



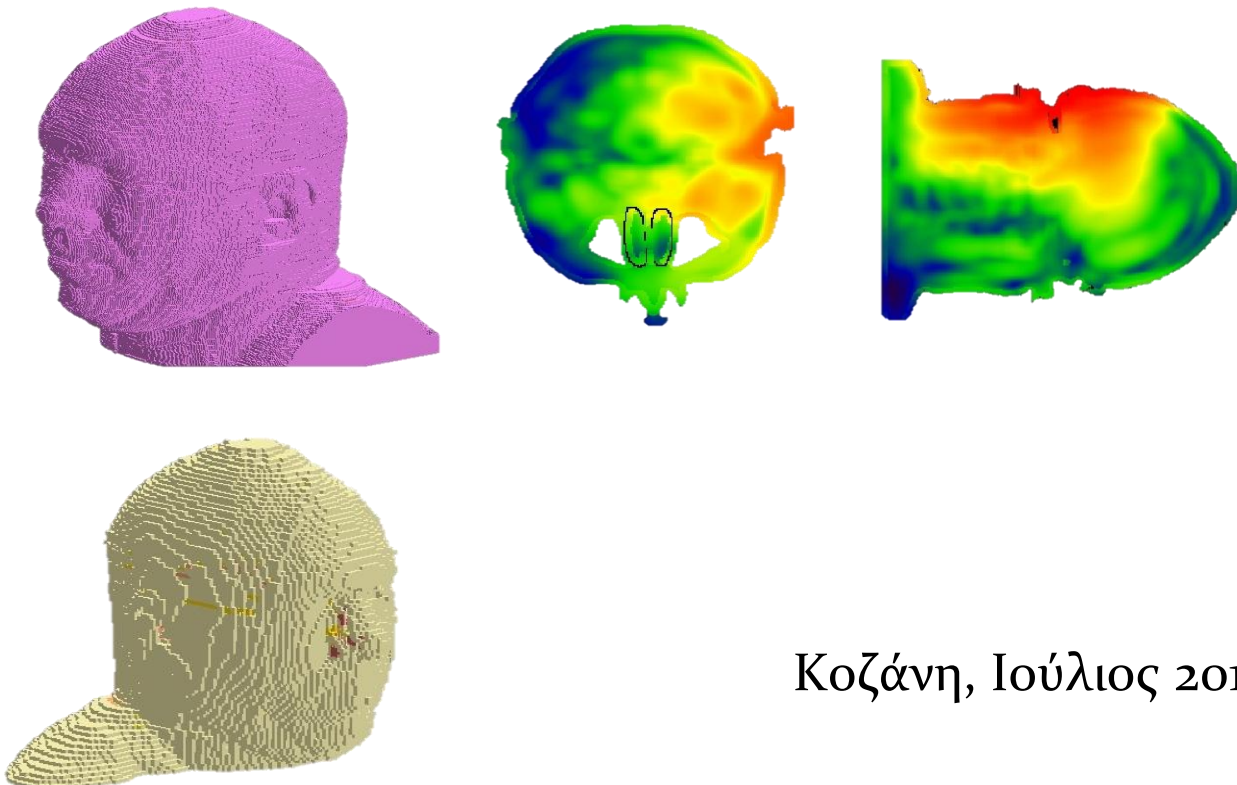
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διπλωματική εργασία

Προσομοιωτική Μελέτη Επίδρασης
Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στους
Ανθρώπινους Βιολογικούς Ιστούς

Αντωνία Χ. Τερζίδου

Επιβλέπων Καθηγητής: Θεόδωρος Ζυγκιρίδης



Κοζάνη, Ιούλιος 2015

Διμελής εξεταστική επιτροπή

- Θεόδωρος Ζυγκιρίδης: Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
- Θεόδωρος Θεοδουλίδης: Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Copyright © Αντωνία Τερζίδου, 2015

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.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς και ολόψυχες ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν ουσιαστικά, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθειά μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Θεόδωρο Ζυγκιρίδη για την επίβλεψη της εργασίας, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθώς και για την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του και να μπορέσω να επωφεληθώ από τις πολύτιμες γνώσεις του. Επιπλέον, για την υπομονή που έδειξε στις αμέτρητες απορίες μου αλλά και την υποστήριξη που μου παρείχε μέχρι το πέρας της διπλωματικής εργασίας. Η ηρεμία που ενέπνευσε στον τρόπο δουλειάς μου και η οξυδερκής καθοδήγησή του υπήρξαν ακρογωνιαίοι λίθοι της επιτυχούς εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερος θα ήθελα να τον ευχαριστήσω γιατί με δίδαξε - και κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αλλά και κατά την διδασκαλία προπτυχιακών μαθημάτων - ότι η επιστημονική ακεραιότητα και κατάρτιση χτίζεται μέσα από την μεθοδική δουλειά, την επιμονή και την υπομονή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους και τις φίλες μου που μοιραστήκαμε μαζί τους τις πιο έντονες και όμορφες στιγμές των φοιτητικών μας χρόνων.

Τέλος τις θερμότερες ευχαριστίες προς τους γονείς μου, Χρήστο και Κωνσταντία για την παρότρυνση και συμπαράσταση που μου δείχνουν. Έτσι, θα ήθελα να αναφέρω ότι η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Αντωνία Χ. Τερζίδου,

Κοζάνη, Ιούλιος 2015

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή	
1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	3
1.2 Σκοπός παρούσας εργασίας – αντικείμενο μελέτης	10
Κεφάλαιο 2	
Βασικές έννοιες	
2.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	12
2.2 Ιοντίζουσα και μη Ιοντίζουσα ακτινοβολία	18
2.2.1 Ιοντίζουσα ακτινοβολία	19
2.2.2 Μη ιοντίζουσα ακτινοβολία	21
2.3 Η έννοια του Βιοηλεκτρομαγνητισμού	24
Κεφάλαιο 3	
Αλληλεπίδραση RF ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και βιολογικών ιστών	
3.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες βιολογικών ιστών	27
3.1.1 Μακροσκοπική προσέγγιση	28
3.1.2 Μικροσκοπική προσέγγιση	29
3.2 Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR)	31
3.3 Βιολογικά αποτελέσματα επίδρασης RF ακτινοβολιών στους βιολογικούς ιστούς	34
3.3.1 Θερμικές επιδράσεις	35
3.3.1.1 Νόμοι που καθορίζουν το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό των βιολογικών ιστών	36
3.3.2 Μη θερμικές και αθερμικές επιδράσεις	37
Κεφάλαιο 4	
Όρια ασφαλούς έκθεσης σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	
4.1 Δοσιμετρία	39
4.2 Ιστορική αναδρομή στα όρια επιτρεπτής έκθεσης	40
4.3 Βασικά στοιχεία για τα όρια έκθεσης	41

4.3.1	Επαγγελματική και γενικού πληθυσμού έκθεση	41
4.3.2	Παράγοντας ασφαλείας	42
4.3.3	Η έννοια μέσης τιμής μεγεθών	43
4.3.4	Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς	43
4.4	Πρότυπα όρια της ICNIRP	45
4.5	Πρότυπα όρια του IEEE	49
4.6	Πρότυπα όρια που ισχύουν στην Ελλάδα	51

Κεφάλαιο 5

Η μέθοδος FDTD

5.1	Αριθμητικές μέθοδοι στον Ηλεκτρομαγνητισμό	54
5.2	Βασικά στοιχεία της μεθόδου FDTD	55
5.3	Κεντρική Ιδέα της μεθόδου FDTD – Μέθοδος FDTD τριών διαστάσεων	56
5.4	Ο Αλγόριθμος του Yee	57
5.4.1	Βασικές ιδέες του αλγορίθμου Yee	57
5.4.2	Εφαρμογή αλγορίθμου Yee – Ανάλυση της μεθόδου FDTD	59
5.4.3	Αριθμητική ευστάθεια κατά την επίλυση του αλγορίθμου Yee	62
5.5	Παράμετροι της μεθόδου FDTD	62
5.6	Απορροφητικές Συνθήκες (Οριακές Συνθήκες Απορρόφησης)	64
5.7	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FDTD	66

Κεφάλαιο 6

Υπολογισμός SAR σε απλό και πιο λεπτομερές ανατομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού για διπολική κεραία λ/2

6.1	Γενικά στοιχεία	68
6.1.1	Διπολική κεραία λ/2	68
6.1.2	Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού	69
6.1.3	Υπολογισμός SAR	69
6.2	Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί	71
6.2.1	Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 900 MHz	72
6.2.2	Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 1800 MHz	74
6.2.3	Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 2.44 GHz	77
6.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων	79
6.3	Διπολική κεραία λ/2 σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί	81
6.3.1	Διπολική κεραία λ/2 σε οριζόντια θέση και δίπλα στο	

αυτί στα 900 MHz	82
6.3.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί στα 1800 MHz	84
6.3.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί στα 2.44 GHz	86
6.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	88
6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης και οριζόντιας θέσης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ δίπλα στο αυτί	90
6.5 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι	95
6.5.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 900 MHz	96
6.5.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 1800 MHz	98
6.5.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz	100
6.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	102
6.6 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι	104
6.6.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 900 MHz	104
6.6.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 1800 MHz	106
6.6.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz	108
6.6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	110
6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης και οριζόντιας θέσης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ δίπλα στο μάτι	111
6.8 Υπολογισμός SAR σε αναλυτικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού με διπολική κεραία $\lambda/2$ τοποθετημένη σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο ανθρώπινο αυτί	
6.8.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 900 MHz	118
6.8.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 1800 MHz	121
6.8.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz	124
6.8.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	127

Κεφάλαιο 7

Σχεδιασμός και κατασκευή τερματικής συσκευής – Τοποθέτηση δίπλα σε μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

7.1 Γενικά στοιχεία	
7.1.1 Patch κεραία – θεωρητικό υπόβαθρο	131

7.1.2 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού	132
7.2 Κατασκευή μοντέλου τερματικής συσκευής	132
7.2.1 Κατασκευή τερματικής συσκευής στα 900 MHz	133
7.2.2 Κατασκευή τερματικής συσκευής στα 1800 MHz	137
7.3 Έλεγχος ορθής λειτουργίας της κεραίας	139
7.4 Μοντέλο τερματικής συσκευής σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι	142
7.4.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο κεφάλι	142
7.4.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο κεφάλι	144
7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	146
7.5 Μοντέλο τερματικής συσκευής με κλίση 30° και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι	
7.5.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz με κλίση 30° και δίπλα στο κεφάλι	148
7.5.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz με κλίση 30° και δίπλα στο κεφάλι	152
7.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	155
7.6 Μοντέλο τερματικής συσκευής με κλίση 45° και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι	
7.6.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz με 45° και δίπλα στο κεφάλι	157
7.6.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz με 45° και δίπλα στο κεφάλι	160
7.6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	163
7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων και για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης της τερματικής συσκευής	164

Κεφάλαιο 8

Έκθεση σε επίπεδο κύμα

8.1 Σύστημα Συντεταγμένων	170
8.2 Επίπεδο κύμα σε απλό μοντέλο κεφαλιού	171
8.3 Επίπεδο κύμα σε πιο λεπτομερές μοντέλο κεφαλιού	174
8.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	177

Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Βιβλιογραφία

184

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αλληλεπίδραση κεραιών και ασύρματων τερματικών συσκευών κινητών επικοινωνιών με ανατομικά μοντέλα ανθρώπινου κεφαλιού με τη χρήση της μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain - FDTD). Στόχος είναι η διερεύνηση και εκτίμηση του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) που αναπτύσσεται σε μοντέλα ανθρώπινου κεφαλιού λόγω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προέρχεται είτε από μια απλή διπολική κεραία $\lambda/2$ (σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz), είτε από μια τερματική συσκευή (σε συχνότητες GSM 900 MHz και 1800 MHz), είτε από ένα επίπεδο κύμα προερχόμενο από κεραία ασύρματου δικτύου (σε συχνότητα 2.44 GHz). Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται ο σκοπός της εργασίας και παρουσιάζονται τα βιοηλεκτρομαγνητικά προβλήματα που μελετήθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησής της. Στη συνέχεια γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της επιστημονικής έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί σε αυτόν τον τομέα.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ο διαχωρισμός του σε ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετάται η αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και βιολογικών ιστών. Αναλύεται ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης και δίνεται έμφαση στις θερμικές επιδράσεις των RF ακτινοβολιών στους βιολογικούς ιστούς.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα όρια ασφαλούς έκθεσης σε μη ιοντίζουσα ακτινοβολία. Μελετούνται τα όρια της ICNIRP, του IEEE καθώς και τα όρια που ισχύουν στην Ελλάδα.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (FDTD), η υπολογιστική μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των βιοηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

Στα Κεφάλαια 6, 7 και 8 παρουσιάζονται τα προβλήματα που μελετούμε, αναλύονται λεπτομερώς οι περιπτώσεις αυτών και παρέχονται συγκριτικά αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από προσομοιώσεις.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR), Ανατομικό Μοντέλο Ανθρώπινου Κεφαλιού, Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (FDTD), Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία, Όρια Ασφαλούς Έκθεσης, Διπολική Κεραία, Τερματική Συσκευή

Abstract

In present diploma thesis, the interaction between the antennas and the wireless terminal devices of mobile communication with anatomic models of human head is studied with the use of Finite Difference Time Domain method (FDTD). The aim is the probe and assessment of the Specific Absorption Rate (SAR), which is developed in the models of human heads because of the electromagnetic radiation, which comes either from a half wavelength dipole antenna (in frequencies 900 MHz, 1800 MHz and 2.44 GHz) or from a terminal device (GSM frequency at 900 MHz and 1800 MHz) or from a plane wave which comes from an antenna of wireless network (frequency 2.44 GHz). This diploma thesis is allocated as followed:

In the first chapter, the aim of this diploma thesis is described and the bioelectromagnetic problems which were studied during its development are presented. Then, a bibliographic review of scientific investigation, which has been conducted in this field, is done.

In the second chapter, the electromagnetic spectrum and its division into ionizing and non-ionizing radiation is described.

In the third chapter, the interaction between the electromagnetic waves and the biological tissues is studied. The Specific Absorption Rate (SAR) is also analyzed and emphasis is given on the thermal effects of the RF radiations on the biological tissues.

In the fourth chapter, the limits for safe exposure to non-ionizing radiation are presented. The limits of the ICNIPR, IEEE as well as the limits which are applied to Greece are studied, too.

In fifth chapter, the Finite Difference Time Domain (FDTD), the calculative method which is used for the study of the bioelectromagnetic problems, is described.

In the sixth, seventh and eighth chapter, the problems, which we study are presented. Moreover, their cases are detailed and results are given comparatively, which arise after simulations.

Finally, in ninth chapter, the conclusions and the future developments of this diploma thesis are presented.

Key words: Specific Absorption Rate (SAR), Anatomic Head Model, Finite Difference Time Domain (FDTD), Electromagnetic Radiation, Limits for Safe Exposure, Dipole Antenna, Terminal Device

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική αναφορά επιστημονικών μελετών που έχουν γίνει πάνω στον τομέα αλληλεπίδρασης RF ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και βιολογικών συστημάτων. Μέσα από αυτήν την ανασκόπηση, θα διαπιστωθεί η ραγδαία επιστημονική εξέλιξη και το έντονο ενδιαφέρον των ερευνητών της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας για την διαμόρφωση μιας πλήρους εικόνας σε θέματα που αφορούν αυτό το αντικείμενο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και τα βιοηλεκτρομαγνητικά προβλήματα που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Αναμφισβήτητα, ο τομέας έρευνας της επίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στους βιολογικούς ιστούς/συστήματα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον υπολογιστικό ηλεκτρομαγνητισμό τα τελευταία χρόνια. Μια πληθώρα ερευνών έχει πραγματοποιηθεί από επιστήμονες αλλά και διεθνείς οργανισμούς. Οι έρευνες αυτές έχουν ως κύριο άξονά τους τη διαμόρφωση και μελέτη ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων που απαρτίζονται από ένα βιολογικό σύστημα το οποίο εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, προερχόμενη από πηγές διάφορων τύπων.

Η μοντελοποίηση της κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο ανθρώπινο σώμα ή στο κεφάλι, μετά από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από συσκευές που χρησιμοποιούμε ακόμα και στην καθημερινή μας ζωή, επιτρέπει τον σχεδιασμό βελτιστοποιημένων συστημάτων. Η επιστημονική κοινότητα ασχολείται εντατικά με τις συνέπειες επίδρασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στους ζώντες οργανισμούς, καθώς η μοντελοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος παρέχει τη δυνατότητα απόκτησης γενικής εικόνας της αλληλεπίδρασης και δίνει απαντήσεις σε φλέγοντα ζητήματα, όπως το ποσοστό απορρόφησης ακτινοβολίας από τους ιστούς. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί στα συστήματα κινητής επικοινωνίας, η ευρεία χρήση των οποίων τις τελευταίες δεκαετίες έχει ωθήσει τους επιστήμονες στη διεξαγωγή μελετών προκειμένου να διαπιστωθεί αν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων προκαλούν αρνητικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.

Ο υπολογισμός της απορροφούμενης ενέργειας από το ανθρώπινο κεφάλι, το οποίο εκτίθεται σε συσκευές ασύρματης επικοινωνίας έχει γίνει ένας τομέας ενεργούς και συνεχούς έρευνας από το 1990 και μετά. Οι κύριες προσπάθειες επικεντρώθηκαν στον υπολογισμό του Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης σε 1 ή 10 γραμμάρια ιστού. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD) (Taflove και Hagness 2005) είναι η πιο ευρέως αποδεκτή μέθοδος για τον υπολογισμό SAR. Σε ότι αφορά την κινητή επικοινωνία, μελέτες έχουν δείξει ότι το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο της κεραίας που χρησιμοποιείται.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σειρά από επιλεγμένες δημοσιευμένες μελέτες σχετικές με τον υπολογισμό του SAR κατά την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στους βιολογικούς ιστούς, χρησιμοποιώντας την μέθοδο FDTD.

Το 1998, πραγματοποιήθηκε μια από τις πρώτες μελέτες των ηλεκτρομαγνητικών υπολογισμών για τον προσδιορισμό των πεδίων στο εσωτερικό του κεφαλιού χρήστη κινητού τηλεφώνου [W. Heyvaert et al, 1998]. Χρησιμοποιήθηκε μια διπολική κεραία σαν ακτινοβολιτής και μια ομοιογενής με απώλειες σφαίρα σαν απορρόφητης των πεδίων (κεφάλι). Στη συνέχεια, έγινε μια εκτεταμένη μελέτη και διακριτοποίηση του πλέγματος με σκοπό τον καθορισμό του μεγέθους του πλέγματος που απαιτείται για την ανάκτηση αποτελεσμάτων SAR. Στόχος ήταν αυτά τα αποτελέσματα με τις τιμές SAR να είναι αρκετά ακριβή ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα διεθνή πρότυπα-όρια ασφαλείας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, επιβεβαίωσαν το πόσο σημαντικό είναι να υπάρχει διερεύνηση της ακρίβειας της μεθόδου μοντελοποίησης για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μέσα σε ένα βιολογικό σύστημα.

Το 2000, ο M. Martinez Burdalo και μια ομάδα συνεργατών του παρουσίασαν μια θεωρητική μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) σε ένα ανθρώπινο μάτι, όταν αυτό ακτινοβολείται από το πεδίο ενός κινητού τηλεφώνου. [M. Martinez – Burdalo et al, 2000]. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιήθηκε για να αναλύσει τις τιμές του SAR σε διαφορετικές αποστάσεις κεραίας – ανθρώπινου ματιού αλλά και στην περίπτωση όπου η κεραία βρίσκεται ανάμεσα στο μάτι και σε έναν μεταλλικό τοίχο.

Η τιμή SAR στο ανθρώπινο μάτι, όταν ακτινοβολείται από το πεδίο ενός κινητού τηλεφώνου μελετήθηκε σε διάφορες συνθέσεις χρησιμοποιώντας την μέθοδο FDTD. Έγινε χρήση απλών μοντέλων κεφαλιού και ματιών για τη θεωρητική μελέτη του SAR. Παρατηρήθηκε ότι στην χειρότερη περίπτωση, όταν η κεραία βρίσκεται μπροστά από το μάτι, τα όρια της ICNIRP υπερβαίνονται μόνο αν η απόσταση κεραίας – ματιού είναι μικρότερη από 2 cm, κάτι το οποίο αποτελεί μια ασυνήθιστη κατάσταση. Αν ληφθεί υπόψη η παρουσία ενός κατακόρυφου μεταλλικού τοίχου δίπλα στην κεραία, τα επίπεδα SAR αυξάνονται ως και 50 %. Στη χειρότερη

περιπτωση που μελετήθηκε, τα επίπεδα SAR είναι πάντα κάτω από τα πρότυπα όρια, όταν η απόσταση κεραίας ματιού είναι πάνω από 2.5 cm.

Το 2002, ο T. V. Yioultsis και η επιστημονική του ομάδα, παρουσίασε μια συνολική ηλεκτρομαγνητική και θερμική ανάλυση της ακτινοβολίας και τις επιπτώσεις της στα ανθρώπινα όντα, λόγω της χρήσης των διαφόρων τύπων των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κεραιών κινητών τηλεφώνων και επικοινωνίας. [T. V. Yioultsis et al, 2002]. Πρόκειται για μια από τις πρώτες μελέτες που ασχολείται με ένα ευρύ φάσμα συγκριτικής έρευνας των σύγχρονων κινητών τηλεφώνων, σε αντίθεση με την πλειονότητα των υφιστάμενων εργασιών, η οποία δεν εκτείνεται πέρα από την παρωχημένη γενική περίπτωση του τηλεφώνου. Επιπλέον, μελετάται η περίπτωση κεραιών ασύρματου τοπικού δικτύου (LAN antennas), λόγω της αυξανόμενης χρήσης τους και των μεγάλων περιόδων έκθεσης σε αυτές.

Η υπολογιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση τη μέθοδο FDTD, και μια αποδοτική θερμική ανάλυση έδειξε ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές τόσο σε τοπικές όσο και σε μέσες τιμές SAR ή ηλεκτρικά πεδία και χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Αυτή η παρατήρηση που σημειώθηκε, αποτελεί ένδειξη των διαφορετικών βαθμών αλληλεπίδρασης μεταξύ της κεραίας και του ανθρώπινου κεφαλιού. Ως εκ τούτου, χρήσιμες οδηγίες σχεδιασμού κεραιών, όπως η χρήση κατάλληλων ανακλαστικών επιφανειών, μπορεί να αξιοποιηθεί. Σε περιπτώσεις όπου τα προτεινόμενα χρονικά όρια της έκθεσης υπερβαίνονται, και ειδικά στην περίπτωση των WLAN, η πιθανότητα βλαβερών θερμικών ή μη θερμικών επιδράσεων ακτινοβολίας δεν θα πρέπει να αποκλειστεί και ενδείκνυται για θέμα περαιτέρω έρευνας.

Το 2005, διενεργήθηκε μια έρευνα σύγκρισης των χαρακτηριστικών ηλεκτρομαγνητικής απορρόφησης σε κεφάλι ενήλικα και σε κεφάλι παιδιού για κινητά τηλέφωνα με συχνότητα λειτουργίας στα 1800 MHz. [Claudio R. Fernández et al, 2005]. Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR) που παράγεται από τα κινητά τηλέφωνα στο κεφάλι των παιδιών προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου. Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο κεφαλιού δεκάχρονου παιδιού βασισμένο σε εικόνες υπολογιστικής τομογραφίας. Οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι προσαρμόστηκαν ώστε να ταιριάζουν σε αυτή την ηλικία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις υπολογισμένες τιμές στο κεφάλι ενηλίκων. Επιπλέον, σύγκριση έγινε με τις τιμές SAR στο μοντέλο κεφαλιού δεκάχρονου παιδιού όταν χρησιμοποιήθηκαν τιμές ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων ενήλικα. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι σε παρόμοιες συνθήκες, το SAR το οποίο υπολογίζεται για παιδιά είναι υψηλότερο από αυτό των ενηλίκων. Με τη χρήση του μοντέλου κεφαλιού δεκάχρονου παιδιού, ελήφθησαν τιμές γύρω στο 80 % υψηλότερες από ότι με τη

χρήση μοντέλου κεφαλιού ενήλικα. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, εξαιτίας των διαφορετικών διαστάσεων και ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων στα δύο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Γενικότερα, η έρευνα γύρω από την έκθεση των παιδιών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία αναπτύσσεται συνεχώς και ραγδαία.

Δεδομένου ότι η έκθεση στις ραδιοσυχνότητες (RF) του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αυξήθηκε με την αυξημένη χρήση της ασύρματης επικοινωνίας, η πιθανή συσχέτιση με κινδύνους για την υγεία, έχει συζητηθεί ευρέως. Ένας τομέας ενδιαφέροντος, είναι η αλληλεπίδραση των ιατρικών εμφυτευμάτων και των συσκευών ραδιοσυχνοτήτων, όπως τα κινητά τηλέφωνα. Στη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα σχετικά με τα ενεργά εμφυτεύματα όπως βηματοδότες έχουν συζητηθεί, αλλά οι μελέτες για παθητικά μεταλλικά (δηλ αγώγιμα) εμφυτεύματα είναι σπάνιες. Ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τους ιστούς μπορεί να ενισχυθεί εξαιτίας μεταλλικών εμφυτευμάτων. Έτσι το 2007, ο H. Virtanen και οι συνεργάτες του, προχώρησαν σε μια μελέτη στην οποία εξετάστηκε η επίδραση αυθεντικών παθητικών μεταλλικών εμφυτευμάτων στην περιοχή του κεφαλιού. [H. Virtanen et al, 2007]. Χρησιμοποιήθηκε μια κεραία $\lambda/2$ ως πηγή έκθεσης και μελετήθηκε αριθμητικά ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR) στο κοντινό πεδίο. Στόχος ήταν η μοντελοποίηση των πιθανών χειρότερων περιπτώσεων των πιο κοινών εμφυτευμάτων σε ένα ακριβές αναλυτικό MRI μοντέλο κεφαλιού. Σε περιοχές έκθεσης, θεωρήθηκαν οι συχνότητες GSM (900 MHz και 1800 MHz) και UMTS (2450 MHz). Τα εμφυτεύματα που μελετήθηκαν ήταν πλάκες κρανίου, πλάκες οστών και δακτύλιοι αυτιού. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι μερικά από τα εμφυτεύματα, υπό πολύ σπάνιες συνθήκες έκθεσης, είναι σε θέση να προκαλέσουν αξιοσημείωτη αύξηση της τιμής του SAR.

Το 2008, ο Zheng Zhan στο Πανεπιστήμιο του Πεκίνου μελέτησε τα δίκτυα περιοχής σώματος (Body Area Networks - BANs). [Zheng Zhan et al, 2008]. Στα BANs είναι βασικό το ζήτημα της ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής, καθώς πρόκειται για ένα ασύρματο δίκτυο. Δεν είχε υπάρξει κάποια συμφωνία στις μέχρι τότε μελέτες για το αν αυτή η ακτινοβολία προκαλεί κάποια βλάβη στο ανθρώπινο σώμα ή όχι. Αυτό εξακολουθεί να βρίσκεται υπό διερεύνηση. Εντούτοις, δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι το ανθρώπινο σώμα μπορεί να απορροφήσει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπομπής. Σε αυτό το BAN γύρω από το ανθρώπινο σώμα, πρέπει να υπάρχει κάποια επίδραση από ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές σε αυτό, επειδή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα βρίσκεται τόσο κοντά στο σώμα. Ωστόσο, το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζει διαφορετικές τιμές SAR για διαφορετικές συχνότητες ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αναλύοντας τα στοιχεία που προέκυψαν, συνάχθηκε το συμπέρασμα ότι στα BANs υπάρχει μικρότερο SAR για ηλεκτρομαγνητική εκπομπή

χαμηλής συχνότητας, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία για την υλοποίηση μελλοντικών BANs.

Αναλύοντας τα δεδομένα της έρευνας που έγινε και παρατηρώντας τα συμπεράσματα, κατέληξαν στο ότι ενώ η συχνότητα είναι μεταξύ 0.5 GHz και 5.5 GHz και μια πηγή είναι κοντά στο αυτί του μοντέλου του ανθρώπινου κεφαλιού, η επίδραση της ακτινοβολίας μειώνεται καθώς η συχνότητα γίνεται υψηλότερη. Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, η απορροφούμενη ενέργεια από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού αυξάνεται πολλές φορές, κάτι το οποίο είναι επιβλαβές για την υγεία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε ένα BAN, το SAR είναι χαμηλότερο για ηλεκτρομαγνητική εκπομπή χαμηλότερης συχνότητας, κάτι το οποίο αποτελεί οδηγό για την υλοποίηση επερχόμενων BANs, καθώς η μελλοντική έρευνα θα επεκταθεί σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα και θα εξεταστούν περισσότερες καταστάσεις.

Το 2009 παρουσιάστηκε άλλη μια έρευνα που αφορά την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το ανθρώπινο κεφάλι. [Wan Azlan Wan Zainal Abidin, 2009]. Χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ακτινοβολίας ένα μονόπολο και εφαρμόστηκε η μέθοδος FDTD. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz με ακτινοβολούμενη ισχύ 0.6 W. Από τα αποτελέσματα, οι τιμές του SAR που λαμβάνονται για τα κινητά τηλέφωνα που λειτουργούν σε συχνότητα των 900 MHz και των 1800 MHz δεν υπερβαίνουν τα πρότυπα όρια ασφαλείας της ICNIRP. Συνεπώς, δεν φαίνεται να υπάρχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία που οφείλονται στη χρήση κινητού τηλεφώνου.

Το 2009, οι Alina Buleandra και Teodor Petrescu, σε άρθρο τους παρουσίασαν μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων έκθεσης στην οποία ένας ετερογενής ανθρώπινος εγκέφαλος ακτινοβολείται από ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από μια διπολική κεραία. [Buleandra et al, 2009]. Οι τιμές του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης, υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν για διαφορετικές περιπτώσεις συχνότητας της πηγής αλλά και απόστασης του μοντέλου-πηγής.

Η αξιολόγηση της έκθεσης του ανθρώπου σε νέα τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπήρξε και συνεχίζει να αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα που απαιτεί συνεχώς νέες και περισσότερες μελέτες. Το άρθρο αυτό, έχει παρουσιάσει μια σύγκριση μεταξύ των διάφορων σεναρίων ακτινοβολίας. Το μοντέλο ενός ετερογενούς ανθρώπινου εγκεφάλου εκτίθηκε στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μιας διπολικής κεραίας και τοποθετήθηκε σε διάφορες θέσεις γύρω από αυτό. Οι μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της εργασίας, έγκεινται στην αντικατάσταση της διπολικής κεραίας με ένα ρεαλιστικό μοντέλο ενός τηλεφώνου και επίσης στη μελέτη περιπτώσεων έκθεσης σε WiMAX διαμορφωμένες συχνότητες.

Το 2009, υλοποιήθηκε από μια ομάδα ερευνητών στην Ινδία, μια έρευνα που αφορούσε την αλληλεπίδραση κινητού τηλεφώνου με το ανθρώπινο κεφάλι. [S. S.

Karthikeyan et al, 2009]. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η ενέργεια που απορροφάται από τον βιολογικό ιστό εξαρτάται κυρίως από τις λειτουργικές παραμέτρους της κεραίας της τηλεφωνικής συσκευής. Προκειμένου να μειωθεί το SAR, χρησιμοποιήθηκαν μεταυλικά για τη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής επίδρασης μεταξύ κεραίας κινητού τηλεφώνου και μοντέλου ανθρώπινου κεφαλιού. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το SAR στο κεφάλι μπορεί να ελαττωθεί τοποθετώντας μεταυλικά ανάμεσα στην κεραία και στο κεφάλι. Με τη τοποθέτηση συστοιχίας διαχωρισμένων δακτυλίων (Split Ring Resonators-SRRs) περιοδικά, παίρνουμε μια ηλεκτρομαγνητική θωράκιση. Με το σωστό σχεδιασμό των κατασκευαστικών παραμέτρων της SRRs, η αποτελεσματική διαπερατότητα του μέσου μπορεί να γίνει αρνητική γύρω στις ζώνες συχνοτήτων των 900 MHz και των 1800 MHz. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις τιμές SAR, με την παρουσία του εκθέματος SRR παρουσίασαν σημαντική μείωση. Τα αποτελέσματα αυτά ενδείκνυνται για παροχή χρήσιμων πληροφοριών σε ότι αφορά τον σχεδιασμό εξοπλισμού κινητών επικοινωνιών, συμμορφομένων με τα όρια ασφαλείας.

Το 2011, στην εργασία τους οι Adel Z. El και Dein Alaeddin Amr ανέλυσαν τον Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης (SAR) που προκαλείται σε μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού διαφόρων μεγεθών, από ένα κινητό τηλέφωνο στα 900 MHz και 1800 MHz. [Adel Z. El et al, 2011]. Συγκεκριμένα, η μελέτη εξέτασε τις διαφορές στην τιμή του SAR μεταξύ ενηλίκων και παιδιών. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν αυτές οι διαφορές για τη συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα ορίων ασφαλείας. Επιπροσθέτως, διερευνήθηκαν, μέσα από τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων κεφαλιού που χρησιμοποιήθηκαν, σημαντικές σχεδιαστικές παράμετροι των κεραιών κινητών τηλεφώνων, όπως απόδοση ακτινοβολίας, συνολική αποτελεσματικότητα και κατευθυντικότητα.

Τα ληφθέντα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή του τοπικού SAR που αντιστοιχεί σε ένα πλήρως εντοπισμένο σημείο), καθώς και οι τιμές 1g και 10g SAR (οι οποίες αφορούν τη μέγιστη απορρόφηση ακτινοβολίας σε μάζες αναφοράς 1g και 10g αντίστοιχα) στο ανθρώπινο κεφάλι διαφόρων μεγεθών, που λαμβάνονται με ακτινοβολούμενη ισχύ της τάξης των 125 mW από μία μονοπολική κεραία που λειτουργεί στα 900 MHz και στα 1800MHz, ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος του κεφαλιού του ανθρώπου σε κάθε συχνότητα. Επίσης, τα μεγέθη του μοντέλου του κεφαλιού έχουν επίδραση στις σχεδιαστικές παραμέτρους της κεραίας του κινητού τηλεφώνου, και αυτή η επίδραση δεν μπορεί να εξαλειφθεί, επειδή αποτελεί ένα ηλεκτρομαγνητικό χαρακτηριστικό. Στη συνέχεια, τα ληφθέντα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι οι τιμές SAR 1g και 10g για το ανθρώπινο κεφάλι, που προκύπτουν με ακτινοβολούμενη ισχύ των 0.125 Watt για όλες τις προσομοιώσεις είναι κάτω από το όριο των 1.6 W/kg, το οποίο συνιστάται από την ICNIRP.

Το 2012, ερευνήθηκε σε μια εργασία ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης σε παιδιά από έκθεση σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). [R. P. Findla et P. J. Dimbylow, 2012]. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν FDTD υπολογισμοί στα 2.4 GHz και 5 GHz χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο καθισμένου δεκάχρονου παιδιού προκειμένου να ερευνηθεί η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στα σχολεία λόγω των ασύρματων τοπικών δικτύων. Η μελέτη αυτή παρουσίασε τις τιμές SAR ολόκληρου του σώματος αλλά και τις τοπικές. Αυτές οι τιμές προέκυψαν τόσο από πεδία επίπεδου κύματος όσο κι από πεδία που παράγονται από μια αντιπροσωπευτική κεραία WLAN που τοποθετήθηκε κοντά στο σώμα. Η μέγιστη μέση τιμή SAR για ολόκληρο το σώμα παρατηρήθηκε στην έκθεση στο επίπεδο κύμα και υπερέβαινε κατά πολύ τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Το μέγιστο τοπικό SAR σημειώθηκε στο κεφάλι στα 2.4 GHz με ισχύ εκπομπής της κεραίας στα 0.1 W και σε απόσταση 30 cm. Η τιμή αυτή βρισκόταν εντός των ορίων ασφαλούς έκθεσης.

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στις έρευνες που αφορούν την επίδραση της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από ασύρματες συσκευές μεταφοράς ενέργειας, στους βιολογικούς ιστούς. Το 2013, δημοσιεύθηκε μια αναφορά που παρείχε προτάσεις για επιστημονικές μεθόδους αξιολόγησης συμμόρφωσης των ασύρματων συστημάτων μεταφοράς ενέργειας με τα ασφαλή όρια έκθεσης του ανθρώπινου οργανισμού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. [Andreas Christ et Mark G. Douglas, 2013]. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα αντιπροσωπευτικό σύστημα μεταφοράς ενέργειας, κάτω από ένα περιορισμένο σύνολο συνθηκών λειτουργίας με στόχο την εκτίμηση των μέγιστων επιπέδων SAR. Το σύστημα λειτουργούσε σε χαμηλή συχνότητα MHz και επιτεύχθηκε μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σύζευξης κοντινού πεδίου μεταξύ δυο πηγών συντονισμού. Το γενικό σύστημα ασύρματης μετάδοσης ενέργειας μοντελοποιήθηκε αριθμητικά με το πηνίο εκπομπής τοποθετημένο σε απόσταση 10 mm από το κάθενα από τα τέσσερα ανατομικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Η έκθεση σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από την απόσταση και το σχεδιασμό της σπείρας. Διαπιστώθηκε ύστερα από την αριθμητική μοντελοποίηση του συστήματος, ότι βρισκόμαστε εντός των τοπικών ορίων SAR και των ορίων SAR για ολόκληρο το σώμα όταν τα μεταδιδόμενα ρεύματα πηνίου είναι από $0.5 A_{rms}$ έως $1,2 A_{rms}$ για τον μέγιστης έκθεσης προσανατολισμό του πηνίου. Για τις ίδιες διατάξεις πηνίου, η έκθεση μπορεί να διαφέρει περισσότερο από 3 dB για διαφορετικά ανθρώπινα μοντέλα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι έρευνες που αφορούν την έκθεση του ανθρώπινου σώματος σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που προέρχονται από ασύρματα σύστημα μεταφοράς ενέργειας, βρίσκονται σε μια συνεχή εξέλιξη με στόχο την διαμόρφωση ασφαλών συμπερασμάτων και την συμβολή τους στην συμμόρφωση των WTPs

συσκευών (Wireless Transfer Power Devices – Ασύρματες Συσκευές Μεταφοράς Ενέργειας) στα διεθνή πρότυπα ασφαλείας.

1.2 Σκοπός παρούσας εργασίας - Αντικείμενο μελέτης

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων με βιολογικά αντικείμενα ποικίλων επιπέδων πολυπλοκότητας. Κύριος στόχος είναι η εκτίμηση των επιπέδων στα οποία κινείται ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR).

Στην υπολογιστική δοσιμετρία, πραγματοποιείται μοντελοποίηση βιολογικών ιστών, θεωρώντας συνήθως τον κάθε ιστό ως ένα διηλεκτρικό μέσο με ή χωρίς απώλειες. Σε κάθε μέσο αποδίδονται συγκεκριμένες ηλεκτρικές ιδιότητες, οι οποίες και χαρακτηρίζουν τον ιστό που αντιπροσωπεύει. Έτσι σχηματίζεται μια βιολογική δομή (ή βιολογικό σύστημα) στην οποία γίνεται εκτίμηση των επιπέδων απορροφούμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μετράται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πεδίου είναι η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (FDTD). Με αυτή την μέθοδο προσφέρεται ένας αποτελεσματικός τρόπος επίλυσης στο πεδίο του χώρου και του χρόνου των εξισώσεων Maxwell, τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο. Η βασική διαμόρφωση μιας γεωμετρίας η οποία χρησιμοποιείται για υπολογισμούς στην FDTD αποτελείται από ένα διακριτοποιημένο βιολογικό σύστημα (κεφάλι ή σώμα) και μια πηγή εκπομπής ακτινοβολίας, που μπορεί να είναι είτε μια απλή κεραία είτε μια τερματική συσκευή. Μέσω αυτής της μεθόδου, στην ουσία, υπολογίζεται αριθμητικά η ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απορροφάται από βιολογικούς ιστούς για διάφορες συνθήκες έκθεσης και για διαφορετικούς τύπους πηγών. Οι ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση κατάλληλου λογισμικού πακέτου.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα ανθρώπινου κεφαλιού, ένα απλό αποτελούμενο συνολικά από 7 ιστούς κι ένα πιο λεπτομερές μοντέλο αποτελούμενο από 26 ιστούς. Και τα δύο μοντέλα αναπτύχθηκαν από τομές MRI κεφαλιού και στηρίζονται σε ρεαλιστικά δεδομένα.

Μελετήθηκε η περίπτωση τοποθέτησης μιας διπολικής κεραίας $\lambda/2$ ως πηγή ακτινοβολίας, δίπλα σε ένα απλό ανατομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, μια διπολική κεραία $\lambda/2$, σε συχνότητες λειτουργίας 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Η διπολική κεραία τοποθετήθηκε σε 5 διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του κεφαλιού μετρήθηκαν τα επίπεδα των τιμών SAR (μέγιστων τοπικών τιμών, μέγιστων μέσων τιμών με μάζα αναφοράς ένα γραμμάριο ιστού-1g SAR και με μάζα αναφοράς δέκα γραμμάρια-10g SAR). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως κατανέμεται το

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εσωτερικά του μοντέλου. Ως προς την τοποθέτηση της κεραίας, εξετάστηκαν συνολικά 4 περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η κεραία τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί, ενώ στη δεύτερη περίπτωση σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί. Έγινε σύγκριση των δύο αυτών περιπτώσεων. Εν συνεχεία στην τρίτη περίπτωση που εξετάστηκε η διπολική κεραία τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση μπροστά από το μάτι. Έπειτα σε οριζόντια θέση. Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Διερευνήθηκε επίσης η περίπτωση τοποθέτησης διπολικής κεραίας σε κατακόρυφη θέση δίπλα από λεπτομερές μοντέλο κεφαλιού. Εξετάστηκε επίσης αν τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμβαδίζουν με τα επιτρεπτά όρια έκθεσης σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως αυτά έχουν θεσπιστεί από διεθνείς οργανισμούς.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε μία τερματική συσκευή που περιλαμβάνει μια εσωτερική κεραία patch για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας GSM, στα 900 MHz και στα 1800 MHz. Η συσκευή τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από το ανθρώπινο κεφάλι. Συνολικά εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις προσανατολισμού της τερματικής συσκευής. Ειδικότερα, η τερματική συσκευή σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί, με κλίση 30 μοιρών δίπλα στο αυτί και με κλίση 45 μοιρών δίπλα στο αυτί. Πριν την κατασκευή κάθε γεωμετρίας και την εκτέλεση της προσομοίωσης, έγινε έλεγχος προσαρμογής της κεραίας τόσο στην κατακόρυφη θέση, όσο και με κλίση 30 και 45 μοιρών. Για κάθε απόσταση υπολογίστηκε η επίδρασή της στα επίπεδα SAR. Αφού μετρήθηκαν τα επίπεδα SAR, έγινε σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών προσανατολισμών της τερματικής συσκευής. Έπειτα εξετάστηκε κατά πόσο οι τιμές SAR που προκύπτουν, συμβαδίζουν με τα διεθνή όρια ασφαλούς έκθεσης.

Τέλος εξετάστηκε η περίπτωση επίπεδου κύματος που θεωρητικά προέρχεται από κεραία ασύρματου δικτύου στα 2.44 GHz. Αναλυτικότερα το επίπεδο κύμα προσομοιώνει την περίπτωση όπου μια πηγή βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από το κεφάλι. Υπολογίστηκαν οι τιμές SAR και στη συνέχεια έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών μοντέλων.

Κεφάλαιο 2

Βασικές Έννοιες

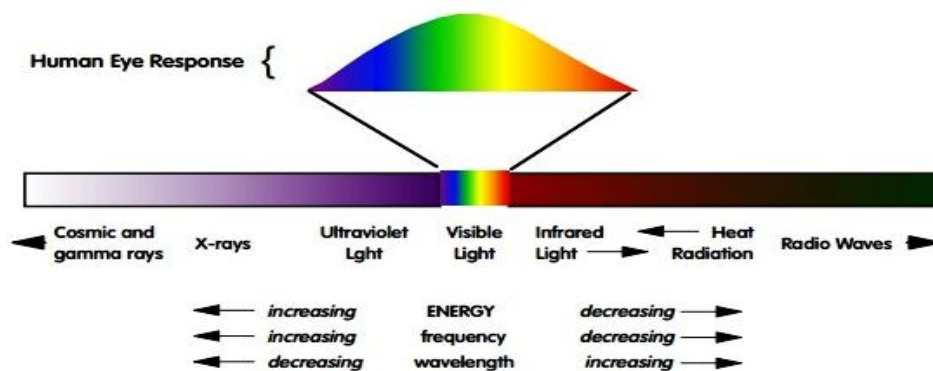
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται θεμελιώδεις έννοιες που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ειδικότερα αναλύεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μελετάται ο διαχωρισμός του σε ιοντίζουσες και μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

2.1 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εμφανίζονται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Γνωρίζουμε ότι η ακτινοβολία είναι ενέργεια που διαδίδεται και διαχέεται. Ένας μεγάλος αριθμός συχνοτήτων σε αριθμητική σειρά δημιουργούν ένα φάσμα (spectrum). Αυτή η σειρά είναι γνωστή ως **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**. Το φάσμα είναι μια συνεχής περιοχή ακτινοβολίας, που εκτείνεται απ' τα ραδιοκύματα έως τις ακτίνες γ.

Σε όλες τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος τα κύματα έχουν την ίδια φύση, διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, την ταχύτητα του φωτός και διαφέρουν ουσιαστικά μόνο στη συχνότητα και το μήκος κύματος. Η συχνότητα του κύματος με την οποία πάλλεται στο χώρο είναι η συχνότητα του δονούμενου ηλεκτρικού φορτίου που το δημιούργησε. Επειδή η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος είναι 300.000 km/s, ένα κύμα π.χ. που έχει συχνότητα 1s, θα έχει μήκος 300.000 km στον κενό χώρο. Ισχύει δηλαδή η σχέση:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$



Πηγή: physics.uc.edu

Εικόνα 2.1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (EM spectrum)



Πηγή: phys.utk.edu

Εικόνα 2.2: Το φάσμα ορατού φωτός (*visible light*). Σχηματικά φαίνεται ότι το ορατό μέρος του φάσματος μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σύμφωνα με το χρώμα, με κόκκινο στα μεγαλύτερα μήκη κύματος και βιολετί στα μικρότερα μήκη κύματος.

Όλα αυτά τα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαφέρουν μόνο σε μια ιδιότητά τους, το μήκος κύματος. Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται σύμφωνα με το μήκος κύματος, το αποτέλεσμα είναι ένα φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 2.1. Βλέπουμε ότι το ορατό φάσμα (*visible light*) είναι μόνο ένα μικρό μέρος ολόκληρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να ανιχνεύσει μόνο ένα μέρος του φάσματος του φωτός (εικόνα 2.2). Οι άνθρωποι δεν μπορούν να ανιχνεύσουν οπτικά οποιοδήποτε άλλο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος χωρίς τη βοήθεια ειδικού εξοπλισμού.

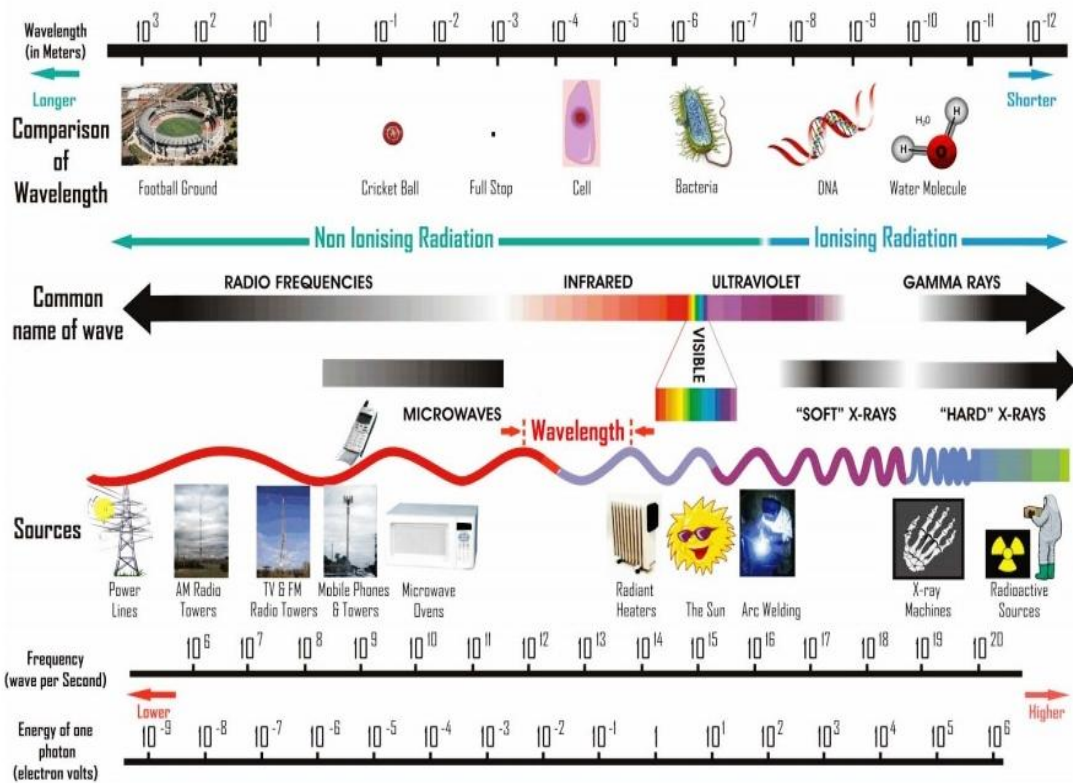
Στη εικόνα 2.1, απεικονίζεται η απόκριση-ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού (*human eye response*). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε (λαμβάνοντας υπόψη και την εικόνα 2.2) το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στο φως, στο μεσαίο τμήμα του ορατού φάσματος: πράσινο και κίτρινο. Γι' αυτό τα οχήματα έκτακτης ανάγκης έχουν χρώματα συχνά φανταχτερά - κίτρινο ή πράσινο. Το μάτι είναι λιγότερο ευαίσθητο προς το κόκκινο και μωβ, τα οποία είναι στα άκρα του ορατού φωτός. Τα υπέρυθρα και υπεριώδη τμήματα του φάσματος είναι αόρατα για τον άνθρωπο.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται γενικά σε επτά περιοχές, τις ζώνες συχνοτήτων, κατά φθίνουσα σειρά μήκους κύματος και αυξανόμενη ενέργεια και συχνότητα. Οι κοινές ονομασίες είναι:

- Ραδιοκύματα (Radio)
- Μικροκύματα (Microwave)
- Υπέρυθρη (IR)
- Ορατό φως (Visible)
- Υπεριώδης ακτινοβολία (UV- UltraViolet)
- Ακτίνες X (X-ray)
- Ακτίνες γ (Gamma ray)

Συνήθως, χαμηλότερης ενέργειας ακτινοβολία, όπως τα ραδιοκύματα, εκφράζεται μέσω της συχνότητας. Τα μικροκύματα, το υπέρυθρο, το ορατό και το υπεριώδες φως είναι συνήθως εκφρασμένα ως μήκη κύματος. Υψηλότερης ενέργειας ακτινοβολία, όπως οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ, εκφράζεται μέσω της ενέργειας ανά φωτόνιο.

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Πηγή : arpansa.gov.au/pubs/emr/spectrum

Εικόνα 2.3: Λεπτομερής απεικόνιση του ΗΜ φάσματος

Ο ακόλουθος πίνακας δίνει κατά προσέγγιση μήκη κύματος, συχνότητες και ενέργειες για επιλεγμένες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Πίνακας 2.1: Μήκος κύματος, συχνότητα και ενέργεια περιοχών ΗΜ φάσματος

Περιοχή	Μήκος κύματος (cm)	Συχνότητα (Hz)	Ενέργεια (eV)
Ραδιοκύματα	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Μικροκύματα	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Υπέρυθρη	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Ορατή	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Υπεριώδης	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Ακτίνες X	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Ακτίνες γ	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Σημείωση: Η σημειογραφία "eV" σημαίνει ηλεκτρόνιο-βολτ και αποτελεί μια κοινή μονάδα μέτρησης ενέργειας στην ατομική φυσική.

Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε κάποια γενικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής του ΗΜ φάσματος καθώς και τους τομείς στους οποίους αυτές χρησιμοποιούνται.

Ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα έχουν τα μεγαλύτερα μήκη κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Τα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα από 10 mm. Πιο συγκεκριμένα, το εύρος του μήκους κύματος των ραδιοκυμάτων κυμαίνεται από $10^6 - 10^{10}$ μm . Ανήκουν στο χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με συχνότητες έως περίπου 30 GHz.

Ραδιοκύματα εκπέπονται από τη γη, τα κτίρια καθώς κι από τα αυτοκίνητα, γενικά από αντικείμενα μεγάλου μεγέθους. Στα ραδιοκύματα έχει στηριχθεί η λειτουργία των ρανταρ, τα οποία ανιχνεύουν την παρουσία αλλά και την κίνηση σωμάτων τα οποία εκπέμπουν αυτού του τύπου την ακτινοβολία.

Τα ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται κυρίως στη ραδιοφωνία και την τηλεόραση, καθώς έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν ραδιοφωνικά σήματα και σήματα τηλεόρασης. Τα ραδιοφωνικά κύματα απαρτίζονται από δύο ειδών εκπομπές την FM (Frequency Modulated waver) και την AM (Amplitude Modulated waves). Τα AM κύματα έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος από τα FM κύματα. Λόγω του μικρότερου μήκους κύματος τα FM μπορούν να εντοπιστούν από μεγάλα σώματα όπως κτίρια και τούνελ. Τα AM κύματα, αντίθετα, είναι σε θέση να «αποφύγουν» τέτοια μεγάλα σώματα και να ταξιδέψουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες της κινητής τηλεφωνίας και άλλων συστημάτων πλοήγησης. Επίσης ραδιοκύματα συναντάμε στις δορυφορικές επικοινωνίες και στα δίκτυα υπολογιστών. Γενικά αξιοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών.

Μικροκύματα

Τα μικροκύματα βρίσκονται στο εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ ραδιοκυμάτων και υπέρυθρης ακτινοβολίας(IR). Έχουν συχνότητες από 3 GHz έως και περίπου 300 GHz και μήκη κύματος από 10 mm έως περίπου 100 μm . Αποτελούν δηλαδή ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής ενέργειας. Τα μικροκύματα χωρίζονται σε τρεις επιμέρους ζώνες :

- ✓ Στα δεκατομετρικά μικροκύματα (Ultra high frequency - **UHF**) με περιοχή συχνοτήτων από 0.3 έως 3 GHz
- ✓ Στα εκατοστομετρικά μικροκύματα (Super high frequency – **SHF**) με περιοχή συχνοτήτων από 3 έως 30 GHz
- ✓ Στα χιλιοστομετρικά μικροκύματα (Extremely high frequency – **EHF**) με περιοχή συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz

Τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται σε ευρωζωνικές επικοινωνίες, ραντάρ, καθώς και ως πηγή θερμότητας για φούρνους μικροκυμάτων (η ακτινοβολία απορροφάται από τις τροφές και τις θερμαίνει) και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται επίσης από τους αστρονόμους για τον προσδιορισμό της δομής

γειτονικών γαλαξιών, αλλά και του δικού μας. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούνται για εκπομπή επίγειου τηλεοπτικού σήματος (UHF). Επίσης, βρίσκουν εφαρμογή στο πρότυπο ανταλλαγής αρχείων Bluetooth.

Υπέρυθρη Ακτινοβολία

Η υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) είναι περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ των μικροκυμάτων και του ορατού φωτός. Η IR έχει συχνότητες από 30 THz μέχρι περίπου 400 THz και μήκη κύματος από 100 μm μέχρι 740 nm. Το φως της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι αόρατο για τα ανθρώπινα μάτια, αλλά μπορούμε να την αισθανθούμε ως θερμότητα εάν η ένταση είναι επαρκής. Οι υπέρυθρες ακτίνες μπορούν να γίνουν αντιληπτές από ορισμένους οργανισμούς αλλά και τεχνητά με θερμικές κάμερες.

Η υπέρυθρη θερμική ακτινοβολία δεν έχει καμία σχέση με την βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία ευθύνεται για εγκαύματα και κακώσεις του δέρματος. Τα υπέρυθρα κύματα είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί να ζεστάνει αντικείμενα χωρίς να ζεσταίνει τον αέρα γύρω τους. Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από θερμά σώματα και απορροφώνται εύκολα από τα περισσότερα υλικά. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που απορροφάται από ένα σώμα αυξάνει το πλάτος της ταλάντωσης των σωματιδίων από τα οποία αποτελείται, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του. Τα σώματα με μεγαλύτερη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερες υπέρυθρες και αντίστροφα αυξάνεται η θερμοκρασία των σωμάτων που απορροφούν περισσότερες υπέρυθρες.

Η υπέρυθρη θερμότητα στο υπέρυθρο θερμικό σύστημα είναι ακριβώς όπως η ζέστη που παίρνουμε από τον ήλιο μας ή ακόμα το είδος της ενέργειας που παράγεται από τον οργανισμό μας όταν καίει τα 'καύσιμά' του για να μας κρατήσει ζεστούς.

Η υπέρυθρη θερμική ακτινοβολία χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για θεραπευτικούς σκοπούς και μπορεί να χαρακτηριστεί ως απολύτως ασφαλής. Για παράδειγμα, στην Ιατρική, δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταδίδει θερμότητα σε ορισμένη περιοχή του σώματος. Επίσης σημαντική είναι η συμβολή τους στον κλάδο της αστροφυσικής και της αστρονομίας.

Ορατή Ακτινοβολία (φως)

Το ορατό φως βρίσκεται στη μέση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μεταξύ υπέρυθρης (IR) και υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας. Έχει συχνότητες από 400 THz έως 750 THz και μήκη κύματος από 380 nm έως περίπου 700nm . Γενικότερα, το ορατό φως ορίζεται ως τα μήκη κύματος που είναι ορατά στα ανθρώπινα μάτια.

Στον πίνακα που παρατίθεται παρακάτω απεικονίζονται προσεγγιστικά τα μήκη κύματος των διάφορων χρωμάτων του ορατού φάσματος.

Πίνακας 2.2 : Ζώνες μήκους κύματος των διάφορων χρωμάτων του ορατού φωτός

Μήκος κύματος στο κενό	Χρώμα
400nm – 440nm	Ιώδες
440nm – 480nm	Κυανό
480nm – 560nm	Πράσινο
560nm – 590nm	Κίτρινο
590nm – 630nm	Πορτοκαλί
630nm – 700nm	Ερυθρό

Αξίζει να σημειωθεί ότι το χρώμα μιας επιφάνειας εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα της επιφάνειας αυτής να ανακλά τα ποικίλα μήκη κύματος. Δηλαδή μια επιφάνεια θα φαίνεται στο ανθρώπινο μάτι κυανή όταν ανακλά τις ακτινοβολίες με μήκη κύματος 440 nm έως 480 nm και απορροφά τις υπόλοιπες.

Υπεριώδης Ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ του ορατού φωτός και των ακτίνων Χ. Έχει συχνότητες από $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ έως $3 \times 10^{17} \text{ Hz}$ και μήκη κύματος περίπου 10nm έως 380nm. Το υπεριώδες φως είναι ένα συστατικό του ήλιου, ωστόσο είναι αόρατο στο ανθρώπινο μάτι. Υπάρχουν τρία είδη υπεριώδους ακτινοβολίας:

- ✓ **UV – A:** Κυμαίνεται στο κενό από 315nm έως 400nm και αποτελεί το πιο ακίνδυνο είδος ακτινοβολίας.
- ✓ **UV – B:** Κυμαίνεται στο κενό από 280nm έως 315nm. Αυτή η ακτινοβολία προκαλεί το μαύρισμα, αλλά μπορεί να γίνει επικίνδυνη μετά από υπερβολική έκθεση στον ήλιο.
- ✓ **UV – Γ:** Κυμαίνεται στο κενό από 40nm έως 280nm. Πρόκειται για το πιο επικίνδυνο είδος υπεριώδους ακτινοβολίας. Επιστήμονες, χρησιμοποιώντας αυτή την ακτινοβολία έχουν πετύχει εργαστηριακά μεταλλάξεις.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η υπεριώδης ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος προκαλεί βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, οι οποίες μπορεί να είναι τόσο σοβαρές και να οδηγήσουν ακόμα και στην εμφάνιση καρκίνου. Επίσης κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το μαύρισμα του δέρματος οφείλεται στη μελανίνη που παράγει ο οργανισμός προκειμένου να προστατευθεί από την υπεριώδη ακτινοβολία. Εκτενέστερη ανάλυση στις βιολογικές επιδράσεις αυτής της ακτινοβολίας στους ανθρώπινους ιστούς θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Ακτίνες Χ

Αποτελούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πολύ μεγάλης συχνότητας. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η διατρητική τους ικανότητα, που σημαίνει ότι διαπερνούν

εύκολα αρκετά υλικά και μπορούν να καταστρέψουν τους ιστούς δέρματος διαφόρων ζώων. Οι ακτίνες X ταξινομούνται σε δύο βασικούς τύπους: τις μαλακές (soft) ακτίνες X και τις σκληρές (hard) ακτίνες X. Οι μαλακές ακτίνες X περιλαμβάνουν το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ της υπεριώδους (UV) και των ακτίνων γ. Έχουν συχνότητες από $3 \times 10^{16} \text{ Hz}$ έως 10^{18} Hz και μήκη κύματος από περίπου 10 nm έως περίπου 100 pm. Οι σκληρές ακτίνες X καταλαμβάνουν την ίδια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με τις ακτίνες γ. Η μόνη διαφορά μεταξύ τους είναι η πηγή τους: οι ακτίνες X παράγονται από την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων, ενώ οι ακτίνες γ παράγονται από τους ατομικούς πυρήνες.

Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ιατρική, για διαγνωστικούς σκοπούς (ακτινογραφίες) αλλά και στην μελέτη ποικίλων κρυσταλλικών δομών. Μπορούν να καταστούν επιβλαβείς για τους βιολογικούς ιστούς αν υπάρχει υπερέκθεση σ'αυτές.

Ακτίνες γ

Οι ακτίνες γ βρίσκονται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος πάνω από τις μαλακές ακτίνες X. Έχουν τα μικρότερα μήκη κύματος και τη μεγαλύτερη συχνότητα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από περίπου 10^{18} Hz και μήκη κύματος λιγότερο από 100 pm. Εκπέμπονται από τις αποδιεγέρσεις ραδιενεργών πυρήνων, από τις πυρηνικές αντιδράσεις ή από τις αντιδράσεις και τις διασπάσεις στοιχειωδών σωματιδίων.

Οι ακτίνες γ λόγω της τεράστιας διατρητικής τους ικανότητας, είναι πολύ διεισδυτικές και προκαλούν βλάβες στους βιολογικούς ιστούς από τους οποίους απορροφώνται. Για παράδειγμα μπορούν να διατρήσουν μια επιφάνεια ακόμα και τσιμέντου πάχους έως και 3 m. Καθιστούνται χρήσιμες για τη θανάτωση καρκινικών κυττάρων, όταν εφαρμόζονται σε προσεκτικά μετρημένες δόσεις σε μικρές περιοχές. Η ανεξέλεγκτη έκθεση είναι εξαιρετικά επικίνδυνη για τα έμβια όντα, διότι διασπά τις ουσίες των κυττάρων, μεταλλάσει το DNA προκαλώντας θάνατο. Βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών στην ιατρική και χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακές μελέτες. Μια τεχνική που χρησιμοποιεί ακτίνες γ, είναι το σπινθηρογράφημα όπου η ακτινοβολία παράγεται από ένα ραδιενεργό υγρό που έχει χορηγηθεί στο εξεταζόμενο.

2.2 Ιοντίζουσα και μη ιοντίζουσα ακτινοβολία

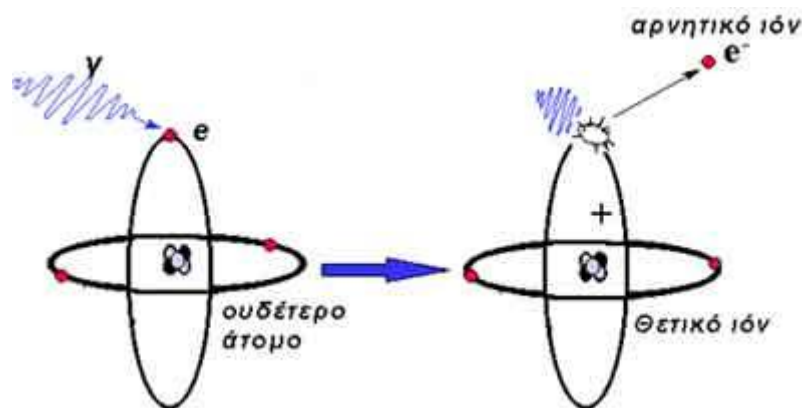
Με κριτήριο την ενέργεια που μεταφέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαχωρίζεται σε δύο περιοχές, την ιοντίζουσα και την μη ιοντίζουσα ακτινοβολία. Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στην μη ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση της ιονίζουσας και της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, κρίνεται σκόπιμο να αναφέρουμε τη διαδικασία η οποία αποτελεί βασικό κριτήριο διαχωρισμού των δύο αυτών ειδών.

Όταν κάνουμε λόγο για **ιοντισμό ή ιονισμό** ενός ατόμου, εννοούμε την περίπτωση στην οποία η ενέργεια που προσφέρεται στο άτομο είναι ικανή να προκαλέσει την απομάκρυνση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από τις ηλεκτρονικές ατομικές στοιβάδες. Έτσι το άτομο θα έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο, συνεπώς θα εμφανίσει θετικό φορτίο. Τα ραδιενεργά υλικά κατά τη διάρκεια της σχάσης τους παράγουν ιονίζουσα ακτινοβολία η οποία έχει αρκετή ενέργεια ώστε να διεγείρει και να αποχωρίσει ηλεκτρόνια από τα άτομα (παράγοντας δύο φορτισμένα ιόντα) ή να σπάσει μερικούς χημικούς δεσμούς.

Ο ιοντισμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην φυσική των ακτινοβολιών καθώς και στις συνέπειες αυτών στο ανθρώπινο σώμα. Τη θέση του ηλεκτρονίου το οποίο απομακρύνθηκε, παίρνει άλλο από μια υψηλότερη στοιβάδα κι αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας.

Η διαδικασία του ιοντισμού περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα :



Πηγή : eea.gr

Εικόνα 2.4: Η απορρόφηση μεγάλης ενέργειας από το ηλεκτρόνιο του δίνει τη δυνατότητα να εγκαταλείψει το άτομο και να απομακρυνθεί από αυτό. Η θέση που μένει άδεια στη στοιβάδα καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο υψηλότερης στοιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Παρατηρούμε την παραγωγή αντίθετα φορτισμένων ιόντων.

Συνεπώς, η ενέργεια αλλά και ο τρόπος αλληλεπίδρασης είναι οι παράγοντες που κατατάσσουν τις ακτινοβολίες σε ιονίζουσες ακτινοβολίες. Σε αυτό το σημείο, θα εξετάσουμε ξεχωριστά την κάθε κατηγορία.

2.2.1 Ιονίζουσα ακτινοβολία

Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing Radiation, IR) είναι το είδος της ακτινοβολίας που μεταφέρει πολύ υψηλή ενέργεια και εισχωρεί στον οργανισμό προκαλώντας βλάβες σε ζώντες οργανισμούς. Είναι ικανή να προκαλέσει ιοντισμό, την διαδικασία που

περιγράψαμε παραπάνω, δηλαδή καταστροφή της ενδομοριακής δομής, διάσπαση των διαμοριακών δεσμών αλλά και καρκινογενετικά φαινόμενα σε ένα βιολογικό σύστημα.

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία εκπέμπεται τόσο από τις φυσικές όσο κι από τις τεχνικές πηγές ακτινοβολίας. Οι πιο γνωστές ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτίνες Χ, οι οποίες παράγονται στις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στην ακτινολογία και οι ακτίνες γ, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην Πυρηνική Ιατρική. Σε αυτή την κατηγορία ακτινοβολιών ανήκουν επίσης οι σωματιδιακές ακτινοβολίες α, β και γ. Η διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος αλλά και την ενέργεια που μεταφέρει.

Ο άνθρωπος δέχεται ακτινοβολία καθημερινά από ένα σύνολο φυσικών και τεχνητών πηγών που βρίσκονται παντού γύρω του. Με βασικό κριτήριο την πηγή εκπομπής τους διακρίνονται σε φυσικές ακτινοβολίες, που προέρχονται από το περιβάλλον της γης και του διαστήματος, και τεχνητές ακτινοβολίες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από τον άνθρωπο.

Άρα οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες χωρίζονται σε ακτινοβολία από φυσικές πηγές και ακτινοβολία από τεχνητές πηγές/.

Φυσικές πηγές

Φυσικές πηγές ακτινοβολίας είναι τα συστατικά του φλοιού της γης και η κοσμική ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, φυσικές πηγές χαρακτηρίζονται τα φυσικά ραδιοϊσότοπα (ή φυσικά ραδιενεργά στοιχεία) τα οποία βρίσκονται στο έδαφος, στον αέρα, στο νερό, στο υπέδαφος αλλά και στην τροφή και προϋπάρχουν από τον σχηματισμό της γης. Επιπροσθέτως στο χώρο του διαστήματος, ο ήλιος αλλά και η κοσμική ακτινοβολία που ακτινοβολούν τα ουράνια σώματα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία πηγών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσό ακτινοβολίας που λαμβάνει ο άνθρωπος, από άποψη επιπτώσεων, είναι το φυσικό ραδιενεργό ραδόνιο, το οποίο προέρχεται από το ουράνιο που υπάρχει στα πετρώματα της γης και στο έδαφος.

Τεχνητές πηγές

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν κυρίως μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών, τα οποία έχουν υλοποιηθεί και χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο για την κάλυψη των αναγκών του. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς όπως στην βιομηχανία, στην έρευνα, στην ιατρική και στην παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα οι τεχνητές πηγές περιλαμβάνουν τις ακτίνες Χ, που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική, τις βιομηχανικές ακτίνες γ, κατάλοιπα από την πυρηνική βιομηχανία, ραδιογραφήσεις, συσκευές για έλεγχο ποιοτικών παραμέτρων αλλά και ακτινοβολητές για την επίτευξη αποστείρωσης υλικών.

Πίνακας 2.3: Μέση ενεργός ετήσια δόση ακτινοβολίας ανά πηγή

Πηγή	Δόση [mSv / έτος]
Φυσική ακτινοβολία	
Κοσμική ακτινοβολία	0.4
Εξόρυξη άνθρακα	0.7
Επεξεργασία ορυκτών	1.0
Επίγεια	0.5
Εσωτερική (στο σώμα)	0.3
Τεχνητή ακτινοβολία	
Κύκλος πυρηνικού καυσίμου	1.8
Βιομηχανική χρήση	0.5
Ιατρική χρήση	0.3
Φαρμακοβιομηχανία	0.1
Στρατιωτικές αμυντικές δραστηριότητες κρατών	0.2

Τα αριθμητικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα ανήκουν στο Επιστημονική Επιτροπή πάνω σε επιδράσεις ατομικής ενέργειας (Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

mSv : milliSievert (μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για την μέτρηση δόσης ακτινοβολίας). Η πιθανότητα βλάβης του οργανισμού έχει άμεση εξάρτηση από την δόση ακτινοβολίας (ή αλλιώς ενέργεια ανά χιλίογραμμο μάζας).

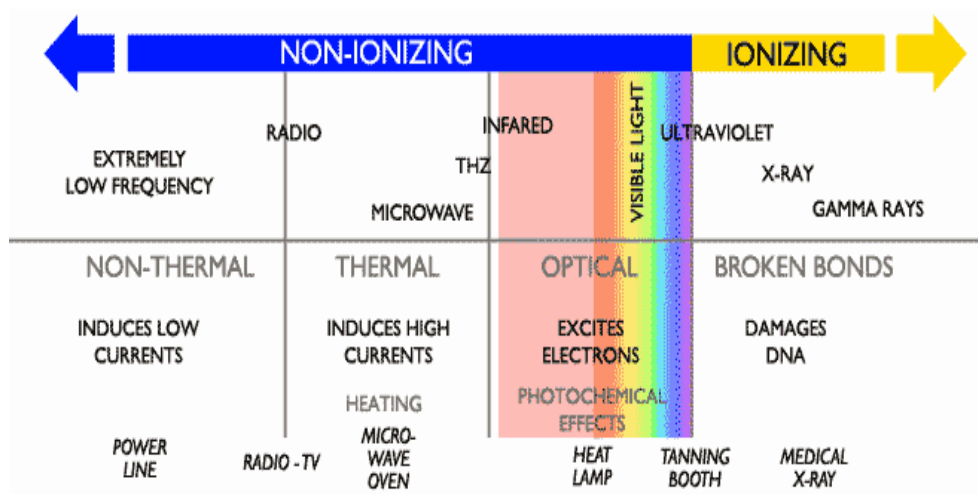
2.2.2 Μη ιονίζουσα ακτινοβολία

Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία (Non Ionizing Radiation, NIR) μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια, η οποία δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει ιοντισμό, αλλά είναι σε θέση να προκαλέσει χημικές, ηλεκτρικές και θερμικές επιδράσεις στα κύτταρα, οι οποίες μπορούν να είναι άλλες φορές επιβλαβείς κι άλλες φορές ευεργετικές στη λειτουργία τους.

Τα ραδιοκύματα, η ορατή, η υπέρυθη, τα μικροκύματα, η ακτινοβολία laser, η υπεριώδης ακτινοβολία, δηλαδή όλες οι ακτινοβολίες χαμηλής ενέργειας (ως και τις υπεριώδεις ακτινοβολίες), ανήκουν στην κατηγορία των μη ιοντίζουσων ακτινοβολιών, διότι δεν είναι σε θέση να προκαλέσουν ιοντισμό. Είναι ικανές να προκαλέσουν μόνο θερμικά αποτελέσματα, εξαιτίας των ταλαντώσεων που προκαλούν στα μόρια της ύλης.

Μη ιοντίζουσα ακτινοβολία υπάρχει στο περιβάλλον μας και προέρχεται από την έκθεσή μας είτε στις γραμμές υψηλής τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος, είτε στο φως του ήλιου είτε στις ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούμε καθημερινά, είτε στα κινητά μας τηλέφωνα. Επιπροσθέτως, μη ιοντίζουσα ακτινοβολία δημιουργείται από τις εγκαταστάσεις μεταβίβασης ραδιοφωνικών, τηλεφωνικών και τηλεοπτικών επικοινωνιών, τις δορυφορικές επικοινωνίες, τα ρανταρ, τις οικιακές συσκευές

μικροκυμάτων, τους λαμπτήρες πυρακτώσεως υψηλής έντασης, τους λαμπτήρες φθορίου κτλπ.



