3, όπου υποδεικνύεται η προκαθορισμένη φορά των ρευμάτων

Η περίπτωση της μετατόπισης φάσης 180 μοιρων εξετάζεται στο Σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε απόσταση 20cm για μετατόπιση φάσης 180°

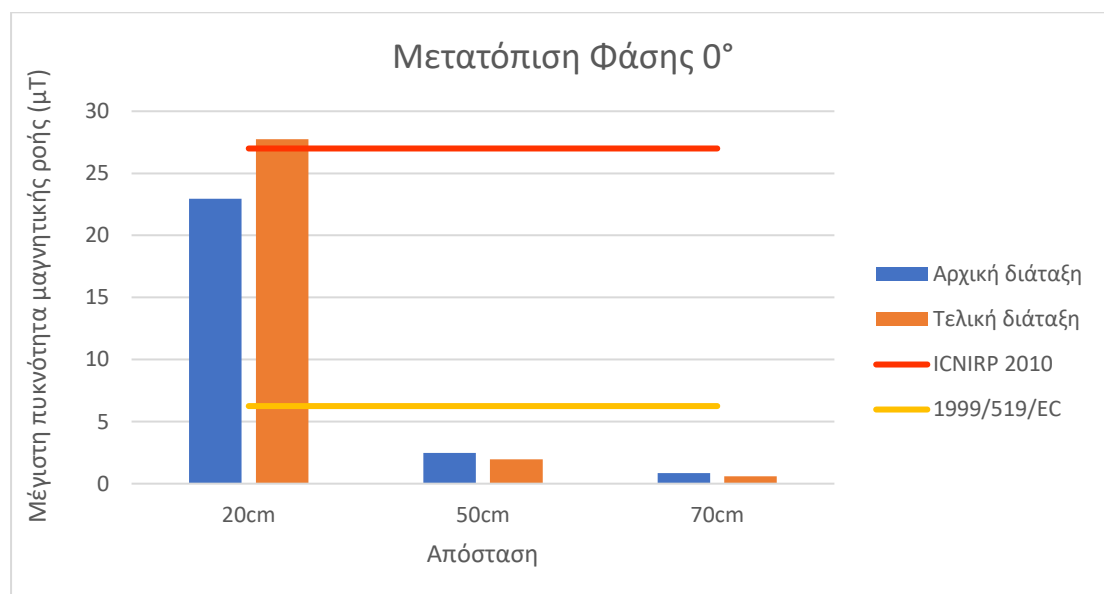
Στην περίπτωση μετατόπισης φάσης των ρευμάτων ίση με 180 μοίρες, η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής που εντοπίζεται στην επιφάνεια των 20cm ισούται με 75,552μΤ την χρονική στιγμή 2,94μs. Τα ρεύματα που διαρρέουν τον φορτιστή την συγκεκριμένη στιγμή ισούνται με  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = -25A$ .

Λαμβάνοντας υπόψιν την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ο Πίνακας 5.7 που απεικονίζει το συνδυασμό ρευμάτων που δίνει το μέγιστο της πυκνότητας μαγνητικής ροής για μετατόπιση φάσης 0, 90 & 180 μοίρες.

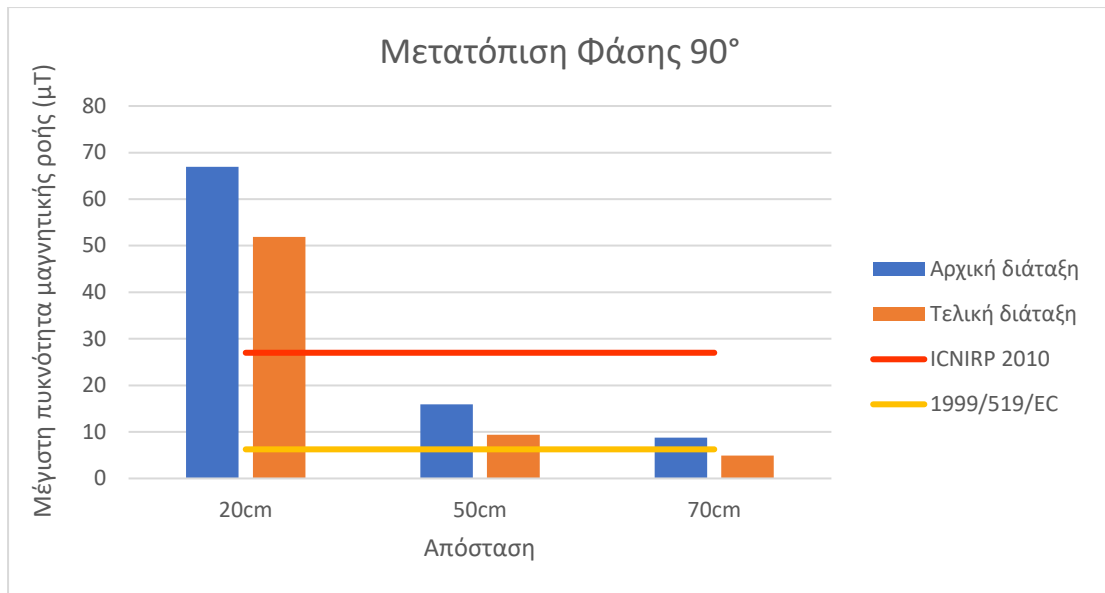
Μετατόπιση Φάσης (°)	$I_1(A)$	$I_2(A)$	Μέγιστη Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής (μΤ)
0	25	25	27,751
90	12,5	-21,65	51,886
180	25	-25	75,552

Πίνακας 5.7: Συνδυασμός ρευμάτων όπου παρουσιάζεται το μέγιστο της πυκνότητας μαγνητικής ροής για μετατόπιση φάσης 0, 90 & 180 μοίρες σε απόσταση 20cm

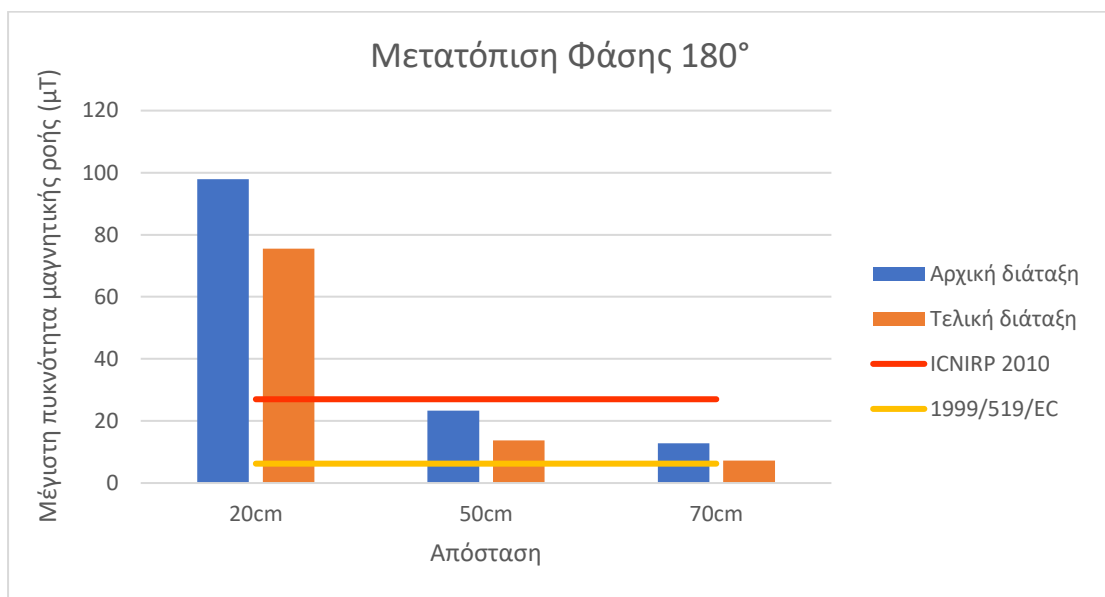
Με βάση την παραπάνω ανάλυση, τα μέγιστα των πυκνοτήτων μαγνητικής ροής και για τις 3 επιφάνειες παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα, όπου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της αρχικής διάταξης.



Σχήμα 5.22: Σύγκριση μεγίστων πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης 0°



Σχήμα 5.23: Σύγκριση μεγίστων πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης 90°



Σχήμα 5.24: Σύγκριση μεγίστων πυκνότητας μαγνητικής ροής σε απόσταση 20, 50, 70cm για μετατόπιση φάσης 180°

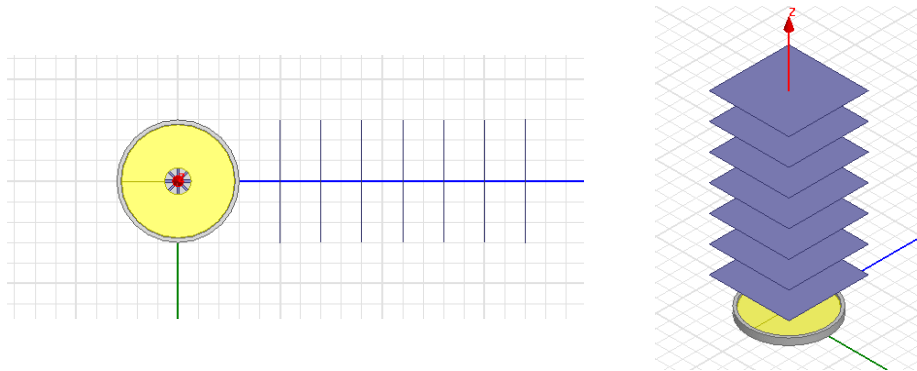
Συγκρίνοντας τις δύο διατάξεις παρατηρείται πως το πεδίο της αρχικής διάταξης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της μικρότερης διάταξης. Εξαιρέση αποτελεί η κατάσταση για μηδενική μετατόπιση φάσης και απόσταση αρκετά κοντά στον φορτιστή.

Αναφορικά με τα όρια λειτουργίας, στην τελική διάταξη, λόγω των μικρότερων διαστάσεων, το πεδίο είναι μειωμένο και βρίσκεται εντός ορίων σε απόσταση 50cm και 70cm με βάση το όριο της ICNIRP. Καλύτερη είναι η κατάσταση σχετικά και με τις συστάσεις του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου με το αντίστοιχο όριο να επαληθεύεται σε απόσταση 70cm και για μετατόπιση φάσης 0° και 90°.

### 5.3.2 Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος

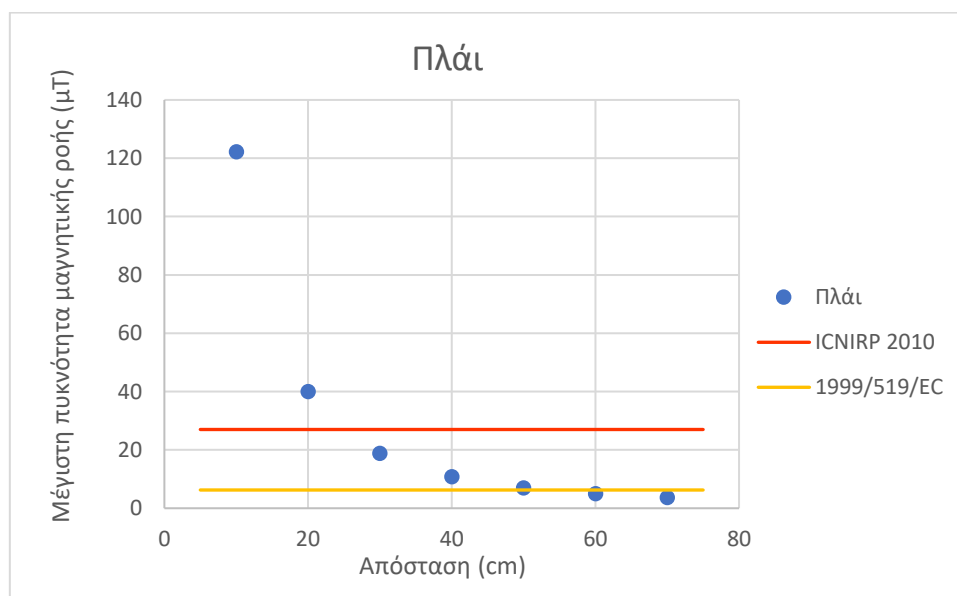
Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί το πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από το πρωτεύον, όταν δεν βρίσκεται σε σύζευξη και λειτουργεί με το μέγιστο ρεύμα 25A. Οι επιφάνειες που εξετάστηκαν τοποθετήθηκαν στο πλάι και πάνω από αυτό, σε απόσταση 10cm μεταξύ τους, με στόχο να προσδιοριστεί η ελάχιστη απόσταση όπου ικανοποιούνται τα δύο θεσπισμένα όρια.

Οι διατάξεις προς ανάλυση φαίνονται στο Σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.25: Διάταξη λειτουργίας μόνο πρωτεύοντος με επιφάνειες προς ανάλυση στο πλάι και από πάνω

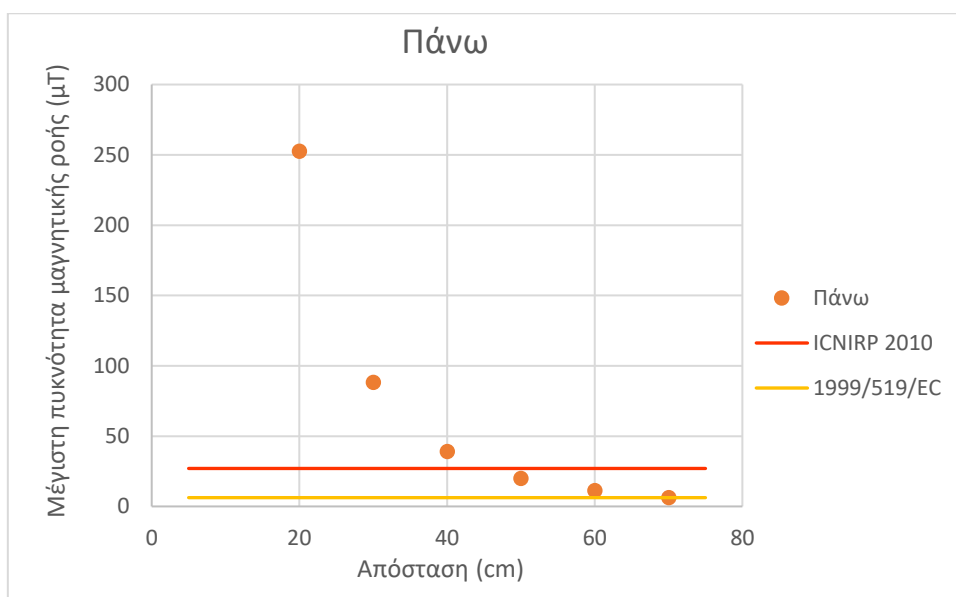
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις επιφάνειες στο πλάι φαίνονται στο Σχήμα 5.26.



Σχήμα 5.26: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής πλάι του πρωτεύοντος

Παρατηρείται πως η μέγιστη μαγνητική ροή βρίσκεται εντός των ορίων ασφαλείας της ICNIRP σε απόσταση 30cm και του ευρωπαϊκού συμβουλίου σε 60cm.

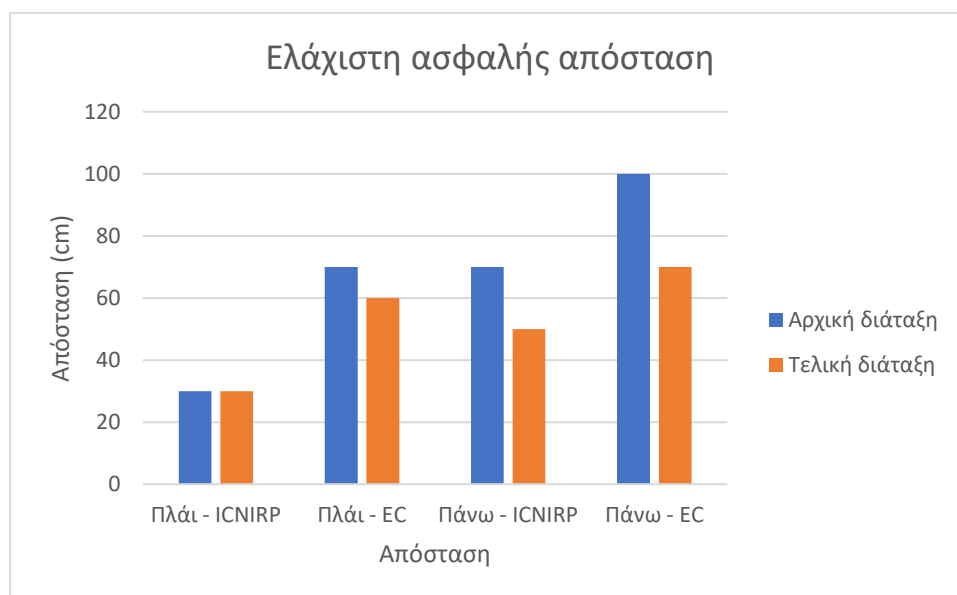
Τα αποτελέσματα του πεδίου πάνω από το πρωτεύον φαίνονται στο Σχήμα 5.27.



Σχήμα 5.27: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής πάνω από το πρωτεύον

Στην περίπτωση αυτή, η ασφαλής επιφάνεια πάνω από το πρωτεύον σύμφωνα με την ICNIRP βρίσκεται στα 50cm και με το ευρωπαϊκό συμβούλιο στα 70cm.

Συγκρίνοντας τις ελάχιστες ασφαλείς αποστάσεις από τα πρωτεύοντα της αρχικής και της τελικής διάταξης προκύπτει το Σχήμα 5.28



Σχήμα 5.28: Σύγκριση ελαχίστων ασφαλών αποστάσεων από το πρωτεύον

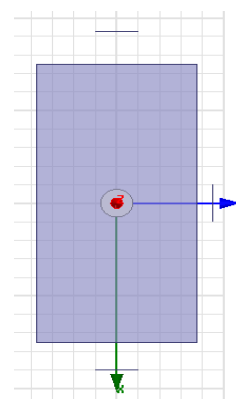
Είναι σαφές πως το πεδίο που δημιουργείται στο χώρο από το πρωτεύον της τελικής διάταξης έχει μικρότερη τιμή σε σχέση με το πεδίο της αρχικής διάταξης. Ιδιαίτερα μειωμένο εμφανίζεται στην επιφάνεια που βρίσκεται πάνω από αυτό.

### 5.3.3 Τοποθέτηση φορτιστή στο κέντρο του οχήματος

Στην ενότητα αυτή θα προσομοιωθεί η λειτουργία του φορτιστή με τον δευτερεύον τοποθετημένο στο κέντρο του σασί (Σχήμα 5.29). Ο φορτιστής θα ισαπέχει από το άκρο του σασί 1,2m, δεδομένου του γεγονότος ότι οι διαστάσεις του σασί ορίζονται ως 3x1,5m. Οι επιφάνειες προς εξέταση βρίσκονται στο μπροστά μέρος, στο πίσω και στο πλάι.

Όπως ορίστηκε στην ενότητα 5.3.1 και στον Πίνακα 5.7, τα ρεύματα που εφαρμόστηκαν ήταν  $I_1 = 25A$ ,  $I_2 = 25A$ , για την προσομοίωση της περίπτωσης με μετατόπιση φάσης  $0^\circ$ ,  $I_1 = 12,5A$ ,  $I_2 = -21,65A$  για τις  $90^\circ$  και  $I_1 = 25A$ ,  $I_2 = -25A$  για τις  $180^\circ$ . Τα αποτελέσματα των τριών καταστάσεων λειτουργίας φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
Θέση φορτιστή στο κέντρο	Εξωτερικό		
Μετατόπιση φάσης ( $^\circ$ )	Μπροστά	Πίσω	Πλάι
0	0,008	0,009	0,170
90	0,456	0,525	5,070
180	0,669	0,768	7,390



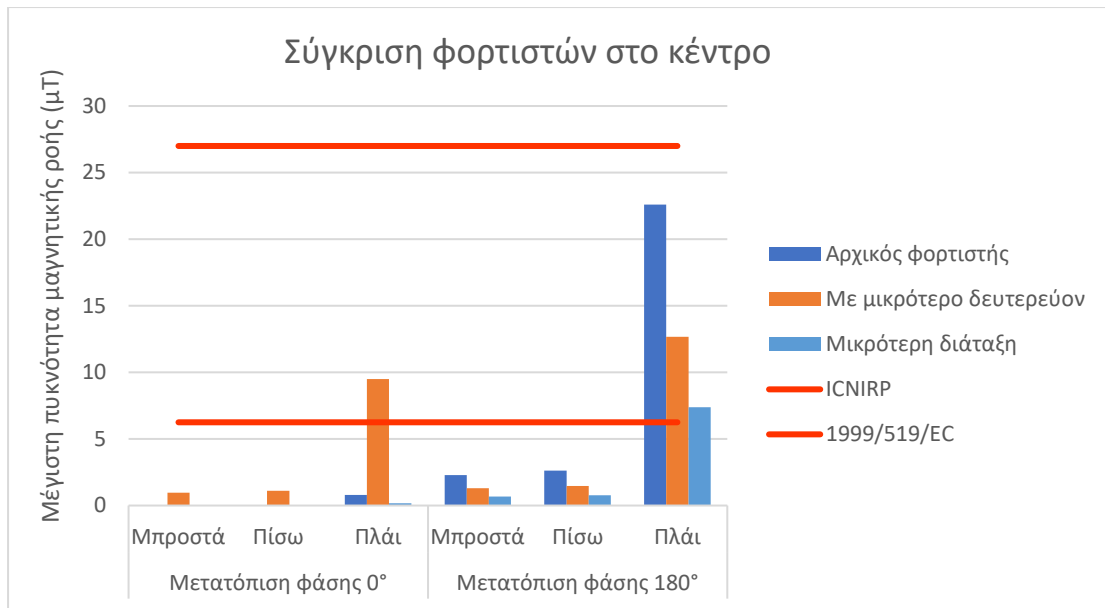
Σχήμα 5.29: Κάτοψη αυτοκινήτου με το φορτιστή στο κέντρο

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με το φορτιστή στο κέντρο

Παρατηρούμε πως το πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος λαμβάνει τιμές οι οποίες είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Το όριο του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση την περίπτωση για μετατόπιση φάσης  $180$  μοιρών στο πλάι του οχήματος, όπου παραβιάζεται για σχεδόν  $1\mu T$ . Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το όριο επαληθεύεται στην περίπτωση των ρευμάτων με μετατόπιση φάσης  $90$  μοίρες, μετατόπιση η οποία συναντάται συχνά στην στατική φόρτιση.

Το όριο της ICNIRP τηρείται σε κάθε περίπτωση, επιτρέποντας παράλληλα περιθώριο ανοχής, λόγω των χαμηλών τιμών του πεδίου.

Στο Σχήμα 5.30 παρουσιάζεται η σύγκριση του φορτιστή με τους προηγούμενους δύο, αναφορικά με την θέση τοποθέτησης στο κέντρο. Παρατηρείται ότι μία μείωση των διαστάσεων μόνο του δευτερεύοντος δεν επιτυγχάνει ικανοποιητική μείωση της μαγνητικής ροής. Πιο συγκεκριμένα ένα μικρότερο δευτερεύον ενδέχεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερη μαγνητική ροή σε περίπτωση που εξετάζονται μικρές μετατοπίσεις φάσεις μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Αντίθετα σε περίπτωση που μειώνονται τόσο οι διαστάσεις του δευτερεύοντος όσο και του πρωτεύοντος, σε κάθε κατάσταση λειτουργίας παρατηρείται στο χώρο το μικρότερο μαγνητικό πεδίο. Εμφανής είναι η διαφορά στην περίπτωση όπου αναπτύσσεται το μέγιστο δυνατό πεδίο, δηλαδή για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων  $180$  μοίρες, όπου η ποσοστιαία μείωση του πεδίου συγκριτικά με τον αρχικό φορτιστή είναι της τάξης του  $67\%$ .



