



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΘΕΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ:
ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΔΥΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
(900/1800 MHz)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασπασία Γ. Πετρή

Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΘΕΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ:
ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΔΥΟ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
(900/1800 MHz)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασπασία Γ. Πετρή

Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Νοεμβρίου 2004.

.....
Κ. Νικήτα
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2004

.....
Ασπασία Γ. Πετρή

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

Copyright © Ασπασία Γ. Πετρή, 2004.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική διατριβή μελετά την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων και βιολογικών ιστών που εκτίθενται στο πεδίο της ακτινοβολίας. Η εργασία εστιάζει στην εκτίμηση των επιπέδων έκθεσης των ανθρώπων στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συσκευών κινητής τηλεφωνίας.

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρονται οι βασικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ραδιοσυχνοτήτων και βιολογικών ιστών, καθώς επίσης και τα όρια ασφαλούς έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι κυριότερες επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε βιολογικά αντικείμενα και παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραματικής δοσιμετρίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης βιολογικών αντικειμένων διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας.

Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στην μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων σε βιολογικούς ιστούς.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης κεφαλιού ενήλικα άνδρα και τερματικής συσκευής κινητού τηλεφώνου και εκτιμάται η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος στο κεφάλι.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης κεφαλιού ενήλικα άνδρα και τερματικής συσκευής κινητού τηλεφώνου εξοπλισμένης με dual-band κεραία και εκτιμάται η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος στο κεφάλι.

Λέξεις κλειδιά:

Ηλεκτρομαγνητικά πεδία, βιολογικές επιδράσεις, FDTD, μοντέλα βιολογικών ιστών, dual-band κεραία

Abstract

The subject of the present diploma thesis is the study of the interaction between the radiofrequency electromagnetic irradiation and the biological tissues. The main objective of the diploma thesis is the evaluation of the public exposure levels to the near electromagnetic field irradiated by mobile terminals.

Chapter 1 presents the basic mechanisms of the interaction between the RF electromagnetic fields and biological tissues, as well as the safety exposure limits and guidelines.

Chapter 2 analyses the main biological effects of the electromagnetic irradiation and presents experimental dosimetry results.

Chapter 3 presents computational simulation methods of biological objects which are characterized by various complexity levels.

Chapter 4 refers to the Finite Difference Time Domain (FDTD) method for the resolution of the interaction between EMF and biological tissues.

Chapter 5 presents the simulation of the interaction between an adult head model and a mobile terminal equipped with a dual-band antenna. The result is the evaluation of the absorbed electromagnetic power by the head model.

Key Words:

Electromagnetic fields, biological effects, FDTD, models of biological tissues, dual-band antenna

Στους γονείς μου

Περιεχόμενα

Πρόλογος		9
Κεφάλαιο 1	Συστήματα κινητών επικοινωνιών και Θέματα ασφάλειας	11
1.1	Εισαγωγή	11
1.2	Το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων	11
1.3	Τεχνολογία και συχνότητες λειτουργίας των κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων	12
1.3.1	FDMA	13
1.3.2	TDMA	13
1.3.3	CDMA	13
1.4	Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – βιολογικών υλικών	14
1.4.1	Θερμικές επιδράσεις	16
1.4.2	Μη – θερμικές επιδράσεις	17
1.5	Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης, SAR	17
1.6	Όρια ασφαλούς έκθεσης	18
1.7	Δοσιμετρία	19
1.7.1	Μελέτη βιολογικών επιδράσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	22
1.7.2	Συστήματα έκθεσης βιολογικών συστημάτων	23
1.7.2.1	Εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητικά Κελιά, TEM	23
1.7.2.2	Ακτινικές Γραμμές Μετάδοσης, RTL	24
1.8	Επιδημιολογικές μελέτες	24
1.8.1	Επιδημιολογικές μελέτες σε υγιείς ανθρώπους	24
1.8.2	Επιδημιολογικές μελέτες σε καρκινοπαθείς	25
1.8.3	Επιδημιολογικές μελέτες για διάφορες άλλες επιδράσεις, εκτός καρκίνου	26
1.8.4	Επιδημιολογικές μελέτες σε στρατιωτικές βάσεις	26
1.8.5	Επιδημιολογικές μελέτες σε παιδιά	27
Αναφορές – Βιβλιογραφία		28
Κεφάλαιο 2	Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων σε βιολογικά συστήματα	30
2.1	Εισαγωγή	30

2.1.1	Καρκινογένεση	31
2.1.2	Επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα	32
2.2	Επιδράσεις στο DNA	32
2.3	Απόπτωση	36
2.4	Επιδράσεις στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων	37
2.5	Επιδράσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα	38
2.6	Επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα	38
2.7	Επιδράσεις στη συμπεριφορά	41
2.7.1	Μελέτες σε ανθρώπους	41
2.7.2	Μελέτες σε πειραματόζωα	48
2.8	Συμπεράσματα	50
Αναφορές – Βιβλιογραφία		54
Κεφάλαιο 3	Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης για τη μελέτη βιολογικών επιδράσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	56
3.1	Εισαγωγή	56
3.2	Μοντελοποίηση σε βιοφυσικό επίπεδο	57
3.2.1	Μοντέλα μετακίνησης ιόντων	57
3.2.2	Μοντέλα διόδου πρωτεϊνών	57
3.3	Μοντελοποίηση στο επίπεδο των πρωτεϊνών	59
3.4	Μοντελοποίηση της κυτταρικής μεμβράνης	60
3.5	Μοντελοποίηση βιολογικών ιστών	65
3.5.1	Μέθοδος ισοδύναμου κυκλώματος	66
3.6	Συμπεράσματα	69
Αναφορές – Βιβλιογραφία		70
Κεφάλαιο 4	Η υπολογιστική μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών Προβλημάτων	71
4.1	Εισαγωγή	71
4.2	Βασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού – Εξισώσεις Maxwell	71
4.3	Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου, FDTD	73

4.3.1	Περιγραφή των εξισώσεων του Maxwell με την μέθοδο FDTD	74
4.3.2	Αριθμητική ευστάθεια της FDTD	77
4.4	Οριακές συνθήκες απορρόφησης	78
4.5	Διαμόρφωση με την FDTD	78
4.6	Συμπεράσματα	79
Αναφορές – Βιβλιογραφία		80
Κεφάλαιο 5	Υπολογισμός του SAR σε ένα ανατομικό, ρεαλιστικό μοντέλο κεφαλιού για dual band συσκευή κινητού τηλεφώνου	81
5.1	Προσομοίωση με το πρόγραμμα XFDTD	81
5.1.1	Μοντελοποίηση κινητού τηλεφώνου	82
5.1.2	Μοντελοποίηση dual band ελικοειδούς μονοπόλου	84
5.1.3	Μοντελοποίηση dual band ελικοειδούς διπόλου	85
5.1.4	Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού	86
5.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	88
I.	Dual Band ελικοειδές μονόπολο	88
II.	Dual band ελικοειδές δίπολο	98
III.	Dual band ελικοειδές δίπολο που ακουμπά στο αυτί	102
IV.	Σύγκριση αποτελεσμάτων	106
5.3	Συμπεράσματα	107
Αναφορές – Βιβλιογραφία.		109
Ανακεφαλαίωση		110
Υπότιτλοι Εικόνων		111
Υπέρτιτλοι Πινάκων		114

Πρόλογος

Η έξαρση των τηλεπικοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες έχει αυξήσει την χρήση των κινητών φορητών τηλεφώνων καθώς και τους σταθμούς βάσης των κεραιών κινητής τηλεφωνίας. Οι σταθμοί συχνά βρίσκονται σε κατοικημένες περιοχές (π.χ. κοντά σε σπίτια και σχολεία), ενώ τα κινητά τηλέφωνα όταν χρησιμοποιούνται βρίσκονται πολύ κοντά στο κεφάλι του χρήστη και σημαντικό μέρος της ακτινοβολούμενης ισχύος της κεραίας απορροφάται από το κεφάλι του χρήστη. Είναι αναμενόμενο λοιπόν, η έκθεση του πληθυσμού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τόσο των σταθμών βάσης όσο και των κινητών τηλεφώνων να έχει προβληματίσει κοινή γνώμη και επιστημονική κοινότητα για τις επιδράσεις της ακτινοβολίας στην υγεία των ανθρώπων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα με βιολογικά αντικείμενα διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα και αναλύεται ο τρόπος αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων και των βιολογικών ιστών. Ακόμα αναφέρονται οι συνθήκες ασφαλούς έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχουν καθοριστεί με συγκεκριμένα μεγέθη το κυριότερο από τα οποία είναι ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης. Παρουσιάζονται τέλος, κάποιες επιδημιολογικές μελέτες των επιπτώσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων σε ανθρώπους.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι βλαβερές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό και παρουσιάζονται πειραματικές έρευνες των επιδράσεων της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων σε βιολογικά αντικείμενα. Οι επιδράσεις αυτές κυρίως αφορούν την εμφάνιση φαινομένων καρκινογένεσης και μεταβολές στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα. Ακόμα αναφέρονται επιδράσεις που σχετίζονται με την συμπεριφορά των ανθρώπων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τρόποι μοντελοποίησης βιολογικών αντικειμένων διαφόρων επιπέδων πολυπλοκότητας. Τα μοντέλα αυτά να χρησιμοποιούνται στην υπολογιστική δοσιμετρία για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των βιολογικών αντικειμένων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων σε βιολογικούς ιστούς. Η μέθοδος προσφέρει έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο επίλυσης στο πεδίο του χώρου και στο πεδίο του χρόνου των συζευγμένων εξισώσεων στροβιλισμού του Maxwell ταυτόχρονα για το ηλεκτρικό και για το μαγνητικό πεδίο.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής για την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τερματικής συσκευής κινητού τηλεφώνου και του κεφαλιού του χρήστη. Χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά δυο κεραίες, ένα dual band ελικοειδές μονόπολο και ένα dual band ελικοειδές δίπολο, και προσομοιώθηκε η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας τους με το αριθμητικό μοντέλο του κεφαλιού ενός άνδρα. Τα αποτελέσματα που παράγονται είναι η μέγιστη μέση τιμή του SAR και η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του κεφαλιού.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά την επιβλέπουσα Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Κωνσταντίνα Νικήτα για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής διατριβής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σταύρο Κουλουριδίδη για την αδιάκοπη και ουσιαστική επίβλεψη, καθοδήγηση και ηθική στήριξη καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου για τη συνεργασία και τη βοήθεια που μου παρείχαν απλόχερα και με διευκόλυναν στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και την υποστήριξη τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη δικιά τους συμπαράσταση και αγάπη δεν είχα καταφέρει να αντιμετωπίσω τις δύσκολες στιγμές που προέκυψαν όλα αυτά τα χρόνια.