Πηγή: www.teraphysics.com

Εικόνα 2.5: Διαχωρισμός ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε ιονίζουσα και μη ιονίζουσα ακτινοβολία

Η μη ιονίζουσα περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διαχωρίζεται σε ζώνες-υποπεριοχές, ανάλογα με τη συχνότητα (και το μήκος κύματος). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στη μελέτη των μη ιονίζουσων ακτινοβολιών στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται συγκεντρωτικά οι ζώνες συχνοτήτων της περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που απαρτίζουν τις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες (έως 300 GHz).

Πίνακας 2.4: Πηγές εκπομπής μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας έως 300 GHz. Η μη-ιοντίζουσα περιοχή εκτείνεται έως την υπέρυθρη (infrared, IR), την ορατή (visible, VI) και την υπεριώδη (ultra-violet, UV) ακτινοβολία. Εμείς επικεντρωνόμαστε στη περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων και των μικροκυμάτων, λόγω της ιδιαίτερης βιολογικής τους σημασίας.

Περιοχή φάσματος	Προσδιορισμός Ζώνης Συχνοτήτων	Μήκος κύματος	Εύρος Συχνοτήτων	Πηγές Εκπομπής	
RF (Radio Frequencies)	ELF (Extremely Low Frequency)	100.000 km εώς 10.000 km	3 Hz εώς 30 Hz		
	SLF (Super Low Frequency)	10.000 km εώς 1.0 km	30 Hz εώς 300 Hz	Υψηλής τάσης Αγωγοί	
	ULF (Ultra Low Frequency)	1.000 km εώς 100 km	0.3 kHz εώς 3 kHz		
	VLF (Very Low Frequency)	100 km εώς 10 km	3 kHz Εώς 30 kHz	Συστήματα ραδιοαυτιλίας	
	LF (Low Frequency)	10 km εώς 1 km	30 kHz εώς 300 kHz	Συστήματα Πληροφορίας και καιρού Ραδιοφάρος	
	MF (Medium Frequency)	1000 m εώς 100 m	0.3 MHz εώς 3 MHz	Ερασιτεχνικοί Ραδιοσταθμοί	
	HF (High Frequency)	100 m εώς 10 m	3 MHz εώς 30 MHz	AM ράδιο Έλεγχος αεροπλοΐας Διεθνείς Επικοινωνίες	
	VHF (Very High Frequency)	10 m εώς 1 m	30 MHz εώς 300 MHz	Ερασιτεχνικοί Ραδιοσταθμοί FM ράδιο	
	MW (Micro-Waves)	UHF (Ultra High Frequency)	1m εώς 10 cm	300 MHz εώς 3 GHz	Κινητή και Ασύρματη τηλεφωνία Ιατρικές Διαθερμίες Οικιακές συσκευές φούρνων μικροκυμάτων
		SHF (Super High Frequency)	10 cm εώς 1 cm	3 GHz εώς 30 GHz	Ραδιοτηλεόραση Ραντάρ
EHF (Extremely High Frequency)		1 cm εώς 1mm	30 GHz Εώς 300 GHz	Τηλεπικοινωνίες Οπτικά συστήματα	

2.3 Η έννοια του Βιοηλεκτρομαγνητισμού

Ο βιοηλεκτρομαγνητισμός (Bioelectromagnetism) αναφέρεται στη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και βιολογικών οντοτήτων. Οι τομείς έρευνας και μελέτης περιλαμβάνουν ηλεκτρικά ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από ζωντανά κύτταρα, ιστούς ή οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των bioluminescent βακτηρίων. Για παράδειγμα, το δυναμικό της κυτταρικής μεμβράνης και τα ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν σε νεύρα και μύες, ως αποτέλεσμα των δυναμικών ενέργειας. Επίσης τεχνητές πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, όπως τα κινητά τηλέφωνα αλλά και ανάπτυξη νέων θεραπειών για τη θεραπεία διαφόρων παθήσεων. Ο όρος μπορεί να αναφέρεται επίσης στη δυνατότητα ζωντανών κυττάρων, ιστών, καθώς και οργανισμών να παράγουν ηλεκτρικά πεδία και στην απόκριση των κυττάρων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Συνεπώς πρόκειται για έναν επιστημονικό κλάδο που εξετάζει τα ηλεκτρικά, ηλεκτρομαγνητικά και μαγνητικά φαινόμενα που προκύπτουν στους βιολογικούς ιστούς. Αυτά τα φαινόμενα περιλαμβάνουν:

- τη συμπεριφορά των ευερέθιστων ιστών - ιστοί που διεγείρονται πολύ εύκολα - (οι πηγές)
- τα ηλεκτρικά ρεύματα και δυναμικά στον αγωγό
- το μαγνητικό πεδίο στο και πέραν του σώματος
- την απόκριση των ευερέθιστων κυττάρων στη διέγερση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου
- τις εγγενείς (εσωτερικές) ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του ιστού

Είναι σημαντικό να διαχωριστεί η έννοια του βιοηλεκτρομαγνητισμού από την έννοια της ηλεκτρονικής ιατρικής. Η πρώτη περιλαμβάνει βιοηλεκτρικά, βιοηλεκτρομαγνητικά και βιομαγνητικά φαινόμενα, μεθοδολογία μέτρησης και διέγερσης, ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε πραγματικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς αυτούς.

Εξ ορισμού, ο βιοηλεκτρομαγνητισμός είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος, αφού πρόκειται για τη σύνδεση των επιστημών ζωής με τις φυσικές επιστήμες και τη μηχανική. Κατά συνέπεια, έχουμε ένα ειδικό ενδιαφέρον σε εκείνους τους επιστημονικούς τομείς που συνδυάζουν μηχανική και φυσική με βιολογία και ιατρική. Εν συντομία, αυτοί οι τομείς ορίζονται ως εξής:

Βιοφυσική (Biophysics): Η επιστήμη που ασχολείται με την επίλυση των βιολογικών προβλημάτων όσον αφορά τις έννοιες της φυσικής.

Εμβιομηχανική (Bioengineering): Η εφαρμογή της μηχανικής για την ανάπτυξη των συσκευών υγειονομικής περίθαλψης, ανάλυση βιολογικών συστημάτων, και την κατασκευή προϊόντων με βάση την πρόοδο της τεχνολογίας αυτής. Ο όρος αυτός

επίσης συχνά χρησιμοποιείται για να καλύψει τόσο την Βιοϊατρική Τεχνολογία όσο και την και Βιοχημική Μηχανική (ή Βιοτεχνολογία).

Βιοτεχνολογία (Biotechnology): Η μελέτη της τεχνολογίας της μικροβιολογικής διαδικασίας. Τα κύρια πεδία εφαρμογής της βιοτεχνολογίας είναι η γεωργία, αλλά και η παραγωγή τροφίμων και φαρμάκων.

Ηλεκτρονική ιατρική (Medical Electronics): Ένα τμήμα της βιοϊατρικής τεχνολογίας που περιλαμβάνει ηλεκτρονικές συσκευές και μεθόδους στην ιατρική.

Ιατρική φυσική (Medical Physics): Μια επιστήμη, η οποία βασίζεται σε φυσικά προβλήματα στην κλινική ιατρική.

Βιοϊατρική τεχνολογία (Biomedical Engineering): Ένας κλαδος της μηχανικής που σχετίζεται με την εφαρμογή της επιστήμης και της τεχνολογίας (συσκευές και μεθόδους) στη βιολογία και την ιατρική.

Κεφάλαιο 3

Αλληλεπίδραση RF ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και βιολογικών ιστών

Όσο αυξάνουν οι καθημερινές δραστηριότητες των ανθρώπων, αυξάνεται και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, οι επικοινωνίες αλλά και η χρήση των κινητών τηλεφώνων και της ραδιοτηλεόρασης. Πρακτικά αυτό σημαίνει μεγαλύτερη παραγωγή, πληθώρα ηλεκτρικών μηχανημάτων και συσκευών και περισσότερα δίκτυα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το περιβάλλον του ανθρώπου να κατακλύζεται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Είναι ευρέως διαδεδομένες οι ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ιατρικής και πιο συγκεκριμένα για τη διαθερμία, την υπερθερμία κακοήθων ογκών αλλά και τη διέγερση της ανάπτυξης οστών και της επούλωσης τραυμάτων. Επιπροσθέτως, στον τομέα της ιατρικής διάγνωσης, οι ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη μη επεμβατική μέτρηση θερμοκρασίας αλλά και τη χρήση παθητικών μικροκυματικών τεχνικών για την ανίχνευση καρκινικών όγκων. Στην ακτινολογία, κατά την εφαρμογή ηλεκτρικών ρευμάτων χαμηλής συχνότητας, ενεργητικές μικροκυματικές τεχνικές και τεχνικές μέτρησης δυναμικών που επάγονται στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν για την τομογραφική του απεικόνιση. Η πιο διαδεδομένη ηλεκτρομαγνητική τεχνική τρισδιάστατης απεικόνισης, η οποία βασίζεται στο φαινόμενο του Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (MRI), δίνει χρήσιμες πληροφορίες σε ότι αφορά την διάγνωση στην κλινική πράξη

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αντικείμενο εκτενούς έρευνας από τους επιστήμονες οι δυσμενείς επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χαμηλής συχνότητας στον ανθρώπινο οργανισμό. Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα έχει εκδηλώσει έντονο ενδιαφέρον για την πιθανή επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην υγεία του ανθρώπου, λόγω της καθημερινής και συνεχούς έκθεσης σε αυτά. Μια σειρά από ηλεκτρομαγνητικές πηγές εκπέμπουν στην περιοχή των ραδιοκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως για παράδειγμα αυτές που χρησιμοποιούνται για μια τηλεοπτική εκπομπή (VHF και UHF), για μια ραδιοφωνική εκπομπή (AM και FM), για ραντάρ, για κινητή τηλεφωνία, για μικροκυματικές ζεύξεις και για δορυφορικές επικοινωνίες.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η μελέτη των επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι κρίσιμη για δύο σημαντικούς λόγους:

- 1) για να κατανοήσουμε τους κινδύνους για την υγεία μας και να καθορίσουμε ασφαλή πρότυπα για κινητά τηλέφωνα, ραδιοκύματα, ασύρματη δικτύωση, τηλεοπτικές και ραδιοφωνικές μεταδόσεις, γραμμές ρεύματος και απεικόνιση ιατρικής εικόνας με ακτίνες X
- 2) για να αναπτύξουμε και να αξιοποιήσουμε ιατρικές εφαρμογές και θεραπείες, όπως υπερηχογράφημα, απεικόνιση με Terahertz, θέρμανση ιστού, μαγνητική τομογραφία (MRI), μη επεμβατική χορήγηση φαρμάκων και επούλωση οστών.

3.1 Ηλεκτρικές ιδιότητες των βιολογικών ιστών

Η αλληλεπίδραση της RF και MW ακτινοβολίας με την ύλη περιγράφεται από τις εξισώσεις του Maxwell που αντικατοπτρίζουν το κύμα, παρά τη σωματιδιακή φύση της αλληλεπίδρασης. Τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερα από τις διαστάσεις των ατομικών ή μοριακών δομών. Ωστόσο, τα μήκη κύματος είναι συγκρίσιμα με τις διαστάσεις πολλών αντικειμένων, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών οργανισμών, και των εξαρτημάτων του ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτό συμβάλλει στην πολυπλοκότητα των φυσικών αλληλεπιδράσεων και στη συνέχεια στη μαθηματική τους αναπαράσταση.

Οι φυσικές πτυχές των αλληλεπιδράσεων της RF και MW ακτινοβολίας με την ύλη, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών συστημάτων, μπορούν να περιγραφούν με δύο ξεχωριστούς αλλά αλληλένδετους τρόπους. Μακροσκοπικές αλληλεπιδράσεις εκφράζονται σε όρους της κλασικής ηλεκτροδυναμικής (δηλαδή εξισώσεις του Maxwell). Οι αλληλεπιδράσεις προσδιορίζονται από διηλεκτρική επιδεκτικότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Οι λύσεις που αναζητούνται αφορούν την κατανομή των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του δοθέντος αντικειμένου καθώς και στην απορροφούμενη ισχύ δηλαδή στο ποσοστό της ενέργειας απορρόφησης.

Οι μικροσκοπικές αλληλεπιδράσεις εκφράζονται σε ατομικό, μοριακό και κυτταρικό επίπεδο, και προκαλούνται από τα εφαρμοζόμενα RF ή MW πεδία. Ένας ειδικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης μπορεί να είναι εξαιτίας ενός ηλεκτρικού πεδίου ή μαγνητικού πεδίου ή και των δύο. Οι τύποι μικροσκοπικών αλληλεπιδράσεων εξαρτώνται από τη δομή ενός δεδομένου μέσου και ποικίλουν ανάλογα με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η ηλεκτρική επιδεκτικότητα και η μαγνητική διαπερατότητα είναι μακροσκοπικές εκφράσεις των μικροσκοπικών αλληλεπιδράσεων. Και οι δύο είναι μιγαδικοί αριθμοί, η διηλεκτρική επιδεκτικότητα περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις απόκρισης προς το ηλεκτρικό πεδίο, ενώ η μαγνητική διαπερατότητα αντιπροσωπεύει την αλληλεπιδράσεις με το μαγνητικό πεδίο. Συχνότερα, οι σχετικές τιμές κανονικοποιούνται προς εκείνες τις του κενού που χρησιμοποιούνται.

Στον τομέα των βιολογικών επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων των μη ιοντίζουσων ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών με τη ζώντα ύλη, συνηθίζεται να αναφερόμαστε σε μια περιγραφή των μακροσκοπικών αλληλεπιδράσεων, όπως δοσιμετρία, και να περιγράψουμε μικροσκοπικές αλληλεπιδράσεις και τους μακροσκοπική αναπαράσταση σαν μηχανισμούς βιοφυσικής ή αλληλεπίδρασης. Ο στόχος αυτής της συνεισφοράς είναι να παρουσιαστούν οι θεμελιώδεις αρχές των αλληλεπιδράσεων των ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυμάτων με την ύλη, με ιδιαίτερη αναφορά στα βιολογικά υλικά και στα βιολογικά συστήματα.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και των βιολογικών ιστών, είναι απαραίτητο να μελετήσουμε αρχικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών τόσο σε επίπεδο βασικής όσο και σε επίπεδο εφαρμοσμένης βιοφυσικής. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης, μπορούν να ερευνηθούν και να μελετηθούν σε ποικίλα επίπεδα οργάνωσης των βιολογικών ιστών. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να θεωρήσουμε ή πολύπλοκα συστήματα (όργανα, ιστοί) ή λιγότερο πολύπλοκα συστήματα (αλυσίδες ή ομάδες ατόμων) ή υποκυτταρικές δομές (πυρήνας, μεμβράνη κλπ). Σε ότι αφορά το υποκυτταρικό επίπεδο, η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται μέσω των δυνάμεων που ασκεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στα ελεύθερα αλλά και στα δέσμια φορτία του βιολογικού συστήματος.

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε μακροσκοπικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των βιολογικών ιστών και θα προχωρήσουμε σε μια συσχέτιση με μοριακές ιδιότητες.

3.1.1 Μακροσκοπική προσέγγιση

Η ύλη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άθροισμα των σωματιδίων, ορισμένα εκ των οποίων διαθέτουν ηλεκτρικά φορτία, και μερικά δρουν ως μαγνητικά δίπολα. Λόγω της παρουσίας των φορτισμένων σωματιδίων και των μαγνητικών διπόλων, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα στην ύλη είναι εξαιρετικά πολύπλοκο. Ωστόσο, όσον αφορά την αντιμετώπιση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, μπορούν να εξεταστούν με την «μακροσκοπική» κλίμακα.

Γνωρίζουμε ότι στην περιοχή των RF και MW συχνοτήτων το ανθρώπινο σώμα είναι απόλυτα μη-μαγνητικό κι έτσι οι μαγνητικές ιδιότητες των ιστών περιγράφονται με τη μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου, άρα ισχύει:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (3.1)$$

Εξαίρεση αποτελεί η διαδικασία απεικόνισης με Πυρηνικό Μαγνητικό Συντονισμό (ή MRI) όπου έχουμε εμφάνιση παραμαγνητικών ιδιοτήτων των βιολογικών ιστών με την εφαρμογή ισχυρού συνεχούς (dc) μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, οι βιολογικοί ιστοί παρουσιάζουν πολύπλοκες και σημαντικές ηλεκτρικές ιδιότητες, οι οποίες κατά καιρούς έχουν μελετηθεί διεξοδικά από πληθώρα ερευνητών και επιστημόνων.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών περιλαμβάνουν την ειδική αγωγιμότητα σ και τη σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ_r . Όταν μια τάση V εφαρμοστεί μεταξύ των απέναντι πλευρών ενός μοναδιαίου κύβου βιολογικού υλικού, τότε θα δημιουργηθούν δύο ρεύματα:

- α) το ρεύμα αγωγιμότητας I_c , και
- β) το ρεύμα μετατόπισης I_d

Τα παραπάνω ρεύματα δίνονται από τις σχέσεις:

$$J_c = \sigma E \overset{\text{προκύπτει}}{\longleftrightarrow} I_c = \sigma V \quad (3.2)$$

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} \Rightarrow J_d = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \Rightarrow I_d = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.3)$$

Τόσο η ειδική αγωγιμότητα όσο και η ηλεκτρική διαπερατότητα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ διαφορετικών βιολογικών ιστών. Μπορούμε να πούμε όμως ότι η τιμή του I_c αυξάνει αργά με τη συχνότητα και παραμένει περίπου σταθερή μέχρι την τιμή των 100kHz. Αντίθετα, η τιμή του ρεύματος μετατόπισης αυξάνεται πολύ γρήγορα με τη συχνότητα και για συχνότητες πάνω από τα 10MHz περίπου το ρεύμα μετατόπισης γίνεται πιο σημαντικό από το ρεύμα αγωγιμότητας.

Μπορούμε να προχωρήσουμε στη διάκριση τριών περιοχών συχνοτήτων, όπου συμβαίνουν απότομες μεταβολές στη τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητας:

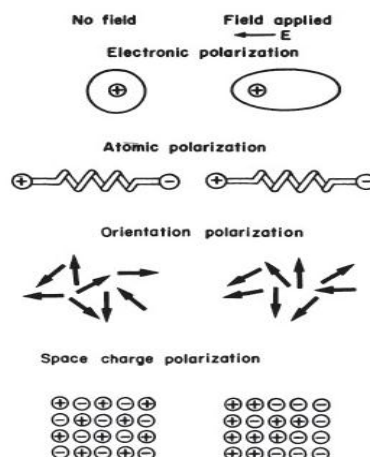
- Την περιοχή συχνοτήτων γύρω από τα 10Hz, όπου θεωρείται ότι ρόλο παίζουν οι διεπιφάνειες μεταξύ των ιστών και τα φορτία κοντά σε αυτές. Ανάμεσα στις φυσικές διεργασίες που συνεισφέρουν σε αυτή την απότομη μεταβολή συμπεριλαμβάνεται και η πόλωση μεγάλων μοριακών δομών στις κυτταρικές μεμβράνες. Κάτω απ' αυτήν την περιοχή συχνοτήτων, οι τιμές της ηλεκτρικής διαπερατότητας γίνονται αρκετά μεγάλες.
- Τις συχνότητες γύρω από το 1MHz (0.1-10MHz) που συνδέονται με τη χωρητικότητα των μεμβρανών και το σχηματισμό φορτίων γύρω από αυτές. Πάνω από αυτήν την περιοχή συχνοτήτων η εμπέδηση λόγω των κυτταρικών μεμβρανών είναι αμελητέα και τα ηλεκτρικά ρεύματα ρέουν εξίσου στον ενδοκυττάριο και το εξωκυττάριο χώρο.
- Την φασματική περιοχή γύρω από τα 10GHz, η οποία αντιστοιχεί στην πολωσιμότητα των μορίων νερού.

3.1.2 Μικροσκοπική προσέγγιση

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η ύλη μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από θετικούς πυρήνες που περιβάλλονται από αρνητικά ηλεκτρόνια. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα μια ελαφρά μετατόπιση των ηλεκτρονίων σε σχέση με τον πυρήνα, εισάγονται διπολικές ροπές με αποτέλεσμα να προκληθεί η

λεγόμενη ηλεκτρονική πόλωση των υλικών. Όταν τα άτομα διαφορετικών τύπων σχηματίζουν μόρια, συνήθως δεν μοιράζονται τα ηλεκτρόνιά τους συμμετρικά. Τα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται προς τα άτομα που ασκούν πιο ισχυρές εκκλικές δυνάμεις. Έτσι, τα άτομα επιβαρύνονται με αντίθετη πολικότητα, και ένα εξωτερικό πεδίο το οποίο ενεργεί, τείνει να αλλάξει τις θέσεις ισορροπίας των ίδιων των ατόμων. Με αυτή τη σχετική μετατόπιση των φορισμένων ατόμων ή ομάδων φορισμένων ατόμων, δημιουργείται ένας δεύτερος τύπος προκαλούμενης διπολικής ροπής, ο οποίος αντιπροσωπεύει την ατομική πόλωση του διηλεκτρικού. Η ασύμμετρη κατανομή φορτίου μέσα στις μοριακές δομές είναι υπεύθυνη για τη μόνιμη διπολική ροπή η οποία υφίσταται ακόμα και ανευ παρουσίας ηλεκτρικού πεδίου. Τα μόρια τα οποία εμφανίζουν μόνιμη διπολική ροπή έχουν την τάση προσανατολίζονται σύμφωνα με τη διεύθυνση πόλωσης του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Αυτοί οι τρεις μηχανισμοί πόλωσης που χαρακτηρίζονται από την ηλεκτρική πολωσιμότητα, την ατομική πολωσιμότητα και την διπολική πολωσιμότητα οφείλονται σε φορτία που είναι τοπικά δεσμευμένα σε άτομα, σε μόρια, ή σε δομές στερεών και υγρών. Επιπλέον, τα ελεύθερα φορτία που συνήθως υπάρχουν μπορούν να μετακινηθούν για κάποια απόσταση μέσα στο διηλεκτρικό υλικό. Όταν η κίνηση αυτών των φορτίων εμποδίζεται είτε γιατί προσελκύουν σε διαχωριστικές επιφάνειες είτε γιατί αυτοπαγιδεύονται στο υλικό, έχουμε την εμφάνιση χωρικών φορτίων και φυσικά αντίστοιχη πόλωση. Συνεπώς, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε στους μηχανισμούς πόλωσης ένα τέταρτο είδος, την χωρική ή διεπιφανειακή πόλωση, η οποία χαρακτηρίζεται από διεπιφανειακή πολωσιμότητα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι μηχανισμοί πόλωσης που αναλύθηκαν παραπάνω.



Πηγή : Book "Fundamentals of the interactions of radiofrequency and microwave energies with matter" by Grandolfo M., Michaelson S.M., Rindi A. (eds), Plenum Press, New York

Εικόνα 3.1: Μηχανισμοί πόλωσης βιολογικών υλικών

Οι παραπάνω τρόποι πόλωσης προκαλούν χαλάρωση αλλά και φαινόμενα διασποράς. Στα βιολογικά υλικά συναντάμε κυρίως τον μηχανισμό πόλωσης χωρικών φορτίων και διπολικής ροπής λόγω της ύπαρξης ιόντων και κυτταρικών μεμβρανών. Σε ότι αφορά την ατομική και την ηλεκτρονική πόλωση, εκεί οι συχνότητες χαλάρωσης (relaxation frequencies) υπερβαίνουν τα 300 GHz.

Η αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις RF και MW συχνότητες με την ύλη μπορεί να περιγραφεί μακροσκοπικά με την αντανάκλαση των μοριακών αλληλεπιδράσεων. Οι παράμετροι οι οποίες προέκυψαν χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις Maxwell, και θεωρητικά είναι δυνατόν να ποσοτικοποιήσουν τα πεδία εξωτερικά και εσωτερικά του κάθε αντικειμένου. Όμως πρακτικά, σε πολλές περιπτώσεις, οι δυσκολίες σε ότι αφορά την επίλυση των εξισώσεων Maxwell για πολύπλοκες γεωμετρίες και εξαιρετικά μη-ομοιόμορφες ιδιότητες του αντικειμένου, είναι ανυπέρβλητες.

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η αλληλεπίδραση των RF και MW ακτινοβολιών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας, όπως η συχνότητα, η πόλωση και η ένταση, τα βιολογικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, δηλαδή τη γεωμετρία (μέγεθος και σχήμα), την εσωτερική δομή και διηλεκτρική κατανομή, και, τέλος, το περιβάλλον, δηλαδή το μοντέλο πηγής-αντικείμενου αλληλεπίδρασης, παρουσία άλλων αντικειμένων σε κοντινή απόσταση.

3.2 Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR)

Η συχνότητα ακτινοβολίας, η πυκνότητα ισχύος (ο λόγος της ισχύος της ακτινοβολίας που διαδίδεται κάθετα μέσα από μια μοναδιαία επιφάνεια- μετριέται σε W/m^2) της και ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά για την μελέτη των βιολογικών επιδράσεων. Τα δύο πρώτα μεγέθη μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα με ακρίβεια, ενώ ο δείκτης SAR εκτιμάται δύσκολα με βάση κάποια μοντέλα.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί σωστά η απόκριση μίας βιολογικής δομής στην ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ακτινοβολείται μέσω των κεραιών, σε όρους προσπίπτοντος και επαγόμενου πεδίου, η ενέργεια που απορροφάται και διατηρείται μέσα στο σώμα, θεσπίστηκε και ορίστηκε να καταδεικνύεται από τον δείκτη SAR. Είναι η παράγωγος ως προς το χρόνο (ποσοστό ή πόσο) της στοιχειώδους ενέργειας (dW) που απορροφάται ή διαχέεται σε μια στοιχειώδη μάζα (dm) που περιέχεται σε έναν όγκο στοιχείο (dV) μιας δεδομένης πυκνότητας (ρ), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω σχέση:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (3.4)$$

Το SAR εκφράζεται σε μονάδες Watt ανά χιλιόγραμμα (W/kg) ή ισοδύναμα σε milliwatts ανά γραμμάριο (mW/g). Μπορεί επίσης να σχετιστεί με το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (3.5)$$

Συνεπώς ο δείκτης SAR (W/kg) εκφράζει την ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας ιστού στη μονάδα του χρόνου όπου το σ αναπαριστά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ιστού (Si/m ή S/m), το ρ την πυκνότητα του ίδιου ιστού (kg/m^3) και το E την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται (V/m) ή διαφορετικά την ένταση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σημειώνεται ότι η σχέση (3.5) μπορεί να γραφεί κι ως εξής:

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} \left(|\hat{E}_x|^2 + |\hat{E}_y|^2 + |\hat{E}_z|^2 \right) \quad (3.6)$$

όπου \hat{E}_x, \hat{E}_y και \hat{E}_z οι κορυφές των τιμών των διανυσμάτων του ηλεκτρικού πεδίου.

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης μπορεί να γραφτεί επίσης ως εξής :

$$SAR = \left(\frac{\sigma}{2\rho} \right) |\hat{E}_i|^2 = \left(\frac{\omega \epsilon_0 \epsilon''}{2\rho} \right) |\hat{E}_i|^2 \quad (3.7)$$

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες. Μεταξύ αυτών, τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας (η συχνότητα, η ένταση, η συνέχεια ή μη της διάδοσης του κύματος και η πόλωση της ακτινοβολίας), η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των ιστών, το πηλίκο του ύψους του σώματος προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και ο προσανατολισμός του σώματος σε σχέση με την πηγή (την απόσταση πηγής εκπομπής της ακτινοβολίας από τον βιολογικό ιστό) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο. Στο εσωτερικό πεδίο και διαμέσου αυτού, η κατανομή SAR δεν είναι ομοιόμορφη, διότι η ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων που προκαλείται στο σώμα είναι διάσπαρτη και απορροφούμενη σε διάφορες επιφάνειες.

Οι μορφές του SAR, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις της απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα μοντέλα είναι:

- ✓ η μέγιστη τιμή του τοπικού SAR (SAR_{local}), που αντιστοιχεί στο πλήρως εντοπισμένο σημείο, στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή SAR
- ✓ τα SAR_{1g} , SAR_{10g} που αφορούν τη μέγιστη απορρόφηση ακτινοβολίας σε μάζες αναφοράς 1g και 10g αντίστοιχα.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η μέτρηση του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης είναι μια απλή διαδικασία, πρακτικά όμως αδύνατη, λόγω της διεισδυτικής της φύσης. Στο εργαστήριο, μπορούμε να μετρήσουμε απευθείας το SAR, παρατηρώντας αύξηση της θερμοκρασίας μιας εντοπισμένης περιοχής του ιστού. Για να γίνει αυτό, είναι απαραίτητη η εισαγωγή θερμιδομέτρων στο εσωτερικό του ζωντανού ιστού, διαδικασία αδύνατη. Συνεπώς, η αξιολόγηση των κατανομών του SAR που συνδέονται με τέτοιες συσκευές (που λειτουργούν στην περιοχή των

ραδιοσυχνότητων), είναι μια σύνθετη διαδικασία, που συνήθως επιτυγχάνεται με αριθμητική προσομοίωση ή κατάλληλες ειδικές τεχνικές μέτρησης. Μεταξύ αυτών, η πιο ευρέως διαδεδομένη αριθμητική προσέγγιση βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD – Finite Difference Time Domain). Μοντελοποιούμε τις πηγές ακτινοβολίας και τους ιστούς και υπολογίζουμε τον SAR με την επίλυση του εκάστοτε ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος, μέσω αριθμητικών διαδικασιών. Η FDTD μέθοδος επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις Maxwell των αλληλεπιδράσεων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, στο πεδίο του χρόνου. Αυτή τη μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε και στην παρούσα εργασία και θα περιγράψουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι εάν για την απόσταση r της πηγής εκπομπής ακτινοβολίας από τον βιολογικό ιστό ισχύει:

$$r > \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D το μήκος του βιολογικού ιστού και λ το μήκος κύματος, η κατανομή στο μακρινό πεδίο είναι απλή και το βιολογικό σύστημα μέσα σε αυτό δέχεται λιγότερο ισχυρή επίδραση. Αν ισχύει:

$$r < \frac{2D^2}{\lambda}$$

τότε βρισκόμαστε σε συνθήκες εγγύς πεδίου, άρα η σχέση μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι πολύ σύνθετη και περίπλοκη. Η εξάρτηση της τιμής του SAR από ένα τόσο μεγάλο πλήθος παραμέτρων συνεπάγεται την ιδιαίτερως επιλεκτική απορρόφηση της ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα.

Αν και ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης είναι ένα μέγεθος που αφορά κυρίως το ηλεκτρικό πεδίο, συχνά χρησιμοποιείται και για τον υπολογισμό του τοπικού ρυθμού μεταβολής της θερμότητας, δηλαδή dT/dt με μονάδα μέτρησης $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$. Μαθηματικά, ο τυπικός ρυθμός μεταβολής της θερμότητας περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c} \quad (3.8)$$

όπου c είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του ιστού ή ειδική θερμότητα του ιστού (να σημειώσουμε ότι η τιμή της είναι συνήθως κοντά σε αυτή του νερού, δηλαδή $4186 \text{ J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$).

Υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν μηχανισμοί ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον, η σχέση (3.7), δηλαδή η σχέση που συνδέει την ειδική απορρόφηση ακτινοβολίας με την αύξηση θερμοκρασίας σε ένα μονωμένο βιολογικό σύστημα, μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\Delta T = \frac{SAR \times t_{exp}}{c} \quad (3.9)$$

όπου ΔT : η αύξηση της θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}$

t_{exp} : ο χρόνος έκθεσης

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης, στην περίπτωση της υπερθερμίας, χρησιμοποιείται ως μέτρος της απορροφούμενης ισχύος και αποτελεί εξαιρετικά ωφέλιμο εργαλείο για τη μέθοδο, καθώς ο υπολογισμός του μας δίνει πληροφορίες για το ποσό της ενέργειας που απορροφάται σε κάθε σημείο ενός ιστού.

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης αποτελεί βασικό εργαλείο τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην ανάλυση πειραμάτων, και *in vivo* αλλά και *in vitro*. Η πιο διαδεδομένη χρήση του έγκειται στο ότι αποτελεί τον κύριο παράγοντα με βάση τον οποίο καθορίζονται παγκοσμίως τα όρια ασφαλούς έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μιας κινητής συσκευής τηλεφώνου, τα οποία και θα δούμε αναλυτικότερα σε επόμενη παράγραφο της παρούσας εργασίας.

3.3 Βιολογικά αποτελέσματα επίδρασης RF ακτινοβολιών στους ιστούς

Η αλματώδης αύξηση της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών στην καθημερινή ζωή κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε πολλές επιστημονικές ομάδες και μελετητές στην αναζήτηση του τρόπου αλληλεπίδρασης της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την έμβια ύλη για τον καθορισμό ασφαλών ορίων έκθεσης σε αυτήν. Μέχρι πρόσφατα είχε επικρατήσει η γενικά αποδεκτή άποψη ότι η βιολογική δράση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι μόνο θερμικού χαρακτήρα, όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο από 0.5 μm . Πρόσφατες έρευνες διερευνούν τυχόν μη θερμικά αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τα βιολογικά συστήματα.

Γνωρίζουμε ότι, όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συναντούν κάποιο εμπόδιο, μέρος αυτών μπορεί ή να ανακλαστεί ή να διαθλαστεί ή να διαδοθεί μέσω του αντικειμένου ή να απορροφηθεί από αυτό το αντικείμενο. Το ποια από τις παραπάνω διαδικασίες θα λάβει χώρα, είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, του πόσο καλός αγωγός ηλεκτρισμού είναι το αντικείμενο, της γωνίας πρόσπτωσης αλλά και του σχήματος του αντικειμένου. Ειδικότερα, στο ανθρώπινο σώμα το οποίο έχει μια μέτρια αγωγιμότητα, μπορούν να συμβούν όλες οι παραπάνω διαδικασίες. Όπως συμβαίνει με κάθε μορφή ενέργειας, έτσι και με την ενέργεια που μεταφέρεται από τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα, μπορεί να επιδράσει σε ένα βιολογικό σύστημα. Το αποτέλεσμα της επίδρασης αυτής, μπορεί να είναι άλλοτε επιβλαβές κι άλλοτε ευεργετικό για το βιολογικό σύστημα. Αυτό εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες έκθεσης (πυκνότητα ισχύος, συχνότητα ακτινοβολίας, διάρκεια έκθεσης κλπ) όπως επίσης και από ποικίλους περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες.

Προκειμένου να εξετάσουμε τις βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στους ιστούς, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός τους σε τρεις επιμέρους κατηγορίες :

- 1) Τις θερμικές επιδράσεις
- 2) Τις μη θερμικές επιδράσεις
- 3) Τις αθερμικές επιδράσεις

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αποτελούν κοινό τόπο όλων των μελετητών, ενώ η τρίτη κατηγορία εμφανίζεται σπανιότερα στην βιβλιογραφία.

Ο διαχωρισμός της πρώτης και της δεύτερης κατηγορίας έγκειται στο παρακάτω παρατηρήσιμο φαινόμενο: αύξηση θερμοκρασίας μεγαλύτερη ή μικρότερη από 0.1 °C. Ειδικότερα, οι θερμικές επιδράσεις συνοδεύονται από αύξηση της θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 0.1 °C, λόγω της έκθεσης σε σχετικά υψηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Αντίθετα, στις μη θερμικές επιδράσεις, έχουμε θερμοκρασιακή αύξηση μικρότερη των 0.1 °C.

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε εκτενέστερα τις παραπάνω κατηγορίες καθώς και τους μηχανισμούς λειτουργίας αυτών.

3.3.1 Θερμικές επιδράσεις

Στην αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας με ζωντανούς οργανισμούς, το ότι υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}(\vec{r})$ αυξάνει την κινητική ενέργεια των μορίων νερού, κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στους ιστούς των οργανισμών. Αυτή η αλληλεπίδραση ευθύνεται για την αύξηση της θερμοκρασίας είτε τοπικά είτε συνολικά σε όλα το σώμα του ανθρώπου. Τέτοιου είδους επιδράσεις ονομάζονται θερμικές κι έχουν αυτήν την ονομασία λόγω της τοπικής παραγωγής θερμότητας.

Αναλυτικότερα, στον ζωντανό οργανισμό έχουμε διέγερση των ελεύθερων ηλεκτρονίων των ατόμων και εξαναγκασμένη πόλωση ατόμων και μορίων του ιστού εξαιτίας της ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος. Στη συνέχεια, γίνεται ευθυγράμμιση των ήδη υπάρχοντων δίπολων ατόμων και μορίων με το ηλεκτρικό δίπολο του κύματος κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του ιστού.

Οι βλάβες που μπορεί να υποστεί ένας ζωντανός οργανισμός προξενούνται από τη θέρμανση των ακτινοβολούμενων ιστών και την ταυτόχρονη αδυναμία των θερμορυθμιστικών μηχανισμών των ιστών να αντιμετωπίσουν την ακτινοβολία. Για να εκφραστεί η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο, χρησιμοποιούμε το μέγεθος της πυκνότητας ισχύος (mV/cm^2), το οποίο μας δίνει έμμεσες πληροφορίες μόνο για την ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα απορροφήσει το σώμας μας, όταν βρεθεί στο ακτινοβολούμενο σημείο. Πρόκειται για ένα μέτρο των συνθηκών που επικρατούν σε ένα σημείο, όμως πριν βρεθούμε

σ'αυτό. Οι ιστοί θα απορροφήσουν ένα μέρος μόνο της ακτινοβολίας αυτής και όχι απαραίτητα ομοιόμορφα. Η μέση τιμή της ακτινοβολίας που απορροφάται εκφράζεται από τον ειδικό ρυθμό απορρόφησης που μελετήσαμε παραπάνω.

Στις θερμικές επιδράσεις, η διαδικασία αύξησης της θερμοκρασίας που παρατηρείται μέσα στους βιολογικούς ιστούς, απαρτίζεται από δύο στάδια.

1ο στάδιο: Αρχικά, διεισδύει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα στους ιστούς (είτε τοπικά είτε συνολικά)

2ο στάδιο: Με την προϋπόθεση ότι διατηρείται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που έχει επιβληθεί, αυξάνεται η θερμοκρασία και η απορροφούμενη ισχύς ανά μονάδα μάζας (SAR) έχει μια αριθμητική τιμή αρκετά μεγάλη.

3.3.1.1 Νόμοι που καθορίζουν το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό των βιολογικών ιστών

Στις θερμικές επιδράσεις, υπάρχουν δύο νόμοι οι οποίοι καθορίζουν το θερμοκρασιακό πεδίο στο εσωτερικό των βιολογικών ιστών:

- 1) Απελευθερούμενη ισχύς ανά μονάδα μάζας (ή απλούστερα το γνωστό SAR)
- 2) Βιοθερμική εξίσωση - Θερμική αντίδραση βιολογικών ιστών

Η αλληλεπίδραση εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με τους βιολογικούς ιστούς, εξαρτάται από :

- 1) Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
 - ✓ Συχνότητα (άρα και μήκος κύματος)
 - ✓ ένταση
 - ✓ πόλωση προσπίπτοντος κύματος
 - ✓ προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος
- 2) Τα χαρακτηριστικά του βιολογικού συστήματος
 - ✓ γεωμετρία (σχήμα και μέγεθος)
 - ✓ εσωτερική δομή (διηλεκτρικές ιδιότητες ιστών)
- 3) Την απόσταση της πηγής εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και του βιολογικού συστήματος
 - ✓ αν βρισκόμαστε στο κοντινό ή μακρινό πεδίο
 - ✓ συνθήκες/ ιδιότητες που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο.
- 4) Χρόνο έκθεσης βιολογικού ιστού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Όσον αφορά την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο σώμα του ανθρώπου και το βάθος διείσδυσης, σημαντική είναι η εξαρτησή του από τη συχνότητα αλλά και την πόλωση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου. Με αύξηση της συχνότητας, το βάθος διείσδυσης ελαττώνεται. Παρατηρείται μεγαλύτερη απορρόφηση για πόλωση παράλληλη με τον άξονα του ανθρώπινου σώματος. Σε έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων (40 -100 MHz), παρατηρείται αύξηση της απορρόφησης ισχύος από το ανθρώπινο σώμα και

φαινόμενα συντονισμού. Για τμήματα του ανθρώπινου σώματος (άκρα, κεφάλι) παρατηρούνται φαινόμενα συντονισμού και αύξηση απορρόφησης ισχύος σε μεγαλύτερες συχνότητες.

Το πόση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα απορροφήσουν οι ιστοί, εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των ιστών, οι οποίες εξαρτώνται από την συχνότητα και την περιεκτικότητα των ιστών σε νερό.

Τέλος, σε ότι αφορά τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον πηγής-βιολογικού συστήματος, η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία εδάφους ή αγωγίμων αντικειμένων σε κοντινή απόσταση από το βιολογικό σύστημα.

Βιοθερμική εξίσωση – Θερμική συμπεριφορά των βιολογικών ιστών

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στους ιστούς που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συνδέεται με τον Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης (SAR) με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(SAR + P_m - P_c - P_b)}{C} \quad (3.10)$$

Όπου: ΔT : αύξηση θερμοκρασίας, Δt : χρόνος έκθεσης

P_m : ρυθμός θερμότητας μεταβολισμού

P_c : ρυθμός απώλειας θερμότητας ανά μονάδα όγκου λόγω θερμικής αγωγιμότητας

P_b : ρυθμός απώλειας θερμότητας ανά μονάδα όγκου λόγω αιματικής ροής

C : ειδική θερμότητα

Αν πριν την έκθεση, υπάρχει μια σταθερή κατάσταση όπου :

$$P_m = P_c + P_b \quad (3.11)$$

τότε καταλήγουμε στη σχέση (3.8) (που είδαμε στην παράγραφο 3.3). Συνεπώς, κατά την αρχική περίοδο της έκθεσης έχει κανείς :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{SAR}{C}$$

και το SAR μπορεί να προσδιοριστεί από τις μετρήσεις της αύξησης θερμοκρασίας στον ιστό σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έκθεση.

3.3.2 Μη θερμικές και αθερμικές επιδράσεις

Οι **μη θερμικές επιδράσεις**, ονομάζονται κατ'αυτόν τον τρόπο, διότι προκαλούνται από απορρόφηση χαμηλών ποσών ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, τα οποία δεν είναι ικανά να αυξήσουν τη θερμοκρασία του ιστού. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι μια βιολογική επίδραση δε συνιστά υποχρεωτικά κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου.

Τα μη θερμικά βιολογικά αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που έχουν αναφερθεί στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία είναι ενδεικτικά:

- Δέσμευση και απελευθέρωση ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) στον εγκέφαλο [Adey and Bawin, 1980]
- Επιτάχυνση της συγκόλλησης καταγμάτων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία
- Ακουστικό – μικροκυματικό φαινόμενο (σημειώνεται στην περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, από ραντάρ παλμικής φύσεως). Ωστόσο, το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι αμφιλεγόμενο, διότι άλλοι ερευνητές το θεωρούν θερμικό.
- Επαγωγή ιού από καρκινικά κύτταρα.

Οι **αθερμικές επιδράσεις**, ονομάζονται έτσι διότι είναι αποτέλεσμα απορρόφησης θερμότητας ικανής να αυξήσει τη θερμοκρασία, χωρίς όμως τελική αύξηση της θερμοκρασίας του ιστού. Συμβαίνουν συνήθως για συχνότητες πεδίων κάτω των 10 MHz. Ωστόσο, αθερμικές επιδράσεις μπορεί να συναντήσουμε και σε υψηλότερες συχνότητες, εφόσον οι τιμές του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης είναι μικρότερες από τα όρια.

Κεφάλαιο 4

Όρια ασφαλούς έκθεσης σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Παγκοσμίως, διεθνείς οργανισμοί και χώρες έχουν προχωρήσει στη θέσπιση ορίων αποδεκτής έκθεσης του γενικού πληθυσμού και των εργαζομένων σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στόχος της θέσπισης αυτών των ορίων – προτύπων είναι η διασφάλιση της υγείας του ανθρώπου από τις τυχόν βλαβερές επιδράσεις της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τα όρια που προτείνουν διάφοροι διεθνείς οργανισμοί, αφού ορίσουμε την έννοια της δοσιμετρίας.

4.1 Δοσιμετρία

Δοσιμετρία είναι η μέτρηση ή ο προσδιορισμός ύστερα από υπολογισμούς, της εσωτερικής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ή της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος, της ειδικής απορρόφησης ενέργειας ή της κατανομής του ρυθμού ειδικής απορρόφησης ενέργειας σε βιολογικά συστήματα τα οποία εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Άρα, ο όρος δοσιμετρία χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της έκθεσης βιολογικών ιστών στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Στην παρούσα εργασία μελετούμε τον Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης, η εκτίμηση του οποίου μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά. **Πειραματικά**, ο SAR μπορεί να προσδιοριστεί σε ομοιώματα βιολογικών ιστών που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και βασίζονται στη μέτρηση έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ή του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας, στην περίπτωση όπου ηλεκτρομαγνητικό κύμα υψηλής ισχύος ακτινοβολήσει για μικρό χρονικό διάστημα το ομοίωμα που μελετούμε. **Υπολογιστικά**, για να μελετήσουμε την κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που απορροφάται από τους βιολογικούς ιστούς, χρησιμοποιούμε αναλυτικές μεθόδους και αριθμητικές τεχνικές προσομοίωσης. Οι αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αναλύσουμε απλοποιημένα μοντέλα βιολογικών ιστών, όπως ομογενείς ή στρωματοποιημένες κανονικής μορφής (επίπεδες, κυλινδικές, σφαιρικές) γεωμετρικές διατάξεις. Από την άλλη πλευρά εφαρμόζοντας αριθμητικές τεχνικές προσομοίωσης, μπορούμε να αναλύσουμε πολύπλοκα ρεαλιστικά μοντέλα βιολογικών ιστών με ανομοιογένειες. Έτσι, μπορούμε να λάβουμε υπόψη την σύνθετη και περίπλοκη φύση του κοντινού πεδίου, κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ της πηγής και των βιολογικών ιστών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης δεν είναι ένα άμεσα μετρήσιμο μέγεθος, συχνά χρησιμοποιείται σαν παράμετρος δοσιμετρίας η πυκνότητα ισχύος (ισχύς ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στη μονάδα επιφάνειας). Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πρότυπα, τα οποία έχουν θεσπιστεί και θα δούμε σε αυτή την παράγραφο, αναφέρονται συνήθως στις συνθήκες μακρινού πεδίου.

Για να προσδιορίσουμε το μακρινό πεδίο, αρκεί να γνωρίζουμε ένα από τα μεγέθη: ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο ή πυκνότητα ισχύος προσπίπτοντος κύματος, για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα υπόλοιπα δύο. Η πυκνότητα ισχύος στο μακρινό πεδίο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(W/m^2) = \frac{E_0^2}{2Z_0} \quad (4.1)$$

όπου $Z_0 = 120\pi \Omega$, είναι η σύνθετη αντίσταση ελεύθερου χώρου και E_0 το πλάτος του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου. Η σχέση αυτή ισχύει μόνο στο μακρινό πεδίο, διότι τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαθέτει χαρακτηριστικά επίπεδου κύματος. Επίσης, τα διανύσματα μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και προς την διεύθυνση διάδοσης.

Σε ότι αφορά το κοντινό πεδίο, εκεί, τα διανύσματα του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλονται γρήγορα και η σχέση που τα συνδέει είναι αρκετά σύνθετη. Συνεπώς, όταν ένα βιολογικό σύστημα εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από πηγές κοντά σε αυτό, η πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος κύματος δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος δοσιμετρίας. Στο κοντινό πεδίο το βιολογικό σύστημα αλληλεπιδρά με την πηγή ακτινοβολίας, κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται το πεδίο που δημιουργείται από την πηγή, άρα και η ισχύς που απορροφάται από το σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, τα όρια ασφαλούς έκθεσης, προτιμάται να ορίζονται σύμφωνα με τον Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης (SAR), ο οποίος αποτελεί το καθοριστικότερο μέγεθος στην διαδικασία ποσοτικοποίησης των θερμικών επιδράσεων.

4.2 Ιστορική αναδρομή στα όρια επιτρεπτής έκθεσης

Η μελέτη των επιδράσεων της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων, αποτέλεσε πεδίο έρευνας επιστημονικών ομάδων από τα μέσα της δεκαετίας του 1950. Ωστόσο, η διερεύνηση και θέσπιση των ορίων έκθεσης καθυστέρησε.

Η πρώτη προσπάθεια θέσπισης ορίων έκθεσης, έγινε από την Διεθνή Ένωση Προστασίας από την Ακτινοβολία (IRPA – International Radiation Protection Association), με την ανάθεση σε μια ομάδα να εξετάσει τα θέματα προστασίας από την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η

ομάδα αυτή το 1977 ονομάστηκε Διεθνής Επιτροπή Μη Ιονίζουσας Ακτινοβολίας (INIRC – International Non-Ionizing Radiation Committee). Η INIRC δημιούργησε ένα σημαντικό ερευνητικό υπόβαθρο γύρω από την μελέτη των επιδράσεων της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας. Το 1992, η INIRC μετονομάστηκε σε Διεθνή Επιτροπή Προστασίας από την Μη Ιονίζουσα Ακτινοβολία (ICNIRP – International Commission on Non – Ionizing Radiation Protection). Ο μη κυβερνητικός αυτός οργανισμός που αναγνωρίζεται επισήμως από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization-WHO), αποτιμά τα επιστημονικά αποτελέσματα στους τομείς της επιδημιολογίας, της ιατρικής, της βιολογίας, της φυσικής και της μηχανικής σε όλο τον κόσμο. Η ICNIRP ανακοινώνει οδηγίες που προτείνουν όρια για την έκθεση, τα οποία αναθεωρούνται και ενημερώνονται περιοδικά, όταν κρίνεται απαραίτητο.

Οι πιο πρόσφατες οδηγίες της ICNIRP δημοσιεύτηκαν το 1998 και έχουν υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης CENELEC (Commission European de Normalisation Electrotechnique) και το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο κατά τη σύνταξη του ισχύοντος προτύπου για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι οδηγίες της ICNIRP αποτελούν τη βάση και της ελληνικής νομοθεσίας για την προστασία του κοινού από την έκθεσή του στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO) τονίζει ότι η έκθεση σε επίπεδα που δεν υπερβαίνουν τα όρια που προτείνει η ICNIRP δεν φαίνεται να έχει κάποια αρνητική συνέπεια στην υγεία του ανθρώπου.

4.3 Βασικά στοιχεία για τα όρια έκθεσης

Σε αυτό το σημείο, θα παραθέσουμε ορισμένες βασικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Αρχικά θα γίνει διαχωρισμός των δυο μεγάλων κατηγοριών έκθεσης, του επαγγελματικού και του γενικού πληθυσμού (κοινού). Στη συνέχεια θα αναλυθεί η έννοια του παράγοντα ασφαλείας και της μέσης τιμής μεγεθών και, τέλος, θα δοθούν οι ορισμοί των βασικών περιορισμών και των επιπέδων αναφοράς.

4.3. 1 Επαγγελματική και γενικού πληθυσμού έκθεση

Τους διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης έχει απασχολήσει αρκετά το κατά πόσο θα πρέπει να θεσπιστούν διαφορετικά όρια ασφαλείας για τον γενικό πλήθος ή ευρύ κοινό (public limits) από τα επαγγελματικά όρια (occupational limits), δηλαδή όρια τα οποία ισχύουν στην περίπτωση έκθεσης του ανθρώπου σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατά την διάρκεια της εργασίας του. Στόχος είναι το τελικό πρότυπο να αποτελεί πρότυπο δύο κατηγοριών (two – tiers standard). Υπάρχουν δυο αντικρουόμενες απόψεις πάνω σε αυτό το ζήτημα.

Η μια άποψη είναι ότι δεν υπάρχει κανένας λόγος διάκρισης των δύο κατηγοριών διότι:

- Ο παράγοντας ασφαλείας του 10, θεωρείται αρκετός για να καλύψει οποιεσδήποτε διαφοροποιήσεις περιβάλλοντος.
- Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων δεν υπάρχει η έννοια της δόσης, που συναντάμε την ιοντίζουσα ακτινοβολία, την οποία είδαμε στο 2^ο κεφάλαιο.
- Ο επαγγελματικά εκτιθέμενος πληθυσμός αποτελείται από ενήλικες που εκτίθενται γενικά κάτω από γνωστές συνθήκες και είναι εκπαιδευμένοι στο να έχουν επίγνωση των πιθανών κινδύνων και να λάβουν τις κατάλληλες προφυλάξεις.

Η αντίθετη πλευρά υποστηρίζει ότι:

- Στο γενικό πληθυσμό υπάρχουν μεμονωμένα άτομα ή ομάδες ατόμων με αυξημένη θερμοευαισθησία, λόγω μη επαρκούς λειτουργίας του θερμορυθμιστικού μηχανισμού τους, όπως για παράδειγμα άτομα τρίτης ηλικίας ή βρέφη ή άτομα που ακολουθούν κάποια φαρμακευτική αγωγή.
- Επιπλέον, η πλειοψηφία του γενικού πληθυσμού δεν έχει λάβει την κατάλληλη ενημέρωση για τις πιθανές επιπτώσεις έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή τρόπους ελάττωσης και αποφυγής αυτής.

Συνήθως, στα πρότυπα στα οποία συναντούμε διαφορετικά όρια έκθεσης για τις δύο κατηγορίες ατόμων, το όριο για τον γενικό πληθυσμό θεσπίζεται στο ένα πέμπτο του ορίου επαγγελματικής έκθεσης. Επιπροσθέτως, όταν στο πρότυπο υπάρχει πεδίο αναφοράς στην τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, η τιμή αυτού για το κοινό βρίσκεται διαιρώντας με τον παράγοντα $\sqrt{5}$.

4.3.2 Παράγοντας ασφαλείας

Η θέσπιση ενός παράγοντα ασφαλείας (safety factor) προϋποθέτει ότι έχει ταυτοποιηθεί κάποιος κίνδυνος εμφάνισης βιολογικού φαινομένου και ότι ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας στο όριο ασφαλείας είναι απαραίτητος προκειμένου να απομακρυνθεί πλήρως ο κίνδυνος. Τα βιολογικά φαινόμενα εμφανίζουν ιδιαίτερες δυσκολίες στη θέσπιση παραγόντων ασφαλείας, καθώς για αρκετά από αυτά δεν είναι εφικτός ο καθορισμός ενός τέτοιου παράγοντα, λόγω της ίδιας της φύσεώς τους, ενώ για άλλα δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία, ώστε να προσδιορισθεί ένα περιθώριο ασφαλείας. Έτσι για την περίπτωση του παράγοντα ασφαλείας με τιμή 10, ο οποίος καθιερώθηκε για πρώτη φορά από το πρότυπο ANSI C.95.1-1982 και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται, έγιναν οι παρακάτω υποθέσεις:

- Το φαινόμενο, στο οποίο βασίζεται η θέσπιση του ορίου, δεν αποτελεί καθευατό συγκεκριμένο κίνδυνο, αλλά γίνεται η υπόθεση ότι μακροχρόνια

έκθεση κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την υγεία.

- Η ευθεία προέκταση αποτελεσμάτων από τα ζώα στον άνθρωπο είναι αρκετά συντηρητική υπόθεση, αφού είναι αποδεδειγμένο ότι η θερμορυθμιστική ικανότητα του ανθρώπου σε σχέση με το είδος των πειραματόζωων που χρησιμοποιήθηκαν για τη θέσπιση των ορίων είναι καλύτερη.
- Η επιλογή ως αναφοράς της έκθεσης σε μακρινό πεδίο με κατακόρυφη πόλωση είναι μια συντηρητική υπόθεση, γιατί για κάθε άλλη πόλωση η τιμή του SAR μειώνεται αισθητά.
- Η ενσωμάτωση σε μια καμπύλη όλων των συχνοτήτων συντονισμού για ανθρώπους όλων των μεγεθών, παρόλο που η τιμή του SAR μειώνεται αισθητά για συχνότητες μικρότερες από αυτή του συτονισμού, είναι μια συντηρητική υπόθεση.

Η υιοθέτηση αυτού του παράγοντα ασφαλείας από τα πρότυπα που ακολούθησαν αιτιολογείται στη βάση :

- διαφορών στην απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, λόγω διαφορών στη γεωμετρία έκθεσης (μέγεθος, προσανατολισμός στο πεδίο) κατά περίπτωση
- έλλειψης εκτεταμένων επιδημιολογικών μελετών
- ύπαρξης ακραίων περιβαλλοντικών καταστάσεων, όπως για παράδειγμα υψηλές θερμοκρασίες και υψηλά επίπεδα σωματικής δραστηριότητας.

4.3.3 Η έννοια της μέσης τιμής μεγεθών

Η έννοια της μέσης τιμής στο χρόνο υπάρχει σε όλα τα πρότυπα διεθνώς. Η χρονική περίοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης τιμής των μεγεθών (βασικών ορίων και επιπέδων αναφοράς) είναι συνήθως 6min (το 1/10 της ώρας). Είναι φανερό ότι θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη τιμή του μεγέθους που καθορίζει το επίπεδο αναφοράς κατά το χρόνο μέτρησης, γιατί σε κάποια από τα πρότυπα τίθενται και μέγιστες επιτρεπόμενες στιγμιαίες τιμές (όπως στο ICNIRP που θα μελετήσουμε σε επόμενη παράγραφο).

4.3.4 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς

Οι περιορισμοί σχετικά με τις επιπτώσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία βασίζονται σε διαπιστωμένες επιπτώσεις στην υγεία και ονομάζονται βασικοί περιορισμοί. Ανάλογα με τη συχνότητα, τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των βασικών περιορισμών σχετικά με την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι η πυκνότητα ρεύματος, ο SAR και η πυκνότητα ισχύος. Η προστασία από τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία προϋποθέτει ότι δεν γίνεται υπέρβαση αυτών των βασικών περιορισμών.

Τα επίπεδα αναφοράς της έκθεσης παρέχονται για σύγκριση με μετρημένες τιμές των φυσικών μεγεθών. Συμμόρφωση με όλα τα επίπεδα αναφοράς που δίδονται στις παρούσες κατευθυντήριες οδηγίες θα εξασφαλίσει τη συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς. Αν οι μετρούμενες τιμές είναι υψηλότερες από τα επίπεδα αναφοράς, αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι έχουν παραβιαστεί οι βασικοί περιορισμοί, αλλά ότι μια πιο λεπτομερής ανάλυση είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τους βασικούς περιορισμούς.

Διαφορετικές επιστημονικές βάσεις χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των βασικών περιορισμών έκθεσης στις διάφορες περιοχές συχνοτήτων:

- Από 1 Hz έως 10 MHz, βασικοί περιορισμοί προβλέπονται στην πυκνότητα ρεύματος για την πρόληψη επιπτώσεων στις λειτουργίες του νευρικού συστήματος.
- Από 100 kHz έως 10 GHz, βασικοί περιορισμοί για το SAR προβλέπονται για την πρόληψη θερμικής επιβάρυνσης σε ολόκληρο το σώμα και την υπερβολική θέρμανση εντοπισμένου ιστού. Από την περιοχή των 100 kHz έως 10 MHz, περιορισμοί παρέχονται τόσο για την πυκνότητα ρεύματος όσο και για το SAR.
- Από 10 GHz και 300 GHz, βασικοί περιορισμοί προβλέπονται στην πυκνότητα ισχύος για την πρόληψη υπερβολικής θέρμανσης του ιστού στην επιφάνεια του σώματος ή κοντά σε αυτήν.

Στην περιοχή συχνοτήτων από λίγα Hz έως 1 kHz, για επίπεδα επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος πάνω από 100 mA m^{-2} , τα κατώτατα όρια για τις οξείες μεταβολές στη διεγερσιμότητα του κεντρικού νευρικού συστήματος αλλά και για άλλες επιδράσεις, υπερβαίνονται. Υπό το πρίσμα των παραπάνω λόγων ασφαλείας, αποφασίστηκε ότι για συχνότητες στο εύρος από 4 Hz έως 1 kHz, η επαγγελματική έκθεση θα πρέπει να περιορίζεται σε τομείς που επάγουν πυκνότητα ρεύματος λιγότερη από 10 mA m^{-2} , δηλαδή να χρησιμοποιούν έναν συντελεστή ασφαλείας του 10. Για το ευρύ κοινό εφαρμόζεται ένας πρόσθετος παράγοντας ασφαλείας του 5, δίνοντας έναν βασικό περιορισμό της έκθεσης των 2 mA m^{-2} . Κάτω από 4 Hz και πάνω από 1 kHz ο βασικός περιορισμός της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος αυξάνεται προοδευτικά, κάτι που αντιστοιχεί σε αύξηση του κατώτατου ορίου διέγερσης του νεύρου για αυτή την περιοχή συχνοτήτων.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα όρια ισχύουν όταν η έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι συνεχής και μόνιμη. Οι τιμές που έχουν δοθεί στα όρια αναφέρονται σαν χρονικός μέσος όρος οποιασδήποτε έκθεσης 6 min. Για έκθεσης μικρής διάρκειας, είναι πιθανό να εκτεθεί κάποιος σε τιμές μεγαλύτερες των ορίων, αλλά πρέπει ο μέσος όρος έκθεσης στη διάρκεια οποιουδήποτε εξαλέπτου να μην ξεπερνά το προτεινόμενο όριο.

Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι σε κανένα από τα πρότυπα που έχουν θεσπιστεί δεν υπάρχει καθορισμός απόστασης ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει διότι οι διάφορες διατάξεις κεραιών εκπέμπουν με διαφορετικό τρόπο, συνεπώς δεν είναι εφικτό να οριστεί.

4.4 Πρότυπα όρια της ICNIRP

Τα όρια υιοθετούνται από τους περισσότερους οργανισμούς με βάση τις θερμικές επιδράσεις και χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις μη θερμικές και αθερμικές επιδράσεις. Αυτή την τακτική ακολουθεί και η ICNIRP, οι οδηγίες της οποίας για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία καλύπτουν το εύρος συχνοτήτων μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας από τα 0 έως και τα 300 GHz. Τα όρια, τα οποία έχει δημοσιεύσει η ICNIRP, βασίζονται σε διεξοδικές επισκοπήσεις ερευνών και δημοσιευμένης επιστημονικής βιβλιογραφίας και αποτελούν τις πιο αποδεκτές οδηγίες παγκοσμίως. Έχουν καθοριστεί με βάση αποτελέσματα σχετικά με την έντονη βραχυπρόθεσμη έκθεση κι όχι την μακροπρόθεσμη έκθεση, κι αυτό διότι η υπάρχουσα επιστημονική βιβλιογραφία για τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα της έκθεσης σε χαμηλής έντασης ηλεκτρομαγνητικά πεδία δεν θεωρείται επαρκής για την θέσπιση αξιόπιστων ποσοτικών ορίων.

Τα όρια εξαρτώνται από την συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και εκφράζονται σε ποσότητες πυκνότητας ισχύος, έντασης του πεδίου ή Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (είτε μέσου είτε τοπικού). Ορίζονται βασικοί περιορισμοί που αφορούν τα δοσιμετρικά μεγέθη, όπως το SAR. Επίσης, ορίζονται επίπεδα αναφοράς που αντιστοιχούν σε μεγέθη, για τις περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η απευθείας εκτίμηση της απορροφούμενης ισχύος από τους ιστούς. Επιπλέον, ο υπολογισμός των πεδίων αναφοράς από τους αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς έχει πραγματοποιηθεί με την υπόθεση μέγιστης σύζευξης του ανθρώπινου σώματος με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (η πιο δυσμενής περίπτωση). Στους πίνακες 7 και 8, που ακολουθούν, αναπαριστώνται τα επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο γενικού πληθυσμού και επαγγελματικής έκθεσης αντίστοιχα.

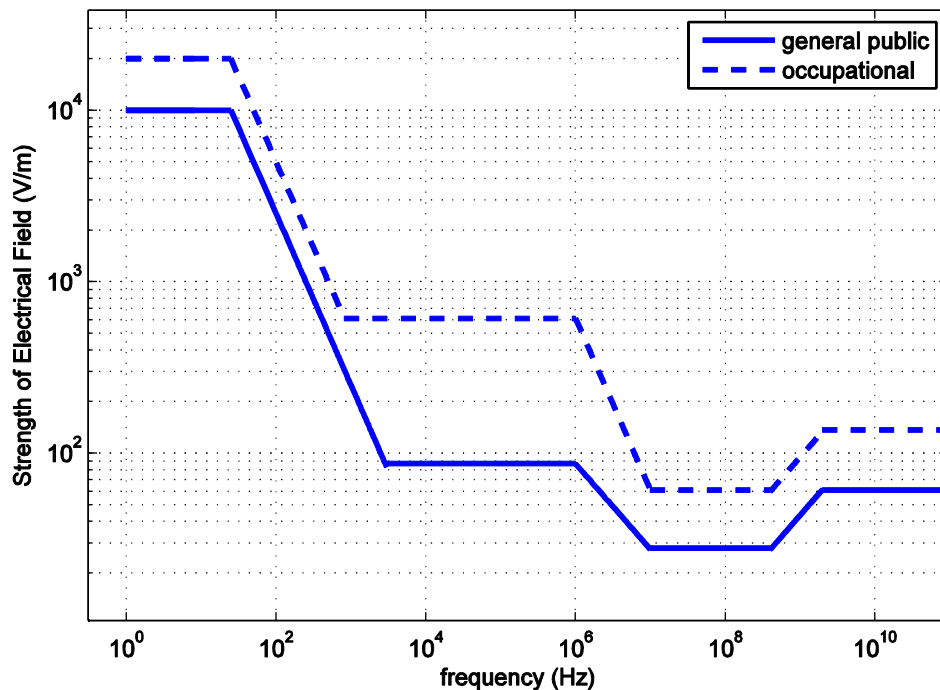
Πίνακας 4.1: Επίπεδα αναφορά για έκθεση γενικού πληθυσμού σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Όρια της ICNIRP συναρτήσεως της συχνότητας εκφρασμένα σε ποσότητες έντασης πεδίου για συχνότητες 0Hz-300GHz.

Περιοχή Συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
Πάνω από 1 Hz	-	-
1 - 8 Hz	10.000	-
8 - 25 Hz	10.000	-
0.025 - 0.8 kHz	$250 / f$	-
0.8 – 3 KHz	$250 / f$	-
3 – 150 kHz	87	-
0.15 – 1 MHz	87	-
1 – 10 MHz	$87/f^{1/2}$	-
10 – 400 MHz	28	2
400 – 2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$f / 200$
2 – 300 GHz	61	10

Πίνακας 4.2: Επίπεδα αναφορά για επαγγελματική έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Όρια της ICNIRP συναρτήσεως της συχνότητας εκφρασμένα σε ποσότητες έντασης πεδίου για συχνότητες 0Hz-300GHz.

Περιοχή Συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
Πάνω από 1 Hz	-	-
1 - 8 Hz	20.000	-
8 - 25 Hz	20.000	-
0.025 - 0.82 kHz	$500 / f$	-
0.82 – 65 KHz	610	-
0.065 – 1 MHz	610	-
1 – 10 MHz	$610 / f$	-
10 – 400 MHz	61	10
400 – 2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$f / 40$
2 – 300 GHz	137	50

Με βάση τους πίνακες 4.1 και 4.2 σχεδιάζουμε ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση της συχνότητας και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους δύο διαφορετικούς τρόπους έκθεσης.



Εικόνα 4.1: Συγκριτικό διάγραμμα. Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, σε επαγγελματική έκθεση και σε έκθεση γενικού πληθυσμού.

Παρατηρήσεις: Στην περιοχή συχνοτήτων 10 MHz έως 10 GHz, η οποία και μας ενδιαφέρει περισσότερο στην παρούσα εργασία, τα επίπεδα αναφοράς γενικού πληθυσμού για τα ηλεκτρικά πεδία είναι χαμηλότερα κατά έναν παράγοντα του 2.2 από τα αντίστοιχα πεδία για επαγγελματική έκθεση. Ο παράγοντας 2.2 προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του 5, ο οποίος είναι ο παράγοντας ασφαλείας μεταξύ των βασικών περιορισμών της επαγγελματικής έκθεσης και αυτών του γενικού πληθυσμού. Η τετραγωνική ρίζα χρησιμοποιείται για να συνδέσει τις ποσότητες «ένταση πεδίου» και «πυκνότητα ισχύος».

Κατά το πρότυπο ICNIRP, το κατώτατο όριο (κατώφλι) εμφάνισης βιολογικών φαινομένων στον άνθρωπο (ή γενικά σε πρωτογενή θηλαστικά) είναι 4 W/kg για ολόκληρο το σώμα. Συνυπολογίζοντας τον παράγοντα ασφαλείας 10, διαμορφώνονται τα όρια έκθεσης για τους εργαζομένους στα 0.4 W/kg. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη ομάδες πληθυσμού πιο ευπαθείς ή συνυπολογίζοντας ότι δεν αποκλείεται η έκθεση να πραγματοποιείται σε ήδη επιβαρημένους χώρους με αυξημένη θερμοκρασία ή εργασία, επιλέχθηκε ένας συντελεστής ασφαλείας 50 για τον υπολογισμό των ορίων έκθεσης του γενικού πληθυσμού. Συνεπώς, το ένα πέμπτο της τελευταίας τιμής είναι το 0.08 W/kg και αποτελεί το βασικό όριο για τον γενικό πληθυσμό.

Παράλληλα, προκειμένου να μην υπάρξουν περιοχές του σώματος στις οποίες παρατηρείται εμφάνιση τοπικά υψηλής απορρόφησης ενέργειας, έχουν θεσπιστεί

περιορισμοί για τον μέγιστο τοπικό ρυθμό απορρόφησης: για το κεφάλι και τον κορμό στα 2 W/kg, για τα άκρα στα 4 W/kg. Με παρόμοιο σκεπτικό, κι άλλοι διεθνείς οργανισμοί και επιστημονικοί φορείς διαμόρφωσαν τα ισχύοντα όρια για την έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Βασική γραμμή της ICNIRP είναι ότι προστασία εναντίον βλαβερών επιδράσεων στην υγεία, προϋποθέτει μη υπέρβαση αυτών των ορίων.

Πίνακας 4.3: Όρια έκθεσης της ICNIRP εκφρασμένα σε SAR (3 kHz – 10 GHz)

	Μέσος ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) ολόκληρου του σώματος	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) στο κεφάλι και στον κορμό	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) στα άκρα
Επαγγελματική Έκθεση	0.4	10	20
Έκθεση Γενικού Πληθυσμού	0.08	2	4

Να σημειωθεί ότι στον Πίνακα 4.3 οι τιμές του SAR υπολογίζονται ως μέση τιμή σε μάζα 10g συνεχούς ιστού και για διάστημα μέτρησης/έκθεσης 6 λεπτών.

Βασικά σημεία – παρατηρήσεις για τα όρια της ICNIRP

- ✓ Δεν εστιάζουν στην διαφορετική απορρόφηση ακτινοβολίας από ενήλικες και παιδιά.
- ✓ Ο διαχωρισμός των ακτινοβολιών γίνεται με βάση τη συχνότητα και δεν συνυπολογίζεται η κυματομορφή, η οποία αποτελεί έναν καθοριστικό σε βιολογικό επίπεδο παράγοντα.
- ✓ Δεν υπάρχει αναφορά στη συνεχή και έκθεση των ατόμων σε πολλαπλές πηγές ακτινοβολίας ταυτόχρονα.
- ✓ Εστιάζουν σε βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου.
- ✓ Στηρίζονται αποκλειστικά στις θερμικές επιδράσεις, οι οποίες έχουν σαν μοναδικό αποτέλεσμα τη θέρμανση των ιστών.
- ✓ Τα διαθέσιμα πρότυπα δεν έχουν τροποποιηθεί από το 1998, παρά τη ραγδαία εισχώρηση νέων δεδομένων από επιστημονικές έρευνες που δείχνουν ότι οι περισσότεροι μη θερμικοί μηχανισμοί οδηγούν μακροπρόθεσμα σε βλαβερές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου, όπως καρκίνο του μαστού, λευχαιμία, Αλτσχάιμερ, σεξουαλικές δυσλειτουργίες και κατάθλιψη.

4.5 Πρότυπα όρια του IEEE

Το IEEE (Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών - Institute of Electrical and Electronics Engineers), με στόχο την προστασία από τις αρνητικές επιδράσεις της έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, εξέδωσε οδηγίες και πρότυπα για ασφαλή έκθεση το 2006. Τα όρια αναφέρονται στη συχνοτική περιοχή από 3 kHz έως 300 GHz και όπως και τα όρια της ICNIRP, εξαρτώνται από την συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και μπορεί να εκφραστεί είτε σε ποσότητες ρυθμού ειδικής απορρόφησης (μέσου και τοπικού) είτε σε ποσότητες έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

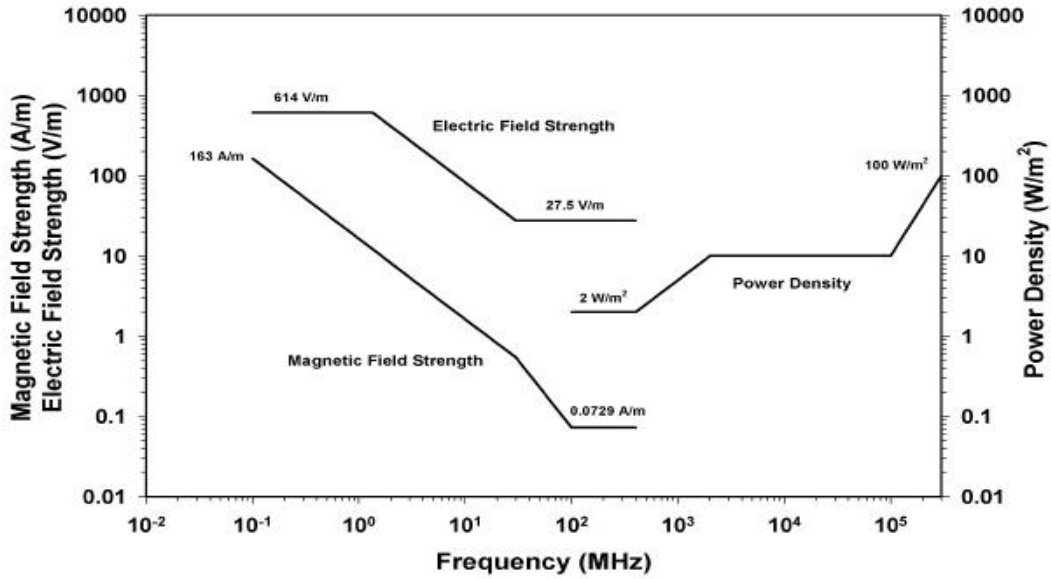
Πίνακας 4.4: Επίπεδα αναφορά για έκθεση γενικού πληθυσμού σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Όρια της IEEE.