Σχήμα 5.30: Σύγκριση των τριών φορτιστών εξετάζοντας μετατόπιση φάσης 0 και 180 μοίρες

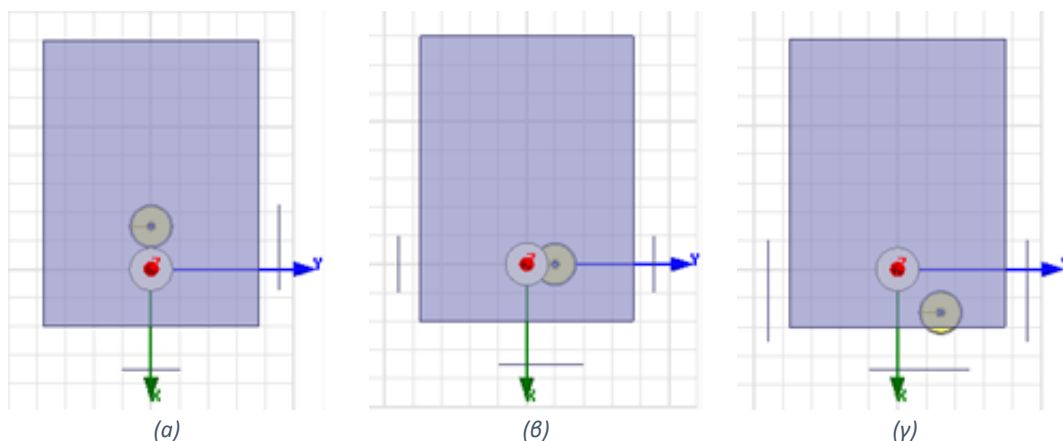
#### 5.3.4 Λειτουργία φορτιστή σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί το πεδίο που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του οχήματος σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης, καλύπτοντας όλες τις πιθανές θέσεις που μπορεί να βρεθεί το πρωτεύον σε σχέση με το δευτερεύον κατά την στατική και την δυναμική φόρτιση

Ο φορτιστής τοποθετείται ενδεικτικά στο πίσω μέρος στη θέση +25cm, δηλαδή το άκρο του φορτιστή θα απέχει 25cm από το τέλος του σασί και 55cm από το πίσω μέρος του αυτοκινήτου.

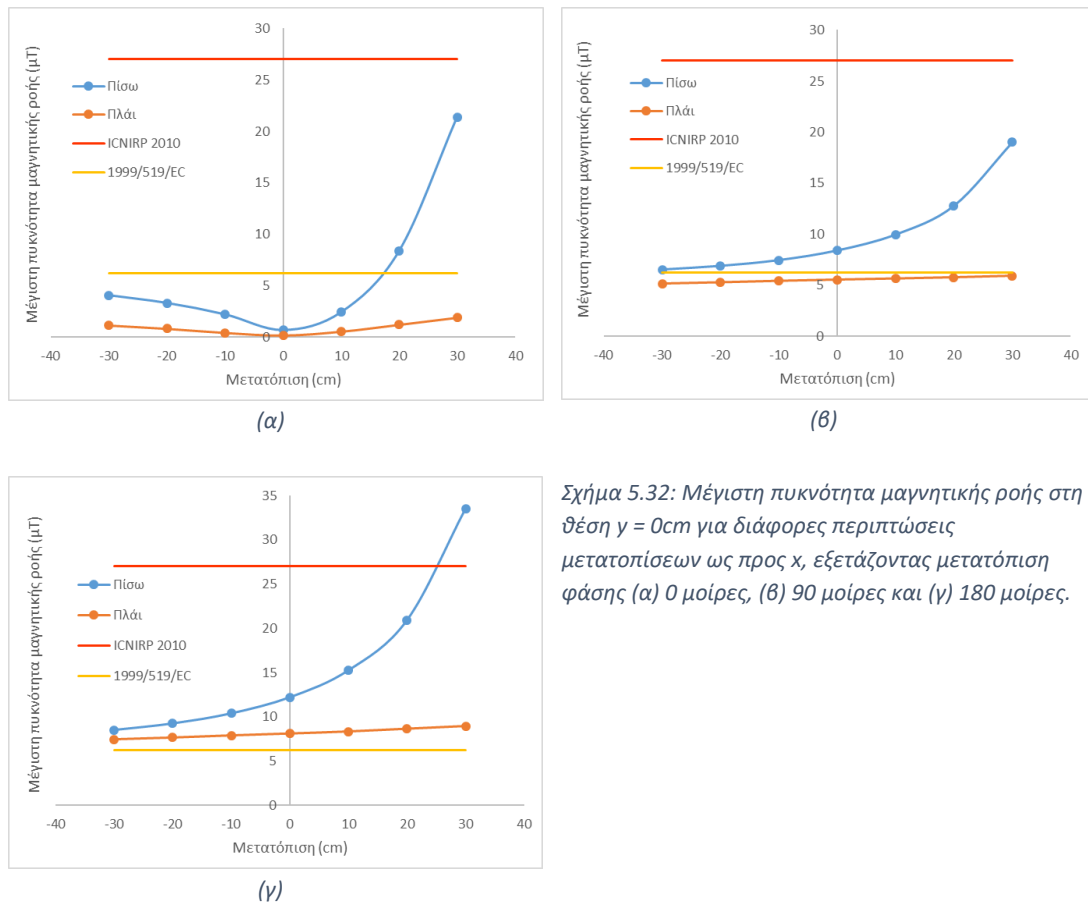
Θα μελετηθεί μία επιφάνεια στο πίσω μέρος και μία στο πλάι για ρεύματα λειτουργίας  $I_1 = 25A - I_2 = 25A$ ,  $I_1 = 12,5A - I_2 = -21,65A$  και  $I_1 = 25A - I_2 = -25A$ , όπως προέκυψαν από την ενότητα 5.3.1.

Στο Σχήμα 5.31 παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες πιθανές θέσεις.



Σχήμα 5.31: Κάτοψη με το πρωτεύον στις θέσεις (α)  $x = -30cm$ ,  $y = 0cm$ , (β)  $x = 0cm$ ,  $y = 20cm$  και (γ)  $x = +30cm$ ,  $y = 30cm$

Αρχικά, εξετάστηκε η θέση  $\gamma = 0\text{cm}$  για τις τρεις μετατοπίσεις φάσης, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο Σχήμα 5.32. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται στο Παράρτημα.



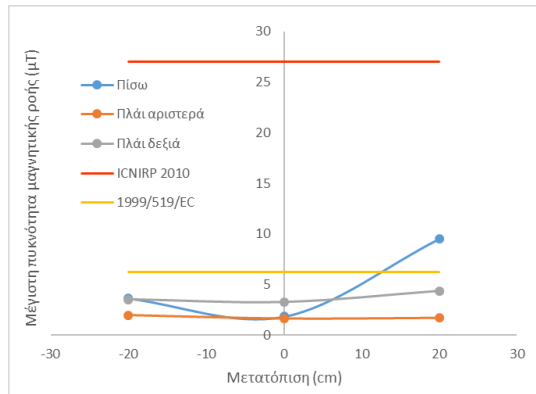
Σχήμα 5.32: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $\gamma = 0\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Ο φορτιστής λειτουργεί εντός των ορίων της ICNIRP σε όλες τις θέσεις για μετατόπιση φάσης 0 και 90 μοίρες, ενώ για 180 μοίρες η τιμή του πεδίου στο πίσω μέρος το υπερβαίνει μόνο για μετατοπίσεις η οποίες πλησιάζουν προς το άκρο του οχήματος.

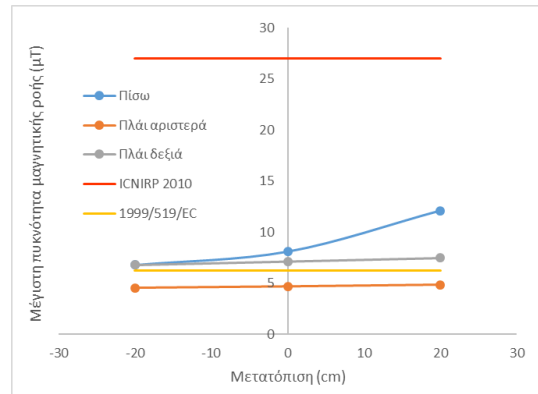
Με βάση το ευρωπαϊκό συμβούλιο, το πεδίο που εντοπίζεται στο πλάι βρίσκεται συνεχώς εντός ορίων για μετατόπιση φάσης 0 και 90 μοίρες, ενώ για την περίπτωση των 180 μοιρών είναι διαρκώς πάνω από το όριο. Όσον αφορά το πεδίο στο πίσω μέρος, αυτό βρίσκεται εντός του ορίου όταν το πρωτεύον βρίσκεται προς το κέντρο του οχήματος, ενώ καθώς αυτό κινείται προς το άκρο του οχήματος, ξεπερνά το όριο.



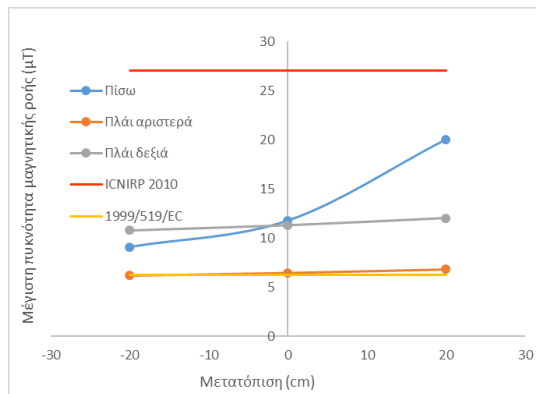
Στην συνέχεια για τις ίδιες μετατοπίσεις φάσεις μεταξύ των ρευμάτων, εξετάζεται η θέση  $\gamma = 20\text{cm}$  (Σχήμα 5.33). Στην συγκεκριμένη θέση οι προσομοιώσεις περιορίστηκαν στην περιοχή όπου μεταφέρεται ικανοποιητική ισχύς, η οποία με βάση την ενότητα 1.4.2 περιορίζεται στο διάστημα  $x = -20\text{cm}$  έως  $x = +20\text{cm}$ .



(α)



(β)

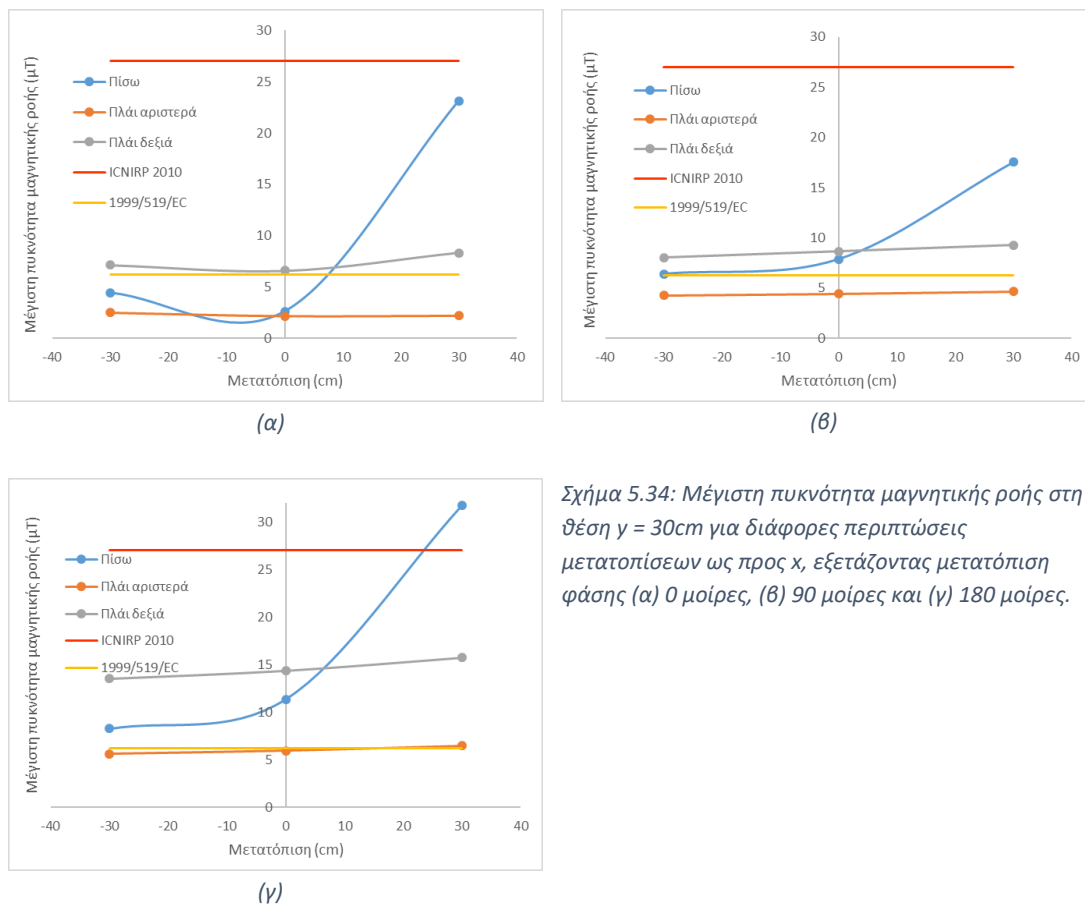


(γ)

Σχήμα 5.33: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $\gamma = 20\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Τα συμπεράσματα που ισχύουν για την περίπτωση με  $\gamma = 0\text{cm}$  ισχύουν και για την περίπτωση με  $\gamma = 20\text{cm}$ . Πιο συγκεκριμένα, το όριο της ICNIRP τηρείται για όλες τις μετατοπίσεις και τους συνδυασμούς ρευμάτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.33, ενώ το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου τηρείται μόνο για μετατόπιση φάσης  $0^\circ$  και αποφεύγοντας τις ακραίες θέσεις όπως για  $x = 20\text{cm}$  ή περισσότερο. Στις άλλες μετατοπίσεις φάσης το πεδίο στις επιφάνειες είτε πίσω, είτε στο πλάι υπερβαίνει το όριο.

Τέλος, θα εξεταστεί και η ακραία περίπτωση,  $\gamma = 30\text{cm}$ , για μετατοπίσεις φάσεις 0,90 και 180 μοίρες (Σχήμα 5.34).



Σχήμα 5.34: Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής στη θέση  $\gamma = 30\text{cm}$  για διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων ως προς  $x$ , εξετάζοντας μετατόπιση φάσης (α) 0 μοίρες, (β) 90 μοίρες και (γ) 180 μοίρες.

Το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις μετατοπίσεις και για τα τρία ρεύματα, με μοναδική εξαίρεση την περίπτωση για μετατόπιση φάσης 180° και για μετατόπιση η οποία πλησιάζει το άκρο του σασί. Το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου, όντας πιο αυστηρό, δεν επαληθεύεται σε καμία από τις περιπτώσεις, καθώς το πεδίο στο πλάι του οχήματος είναι πάνω από το όριο.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψιν το πεδίο που εντοπίζεται στο πλάι του οχήματος, ο φορτιστής μπορεί σύμφωνα με την ICNIRP να λειτουργήσει σε όλες τις περιπτώσεις μετατόπισης φάσης των ρευμάτων για όλες τις πιθανές θέσεις πρωτεύοντος.

Όσον αφορά το ευρωπαϊκό συμβούλιο και επίσης το πεδίο στο πλάι, ο φορτιστής επιτρέπεται να λειτουργήσει στο εύρος μετατοπίσεων έως 20cm στον οριζόντιο άξονα (άξονας  $\gamma$ ) για μετατοπίσεις φάσης οι οποίες περιορίζονται στις 90 μοίρες

Αξίζει να σημειωθεί πως το πρωτεύον πρέπει να απενεργοποιείται κατά την μη σύζευξη με δευτερεύον, διότι το πεδίο που δημιουργείται 5cm πάνω από αυτό είναι της τάξης των 1074,5μT, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 5.3.2.

Τέλος, παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας των τριών φορτιστών όσον αφορά στα περιθώρια ανοχής σε μετατοπίσεις για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων ίση με 90 μοίρες, όπως συχνά συναντάται στην στατική φόρτιση. Τα περιθώρια ανοχής ορίστηκαν με βάση το πεδίο που αναπτύσσεται στο πλάι του οχήματος.

Όριο μετατοπίσεων	ICNIRP		1999/519/EC	
	Άξονας x	Άξονας y	Άξονας x	Άξονας y
Αρχική διάταξη	-60cm...+60cm	-20cm...+20cm	-	-
Διάταξη με μικρότερο δευτερεύον	-45cm...+45cm	-20cm...+20cm	-	-
Τελική διάταξη	-30cm...+30cm	-30cm...+30cm	-30cm...+30cm	0cm

Πίνακας 5.9: Περιθώρια ανοχής μετατοπίσεων του πρωτεύοντος για τους τρεις φορτιστές

Παρατηρείται πως η τελική διάταξη σύμφωνα με την ICNIRP μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια για όλες τις μετατοπίσεις στο εύρος διαστάσεων του φορτιστή. Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως η τελική διάταξη είναι η μόνη που επιτυγχάνει να εναρμονιστεί με το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου για μηδενική μετατόπιση στον άξονα y και για μετατοπίσεις -30cm έως +30cm στον άξονα x.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> : Επίδραση της θωράκισης στο μαγνητικό πεδίο

### 6.1 Εισαγωγή

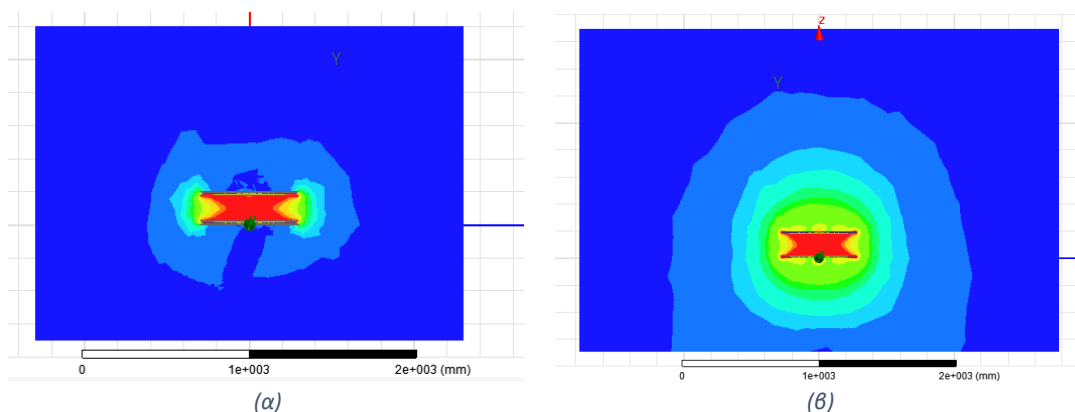
Στο κεφάλαιο αυτό, θα μελετηθεί μέσα από προσομοιώσεις η επίδραση στο μαγνητικό πεδίο της θωράκισης αλουμινίου του φορτιστή και του σασί του οχήματος.

### 6.2 Επίδραση της θωράκισης αλουμινίου του συζεύκτη στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία

Στα προηγούμενα κεφάλαια για την προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου στο εξωτερικό του αυτοκινήτου πραγματοποιήθηκε μαγνητοστατική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή δύναται να προσδιορίσει με ιδιαίτερη ακρίβεια το μαγνητικό πεδίο σε έναν μαγνητικό συζεύκτη, δεν επιτρέπει, ωστόσο τη μελέτη της επίδρασης της θωράκισης που παρέχει το αλουμίνιο στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία. Για να μελετηθεί η επίδραση της θωράκισης πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα δινορεύματα που αναπτύσσονται στο εσωτερικό υλικών όπως το αλουμίνιο ή το σασί του αυτοκινήτου, τα οποία είναι αποτέλεσμα του χρονομεταβλητού ρεύματος στο πρωτεύον της διάταξης. Το Maxwell, ωστόσο παρέχει την δυνατότητα ανάλυσης με δινορεύματα (Eddy current analysis).

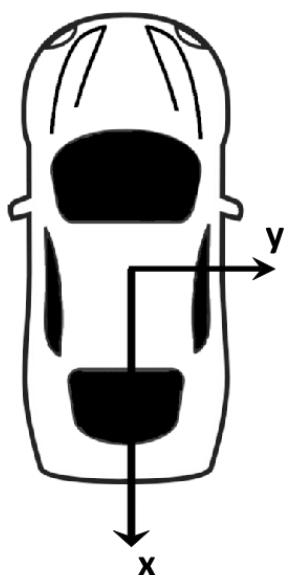
Αρχικά, παρουσιάζεται η επίδραση της θωράκισης αλουμινίου του συζεύκτη. Τα ρεύματα που επιλέχθηκαν είναι  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ , η διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων ίση με  $90^\circ$ , διαφορά η οποία συναντάται συχνά για μια αντιστάθμιση σειράς - σειράς, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 και η συχνότητα λειτουργίας ίση με  $85kHz$ .

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με θωράκιση και χωρίς θωράκιση φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Δίνεται το μαγνητικό πεδίο στον άξονα  $y$ , καθώς, λόγω της συμμετρικότητας του εξεταζόμενου συζεύκτη το πεδίο που αναπτύσσεται στον χώρο γύρω από τον φορτιστή, είτε εξετάζουμε ως προς τον  $X$  άξονα, είτε ως προς τον  $Y$ , παρουσιάζει την ίδια μορφή. Στο Σχήμα 6.2 παρατίθεται η κάτοψη ενός αυτοκινήτου με σχεδιασμένους τους άξονες.

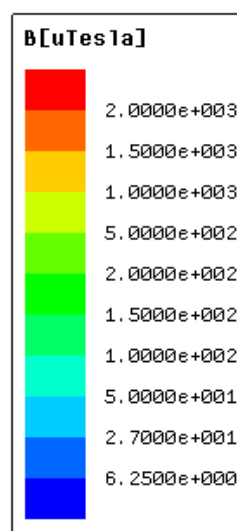


Σχήμα 6.1: Σύγκριση μαγνητικού πεδίου στον άξονα  $Y$  (α) με και (β) χωρίς θωράκιση

Σε όλες τις περιπτώσεις έχει εφαρμοστεί η ίδια κλίμακα, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3. Με σκούρο μπλε χρώμα απεικονίζεται το πεδίο με τιμή μέγιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής μικρότερης των 6,25μΤ, όριο το οποίο θέτει το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, ενώ με πιο ανοιχτό μπλε το πεδίο με τιμή μικρότερη των 27μΤ, όπου ικανοποιείται δηλαδή το όριο που θέτει η ICNIRP. Στα υπόλοιπα σημεία το πεδίο είναι αυξημένο και εκτός ασφαλών ορίων. Η συγκεκριμένη κλίμακα χρωμάτων θα εφαρμοστεί σε όλες τις προσομοιώσεις που θα λάβουν χώρα σε αυτό το κεφάλαιο.



Σχήμα 6.2: Κάτοψη αυτοκινήτου



Σχήμα 6.3: Κλίμακα χρωμάτων

Αναφορικά με την μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, παρατηρείται πως η θωράκιση αλουμινίου συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό στον περιορισμό της. Πιο συγκεκριμένα, οι ελάχιστες αποστάσεις όπου το πεδίο είναι ασφαλές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Όριο	Πλάι (cm)		Πάνω (cm)	
	Με θωράκιση	Χωρίς θωράκιση	Με θωράκιση	Χωρίς θωράκιση
6,25μΤ	33	80	32	103
27μΤ	18	35	12	62

Πίνακας 6.1: Ελάχιστες ασφαλείς αποστάσεις φορτιστή

Από τον παραπάνω πίνακα, καθίσταται σαφές πως μια θωράκιση αλουμινίου είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό της διάταξης.

### 6.3 Επίδραση του σασί του οχήματος στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η επίδραση του σασί στο μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται.

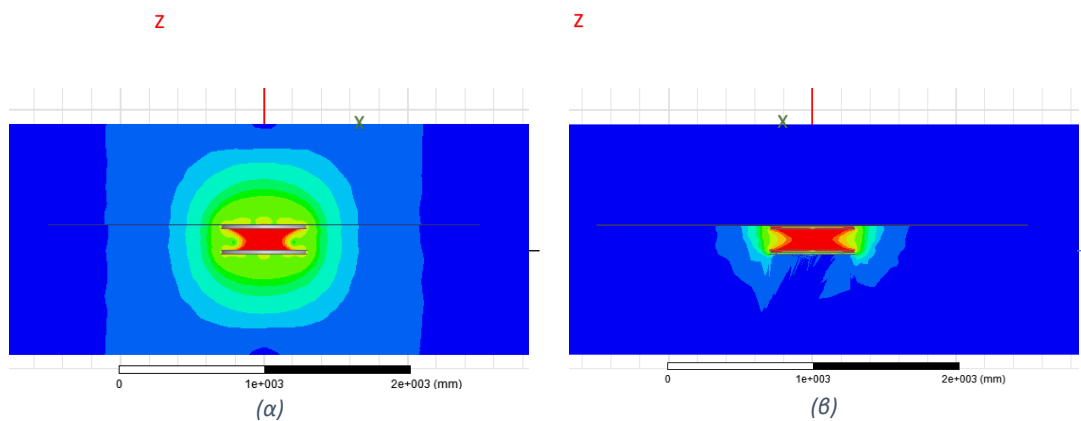
Το σασί είναι ένα από τα βασικότερα δομικά μέρη του αυτοκινήτου, καθώς πάνω σε αυτό στηρίζεται το αμάξωμα, ο κινητήρας και άλλα στοιχεία που το απαρτίζουν. Η επιλογή του πρέπει να γίνεται κατάλληλα, συνυπολογίζοντας το βάρος που πρέπει να υποστηρίξει, αλλά και μηχανικές ιδιότητες, όπως η αντοχή σε παραμορφώσεις και στη διάβρωση, ενώ συγχρόνως να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος. Δύο βασικά υλικά έχουν αυτές τις ιδιότητες, το ατσάλι και το αλουμίνιο.