Την ολοκλήρωση της διπλωματικής διατριβής και την απόκτηση πλέον του πτυχίου θα ήθελα να μοιραστώ με τον αδερφό μου το Σταύρο· θα έπαιρνε και αυτός το πτυχίο του τις μέρες αυτές ...

Κεφάλαιο 1

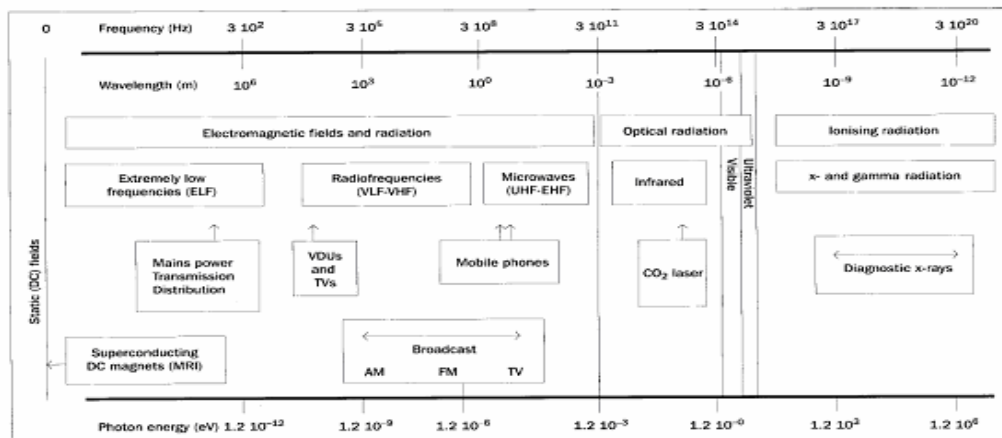
Συστήματα κινητών επικοινωνιών και Θέματα ασφαλείας

1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια οι κινητές τηλεπικοινωνίες έχουν εξελιχθεί αλματωδώς. Πέρα από μια απλή τηλεφωνική συνδιάλεξη παρέχουν πλέον πληθώρα ελκυστικών υπηρεσιών (π.χ. αποστολή και λήψη γραπτών μηνυμάτων, εικόνων και video, πρόσβαση στο διαδίκτυο), καθιστώντας τες δημοφιλείς σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού σε όλη την υφήλιο. Εκτιμάται ότι στο εγγύς μέλλον ο αριθμός των κινητών τηλεφώνων θα ξεπεράσει τον αριθμό των σταθερών. Έτσι λοιπόν, ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού παγκόσμια θα περιβάλλεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των κινητών τηλεφώνων. Είναι πλέον κατανοητές και αποδεκτές οι εκπεφρασμένες ανησυχίες για τις πιθανές επιβλαβείς συνέπειες, στον ανθρώπινο οργανισμό, της χρήσης των κινητών τηλεφώνων. Εκτεταμένες έρευνες, που περιλαμβάνουν επιδημιολογικές, βιολογικές και ιατρικές μελέτες, διεξάγονται από διάφορους φορείς σε όλο τον κόσμο για να εκτιμηθεί η ασφάλεια της έκθεσης του ανθρώπου στο πεδίο του κινητού.

1.2 Το φάσμα των ραδιοσυχνότητων

Τα κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες (RadioFrequencies, RF). Με τον όρο ραδιοσυχνότητες χαρακτηρίζονται οι συχνότητες που βρίσκονται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 10 kHz έως 300 GHz. Ειδικότερα το τμήμα από 300 MHz έως 300 GHz καλείται μικροκύματα (**m**icrowaves, MW), ενώ για την περιοχή από 30 GHz έως 300 GHz χρησιμοποιείται και ο όρος χιλιοστομετρικά κύματα. Στο φάσμα η RF περιοχή βρίσκεται ανάμεσα στο ορατό φως και στα πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (**E**xtrêmement **L**ow Frequency, ELF, όπως είναι αυτά που παράγονται από γραμμές υψηλής τάσης). Οι περιοχές αυτές απεικονίζονται στο σχήμα της εικόνας 1.1 [1].



εικόνα 1.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

1.3 Τεχνολογία και συχνότητες λειτουργίας των κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Θεωρούμε ότι το σήμα που εκπέμπεται από την κεραία ενός κινητού τηλεφώνου έχει τη βασική μορφή ενός τηλεπικοινωνιακού σήματος [2]

$$c(t) = a(t) \cos(\theta(t)) \quad (1).$$

το σήμα αυτό ονομάζεται φέρον. Οι συναρτήσεις $a(t)$ και $\theta(t)$ είναι, αντίστοιχα, το πλάτος και η γωνία του φέροντος και είναι δυνατό να μεταβάλλονται από ένα σήμα πληροφορίας $f(t)$. Η γωνία του φέροντος πιο αναλυτικά είναι:

$$\theta(t) = \omega_c t + \psi \quad (2).$$

με ω_c η φέρουσα συχνότητα και ψ η τυχαία φάση του τοπικού ταλαντωτή του δέκτη (συνήθως θεωρείται $\psi = 0$, για απλοποίηση των εκφράσεων).

Σε Hz η φέρουσα συχνότητα προκύπτει από τη σχέση $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$ (3).

Η χρήση των συχνοτήτων αυτών καθορίζεται από διεθνείς συμφωνίες και κάθε συχνότητα χρησιμοποιείται από συγκεκριμένο φορέα για καθορισμένο σκοπό. Για παράδειγμα τα συστήματα τηλεπικοινωνιών σήμερα χρησιμοποιούν συχνότητες στην περιοχή των 900 MHz και στην περιοχή 1800 – 1900 MHz.

Σημαντική παράμετρος στη μελέτη του τηλεπικοινωνιακού σήματος είναι η ισχύς του, η οποία προκύπτει από την εξίσωση του σήματος:

$$|c(t)|^2 = a^2(t) \cos^2(\omega_c t + \psi) \quad (4).$$

$$P(t) \cong \frac{1}{2} a^2(t) \quad (5).$$

και είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους.

Συνήθως οι διαμορφώσεις του σήματος γίνονται με συνεχή μεγέθη, ώστε και η ισχύς $P(t)$ να είναι συνεχής (για παράδειγμα στα σήματα με διαμόρφωση συχνότητας, (frequency modulation, FM)). Στις κινητές επικοινωνίες για πολλούς χρήστες, τα πρωτόκολλα διαμόρφωσης των σημάτων διαφοροποιούνται και στην ισχύ. Αυτές οι διαφοροποιήσεις εξαρτώνται από δύο, κυρίως, παραμέτρους του συστήματος. Πρώτον, από το πόσοι χρήστες μοιράζονται το ίδιο φάσμα στον ίδιο χρόνο, και δεύτερον από την ισχύ που διαθέτει.

Οι τρεις τεχνικές πρόσβασης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος που περιγράφονται στη συνέχεια έχουν διαμορφωθεί ανάλογα με την ισχύ που διαθέτουν για να καλύψουν τις ανάγκες του σε χωρητικότητα, εξοικονομώντας ταυτόχρονα την ισχύ μετάδοσης. Έτσι διαφοροποιείται η μια τεχνική από την άλλη [3].

1.3.1 FDMA

Τα πρώτα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα χρησιμοποιούσαν αναλογικά πρωτόκολλα μετάδοσης. Με την τεχνική της Πολλαπλής Προσπέλασης με Διαίρεση Συχνότητας (**F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess, **FDMA**) η συχνότητα του σήματος ομιλίας διαμορφώνει ένα συνεχές φέρον και σε κάθε χρήστη ανατίθεται μια καθορισμένη φέρουσα συχνότητα και το απαραίτητο εύρος για όσο χρόνο διαρκεί η σύνδεση. Η ισχύς είναι μια συνεχής συνάρτηση του χρόνου, έτσι το φάσμα της ισχύος έχει τιμή μόνο στη συχνότητα μηδέν. Στις Η.Π.Α., τα συστήματα αυτά, εκτός από το φάσμα των συχνοτήτων 824 – 894 MHz (ειδικότερα 824 – 849 MHz για τα κινητά και 869 – 894 MHz για τους σταθμούς βάσης) που λειτουργούσαν, πλέον λειτουργούν και στα 1900 MHz.

1.3.2 TDMA

Στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας (1990) τα συστήματα άγγιζαν τα όρια των δυνατοτήτων τους. Αυτό οδήγησε στην εισαγωγή νέων υπηρεσιών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και στην χρήση ψηφιακών τεχνικών όπως η τεχνολογία της Πολλαπλής Προσπέλασης με Διαίρεση Χρόνου (**T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess, **TDMA**) καθώς και υβριδικών τεχνικών **FDMA/TDMA**, που λειτουργούν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων με τα αναλογικά. Ο κάθε χρήστης που εξυπηρετείται από το σύστημα επιτρέπεται να εκπέμπει μόνος του για κάποιο περιορισμένο χρονικό διάστημα που επαναλαμβάνεται περιοδικά. Το σύστημα διαθέτει το ίδιο φέρον και εύρος σε πολλούς χρήστες, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το φέρον είναι στα 217Hz και η διάρκεια έκκρισης του παλμού μετάδοσης είναι 577μs. Η τεχνική αυτή εμπλέκει ηλεκτρομαγνητικά πεδία από την περιοχή των RF αλλά και των ELF συχνοτήτων και κυριαρχεί στην Ευρώπη όπου εφαρμόζεται στα **D**igital **E**uropean **C**ordless **T**elecommunication (**DECT**), **T**rans **E**uropean **T**runked **R**adio (**TETRA**), **D**igital personal **C**ommunication **S**ystem (**DCS 1800**) καθώς και στο **G**lobal **S**ystem for **M**obile communications (**GSM**). Τα κινητά τηλέφωνα **TDMA** λειτουργούν σε δύο βασικές ζώνες συχνοτήτων, στα 800/900 MHz και τα 1800/1900 MHz [4].

1.3.3 CDMA

Τα συστήματα τρίτης γενιάς, στα οποία ανήκει το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (**U**niversal **M**obile **T**elecommunication **S**ystem, **UMTS**), χρησιμοποιούν την τεχνολογία της Πολλαπλής Προσπέλασης με Διαίρεση Κώδικα (**C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess, **CDMA**). Με την τεχνολογία αυτή αποκωδικοποιούνται τα σήματα που φτάνουν ταυτόχρονα και στην ίδια συχνότητα στον δέκτη. Κάθε σήμα διανέμεται σε πολλές συχνότητες με μια ειδική μορφή κωδικοποίησης. Τα κινητά τηλέφωνα **CDMA** μεταδίδουν συνήθως γύρω στα 800 MHz (824 - 894 MHz) [4].