Περιοχή συχνοτήτων	Rms Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Rms Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
0.1 – 1.34 MHz	614	1000
1.34 - 3 MHz	$823.8 / f$	$1800 / f^2$
3 - 30 MHz	$823.8 / f$	$1800 / f^2$
30 - 100 MHz	27.5	2
100 – 400 MHz	27.5	2
400 – 2000 MHz	-	$f / 200$
2000 – 5000 MHz	-	10
5000 – 30000 MHz	-	10
30000 – 100000 MHz	-	10
100000 – 300000 MHz	-	$(90f - 7000) / 200$

Πίνακας 4.5: Επίπεδα αναφορά για επαγγελματική έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Όρια της IEEE.

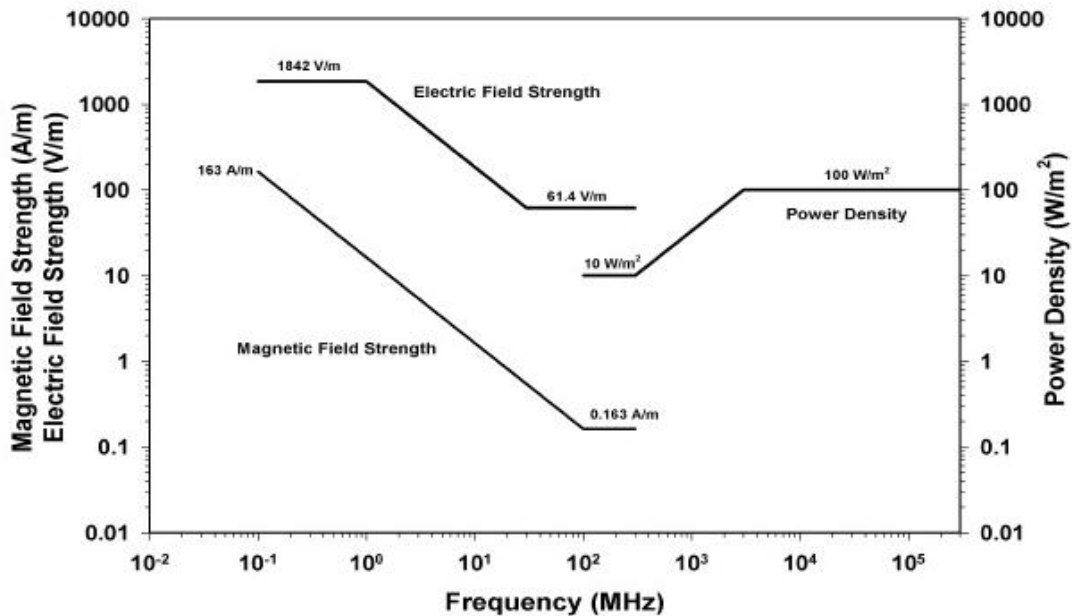
Περιοχή συχνοτήτων	Rms Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Rms Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
0.1 – 1.0 MHz	1842	9000
1.0 - 30 MHz	$1842 / f$	$9000 / f^2$
30 – 100 MHz	61.4	10
100 - 300 MHz	61.4	10
300 – 3000 MHz	-	$f / 30$
3000 – 30000 MHz	-	100
30000 – 300000 MHz	-	100

Σημείωση για τους πίνακες 4.4 και 4.5: Η ενεργός τιμή (rms) της μεταβαλλόμενης τάσης, ορίζεται σαν εκείνη η τιμή σταθερής τάσης που εμφανίζει το ίδιο ποσό θερμότητας σε μια αντίσταση με τη πραγματική τάση κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Μαθηματικά αυτό είναι ίσο με $V_{rms} = V_m / 2$.



Πηγή: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz

Εικόνα 4.2: Διαγραμματική αναπαράσταση πίνακα 10. Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, σε έκθεση γενικού πληθυσμού.



Πηγή: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz

Εικόνα 4.3 : Διαγραμματική αναπαράσταση πίνακα 11. Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, σε επαγγελματική έκθεση.

Πίνακας 4.6: Όρια έκθεσης της IEEE εκφρασμένα σε SAR (100 kHz – 10 GHz)

	Μέσος ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) ολόκληρου του σώματος	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) στο κεφάλι και στον κορμό	Τοπικός ρυθμός Ειδικής απορρόφησης (SAR) στα άκρα
Επαγγελματική Έκθεση	0.4	8	20
Έκθεση γενικού Πληθυσμού	0.08	1.6	4

Για επαγγελματική έκθεση, τα όρια του SAR είναι υπολογισμένα κατά μέσο όρο για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα των 6 λεπτών. Για έκθεση γενικού πληθυσμού, ο μέσος χρόνος για τα όρια SAR ποικίλει από έξι λεπτά ως 30 λεπτά. Μια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε, συγκριτικά με τα όρια της ICNIRP, είναι ότι ο τοπικός ρυθμός απορρόφησης στο κεφάλι και στον κορμό παρουσιάζει μικρότερη μέση τιμή.

4.6 Πρότυπα όρια που ισχύουν στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τον Νόμο 3431/2006, γύρω από κάθε κατασκευή κεραίας που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν θα πρέπει να υπάρχουν χώροι προσπελάσιμοι από το γενικό πληθυσμό, στους οποίους τα επίπεδα έκθεσης υπερβαίνουν το 70% των ορίων της ICNIRP. Συνεπώς μετά την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 70% προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες 4.7 και 4.9.

Επιπροσθέτως, σε περίπτωση εγκατάστασης κατασκευής κεραίας σε απόσταση μικρότερη από 300 μέτρα από την περίμετρο κτιριακών εγκαταστάσεων νοσοκομείων, βρεφονηπιακών σταθμών, γηροκομείων και σχολείων, τα επίπεδα έκθεσης του κοινού απαγορεύεται να υπερβαίνουν το 60% των ορίων της ICNIRP. Συνεπώς, εφαρμόζονται ακόμα αυστηρότερα όρια σε σχέση με αυτά που ορίζονται από την ICNIRP. Μετά την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 60%, προκύπτουν οι πίνακες 4.8 και 4.10.

Πίνακας 4.7: Επίπεδα αναφορά για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή συχνοτήτων 1kHz – 300GHz,όπως προκύπτουν μετά την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 70%.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
1 - 3 kHz	$175 / f$	-
3 - 174 kHz	60.9	-
0.174 - 1.43 MHz	60.9	-
1.43 - 10 MHz	$72.8 / \sqrt{f}$	-
10 - 400 MHz	23.4	1.4
400 - 2000 MHz	$1.15 \cdot \sqrt{f}$	$f / 286$
2 - 300 GHz	51	7

Πίνακας 4.8: Επίπεδα αναφορά για επαγγελματική έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή συχνοτήτων 1kHz – 300GHz,όπως προκύπτουν μετά την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 60%.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου, E (V/m)	Πυκνότητα ισχύος ισοδύναμου επίπεδου ΗΜ κύματος S_{eq} (W/m ²)
1 - 3 kHz	$150 / f$	-
3 - 174 kHz	52.2	-
0.174 - 1.43 MHz	52.2	-
1.43 - 10 MHz	$67.3 / \sqrt{f}$	-
10 - 400 MHz	21.7	1.2
400 - 2000 MHz	$1.065 \cdot \sqrt{f}$	$f / 333$
2 - 300 GHz	47.2	6

Πίνακας 4.9: Βασικοί περιορισμοί στην περιοχή συχνοτήτων 1kHz – 300GHz, όπως προκύπτουν με την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 70%.

Περιοχή συχνοτήτων	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m ²)	Μέσος Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για όλο το σώμα (W/kg)	Τοπικός Ρυθμός ειδικής απορρόφησης (κεφάλι και κορμός) (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (άκρα) (W/kg)	Πυκνότητα Ισχύος (W/m ²)
1 kHz - 100 kHz	$f / 714$	-	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	$f / 714$	0.056	1.4	2.8	-
10 MHz - 10 GHz	-	0.056	1.4	2.8	-
10 GHz - 300 GHz	-	-	-	-	7

Πίνακας 4.10: Βασικοί περιορισμοί στην περιοχή συχνοτήτων 1kHz – 300GHz, όπως προκύπτουν με την εφαρμογή του συντελεστή μείωσης 60%.

Περιοχή συχνοτήτων	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m ²)	Μέσος Ρυθμός ειδικής απορρόφησης για όλο το σώμα (W/kg)	Τοπικός Ρυθμός ειδικής απορρόφησης (κεφάλι και κορμός) (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (άκρα) (W/kg)	Πυκνότητα Ισχύος (W/m ²)
1 kHz - 100 kHz	$f / 833$	-	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	$f / 833$	0.048	1.2	2.4	-
10 MHz - 10 GHz	-	0.048	1.2	2.4	-
10 GHz - 300 GHz	-	-	-	-	6

Κεφάλαιο 5

Η μέθοδος FDTD

5.1 Αριθμητικές μέθοδοι στον Ηλεκτρομαγνητισμό

Τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα που συναντούμε στην πράξη, δεν μπορούν να επιλυθούν με γνωστές αναλυτικές μεθόδους επίλυσης, όπως με τη μέθοδο χωρισμού μεταβλητών. Αυτό συμβαίνει διότι οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που συναντώνται πρακτικά δεν είναι γραμμικές και είναι αδύνατον να γίνουν γραμμικές χωρίς να επηρεαστεί το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η περιοχή στην οποία επιθυμείται να γίνει επίλυση του προβλήματος είναι περίπλοκη και οι οριακές συνθήκες ή μεταβάλλονται με το χρόνο ή είναι μικτού τύπου. Επιπροσθέτως πολλές φορές το υλικό μέσο είναι είτε ανισοτροπικό, είτε ανομοιογενές.

Η χρήση των εξισώσεων Maxwell στα προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού μπορεί να βασιστεί σε αναλυτικές λύσεις στην περίπτωση απλών γεωμετριών και πολύ συγκεκριμένων οριακών συνθηκών. Συνεπώς, όταν έχουμε να κάνουμε με πιο σύνθετα προβλήματα, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι η καταλληλότερη και ασφαλέστερη επιλογή για την επίλυσή τους. Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξή τους γίνεται όλο και πιο δημοφιλής και αποτελούν πλέον αναπόσπαστο και σημαντικό κομμάτι του ηλεκτρομαγνητισμού. Τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι είναι :

- 1) Η μέθοδος ολοκληρωτικών εξισώσεων (Integral Equations – IE)
- 2) Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite-Difference Time Domain – FDTD)
- 3) Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM)

Αν και πολλές τεχνικές ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων εφαρμόζονται στο πεδίο της συχνότητας, η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain-FDTD) επιλύει τις εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι ο υπολογισμός των τιμών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξελίσσεται σε διακριτά βήματα στον χρόνο. Ένα πλεονέκτημα της προσέγγισης του πεδίου του χρόνου είναι ότι δίνει μία ευρείας ζώνης έξοδο από μόνο μία εκτέλεση του προγράμματος. Ωστόσο, ο κύριος λόγος χρησιμοποίησης της μεθόδου FDTD είναι η εξαιρετικά αυξανόμενη επίδοση της μεθόδου καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει.

Η διαδικασία για την εύρεση λύσης ενός προβλήματος με τη χρήση της μεθόδου FDTD αποτελείται από τρία βασικά βήματα:

- 1) Χωρισμός της περιοχής την οποία εξετάζουμε και θέλουμε να βρούμε λύση μέσα σε αυτήν, σε ένα πλέγμα από σημεία.
- 2) Προσέγγιση της δοθείσας διαφορικής εξίσωσης από μια ισοδύναμη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η εξίσωση συσχετίζει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής σε ένα σημείο μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος με τις τιμές της μεταβλητής αυτής στα γειτονικά σημεία.
- 3) Επίλυση των εξισώσεων διαφορών, λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες.

5.2 Βασικά στοιχεία μεθόδου FDTD

Όπως η πλειοψηφία των μεθόδων υπολογιστικής ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης, η μέθοδος FDTD αντιμετωπίζει προβλήματα παρέχοντας μια «πλήρους κύματος» λύση. Δεδομένου ότι αντιμετωπίζει φυσικά τη διασπορά και τα μη γραμμικά υλικά, και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων σε μια μόνο εκτέλεση, η FDTD έχει γίνει το κύριο μέσο για αριθμητικά μοντέλα επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων, όπως κεραίες, φωτονικοί κρύσταλλοι, γραμμές μεταφοράς, προσομοιώσεις κυκλωμάτων κ.α.

Η μέθοδος FDTD, η οποία διακριτοποιεί τις εξισώσεις του Maxwell τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο του χώρου, έχει καταδείξει επιθυμητά χαρακτηριστικά γνωρίσματα για την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών δομών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου FDTD είναι η ευελιξία της στο να λύνει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων μικροκυμάτων και κεραιών (microwave and antenna problems).

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να μοντελοποιήσει τα διάφορα μέσα, όπως αγωγούς, διηλεκτρικά, στοιχεία με συγκεντρωμένες παραμέτρους (lumped elements), ενεργές συσκευές και υλικά διασποράς. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου FDTD είναι η ικανότητά της στους ευρυζωνικούς χαρακτηρισμούς. Δεδομένου ότι αυτή η μέθοδος υλοποιείται στην περιοχή χρόνου, τα μεταβατικά δεδομένα από μία προσομοίωση μπορούν να μετασχηματιστούν στο πεδίο της συχνότητας για να αποκτήσουν μια ευρυζωνική απόκριση.

Η μέθοδος FDTD ασχολείται με τη διαφορική μορφή των εξισώσεων Maxwell στην περιοχή χρόνου. Οι παρακάτω σχέσεις (5.7) και (5.8) είναι οι διαφορικές μορφές του νόμου του Ampere και των εξισώσεων Faraday, αντίστοιχα. Αυτές οι δύο εξισώσεις χρησιμοποιούνται για την επίλυση αριθμητικών υπολογισμών στην FDTD μέθοδο.

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \quad (5.7)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5.8)$$

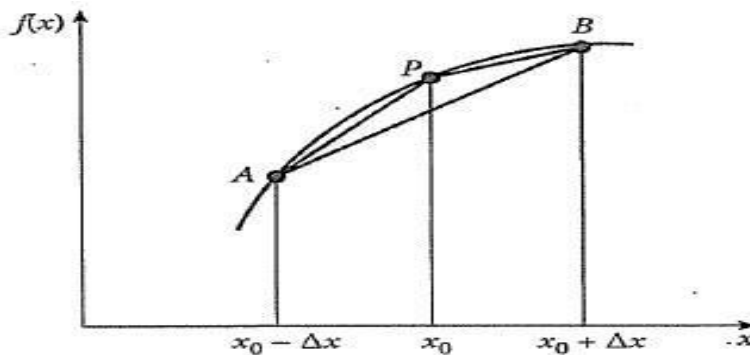
όπου E και H το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα, ϵ και μ η διηλεκτρική σταθερά και η μαγνητική διαπερατότητα αντίστοιχα, σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα και t ο χρόνος.

5.3 Κεντρική ιδέα της FDTD-μέθοδος FDTD τριών διαστάσεων

Η κεντρική ιδέα της FDTD βασίζεται στην προσέγγιση της παραγώγου μια συνάρτησης με μια εξίσωση κεντρικών διαφορών.

Γενικά για προσέγγιση πρώτης παραγώγου με κεντρική διαφορά ισχύει :

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x^2)$$



Πηγή : Numerical techniques in electromagnetics with Matlab - Matthew Sadiku

Εικόνα 5.1: Προσέγγιση κεντρικής διαφοράς

Για την χρονική παράγωγο, η προσέγγιση πραγματοποιείται ως εξής :

$$\frac{\partial \varphi(\underline{r}, t)}{\partial t} = \frac{\varphi(\underline{r}, t + \frac{\Delta t}{2}) - \varphi(\underline{r}, t - \frac{\Delta t}{2})}{\Delta t} \quad (5.9)$$

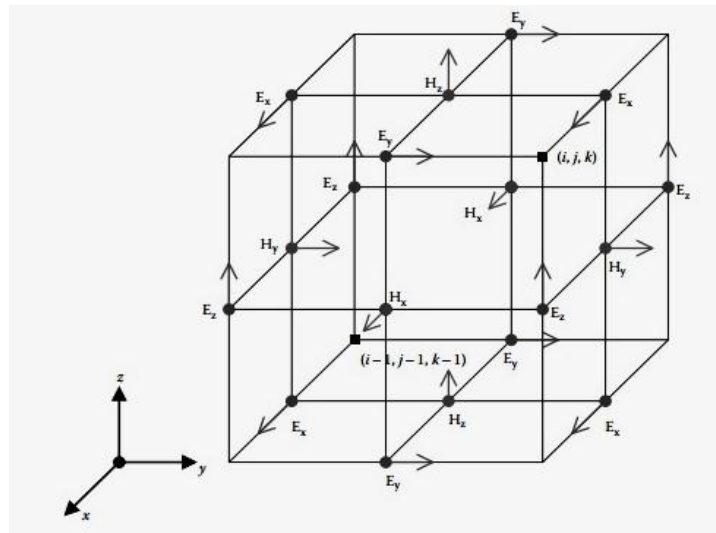
Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει σφάλμα $O(\Delta t^2)$. Κατ' επέκταση τη μερική παράγωγο μιας συνάρτησης ως προς x , την προσεγγίζουμε ως ακολούθως:

$$\frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial x} = \frac{\varphi(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z) - \varphi(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z)}{\Delta x} \quad (5.10)$$

5.4 Ο αλγόριθμος του Yee

Ο ευρέως γνωστός αλγόριθμος του Yee παρουσιάστηκε από τον Kane Yee σε δημοσίευσή του το 1966. Για να επιλύσει τις εξισώσεις του Maxwell αριθμητικά, ο Yee

εισήγαγε ένα ορθογωνικό πλέγμα με διανύσματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα της εικόνας 5.2. Το ειδικό πλέγμα κελιού που ο Yee χρησιμοποίησε ονομάστηκε Yee cell και διακρίτοποιεί τις τρεις διαστάσεις του χώρου μέσα σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα.



Πηγή: *Theory and Phenomena of Metamaterials*, by Filippo Capolino

Εικόνα 5.2: Διανύσματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε ένα μοναδιαίο κελί

5.4.1 Βασικές ιδέες του αλγόριθμου Yee

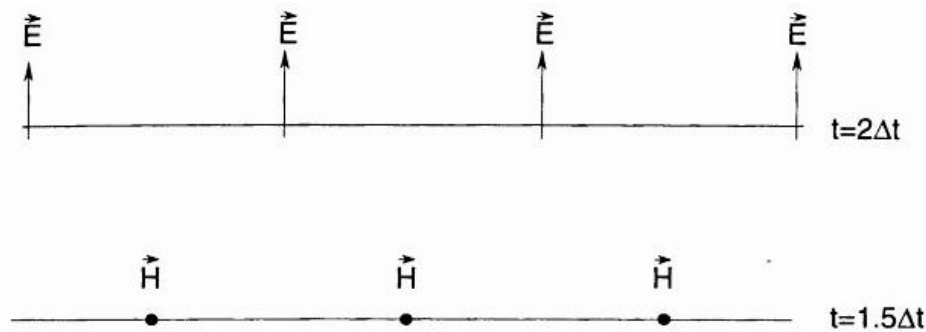
Ο αλγόριθμος του Yee αποτελεί τον κορμό της μεθόδου FDTD την οποία μελετούμε. Ο Yee προσέγγισε το σύστημα των εξισώσεων στροφής του Maxwell με ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, για την περίπτωση υλικού χωρίς απώλειες, δηλαδή για υλικό στο οποίο ισχύει $\sigma = 0$ και $\rho' = 0$.

Οι βασικές ιδέες του αλγορίθμου είναι οι παρακάτω:

- Προσδιορίζει και τις δύο πεδιακές εντάσεις (και την ηλεκτρική και την μαγνητική) στο χώρο και το χρόνο, χρησιμοποιώντας τις συζευγμένες εξισώσεις στροφής του Maxwell αντί να προσδιορίσει μόνο τη μία από αυτές με τη χρήση της εξίσωσης κύματος.
- Χρησιμοποιώντας πληροφορίες και του \vec{E} και του \vec{H} , η λύση είναι πιο εύρωστη απ'ότι χρησιμοποιώντας είτε το ένα είτε το άλλο μόνο του (για παράδειγμα είναι ακριβής για μια ευρύτερη κατηγορία δομών). Και οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού μπορούν να μοντελοποιηθούν με έναν άμεσο τρόπο.
- Χαρακτηριστικά μοναδικά στο κάθε πεδίο όπως οι επαπτομενικές ιδιαιτερότητες του \vec{H} κοντά στα άκρα, οι αζυμουθιακές (looping) ιδιαιτερότητες κοντά στα λεπτά σύρματα, ή οι ακτινικές ιδιαιτερότητες του \vec{E} σε κοντινά

σημεία, άκρες και λεπτά σύρματα, μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά εάν και το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι διαθέσιμα.

Ο αλγόριθμος Yee τοποθετεί τις συνιστώσες \vec{E} και \vec{H} στο χρόνο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, έτσι ώστε, οι συνιστώσες του ενός πεδίου να παρεμβάλλονται στις συνιστώσες του άλλου.



Πηγή : *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method - A. Taflov*

Εικόνα 5.3 : Διακριτοποίηση στο χρόνο και υπολογισμός των συνιστωσών των δυο πεδίων κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών βημάτων

Η διάταξη αυτή ονομάζεται **leapfrog**. Υπολογίζονται οι τιμές των συνιστωσών του \vec{E} στο χώρο του προβλήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας τις τιμές των συνιστωσών του H που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη. Έπειτα αποθηκεύονται και αυτές στη μνήμη. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι υπολογισμοί για το μαγνητικό πεδίο και αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που προηγουμένως υπολογίστηκαν. Ο κύκλος μπορεί να συνεχιστεί υπολογίζοντας εκ νέου το ηλεκτρικό πεδίο με βάση τις τιμές του μαγνητικού πεδίου. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ολοκληρωθεί η διαδοχή των χρονικών βημάτων. Η διαδικασία leapfrog είναι πλήρως άμεση (fully explicit) με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η επίλυση συστημάτων εξισώσεων καθώς και η αντιστροφή πινάκων.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του αλγορίθμου του Yee είναι ο ταυτόχρονος προσδιορισμός τόσο των ηλεκτρικών όσο και του μαγνητικών πεδίων συνιστωσών, οι οποίες συσχετίζονται τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Δηλαδή, κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου «σαρώνουμε» όλο τον υπολογιστικό χώρο μας και σε κάθε κελί υπολογίζουμε τις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν την προηγούμενη τιμή της συνιστώσας, αλλά και τις τιμές των γειτονικών συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες έχουν υπολογιστεί, σύμφωνα με την τεχνική leapfrog, σε διαφορετική χρονική στιγμή. Κατ' ακριβώς, ανάλογο τρόπο, υπολογίζουμε και τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου.

5.4.2 Εφαρμογή αλγορίθμου Yee - ανάλυση της μεθόδου FDTD

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου του Yee ο χώρος του προβλήματος διαιρείται σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα διαστάσεων Δx , Δy , Δz , που ονομάζονται “κελιά του Yee” και για τα οποία έχουμε κάνει αναφορά παραπάνω.

Σε αυτό το σημείο θα θεωρήσουμε κάποιους συμβολισμούς που θα μας διευκολύνουν στη μελέτη της εφαρμογής του αλγορίθμου Yee.

Οι διαστάσεις του κελιού είναι $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Το πεδίο χώρου V θα πληρωθεί με αυτά τα μοναδιαία κελιά, και ένα σημείο πλέγματος (i, j, k) . Αυτό το χωρικό σημείο σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα το συμβολίζουμε ως εξής :

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (5.11)$$

όπου $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ η χωρική διαμέριση κατά μήκος των αξόνων x, y, z και οι i, j, k είναι ακέραιοι αριθμοί.

Έστω u μια οποιαδήποτε από τις έξι συνιστώσες του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου στο ορογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Έστω επίσης ότι αναφέρεται στην χρονική στιγμή $n\Delta t$ και το κελί βρίσκεται στην θέση $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$. Η συνάρτηση του χώρου και χρόνου u , υπολογιζόμενη σε διακριτά σημεία του χώρου συμβολίζεται ως ακολούθως :

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u^n_{i,j,k} = u^n(i, j, k) \quad (5.12)$$

Οι μερικές χρονικές και χωρικές παράγωγοι μετατρέπονται σε κεντρικές διαφορές

Γνωρίζουμε ότι για γραμμικά, ιστροπικά υλικά χωρίς διασπορά, ισχύουν οι σχέσεις :

$$B = \mu H \quad (5.13)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα [H/m]

$$D = \varepsilon E \quad (5.14)$$

όπου ε η ηλεκτρική επιτρεπτότητα [F/m]

Σε περίπτωση που τα υλικά που εξετάζουμε παρουσιάζουν ηλεκτρικές και μαγνητικές απώλειες μπορούμε να ορίσουμε :

- ✓ ένα ισοδύναμο μαγνητικό ρεύμα που αντιστοιχεί στους μηχανισμούς μαγνητικών απωλειών:

$$J_m = \rho' H \quad (5.15)$$

ρ' : ισοδύναμη ειδική μαγνητική αντίσταση [Ω/m]

- ✓ και ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο αντιστοιχεί στους μηχανισμούς ηλεκτρικών απωλειών:

$$J_e = \sigma E \quad (5.16)$$

σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα [S/m]

Στη συνέχεια προχωράμε σε ανάλυση σε βαθμωτές εξισώσεις και παίρνουμε τις παρακάτω εξισώσεις σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z).

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho' H_x \right) \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho' H_y \right) \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho' H_z \right) \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (5.22)$$

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τις προσεγγίσεις των σχέσεων (5.9) και (5.10) στις εξισώσεις που αποτυπώνονται στις σχέσεις (5.17) έως (5.22) για να πάρουμε τις τιμές της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για το χρονικό βήμα n στο σημείο του πλέγματος (i,j,k) . Συνεπώς, η σχέση (5.17) γίνεται :

$$\frac{H_x|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - H_x|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j,k}} \left[\frac{E_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_y|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_z|_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} - \rho'_{i,j,k} H_x|_{i,j,k}^n \right] \quad (5.23)$$

Στην σχέση (5.23) παρατηρούμε την εμφάνιση του παράγοντα $H_x|_{i,j,k}^n$. Κατά τη χρονική στιγμή n ο αλγόριθμος δεν έχει ακόμα υπολογίσει το μαγνητικό πεδίο. Άρα χρησιμοποιούμε την παρακάτω προσέγγιση :

$$H_x|_{i,j,k}^n = \frac{H_x|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + H_x|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{2}$$

Μετά από την εκτέλεση των πράξεων προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$H_x \left|_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} H_x \left|_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}} \left[\frac{E_y|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_y|_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} - \frac{E_z|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - E_z|_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} \right] \right.$$

$$H_y \left| \begin{array}{c} n+1/2 \\ i,j,k \end{array} \right. = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} H_y \left| \begin{array}{c} n-1/2 \\ i,j,k \end{array} \right. \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \left[\frac{E_z|_{i+1/2,j,k}^n - E_z|_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} - \frac{E_x|_{i,j,k+1/2}^n - E_x|_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \right]$$

$$H_z \left| \begin{array}{c} n+1/2 \\ i,j,k \end{array} \right. = \frac{1 - \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} H_z \left| \begin{array}{c} n-1/2 \\ i,j,k \end{array} \right. \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}}}{1 + \frac{\rho'_{i,j,k} \Delta t}{2\mu_{i,j,k}}} \left[\frac{E_x|_{i,j+1/2}^n - E_x|_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} - \frac{E_y|_{i+1/2,j,k}^n - E_y|_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \right]$$

$$E_x \left| \begin{array}{c} n+1 \\ i,j,k \end{array} \right. = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} E_x \left| \begin{array}{c} n \\ i,j,k \end{array} \right. \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right]$$

$$E_y \left| \begin{array}{c} n+1 \\ i,j,k \end{array} \right. = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} E_y \left| \begin{array}{c} n \\ i,j,k \end{array} \right. \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_x|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \frac{H_z|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} \right]$$

$$E_z \left| \begin{array}{c} n+1 \\ i,j,k \end{array} \right. = \frac{1 - \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} E_z \left| \begin{array}{c} n \\ i,j,k \end{array} \right. \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j,k} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \left[\frac{H_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_x|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} \right]$$

Παρατηρήσεις στις παραπάνω εξισώσεις:

- ✓ Μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των ηλεκτρικών και μαγνητικών συνιστωσών σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος.
- ✓ Σημειώνουμε ότι η υπολογιζόμενη τιμή μιας συνιστώσας εξαρτάται μόνο από την προηγούμενη τιμή της, τις προηγούμενες τιμές των άλλων δύο συνιστωσών του πεδίου στα γειτονικά σημεία και από το ηλεκτρικό και μαγνητικό ρεύμα

5.4.3 Αριθμητική ευστάθεια κατά την επίλυση του αλγορίθμου Yee

Το να επιλύσουμε τις παραπάνω διαφορικές εξισώσεις δεν είναι δυνατό κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες. Αν δε γίνει σωστή επιλογή των Δx , Δy , Δz και Δt θα παρουσιαστεί αριθμητική αστάθεια κατά την διάρκεια επίλυσης του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα το αριθμητικό σφάλμα, το οποίο παράγεται σε κάθε βήμα, θα συσσωρεύεται κι ολοένα θα αυξάνει.

Αποδεικνύεται ότι υπάρχει μέγιστη τιμή, την οποία μπορεί να πάρει το χρονικό βήμα Δt και η οποία εξαρτάται από τις τιμές των Δx , Δy , Δz . Η μέγιστη τιμή του χρονικού βήματος Δt δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (5.24)$$

όπου Δx , Δy , Δz : διαστάσεις κελιού και c : ταχύτητα του φωτός στο κενό. Συνεπώς, πρέπει να επιλέξουμε $\Delta t \leq \Delta t_{max}$ ώστε να εξασφαλίσουμε αριθμητική ευστάθεια. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται συνθήκη Courant. Αν έχουμε $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ η συνθήκη Courant απλοποιείται ως εξής :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{c\sqrt{3}}$$

5.5 Παράμετροι της μεθόδου FDTD

Προκειμένου να υλοποιήσουμε τον αλγόριθμο του Yee πρέπει να καθορίσουμε τους εξής παράγοντες, οι οποίοι αποτελούν και τις παραμέτρους μιας προσομοίωσης :

- Μέγεθος κελιού
- Χρονικό βήμα
- Διέγερση
- Απορροφητικές συνθήκες

Μέγεθος κελιού

Το μέγεθος του κελιού καθορίζεται από δύο παράγοντες. Συγκεκριμένα, πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ώστε να επιτρέπει την επιθυμητή ακρίβεια και αρκετά μεγάλο, ώστε να μην δεσμεύει πολύ υπολογιστικό χώρο και να μη δημιουργεί υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις.

Αρχικά υπάρχει ένας περιορισμός ο οποίος λέει ότι το μέγεθος του κελιού πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το ελάχιστο μήκος κύματος, για το οποίο απαιτούνται ακριβή αποτελέσματα. Το προτεινόμενο όριο για το μέγεθος του κελιού είναι το $1/10$ του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα του προβλήματος. Σημειώνουμε ότι οι όροι «πολύ μικρότερο» και «ακριβή αποτελέσματα» είναι σχετικοί, παρ'αυτά αποδεχόμαστε το παραπάνω όριο για το μέγεθος του κελιού. Σημειώνουμε ότι οι ακμές του κελιού πρέπει να είναι ίσες ή μικρότερες από το όριο $1/10$ που αναφέραμε παραπάνω. Αξίζει να τονίσουμε ότι σε κάποιες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μεγάλη ακρίβεια (όπως ραντάρ), χρειάζονται κελιά με ακμές $\lambda/20$ ή μικρότερες.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται το μέγεθος του κελιού είναι το υλικό που περιέχει. Όσο μεγαλύτερη είναι η διηλεκτρική σταθερά ή η αγωγιμότητα ενός υλικού, τόσο μικρότερο θα είναι το μήκος κύματος το οποίο αντιστοιχεί σε μια ορισμένη συχνότητα άρα και σε μικρότερες διαστάσεις του κελιού. Προκειμένου να μοντελοποιηθούν ανομοιογενείς χώροι συχνά χρησιμοποιούνται ομάδες κελιών με διαφορετικά μεγέθη.

Οι διαστάσεις Δx , Δy , Δz των κελιών καθορίζουν :

- Το συνολικό αριθμό των κελιών
- Το συνολικό υπολογιστικό κόστος (χρόνος προσομοίωσης και δέσμευση μνήμης)

Χρονικό βήμα

Το μέγιστο χρονικό βήμα το οποίο εξασφαλίζει ευστάθεια παρέχεται από τη συνθήκη του Courant, την οποία μελετήσαμε και αναλύσαμε παραπάνω.

Διέγερση

Στη συνέχεια, εστιάζουμε στη μελέτη εισαγωγής στο χώρο του προβλήματος μια ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διέγερση είναι το γραμμικά πολωμένο επίπεδο κύμα στο κενό, η οποία είναι κατάλληλη για προβλήματα σκέδασης σήματος ρανταρ από στόχο. Στην πορεία παρουσιάστηκαν κι άλλα είδη ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης όπως σημειακές γραμμικές και μη πηγές και φορτία, οι οποίες βοηθούν στην μοντελοποίηση διάδοσης, ανάκλασης, σύζευξης και ακτινοβολίας ψηφιακών σημάτων σε ηλεκτρονικές πλακέτες πολλαπλών στρωμάτων και microchips.

Η διέγερση μπορεί να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Οι συνηθέστερες μορφές είναι οι παρακάτω :

$$\text{Ημιτονοειδής : } H_z |_{i_s, j_s, k_s}^{n+1/2} = \sin[2p_i f_0 (n+1/2)\Delta t]$$

$$\text{Τετραγωνική : } H_z |_{i_s, j_s, k_s}^{n+1/2} = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq T/2 \\ 0, & T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

$$\text{Παλμός Gauss : } H_z |_{i_s, j_s, k_s}^{n+1/2} = \exp[-a(t - \beta\Delta t)^2]$$

5.6 Απορροφητικές Συνθήκες

Για να προσομοιώσουμε ένα πρόβλημα ανοιχτού χώρου με τη βοήθεια της μεθόδου FDTD πρέπει, ο χώρος στον οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου να εκτείνεται στο άπειρο. Σχεδόν όλες οι προς προσομοίωση γεωμετρίες περιέχουν μη φραγμένες περιοχές με άπειρα όρια, στις οποίες το χωρικό φάσμα των υπολογιζόμενων πεδίων δε περιορίζεται κατά μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Επομένως το να υπολογίζουμε τις συνιστώσες του ηλεκτροικού πεδίου στο άπειρο δεν μπορεί να είναι εφικτό, καθώς δεν μπορούμε να αποθηκεύουμε άπειρα δεδομένα σε έναν υπολογιστή καθότι αυτός δεν έχει απεριόριστη μνήμη για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο. Συνεπώς ο χώρος υπολογισμού θα πρέπει να είναι περιορισμένου μεγέθους.

Η μέθοδος FDTD προσομοιώνει την εξέλιξη ενός φαινομένου σε έναν πεπερασμένο χώρο. Στο τεχνητό όριο που τίθεται από το πλέγμα πρέπει :

- ✓ Να τεθούν οι ανάλογες οριακές συνθήκες Dirichlet ή Neuman αν υπάρχει κάποιο φυσικό όριο.
- ✓ Να τεθούν οι κατάλληλες απορροφητικές συνθήκες ώστε να προσομοιώνεται ο άπειρος χώρος με το πεπερασμένο πλέγμα αν δεν υπάρχει κάποιο φυσικό όριο.
- ✓ Η βασική αρχή που πρέπει να ικανοποιείται είναι :

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0}$$

Υπάρχει μια πληθώρα απορροφητικών οριακών συνθηκών. Ενδεικτικά αναφέρουμε τρεις από τις σημαντικότερες απορροφητικές συνθήκες.

Συνθήκη Liao

Η συνθήκη Liao ουσιαστικά παίζει τον ρόλο των συνοριακών συνθηκών και μειώνει το πλάτος των ανακλώμενων κυμάτων τα οποία δημιουργούνται λόγω ασυνεχειών στα οριακά σημεία. Ουσιαστικά είναι μια απλή σχέση πρόβλεψης (extrapolation) του ηλεκτρικού πεδίου στο σύνορο, από τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σε εσωτερικά κελιά και προηγούμενες χρονικές στιγμές. Με αυτή την συνθήκη λοιπόν είναι μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο στα όρια της διάταξης στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος FDTD. Για να ισχύει η συνθήκη Liao και να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι ανακλάσεις στα τοιχώματα της διάταξης, ο αγωγός βρίσκεται 10 κελιά πιο μέσα σε σχέση με το διηλεκτρικό από το οποίο περιβάλλεται στην αρχή και στο τέλος της διάταξης. Τόσο η διέγερση όσο και η επιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου βρίσκεται 10 κελιά εσωτερικά του διηλεκτρικού προς περιορισμό των ανακλάσεων.

Συνθήκη Mur

Η απορροφητική συνθήκη πρώτης τάξης του Mur υπολογίζει το πεδίο στο όριο από τιμές στην προηγούμενη χρονική στιγμή και στο πρώτο γειτονικό σημείο εντός του ορίου. Δηλαδή, αν πάρουμε την συνιστώσα E_y στη θέση $(0,j,k)$ η συνθήκη Mur αποτυπώνεται ως εξής :

$$E_y^{n+1}(0,j,k) = E_y^n(1,j,k) + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} [E_y^{n+1}(1,j,k) - E_y^n(0,j,k)]$$

PML (Perfect Matched Layer)

Πρόκειται για μια απορροφητική συνθήκη με πολλά πλεονεκτήματα που ονομάζεται «τέλεια προσαρμοσμένο στρώμα» ή «στρώμα τέλειας προσαρμογής» για την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ικανοποιεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια την ανάγκη προσομοίωσης του άπειρου χώρου χάρη στις τεχνητές του ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Το 1994, το θέμα των ABCs απασχόλησε και πάλι την επιστημονική κοινότητα, μετά την δημοσίευση της εργασίας του J. P. Berenger για μία υψηλής απόδοσης ABC, υποδεικνύοντας το στρώμα τέλειας προσαρμογής (PML). Η καινοτομία της μεθόδου του Berenger είναι πως τα επίπεδα κύματα αυθαίρετης πρόσπτωσης, πόλωσης και συχνότητας αντισταθμίζονται στο σύνορο της γεωμετρίας που προσομοιώνουμε.

5.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FDTD

Η μέθοδος FDTD παρουσιάζει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων. Ενδεικτικά παρακάτω αναφέρουμε τα σημαντικότερα. Η μέθοδος FDTD :

- Εφαρμόζεται στο πεδίο του χρόνου. Χρησιμοποιώντας μη μονοχρωματική διέγερση, με μια μόνο εφαρμογή της παίρνουμε αποτελέσματα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.
- Είναι σε θέση να χειριστεί περίπλοκες γεωμετρίες, πετυχαίνοντας την επιθυμητή ακρίβεια με επαρκή αριθμό κελιών.
- Είναι μια άμεση μέθοδος. Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτεί την επίλυση κανενός συστήματος εξισώσεων.
- Εμφανίζει βελτίωση στα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της αναλυτικότητας του πλέγματος, δηλαδή αύξηση του συνολικού αριθμού κελιών στον οποίο διακριτοποιούμε τον υπολογιστικό χώρο.
- Επιτρέπει τον καθορισμό του υλικού σε όλα τα σημεία του χώρου του προβλήματος. Μ'αυτό τον τρόπο μπορεί να συμπεριλάβει ανομοιογενή υλικά αλλά και αντικείμενα.
- Υπολογίζει τις πεδιακές εντάσεις E και H .
- Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει λεπτομερείς πολύπλοκες τρισδιάστατες γεωμετρίες και να μοντελοποιήσει οποιαδήποτε διέγερση.
- Επιτρέπει την παρατήρηση των πεδιακών μεγεθών σε όλα τα σημεία του χώρου του προβλήματος που έχουμε ορίσει. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο για διαφορετικές χρονικές στιγμές, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε ταινίες, οι οποίες απεικονίζουν την εξέλιξη του πεδίου. Επιπροσθέτως, με τον μετασχηματισμό μακρινής ζώνης η μέθοδος είναι σε θέση να προβλέψει το πεδίο και πέραν του καθορισμένου χώρου του προβλήματος.
- Μοντελοποιεί την πλειοψηφία των κατηγοριών υλικών με τον καθορισμό των παραμέτρων σ, μ και ϵ . Πέραν των υλικών στα οποία οι σ, μ, ϵ είναι σταθερές, καλύπτει και υλικά ανισότροπα, μη γραμμικά καθώς και υλικά στα οποία κάποιες από τις θεμελιώδεις παραμέτρους εξαρτώνται από την συχνότητα.
- Είναι εύκολο σαν μέθοδος να προγραμματιστεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και εφαρμόζεται σε μια ποικιλία προβλημάτων, τόσο από πλευράς εμπλεκόμενων συχνοτήτων όσο και από πλευράς διαστάσεων.
- Είναι μια μέθοδος αποδοτική σε μεγάλα προβλήματα, συγκριτικά με άλλες μεθόδους, όπως η μέθοδος των ροπών, ειδικά όταν απαιτούνται αποτελέσματα για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Όπως όλες οι μέθοδοι υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού, έτσι και η FDTD παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η μέθοδος FDTD μπορεί να καταστεί αναποτελεσματική για προβλήματα πολύ μεγάλων διαστάσεων, καθώς οι απαιτήσεις της σε υπολογιστική μνήμη αυξάνονται υπέρογκα διότι οι διαστάσεις των κελιών που πλέγματος επιβάλλεται να είναι σχετικές μικρές συγκριτικά με το μήκος κύματος (συνήθως $\lambda/20$ έως και $\lambda/10$). Επιπλέον το χρονικό βήμα πρέπει να είναι μικρότερο από τη συνθήκη Courant, έτσι ώστε η άμεση διαδικασία υπολογισμού να χαρακτηρίζεται από ευστάθεια.
- Η ποιότητα της λύσης που προκύπτει δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί εσωτερικά
- Η διαδικασία προσομοίωσης κεραιών οι οποίες είναι πολύ λεπτές (σε σύγκριση με το μήκος κύματος) και δεν έχουν τέλεια εφαρμογή με το κυβικό πλέγμα, όπως για παράδειγμα οι ελικοειδείς κεραιές, παρουσιάζει σημαντικότερες δυσκολίες.

Η μεγάλη διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων και η τεράστια απαίτηση υπολογιστικών πόρων οδηγεί σε περιορισμούς και μειονεκτήματα, τα οποία μπορούν να ξεπεραστούν με τη συγγραφή κώδικα για παράλληλο προγραμματισμό. Με τέτοιου είδους βελτιώσεις η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί σε πολύ μικρότερο χρόνο από τον αρχικά απαιτούμενο. Να σημειωθεί ότι οι αδυναμίες της μεθόδου FDTD τροφοδότησαν σειρά εξελίξεων και νέους αλγορίθμους στο πεδίο του χρόνου, με σημαντικότερες την μέθοδο πολλαπλής αναλυτικότητας στο πεδίο του χρόνου (Multiresolution Time-Domain – MRTD) και την ψευδοφασματική μέθοδο στο πεδίο του χρόνου (Pseudospectral Time – Domain – PSTD).

Κεφάλαιο 6

Υπολογισμός του SAR σε απλό και πιο λεπτομερές ανατομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού για διπολική κεραία $\lambda/2$

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετούμε την περίπτωση στην οποία τοποθετήθηκε ως πηγή ακτινοβολίας, δίπλα σε ένα απλό ανατομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, μια διπολική κεραία $\lambda/2$, σε συχνότητες λειτουργίας 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Αναλύθηκαν δύο περιπτώσεις. Καθεμία από τις περιπτώσεις, τις διαχωρίσαμε σε δύο υποπεριπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα:

1^η περίπτωση: Διπολική κεραία $\lambda/2$ δίπλα στο αυτί.

- i. Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί
- ii. Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί

2η περίπτωση: Διπολική κεραία $\lambda/2$ μπροστά και δίπλα στο μάτι.

- i. Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση, μπροστά και δίπλα στο μάτι.
- ii. Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση, μπροστά και δίπλα στο μάτι.

Τέλος, εξετάστηκε και η περίπτωση τοποθέτησης μια διπολικής κεραίας $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί ενός αναλυτικού ανατομικού μοντέλου ανθρώπινου κεφαλιού.

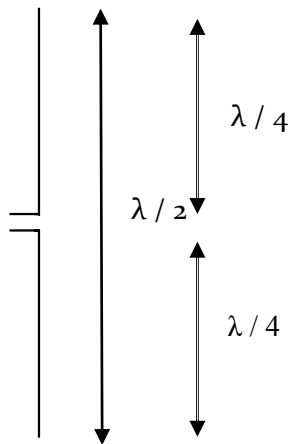
Μελετήθηκε η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που προέρχεται από τη διπολική κεραία $\lambda/2$, με το μοντέλο του κεφαλιού. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν υπολογίζουν τον Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης (SAR) αλλά και την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του ανθρώπινου κεφαλιού. Με τη βοήθεια του λογισμικού, προσομοιώθηκε τόσο το κεφάλι όσο και η διπολική κεραία $\lambda/2$.

6.1 Γενικά στοιχεία

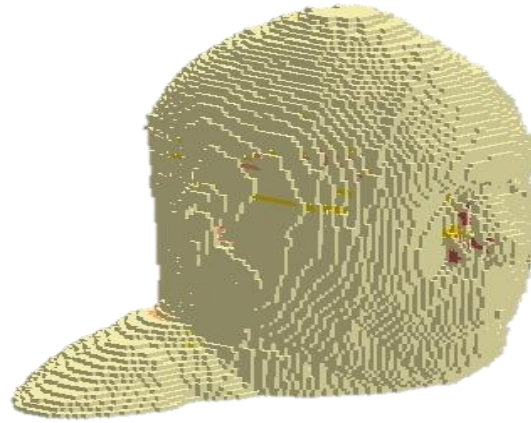
6.1.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$

Μια απλή από πλευράς διάταξης κεραία με ευρεία χρήση είναι η διπολική κεραία, το μήκος της οποίας είναι $\lambda/2$ (συναντάται στην βιβλιογραφία και ως δίπολο μισού μήκους κύματος). Αυτό το είδος κεραίας ανήκει στην κατηγορία των γραμμικών κεραιών μικρής διαμέτρου ($d \ll \lambda$) και τροφοδοτείται στη μέση. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα η κατανομή του ρεύματος να είναι περίπου ημιτονοειδής με το μέγιστο να εμφανίζεται στο κέντρο και τα ελάχιστα στα άκρα. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η διπολική κεραία $\lambda/2$ αποτελείται από κομμάτι σύρματος, ράβδου ή σωλήνα μήκους $\lambda/2$ στην εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας.



Εικόνα 6.1: Γεωμετρία διπολικής κεραίας $\lambda/2$



Εικόνα 6.2: 3D απεικόνιση μοντέλου ανθρώπινου κεφαλιού

6.1.2 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

Τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του ανθρώπινου κεφαλιού είναι βασισμένα στην ανθρώπινη ανατομία. Αρκετά από αυτά είναι απλά κι άλλα είναι πιο λεπτομερη, αναλυτικά και περίπλοκα. Συνήθως τα ανατομικά μοντέλα κατασκευάζονται με τρισδιάστατη πιστή αναπαράσταση των τομών κεφαλιών εθελοντών, οι οποίες προέρχονται από Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού (MRI – Magnetic Resonance Imaging). Επιπλέον αρκετά ανατομικά μοντέλα σχεδιάζονται με τη βοήθεια CAD λογισμικού. Το λογισμικό συνυπολογίζει την ανθρώπινη ανατομία χωρίς όμως να κάνει χρήση δεδομένων που προέρχονται από ένα πραγματικό ανθρώπινο κεφάλι. Τα μοντέλα αυτά έχει επικρατήσει να ονομάζονται CAD-based μοντέλα.

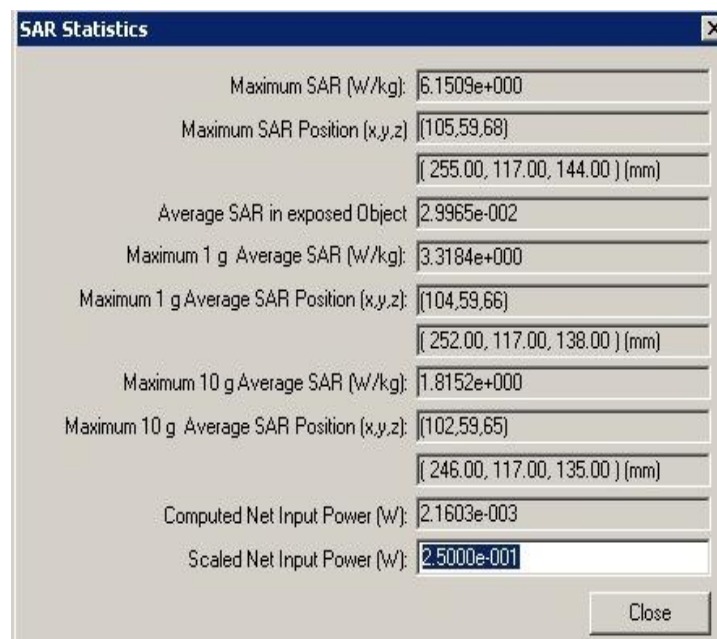
Το αριθμητικό ανατομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού που χρησιμοποιήθηκε παρέχεται από το λογισμικό, αποτελείται από 7 ιστούς και έχει τη μορφή που φαίνεται στις εικόνα 6.2.

6.1.3 Υπολογισμός SAR

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των τιμών SAR [τοπικό(local) και μέσο(average)] σε ομοιώματα ανθρώπινου κεφαλιού ή σώματος, τα οποία δέχονται επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που προέρχεται είτε από κάποια μεμονωμένη κεραία είτε από κεραία που εμπεριέχεται σε τερματική συσκευή. Επιπλέον, απαιτείται τα διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται να είναι

κανονικά (normal type). Τα εξαρτώμενα από τη συχνότητα υλικά (frequency dependent materials) μπορούν να έχουν έναν παράγοντα απώλειας που σχηματίζεται από το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς. Αυτά τα υλικά δεν υποστηρίζονται για τους υπολογισμούς SAR.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι παρέχεται η δυνατότητα για υπολογισμό μέσων τιμών SAR (SAR average). Οι τιμές αυτές αφορούν κάποιον όγκο της γεωμετρίας με μάζα αναφοράς 1g και 10g. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής SAR σε ένα αντικείμενο αφορά κάποιον κυβικό όγκο αποτελούμενο από βασικά στοιχεία (voxels). Το λογισμικό αναλαμβάνει τον υπολογισμό της μέσης τιμής SAR στην καρτέλα «SAR Statistics» του παραθύρου εμφάνισης των αποτελεσμάτων. Εκεί παρουσιάζονται όλα τα υλικά με απώλειες και μη μηδενική πυκνότητα. Να σημειωθεί ότι τιμή που αντιστοιχεί στο SAR ολόκληρου του σώματος, αφορά όλους τους ιστούς. Η τιμή τοπικού SAR αποθηκεύεται στα επίπεδα XY, ZX, YZ τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των SAR_1g και SAR_10g, δηλαδή τιμές SAR με μάζα αναφοράς 1g και 10g αντίστοιχα. Με τη βοήθεια της επιλογής «View Statistics» του παραθύρου «SAR Statistics» εμφανίζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό του SAR.



Εικόνα 6.3: Τυπική παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Στα αποτελέσματα που εμφανίζονται συμπεριλαμβάνονται και εντοπίζονται πλήρως οι μέγιστες τιμές των SAR_average . Επίσης εμφανίζεται η ισχύς εισόδου, για την οποία υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης και η τροποποίησή της χωρίς να χρειαστεί να τρέξει εκ νέου η προσομοίωση. Μας ενδιαφέρουν οι τιμές SAR σε συγκεκριμένα τμήματα της γεωμετρίας. Συνεπώς για να αποφευχθεί ο υπολογισμός

SAR_average σε ολόκληρη τη γεωμετρία, χρειάζεται να αποθηκευτούν κάποια επίπεδα τοπικών SAR στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Αυτή η περιοχή βρίσκεται συνήθως στην πλευρά του μοντέλου η οποία ακτινοβολείται από την κοντινή πηγή.

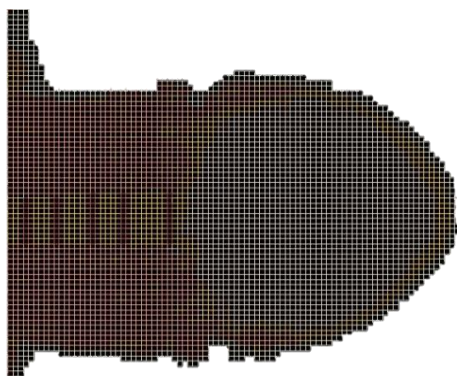
6.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί

Γενική περιγραφή προβλήματος

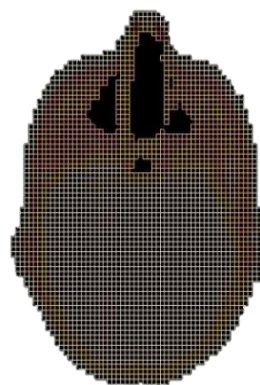
Το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και μια διπολική κεραία $\lambda/2$, η οποία τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το ανθρώπινο αυτί. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται σε τρεις διαφορετικές συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Στόχος είναι η μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) καθώς και το πως η τροποποίηση της παραμέτρου της απόστασης μεταξύ ανθρώπινου κεφαλιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$, επιδρά σε αυτόν. Επιπλέον εξετάζεται αν οι τιμές SAR που προκύπτουν βρίσκονται εντός των θεσπισμένων ορίων έκθεσης γενικού πληθυσμού.

Κατασκευή γεωμετρίας

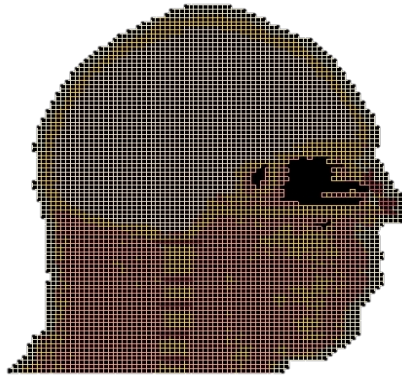
Η διπολική κεραία κατασκευάζεται με βάση την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της, καθώς το μήκος της έχει άμεση εξάρτηση απ' αυτήν. Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού στο επίπεδο ZX, κατασκευάζεται η διπολική κεραία για καθεμία από τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις (slice: 60). Η κεραία σχεδιάστηκε με το εργαλείο wire το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή μονοδιάστατων κατασκευών με μηδενικό πάχος.



Εικόνα 6.4 : Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο ZX επίπεδο, slice:60, όπου γίνεται ο σχεδιασμός της κεραίας



Εικόνα 6.5: Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο XY επίπεδο



Εικόνα 6.6: Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο YZ επίπεδο

6.2.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 900 MHz Περιγραφή προβλήματος

Σε αυτή την περίπτωση του προβλήματος που μελετήθηκε η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κινητή τηλεφωνία). Συνεπώς, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Πιο συγκεκριμένα οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 900 MHz είναι 0.25 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 2.5e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την εξής λογική: Αφού η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας είναι 900 MHz έχουμε:

$$c = \lambda f \Rightarrow \lambda = 0.333 \text{ m} = 33.33 \text{ cm} = 333.33 \text{ mm} \approx 333 \text{ mm}$$

$$\text{Επομένως } \lambda/2 = 333/2 = 166.5 \approx 167 \text{ mm}$$

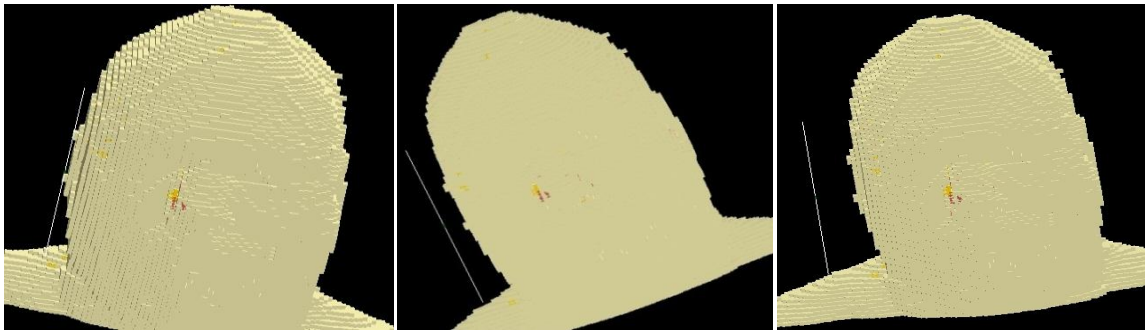
$$\text{Άρα } 167/2 = 83,5 \text{ mm}$$

$$\text{Συνεπώς } 83.5/3.66 = 22,8 \approx 23 \text{ κελιά}$$

Από τα παραπάνω καταλήγουμε ότι η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο αυτί θα περιλαμβάνει συνολικά 46 κελιά. Πιο αναλυτικά 23 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 23 κελιά όπως φαίνεται στις εικόνες 6.7 και 6.8 που ακολουθούν.



Εικόνα 6.7: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 0.36 cm
 Εικόνα 6.8: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 3.66 cm



(α)

(β)

(γ)

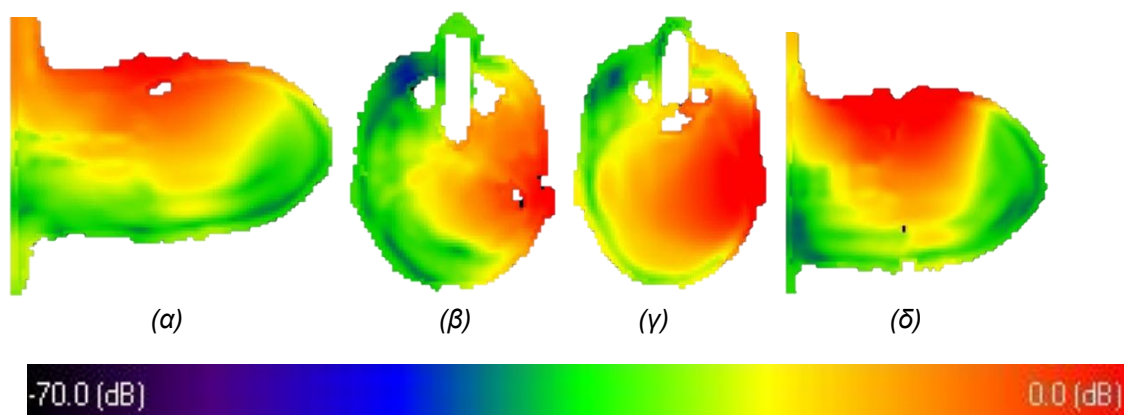
Εικόνα 6.9: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το αυτί του μοντέλου

Αποτελέσματα

Μετά την εκτέλεση προσομοιώσεων για πέντε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ κεραίας και μοντέλου κεφαλιού, προέκυψαν οι μέγιστες τοπικές και μέσου όρου τιμές SAR. Εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης της κεραίας- κεφαλιού στις τιμές του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR).

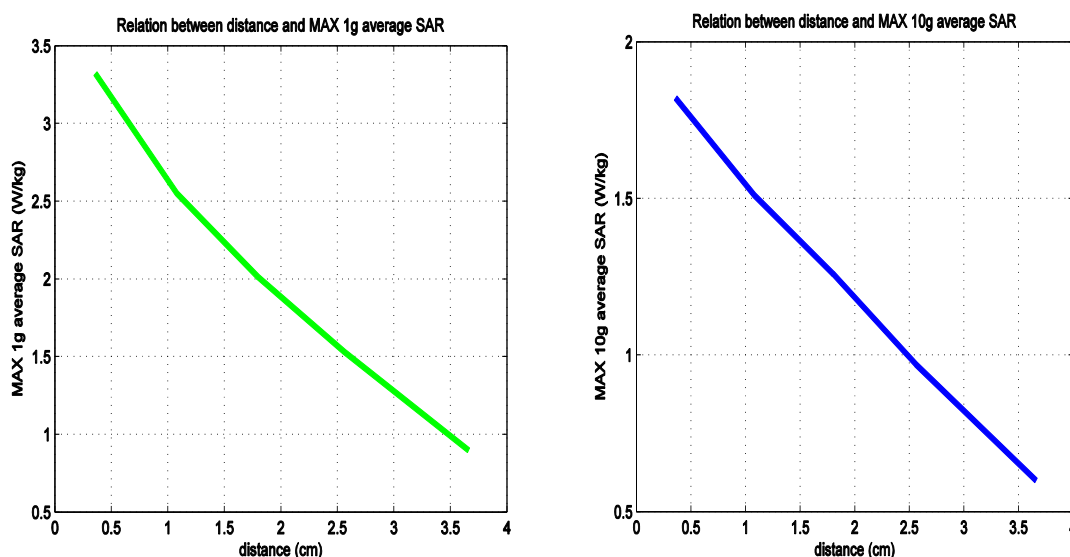
Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	6.15	3.32	1.82
1.08	4.39	2.55	1.51
1.8	3.30	2.01	1.26
2.56	2.33	1.53	0.97
3.66	1.29	0.9	0.6



Εικόνα 6.10: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

Παρατίθενται δύο γραφήματα που αναπαριστούν τα MAX 1g Average SAR (W/kg) και MAX 10g Average SAR (W/kg) συναρτήσει της απόστασης κεραίας –κεφαλιού.



Εικόνα 6.11: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 – κεφαλιού.

6.2.2 Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 1800 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία λ/2 λειτουργεί στη συχνότητα των 1800 MHz (κινητή τηλεφωνία). Επομένως, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm

και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 1800 MHz είναι 0.125 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W): 1.25e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την ακόλουθη λογική: Αφού η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας είναι 1800 MHz έχουμε:

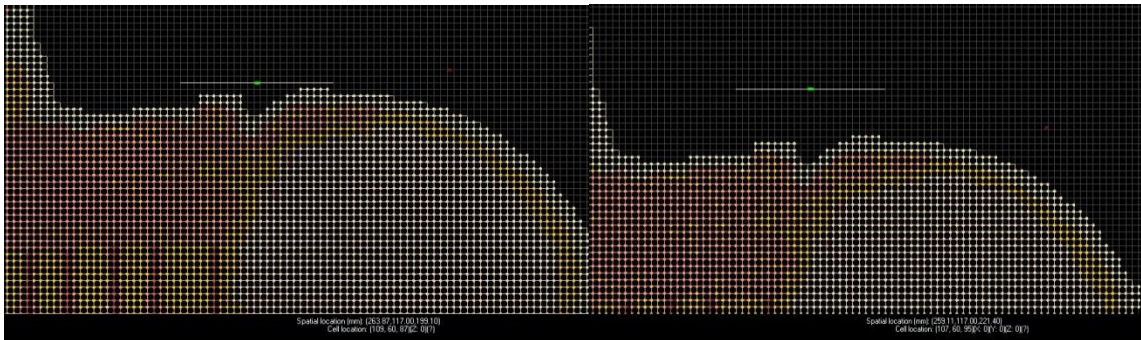
$$c = \lambda f \Rightarrow \lambda = 0.1667 \text{ m} = 16.67 \text{ cm} = 166,7 \text{ mm} \approx 167 \text{ mm}$$

$$\text{Επομένως } \lambda/2 = 167/2 = 83.5 \approx 83 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } 83/2 = 41,5 \text{ mm}$$

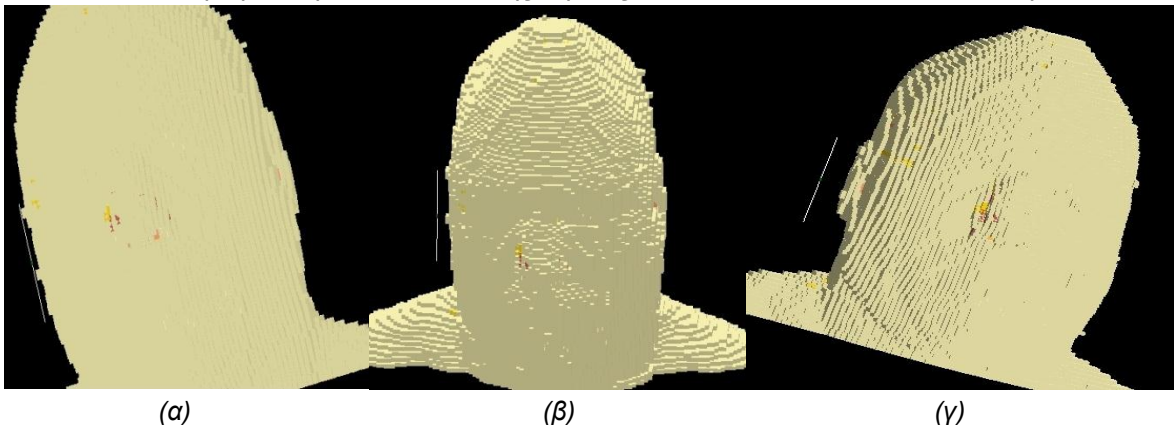
$$\text{Συνεπώς } 41.5/3.66 = 11.3 \approx 11 \text{ κελιά}$$

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο αυτί θα αποτελείται συνολικά από 23 κελιά. Πιο αναλυτικά, 11 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 11 κελιά.



Εικόνα 6.12: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 0.36 cm

Εικόνα 6.13: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 2.56 cm

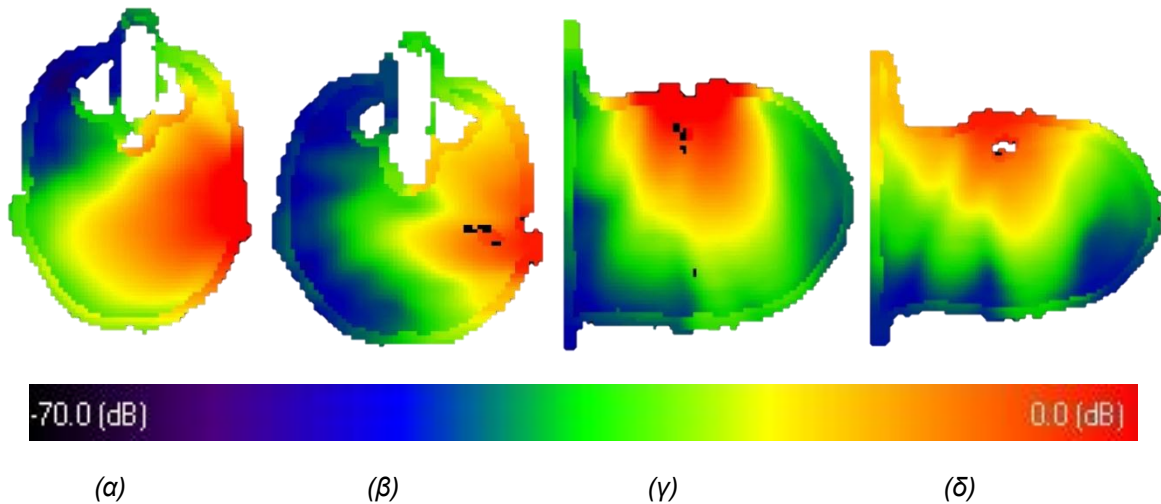


Εικόνα 6.14: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.08 cm και (γ) 2.56 cm από το αυτί του μοντέλο

Αποτελέσματα

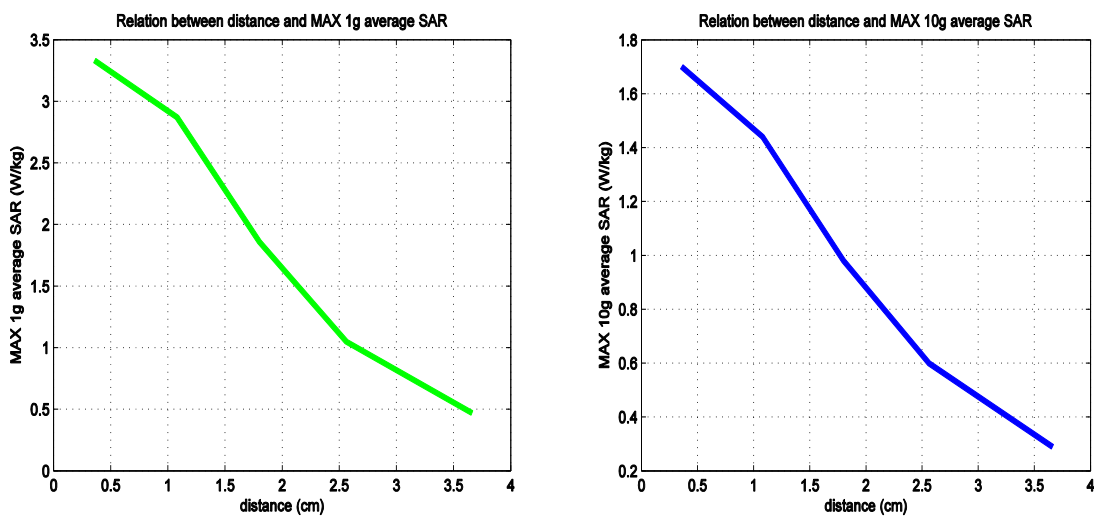
Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	6.4	3.33	1.7
1.08	5.29	2.87	1.44
1.8	3.28	1.86	0.98
2.56	1.77	1.05	0.6
3.66	0.74	0.47	0.29



Εικόνα 6.15: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

Στα γραφήματα που ακολουθούν αναπαριστώνται τα MAX 1g Average SAR (W/kg) και MAX 10g Average SAR (W/kg) συναρτήσει της απόστασης κεραίας – κεφαλιού.



Εικόνα 6.16: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 – κεφαλιού.

6.2.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 2.44 GHz

Περιγραφή προβλήματος

Σε αυτή την περίπτωση η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 2.44 GHz (ασύρματα δίκτυα). Η κεραία σχεδιάζεται σύμφωνα με αυτή την συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 2.44 GHz είναι 0.1 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 1e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την γνωστή κι από τις παραπάνω περιπτώσεις λογική. Η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας είναι 2.44 GHz άρα έχουμε:

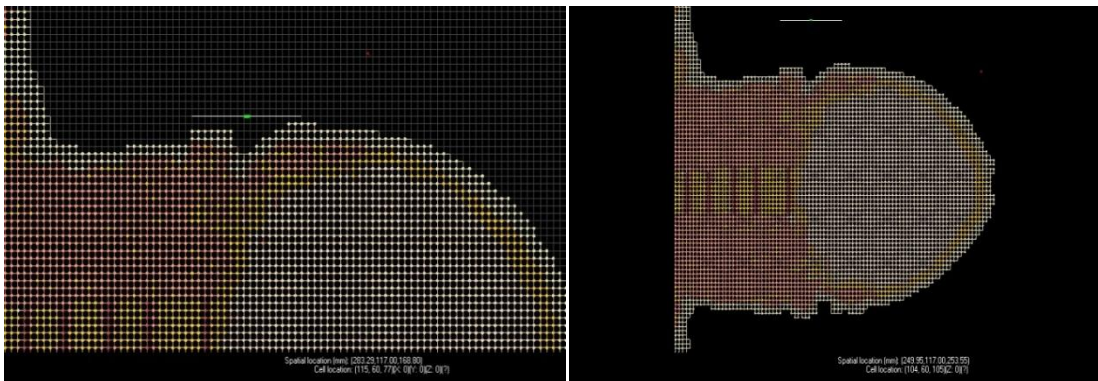
$$c = \lambda f \Rightarrow \lambda = 0.123 \text{ m} = 1.23 \text{ cm} = 123 \text{ mm}$$

$$\text{Επομένως } \lambda/2 = 123/2 = 61.5 \approx 61 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } 61/2 = 30.5 \text{ mm} \approx 31$$

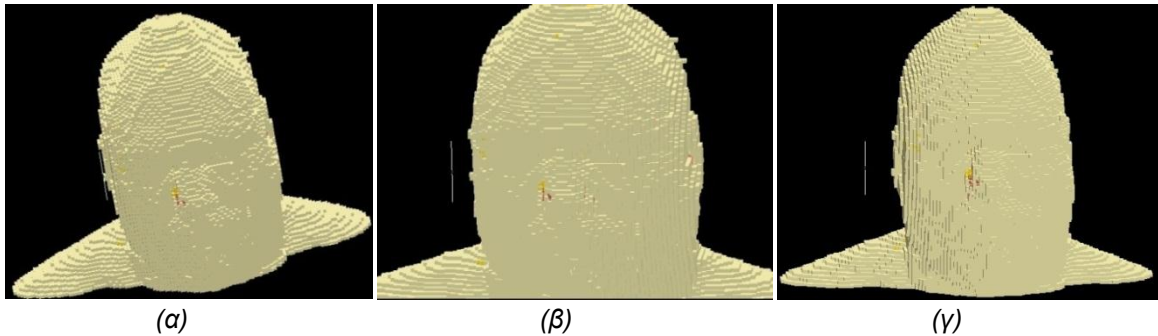
$$\text{Συνεπώς } 31/3.66 = 8.47 \approx 8 \text{ κελιά}$$

Από τα παραπάνω καταλήγουμε ότι η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο αυτί θα περιλαμβάνει συνολικά 17 κελιά. Πιο αναλυτικά 8 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 8 κελιά.