Για να καταφέρει ένα σασί αλουμινίου να αποκτήσει τις ίδιες ιδιότητες με ένα σασί από ατσάλι, απαιτούνται συνήθως χημικές προσθήκες, κατάλληλη επεξεργασία και μεγαλύτερο πάχος<sup>1,2</sup> [.]. Ως επί το πλείστον, σασί αλουμινίου χρησιμοποιείται στην κατασκευή αγωνιστικών αυτοκινήτων, όπου το βάρος παίζει ένα σημαντικό ρόλο, ενώ στην κατηγορία των συμβατικών αυτοκινήτων χρησιμοποιείται κυρίως σασί από ατσάλι<sup>3</sup>.

Καθώς η ασύρματη φόρτιση απευθύνεται πρωτίστως σε αυτοκίνητα συμβατικά επιβατικά οχήματα το σασί που επιλέγεται για το μοντέλο προσομοίωσης του φορτιστή, κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι, έχει μήκος 3m, πλάτος 1,5m, σύμφωνα με τις διαστάσεις οχημάτων που μελετώνται στην ενότητα 3.5, και πάχος 3mm.

Με τον φορτιστή τοποθετημένο στο κέντρο του σασί, θα μελετηθεί το πεδίο ως προς τους άξονες X και Y. Τα ρεύματα επιλέχθηκαν και σε αυτή την περίπτωση να είναι I1 = 25A και I2 = 25A με τη διαφορά φάσης μεταξύ τους ίση με 90°.

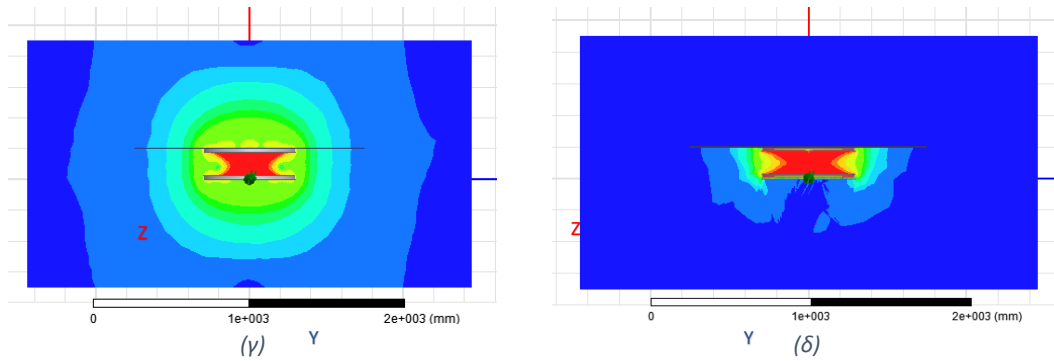
Μη λαμβάνοντας υπόψιν το σασί του οχήματος, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 6.4-(α) και (β). Όταν το σασί δε λαμβάνεται υπόψιν στην ανάλυση παρατηρείται ένα ιδιαίτερα μεγάλο ΗΜ πεδίο που εκτείνεται σε μεγάλες αποστάσεις τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του οχήματος.



<sup>1</sup> <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>

<sup>2</sup> <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/16437/The-Battle-of-the-Bodies-Steel-vs-Aluminum-in-Automotive-Production.aspx>

<sup>3</sup> <http://roar.uel.ac.uk/1331/1/NTI%20conference%20Paper.pdf>



Σχήμα 6.4: Σύγκριση μαγνητικού πεδίου με θωράκιση αλουμινίου στους άξονες X και Y μέσω (α), (γ) μαγνητοστατικής ανάλυσης και (β) (δ) ανάλυσης με δινορεύματα

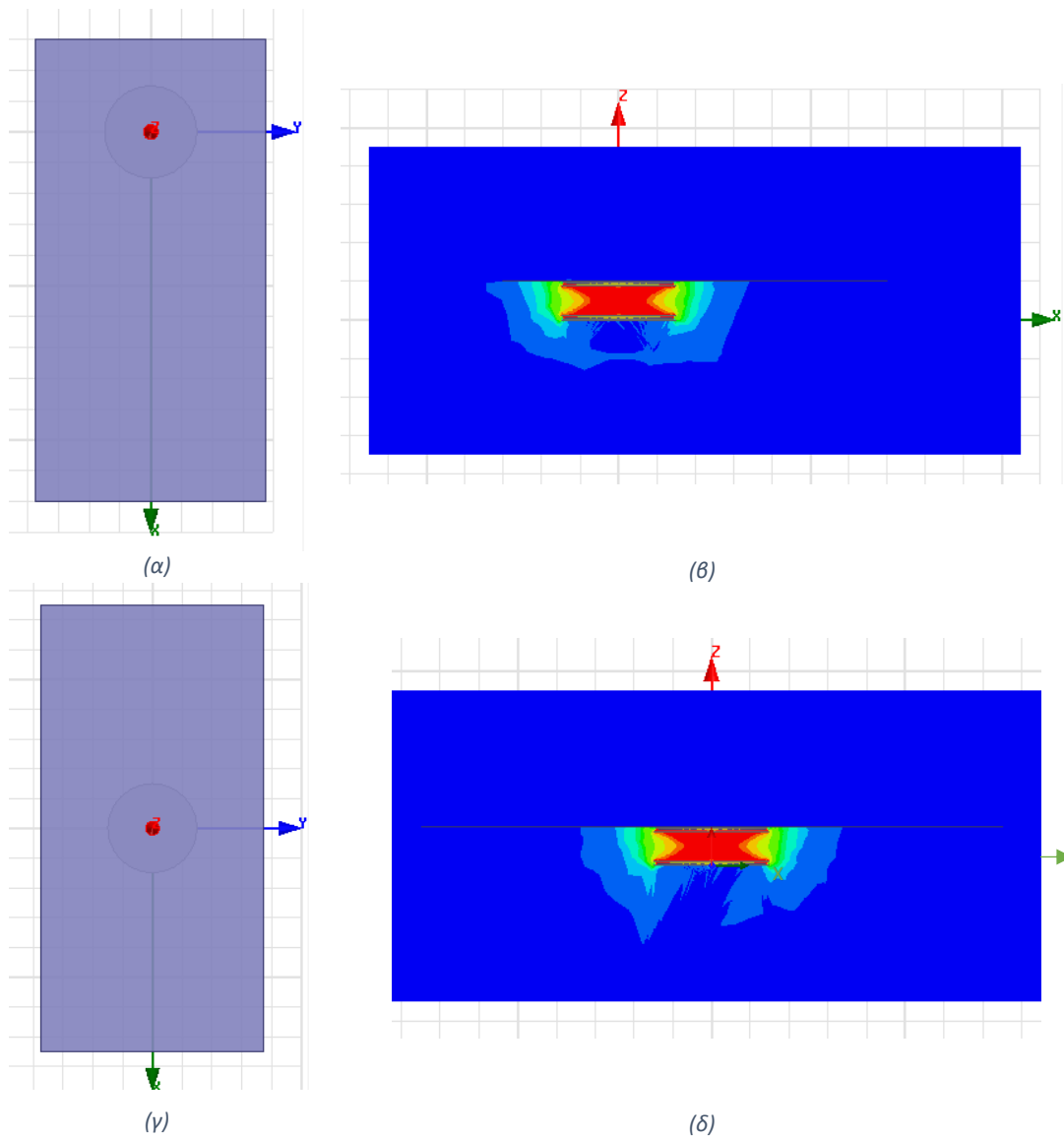
Αντιθέτως, εφαρμόζοντας ανάλυση με δινορεύματα, συνυπολογίζεται το σασί, με αποτέλεσμα τα μαγνητικά πεδία να περιορίζονται σημαντικά τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του οχήματος, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 6.2-(β) και (δ). Ο βαθμός συμμετοχής του σασί, μάλιστα, είναι τέτοιος ώστε το πεδίο πάνω και γύρω από το σασί να βρίσκεται εντός του ορίου των 6,25μΤ που ορίζει το ευρωπαϊκό συμβούλιο.

#### 6.4 Τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο όχημα

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η λειτουργία του φορτιστή με το δευτερεύον τοποθετημένο κάτω από το σασί. Ο φορτιστής θα περιβάλλεται από θωράκιση αλουμινίου και θα εκπονηθεί ανάλυση με δινορεύματα. Η διαφορά φάσης των ρευμάτων θα είναι 90° και θα επιλεγθεί η κατάσταση εκείνη που δίνει το μέγιστο μαγνητικό πεδίο, για ρεύματα λειτουργίας  $I_1 = 25A$  και  $I_2 = 25A$ .

Οι επιφάνειες που θα εξεταστούν βρίσκονται τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του οχήματος. Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, το σασί έχει μήκος 3m, πλάτος 1,5m και η καμπίνα των επιβατών απέχει από την άκρη του σασί 60cm στο μπροστινό μέρος και 50cm στο πίσω μέρος.

Ο φορτιστής θα τοποθετηθεί σε 2 σημεία, των οποίων η κάτοψη και η πυκνότητα μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται κατά μήκος του οχήματος (άξονας x) παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Αρχικά στα Σχήματα 6.5 (α) και (β) εξετάζεται η θέση στο ακριανό μέρος, 30cm από το άκρο του σασί και στη συνέχεια στα Σχήματα 6.5 (γ) και (δ) στο κέντρο του οχήματος.



Σχήμα 6.5: Κάτοψη και κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά μήκος του οχήματος με τον φορτιστή τοποθετημένο (α) (β) κοντά στο άκρο και (γ) (δ) στο κέντρο

Παρατηρούμε πως και για τις 2 θέσεις του φορτιστή το μαγνητικό πεδίο που εντοπίζεται είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό είναι εντός των ασφαλών ορίων. Ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου στον άξονα x που υπερβαίνει το όριο που θέτει το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο δεν επηρεάζει την ασφάλεια, καθώς στη θέση αυτή βρίσκεται συνήθως ο προφυλακτήρας, επομένως η ανθρώπινη παρουσία καθίσταται αδύνατη.



## 6.5 Θωράκιση & Μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος-δευτερεύοντος

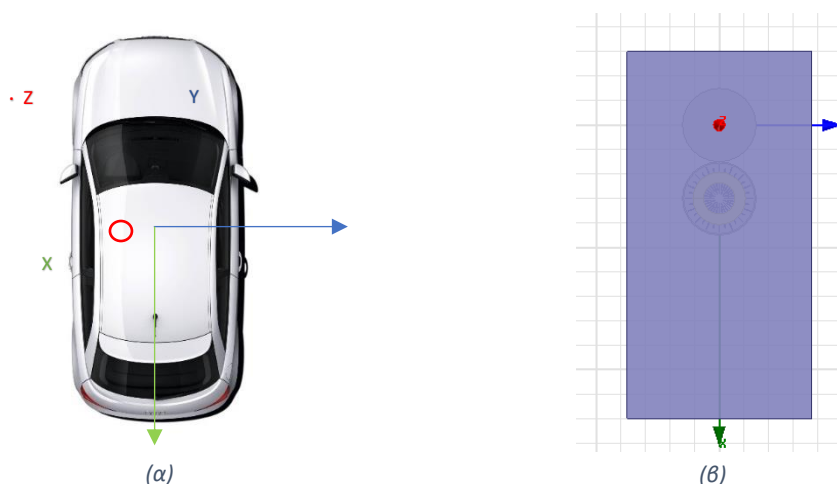
Έχοντας επιλέξει ως πιθανές θέσεις τοποθέτησης του φορτιστή στο όχημα μια στο άκρο του οχήματος και μια στο κέντρο, θα μελετηθεί για κάθε μια από αυτές το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και το εξωτερικό του οχήματος. Με βάση τα αποτελέσματα του πεδίου θα προσδιοριστούν οι ελάχιστες ασφαλείς αποστάσεις όπως ορίζονται από τα όρια που θέτουν το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και η ICNIRP.

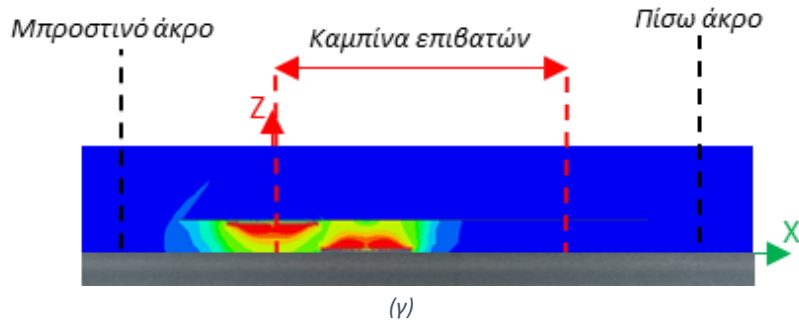
### 6.5.1 Λειτουργία του δευτερεύοντος στο άκρο του οχήματος

Για τη πραγματοποίηση της ανάλυσης, τοποθετούμε το δευτερεύον στο μπροστινό μέρος, 30cm από την άκρη του σασί. Δεδομένου της συμμετρικότητας του συζεύκτη αλλά και του σασί που προσομοιώνεται, ανάλογα αποτελέσματα θα λαμβάνονταν και σε περίπτωση τοποθέτησης του φορτιστή 30cm από το πίσω μέρος του σασί. Θα εξεταστεί, επίσης, το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται σε συνθήκες οριζόντιας μετατόπισης. Στο Σχήμα 6.6 (α) φαίνεται ενδεικτικά η κάτοψη του οχήματος με το σύστημα συντεταγμένων και στο (β) η κάτοψη με το πρωτεύον μετατοπισμένο κατά 60cm στον άξονα x.

Σε κάθε περίπτωση μετατόπισης θα υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση από το άκρο του σασί που ικανοποιεί τα όρια που θέτει το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο και η ICNIRP. ως προς τους άξονες -X, +Y, -Y και στον +Z. Στον άξονα +X, που προσομοιώνει το πίσω μέρος του οχήματος, το πεδίο είναι διαρκώς εντός των ορίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.6 (γ), όπου εξετάζεται η ακραία θέση  $x = 60\text{cm}$ , καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο άκρο +X. Στην περίπτωση αυτή το άκρο του σασί απέχει από το άκρο του φορτιστή 1,5m.

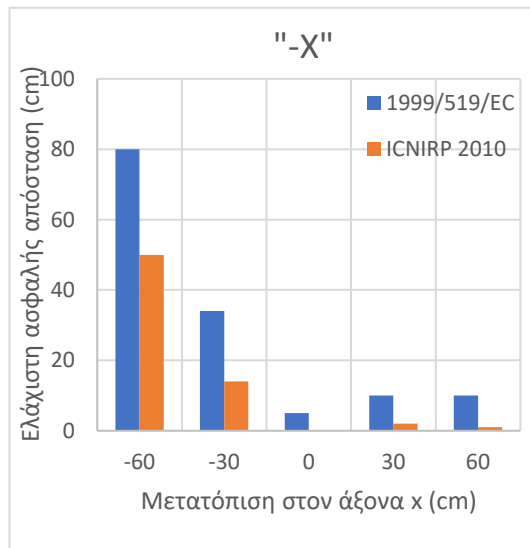
Σχετικά με τον άξονα Z εξετάζονται σημεία εντός της καμπίνας επιβατών, όπου σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, η καμπίνα απέχει από την άκρη του σασί περίπου 60cm στο μπροστινό μέρος και 50cm στο πίσω μέρος. Η πλάγια όψη του οχήματος όπου με κόκκινο χρώμα υποδεικνύεται η καμπίνα των επιβατών φαίνεται στο Σχήμα 6.6 (γ).



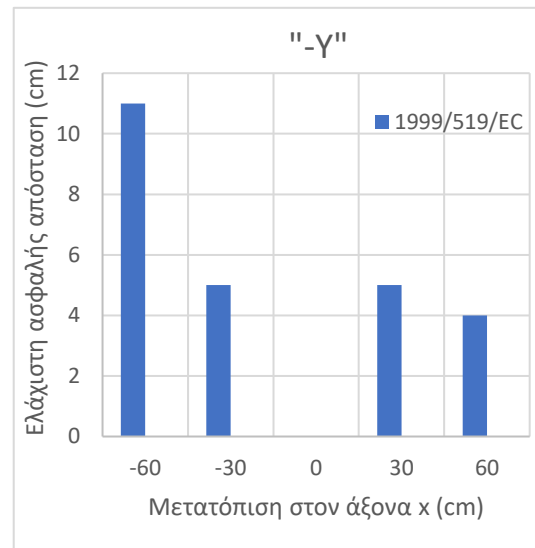


Σχήμα 6.6: Κάτοψη του οχήματος (α) με σύστημα συντεταγμένων, (β) με το πρωτεύον στη θέση  $x = 60\text{cm}$ ,  $y = 0\text{cm}$  και (γ) κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα  $x$  με υπόδειξη της καμπίνα των επιβατών

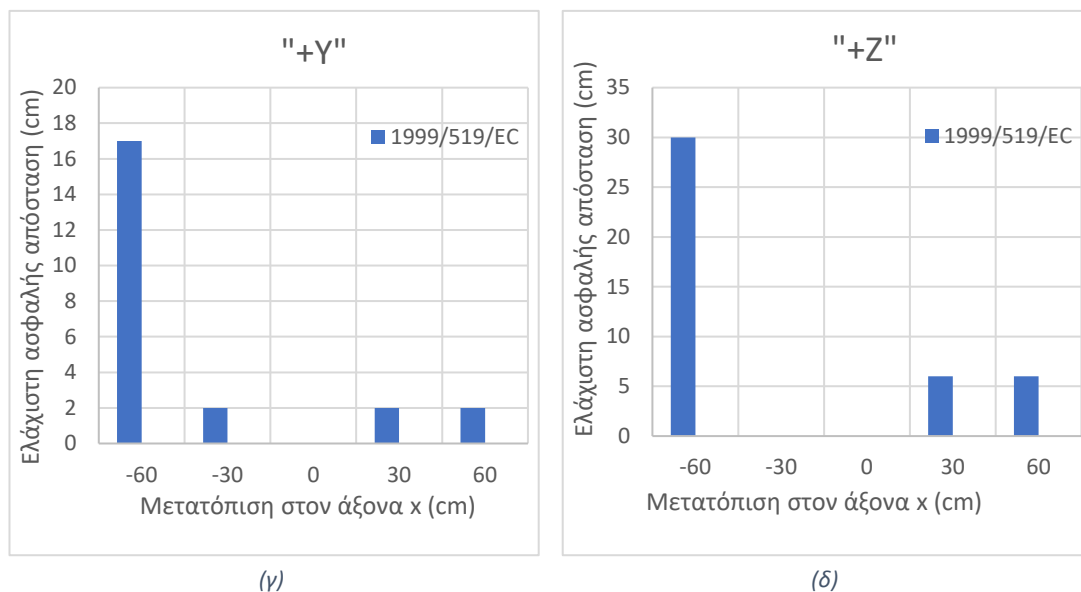
Με το πρωτεύον τοποθετημένο στο κέντρο του άξονα  $y$ , εξετάζονται πιθανές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα  $x$  (Σχήμα 6.7). Τα αναλυτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται στο Παράρτημα.



(α)

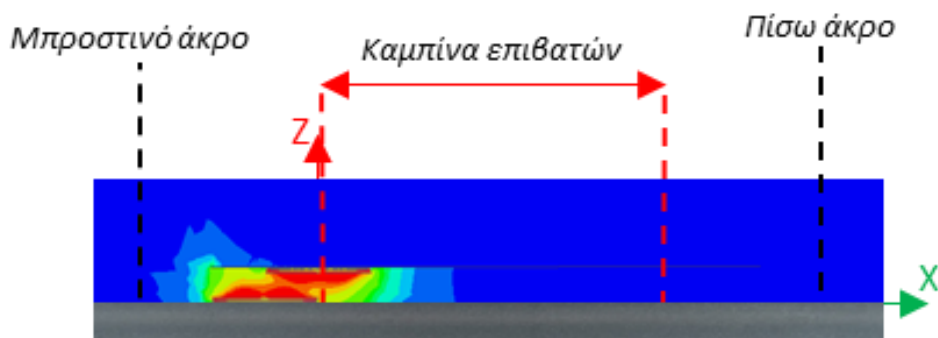


(β)



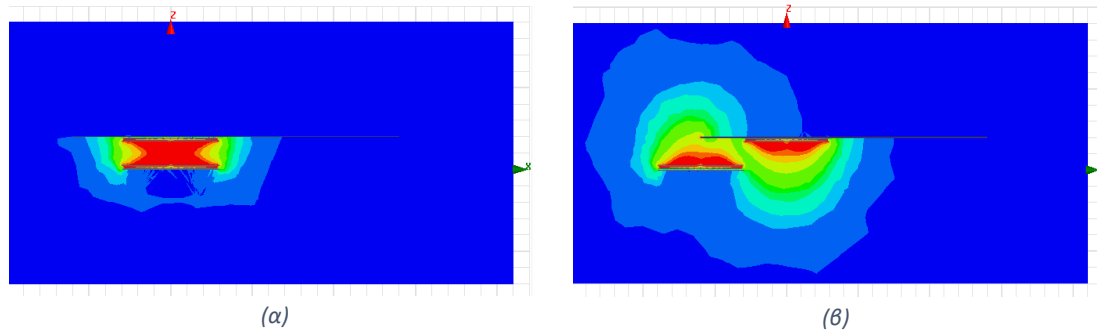
Σχήμα 6.7: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) -X (β) -Y (γ) +Y (δ) +Z για μηδενική μετατόπιση του πρωτεύοντος ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στα σχήματα (β)-(δ) το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Το πεδίο που εντοπίζεται στην ακραία κατάσταση  $x = -60\text{cm}$  εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένες τιμές για όλα τα σημεία που εξετάζονται. Για το λόγο αυτό οι αντίστοιχες αποστάσεις από την άκρη του σασί είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Στην κατάσταση  $x = -30\text{cm}$  ο φορτιστής βρίσκεται κάτω από τον κινητήρα, επομένως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.8 το μαγνητικό πεδίο στην συγκεκριμένη θέση δεν καθίσταται επικίνδυνο όταν εξετάζονται σημεία εντός της καμπίνας των επιβατών. Στις υπόλοιπες καταστάσεις το πεδίο είναι εντός του ορίου του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου σε απόσταση λίγων εκατοστών από το σασί, ενώ με βάση το όριο της ICNIRP, η ασφαλής απόσταση ορίζεται ακριβώς στο άκρο του.



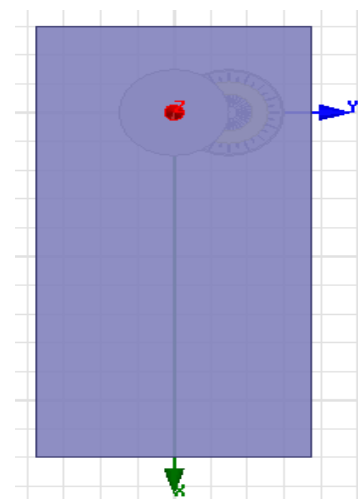
Σχήμα 6.8: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα x με το πρωτεύον στη θέση  $x = -30\text{cm}$ ,  $y = 0\text{cm}$

Οι ιδιαίτερες μεγάλες τιμές της πυκνότητας μαγνητικής ροής παρατηρούνται για μεγάλες μετατοπίσεις κατά τον άξονα x. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η κατανομή της ροής στον άξονα x όταν (α) το πρωτεύον και το δευτερεύον είναι ευθυγραμμισμένα και όταν (β) το πρωτεύον βρίσκεται στην θέση  $x = -60\text{cm}$ .