Τελευταία αναπτύσσεται το Σύστημα Προσωπικών Επικοινωνιών (**P**ersonal **C**ommunication **S**ystem, **PCS**) το οποίο λειτουργεί στα 1850 – 1990 MHz και χρησιμοποιεί **TDMA** και **CDMA**. Τα συστήματα **PCS** λειτουργούν σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος σε σχέση με τα αναλογικά.

1.4 Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – βιολογικών υλικών

Τα κινητά τηλέφωνα εκπέμπουν RF ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή ανήκει στην μη – ιοντίζουσα περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπου η κβαντική ενέργεια δεν είναι ικανή να διασπάσει μοριακούς δεσμούς ή να προκαλέσει ιονισμό στα βιολογικά υλικά. Ιοντίζουσα χαρακτηρίζεται η ακτινοβολία που βρίσκεται σε συχνότητες μεγαλύτερες από $8 \cdot 10^{14}$ Hz (ακτίνες X, ακτίνες γ, κ.λ.π.), καθώς η κβαντική ενέργεια σε αυτή την περιοχή είναι ικανή να προκαλέσει σε ένα βιολογικό υλικό καταστροφή της ενδομοριακής δομής, διάσπαση διαμοριακών δεσμών και πρόκληση καρκινογενετικών φαινομένων.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλληλεπιδρούν με τους βιολογικούς ιστούς καθώς διαδίδονται μέσα σε αυτούς, απορροφούνται από αυτούς και ανακλώνται σε διαχωριστικές επιφάνειες ιστών. Στις συχνότητες των ραδιοκυμάτων το ηλεκτρικό πεδίο είναι αυτό που κυριαρχεί στις αλληλεπιδράσεις καθώς τα βιολογικά υλικά έχουν ηλεκτρικές ιδιότητες και η διηλεκτρική αλληλεπίδρασή τους με το πεδίο οδηγεί σε πόλωση των μορίων και σε προσανατολισμό των διπόλων τους. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου στα βιολογικά υλικά πρακτικά αμελείται, καθώς ελάχιστα βιολογικά υλικά έχουν μαγνητικές ιδιότητες (όπως για παράδειγμα οι φερομαγνητικοί κρύσταλλοι που έχουν βρεθεί σε ορισμένα βακτήρια) και η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων με τα υλικά αυτά γίνεται με μεγάλη σταθερά χρόνου. Λαμβάνεται ωστόσο υπόψη μόνο σε μελέτες που αφορούν τα πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (ELF).

Οι αλληλεπιδράσεις των ραδιοκυμάτων με τους βιολογικούς ιστούς καθορίζονται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών, δηλαδή την αγωγιμότητα, σ (Si/m), και τη διηλεκτρική σταθερά, ϵ_r . Τα χαρακτηριστικά αυτά σχετίζονται έντονα με την περιεκτικότητα των ιστών σε νερό αλλά και με τη συχνότητα της πηγής του εξωτερικά επιβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Τα μόρια του νερού εμφανίζονται ως ηλεκτρικά δίπολα, και σύμφωνα με τη θεωρία αλληλεπίδρασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλών συχνοτήτων με τους βιολογικούς ιστούς, η παρουσία του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου είναι ικανή να προκαλέσει ταλάντωση των μορίων του νερού αυξάνοντας την κινητική τους ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό, μεταφέρεται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ενέργεια στους βιολογικούς ιστούς, ικανή να αυξήσει τη θερμοκρασία του βιολογικού ιστού. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων τύπων ιστών έχουν δημοσιευθεί [5] – [7] για αρκετές συχνότητες και θερμοκρασίες.

Η σχετική διηλεκτρική επιτρεπτότητα που δίνεται από την σχέση [8]

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 + j \frac{\sigma}{\omega} \quad (6).$$

όπου

$\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12}$ f/m η διηλεκτρική σταθερά του κενού και

ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά, η οποία αποτελεί το μέτρο της ικανότητας του

βιολογικού μέσου να αποθηκεύσει ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου, και ο όρος $\frac{\sigma}{\omega}$

εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται από το βιολογικό μέσο ανά Hertz.

Ένα ακόμα μέγεθος που χρησιμοποιείται στη μελέτη των αλληλεπιδράσεων είναι το βάθος διείσδυσης, δ , και ορίζεται ως η απόσταση από το σημείο εισόδου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον βιολογικό ιστό έως το σημείο στο οποίο η ένταση του πεδίου έχει μειωθεί στο $1/e$ την έντασης εισόδου στον ιστό. Όταν το πεδίο προσπίπτει στον ιστό ως επίπεδο κύμα το βάθος διείσδυσης δίνεται από τη σχέση [8] :

$$\delta = \frac{1}{\omega} \left[\left(\frac{\mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0}{2} \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (7).$$

Το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο στις χαμηλές RF συχνότητες, ενώ μειώνεται καθώς προχωράμε προς τις συχνότητες των χιλιοστομετρικών κυμάτων. Το βάθος διείσδυσης καθορίζει πόση ενέργεια φτάνει βαθιά μέσα στο σώμα του ιστού, ενώ εξαρτάται από τη συχνότητα και την πόλωση της ακτινοβολίας της πηγής του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου.

Η αλληλεπίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με έναν βιολογικό ιστό εξαρτάται [9]:

- ▶ από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας
συχνότητα
ένταση
πόλωση
- ▶ από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βιολογικού αντικειμένου (σχήμα, μέγεθος) και την εσωτερική δομή του. Η ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα βιολογικό αντικείμενο εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των ιστών.
- ▶ Από την απόσταση της πηγής του εξωτερικού πεδίου και του βιολογικού αντικειμένου (κοντινό ή μακρινό πεδίο), και από τις ιδιότητες του περιβάλλοντα χώρου. Αν η απόσταση είναι μικρή ή συγκρίσιμη με το μήκος κύματος και τις διαστάσεις της πηγής (δηλαδή μικρότερη από $2D^2/\lambda$, με D η διάσταση της πηγής και λ το μήκος κύματος), το βιολογικό αντικείμενο υφίσταται την ισχυρή επίδραση του κοντινού πεδίου της πηγής. Ακόμα η παρουσία αγωγικών υλικών κοντά στο ανθρώπινο σώμα επηρεάζει την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Οι επιδράσεις, ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλούν στο βιολογικό σύστημα, διακρίνονται σε θερμικές και σε μη – θερμικές.

1.4.1 Θερμικές επιδράσεις

Όταν η θερμοκρασία του συστήματος αυξάνεται περισσότερο από 0.1 °C, η επίδραση χαρακτηρίζεται θερμική. Στην περίπτωση αυτή τα μεγέθη που εμπλέκονται στην αλληλεπίδραση πεδίου-ιστού είναι η θερμική χωρητικότητα, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του βιολογικού ιστού. Η ανάλυση των επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα βιολογικά συστήματα μελετά τα φυσιο-παθολογικά φαινόμενα που μεταβάλλουν τις φυσιολογικές τιμές των παραπάνω μεγεθών. Η παρουσία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αυξάνει την κινητική ενέργεια των μορίων του νερού με συνέπεια τη μεταφορά ενέργειας στους ιστούς, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας είτε μόνο του ιστού, είτε ολόκληρου του βιολογικού συστήματος.

Η μελέτη των θερμικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του ανθρώπινου κεφαλιού αντιμετωπίζει δυο προβλήματα [10]. Το πρώτο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της πιθανής κατανομής της θερμότητας, ενώ το δεύτερο είναι να υπολογιστεί το πότε σταματά η αύξηση της θερμοκρασίας και σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή. Για να λυθεί το πρώτο πρόβλημα, αρχικά προσδιορίζεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα τριοδιάστατο μοντέλο κεφαλιού, λύνοντας τις διαφορικές εξισώσεις του Maxwell

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E}$$

(8).

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\nabla \times \vec{H} - \sigma \vec{E} \right)$$

Μετά τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμότητας, η σταθερή κατάσταση της θερμοκρασίας λαμβάνεται λύνοντας την βιοθερμική εξίσωση του Pennes [10]

$$\rho_t c_t \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_p + Q_m - V_s (T - T_b)$$

(9).

όπου

T είναι η θερμοκρασία του ιστού, (K)

t ο χρόνος, (sec)

k η θερμική αγωγιμότητα, (W/mK)

Q_p η απορροφώμενη ισχύς ανά μονάδα όγκου ιστού, (W/m³)

Q_m η ισχύς που παράγεται από το μεταβολισμό ανά μονάδα όγκου ιστού, (W/m³)

V_s ο ρυθμός διάχυσης του αίματος, (W/m³K)

T_b η θερμοκρασία του αρτηριακού αίματος που εισέρχεται στον όγκο, (K)

ρ_t η πυκνότητα του ιστού, (kg/m³)

c_t η ειδική θερμότητα του ιστού, (J/kgK)

Οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύουν τον ρυθμό αλλαγής της αποθηκευμένης εσωτερικής ενέργειας του ιστού. Ο όρος $k\nabla^2 T$ περιγράφει τη μεταφορά της θερμότητας μέσω θερμικής αγωγής, ενώ οι επόμενοι δυο όροι αφορούν την πυκνότητα της εναποτιθέμενης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Ο όρος $V_s(T - T_b)$ περιγράφει την απαγωγή της θερμότητας λόγω της ροής του αίματος. Το αίμα, που εισέρχεται στον υπό εξέταση όγκο με κάποια αρτηριακή θερμοκρασία, καθώς εξέρχεται από τον όγκο μεταφέρει θερμική ενέργεια και συμπεριφέρεται ως παραγωγός ενέργειας όταν $T_b < T$.

1.4.2 Μη – θερμικές επιδράσεις

Ως μη-θερμικές χαρακτηρίζονται οι επιδράσεις όταν η θερμοκρασία του βιολογικού αντικειμένου δεν αυξάνεται περισσότερο από 0.1 °C. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην περίπτωση αυτή αλληλεπιδρά κυρίως με την κυτταρική μεμβράνη και αυξάνει την διηλεκτρική διαπερατότητά της μεταβάλλοντας τη δραστηριότητα συγκεκριμένων ενζύμων, αυξάνοντας την εκροή ιόντων ασβεστίου καθώς και τη διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού (Blood Brain Barrier, BBB).