Εικόνα 6.17: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 0.36 cm

Εικόνα 6.18: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 2.56 cm

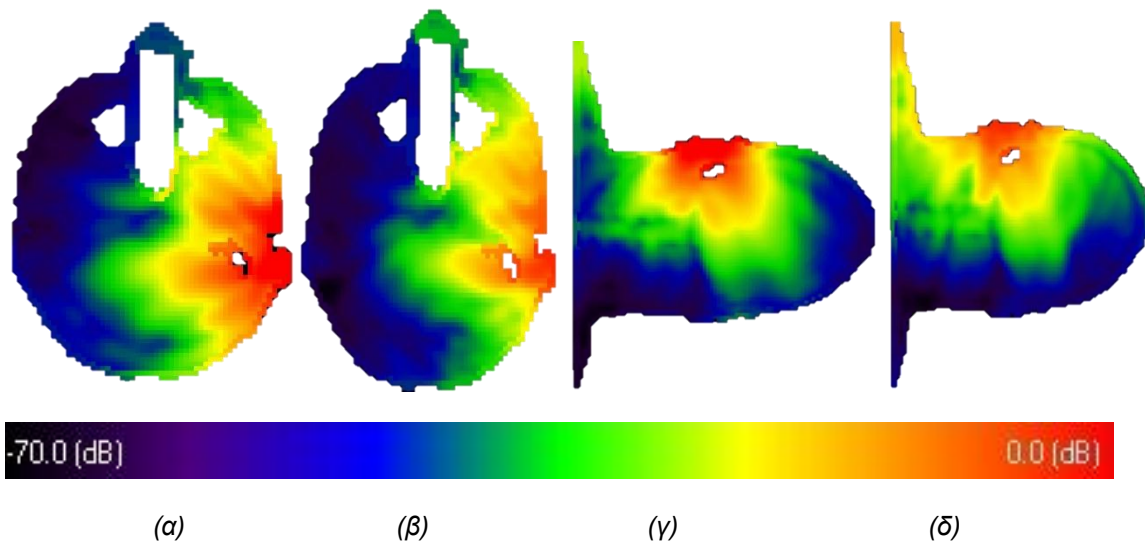


Εικόνα 6.19: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το αυτί του μοντέλου

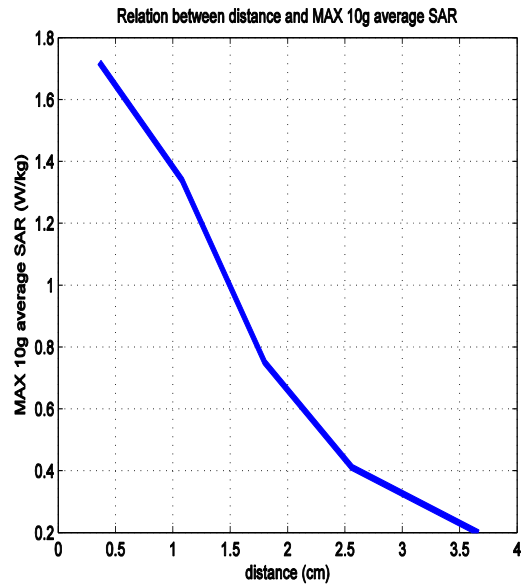
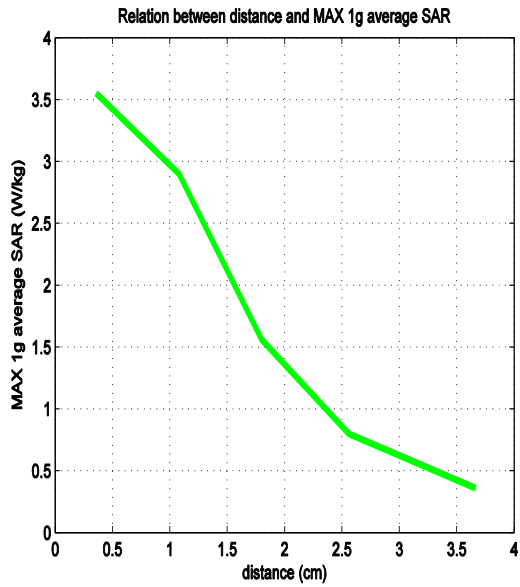
Αποτελέσματα

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	8.38	3.55	1.72
1.08	5.99	2.90	1.34
1.8	3.10	1.56	0.75
2.56	1.56	0.80	0.41
3.66	0.69	0.36	0.20



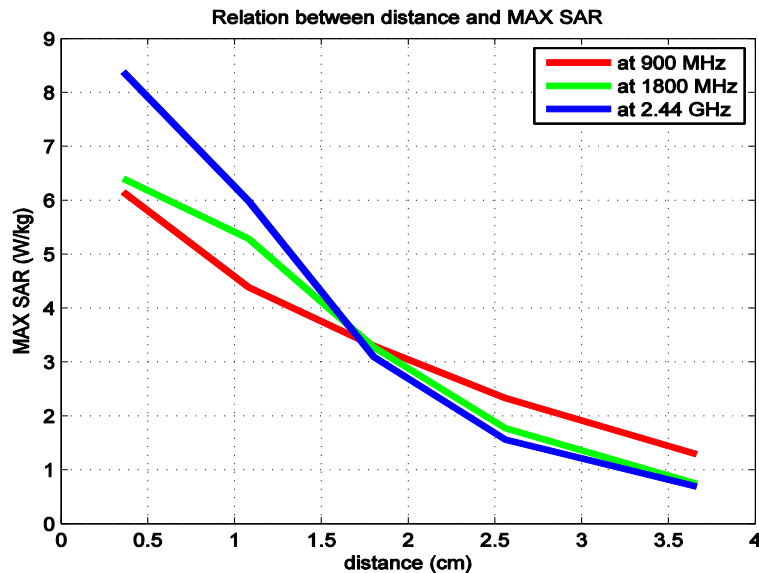
Εικόνα 6.20: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

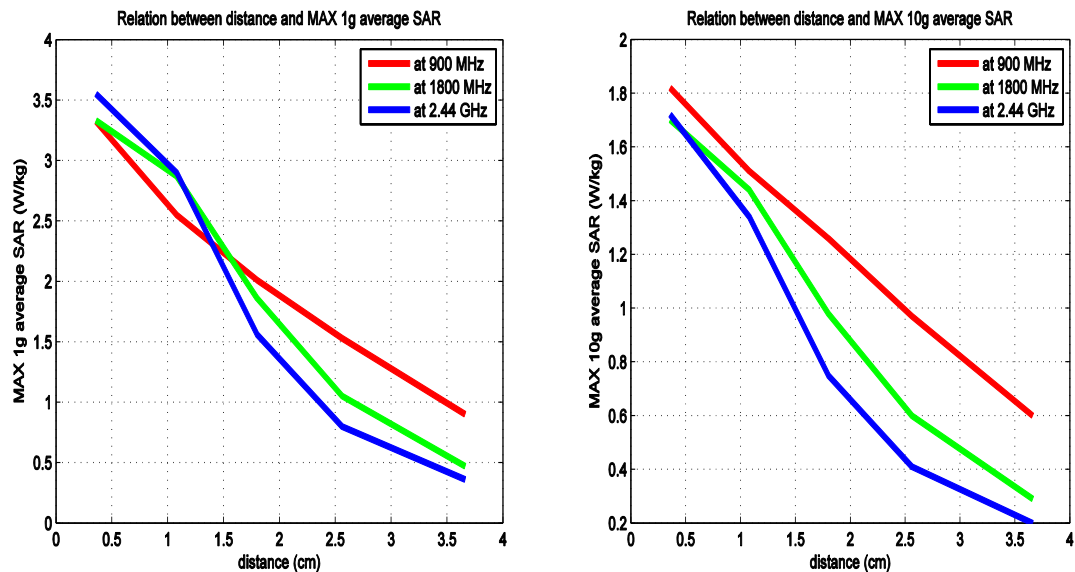


Εικόνα 6.21: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 – κεφαλιού.

6.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Εκτελέστηκαν συνολικά δεκαπέντε προσομοιώσεις, πέντε προσομοιώσεις σε κάθε συχνότητα, μία προσομοίωση για κάθε μια από τις συνολικά πέντε αποστάσεις. Οι τρεις διαφορετικές συχνότητες ήταν 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz με input scaled power 0.25 W, 1.125 W και 0.1 W αντίστοιχα.

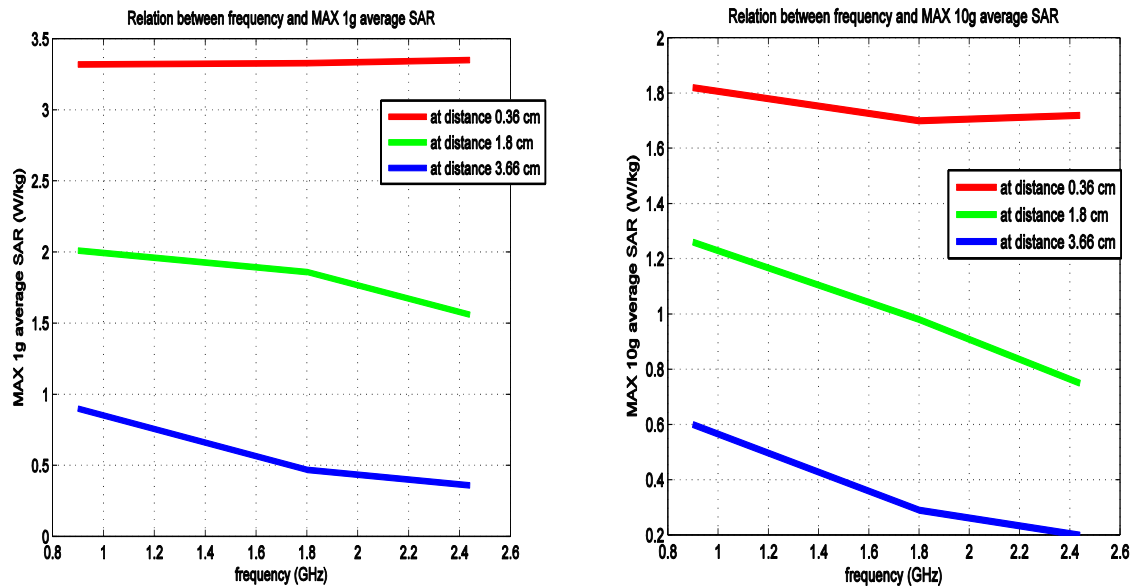




Εικόνα 6.22: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz.

Από τα διάγραμμα που προηγήθηκαν παρατηρείται ότι τιμές των μετρούμενων ποσοτήτων SAR μειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ διπολικής κεραίας $\lambda/2$ - κεφαλιού. Συγκριμένα, για απόσταση κεραίας-κεφαλιού 0.36 (σχεδόν σε επαφή) η τιμή 1g SAR, στα 900 MHz είναι 3.32 W/kg, στα 1800 MHz είναι 3.33 W/kg, στα 2.44GHz είναι 3.55 W/kg. Και οι τρεις αυτές τιμές υπερβαίνουν τα όρια ασφαλούς έκθεσης γενικού πληθυσμού της ICNIRP (αλλά βρίσκονται εντός των ορίων επαγγελματικής έκθεσης). Σε ότι αφορά τις τιμές 1g SAR και 10g SAR παρατηρήθηκε ότι βρισκόμαστε εντός των ορίων μετά την τρίτη απόσταση, δηλαδή τα 1.8 cm σε όλες τις συχνότητες που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, σε απόσταση 3.66 cm μεταξύ διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού, στα 900 MHz η τιμή 1g SAR είναι 0.9 W/kg και η τιμή 10g SAR 0.6 W/kg. Επίσης, σε απόσταση 2.56 cm μεταξύ διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού, στα 1800 MHz, η τιμή 1g SAR είναι 1.05 W/kg και η τιμή 10g SAR 0.6 W/kg. Τέλος, σε απόσταση 1.8 cm μεταξύ διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού, στα 2.44 GHz, η τιμή 1g SAR είναι 1.56 W/kg και η τιμή 10g SAR 0.75 W/kg.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις με βάση τα διαγράμματα που προέκυψαν, συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της απόστασης μεταξύ κεραίας- κεφαλιού, έστω και κατά μερικά mm, προκαλεί σημαντική μείωση των επιπέδων απορροφούμενης από το κεφάλι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί η περίπτωση μεταξύ της απόστασης 1.08 cm και της αμέσως επόμενης 1.8 cm ,όπου σε όλες τις συχνότητες που διερευνήθηκαν, γίνεται είσοδος στα ασφαλή όρια έκθεσης με σημαντικότερη μείωση του SAR.



Εικόνα 6.23: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας στις αποστάσεις 0.36 cm, 1.8 cm και 3.66 cm

Από τα διαγράμματα της εικόνας 6.28 επιβεβαιώνεται ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ κεραίας-κεφαλιού έχουμε αξιοσημείωτη μείωση του SAR. Επίσης παρατηρήθηκε ότι για τις αποστάσεις 0.36 cm, 1.8 cm και 3.66 cm οι τιμές 10g SAR παρουσιάζουν μείωση καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και στις τιμές 1g SAR, με εξαίρεση την πρώτη απόσταση 0.36 cm όπου τα επίπεδα SAR να μην υπερβαίνουν τα όρια ασφαλούς έκθεσης κοινού της ICNIRP, αλλά βρίσκονται εντός ορίων επαγγελματικής έκθεσης, και κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα με την αύξηση της συχνότητας. Σε ότι αφορά την μεταβολή του SAR συναρτήσει της συχνότητας δεν μπορεί να διατυπωθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα, διότι στην απόσταση 0.36 cm παρατηρείται μια ομαλή αυξομείωση των τιμών SAR. Αντίθετα στις αποστάσεις 1.8 cm και 3.66 cm παρατηρείται σταδιακή μείωση του SAR με αύξηση της συχνότητας λειτουργίας της κεραίας.

6.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί

Γενική περιγραφή προβλήματος

Το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα το οποίο εξετάστηκε αποτελείται από ένα αντομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και μια διπολική κεραία $\lambda/2$. Η κεραία τοποθετείται σε οριζόντια θέση, σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το ανθρώπινο αυτί. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται σε τρεις διαφορετικές συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Και σε αυτό το πρόβλημα στόχος είναι η μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) καθώς και το πως η τροποποίηση της

παραμέτρου της απόστασης μεταξύ ανθρώπινου κεφαλιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$, επίδρά σε αυτόν. Τέλος, εξετάζεται αν οι προκύπτουσες τιμές SAR συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα ασφαλούς έκθεσης.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η διπολική κεραία κατασκευάζεται με βάση τη συχνότητα λειτουργίας της, καθώς το μήκος της εξαρτάται απ' αυτήν. Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού στο επίπεδο XY, κατασκευάζεται η διπολική κεραία για καθεμία από τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις. (slice: 59)

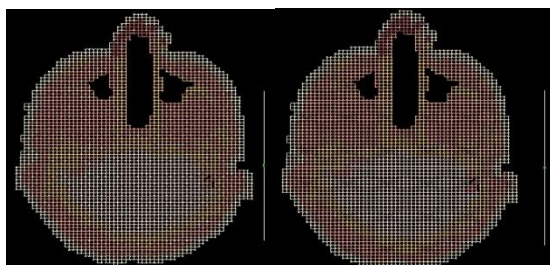
6.3.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί στα 900 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κινητή τηλεφωνία). Επομένως, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 900 MHz είναι 0.25 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 2.5e-001.

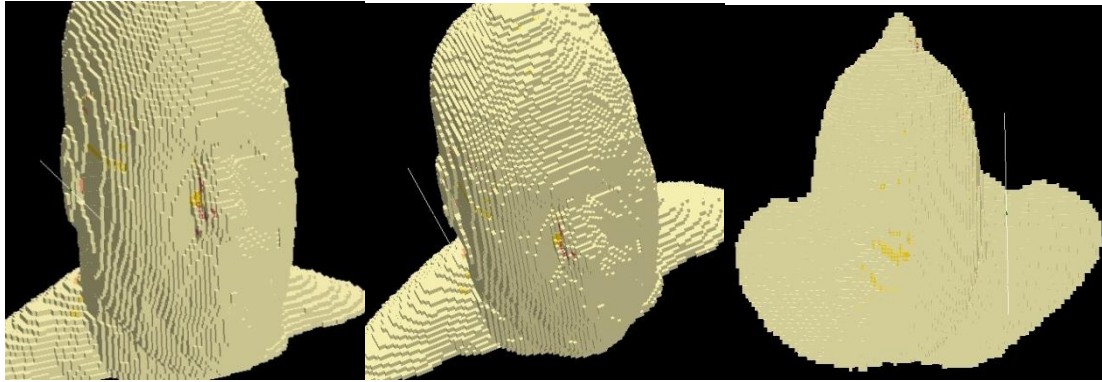
Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού αλλά και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την λογική που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.2.1. Συνεπώς, η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία θέλουμε να τοποθετήσουμε σε οριζόντια θέση δίπλα στο αυτί θα περιλαμβάνει συνολικά 46 κελιά. Πιο συγκεκριμένα, 23 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 23 κελιά.



Εικόνα 6.24: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο XY, σε απόσταση 1.08 cm

Εικόνα 6.25: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο XY, σε απόσταση 2.56 cm



(α)

(β)

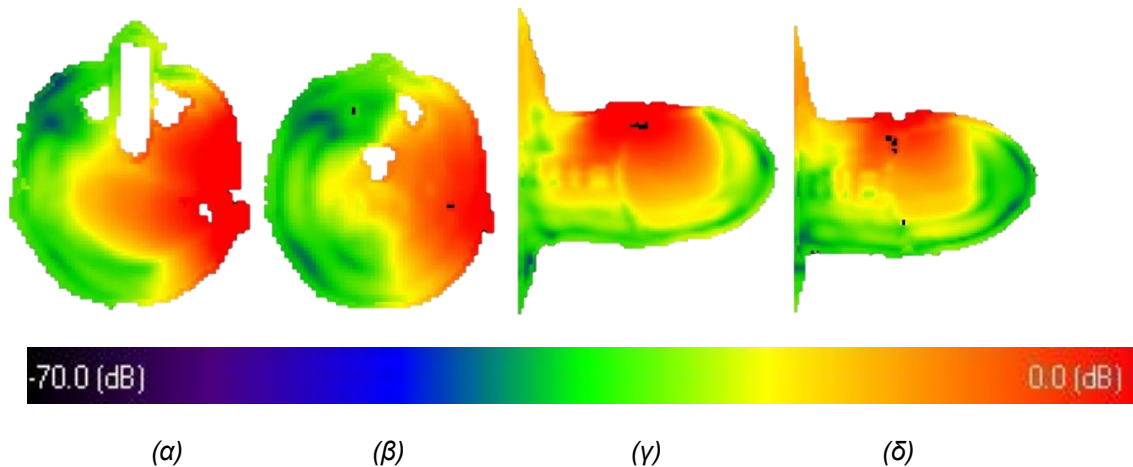
(γ)

Εικόνα 6.26: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 2.56 cm από το αυτί του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	8.2	3.93	2.19
1.08	5.12	2.40	1.69
1.8	3.64	1.88	1.22
2.56	2.59	1.41	0.87
3.66	1.51	0.86	0.51



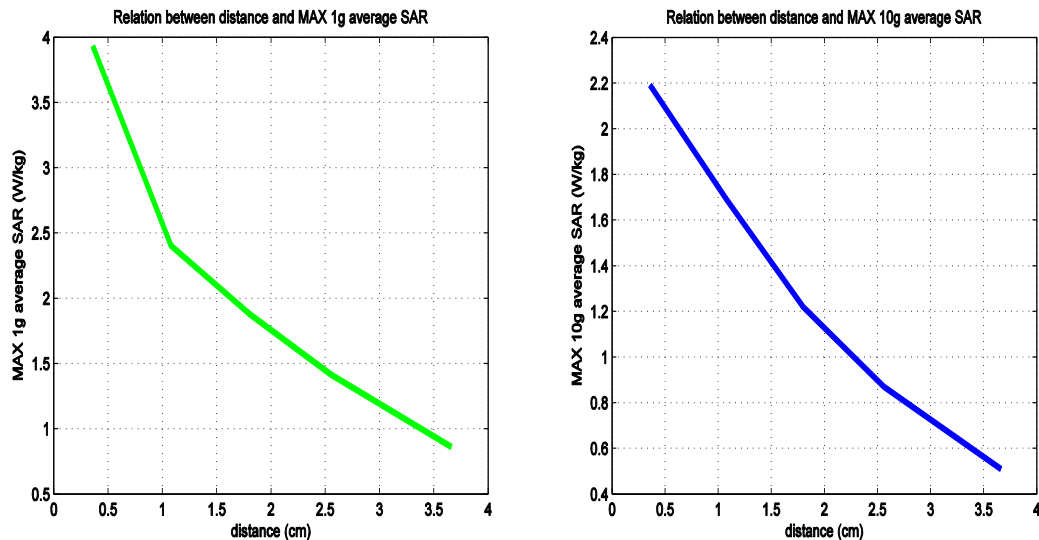
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.27: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 2.56 cm (β και δ)



Εικόνα 6.28: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού.

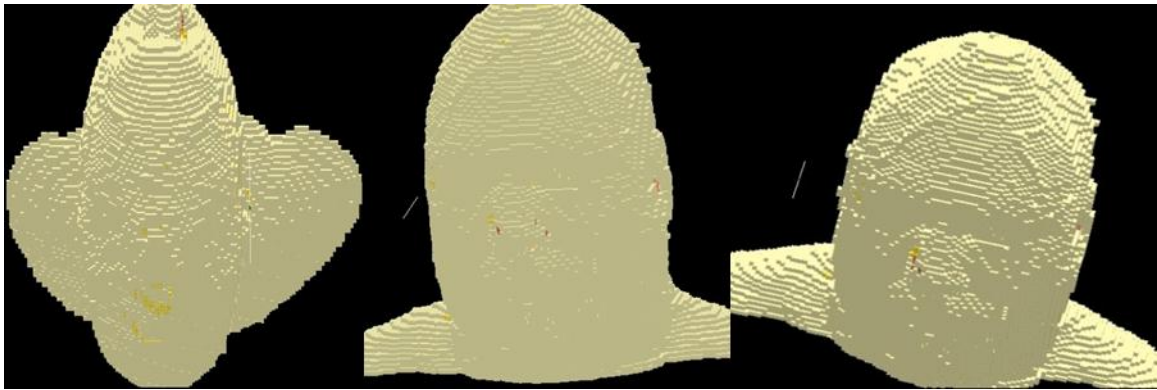
6.3.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί στα 1800 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 1800 MHz (κινητή τηλεφωνία). Άρα ο σχεδιασμός της κεραίας υλοποιείται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού οι οποίες είναι 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 1800 MHz είναι 0.125 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W): 1.25e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την λογική που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.3: Αφού η συχνότητα λειτουργίας της κεραίας είναι 1800 MHz, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο αυτί θα αποτελείται συνολικά από 23 κελιά. Πιο αναλυτικά 11 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 11 κελιά.



(α)

(β)

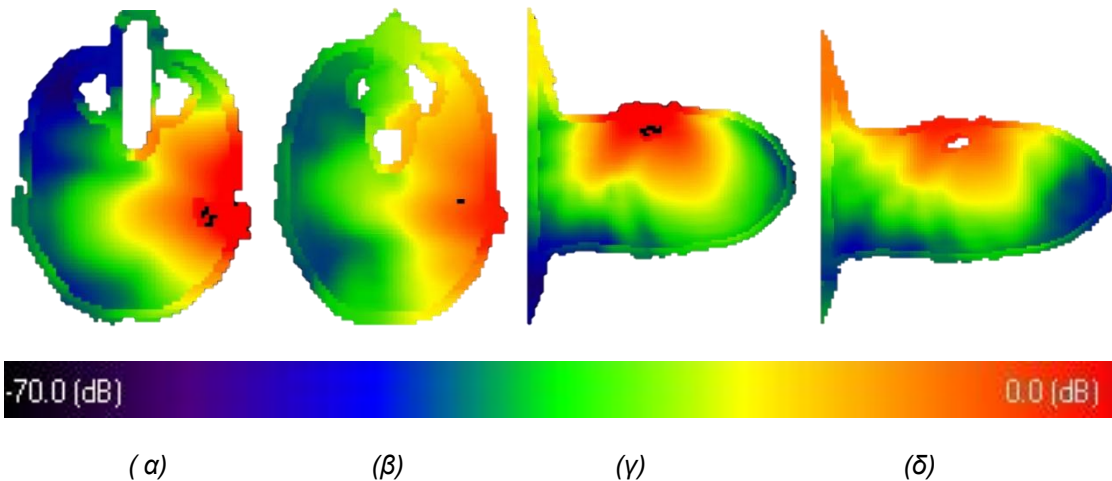
(γ)

Εικόνα 6.29: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το αυτί του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	10.49	5.29	2.51
1.08	4.35	2.87	1.61
1.8	2.18	1.42	0.88
2.56	1.12	0.72	0.48
3.66	0.49	0.33	0.23



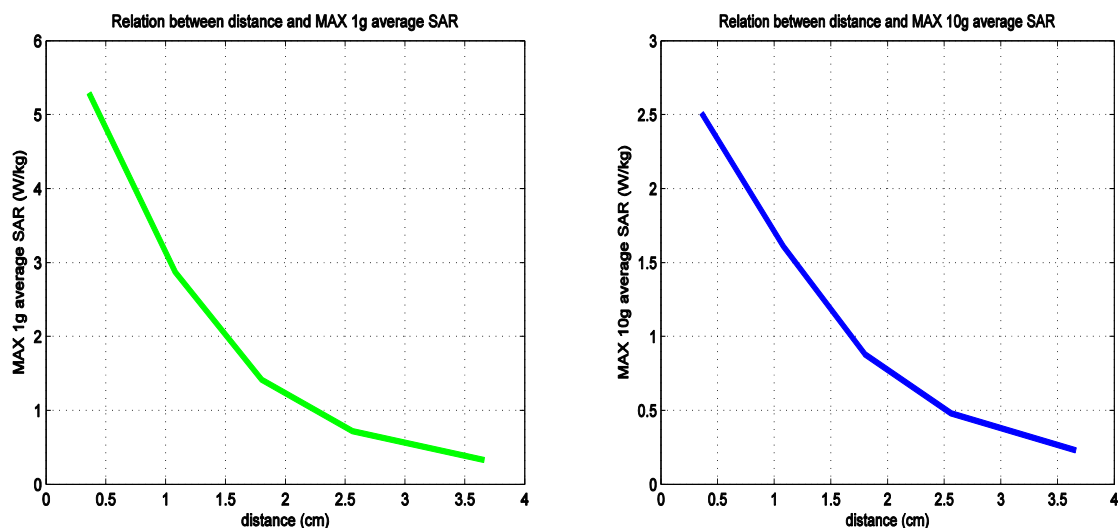
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.30: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)



Εικόνα 6.31: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού.

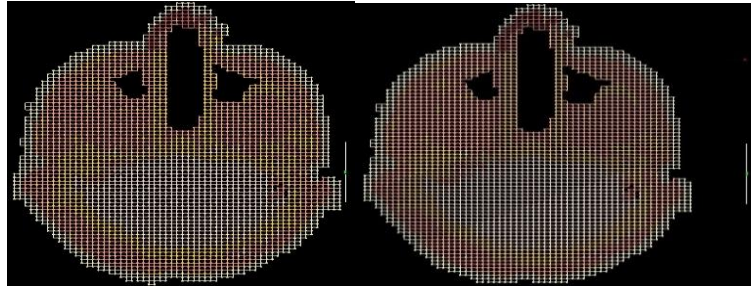
6.3.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο αυτί στα 2.44 GHz

Περιγραφή προβλήματος

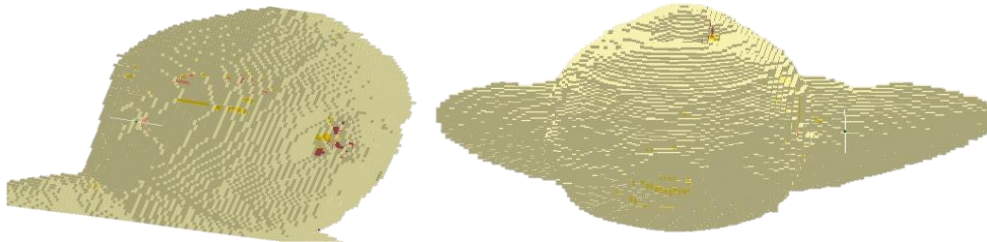
Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 2.44 GHz (ασύρματα δίκτυα). Η κεραία σχεδιάζεται σύμφωνα με αυτή την συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 2.44 GHz είναι 0.1 W, δηλαδή Scaled Net Input Power (W) : $1e-001$.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού(ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ κατασκευάστηκε με την λογική που πειραγράφηκε στην παράγραφο 6.2.4. Επομένως, η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο αυτί θα περιλαμβάνει συνολικά 17 κελιά. Πιο αναλυτικά 8 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 8 κελιά.



Εικόνα 6.32: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας λ/2 στο επίπεδο ΧΥ, σε απόσταση 1.08 cm
 Εικόνα 6.33: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας λ/2 στο επίπεδο ΧΥ, σε απόσταση 2.56 cm



(α)

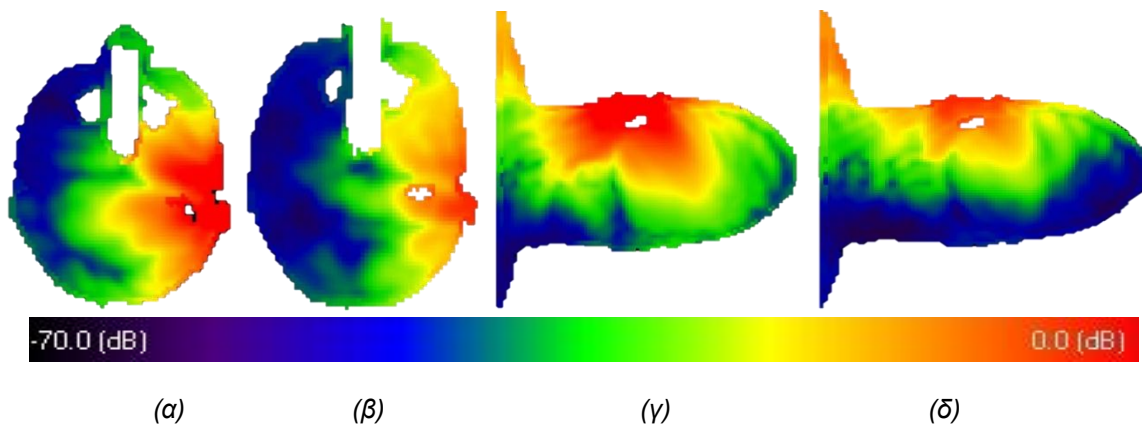
(β)

Εικόνα 6.34: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία λ/2 σε απόσταση (α) 0.36 cm και (β) 2.56 cm από το αυτί του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	12	5.56	2.29
1.08	4.65	2.64	1.28
1.8	1.97	1.13	0.62
2.56	1.01	0.56	0.32
3.66	0.45	0.25	0.16



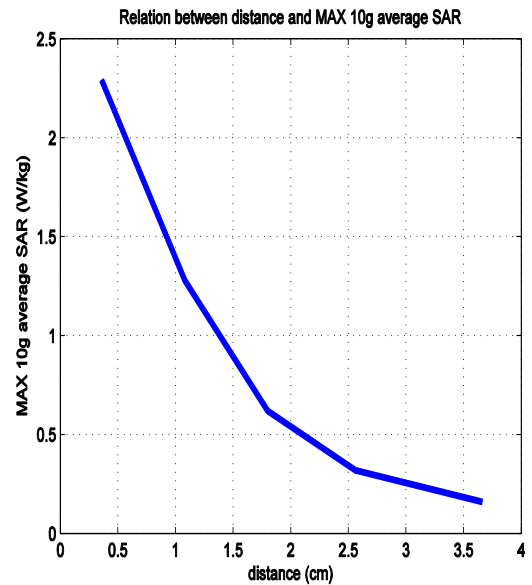
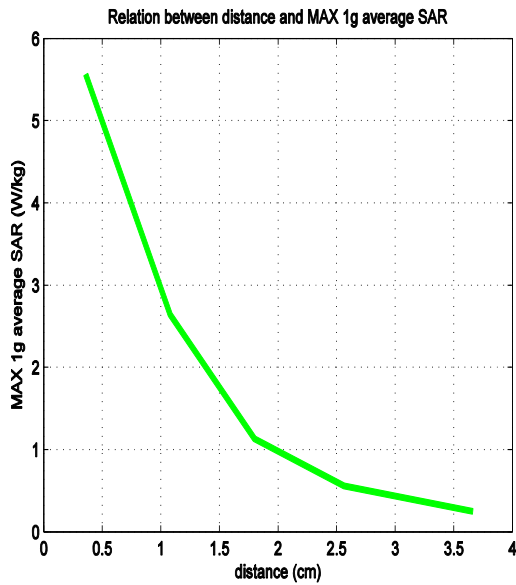
(α)

(β)

(γ)

(δ)

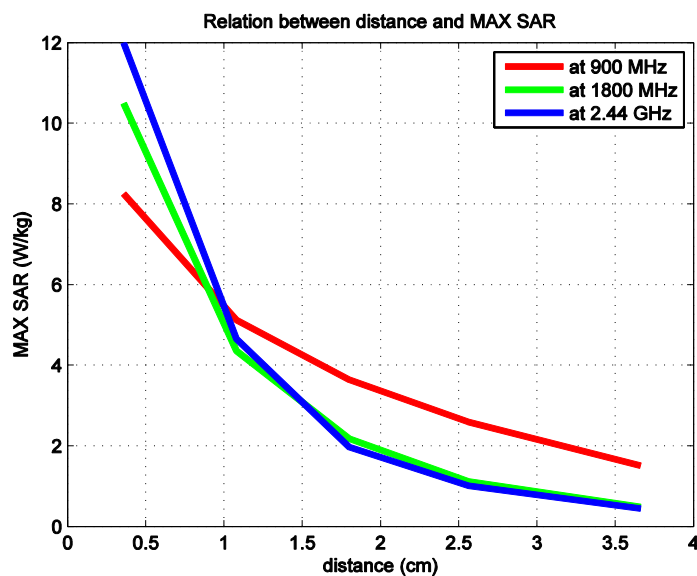
Εικόνα 6.35: Επίπεδα ΧΥ (α και β) και ΖΧ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

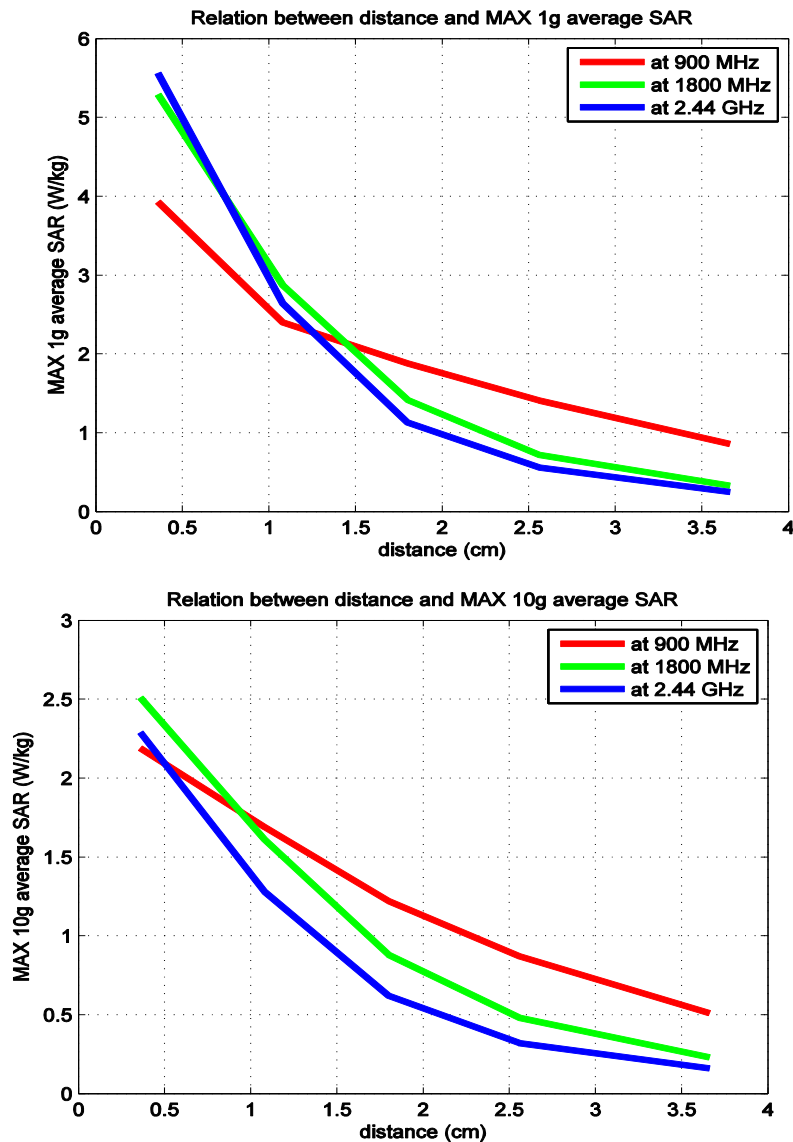


Εικόνα 6.36: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 – κεφαλιού.

6.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

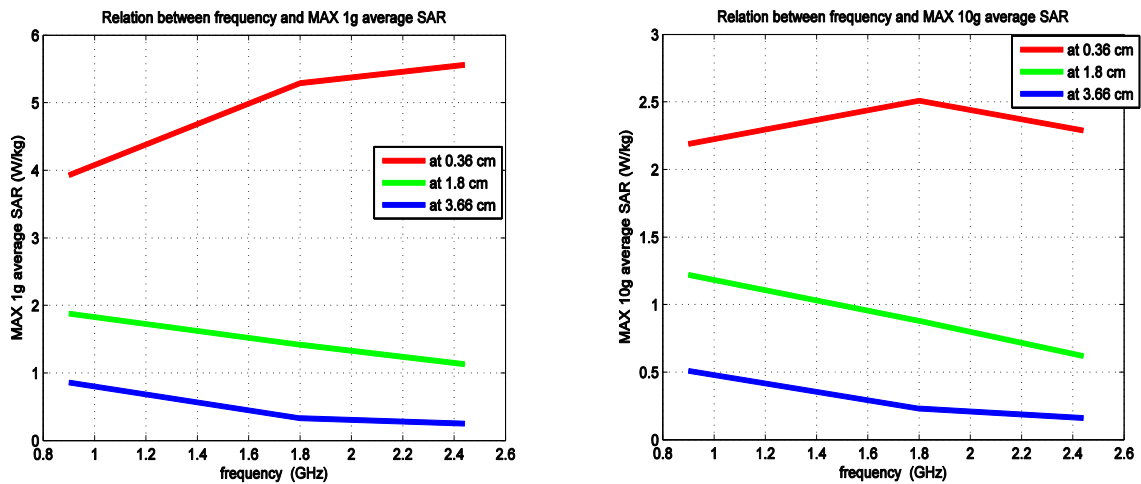
Εκτελέστηκαν συνολικά δεκαπέντε προσομοιώσεις, πέντε προσομοιώσεις σε κάθε συχνότητα, μία προσομοίωση για κάθε μια από τις συνολικά πέντε αποστάσεις. Οι τρεις διαφορετικές συχνότητες ήταν 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz με input scaled power 0.25 W, 1.125 W και 0.1 W αντίστοιχα.





Εικόνα 6.37: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – κεφαλιού σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz.

Από τα παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι τιμές των μετρούμενων ποσοτήτων SAR ελαττώνεται με αύξηση της απόστασης μεταξύ διπολικής κεραίας $\lambda/2$ - κεφαλιού. Στην πρώτη απόσταση που μελετήθηκε, αυτή των 0.36 cm, οι τιμές 1g SAR και 10g SAR υπερβαίνουν τα όρια επιτρεπτής έκθεσης κοινού σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας της διπολικής κεραίας $\lambda/2$. Παρ'όλα αυτά βρίσκονται των ορίων επαγγελματικής έκθεσης. Πιο συγκεκριμένα όταν η κεραία βρίσκεται σε απόσταση 1.8 cm από το ανθρώπινο κεφάλι, στα 900 MHz, η τιμή 1g SAR είναι 1.88 W/kg. Στα 1800 MHz, στην ίδια απόσταση είναι 1.42 W/kg, ενώ στα 2.44 GHz είναι 1.13 W/kg. Μικρές τιμές 1g SAR αλλά και 10g SAR σημειώνονται για κάπως μεγαλύτερη απόσταση κεραίας –κεφαλιού της τάξης των 3.66 cm.

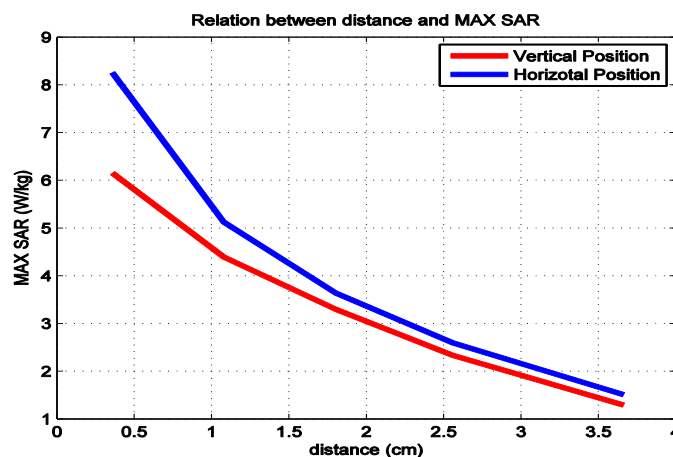


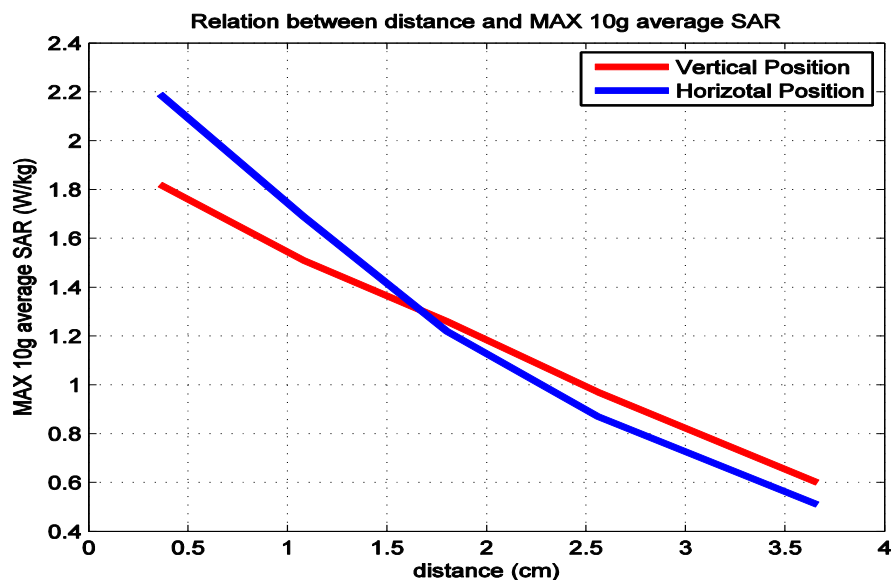
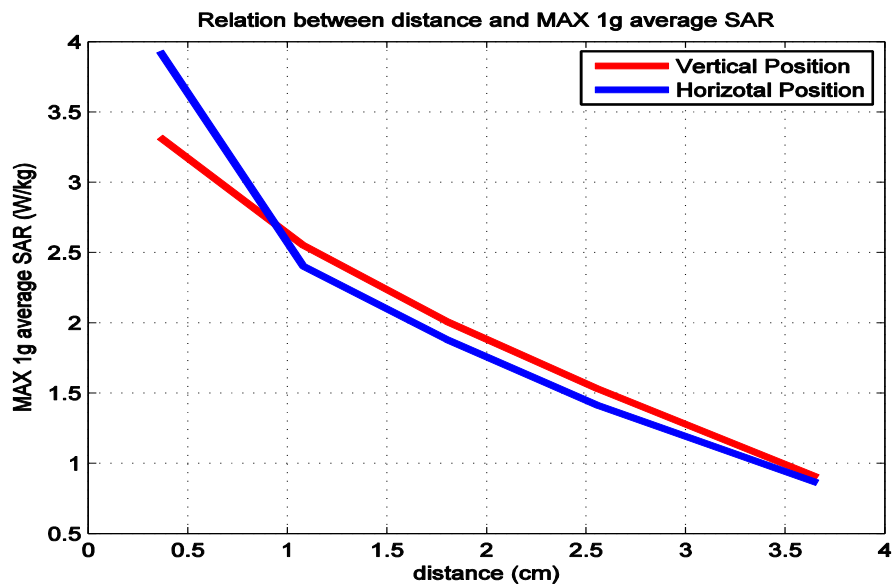
Εικόνα 6.38: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας στις αποστάσεις 0.36 cm, 1.8 cm και 3.66 cm

Από τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται η πτωτική τάση των τιμών του SAR, με την αυξητική μεταβολή της απόστασης. Σε ότι αφορά την μεταβολή του SAR συναρτήσει της συχνότητας δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα, διότι στην απόσταση 0.36 παρατηρείται μια αυξομείωση των τιμών SAR. Εν αντιθέσει με τις αποστάσεις 1.8 cm και 3.66 cm όπου τόσο το 1g SAR όσο και το 10g SAR παρουσιάζουν μείωση με την αύξηση της συχνότητας από τα 900 MHz στα 1800 MHz και μετέπειτα στα 2.44 GHz.

6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης και οριζόντιας θέσης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ δίπλα στο αυτί

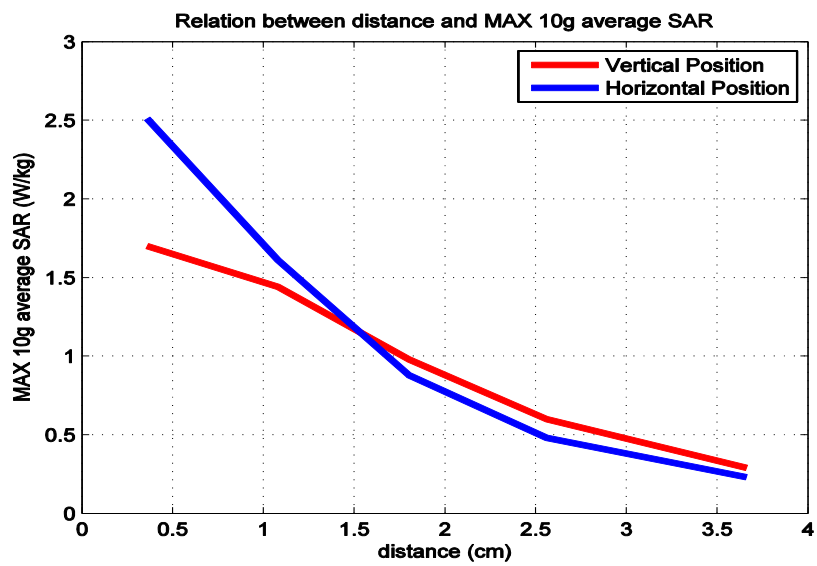
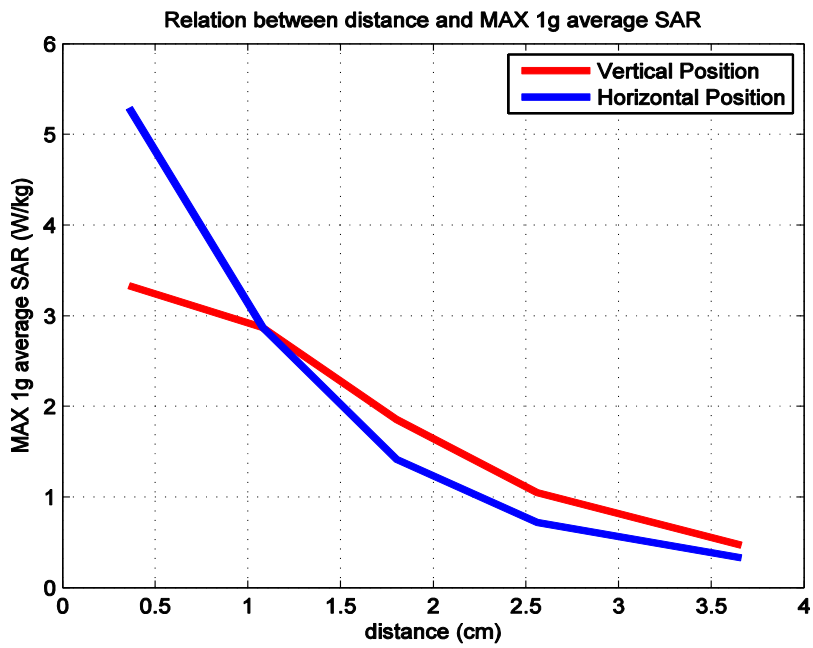
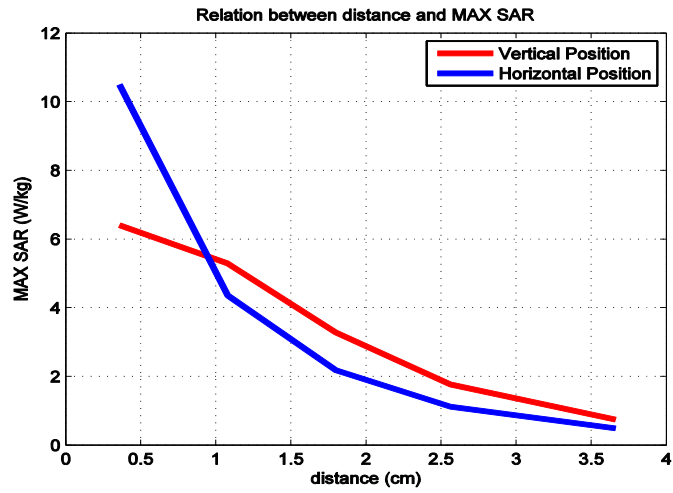
Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις τοποθέτησης της διπολικής κεραίας $\lambda/2$, μία σε κατακόρυφη θέση και μία σε οριζόντια θέση. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε συχνότητες λειτουργίας της κεραίας στα 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.





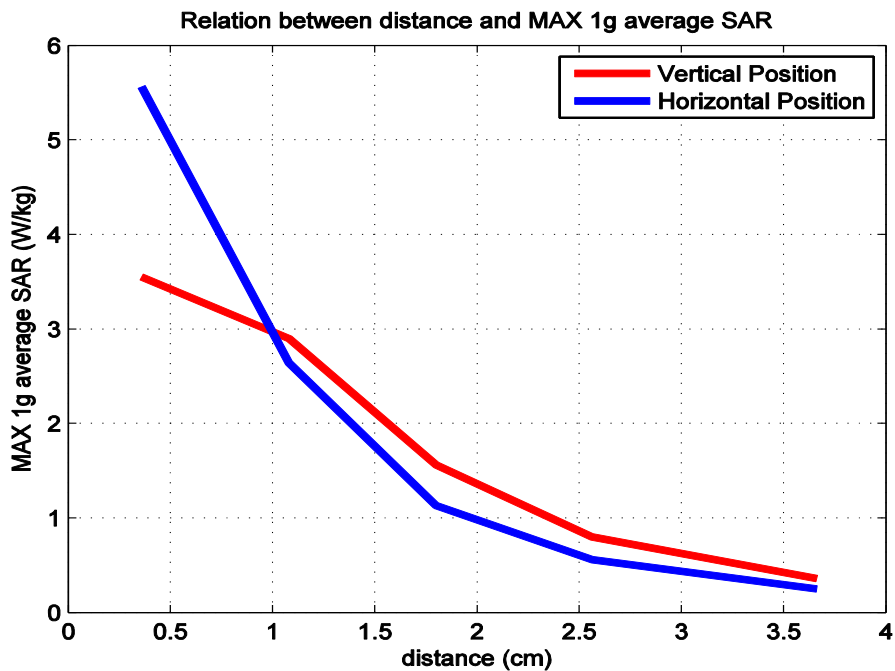
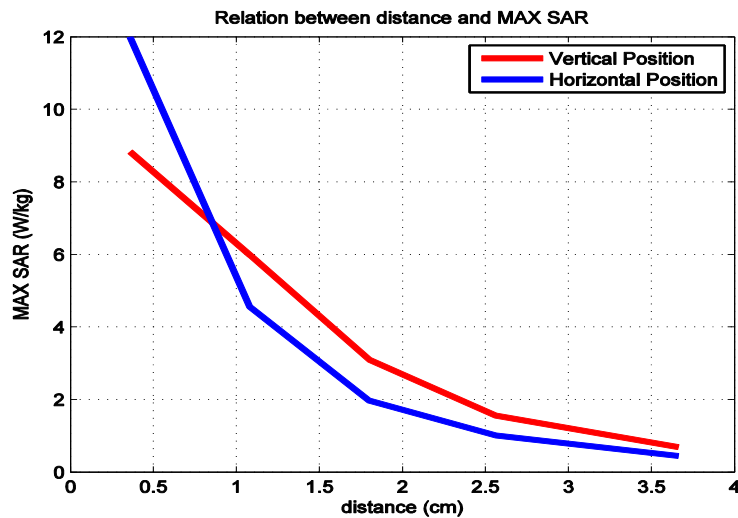
Εικόνα 6.39: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας $\lambda/2$, στα 900 MHz.

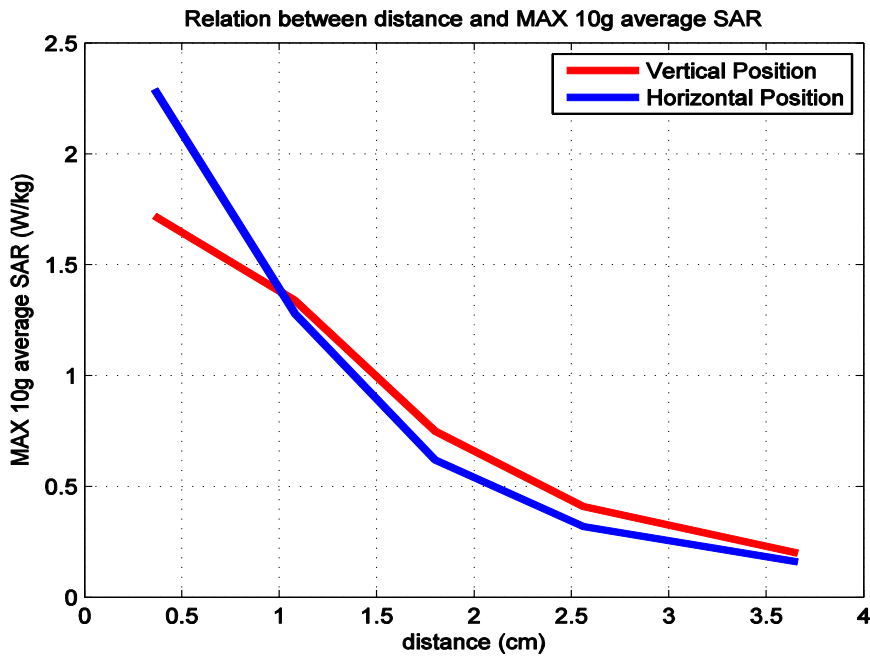
Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα, στα 900 MHz, παρατηρείται ότι για αποστάσεις μεγαλύτερες από 1.08 cm, οι τιμές SAR είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στην περίπτωση κατακόρυφης θέσης της κεραίας δίπλα στο αυτί. Πιο συγκεκριμένα, στις αποστάσεις 1.8 cm, 2.56 cm και 3.66 cm. Αντίθετα για την μικρότερη απόσταση που μελετήθηκε, τα 0.36 cm, οι τιμές SAR είναι εμφανώς μεγαλύτερες στην περίπτωση οριζόντιας θέσης της κεραίας δίπλα στο αυτί.



Εικόνα 6.40: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας λ/2, στα 1800 MHz.

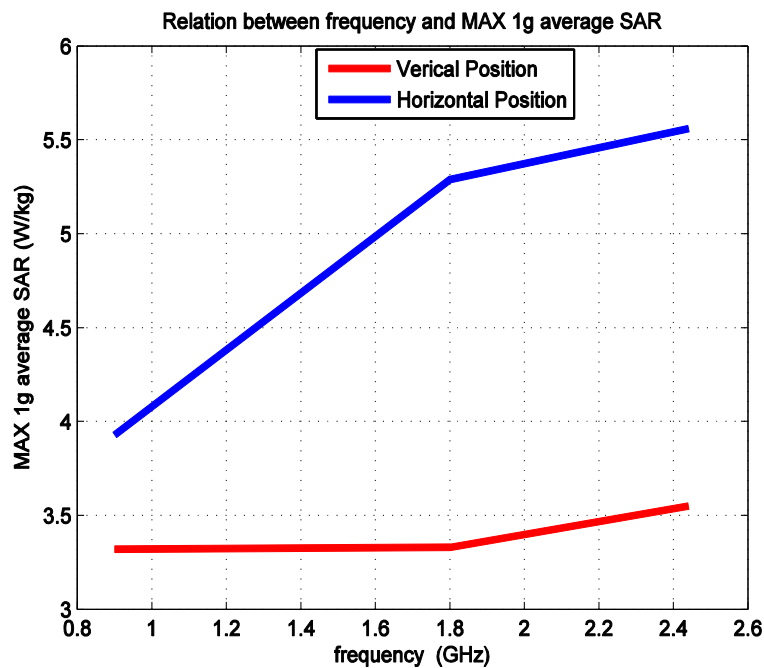
Από τα συγκριτικά διαγράμματα, στα 1800 MHz, παρατηρείται επίσης πως μόνο για την πρώτη απόσταση που μελετήθηκε, αυτή των 0.36 cm οι τιμές SAR είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση οριζόντιας θέσης της κεραίας. Όσο η απόσταση αυξάνεται, οι τιμές SAR για την περίπτωση της κατακόρυφης θέσης της κεραίας είναι ελαφρώς μεγαλύτερες.



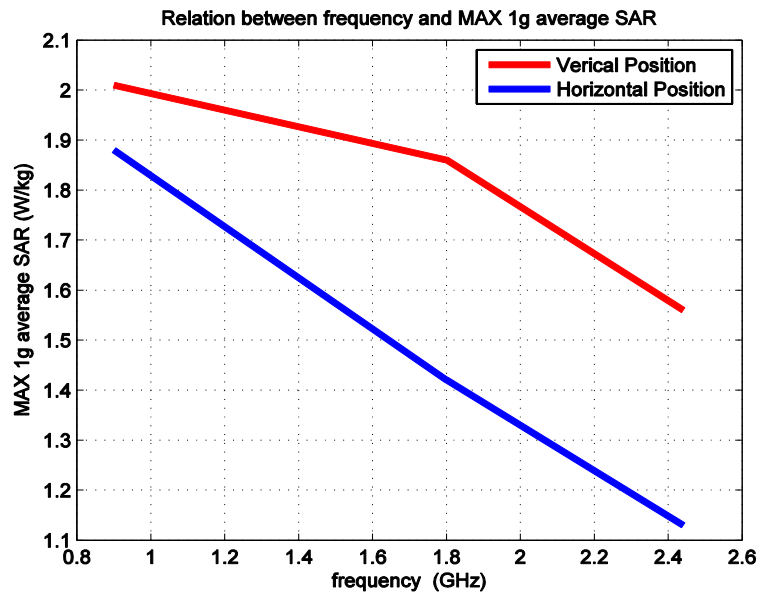


Εικόνα 6.41: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας $\lambda/2$, στα 2.44 GHz.

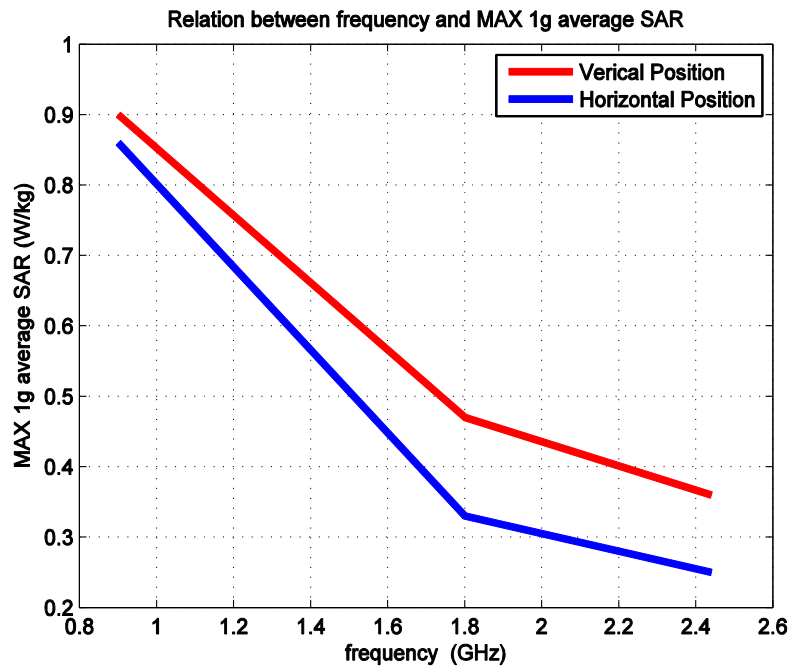
Από τα συγκριτικά διαγράμματα, στα 2.44 GHz, παρατηρείται επίσης πως μετά την απόσταση των 1.08 cm, οι τιμές SAR είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση κατακόρυφης θέσης της κεραίας. Στην πρώτη απόσταση που μελετήθηκε, των 0.36 cm, οι τιμές SAR είναι αισθητά μεγαλύτερες στην περίπτωση οριζόντιας θέσης της κεραίας.



Εικόνα 6.42: MAX 1g SAR συναρτήσει συχνότητας με απόσταση 0.36 cm



Εικόνα 6.43: MAX 1g SAR συναρτήσει συχνότητας με απόσταση 1.8 cm



Εικόνα 6.44: MAX 1g SAR συναρτήσει συχνότητας με απόσταση 3.66 cm

6.5 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι

Γενική περιγραφή προβλήματος

Σε αυτή την περίπτωση η οποία μελετήθηκε, το πρόβλημα αποτελείται από ένα αντομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και μια διπολική κεραία $\lambda/2$, η οποία

τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μάτι. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται σε τρεις διαφορετικές συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Στόχος είναι η μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) καθώς και το πως η τροποποίηση της παραμέτρου της απόστασης μεταξύ ματιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$, επιδρά σε αυτόν.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η διπολική κεραία κατασκευάζεται με βάση την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της, καθώς το μήκος της έχει άμεση εξάρτηση απ' αυτήν. Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού στο επίπεδο YZ, κατασκευάζεται η διπολική κεραία για καθεμία από τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις (slice: 66). Η κεραία σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του εργαλείου wire.

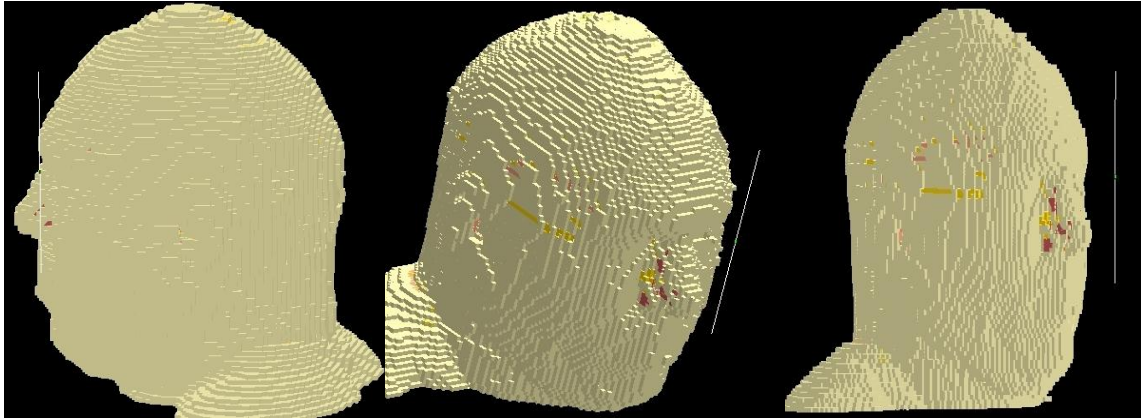
6.5.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 900 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Σε αυτή την περίπτωση του προβλήματος που μελετήθηκε η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κινητή τηλεφωνία). Επομένως, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 900 MHz είναι 0.25 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 2.5e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο μάτι θα περιλαμβάνει συνολικά 46 κελιά. Αναλυτικότερα, 23 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 23 κελιά.



(α)

(β)

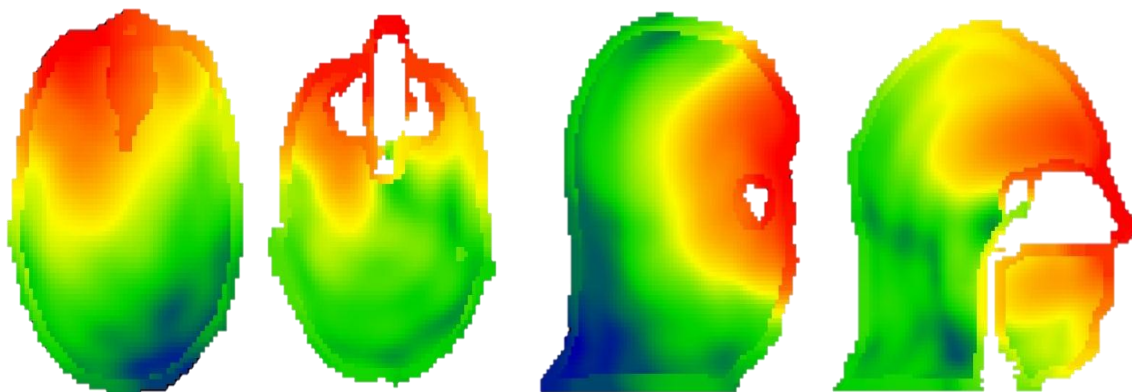
(γ)

Εικόνα 6.45: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 2.56 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	8.02	3.35	1.78
1.08	4.05	2.38	1.36
1.8	2.70	1.63	0.98
2.56	2.22	1.19	0.774
3.66	2	1.13	0.767



-70.0 (dB)

0.0 (dB)

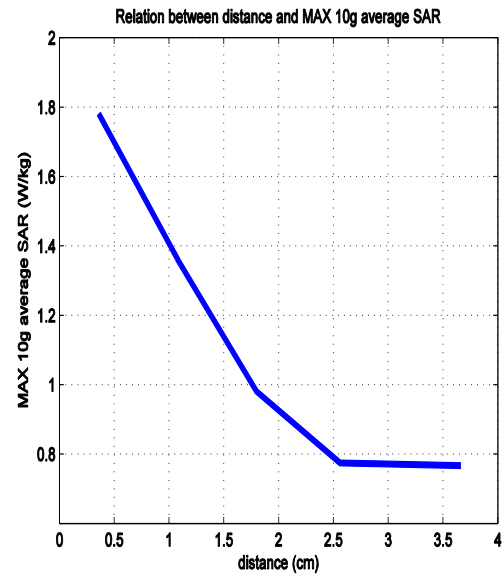
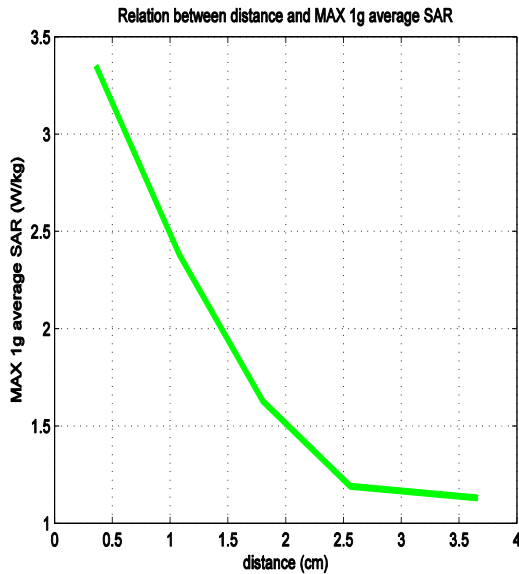
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.46: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)



Εικόνα 6.47: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – ματιού.

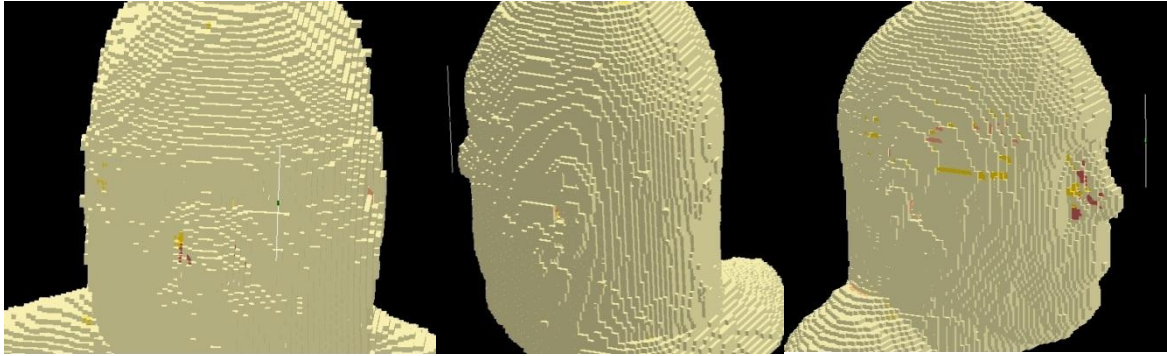
6.5.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 1800 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 1800 MHz (κινητή τηλεφωνία). Συνεπώς ο σχεδιασμός της κεραίας πραγματοποιείται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 1800 MHz είναι 0.125 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W): 1.25e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία τοποθετείται δίπλα στο μάτι θα αποτελείται συνολικά από 23 κελιά. Πιο συγκεκριμένα, 11 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 11 κελιά.



(α)

(β)

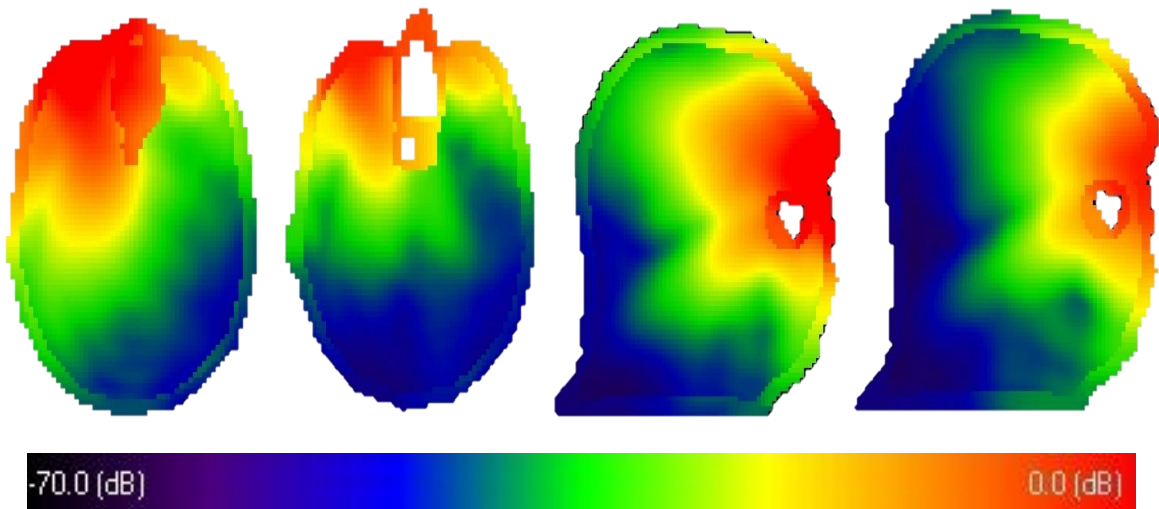
(γ)

Εικόνα 6.48: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	6.68	3.91	1.96
1.08	3.38	2.28	1.24
1.8	1.66	1.28	0.74
2.56	1.02	0.71	0.43
3.66	0.57	0.35	0.23



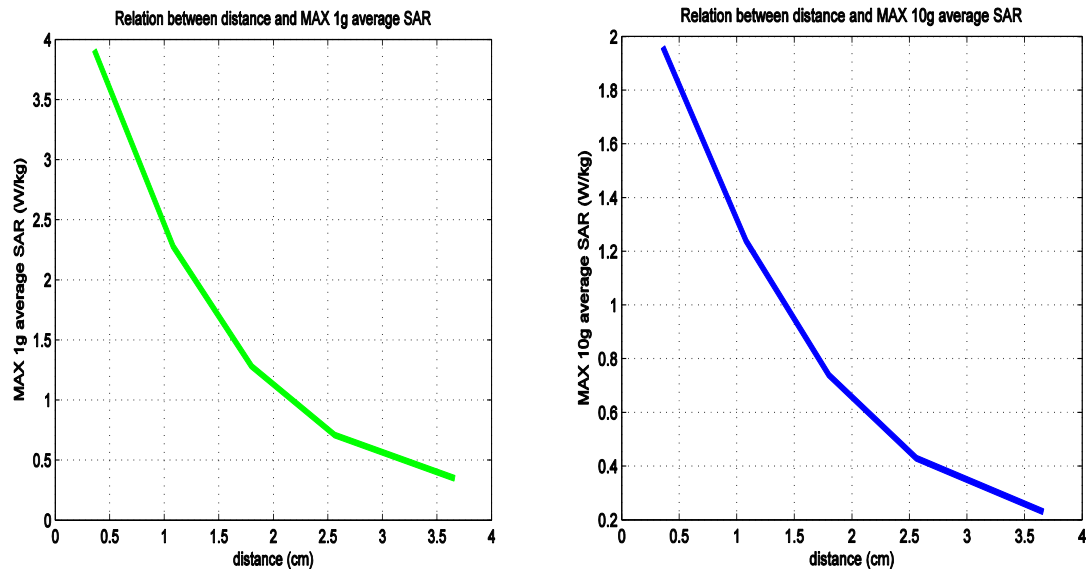
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.49: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 2.56 cm (β και δ)



Εικόνα 6.50: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – ματιού.

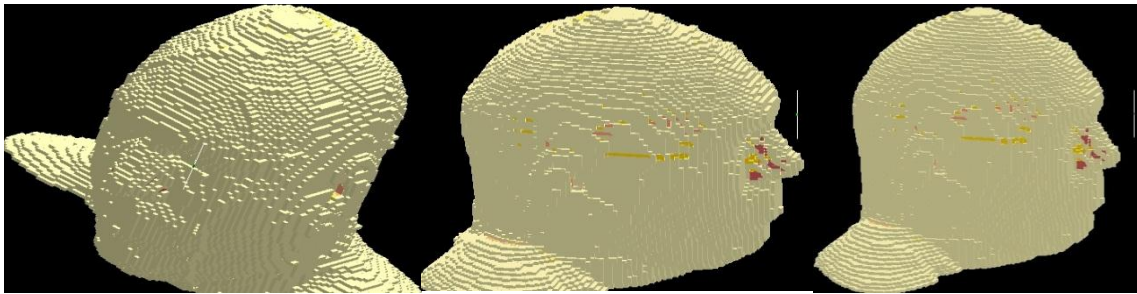
6.5.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 2.44 GHz (ασύρματα δίκτυα). Η κεραία σχεδιάζεται σύμφωνα με αυτή την συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 2.44 GHz είναι 0.1 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 1e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού(ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία τοποθετήθηκε δίπλα στο μάτι και περιλαμβάνει συνολικά 17 κελιά. Αναλυτικότερα, 8 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 8 κελιά.



