



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Προσομοιωτική μελέτη της αλληλεπίδρασης ανθρώπου και
ασύρματων διατάξεων σε δίκτυα νέας γενιάς**

Κατιρτζίδου Αικατερίνη
Επιβλέπων καθηγητής: Ζυγκιρίδης Θεόδωρος

Κοζάνη, Ιούνιος 2019

©2019 – All rights reserved

Copyright ©Κατιρδζίδου Αικατερίνη, 2019

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εη 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 παρών μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της για κερδοσκοπικό σκοπό θα πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Θεόδωρο Ζυγκιρίδη, για την καθοδήγηση του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά κυρίως για το ενδιαφέρον που μου δημιουργήθηκε για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία παρακολουθώντας το μάθημά του, χάρη στον ξεχωριστό τρόπο διδασκαλίας του.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα από την αρχή της ζωής μου και μου έδωσαν όλα τα εφόδια για να πετύχω τους στόχους μου και να μπορέσω να φοιτήσω στην σχολή που ονειρευόμουν. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τα αδέρφια μου, που μου δείχνουν καθημερινά την αγάπη τους και μου δίνουν δύναμη να συνεχίσω.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που γνώρισα τα τελευταία χρόνια της ζωής μου και με κάνουν καθημερινά χαρούμενη, με βοηθούν να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν με σκοπό να εξελιχθώ σαν χαρακτήρας, αλλά και να βελτιώσω κάθε μου δεξιότητα. Η εμπύχωση τους για μένα είναι το πιο πολύτιμο δώρο.

Εύχομαι, αυτή η διπλωματική εργασία, να αποτελέσει έμπνευση για νέες ιδέες και έρευνες με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας που προνοεί και προστατεύει τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Κατιρτζίδου Αικατερίνη, 2019
Κοζάνη

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	3
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	4
Κεφάλαιο 2	
Βασικές έννοιες	
2.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	9
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	10
Κεφάλαιο 3	
Πρότυπα ασφαλούς έκθεσης	
3.1 Δοσιμετρία	12
3.2 Περιορισμοί και μετρήσεις ακτινοβολίας	13
3.2.1 Κατηγορίες περιορισμών έκθεσης	13
3.2.2 Μετρήσεις ακτινοβολίας	14
3.3 Πιθανότητες υπέρβασης ορίων ασφαλείας και αμφιβολίες	14
3.4 Όρια έκθεσης της ICNIRP	15
3.5 Όρια έκθεσης στην Ελλάδα	17
3.6 Όρια έκθεσης της IEEE	18
Κεφάλαιο 4	
Η τεχνολογία της επικοινωνίας σήμερα	
4.1 Λειτουργία κινητής τηλεφωνίας	20
4.2 Κινητή τηλεφωνία σήμερα	21
4.3 Δίκτυα 5G	21

Κεφάλαιο 5

Υπολογισμός του SAR σε μοντέλο κεφαλιού για την περίπτωση ακτινοβολίας διπόλου $\lambda/2$

5.1 Γενικά στοιχεία	22
5.1.1 Δίπολο $\lambda/2$	22
5.1.2 Μέθοδος FDTF (Finite Difference Time Domain)	23
5.1.3 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού	25
5.1.4 Συχνότητες εκπομπής και θέσεις	27
5.1.5 Κατασκευή γεωμετρίας	27
5.2 Δίπολο $\lambda/2$ δίπλα στο αυτί	28
5.2.1 Δίπολο $\lambda/2$ με κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί στα 6 Ghz	28
5.2.2 Δίπολο $\lambda/2$ με κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί στα 10 Ghz	30
5.2.3 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί στα 6 Ghz	31
5.2.4 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί στα 10 Ghz	33
5.3 Δίπολο δίπλα στο μάτι	34
5.3.1 Δίπολο $\lambda/2$ με κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι στα 6 Ghz	34
5.3.2 Δίπολο $\lambda/2$ με κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι στα 10 Ghz	36
5.3.3 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι στα 6 Ghz	37
5.3.4 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι στα 10 Ghz	39
5.4 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης	40
5.4.1 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης στο αυτί	40
5.4.2 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης στο μάτι	42
5.4.3 Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης αυτιού στα 6 και 10 Ghz	43
5.4.4 Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης αυτιού στα 6 και 10 Ghz	44
5.4.5 Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης ματιού στα 6 και 10 Ghz	45
5.4.6 Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης ματιού στα 6 και 10 Ghz	47

Κεφάλαιο 6

Επίπεδο κύμα

6.1 Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	48
6.2 Επίπεδο κύμα σε μοντέλο κεφαλιού	48
6.2.1 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια ICNIRP	51
6.2.2 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια της Ελλάδας για τον γενικό πληθυσμό (60%)	53
6.2.3 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια της Ελλάδας για τον γενικό πληθυσμό (70%)	55
6.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	57

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα	60
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	60

Βιβλιογραφία	62
---------------------	-----------

Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, μελετάται το θέμα της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Ιδιαίτερη βάση δίνεται στον υπολογισμό του ρυθμού ειδικής απορρόφησης (SAR) της ακτινοβολίας από τους ιστούς στις αρχικές συχνότητες που πρόκειται να λειτουργήσουν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στόχος είναι, να γίνει μία ανασκόπηση των πρότυπων ασφαλούς έκθεσης και στη συνέχεια να υπολογιστεί η απορρόφηση ακτινοβολίας στην περίπτωση έκθεσης σε πηγές κοντινού πεδίου στις συχνότητες που προαναφέρθηκαν, αλλά και στην περίπτωση έκθεσης σε επίπεδο κύμα. Για την επίτευξη του στόχου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με την χρήση της μεθόδου FDTD. Οι προσομοιώσεις, έγιναν με βάση ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού που προσεγγίζει τις ιδιότητες του ανθρώπινου οργανισμού.

Το κεφάλαιο 1, περιέχει μία γενική εισαγωγή καθώς και μία βιβλιογραφική ανασκόπηση άρθρων που σχετίζονται με τις υψηλές συχνότητες και τα πρότυπα ασφαλείας.

Το κεφάλαιο 2, παρουσιάζει βασικές έννοιες για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Το κεφάλαιο 3, ασχολείται με πρότυπα ασφαλούς έκθεσης.

Το κεφάλαιο 4, αναλύει τη λειτουργία κινητής τηλεφωνίας, τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα και αυτές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις επόμενες γενιές δικτύων.

Το κεφάλαιο 5, έχει να κάνει με την έκθεση σε πηγές κοντινού πεδίου και την παρουσίαση των προσομοιώσεων και συμπερασμάτων γύρω από αυτόν τον τομέα.

Στο κεφάλαιο 6, αναπτύσσεται η περίπτωση του επίπεδου κύματος με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, διαγράμματα και συμπεράσματα.

Τέλος, το κεφάλαιο 7, συνοψίζει τα συμπεράσματα από όλη την έρευνα και προτείνει μελλοντικές επεκτάσεις.

Abstract

In this diploma thesis, is being studied the issue of the effect of electromagnetic radiation on the human body. A special basis is given to calculate the specific absorption rate (SAR) of the radiation from the tissues at the initial frequencies to be used by the fifth generation networks. The aim is to review the safe exposure scenarios and then calculate the absorption of radiation in case of exposure to near-field sources at the frequencies mentioned above, but also in case of exposure to plane wave. To achieve the goal, simulations were made using FDTD method. The simulations were made on the basis of a human head model approaching the properties of the human organism.

Chapter 1, contains a general introduction as well as a bibliographic review of articles related to high frequencies and safety standards.

Chapter 2, introduces basic concepts for electromagnetic radiation an electromagnetic spectrum.

Chapter 3, deal with safe exposure standards.

Chapter 4, analyzes the mobile telephony function, the frequencies used today and those to be used in the next generation of networks.

Chapter 5, is about exposure to near-field sources and the presentation of simulations and conclusions about this area.

In chapter 6, we develop the case of plane wave with the corresponding simulations, diagrams and conclusions.

Finally, chapter 7 summarizes the findings of the survey and proposes future extensions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης της τεχνολογίας, οι άνθρωποι έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν και να αποκτούν πληροφορίες οποιαδήποτε στιγμή, εύκολα και γρήγορα. Οι εξελίξεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών είναι ραγδαίες και πολλά υποσχόμενες. Ο άνθρωπος που είχε πάντα την τάση να αποκτά νέες γνώσεις και να βελτιώνει την καθημερινότητά του, έχει εισάγει στην ζωή του πληθώρα συσκευών, όπως το κινητό, το ραντάρ, τον υπολογιστή, κ.α. οι οποίες εκπέμπουν και λαμβάνουν ηλεκτρομαγνητική ισχύ μέσω ακτινοβολίας. Έτσι, προκύπτει η άμεση ανάγκη για μελέτη της επίδρασης αυτής της ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να ρίξουμε μια ματιά στις έρευνες των τελευταίων ετών, οι οποίες επικεντρώνονται στην μελέτη της αύξησης θερμοκρασίας των ιστών του οργανισμού με δεδομένη τη χρήση πολύ μεγαλύτερων συχνοτήτων στα δίκτυα πέμπτης γενιάς, καθώς και τα όρια ασφαλούς έκθεσης.

1.1 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει μία έρευνα σχετικά με την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον οργανισμό, όταν χρησιμοποιούνται συχνότητες από 6 GHz και πάνω. Αυτή η ανάγκη προέκυψε κυρίως από την πέμπτη γενιά δικτύων τηλεπικοινωνιών που πρόκειται να έρθει στο προσκήνιο τα επόμενα χρόνια και έχει σαν στόχο να επιτύχει μεγάλες ταχύτητες και πολλά άλλα πλεονεκτήματα, λειτουργώντας σε μεγαλύτερες από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Αρχικά, υπάρχει η βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην οποία περιέχονται αναφορές σε επιστημονικά άρθρα και άλλες σχετικές έρευνες σχετικά με την επίδραση χιλιοστομετρικών κυμάτων στον ανθρώπινο οργανισμό και τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες γενικές έννοιες σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αμέσως μετά, υπάρχει μία αναφορά στα πρότυπα ασφαλούς έκθεσης όπου αναφέρονται βασικά πράγματα για το πώς προέκυψαν τα όρια και τη συχνότητα μετρήσεων για τα επίπεδα εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή. Επιπλέον, υπάρχει εστίαση στα όρια του διεθνούς οργανισμού ICNIRP, της IEEE και της Ελλάδας, η οποία όπως είναι φανερό στη συνέχεια, έχει αυστηρότερα όρια και επιπλέον προστασία.

Ακολουθεί ένα κεφάλαιο που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των δικτύων πέμπτης γενιάς, στο φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα και άλλες γενικές πληροφορίες καθώς επίσης παρουσιάζονται οι αμφιβολίες για την κάλυψη των ορίων ασφαλείας μέχρι σήμερα.

Στη συνέχεια, ξεκινούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η FDTD (Finite Difference Time Domain). Αρχικά, οι προσομοιώσεις έχουν να κάνουν με την έκθεση σε πηγές κοντινού πεδίου. Προσομοιώνεται ένα δίπολο $\lambda/2$ που τοποθετείται κοντά σε

ευαίσθητους ιστούς του κεφαλιού, όπως είναι το μάτι και το αυτί. Δοκιμές γίνονται σε διάφορες αποστάσεις και εξάγονται κάποια συμπεράσματα, τα οποία απεικονίζονται σε διαγράμματα σχετικά με τον ρόλο της απόστασης του διπόλου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται στα 6 και 10 GHz που είναι στο αρχικό εύρος συχνοτήτων των δικτύων πέμπτης γενιάς. Σκοπός είναι η εκτίμηση και ο υπολογισμός του SAR για αυτές τις συχνότητες.

Στο επόμενο κεφάλαιο, υπάρχουν πάλι τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που αυτή τη φορά σχετίζονται με τα αποτελέσματα του SAR σε συνθήκες πρόσπτωσης επίπεδου κύματος. Το επίπεδο κύμα, αν και αποτελεί μία εξιδανικευμένη περίπτωση, αφορά την περίπτωση μακρινής πηγής. Σε αυτές, δίνεται βάση στη μέγιστη πυκνότητα ισχύος που είναι επιτρεπτή για την ICNIRP και την Ελλάδα και όλα τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε διαγράμματα. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, υπάρχουν τα γενικά συμπεράσματα από όλη την εργασία και ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να συμβάλλουν στην καλύτερη προστασία του ανθρώπινου οργανισμού από τις ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ένα βασικό στοιχείο της φύσης και της καθημερινότητας είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Εάν συγκεντρωθούν όλες οι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συγκροτούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, το οποίο μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες: την ιονίζουσα ακτινοβολία με συχνότητες μεγαλύτερες από το ορατό φως και τη μη ιονίζουσα με συχνότητες μικρότερες/ίσες με το ορατό φως. Η συνεχής αύξηση της παρουσίας συσκευών που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γύρω μας, όπως το κινητό, το ραντάρ και πολλά άλλα, έχει κάνει απαραίτητη την ύπαρξη ασφαλών ορίων έκθεσης, με σκοπό να προστατευθεί ο άνθρωπος από την πιθανότητα εμφάνισης κάποιας δυσμενούς συνθήκης στον οργανισμό του.

Μέχρι σήμερα, το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών που έχει γίνει βασικό κομμάτι της καθημερινότητας, κυμαίνεται κυρίως στη μπάνα 800 – 2600 MHz. Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη απόσταση μπορεί να καλυφθεί από την ηλεκτρομαγνητική ισχύ, για αυτό και κάθε ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται για διαφορετικές ανάγκες. Από την άλλη μεριά, όσο χαμηλότερη είναι η ζώνη συχνοτήτων, τόσο χαμηλότερη είναι κι η χωρητικότητα.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι πλέον μπαίνουμε στην εποχή του 5G ή αλλιώς των δικτύων πέμπτης γενιάς, που υπόσχονται να προσφέρουν πιο γρήγορες ταχύτητες από ποτέ, αλλά και πιο αξιόπιστες συνδέσεις, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Το 5G αναμένεται να λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων μεγαλύτερες από τις συχνότητες που χρησιμοποιούν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς και κάτω. Σε αυτές τις συχνότητες, τα κύματα μπορούν να πραγματοποιούν μεταφορά δεδομένων σε μεγαλύτερες απ' ό,τι μέχρι τώρα ταχύτητες, ωστόσο δεν μπορούν εύκολα να παρακάμψουν εμπόδια όπως κτίρια, γεγονός που

οδηγεί αβίαστα στο συμπέρασμα ότι το πλήθος των κεραιών θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά.

Τα όρια ασφαλούς έκθεσης μέχρι σήμερα για συσκευές που λειτουργούν σε συχνότητες έως 5 GHz, χαρακτηρίζονταν από τον SAR, με σκοπό να περιορίσουν την απορροφούμενη ισχύ για την αποφυγή της αύξησης θερμοκρασίας στο κεφάλι ή το σώμα. Σε συσκευές που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 6 GHz, τα όρια ασφαλούς έκθεσης βασίζονται στην πυκνότητα ισχύος. Ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης SAR που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό ορίων ασφαλούς έκθεσης, αποτελεί μέγεθος που εκφράζει τον ρυθμό απορρόφησης της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων από τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος και υπολογίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται από ορισμένη μάζα ιστού (ειδική απορρόφηση) μέσα σε ορισμένο χρόνο και μετριέται σε μονάδες ισχύος ανά μάζα (W/kg), εστιάζοντας σε μάζα ιστού 1g ή 10g.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση από διάφορες έρευνες, σχετικά με την έκθεση του ανθρώπου σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα όρια ασφαλείας που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στο πλαίσιο εμφάνισης των δικτύων πέμπτης γενιάς που λειτουργούν σε μεγαλύτερες συχνότητες από αυτές που χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα.

Το 2017, πραγματοποιήθηκε μία έρευνα, με σκοπό να βρει τη συσχέτιση της ροής του αίματος, την αύξηση της θερμοκρασίας του οργανισμού και τον SAR, κυρίως σε συχνότητες άνω των 6 GHz [Laakso et al, 2017]. Πρώτα, δόθηκε βάση στην μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του κεφαλιού, με τη βοήθεια της τεχνικής laser Doppler. Στην μελέτη, συμμετείχαν εθελοντές από 22 έως 24 ετών και μετρήθηκε η ροή αίματος σε διαφορετικά σημεία του κεφαλιού και σε τρία διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια του κεφαλιού όταν αυτοί βρίσκονταν σε ένα γραφείο με θερμοκρασία 23°C. Αντίστοιχα, έγιναν προσομοιώσεις με ρεαλιστικά μοντέλα ανθρώπων διαφορετικού φύλου και ηλικίας, στα οποία τοποθετήθηκε μια διπολική κεραία σε απόσταση 25 mm από το κεφάλι, η οποία είχε συχνότητα εκπομπής από 1 έως 12 GHz. Με την βοήθεια της μεθόδου FDTD, έγινε ο υπολογισμός της ισχύος που απορροφήθηκε από το κεφάλι και με τη βιοθερμική εξίσωση έγινε ο υπολογισμός της θερμοκρασίας για τα μοντέλα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το βάθος, τόσο αυξάνεται και η ροή του αίματος. Σε χαμηλότερες συχνότητες, η ροή του αίματος παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια σε σχέση με τις μεγαλύτερες συχνότητες, λόγω του μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης των κυμάτων χαμηλότερων συχνοτήτων. Τέλος, όσον αφορά τη σχέση του SAR με την θερμοκρασία, σε όλα τα μοντέλα παρατηρήθηκε φθίνουσα τάση του SAR όσο αυξάνεται η συχνότητα.

Το 2018, μία έρευνα ασχολήθηκε με την αλληλεπίδραση ενός μοντέλου κεφαλιού με έξι στρώματα, τα οποία είναι: δέρμα-λίπος-κόκκαλο-μήνιγγα-εγκεφαλονωτιαίο υγρό-εγκέφαλος, με μία διπολική κεραία [Miyazaki et al, 2018]. Το κεφάλι σχεδιάστηκε σαν ένας κύλινδρος και η απόσταση του διπόλου από αυτό ήταν 0 cm. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η FDTD και το εύρος συχνοτήτων ήταν από 1 έως 10 GHz. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκε η βιοθερμική εξίσωση για την εύρεση της αύξησης θερμοκρασίας του μοντέλου. Παρατηρώντας μέγεθος του SAR για κάθε συχνότητα, βγαίνει αβίαστα το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, αυξάνεται και ο SAR. Όταν ξεπερνιέται η συχνότητα των 6 GHz

ο SAR πέφτει πολύ και αυτό είναι λογικό γιατί όταν ξεπερνιέται η συχνότητα των 6 GHz, η παράμετρος που είναι σημαντική για την απορρόφηση ακτινοβολίας είναι η πυκνότητα ισχύος και όχι ο SAR. Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στο SAR για τον εγκέφαλο καθώς είναι από τα πιο σημαντικά όργανα του σώματος μας. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως ο SAR δεν ξεπερνούσε το επιτρεπτό όριο στις συχνότητες κάτω των 6 GHz αλλά το ξεπερνούσε στα 6 GHz.

Μία παλιότερη ενδιαφέρουσα έρευνα που δημοσιεύθηκε το 2015, αφορά τα ασφαλή όρια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για συχνότητες άνω των 6 GHz, στις οποίες θα λειτουργούν οι συσκευές που ανήκουν στην γενιά του 5G [Colombi et al, 2015]. Τα όρια SAR υπολογίζονται με κύριες μονάδες το 1g ιστού (FCC) ή τα 10g (IEEE & ICNIRP). Τα όρια πυκνότητας ισχύος υπολογίζονται αντίστοιχα με διαφορετικές μονάδες από κάθε οργανισμό. Στο πλαίσιο της μελέτης, έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις με το ευρέως γνωστό ηλεκτρομαγνητικό λογισμικό FEKO. Η μελέτη έγινε με βάση ένα επίπεδο φυσικό μοντέλο ανθρώπινου σώματος, που μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια την αντίδραση του σώματος στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σε συχνότητες από κάτω των 10 GHz έως και 70 GHz. Το συμπέρασμα είναι πως σε χαμηλότερες συχνότητες υπάρχει ένας συνδυασμός πολλών παραγόντων και η βασική παράμετρος ασφαλείας είναι ο SAR, ενώ σε μεγαλύτερες συχνότητες παρατηρείται μεγαλύτερη επιφανειακή απορρόφηση ισχύος με αποτέλεσμα τα όρια να προκύπτουν με βάση την πυκνότητα ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα επιστημονικό άρθρο με θέμα την ακούσια απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα βρέφη, βασισμένο στις επιδράσεις της συχνότητας 3,5 GHz [Consheng et al, 2017]. Στόχος του είναι να ερευνηθεί το αποτέλεσμα παλιότερων ερευνών που αναφέρουν πως η απορρόφηση ακτινοβολίας από τα παιδιά, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από ότι στους ενήλικες. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις ήταν δύο. Ένα που αναπαριστά ένα παιδί ενός έτους και ένα μοντέλο ενός ενήλικα 22 ετών. Οι προσομοιώσεις έγιναν χρησιμοποιώντας την μέθοδο FDTD και το λογισμικό SEMCAD. Επιπροσθέτως, τέσσερις προσεγγίσεις έγιναν για τις διηλεκτρικές ιδιότητες που είναι εξαρτώμενες από την ηλικία του ανθρώπου, με βάση τις τιμές από έναν αρουραίο, εφόσον είναι γνωστή η συσχέτιση των ηλικιών ανθρώπου-αρουραίου. Όσον αφορά τις προσομοιώσεις, μελετήθηκε το μοντέλο του μωρού μόνο του, ο ενήλικας να κρατάει το μωρό από μπροστά και ο ενήλικας να κρατάει το μωρό στην πλάτη του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πυκνότητα ισχύος έφτανε μέχρι 0,42 W/m². Η τιμή αυτή είναι 5% μικρότερη από το όριο του ICNIRP και αφορά τον γενικό πληθυσμό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο ολικός SAR για τα βρέφη είναι μικρότερος όταν βρίσκονται στην αγκαλιά του ενήλικα και ο ενήλικας λειτουργεί σαν «ασπίδα», χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη διαφορά. Ωστόσο, εστιάζοντας στο SAR τοπικά, με βάση τον υπολογισμό του SAR σε σχέση με τις διηλεκτρικές ιδιότητες ενήλικα και μωρού, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο εγκέφαλος του μωρού να απορροφά μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η απορρόφηση της ακτινοβολίας φάνηκε να γίνεται κυρίως από το δέρμα και τους ιστούς σε απόσταση 2 cm κάτω από αυτό, στη συχνότητα των 3.5 GHz.

Όπως είναι φανερό, ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα μελέτης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών σε μεγαλύτερες συχνότητες. Αυτό το θέμα, εμφανίστηκε σε ένα ακόμα άρθρο του 2017 [Foster et al, 2017], που είχε σαν στόχο την εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας των ιστών, όταν σε απόσταση 2 cm από το σώμα υπάρχει μια διπολική κεραία. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το FEKO και το εύρος συχνοτήτων που διερευνήθηκε ήταν 2-60 GHz με την μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος σε κάθε περίπτωση. Η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος, υπολογίστηκε με βάση την βιοθερμική εξίσωση του Pennes. Συγκρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα για την αύξηση θερμοκρασίας των ιστών, με τα προβλεπόμενα δεδομένα από τους διάφορους οργανισμούς, διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο εκτιμά επαρκώς την αύξηση θερμοκρασίας στο δέρμα που εκτίθεται σε χιλιοστομετρικά κύματα. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τα όρια των τριών γνωστών οργανισμών FCC, ICNIRP και IEEE. Για τα δεδομένα των FCC & ICNIRP η αύξηση αυτή μειώνεται πολύ στην μετάβαση από SAR σε πυκνότητα ισχύος. Αντίθετα, αυτό δε συμβαίνει για τα δεδομένα της IEEE. Αντίστοιχα αποτελέσματα υπάρχουν στο διάγραμμα για την απορροφούμενη ισχύ σε σχέση με την συχνότητα. Συμπερασματικά, φαίνεται τα όρια της IEEE να δημιουργούν ένα ασφαλές σταθερό όριο σχετικά με την αύξηση θερμοκρασίας των ιστών σε σχέση με τους άλλους δύο οργανισμούς. Θεωρητικά, μια πιο ομοιόμορφη θερμοκρασία μπορεί να παρατηρηθεί συνδυάζοντας τα όρια του ICNIRP μέχρι τη συχνότητα των 10 GHz και της IEEE για τις μεγαλύτερες συχνότητες.