Οι μη – θερμικές επιδράσεις προβληματίζουν περισσότερο την επιστημονική κοινότητα καθώς σχετίζονται με επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που υπάρχουν στην καθημερινή πραγματικότητα. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη των μη – θερμικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε βιολογικά αντικείμενα, και παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

1.5 Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης, SAR

Η εγγύτητα του κινητού τηλεφώνου στο κεφάλι του χρήστη σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση RF ακτινοβολίας και βιολογικών ιστών έχει προκαλέσει σοβαρό προβληματισμό στην κοινή γνώμη αλλά και στην επιστημονική κοινότητα σχετικά με την ασφάλεια της έκθεσης τόσων εκατομμυρίων ανθρώπων στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του προσωπικού τους κινητού τηλεφώνου. Προέκυψε η ανάγκη να θεσπιστούν από τις κυβερνήσεις των κρατών αλλά και από τους διεθνείς οργανισμούς, όρια ασφαλούς έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Κρίθηκε αναγκαίο να προσδιοριστεί η ασφαλής για τον άνθρωπο ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το κινητό. Η ένταση αυτή μετράται στον ελεύθερο χώρο σε μονάδες W/m^2 . Ωστόσο δεν περιέχει πληροφορίες για τις βιολογικές συνέπειες που προκαλεί η απορρόφησή της από τον οργανισμό. Έτσι ορίστηκε ένα καινούργιο μέγεθος, το οποίο βασίστηκε στα θερμικά αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, για να περιγράψει την ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον ανθρώπινο οργανισμό. Το μέγεθος αυτό είναι ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (**Specific Absorption Rate, SAR**), και ορίζεται ως η απορροφώμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά μονάδα μάζας σώματος, (W/kg) [8]:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (10).$$

ενώ σε σχέση με το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από την [11]

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} |E|^2 \quad (11).$$

όπου E είναι η ένταση της ηλεκτρικής ενέργειας (V/m),

σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του βιολογικού ιστού (S/m) και

ρ η πυκνότητα μάζας του βιολογικού ιστού (kg/m^3)

Αν και ο SAR είναι ένα μέγεθος που αφορά το ηλεκτρικό πεδίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί ο τοπικός ρυθμός μεταβολής της θερμοότητας, $\frac{dT}{dt}$, $^{\circ}\text{C/sec}$ [8]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c} \quad (12).$$

όπου c η ειδική θερμοχωρητικότητα του ιστού σε $\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$.

Υποτίθεται ότι οι θερμοδυναμικές συνθήκες είναι ιδανικές, δηλαδή δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας λόγω της θερμικής διάχυσης ή της ροής του αίματος. Έτσι, SAR 1 W/kg, σχετίζεται με ρυθμό θερμότητας μικρότερο από $0.0003 ^{\circ}\text{C}$, σε μυϊκό ιστό ($c=3.5 \text{ kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$). Αυτός ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι εξαιρετικά μικρός καθώς ακόμα και χωρίς την παρουσία αίματος ή άλλου ψυκτικού μηχανισμού, θα χρειαζόταν περισσότερο από μια ώρα για να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά έναν βαθμό Κελσίου.

Ο SAR είναι το κύριο εργαλείο στον σχεδιασμό και στην ανάλυση πειραμάτων, τόσο *in vivo* όσο και *in vitro*. Ακόμα είναι ο παράγοντας βάση του οποίου καθορίζονται παγκοσμίως τα όρια ασφαλούς έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός κινητού τηλεφώνου.

1.6 Όρια ασφαλούς έκθεσης

Χρησιμοποιώντας πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους, εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί καθόρισαν πρότυπα ορίων ασφαλούς έκθεσης στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα όρια αυτά διαφέρουν από πρότυπο σε πρότυπο, ανάλογα με τις παραμέτρους και τις παραδοχές που υιοθετεί ο κάθε οργανισμός στους υπολογισμούς του. Στην Ευρώπη οι υπολογισμοί γίνονται σε 10 g ιστού και σε διάρκεια έκθεσης 6 min, ενώ στις Η.Π.Α. σε 1 g ιστού, με διάρκεια έκθεσης 30 min. Εξαιτίας της ανομοιογενούς διάχυσης της ενέργειας ο SAR εξαρτάται από το βιολογικό σύστημα που γίνεται ο κάθε υπολογισμός. Αυτές οι διαφορές έχουν σημασία καθώς δεν μπορούν να ενοποιηθούν όλα τα πρότυπα σε ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο. Έτσι, στις Η.Π.Α., η Ομοσπονδιακή Επιτροπή για τις Τηλεπικοινωνίες (**Federal Communications Commission, FCC**) έχει καθορίσει το όριο ασφαλείας για τον τοπικό SAR ανά γραμμάριο κάθε εγκεφαλικού ιστού στα 1.6 W/kg για τον γενικό πληθυσμό, ενώ για την επαγγελματική έκθεση όριο ασφαλείας είναι τα 8.0 W/kg [12]. Το επιτρεπόμενο όριο από την Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από την Μη-Ιοντίζουσα Ακτινοβολία (**International Commission on**

Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), που υιοθετείται από την Ευρώπη και την Ιαπωνία, είναι 2 W/kg ανά 10 g για τον γενικό πληθυσμό [13].

Η γνώση της τιμής του SAR σε όλο το ανθρώπινο σώμα είναι σημαντική για να εκτιμηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος. Πειραματικές μελέτες υπέδειξαν ότι η θερμοκρασία του σώματος αυξάνεται σημαντικά όταν η μέση τιμή του SAR στο σώμα είναι πάνω από 4 W/kg [14]. Λαμβάνοντας υπόψη και τους θερμορρυθμιστικούς παράγοντες, καθορίστηκε ακόμα ένα όριο ασφαλείας όπου η ανώτερη μέση τιμή του SAR σε ολόκληρο το σώμα είναι 0.4 W/kg (παράγοντας ασφαλείας 10) για επαγγελματική έκθεση και 0.08 W/kg (επιπλέον παράγοντας ασφαλείας 5) για τον γενικό πληθυσμό [8].

Στον Πίνακα 1 βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα όρια ασφαλούς έκθεσης που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΟΡΙΑ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

	Ελεγχόμενο περιβάλλον ¹ Επαγγελματική έκθεση	Μη ελεγχόμενο περιβάλλον ² Γενικός πληθυσμός
Σε όλο το σώμα	0.4 W/kg	0.08 W/kg
Ανά 1g ιστού	8.0 W/kg	1.6 W/kg
Ανά 10g ιστού	8.0 W/kg	2 W/kg

1.7 Δοσιμετρία

Ο όρος ηλεκτρομαγνητική δοσιμετρία, χρησιμοποιείται για να περιγράφεται η ποσοτικοποίηση και έκθεση βιολογικών ιστών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Όταν αναφερόμαστε σε συνθήκες μακρινού πεδίου το βιολογικό αντικείμενο υφίσταται λιγότερο ισχυρή επίδραση από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η κατανομή του πεδίου είναι πιο απλή και μπορεί, πρακτικά, να χρησιμοποιηθεί η σχέση ανάμεσα στην ένταση του πεδίου και στον SAR. Αντίθετα, σε συνθήκες κοντινού πεδίου, όπως είναι και η έκθεση στο πεδίο του κινητού τηλεφώνου, δεν είναι χρήσιμη η γνώση της έντασης του πεδίου. Στις περιπτώσεις αυτές, ο SAR σχετίζεται με την ισχύ που εκπέμπεται από την πηγή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και όχι με την ένταση του πεδίου στον ελεύθερο χώρο. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες, πειραματικές και αριθμητικές, που υπολογίζουν τη διάχυση της ενέργειας στο κεφάλι ως συνάρτηση της εκπεμπόμενης ισχύος, της συχνότητας, της απόστασης πηγής κεφαλιού, αλλά και των γεωμετρικών παραμέτρων του κεφαλιού.

¹ Ελεγχόμενο περιβάλλον είναι οι χώροι όπου οι εργαζόμενοι γνωρίζουν ότι εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

² Μη – ελεγχόμενο είναι το περιβάλλον όπου μεμονωμένα άτομα εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χωρίς να το γνωρίζουν, ή χωρίς να μπορούν να ελέγξουν την έκθεσή τους.

Η απορρόφηση και η διάχυση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο κεφάλι δεν είναι ομοιόμορφη αλλά εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των βιολογικών συστημάτων (τα οστά για παράδειγμα, που περιέχουν τη λιγότερη ποσότητα νερού απορροφούν λιγότερη ενέργεια από τους μυϊκούς ιστούς). Ακόμα το μέγεθος του βιολογικού αντικειμένου σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, η θέση, η γεωμετρία, αλλά και ο προσανατολισμός του ως προς την πηγή της ακτινοβολίας καθιστούν την απορρόφηση μη γραμμικό φαινόμενο και κατά συνέπεια δύσκολο να περιγραφεί με ακρίβεια. Για να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά το πρόβλημα, αναπτύχθηκαν ρεαλιστικά ανατομικά μοντέλα του κεφαλιού.

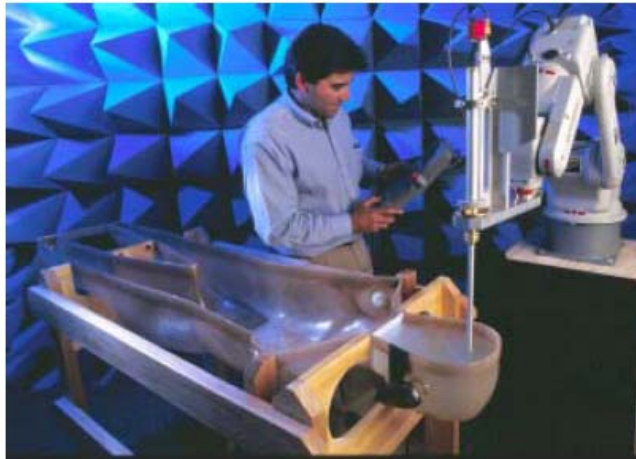
Τα υπολογιστικά, αριθμητικά μοντέλα του ανθρώπινου σώματος, και ειδικότερα του κεφαλιού, κατασκευάστηκαν με δεδομένα και εικόνες αξονικής (Computed Tomography, CT) και μαγνητικής (Magnetic Resonance Imaging, MRI) τομογραφίας. Τα όργανα και οι ιστοί που εμπλέκονται στους υπολογισμούς του SAR στο κεφάλι είναι δερματικός ιστός (skin), μυϊκός ιστός (muscle), οστά (bone), εγκέφαλος (brain), εγκεφαλονωτιαίο υγρό (cerebrospinal fluid), ιγμόρεια (sinuses), αυτιά (ear), μύτη (nose), μάτια (φακοί (lens), σκληρός χιτώνας (sclera – humor layer)), υποθάλαμος (hypothalamus), υπόφυση (pituitary), επίφυση (pineal glands). Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών αυτών είναι γνωστές [5] – [7].