(α)

(β)

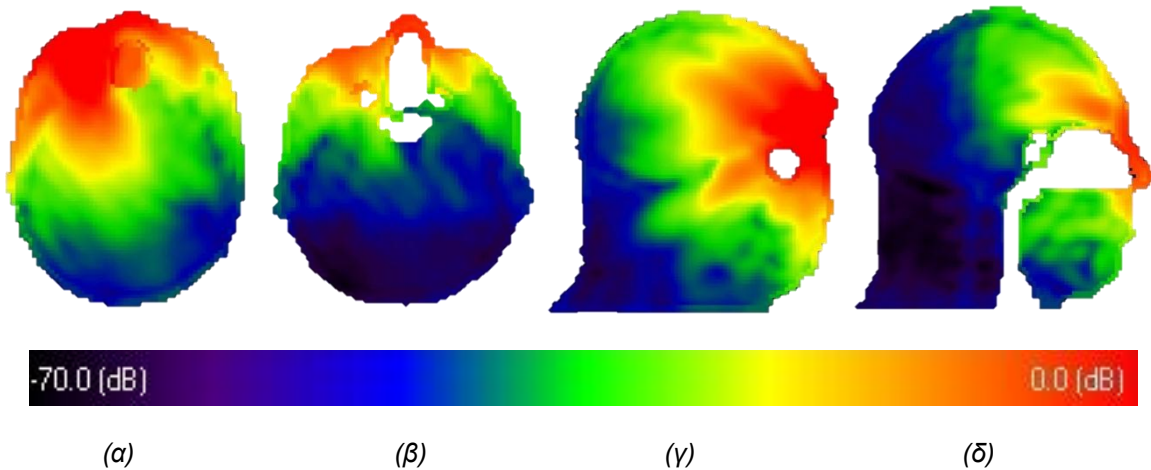
(γ)

Εικόνα 6.51: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία λ/2 σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.9 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	7.196	4.19	1.89
1.08	3.23	2.1	1.02
1.8	1.44	0.98	0.51
2.56	0.72	0.51	0.28
3.66	0.61	0.29	0.18



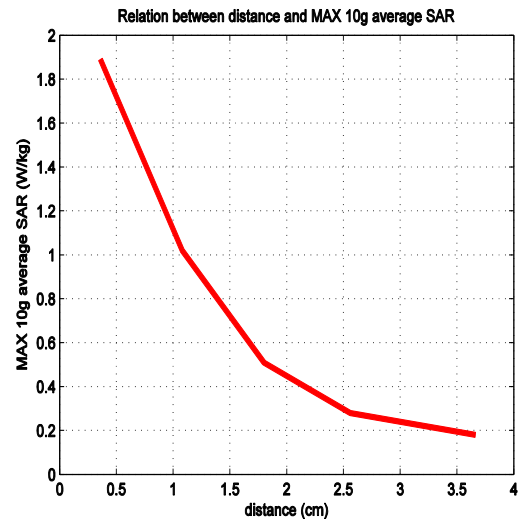
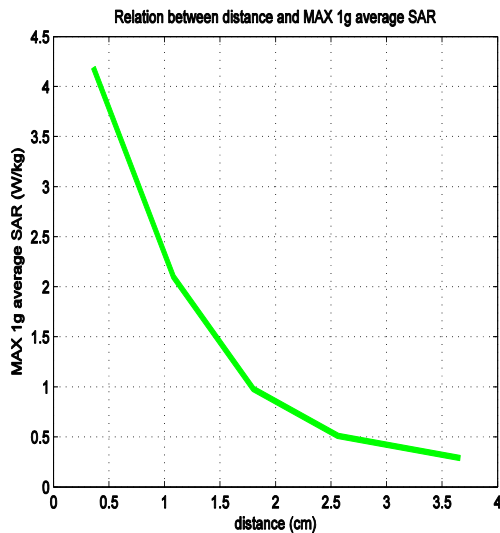
(α)

(β)

(γ)

(δ)

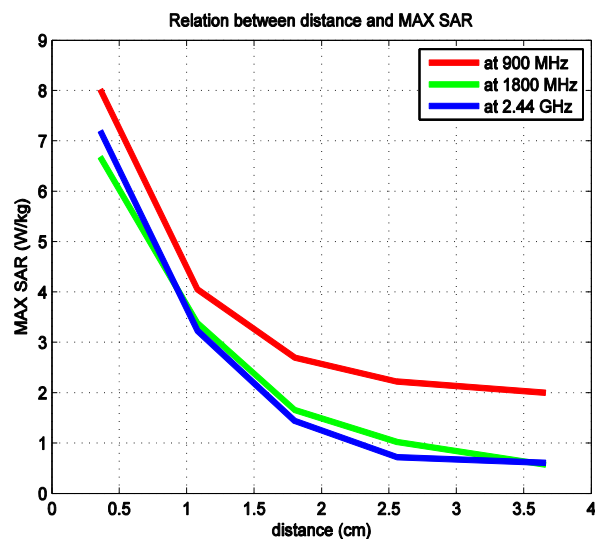
Εικόνα 6.52: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

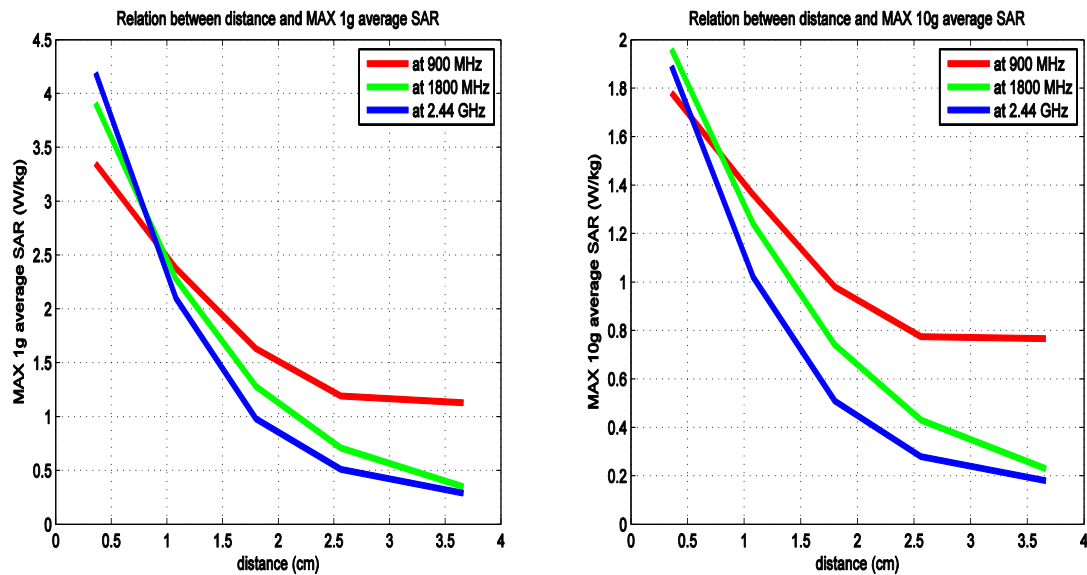


Εικόνα 6.53: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ -ματιού.

6.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

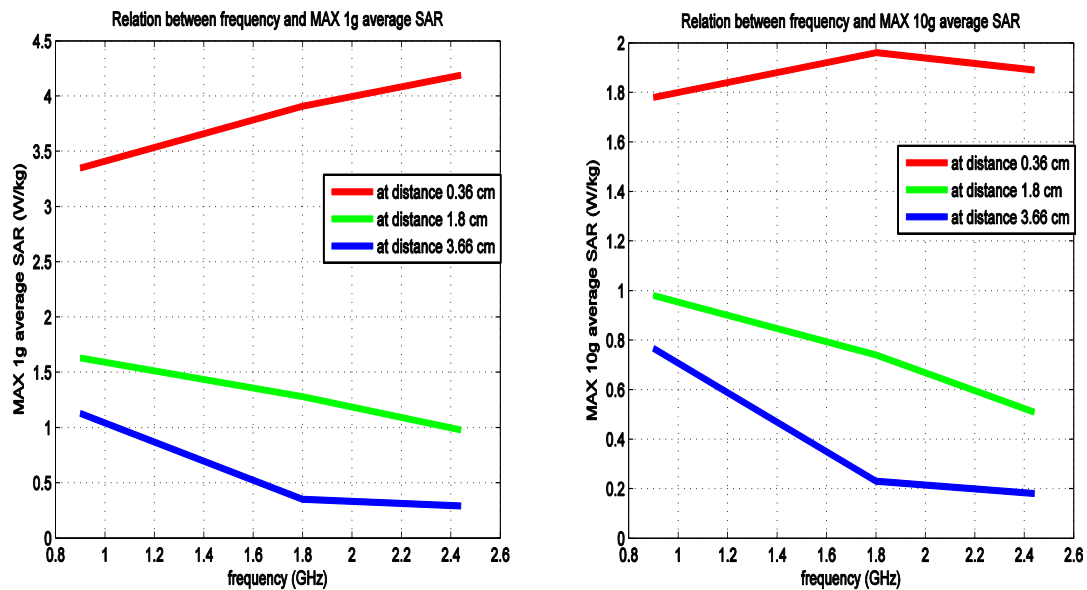
Εκτελέστηκαν συνολικά δεκαπέντε προσομοιώσεις, πέντε προσομοιώσεις σε κάθε συχνότητα, μία προσομοίωση για κάθε μια από τις συνολικά πέντε αποστάσεις. Οι τρεις διαφορετικές συχνότητες ήταν 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz με input scaled power 0.25 W, 0.125 W και 0.1 W αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.





Εικόνα 6.54: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – ματιού σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz.

Εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ από το μάτι του μοντέλου του ανθρώπινου κεφαλιού. Παρατηρήθηκε ότι με σταδιακή αύξηση της απόστασης μεταξύ της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – ματιού, σημειώνεται μείωση των τιμών SAR, τόσο των τοπικών (SAR_{local}) όσο και των 1g SAR και 10g SAR. Επιπλέον, από τα διάγραμμα που προέκυψαν φαίνεται ότι για την πρώτη απόσταση που μελετήθηκε (0.36 cm), στα 900 MHz έχουμε ελαφρώς μικρότερες τιμές SAR 1g και SAR 10g, απ' ότι στα 1800 MHz και 2.44 GHz. Αντιθέτως, καθώς η απόσταση αυξάνεται, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές 1g και 10g SAR είναι υψηλότερες στα 900 MHz συγκριτικά με τα 1800 MHz και 2.44 GHz. Διαπιστώθηκε επίσης ότι μετά την πρώτη απόσταση των 0.36 cm η οποία υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια έκθεσης της ICNIRP, οι υπόλοιπες αποστάσεις που μελετήθηκαν βρίσκονται εντός των ορίων. Ενδεικτικά παρατίθεται ότι με απόσταση κεραίας-ματιού στα 1.8 cm, στα 900 MHz η τιμή 1g SAR είναι 1.63 W/kg. Στα 1800 MHz είναι 1.28 W/kg ενώ στα 2.44 GHz είναι 0.98 W/kg. Επίσης, η τιμή 10g SAR στην απόσταση 1.08 cm στα 900 MHz είναι 1.36 W/kg, 1800 MHz είναι 1.24 W/kg ενώ στα 2.44 GHz είναι 1.02 W/kg.



Εικόνα 6.55: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ σε αποστάσεις 0.36 cm, 1.8 cm και 3.66 cm.

6.6 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο μάτι

Γενική περιγραφή προβλήματος

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από ένα αντομικό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και μια διπολική κεραία $\lambda/2$, η οποία τοποθετείται σε οριζόντια θέση, σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μάτι. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται σε τρεις διαφορετικές συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Στόχος είναι η μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) καθώς και το πως η μεταβολή της παραμέτρου της απόστασης μεταξύ ματιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$, τον επηρεάζει.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η διπολική κεραία κατασκευάζεται με βάση την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της, καθώς το μήκος της έχει άμεση εξάρτηση απ' αυτήν. Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού στο επίπεδο XY, κατασκευάζεται η διπολική κεραία για καθεμία από τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις (slice: 73). Η κεραία σχεδιασθήκε με τη βοήθεια του εργαλείου wire.

6.6.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε οριζόντια θέση και δίπλα στο μάτι στα 900 MHz

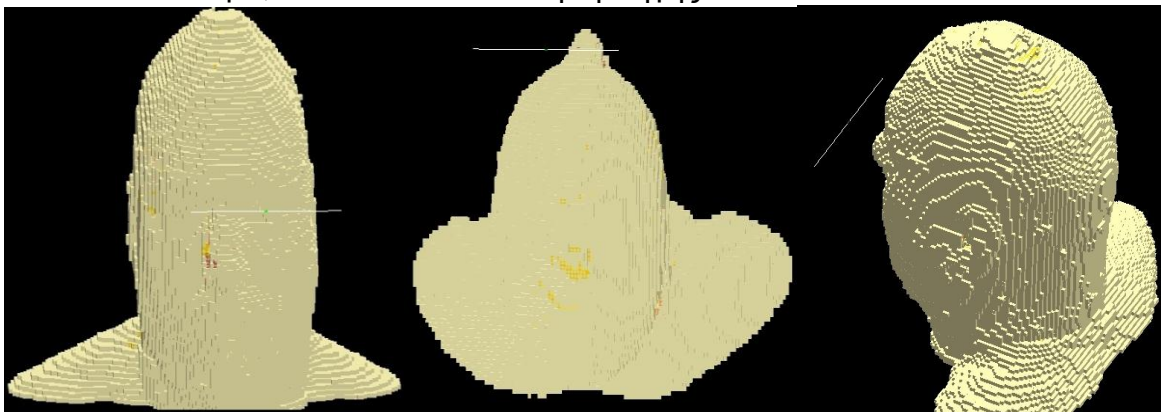
Περιγραφή προβλήματος

Σε αυτή την περίπτωση του προβλήματος που μελετήθηκε η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κινητή τηλεφωνία). Επομένως, ο σχεδιασμός

της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 900 MHz είναι 0.25 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 2.5e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις 162 × 126 × 128 mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας έγινε στο επίπεδο XY, slice 73. Η διπολική κεραία λ/2 η οποία επιθυμούμε να τοποθετήσουμε δίπλα στο μάτι θα περιλαμβάνει συνολικά 46 κελιά. Αναλυτικότερα, 23 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 23 κελιά.



(α)

(β)

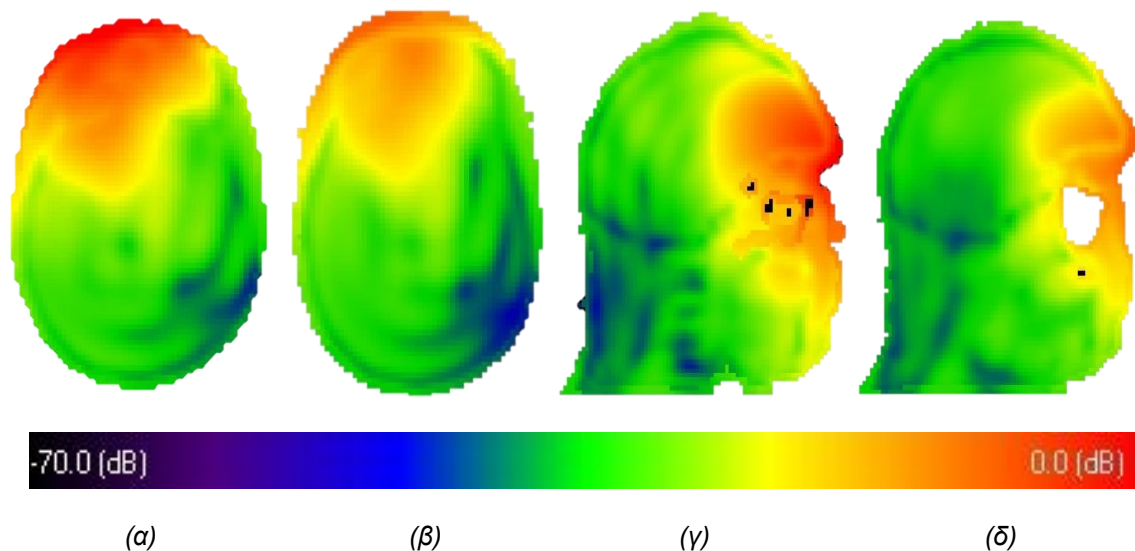
(γ)

Εικόνα 6.56: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία λ/2 σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.08 cm και (γ) 2.56 cm από το μάτι του μοντέλου

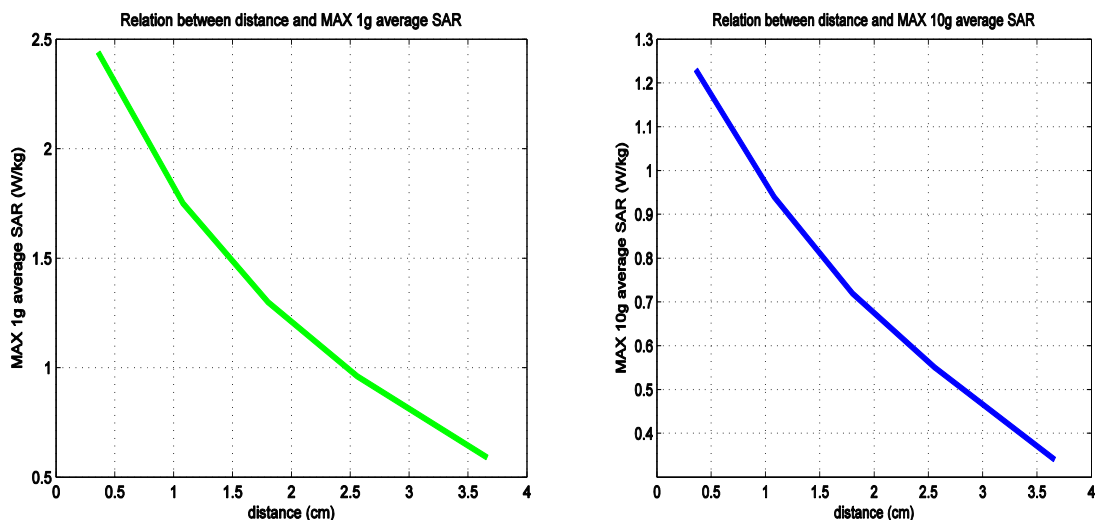
Αποτελέσματα

Πίνακας 6.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	4.94	2.44	1.23
1.08	3.13	1.75	0.94
1.8	2.21	1.3	0.72
2.56	1.65	0.96	0.55
3.66	1.03	0.59	0.34



Εικόνα 6.57: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)



Εικόνα 6.58: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 –ματιού.

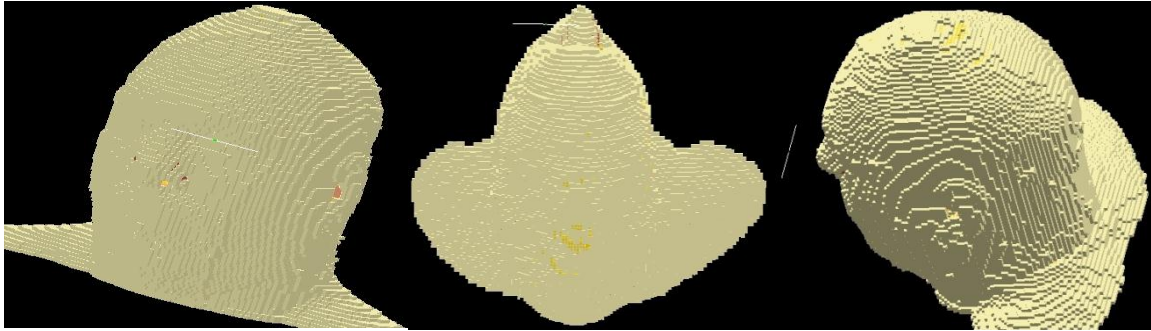
6.6.2 Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 1800 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία λ/2 λειτουργεί στη συχνότητα των 1800 MHz (κινητή τηλεφωνία). Συνεπώς η κεραία σχεδιάζεται με βάση αυτή τη συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 1800 MHz είναι 0.125 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W): 1.25e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $162 \times 126 \times 128$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία τοποθετείται δίπλα στο μάτι θα αποτελείται συνολικά από 23 κελιά. Πιο συγκεκριμένα, 11 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 11 κελιά.



(α)

(β)

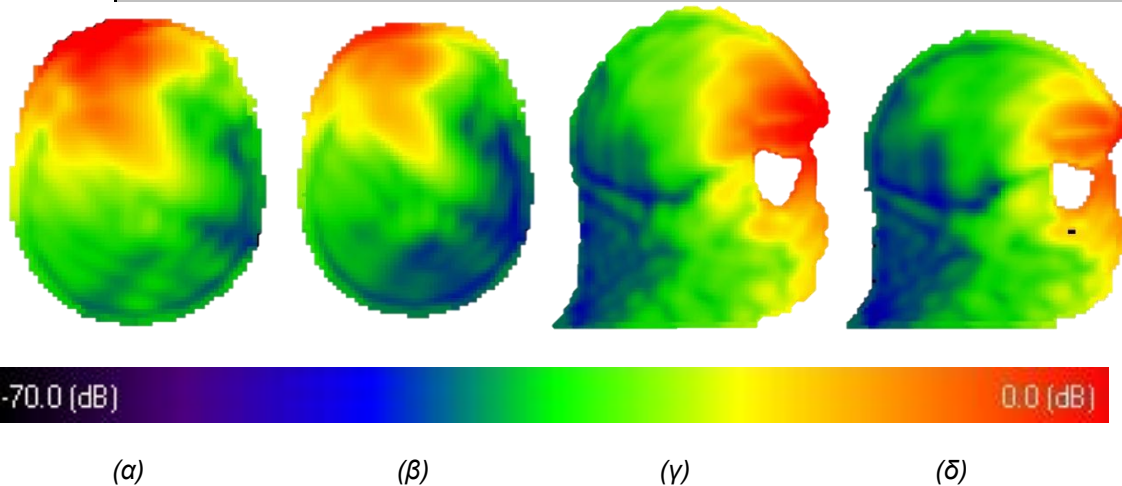
(γ)

Εικόνα 6.59: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	4.42	2.59	1.25
1.08	2.43	1.58	0.75
1.8	1.42	0.92	0.45
2.56	0.86	0.56	0.28
3.66	0.44	0.28	0.14



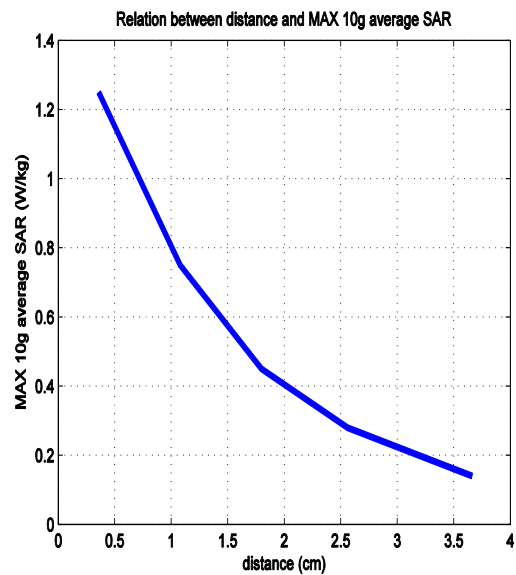
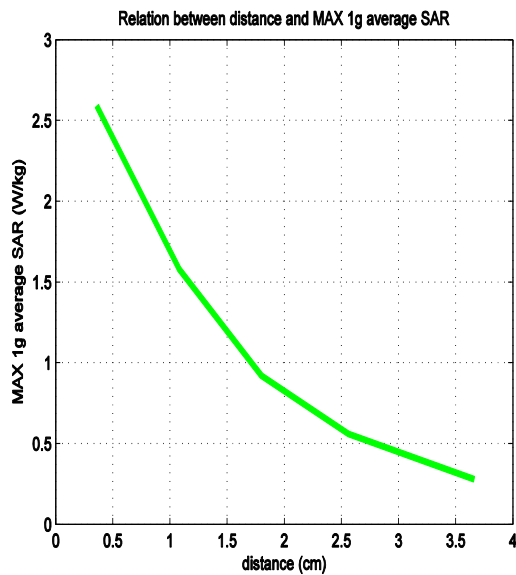
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.60: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)



Εικόνα 6.61: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 –ματιού.

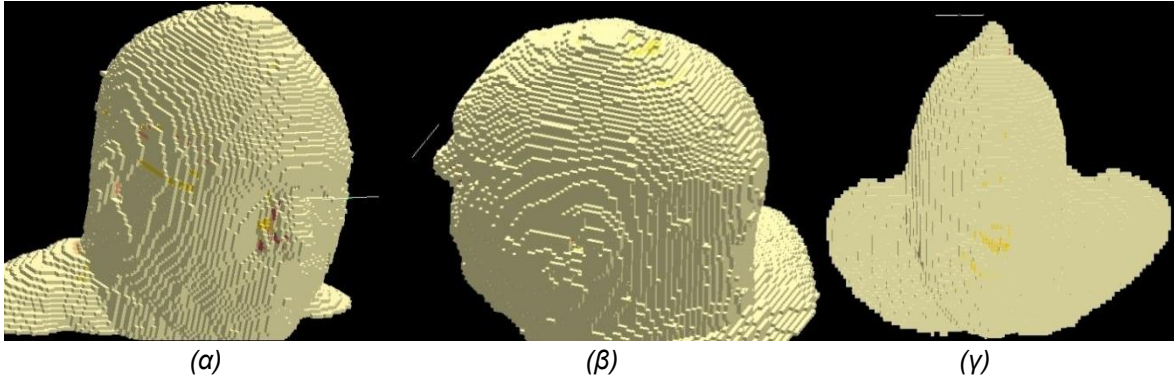
6.6.3 Διπολική κεραία λ/2 σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία λ/2 λειτουργεί στη συχνότητα των 2.44 GHz (ασύρματα δίκτυα). Η κεραία σχεδιάζεται σύμφωνα με αυτή την συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι: 0.36 cm, 1.08 cm, 1.8 cm, 2.56 cm και τέλος 3.66 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 2.44 GHz είναι 0.1 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 1e-001.

Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις 162 × 126 × 128 mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού(ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 3,66 mm ή 0.366 cm. Η διπολική κεραία λ/2 η οποία τοποθετήθηκε δίπλα στο μάτι και περιλαμβάνει συνολικά 17 κελιά. Αναλυτικότερα, 8 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 8 κελιά.

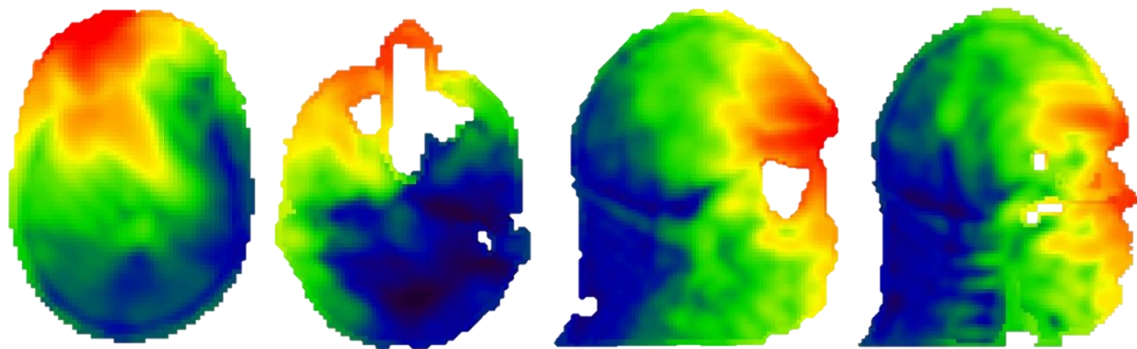


Εικόνα 6.62: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.36 cm (β) 1.8 cm και (γ) 3.66 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

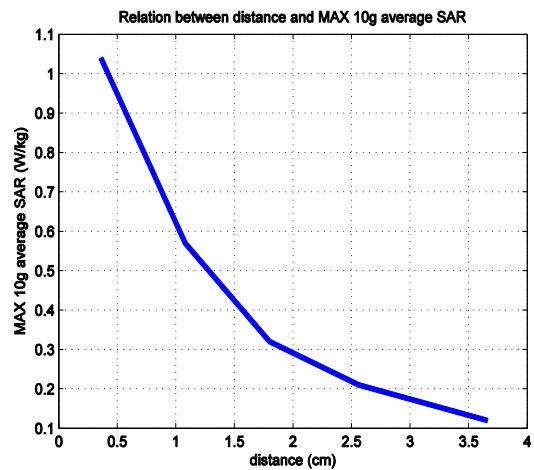
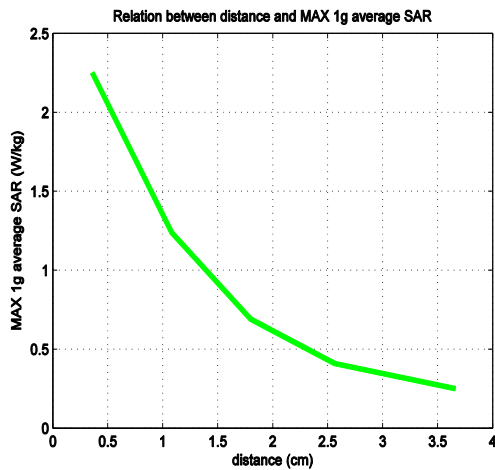
Πίνακας 6.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g Average SAR (W/kg)	MAX 10g Average SAR (W/kg)
0.36	3.8	2.25	1.04
1.08	1.86	1.24	0.57
1.8	1.04	0.69	0.32
2.56	0.66	0.41	0.21
3.66	0.58	0.25	0.12



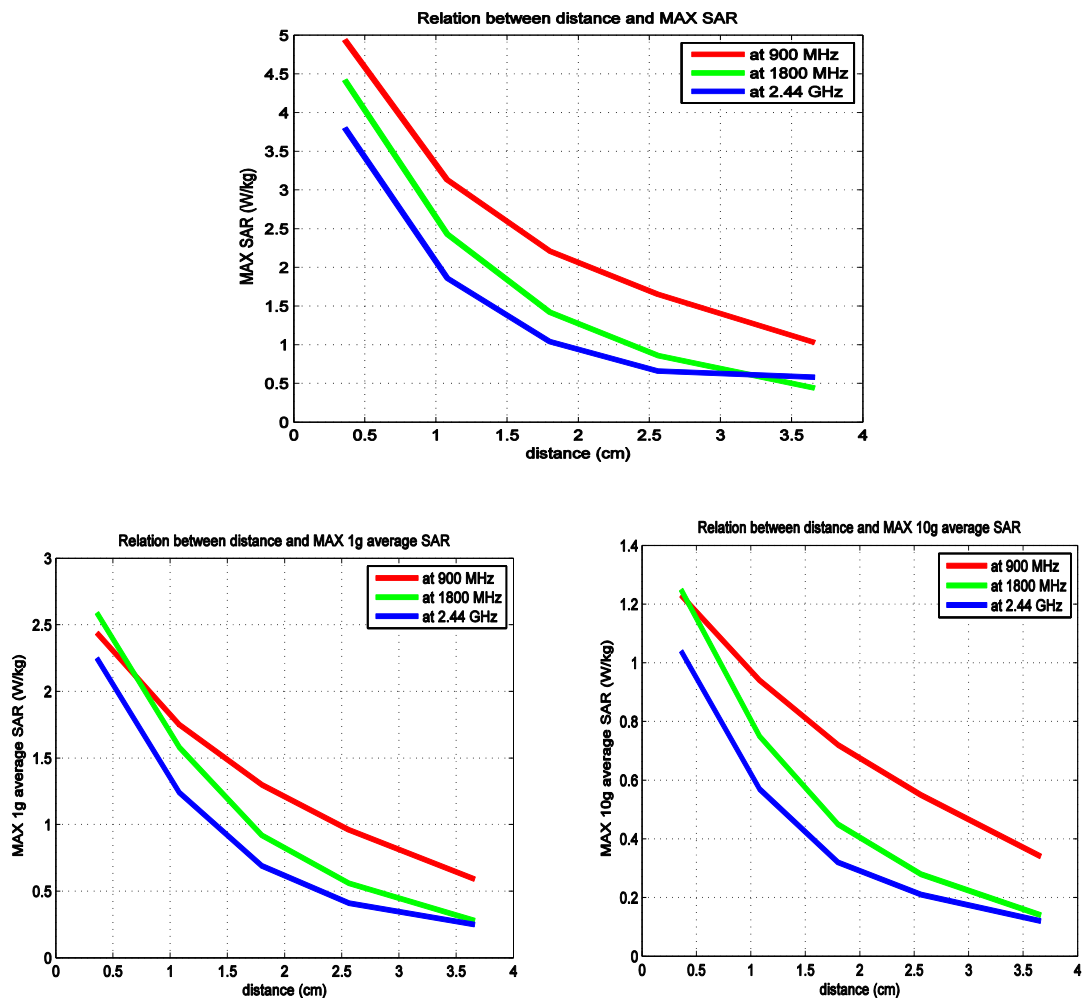
(α) (β) (γ) (δ)

Εικόνα 6.63: Επίπεδα XY (α και β) και YZ (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για απόσταση 0.36 cm (α και γ) και για απόσταση 3.66 cm (β και δ)

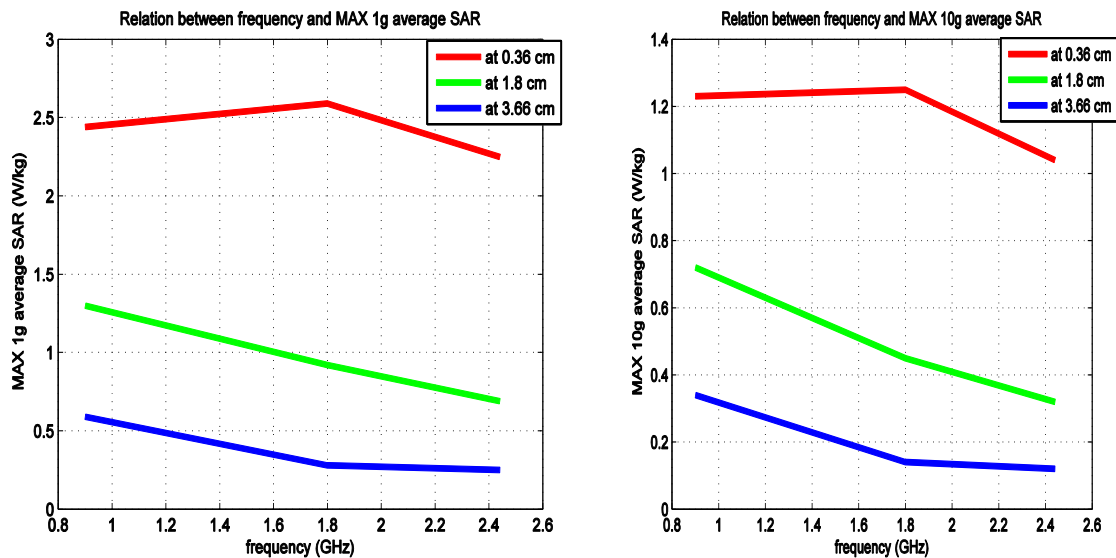


Εικόνα 6.64: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ –ματιού.

6.6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων



Εικόνα 6.65: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ –ματιού σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz.

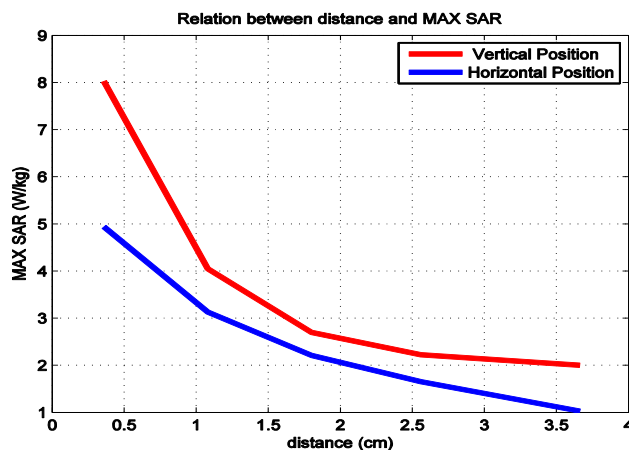


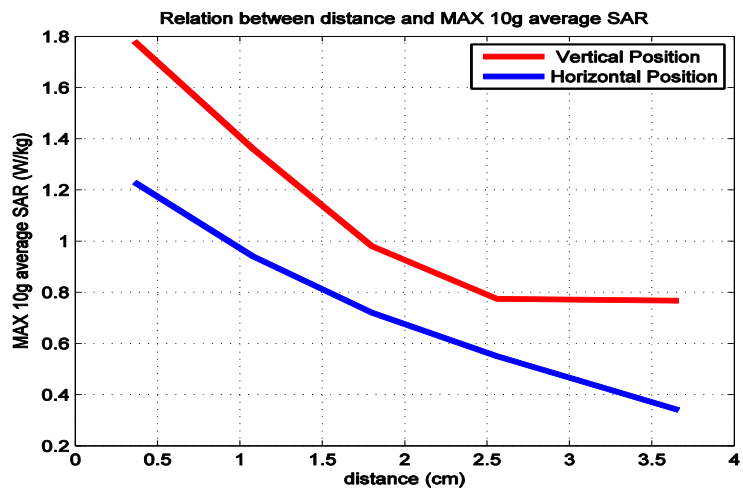
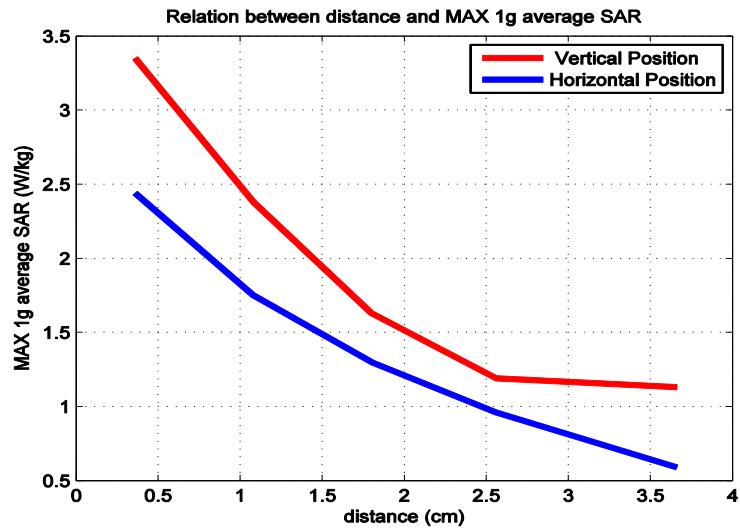
Εικόνα 6.66: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ σε αποστάσεις 0.36 cm, 1.8 cm και 3.66 cm.

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι στα 900 MHz τόσο οι τοπικές τιμές SAR όσο και οι 1g και 10g SAR είναι λίγο μεγαλύτερες απ' ό τι στα 1800 MHz και 2.44 GHz. Με εξαίρεση την απόσταση των 0.36 cm, οι υπόλοιπες αποστάσεις βρίσκονται εντός των ορίων ασφαλούς έκθεσης που ορίζει η ICNIRP.

6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατακόρυφης και οριζόντιας θέσης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ δίπλα στο μάτι

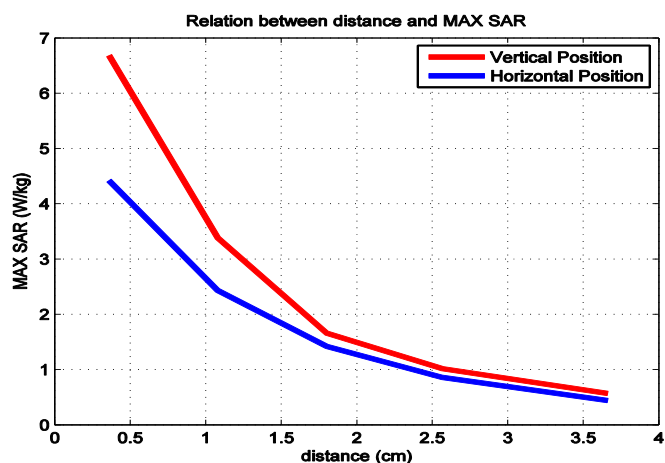
Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις τοποθέτησης της διπολικής κεραίας $\lambda/2$, μία σε κατακόρυφη θέση και μια σε οριζόντια θέση δίπλα στο μάτι. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε συχνότητες λειτουργίας της κεραίας στα 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz. Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

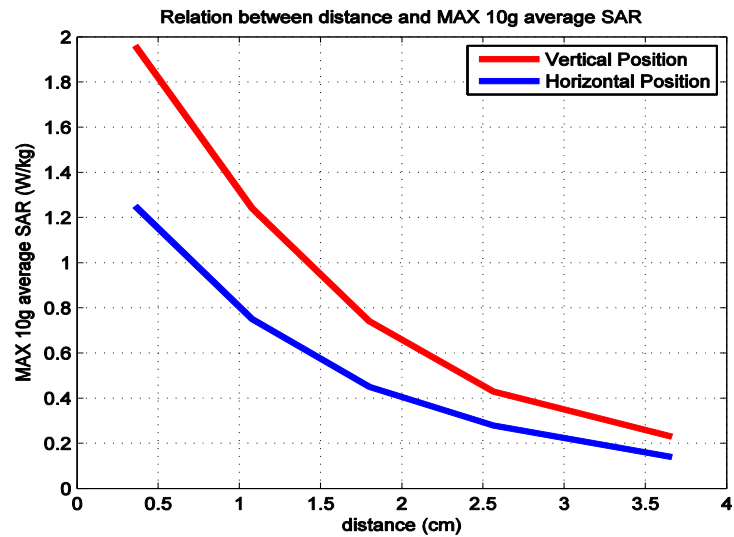
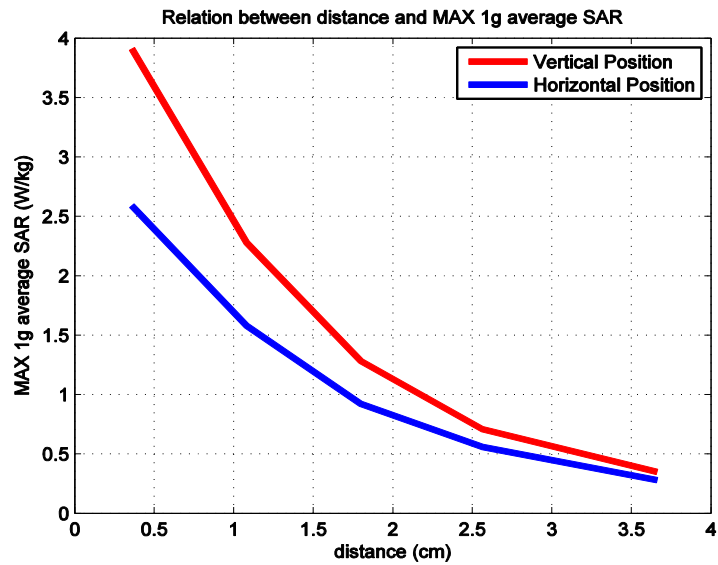




Εικόνα 6.67: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας $\lambda/2$, στα 900 MHz.

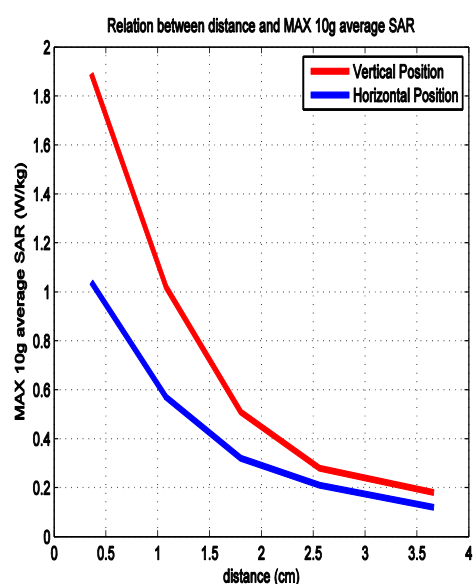
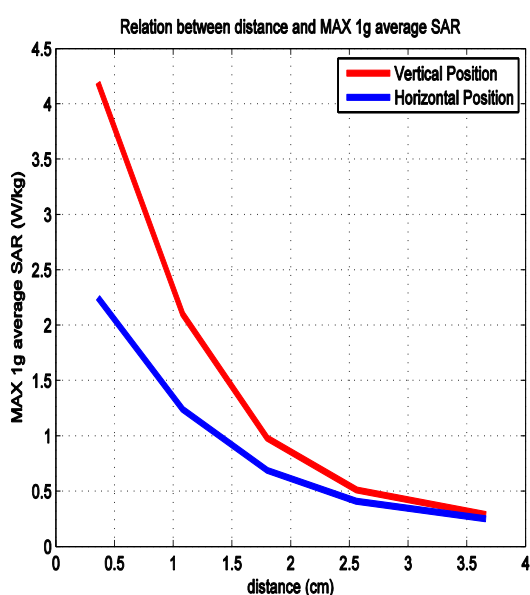
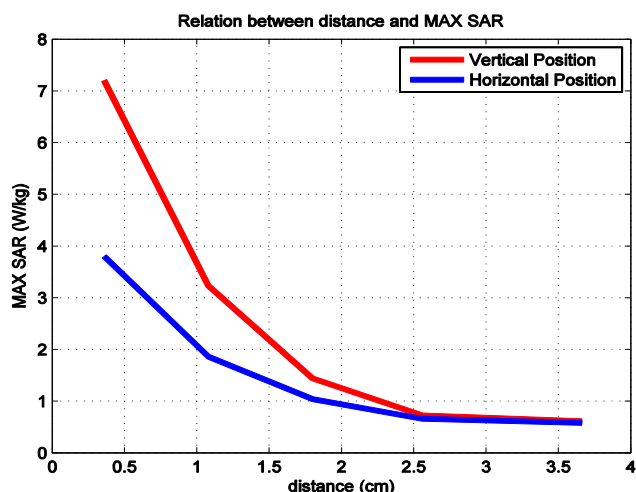
Στα 900 MHz, παρατηρήθηκε ότι για την περίπτωση κατακόρυφης θέσης της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ τόσο οι τοπικές τιμές SAR όσο και οι τιμές 1g, 10g είναι εμφανώς μεγαλύτερες συγκριτικά με την οριζόντια θέση της κεραίας. Πιο συγκεκριμένα οι μέσες τιμές 1g και 10g είναι μεγαλύτερες από 66% έως περίπου 72%.





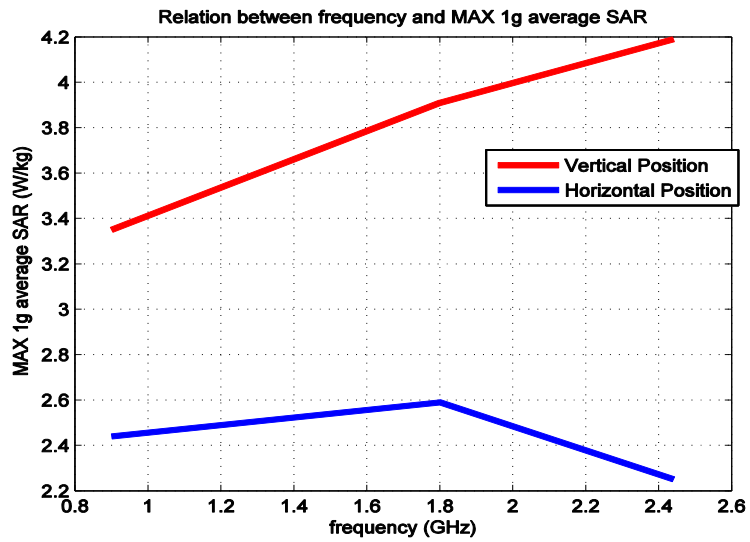
Εικόνα 6.68: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας $\lambda/2$, στα 1800 MHz.

Στα 1800 MHz, επίσης παρατηρείται ότι οι μετρούμενες ποσότητες SAR (SAR_{local} , 1g SAR και 10g SAR) είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση όπου η κεραία είναι τοποθετημένη σε κατακόρυφη θέση. Οι τιμές σε ορισμένα σημεία σημειώνονται μεγαλύτερες έως και περίπου 65%.

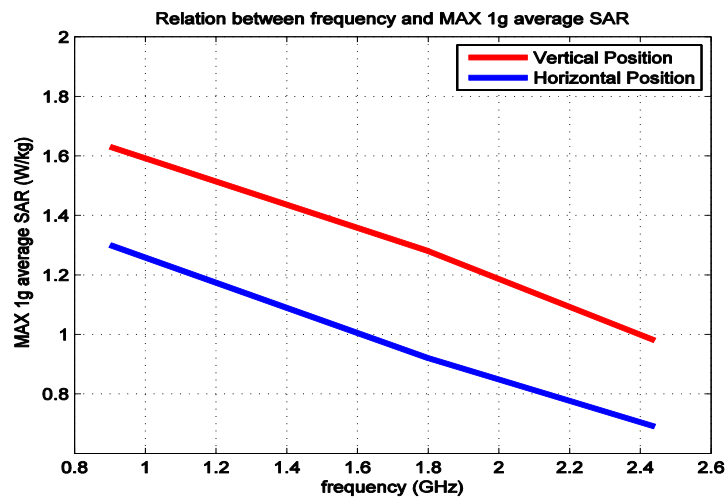


Εικόνα 6.69: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης για κατακόρυφη και οριζόντια θέση διπολικής κεραίας $\lambda/2$, στα 2.44 GHz.

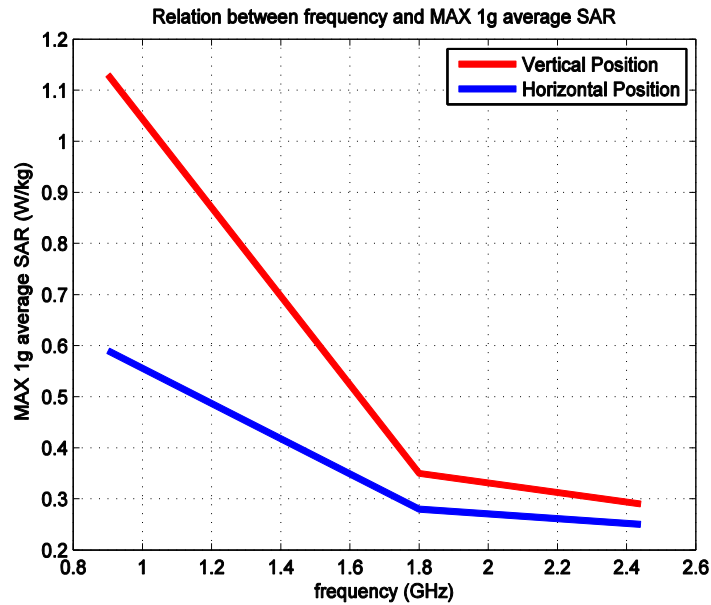
Στα 2.44 GHz, παρατηρείται ότι οι τιμές SAR για την περίπτωση τοποθέτησης κεραίας σε κατακόρυφη θέση είναι αρκετά υψηλότερες για τις μικρές αποστάσεις (0.36 cm, 1.08 cm). Όσο η απόσταση αυξάνεται, η διαφορά των τιμών SAR για κατακόρυφη και οριζόντια θέση κεραίας μειώνεται. Συγκεκριμένα, η τιμή 1g SAR σε απόσταση 0.36 cm για κατακόρυφη θέση κεραίας είναι 1.89 W/kg ενώ για οριζόντια θέση κεραίας παρατηρείται μικρότερη στα 1.04 W/kg. Στη συνέχεια για την μεγαλύτερη απόσταση που μελετήθηκε (3.66 cm) η διαφορά στην τιμή 1g SAR έγκειται στο 0.04. Πιο συγκεκριμένα, 1g SAR στην κατακόρυφη θέση είναι 0.29 W/kg ενώ το 1g SAR στην οριζόντια θέση είναι 0.25 W/kg).



Εικόνα 6.70: MAX 1g SAR συναρτήσει συχνότητας με απόσταση 0.36 cm



Εικόνα 6.71: MAX 1g SAR συναρτήσει συχνότητας με απόσταση 1.8 cm



Εικόνα 6.72: MAX 1g SAR συναρτήσεως συχνότητας με απόσταση 3.66 cm

6.8 Υπολογισμός SAR σε λεπτομερές μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού με διπολική κεραία $\lambda/2$ τοποθετημένη δίπλα και κάθετα στο ανθρώπινο αυτί

Γενική περιγραφή προβλήματος

Το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και μια διπολική κεραία $\lambda/2$, η οποία τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το ανθρώπινο αυτί. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.1 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.6 cm και 2.5 cm.

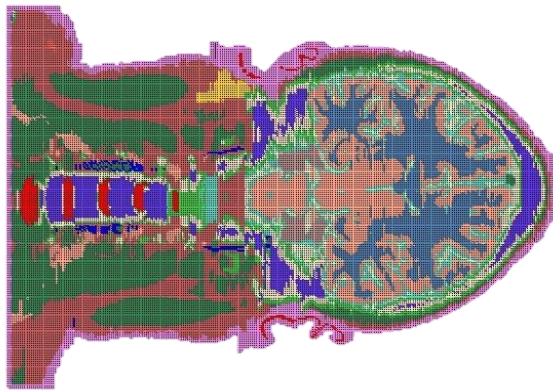
Το μοντέλο κεφαλιού κατασκευάστηκε από τρισδιάστατη πιστή αναπαράσταση των τομών ρεαλιστικού κεφαλιού, οι οποίες προήλθαν από Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού (MRI – Magnetic Resonance Imaging). Συγκεκριμένα προήλθε από αξονική, οβελιαία και στεφανιαία τομή Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού διαφόρων προσανατολισμών. Το μοντέλο αποτελείται από συνολικά 26 ιστούς και είναι ρυθμισμένο με τις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών στην συχνότητα των 2.44 GHz. Συνεπώς για πραγματοποίηση προσομοιώσεων σε διαφορετικές συχνότητες γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές στις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών.

Οι προσομοιώσεις εκτελούνται σε τρεις διαφορετικές συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz με ισχύ εισόδου 0.25 W, 0.125 W και 0.1 W αντίστοιχα. Στόχος είναι η μελέτη του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) καθώς και το πως η σταδιακή μεταβολή της παραμέτρου της απόστασης μεταξύ ανθρώπινου κεφαλιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$, επιδρά σε αυτόν. Στη συνέχεια εξετάζεται αν οι τιμές SAR

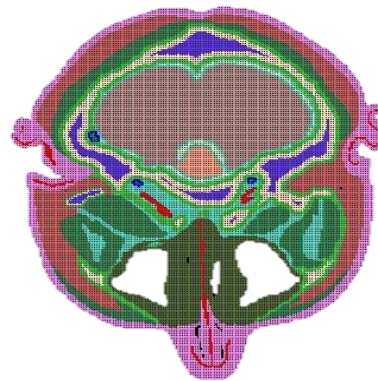
που προκύπτουν βρίσκονται εντός των ορίων επιτρεπτής έκθεσης. Εστιάζουμε στα όρια γενικού πληθυσμού.

Κατασκευή γεωμετρίας

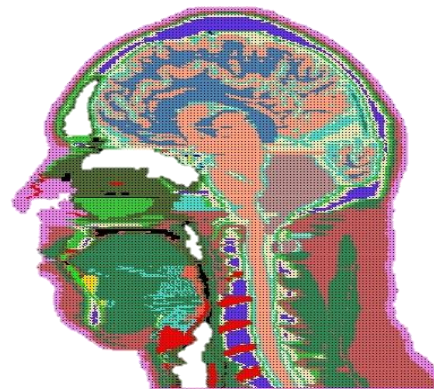
Η διπολική κεραία κατασκευάζεται με βάση την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της, καθώς το μήκος της εξαρτάται απ' αυτήν. Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού στο επίπεδο ZX (slice: 149, κατασκευάζεται η διπολική κεραία για καθεμία από τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις). Η κεραία σχεδιαστήκε με το εργαλείο wire.



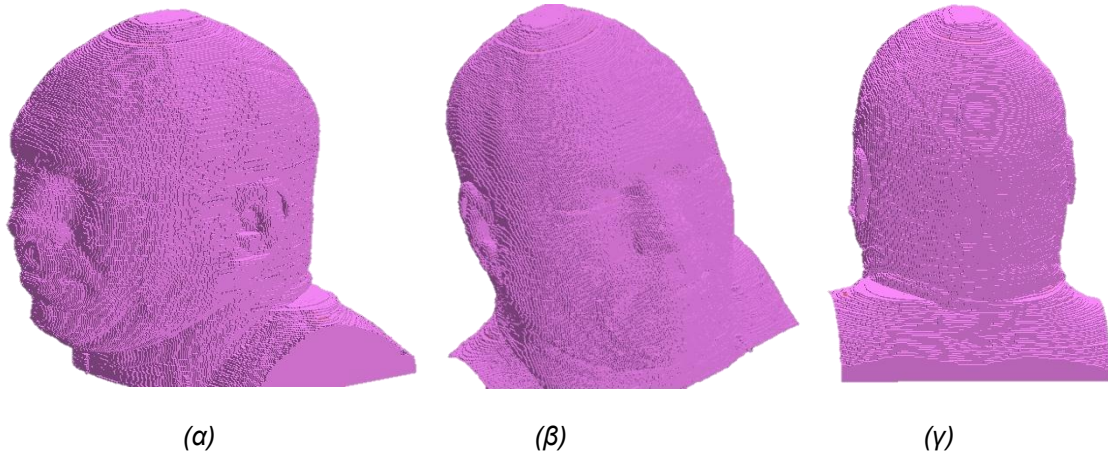
Εικόνα 6.73 : Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο ZX επίπεδο, slice 149 όπου κατασκευάζεται η κεραία



Εικόνα 6.74: Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο XY επίπεδο



Εικόνα 6.75: Τομή ανθρώπινου κεφαλιού στο YZ επίπεδο



Εικόνα 6.76: 3D απεικόνιση μοντέλου ανθρώπινου κεφαλιού

6.8.1 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 900 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κινητή τηλεφωνία). Συνεπώς, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Συγκεκριμένα, οι αποστάσεις αυτές είναι 0.1 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.6 cm και 2.5 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 900 MHz είναι 0.25 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 2.5e-001.

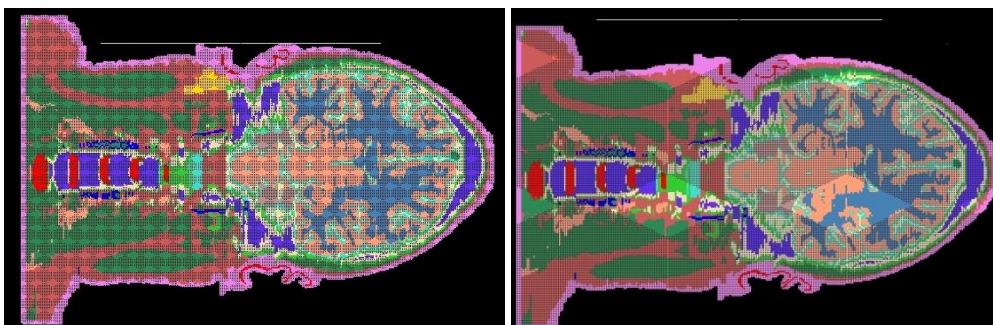
Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $227 \times 271 \times 300$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 1 mm ή 0.1 cm.

$$c = \lambda f \xrightarrow{\text{προκύπτει}} \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{0.9 \times 10^9} = 0.333 \text{ m ή } 33.3 \text{ cm ή } 333 \text{ mm}$$

Αφού $\lambda=333$ mm, συνεπώς $\lambda/2 = 166.5$ mm, προσεγγιστικά στον κοντινότερο περιττό $\lambda/2 \approx 167$ mm

Επειδή οι διαστάσεις ενός κελιού είναι $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$, η διπολική κεραία $\lambda/2$, η οποία τοποθετείται δίπλα στο αυτί θα αποτελείται συνολικά από 167 κελιά. Πιο αναλυτικά 83 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 83 κελιά.



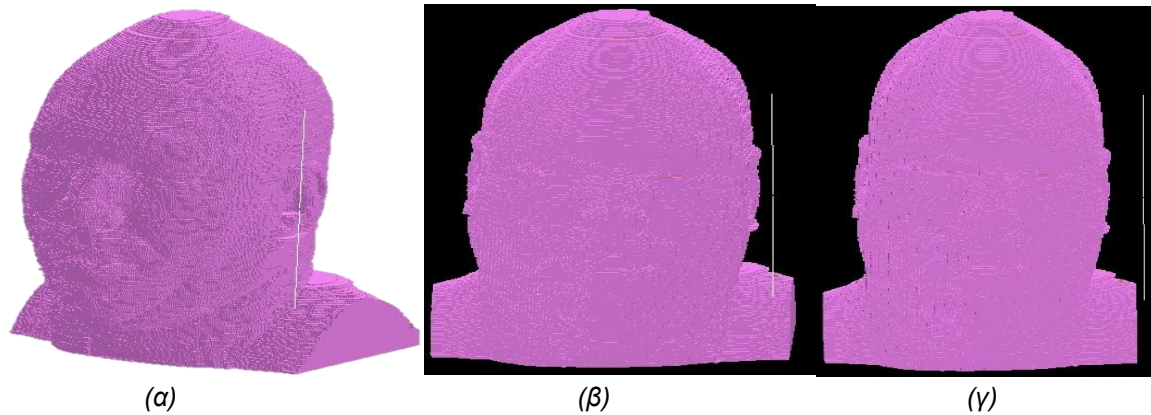
Εικόνα 6.77: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 0.1 cm

Εικόνα 6.78: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 2.5 cm

Γίνεται αλλαγή των τιμών των διηλεκτρικών ιδιοτήτων με βάση τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.13: Διηλεκτρικές ιδιότητες βιολογικών ιστών στα 900 MHz

Ιστός	Αγωγιμότητα (S/m)	Σχετική Επιτρεπτότητα
Κερατοειδής χιτώννας Οφθαλμού	1.3943	55.235
Αμφιβληστροειδής χιτώννας Οφθαλμού	1.1668	55.271
Φακός οφθαλμού	0.7934	46.573
Σκληρός χιτώννας οφθαλμού ή (επιπεφυκώς οφθαλμού)	1.1668	55.271
Νωτιαίος μυελός	0.57369	32.531
Αίμα	1.5379	61.36
Σωματικό υγρό	1.6362	68.902
Υαλοειδές σώμα οφθαλμού	1.6362	68.902
Δόντια	0.14331	12.454
Αιμοφόρα αγγεία	0.69612	44.775
Χόνδρος	0.78239	42.653
Λέμφος	1.0385	59.684
Αδένες	1.0385	59.684
Παρεγκεφαλίδα	1.2628	49.444
Εγκεφαλονωτιαίο υγρό	2.4126	68.638
Μυελός των οστών	0.040208	5.5043
Βλεννογόμος	0.84465	46.08
Σπογγώδες οστό	0.34	20.788
Δέρμα (στεγνό)	0.86674	41.405
Τένοντες	0.71839	45.825
Φλοιός οστού	0.14331	12.454
Λευκή ουσία εγκεφάλου	0.59079	38.886
Φαία ουσία εγκεφάλου	0.94227	52.725
Μυς	0.94294	55.032
Λίπος	0.051043	5.462

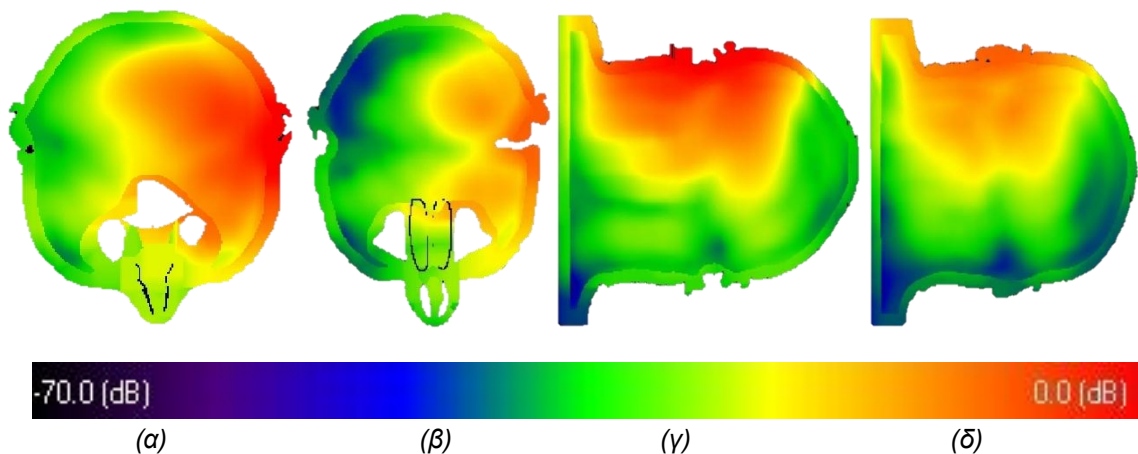


Εικόνα 6.79: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.1 cm (β) 1 cm και (γ) 2.5 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

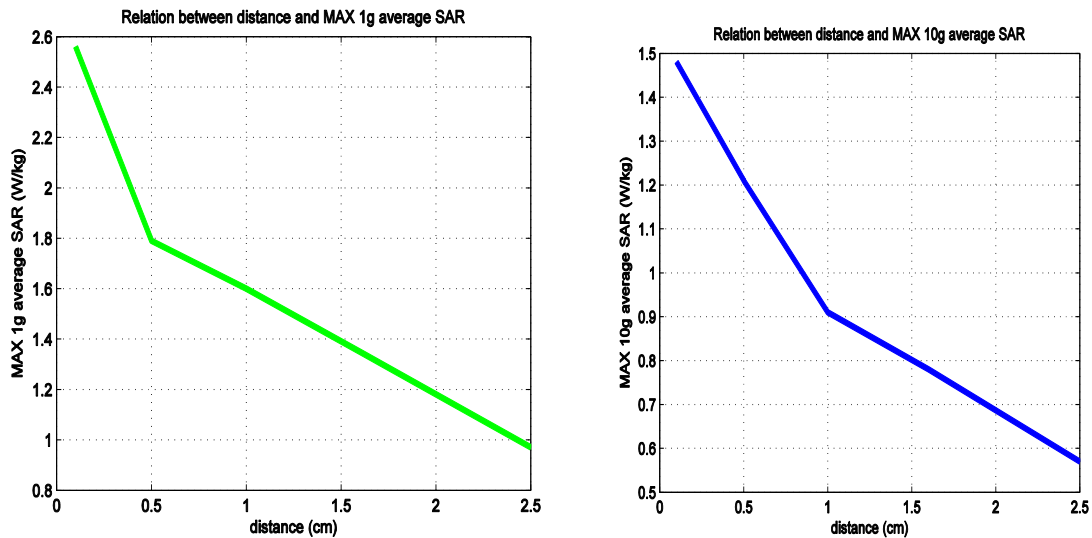
Πίνακας 6.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.1	12.5	2.56	1.48
0.5	7.64	1.79	1.21
1	4.82	1.6	0.91
1.6	4.09	1.35	0.78
2.5	3.07	0.97	0.57



Εικόνα 6.80: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.1 cm (α και γ) και για απόσταση 2.5 cm (β και δ)

Παρατίθενται δύο γραφήματα που δείχνουν τις αποστάσεις από 0.1 cm έως 2.5 cm συναρτήσεως του MAX 1g Average SAR (W/kg) και του MAX 10g Average SAR (W/kg).



Εικόνα 6.81: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – αυτιού.

6.8.2 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο αυτί στα 1800 MHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ λειτουργεί στη συχνότητα των 1800 MHz (κινητή τηλεφωνία). Άρα, ο σχεδιασμός της κεραίας γίνεται με βάση αυτή τη συχνότητα. Η κεραία τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.1 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.6 cm και 2.5 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 1800 MHz είναι 0.125 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 1.25e-001.

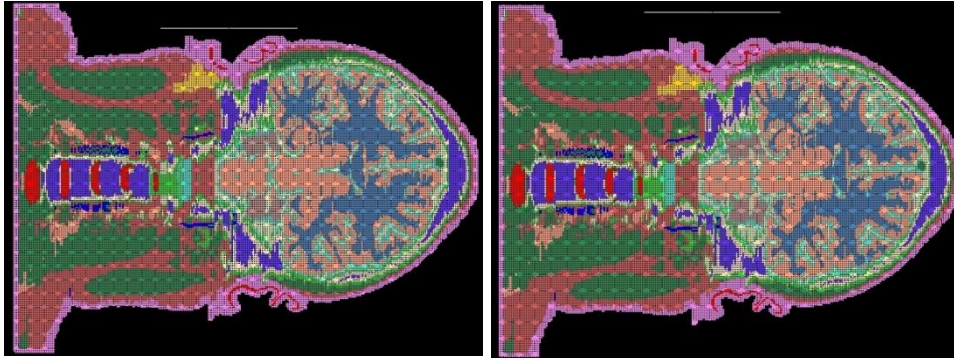
Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $227 \times 271 \times 300$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Y_{ee}) ορίστηκε 1 mm ή 0.1 cm.

$$c = \lambda f \xrightarrow{\text{προκύπτει}} \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9} = 0.167 \text{ m ή } 16.7 \text{ cm ή } 167 \text{ mm}$$

Αφού $\lambda = 167 \text{ mm}$, συνεπώς $\lambda/2 = 83.5 \text{ mm}$, προσεγγιστικά στον κοντινότερο περιπτώ $\lambda/2 \approx 83 \text{ mm}$

Συνεπώς διπολική κεραία $\lambda/2$ που τοποθετείται δίπλα στο αυτί θα αποτελείται συνολικά από 83 κελιά. Πιο αναλυτικά 41 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 41 κελιά.

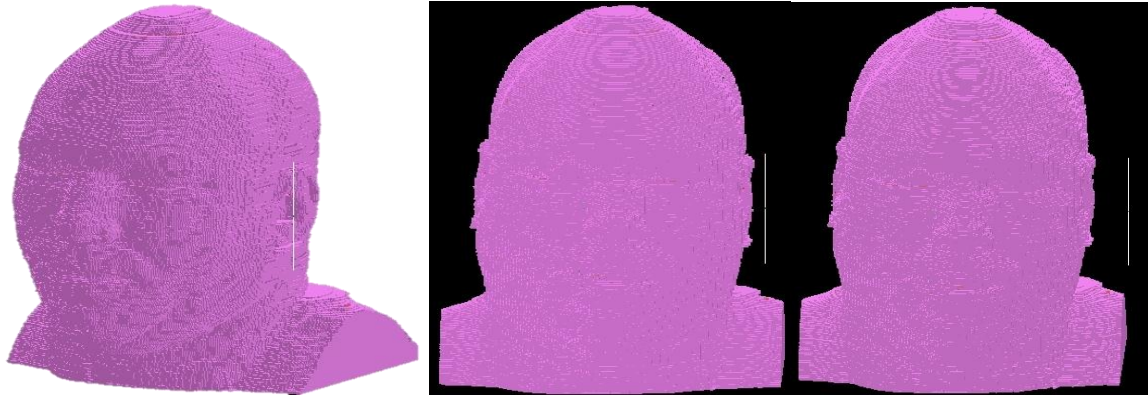


Εικόνα 6.82: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 0.5 cm
 Εικόνα 6.83: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο ZX, σε απόσταση 1.6 cm

Γίνεται αλλαγή των τιμών των διηλεκτρικών ιδιοτήτων με βάση τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.15: Διηλεκτρικές ιδιότητες βιολογικών ιστών στα 1800 MHz

Ιστός	Αγωγιμότητα (S/m)	Σχετική Επιτρεπτότητα
Κερατοειδής χιτώνας	1.8582	52.768
Οφθαλμού		
Αμφιβληστροειδής χιτώνας	1.6018	53.568
Οφθαλμού		
Φακός οφθαλμού	1.1473	45.353
Σκληρός χιτώνας	1.6018	53.568
οφθαλμού ή (επιπεφυκώς οφθαλμού)		
Νωτιαίος μυελός	0.8429	30.867
Αίμα	2.0435	59.372
Σωματικό υγρό	2.0325	68.573
Υαλοειδές σώμα οφθαλμού	2.0325	68.573
Δόντια	0.27522	11.781
Αιμοφόρα αγγεία	1.0658	43.343
Χόνδρος	1.2869	40.215
Λέμφος	1.501	58.142
Αδένες	1.501	58.142
Παρεγκεφαλίδα	1.7089	46.114
Εγκεφαλονωτιαίο υγρό	2.9236	67.2
Μυελός των οστών	0.068475	5.3716
Βλεννογόμος	1.232	43.85
Σπογγώδες οστό	0.58827	19.343
Δέρμα (στεγνό)	1.1847	38.872
Τένοντες	1.2008	44.251
Φλοιός οστού	0.27522	11.781
Λευκή ουσία εγκεφάλου	0.91494	37.011
Φαία ουσία εγκεφάλου	1.3913	50.079
Μυς	1.341	53.549
Λίπος	0.078388	5.3494



(α)

(β)

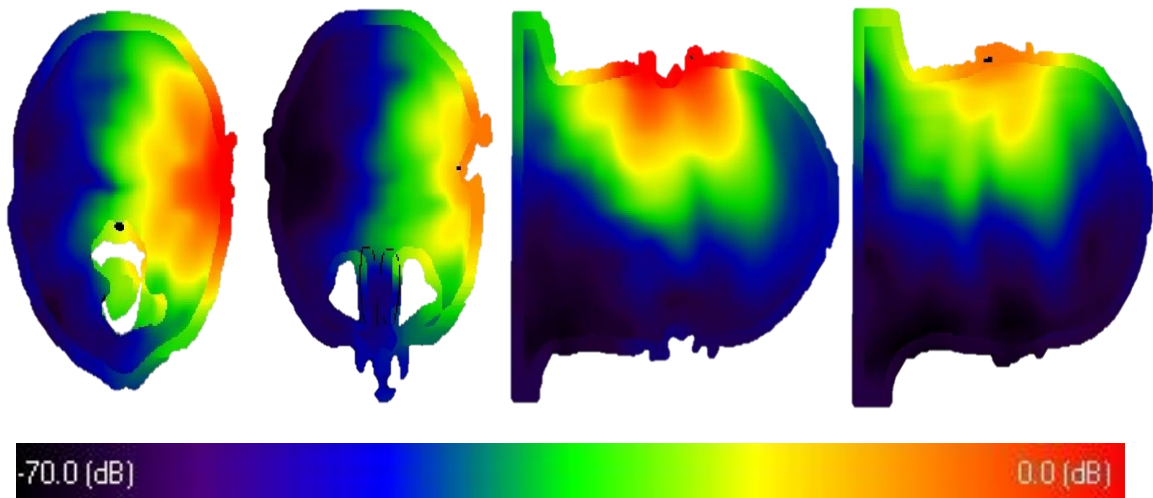
(γ)

Εικόνα 6.84: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.5 cm (β) 1,6 cm και (γ) 2.5 cm από το μάτι του μοντέλου

Αποτελέσματα

Πίνακας 6.16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.1	21.9	4.59	1.84
0.5	9.6	3.58	1.47
1	7.22	3.23	1.24
1.6	4.74	2.22	0.88
2.5	2.18	1.06	0.45



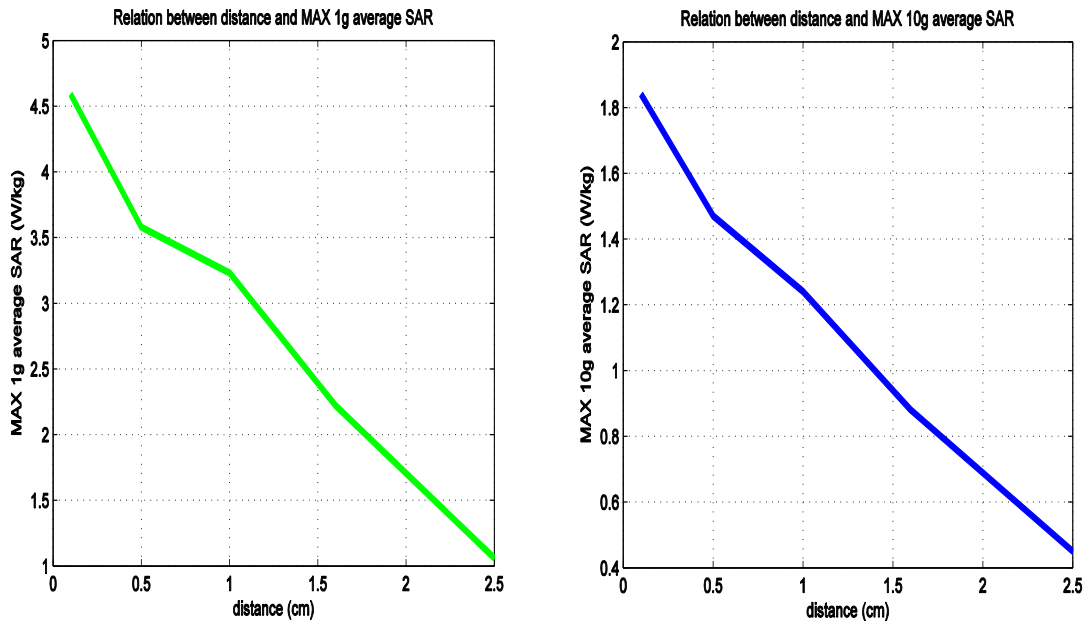
(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 6.85: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.1 cm (α και γ) και για απόσταση 2.5 cm (β και δ)



Εικόνα 6.86: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – αυτιού.