Στο ίδιο πλαίσιο, το 2018 δημοσιεύθηκαν τα αποτελέσματα κάποιων προσομοιώσεων για το εύρος συχνοτήτων από 6 GHz έως 1 THz [Kun Li et al, 2018]. Η λογική ήταν η ίδια. Το 5G είναι η τεχνολογία του μέλλοντος και πολλά υποσχόμενο, παρόλα αυτά επειδή πολλές συσκευές έχουν αρχίσει να διεισδύουν ήδη στην αγορά, βασική προτεραιότητα πρέπει να είναι ο έλεγχος των επιπτώσεων αυτών των συχνοτήτων στον ανθρώπινο οργανισμό. Η πυκνότητα ισχύος ορίστηκε ως 10 W/m^2 . Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας έγινε με τη βοήθεια της βιοθερμικής εξίσωσης. Μελετήθηκαν δύο μοντέλα, το ένα με 3 στρώματα και το άλλο με 4 στρώματα. Μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε στο μοντέλο με τα 4 στρώματα, καθώς υπάρχει θερμομόνωση χάρη στο στρώμα της επιδερμίδας. Τα άλλα 3 στρώματα ήταν η δερμίδα, το λίπος και οι μύες. Με βάση τα αποτελέσματα, φάνηκε πως καθώς η συχνότητα αυξανόταν, αντίστοιχη συμπεριφορά είχε και η θερμοκρασία. Ακόμα, συμπεραίνεται πως δεν φάνηκε κάποια άμεση συσχέτιση της θερμοκρασίας με την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος στο εύρος συχνοτήτων που μελετήθηκε. Σε αντίθεση με αυτό, η διαθλώμενη πυκνότητα ισχύος φαίνεται να έχει άμεση συσχέτιση με την θερμοκρασία, ανεξάρτητα από την συχνότητα, την γωνία και την πόλωση. Αυτό συνεπάγεται πως η πυκνότητα ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ασφαλής περιορισμός για τα χιλιοστομετρικά κύματα.

Μία πιο εξειδικευμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε, με επίκεντρο τη χρήση έξυπνων φορητών συσκευών, οι οποίες λειτουργούν σε συχνότητες δικτύου πέμπτης γενιάς και συγκεκριμένα τη χρήση έξυπνων γυαλιών [Fatih Kaburcuk et al, 2018]. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με ένα ρεαλιστικό μοντέλο κεφαλιού, αποτελούμενο από 8 ιστούς (δέρμα, μύες, κόκκαλα, αίμα, κ.α.) και με ένα μοντέλο έξυπνου ζευγαριού γυαλιών. Τα γυαλιά

αποτελούνταν από πλαστικό σκελετό, μεταλλικές βίδες, φακούς και μία διπολική κεραία που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο παθητικά καλώδια. Η προσομοίωση βασίστηκε στη μέθοδο FDTD και ο υπολογισμός του SAR και της θερμοκρασίας του σώματος έγινε με βάση την βιοθερμική εξίσωση του Pennes. Η αύξηση της θερμοκρασίας του κεφαλιού, υπολογίστηκε σε μία προσομοίωση για 2,4 και 4,9 GHz. Η διαδικασία έχει ως εξής: Πρώτα υπολογίζεται η αρχική θερμοκρασία με την βοήθεια της βιοθερμικής εξίσωσης, με $SAR = 0$. Στη συνέχεια, η κατανομή της τελικής θερμοκρασίας υπολογίζεται, αντικαθιστώντας τον SAR στην εξίσωση. Η διαφορά των δύο αποτελεσμάτων, δηλώνει την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ισχύς εισόδου ορίστηκε 0,25 W. Η μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε στην αριστερή μεριά του κεφαλιού, στην οποία ήταν τοποθετημένη και η κεραία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Βασικές έννοιες

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται μία αναφορά σε βασικές έννοιες σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δίνεται μία γενική εικόνα της ακτινοβολίας αυτής αλλά και του φάσματος το οποίο αποτελεί μία θεμελιώδη έννοια που δεν θα μπορούσε να παραληφθεί.

2.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Με τον όρο ακτινοβολία ορίζεται η διάδοση ενέργειας στο χώρο είτε με τη μορφή σωματιδίων είτε με τη μορφή κυμάτων. Η έκθεση του ανθρώπου σε αυτήν είναι καθημερινή, προέρχεται είτε από φυσικές, είτε από τεχνητές πηγές και η περιοχή του φάσματος που γίνεται αντιληπτή είναι το ορατό φως και οι υπέρυθρες ακτινοβολίες. Ακόμα κι ο ίδιος ο άνθρωπος εκπέμπει ακτινοβολία. Τα βασικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι το μήκος κύματος, η συχνότητα και η ενέργεια που μεταφέρεται. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα.

Οι πηγές ακτινοβολίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε φυσικές και τεχνητές. Αναφορικά, οι πιο συνηθισμένες τεχνητές πηγές είναι οι κεραίες σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας, τα ασύρματα τηλέφωνα, πομποί ραδιοφωνικών σταθμών, ενώ οι φυσικές είναι το ηλιακό φως, η ακτινοβολία γης, αλλά και η εσωτερική ακτινοβολία που εισέρχεται στο σώμα με εισπνοή και κατάποση.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η ακτινοβολία διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: ιοντίζουσα ακτινοβολία και μη ιοντίζουσα. Ιοντισμός ονομάζεται οποιαδήποτε διαδικασία οδηγεί στην πρόσληψη ή την αφαίρεση ενός ηλεκτρονίου από ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο ή μόριο και τη μετατροπή του σε ιόν. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία, είναι αυτή της οποίας η ενέργεια που μεταφέρει μπορεί να εισέλθει μέσα στην ύλη. Αφού εισέλθει, μπορεί να διασπάσει χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει προβλήματα στον ανθρώπινο οργανισμό. Η πιο γνωστή μορφή ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι οι ακτίνες X που χρησιμοποιούνται στην ιατρική. Η μη ιοντίζουσα ακτινοβολία μεταφέρει λιγότερη ενέργεια που δεν είναι ικανή να προκαλέσει ιοντισμό. Παρόλα αυτά, μπορεί να έχει άλλες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, όπως χημικές, ηλεκτρικές και θερμικές. Σε αυτήν την κατηγορία, ανήκουν τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα (κεραίες επικοινωνιών, ραδιοφωνίας, κ.α.), η υπεριώδης, η υπέρυθη ακτινοβολία, κ.α.

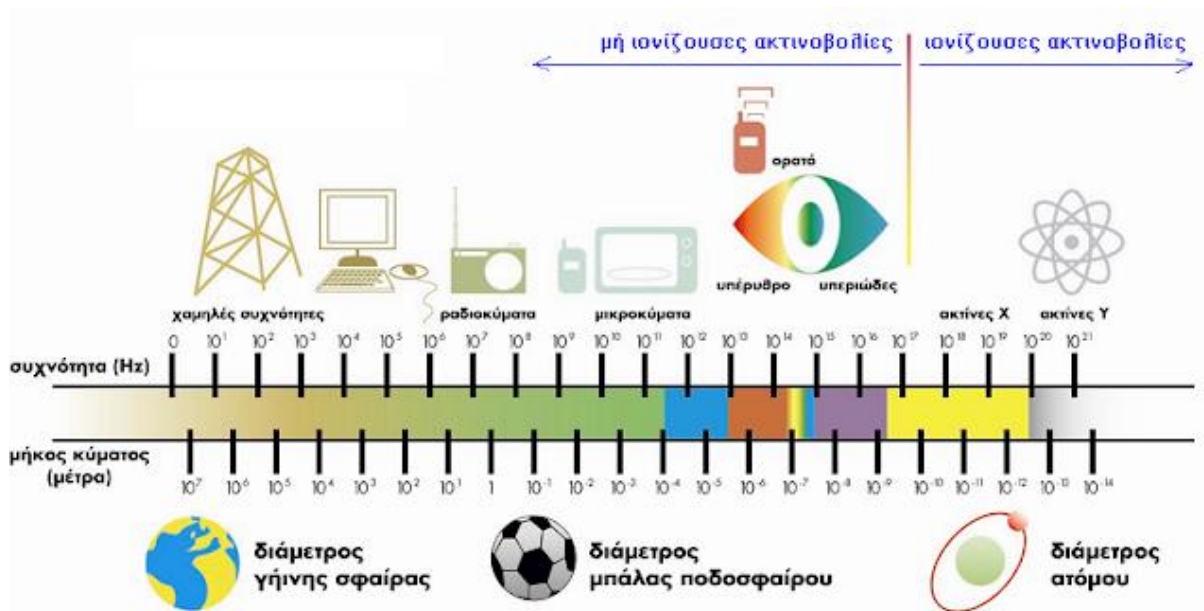
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά ενός κύματος είναι η συχνότητά του και η ενέργεια που μεταφέρει. Αυτά τα δύο μεγέθη συνδέονται με τη σχέση $E=h*f$, όπου E η ενέργεια, h η σταθερά του Planck και f η συχνότητα. Εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε ότι η συχνότητα με την μεταφερόμενη ενέργεια είναι δύο ανάλογα ποσά, άρα όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μεταφερόμενη ενέργεια. Το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .

Ο άνθρωπος είναι σε θέση να αντιληφθεί μόνο την ύπαρξη μιας μικρής περιοχής του φάσματος, που περιλαμβάνει το ορατό φως μέσω της όρασης και την υπέρυθρη ακτινοβολία μέσω της θερμότητας. Βέβαια, ο άνθρωπος έρχεται καθημερινά σε επαφή και με άλλες ομάδες συχνοτήτων όπως για παράδειγμα τα μικροκύματα (φούρνος μικροκυμάτων, Wi-Fi)., Μπορεί ο φούρνος μικροκυμάτων και το Wi-Fi να χρησιμοποιούν μικροκύματα, παρόλα αυτά έχουν μία βασική διαφοροποίηση και αυτή έχει να κάνει με την ισχύ, η οποία είναι η ενέργεια της ακτινοβολίας ανά δευτερόλεπτο.

Οι επιμέρους ζώνες του φάσματος, είναι επτά. Αρχικά, είναι τα ραδιοκύματα που καλύπτουν εύρος συχνοτήτων 0-300 MHz και χρησιμοποιούνται κυρίως στη ραδιοφωνία και την τηλεόραση. Στη συνέχεια, τα μικροκύματα που καλύπτουν το εύρος 300 MHz – 300 GHz και έχουν πλήθος εφαρμογών στις τηλεπικοινωνίες. Τα συναντούμε στους φούρνους μικροκυμάτων, τα ραντάρ, τα Bluetooth, κ.α. Αμέσως μετά, είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία που κυμαίνεται από 300 GHz έως 400 THz. Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα σώματα λόγω της θερμότητας. Σημαντικές εφαρμογές είναι οι υπέρυθρες ακτίνες στις οπτικές ίνες, στην ιατρική, αλλά και η υπέρυθρη φωτογραφία που χρησιμοποιείται σε επιστήμες όπως η αρχαιολογία, η οικολογία, κ.α. Στη συνέχεια, υπάρχει το ορατό φως σε συχνότητες 400-800 THz, το οποίο γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Ακολουθεί η υπεριώδης ακτινοβολία, από 800 THz - $3 \cdot 10^{17}$ Hz και εκπέμπεται από εξαιρετικά θερμά σώματα, όπως ο ήλιος. Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας του ήλιου, απορροφάται από την στρατόσφαιρα. Με μεγάλες δόσεις υπεριώδους ακτινοβολίας, ο άνθρωπος θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στον οργανισμό. Τέλος, υπάρχουν οι ακτινοβολίες X και Y, από $3 \cdot 10^{17}$ Hz - $5 \cdot 10^{19}$ Hz και $5 \cdot 10^{19}$ Hz - $3 \cdot 10^{22}$ Hz αντίστοιχα. Οι ακτίνες X, μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στον οργανισμό για αυτό και στην ιατρική που χρησιμοποιούνται, πρέπει να υπάρχει μέτρο. Οι ακτίνες Y, εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες.

Παρακάτω, παρουσιάζεται μια εικόνα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:



Εικόνα 2.1 : Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (πηγή www.physiclessons.blogspot.com).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πρότυπα ασφαλούς έκθεσης

Είναι σημαντικό να μελετηθούν οι περιορισμοί για την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δίνοντας έμφαση στα ευρέως αποδεκτά όρια διεθνών οργανισμών και παρουσιάζοντας μία εικόνα για το πώς προκύπτουν.

3.1 Δοσιμετρία

Με τον όρο δοσιμετρία, αναφερόμαστε σε μία επιστήμη με μεγάλο ενδιαφέρον, η οποία έχει στόχο την μέτρηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας από έναν οργανισμό. Η απορροφούμενη δόση (D), ορίζεται ως η ενέργεια (E) που αποθέτει η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά τη διέλευση της στη μονάδα μάζας m των ιστών. Δηλαδή: $D = E/m$. Ως μονάδα μέτρησης ορίζεται το rad (radiation absorbed dose) και είναι η ποσότητα ακτινοβολίας που αποθέτει 0,01 J ενέργειας ανά χιλιόγραμμο μάζας ιστού. Δηλαδή: 1 rad = 0.01 J/kg. Στο S.I. η μονάδα μέτρησης ονομάζεται Gray (Gy) και ισοδυναμεί με 1 J/kg ή 10^2 rad. Η απορροφηθείσα δόση αναφέρεται σε όλες τις ακτινοβολίες και αποτελεί μέτρηση της ολικής ενέργειας που απορροφά κάποιο συγκεκριμένο μέρος της ύλης ή ένας οργανισμός. Δεν αποτελεί από μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας.

Έτσι, προκύπτει ένα άλλο μέγεθος, που είναι η ισοδύναμη δόση (H). Η ισοδύναμη δόση συνδυάζει την μέτρηση της δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ένας οργανισμός, με τις βιολογικές επιδράσεις της. Ο υπολογισμός γίνεται από τον τύπο $H = D \times RBE$, όπου RBE (Relative Biological Effectiveness) είναι η σχετική βιολογική δραστηριότητα. Μονάδα μέτρησης στο S.I. είναι το Sievert (Sv) που ισοδυναμεί με 1 Gy \times RBE .

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία, θα υπάρξει εστίαση στον SAR, ο οποίος είναι ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης και τον ρυθμό απορρόφησης της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων από τους ιστούς του ανθρώπινου οργανισμού. Μετριέται σε μονάδες ισχύος ανά μάζα (W/kg). Η μέτρηση του SAR γίνεται με την εκπομπή ακτινοβολίας σε ανθρώπινα ομοιώματα (phantoms) και την μέτρηση της ακτινοβολίας που απορροφάται. Τα ομοιώματα αυτά, μιμούνται τις ιδιότητες του ανθρώπινου ιστού ως προς την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις λαμβάνονται για πολλές θέσεις και αποστάσεις του κινητού από το ομοίωμα. Κάθε κινητή συσκευή που κυκλοφορεί, συνοδεύεται και από το SAR που την χαρακτηρίζει. Για να προσδιοριστεί ο δείκτης SAR ενός κινητού, η συσκευή δοκιμάζεται στα υψηλότερα δυνατά επίπεδα ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμψει και κάτω από τις χειρότερες δυνατές συνθήκες. Βέβαια, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι η ακτινοβολία που δέχεται κάποιος από το κινητό, όταν για παράδειγμα δεν έχει σήμα, αυξάνεται αρκετά, με αποτέλεσμα να μπορεί να φτάσει το μέγιστο SAR που το χαρακτηρίζει, ενώ ταυτόχρονα, ένα κινητό με μεγαλύτερο SAR που πιάνει καλύτερο σήμα, μπορεί εκείνη τη στιγμή να έχει χαμηλότερο SAR από το

πρώτο. Επιπροσθέτως, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολία που απορροφάται από τον οργανισμό είναι πάρα πολλοί, όπως η απόσταση που έχει ο χρήστης από το κινητό, αν χρησιμοποιεί hands-free, αν έχει σήμα, ο τρόπος που κρατάει το κινητό και πολλοί άλλοι.

Ένας άλλος τρόπος για να χαρακτηριστεί ένα πεδίο είναι με τη βοήθεια της πυκνότητας ροής ισχύος. Η πυκνότητα ροής ισχύος ορίζεται ως η ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση της διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η μονάδα μέτρησης είναι W/m^2 . Για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος ο τύπος είναι:

$$P = \frac{E_0^2}{2Z_0},$$

όπου Z_0 η σύνθετη αντίσταση στον ελεύθερο χώρο και E_0 το πλάτος του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου. Η πυκνότητα ισχύος χρησιμοποιείται κυρίως για την μέτρηση σε μακρινά πεδία. Το μακρινό πεδίο είναι αυτό που προκαλείται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την κεραία. Η διάκριση μεταξύ των κοντινού και μακρινού πεδίου δεν είναι αυστηρή, γενικά μπορεί να θεωρηθεί ότι το μακρινό πεδίο ξεκινά από μία απόσταση που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$r_F = \frac{2d^2}{\lambda},$$

όπου d είναι το μήκος της κεραίας και λ το μήκος κύματος. Στην περίπτωση διπολικής κεραίας, το μακρινό πεδίο αρχίζει από μία απόσταση ίση με $\lambda/2$.

3.2 Περιορισμοί και μετρήσεις ακτινοβολίας

3.2.1 Κατηγορίες περιορισμών έκθεσης

Είναι σημαντικό να διακριθούν οι περιοχές συχνοτήτων και σε ποιον περιορισμό δίνεται βάση σε κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, δεν χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε συχνότητα εκπομπής ο SAR σαν περιορισμός. Και αυτό συμβαίνει καθώς κάθε εύρος συχνοτήτων είναι ικανό να προκαλέσει διαφορετικές επιπτώσεις. Στο εύρος συχνοτήτων 3 kHz – 10 MHz, οι περιορισμοί βασίζονται στην πυκνότητα ρεύματος καθώς σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων θεμιτό είναι να προληφθούν τυχόν επιπτώσεις στις λειτουργίες του νευρικού συστήματος. Στο εύρος 100 kHz – 10 GHz, οι περιορισμοί προκύπτουν από το SAR και στόχος είναι η πρόληψη της υπερθέρμανσης κάποιου ιστού. Τέλος, στις συχνότητες 6 – 300 GHz οι περιορισμοί προκύπτουν με βάση την πυκνότητα ισχύος. Οι τιμές για τα όρια σε κάθε περίπτωση αφορούν τον μέσο όρο οποιασδήποτε έκθεσης 6 λεπτών.

Επιπλέον, είναι γνωστό ότι τα όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία έχουν οριστεί διαφορετικά για το κοινό και διαφορετικά για τους επαγγελματίες. Αυτή η ιδέα έχει σαν βάση ότι οι επαγγελματίες γνωρίζουν για την πιθανή έκθεσή τους σε ακτινοβολία και έχουν μάθει πώς να προστατεύονται και να την αποφεύγουν σε αντίθεση με τον γενικό πληθυσμό.

3.2.2 Μετρήσεις ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και η επίδραση της στον ανθρώπινο οργανισμό, είναι σημαντικό θέμα και αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημόνων. Καθώς οι εξελίξεις στην τεχνολογία και την καθημερινότητα είναι ραγδαίες, υπάρχει φανερή ανάγκη για έλεγχο και ενημέρωση για τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή. Έτσι λοιπόν, έχουν εγκατασταθεί κάποια συστήματα μετρήσεων σε διάφορες περιοχές με σκοπό την αδιάκοπη ενημέρωση σε αυτόν τον τομέα.

Για παράδειγμα, ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το «ΕΡΜΗΣ». Πρόκειται για ένα σύστημα 24ωρης μέτρησης και ελέγχου της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων στο περιβάλλον από διάφορες πηγές. Την επιστημονική διαχείριση του προγράμματος, έχουν αναλάβει το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης για τις περιοχές της Νότιας και Βόρειας Ελλάδας αντίστοιχα. Η λειτουργία του προγράμματος ξεκίνησε το Νοέμβριο του 2002, ενώ μέχρι σήμερα έχει εφαρμοστεί σε 126 σημεία σε 13 Περιφέρειες της χώρας.

Ένα ακόμα γνωστό πρόγραμμα είναι το «pedion24». Το σύστημα pedion24 αποτελείται από τους σταθμούς μέτρησης των επιπέδων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε διάφορες περιοχές και το κέντρο διαχείρισης που βρίσκεται στο εργαστήριο κινητών ραδιοεπικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι σταθμοί μέτρησης έχουν ειδικά όργανα μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου τα οποία κάθε 6 λεπτά καταγράφουν μία τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου (μονάδα μέτρησης V/m). Κάθε 24 ώρες οι σταθμοί μέτρησης επικοινωνούν με το κέντρο διαχείρισης και αποστέλλουν τα δεδομένα στον κεντρικό εξυπηρετητή. Τα δεδομένα αυτά, είναι αποθηκευμένα σε βάσεις δεδομένων και μπορεί όποιος θέλει να έχει πρόσβαση σε αυτά.

3.3 Πιθανότητες υπέρβασης ορίων ασφαλείας και αμφιβολίες

Ένας ακατάλληλος σχεδιασμός ή μία ανεπαρκής μέριμνα για την ασφάλεια της τοποθέτησης ενός σταθμού βάσης, είναι πιθανό να αποτελέσει την αιτία για υπέρβαση των ορίων ασφαλείας που έχουν τεθεί. Αυτό μπορεί να συμβεί αν η κεραία που εγκαθίσταται είναι σε θέση που βρίσκεται σε μικρή οριζόντια απόσταση από χώρο που χρησιμοποιούν άνθρωποι.

Εκτός από τα πιθανά λάθη που μπορεί να προκαλούν υπέρβαση των ορίων ασφαλείας, είναι σημαντικό να αναλογιστεί κάποιος αν τα όρια που έχουν τεθεί, είναι ασφαλή και πλήρη. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι ότι βασίζονται κυρίως σε βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία και όχι σε μακροχρόνιες, δίνοντας βάση για παράδειγμα στην υπερθέρμανση των ιστών. Δεν ανανεώνονται συχνά, ενώ οι εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες είναι συνεχείς. Επίσης, δεν λαμβάνουν υπόψιν τους την ταυτόχρονη και συνεχή έκθεση του πληθυσμού σε πολλαπλές πηγές ακτινοβολίας.

3.4 Όρια έκθεσης της ICNIRP

Η ICNIRP είναι η διεθνής επιτροπή για την προστασία από μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες, παρέχει επιστημονικές συμβουλές και καθοδήγηση σχετικά με τις επιπτώσεις τις μη ιοντίζουσες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες στην υγεία του ανθρώπου αλλά και στο περιβάλλον. Σύμφωνα με την ICNIRP τα όρια χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η μία αφορά το γενικό πληθυσμό και η άλλη τους επαγγελματικά ασχολούμενους σε χώρους έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα όρια για τη δεύτερη κατηγορία είναι υψηλότερα, καθώς οι άνθρωποι που ανήκουν σε αυτήν έχουν γνώση των κινδύνων και μπορούν να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Η ICNIRP, μετά από εξέταση δημοσιευμένων ερευνών που αφορούν τις βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εστίασε στον παράγοντα που έκρινε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την θέσπιση ορίων έκθεσης, ο οποίος δεν είναι άλλος από την αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών από την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών κατά 1°C που αρχίζει να μην είναι εντελώς ακίνδυνη, παρατηρείται για SAR ίσο με 4 W/kg , ως μέση τιμή για όλο το σώμα. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, αυτό το κατώτατο όριο μειώθηκε κι άλλο κι έτσι πρόκυψαν οι τιμές των ορίων για την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού. Αρχικά λοιπόν, υιοθετήθηκε ένας συντελεστής ασφαλείας 10 με αποτέλεσμα $0,4\text{ W/kg}$ που αφορά τη μέγιστη τιμή για επαγγελματική έκθεση και προστέθηκε κι άλλος ένας συντελεστής ασφαλείας 5 με αποτέλεσμα $0,08$ την μέγιστη τιμή για την έκθεση του κοινού. Οι παραπάνω τιμές αντικατοπτρίζουν τη μέση τιμή για χρονικό διάστημα μέτρησης 6 min. Με αντίστοιχο τρόπο προέκυψαν τα όρια για επιμέρους τμήματα του ανθρώπινου σώματος, καθώς πρέπει να δοθεί έμφαση και στη μη αύξηση της θερμοκρασίας κάποιου μεμονωμένου μέρους του σώματος.