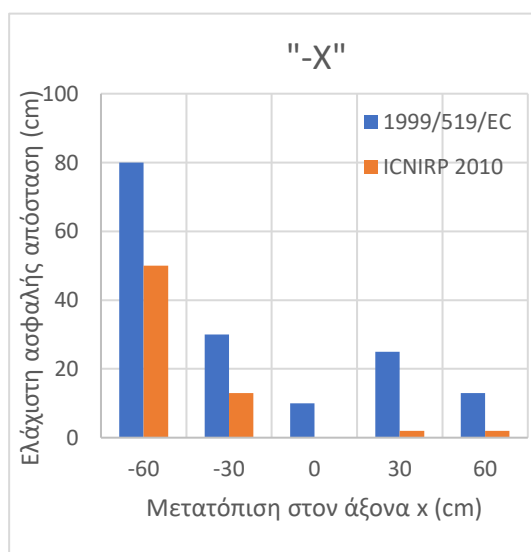


Σχήμα 6.9: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής στις θέσεις (α)  $X = 0, Y = 0$  και (β)  $X = -60\text{cm}, Y = 0$

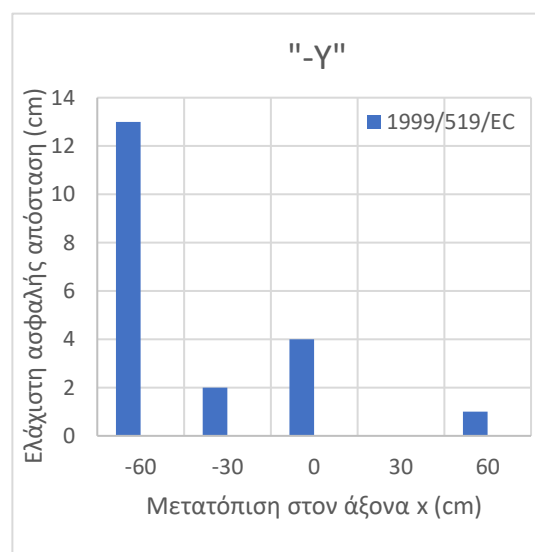
Στη συνέχεια, μετατοπίζεται το πρωτεύον κατά 30cm στον άξονα y (Σχήμα 6.10) και εξετάζονται διάφορες πιθανές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα x. Για αποστάσεις από το άκρο του σασί που εξετάζονται στον άξονα +X (Σχήμα 6.6-α), το πεδίο είναι εντός των ορίων που τίθενται και από ICNIRP και από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, για όλες τις μετατοπίσεις που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα των άλλων αξόνων φαίνονται στο Σχήμα 6.11.



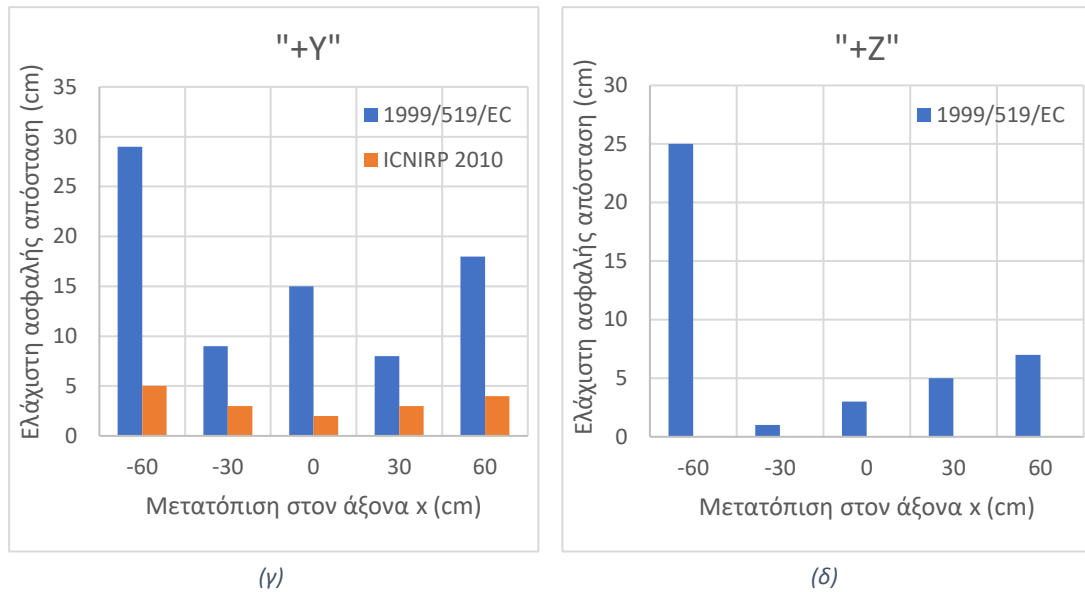
Σχήμα 6.10: Κάτοψη με το πρωτεύον στη θέση  $X = 0\text{cm}, Y = 30$



(α)



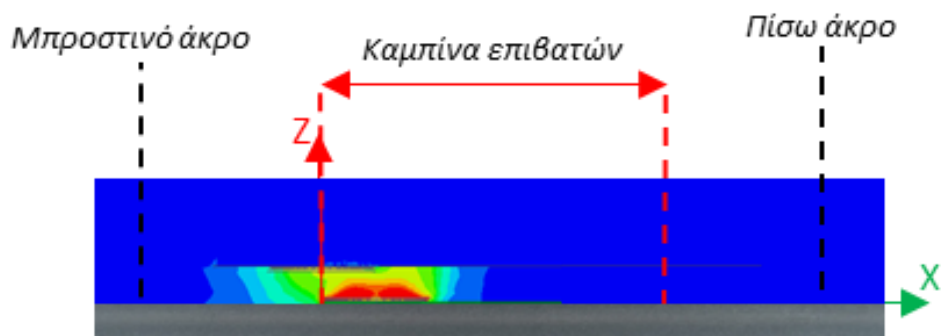
(β)



Σχήμα 6.11: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) -X (β) -Y (γ) +Y (δ) +Z για μετατόπιση του πρωτεύοντος ως προς τον οριζόντιο άξονα κατά 30cm. Στα σχήματα (β) και (δ) το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

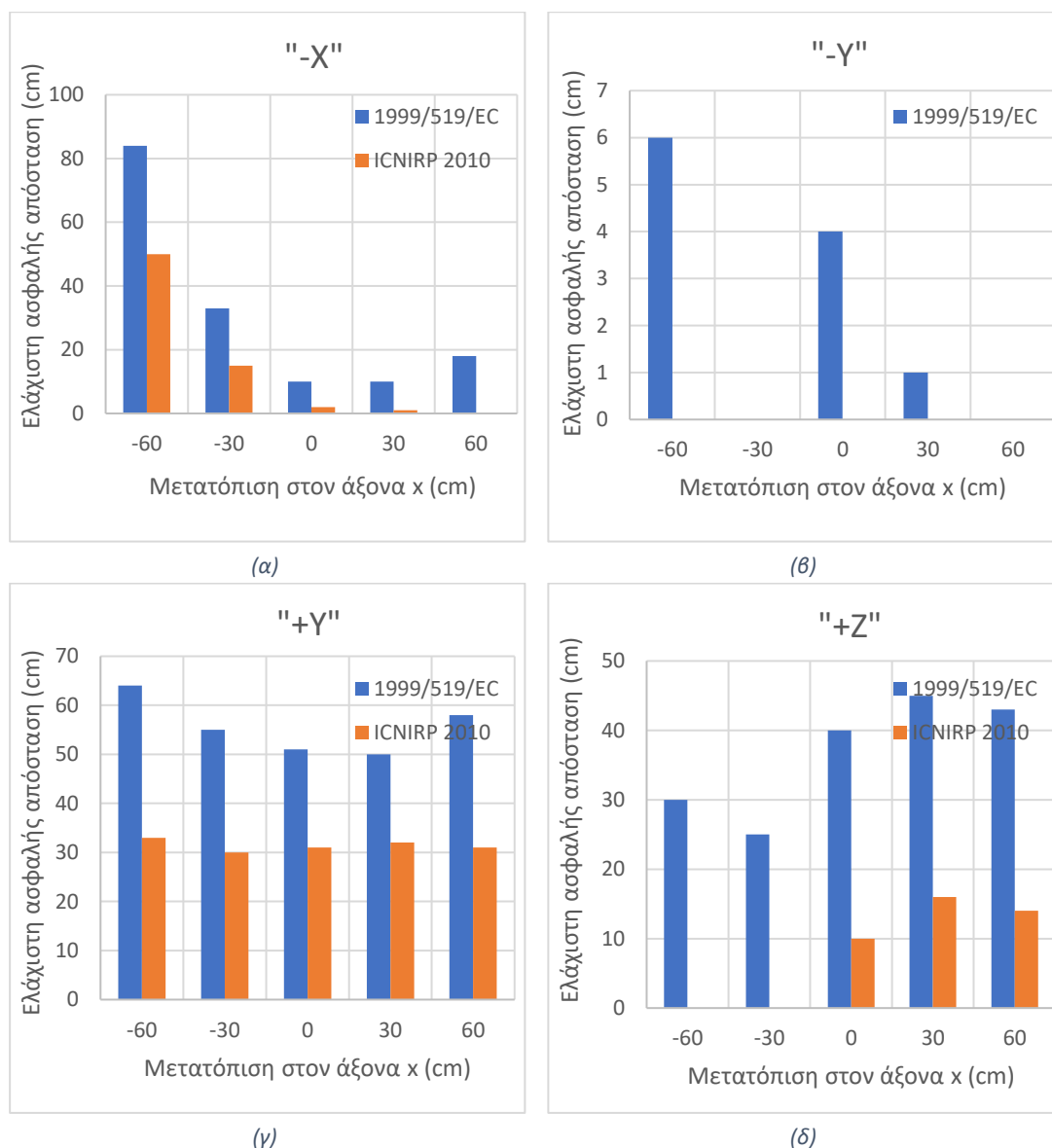
Παρατηρείται πως στην περίπτωση μετατόπισης του πρωτεύοντος κατά  $x = 30\text{cm}$ , το πεδίο εμφανίζεται σχετικά αυξημένο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Με βάση το όριο της ICNIRP, εμφανίζεται πλέον μαγνητικό πεδίο στην δεξιά πλευρά του οχήματος (άξονα +Y στο Σχήμα 6.10 και Σχήμα 6.6-α) το οποίο γίνεται ασφαλές σε απόσταση 5cm από το άκρο του σασί. Το πεδίο αυτό όμως δεν είναι εμπόδιο στην αξιοποίηση του φορτιστή, καθώς μεταξύ σασί και εξωτερικού χώρου μεσολαβεί η πόρτα του οχήματος, το πάχος της οποίας καλύπτει συνήθως την απόσταση των 5cm.

Σύμφωνα με το όριο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου όμως, επιπλέον μέτρα πρέπει να ληφθούν, καθώς το πεδίο που εμφανίζεται είτε στο εξωτερικό είτε στο εσωτερικό, είναι αυξημένο. Αναφέρεται χαρακτηριστικά πως το πεδίο εντός του οχήματος (άξονας +Z) στη θέση  $X = 30$  και  $Y = 30$ , γίνεται ασφαλές σε απόσταση 5cm από το σασί, σημείο όπου βρίσκονται τα πόδια των επιβατών. Ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 6.12 η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στη θέση  $X = 30$  και  $Y = 30$ , όπου εντός της καμπίνας με ανοιχτό μπλε χρώμα φαίνονται τα διάφορα σημεία όπου υπερβαίνεται το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου.



Σχήμα 6.12: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα x με το πρωτεύον στη θέση  $x = 30\text{cm}$ ,  $y = 30\text{cm}$

Τέλος, εξετάζονται και οι ακραίες μετατοπίσεις, δηλαδή με το πρωτεύον μετατοπισμένο κατά 60cm στον άξονα γ (Σχήμα 6.6-α). Και στην περίπτωση αυτή μελετώνται οι διάφορες πιθανές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα χ. Στο πίσω μέρος του οχήματος (άξονας +X), το πεδίο είναι επίσης εντός των ορίων για κάθε περίπτωση που εξετάζεται. Τα αποτελέσματα σχετικά με την ασφαλή απόσταση από το σασί του οχήματος για τους υπόλοιπους άξονες του Σχήματος 6.6-α παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.13.



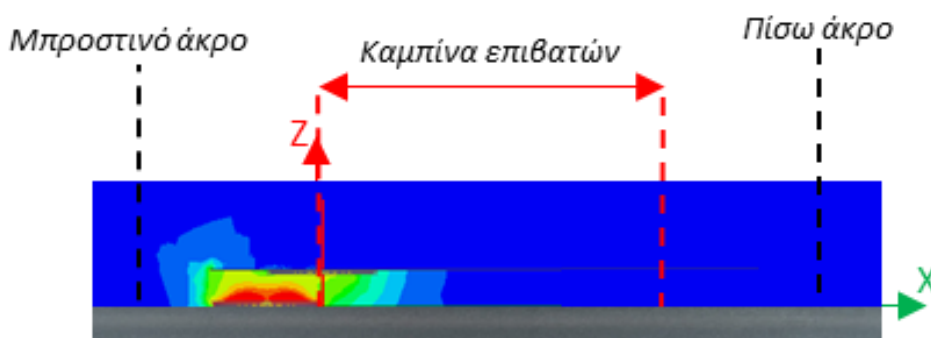
Σχήμα 6.13: Ελάχιστη ασφαλή απόσταση στους άξονες (α) -X (β) -Y (γ) +Y (δ) +Z για μετατόπιση του πρωτεύοντος ως προς τον οριζόντιο άξονα κατά 60cm. Στο σχήμα (β) το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Στην κατάσταση αυτή, το πεδίο είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Δεξιά του οχήματος (άξονας +Y), το πεδίο γίνεται ασφαλές σε απόσταση τουλάχιστον 50cm από το άκρο του σασί, με βάση το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, ή σε απόσταση 30cm με βάση την ICNIRP για οποιαδήποτε μετατόπιση ως προς τον άξονα χ. Και στο εσωτερικό το πεδίο είναι αυξημένο, μιας και γίνεται ασφαλές σε απόσταση μεγαλύτερης των 30cm ή 10cm πάνω από το σασί

(κατά τον άξονα +Z στο Σχήμα 6.6-α), αναλόγως το όριο. Συνεπώς, η θέση  $y = 60\text{cm}$ , πρέπει να αποφεύγεται και στη στατική και στη δυναμική φόρτιση.

Αναφορικά με τα όρια του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, παρατηρείται πως για μετατοπίσεις στο εύρος  $-30\text{cm}$  έως  $30\text{cm}$ , είτε ως προς τον άξονα  $x$ , είτε ως προς τον άξονα  $y$ , το ασφαλές πεδίο εντοπίζεται σε απόσταση μερικών  $\text{cm}$  από το άκρο του σασί του οχήματος με δύο εξαιρέσεις. Πρώτον, στην επιφάνεια του άξονα  $-X$ , η οποία προσομοιώνει το μπροστινό μέρος του σασί, το πεδίο γίνεται ασφαλές σε απόσταση αρκετών εκατοστών, όμως δεν αποτελεί πρόβλημα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.14, διότι μεταξύ μπροστινού μέρους και σασί μεσολαβεί ο προφυλακτήρας, ο οποίος έχει υπολογιστεί περίπου  $35\text{cm}$ . Δεύτερη εξαίρεση είναι η επιφάνεια στα δεξιά του σασί (άξονας  $+Y$ ), όπου επίσης μεταξύ σασί και εξωτερικού χώρου μεσολαβεί η πόρτα του οχήματος, το πάχος της οποίας καλύπτει ένα μέρος της απόστασης με αποτέλεσμα το πεδίο εν τέλει να γίνεται ασφαλές σε απόσταση λίγων εκατοστών από το όχημα.

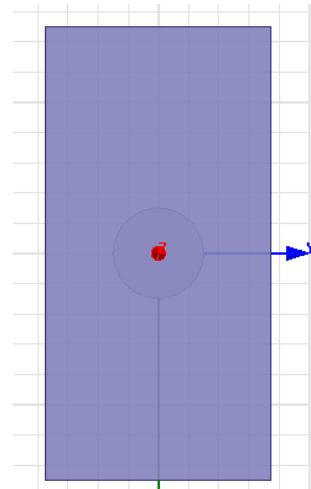
Σύμφωνα με τα όρια της ICNIRP, οι ασφαλείς αποστάσεις από το σασί είναι σαφώς μειωμένες. Σημαντική παρατήρηση είναι πως για μετατοπίσεις της τάξης των  $30\text{cm}$ , και στους δύο άξονες, το πεδίο στο εσωτερικό του οχήματος (άξονας  $+Z$ ) είναι διαρκώς εντός ορίων.



Σχήμα 6.14: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα  $x$  με το πρωτεύον στη θέση  $x = -30\text{cm}$ ,  $y = 30\text{cm}$

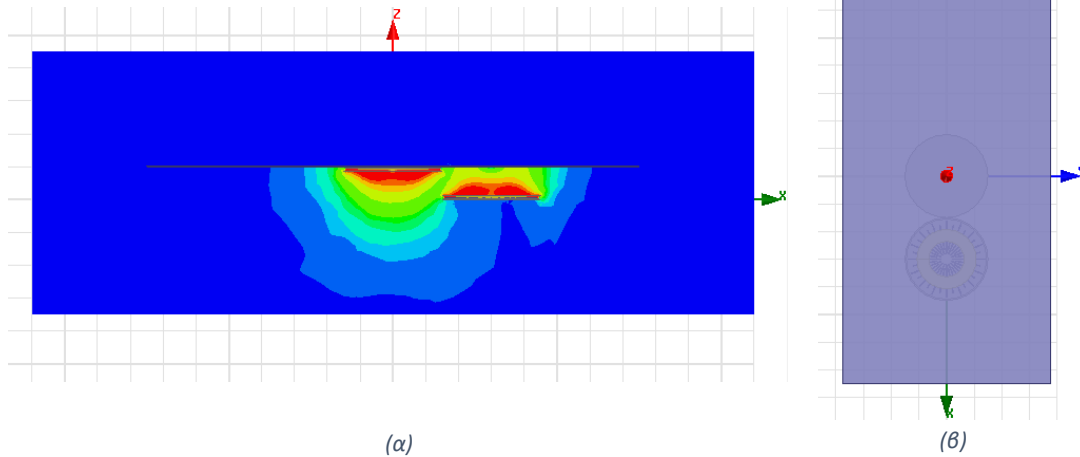
### 6.5.2 Λειτουργία δευτερεύοντος στο κέντρο του οχήματος

Στην ενότητα αυτή θα τοποθετηθεί το δευτερεύον στο κέντρο του οχήματος και θα εξεταστεί ομοίως με πριν το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό σε οριζόντιες μετατοπίσεις (άξονες  $x$  &  $y$ ). Η κάτοψη με το δευτερεύον τοποθετημένο στο κέντρο του σασί, όπως κατασκευάστηκε στο λογισμικό Maxwell φαίνεται στο Σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.15: Κάτοψη διάταξης με το φορτιστή στο κέντρο

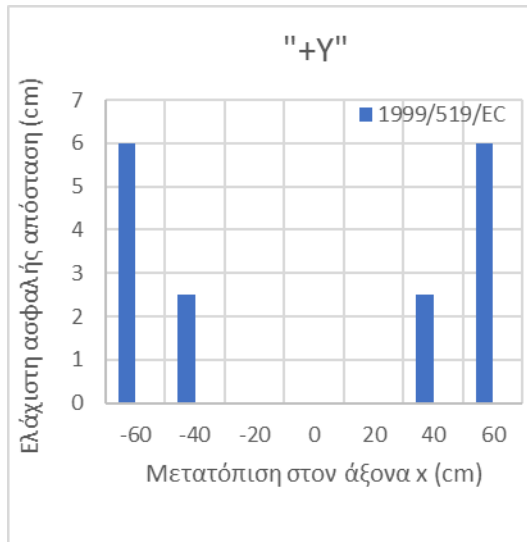
Έπειτα από προσομοιώσεις διαπιστώθηκε πως το πεδίο που υπολογίζεται στο άκρο του σασί κατά τους άξονες  $+X$  και  $-X$ , δηλαδή στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του οχήματος, ικανοποιεί για όλες τις μετατοπίσεις τα όρια του ευρωπαϊκού συμβουλίου και της ICNIRP. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η κατανομή της μαγνητικής ροής με το πρωτεύον τοποθετημένο στην ακραία θέση  $x = 60\text{cm}$ .



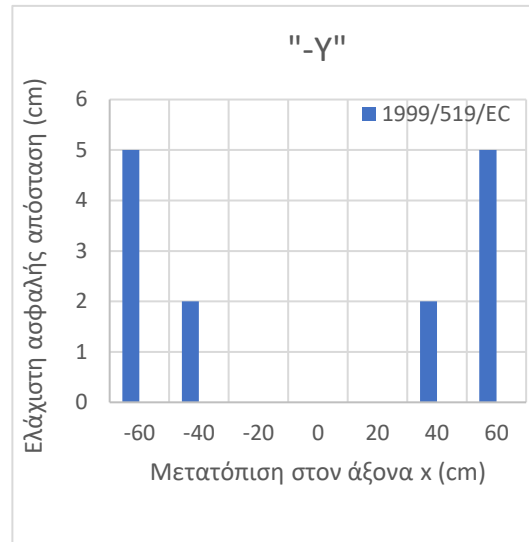
Σχήμα 6.16: (α) Πυκνότητα μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα  $x$  και (β) κάτοψη του οχήματος με το πρωτεύον στη θέση  $x = 60\text{cm}$ ,  $y = 0\text{cm}$

Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι ελάχιστες αποστάσεις όπου ικανοποιούνται τα όρια που τίθενται από την ICNIRP και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, από την άκρη του σασί στους άξονες  $+Y$ ,  $-Y$  και  $+Z$  (Σχήμα 6.6-α). Τα αναλυτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται στο Παράρτημα. Αρχικά εξετάζεται μηδενική μετατόπιση ως προς τον άξονα  $y$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις πιθανές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα  $X$  απεικονίζονται στο Σχήμα 6.17.

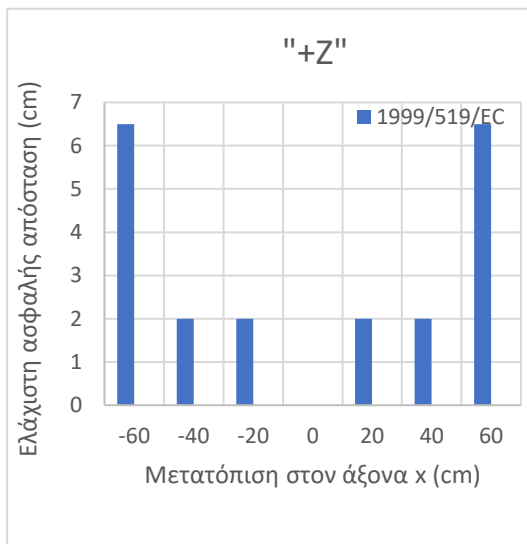




(α)



(β)



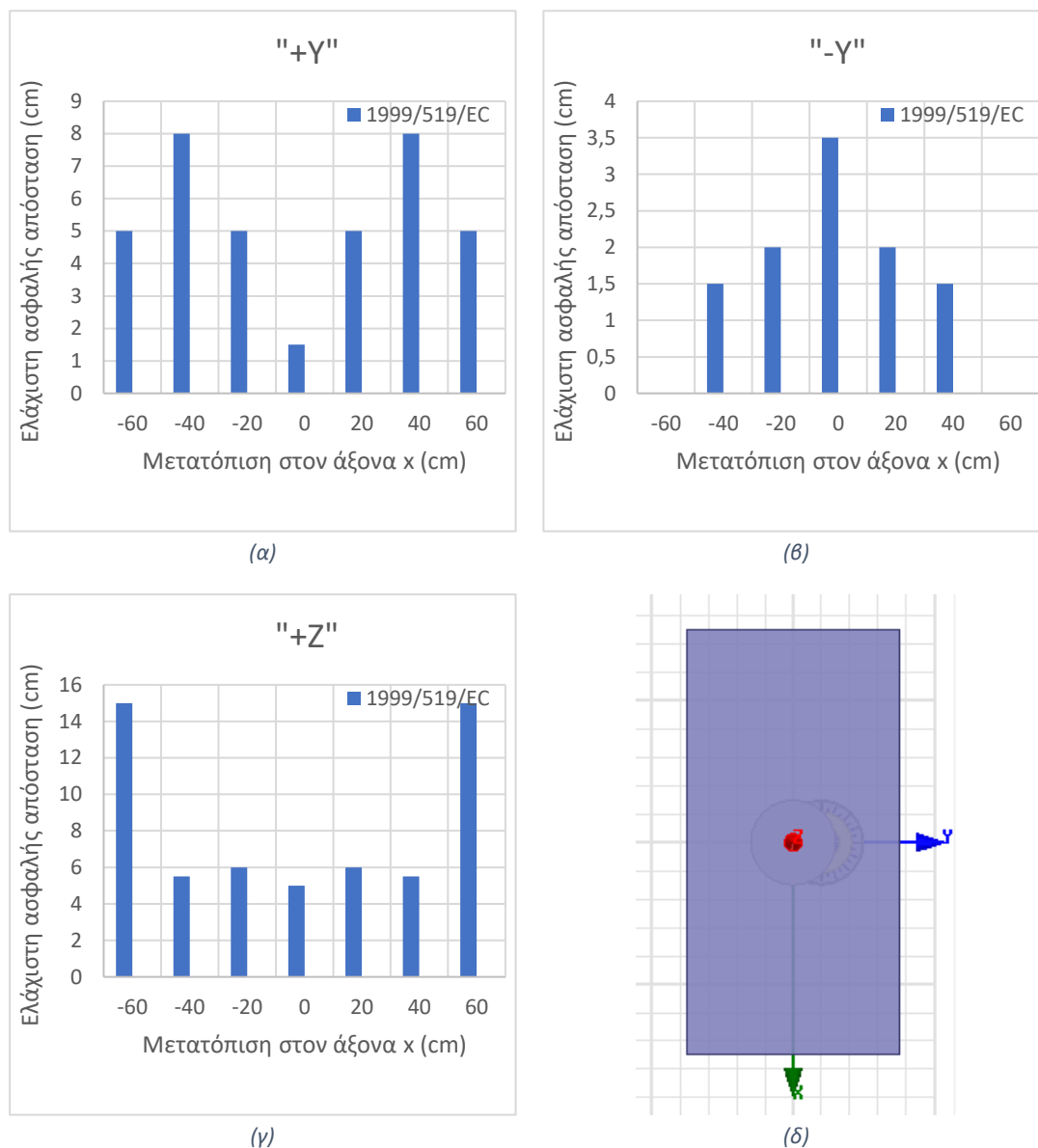
(γ)

Σχήμα 6.17: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) +Υ (β) -Υ και (γ) +Ζ για μηδενική μετατόπιση του πρωτεύοντος ως προς τον οριζόντιο άξονα. Και στα τρία σχήματα το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Σχετικά με το Σχήμα 6.17-α,β και σχετικά με τα πλαίσια του αυτοκινήτου (κατά τον άξονα γ στο Σχήμα 6.6-α) παρατηρείται ότι το ΗΜ πεδίο είναι εντός των ορίων που τίθενται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο με εξαίρεση μικρές αποστάσεις από το σασί του οχήματος. Σύμφωνα με το Σχήμα 6.17-γ, το ΗΜ πεδίο επίσης βρίσκεται εντός του ορίου του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου σε ύψος μερικών εκατοστών πάνω από το σασί.