6.8.3 Διπολική κεραία $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο μάτι στα 2.44 GHz

Περιγραφή προβλήματος

Η διπολική κεραία $\lambda/2$ που προσομοιώνεται λειτουργεί στη συχνότητα των 2.44 GHz (ασύρματα δίκτυα). Η κεραία σχεδιάζεται σύμφωνα με αυτή την συχνότητα και τοποθετείται σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις από το μοντέλο του ανθρώπινου κεφαλιού. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.1 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.6 cm και 2.5 cm. Η ισχύς εισόδου για τα 2.44 GHz είναι 0.1 W, δηλαδή θέτουμε Scaled Net Input Power (W) : 1e-001.

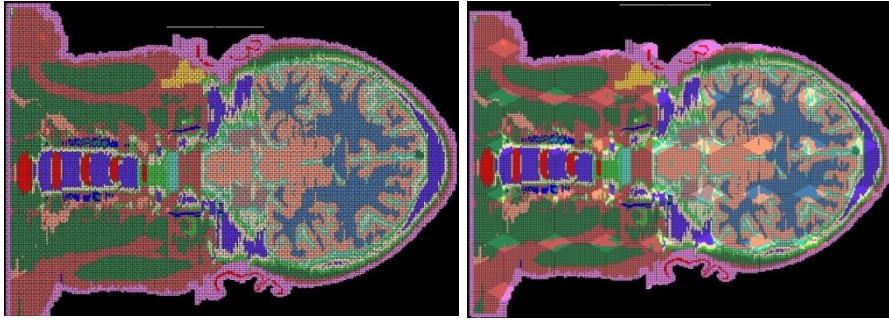
Κατασκευή γεωμετρίας

Η γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα FDTD με διαστάσεις $227 \times 271 \times 300$ mm. Μέσα σε αυτό το πλέγμα τοποθετήθηκε η κεραία, το ομοίωμα του κεφαλιού καθώς και η πηγή διέγερσης της γεωμετρίας. Το μέγεθος ενός κελιού (ή μέγεθος κύβου Yee) ορίστηκε 1 mm ή 0.1 cm.

$$c = \lambda f \xrightarrow{\text{προκύπτει}} \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.44 \times 10^9} 0.123 \text{ m ή } 12.3 \text{ cm}$$

Αφού $\lambda=123$ mm, συνεπώς $\lambda/2 = 61.5$ mm, προσεγγιστικά στον κοντινότερο περιπτώ $\lambda/2 \approx 61$ mm

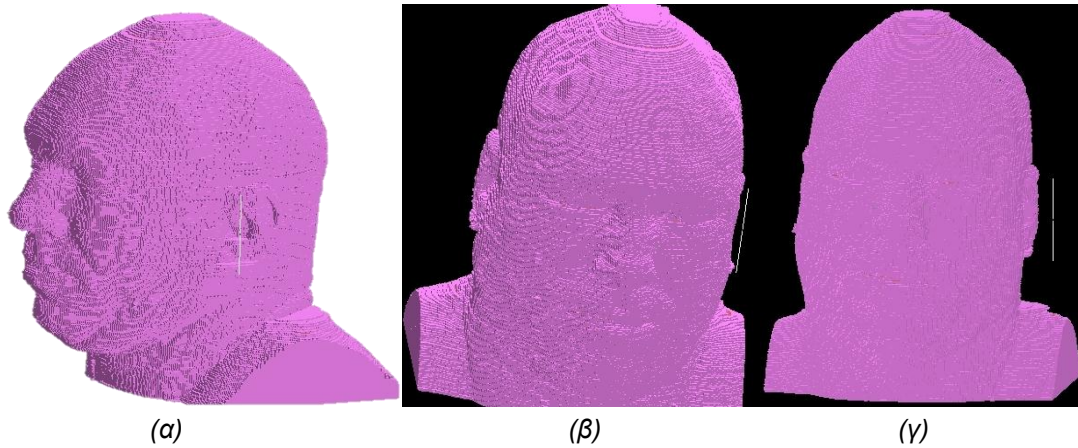
Η διπολική κεραία $\lambda/2$ η οποία τοποθετήθηκε δίπλα στο μάτι και περιλαμβάνει συνολικά 61 κελιά. Αναλυτικότερα, 30 κελιά – τοποθέτηση πηγής – 30 κελιά.



Εικόνα 6.87: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο YZ, σε απόσταση 0.5 cm
 Εικόνα 6.88: Γεωμετρία κεφαλιού – διπολικής κεραίας $\lambda/2$ στο επίπεδο YZ, σε απόσταση 2.5 cm

Πίνακας 6.17: Διηλεκτρικές ιδιότητες βιολογικών ιστών στα 2.44 GHz

Ιστός	Αγωγιμότητα (S/m)	Σχετική Επιτρεπτότητα
Κερατοειδής χιτώνας Οφθαλμού	2.288	51.631
Αμφιβληστροειδής χιτώνας Οφθαλμού	2.0258	52.631
Φακός οφθαλμού	1.498	44.636
Σκληρός χιτώνας οφθαλμού ή (επιπεφυκώς οφθαλμού)	2.0258	52.642
Νωτιαίος μυελός	1.0845	30.155
Αίμα	2.5363	58.28
Σωματικό υγρό	2.4702	68.214
Υαλοειδές σώμα οφθαλμού	2.4702	68.214
Δόντια	0.39236	11.387
Αιμοφόρα αγγεία	1.429	42.544
Χόνδρος	1.7481	38.792
Λέμφος	1.9599	57.215
Αδένες	1.9599	57.215
Παρεγκεφαλίδα	2.0949	44.822
Εγκεφαλονωτιαίο υγρό	3.4486	66.258
Μυελός των οστών	0.094595	5.298
Βλεννογόνος	1.5858	42.867
Σπογγώδες οστό	0.80165	18.56
Δέρμα (στεγνό)	1.4593	38.018
Τένοντες	1.6765	43.139
Φλοιός οστού	0.39236	11.387
Λευκή ουσία εγκεφάλου	1.2099	36.178
Φαία ουσία εγκεφάλου	1.8008	48.928
Μυς	1.732	52.742
Λίπος	0.10408	5.2811

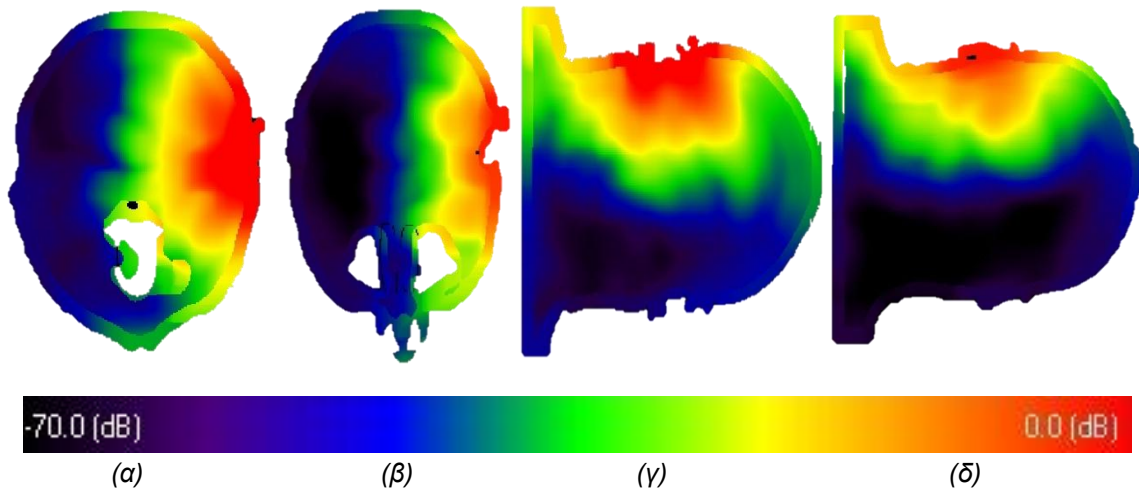


Εικόνα 6.89: 3D απεικόνιση. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ σε απόσταση (α) 0.1 cm (β) 0.5 cm και (γ) 1.6 cm από το μάτι του μοντέλου

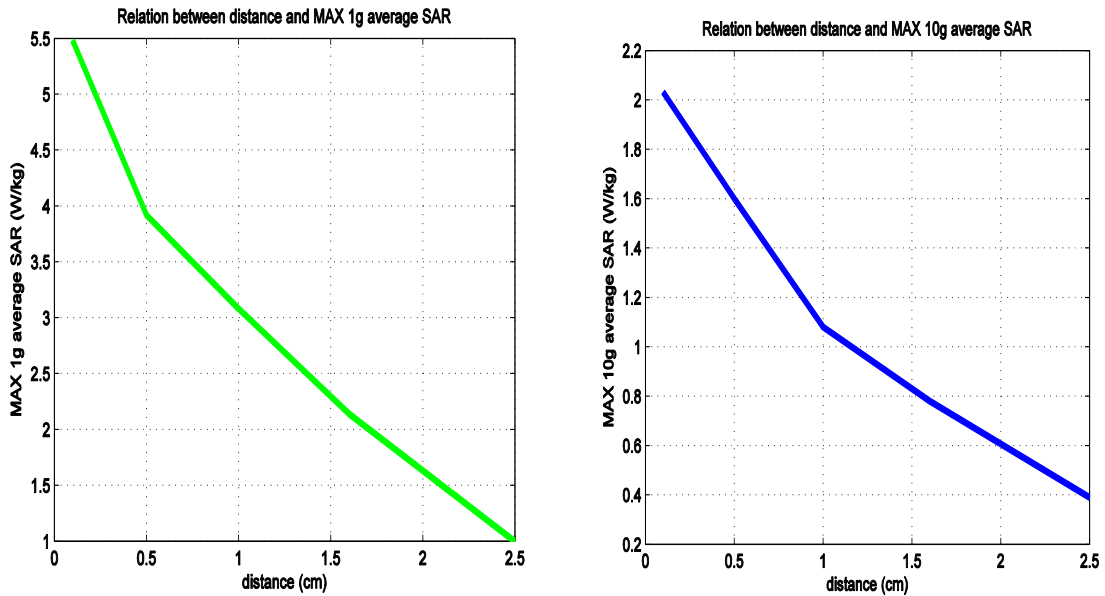
Αποτελέσματα

Πίνακας 6.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.1	22.9	5.48	2.03
0.5	10.8	3.92	1.60
1	6.55	3.08	1.08
1.6	4.31	2.14	0.78
2.5	1.96	1	0.39



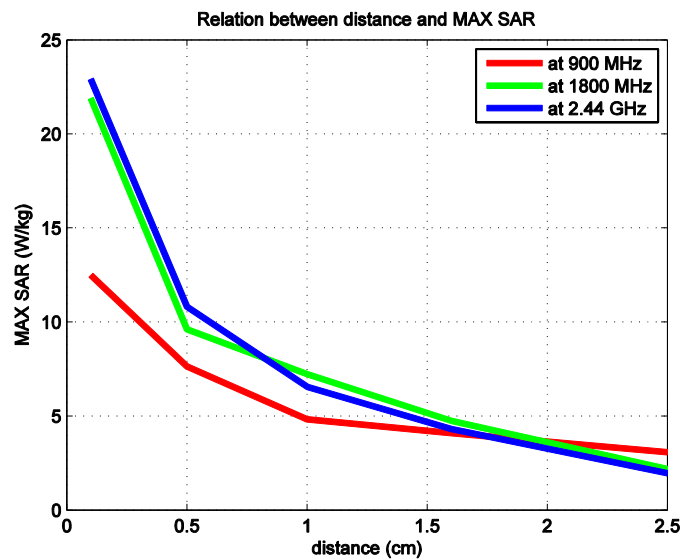
Εικόνα 6.90: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.1 cm (α και γ) και για απόσταση 2.5 cm (β και δ)

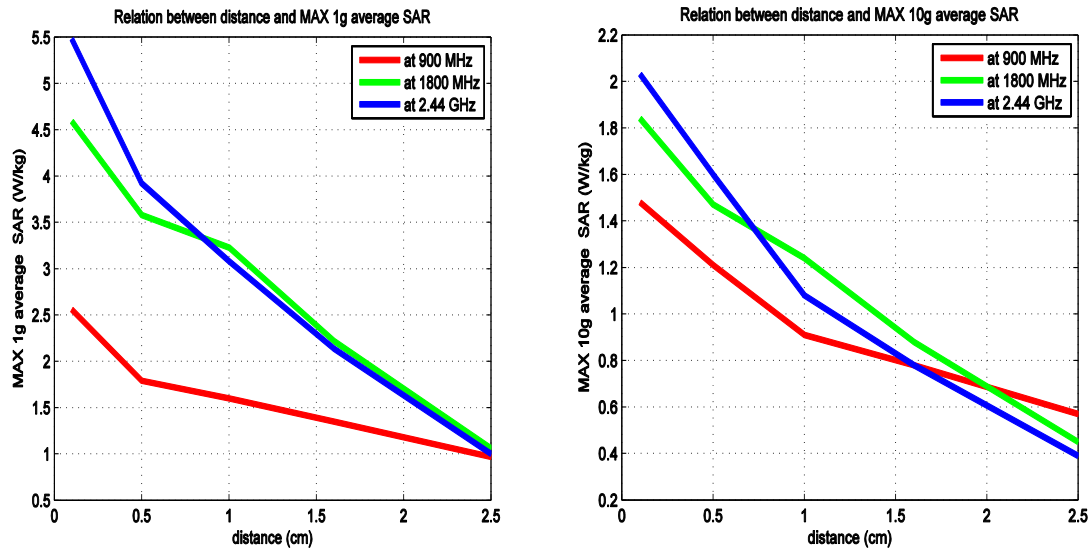


Εικόνα 6.91: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας λ/2 – αυτιού.

6.8.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

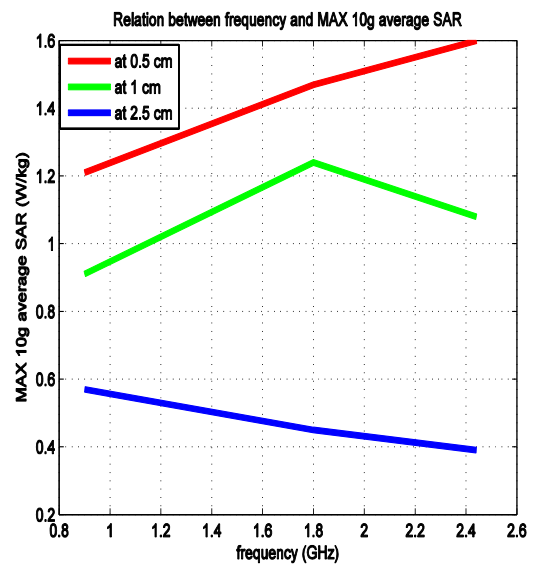
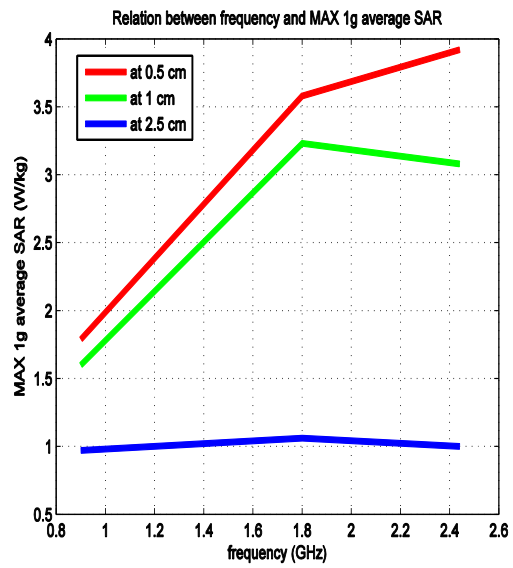
Εκτελέστηκαν συνολικά 15 προσομοιώσεις, 5 προσομοιώσεις σε κάθε συχνότητα, μία προσομοίωση για κάθε μια από τις συνολικά 5 αποστάσεις. Οι τρεις διαφορετικές συχνότητες ήταν 900MHz, 1800MHz και 2.44 GHz με input scaled power 0,25 W, 1.125 W και 0.1 W αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα απεικονιστεί σε ένα διάγραμμα τη σχέση μεταξύ της απόστασης και του MAX SAR και για τις τρεις συχνότητες. Ομοίως για MAX 1g average SAR καθώς και MAX 10g average SAR.





Εικόνα 6.92: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ – ματιού σε συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 2.44 GHz.

Μείωση τόσο των τοπικών τιμών SAR όσο και των τιμών 1g SAR και 10g SAR σημειώθηκε με αύξηση της απόστασης μεταξύ μοντέλου κεφαλιού και διπολικής κεραίας $\lambda/2$. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι οι τιμές 10g SAR βρίσκονται εντός των ορίων επιτρεπτής έκθεσης γενικού πληθυσμού για όλες τις αποστάσεις που μελετήθηκαν. Εξάιρεση αποτελεί, στη συχνότητα των 2.44 GHz, η πρώτη απόσταση (σχεδόν σε επαφή – 0.1 cm), η τιμή της οποίας οριακά ξεπερνά τα πρότυπα και κυμαίνεται στα 2.03 W/kg. Από την απόσταση των 1cm και μετά οι τιμές SAR στα 1800 MHz είναι ελαφρώς υψηλότερες απ'ότι στα 2.44 GHz. Για την πρώτη απόσταση των 0.1 cm (που είναι σχεδόν ουτοπική και στην πράξη είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί) παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές SAR στα 2.44 GHz, στη συνέχεια στα 1800 MHz και τέλος μικρότερες τιμές στα 900 MHz.



Εικόνα 6.93: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας της διπολικής κεραίας $\lambda/2$ σε αποστάσεις 0.5 cm, 1 cm και 2.5 cm.

Κεφάλαιο 7

Σχεδιασμός και κατασκευή τερματικής συσκευής - Τοποθέτηση δίπλα σε μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

Σε αυτό το κεφάλαιο εστιάζουμε στη μελέτη της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ασύρματη τερματική συσκευή και εξετάζουμε το ποσό απορροφούμενης ακτινοβολίας στο ανθρώπινο κεφάλι. Πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση σε κατάλληλο λογισμικό πακέτο, μίας τερματικής συσκευής που περιλαμβάνει μια εσωτερική κεραία patch για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας GSM, στα 900 MHz και στα 1800 MHz. Στη συνέχεια, η μοντελοποιημένη ασύρματη συσκευή τοποθετήθηκε δίπλα σε λεπτομερές μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις για κάθε συχνότητα. Συνολικά εξετάστηκαν τρεις μεμονωμένες περιπτώσεις προσανατολισμού της τερματικής συσκευής. Αναλυτικότερα, η τερματική συσκευή τοποθετημένη:

- ✓ σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί
- ✓ με κλίση 30 μοιρών δίπλα στο αυτί
- ✓ με κλίση 45 μοιρών δίπλα στο αυτί

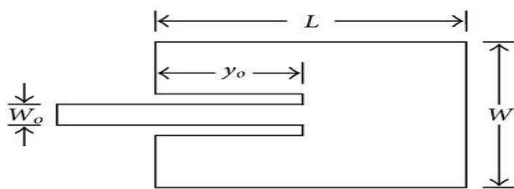
Οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις προσανατολισμού μελετήθηκαν με στόχο να εξεταστεί η τυπική καθημερινή χρήση των κινητών, καθώς η χρήση τους σπάνια πραγματοποιείται σε πλήρως κατακόρυφη θέση, λαμβάνοντας συνήθως κάποια κλίση. Πριν την κατασκευή κάθε γεωμετρίας και την εκτέλεση της προσομοίωσης, έγινε έλεγχος προσαρμογής της κεραίας τόσο στην κατακόρυφη θέση, όσο και με κλίση 30 και 45 μοιρών. Άρα για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της κεραίας πραγματοποιήθηκαν αυτές οι πρόσθετες προσομοιώσεις με τις συσκευές να λειτουργούν στον ελεύθερο χώρο, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αποδοτική λειτουργία των στοιχείων ακτινοβολίας σε σχέση με τον συντελεστή ανάκλασης.

Μελετήθηκε η παράμετρος απόστασης της τερματικής συσκευής από το κεφάλι. Για κάθε απόσταση υπολογίστηκε η επίδρασή της στα επίπεδα SAR. Αφού μετρήθηκαν τα επίπεδα SAR, έγινε σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών τοποθετήσεων της κινητής τερματικής συσκευής. Τέλος εξετάστηκε κατά πόσο οι τιμές SAR που προκύπτουν συμβαδίζουν με τα διεθνή όρια ασφαλούς έκθεσης.

7.1 Γενικά στοιχεία

7.1.1 Patch κεραία – θεωρητικό υπόβαθρο

Οι κεραίες μικροταινίας τύπου patch (microstrip patch antennas) αποτελούν ένα από τα είδη των κεραιών μικροταινίας (άλλα είδη είναι οι κεραίες οδεύοντος κύματος και οι σχισμοκεραίες). Πρόκειται για μια σημαντική κατηγορία κεραιών λόγω της απλής δομής τους, της ικανοποιητικής τους ευελιξίας στον καθορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών τους (όπως η συχνότητα συντονισμού) και του χαμηλού κόστους κατασκευής τους. Παρέχουν επίσης αξιόπιστη απόδοση. Επιπροσθέτως, οι κεραίες αυτές έχουν μικρό όγκο και βάρος, κάτι το οποίο τις καθιστά εύκολες στη χρήση. Να σημειωθεί επίσης ότι μπορούν με ευκολία να συνδιαστούν με άλλα μικροκυματικά κυκλώματα.



Εικόνα 7.1: Μικροταινιακή κεραία ή κεραία μικροταινίας με εσοχή

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν και της ικανοποίησης των απαιτήσεων σύγχρονων εφαρμογών, έχει γίνει εκτενής έρευνα κι έχουν βρεθεί ποικίλα πεδία εφαρμογών αυτού του είδους των κεραιών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροσκάφη, δορυφόρους αλλά κυρίως σε τομείς ασύρματων και κινητών τηλεπικοινωνιών.

Οι κεραίες αυτές αποτελούνται από ένα λεπτό μεταλλικό κάλυμμα (patch) (συνήθως ορθογώνιο) τοποθετημένο πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα (substrate). Αυτό το υπόστρωμα τερματίζεται σε αγωγίμο επίπεδο (groundplane). Το φύλλο βρίσκεται σε απόσταση h (όπου $h \ll \lambda_0$) πάνω από το επίπεδο γείωσης. Το υπόστρωμα είναι επιθυμητό να είναι παχύ με διηλεκτρική σταθερά στο χαμηλό άκρο της περιοχής $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ έτσι ώστε η κεραία να έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, καλύτερη αποδοτικότητα και ισχυρό ακτινοβολούμενο πεδίο. Συγκεκριμένα, οι κεραίες με υπόστρωμα μικρού ϵ_r και παχύτερα υποστρώματα παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά καθώς το διηλεκτρικό συγκεντρώνει ασθενέστερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Αντίθετα, οι κεραίες με μεγάλο ϵ_r και λεπτά υποστρώματα έχουν μικρό εύρος ζώνης και μειωμένη αποδοτικότητα. Το μέγεθος σε αυτές τις κεραίες είναι μικρό, η σύνδεση των πεδίων ισχυρή συνεπώς ελαχιστοποιείται η ανεπιθύμητη ακτινοβολία, με μειονέκτημα τις μεγαλύτερες απώλειες.

Το κάλυμμα (patch) μπορεί να διαμορφωθεί ποικιλοτρόπως και είναι τέτοιο ώστε το μέγιστο του διαγράμματος να είναι κάθετο στο επίπεδο του καλύμματος (ευρύπλευρη ακτινοβολία). Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή του κατάλληλου ρυθμού διέγερσης. Η τροφοδοσία τους πραγματοποιείται συνήθως με ομοαξονική

σύνδεση, γραμμή μικροταινίας, σύζευξη μέσω ανοιγμάτων ή σύζευξη λόγω εγγύτητας. Η κάθε μέθοδος τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από το διαφορετικό εύρος ζώνης που προσφέρει και τις δυσκολίες υλοποίησής της.

Το αγώγιμο κάλυμμα μπορεί να έχει διάφορες μορφές, οι πιο διαδεδομένες ωστόσο είναι η ορθογωνική, η τετραγωνική και η κυκλική. Ο τρόπος με τον οποίο ακτινοβολούν παρουσιάζει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με αυτόν των διπόλων, παρόλο που γεωμετρικά διαφέρουν αρκετά.

Να σημειωθεί ότι αυτό το είδος των κεραίων παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες όπως το στενό εύρος ζώνης (αυτό παρατηρείται κυρίως στις patch κεραίες με γειωμένο υπόστρωμα). Επιπλέον συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλό κέρδος, περίπου στα 6dB, καθώς και μικρή αποδοτικότητα. Μεγάλο μέρος της ισχύος εισόδου δεν ακτινοβολείται λόγω της παρουσίας κυμάτων επιφάνειας και εξαιτίας απωλειών στους αγωγούς και στο διηλεκτρικό.

7.1.2 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

Το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού που χρησιμοποιήθηκε αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6 και αναλύθηκε στην παράγραφο 6.8. Πρόκειται για ένα μοντέλο με αρκετά μεγάλη χωρική λεπτομέρεια, αποτελούμενο από 26 ιστούς. Είναι κατασκευασμένο με βάση πραγματικό ανθρώπινο κεφάλι καθώς στηρίχθηκε σε πραγματικά δεδομένα Μαγνητικής Τομογραφίας.

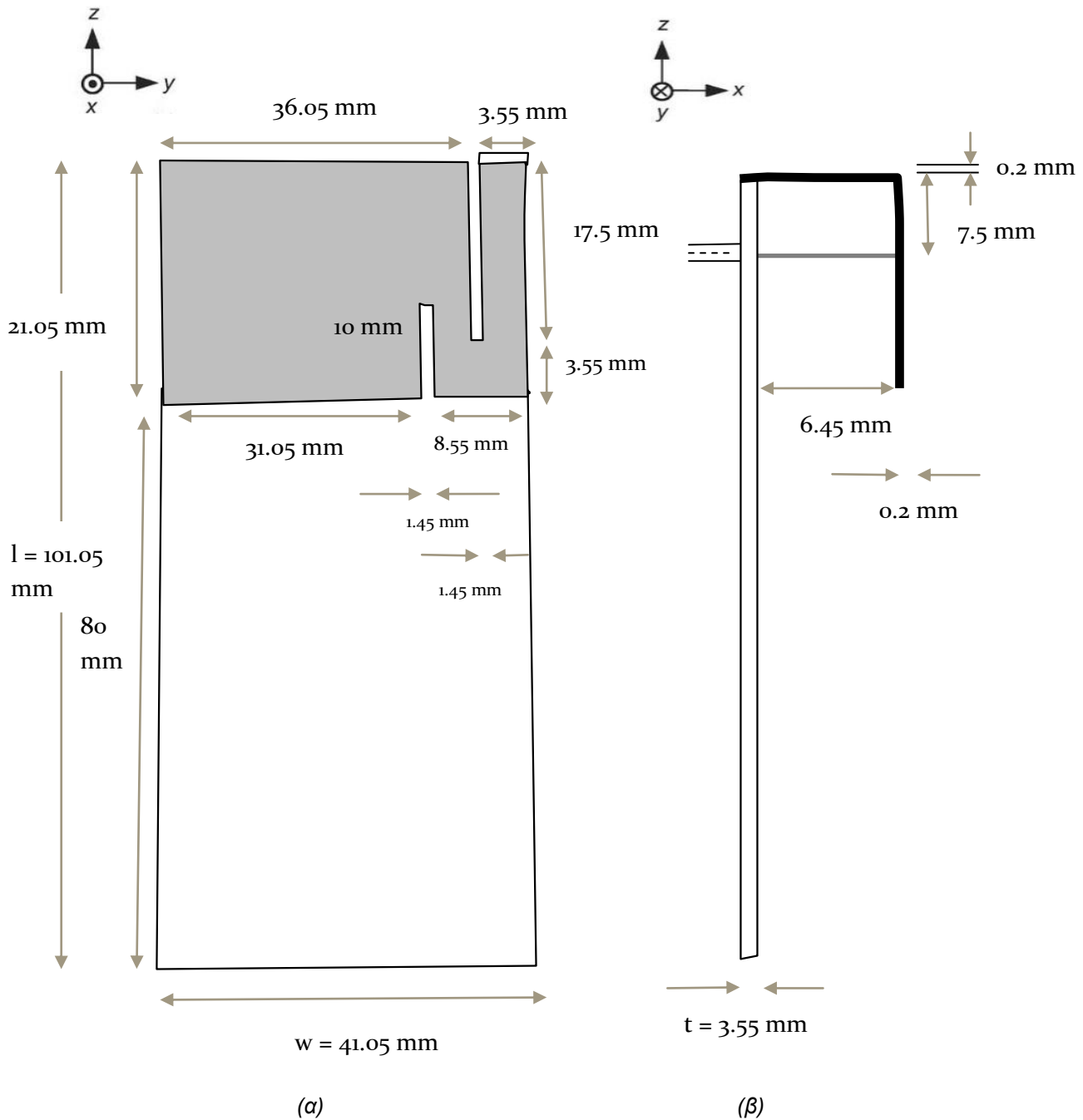
7.2 Κατασκευή μοντέλου τερματικής συσκευής

Κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα τηλεφώνων, τα οποία περιλαμβάνουν μια εσωτερική κεραία patch κι ένα πλαίσιο (chassis) . Το ένα μοντέλο λειτουργεί στα 900 MHz και το άλλο στα 1800 MHz. Σε άρθρο των Pertti Vainikainen et al, το 2002, αποδείχθηκε ότι η συμπεριφορά μιας αρκετά μικρής ραδιο-συσκευής όπως τα κινητά τηλέφωνα, μπορεί να περιγραφεί από τον σχεδιασμό ενός συστήματος μιας κεραίας κι ενός πλαισίου σαν συνδιασμός των ξεχωριστών ρυθμών του στοιχείου της κεραίας και του πλαισίου. Η προσέγγιση βασίστηκε στην ιδέα ότι ο συνδιασμός υποστηρίζει δύο σημαντικούς, αρκετά ανεξάρτητους ρυθμούς: τον συμπαγή ψεύδο-TEM (quasi TEM) ρυθμό από ένα αυτοσυντονιζόμενο στοιχείο κεραίας και τον ρυθμό κυματοδότησης του πλαισίου που μοιάζει με ένα παχύ δίπολο (ο κυματοδηγός ενός κύματος chassis προσομοιώνει ένα παχύ δίπολο). Αποδείχθηκε ότι με ταίριασμα των συχνοτήτων συντονισμού του στοιχείου της κεραίας και του πλαισίου, μπορεί να ληφθεί ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι στα 900 MHz, εκεί όπου ο ρυθμός του πλαισίου τυπικά κυριαρχεί, το στοιχείο της κεραίας έχει μια μικρή μόνο επίδραση στις ιδιότητες των κοντινών και των μακρινών πεδίων του κινητού τηλεφώνου.

7.2.1 Κατασκευή τερματικής συσκευής στα 900 MHz

Σχεδιασμός και περιγραφή τερματικής συσκευής

Κατασκευάστηκε ένα μοντέλο κινητού τηλεφώνου για συχνότητα λειτουργίας στα 900 MHz, το οποίο αποτελείται από μια patch κεραία κι ένα επίπεδο γείωσης (groundplane). Οι διαστάσεις του πλαισίου είναι $101.05 \text{ mm} \times 41.05 \text{ mm} \times 3.55 \text{ mm}$ [(l)μήκος \times (w)πλάτος \times (t)πάχος].

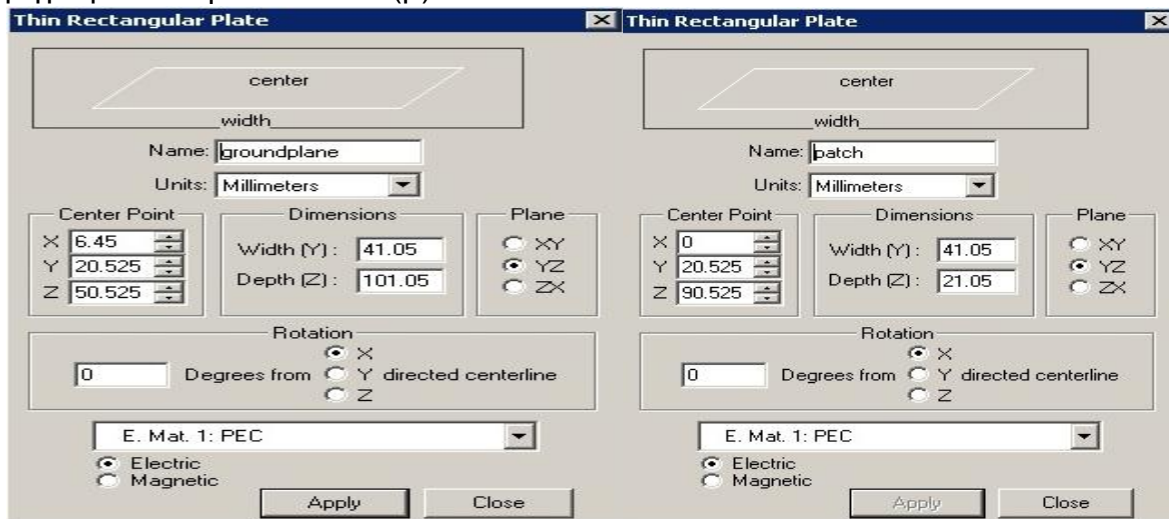


Εικόνα 7.2: Μοντέλο τηλεφώνου με εσωτερική patch κεραία για 900 MHz. (α) Πρόσοψη και (β) πλάγια όψη.

Μοντελοποίηση τερματικής συσκευής

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού του με βάση το σχήμα της εικόνας 7.2.

Η γεωμετρία που κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε σε ένα πλέγμα FDTD διαστάσεων $46 \times 81 \times 141 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού (ή μέγεθος του κύβου Δ) που επιλέχθηκε είναι 1 mm και οι διαστάσεις του είναι $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Αρχικά, στο YZ επίπεδο τοποθετείται μια ορθογωνική πλάκα (rectangular plate) που αναπαριστά το επίπεδο γείωσης όπου $Y(\text{width})=41.05$ και $Z(\text{depth})=101.05$. Οι μονάδες ρυθμίζονται σε χιλιοστά και ορίζεται υλικό της πλάκας PEC (Perfect Electric Conductor). Ομοίως και για τις επιπλέον πλάκες που θα εισαχθούν στη συνέχεια. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα 7.3 (α). Ύστερα εισάγεται ακόμη μια ορθογωνική πλάκα προκειμένου να αναπαρασταθεί η κεραία patch, όπως περιγράφεται στην εικόνα 7.3 (β).

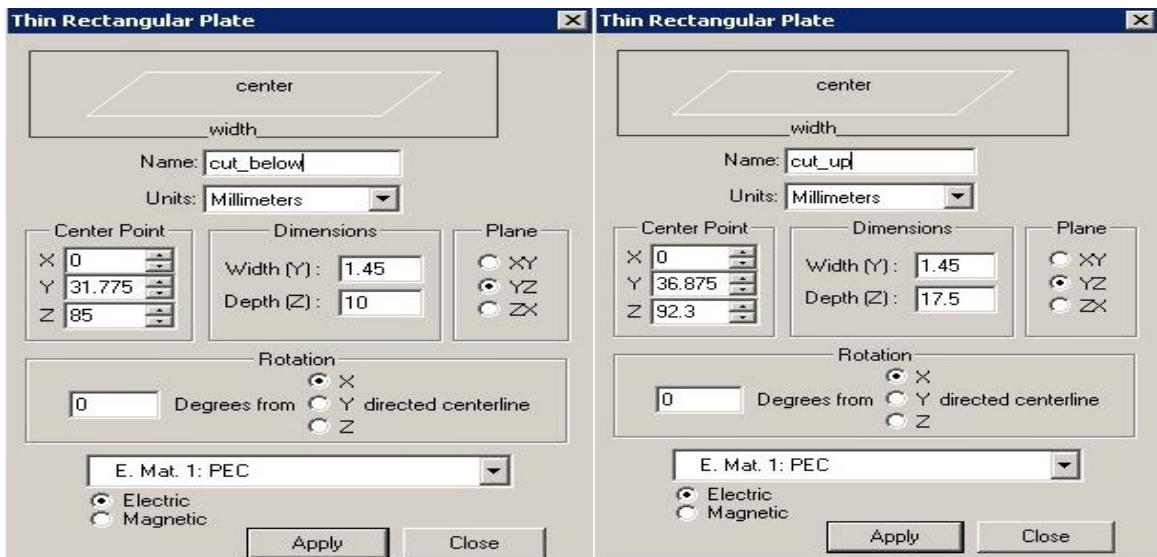


(α)

(β)

Εικόνα 7.3: Προσθήκη ορθογώνιας πλάκας που αναπαριστά το επίπεδο γείωσης (α) και την κεραία patch (β)

Έπειτα, τοποθετούνται δύο επιπλέον ορθογωνικές πλάκες όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4. Αυτές οι ορθογώνιες πλάκες εισήχθηκαν προκειμένου να προχωρήσουμε στην δημιουργία των εγκοπών της patch κεραίας όπως αναπαριστάται στο σχήμα της εικόνας 7.2. Κατόπιν, μέσω της επιλογής «Boolean Operations» κάνουμε “subtract” την ορθογωνική πλάκα cut_below από την ορθογώνια πλάκα patch. Ομοίως και για την ορθογωνική πλάκα cut_up.

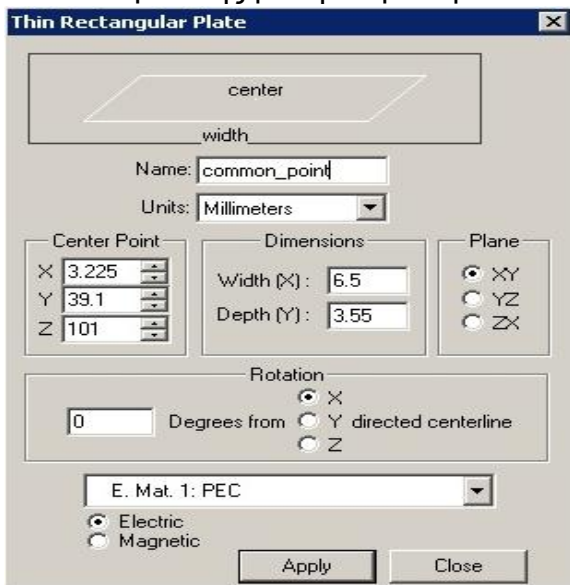


(α)

(β)

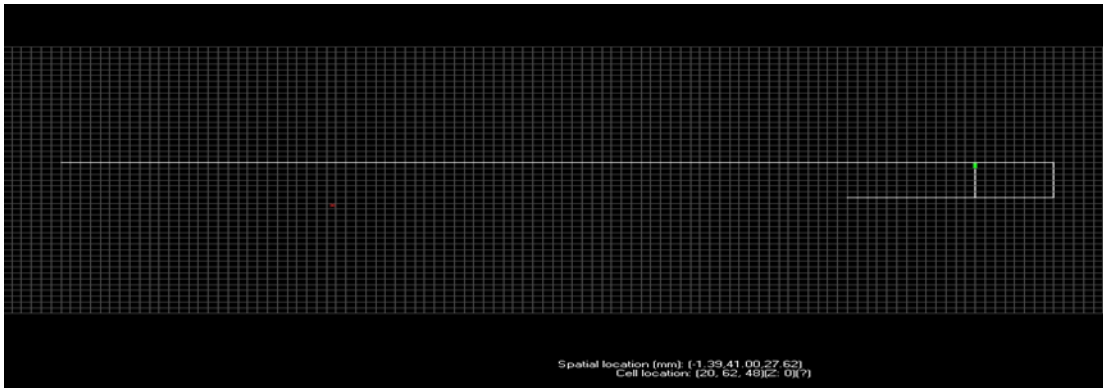
Εικόνα 7.4: Προσθήκη ορθογώνιας πλάκας cut_below (α) και cut_up (β)

Δημιουργείται έτσι ένα τελικό subtraction object το οποίο αποτελεί την κεραία patch που επιθυμούμε. Έπειτα δημιουργούμε μια ορθογώνια πλάκα, η οποία ενώνει το επίπεδο γείωσης με την κεραία patch.



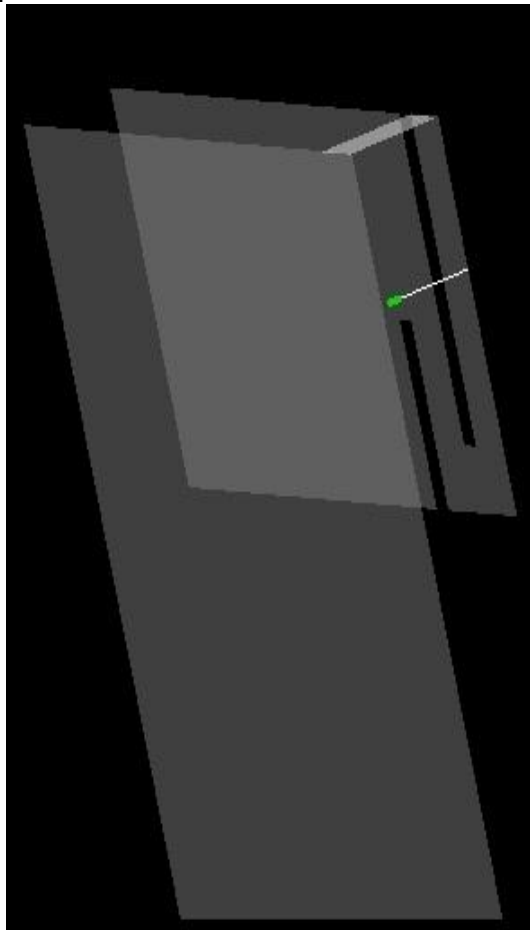
Εικόνα 7.5 : Ορθογωνική πλάκα η οποία αναπαριστά το κοινό σημείο μεταξύ επιπέδου γείωσης και patch κεραίας.

Η πηγή τοποθετείται πάνω από το επίπεδο γείωσης, πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο ZX slice:62 σε απόσταση 7.5 mm (8 κελιά) από το κοινό σημείο κεραίας patch και επιπέδου γείωσης. Η πηγή ενώνεται με την κεραία patch με ένα απλό σύρμα(wire) μηδενικού πάχους.



Εικόνα 7.6 : ZX επίπεδο, slice: 62. Τοποθέτηση πηγής

Το μοντέλο τερματικής συσκευής στα 900 MHz που προκύπτει, στο επίπεδο YZ έχει την ακόλουθη μορφή.



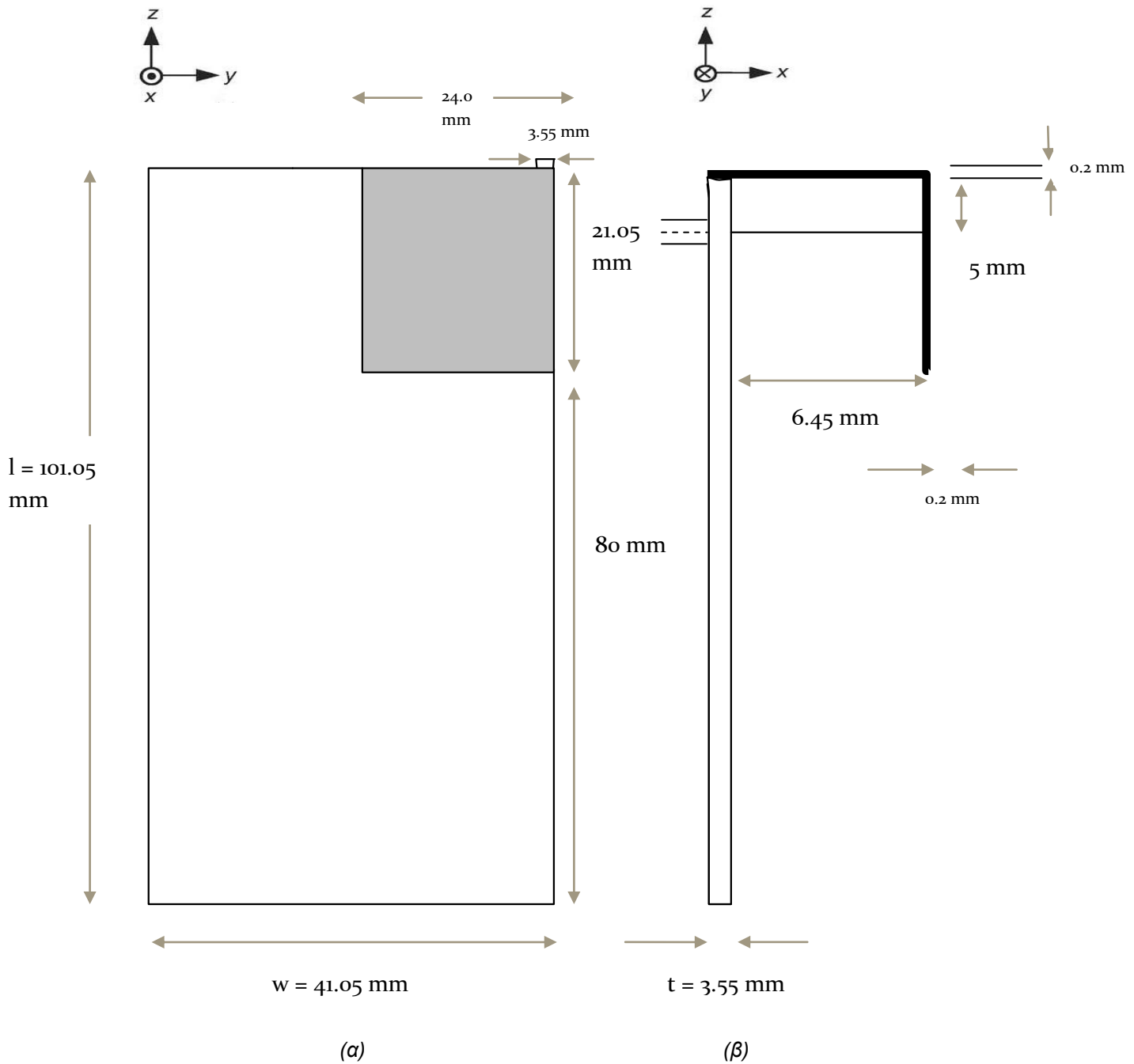
Εικόνα 7.7 : 3D απεικόνιση τερματικής συσκευής στα 900 MHz

7.2.2 Κατασκευή τερματικής συσκευής στα 1800 MHz

Σχεδιασμός και περιγραφή τερματικής συσκευής

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ένα μοντέλο κινητού τηλεφώνου με συχνότητα λειτουργίας στα 1800 MHz, το οποίο αποτελείται από μια patch κεραία κι ένα επίπεδο

γείωσης (groundplane). Οι διαστάσεις του πλαισίου είναι $101.05 \text{ mm} \times 41.05 \text{ mm} \times 3.55 \text{ mm}$ [(l)μήκος \times (w)πλάτος \times (t)πάχος].



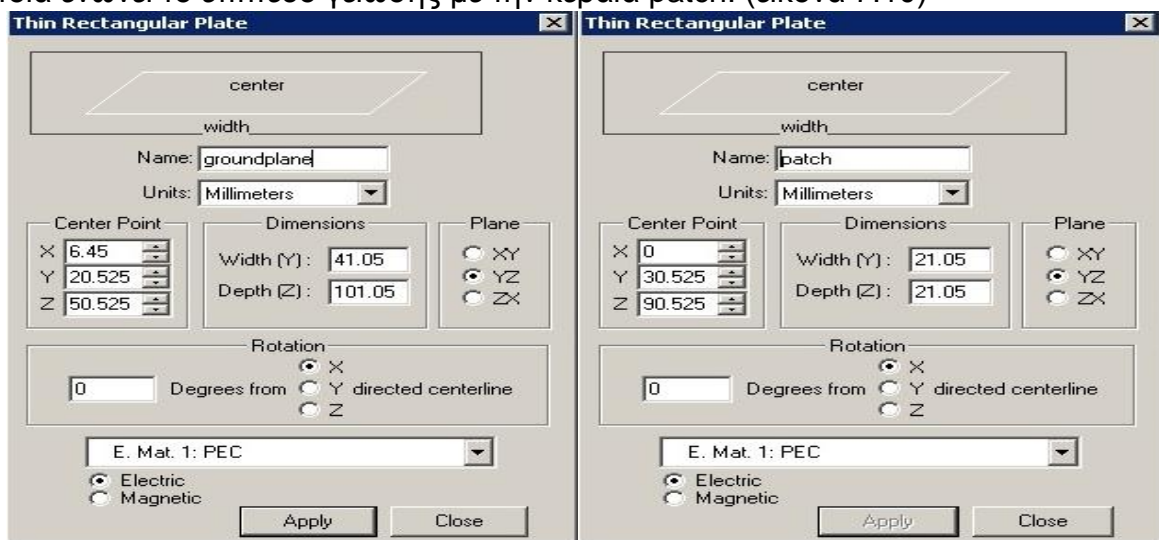
Εικόνα 7.8: Μοντέλο τηλεφώνου με εσωτερική patch κεραία για 1800 MHz. (α) Πρόσοψη και (β) πλάγια όψη.

Μοντελοποίηση τερματικής συσκευής

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού του με βάση το σχήμα της εικόνας 7.8.

Η γεωμετρία που κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε σε ένα πλέγμα FDTD διαστάσεων $46 \times 81 \times 141 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού (ή μέγεθος του κύβου Y_{ee})

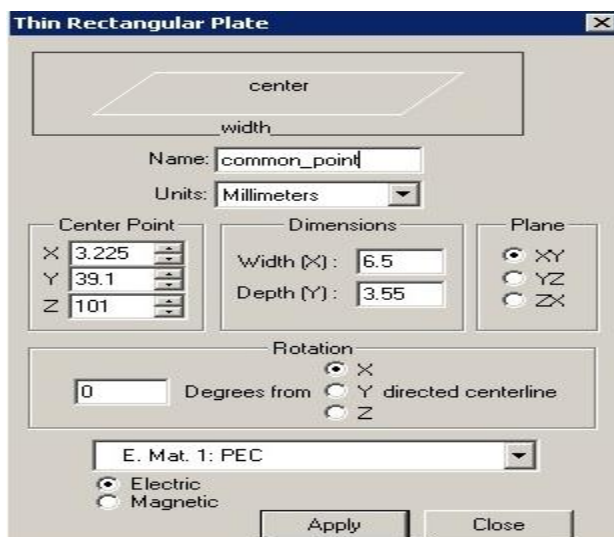
που επιλέχθηκε είναι 1mm και οι διαστάσεις του είναι $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$. Αρχικά, στο YZ επίπεδο τοποθετείται μια ορθογωνική πλάκα (rectangular plate) που αναπαριστά το επίπεδο γείωσης όπου $Y(\text{width})=41.05$ και $Z(\text{depth})=101.05$. Οι μονάδες ρυθμίζονται σε χιλιοστά και ορίζεται υλικό της πλάκας PEC (Perfect Electric Conductor). Ομοίως και για τις υπόλοιπες πλάκες που θα εισαχθούν στην πορεία. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα 7.9 (α). Στη συνέχεια εισάγεται ακόμη μια ορθογωνική πλάκα προκειμένου να αναπαρασταθεί η κεραία patch, όπως περιγράφεται στην εικόνα 7.9 (β). Κατόπιν δημιουργούμε μια ορθογώνια πλάκα, η οποία ενώνει το επίπεδο γείωσης με την κεραία patch. (εικόνα 7.10)



(α)

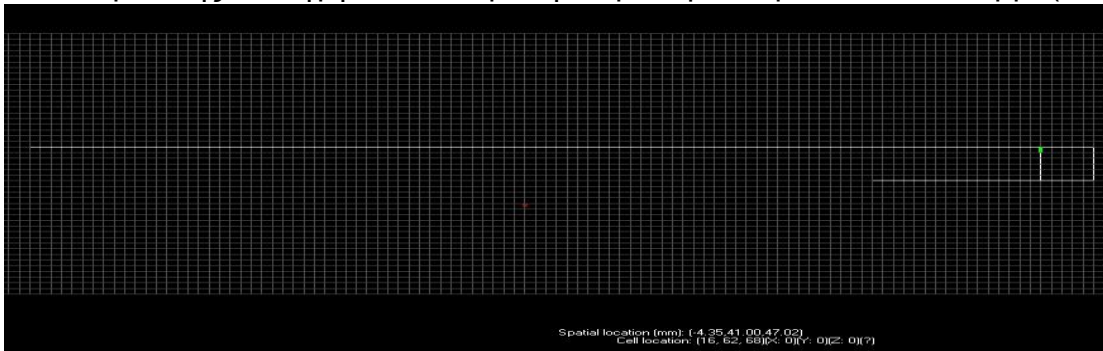
(β)

Εικόνα 7.9: Προσθήκη ορθογώνιας πλάκας που αναπαριστά το επίπεδο γείωσης (α) και την κεραία patch (β)



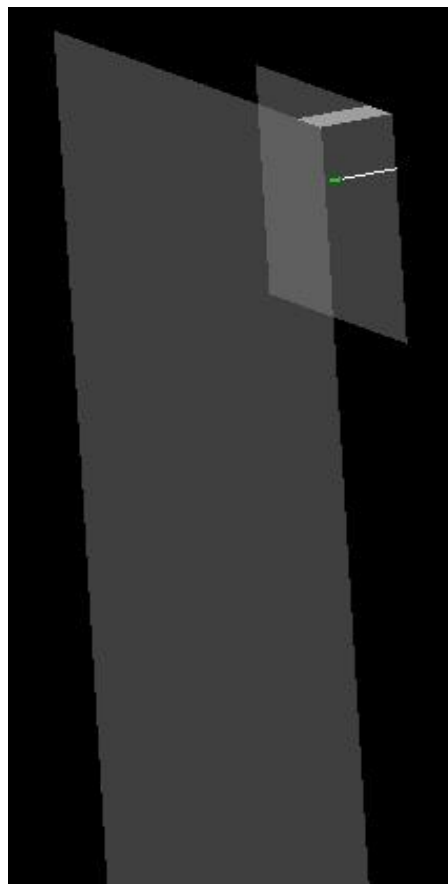
Εικόνα 7.10 : Ορθογωνική πλάκα η οποία αναπαριστά το κοινό σημείο μεταξύ επιπέδου γείωσης και patch κεραίας.

Η πηγή τοποθετείται δίπλα στο επίπεδο γείωσης, πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο ZX slice:62 σε απόσταση 7.5 mm (8 κελιά) από το κοινό σημείο κεραίας patch και επιπέδου γείωσης. Η πηγή ενώνεται με την κεραία patch με ένα απλό σύρμα(wire).



Εικόνα 7.11 : ZX επίπεδο, slice: 62. Τοποθέτηση πηγής

Το μοντέλο τερματικής συσκευής στα 1800 MHz έχει την ακόλουθη μορφή.



Εικόνα 7.12 : 3D απεικόνιση τερματικής συσκευής στα 1800 MHz

7.3 Έλεγχος ορθής λειτουργίας κεραίας

Πριν γίνει η τοποθέτηση της κεραίας δίπλα στο μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού για κάθε περίπτωση (κατακόρυφη θέση, κλίση 30 μοίρες, κλίση 45 μοίρες) και για κάθε συχνότητα (900 MHz, 1800 MHz), πραγματοποιήθηκε έλεγχος συντονισμού,

προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει καλή προσαρμογή της κεραίας. Στη συνέχεια παρατίθενται οι ορισμοί κάποιων απαραίτητων εννοιών που αφορούν τον έλεγχο προσαρμογής.

Συντονισμός της κεραίας ονομάζεται η διαδικασία μέσω της οποίας το φανταστικό μέρος της αντίστασης εισόδου μηδενίζεται σε μια ορισμένη συχνότητα ω_0 . Συνεπώς κατά τον συντονισμό ισχύει:

$$\text{Im}\{Z_a(\omega_0)\} = X_a(\omega_0) = 0$$

Ο συντονισμός μιας κεραίας για κεντρική συχνότητα ω_0 του εύρους συχνοτήτων που αυτή εκπέμπει ή λαμβάνει, επιφέρει σημαντική μείωση του φανταστικού μέρους για ένα ικανό εύρος συχνοτήτων $\Delta\omega$ γύρω από την ω_0 . Για το εύρος συχνοτήτων από $\omega_0 - \Delta\omega/2$ έως $\omega_0 + \Delta\omega/2$, το φανταστικό μέρος είναι σχετικά μικρό και η κεραία θεωρείται συντονισμένη. Αυτό το εύρος $\Delta\omega$ είναι το εύρος ζώνης της κεραίας.

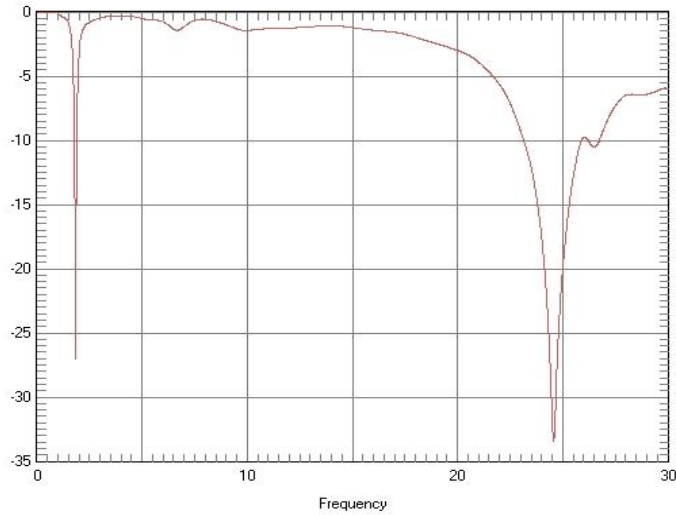
Ο **συντελεστής ανάκλασης** (Reflection Coefficient) ή παράγοντας s_{11} εκφράζει την ισχύ του ανακλώμενου κύματος σε σχέση με το προσπίπτον κύμα. Οι παράμετροι σκέδασης S προσδιορίζουν την έξοδο σε μια συγκεκριμένη θύρα i ενός δικτύου όταν μια άλλη θύρα j έχει διεγερθεί. Επιπλέον το μέγεθος S_{ii} μας δείχνει το ποσοστό της ισχύος που φτάνει στην είσοδο i και επιστρέφει στην πηγή διέγερσης.

Το **εύρος ζώνης** (Bandwidth, BW) είναι η περιοχή συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα συντονισμού στην οποία η κεραία λειτουργεί αποτελεσματικά. Προσδιορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή ανάκλασης, όταν αυτός λαμβάνει τιμές μικρότερες από -10 dB. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η απαίτηση αυτή μπορεί να είναι ακόμα πιο χαλαρή (πχ -6 dB). Το φάσμα συχνοτήτων που ικανοποιούν αυτόν τον περιορισμό ονομάζεται εύρος ζώνης.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται έλεγχος προσαρμογής, όπου εξετάζεται η παράμετρος σκέδασης S_{11} , καθώς αποτελεί μέτρο ποιότητας της προσαρμογής. Αν η παράμετρος αυτή έχει τιμή μικρότερη από -10 dB σε μια περιοχή συχνοτήτων, τότε η λειτουργία της κεραίας είναι ικανοποιητική στην περιοχή αυτή από την άποψη δημιουργίας στάσιμων κυμάτων, καθώς μόνο το 10% της ισχύος που εφαρμόζεται στην κεραία ανακλάται προς τη γραμμή τροφοδοσίας.

Το διάγραμμα s_{11} συναρτήσει της συχνότητας εξάγεται από το λογισμικό που χρησιμοποιούμε. Πριν γίνει η εκτέλεση της σε προσομοίωσης ορίζεται γκαουσιανή κυματομορφή και γίνεται ενεργοποίηση των παραμέτρων S.

Αφού εκτελεστεί η προσομοίωση, προκύπτει ένα plot που στον κάθετο άξονα αναπαριστάται η παράμετρος s_{11} (dB) και στον οριζόντιο άξονα η συχνότητα (GHz).



Εικόνα 7.13: Διάγραμμα παραμέτρου s_{11} (dB) συναρτήσει της συχνότητας (GHz)

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάγνωση του τύπου αρχείου s_{11} μέσω MATLAB προκειμένου να έχουμε δυνατότητα επεξεργασίας του διαγράμματος.

```

File Edit Format View Help
# 1 1 1 1 26 62 114 50.000000 50.000000 0 1
# frequency domain normalized s-params for port 1, port 1 active
# freq. Hz Re{s(1,1)} Im{s(1,1)} Mag{s} (dB) phase{s} (deg)
#@
3.169285e+007 -9.971021e-001 7.068307e-002 -3.437819e-003 175.945
4.753928e+007 -9.949904e-001 1.069493e-001 6.267320e-003 173.865
6.338571e+007 -9.911656e-001 1.437506e-001 1.332726e-002 171.748
7.923214e+007 -9.852821e-001 1.806008e-001 1.473008e-002 169.613
9.507856e+007 -9.773609e-001 2.168855e-001 9.863164e-003 167.488
1.109250e+008 -9.677877e-001 2.521284e-001 7.889685e-004 165.398
1.267714e+008 -9.571409e-001 2.861947e-001 -8.581294e-003 163.353
1.426178e+008 -9.459260e-001 3.193373e-001 -1.412710e-002 161.346
1.584643e+008 -9.343421e-001 3.520585e-001 -1.330833e-002 159.354
1.743107e+008 -9.221897e-001 3.848536e-001 -6.318474e-003 157.348
1.901571e+008 -9.089685e-001 4.179516e-001 3.937916e-003 155.307
2.060036e+008 -8.941198e-001 4.511787e-001 1.306259e-002 153.224
2.218500e+008 -8.773056e-001 4.840113e-001 1.704316e-002 151.114
2.376964e+008 -8.585884e-001 5.157993e-001 1.397442e-002 149.005
2.535428e+008 -8.384255e-001 5.460574e-001 4.930395e-003 146.924
2.693892e+008 -8.174724e-001 5.746877e-001 -6.401370e-003 144.893
2.852357e+008 -7.962861e-001 6.020239e-001 -1.520785e-002 142.909
3.010821e+008 -7.750621e-001 6.286708e-001 -1.763225e-002 140.954
3.169285e+008 -7.535369e-001 6.552057e-001 -1.255859e-002 138.993
3.327750e+008 -7.311089e-001 6.818829e-001 -2.239425e-003 136.995
3.486214e+008 -7.071263e-001 7.084813e-001 8.561963e-003 134.945
3.644678e+008 -6.812142e-001 7.343776e-001 1.458226e-002 132.849
3.803142e+008 -6.534800e-001 7.588194e-001 1.232953e-002 130.734
3.961607e+008 -6.244934e-001 7.812761e-001 1.668967e-003 128.636
4.120071e+008 -5.950370e-001 8.017000e-001 -1.395546e-002 126.584
4.278535e+008 -5.657357e-001 8.205656e-001 -2.882573e-002 124.584
4.437000e+008 -5.367401e-001 8.386520e-001 -3.739241e-002 122.619
4.595464e+008 -5.076219e-001 8.566629e-001 -3.684803e-002 120.649
4.753928e+008 -4.775451e-001 8.748553e-001 -2.866574e-002 118.628
4.912392e+008 -4.456496e-001 8.928629e-001 -1.824494e-002 116.525
5.070857e+008 -4.114712e-001 9.098159e-001 -1.272761e-002 114.335
5.229321e+008 -3.751909e-001 9.247156e-001 -1.798606e-002 112.084
5.387785e+008 -3.375771e-001 9.369022e-001 -3.600424e-002 109.815
5.546250e+008 -2.996218e-001 9.463828e-001 -6.381444e-002 107.568
5.704714e+008 -2.620275e-001 9.538462e-001 -9.447646e-002 105.361
5.863178e+008 -2.247849e-001 9.603227e-001 -1.199963e-001 103.174
6.021642e+008 -1.870661e-001 9.666256e-001 -1.351546e-001 100.953
6.180106e+008 -1.475163e-001 9.728269e-001 -1.405592e-001 98.622
6.338571e+008 -1.048419e-001 9.780364e-001 -1.432789e-001 96.119
6.497035e+008 -5.842859e-002 9.806218e-001 -1.545781e-001 93.410
6.655500e+008 -8.677991e-003 9.788051e-001 -1.857342e-001 90.508
6.813964e+008 4.314090e-002 9.713662e-001 -2.437824e-001 87.457
6.972428e+008 9.551465e-002 9.580888e-001 -3.289351e-001 84.307
7.130892e+008 1.475121e-001 9.396612e-001 -4.348434e-001 81.078
7.289356e+008 1.993958e-001 9.169698e-001 -5.522513e-001 77.732
7.447821e+008 2.526167e-001 8.900248e-001 -6.754684e-001 74.154

```

Εικόνα 7.14: Τύπος αρχείου s_{11}

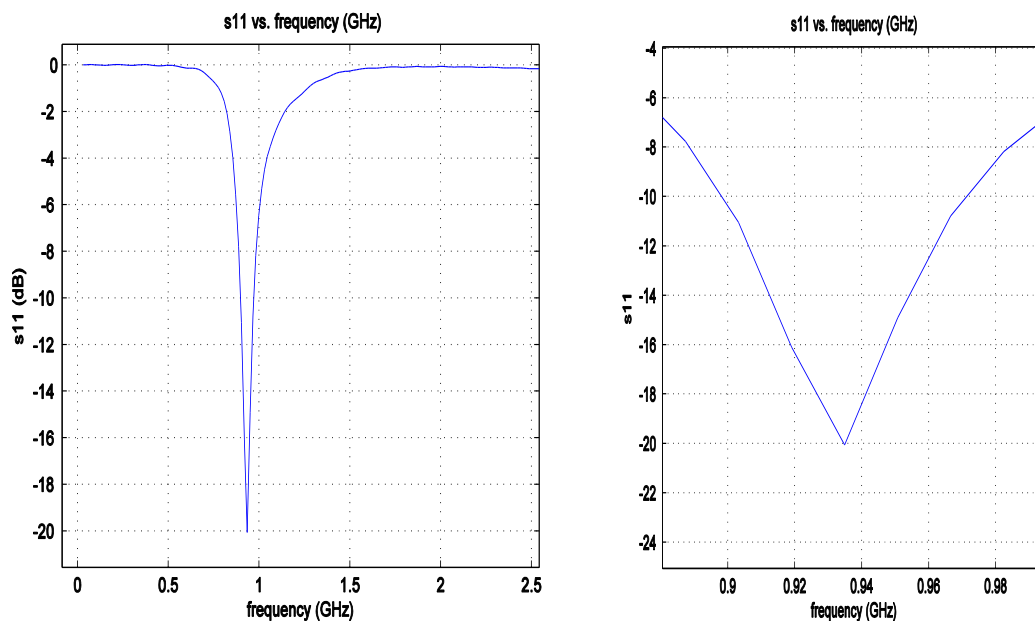
7.4 Μοντέλο τερματικής συσκευής σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι

Πριν τοποθετηθεί η κάθε τερματική συσκευή δίπλα στο μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού πραγματοποιείται έλεγχος προσαρμογής. Αφού αυτός καταστεί επιτυχής, προχωρούμε στην κατασκευή της γεωμετρίας του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος που αποτελεί αντικείμενο μελέτης μας. Σε αυτή την παράγραφο μελετούμε την περίπτωση τοποθέτησης της τερματικής συσκευής στα 900 MHz αλλά και τερματικής συσκευής στα 1800 MHz σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί.

7. 4.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο κεφάλι

Έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Η κεραία συντονίζεται στα 935 MHz με συντελεστή ανάκλασης -20.064 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 895 MHz έως 970 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

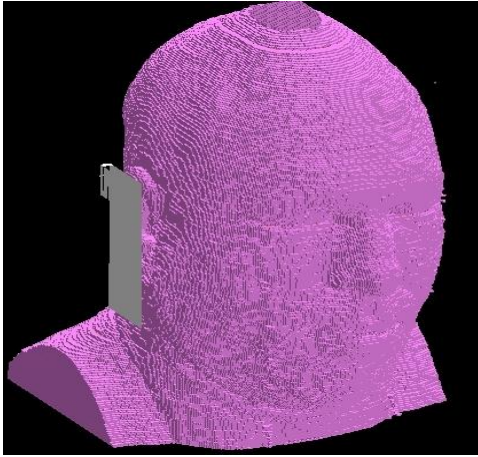


Εικόνα 7.15: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 900 MHz και ένα λεπτομερές μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού (βλ παράγραφο 6.8). Αφού γίνει αλλαγή των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού (με βάση τον πίνακα που δόθηκε στο Κεφάλαιο 6), αυτό εισήχθη σαν .id file (file→Geometry→Import →Mesh Object→Import From ID file) σε ένα πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300$ mm. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου

Υεε είναι 1 mm και οι διαστάσεις αυτού 1 mm × 1 mm × 1 mm. Στη συνέχεια εισήχθει η τερματική συσκευή και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm. Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Επιπλέον στα 900 MHz, η ισχύς εισόδου είναι 0.25 W.



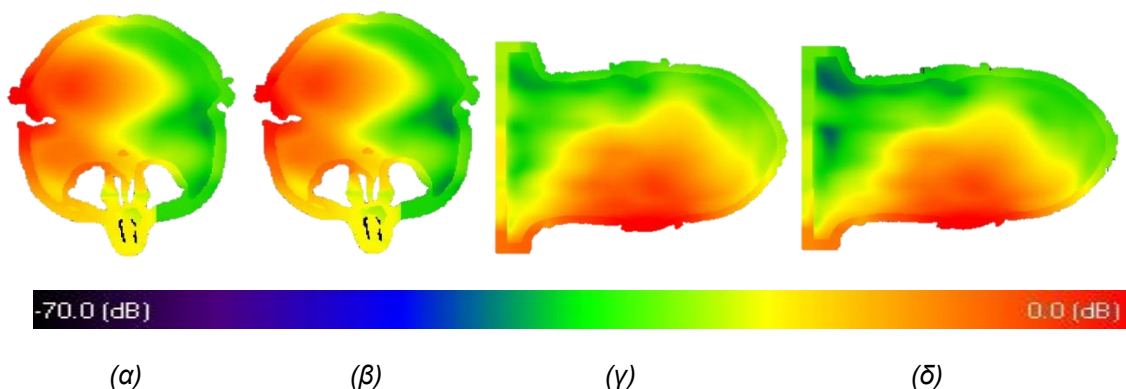
Εικόνα 7.16: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 0.5 cm από το μοντέλο κεφαλιού.

Αποτελέσματα

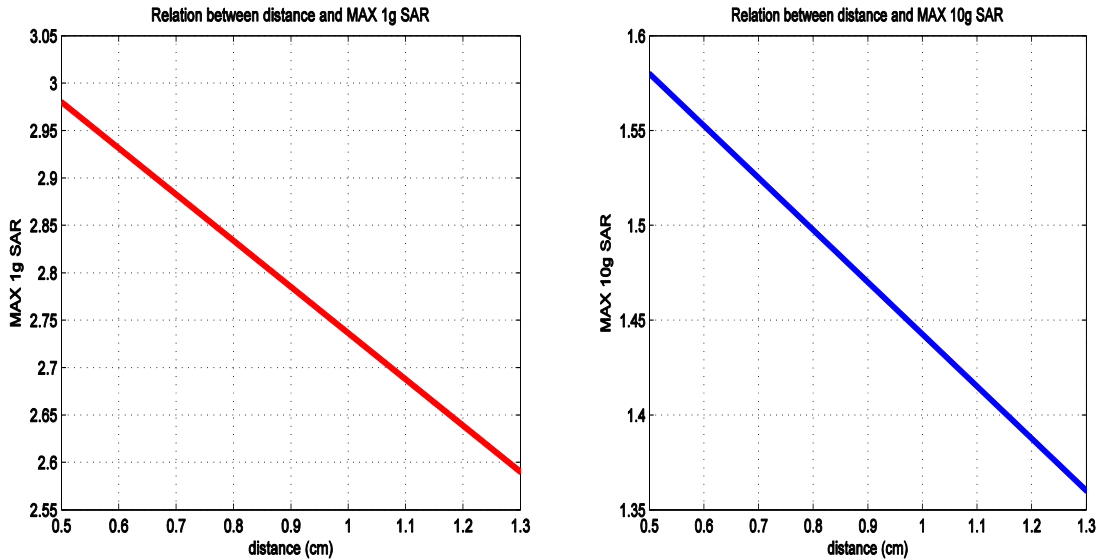
Μετά την εκτέλεση προσομοιώσεων για δύο διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τερματικής συσκευής και αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού, προέκυψαν οι μέγιστες τοπικές και μέσου όρου τιμές SAR. Εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης της τερματικής συσκευής- κεφαλιού στις τιμές του Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης (SAR).