Σε κάποιες περιπτώσεις, η εκτίμηση της ισχύος που απορροφάται είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, για αυτό υπάρχουν τα επίπεδα αναφοράς. Η ένταση της ακτινοβολίας περιγράφεται από τρία βασικά μεγέθη που αποτελούν τα επίπεδα αναφοράς. Αυτά είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m), η ένταση του μαγνητικού πεδίου (A/m) και η πυκνότητα ισχύος (W/m^2). Σε συνθήκες επίπεδου κύματος, αυτά τα τρία μεγέθη συνδέονται μέσω απλών μαθηματικών σχέσεων και αν κάποιος γνωρίζει έστω και ένα από τα τρία, μπορεί να βρει τα άλλα δύο. Ο SAR εκφράζει την απορροφούμενη ισχύ ανά μονάδα μάζας του σώματος (W/Kg). Δεν δίνεται βάση στην απόσταση ασφαλείας από την πηγή εκπομπής κι αυτό συμβαίνει γιατί ο τρόπος που ακτινοβολεί η κάθε πηγή είναι διαφορετικός και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πηγής.

Στους πίνακες 3.1 και 3.2 που ακολουθούν, αναπαρίστανται τα επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του γενικού πληθυσμού, αλλά και για επαγγελματική έκθεση, ενώ στον πίνακα 3.3 φαίνονται τα όρια έκθεσης της ICNIRP εκφρασμένα σε SAR.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)
0-1 Hz	-	3.2x10 ⁴	4x10 ⁴
1-8 Hz	10.000	3.2x10 ⁴	4x10 ⁴ / f ²
8-25 Hz	10.000	4.000/f	5.000/f
0,025-0.8 kHz	250/f	4/f	5/f
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25
3-150 kHz	87	5	6,25
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0.92/f
1-10 MHz	87 / f ^{1/2}	0,73/f	0.92/f
10-400 MHz	28	0,073	0,092
400-2000 MHz	1.375 f ^{1/2}	0,0037 f ^{1/2}	0,0046 f ^{1/2}
2-300 GHz	61	0,16	0,20

Πίνακας 3.1: Επίπεδα αναφοράς για το γενικό πληθυσμό με βάση την ICNIRP.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)
0-1 Hz	-	1,63x10 ⁵	4x10 ⁴
1-8 Hz	20.000	1,63x10 ⁵ / f ²	4x10 ⁴ / f ²
8-25 Hz	20.000	20.000/f	5.000/f
0,025-0.8 kHz	500/f	20/f	5/f
0,8-1 MHz	610	24,4	6,25
1-10 MHz	610/f	1,6/f	6,25
10-400 MHz	61	0,16	0.92/f
400-2000 MHz	3 f ^{1/2}	0,008 f ^{1/2}	0.92/f
2-300 GHz	137	0,36	0,092

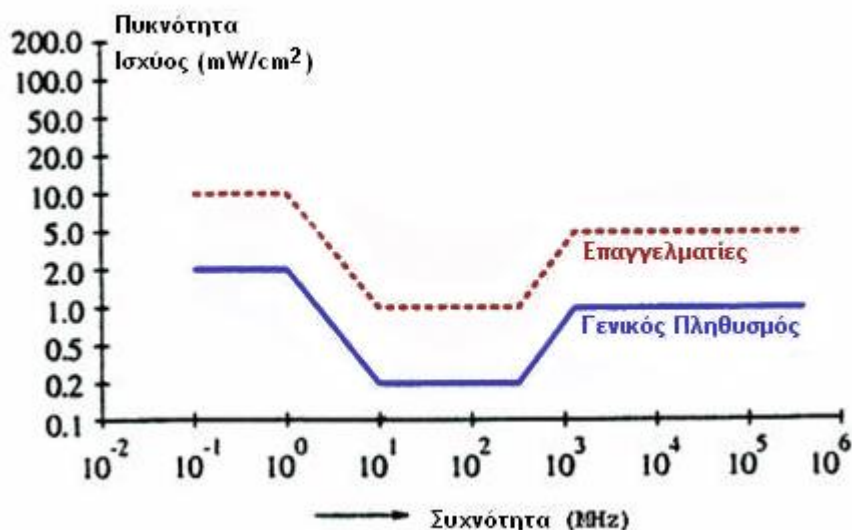
Πίνακας 3.2: Επίπεδα αναφοράς για τον πληθυσμό επαγγελματικής έκθεσης.

Όπως είναι φανερό, οι τιμές για τον γενικό πληθυσμό είναι μικρότερες από αυτές για τον πληθυσμό επαγγελματικής έκθεσης και αυτό συμβαίνει και γιατί η δεύτερη κατηγορία γνωρίζει τους κινδύνους και μπορεί να προστατευτεί αλλά και γιατί η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει ευπαθείς ομάδες, όπως τα βρέφη, οι ηλικιωμένοι κ.α.

	SAR ολόκληρου σώματος (10g)	Τοπικός SAR σε κεφάλι και κορμό (10g)	Τοπικός SAR στα άκρα (10g)	Πυκνότητα ισχύος (W/m^2)
0,1– 10GHz	0,4	10	20	-
10-300 GHz	-	-	-	50

Πίνακας 3.3: SAR και πυκνότητα ισχύος για το εύρος 0.1-10 GHz και 10-300 GHz.

Τέλος, παρακάτω είναι ένα διάγραμμα που δεν έχει γραμμική κλίμακα και απεικονίζει την διαφορά μεταξύ των ορίων επαγγελματικής έκθεσης και έκθεσης γενικού πληθυσμού, με βάση την πυκνότητα ισχύος και την συχνότητα.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα που απεικονίζει τα όρια έκθεσης του επαγγελματικού και του γενικού πληθυσμού (πηγή www.eett.gr).

3.5 Όρια έκθεσης στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι από τις χώρες της Ευρώπης με τα αυστηρότερα όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, με σκοπό να ληφθούν υπόψιν αβεβαιότητες που αφορούν ατομικές ευαισθησίες, διαφορές σε ηλικία, κατάσταση υγείας του καθενός, κ.α. Η Ελλάδα έχει σαν μέγιστα όρια έκθεσης το 70% των ορίων της ΕΕ. Επιπλέον, για τις κτιριακές εγκαταστάσεις νοσοκομείων, βρεφονηπιακών σταθμών, σχολείων και γηροκομείων ισχύει πως για την περίπτωση εγκατάστασης κεραιές σε απόσταση μέχρι 300 μέτρα από την περίμετρο, τα όρια γίνονται ακόμα πιο αυστηρά και πέφτουν στο 60% των ορίων της ΕΕ.

Αυτή τη φορά, οι πίνακες που παρουσιάζονται, αφορούν συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Στον πίνακα 3.4 απεικονίζονται τα όρια της Ελλάδας με το 70% για τους επαγγελματίες και στον 3.5 τα όρια με το 60% για το γενικό πληθυσμό.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα ισχύος (W/m^2)
10-400 MHz	23,4	0,0611	1,4
600 MHz	28,2	0,0758	2,1
800 MHz	32,5	0,0876	2,8
900 MHz	34,5	0,929	3,1
1.800 MHz	48,8	0,1313	6,3
2-300 GHz	51	0,1339	7

Πίνακας 3.4: Όρια Ελλάδας 60%.

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα ισχύος (W/m^2)
10-400 MHz	21,7	0,0565	1,2
600 MHz	26,1	0,0702	1,8
800 MHz	30,1	0,0811	2,4
900 MHz	31,9	0,0860	2,7
1.800 MHz	45,2	0,1216	5,4
2-300 GHz	47,2	0,1239	6

Πίνακας 3.5: Όρια Ελλάδας 70%.

3.6 Όρια έκθεσης της IEEE

Τα όρια έκθεσης του οργανισμού IEEE, είναι παρόμοια με αυτά της ICNIRP, εστιάζουν στο εύρος συχνοτήτων 3 kHz – 300 GHz και εξαρτώνται από τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στους πίνακες 3.6 και 3.7 φαίνονται τα όρια της IEEE για τον γενικό πληθυσμό και την επαγγελματική έκθεση αντίστοιχα. Επίσης, στους πίνακες παρουσιάζεται η rms ένταση ηλεκτρικού πεδίου και πυκνότητα ισχύος, η οποία είναι η ενεργός τιμή. Η ενεργός τιμή rms (root mean square) ορίζεται ως η τιμή συνεχούς τάσης που παράγει την ίδια μέση ισχύ με την εναλλασσόμενη. Τέλος, στον πίνακα 3.8, παρουσιάζονται τα όρια για τις δύο κατηγορίες εκφρασμένα με βάση τον SAR.

Περιοχή συχνοτήτων	Rms Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Rms Πυκνότητα ισχύος (W/m^2)
0,1 -1,34 MHz	614	1.000
1,34-3 MHz	823,8/f	1.800/ f^2
3-30 MHz	823,8/f	1.800/ f^2
100-400 MHz	27,5	2
400-2.000 MHz	27,5	2
2.000-5.000 MHz	-	f/200
5.000-30.000 MHz	-	10
30.000-100.000 MHz	-	10
100.000-300.000 MHz	-	(90f-7.000)/200

Πίνακας 3.6: Όρια έκθεσης ακτινοβολίας γενικού πληθυσμού.

Περιοχή συχνοτήτων	Rms Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	Rms Πυκνότητα ισχύος (W/m^2)
0,1 -1 MHz	1.842	9.000
1-30 MHz	1.842/f	9.000/ f^2
30-100 MHz	61,4	10
100-300 MHz	61,4	10
300-3.000 MHz	-	f/30
3.000-30.000 MHz	-	100
300.000-300.000 MHz	-	100

Πίνακας 3.7: Όρια έκθεσης ακτινοβολίας επαγγελματικού πληθυσμού.

	SAR ολόκληρου σώματος (10g)	Τοπικός SAR σε κεφάλι και κορμό (10g)	Τοπικός SAR στα άκρα (10g)
Επαγγελματική Έκθεση	0,4	8	20
Έκθεση γενικού πληθυσμού	0,08	1,6	4

Πίνακας 3.8: Όρια έκθεσης ακτινοβολίας εκφρασμένα με τον SAR.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η τεχνολογία της επικοινωνίας σήμερα

Σήμερα, η τεχνολογία είναι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Η επικοινωνία είναι πλέον δεδομένη και οι απαιτήσεις των χρηστών για γρήγορες συνδέσεις συνεχώς αυξάνονται. Έτσι, επίκεντρο των τηλεπικοινωνιών στις μέρες μας αποτελεί το 5G. Τα ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς, με συντομογραφία 5G, είναι βελτιωμένες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων που αναμένεται να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες. Με το όραμα των έξυπνων πόλεων να γίνεται σιγά-σιγά πραγματικότητα, η πέμπτη γενιά δικτύων θα μπορούσε να πει κάποιος πως είναι απαραίτητη, καθώς διαθέτει μεγαλύτερη χωρητικότητα, γεγονός που θα επιτρέπει ταυτόχρονη σύνδεση πολλών συσκευών, στο ίδιο δίκτυο. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να δοθεί βάση στις πολύ μεγαλύτερες συχνότητες τις οποίες χρησιμοποιεί, σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων.

4.1 Λειτουργία κινητής τηλεφωνίας

Για να υπάρχει δυνατότητα ο καθένας να χρησιμοποιεί ένα κινητό τηλέφωνο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός ασύρματου δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούν πολλούς σταθμούς βάσης με σκοπό να καλύψουν την ανάγκη που υπάρχει για σήμα σε κάθε περιοχή. Όταν παίρνει κάποιος τηλέφωνο, η κινητή συσκευή επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης με την βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο σταθμός βάσης με τη σειρά του επικοινωνεί με κάποια κέντρα, μεταφέροντας τα δεδομένα που χρειάζονται, έτσι ώστε ο χρήστης να καταφέρει να επικοινωνήσει με αυτόν που θέλει. Ένας σταθμός βάσης αποτελείται από κεραιοσυστήματα εκπομπής και λήψης σημάτων αλλά είναι και εξοπλισμένος έτσι ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται αυτά τα σήματα.

Το κινητό τηλέφωνο εκπέμπει ακτινοβολία κυρίως κατά την διάρκεια επικοινωνίας. Διαφορετικά, όταν βρίσκεται σε αδράνεια, εκπέμπει σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, με σκοπό να διατηρήσει την σύνδεση με το σταθμό βάσης. Όταν η συσκευή είναι κλειστή, δεν ακτινοβολεί καθόλου. Τα εξαρτήματα που υπάρχουν όπως τα hands-free, περιορίζουν την έκθεση του κεφαλιού σε ακτινοβολία, καθώς όπως θα φανεί και στην πορεία από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ακόμα και μία μικρή απομάκρυνση από το κεφάλι, της τάξης του ενός εκατοστού, μπορεί μέχρι και να μειώσει στο μισό την απορροφούμενη ακτινοβολία. Βέβαια, αν την ώρα που κάποιος χρησιμοποιεί κάποιο τέτοιο εξάρτημα και έχει το κινητό τοποθετημένο σε κάποιο άλλο σημείο του σώματος, το αποτέλεσμα είναι να μεταφέρει την ακτινοβολία από το κεφάλι σε εκείνο το σημείο.

4.2 Κινητή τηλεφωνία σήμερα

Στην Ελλάδα οι τρεις γνωστές εταιρίες κινητής τηλεφωνίας είναι η Cosmote, η Vodafone και η Wind. Αυτές, χρησιμοποιούν κάποιες βασικές ζώνες συχνοτήτων οι οποίες είναι 800 MHz, 900 MHz, 1.800 MHz, 2.100 MHz & 2.600 MHz.

Τα κινητά τηλέφωνα εκπέμπουν ραδιοκύματα σε καθορισμένα επίπεδα ισχύος και η μέση ισχύς εκπομπής τους είναι το 0,5 W. Όταν ένα κινητό βρίσκεται κοντά σε έναν σταθμό βάσης, απαιτούνται χαμηλότερα επίπεδα ισχύος. Βέβαια, δεν είναι μόνο η απόσταση καθοριστικός παράγοντας, αλλά και τα εμπόδια που παρεμβάλλονται. Η ισχύς που εκπέμπει μία συσκευή εξαρτάται από την επιτυχία επικοινωνίας της συσκευής με τον σταθμό βάσης. Η ποιότητα αυτής της επικοινωνίας απεικονίζεται στην μπάρα του κινητού που δείχνει το σήμα. Έτσι, όταν κάποιος είναι στο ασανσέρ, σε υπόγειο, μετρό και άλλα μέρη που δεν έχει καλό σήμα, το κινητό προσπαθεί πολύ για να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα να εκπέμπει την μέγιστη ισχύ.

4.3 Δίκτυα 5G

Με μία σύντομη αναδρομή στις προηγούμενες γενιές δικτύων, οι οποίες φαίνεται να αλλάζουν ανά δεκαετία, μπορεί κάποιος να θυμηθεί την γενιά 2G η οποία παρείχε δυνατότητα μετάδοσης φωνής και sms. Το 3G μετά, αύξησε την χωρητικότητα κάνοντας δυνατή την αποστολή κι άλλων αρχείων όπως μίας φωτογραφίας. Το 4G παρείχε υψηλές ταχύτητες και δυνατότητα για live αναμεταδόσεις. Πλέον, το 5G που βρίσκεται στο προσκήνιο, υπόσχεται να κάνει πραγματικότητα την ταυτόχρονη χρήση δικτύου από πολλούς χρήστες, τις πολύ υψηλές ταχύτητες και την δυνατότητα ανταλλαγής μεγάλων δεδομένων.

Το 5G αναμένεται να λειτουργεί σε ένα εύρος υψηλών συχνοτήτων του ασύρματου φάσματος, κάπου μεταξύ 6-60 GHz. Όπως είναι φανερό, αυτό το εύρος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις ήδη χρησιμοποιούμενες περιοχές συχνοτήτων. Σε αυτό το εύρος, η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται σε ιδιαιτέρως υψηλές ταχύτητες αλλά βρίσκουν ιδιαιτέρως δύσκολο να παρακάμπτουν εμπόδια όπως τοίχους και κτίρια, όπως και να μεταφέρουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι, προβλέπεται ότι θα χρειάζεται μία μικρή κεραία ανά 2-8 σπίτια.

Ένα πρόβλημα που φαίνεται με την πρώτη ματιά είναι ότι όταν θα αρχίσουν να εγκαθίστανται οι κεραίες για τις συχνότητες του 5G, ταυτόχρονα για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, θα λειτουργούν και όλες οι άλλες που λειτουργούν μέχρι σήμερα με τα τωρινά δεδομένα για το εύρος συχνοτήτων.

Κεφάλαιο 5

Υπολογισμός του SAR σε μοντέλο κεφαλιού για την περίπτωση ακτινοβολίας διπόλου $\lambda/2$

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται περιπτώσεις, στις οποίες μία διπολική κεραία $\lambda/2$ τοποθετείται δίπλα στο κεφάλι, δίνοντας έμφαση στους ευαίσθητους ιστούς, όπως είναι το μάτι και το αυτί, σε κατακόρυφη και οριζόντια θέση. Με τις προσομοιώσεις που έγιναν σε πέντε διαφορετικές αποστάσεις του διπόλου από τους ευαίσθητους ιστούς, προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με το SAR, τα οποία και αναλύονται ακολούθως.

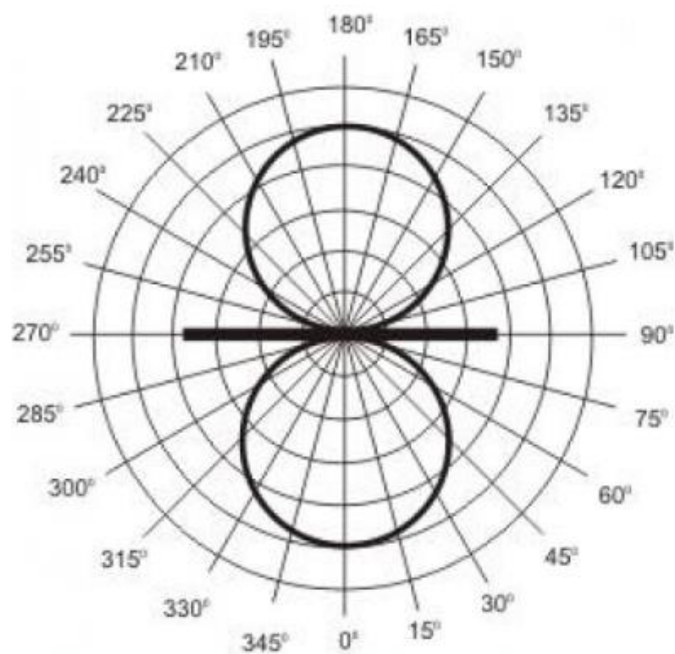
5.1 Γενικά στοιχεία

5.1.1 Δίπολο $\lambda/2$

Η κεραία αποτελεί βασικό μέρος κάθε τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Η διπολική κεραία $\lambda/2$ ή αλλιώς δίπολο μισού κύματος, είναι μία από τις συνηθέστερες κεραίες και αποτελείται από κομμάτι σύρματος, ράβδου ή σωλήνα μήκους $\lambda/2$ όσον αφορά τη συχνότητα. Πρακτικά η κεραία αποτελείται από δύο κομμάτια $\lambda/4$ το καθένα και στη μέση τροφοδοτείται από μία γραμμή μεταφοράς. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου της συγκεκριμένης κεραίας έχει πραγματικό μέρος ίσο με 73Ω . Συνήθως, η διπολική κεραία χρησιμοποιείται με οριζόντια πόλωση. Στις εικόνες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα, απεικονίζεται ένα δίπολο $\lambda/2$ και το διάγραμμα ακτινοβολίας του.



Εικόνα 5.1 : Δίπολο $\lambda/2$ (πηγή www.psarema-skafos.gr).



Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα ακτινοβολίας διπόλου $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση (πηγή www.psarema-skafos.gr).

5.1.2 Μέθοδος FDTD (Finite Difference Time Domain)

Η μέθοδος FDTD ή αλλιώς μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου, αποτελεί μία από τις πιο γνωστές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι σχετικά απλό να υλοποιηθεί και είναι ακριβής. Είναι μία τεχνική που υπολογίζει τις διάφορες πεδιακές συνιστώσες στο πεδίο του χρόνου.

Το μαθηματικό μοντέλο βασίζεται στην διαφορική μορφή των εξισώσεων του Maxwell. Ο αλγόριθμος βασίζεται μόνο στις εξισώσεις στροβιλισμού.

Όσον αφορά την υλοποίηση, πρέπει αρχικά να επιλεγθεί ένα χωρικό βήμα. Επιλέγεται αρχικά η μέγιστη συχνότητα του προβλήματος προς επίλυση. Σε αυτή τη συχνότητα αντιστοιχεί ένα μήκος κύματος λ . Οι διαστάσεις του πλέγματος που επιλέγονται πρέπει να είναι μικρότερες ή ίσες από το $\lambda/10$. Επιπλέον, πρέπει να επιλεγθεί ένα χρονικό βήμα. Για την μέγιστη συχνότητα που είναι δεδομένη στο πρόβλημα, το χρονικό βήμα έχει μία μέγιστη επιτρεπτή τιμή, πάνω από την οποία ο αλγόριθμος οδηγείται σε αστάθεια.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι επιλύει τις εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο του χρόνου, επιλύει ταυτόχρονα και το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο και είναι απλή στον προγραμματισμό και αξιόπιστη.

Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla_x \vec{E} - \frac{\sigma^*}{\mu} \vec{H} \quad \text{και} \quad \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \nabla_x \vec{E} - \frac{\sigma^*}{\varepsilon} \vec{E}$$

Για να βρεθεί η λύση αυτών των δύο εξισώσεων, πρέπει να δημιουργηθεί ένα πεπερασμένο τρισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα από κελιά τα οποία είναι όμοια. Οι διαστάσεις επιλέγονται μέσω του ορισμού χωρικών βημάτων. Στην συνέχεια, θεωρείται ότι υπάρχουν συγκεκριμένες θέσεις για τις συνιστώσες που πρέπει να υπολογιστούν. Αυτές απεικονίζονται στο πλέγμα του Yee το οποίο σχεδιάζεται στην εικόνα 5.1. Η τοποθέτηση των συνιστωσών έγινε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι νόμοι του Ampere και του Faraday. Στη συνέχεια πρέπει να βρεθούν οι πραγματικές συντεταγμένες των σημείων και να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ μίας πεδιακής συνιστώσας κι ενός άλλου σημείου.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίο σε διαφορετικές στιγμές στο χρόνο. Αυτό γίνεται με την τεχνική leapfrog.

Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχεται όλος ο χώρος και σε κάθε κελί υπολογίζεται η κάθε συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου με βάση κάθε φορά την προηγούμενη τιμή της συνιστώσας και τις γειτονικές. Με ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μαγνητικές συνιστώσες. Συγκεκριμένα, μετά από χωρική διακριτοποίηση ενός αρχικού μοντέλου, προκύπτουν συνήθεις διαφορικές εξισώσεις που είναι χρονικά εξαρτημένες, γραμμικές ή μη γραμμικές και μπορούν να επιλυθούν με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων διαφορών. Για παράδειγμα, η συνιστώσα E_x του ηλεκτρικού πεδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση ανανέωσης

$$E_{X_{i,j,k}}^{n+1} = C_a E_{X_{i,j,k}}^n + C_{b1} (H_{Z_{i,j+1/2,k}}^{n+1/2} - H_{Z_{i,j-1/2,k}}^{n+1/2}) + C_{b2} (H_{Y_{i,j,k-1/2}}^{n+1/2} - H_{Y_{i,j,k+1/2}}^{n+1/2})$$

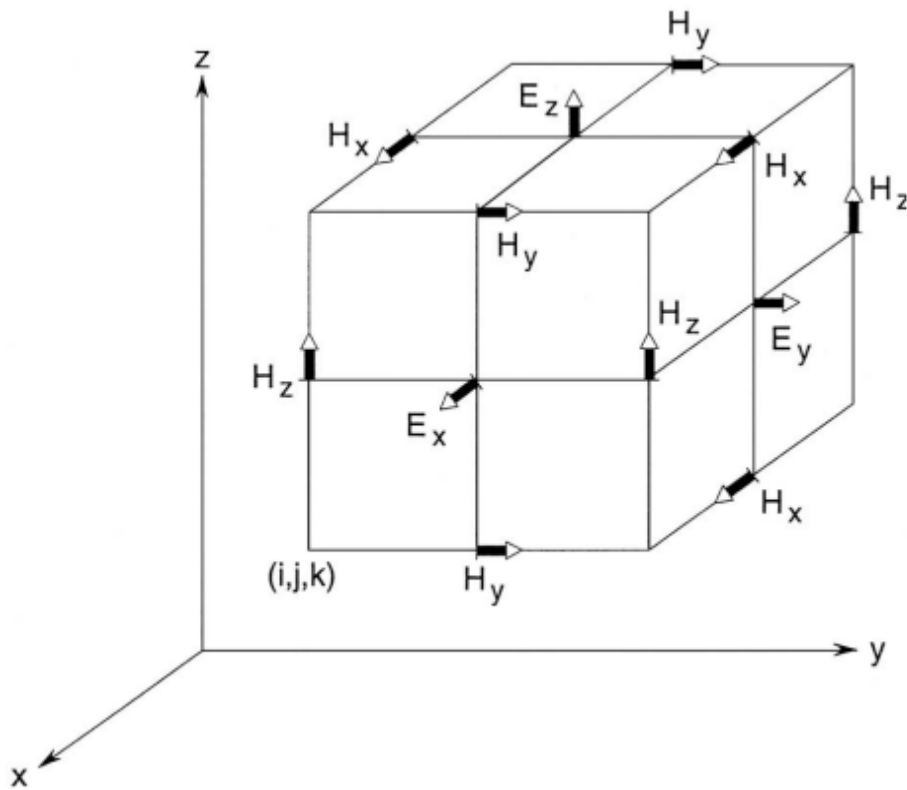
όπου

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right) \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1},$$

$$C_{b1} = \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1},$$

$$C_{b2} = \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta z} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}\right)^{-1},$$

και Δx , Δy , Δz , Δt τα χωρικά και το χρονικό βήμα αντιστοίχως, ε η διηλεκτρική σταθερά, σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα και C οι συντελεστές ενημέρωσης.