Σχετικά με τα όρια που τίθενται από την ICNIRP, το ΗΜ πεδίο βρίσκεται εντός του ορίου για κάθε πιθανή θέση του πρωτεύοντος ως προς τον άξονα χ (Σχήμα 6.6-α), όταν εξετάζεται μηδενική οριζόντια μετατόπιση ως προς τον άξονα γ.

Έπειτα μετατοπίζεται το πρωτεύον 20cm ως προς τον οριζόντιο άξονα, δίνοντας τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 6.18):

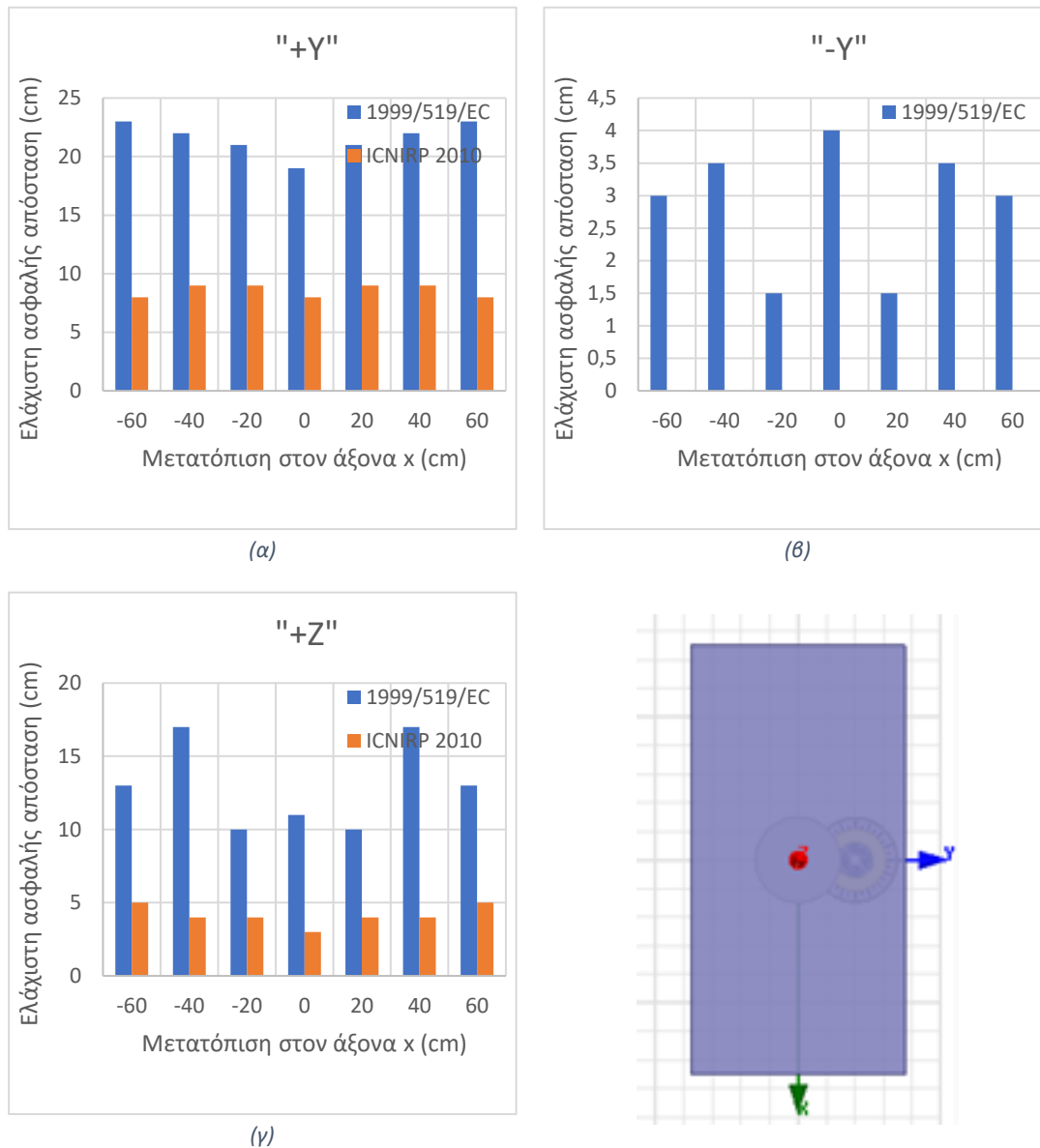


Σχήμα 6.18: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) +Y (β) -Y και (γ) +Z για μετατόπιση του πρωτεύοντος κατά 20cm ως προς τον οριζόντιο άξονα. Και στα τρία σχήματα το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Στο (δ) φαίνεται η κάτοψη της διάταξης με το πρωτεύον στη θέση  $x = 0cm$ ,  $y = 20cm$

Στην περίπτωση αυτή, καθώς μειώνεται η επικάλυψη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, αυξάνεται το εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο, συνεπώς και η ελάχιστη ασφαλής απόσταση από το άκρο του σασί. Με βάση το όριο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.18-α,β, το πεδίο που εντοπίζεται στις εξωτερικές πλαϊνές επιφάνειες του οχήματος βρίσκεται εντός του ασφαλούς ορίου σε απόσταση μερικών εκατοστών από το άκρο του σασί. Στον άξονα +Z, δηλαδή εντός της καμπίνας των επιβατών, για μετατοπίσεις μέχρι 40cm το πεδίο γίνεται ασφαλές σε μια μέση απόσταση 5cm πάνω από το σασί. Στην ακραία θέση των 60cm το πεδίο είναι ιδιαίτερα αυξημένο.

Όσον αφορά στο όριο της ICNIRP, παρά την μετατόπιση των 20cm ως προς τον άξονα  $y$ , και σε αυτή την περίπτωση το πεδίο βρίσκεται συνεχώς εντός του ασφαλούς ορίου.

Στην συνέχεια, εξετάζεται η λειτουργία του φορτιστή με το πρωτεύον μετατοπισμένο κατά 40cm στον οριζόντιο άξονα (Σχήμα 6.19).



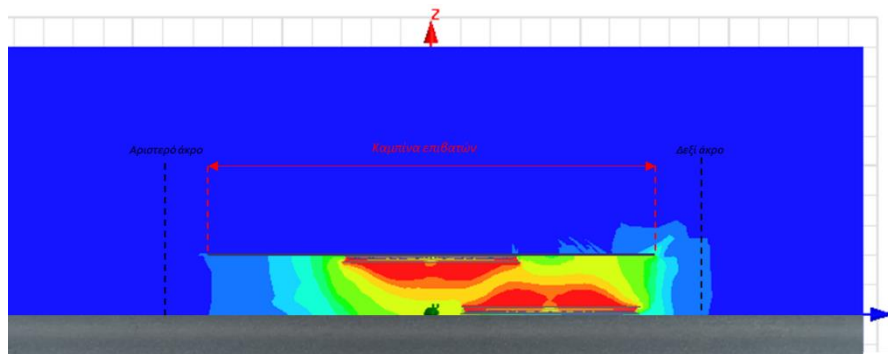
Σχήμα 6.19: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) +Y (β) -Y και (γ) +Z για μετατόπιση του πρωτεύοντος κατά 40cm ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στο σχήμα (γ) το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Στο (δ) φαίνεται η κάτωση της διάταξης με το πρωτεύον στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 40\text{cm}$

Το πεδίο σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται αρκετά, με αποτέλεσμα να απαιτούνται επιπλέον μέτρα προστασίας για την ασφαλή χρησιμοποίηση του φορτιστή. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν τις συστάσεις του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, το πεδίο που εντοπίζεται στα δεξιά του οχήματος (Σχήμα 6.6-α) γίνεται ασφαλές σε απόσταση τουλάχιστον 20cm από το άκρο του σασί για οποιαδήποτε μετατόπιση στον άξονα  $x$ , ενώ αυξημένο είναι και στο

εσωτερικό του οχήματος, με την ελάχιστη ασφαλή απόσταση να ορίζεται στα 10cm τουλάχιστον.

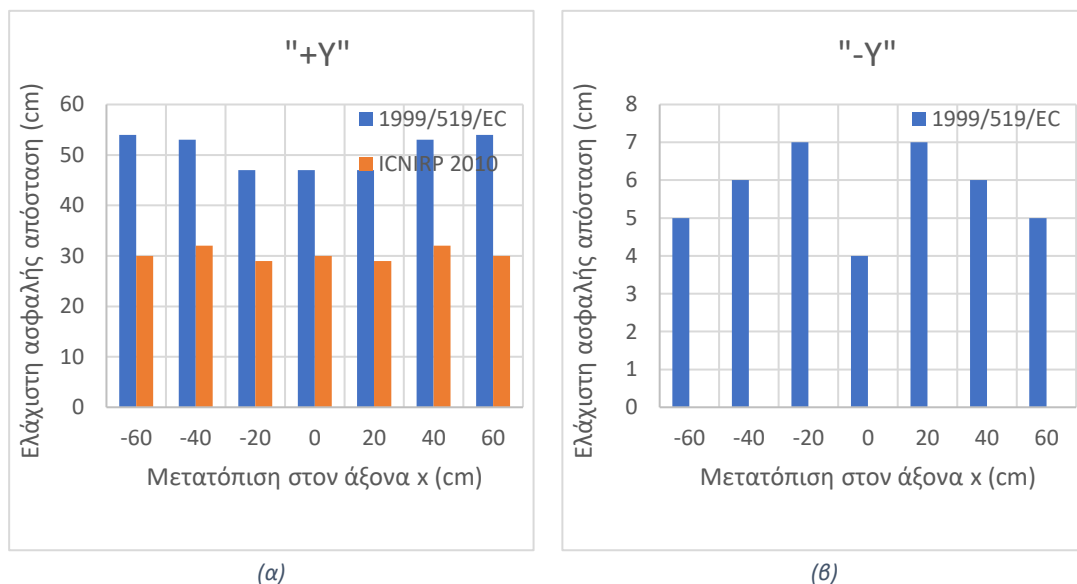
Με βάση την ICNIRP, οι αποστάσεις είναι μικρότερες, λόγω του μεγαλύτερου ορίου. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, για την ικανοποίηση του αντίστοιχου ορίου ορίζεται μια ελάχιστη ασφαλή απόσταση σε 5 εκατοστά πάνω από το σασί για τα εσωτερικά σημεία και περίπου 10 εκατοστά από τα δεξιά για τα πλαϊνά.

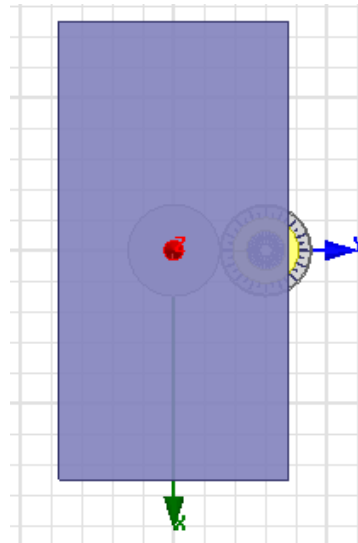
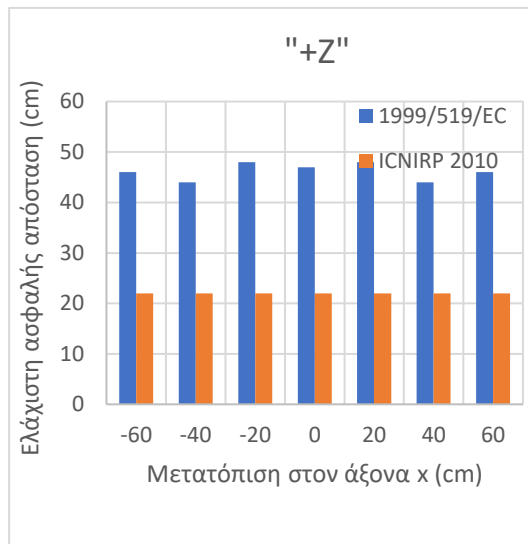
Ενδεικτικά, στο Σχήμα 6.20 φαίνεται η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στη θέση  $X = 0$  και  $Y = 40$ ., όπου υποδεικνύονται ταυτόχρονα η καμπίνα των επιβατών και οι εξωτερικές επιφάνειες του οχήματος, καθώς μεταξύ του σασί και του εξωτερικού χώρου μεσολαβεί η πόρτα.



Σχήμα 6.20: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής ως προς τον άξονα  $y$  με το πρωτεύον στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 40\text{cm}$

Τέλος, το πρωτεύον τοποθετείται στην ακραία θέση, δηλαδή 60cm από την αρχική, έχοντας τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 6.21):



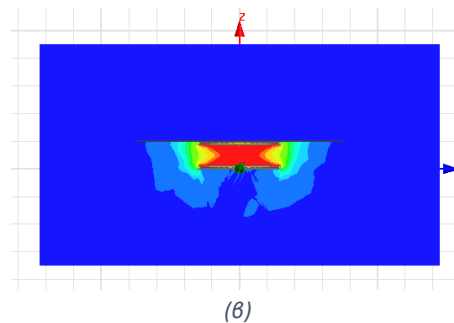
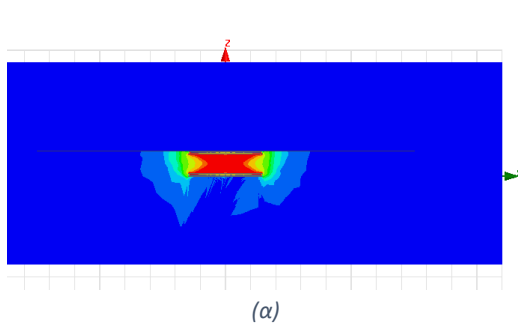


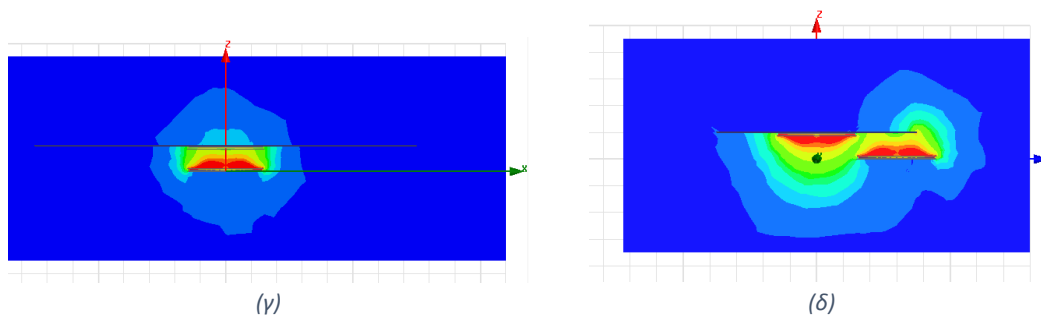
(γ)

Σχήμα 6.21: Ελάχιστη ασφαλής απόσταση στους άξονες (α) +Y (β) -Y και (γ) +Z για μετατόπιση του πρωτεύοντος κατά 60cm ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στο σχήμα (γ) το όριο της ICNIRP ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Στο (δ) φαίνεται η κάτοψη της διάταξης με το πρωτεύον στη θέση  $x = 0\text{cm}$ ,  $y = 60\text{cm}$

Δεδομένου ότι η θέση  $y = 60\text{cm}$  αποτελεί μια ακραία θέση, το πεδίο είναι απαγορευτικά αυξημένο. Η ελάχιστη απόσταση πάνω από την οποία το πεδίο γίνεται ασφαλές στο εσωτερικό του οχήματος και τον άξονα ζ (Σχήμα 6.6-α), σύμφωνα με το Σχήμα 6.21-δ ορίζεται κατά μέσο όρο στα 44cm πάνω από το σασί με βάση το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και στα 22cm πάνω από το σασί με βάση την ICNIRP. Επομένως τόσο ακραίες μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πρέπει να αποφεύγονται. Οι ελάχιστες ασφαλείς αποστάσεις στο πλάι δεξιά του οχήματος είναι επίσης ιδιαίτερα αυξημένες, μιας και όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.21-α, με βάση το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο υπολογίζονται τουλάχιστον σε 47cm και με βάση την ICNIRP σε 29cm.

Στο Σχήμα 6.22 παρουσιάζεται η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής για μηδενική μετατόπιση πρωτεύοντος σε σύγκριση με τη μετατόπιση κατά 60cm στον οριζόντιο άξονα (Σχήμα 6.21-δ). Τα επίπεδα που εξετάζονται διέρχονται από το κέντρο του πρωτεύοντος και εκτείνονται κατά μήκος και πλάτος του οχήματος.





Σχήμα 6.22: Κατανομή πυκνότητας μαγνητικής ροής στις θέσεις (α) (β)  $X = 0, Y = 0$  ως προς τον άξονα  $x$  και  $y$  και (γ) (δ)  $X = 0, Y = 60\text{cm}$  ως προς τον άξονα  $x$  και  $y$  αντίστοιχα

Παρατηρείται πως για μεγάλες μετατοπίσεις, το μαγνητικό πεδίο που εντοπίζεται στο χώρο καθίσταται ασφαλές σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το σασί είτε πάνω από αυτό είτε στο πλάι.

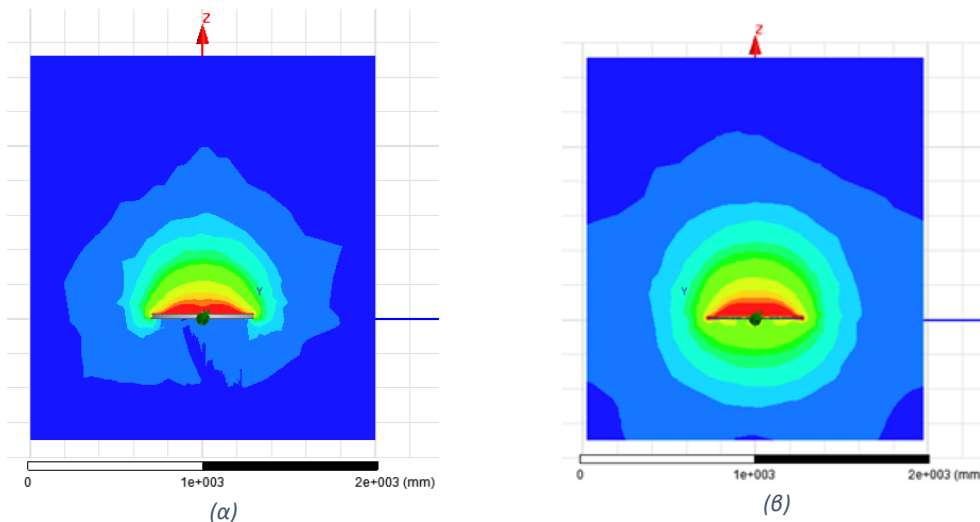
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της λειτουργίας με τον φορτιστή τοποθετημένο στο κέντρο του σασί παρουσιάζουν ομοιότητες με τα αντίστοιχα για το μπροστινό μέρος. Πιο συγκεκριμένα για εύρος μετατοπίσεων έως 30cm, είτε στον οριζόντιο άξονα, είτε στον κατακόρυφο, το πεδίο είναι ασφαλές σε απόσταση λίγων εκατοστών από το σασί με βάση το ευρωπαϊκό συμβούλιο ή για μηδενική απόσταση με βάση την ICNIRP. Σαφώς, βέβαια η τοποθέτηση στο κέντρο του οχήματος εξασφαλίζει τώρα ότι το πεδίο είναι εντός των ορίων στο πίσω και μπροστινό μέρος του οχήματος.

Ωστόσο, για μεγάλες μετατοπίσεις, όπως για 40cm ή 60cm κατά τον άξονα  $y$ , μειώνεται η επικάλυψη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύον, με αποτέλεσμα το πεδίο να λαμβάνει ιδιαίτερα αυξημένες τιμές και οι αποστάσεις στις οποίες γίνεται ασφαλές να βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 20cm.

## 6.6 Λειτουργία μόνο πρωτεύοντος

Στην ενότητα αυτή θα εξεταστεί το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω και πάνω από το πρωτεύον με την επίδραση της θωράκισης αλουμινίου. Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται το ενδεχόμενο όπου δεν υπάρχει κάποιο όχημα πάνω από το φορτιστή ή όταν ένα όχημα διέρχεται πάνω από το φορτιστή αλλά δεν διαθέτει ένα δευτερεύον πηνίο. Η σύγκριση του μαγνητικού πεδίου που προέκυψε από την ανάλυση με δινορεύματα του πρωτεύοντος με και χωρίς θωράκιση αλουμινίου φαίνεται στο Σχήμα 6.23.

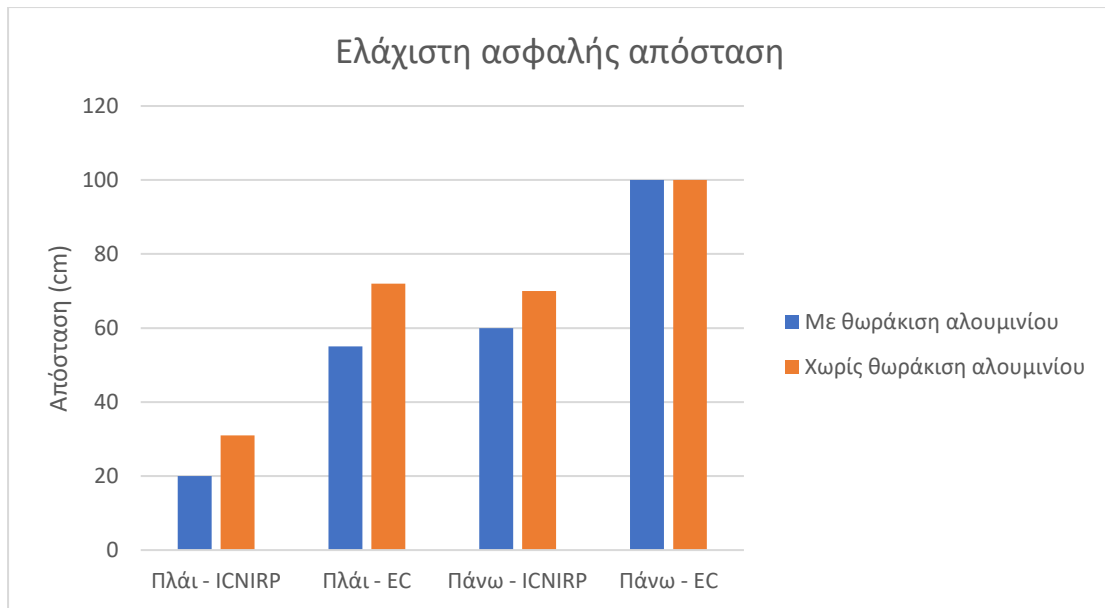
Αρχικά, εφαρμόστηκε μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 25A και υπολογίστηκε πως η ελάχιστη ασφαλής απόσταση αριστερά και δεξιά του φορτιστή βρίσκεται 55cm από το άκρο του φορτιστή με βάση το όριο που θέτει το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο και 20cm με βάση την ICNIRP. Όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση πάνω από το πρωτεύον, αυτή βρίσκεται στο 1m με βάση το όριο των 6,25μT και στα 60cm ως προς τα 27μT. Η κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής φαίνεται στο Σχήμα 6.23 (α).