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα στο κεφάλι του χρήστη έχει εξεταστεί τόσο πειραματικά, με τη χρήση ομοιωμάτων του κεφαλιού, όσο και αριθμητικά, με υπολογιστικές μεθόδους, καθώς δεν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση της ακτινοβολίας σε ζωντανό οργανισμό. Σε ερευνητικά εργαστήρια κατασκευάστηκαν ομοιώματα του ανθρώπινου κεφαλιού από υλικά τα οποία έχουν παρόμοιες διηλεκτρικές ιδιότητες με τα συστατικά του εγκεφάλου. Ένα τέτοιο ομοίωμα είναι και αυτό στην εικόνα 1.2 που ακολουθεί, όπου φαίνεται ένας τρόπος πειραματικής δοσιμετρίας [15].



εικόνα 1.2 Διάταξη πειραματικής δοσιμετρίας σε ομοίωμα κεφαλιού με χρήση κινητού τηλεφώνου. Η κεραία του κινητού εκπέμπει στο κεφάλι, και η απορροφώμενη ενέργεια μετράται και καταγράφεται σε υπολογιστή.

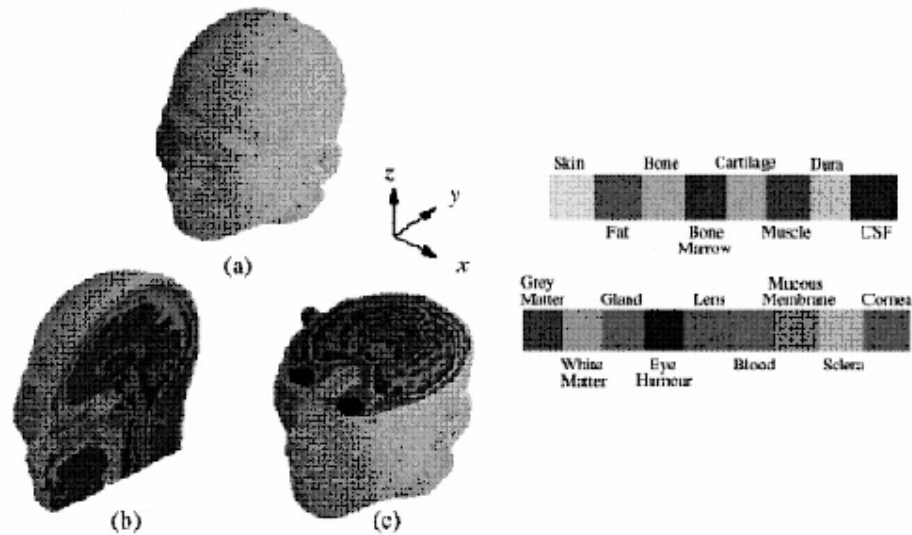
Μια ακόμα διάταξη πειραματικής δοσιμετρίας, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 1.3. [16].



εικόνα 1.3 Διάταξη πειραματικής δοσιμετρίας σε ομοίωμα ανθρώπινου σώματος. Η δοσιμετρία γίνεται μόνο στο κεφάλι με ένα ρομποτικό σύστημα. Ο χώρος που αντιστοιχεί στο κεφάλι έχει γεμίσει με υλικά παρόμοιων διηλεκτρικών ιδιοτήτων με τους ιστούς του ανθρώπινου κεφαλιού.

Στην εικόνα 1.3, φαίνεται ένα ομοίωμα ανθρώπινου σώματος και ένα ρομποτικό σύστημα για τη μέτρηση του SAR. Ο χώρος που αντιστοιχεί στο κεφάλι έχει γεμίσει με ένα διάλυμα υλικών οι διηλεκτρικές ιδιότητες των οποίων είναι παρόμοιες με τις ιδιότητες των ιστών ενός πραγματικού ανθρώπινου κεφαλιού. Το σύστημα αποτελείται από ένα ρομπότ, ένα σύστημα εμφυτεύσιμων, μικροσκοπικών ισοτροπικών αισθητήρων μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (probes) και ένα σύστημα ελέγχου της διαδικασίας, με το ανάλογο λογισμικό. Μια κεραία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και το probe μετρά την ισχύ που απορροφάται σε κάθε θέση του ομοιώματος του κεφαλιού.

Στην υπολογιστική δοσιμετρία προσομοιώνονται σε υπολογιστές, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, το κεφάλι και η πηγή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δηλαδή το κινητό τηλέφωνο με την κεραία του. Τα μοντέλα βελτιώνονται διαρκώς χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας τόσο των υπολογιστών όσο και της τομογραφίας, ώστε να προσεγγίζουν κάθε φορά με μεγαλύτερη αξιοπιστία το ανθρώπινο κεφάλι. Με την ανάπτυξη της τομογραφίας βελτιώνεται η ποιότητα των δεδομένων για την κατασκευή του μοντέλου του κεφαλιού ενώ η ανάπτυξη των υπολογιστών συμβάλλει στην εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και ενέργειας, καθώς απαιτείται υψηλή υπολογιστική επίλυση για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων που εμπλέκουν αλληλεπίδραση με βιολογικά σύνθετα συστήματα. Στην εικόνα 1.4 παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό αριθμητικό μοντέλο κεφαλιού [11].



εικόνα 1.4 Στην εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο του κεφαλιού ενός άνδρα σε τρεις διαστάσεις (a), και σε δυο τομές, κάθετη (b) και οριζόντια (c), ενώ φαίνεται και η αντιστοίχιση των αποχρώσεων του γκρι σε ιστούς του κεφαλιού. Με βάση τα MRI δεδομένα οι ερευνητές κατασκεύασαν 17 διαφορετικούς ιστούς του εγκεφάλου, αποδίδοντας στον καθένα μια διαφορετική απόχρωση της κλίμακας του γκρι. Στις τομές διακρίνονται οι ιστοί με τις αποχρώσεις που τους έχουν αποδοθεί.

Ο υπολογισμός του πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού γίνεται κυρίως με την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (**F**inite **D**ifference **T**ime **D**omain, FDTD). Η μέθοδος λύνει με κομψό και αποτελεσματικό τρόπο τις εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξισώσεις Maxwell, σε διάφορες γεωμετρίες.

Οι βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορούν να μελετηθούν *in vitro* και *in vivo*, χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα έκθεσης.

1.7.1 Μελέτη βιολογικών επιδράσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Τα πειράματα **in vitro** γίνονται εργαστηριακά σε απομονωμένα συστατικά βιολογικών συστημάτων, όπως είναι οι κυτταροκαλλιέργειες. Οι μελέτες αυτές επιχειρούν να εντοπίσουν τους μηχανισμούς με τους οποίους τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν με το βιολογικό σύστημα, να εξετάσουν δηλαδή εάν η ακτινοβολία που δέχεται το σύστημα είναι ικανή να αλλοιώσει τη φυσιολογική λειτουργία ή τη δομή του. Οι συχνότητες και η ενέργεια των κυμάτων στις *in vitro* μελέτες πρέπει να αντιστοιχούν σε αυτές που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα, για είναι τα συμπεράσματα (που θα εξαχθούν) ασφαλή και αξιόπιστα. Συνήθως, οι βιολογικές επιδράσεις που ανιχνεύονται *in vitro* εξετάζονται και *in vivo*.

Τα πειράματα **in vivo** γίνονται εργαστηριακά σε ζωντανούς βιολογικούς οργανισμούς, δηλαδή σε πειραματόζωα. Κυρίως χρησιμοποιούνται ποντίκια και χοίροι. Στα πειραματόζωα γίνονται μετρήσεις για να υπολογιστεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που απορροφά το ζώο που ακτινοβολείται και κατά

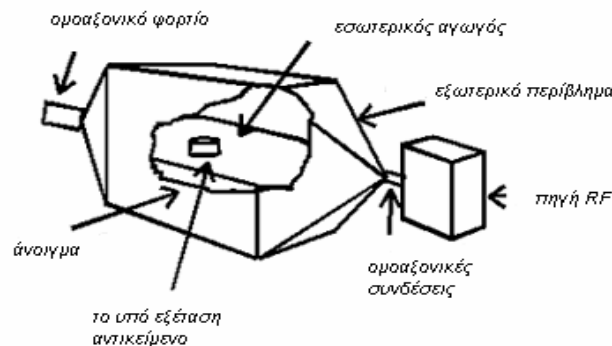
πόσο αυτή η ενέργεια είναι μέσα στα όρια ασφαλείας. Ακόμα εξετάζεται η ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται το πειραματόζωο σε συνάρτηση με τις ενδεχόμενες μη φυσιολογικές αλλαγές στον οργανισμό του. Ανιχνεύεται, δηλαδή, η μεταβολή στη φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού του ή η εμφάνιση ασθενειών στο ζώο.

1.7.2 Συστήματα έκθεσης βιολογικών συστημάτων

Στην πειραματική δοσिमетρία αναπτύχθηκαν διάφορες διατάξεις για να εξασφαλίσουν τις κατάλληλες συνθήκες έκθεσης του βιολογικού αντικειμένου στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι διατάξεις είναι κυρίως Εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητικά Κελιά (Transverse Electromagnetic cells, TEM), Ακτινικές Γραμμές Μετάδοσης (Radial Transmission Lines, RTL), και κυματοδηγοί.

1.7.2.1 Εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητικά Κελιά, TEM

Το σύστημα έκθεσης που χρησιμοποιείται συνήθως στις πειραματικές μελέτες είναι τα TEM κελιά, καθώς είναι μικρές, ανεξάρτητες, αυτοτελείς διατάξεις και χωρούν σε συνηθισμένα εκκολαπτήρια. Τα Εγκάρσια Ηλεκτρομαγνητικά κελιά είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σταθερού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ένα οριοθετημένο περιβάλλον. Το κελί αποτελείται από ένα τμήμα ορθογωνικής ομοαξονικής γραμμής μετάδοσης, η οποία στο ένα άκρο της είναι πιο λεπτή για να εφαρμόζει σε συνήθεις ομοαξονικές συνδέσεις. Το κύμα διαδίδεται μέσα στο κελί όπως περίπου και στον ελεύθερο χώρο (αντίσταση 377 Ω), έτσι οι συνθήκες μέσα στο κελί παρέχουν μια ικανοποιητική προσέγγιση της μετάδοσης του κύματος στο μακρινό πεδίο στον ελεύθερο χώρο. Το μειονέκτημα των TEM κελιών είναι το περιορισμένο μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να μελετηθούν μέσα σε αυτά καθώς οι διαστάσεις τους πρέπει να είναι αρκετά μικρές. Ένα TEM κελί φαίνεται στην εικόνα 1.5 [17].