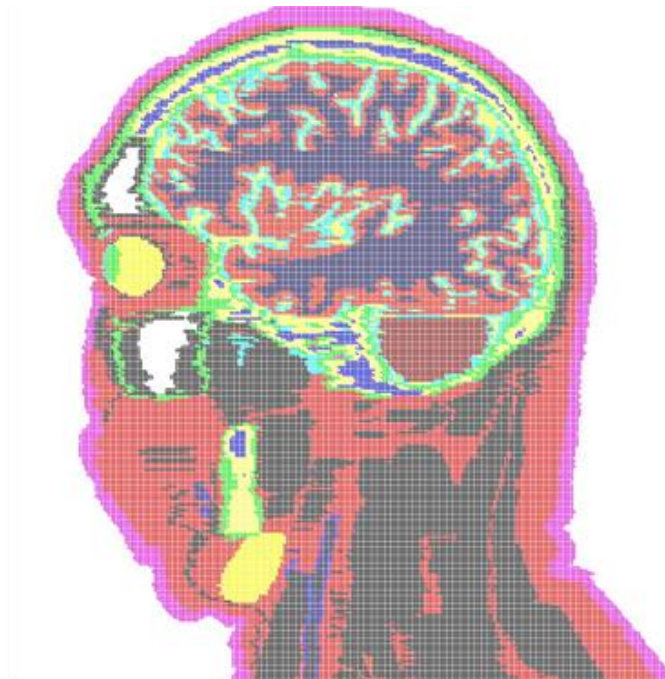
Σχήμα 5.1 : Θέσεις συνιστωσών στο κελί του Yee (πηγή www.ikee.lib.auth.gr).

5.1.3 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

Για τις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού, το οποίο είναι φτιαγμένο έτσι ώστε να προσεγγίζει τις ιδιότητες ενός πραγματικού κεφαλιού, βασισμένο σε εικόνες μαγνητικού συντονισμού. Στην εικόνα 5.3 απεικονίζεται το τρισδιάστατο μοντέλο κεφαλιού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία, ενώ στην εικόνα 5.4 μία δισδιάστατη τομή στο επίπεδο YZ.



Εικόνα 5.3 : 3D απεικόνιση κεφαλιού.



Εικόνα 5.4 : Τομή κεφαλιού στο επίπεδο YZ.

5.1.4 Συχνότητες εκπομπής και θέσεις

Οι συχνότητες εκπομπής του διπόλου που μελετήθηκαν είναι τα 6 και τα 10 GHz. Αυτές οι συχνότητες επιλέχθηκαν καθώς η τεχνολογίες 5G που βρίσκονται ακόμα σε σχετικά αρχικό στάδιο, θα εξεταστούν σε δύο μπάντες. Η πρώτη μπάντα που είναι και η πιο χαμηλή για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, θα είναι έως 6 GHz και εκεί γύρω θα βρίσκονται οι συχνότητες που θα γίνουν τα πρώτα πειράματα λειτουργίας. Τα 10 GHz είναι μία επίσης ενδιαφέρουσα συχνότητα, καθώς βρίσκεται στο εύρος των συχνοτήτων της πέμπτης γενιάς και είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα 6 GHz, ενώ από τα 10 GHz και πάνω, ο δείκτης SAR σταματά να γίνεται το μέγεθος που ορίζει τους περιορισμούς έκθεσης και δίνει τη θέση του στην πυκνότητα ισχύος.

Επιπλέον, οι θέσεις που επιλέχθηκαν ήταν κοντά στους ευαίσθητους ιστούς και συγκεκριμένα σε αποστάσεις 0,36 cm, 1,08 cm, 1,8 cm, 2,52 cm και 3,6 cm.

5.1.5 Κατασκευή κεραίας

Η γεωμετρία που δημιουργήθηκε, τοποθετήθηκε μέσα σε ένα πλέγμα σύμφωνα με την μέθοδο FDTD . Στο πλέγμα αυτό βρισκόταν το μοντέλο του κεφαλιού και η διπολική κεραία που αποτελούσε την πηγή. Αρχικά υπολογίστηκε το λ (μήκος κύματος), με τη βοήθεια της συχνότητας (f) και της ταχύτητας του φωτός σε κενό χώρο (c =σταθ.).

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = \frac{3}{60} = 0,05m$$

Στην συνέχεια, υπολογίστηκε το μήκος του διπόλου $\lambda/2$:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025m = 2,5cm$$

Το μέγιστο αποδεκτό μήκος κελιού, δίνεται από τον τύπο:

$$L_{\max} = \frac{\lambda}{10} = \frac{0,05}{10} = 0,5cm$$

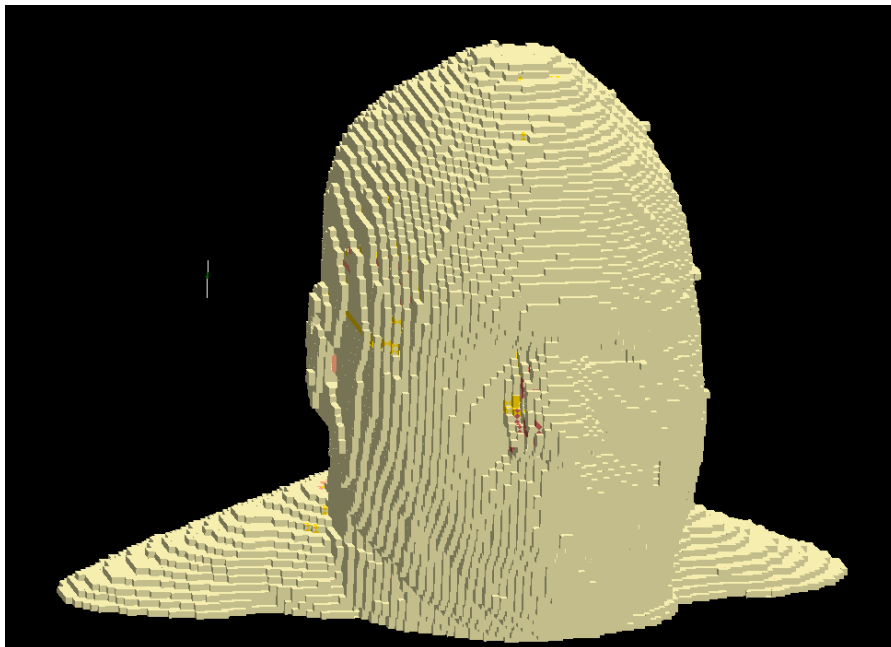
Έτσι, αποφασίστηκε ότι το δίπολο θα πιάνει 7 κελιά και το μέγεθος του ενός κελιού θα είναι:

$$\frac{\text{Μήκος διπόλου}}{\text{Πλήθος κελιών}} = \frac{2,5}{7} = 0,35714cm$$

5.2 Δίπολο $\lambda/2$ δίπλα στο αυτί

5.2.1 Δίπολο $\lambda/2$ κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί στα 6 GHz

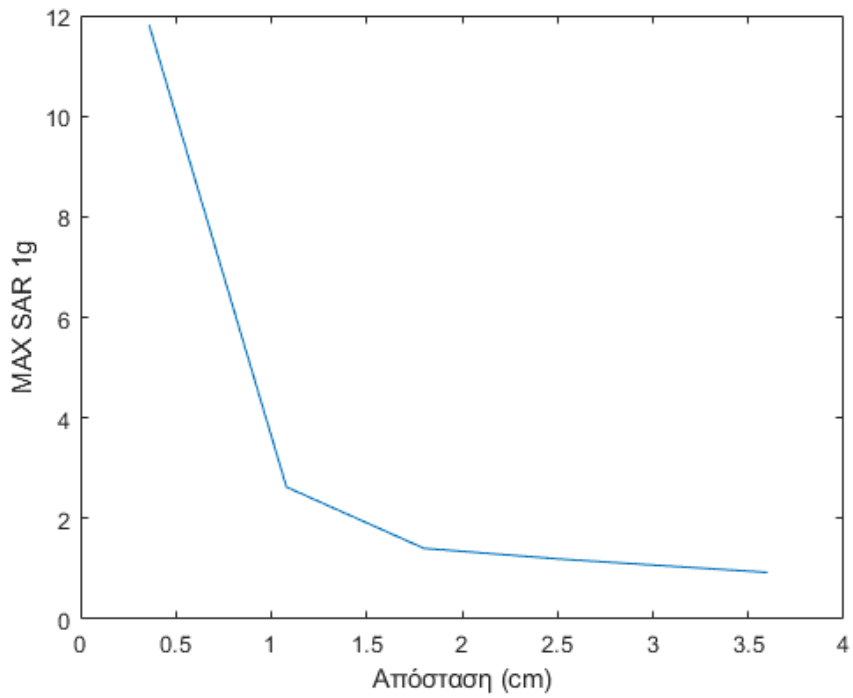
Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση στην οποία η διπολική κεραία $\lambda/2$ τοποθετήθηκε σε πέντε διαφορετικές θέσεις δίπλα από το αυτί, με κατακόρυφη πόλωση. Η συχνότητα που εξετάστηκε αρχικά είναι τα 6 GHz. Στην εικόνα 5.5 απεικονίζεται το δίπολο κοντά στο αυτί. Τα αποτελέσματα του SAR σε σχέση με την απόσταση παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Όπως είναι φανερό, η απόσταση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και με 1 εκατοστό απομάκρυνσης του διπόλου, η απορροφούμενη ακτινοβολία μειώνεται σημαντικά. Τα αποτελέσματα για τον SAR σε 1 και 10 g ιστού έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά κι είναι αναμενόμενο καθώς η διαφορά τους είναι ότι στην πρώτη περίπτωση η μέτρηση γίνεται για 1g ιστού και στην δεύτερη για 10g. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.6 και 5.7. Όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έχουν κανονικοποιηθεί στη στάθμη των 0,5 W.



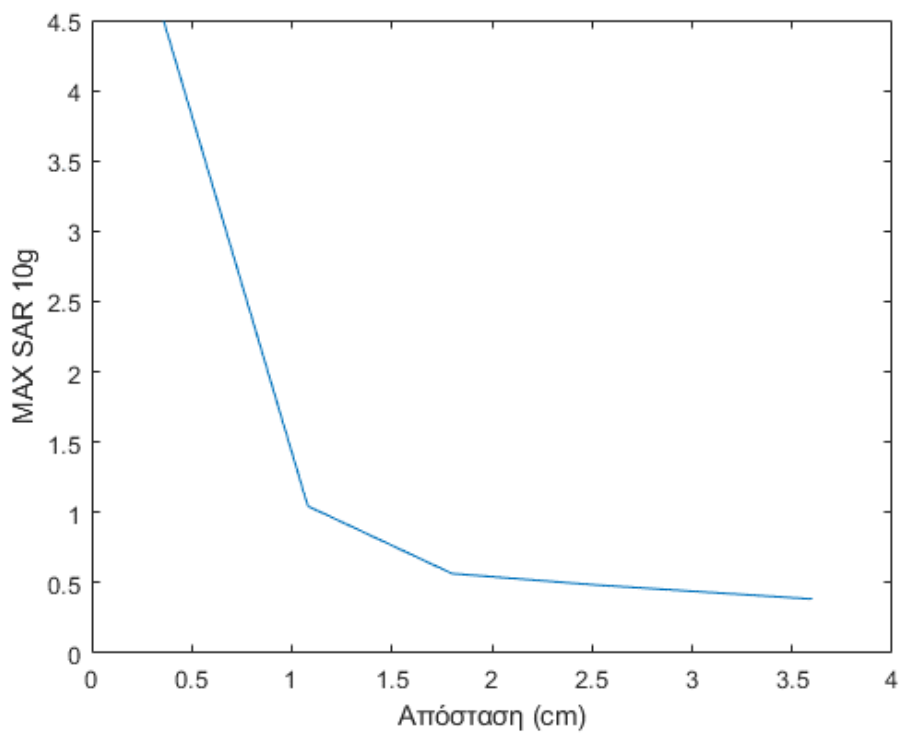
Εικόνα 5.5 : Δίπολο κοντά στο αυτί με κατακόρυφη πόλωση.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,36	74,47	11,82	0,4494
1,08	12,01	2,62	0,1
1,8	6,26	1,41	0,57
2,52	5,19	1,19	0,48
3,6	3,94	0,93	0,38

Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα SAR για κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί.



Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση.



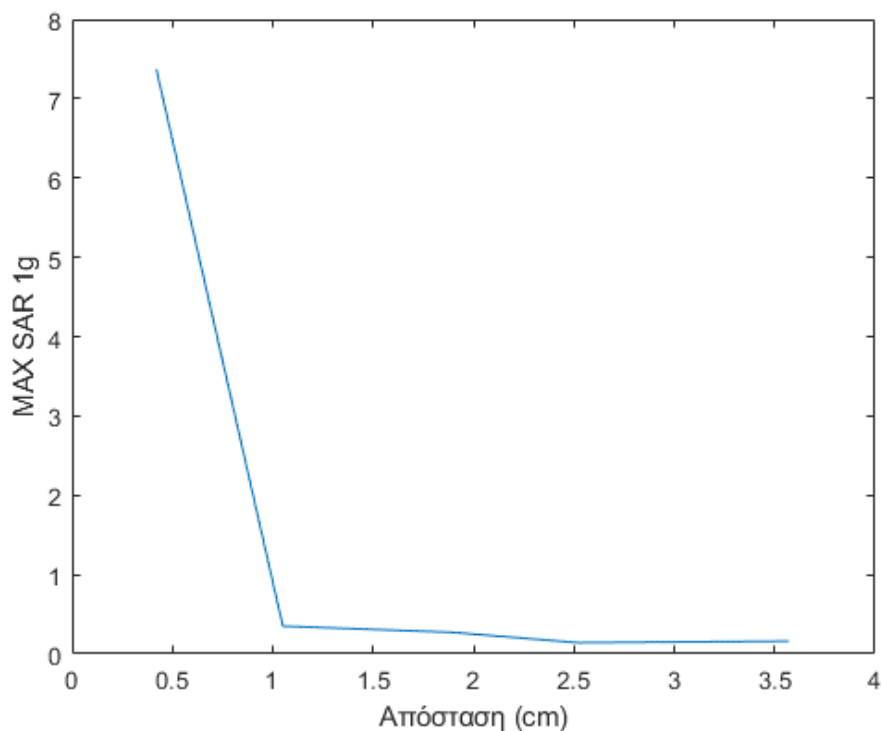
Εικόνα 5.7 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση.

5.2.2 Δίπολο $\lambda/2$ κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί στα 10 GHz

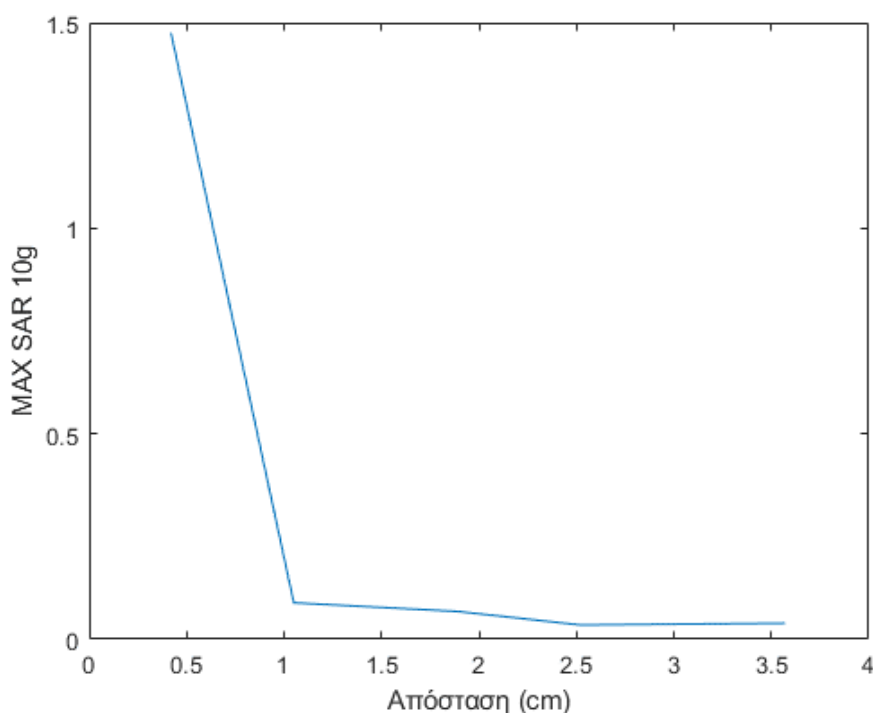
Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη σχέση SAR και απόστασης στη συχνότητα των 10 GHz. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.8 και 5.9. Η μείωση της απόστασης μεταξύ κεραίας και κεφαλιού, προκαλεί σημαντική μείωση των επιπέδων απορροφούμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σε απόσταση 0,42 ο μέγιστος SAR 1g είναι 7,37 και σε απόσταση 1,05 ο μέγιστος SAR είναι 0,35 W/kg. Στη συχνότητα των 10 GHz στην απόσταση 0,42 cm, ο μέγιστος SAR 10g ξεπερνάει το επιτρεπτό όριο για τον γενικό πληθυσμός στην Ελλάδα, ενώ σε απόσταση 1,05 βρίσκεται εντός του ορίου ασφαλούς έκθεσης.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,42	110,37	7,37	1,48
1,05	5,28	0,35	0,088
1,89	4,29	0,27	0,068
2,52	1,97	0,41	0,035
3,57	1,24	0,16	0,039

Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα SAR για κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί – 10 GHz.



Εικόνα 5.8 : Διάγραμμα SAR 1g κατακόρυφης πόλωσης αυτί – 10 GHz.



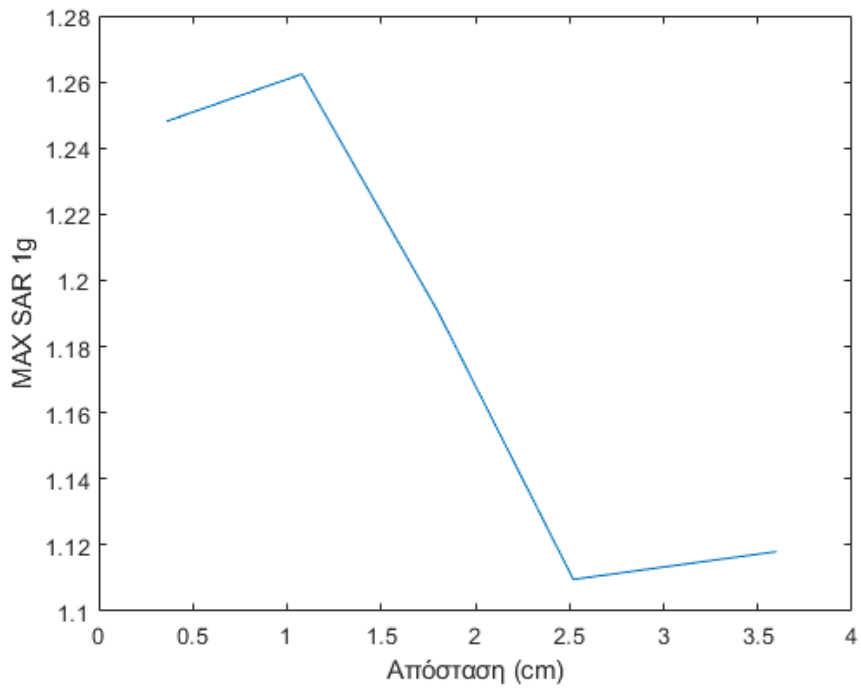
Εικόνα 5.9 : Διάγραμμα SAR 10g κατακόρυφης πόλωσης αντί – 10 GHz.

5.2.3 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί στα 6 GHz

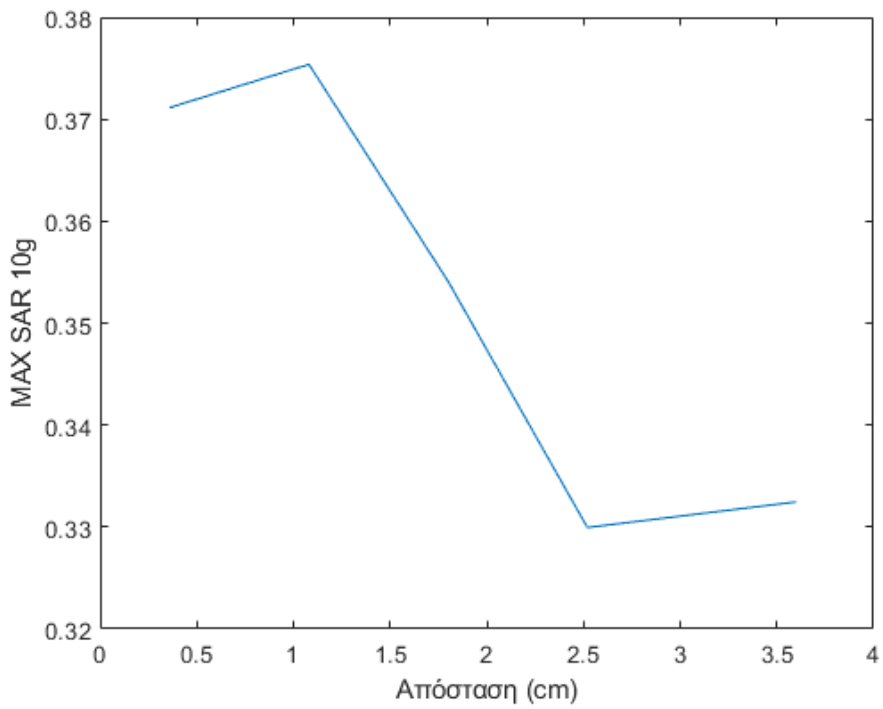
Στην οριζόντια πόλωση με τη συχνότητα της πηγής να είναι 6 GHz, τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.3. Γενικά, υπάρχει πτωτική τάση, παρόλα αυτά υπάρχουν δύο μικρά σκαλοπάτια τα οποία είναι αρκετά μικρά. Ο SAR βρίσκεται κάτω από το ασφαλές όριο σε όλες τις αποστάσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.10 και 5.11.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,36	4,34	1,25	0,37
1,08	4,39	1,26	0,38
1,8	13,76	1,19	0,35
2,52	12,82	1,1	0,33
3,6	3,89	1,12	0,33

Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα SAR για οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί – 6 GHz.



Εικόνα 5.9 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση.