Σχήμα 6.23: Λειτουργία πρωτεύοντος με ανάλυση με δινορεύματα (α) με και (β) χωρίς θωράκιση αλουμινίου

Τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων αποτυπώνονται στο Σχήμα 6.24. Η θωράκιση αλουμινίου επιτυγχάνει τον περιορισμό του πεδίου στο πλάι, καθώς η ελάχιστη ασφαλής απόσταση στο πλάι με βάση το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου μειώθηκε κατά 31%. Παρατηρείται, ωστόσο, πως το πεδίο που εντοπίζεται πάνω από το φορτιστή είτε με θωράκιση είτε χωρίς βρίσκεται εντός ασφαλών ορίων σε ιδιαίτερα μεγάλες αποστάσεις, οι οποίες στις δύο περιπτώσεις ταυτίζονται.

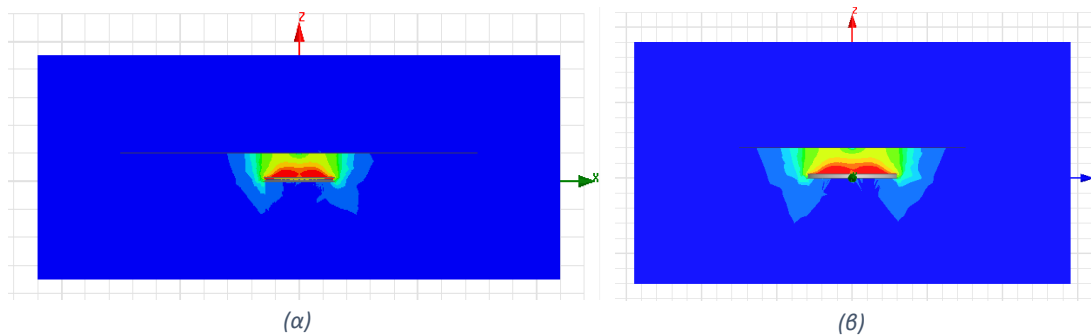
Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η θωράκιση αλουμινίου είναι απαραίτητη στη σχεδίαση ενός επαγωγικού συζεύκτη για τον περιορισμό του πεδίου που αναπτύσσεται στο πλάι και πως πρέπει να παρθούν επιπλέον μέτρα προστασίας για την μεγαλύτερη ασφάλεια των πεζών που πιθανόν διέλθουν πάνω από το πρωτεύον.



Σχήμα 6.24: Ελάχιστες ασφαλείς αποστάσεις κατά τη λειτουργία πρωτεύοντος με ή χωρίς θωράκιση

Μια δεύτερη κατάσταση η οποία πρέπει να εξεταστεί είναι η ασφάλεια των επιβατών ενός διερχόμενου αυτοκινήτου, συμβατικού ή ηλεκτρικού όταν αυτό δεν φορτίζει ή όταν διαθέτει ένα δευτερεύον πηνίο και διέρχεται πάνω από το εν λειτουργία πρωτεύον.

Η κατανομή της μαγνητικής ροής με το πρωτεύον κάτω από το κέντρο του σασί ως προς τους άξονες x και y απεικονίζεται στο Σχήμα 6.25.

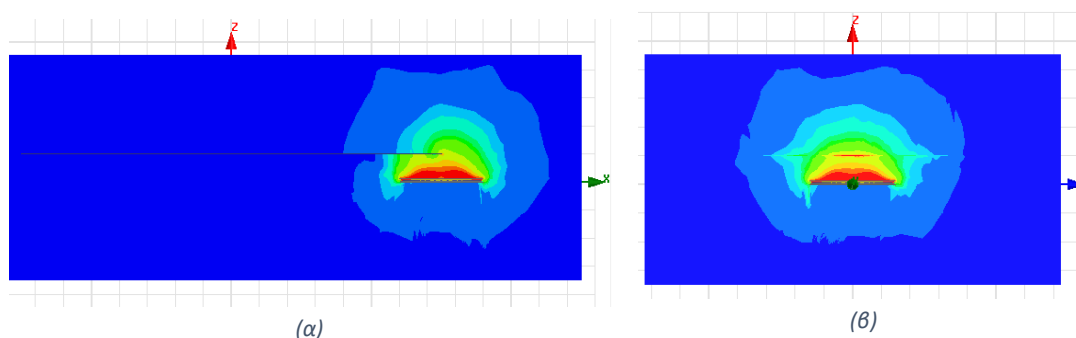


Σχήμα 6.25: Λειτουργία πρωτεύοντος στο κέντρο κάτω από το σασί ως προς τους άξονες (α) X και (β) Y

Παρατηρείται πως το πεδίο που διέρχεται στην καμπίνα των επιβατών ικανοποιεί το αυστηρότερο όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, άρα και της ICNIRP.



Στη συνέχεια θα εξεταστεί το πεδίο που αναπτύσσεται όταν η διάταξη εξέρχεται από το όχημα και βρίσκεται κατά το ήμισυ κάτω από το σασί. Οι άξονες με βάση τους οποίους θα αποτυπωθεί η κατανομή του πεδίου θα είναι οι  $x$  και  $y$  και θα διέρχονται από το κέντρο του πρωτεύοντος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.26.



Σχήμα 6.26: Λειτουργία πρωτεύοντος στο άκρο κάτω από το σασί ως προς τους άξονες (α)  $X$  και (β)  $Y$

Παρατηρείται πως αναπτύσσεται ένα ιδιαίτερα αυξημένο πεδίο στο χώρο εντός και εκτός του οχήματος. Το σασί λειτουργεί ως θωράκιση για το ήμισυ του φορτιστή, όμως οι υπόλοιπες μαγνητικές ροές που δεν καλύπτονται από το σασί διέρχονται εντός του οχήματος. Το πεδίο εντός της καμπίνας γίνεται ασφαλές σε απόσταση 65cm και 30cm από το άκρο του σασί, με βάση τα όρια του Ευρωπαϊκού συμβουλίου και της ICNIRP αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα όρια για το ύψος του πεδίου είναι 60cm και 30cm πάνω από το σασί. Είναι προφανές πως απαιτούνται επιπλέον μέτρα προστασίας για την ασφάλεια των επιβατών, όπως για παράδειγμα η απενεργοποίηση του πρωτεύοντος.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και επεκτάσεις

### 7.1 Συμπεράσματα

Η ασύρματη φόρτιση είναι μια διαδικασία, η οποία δύναται να απλοποιήσει σε μεγάλο βαθμό πτυχές της καθημερινότητας του ανθρώπου. Παρά την περιορισμένη αξιοποίηση της, τα οφέλη είναι ήδη ορατά. Αναφορικά με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, η ασύρματη φόρτιση καθιστά την διαδικασία πιο ασφαλής, καθώς επιτρέπει την πραγμάτωση της σε οποιοσδήποτε συνθήκες μέσω της αποφυγής των καλωδίων. Παράλληλα, με τη δυνατότητα φόρτισης του οχήματος καθώς κινείται στο δρόμο δύναται να αντιμετωπίσει το μεγαλύτερο πρόβλημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, που είναι η περιορισμένη αυτονομία.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν τα ΗΜ πεδία λόγω των υψίσυχων ρευμάτων λειτουργίας σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη. Η προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης έγινε στο υπολογιστικό πρόγραμμα Ansoft Maxwell, το οποίο, συν των άλλων, προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού του αναπτυσσόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσω μαγνητοστατικής επίλυσης, είτε μέσω επίλυσης με δινορεύματα, επιλογές οι οποίες εφαρμόστηκαν στην διεξαγωγή της παρούσας μελέτης.

Αρχικά μελετήθηκε η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων που αναπτύσσονται στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του συζεύκτη. Για τον περιορισμό του χρόνου των προσομοιώσεων και για τη μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων υλοποιήθηκε αρχικά μαγνητοστατική ανάλυση. Εξετάζοντας διάφορες μετατοπίσεις φάσης παρατηρήθηκε πως για μηδενική μετατόπιση φάσης αναπτυσσόταν το ελάχιστο μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, το μαγνητικό πεδίο λάμβανε τις μέγιστες τιμές για μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων ίση με 180 μοίρες. Μία ενδιαμέση κατάσταση παρατηρείται για μετατοπίσεις φάσης ίσης με 90 περίπου μοίρες, η οποία είναι μια συνηθισμένη κατάσταση, ιδιαίτερα για συστήματα στατικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την μέγιστη τιμή των ρευμάτων και παρατηρήθηκε πως μεγάλες τιμές ρευμάτων σε πρωτεύον και/ή δευτερεύον δύναται να δημιουργήσουν ΗΜ πεδία με ιδιαίτερα μεγάλες τιμές. Ωστόσο, τα ΗΜ πεδία αυτά μπορούν να περιοριστούν άμεσα με τη μείωση της τιμής των ρευμάτων σε πρωτεύον και /ή δευτερεύον. Μελετήθηκε επίσης το μαγνητικό πεδίο στο εξωτερικό του οχήματος, εξετάζοντας διάφορες θέσεις τοποθέτησης του φορτιστή στο όχημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τοποθέτηση του φορτιστή προς το κέντρο του οχήματος μπορεί να μειώσει σημαντικά τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται στο μπροστινό και πίσω μέρος του οχήματος.

Κατόπιν, ελέγχθηκε το πεδίο που αναπτύσσεται σε συνθήκες στατικής φόρτισης, όταν το πρωτεύον βρίσκεται μετατοπισμένο σε σχέση με το δευτερεύον. Διαπιστώθηκε πως σε ορισμένες θέσεις μεγάλων μετατοπίσεων αναπτύσσονται έντονα ΗΜ πεδία στο εξωτερικό του οχήματος. Ωστόσο, μπορούν να ορισθούν με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν τα

περιθώρια ανοχής σε μετατοπίσεις του φορτιστή, τα οποία επιτρέπουν την αξιοποίηση του σε εφαρμογές ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στο ίδιο πλαίσιο εξετάστηκε και η δυναμική φόρτιση, εξετάζοντας τις πιθανές θέσεις μετατοπίσεων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τόσο όταν ένα όχημα δεν καλύπτει το φορτιστή, αλλά και όταν εξετάζονται συγκεκριμένες θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή κατά τη διάρκεια της κίνησης, δύναται να αναπτυχθούν έντονα ΗΜ πεδία στο εξωτερικό του οχήματος.

Ελέγχθηκε στη συνέχεια η επίδραση του μεγέθους της διάταξης στο εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο, εξετάζοντας και πάλι διάφορες μετατοπίσεις φάσης μεταξύ ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, αλλά και τη λειτουργία σε συνθήκες οριζόντιων μετατοπίσεων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Παρατηρήθηκε πως μία απλή μείωση μόνο των διαστάσεων του δευτερεύοντος δε μειώνει σημαντικά τα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία. Αντιθέτως, με μία ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, επιτεύχθηκε σημαντική μείωση των ΗΜ πεδίων.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της θωράκισης αλουμινίου του συζεύκτη στα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία. Η μελέτη αυτή υλοποιήθηκε με την ανάλυση δινορευμάτων, η οποία αν και αυξάνει το χρόνο των προσομοιώσεων, δεν μπορεί, ωστόσο να αποφευχθεί στην περίπτωση αυτή λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων στη θωράκιση αλουμινίου. Η θωράκιση αλουμινίου δύναται να μειώσει σημαντικά το εκπεμπόμενο ΗΜ πεδίο γύρω από το συζεύκτη και φαίνεται να είναι απαραίτητη σε συνθήκες επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Εξετάστηκε, επίσης, η επίδραση του σασί του οχήματος στο ΗΜ πεδίο που παρατηρείται εντός του οχήματος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το σασί του οχήματος δύναται να περιορίσει σημαντικά τα ΗΜ πεδία στο εσωτερικό του οχήματος για τις περισσότερες θέσεις οριζόντιας μετατόπισης. Ένα έντονο ΗΜ πεδίο, ωστόσο, παρατηρείται σε ακραίες θέσεις μετατοπίσεων. Οι θέσεις αυτές μπορούν να αποφευχθούν στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, ορίζοντας κατάλληλα την περιοχή λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, όπου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι θέσεις κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, επιπλέον μέτρα θα πρέπει να ληφθούν για τη λειτουργία του συστήματος στις ακραίες αυτές θέσεις, όπου το ΗΜ πεδίο είναι έντονο.

## 7.2 Επεκτάσεις

Κάποια θέματα τα οποία μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω είναι τα εξής:

- Η ανάλυση των ΗΜ πεδίων σε επιπλέον διατάξεις. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκε η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη, η οποία φαίνεται να είναι μία αρκετά διαδεδομένη διάταξη σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, απαντώνται στη βιβλιογραφία και επιπλέον διατάξεις, όπως για παράδειγμα τετραγωνικές διατάξεις δύο ή και περισσότερων πηνίων. Μία παρόμοια μελέτη των ΗΜ πεδίων σε τέτοιες διατάξεις και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

- Μελέτη συστημάτων ελέγχου για τον περιορισμό των ΗΜ πεδίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα ΗΜ πεδία σε μία διάταξη επαγωγικής φόρτισης επηρεάζονται σημαντικά από τη μετατόπιση φάσης μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, αλλά και από τις τιμές καθαυτές των ρευμάτων. Συστήματα ελέγχου, επομένως, θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, τα οποία ελέγχουν κατάλληλα τη φάση και/ή την τιμή των ρευμάτων ώστε να περιορίσουν τα ΗΜ πεδία.
- Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τα ΗΜ πεδία σε μία διάταξη επαγωγικής φόρτισης με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος Maxwell. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων

## Αναφορές

- [1] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%BF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%BF).
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32016D1841>.
- [3] A. Lorico, J. Taiber, T. Yanni, “Effect of Inductive Power Technology Systems on Battery-Electric Vehicle Design”, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Nov. 2011.
- [4] Siqi Li and Chunting Chris Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications”, Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of (early access articles).
- [5] G. A. Covic and J. T. Boys, “Inductive power transfer,” Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1–14, Jun. 2013.
- [6] Klontz K.W., Esser A., Bacon R.R., Divan D.M., Novotny D.W., Lorenz R.D., “An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface”, Power Conversion Conference, 1993 Yokohama, Page(s): 227 – 232.
- [7] Severns R., Yeow E., Woody G., Hall J., Hayes J., “An ultra-compact transformer for a 100 W to 120 kW inductive coupler for electric vehicle battery charging” Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings, Eleventh Annual Volume: 1, Page(s): 32 - 38 vol.1.
- [8] D. A. G. Pedder, A. D. Brown, and J. A. Skinner, "A contactless electrical energy transmission system," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 23-30, 1999.
- [9] Chwei-Sen Wang, Stielau O.H., Covic G.A., “Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 52, Issue: 5, 2005, Page(s): 1308 – 1314.
- [10] Takanashi H., Sato Y., Kaneko Y., Abe S., Yasuda T., "A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, Page(s): 269 – 274.
- [11] Covic G.A., Boys J.T., Kissin M.L.G., Lu H.G., “A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 54, Issue: 6, 2007, Page(s): 3370 – 3378.
- [12] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," in Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, 2010, pp. 807-813.
- [13] G. A. J. Elliot, J. T. Boys, and G. A. Covic, "A Design Methodology for Flat Pick-up ICPT Systems," in Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on, 2006, pp. 1-7.
- [14] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems,” IEEE Transactions on Power Electronics. vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, Nov. 2011.
- [15] Covic G.A., Boys J.T., “Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications”, Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of, Volume: 1, Issue: 1, 2013, Page(s): 28 – 41.

- [16]M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and H. Chang-Yu, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 318-328, 2013.
- [17]G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011*, pp. 1832-1838.
- [18]M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, and H. Chang-Yu, "Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011*, pp. 614-621.
- [19]H. Jin, L. Wooyoung, C. Gyu-Hyeong, L. Byunghun, and R. Chun-Taek, "Characterization of novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011*, pp. 1975-1979.
- [20]J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 3666-3679, 2011.
- [21]T. E. Stamati and P. Bauer, "On-road charging of electric vehicles", in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE, 2013*, pp. 1-8.
- [22]S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and C. T. Rim, "New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 5832-5841, 2013.
- [23]J. Young Jae, K. Young Dae, and J. Seungmin, "Optimal design of the wireless charging electric vehicle", in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012*, pp. 1-5.
- [24]G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, B. S. Riar, and A. Sondhi, "Design of a double coupled IPT EV highway", in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013*, pp. 4606-4611.
- [25]K. Lee, Z. Pantic, and S. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. PP, pp. 1- 1, 2013.
- [26]J. L. Villa, J. Sallan, J. F. Sanz Osorio, and A. Llombart, "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 945-951, 2012.
- [27]Chwei-Sen Wang, Grant A. Covic, Oskar H. Stielau, "Investigating an LCL Load Resonant Inverter for Inductive Power Transfer Applications", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 19, No. 4, pp. 995-1002, July 2004.
- [28]S. Li, W. Li, J. Deng, T.D. Nguyen, C.C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer", *IEEE Trans. Vehi. Techn.*, vol. 64, pp. 2261-2273, 2015.
- [29]W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li and C. C. Mi, "Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4429-4439, June 2016.
- [30]G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer", *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1-14, Jun. 2013.

- [31]Y. H. Chao, J. J. Shieh, C.-T. Pan, W.-C. Shen, and M.-P. Chen, "A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems," in Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Appl., May 2007, pp. 2322–2327.
- [32]ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300GHz), PUBLISHED IN HEALTHPHYSICS 74(4):494-522;1998  
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>.
- [33]ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (1-100kHz), PUBLISHED IN: HEALTH PHYSICS 99(6):818-836, 2010:  
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>.
- [34]Council recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz):  
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:199:0059:0070:EN:PDF>.
- [35]DIRECTIVE 2004/40/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC)  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0040&from=EN>.
- [36]Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields).  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0035&from=EN>
- [37]AAMI/ISO 14117-2012 Annex M: Active implantable medical devices - Electromagnetic compatibility - EMC test protocols.
- [38]ANSYS Maxwell: <https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell>.
- [39]Tobias Diekhans; Rik W. De Doncker: "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 11, Nov. 2015
- [40]E. Gati; G. Kampitsis; S. Manias, "Variable Frequency Controller for Inductive Power Transfer in Dynamic Conditions", IEEE Trans. Power Electron., 2016
- [41]J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C.-T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for on-line electrical vehicles (OLEV)," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, Dec. 2011
- [42]J. Shin; S. Shin; Y. Kim; S. Ahn; S. Lee; G. Jung; S.-Jeub Jeon; D.-Ho Cho: "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, Issue 3, March 2014
- [43]F C.S. Wang; G.A. Covic; O.H. Stielau, "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", IEEE Trans. Ind. El., Vol. 51 no.1 pp.148-157, 2004

## Παράρτημα

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, με βάση τα οποία κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα και δεν παρουσιάστηκαν κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής.

### Μετρήσεις 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Percent error (%)	Χρόνος (min)	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)		
		20cm	50cm	70cm
1	12	19,700	2,594	0,987
0,5	19	21,314	2,483	0,968
0,4	26	21,343	2,361	0,971
0,3	32	21,893	2,268	0,961
0,2	59	21,768	2,303	0,814
0,1	112	22,129	2,375	0,806

### Μετρήσεις 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Για τα Σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8:

Μετατόπιση Φάσης (°)	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)		
	20cm	50cm	70cm
0	22,94	2,48	0,85
30	24,99	5,85	3,22
60	48,95	11,65	6,40
90	66,93	15,91	8,76
120	84,77	20,17	11,09
150	91,34	21,74	11,97
180	97,89	23,29	12,81
210	91,34	21,74	11,97
240	84,77	20,17	11,09
270	66,93	15,91	8,76
300	48,95	11,65	6,40
330	24,99	5,85	3,22
360	18,92	2,035	0,697



Για τις μετατόπισης φάσης έχουμε ξεχωριστά:

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	12,5	9,457	1,018	0,348
1,96	21,65	21,65	16,380	1,762	0,603
2,94	25	25	22,938	2,482	0,845
3,92	21,65	21,65	16,380	1,762	0,603
4,90	12,5	12,5	9,457	1,018	0,348
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	-12,5	9,457	1,018	0,348
7,84	-21,65	-21,65	16,380	1,762	0,603
8,82	-25	-25	22,938	2,482	0,845
9,80	-21,65	-21,65	16,380	1,762	0,603
10,78	-12,5	-12,5	9,457	1,018	0,348
11,76	0	0	0	0	0

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 30°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	12,5	24,988	5,848	3,217
0,98	12,5	21,65	22,265	4,564	2,447
1,96	21,65	25	18,886	2,534	1,173
2,94	25	21,65	18,847	2,499	1,112
3,92	21,65	12,5	22,253	4,564	2,435
4,90	12,5	0	24,879	5,847	3,208
5,88	0	-12,5	24,988	5,848	3,217
6,86	-12,5	-21,65	22,265	4,564	2,447
7,84	-21,65	-25	18,886	2,534	1,173
8,82	-25	-21,65	18,847	2,499	1,112
9,80	-21,65	-12,5	22,253	4,564	2,435
10,78	-12,5	0	24,879	5,847	3,208
11,76	0	12,5	24,988	5,848	3,217

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 60°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	21,65	43,279	10,128	5,572
0,98	12,5	25	28,525	6,101	3,303
1,96	21,65	21,65	16,380	1,762	0,603
2,94	25	12,5	28,515	6,117	3,291
3,92	21,65	0	43,101	10,126	5,556
4,90	12,5	-12,5	48,945	11,647	6,404
5,88	0	-21,65	43,279	10,128	5,572
6,86	-12,5	-25	28,525	6,101	3,303
7,84	-21,65	-21,65	16,380	1,762	0,603
8,82	-25	-12,5	28,515	6,117	3,291
9,80	-21,65	0	43,101	10,126	5,556
10,78	-12,5	12,5	48,945	11,647	6,404
11,76	0	21,65	43,279	10,128	5,572

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 90°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	25	49,976	11,695	6,434
0,98	12,5	21,65	22,265	4,564	2,447
1,96	21,65	12,5	22,253	4,564	2,435
2,94	25	0	49,758	11,689	6,416
3,92	21,65	-12,5	66,838	15,890	8,756
4,90	12,5	-21,65	66,933	15,907	8,757
5,88	0	-25	49,976	11,695	6,434
6,86	-12,5	-21,65	22,265	4,564	2,447
7,84	-21,65	-12,5	22,253	4,564	2,435
8,82	-25	0	49,758	11,689	6,416
9,80	-21,65	12,5	66,838	15,890	8,756
10,78	-12,5	21,65	66,933	15,907	8,757
11,76	0	25	49,976	11,695	6,434

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 120°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	21,65	43,279	10,128	5,572
0,98	12,5	12,5	9,457	1,018	0,348
1,96	21,65	0	43,101	10,126	5,556
2,94	25	-12,5	73,622	17,493	9,629
3,92	21,65	-21,65	84,773	20,173	11,091
4,90	12,5	-25	73,597	17,473	9,625
5,88	0	-21,65	43,279	10,128	5,572
6,86	-12,5	-12,5	9,457	1,018	0,348
7,84	-21,65	0	43,101	10,126	5,556
8,82	-25	12,5	73,622	17,493	9,629
9,80	-21,65	21,65	84,773	20,173	11,091
10,78	-12,5	25	73,597	17,473	9,625
11,76	0	21,65	43,279	10,128	5,572

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 150°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	12,5	24,988	5,848	3,217
0,98	12,5	0	24,879	5,847	3,208
1,96	21,65	-12,5	66,838	15,890	8,756
2,94	25	-21,65	91,340	21,744	11,974
3,92	21,65	-25	91,315	21,724	11,961
4,90	12,5	-21,65	66,933	15,907	8,757
5,88	0	-12,5	24,988	5,848	3,217
6,86	-12,5	0	24,879	5,847	3,208
7,84	-21,65	12,5	66,838	15,890	8,756
8,82	-25	21,65	91,340	21,744	11,974
9,80	-21,65	25	91,315	21,724	11,961
10,78	-12,5	21,65	66,933	15,907	8,757
11,76	0	12,5	24,988	5,848	3,217

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 180°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	-12,5	48,945	11,647	6,404
1,96	21,65	-21,65	84,773	20,173	11,091
2,94	25	-25	97,890	23,294	12,808
3,92	21,65	-21,65	84,773	20,173	11,091
4,90	12,5	-12,5	48,945	11,647	6,404
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	12,5	48,945	11,647	6,404
7,84	-21,65	21,65	84,773	20,173	11,091
8,82	-25	25	97,890	23,294	12,808
9,80	-21,65	21,65	84,773	20,173	11,091
10,78	-12,5	12,5	48,945	11,647	6,404
11,76	0	0	0	0	0