εικόνα 1.5 TEM κελί.

1.7.2.2 Ακτινικές Γραμμές Μετάδοσης, RTL

Οι ακτινικές γραμμές μετάδοσης είναι κυλινδρικές συσκευές που στο κέντρο τους βρίσκεται μια κεραία και καταλήγουν ακτινικά είτε σε φορτίο ή σε υλικά απορρόφησης. Η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη έκθεση πολλών αντικειμένων στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων έως 3 GHz [18].

1.8 Επιδημιολογικές μελέτες

Τα συστήματα κινητής επικοινωνίας χρησιμοποιούνται ευρέως από τον γενικό πληθυσμό τις δυο τελευταίες δεκαετίες. Μετά τα πρώτα αναλογικά συστήματα ακολούθησε μια περίοδος όπου αναπτύχθηκαν παράλληλα αναλογικά και ψηφιακά παλμικά συστήματα. Σήμερα εφαρμόζεται στην Ευρώπη το σύστημα GSM. Η αλλαγή, με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών, των συστημάτων έκθεσης δυσκολεύει τη συσχέτιση επιδράσεων και ασθενειών με ένα συγκεκριμένο σύστημα. Ακόμα και η περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών θα δυσκολέψει την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις ενδεχόμενες επιδράσεις της χρήσης του κινητού τηλεφώνου για μεγάλη χρονική περίοδο.

Έτσι, οι διάφορες επιδημιολογικές μελέτες που έχουν γίνει κατά καιρούς δεν μπορούν να αποδείξουν ότι η χρήση των κινητών τηλεφώνων έχει αναγκαστικά επικίνδυνες συνέπειες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Μπορούν ωστόσο να αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία για τον εντοπισμό επικίνδυνων, καταστάσεων της υγείας του οργανισμού και να παρέχουν σημαντικές ενδείξεις επιδράσεων, που καθοδηγούν τους επιστήμονες σε συγκεκριμένους τομείς έρευνας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες επιδημιολογικές μελέτες που έχουν γίνει για να διαπιστωθεί αν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων προκαλούν επιβλαβείς καταστάσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Η πλειονότητα των μελετών ενδιαφέρεται για τη συσχέτιση της χρήσης των κινητών τηλεφώνων με την εμφάνιση καρκίνου.

1.8.1 Επιδημιολογικές μελέτες σε υγιείς ανθρώπους

Στις Η.Π.Α. την περίοδο 1993 – 1994 επιλέχθηκαν, μέσω τηλεφωνικών καταλόγων, 255000 πελάτες μιας εταιρίας παροχής τηλεφωνικών υπηρεσιών από τέσσερις διαφορετικές αστικές περιοχές. Η θνησιμότητα των πελατών που είχαν τουλάχιστον τρία χρόνια λογαριασμό στην εταιρία και χρησιμοποιούσαν κινητά τηλέφωνα, δεν διέφερε από αυτή των πελατών που χρησιμοποιούσαν συμβατικές τηλεφωνικές συσκευές. Ακόμα, δεν παρατηρήθηκε αύξηση του κινδύνου για εμφάνιση λευχαιμίας ή εγκεφαλικών όγκων στους χρήστες των κινητών. Η μικρή όμως χρονική διάρκεια της μελέτης δεν επιτρέπει την ασφαλή εκτίμηση των κινδύνων μακροπρόθεσμα [19].

Στη Δανία έγινε μια έρευνα όπου παρατηρήθηκαν 420095 πελάτες δυο εταιριών κινητής τηλεφωνίας με συμβόλαια που είχαν υπογραφεί από το 1991. Από αυτούς, το 58% χρησιμοποιούσε το σύστημα GSM και οι υπόλοιποι το αναλογικό σύστημα (Nordic Mobile Telephone, NMT, λειτουργεί στα 450 MHz). Στους άνδρες παρατηρήθηκε μείωση στην επίπτωση καρκίνων που σχετιζόνταν με το κάπνισμα,

ενώ αυξήθηκε ελάχιστα η επίπτωση καρκίνων άλλου τύπου. Ανάλογες συμπεριφορές παρατηρήθηκαν και στις γυναίκες. Με περισσότερη προσοχή εξετάστηκε η ανάπτυξη όγκων στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα και λευχαιμίας, αλλά δεν βρέθηκαν αυξημένες σχετικές εμφανίσεις. Τέλος, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις επιδράσεις ανάμεσα στα αναλογικά και στα ψηφιακά τηλέφωνα [19].

1.8.2 Επιδημιολογικές μελέτες σε καρκινοπαθείς

Στις Η.Π.Α., 469 ασθενείς με κακοήθεις όγκους στον εγκέφαλο συμμετείχαν σε κοινή έρευνα με 422 ασθενείς με καρκίνο (λέμφωμα ή λευχαιμία) σε αρχικό στάδιο. Οι ερευνητές ήθελαν να διαπιστώσουν αν οι ασθενείς χρησιμοποιούσαν σε καθημερινή βάση κινητό τηλέφωνο και να το συσχετίσουν με την ανάπτυξη του καρκίνου. Στη μελέτη το 80% των τηλεφώνων που χρησιμοποιούσαν οι ασθενείς ήταν αναλογικά και οι αναλύσεις έγιναν με βάση τα χρόνια χρήσης του κινητού (4 ή περισσότερα), τις ώρες χρήσης το μήνα (10 ή περισσότερες) και τις συνολικές ώρες χρήσης. Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν αυξημένους κινδύνους από τη χρήση των κινητών, δεν υπήρξε κάποια σημαντική ένδειξη που να συσχετίζει την πλευρά του εγκεφάλου που αναπτύχθηκαν οι όγκοι με τη χρήση από την ίδια πλευρά του κινητού τηλεφώνου [19].

Μια μελέτη στη Σουηδία [20] χρησιμοποίησε 1617 ασθενείς με όγκο στον εγκέφαλο για να εξετάσει αν η ανάπτυξη του όγκου σχετίζεται με την έκθεση στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κινητών ή ασύρματων τηλεφώνων. Σε κάθε ασθενή αντιστοιχούσε ένας υγιής, ιδίου φύλου, για να γίνει η σύγκριση των παρατηρήσεων. Στην έρευνα συμμετείχαν ασθενείς στους οποίους διαγνώστηκε καρκίνος το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 1997-Ιούνιος 2000. Η έρευνα βασίστηκε σε ένα ερωτηματολόγιο και οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να απαντήσουν τόσο για τις συνθήκες της ζωής τους, για τη δουλειά τους και για το ιστορικό της υγείας τους όσο και για το κινητό τηλέφωνο που είχαν (για τον τύπο και τη μάρκα του τηλεφώνου, αν είναι αναλογικό, ψηφιακό ή ασύρματο) και για τον τρόπο που το χρησιμοποιούσαν (για τα χρόνια της χρήσης, τον αριθμό των κλήσεων κάθε μέρα, τα λεπτά που μιλούσαν στο τηλέφωνο και για το αυτί στο οποίο συνήθως κρατούσαν το ακουστικό).

Το βασικό εύρημα της ανάλυσης των απαντήσεων ήταν ο αυξημένος κίνδυνος για όγκους στον εγκέφαλο στους χρήστες των αναλογικών κινητών τηλεφώνων. Ο κίνδυνος αυτός αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου χρήσης του τηλεφώνου. Και τα ψηφιακά κινητά τηλέφωνα αύξησαν τον κίνδυνο, όταν χρησιμοποιούνταν για περίοδο μεγαλύτερη από πέντε χρόνια. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκαν μικρότερο χρονικό διάστημα από τα αναλογικά, οπότε τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβώς συγκρίσιμα. Όσον αφορά ποιος τύπος όγκων ήταν πιθανότερο να αναπτυχθεί από τη χρήση των αναλογικών τηλεφώνων, βρέθηκε ότι ήταν το ακουστικό νεύρωμα. Αυτός ο τύπος του όγκου αναπτύσσεται στην πλευρά του εγκεφάλου στην οποία βρίσκεται το αυτί που εκτίθεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το ενδιαφέρον συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι ανεξάρτητα από τον τύπο του τηλεφώνου, ο κίνδυνος ανάπτυξης όγκου είναι αυξημένος στο ημισφαίριο του εγκεφάλου που εκτίθεται περισσότερο στην ακτινοβολία.

1.8.3 Επιδημιολογικές μελέτες για διάφορες άλλες επιδράσεις, εκτός καρκίνου

Μια επιδημιολογική έρευνα που έγινε στην Ελβετία [21], διαφοροποιήθηκε ως προς το αντικείμενο μελέτης σε σχέση με τις προηγούμενες. Σε αυτή την έρευνα εξετάστηκε το κατά πόσο σχετίζεται η χρήση των κινητών τηλεφώνων με την εμφάνιση συμπτωμάτων όπως πονοκέφαλοι, ναυτία και διαταραχές στον ύπνο, καθώς επίσης και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για να περιοριστούν αυτά τα συμπτώματα. Η έρευνα δε, σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέει την χρήση των κινητών και την εμφάνιση των συμπτωμάτων με τη σχέση αιτίου – αιτιατού.

Ερωτηματολόγια άρχισαν να στέλνονται σε ανθρώπους που παραπονιόντουσαν για διάφορα συμπτώματα στην υγεία τους, από τον Ιούνιο του 2001. Έως τον Μάρτιο του 2002, 342 ερωτηματολόγια επιστράφηκαν απαντημένα στους ερευνητές. Η μέση ηλικία των ατόμων που απάντησαν ήταν 49.5 χρόνια, ενώ το 59% των ατόμων ήταν γυναίκες. Γενικά αναφέρθηκαν περισσότερα από ένα συμπτώματα. Τα πιο συχνά ήταν διαταραχές στον ύπνο (απάντησε το 59% των συμμετεχόντων), πονοκέφαλοι (43%), νευρική ή άγχος (20%), δυσκολίες στη συγκέντρωση (18%) και κούραση (16%). Η πλειοψηφία των ερωτώμενων, συσχέτισε τα συμπτώματα που τους παρουσιάστηκαν, με την έκθεσή τους στο πεδίο των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας (78%), ακολούθησε η έκθεση στο πεδίο των κινητών (38%), ενώ στο τέλος βρίσκεται η έκθεση στο πεδίο γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δυο τρίτα των ατόμων που παρουσίασαν αυτά τα συμπτώματα προσπάθησαν να τα μειώσουν, αποφεύγοντας την έκθεσή τους στις πηγές της ακτινοβολίας.