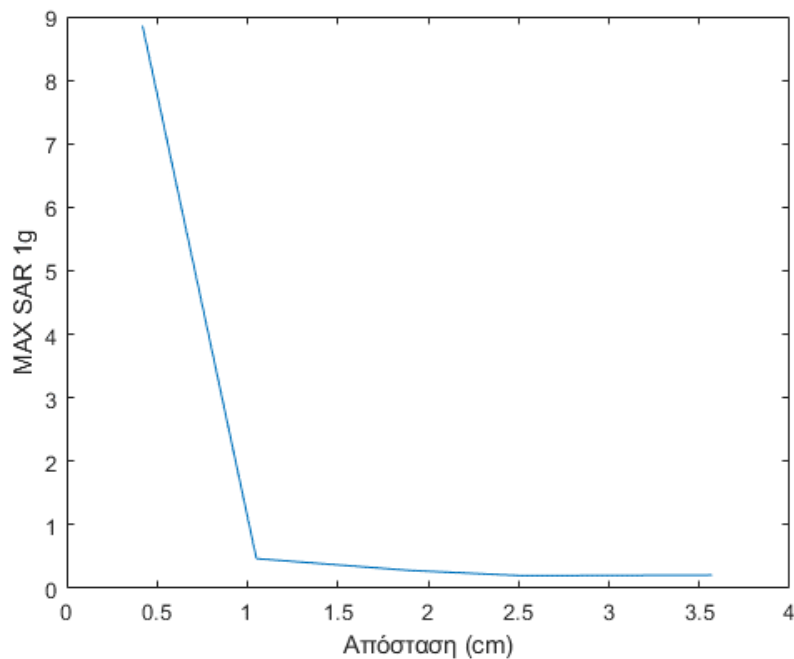
Εικόνα 5.10 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση.

5.2.4 Δίπολο $\lambda/2$ με οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί στα 10 GHz

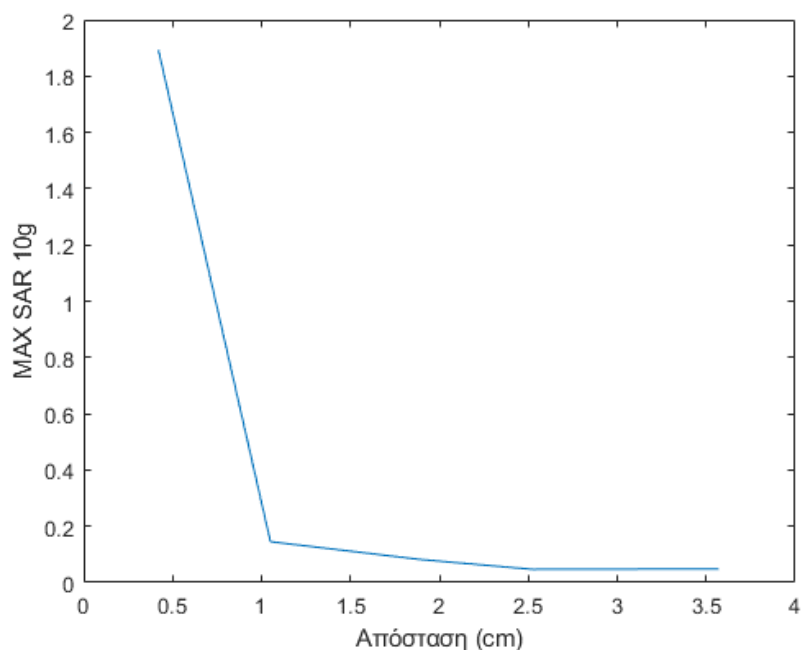
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.12 και 5.13. Φαίνεται και εδώ πως όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο μειώνεται ο SAR. Στη συχνότητα των 10 GHz όπως παρατηρήθηκε και στην κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο αυτί στην ίδια συχνότητα, παραβιάζεται το όριο ασφαλούς έκθεσης στην κοντινή απόσταση των 0,42 cm για το γενικό πληθυσμό, σύμφωνα με τα όρια της Ελλάδας αλλά και της ICNIRP. Η μείωση του SAR με μικρή μεταβολή της απόστασης κεραίας-κεφαλιού είναι φανερή στο διάγραμμα.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,42	104,71	8,85	1,89
1,05	6,65	0,47	0,15
1,89	4,48	0,28	0,15
2,52	2,1	0,18	0,05
3,57	0,94	0,21	0,05

Πίνακας 5.5 : Τα αποτελέσματα του SAR για οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί – 10 GHz.



Εικόνα 5.11 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση για οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί.



Εικόνα 5.12 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση για οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί.

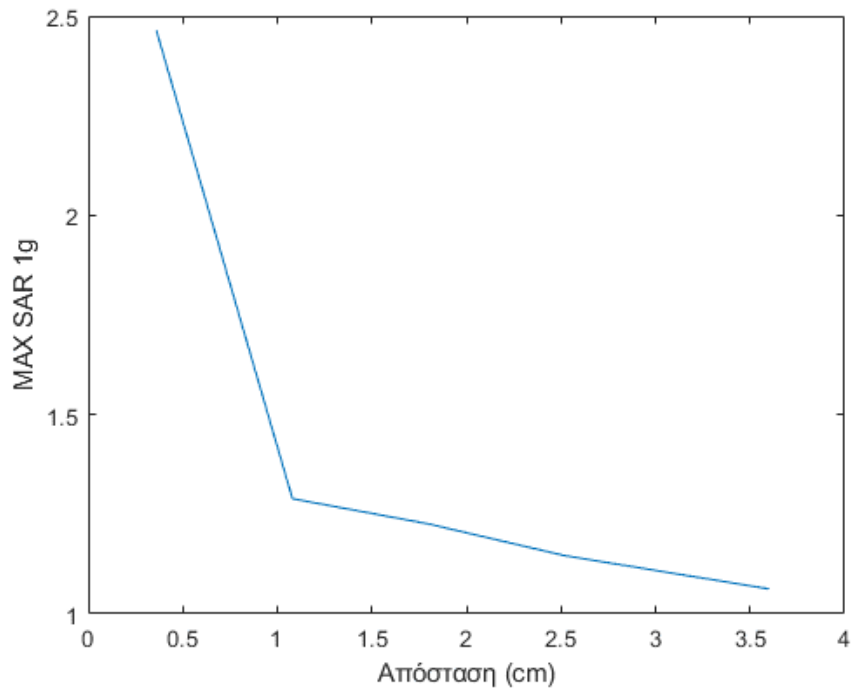
5.3 Δίπολο $\lambda/2$ δίπλα στο μάτι

5.3.1 Δίπολο $\lambda/2$ κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι στα 6 GHz

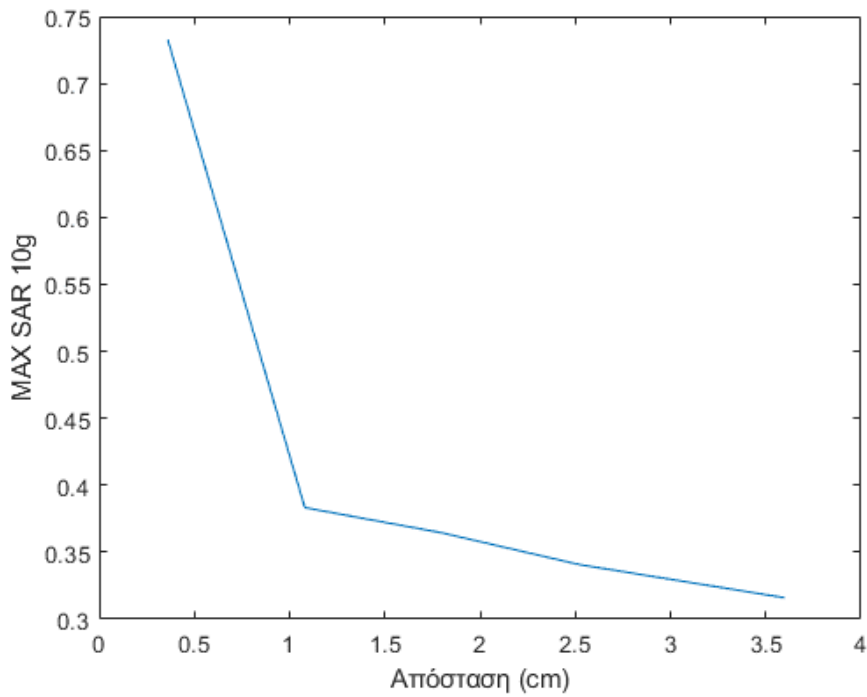
Στη συνέχεια, εξετάστηκε η περίπτωση στην οποία η διπολική κεραία $\lambda/2$ τοποθετήθηκε σε πέντε διαφορετικές θέσεις δίπλα από το μάτι, με κατακόρυφη πόλωση. Η συχνότητα που εξετάστηκε αρχικά είναι τα 6 GHz. Στην εικόνα 5.6 απεικονίζεται το δίπολο κοντά στο αυτί. Τα αποτελέσματα του SAR σε σχέση με την απόσταση παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.13 και 5.14. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται η μεγάλη μείωση του SAR, μόλις αυξάνεται λίγο η απόσταση. Ο SAR σε όλες τις αποστάσεις που μελετήθηκαν βρίσκεται στο πλαίσιο ασφαλούς έκθεσης, για τα όρια της ICNIRP αλλά και της Ελλάδας που είναι πιο αυστηρά.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,36	28,48	2,46	0,73
1,08	34,43	1,29	0,38
1,8	13,28	1,23	0,36
2,52	8,67	1,15	0,34
3,6	6,97	1,07	0,32

Πίνακας 5.5 : Αποτελέσματα SAR για κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι.



Εικόνα 5.13 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση.



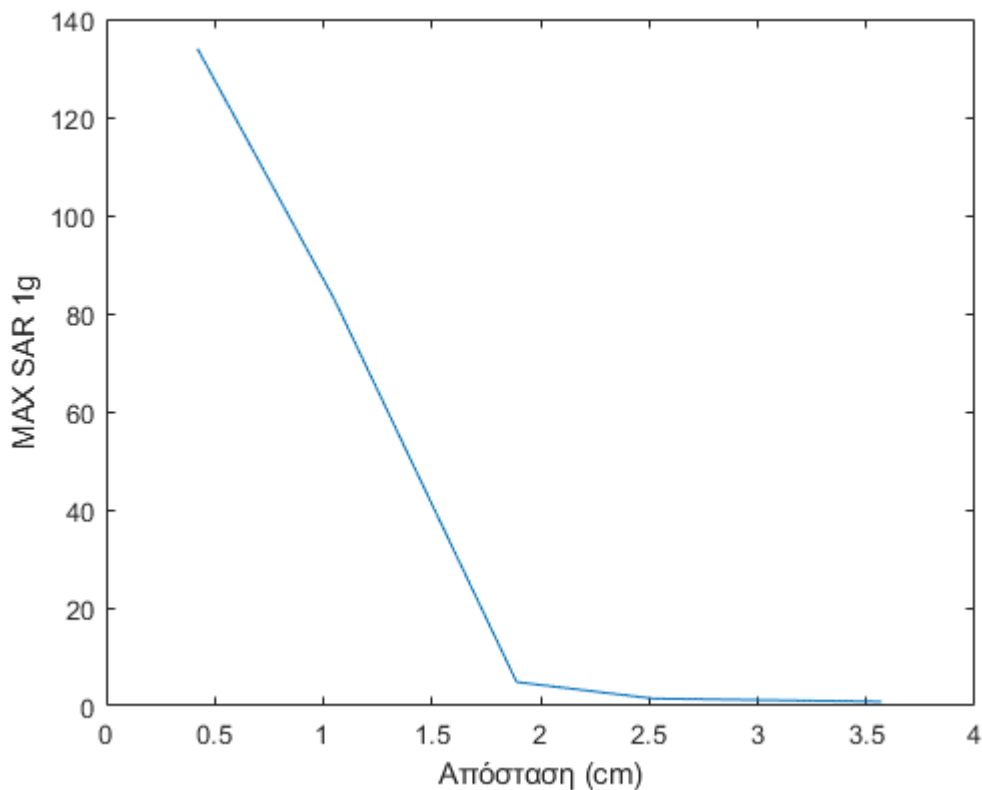
Εικόνα 5.14 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση.

5.3.2 Δίπολο $\lambda/2$ κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι στα 10 GHz

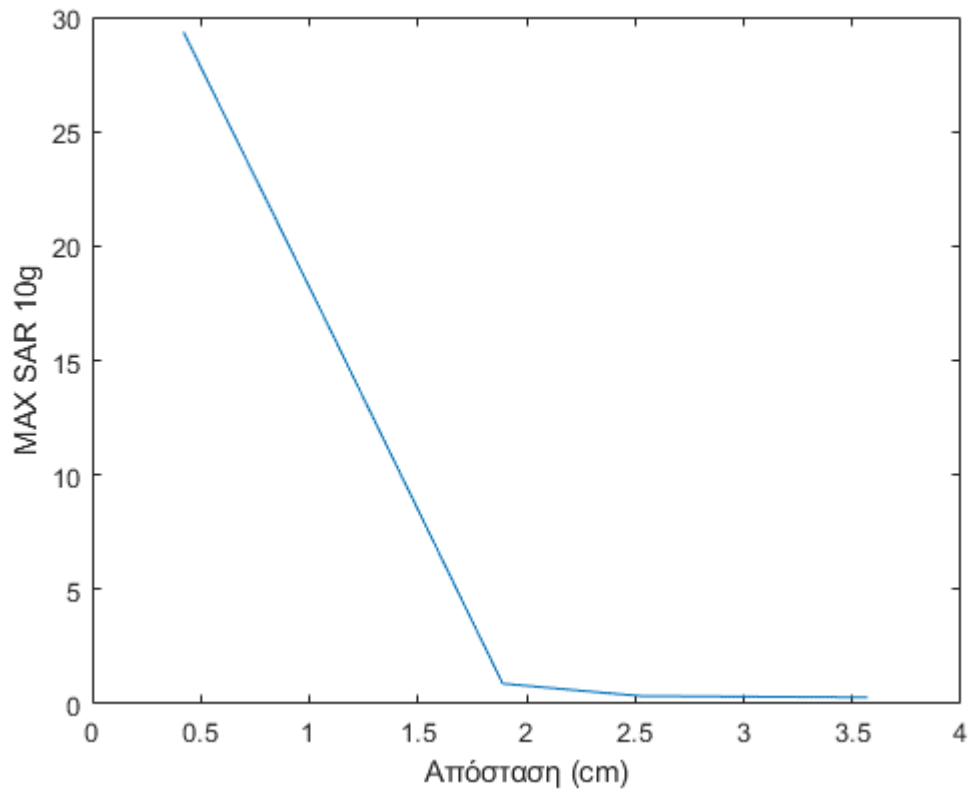
Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη σχέση SAR και απόστασης για τη συχνότητα των 10 GHz. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.15 και 5.16. Οι τιμές για το μάτι στη συχνότητα των 10 GHz είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τα 6 GHz. Σε αυτήν την περίπτωση, ο SAR ξεπερνά σε μεγάλο βαθμό τα όρια ασφαλούς έκθεσης για την ICNIRP και την Ελλάδα, στις αποστάσεις 0,42 και 1,05. Στις αποστάσεις 1,89 και πάνω, ο SAR βρίσκεται πιο χαμηλά από το επιτρεπτό όριο έκθεσης.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,42	795,05	133,99	29,35
1,05	100,87	82,9	17,24
1,89	51,65	4,85	0,89
2,52	11,93	1,48	0,35
3,57	4,97	0,87	0,28

Πίνακας 5.6 : Απεικόνιση SAR στην κατακόρυφη πόλωση δίπλα στο μάτι - 10 GHz.



Εικόνα 5.15 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση για κατακόρυφη πόλωση στο μάτι.



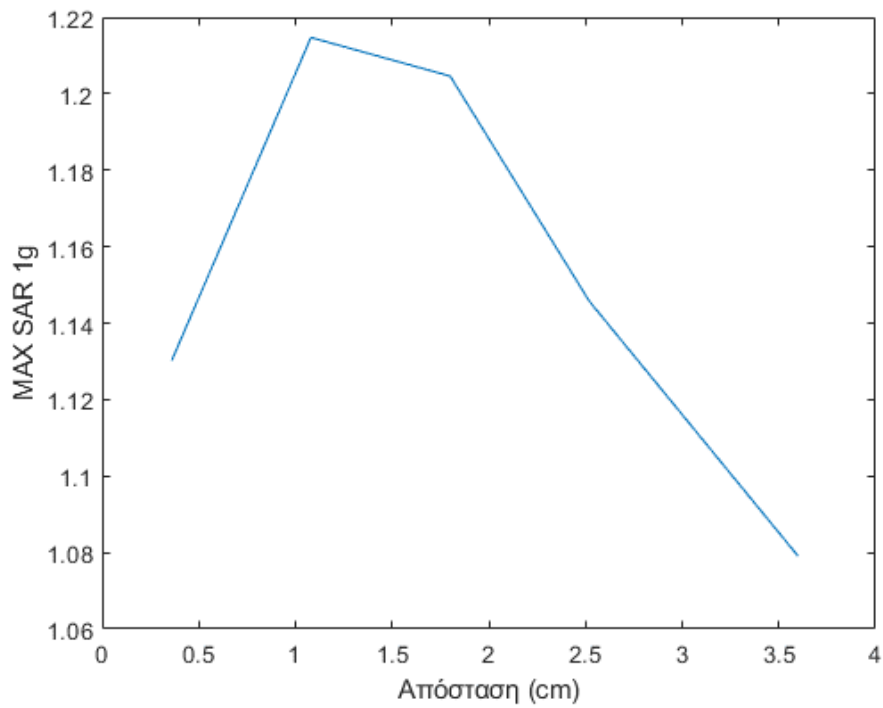
Εικόνα 5.16 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση για κατακόρυφη πόλωση στο μάτι

5.3.3 Δίπολο $\lambda/2$ οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι στα 6 GHz

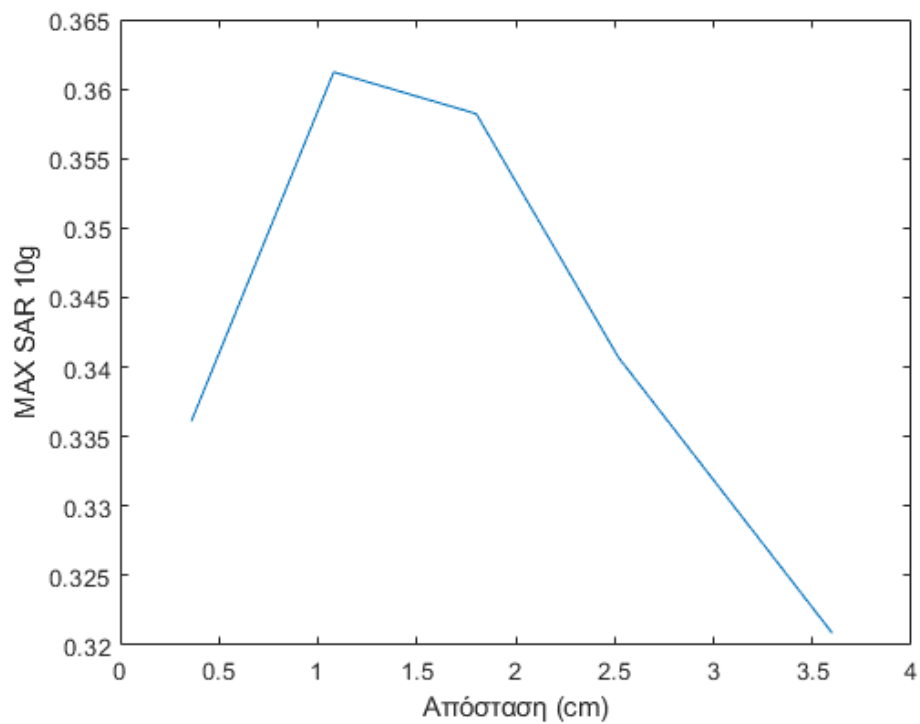
Στην οριζόντια πόλωση με τη συχνότητα της πηγής να είναι 6 GHz, τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.7. Σε αυτήν την περίπτωση επίσης υπάρχει μία εμφανής πτωτική τάση όσο αυξάνεται η απόσταση. Βέβαια και εδώ παρατηρείται ένα μικρό σκαλοπάτι στο διάγραμμα όπως και στην οριζόντια πόλωση δίπλα στο αυτί. Εδώ, σε όλες τις αποστάσεις τα όρια βρίσκονται σε επιτρεπτό πλαίσιο ακόμα και για την Ελλάδα που έχει αυστηρότερα όρια για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.17 και 5.18.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,36	527,49	1,13	0,34
1,08	45,41	1,21	0,36
1,8	14,28	1,2	0,36
2,52	7,13	1,15	0,34
3,6	5,08	1,08	0,32

Πίνακας 5.7 : Απεικόνιση SAR στην οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι - 6 GHz.



Εικόνα 5.17 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση.



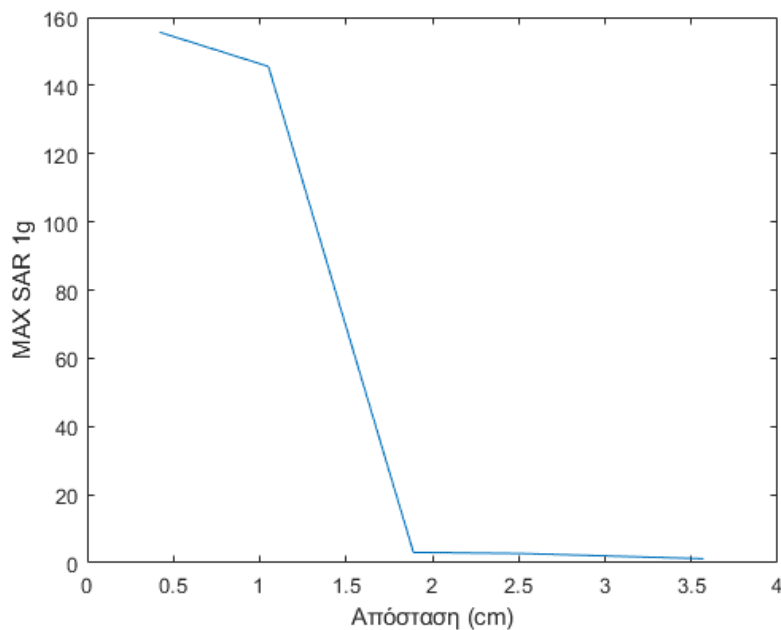
Εικόνα 5.18 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση.

5.3.4 Δίπολο $\lambda/2$ οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι στα 10 GHz

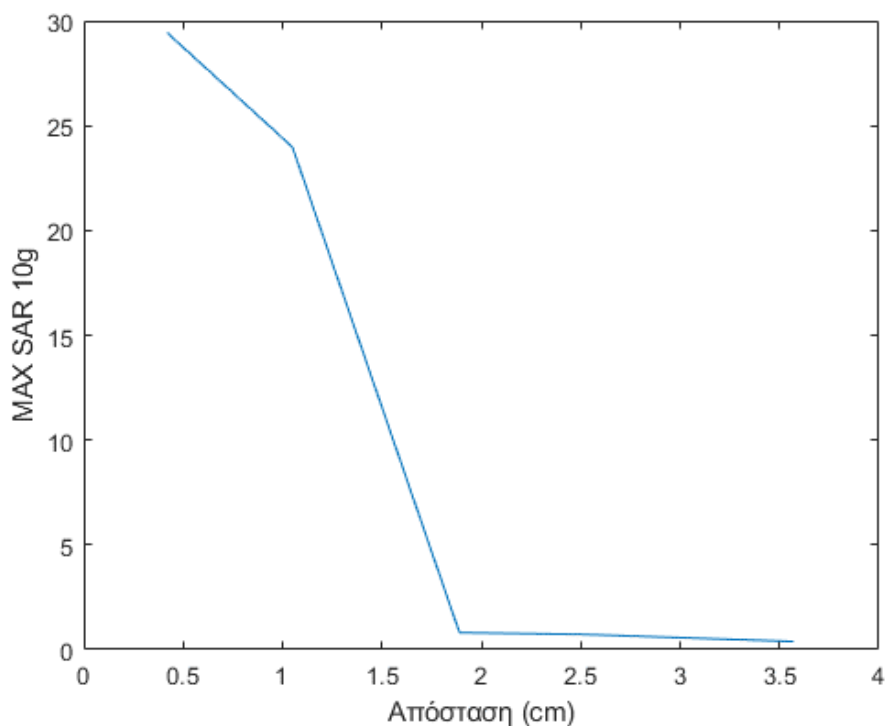
Στην οριζόντια πόλωση του διπόλου δίπλα στο μάτι στη συχνότητα των 10 GHz ο SAR στις αποστάσεις 0,42 και 1,05 ξεπερνά και πάλι τα όρια ασφαλούς έκθεσης για τον γενικό και επαγγελματικό πληθυσμό. Στην συχνότητα των 10 GHz σε κοντινές αποστάσεις παρατηρείται υπέρβαση των ορίων σε μεγάλο βαθμό. Με την αύξηση της απόστασης κατά 1 cm σχεδόν, ο SAR πέφτει σε επιτρεπτές τιμές. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πίνακα διαγραμματικά, στις εικόνες 5.19 και 5.20.