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 210°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	-12,5	24,988	5,848	3,217
0,98	12,5	-21,65	66,933	15,907	8,757
1,96	21,65	-25	91,315	21,724	11,961
2,94	25	-21,65	91,340	21,744	11,974
3,92	21,65	-12,5	66,838	15,890	8,756
4,90	12,5	0	24,879	5,847	3,208
5,88	0	12,5	24,988	5,848	3,217
6,86	-12,5	21,65	66,933	15,907	8,757
7,84	-21,65	25	91,315	21,724	11,961
8,82	-25	21,65	91,340	21,744	11,974
9,80	-21,65	12,5	66,838	15,890	8,756
10,78	-12,5	0	24,879	5,847	3,208
11,76	0	-12,5	24,988	5,848	3,217

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 240°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	-21,65	43,279	10,128	5,572
0,98	12,5	-25	73,597	17,473	9,625
1,96	21,65	-21,65	84,773	20,173	11,091
2,94	25	-12,5	73,622	17,493	9,629
3,92	21,65	0	43,101	10,126	5,556
4,90	12,5	12,5	9,457	1,018	0,348
5,88	0	21,65	43,279	10,128	5,572
6,86	-12,5	25	73,597	17,473	9,625
7,84	-21,65	21,65	84,773	20,173	11,091
8,82	-25	12,5	73,622	17,493	9,629
9,80	-21,65	0	43,101	10,126	5,556
10,78	-12,5	-12,5	9,457	1,018	0,348
11,76	0	-21,65	43,279	10,128	5,572

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 270°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	-25	49,976	11,695	6,434
0,98	12,5	-21,65	66,933	15,907	8,757
1,96	21,65	-12,5	66,838	15,890	8,756
2,94	25	0	49,758	11,689	6,416
3,92	21,65	12,5	22,253	4,564	2,435
4,90	12,5	21,65	22,265	4,564	2,447
5,88	0	25	49,976	11,695	6,434
6,86	-12,5	21,65	66,933	15,907	8,757
7,84	-21,65	12,5	66,838	15,890	8,756
8,82	-25	0	49,758	11,689	6,416
9,80	-21,65	-12,5	22,253	4,564	2,435
10,78	-12,5	-21,65	22,265	4,564	2,447
11,76	0	-25	49,976	11,695	6,434

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 300°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	-21,65	43,279	10,128	5,572
0,98	12,5	-12,5	48,945	11,647	6,404
1,96	21,65	0	43,101	10,126	5,556
2,94	25	12,5	28,515	6,117	3,291
3,92	21,65	21,65	16,380	1,762	0,603
4,90	12,5	25	28,525	6,101	3,303
5,88	0	21,65	43,279	10,128	5,572
6,86	-12,5	12,5	48,945	11,647	6,404
7,84	-21,65	0	43,101	10,126	5,556
8,82	-25	-12,5	28,515	6,117	3,291
9,80	-21,65	-21,65	16,380	1,762	0,603
10,78	-12,5	-25	28,525	6,101	3,303
11,76	0	-21,65	43,279	10,128	5,572

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 330°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	-12,5	24,988	5,848	3,217
0,98	12,5	0	24,879	5,847	3,208
1,96	21,65	12,5	22,253	4,564	2,435
2,94	25	21,65	18,847	2,499	1,112
3,92	21,65	25	18,886	2,534	1,173
4,90	12,5	21,65	22,265	4,564	2,447
5,88	0	12,5	24,988	5,848	3,217
6,86	-12,5	0	24,879	5,847	3,208
7,84	-21,65	-12,5	22,253	4,564	2,435
8,82	-25	-21,65	18,847	2,499	1,112
9,80	-21,65	-25	18,886	2,534	1,173
10,78	-12,5	-21,65	22,265	4,564	2,447
11,76	0	-12,5	24,988	5,848	3,217

Για τα Σχήματα 3.12, 3.13 και 3.14:

I <sub>max</sub> (A)	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)			I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροή (μΤ)		
	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	20cm	50cm	70cm			20cm	50cm	70cm
5	5	5	3,779	0,407	0,138	2,5	-4,33	13,396	3,180	1,750
10	10	10	7,558	0,814	0,276	5	-8,66	26,792	6,360	3,501
15	15	15	11,337	1,221	0,414	7,5	-12,99	40,187	9,540	5,251
20	20	20	15,116	1,629	0,552	10	-17,32	53,583	12,719	7,001
25	25	25	18,895	2,036	0,690	12,5	-21,65	66,979	15,899	8,751
30	30	30	22,674	2,443	0,828	15	-25,98	80,375	19,079	10,502

I <sub>max</sub> (A)	Μετατόπιση Φάσης 180°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)		
	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	20cm	50cm	70cm
5	5	-5	19,574	4,656	2,562
10	10	-10	39,149	9,312	5,125
15	15	-15	58,723	13,968	7,687
20	20	-20	78,298	18,624	10,249
25	25	-25	97,872	23,280	12,811
30	30	-30	117,41	27,937	15,382

Για τα Σχήματα 3.16 και 3.18:

Απόσταση (cm)	Πλάι (μΤ)
5	190,04
10	107,80
20	47,648
30	26,893
40	17,340
50	12,200
60	9,131
70	6,379

Ύψος (cm)	Πάνω (μΤ)
5	2688,8
10	1537,1
20	607,52
30	258,09
40	123,94
50	66,035
60	38,084
70	23,264
80	14,385
90	9,382
100	6,254

## Μετρήσεις 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Για το Σχήμα 4.2:

<b>y = 0cm</b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)			
	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μετατόπιση Φάσης 90°	
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
-60	10,952	5,996	13,131	13,930
-40	9,306	4,025	13,841	14,816
-20	6,486	2,000	15,342	15,731
0	1,673	0,805	18,759	16,404
+20	14,785	2,340	26,875	16,593
+40	94,663	4,425	67,643	16,222
+60	402,65	6,079	215,19	14,345

<b>y = 0cm</b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)	
	Μετατόπιση Φάσης 180°	
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι
-60	16,369	19,406
-40	17,845	21,223
-20	20,858	22,820
0	27,267	23,904
+20	43,245	24,462
+40	124,10	23,872
+60	423,55	20,120

Για το Σχήμα 4.4:

<b>y = 20cm</b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)					
	Μετατόπιση Φάσης 0°			Μετατόπιση Φάσης 90°		
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	11,027	7,754	15,338	13,090	12,554	17,478
-40	9,532	6,646	13,083	13,794	13,030	19,301
-20	7,075	5,524	10,688	15,147	13,512	20,768
0	3,589	4,851	9,702	18,209	13,872	21,614
+20	16,521	5,210	11,757	25,893	14,027	22,101
+40	96,097	6,284	14,643	66,019	14,100	21,834
+60	405,54	7,571	12,784	218,19	12,973	18,250



$y = 20\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	16,279	16,649	28,487
-40	17,747	17,515	30,772
-20	20,506	18,379	32,711
0	26,471	19,008	34,143
+20	42,008	19,598	35,238
+40	125,00	20,121	35,523
+60	425,03	17,505	28,918

Για το Σχήμα 4.6:

$y = 40\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	11,400	8,893	48,389	12,937	11,783	31,711
-40	10,254	8,267	46,173	13,586	12,115	33,869
-20	8,523	7,704	43,578	14,645	12,320	35,713
0	6,448	7,372	42,289	16,867	12,547	36,734
+20	20,044	7,448	43,235	23,369	12,735	36,375
+40	100,21	7,937	45,465	62,306	12,754	35,123
+60	410,56	8,685	42,886	215,04	12,025	30,189

$y = 40\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	15,969	14,962	58,972
-40	17,332	15,569	61,490
-20	19,696	16,098	63,755
0	24,604	16,592	64,928
+20	38,702	16,859	64,284
+40	117,40	16,948	62,689
+60	423,07	15,527	55,327

Για το Σχήμα 4.8:

$\gamma = 60\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	11,791	9,671	500,85	12,778	11,369	256,89
0	9,290	8,834	487,86	15,633	11,894	257,77
+60	409,98	9,533	480,92	210,64	11,477	247,78

$\gamma = 60\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-60	15,686	14,093	517,28
0	22,724	15,179	507,36
+60	416,53	14,362	489,49

Για το Σχήμα 4.11:

$\gamma = 0\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$	Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πλάι	Πλάι	Πλάι
-70	7,018	13,461	18,915
-60	5,996	13,930	19,406
-50	5,469	14,398	20,598
-40	4,025	14,816	21,223
-30	3,537	15,307	22,132
-20	2,000	15,731	22,820
-10	1,392	16,139	23,468
0	0,805	16,404	23,904
+10	1,440	16,542	24,258
+20	2,340	16,593	24,462
+30	4,366	16,697	24,953
+40	4,425	16,222	23,872
+50	5,360	15,833	23,562
+60	6,079	14,345	20,120
+70	7,073	13,449	18,722

## Μετρήσεις 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Για τις μετατόπισης φάσης έχουμε ξεχωριστά:

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	12,5	20,905	5,072	2,818
1,96	21,65	21,65	36,208	8,785	4,881
2,94	25	25	41,811	10,145	5,636
3,92	21,65	21,65	36,208	8,785	4,881
4,90	12,5	12,5	20,905	5,072	2,818
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	-12,5	20,905	5,072	2,818
7,84	-21,65	-21,65	36,208	8,785	4,881
8,82	-25	-25	41,811	10,145	5,636
9,80	-21,65	-21,65	36,208	8,785	4,881
10,78	-12,5	-12,5	20,905	5,072	2,818
11,76	0	0	0	0	0

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 90°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	25	6,185	1,607	0,907
0,98	12,5	21,65	18,868	4,501	2,494
1,96	21,65	12,5	38,274	9,345	5,201
2,94	25	0	47,522	11,695	6,524
3,92	21,65	-12,5	44,035	10,909	6,097
4,90	12,5	-21,65	28,766	7,206	4,033
5,88	0	-25	6,185	1,607	0,907
6,86	-12,5	-21,65	18,868	4,501	2,494
7,84	-21,65	-12,5	38,274	9,345	5,201
8,82	-25	0	47,522	11,695	6,524
9,80	-21,65	12,5	44,035	10,909	6,097
10,78	-12,5	21,65	28,766	7,206	4,033
11,76	0	25	6,185	1,607	0,907

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 180°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	-12,5	26,654	6,632	3,708
1,96	21,65	-21,65	46,153	11,478	6,415
2,94	25	-25	53,294	13,254	7,408
3,92	21,65	-21,65	46,153	11,478	6,415
4,90	12,5	-12,5	26,654	6,632	3,708
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	12,5	26,654	6,632	3,708
7,84	-21,65	21,65	46,153	11,478	6,415
8,82	-25	25	53,294	13,254	7,408
9,80	-21,65	21,65	46,153	11,478	6,415
10,78	-12,5	12,5	26,654	6,632	3,708
11,76	0	0	0	0	0

Για το Σχήμα 5.9:

Μετατόπιση Φάσης (°)	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	20cm	50cm	70cm
0	41,811	10,145	5,636
90	47,522	11,695	6,524
180	53,294	13,254	7,408

Για το Σχήμα 5.14:

y = 0cm	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Μετατόπιση Φάσης 0°		Μετατόπιση Φάσης 90°	
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
-45	2,346	10,288	4,048	11,448
-20	5,735	10,030	7,519	11,568
0	11,648	10,339	13,589	12,000
+20	28,926	12,035	30,801	13,511
+45	203,95	14,091	205,65	15,283

$y = 0\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )	
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$	
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι
-45	5,831	12,617
-20	9,320	13,120
0	15,498	13,708
+20	32,628	15,007
+45	207,13	16,591

Για το Σχήμα 5.15:

$y = 20\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-20	5,994	5,239	20,827	7,568	6,723	22,366
0	11,841	5,547	21,011	13,558	7,173	22,662
+20	28,959	7,063	22,542	30,664	8,389	24,084

$y = 20\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-20	9,239	8,273	23,915
0	15,288	8,788	24,340
+20	32,407	9,876	25,678

Για το Σχήμα 5.16:

$y = 45\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-45	3,793	2,694	81,109	4,667	3,708	82,054
0	12,914	2,842	80,213	14,110	4,288	81,627
+45	202,82	5,181	78,681	204,05	6,299	79,785

$y = 45\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-45	5,831	5,043	82,641
0	15,305	5,832	82,724
+45	204,54	7,531	80,512

Για τα Σχήματα 5.22, 5.23 και 5.24.

Μετατόπιση Φάσης ( $^\circ$ )	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	20cm	50cm	70cm
0	27,751	1,958	0,596
90	51,886	9,415	4,934
180	75,552	13,775	7,228

Για τις μετατόπισης φάσης έχουμε ξεχωριστά:

Χρόνος ( $\mu\text{s}$ )	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	12,5	13,876	0,979	0,298
1,96	21,65	21,65	24,033	1,696	0,516
2,94	25	25	27,751	1,958	0,596
3,92	21,65	21,65	24,033	1,696	0,516
4,90	12,5	12,5	13,876	0,979	0,298
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	-12,5	13,876	0,979	0,298
7,84	-21,65	-21,65	24,033	1,696	0,516
8,82	-25	-25	27,751	1,958	0,596
9,80	-21,65	-21,65	24,033	1,696	0,516
10,78	-12,5	-12,5	13,876	0,979	0,298
11,76	0	0	0	0	0

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 90°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	25	40,554	6,991	3,640
0,98	12,5	21,65	23,578	2,947	1,440
1,96	21,65	12,5	23,509	2,921	1,413
2,94	25	0	40,185	6,935	3,604
3,92	21,65	-12,5	51,840	9,405	4,915
4,90	12,5	-21,65	51,886	9,415	4,934
5,88	0	-25	40,554	6,991	3,640
6,86	-12,5	-21,65	23,578	2,947	1,440
7,84	-21,65	-12,5	23,509	2,921	1,413
8,82	-25	0	40,185	6,935	3,604
9,80	-21,65	12,5	51,940	9,430	4,945
10,78	-12,5	21,65	51,886	9,415	4,934
11,76	0	25	40,554	6,991	3,640

Χρόνος (μs)	Μετατόπιση Φάσης 180°		Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)		
	I1 (A)	I2 (A)	20cm	50cm	70cm
0,00	0	0	0	0	0
0,98	12,5	-12,5	37,776	6,888	3,614
1,96	21,65	-21,65	65,428	11,929	6,259
2,94	25	-25	75,552	13,775	7,228
3,92	21,65	-21,65	65,428	11,929	6,259
4,90	12,5	-12,5	37,776	6,888	3,614
5,88	0	0	0	0	0
6,86	-12,5	12,5	37,776	6,888	3,614
7,84	-21,65	21,65	65,428	11,929	6,259
8,82	-25	25	75,552	13,775	7,228
9,80	-21,65	21,65	65,428	11,929	6,259
10,78	-12,5	12,5	37,776	6,888	3,614
11,76	0	0	0	0	0

Για τα Σχήματα 5.26 και 5.27:

Απόσταση (cm)	Πλάι (μT)	Πάνω (μT)
10	122,26	1074,5
20	40,030	252,39
30	18,858	88,090
40	10,822	38,961
50	7,017	19,937
60	4,956	11,207
70	3,724	6,226

Για το Σχήμα 5.32:

$y = 0\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$		Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$	
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
-30	4,078	1,150	6,541	5,175
-20	3,329	0,826	6,902	5,295
-10	2,221	0,432	7,470	5,434
0	0,699	0,174	8,417	5,552
+10	2,436	0,551	9,980	5,658
+20	8,379	1,218	12,804	5,775
+30	21,394	1,906	19,038	5,914

$y = 0\text{cm}$	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)	
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$	
Μετατόπιση στον άξονα x (cm)	Πίσω	Πλάι
-30	8,521	7,460
-20	9,261	7,658
-10	10,403	7,904
0	12,220	8,114
+10	15,264	8,346
+20	20,932	8,656
+30	33,54	8,955



Για το Σχήμα 5.33:

<b><math>y = 20\text{cm}</math></b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-20	3,643	1,958	3,536	6,816	4,566	6,808
0	1,850	1,672	3,260	8,125	4,705	7,140
+20	9,489	1,728	4,364	12,094	4,871	7,471

<b><math>y = 20\text{cm}</math></b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-20	9,097	6,190	10,780
0	11,781	6,474	11,314
+20	20,021	6,832	12,036

Για το Σχήμα 5.34:

<b><math>y = 30\text{cm}</math></b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )					
	Μετατόπιση Φάσης $0^\circ$			Μετατόπιση Φάσης $90^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-30	4,429	2,501	7,130	6,406	4,288	8,024
0	2,615	2,183	6,598	7,864	4,453	8,643
+30	23,132	2,225	83,156	17,538	4,668	9,272

<b><math>y = 30\text{cm}</math></b>	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mu\text{T}$ )		
	Μετατόπιση Φάσης $180^\circ$		
Μετατόπιση στον άξονα $x$ (cm)	Πίσω	Πλάι αριστερά	Πλάι δεξιά
-30	8,271	5,630	13,503
0	11,366	5,966	14,344
+30	31,680	6,460	15,716

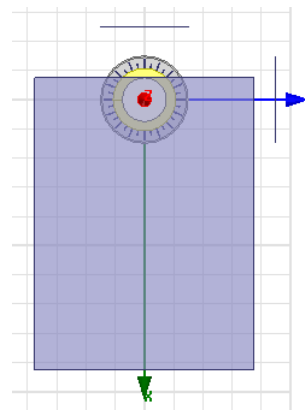
### Τοποθέτηση δευτερεύοντος στο μπροστινό μέρος

Για την εξέταση της θέσης του δευτερεύοντος στο μπροστινό μέρος ορίστηκαν δύο επιφάνειες στο εξωτερικό του οχήματος: μια επιφάνεια στο πλάι, και μία μπροστά όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Εξετάστηκαν τα ρεύματα για μετατόπιση φάσης 0,90 και 180 μοίρες.

Αρχικά ο φορτιστής τοποθετήθηκε στη θέση 0cm, όπου η άκρη του δευτερεύοντος συμπίπτει με την άκρη του σασί (Σχήμα 1). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)	
Θέση φορτιστή 0cm	Εξωτερικό	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι
0	46,627	13,191
90	55,522	15,623
180	64,422	18,081

Πίνακας 1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 0cm



Σχήμα 1: Φορτιστής τοποθετημένος στο μπροστινό μέρος στη θέση 0cm

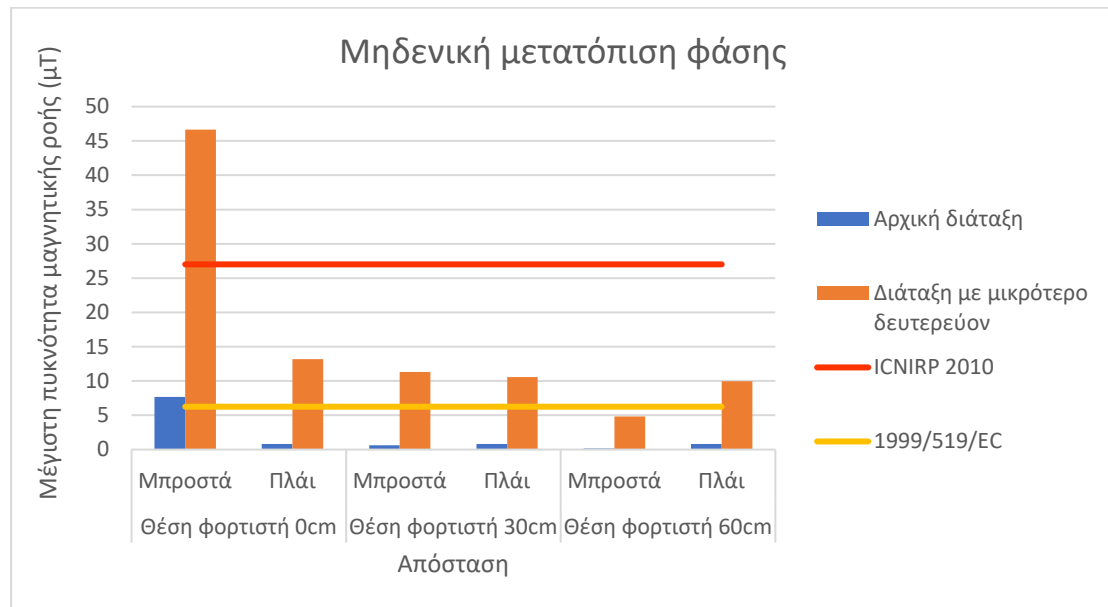
Το πεδίο που αναπτύσσεται στο μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου ξεπερνά το ασφαλή όριο, επομένως μετατοπίζουμε το φορτιστή κατά 30cm και κατά 60cm προς το κέντρο του οχήματος. Εκεί έχουμε τα εξής αποτελέσματα (Πίνακας 2):

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 30cm		Θέση φορτιστή 60cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι	Μπροστά	Πλάι
0	11,328	10,550	4,836	9,947
90	13,148	12,240	5,626	11,583
180	15,072	13,939	6,426	13,183

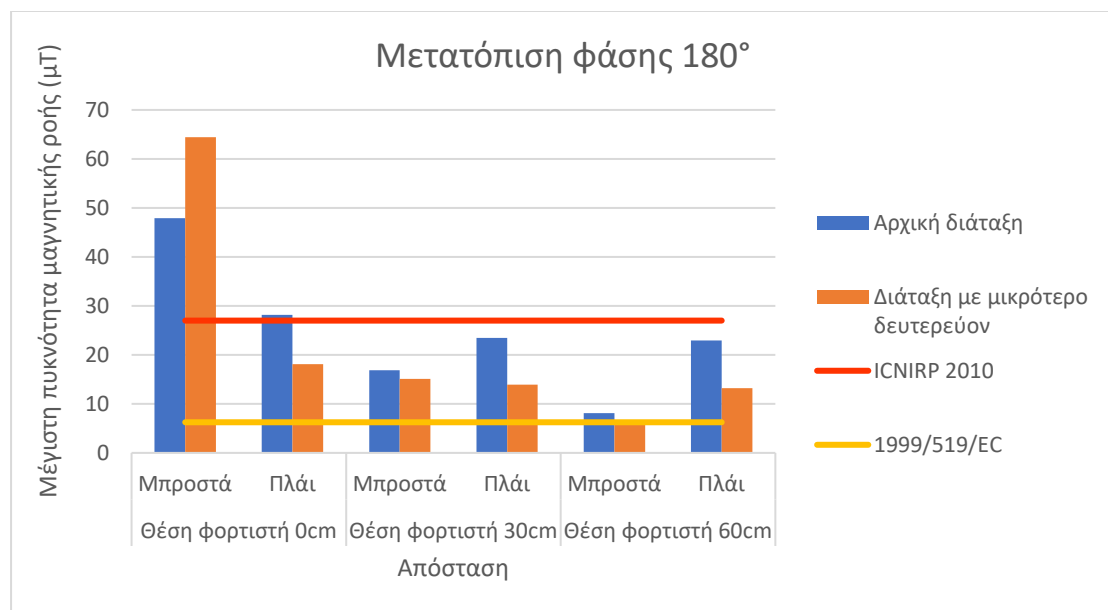
Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 30cm και 60cm

Από τους παραπάνω πίνακες γίνεται σαφές πως το όριο που τίθεται από την ICNIRP ικανοποιείται στην μπροστινή επιφάνεια για μία θέση φορτιστή 30cm από την άκρη του σασί ενώ το πεδίο που εντοπίζεται στην πλαϊνή επιφάνεια βρίσκεται συνεχώς εντός ορίων. Όσον αφορά την λειτουργία του φορτιστή σύμφωνα με τη σύσταση του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, παρατηρείται είναι αδύνατη καθώς το πεδίο στην πλαϊνή επιφάνεια παραβιάζει συνεχώς το όριο.

Στο Σχήμα 2 γίνεται μια αντιπαράθεση του αρχικού φορτιστή και του φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον όσον αφορά το πεδίο που αναπτύσσεται στη μπροστινή και στην επιφάνεια στο πλάι για ρεύματα λειτουργίας με μετατόπιση φάσης 0 και 180 μοίρες.



Σχήμα 2: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο μπροστινό μέρος για μηδενική μετατόπιση φάσης



Σχήμα 3: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο μπροστινό μέρος για μετατόπιση φάσης 180 μοίρες

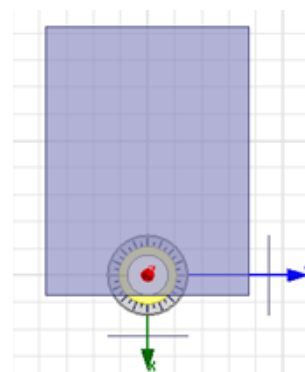
Παρατηρείται πως το πεδίο που δημιουργείται από τον αρχικό φορτιστή για τις ίδιες θέσεις τοποθέτησης του δευτερεύοντος εμφανίζει μειωμένες τιμές. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός πως για μηδενική μετατόπιση ρευμάτων και τοποθέτηση λίγα εκατοστά από το άκρο του σασί, ο μεγαλύτερος φορτιστής ικανοποιεί το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου σε αντίθεση με τον φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον.