1.8.4 Επιδημιολογικές μελέτες σε στρατιωτικές βάσεις

Το Υπουργείο Άμυνας των Η.Π.Α. [22], είναι παγκόσμια ένας από τους μεγαλύτερους φορείς ανάπτυξης και χρήσης συστημάτων ραδιοσυχνότητων. Ραντάρ, συστήματα τηλεπικοινωνιών και όπλων βασίζονται στις ραδιοσυχνότητες. Κατά τη χρήση τέτοιων συστημάτων, άνθρωποι είναι εκτεθειμένοι σε χαμηλά επίπεδα RF ακτινοβολίας, ενώ υπάρχει αυξημένος κίνδυνος το στρατιωτικό προσωπικό να εκτεθεί τυχαία σε υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας. Οι επιστήμονες της Πολεμικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών διεξαγάγουν έρευνες για τα συμπτώματα που παρουσιάζονται στο στρατιωτικό προσωπικό και τα ευρήματα συγκρίνονται και με μελέτες που έχουν γίνει σε πολίτες.

Παλαιότερες έρευνες [23] που έχουν γίνει σε στρατιωτικό προσωπικό έχουν δείξει διάφορες επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Συχνή είναι η εμφάνιση καταρράκτη στα μάτια όσων χειρίζονταν τα ραντάρ ή εργάζονταν κοντά σε αυτά. Κάποιες μελέτες παρουσιάζουν μια ελαφρά συσχέτιση της επαγγελματικής έκθεσης του προσωπικού στα πεδία ραδιοσυχνότητων με την εμφάνιση όγκων στο κεφάλι. Άλλες πάλι δεν βρίσκουν ότι η θνησιμότητα ή ο ρυθμός εμφάνισης καρκίνου στον εγκέφαλο είναι αυξημένος στο στρατιωτικό προσωπικό που ασχολείται με τα πεδία ως προς το υπόλοιπο προσωπικό.

Τα διαφορετικά, και συχνά αντιφατικά ευρήματα των επιδημιολογικών ερευνών, δεν αποτρέπουν την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων όσον αφορά τα αποτελέσματα της μακροχρόνιας έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Καταρχήν είναι αποδεδειγμένο ότι υπάρχει επίδραση της ακτινοβολίας στην υγεία του ανθρώπου. Η επικινδυνότητα της επίδρασης εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης.

Είναι ακόμα πιθανό η μακροχρόνια έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία να λειτουργήσει ως παράγοντας διέγερσης προδιαθεσικών σε καρκίνο καταστάσεων.

Οι διαφορές μεταξύ των ερευνών εντοπίζονται κυρίως στη φιλοσοφία και στην προοπτική κάθε έρευνας. Τα αποτελέσματα καθορίζονται σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή των ομάδων των ατόμων που θα συμμετέχουν στην έρευνα, των ερωτήσεων και των στοιχείων που θα μελετηθούν.

1.8.5 Επιδημιολογικές μελέτες σε παιδιά

Ένα ιδιαίτερο και εξαιρετικά σημαντικό μέρος των επιδημιολογικών μελετών αφορά τα παιδιά. Αν και τα λίγα μόνο τελευταία χρόνια τα παιδιά χρησιμοποιούν κινητό τηλέφωνο, βρίσκονται εκτεθειμένα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, όπως είναι αυτά των σταθμών βάσης των κεραιών κινητής τηλεφωνίας. Δεν μπορούν ακόμα να θεμελιωθούν επιδημιολογικές έρευνες για τα αποτελέσματα της χρήσης των κινητών στα παιδιά, λόγω των λίγων χρόνων χρήσης τους. Ωστόσο, ευρήματα μελετών που έγιναν σε παιδιά που ζούσαν κοντά σε σταθμούς βάσης έδειξαν ότι υπάρχουν αυξημένα κρούσματα λευχαιμίας στα παιδιά αυτά [24].

Σήμερα τα παιδιά, οι έφηβοι κυρίως, χρησιμοποιούν είτε τα δικά τους κινητά τηλέφωνα, είτε των γονιών τους. Οι δυνατότητες επικοινωνίας (π.χ. i – mode), που παρέχουν πλέον οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας έλκουν όλο και περισσότερους ανθρώπους νεαρής ηλικίας, καθιστώντας τους μια δυναμική και πολλά υποσχόμενη αγορά. Από διάφορους οργανισμούς [24] έχουν γίνει συστάσεις να αποφεύγεται, αν είναι δυνατόν, ή τουλάχιστον να περιορίζεται η χρήση των κινητών τηλεφώνων από τα παιδιά και τους εφήβους.

Αναφορές – Βιβλιογραφία.

- [1] Advisory Group on Non Ionizing Radiation, “ELF Electromagnetic Fields and the Risk of Cancer”.
- [2] Κωπτής Π., “Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων”, εκδ. Τζιόλα.
- [3] Andersen J. B., Pedersen G. F., “The Technology of Mobile Telephone Systems Relevant for Risk Assessment”, Radiation Protection Dosimetry, Nuclear Technology Publishing, vol. 72, no. 3–4, pp. 249–257, (1997).
- [4] European Commission Expert Group, “Possible health effects related to the use of radiotelephones”.
- [5] Gabriel C., Gabriel S. and Corthout E., “The dielectric properties of biological tissues: I. Literature Survey”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2231 – 2249, (1996).
- [6] Gabriel S., Lau R. W. and Gabriel C., “The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2251 – 2269, (1996).
- [7] Gabriel S., Lau R. W. and Gabriel C., “The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2271 – 2293, (1996).
- [8] Osepchuk J. M., Petersen R. C., “Safety Standards for Exposure to RF Electromagnetic Fields”, IEEE Microwave, June 2001.
- [9] Κουτσούρης Δ., Νικήτα Κ., “Ιατρικά Απεικονιστικά Συστήματα”, εκδ. Ε.Μ.Π., 2000.
- [10] Lu Y., Ying J., Tan T. K., Arichandran K., “Electromagnetic and Thermal Simulations of 3-D Human Head Model under RF Radiation by Using the FDTD and FD Approaches”, IEEE Transactions on Magnetism, vol. 32, no. 3, pp. 1653 – 1656, May 1996.
- [11] Wang J., Fujiwara O., “Dosimetric Evaluation of Human Head for Portable Telephone”, Electronics and Communications in Japan, part 1, vol. 85, no. 7, (2002).
- [12] Federal Communications Commission, “Information on human exposure to radiofrequency fields from cellular and pcs radio transmitters”, Washington D.C., January 1998.
- [13] Hossman K., Herman D.M., “Effects of Electromagnetic Radiation of Mobile Phones on the Central Nervous System”, Bioelectromagnetics, vol. 24, pp. 49 – 62.

- [14] Mason P. M., Murphy M. R., Petersen R. C., “IEEE EMF Health and Safety Standards”.
- [15] Preece A. W., Iwi G. , Davies-Smith A., Wesnes K., Butler S., Lim E., Varey A. “Effect of a 915 MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man”, *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 75, no. 4, pp. 447 – 456, (1999).
- [16] McIntosh R. L., McKenzie R., and Carratelli A., “The Numerical Evaluation of a SAR Measurement Phantom at the Telstra Research Laboratories”, *Electromagnetic Energy Safety Research*, Telstra Research Laboratories, Australia.
- [17] Malaric K., “Electromagnetic – Compatibility Analysis Using TEM Cells”, *TechOnLine*, December 2001.
- [18] Schonborn F., Pokovic K., Burkhardt M., and Kuster N., “Basis for Optimization of In Vitro Exposure Apparatus for Health Hazard Evaluations of Mobile Communications”, *Bioelectromagnetics*, vol. 22, pp. 547 – 559. (2001).
- [19] Elwood J. M., “Epidemiological Studies of Radio Frequency Exposures and Human Cancer”, *Bioelectromagnetics Supplement*, vol. 6, pp. 63 – 73, (2003).
- [20] Hardell L., Hallquist A., Mild K. H., “Mobile Phones and the Risk for Brain Tumors”, *Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Rhodes 2002, vol. 1, pp. 359 – 362.
- [21] Roosli M., Moser M., Meier M., Braun-Fahrlander C., “Health Symptoms Associated with Electromagnetic Radiation – A Questionnaire Survey”, *Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Rhodes 2002, vol. 2, pp. 670 – 676.
- [22] Miller R. L., Murphy M. R., Merritt J. H., “Radio Frequency Bioeffects Programs at the U.S. Air Force Research Laboratory”, *Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Rhodes 2002, vol. 1, pp. 468 – 476.
- [23] Lin J. C., “Biological Aspects of Mobile Communication Fields”.
- [24] Lin J. C., “Risks to Children from Cellular Telephone Radiation”, *IEEE microwave magazine*, pp. 20 – 26, March 2003.

Κεφάλαιο 2

Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων σε βιολογικά συστήματα.

2.1 Εισαγωγή

Από τη στιγμή που εκφράστηκε ο προβληματισμός για την ασφάλεια της έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των κινητών τηλεφώνων πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν δημοσιεύσει μελέτες που εξετάζουν την επίδραση αυτής της ακτινοβολίας στον άνθρωπο. Οι έρευνες εστιάζουν στο αν οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας σχετίζονται με την ανάπτυξη καρκίνου ή με νευροφυσικές διαταραχές. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μελέτες που έχουν γίνει *in vivo* και *in vitro* σε πειραματόζωα και σε ανθρώπους, και εξετάζουν αυτές τις βιολογικές επιδράσεις.

Οι μελέτες δεν επιχειρούν να αποδείξουν την άμεση μετατροπή των υγιών κυττάρων σε καρκινικά. Σκοπός τους είναι να προσδιορίσουν τις αλλαγές στην κανονική κυτταρική λειτουργία οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ανάπτυξη καρκινικών κυττάρων. Η απόδειξη ότι ένα εξωτερικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει κάποια βιολογική αντίδραση δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ότι αυτή η αντίδραση θα έχει επικίνδυνες για την υγεία προεκτάσεις. Κατά συνέπεια απομονώνονται και μελετώνται εκείνοι οι παράγοντες που όταν αλλοιωθούν έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν καρκινογένεσεις. Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται από δυο χαρακτηριστικές ιδιότητες. Από την ικανότητα μετάλλαξης, δηλαδή τη μετατροπή υγιών κυττάρων σε κύτταρα που έχουν χαρακτηριστικά καρκινικών κυττάρων, και από την τοξικότητα, την ικανότητα να προκαλούν γενετικές αλλοιώσεις, όπως βλάβη στα χρωμοσώματα ή απευθείας καταστροφή του DNA. Οι έρευνες πάνω στη συμπεριφορά των παραγόντων αυτών περιστρέφονται γύρω από την επίδρασή τους στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων, στη διαταραχή του κυτταρικού κύκλου, και στις ανωμαλίες στο μηχανισμό προγραμματισμένου θανάτου (απόπτωση) των κυττάρων.