Θέση (cm)	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
0,42	843,47	155,62	29,43
1,05	115,82	145,57	23,97
1,89	23,35	3,06	0,81
2,52	23,08	2,73	0,73
3,57	10,12	1,2	0,39

Πίνακας 5.8 : Απεικόνιση SAR στην οριζόντια πόλωση δίπλα στο μάτι - 10 GHz.



Εικόνα 5.19 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 1g με την απόσταση για οριζόντια πόλωση στο μάτι - 10 GHz.



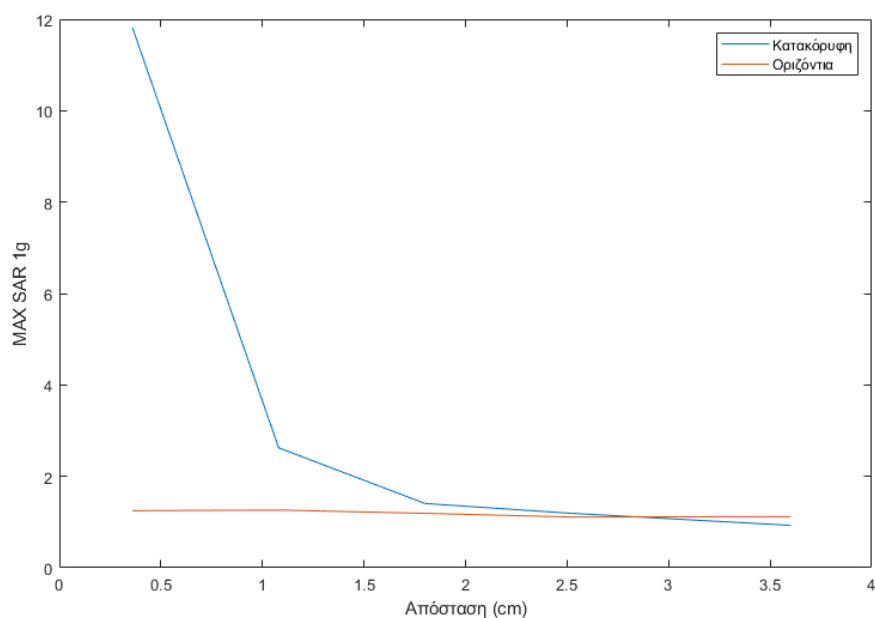
Εικόνα 5.20 : Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μέγιστου SAR 10g με την απόσταση για οριζόντια πόλωση στο μάτι – 10 GHz.

5.4 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης

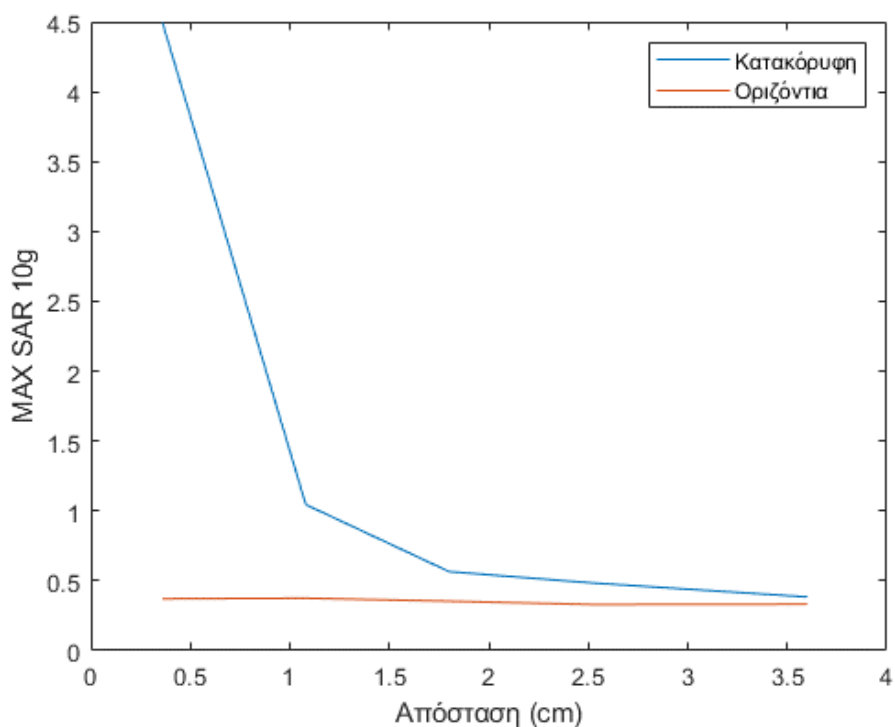
Σε αυτό το σημείο, θα γίνει σύγκριση μεταξύ της οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης για το αυτί και το μάτι ξεχωριστά.

5.4.1 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης στο αυτί

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα από τα διαγράμματα, στην οριζόντια πόλωση, δεν υπάρχει τόσο μεγάλη αλλαγή όσο στην κατακόρυφη πόλωση. Η κατακόρυφη πόλωση στην πιο κοντινή απόσταση έχει πολύ μεγαλύτερο SAR σε σχέση με την οριζόντια. Όσο αυξάνεται η απόσταση, τόσο πιο πολύ συγκλίνουν μεταξύ τους.



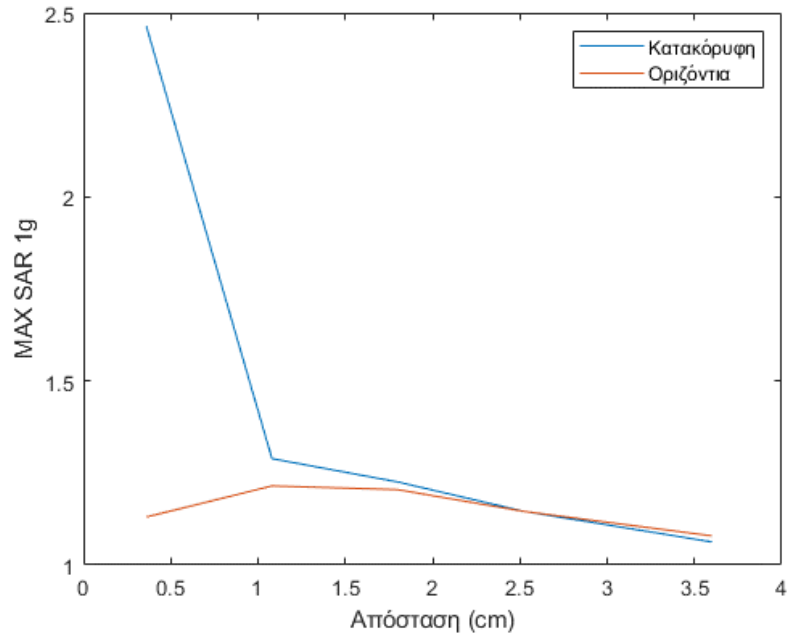
Εικόνα 5.20 : Σύγκριση μέγιστου SAR 1g στο αυτί για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση.



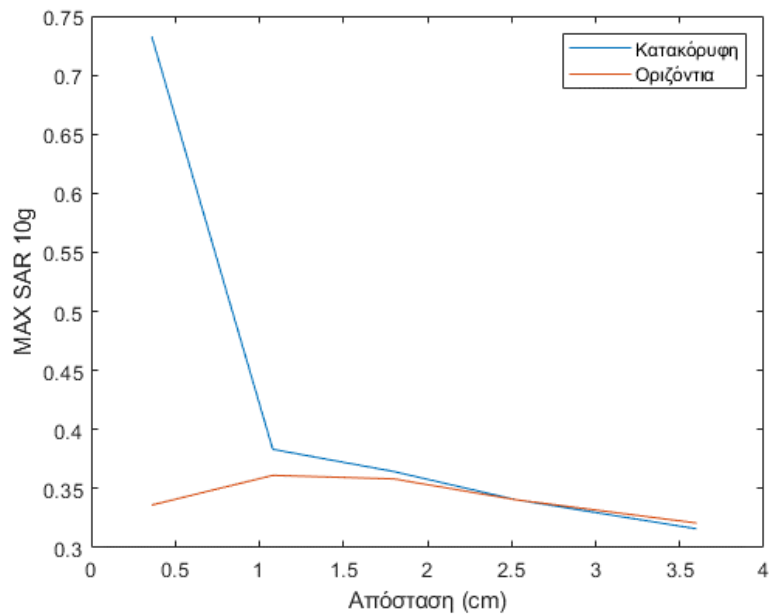
Εικόνα 5.21 : Σύγκριση μέγιστου SAR 1g στο αυτί για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση.

5.4.2 Σύγκριση οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης στο μάτι

Όπως και στην προηγούμενη σύγκριση, έτσι και εδώ, παρατηρείται ότι η κατακόρυφη πόλωση στην πιο κοντινή απόσταση έχει πολύ μεγαλύτερο SAR και μόλις η απόσταση μεγαλώνει λίγο, συγκλίνει με τα αποτελέσματα της οριζόντιας πόλωσης.



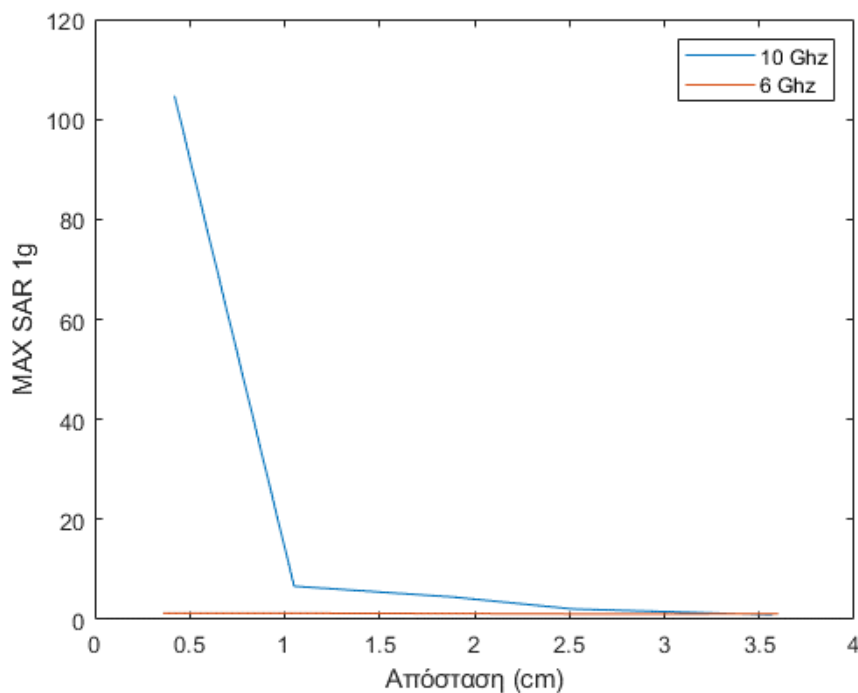
Εικόνα 5.22 : Σύγκριση μέγιστου SAR 1g στο μάτι για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση.



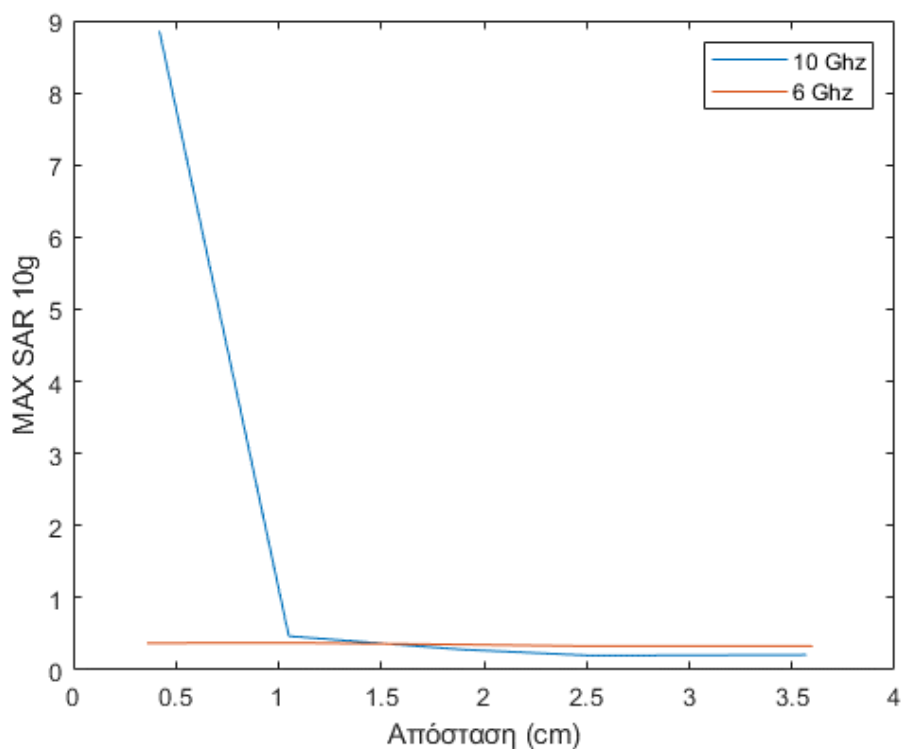
Εικόνα 5.23 : Σύγκριση μέγιστου SAR 10g στο μάτι για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση.

5.4.3 Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης αυτιού στα 6 και 10 GHz

Σε αυτό το σημείο υπάρχουν διαγράμματα στα οποία συγκρίνονται τα αποτελέσματα για την οριζόντια πόλωση αυτιού, στις δύο συχνότητες. Διακρίνεται ότι στις αρχικές κοντινές αποστάσεις στη συχνότητα των 10 GHz ο SAR ξεκινά με αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη συχνότητα των 6 GHz. Ο συνδυασμός της κοντινής απόστασης από τους ευαίσθητους ιστούς με την αύξηση της συχνότητας, οδηγεί σε υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων έκθεσης. Στην εικόνα 5.24 είναι η σύγκριση των δύο συχνοτήτων για SAR 1g και στην 5.25 για SAR 10g.



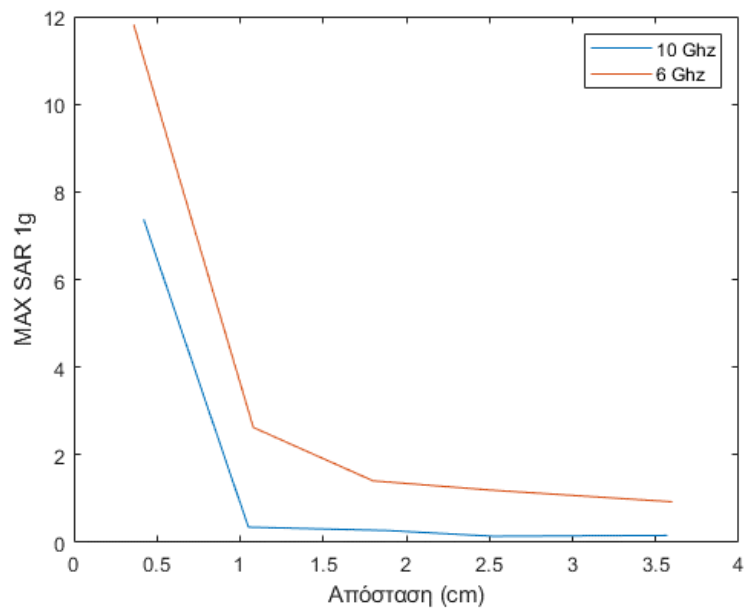
Εικόνα 5.24 : Σύγκριση οριζόντια πόλωση αυτιού στα 6 και 10 GHz για SAR 1g.



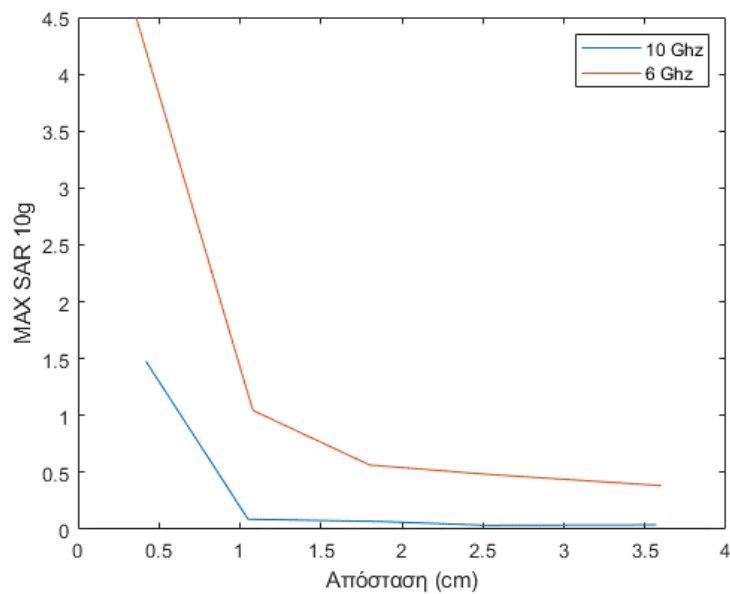
Εικόνα 5.25 : Σύγκριση οριζόντια πόλωση αυτιού στα 6 και 10 GHz για SAR 10g.

5.4.4 Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης αυτιού στα 6 και 10 GHz

Συγκρίνοντας την αλλαγή συχνότητας στην κατακόρυφη πόλωση του αυτιού, φαίνεται πως στη συχνότητα των 10 GHz ο SAR παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την συχνότητα των 6 GHz. Επιπλέον, στην ίδια απόσταση ξεκινά να μειώνεται η τιμή του δραστικά και όσο απομακρύνεται η κεραία από το κεφάλι, οι τιμές του SAR στις δύο συχνότητες βρίσκονται όλο και πιο κοντά.



Εικόνα 5.26 : Σύγκριση κατακόρυφη πόλωση αυτιού στα 6 και 10 GHz για SAR 1g.

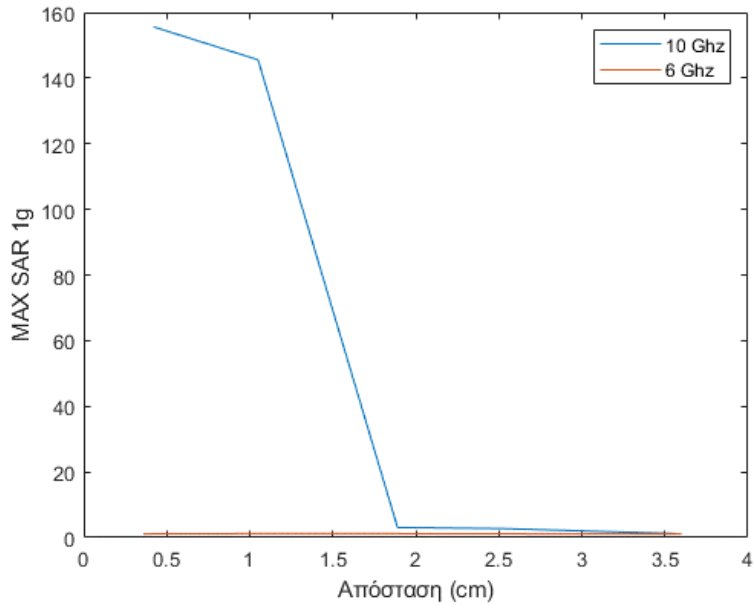


Εικόνα 5.27 : Σύγκριση κατακόρυφη πόλωση αυτιού στα 6 και 10 GHz για SAR 10g.

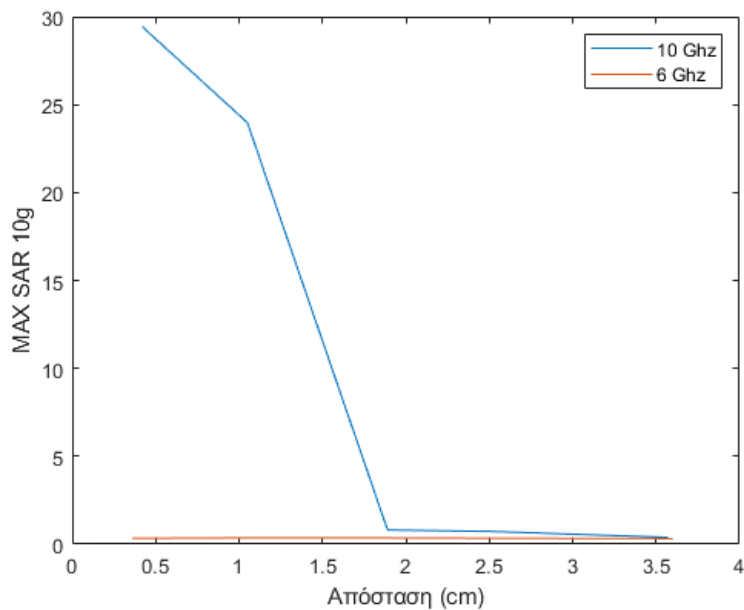
5.4.5 Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz

Στην οριζόντια πόλωση ματιού στις δύο συχνότητες που πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, υπάρχουν βασικές διαφορές στις κοντινές αποστάσεις. Στη συχνότητα των 6 GHz, οι τιμές του SAR κυμαίνονται στο ίδιο επίπεδο σε χαμηλές τιμές, χωρίς να υπερβαίνουν

τα όρια ασφαλούς έκθεσης ακόμα και σε κοντινές αποστάσεις. Αντίθετα, στη συχνότητα των 10 GHz, οι τιμές του SAR σε κοντινή απόσταση, είναι εμφανώς μεγαλύτερες και αφού η απόσταση μεταξύ κεφαλιού και κεραίας ξεπεράσει τα 1,8 cm, ο SAR είναι πολύ κοντά στις τιμές του SAR στα 6 GHz.



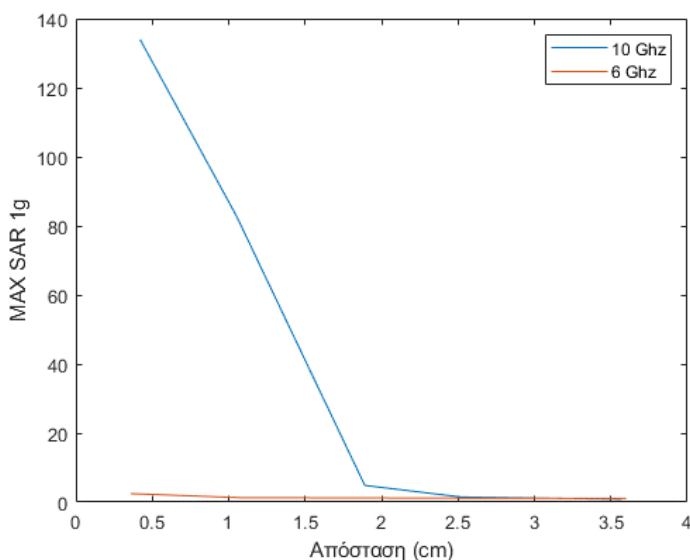
Εικόνα 5.28 : Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz για SAR 1g.



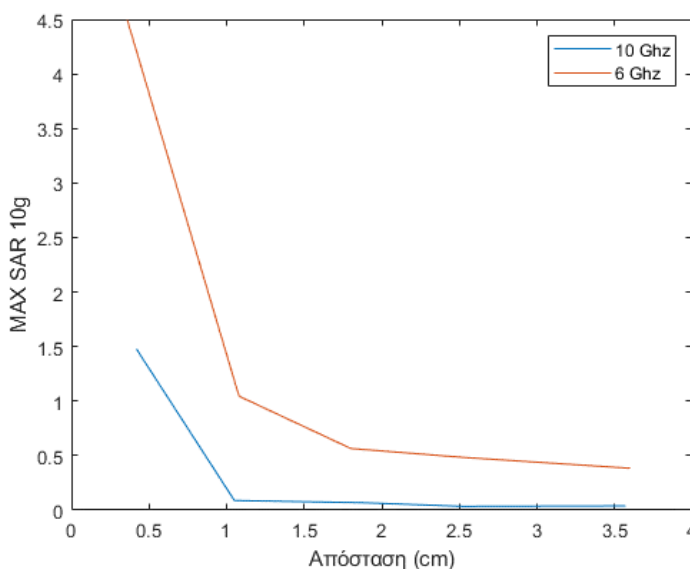
Εικόνα 5.29 : Σύγκριση οριζόντιας πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz για SAR 10g.

5.4.6 Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz

Στην σύγκριση των δύο συχνοτήτων για την περίπτωση της κατακόρυφης πόλωσης στο μάτι, τα συμπεράσματα είναι ίδια με τα προηγούμενα διαγράμματα. Ο αριθμός SAR στα 10 GHz σε κοντινή απόσταση είναι μεγάλος και μη επιτρεπτός ενώ στη συχνότητα των 6 GHz δεν έχει διακυμάνσεις και κυμαίνεται σε σταθερό επίπεδο τιμών, χωρίς να ξεπερνάει τα όρια ασφαλούς έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.