Πίνακας 7.1 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, 1g ,10g SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	6.32	2.98	1.58
1.3 cm	5.59	2.59	1.36



Εικόνα 7.17: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)

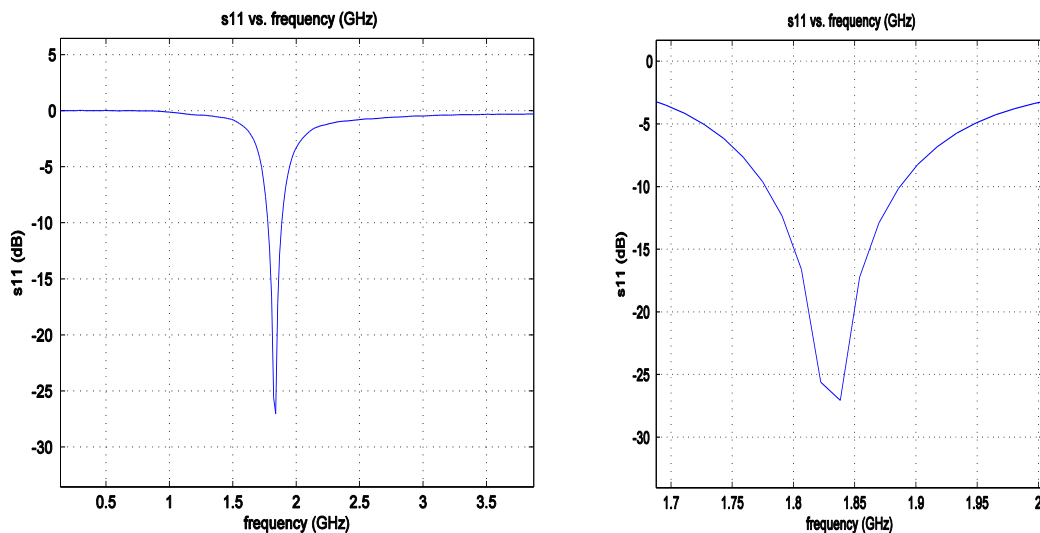


Εικόνα 7.18: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 900 MHz.

7.4.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz σε κατακόρυφη θέση και δίπλα στο κεφάλι

Έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Η κεραία συντονίζεται στα 1838 MHz με συντελεστή ανάκλασης -26.9 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 1777 MHz έως 1885 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

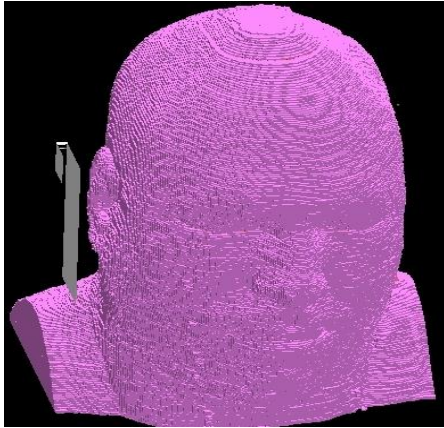


Εικόνα 7.19: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 1800 MHz και ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, αποτελούμενο από 26 ιστούς.

Αρχικά, έγινε τροποποίηση των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού σύμφωνα με τη συχνότητα λειτουργίας της τερματικής συσκευής που εξετάζεται. Στη συνέχεια το μοντέλο κεφαλιού εισήχθη σαν .id file (αρχείο γεωμετρίας) σε ένα πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου Yee είναι 1 mm και οι διαστάσεις αυτού $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times$



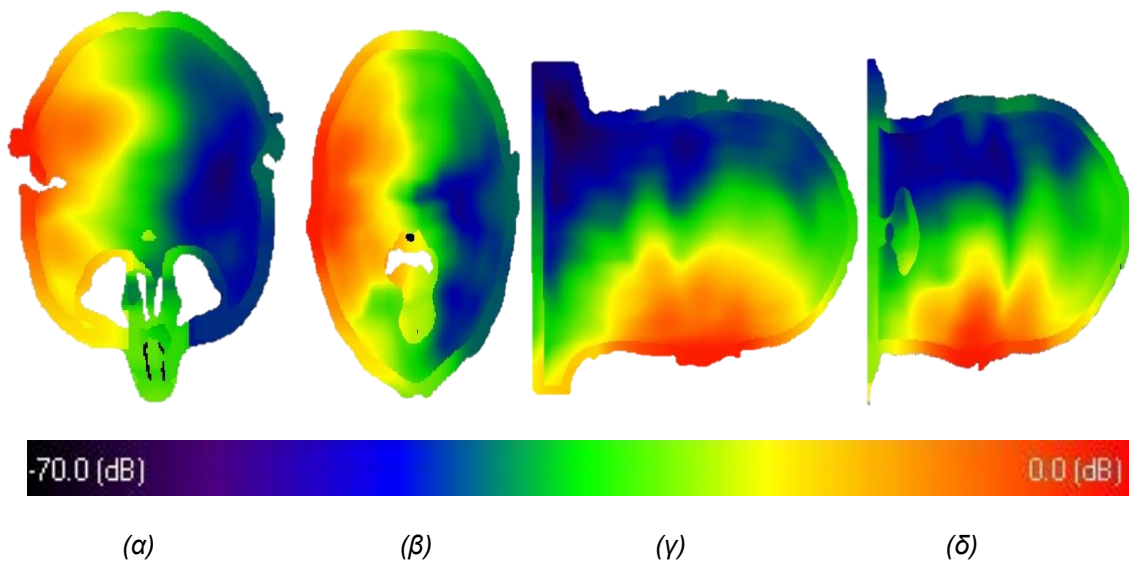
1 mm . Στη συνέχεια εισήχθη η τερματική συσκευή και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm . Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Επιπλέον στα 1800 MHz , η ισχύς εισόδου (ισχύς που χρησιμοποιήθηκε για την κανονικοποίηση) είναι 0.125 W .

Εικόνα 7.20: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 1.3 cm από το μοντέλο κεφαλιού.

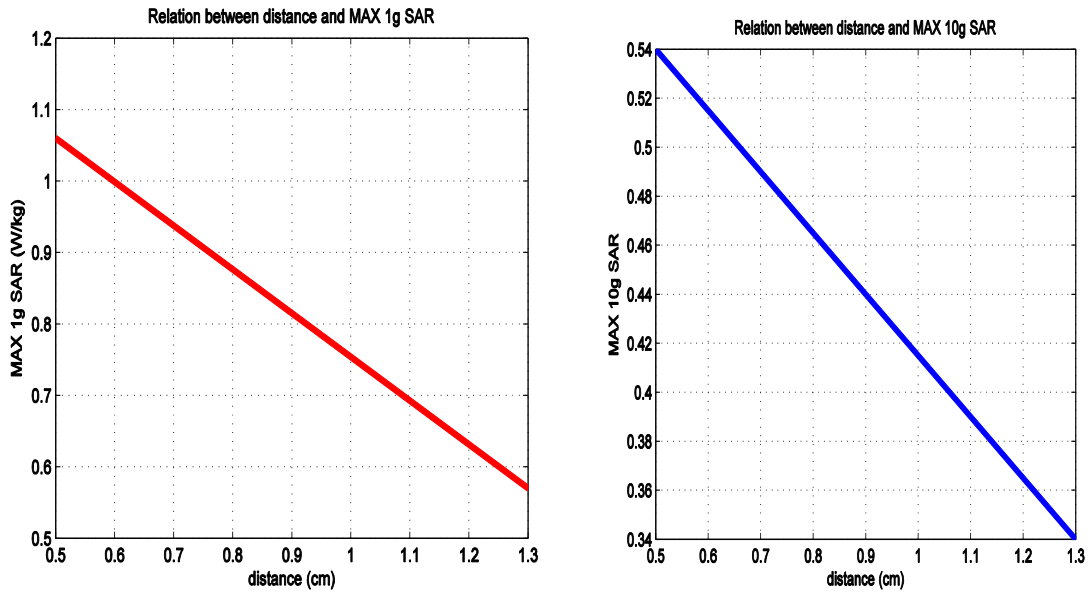
Αποτελέσματα

Πίνακας 7.2 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, $1g$, $10g$ SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	2.52	1.06	0.54
1.3 cm	2.72	0.57	0.34



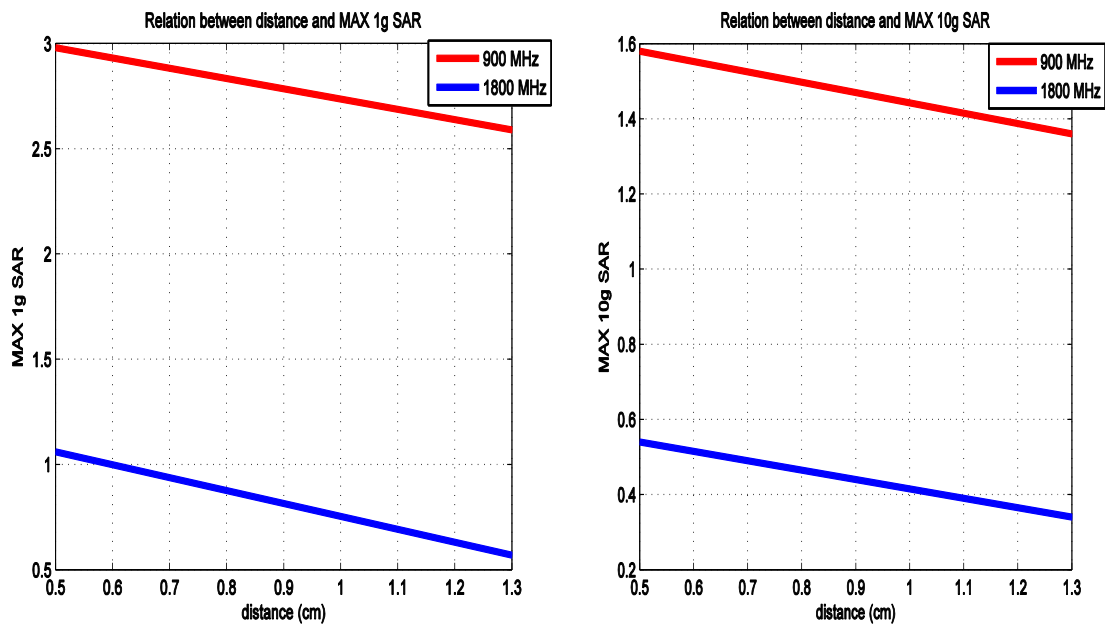
Εικόνα 7.21: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες $10g$ average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)



Εικόνα 7.22: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 1800 MHz.

7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

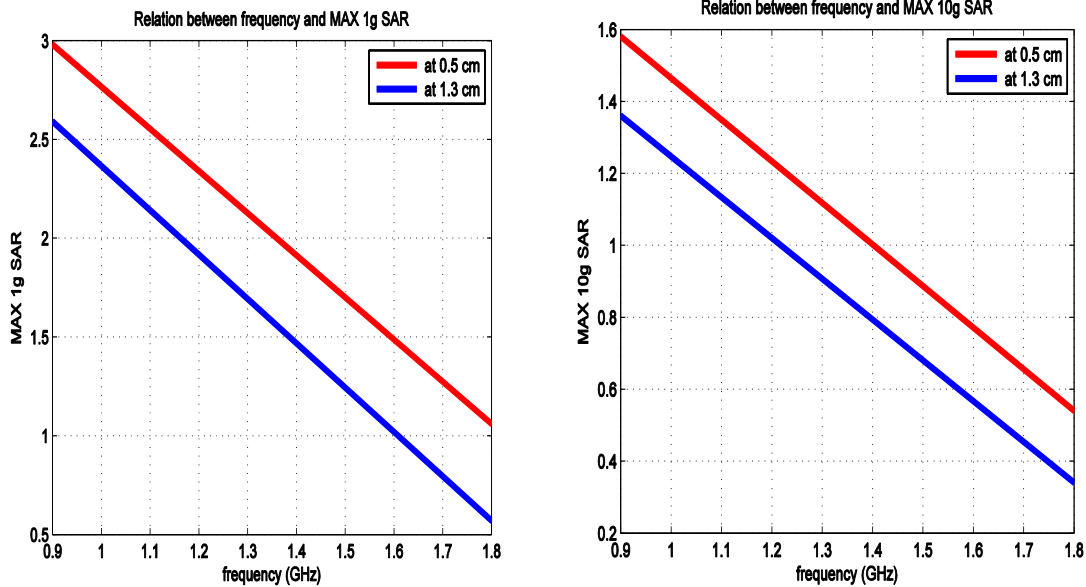
Εκτελέστηκαν συνολικά 4 προσομοιώσεις, 2 προσομοιώσεις σε κάθε συχνότητα, μία προσομοίωση για κάθε μια από τις δύο αποστάσεις. Οι δύο διαφορετικές συχνότητες ήταν 900MHz, 1800MHz με ισχύ εισόδου 0.25 W και 0.125 W αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή των συμπερασμάτων και τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν και στις επόμενες παραγράφους προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί κυρίως η μέγιστη τιμή 10g SAR κι έπειτα η μέγιστη τιμή 1g SAR. Οι τοπικές τιμές δεν λαμβάνονται τόσο πολύ υπόψη, διότι κάποιες από αυτές είναι πολύ υψηλές και δεν είναι πάντοτε αντιπροσωπευτικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο στοχεύουμε στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που θα μπορούσαν να εμφανιστούν από «παραπλανητικές» υψηλές τοπικές τιμές SAR.



Εικόνα 7.23: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού σε συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz.

Αρχικά φαίνεται ότι σημειώνεται μείωση μετρούμενων τιμών SAR με αύξηση της απόστασης μεταξύ τερματικής συσκευής και μοντέλου κεφαλιού. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε καμία από τις δύο αποστάσεις που μελετήθηκαν οι τιμές 10g SAR δεν υπερβαίνουν τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Ωστόσο, η δυσμενέστερη (worst_case) περίπτωση εντοπίζεται στην απόσταση 0.5 cm (η τερματική συσκευή βρίσκεται σχεδόν σε επαφή με το αυτί του μοντέλου), στα 900 MHz όπου η μέγιστη τιμή 10g SAR είναι 1.58 W/kg. Στην ίδια απόσταση στα 1800 MHz η τιμή 10g SAR είναι αρκετά μικρότερη της τάξης των 0.54 W/kg. Η χαμηλότερη τιμή 1g SAR σημειώνεται σε απόσταση 1.3 cm μεταξύ τερματικής συσκευής και μοντέλου κεφαλιού, στα 1800 MHz και είναι 0.57 W/kg. Η καλύτερη περίπτωση από πλευράς χαμηλού δείκτη απορρόφησης παρατηρείται στα 1800 MHz, στην απόσταση 1.3 cm όπου η τιμή 10g SAR είναι μόλις 0.34 W/kg.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα της εικόνας 7.23, γίνεται ευκολα αντιληπτό ότι οι τιμές 1g και 10g SAR είναι γενικότερα υψηλότερες στην συχνότητα των 900 MHz συγκριτικά με τα 1800 MHz. Η πιο αισθητή διαφορά εντοπίζεται στην τιμή 1g SAR στην απόσταση 0.36 cm όπου στα 900 MHz είναι σχεδόν 200% υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στα 1800 MHz στην ίδια απόσταση. Τέλος, να σημειωθεί ότι η περίπτωση τοποθέτησης της τερματικής συσκευής σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί του μοντέλου κεφαλιού δεν αποτελεί μια απόλυτα ρεαλιστική περίπτωση.



Εικόνα 7.24: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας στις αποστάσεις 0.5 cm και 1.3 cm.

7.5 Μοντέλο τερματικής συσκευής με κλίση 30° και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι

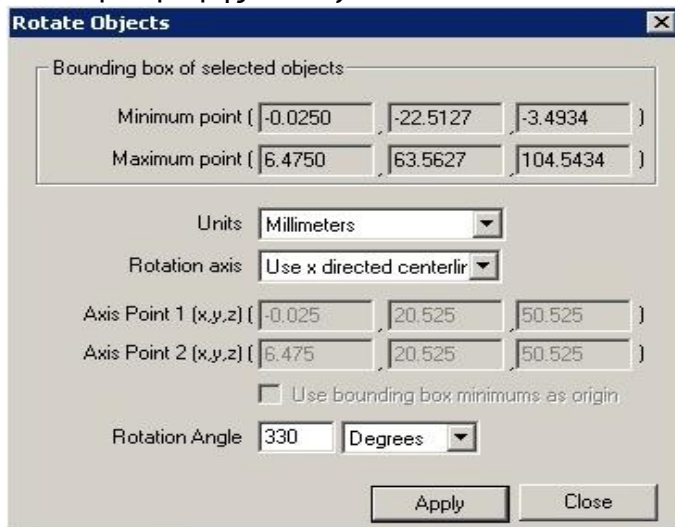
Πριν τοποθετηθεί η κάθε τερματική συσκευή δίπλα στο μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού πραγματοποιείται έλεγχος προσαρμογής. Σε αυτή την περίπτωση με κλίση 30 μοιρών που εξετάζεται, ο έλεγχος θα γίνει αφότου η τερματική συσκευή περιστραφεί. Στη συνέχεια, προχωρούμε στην κατασκευή της γεωμετρίας του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος που αποτελεί αντικείμενο μελέτης μας. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την περίπτωση τοποθέτησης της τερματικής συσκευής στα 900 MHz αλλά και τερματικής συσκευής στα 1800 MHz με κλίση 30 μοιρών δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού.

7. 5.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz με κλίση 30° και δίπλα στο κεφάλι

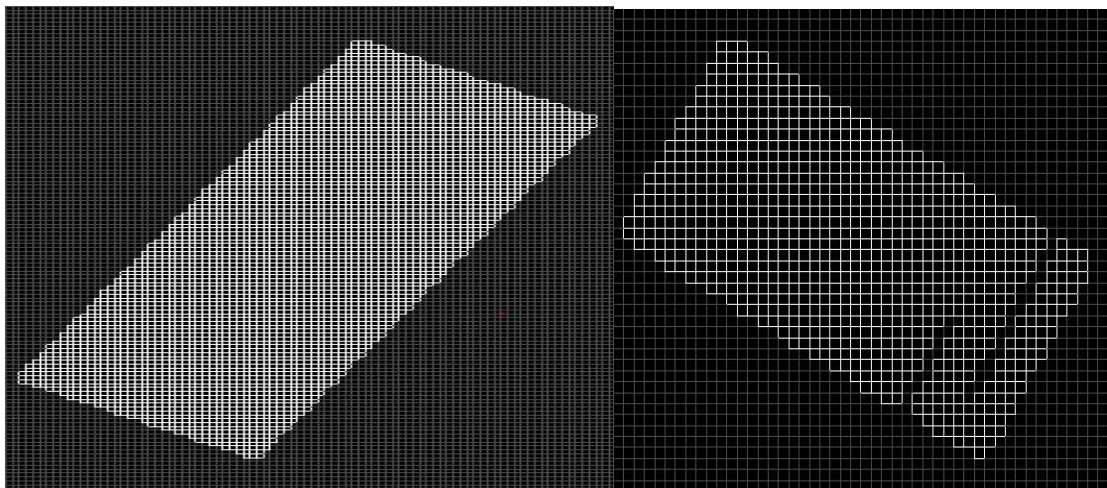
Περιστροφή τερματικής συσκευής και έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Στην περίπτωση προσανατολισμού της τερματικής συσκευής με κλίση 30 μοιρών, έγινε περιστροφή της διάταξης προκειμένου έπειτα να εξεταστεί αν είναι καλή η προσαρμογή. Συγκεκριμένα, ομοδοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία της διάταξης - τερματικής συσκευής (δηλαδή κεραία patch, επίπεδο γείωσης, κοινό σημείο) μέσω της επιλογής “Group” και στη συνέχεια περιστάθηκαν με την επιλογή “Rotate”. Αναλυτικότερα, Selected Objects→Edit/Transform Operations → Rotate. Το μόνο στοιχείο το οποίο δεν μπορούσε να μετακινηθεί είναι το wire, για αυτό και μετά την

περιστροφή ξανασχεδιάστηκε. Βρισκόμαστε στο επίπεδο YZ συνεπώς ορίζουμε άξονα περιστροφής τον άξονα X.



Εικόνα 7.25: Ορισμός άξονα περιστροφής και κλίσης σε μοίρες

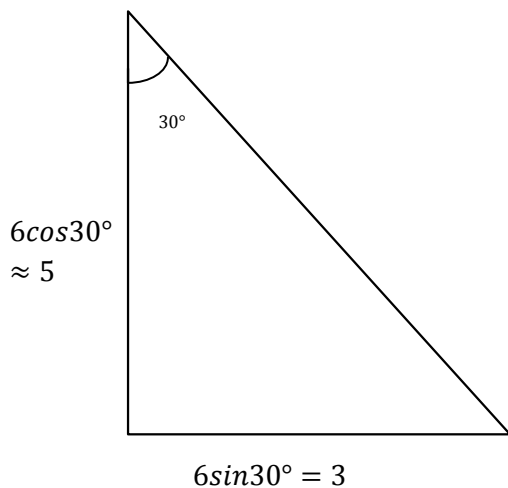


(α)

(β)

Εικόνα 7.26: YZ επίπεδο, slice:33 (α) και slice:26 (β)

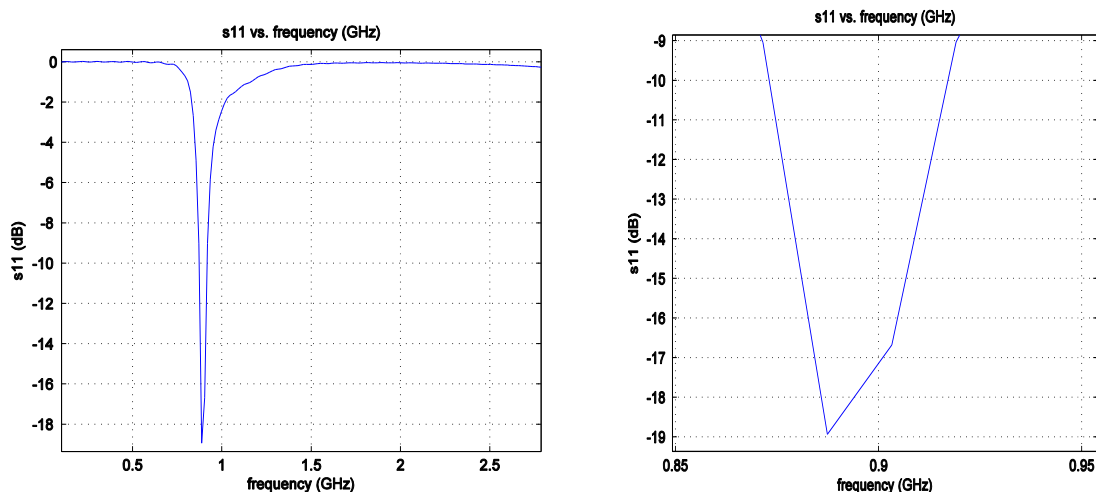
Από την εικόνα 7.26 παρατηρείται ότι μετά την περιστροφή το μοντέλο της τερματικής συσκευής υφίσταται αλλοίωση. Επομένως, ξαναυπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τοποθέτησης της πηγής και του wire. Μετά από δοκιμές προέκυψε:



Στο επίπεδο YZ, slice:26 μετακινούμεστε 5 κελιά προς τα κάτω και 3 κελιά προς τα δεξιά και βρισκόμαστε σε ένα νέο σημείο με συντεταγμένες (26, 86, 106) --> cell location

Στη συνέχεια πηγαίνουμε στο επίπεδο ZX, slice:86 προκειμένου να τοποθετηθεί η πηγή.

Η κεραία συντονίζεται στα 888 MHz με συντελεστή ανάκλασης -19 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 875 MHz έως 915 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

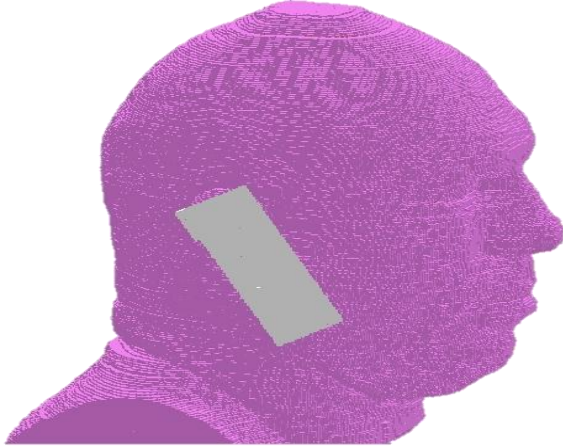


Εικόνα 7.27: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 900 MHz και ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού. Αρχικά, έγινε αλλαγή των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού (με βάση τον πίνακα που δόθηκε στο Κεφάλαιο 6). Κατασκευάστηκε πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου Yee είναι 1 mm και οι διαστάσεις αυτού $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Μετά απ' την κατασκευή του πλέγματος ακολούθησε εισαγωγή του μοντέλου κεφαλιού (με import .id file). Έπειτα εισήχθη η τροποποιημένη τερματική συσκευή (με περιστροφή) σαν αρχείο γεωμετρίας .id file (file→Geometry→Import →Mesh Object→Import From ID file). Η κεραία

μετακινήθηκε και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm. Να σημειωθεί ότι η πηγή και το wire επανατοποθετήθηκαν. Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Επιπλέον στα 900 MHz, η ισχύς εισόδου είναι 0.25 W.

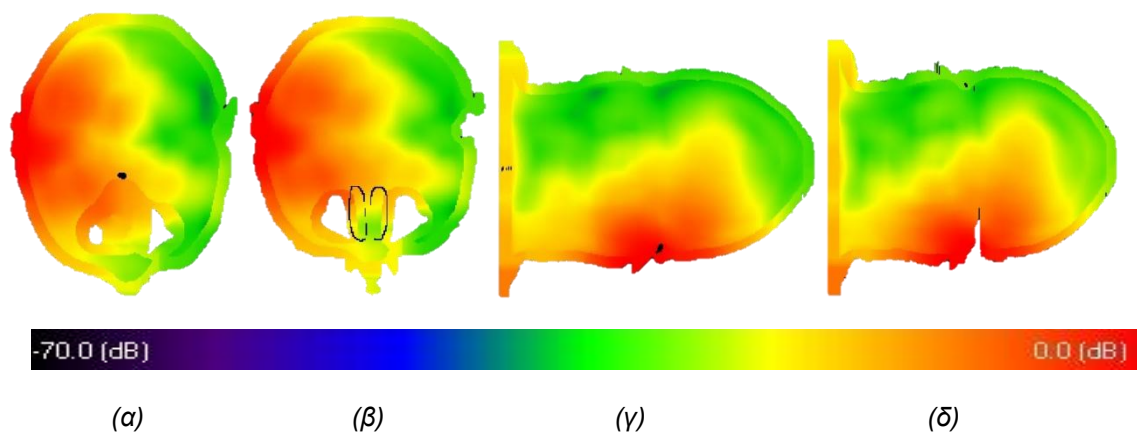


Εικόνα 7.28: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 0.5 cm από το μοντέλο κεφαλιού.

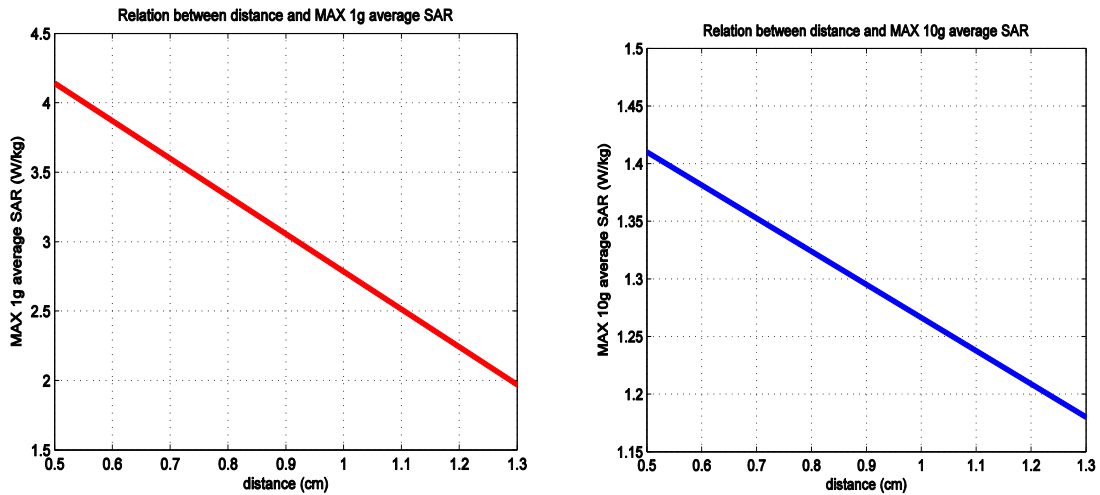
Αποτελέσματα

Πίνακας 7.3 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, 1g , 10g SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	9.93	4.14	1.41
1.3 cm	6.21	1.97	1.18



Εικόνα 7.29: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)

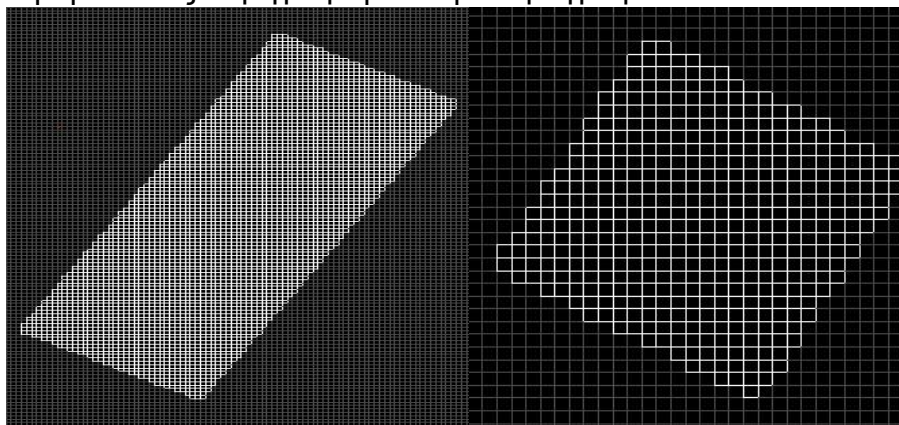


Εικόνα 7.30: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 900 MHz.

7.5.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz με κλίση 30° και δίπλα στο κεφάλι

Περιστροφή τερματικής συσκευής και έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Πραγματοποιήθηκε περιστροφή της τερματικής συσκευής ώστε να έχει κλίση 30 μοιρών, προκειμένου στη συνέχεια να εξεταστεί αν είναι καλή η προσαρμογή. Συγκεκριμένα, ομοδοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία της διάταξης - τερματικής συσκευής (δηλαδή κεραία patch, επίπεδο γείωσης, κοινό σημείο) μέσω της επιλογής “Group” και στη συνέχεια περιστάφηκαν με την επιλογή “Rotate”. Αναλυτικότερα, Selected Objects → Edit/Transform Operations → Rotate. Το μόνο στοιχείο το οποίο δεν περιστράφηκε με την διαδικασία ομαδοποίησης κι έπειτα περιστροφής ήταν είναι το wire, για αυτό και μετά την περιστροφή ξανασχεδιάστηκε. Βρισκόμαστε στο επίπεδο YZ συνεπώς ορίζουμε άξονα περιστροφής τον άξονα X. Η διαδικασία περιστροφής πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 7.5.1.

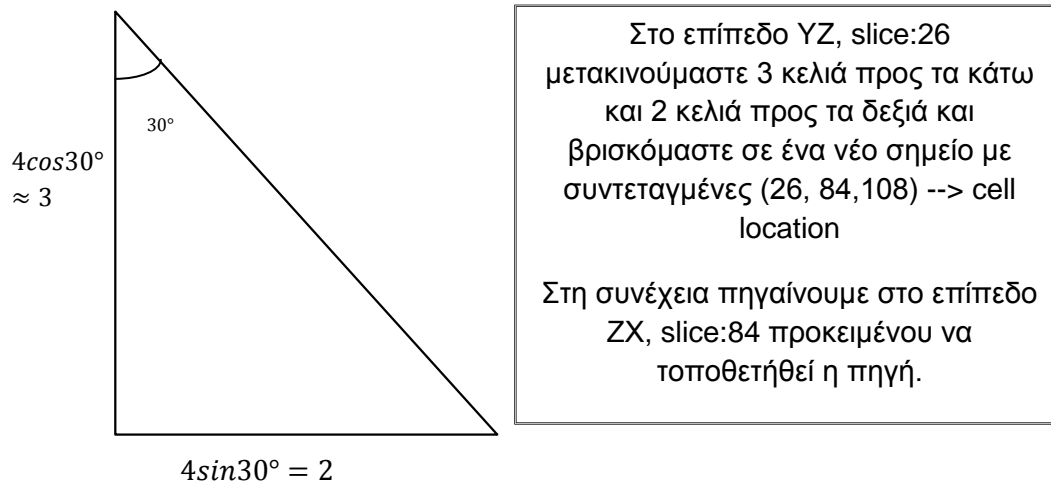


(α)

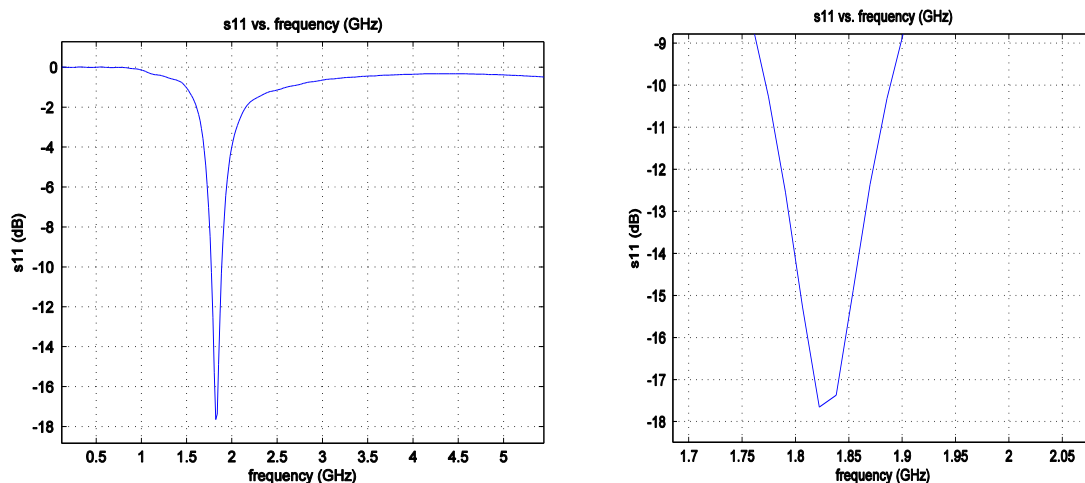
(β)

Εικόνα 7.31: YZ επίπεδο, slice:33 (α) και slice:26 (β)

Από την εικόνα 7.31 διαπιστώνεται ότι μετά την περιστροφή το μοντέλο της τερματικής συσκευής υφίσταται κάποια αλλοίωση. Συνεπώς, υπολογίστηκαν εκ νέου οι συντεταγμένες τοποθέτησης της πηγής και του wire. Μετά από δοκιμές προέκυψε:



Η κεραία συντονίζεται στα 1820 MHz με συντελεστή ανάκλασης -17.5 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 1778 MHz έως 1880 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

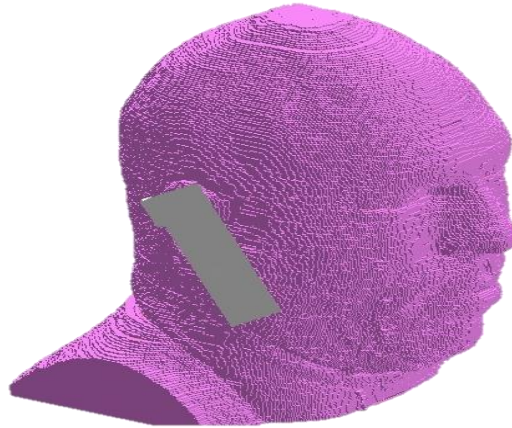


Εικόνα 7.32: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 1800 MHz και ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού. Έγινε αλλαγή των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού (με βάση τον πίνακα που δόθηκε στο Κεφάλαιο 6). Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου Yee είναι 1 mm και οι διαστάσεις αυτού $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Μετά απ' την κατασκευή του πλέγματος ακολούθησε

εισαγωγή του μοντέλου κεφαλιού (με import .id file). Έπειτα εισήχθη η τροποποιημένη τερματική συσκευή (με περιστροφή) σαν αρχείο γεωμετρίας .id file (file→Geometry→Import →Mesh Object→Import From ID file). Η κεραία μετακινήθηκε και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm. Να σημειωθεί ότι η πηγή και το wire επανατοποθετήθηκαν. Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Στα 1800 MHz, η ισχύς εισόδου είναι 0.125 W.

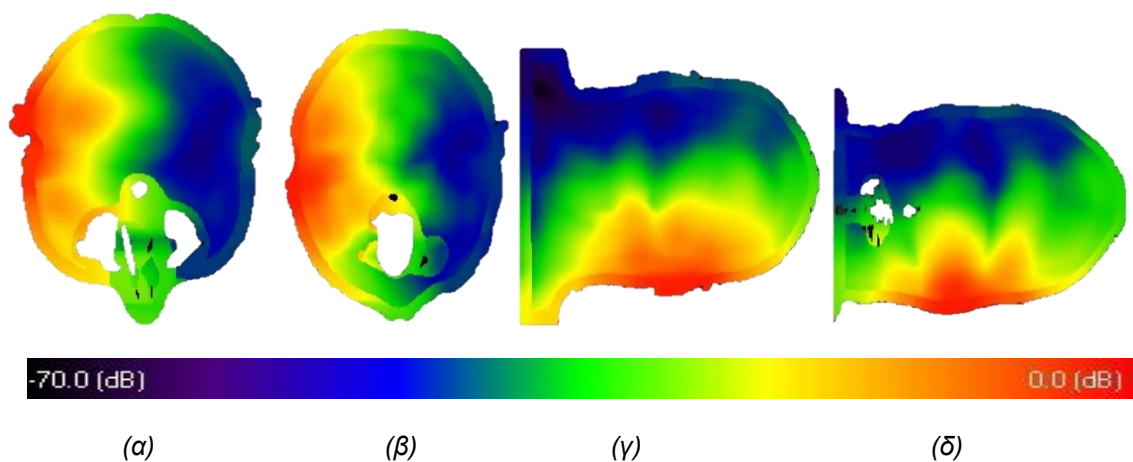


Εικόνα 7.33: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 0.5 cm από μοντέλο κεφαλιού.

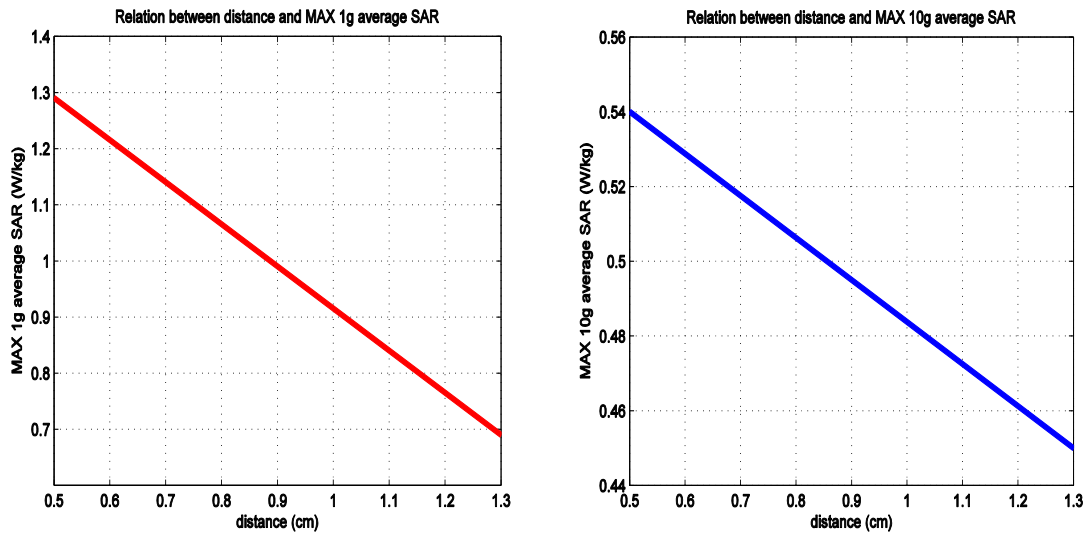
Αποτελέσματα

Πίνακας 7.4 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, 1g , 10g SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	18.69	1.29	0.54
1.3 cm	2.87	0.69	0.45

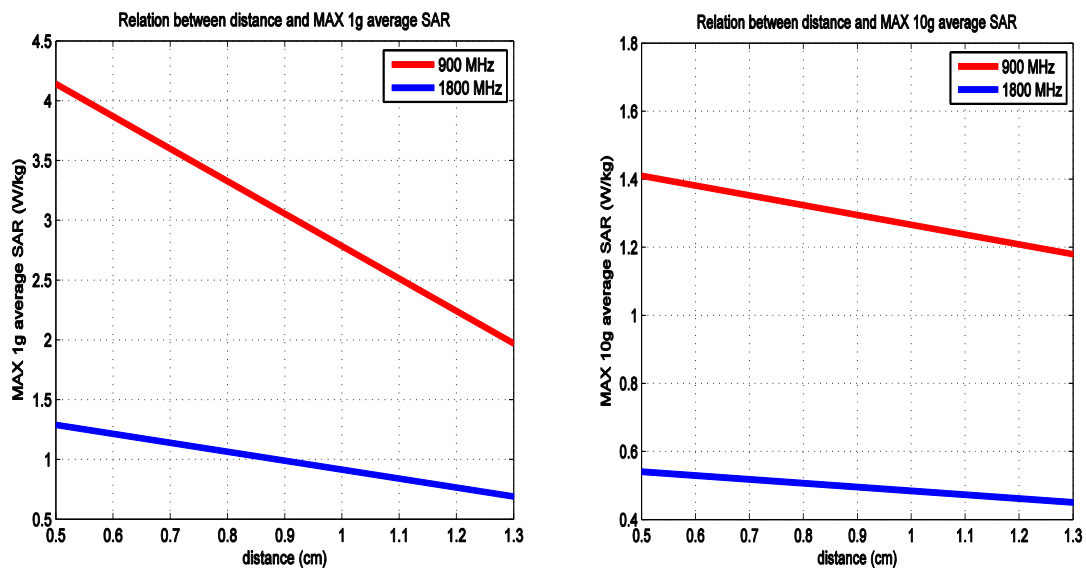


Εικόνα 7.34: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)



Εικόνα 7.35: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 1800 MHz.

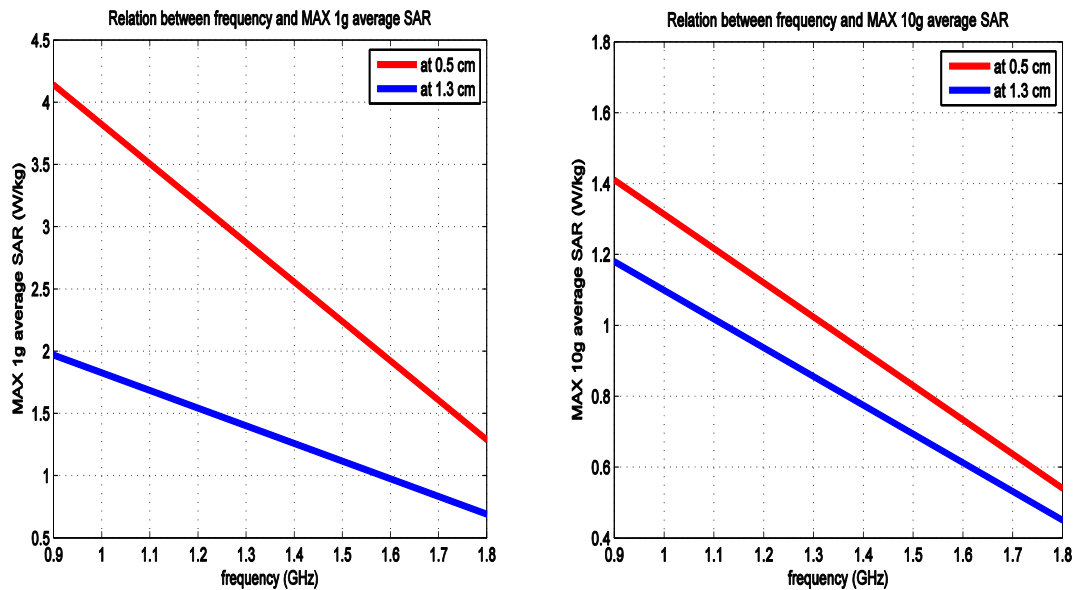
7.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων



Εικόνα 7.36: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής με κλίση 30 μοιρών – κεφαλιού σε συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz.

Από τα διαγράμματα της εικόνας 7.40 παρατηρείται ότι υπάρχει μείωση των τιμών 1g και 10g SAR, καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τερματικής συσκευής με κλίση 30 μοιρών – κεφαλιού. Επιπλέον βλέπουμε ότι οι τιμές 10g SAR δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια ασφαλούς έκθεσης που έχουν οριστεί από την ICNIRP. Πιο συγκεκριμένα, η χειρότερη περίπτωση εμφανίζεται στα 900 MHz σε απόσταση τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 0.5 cm, όπου η τιμή 10g SAR είναι 1.58 W/kg.

Η μικρότερη τιμή 10g SAR εμφανίζεται στα 1800 MHz, στην απόσταση 1.3 cm και είναι της τάξης των 0.34 W/kg.



Εικόνα 7.37: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας στις αποστάσεις 0.5 cm και 1.3 cm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα διαγράμματα της εικόνας 7.37 φαίνεται ότι τόσο οι τιμές 1g SAR όσο και οι τιμές 10g SAR είναι μεγαλύτερες στα 900 MHz απ'ότι στα 1800 MHz και για τις δύο αποστάσεις που εξετάστηκαν. Ειδικότερα, οι τιμές 1g SAR στα 900 MHz είναι υψηλότερες κατά ένα ποσοστό περίπου 200%. Αντίστοιχα και στις τιμές 10g SAR, όπου για παράδειγμα στα 900 MHz, στην απόσταση 1.3 cm η τιμή είναι 1.36 W/kg, ενώ στα 1800 MHz είναι αρκετά μικρότερη και κυμαίνεται μόλις στα 0.34 W/kg.

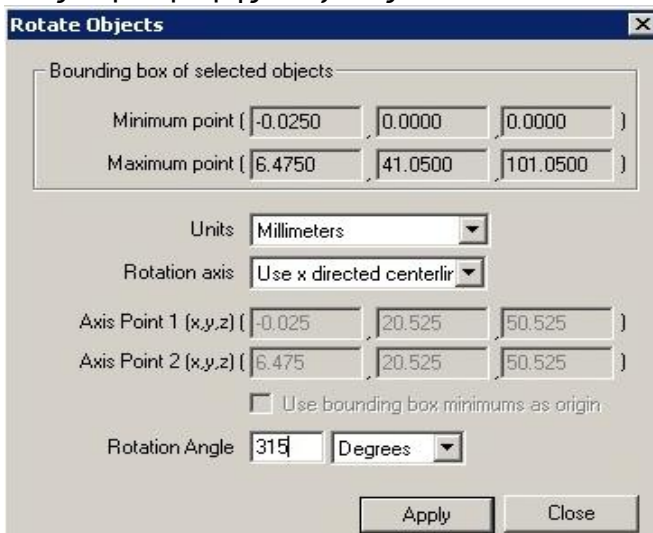
7.6 Μοντέλο τερματικής συσκευής με κλίση 45° και δίπλα στο ανθρώπινο κεφάλι

Πριν τοποθετηθεί η κάθε τερματική συσκευή δίπλα στο μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού πραγματοποιείται έλεγχος προσαρμογής. Σε αυτή την περίπτωση, με κλίση 45 μοιρών η οποία εξετάζεται, ο έλεγχος θα γίνει αφότου η τερματική συσκευή περιστραφεί στο λογισμικό που χρησιμοποιούμε. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η κατασκευή της γεωμετρίας του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος που αποτελεί αντικείμενο μελέτης μας. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την περίπτωση τοποθέτησης της τερματικής συσκευής στα 900 MHz αλλά και τερματικής συσκευής στα 1800 MHz με κλίση 45 μοιρών δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού.

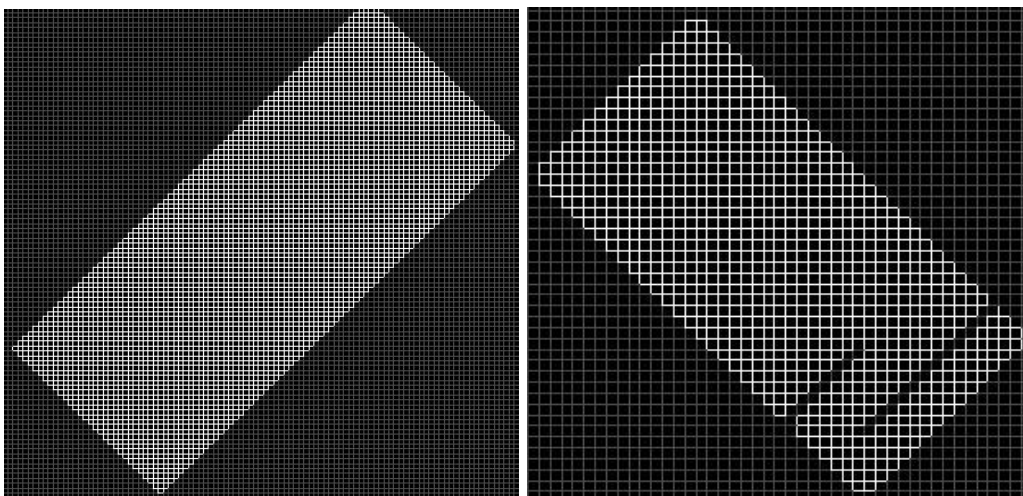
7. 6.1 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 900 MHz με κλίση 45° και δίπλα στο κεφάλι

Περιστροφή τερματικής συσκευής και έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Στην περίπτωση προσανατολισμού της τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών, αρχικά έγινε περιστροφή της διάταξης. Στη συνέχεια, εξετάστηκε αν εμφανίζει καλή προσαρμογή. Συγκεκριμένα, ομοδοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία της διάταξης - τερματικής συσκευής (δηλαδή κεραία patch, επίπεδο γείωσης, κοινό σημείο) μέσω της επιλογής “Group” και στη συνέχεια περιστάφηκαν με την επιλογή “Rotate”. Ειδικότερα, Selected Objects→Edit/Transform Operations → Rotate. Το μόνο στοιχείο το οποίο δεν μπορούσε να μετακινηθεί είναι το wire, για αυτό και μετά την περιστροφή ξανασχεδιάστηκε. Εργαζόμεστε στο επίπεδο YZ συνεπώς ορίστηκε ως άξονας X.



Εικόνα 7.38: Ορισμός άξονα περιστροφής και κλίσης σε μοίρες

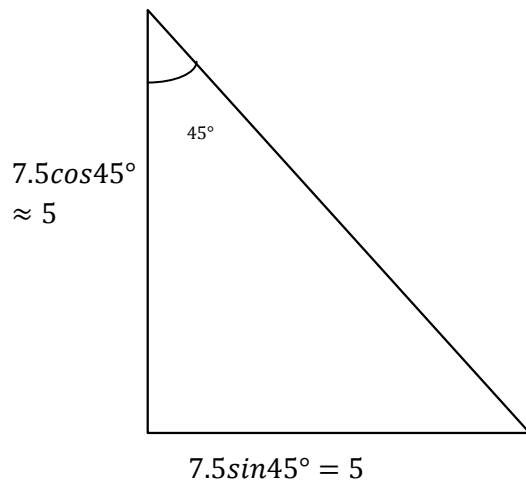


(α)

(β)

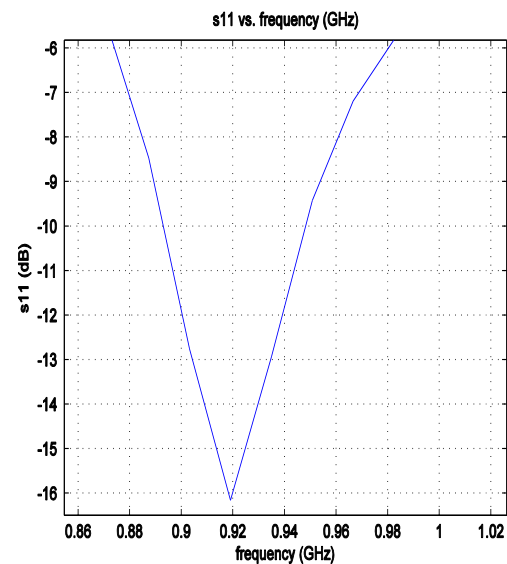
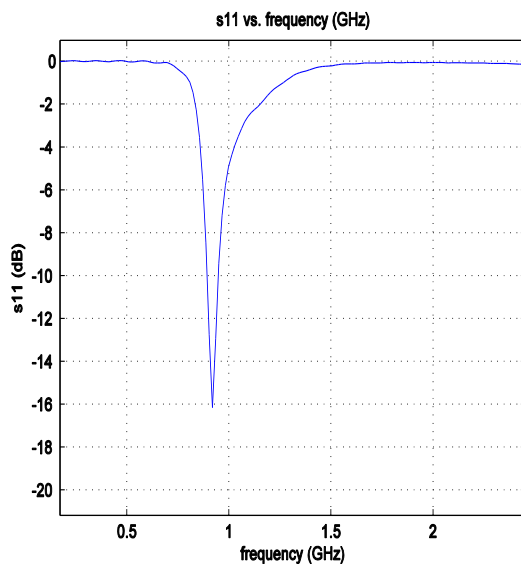
Εικόνα 7.39: YZ επίπεδο, slice:33 (α) και slice:26 (β)

Από την εικόνα 7.39 παρατηρείται ότι μετά την περιστροφή το μοντέλο της τερματικής συσκευής αλλοιώνεται. Συνεπώς, ξαναυπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τοποθέτησης της πηγής και του wire με βάση την ακόλουθη λογική:



Στο επίπεδο YZ, slice:26 μετακινούμαστε 5 κελιά προς τα κάτω και 5 κελιά προς τα αριστερά και βρισκόμαστε σε ένα νέο σημείο με συντεταγμένες (26, 119, 95) --> cell location

Στη συνέχεια πηγαίνουμε στο επίπεδο ZX, slice:119 προκειμένου να τοποθετηθεί η πηγή.



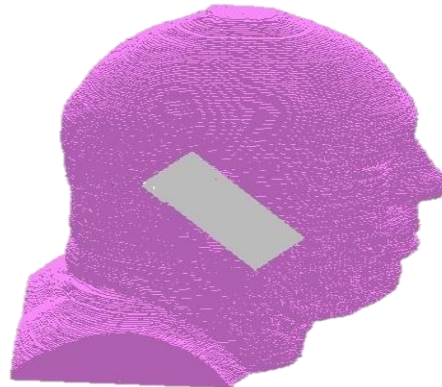
Εικόνα 7.40: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz.

Η κεραία συντονίζεται στα 920 MHz με συντελεστή ανάκλασης -16.2 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 890 MHz έως 950 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 900 MHz και ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού. Αρχικά, έγινε αλλαγή των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού(με βάση τον πίνακα που δόθηκε στο Κεφάλαιο 6). Κατασκευάστηκε πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου Yee είναι 1 mm και οι

διαστάσεις αυτού $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. Μετά απ' την κατασκευή του πλέγματος ακολούθησε εισαγωγή του μοντέλου κεφαλιού (με import .id file). Έπειτα εισήχθη η τροποποιημένη τερματική συσκευή (με περιστροφή) σαν αρχείο γεωμετρίας .id file (file→Geometry→Import →Mesh Object→Import From ID file). Η κεραία μετακινήθηκε και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm. Να σημειωθεί ότι η πηγή και το wire επανατοποθετήθηκαν. Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Επιπλέον στα 900 MHz, η ισχύς εισόδου είναι 0.25 W.

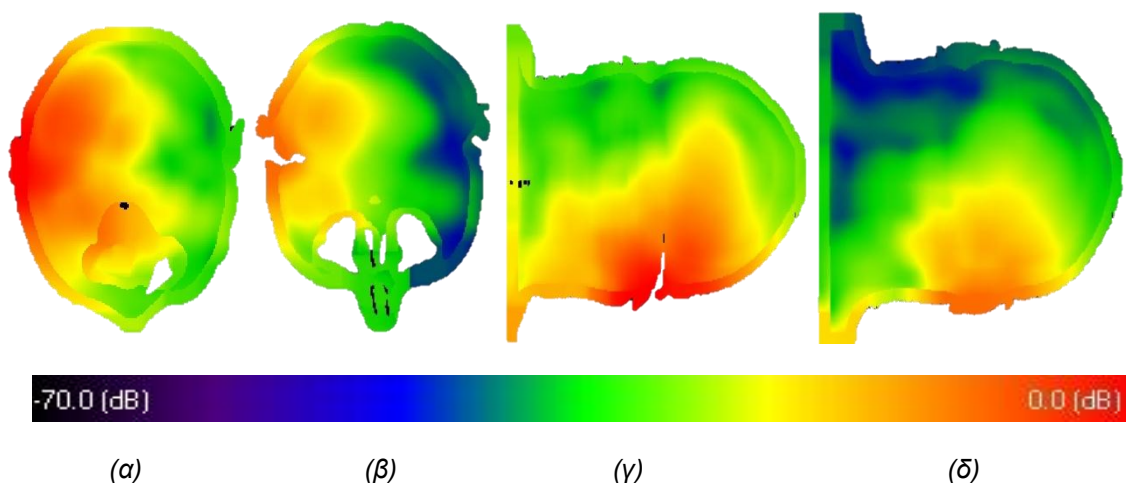


Εικόνα 7.41: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 0.5 cm από το μοντέλο κεφαλιού.

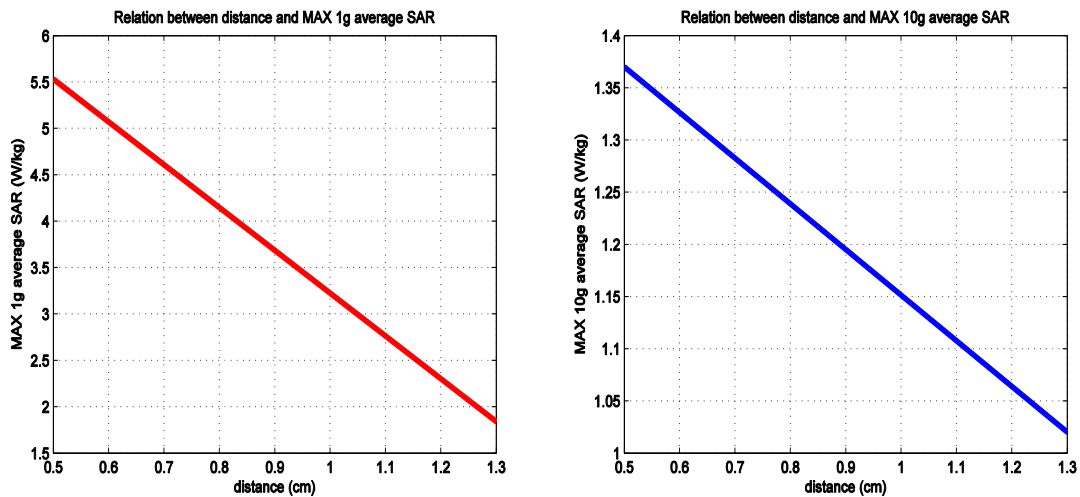
Αποτελέσματα

Πίνακας 7.5 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, 1g , 10g SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	15.7	5.53	1.37
1.3 cm	5.39	1.84	1.02



Εικόνα 7.42: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)

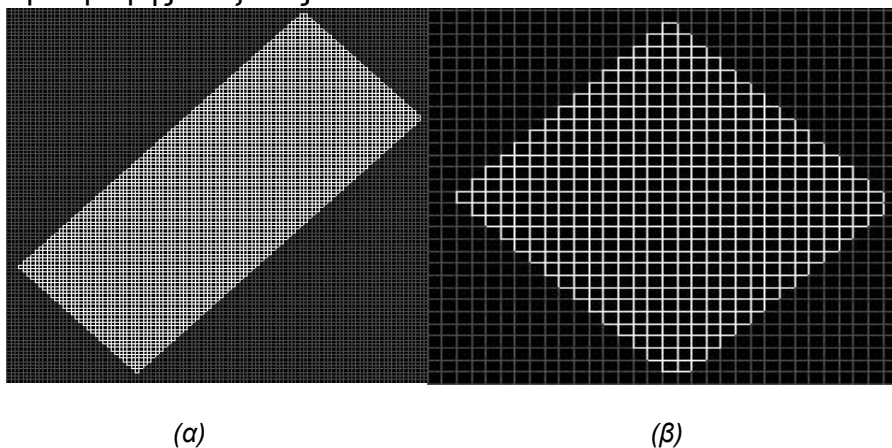


Εικόνα 7.43: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 900 MHz.

7. 6.2 Τερματική συσκευή σε συχνότητα 1800 MHz με κλίση 45° και δίπλα στο κεφάλι

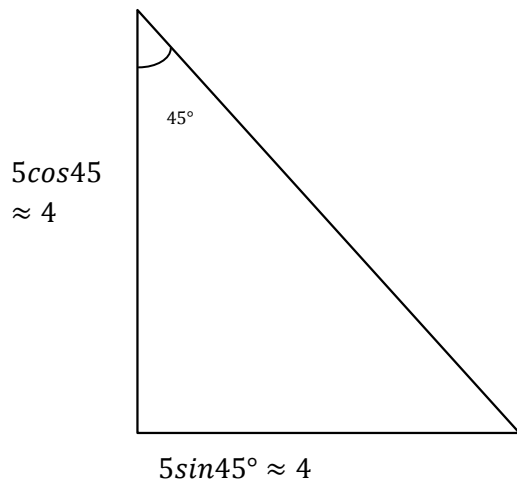
Περιστροφή τερματικής συσκευής και έλεγχος προσαρμογής κεραίας

Στην περίπτωση προσανατολισμού της τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών, έγινε περιστροφή της διάταξης. Στη συνέχεια, εξετάστηκε αν εμφανίζει καλή προσαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, ομοδοποιήθηκαν όλα τα στοιχεία της διάταξης - τερματικής συσκευής (δηλαδή κεραία patch, επίπεδο γείωσης, κοινό σημείο) μέσω της επιλογής “Group” και στη συνέχεια περιστάθηκαν με την επιλογή “Rotate”. Ειδικότερα, Selected Objects→Edit/Transform Operations → Rotate. Το μόνο στοιχείο το οποίο δεν μπορούσε να μετακινηθεί είναι το wire, για αυτό και μετά την περιστροφή σχεδιάστηκε εκ νέου. Εργαζόμεστε στο επίπεδο YZ συνεπώς ορίστηκε ως άξονας περιστροφής ο άξονας X.



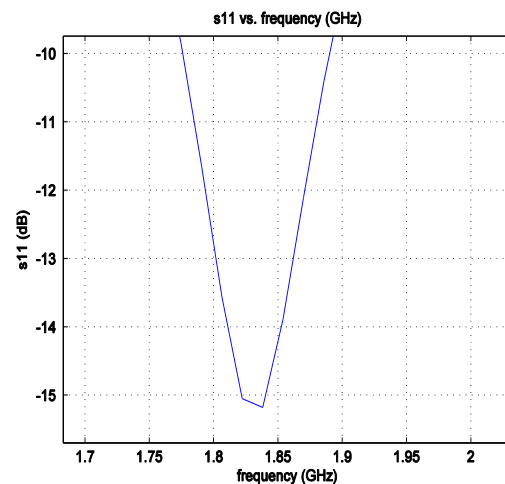
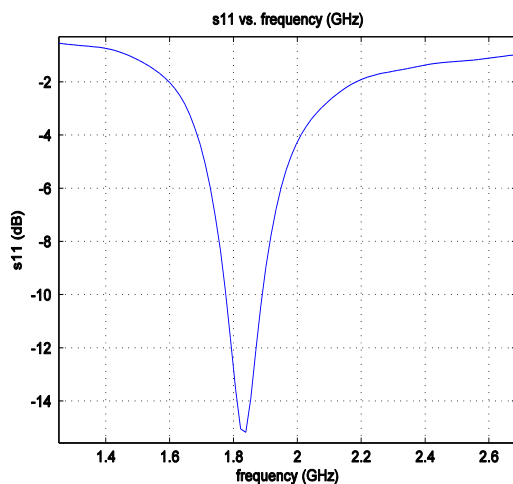
Εικόνα 7.44: YZ επίπεδο, slice:33 (α) και slice:26 (β)

Από την εικόνα 7.49 παρατηρείται ότι μετά την περιστροφή το μοντέλο της τερματικής συσκευής υφίσταται αλλοίωση. Άρα, ξαναυπολογίστηκαν οι συντεταγμένες τοποθέτησης της πηγής και του wire με βάση την ακόλουθη λογική:



Στο επίπεδο YZ, slice:26
μετακινούμεστε 4 κελιά προς τα κάτω
και 4 κελιά προς τα αριστερά και
βρισκόμαστε σε ένα νέο σημείο με
συντεταγμένες (30, 116, 102) --> cell
location

Στη συνέχεια πηγαίνουμε στο επίπεδο
ZX, slice:116 προκειμένου να
τοποθετηθεί η πηγή.



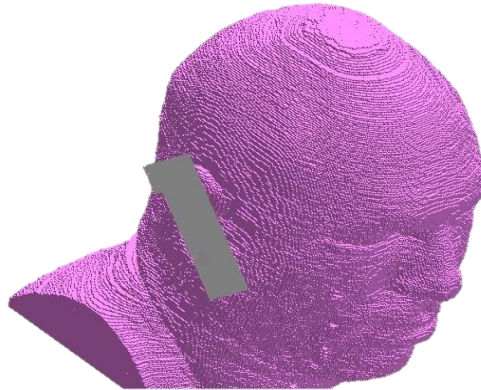
Εικόνα 7.45: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης s_{11} συναρτήσει συχνότητας εκφρασμένης σε GHz.

Η κεραία συντονίζεται στα 1835 MHz με συντελεστή ανάκλασης -15.3 dB. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι από 1775 MHz έως 1889 MHz (εκεί όπου ο συντελεστής ανάκλασης είναι μικρότερος του -10 dB).

Περιγραφή προβλήματος και κατασκευή γεωμετρίας

Το πρόβλημα το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από μια τερματική συσκευή στα 1800 MHz και ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού. Αρχικά, έγινε αλλαγή των διηλεκτρικών τιμών των βιολογικών ιστών στο μοντέλο κεφαλιού (με βάση τον πίνακα που δόθηκε στο Κεφάλαιο 6). Κατασκευάστηκε πλέγμα FDTD διαστάσεων $227 \times 271 \times 300 \text{ mm}$. Το μέγεθος του κελιού ή μέγεθος του κύβου Yee είναι 1 mm και οι διαστάσεις αυτού $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Μετά απ' την κατασκευή του πλέγματος

ακολούθησε εισαγωγή του μοντέλου κεφαλιού (με import .id file). Έπειτα εισήχθη η τροποποιημένη τερματική συσκευή (με περιστροφή) σαν αρχείο γεωμετρίας .id file (file→Geometry→Import →Mesh Object→Import From ID file). Η κεραία μετακινήθηκε και τοποθετήθηκε δίπλα στο αυτί του αναλυτικού μοντέλου κεφαλιού σε δύο διαφορετικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι 0.5 cm και 1.3 cm. Να σημειωθεί ότι η πηγή και το wire επανατοποθετήθηκαν. Επιλέχθηκε οριακή απορροφητική συνθήκη PML. Στα 1800 MHz, η ισχύς εισόδου είναι 0.125 W.

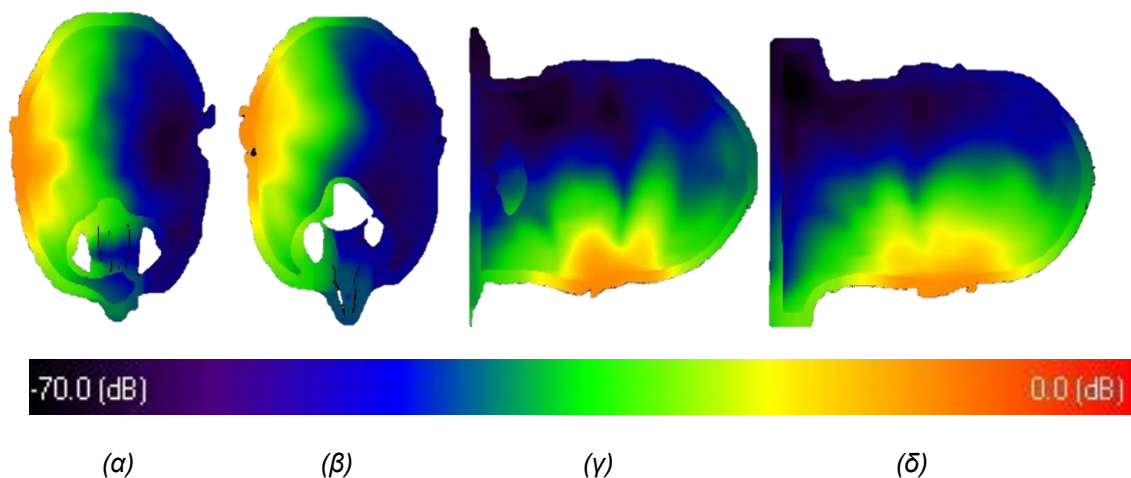


Εικόνα 7.46: 3D απεικόνιση γεωμετρίας εξεταζόμενου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Τερματική συσκευή σε απόσταση 0.5 cm από το μοντέλο κεφαλιού.

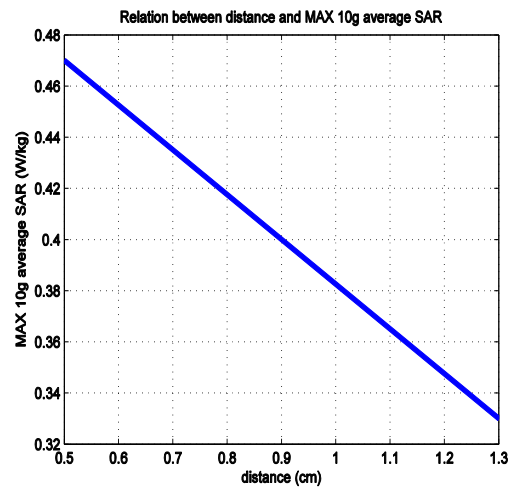
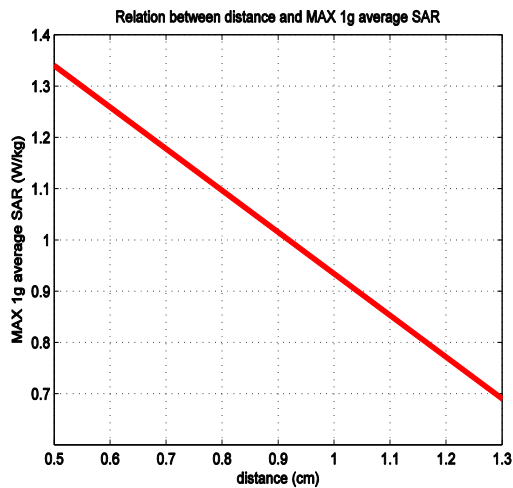
Αποτελέσματα

Πίνακας 7.6 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Μέγιστες τοπικές, 1g , 10g SAR τιμές

Απόσταση (cm)	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
0.5 cm	8.89	1.34	0.47
1.3 cm	1.81	0.69	0.33

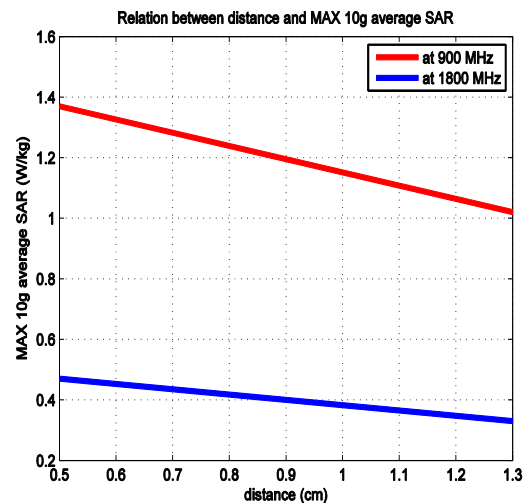
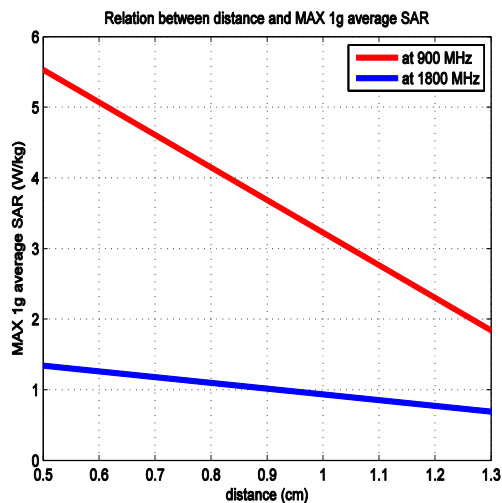


Εικόνα 7.47: Επίπεδα XY (α και β) και ZX (γ και δ) όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 10g average SAR τιμές για απόσταση 0.5 cm (α και γ) και για απόσταση 1.3 cm (β και δ)



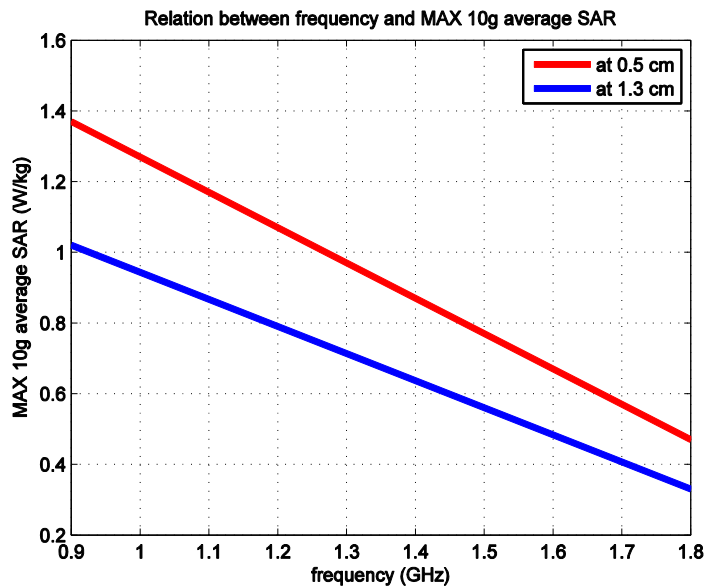
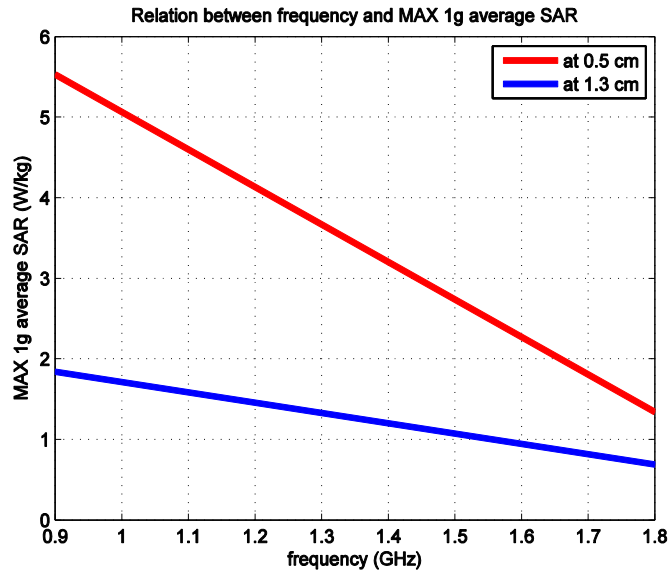
Εικόνα 7.48: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής – κεφαλιού στα 1800 MHz

7.6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων



Εικόνα 7.49: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της απόστασης τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών – κεφαλιού σε συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz.