### Τοποθέτηση δευτερεύοντος στο πίσω μέρος

Θα εξεταστούν και πάλι δύο επιφάνειες ήτοι μία στο πίσω μέρος και μία στο πλάι. Οι μετατοπίσεις φάσεις μεταξύ των ρευμάτων θα είναι ομοίως με πριν 0,90 & 180 μοίρες

Αρχικά ο φορτιστής θα τοποθετηθεί στη θέση όπου το άκρο του δευτερεύοντος θα συμπίπτει με το άκρο από το σασί. Η θέση αυτή θα ονομαστεί θέση 0cm (Σχήμα 4).

Στη συνέχεια θα μετατοπιστεί ο φορτιστής κατά 25cm, 35cm και 50cm προς το κέντρο του σασί. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναφορικά με τη μέγιστη πυκνότητας μαγνητικής ροής βρίσκονται στους Πίνακες 3 και 4.



Σχήμα 4: Φορτιστής τοποθετημένος στο πίσω μέρος στη θέση 0cm

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 0cm		Θέση φορτιστή 25cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
0	66,777	13,208	16,744	10,805
90	79,179	15,607	19,553	12,650
180	91,631	18,027	22,360	14,333

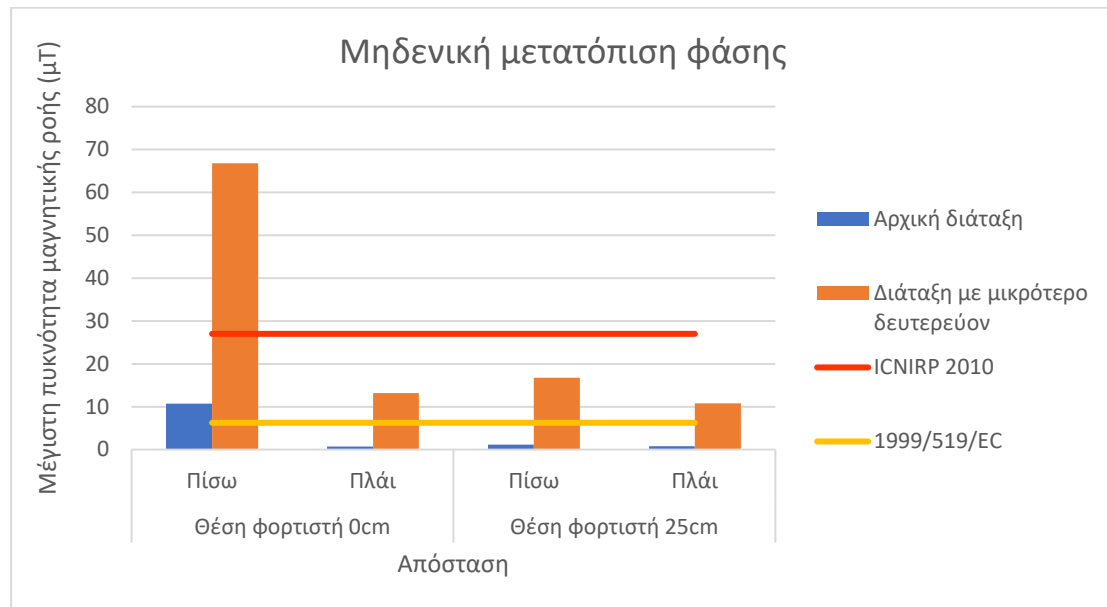
Πίνακας 3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο πίσω μέρος στις θέσεις 0cm και 30cm

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 35cm		Θέση φορτιστή 50cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
0	11,606	10,424	7,393	9,992
90	13,526	12,136	8,610	11,629
180	15,448	13,786	9,865	13,287

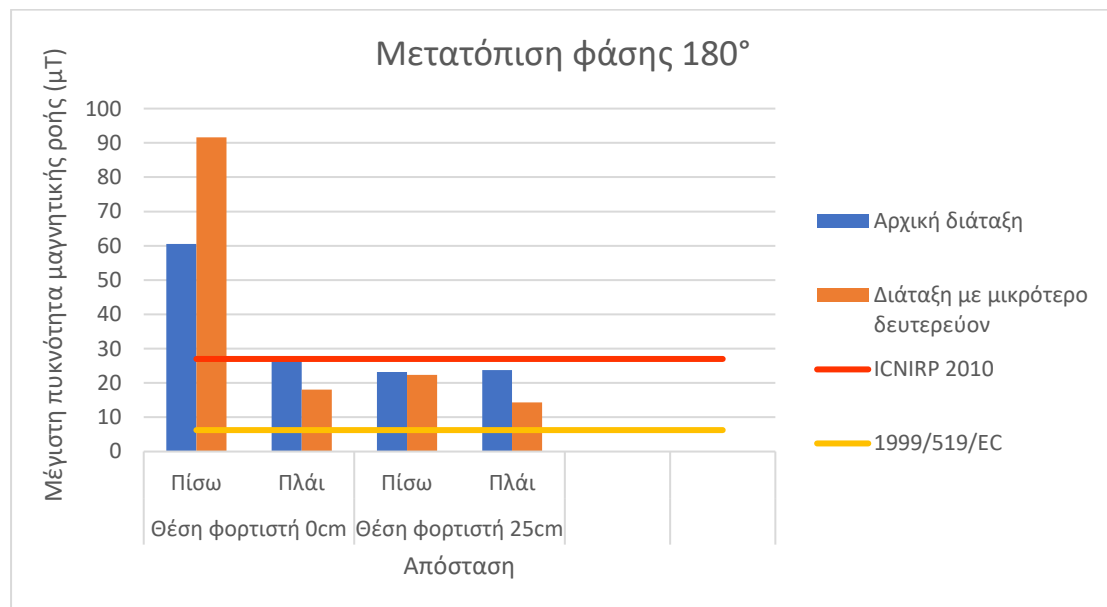
Πίνακας 4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο πίσω μέρος στις θέσεις 35cm και 50cm

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται πως το πεδίο που εντοπίζεται στην πίσω επιφάνεια ικανοποιεί το όριο της ICNIRP όταν ο φορτιστής τοποθετείται σε απόσταση 25cm ή περισσότερο από το άκρο του σασί. Το αυστηρότερο όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου δεν επαληθεύεται ακόμα και στη θέση των 50cm. Όσον αφορά την επιφάνεια στο πλάι, υπερβαίνει για οποιαδήποτε θέση και μετατόπιση ρευμάτων το όριο του ευρωπαϊκού συμβουλίου, ενώ με βάση την ICNIRP βρίσκεται συνεχώς εντός ορίων.

Στη συνέχεια συγκρίνεται το πεδίο που αναπτύσσεται στην πίσω επιφάνεια και στην επιφάνεια στο πλάι κατά την λειτουργία του αρχικού φορτιστή και του φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον για ρεύματα λειτουργίας με μετατόπιση φάσης 0 και 180 μοίρες.



Σχήμα 5: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο πίσω μέρος για μηδενική μετατόπιση φάσης



Σχήμα 6: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο πίσω μέρος για μετατόπιση φάσης 180 μοιρών

Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε πως το πεδίο που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία του μεγαλύτερου φορτιστή έχει μειωμένες τιμές μαγνητικού πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός πως για μηδενική μετατόπιση ρευμάτων και για θέση φορτιστή σε απόσταση 25cm ή περισσότερων από το άκρο του σασί, το πεδίο ικανοποιεί το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, σε αντίθεση με τον φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον, ο οποίος δεν ικανοποιεί το συγκεκριμένο όριο σε καμία θέση.

Τοποθέτηση φορτιστή στο μπροστινό μέρος

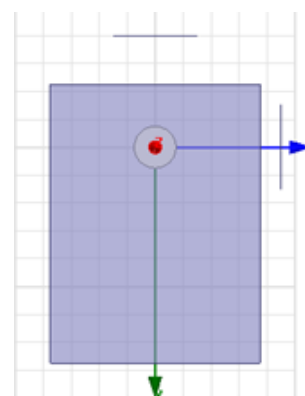
Στην μπροστινή θέση εξετάστηκαν οι θέσεις σε απόσταση 0cm, 30cm και 60cm από το άκρο του σασί. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στους Πίνακες 5 και 6.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 0cm		Θέση φορτιστή 30cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι	Μπροστά	Πλάι
0	8,715	0,702	0,348	0,178
90	23,778	7,407	5,784	5,429
180	33,534	10,701	8,412	7,932

Πίνακας 5: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στις θέσεις 0cm και 30cm

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)	
	Θέση φορτιστή 60cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Μπροστά	Πλάι
0	0,074	0,180
90	2,491	5,121
180	3,643	7,487

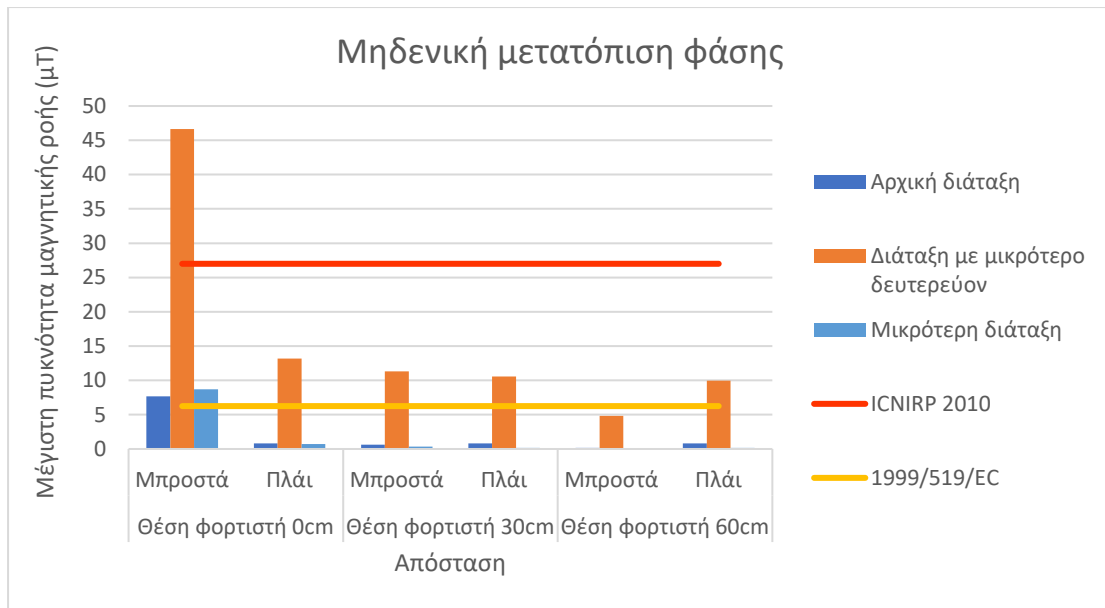
Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο μπροστινό μέρος στη θέση 60cm



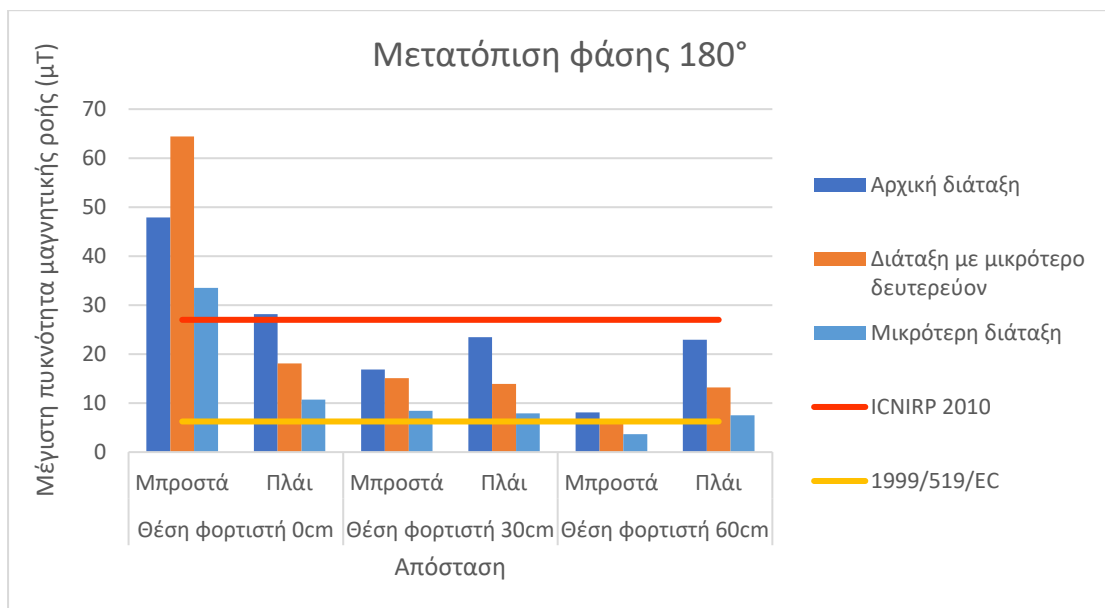
Σχήμα 7: Φορτιστής τοποθετημένος στο μπροστινό μέρος στη θέση 30cm

Συγκρίνοντας τις τιμές του πεδίου που αναπτύσσεται για τις διάφορες θέσεις του φορτιστή με τις αντίστοιχες που προέκυψαν για τον αρχικό φορτιστή και τον φορτιστή με μικρότερο δευτερεύον, προέκυψαν τα Σχήματα 8 και 9.

Η σύγκριση έγινε για μηδενική μετατόπιση φάσης και για μετατόπιση φάσης 180°, που αντιπροσωπεύει την περίπτωση με το μέγιστο εκπεμπόμενο ΗΜ πεδίο.



Σχήμα 8: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο μπροστινό μέρος για μηδενική μετατόπιση φάσης



Σχήμα 9: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο μπροστινό μέρος για μετατόπιση φάσης 180 μοιρών

Παρατηρείται πως ο φορτιστής με το μικρότερο δευτερεύον δημιουργεί το μεγαλύτερο πεδίο στο χώρο, με αποτέλεσμα το όριο το Ευρωπαϊκού Συμβουλίου να μην επιτυγχάνεται πότε. Οι άλλοι δύο φορτιστές εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά καθώς ικανοποιούν το ευρωπαϊκό όριο για θέση φορτιστή μεγαλύτερη από 30cm και μηδενική μετατόπιση φάσης. Για μετατόπιση φάσης 180° κανένας φορτιστής δεν ικανοποιεί το συγκεκριμένο όριο.

Όσον αφορά το όριο της ICNIRP, αυτό ικανοποιείται για θέση φορτιστή μεγαλύτερη των 30cm, ανεξαρτήτου μετατόπισης φάσης.

### Τοποθέτηση φορτιστή στο πίσω μέρος

Για την επιλογή της ιδανικής θέσης στο πίσω μέρος, έγιναν προσομοιώσεις στις θέσεις 0cm, 25cm, 50cm και 75cm από το άκρο του σασί για τους ίδιους συνδυασμούς ρευμάτων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 0cm		Θέση φορτιστή 25cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
0	13,121	0,695	0,699	0,174
90	32,379	7,390	8,417	5,552
180	45,382	10,642	12,220	8,114

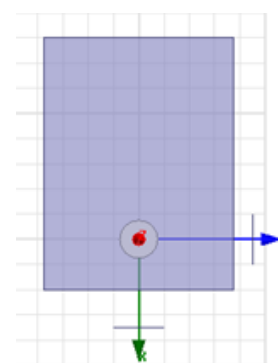
Πίνακας 7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο πίσω μέρος στις θέσεις 0cm και 25cm

	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής (μT)			
	Θέση φορτιστή 50cm		Θέση φορτιστή 75cm	
Μετατόπιση Φάσης (°)	Πίσω	Πλάι	Πίσω	Πλάι
0	0,139	0,179	0,057	0,175
90	3,819	5,180	2,020	5,092
180	5,585	7,554	2,962	7,414

Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με φορτιστή στο πίσω μέρος στις θέσεις 50cm και 75cm

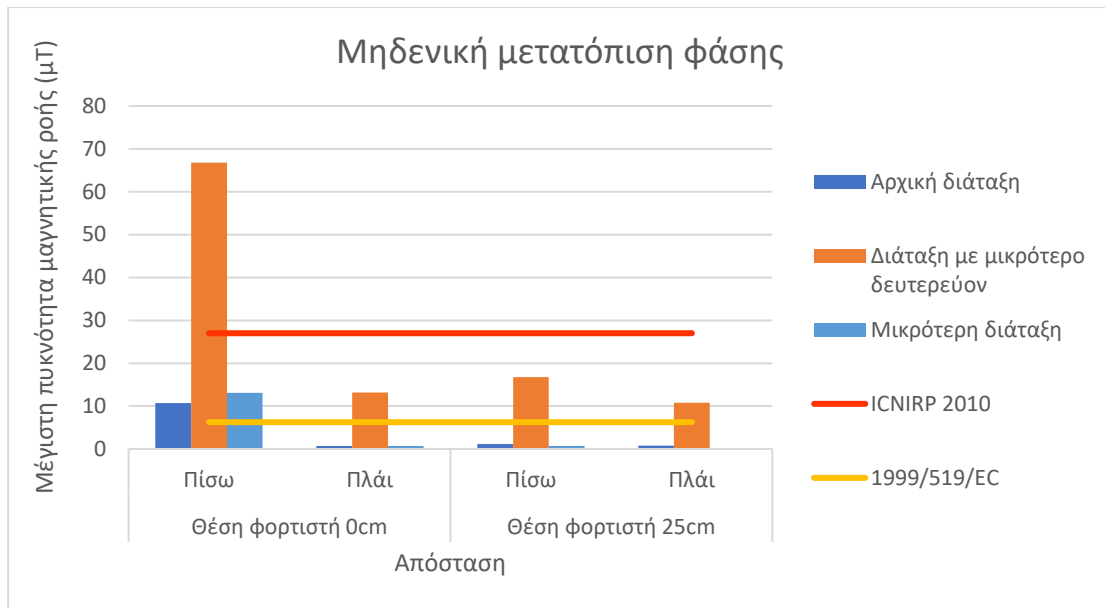
Παρατηρούμε πως το πεδίο όσο απομακρυνόμαστε από το άκρο του σασί εμφανίζεται με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές και για μετατόπιση φάσης 90 μοιρών, όπως συναντάται συχνά στη στατική φόρτιση, ικανοποιείται το όριο της ICNIRP για θέση φορτιστή στα 25cm και το όριο του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου στα 50cm. Η θέση των 25cm παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 16.

Στην συνέχεια της ενότητας θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση των αναπτυσσόμενων πεδίων των τριών φορτιστών, για τις θέσεις τοποθέτησης 0 και 25cm και για μετατόπιση φάσης 0° και 180°.

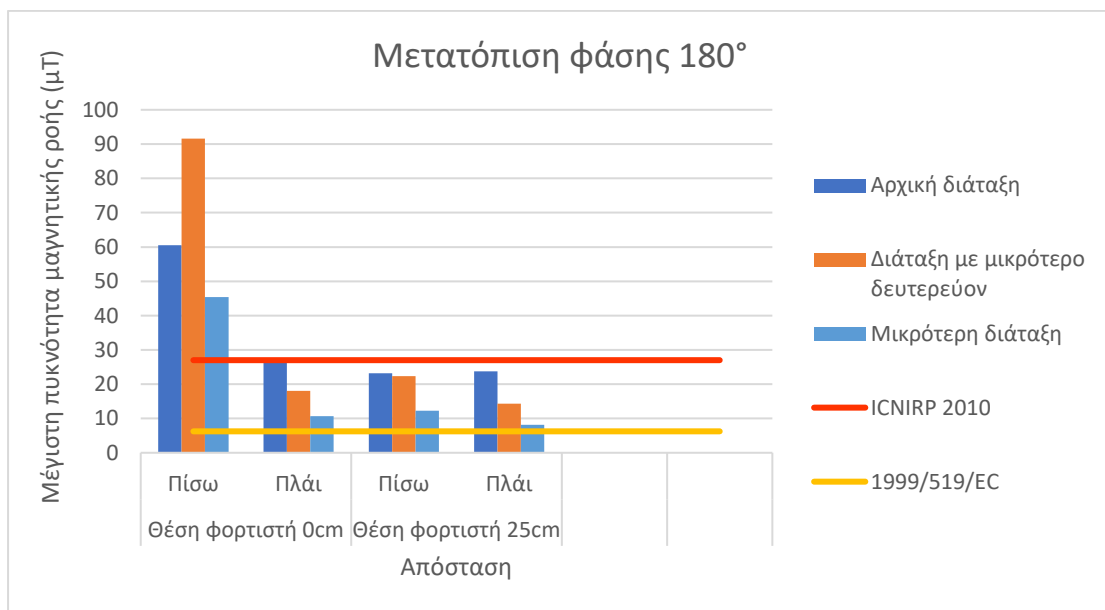


Σχήμα 10: Φορτιστής τοποθετημένος στο πίσω μέρος στη θέση 25cm





Σχήμα 11: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο πίσω μέρος για μηδενική μετατόπιση φάσης



Σχήμα 12: Σύγκριση θέσεων τοποθέτησης στο πίσω μέρος για μετατόπιση φάσης 180 μοιρών

Από την παραπάνω σύγκριση παρατηρείται πως ο φορτιστής με το μικρότερο δευτερεύον δημιουργεί το μεγαλύτερο πεδίο στο χώρο, για μηδενική μετατόπιση φάσης. Όσον αφορά τα όρια λειτουργίας, παρατηρείται πως το όριο το Ευρωπαϊκού Συμβουλίου επιτυγχάνεται από τον αρχικό και τον τελικό φορτιστή μόνο στη θέση 25cm για μηδενική μετατόπιση φάσης.

Το όριο της ICNIRP, όντας πιο ελαστικό, ικανοποιείται για θέση φορτιστή 25cm, ανεξαρτήτου μετατόπισης φάσης.

## Μετρήσεις 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου

Φορτιστής τοποθετημένος στο μπροστινό μέρος

Μετατόπιση (cm)		Όριο Μαγνητικής Ροής (μT)	Ελάχιστη ασφαλής απόσταση (cm)			
X	Y		"-X"	"+Y"	"-Y"	"+Z"
-60	0	6,25	80	17	11	30
		27	50	0	0	0
-30	0	6,25	34	2	5	0
		27	14	0	0	0
0	0	6,25	5	0	0	0
		27	0	0	0	0
30	0	6,25	10	2	5	6
		27	2	0	0	0
60	0	6,25	10	2	4	6
		27	1	0	0	0
-60	30	6,25	80	29	13	25
		27	50	5	0	0
-30	30	6,25	30	9	2	1
		27	13	3	0	0
0	30	6,25	10	15	4	3
		27	0	2	0	0
30	30	6,25	25	8	0	5
		27	2	3	0	0
60	30	6,25	13	18	1	7
		27	2	4	0	0
-60	60	6,25	84	64	6	30
		27	50	33	0	0
-30	60	6,25	33	55	0	25
		27	15	30	0	0
0	60	6,25	10	51	4	40
		27	2	31	0	10
30	60	6,25	10	50	1	45
		27	1	32	0	16
60	60	6,25	18	58	1	43
		27	0	31	0	14

Φορτιστής τοποθετημένος στο κέντρο

Μετατόπιση ( )		Όριο Μαγνητικής Ροής (μΤ)	Ελάχιστη ασφαλής απόσταση		
X	Y		"+Y"	"-Y"	"+Z"
-60	0	6,25	6	5	6,5
		27	0	0	0
-40	0	6,25	2,5	2	2
		27	0	0	0
-20	0	6,25	0	0	2
		27	0	0	0
0	0	6,25	0	0	0
		27	0	0	0
20	0	6,25	0	0	2
		27	0	0	0
40	0	6,25	2,5	2	2
		27	0	0	0
60	0	6,25	6	5	6,5
		27	0	0	0
-60	20	6,25	5	0	15
		27	0	0	0
-40	20	6,25	8	1,5	5,5
		27	0	0	0
-20	20	6,25	5	2	6
		27	0	0	0
0	20	6,25	1,5	3,5	5
		27	0	0	0
20	20	6,25	5	2	6
		27	0	0	0
40	20	6,25	8	1,5	5,5
		27	0	0	0
60	20	6,25	5	0	15
		27	0	0	0
-60	40	6,25	23	3	13
		27	8	0	5
-40	40	6,25	22	3,5	17
		27	9	0	4
-20	40	6,25	21	1,5	10
		27	9	0	4

0	40	6,25	19	4	11
		27	8	0	3
20	40	6,25	21	1,5	10
		27	9	0	4
40	40	6,25	22	3,5	17
		27	9	0	4
60	40	6,25	23	3	13
		27	8	0	5
-60	60	6,25	54	5	46
		27	30	0	22
-40	60	6,25	53	6	44
		27	32	0	22
-20	60	6,25	47	7	48
		27	29	0	22
0	60	6,25	47	4	47
		27	30	0	22
20	60	6,25	47	7	48
		27	29	0	22
40	60	6,25	53	6	44
		27	32	0	22
60	60	6,25	54	5	46
		27	30	0	22