Εικόνα 5.30 : Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz για SAR 1g.



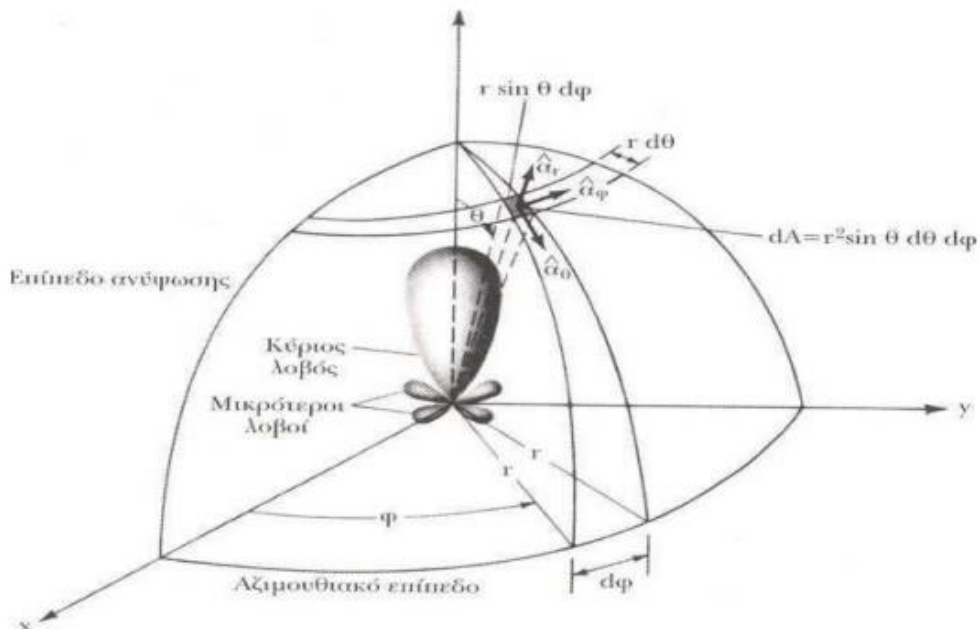
Εικόνα 5.31 : Σύγκριση κατακόρυφης πόλωσης ματιού στα 6 και 10 GHz για SAR 10g.

Κεφάλαιο 6

6.1 Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Επίπεδο κύμα ορίζεται αυτό του οποίου το πλάτος είναι σταθερό σε κάθε σημείο ενός επιπέδου που είναι κάθετο σε μία δεδομένη κατεύθυνση. Το επίπεδο κύμα αποτελεί μία ιδανική περίπτωση και μπορεί να αξιοποιηθεί σε περιπτώσεις που θεωρούμε ότι η πηγή σε σχέση με το κεφάλι έχει μεγάλη απόσταση.

Θεωρείται λοιπόν ότι υπάρχει μακρινό πεδίο ακτινοβολίας και έτσι καλό θα ήταν να δοθεί βάση στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Πρόκειται για την γραφική παράσταση που παρουσιάζει τον τρόπο ακτινοβολίας της κεραίας καθώς μεταβάλλεται το σημείο παρατήρησης του ηλεκτρικού πεδίου. Παρακάτω απεικονίζεται το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας στην εικόνα 6.1. Η γωνία θ είναι η γωνία που ξεκινάει από τον άξονα z και ονομάζεται και γωνία ανύψωσης. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, έχει σταθερή τιμή 90° . Η γωνία φ , είναι η αζιμουθιακή και ξεκινάει από τον άξονα x . Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, μεταβάλλεται με βάση τις τιμές ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$).



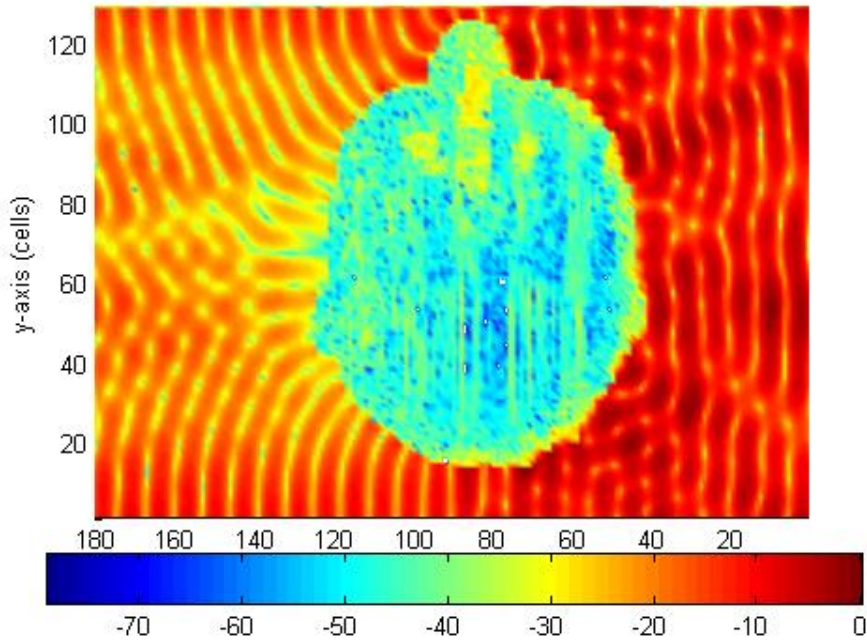
Εικόνα 6.1 : Σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση κεραίων.

6.2 Προσπίπτον επίπεδο κύμα σε μοντέλο κεφαλιού

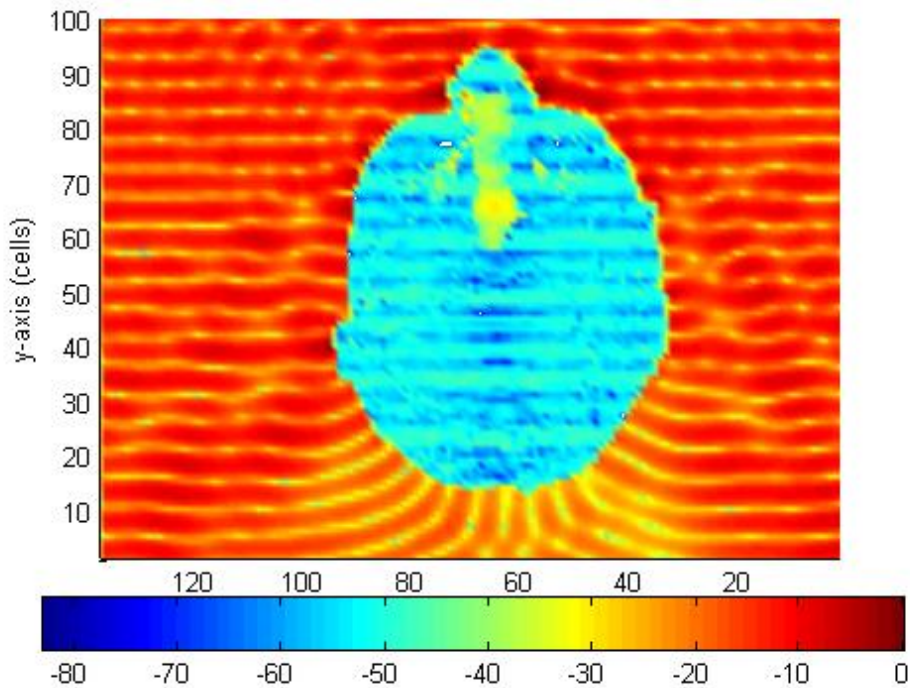
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση επίπεδου κύματος. Πιο συγκεκριμένα με το επίπεδο κύμα (plane wave) εννοείται ότι υπάρχει μία πηγή σε επαρκώς μακρινή απόσταση από το κεφάλι. Έγινε ο υπολογισμός των τιμών SAR για τις συχνότητες 6 και 10 GHz με τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές να έχουν οριστεί για την

πυκνότητα ισχύος. Ο παραπάνω υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για τα όρια της ICNIRP και της Ελλάδας και για το 70% και για το 60%. Στις προσομοιώσεις, η γωνία θ ήταν 90° σταθερά και η γωνία φ μεταβαλλόταν.

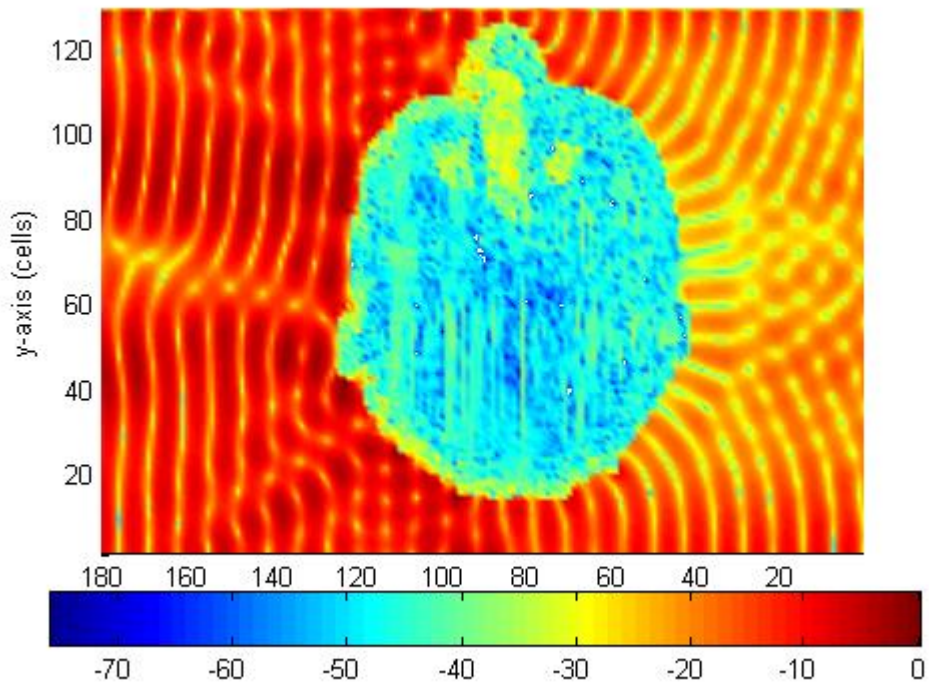
Σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστούν οι εικόνες που δείχνουν την διάδοση του επίπεδου κύματος ανάλογα με την γωνία φ , στις εικόνες 6.2, 6.3, 6.4, 6.5.



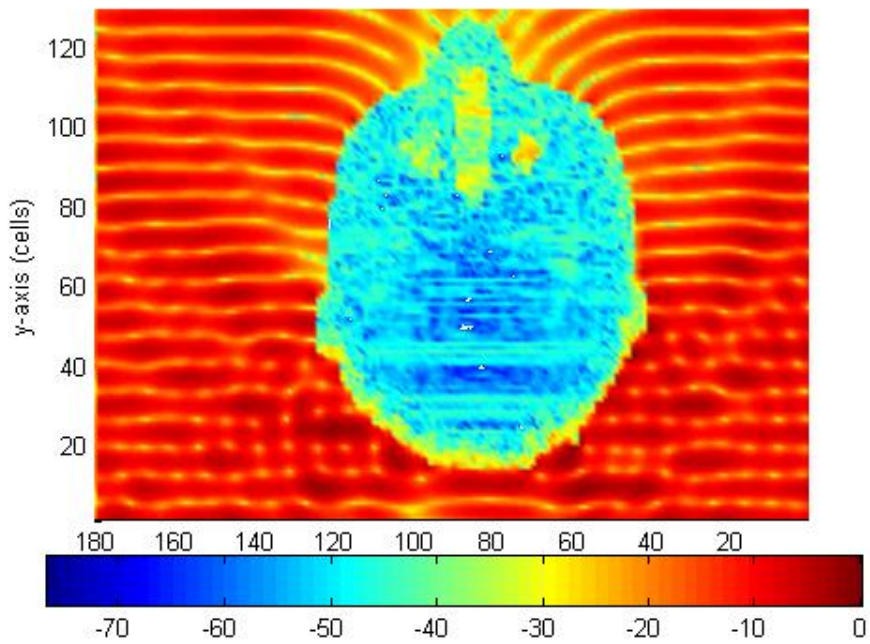
Εικόνα 6.2 : Απεικόνιση του κανονικοποιημένου ηλεκτρικού πεδίου σε dB ($\varphi=0^\circ$ και $\theta=90^\circ$).



Εικόνα 6.3 : Απεικόνιση του κανονικοποιημένου ηλεκτρικού πεδίου σε dB ($\varphi=90^\circ$ και $\theta=90^\circ$).



Εικόνα 6.4 : Απεικόνιση του κανονικοποιημένου ηλεκτρικού πεδίου σε dB ($\varphi=180^\circ$ και $\theta=90^\circ$).



Εικόνα 6.5 : Απεικόνιση του κανονικοποιημένου ηλεκτρικού πεδίου σε dB ($\varphi=270^\circ$ και $\theta=90^\circ$).

6.2.1 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια ICNIRP

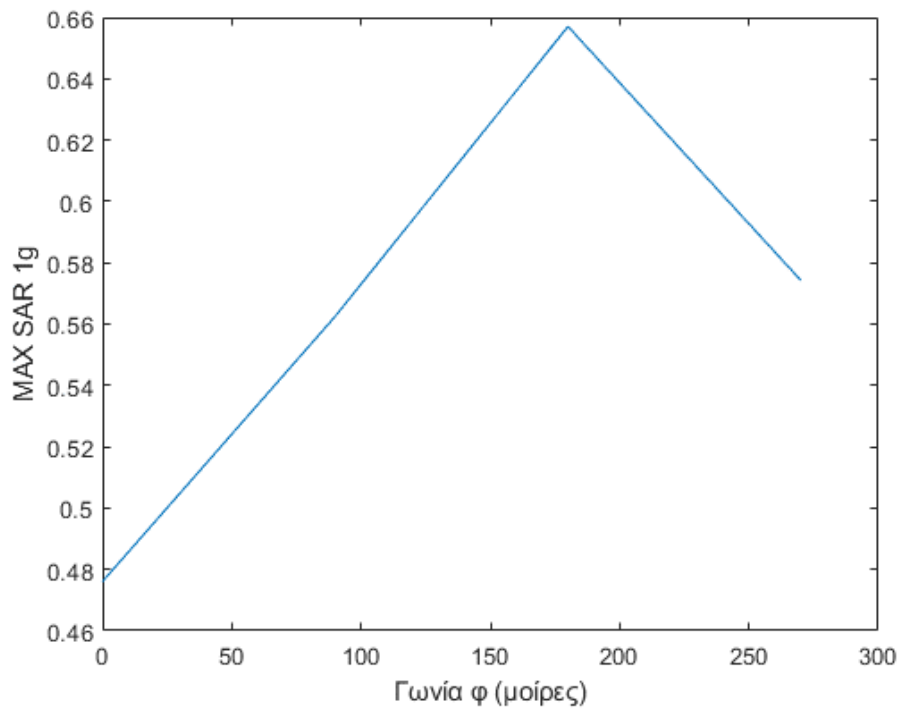
Με βάση τα όρια έκθεσης ακτινοβολίας της ICNIRP, η μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος, είναι τα 10 W/m^2 . Έτσι προκύπτει το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου από τον τύπο $E = \sqrt{S \cdot 377} = \sqrt{10 \cdot 377} = 61,44 \text{ V/m}$, όπου S η πυκνότητα ισχύος και $377 \text{ } \Omega$ η σύνθετη χαρακτηριστική αντίσταση στο κενό. Στον πίνακα 6.1 απεικονίζονται οι τιμές του SAR για τη συχνότητα των 6 GHz ενώ στον πίνακα 6.2 για την συχνότητα των 10 GHz. Συμπερασματικά, σε αυτό το σημείο φαίνεται πως για την συχνότητα των 6 GHz η μέγιστη τιμή βρίσκεται όταν η γωνία ϕ είναι ίση με 180° ενώ στην περίπτωση των 10 GHz όταν η γωνία είναι 270° .

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\phi=0^\circ$	1,16	0,29	0,15
$\theta=90^\circ$ & $\phi=90^\circ$	0,87	0,34	0,16
$\theta=90^\circ$ & $\phi=180^\circ$	1,58	0,39	0,15
$\theta=90^\circ$ & $\phi=270^\circ$	0,91	0,34	0,12

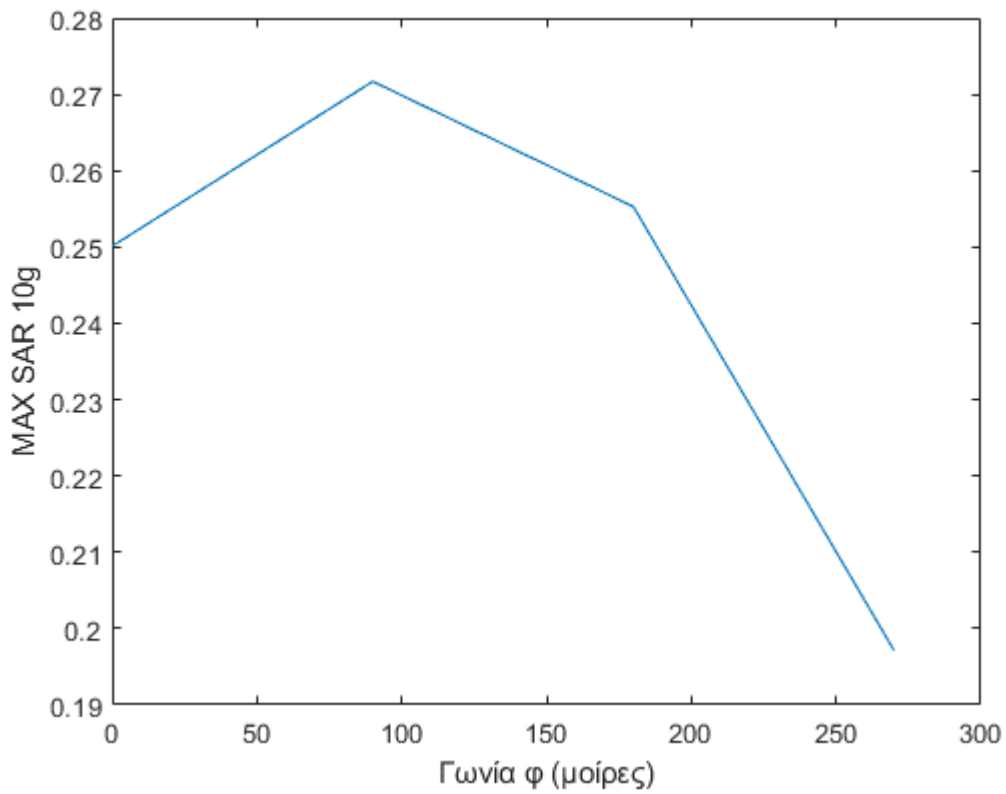
Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της ICNIRP 6 GHz.

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\phi=0^\circ$	0,55	0,19	0,04
$\theta=90^\circ$ & $\phi=90^\circ$	0,19	0,07	0,02
$\theta=90^\circ$ & $\phi=180^\circ$	0,25	0,04	0,009
$\theta=90^\circ$ & $\phi=270^\circ$	0,42	0,09	0,02

Πίνακας 6.2 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της ICNIRP - 10 GHz



Εικόνα 6.6 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 6 GHz ICNIRP.



Εικόνα 6.7 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 10 GHz ICNIRP.

6.2.2 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια της Ελλάδας για τον γενικό πληθυσμό (60%)

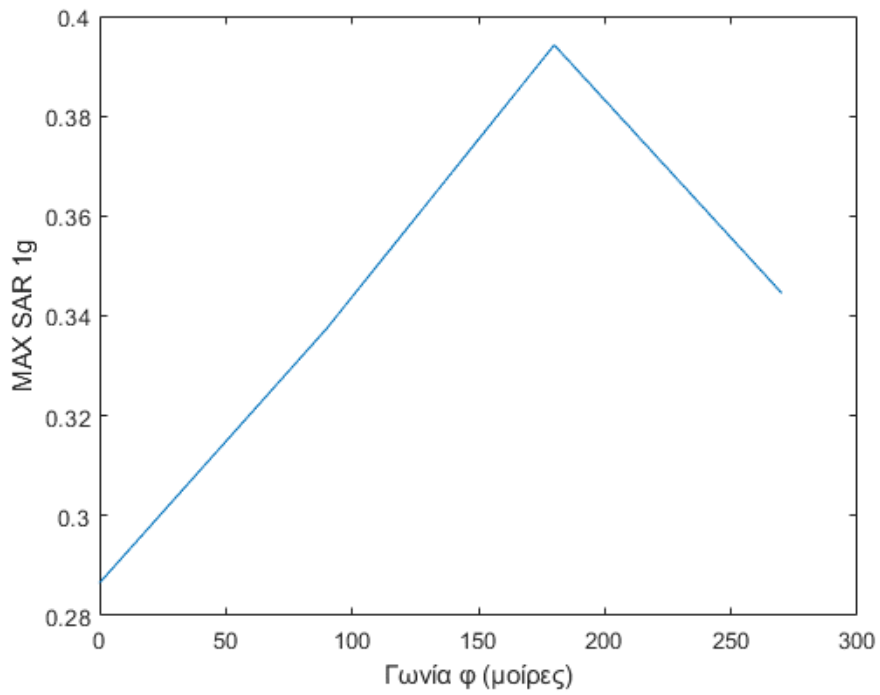
Με βάση τα όρια έκθεσης ακτινοβολίας για την Ελλάδα, η μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος είναι τα 6 W/m^2 . Στον πίνακα 6.3 απεικονίζονται οι τιμές του SAR για τη συχνότητα των 6 GHz ενώ στον πίνακα 6.4 για την συχνότητα των 10 GHz. Στις 180° και 0° αντίστοιχα παρατηρήθηκαν στα όρια της Ελλάδας για τον γενικό πληθυσμό οι μέγιστες τιμές του SAR.

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=0^\circ$	1,16	0,29	0,15
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=90^\circ$	0,87	0,34	0,16
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=180^\circ$	1,58	0,39	0,15
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=270^\circ$	0,91	0,34	0,12

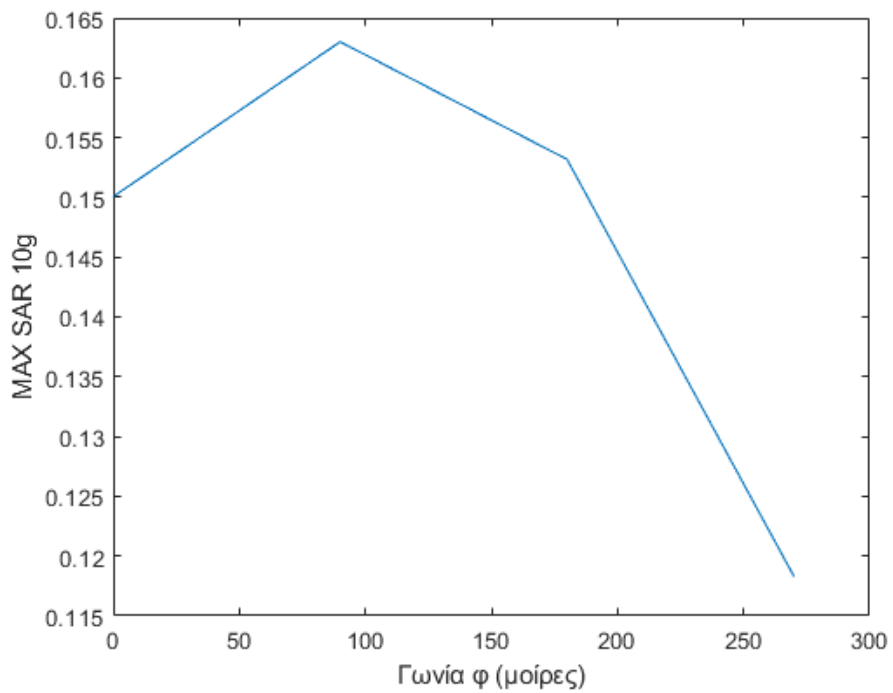
Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της Ελλάδας (60%) – 6 GHz.

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=0^\circ$	0,33	0,12	0,03
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=90^\circ$	0,11	0,04	0,01
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=180^\circ$	0,15	0,03	0,005
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=270^\circ$	0,25	0,05	0,0088

Πίνακας 6.4 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της Ελλάδας (60%) – 10 GHz.



Εικόνα 6.8 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 6 GHz Ελλάδα 60%.