Παρατηρείται σημαντική μείωση των τιμών SAR με αύξηση της απόστασης μεταξύ τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών – κεφαλιού. Επιπλέον σε καμία από τις αποστάσεις που εξετάστηκαν δεν υπάρχει υπέρβση των οριών ασφαλούς έκθεσης. Η χειρότερη περίπτωση σημειώνεται στην συχνότητα των 900 MHz, στην απόσταση 0.5 cm όπου η τιμή 10g SAR είναι 1.37 W/kg. Η ευνοϊκότερη παρατηρείται στα 1800 MHz, στην απόσταση 1.3 cm όπου η τιμή 10g SAR είναι μόλις 0.33 W/kg. Να σημειωθεί επίσης ότι στη συχνότητα των 900 MHz παρατηρούνται γενικότερα μεγαλύτερες τιμές SAR, τόσο τοπικές όσο και 1g και 10g, συγκριτικά με τα 1800 MHz.



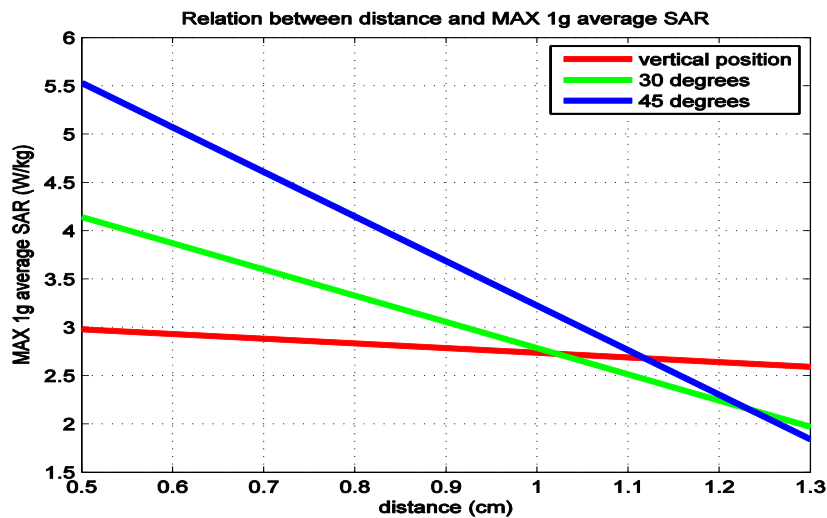
Εικόνα 7.50: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε μοντέλο κεφαλιού συναρτήσει της συχνότητας στις αποστάσεις 0.5 cm και 1.3 cm.

7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων και για τις τρεις περιπτώσεις τοποθέτησης τερματικής συσκευής

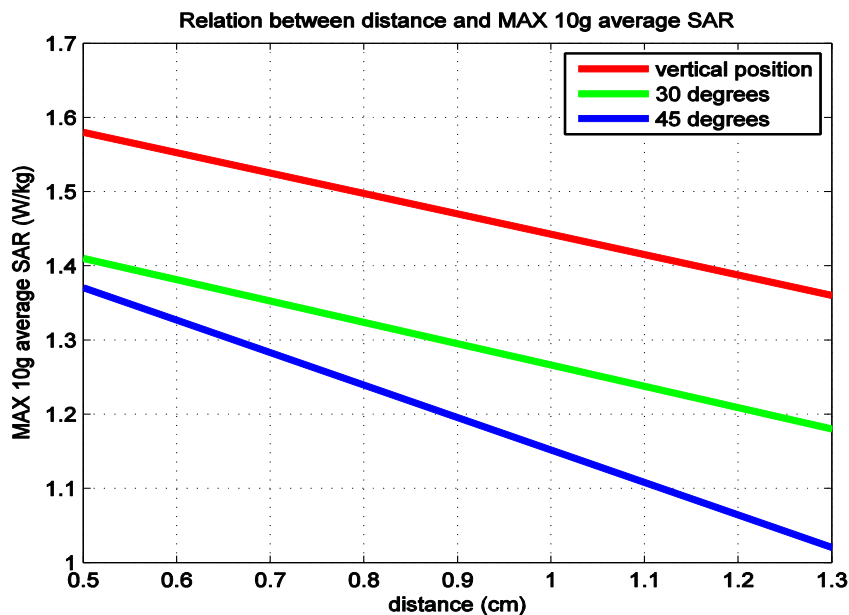
Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις προσανατολισμού της τερματικής συσκευής σε κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών στις συχνότητες των 900 MHz και των 1800 MHz. Σε κάθε συχνότητα, η τερματική συσκευή τοποθετήθηκε σε δύο αποστάσεις, αρχικά σε 0.5 cm (σχεδόν σε επαφή με το ανθρώπινο αυτί) και στη συνέχεια σε απόσταση 1.3 cm. Συνολικά εκτελέστηκαν δώδεκα προσομοιώσεις:

- Τέσσερις προσομοιώσεις για την περίπτωση τοποθέτησης της κεραίας σε κανονική θέση από το ανθρώπινο αυτί, δύο στα 900 MHz και δύο στα 1800 MHz.
- Τέσσερις προσομοιώσεις για την περίπτωση τοποθέτησης της κεραίας με κλίση 30 μοιρών, δύο στα 900 MHz και δύο στα 1800 MHz.
- τέσσερις περιπτώσεις για την περίπτωση τοποθέτησης της κεραίας με κλίση 45 μοιρών, δύο στα 900 MHz και δύο στα 1800 MHz

Στη συνέχεια παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα από τις παραπάνω περιπτώσεις.

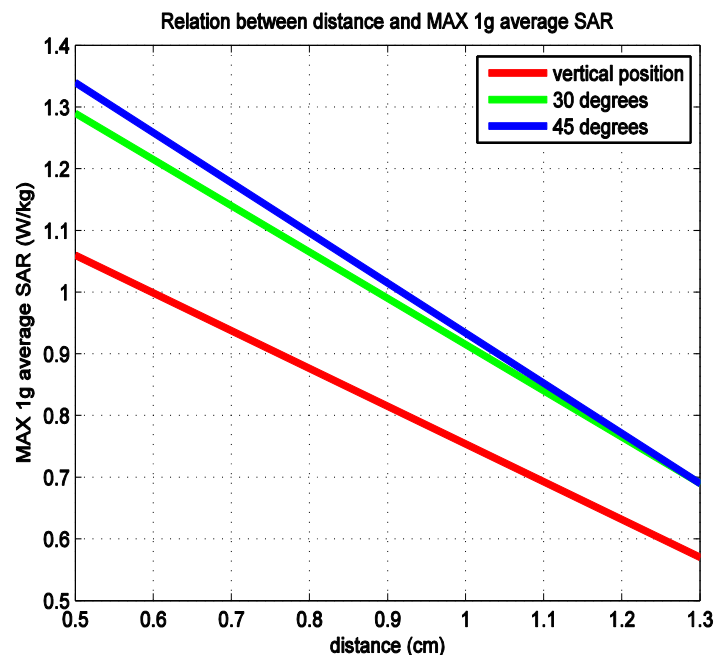


Εικόνα 5.51: MAX 1g average SAR συναρτήσεως της απόστασης στα 900 MHz, με την τερματική συσκευή τοποθετημένη σε κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.

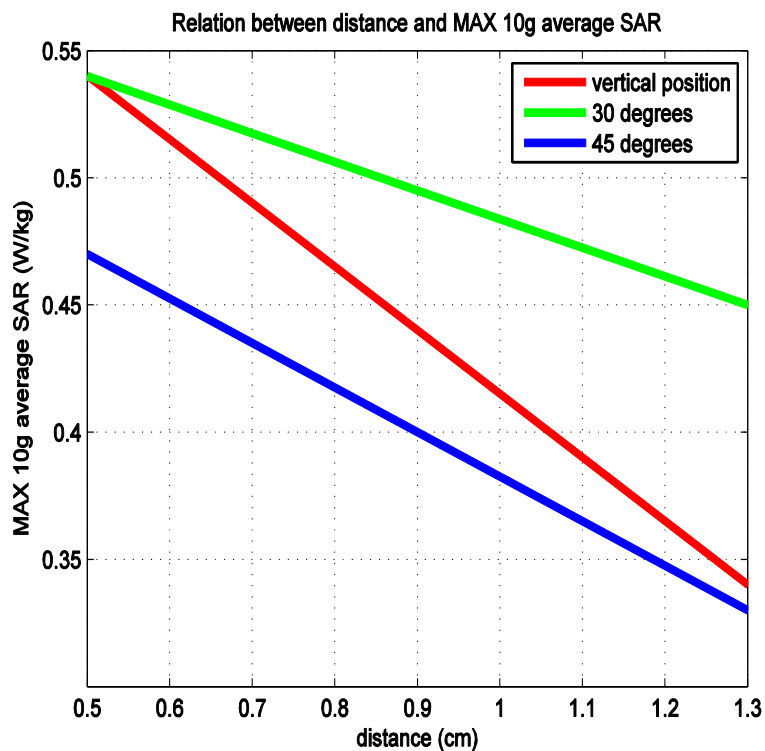


Εικόνα 7.52: MAX 10g average SAR συναρτήσεως της απόστασης στα 900 MHz, με την τερματική συσκευή τοποθετημένη σε κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.

Στην περίπτωση τερματικής συσκευής στα 900 MHz, όλες οι τιμές 10g SAR βρίσκονται εντός των ορίων επιτρεπτής έκθεσης γενικού κοινού. Επιπλέον παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές 10g SAR όταν η τερματική συσκευή τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο κεφάλι. Μικρότερες τιμές 10g SAR σημειώνονται όταν η τερματική συσκευή τοποθετείται με κλίση 30 μοιρών, ενώ οι χαμηλότερες τιμές 10g SAR παρατηρούνται στην περίπτωση όπου η τερματική συσκευή τοποθετείται με κλίση 45 μοιρών. Η χειρότερη περίπτωση από πλευράς επιπέδων SAR, σημειώνεται για κάθετο προανατολισμό συσκευής και απόσταση τερματικής συσκευής-κεφαλιού στα 0.5 cm (σχεδόν σε επαφή) όπου η τιμή 10g SAR είναι 1.58 W/kg. Η καλύτερη περίπτωση παρατηρείται στην απόσταση 1.3 cm, με κλίση τερματικής συσκευής κατά 45 μοίρες όπου η τιμή 10g SAR είναι 1.02 W/kg. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές και στις τρεις περιπτώσεις προανατολισμού της τερματικής συσκευής βρίσκονται αριθμητικά κοντά και η διαφορά τους είναι μικρή. Αναλυτικότερα, η τιμή 10 SAR στην απόσταση 0.5 cm για κατακόρυφη θέση τερματικής συσκευής, στα 900 MHz είναι 1.58 W/kg. Στην ίδια απόσταση για τοποθέτηση τερματικής συσκευής με κλίση 30 μοιρών είναι 1.41 W/kg, ενώ για τοποθέτηση τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών είναι 1.37 W/kg.

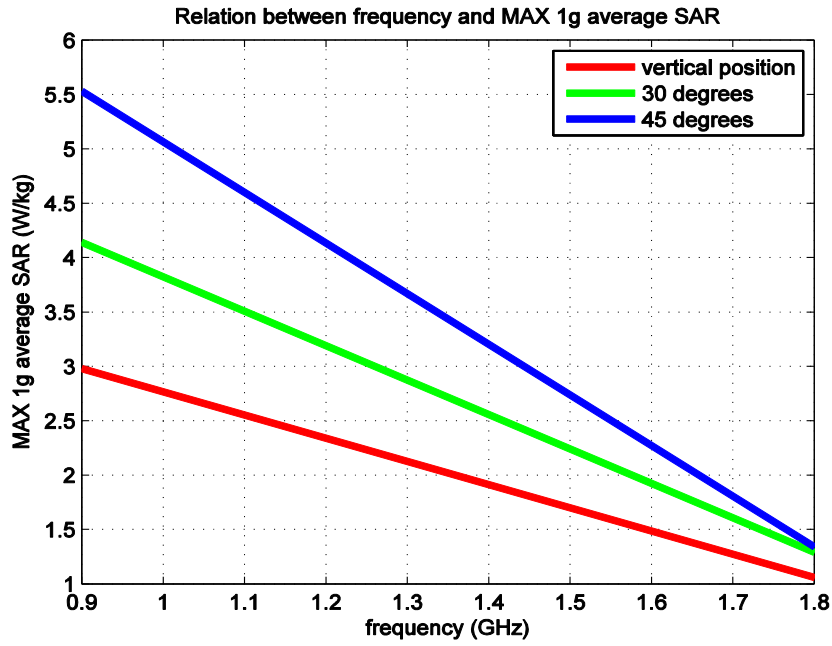


Εικόνα 7.53: MAX 1g average SAR συναρτήσεϊ της απόστασης στα 1800 MHz, με την τερματική συσκευή τοποθετημένη σε κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.

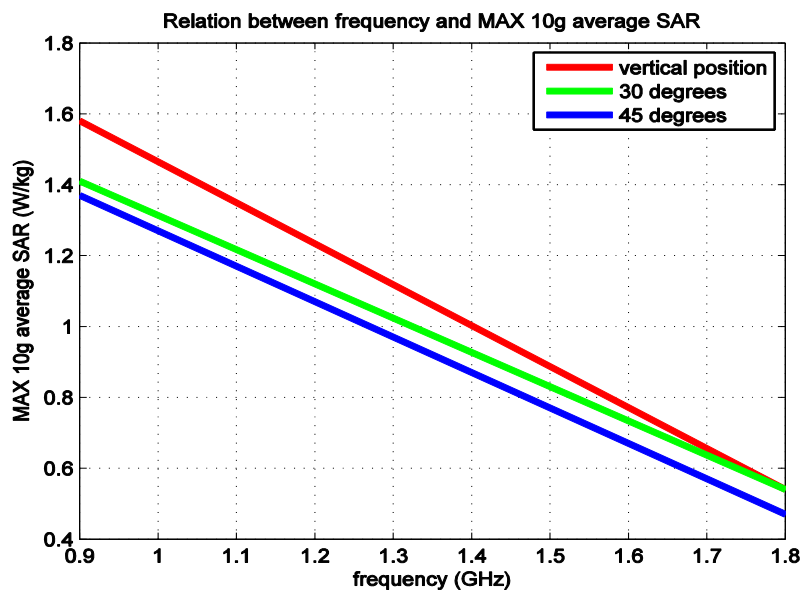


Εικόνα 7.54: MAX 10g average SAR και της απόστασης στα 1800 MHz, με την τερματική συσκευή τοποθετημένη σε κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.

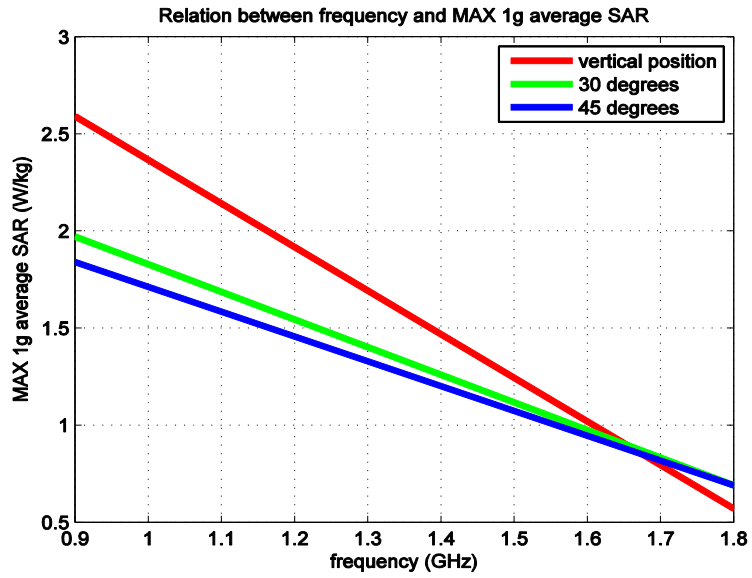
Στα 1800 MHz, οι τιμές 10g SAR που σημειώνονται είναι μικρότερες απ'ότι στα 900 MHz σε όλες τις περιπτώσεις προσανατολισμού της κεραίας και δεν υπερβαίνουν τα διεθνή όρια επιτρεπτής έκθεσης γενικού πληθυσμού. Οι τιμές 10g SAR βρίσκονται κοντά αριθμητικά και στις τρεις περιπτώσεις προσανατολισμού που μελετήθηκαν για αυτή τη συχνότητα. Η δυσμενέστερη περίπτωση εντοπίζεται σε απόσταση τερματικής συσκευής –κεφαλιού 0.5 cm, όπου τόσο στην περίπτωση κλίσης 30 μοιρών όσο και στην περίπτωση κλίσης 45 μοιρών η τιμή 10g SAR είναι 0.54 W/kg. Η χαμηλότερη τιμή 10g SAR παρατηρείται στην απόσταση 1.3 cm, για τοποθέτηση τερματικής συσκευής με κλίση 45 μοιρών και είναι 0.33 W/kg.



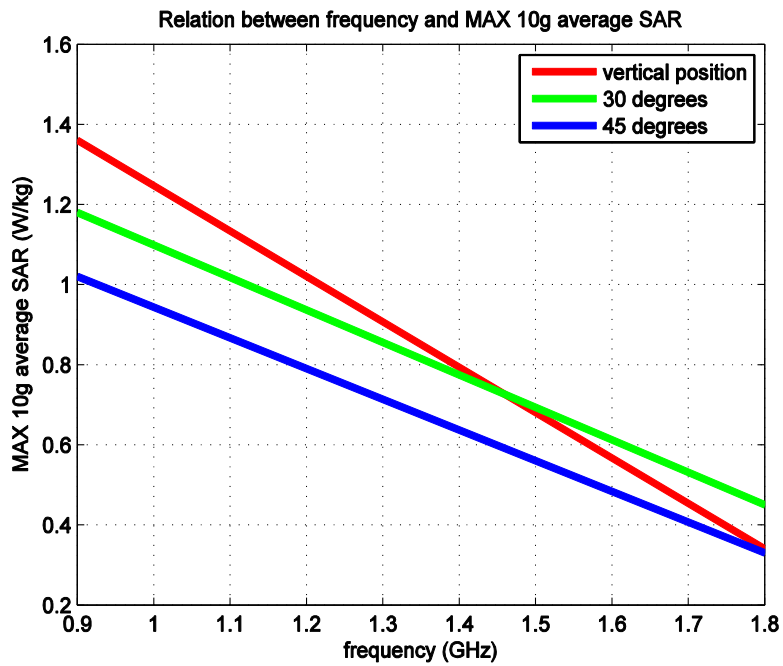
Εικόνα 7.55: MAX 1g average SAR συναρτήσεως της συχνότητας στην απόσταση 0.5 cm, στην κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.



Εικόνα 7.56: MAX 10g average SAR συναρτήσεως της συχνότητας στην απόσταση 0.5 cm, στην κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.



Εικόνα 7.57: MAX 1g average SAR συναρτήσει της συχνότητας στην απόσταση 1.3 cm, στην κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.



Εικόνα 7.58: MAX 10g average SAR και της συχνότητας στην απόσταση 1.3 cm, στην κανονική θέση, με κλίση 30 μοιρών και με κλίση 45 μοιρών.

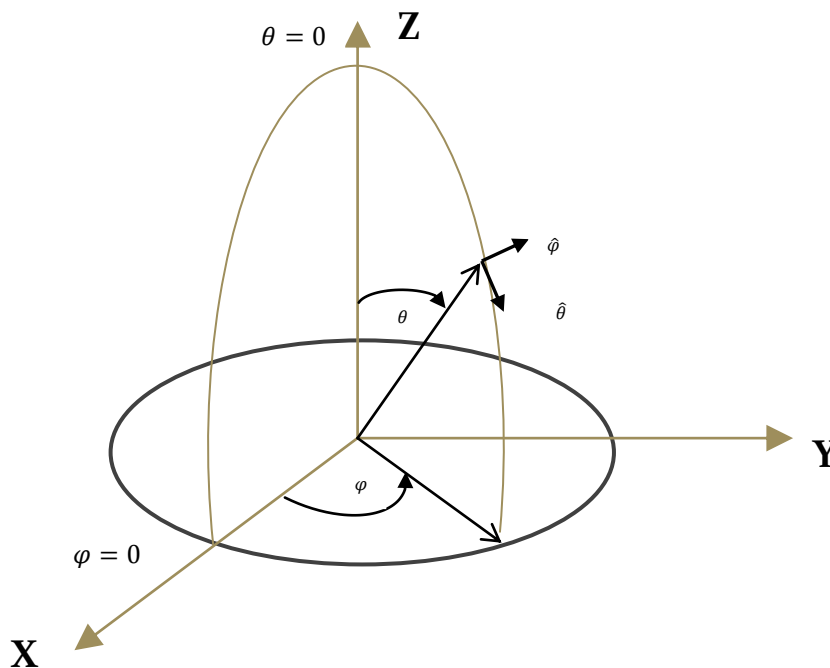
Κεφάλαιο 8

Έκθεση σε επίπεδο κύμα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετούμε την περίπτωση επίπεδου κύματος που θεωρείται ότι προέρχεται από απομακρυσμένη κεραία ασύρματου δικτύου σε συχνότητα 2.44 GHz. Όταν κάνουμε λόγο για επίπεδο κύμα, αναφερόμαστε σε μια προφανώς ιδανική περίπτωση. Συνεπώς, το ανθρώπινο κεφάλι βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της πηγής. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα ανθρώπινου κεφαλιού (απλό και αναλυτικότερο). Στη συνέχεια έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων.

8.1 Σύστημα Συντεταγμένων

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο λογισμικό ορίζεται με αζιμουθιακή γωνία (azimuthal) φ που ξεκινά από τον άξονα x και με γωνία ανύψωσης (elevation) θ που ξεκινά από τον άξονα z. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσεων μακρινού πεδίου (far-zone) και για τον καθορισμό της κατεύθυνσης του προσπίπτοντος επίπεδου κύματος.



Εικόνα 8.1: Το σύστημα συντεταγμένων για μακρινό πεδίο και κατευθύνσεις προσπίπτοντος επίπεδου κύματος

8.2 Επίπεδο κύμα σε απλό μοντέλο κεφαλιού

Περιγραφή προβλήματος

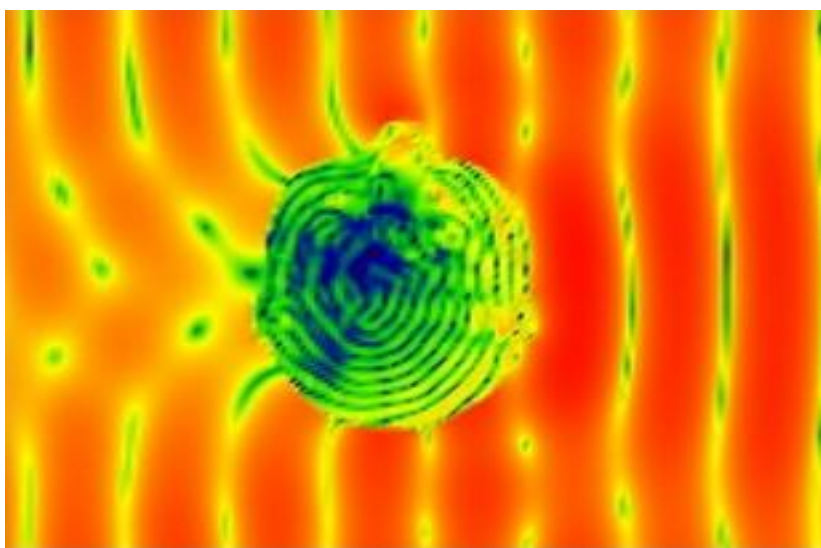
Ένα επίπεδο κύμα (plane wave) προσομοιώνει μια πηγή που βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από το ανθρώπινο κεφάλι. Χρησιμοποιήθηκε απλό μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, αποτελούμενο από 7 ιστούς. Μελετήθηκαν συνολικά τέσσερις περιπτώσεις γωνιών θ και φ . Αναλυτικότερα υπολογίστηκαν οι τοπικές τιμές SAR, μέγιστες μέσες τιμές 1g και 10g για τις περιπτώσεις:

- $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$
- $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$
- $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$
- $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$

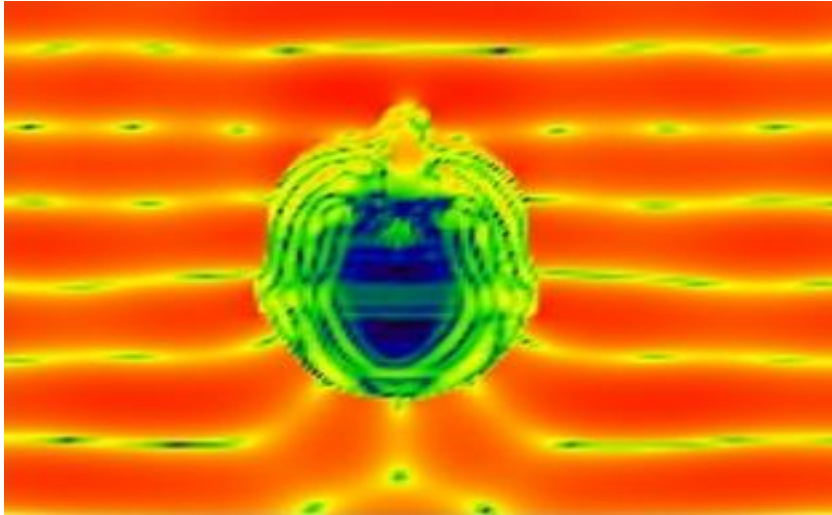
Αποτελέσματα

Πίνακας 8.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

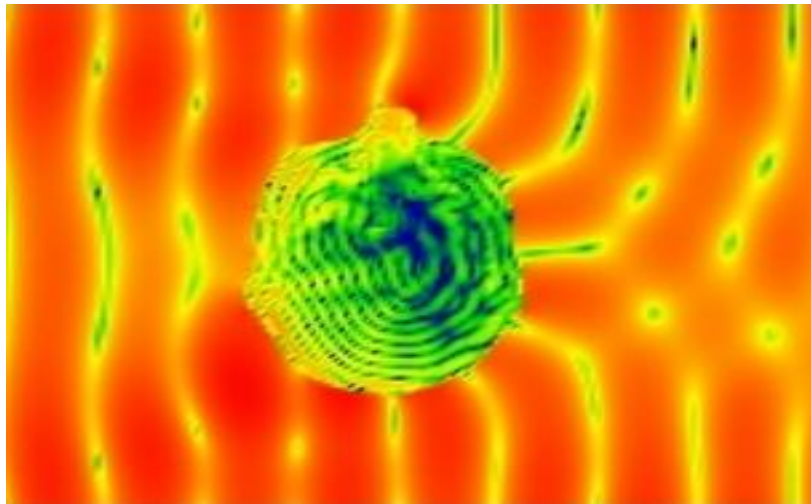
Περιπτώσεις	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$	0.015202	0.010747	0.0054774
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$	0.020355	0.012507	0.0054379
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$	0.020163	0.012947	0.0060837
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$	0.018651	0.011293	0.0050180



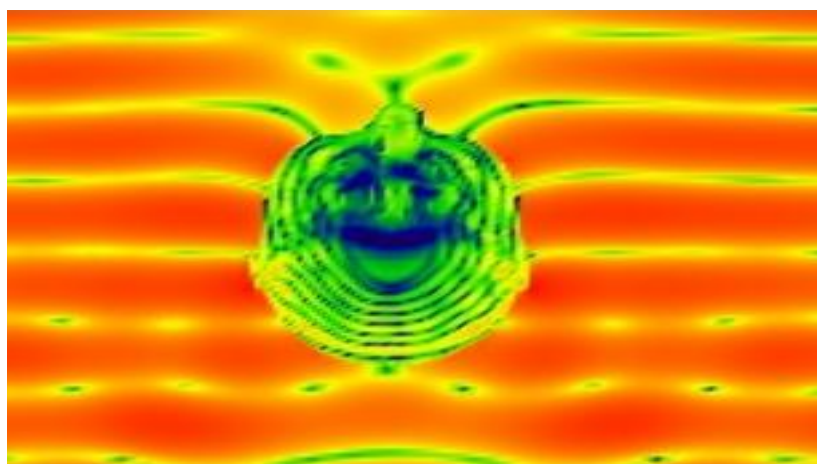
Εικόνα 8.2: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$. Κατεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά.



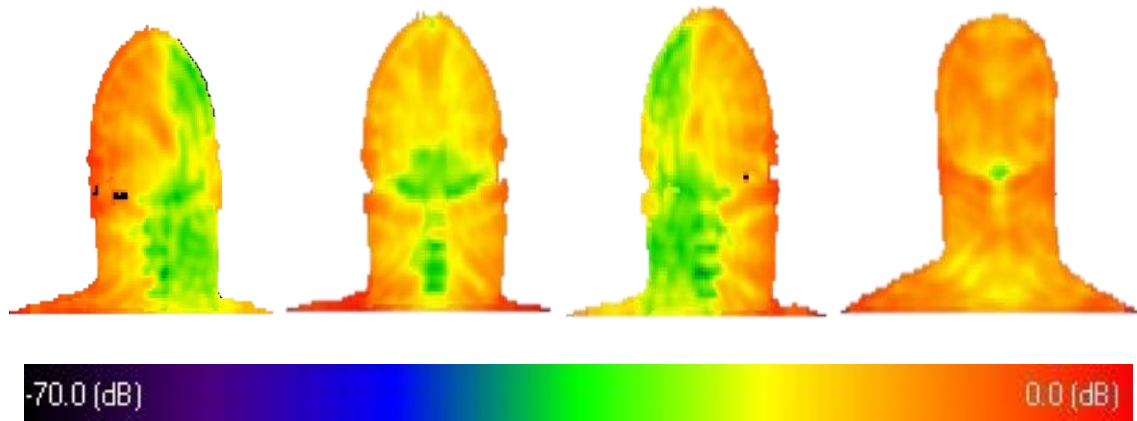
Εικόνα 8.3: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$. Κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω.



Εικόνα 8.4: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$. Κατεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά



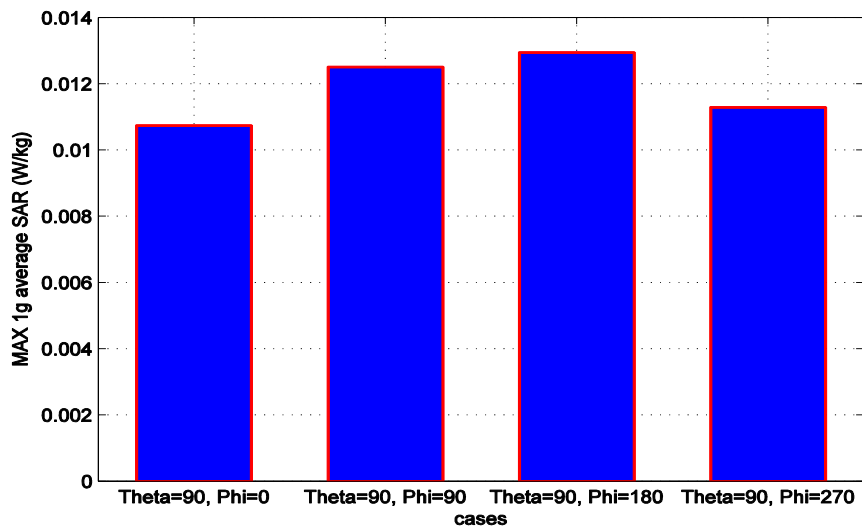
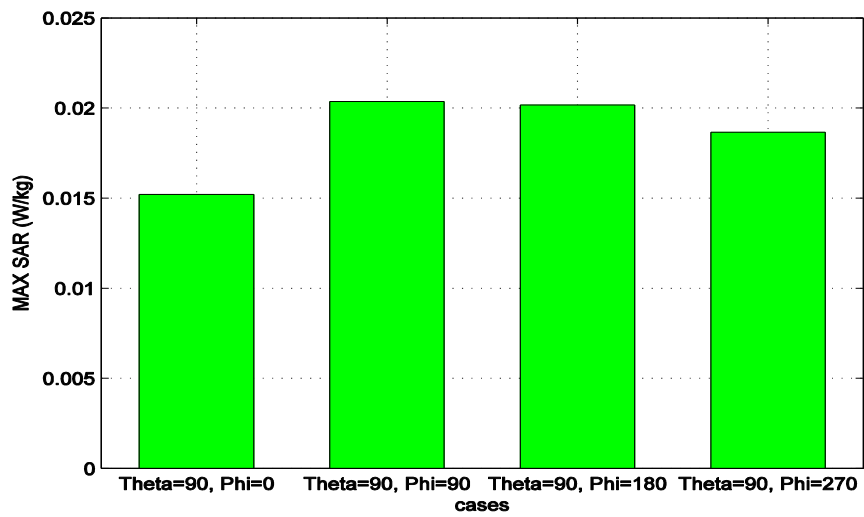
Εικόνα 8.5: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$. Κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω.

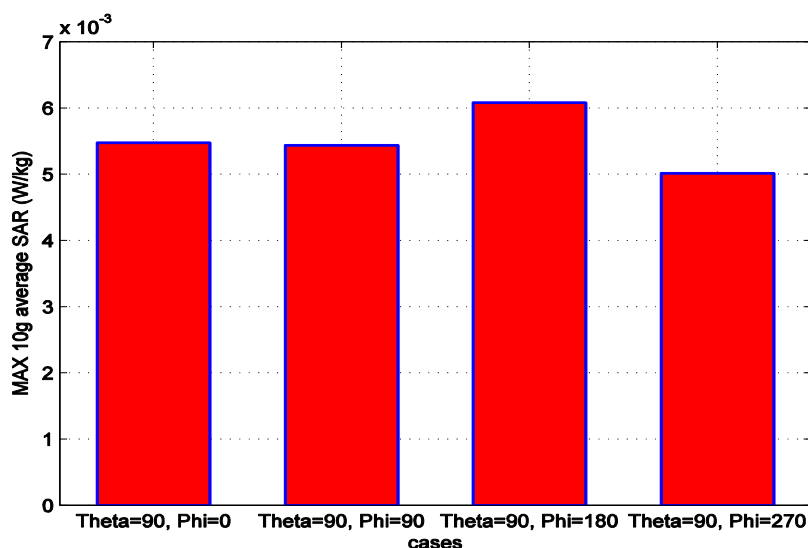


(α) (β) (γ) (δ)

$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$, $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$, $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$

Εικόνα 8.5: Επίπεδο XY όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.





Εικόνα 8.6: Τιμές MAX 1g average SAR και MAX 10g average SAR σε απλό μοντέλο κεφαλιού για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

8.3 Επίπεδο κύμα σε πιο λεπτομερές μοντέλο κεφαλιού

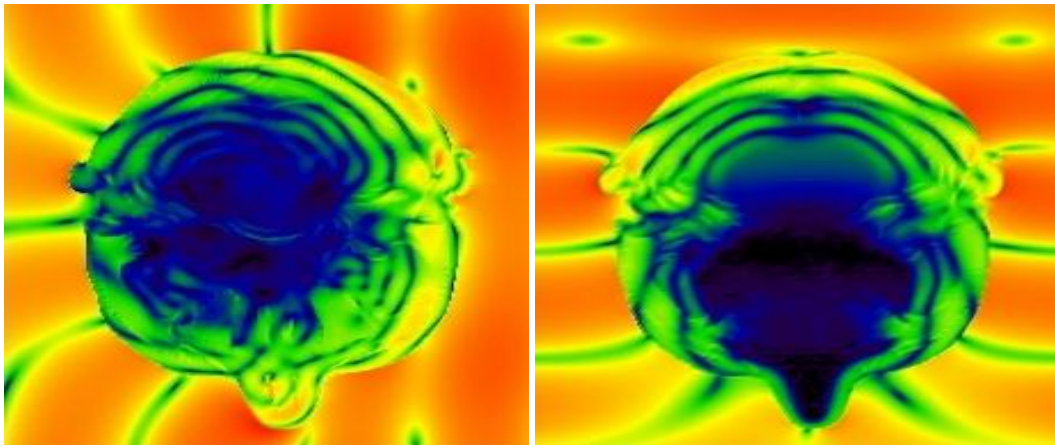
Περιγραφή προβλήματος

Οι παράμετροι του συγκεκριμένου προβλήματος είναι ίδιες με αυτές του προηγούμενου. Συνεπώς, προχωρούμε κατευθείαν στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Αποτελέσματα

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

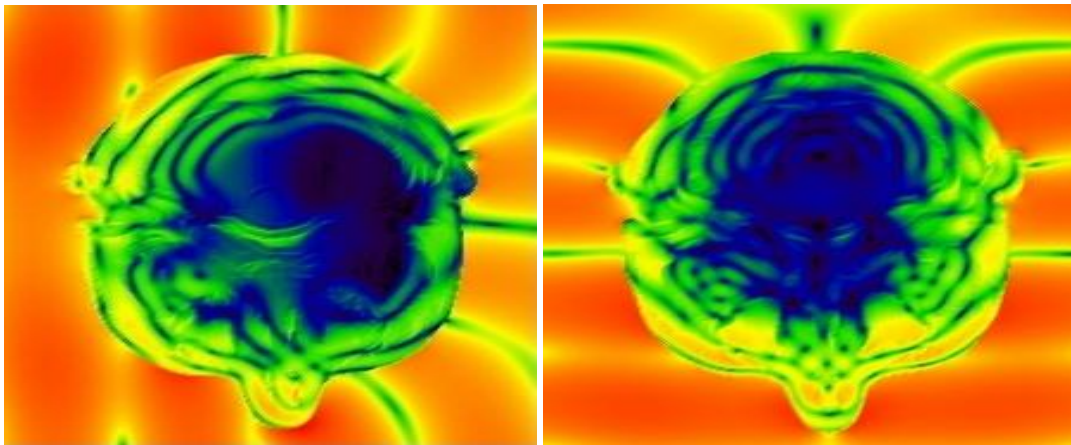
Περιπτώσεις	MAX SAR (W/kg)	MAX 1g SAR (W/kg)	MAX 10g SAR (W/kg)
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$	0.030092	0.011540	0.0054634
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$	0.017992	0.0092208	0.0045579
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$	0.020917	0.010885	0.0051173
$\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$	0.043731	0.019106	0.0068530



(α)

(β)

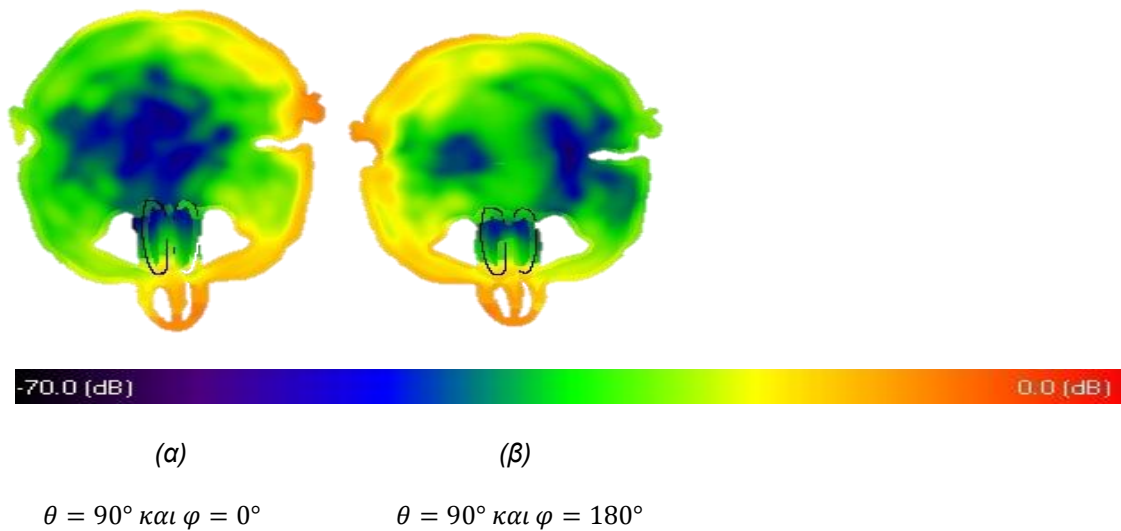
Εικόνα 8.10: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου: $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0^\circ$. Κατεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά (α) και $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$. Κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω (β)



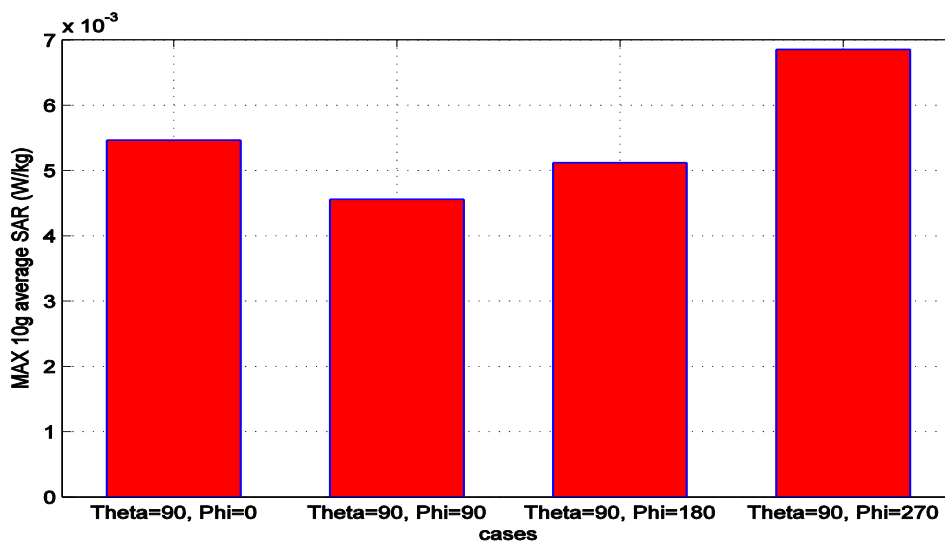
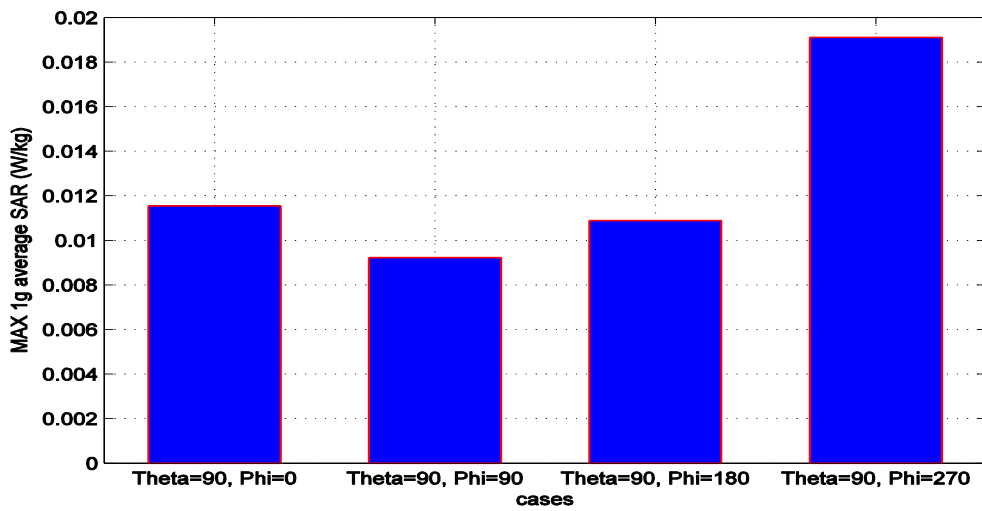
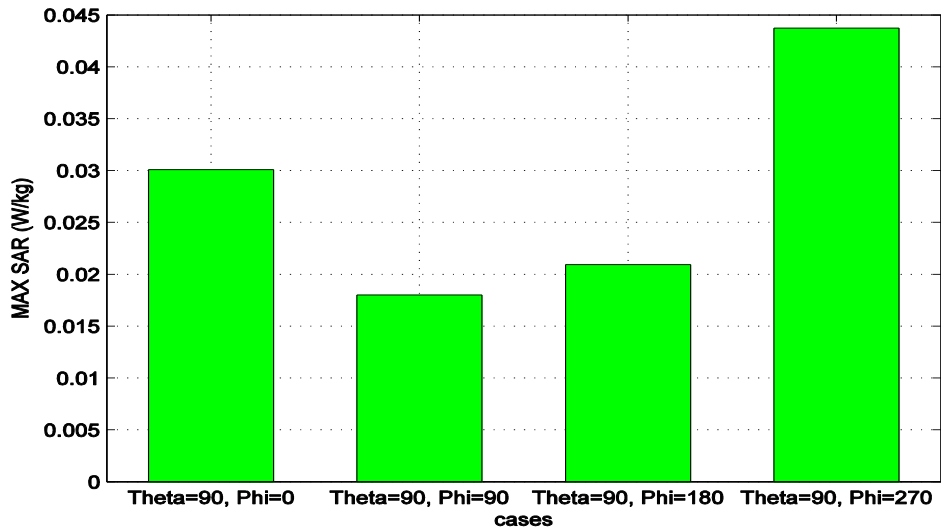
(α)

(β)

Εικόνα 8.11: Διάδοση επίπεδου κύματος για την περίπτωση όπου: $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$. Κατεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά (α) και $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$. Κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω (β)



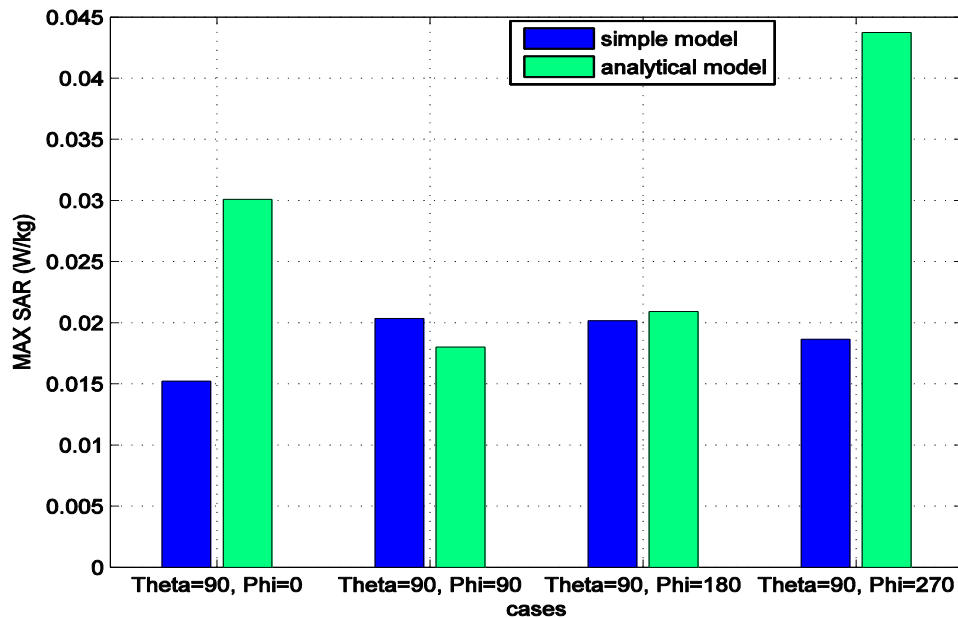
Εικόνα 8.12: Επίπεδο XY όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες 1g average SAR τιμές



Εικόνα 8.13: Τιμές MAX SAR, MAX 1g average SAR, MAX 10g average SAR σε αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

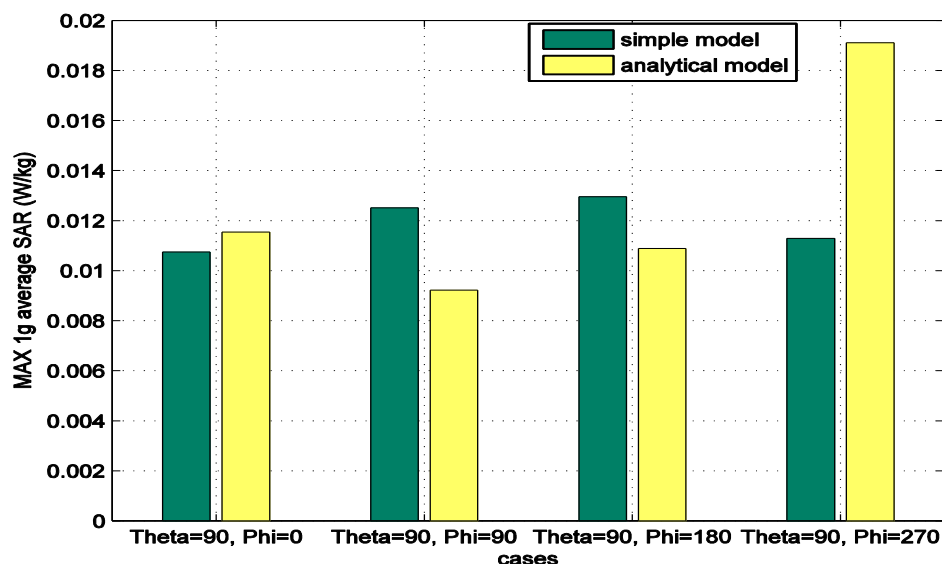
8.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το σημείο θα γίνει σύγκριση των τιμών SAR που σημειώθηκαν στα δύο διαφορετικά μοντέλα ανθρώπινου κεφαλιού που μελετήθηκαν (απλό και αναλυτικό).



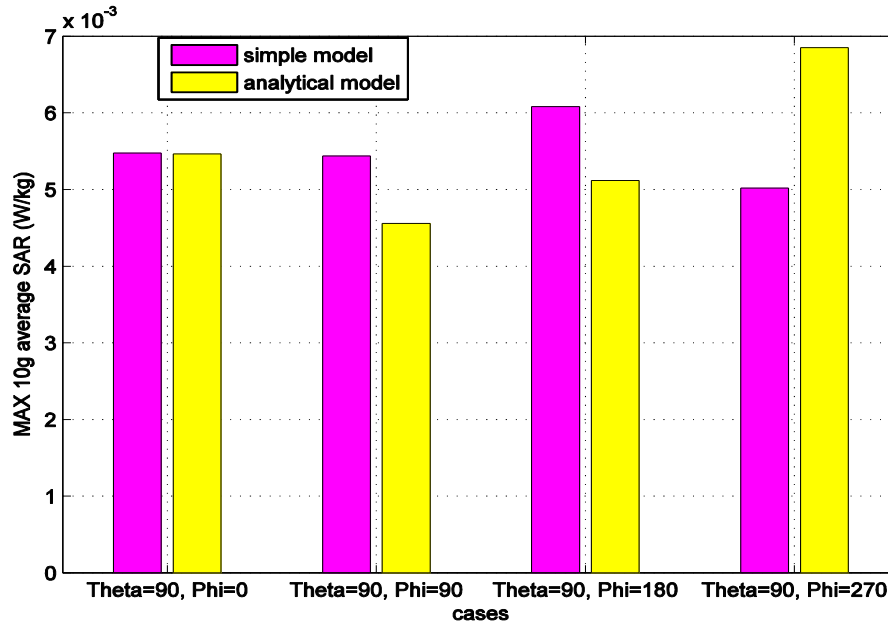
Εικόνα 8.14: Τιμές MAX σε απλό και αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Παρατηρούνται οι αναμενόμενες πολύ μικρές τιμές SAR. Ακόμα και οι τοπικές τιμές SAR κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 8.15: Τιμές MAX 1g average SAR σε απλό και αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Στο απλό μοντέλο κεφαλιού, υψηλότερες 1g SAR τιμές σημειώνονται στην 3^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$. Μικρότερες στην 1^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 0$. Στο αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού, υψηλότερες τιμές 1g SAR παρατηρούνται στην 4^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$. Παράλληλα χαμηλότερες τιμές σημειώνονται στην 2^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$.



Εικόνα 8.16: Τιμές MAX 10g average SAR σε απλό και αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού για τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Στο απλό μοντέλο κεφαλιού, υψηλότερες τιμές 10g SAR εντοπίζονται στην 3^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 180^\circ$. Παράλληλα χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στην 4^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$. Στο αναλυτικό μοντέλο κεφαλιού, υψηλότερες τιμές 10g SAR σημειώνονται στην 4^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$. Συγχρόνως χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στην 2^η περίπτωση όπου $\theta = 90^\circ$ και $\varphi = 90^\circ$.

Συμπεράσματα και Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη και ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κεραιών, ασύρματων τερματικών συσκευών και του ανθρώπινου κεφαλιού. Σχεδιάστηκαν και μοντελοποιήθηκαν πρότυπα τερματικών συσκευών τα οποία τοποθετήθηκαν δίπλα σε μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού (απλό και πιο λεπτομερές) με σκοπό το υπολογισμό της απορροφούμενης ακτινοβολίας από αυτό.

Η μοντελοποίηση των βιοηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων συνεισφέρει καθοριστικά στην έρευνα που έχει ως στόχο την μελέτη αλληλεπίδρασης βιολογικών ιστών και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ραδιοσυχνότητας. Ποικίλα βιολογικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν και να προσομοιωθούν υπολογιστικά. Μελετάται έτσι η συμπεριφορά στους στην επίδραση που δέχονται από διάφορους τύπους κεραιών σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.

Αρχικά μοντελοποιήθηκε μια διπολική κεραία $\lambda/2$ για τη συχνότητα των 900 MHz, των 1800 MHz και των 2.44 GHz. Τοποθετήθηκε δίπλα σε μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, αποτελούμενο από 7 ιστούς. Μελετήθηκε η εξάρτηση της απορρόφησης ως προς την παράμετρο της απόστασης της κεραίας από το κεφάλι, και του προσανατολισμού της κεραίας (κατακόρυφη ή οριζόντια θέση). Πιο συγκεκριμένα η κεραία αρχικά τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση δίπλα στο αυτί και στη συνέχεια σε οριζόντια θέση. Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ κεραίας και αυτιού. Στη συνέχεια η ίδια κεραία τοποθετήθηκε μπροστά από το μάτι, σε κατακόρυφη και σε οριζόντια θέση, και μελετήθηκαν επίσης πέντε διαφορετικές αποστάσεις. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

✓ Γενικότερα, σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν η παράμετρος της απόστασης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο ποσό απορροφούμενης ακτινοβολίας από το κεφάλι. Ειδικότερα, όπως αναμενόταν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν στην πιο κοντινή απόσταση 0.36 cm. Με αύξηση αυτής της απόστασης στα 1.08 cm, τα επίπεδα τιμών SAR παρουσιάζουν σημαντικότερη μείωση.

✓ Σε ότι αφορά την κατακόρυφη και οριζόντια τοποθέτηση της κεραίας δίπλα στο αυτί, παρατηρήθηκε ότι όταν η κεραία τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση οι τιμές SAR ήταν ελαφρώς υψηλότερες σε όλες τις συχνότητες, με εξαίρεση την πρώτη

απόσταση των 0.36 cm. Ομοίως και για την συχνότητα, αύξηση της οποίας οδηγούσε σε μείωση των τιμών SAR. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές 10g SAR βρίσκονται εντός των ορίων ασφαλούς έκθεσης σε όλες τις αποστάσεις και συχνότητες που μελετήθηκαν. Αντίθετα οι τιμές 1g SAR υπερέβαιναν τα όρια κυρίως για την 1^η και 2^η απόσταση (0.36 cm και 1.08 cm) και στις τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας. Γενικότερα σε ότι αφορά τις περιπτώσεις όπου οι τιμές SAR υπερβαίνουν τα όρια, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κεραία είναι πολύ κοντά στο κεφάλι. Πρακτικά αν γίνει τοποθέτηση της κεραίας σε μια πιο ρεαλιστική θέση τα όρια συνήθως ικανοποιούνται.

✓ Σε ότι αφορά την κατακόρυφη και οριζόντια τοποθέτηση της κεραίας μπροστά από το μάτι, επίσης παρατηρείται σημαντική μείωση των τιμών SAR με αύξηση της απόστασης μεταξύ κεραίας – ματιού. Επιπλέον σε όλες τις συχνότητες που μελετήθηκαν παρατηρείται ότι οι μετρούμενες ποσότητες SAR (SAR_{local} , 1g SAR και 10g SAR) είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση όπου η κεραία είναι τοποθετημένη σε κατακόρυφη θέση. Οι τιμές σε ορισμένα σημεία σημειώνονται υψηλότερες έως και περίπου 65%. Να σημειωθεί ότι οι τιμές 10g SAR σε όλες τις εξεταζόμενες αποστάσεις και συχνότητες βρίσκονται εντός των ορίων επιτρεπτούς έκθεσης.

✓ Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι τιμές 10g SAR στην οριζόντια τοποθέτηση κεραίας μπροστά στο μάτι κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα με την χαμηλότερη τιμή να εντοπίζεται στα 2.44 GHz, σε απόσταση 3.66 cm και να είναι μόλις 0.12 W/kg.

Επιπλέον εξετάστηκε η περίπτωση τοποθέτησης διπολικής κεραίας $\lambda/2$ σε κατακόρυφη θέση και δίπλα σε λεπτομερές ομοίωμα ανθρώπινου κεφαλιού. Διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση των τιμών SAR συγκριτικά με το απλό μοντέλο κεφαλιού. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές 10 SAR είναι ελαφρώς χαμηλότερες, ιδίως στις εξεταζόμενες αποστάσεις μετά τα 1.08 cm. Εντούτοις, οι τοπικές τιμές SAR είναι εμφανώς μεγαλύτερες, κάτι το οποίο πιθανώς οφείλεται στην υψηλότερη αναλυτικότητα και πολυπλοκότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου(αποτελείται από 26 ιστούς).

Στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώθηκε στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από ασύρματη τερματική συσκευή (κινητό τηλέφωνο) και εξετάστηκε το ποσό της απορροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο κεφάλι. Αρχικά σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε μια τερματική συσκευή αποτελούμενη από μια εσωτερική κεραία patch για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας στα 900 MHz και στα 1800 MHz. Η μοντελοποιημένη τερματική συσκευή τοποθετήθηκε δίπλα σε λεπτομερές μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις

προσανατολισμού της τερματικής συσκευής. Πιο συγκεκριμένα οι περιπτώσεις αυτές ήταν: α) κατακόρυφη θέση β) με κλίση 30° και γ) με κλίση 45°. Για κάθε περίπτωση προσανατολισμού πραγματοποιήθηκε έλεγχος συντονισμού της κεραίας προκειμένου να ελεγχθεί αν είναι καλή η προσαρμογή της. Στην συχνότητα όπου συντονίζει η κεραία, σημειώθηκε ο συντελεστής ανάκλασης καθώς και το εύρος ζώνης της κεραίας. Μελετήθηκε η παράμετρος της απόστασης τοποθετώντας την τερματική συσκευή σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από το κεφάλι (συγκεκριμένα από το αυτί). Για κάθε απόσταση υπολογίστηκε η επίδρασή της στα επίπεδα SAR. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές 1g και 10g SAR και μελετήθηκε η κατανομή του SAR στο κεφάλι. Έπειτα έγινε σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών τοποθετήσεων της τερματικής συσκευής. Από την σύγκριση αυτή προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

✓ Στα 900 MHz, τιμές 10g SAR παρατηρούνται υψηλότερες στην περίπτωση κατακόρυφης τοποθέτησης της κεραίας. Συγκριτικά μικρότερες τιμές εμφανίζονται στην περίπτωση των 30°. Οι χαμηλότερες τιμές 10g SAR σημειώθηκαν στην περίπτωση προσανατολισμού της τερματικής συσκευής με κλίση 45°.

✓ Στα 1800 MHz, οι τιμές 10g SAR σημειώνονται υψηλότερες στην περίπτωση τοποθέτησης της τερματικής συσκευής με κλίση 30°. Ελαφρώς μικρότερες παρατηρούνται στην περίπτωση κατακόρυφης θέσης της τερματικής συσκευής. Τέλος οι χαμηλότερες τιμές 10g SAR σημειώνονται στην περίπτωση κλίσης 45°.

✓ Να τονιστεί ότι οι διαφορές στις τρεις περιπτώσεις προσανατολισμού είναι πολύ μικρές, αλλά με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα που εξήχθησαν συμπεραίνεται ότι η καλύτερη περίπτωση, από πλευράς χαμηλότερου ποσοστού απορροφούμενης ακτινοβολίας από τους βιολογικούς ιστούς του κεφαλιού, είναι αυτή με κλίση 45°.

✓ Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι σε καμία από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, ακόμα και στην μικρότερη απόσταση τερματικής συσκευής – κεφαλιού (0.5 cm - σχεδόν σε επαφή), δεν σημειώθηκε υπέρβαση των ορίων ασφαλούς έκθεσης. Όπως αναμενόταν σημειώθηκαν μεγαλύτερες τιμές SAR στην σχεδόν σε επαφή απόσταση τερματικής συσκευής – κεφαλιού και χαμηλότερες τιμές όταν η τερματική συσκευή είναι απομακρυσμένη.

✓ Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι οι τιμές SAR που υπολογίζονται σε ένα γραμμάριο ιστού (1g SAR) είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές που υπολογίζονται με μάζα αναφοράς 10 γραμμάρια ιστού (10g SAR).

✓ Τέλος στα 900 MHz παρατηρήθηκαν τιμές SAR (τόσο οι τοπικές όσο και οι 1g, 10g) υψηλότερες απ'αυτές στα 1800 MHz. Αυτό θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από τις μεγαλύτερες τιμές της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας, μιας εκ των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των βιολογικών ιστών, που παρατηρούνται στα 900 MHz (για παράδειγμα

η τιμή της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας στον χόνδρο είναι 42.653 στα 900 MHz και 40.215 στα 1800 MHz).

Τέλος μελετήθηκε η περίπτωση επίπεδου κύματος που δημιουργείται από μια πηγή που βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από το ανθρώπινο κεφάλι. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επεβεβαίωσαν τις αναμενόμενες μικρές τιμές του Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης.

Στα βιοηλεκτρομαγνητικά προβλήματα τα οποία μελετήθηκαν και εστιάζουν στον υπολογισμό της δοσιμετρίας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (FDTD). Σε ότι αφορά την εφαρμογή της επιδιώχθηκε οι διαστάσεις του πλέγματος να είναι κατά το δυνατό ελάχιστες, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον έγινε προσπάθεια η γεωμετρία να είναι τουλάχιστον 20 στοιχεία (κελιά) μακριά από τα όρια του πλέγματος, ώστε να υπάρχει ευστάθεια στους υπολογισμούς.

Δεδομένου ότι η πολυπλοκότητα της δομής που προσομοιώνεται αυξάνει το υπολογιστικό κόστος (αύξηση κελιών, αύξηση αριθμού κυβικών στοιχείων), εξηγείται η μεγάλη διαφορά στο χρόνο προσομοίωσης στα δύο μοντέλα κεφαλιού που μελετήθηκαν (απλό και πιο λεπτομερές).

Επιπλέον να σημειωθεί ότι οι τιμές SAR που καταγράφονται στην μελέτη προβλημάτων που έχουν σαν πηγή ακτινοβολίας μια διπολική κεραία $\lambda/2$, είναι μεγαλύτερες απ' αυτές που σημειώνονται στην περίπτωση τερματικής συσκευής. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην περίπτωση της απλής διπολικής κεραίας δεν υπάρχει κάποιο αγωγή επίπεδο.

Τέλος να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή των συμπερασμάτων προτιμήθηκε η χρήση των τιμών με μάζα αναφοράς δέκα γραμμάρια ιστού (10g SAR). Επιπλέον δεν λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές τιμές SAR, διότι σε κάποιες περιπτώσεις είναι πολύ υψηλές και δεν μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές. Να τονιστεί ότι τα διεθνή πρότυπα θεωρούν ότι οι τοπικές τιμές δεν καθίστανται αντιπροσωπευτικές για την επικινδυνότητα. Συνεπώς προτιμήθηκαν οι τιμές 10g SAR με στόχο να μειωθούν τα πιθανά σφάλματα.

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν θα μπορούσαν να αποτελέσουν την αφετηρία για επέκταση της έρευνας της αλληλεπίδρασης RF H/M ακτινοβολίας και βιολογικών ιστών, με έμφαση στην αλληλεπίδραση του ανθρώπινου σώματος ή κεφαλιού και της κεραίας ασύρματου τερματικού. Προτείνονται οι παρακάτω μελλοντικές κατευθυντήριες γραμμές έρευνας:

→ Μέτρηση SAR σε MRI-based μοντέλα κεφαλιών ατόμων διαφορετικών ηλικιών (για παράδειγμα 5 χρονών, 10 χρονών, 25 χρονών, 50 χρονών) που εκτίθενται σε

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τερματικής συσκευής και εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων με στόχο να διερευνηθεί πως κατανέμεται το ηλεκτομαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του κεφαλιού ανάλογα με την ηλικία του ατόμου.

→ Επιπλέον θα μπορούσε πέραν του SAR να υπολογιστεί η θερμοκρασιακή αύξηση σε ευαίσθητα σημεία του ανθρώπινου κεφαλιού (όπως τα μάτια) εξαιτίας της χρήσης τερματικών συσκευών. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της χρήσης της βιοθερμικής εξίσωσης. Εξάλλου έρευνες έχουν δείξει ότι τα ευαίσθητα όργανα πρέπει να μελετούνται εκτενέστερα, με την επιπρόσθετη ανάλυση της θερμοκρασιακής αύξησης που προέρχεται από έκθεση στην ακτινοβολία της κεραίας. Μόνο το SAR πιθανόν να μην είναι επαρκές για τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας.

→ Επίδραση του χεριού στα εκτιμώμενα επίπεδα SAR.

→ Σχεδιασμός και υλοποίηση ασύρματης συσκευής μεταφοράς ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT) που λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (ELF) από 6 έως και 10 MHz, και εκτίμηση των επιπέδων SAR.

→ Αντικείμενο εκτενούς έρευνας τα τελευταία χρόνια αποτελεί η τοποθέτηση-εμφύτευση ιατρικών συσκευών μέσα στο ανθρώπινο σώμα για εφαρμογές που αφορούν την τηλεμετρία και την τηλεϊατρική. Προχωρημένες ηλεκτρομαγνητικές αριθμητικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό των κεραιών σε ένα περιβάλλον που εξομοιώνει όσο το δυνατόν καλύτερα τον ανθρώπινο οργανισμό. Έπειτα μπορεί να γίνει εκτίμηση των επιπέδων SAR και διαπίστωση του αν υπάρχει συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα ασφαλούς έκθεσης.

→ Τέλος ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μοντελοποίηση τερματικής συσκευής με συχνότητα λειτουργίας στα 900 Mz ή 1800 MHz, που εμπεριέχει MTM(metamaterial) κεραία. Με τη χρήση αυτού του είδους της κεραίας αναμένεται σημαντική μείωση του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης.

Βιβλιογραφία

- [1] World Health Organization – Electromagnetic Fields (EMF)
- [2] Physics - Raymond A. Serway, τόμος II-Ηλεκτρομαγνητισμός
- [3] Sources and Effects of Ionizing Radiation: Sources, United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiatio
- [4] Chapter 8- Electromagnetic waves David Morin, morin@physics.harvard.edu MIT OpenCourseWare - Haus, Hermann A., and James R. Melcher. Electromagnetic Fields and Energy. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989
- [5] <http://www.physics.uc.edu/~sitko/ReflectanceSpectroscopy.pdf>
- [6] Jaakko Malmivuo & Robert Plonsey, *Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*, Oxford University Press, New York, 1995.
- [7] Biological effects of exposure to non-ionizing electromagnetic fields and radiation. R.D. Saunders- C.I. Kowalczuk-Z.J. Sienkiewicz National radiological protection board NRPB 1995
- [8] Σημειώσεις μεταπτυχιακού προγράμματος ΕΜΠ, μάθημα «Βιοηλεκτρομαγνητισμός», Δρ. Κωνσταντίνα Νικήτα
- [9] Grandolfo M., Michaelson S.M., Rindi A., “Fundamentals of the interactions of radiofrequency and microwave energies with matter” Plenum Press, New York
- [10] Comparison of SARs Induced in a Heterogeneous Human Brain Model Alina Buleandra, Teodor Petrescu, Telecommunications Department “Politehnica” University of Bucharest, Bucharest, Romania
- [11] Kwan-Hoong Ng, Non-Ionizing Radiations – Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures, Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation, October 2003
- [12] Λουιζή Α, Μη Ιονίζουσα Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (ΗΜΓ) - Φυσικές Αρχές - Βιολογικές επιδράσεις - Κανονισμοί και Όρια Προστασίας, Οκτώβριος 2007
- [13] Osepchuk J. M., Petersen R. C., “Safety Standards for Exposure to RF Electromagnetic Fields”, IEEE Microwave, June 2001.
- [14] Verschaeve, A. Maes, “Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields”, Mutation Research 410 (1998)

- [15] Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής – Τομέας Εφαρμογών Φυσικής και Φυσικής Περιβάλλοντος, Διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα της Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, Θεσσαλονίκη 2011
- [16] Andre Vander Vorst, Arye Rosen, Youji Kotsuka, RF/Microwave Interaction with Biological Tissues, - Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- [17] L.J. Challis “Review- Mechanisms for Interaction Between RF Fields and Biological Tissue”, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom
- [18] Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος ΕΜΠ «Βιοηλεκτρομαγνητισμός» - Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου – Δρ Κωνσταντίνα Νικήτα
- [19] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΤ) ΕΓΚΥΚΛΙΟΣ - Θέμα : Καθορισμός ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο περιβάλλον σταθμών κεραιών σε εφαρμογή του Ν. 3431/2006 (ΦΕΚ 13/Α/03-02-2006).
- [20] ICNIRP Guidelines -GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHz) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- [21] Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και Κινητή Τηλεφωνία - Τα επιστημονικά δεδομένα – ΕΕΤΤ
- [22] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz
- [23] Lin J. C., “Risks to Children from Cellular Telephone Radiation”, IEEE microwave magazine, pp. 20 – 26, March 2003.
- [24] Paolo Vecchia, Rüdiger Matthes, Gunde Ziegelberger, James Lin, Richard Saunders, Anthony Swerdlow .” ICNIRP 16/Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)”
- [25] Adel Z. El Dein Alaeddin Amr, “Specific Absorption Rate (SAR) Induced in Human Heads of Various Sizes When Using a Mobile Phone” - Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol I - WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
- [26] T. V. Yioultsis, T. I. Kosmanis, E. P. Kosmidou, T. T. Zygiridis, N. V. Kantartzis, T. D. Xenos, and T. D. Tsiboukis, “A Comparative Study of the Biological Effects of Various Mobile Phone and Wireless LAN Antennas”, March 2002
- [27] Zheng Zhan, Zhang Jin ling, Lv Ying hua, Yang Jin sheng, “Compare of Human Head Model SAR about Different Frequency Radiation in BAN”, IEEE, 2008

- [28] Alina Buleandra, Teodor Petrescu, "Comparison of SARs Induced in a Heterogeneous Human Brain Model", 2009
- [29] M. Martinez-Burdalo, L. Nonidez, A. Martin and R. Villar, "FDTD ANALYSIS OF THE MAXIMUM SAR WHEN OPERATING A MOBILE PHONE NEAR A HUMAN EYE AND A WALL", 2000
- [30] H. Virtanen, J. Keshvari and R. Lappalainen, "The effect of authentic metallic implants on the SAR distribution of the head exposed to 900, 1800 and 2450 MHz dipole near field", IEEE, 2007
- [31] W. Heyvaert, N. Ilijasevic, and L. Martens, "GRID SIZE SENSITIVITY OF FIELD AND SAR CALCULATIONS USING THE FDTD METHOD", 1998
- [32] C.-H. Li, M. Douglas, E. Ofli, B. Derat, N. Chavannes and N. Kuster, "Analysis of the Hand Effect on Head SAR with Generic and CAD Phone Models Using FDTD", 2010
- [33] S. S. Karthikeyan, Mahendra Babu Manapati and Rakhesh S. Kshetrimayum, "Reduction of specific absorption rate in human tissues using split ring resonators", IEEE, 2009
- [34] Wan Azlan Wan Zainal Abidin, "900MHz and 1800MHz Mobile Phone Effect Towards Adult Head in SAR Distribution and SAR in Weight", 2010
- [35] Claudio R. Fernández, Giovani Bulla, A. C. Pedra and Alvaro. A. A. de Salles "Comparison of Electromagnetic Absorption Characteristics in the Head of Adult and a Children for 1800 MHz Mobile Phones", IEEE, 2005
- [36] R P Findla, P J Dimbylow, "SAR in children from exposure to wireless local area networks (WLAN)", IEEE, 2012
- [37] Andreas Christ, Mark G. Douglas, "Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer Systems With Human Electromagnetic Exposure Limits", 2013
- [38] Jerdvisanop Chakarothai, Kanako Wake, and Soichi Watanabe, "SAR Assessment of a Human Body Exposed to Electromagnetic Fields from a Wireless Power Transfer System in 10 MHz Band", IEEE, 2014
- [39] Concettina Buccella, Valerio de Santis and Mauro Feliziani, "Prediction of temperature increase in human eyes due to RF sources", IEEE, 2007
- [40] Herman P. Schwan, Kenneth R. Roster, "RF – Field Interactions with Biological Systems: Electrical properties and Biophysical Mechanisms, IEEE, 1980
- [41] Frank S. Barnes, Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, Third Edition, 2006

- [42] Allen Taflove, *Advances in Computational Electrodynamics. The Finite - Difference Time - Domain Method*, 1998
- [43] Pertti Vainikainen, Jani Ollikainen, Outi Kivekäs, and Ilkka Kelaender, "Resonator-Based Analysis of the Combination of Mobile Handset Antenna and Chassis", *IEEE*, 2002
- [44] A Compact Hilbert Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Dual-Band Mobile Phone Applications, M. Z. had and M. Ali, *IEEE*, 2004
- [45] T. T. Zygidis and T. D. Tsiboukis, "Assessment of human exposure to wireless communication devices: Combined electemagnetic and thermal studies for diverse frequency bands", 2008
- [46] R. B. Waterhouse, *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide* (Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2003)
- [47] REMCOM, *Reference Manual, Full Wave, 3D, Electromagnetic Analysis Software, Version 6.3*
- [48] REMCOM, *Users Guide, Full Wave, 3D, Electromagnetic Analysis Software, Version 6.3*