Εικόνα 6.9 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 10 GHz Ελλάδα 60%.

6.2.3 Αποτελέσματα SAR με την μέγιστη πυκνότητα ισχύος για τα όρια της Ελλάδας για τον επαγγελματικό πληθυσμό (70%)

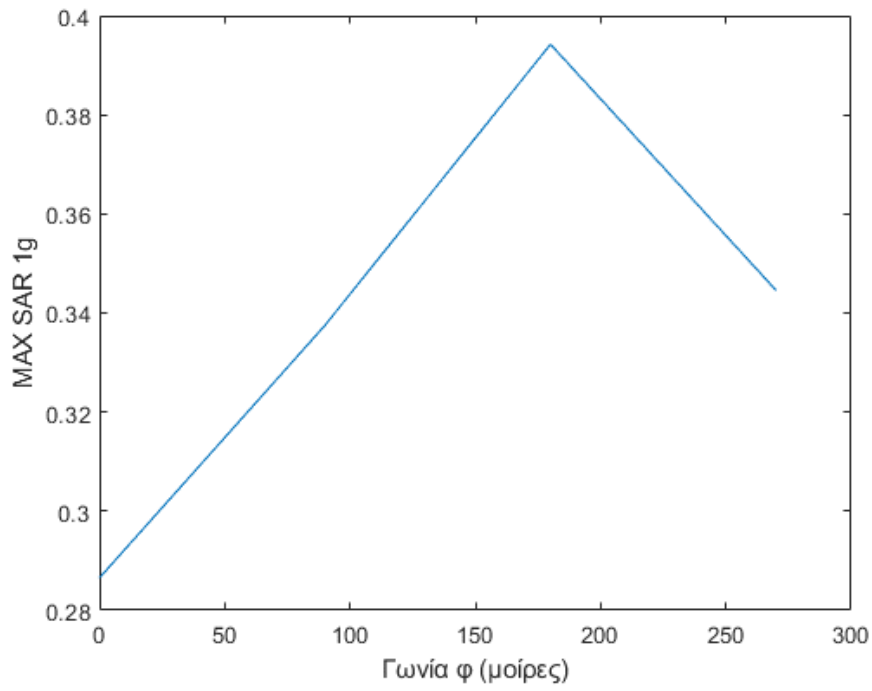
Με βάση τα όρια έκθεσης ακτινοβολίας για την Ελλάδα, η μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος είναι τα 7 W/m^2 . Στον πίνακα 6.5 απεικονίζονται οι τιμές του SAR για τη συχνότητα των 6 GHz ενώ στον πίνακα 6.6 για την συχνότητα των 10 GHz. Για 180° και 0° όπως και στην περίπτωση των ορίων της Ελλάδας με το 60%, παρατηρούνται οι μεγαλύτεροι SAR.

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=0^\circ$	1,35	0,33	0,18
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=90^\circ$	1,01	0,39	0,19
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=180^\circ$	1,84	0,46	0,18
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=270^\circ$	1,07	0,4	0,14

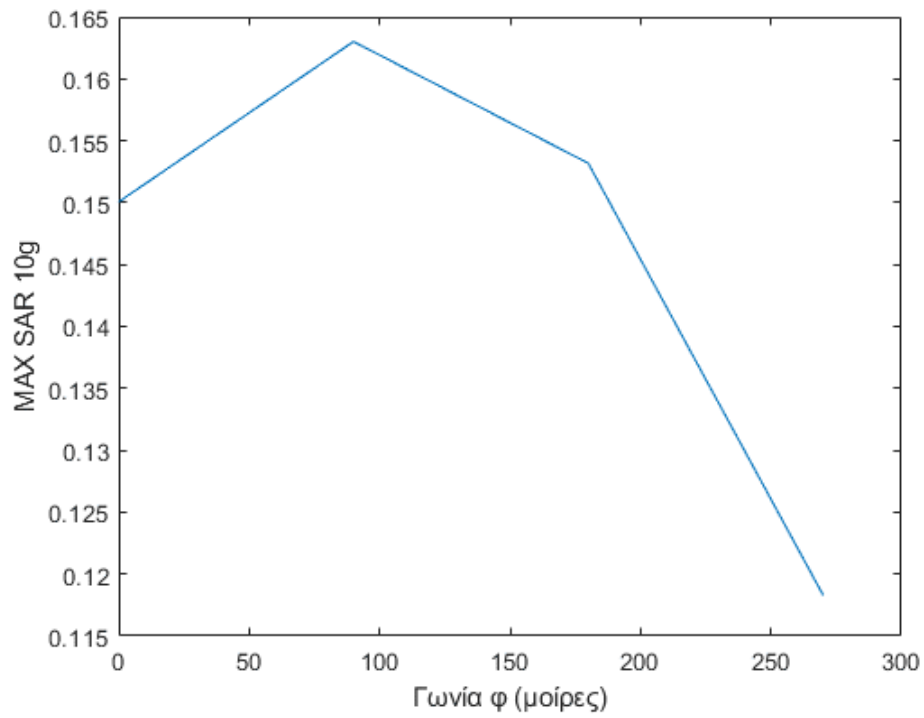
Πίνακας 6.5 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της Ελλάδας (70%) – 6 GHz.

Περιπτώσεις	Max SAR	Max SAR 1g	Max SAR 10g
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=0^\circ$	0,38	0,14	0,031
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=90^\circ$	0,13	0,05	0,02
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=180^\circ$	0,17	0,03	0,006
$\theta=90^\circ$ & $\varphi=270^\circ$	0,3	0,06	0,01

Πίνακας 6.6 : Αποτελέσματα SAR για μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος της Ελλάδας (70%) – 10 GHz.



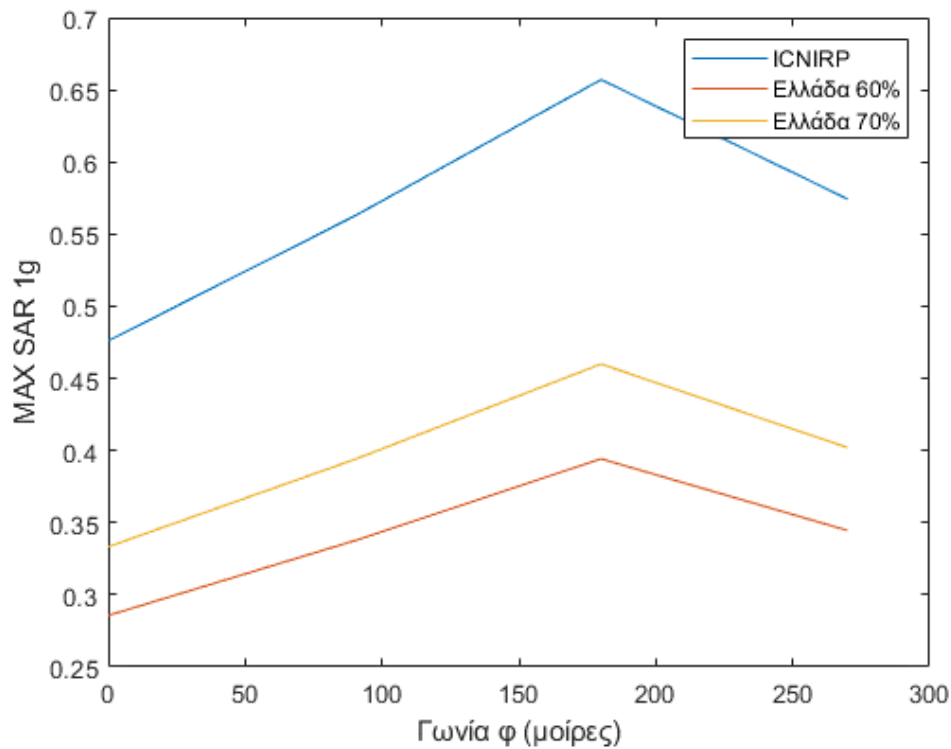
Εικόνα 6.10 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 6 GHz Ελλάδα 70%.



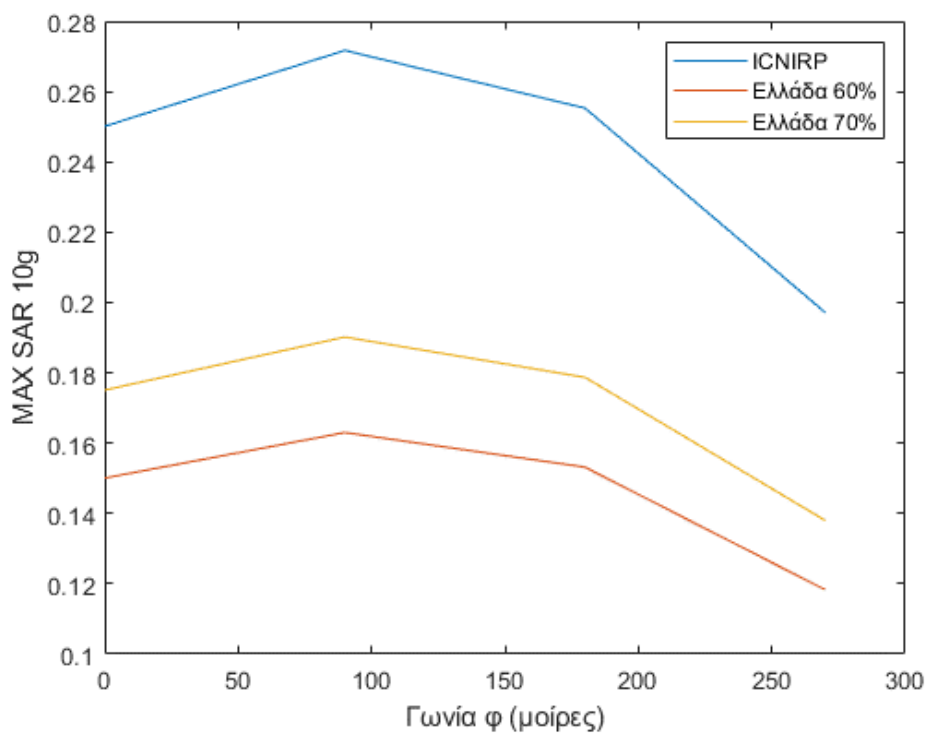
Εικόνα 6.11 : Διάγραμμα SAR – γωνίες για τα 10 GHz Ελλάδα 70%.

6.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

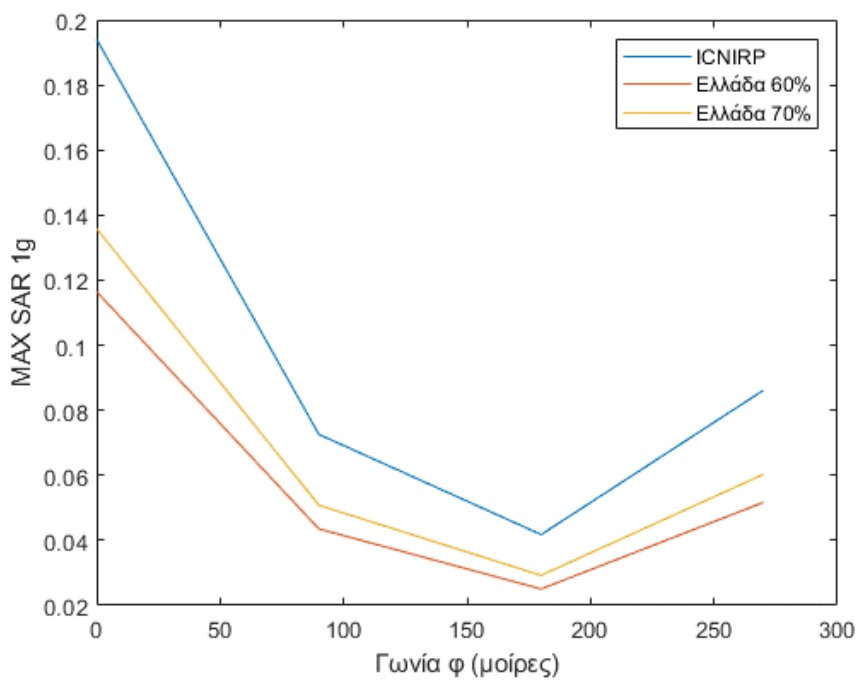
Για τη συχνότητα των 6 GHz, με τη μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος για κάθε οργανισμό, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα στις εικόνες 6.11 και 6.12 για τα 6 GHz και στις εικόνες 6.13 και 6.14 για τα 10 GHz. Όπως είναι γνωστό, εφόσον τα όρια της Ελλάδας είναι πιο αυστηρά, ψηλά στο διάγραμμα βρίσκονται οι αριθμοί SAR της ICNIRP, ακολουθούν τα όρια της Ελλάδας για τον επαγγελματικό πληθυσμό και τέλος τα όρια για τον γενικό πληθυσμό της Ελλάδας. Παρατηρείται πως σε όλα τα διαγράμματα και στα 6 και στα 10 GHz όλοι οι οργανισμοί έχουν την ίδια συμπεριφορά. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα της εικόνας 6.11, όλοι έχουν ένα σκαλοπάτι με άνοδο στην γωνία των 180°, κ.ο.κ.



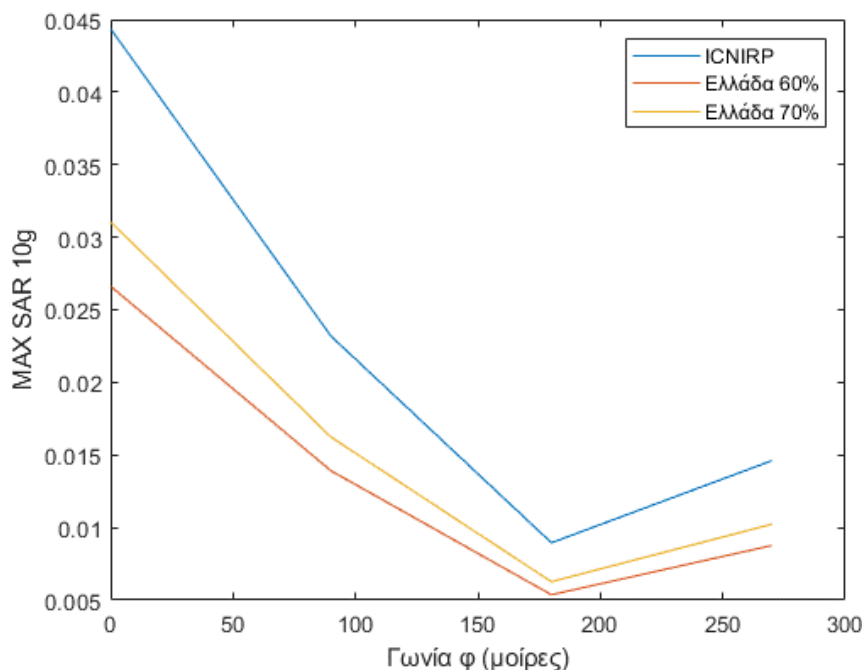
Εικόνα 6.11 : Σύγκριση SAR 1g για όλα τα όρια – 6 GHz.



Εικόνα 6.12 : Σύγκριση SAR 10g για όλα τα όρια – 6 GHz.



Εικόνα 6.13 : Σύγκριση SAR 1g για όλα τα όρια – 10 GHz.



Εικόνα 6.14 : Σύγκριση SAR 10g για όλα τα όρια – 10 GHz.

Κεφάλαιο 7

7.1 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση ενός διπόλου $\lambda/2$ σε συχνότητες 6 και 10 GHz, δίνοντας βάση στους ευαίσθητους ιστούς σε αυτί και μάτι. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι η απόσταση μεταξύ ιστού και κεραίας παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς με απομάκρυνση του διπόλου της τάξης ενός εκατοστού, ο SAR μειώνεται σημαντικά. Γενικά, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της απόστασης μειωνόταν η απορρόφηση ακτινοβολίας, χωρίς αυτό να ισχύει πάντα. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες που δεν μπορούν να ερμηνευτούν με σιγουριά και να βγει κάποιο άμεσο αποτέλεσμα. Στα 10 GHz δεν φάνηκαν μεγάλες διαφοροποιήσεις του SAR σε όλες τις προσομοιώσεις σε σχέση με τα 6 GHz, γεγονός που ήταν αναμενόμενο καθώς σαν όριο σε συχνότητες πάνω από 6 GHz, χρησιμοποιείται η πυκνότητα ισχύος. Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι στην κατακόρυφη πόλωση σε μικρή απόσταση από τον ιστό, υπήρχε αρκετά μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την οριζόντια, παρόλο που όσο μεγάλωνε η απόσταση, οι αντίστοιχες βρίσκονταν πολύ κοντά.

Στις προσομοιώσεις του επίπεδου κύματος, τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν με βάση την μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ισχύος για την ICNIRP και την Ελλάδα. Όπως φάνηκε η Ελλάδα έχει αρκετά αυστηρότερα όρια, που για τον γενικό πληθυσμό είναι το 60% από αυτά της ICNIRP. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν,

υπήρξε παρόμοια συμπεριφορά στις τιμές. Για παράδειγμα, σε κάποιες συγκεκριμένες γωνίες παρουσίαζαν ταυτόχρονα όλες οι περιπτώσεις αύξηση κ.ο.κ.

Τέλος, σε κάποιες πολύ οριακές περιπτώσεις, παρατηρήθηκε υπέρβαση των ορίων SAR σε σχέση με τα όρια και της Ελλάδας αλλά και της ICNIRP, στις συχνότητες 6 και 10 GHz.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Αυτή η διπλωματική εργασία, έδωσε βάση σε μεγαλύτερες συχνότητες δικτύων από τις σημερινές αλλά όχι σε πολύ μεγαλύτερες. Μία ενδιαφέρουσα έρευνα που θα μπορούσε να γίνει είναι η συνέχεια αυτών των προσομοιώσεων για ακόμα μεγαλύτερες συχνότητες τις οποίες έχει σκοπό να χρησιμοποιήσει η πέμπτη γενιά δικτύων.

Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα όρια που έχουν θεσπιστεί για την ασφάλεια από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, εστιάζουν σε βραχυχρόνιες και όχι μακροχρόνιες επιπτώσεις, έτσι ενδιαφέρον θα ήταν να εξεταστούν πιθανές μακροχρόνιες επιπτώσεις στον οργανισμό. Επίσης, τα όρια που υπάρχουν δίνουν βάση μόνο στην υπερθέρμανση των ιστών, καλό θα ήταν λοιπόν να εξεταστούν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζονται στο σώμα και το κεφάλι από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα επέκταση θα ήταν ο έλεγχος για υπέρβαση των ορίων που έχουν θεσπιστεί σε πραγματικές συνθήκες, όπου μπορεί να υπάρχει ταυτόχρονη έκθεση σε πολλές πηγές και ο οργανισμός μπορεί να επηρεάζεται από πολλές άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος, είτε να υπάρχει ανάκλαση των κυμάτων με αποτέλεσμα την υπέρβαση ορίων κ.α.

Τέλος, θα ήταν σημαντικό να δοθεί περισσότερη βάση και να πραγματοποιηθούν περισσότερες έρευνες για επιπτώσεις της ακτινοβολίας σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού, όπως τα νεογέννητα μωρά, τα παιδιά, έγκυος γυναίκες, άνθρωποι με προβλήματα υγείας, κ.α.

Βιβλιογραφία

- [1] D. Colombi, B. Thors and C Törnevik, "*Implications of EMF Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices Above 6 Ghz*", IEEE, 2015
- [2] Ikka Laakso, Ryota Morimoto, Akimasa Hirata and Teruo Onishi, "*Computational Dosimetry of the Human Head Exposed to Near-Field Microwaves Using Measured Blood Flow*", IEEE, 2017
- [3] Dan Liu, Congsheng Li, Yangyang Kang, Zhou Zhou, Yi Xie and Tongning Wu, "*Numerical analysis for infant's unintentional exposure to 3,5 Ghz plane wave radiofrequency electromagnetic fields by field test of fifth generation wireless technologies*", AGU PUBLICATIONS, 2017
- [4] K. Foster and D. Colombi , "*Thermal response of tissue to RF exposure from canonical dipoles at frequencies for future mobile communication systems*", ELECTRONIC LETTERS, 2017
- [5] Z.M. Lwin, M. Yokota, Anger Abdul Razak , "*Numerical Analysis in Spherical Human Head at Different Frequencies of EM Wave Propagation*", IEEE, 2018
- [6] Kun Li, Kensuke Sasaki and Soichi Watanabe, "*EMF exposure from 5G equipment at millimeter wave frequencies*", IEEE, 2018
- [7] Faith Kaburcuk, Atef Z. Elsherbeni, "*Smart Glasses Radiation Effects on a Human Head Model at WI-Fi and 5G Cellular Frequencies*", IEEE, 2018
- [8] Ευθύμιος Καραμπέτσος, "Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Νομοθετικό πλαίσιο, Όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού, Αποτελέσματα ελέγχων." 2005
- [9] www.emfexplained.info/?ID=25914
- [10] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (www.eeae.gr)
- [11] Μανίκας Μάριος, "*Μελέτη και Πειραματικός Προσδιορισμός των Επιπέδων Μη-Ιονίζουσας Ακτινοβολίας (100Khz - 3Ghz) σε Διάφορες Γεωγραφικές Περιοχές*", Διπλωματική Εργασία, 2011
- [12] https://m-learning-edu.blogspot.com/2017/07/blog-post_6.html?m=1
- [13] Ακτινοβολία. Ανακτήθηκε 27 Μαΐου 2019 από Wiki (<https://el.wikipedia.org/wiki/Ακτινοβολία>)
- [14] www.kathimetinifysiki.gr
- [15] Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα. Ανακτήθηκε 3 Ιουνίου 2019 από Wiki (https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρομαγνητικό_φάσμα)
- [16] www.physiclessons.blogspot.com
- [17] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων (www.eett.gr)

- [18] Ειδικός ρυθμός απορρόφησης. Ανακτήθηκε 5 Ιουνίου 2019 από Wiki (https://el.wikipedia.org/wiki/Ειδικός_ρυθμός_απορρόφησης)
- [19] Μαρίνος Γ. Μεταξάς, *"Μονάδες Έκθεσης Ακτινοβολίας και Δοσιμετρία"*, ΠΒΕΑΑ, 2017
- [20] www.pcsteps.gr
- [21] Φίλιππος Κωνσταντίνου, *"Μετρήσεις Έντασης Ακτινοβολίας από Κεραίες Κινητής Τηλεφωνίας"*, 2011
- [22] Χρήστος Λ. Βοζίκης, *"Φυσική II"*, 2008
- [23] International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)
- [24] Ιωάννης Ν. Ζτούπης, *"Μέτρηση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου Χαμηλής Συχνότητας"*, Διπλωματική εργασία, 2009
- [25] Εθνικό Παρατηρητήριο Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων (www.paratiritirioemf.eeae.gr)
- [26] www.lyk-esp-ampel.thess.sch.gr
- [27] www.hermes.physics.auth.gr
- [28] www.pedion24.gr
- [29] www.home-biology.gr
- [30] www.epixeiro.gr
- [31] Επίπεδο Κύμα. Ανακτήθηκε 10 Ιουνίου 2019 από Science Wiki (https://science.fantom.com/el/wiki/Επίπεδο_Κύμα)
- [32] www.rfpage.com
- [33] www.pasrema-skafos.gr
- [34] Νικόλας Άλμπερτ, *"Σχεδίαση και Ανάλυση της Λογαριθμικής Περιοδικής Κεραίας"*, Διπλωματική εργασία, 2010
- [35] Δουλγέρογλου Σ. Ελένη, Παπαευαγγέλου Α. Αποστολία, *"Ανάλυση Διατάξεων Γραμμών Μεταφοράς σε Ολοκληρωμένα Κυκλώματα με την FDTD και Μειωμένη Ταχύτητα Φωτός"*, Διπλωματική εργασία, 2006
- [36] Αθανασίου Ν. Παπαδημόπουλου, *"Η Στοχαστική Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου"*, Διπλωματική εργασία, 2013
- [37] www.repository.kallipos.gr
- [38] www.ceid.upatras.gr
- [39] Αντωνία Χ. Τερζίδου, *"Προσομοιωτική Μελέτη Επίδρασης Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στους Ανθρώπινους Βιολογικούς Ιστούς"*, Διπλωματική εργασία, 2015

[40] Ολυμπία Καραδήμα, *"Προσομοιωτική Εκτίμηση της Ανθρώπινης Έκθεσης σε Πηγές Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας σε Διαφορετικές Συχνότητες Λειτουργίας"*, Διπλωματική εργασία, 2017

[41] Allen Taflove, *"Advances in Computational Electrodynamics. The Finite - Difference Time - Domain Method"*, 1998