Η έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία του κεντρικού νευρικού συστήματος με διάφορους τρόπους. Πιθανές επιδράσεις είναι ο μετασχηματισμός των νευροδιαβιβαστών που ενώνονται με συγκεκριμένους υποδοχείς, η αλλαγή της αγωγιμότητας της ιοντικής μεμβράνης και αλληλεπιδράσεις με ελεύθερες ρίζες που παράγονται από βιοχημικές αντιδράσεις. Ακόμα έχει αναφερθεί ότι η αλληλεπίδραση με ευαίσθητα ένζυμα όπως η ορνιθίνη δεκαρβοξυλάση (ornithine decarboxylase, ODC), μπορεί άμεσα ή έμμεσα να επηρεάσει τους δρόμους μεταγωγής των σημάτων. Αυτοί σχετίζονται με μια πληθώρα μηχανισμών αποκατάστασης των μεταβολών που υφίστανται οι νευρικές λειτουργίες.

Επιδημιολογικές μελέτες αλλά και εργαστηριακές έρευνες έχουν ασχοληθεί με τις βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας των κινητών τηλεφώνων στον άνθρωπο. Η μελέτη των βιολογικών επιδράσεων επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη φαινομένων καρκινογένεσης και στις επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα.

2.1.1 Καρκινογένεση

Έχουν εκφραστεί φόβοι ότι η έκθεση στο πεδίο των κινητών τηλεφώνων είναι ικανή να προκαλέσει τέτοιες αλλαγές σε κυτταρικό επίπεδο ώστε να διαταραχτεί η προγραμματισμένη λειτουργία του κυττάρου και αυτό να οδηγηθεί σε πρόωρο θάνατο ή σε ανεξέλεγκτο πολλαπλασιασμό. Και οι δυο καταστάσεις οδηγούν στην ανάπτυξη όγκων. Έρευνες, *in vivo* και *in vitro*, έχουν γίνει για να εξεταστεί ο κίνδυνος ανάπτυξης καρκινικών κυττάρων ύστερα από έκθεση σε ακτινοβολία κινητών. Ειδικότερα έχουν απομονωθεί και εξετάζονται συγκεκριμένοι μηχανισμοί σε κυτταρικό επίπεδο η μεταβολή των οποίων οδηγεί σε εμφάνιση κακοηθών νεοπλασιών. Παρακολουθούνται οι αλλαγές στη συμπεριφορά ιόντων που κινούνται δια μέσου της κυτταρικής μεμβράνης, των γονιδίων και των πρωτεϊνών, καθώς και η καταστροφή του DNA.

Και στις δυο πλευρές της κυτταρικής μεμβράνης υπάρχουν ελεύθερα ιόντα, κυρίως καλίου, νατρίου, χλωρίου, ασβεστίου. Τα ιόντα αυτά, που ελέγχουν τον όγκο του κυττάρου, παίζουν σημαντικό ρόλο στη μετάδοση των σημάτων δια μέσου της κυτταρικής μεμβράνης και δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δυο πλευρές της. Η ροή των ιόντων δια της μεμβράνης εξαρτάται από τη διαφορά τάσης και συγκέντρωσης ανάμεσα στις δυο πλευρές της. Σε συνθήκες ισορροπίας δεν υπάρχει ροή ιόντων και ανάμεσα στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της μεμβράνης υπάρχει διαφορά τάσης, που ονομάζεται ηλεκτρικό δυναμικό. Εξαιτίας του ηλεκτρικού δυναμικού, το κάθε ιόν σχηματίζει κανάλια στη μεμβράνη από τα οποία διέρχεται. Όταν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, ασκείται μια δύναμη σε κάθε ιόν που διαταράσσει την κατάσταση ισορροπίας του. Η εξωγενής αυτή δύναμη προκαλεί σε κάθε ιόν μια εξαναγκασμένη ταλάντωση που υπερθέτεται στην τυχαία θερμική κίνηση του ιόντος. Όταν το πλάτος της ταλάντωσης του ιόντος υπερβεί ένα κρίσιμο όριο, το ταλαντευόμενο ιόν μπορεί να δώσει λανθασμένα σήματα στα κανάλια από τα οποία διέρχεται και αυτά να ανοίγουν ή να κλείνουν ανεξέλεγκτα. Αλλάζει έτσι η ηλεκτροχημική ισορροπία της μεμβράνης και κατά συνέπεια η λειτουργία όλου του κυττάρου [1].

Stress proteins ή heat shock proteins (hsps) επάγονται από επικίνδυνες εξωκυτταρικές διεγέρσεις όπως αλλαγές στο pH ή αιφνίδια αύξηση της θερμοκρασίας. Έχει αναφερθεί ότι επάγονται και υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ο ρόλος των hsps είναι να διατηρήσουν τη δομή και τη λειτουργία των κυτταρικών πρωτεϊνών, αλλά και να επισκευάσουν τα κατεστραμμένα τμήματα των πρωτεϊνών. Η ανάπτυξη της hsp70 εμπλέκει στοιχεία της οικογένειας του mitogen-activated-phospho-kinase (MAPK), που συμμετέχει στο σύστημα μετάδοσης σημάτων σε διάφορους ευκαριώτους. Οι διαδρομές του MAPK αποτελούνται από ευδιάκριτα ένζυμα τα οποία σειριακά ενεργοποιούν το ένα το άλλο ελέγχοντας έτσι τη λειτουργία συγκεκριμένων ομάδων γονιδίων. Οι διαδρομές αυτές ελέγχουν τον πολλαπλασιασμό των κυττάρων, τον μεταβολισμό και την επιβίωσή τους έπειτα από τραυματισμούς, μολύνσεις, κακοήθειες και άλλες ασθένειες. Οι διαδρομές MAPK οδηγούν ένα κύτταρο στην ωρίμανσή του και μπορεί να καταλήξουν στην απόπτωσή του. Τρεις είναι οι κύριες διαδρομές MAPK : signal-regulated kinase/mitogen activated protein kinase (ERK/MAPK1/2), c-Jun NH₂-terminal kinase/stress activated protein kinase (JNK/SAPK) και p38 MAPK [2]. Για την τελευταία υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σε συνδυασμό με την hsp70 βρίσκονται σε αρκετές έρευνες που εξετάζουν την επίδραση της ακτινοβολίας των κινητών στη συμπεριφορά των κυττάρων.

Οι έρευνες που ασχολούνται με την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο DNA, ξεχωρίζουν δυο μηχανισμούς από τους οποίους επέρχεται η καταστροφή του. Από τη μια, εξετάζουν τη διαταραχή και την ανταλλαγή αδελφών χρωματιδίων (sister chromatid exchange) και το σχηματισμό μικροπυρήνων (micronuclei). Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά τα μονά ή διπλά σπασίματα της αλυσίδας του DNA. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να επηρεάσουν τις γενετικές πληροφορίες ενός βιολογικού συστήματος και να οδηγήσουν σε καρκινογένεση [3].

2.1.2 Επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα

Η μελέτη των επιδράσεων στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα αναφέρεται στις μεταβολές της ηλεκτροφυσιολογίας, της βιοχημείας, της μορφολογίας και της νευροπαθολογίας του κεντρικού νευρικού συστήματος. Ως προέκταση αυτών εξετάζονται και οι διαταραχές στο ύπνο, στη συγκέντρωση, στη μνήμη αλλά και στις μαθησιακές δυνατότητες ανθρώπων και πειραματόζωων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται στη μελέτη της μεταβολής της διαπερατότητας του αιματοεγκεφαλικού φραγμού (Blood Brain Barrier, BBB). Ο εγκέφαλος προστατεύεται από τα επικίνδυνα συστατικά του αίματος με τον αιμοεγκεφαλικό φραγμό, BBB. Ο BBB είναι ένας επιλεκτικός διαπερατός, υδροφοβικός φραγμός που επιτρέπει εύκολα τη διέλευση μικρών λιπο-διαλυτών μορίων, εμποδίζει την είσοδο τοξικών μορίων στον εγκέφαλο και δρα ως ρυθμιστικό σύστημα που σταθεροποιεί και βελτιώνει το ρευστό περιβάλλον των ενδοκυτταρικών δομών του εγκεφάλου. Ένας ανέπαφος BBB προστατεύει τον εγκέφαλο από βλάβες, ενώ η δυσλειτουργία του, όπως προκύπτει έπειτα από επιληπτική προσβολή ή ακραία υπέρταση, επιτρέπει την εισροή στον εγκέφαλο υδροφιλικών μορίων, τα οποία υπό κανονικές συνθήκες θα είχαν αποκλειστεί. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εγκεφαλικό οίδημα, σε αυξημένη ενδοκρανιακή πίεση και, στη χειρότερη περίπτωση, σε μη αναστρέψιμη εγκεφαλική βλάβη. Η φυσιολογική επιλεκτική διαπερατότητα του BBB μπορεί να μεταβληθεί σε πολλές νευροπαθολογικές καταστάσεις. Ανοίγει κατά τη διάρκεια ενός ακαριαίου υπερτασικού επεισοδίου, σε επιληπτική κρίση, αλλά και κατά τη διάρκεια της θεραπείας με ακτίνες X. Αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει ότι η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία αλλάζει τη διαπερατότητα του BBB [4].

2.2 Επιδράσεις στο DNA

Αρκετές ερευνητικές ομάδες, που έχουν χρησιμοποιήσει διάφορα συστήματα έκθεσης, έχουν αναφέρει επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο DNA και στα χρωμοσώματα διαφορετικών κυττάρων.

➤ Μελέτες σε κύτταρα ανθρώπων in vitro

Molt 4 T-λεμφοβλαστικά κύτταρα εκτέθηκαν σε παλμικά σήματα κινητών τηλεφώνων από τον Phillips και την ομάδα του [5]. Τα κύτταρα αυτά επιλέχθηκαν λόγω της ευαισθησίας τους σε παράγοντες που προκαλούν καταστροφή του DNA. Οι συχνότητες έκθεσης είναι στα 813.5625 MHz (iDEN (πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου) σήμα) και στα 836.55 MHz (TDMA σήμα). Οι μελέτες διεξήχθησαν με χαμηλούς SARs, περίπου 2.4 και 24 $\mu\text{W/g}$ για το iDEN σήμα, ενώ για το TDMA σήμα 2.6 και 26 $\mu\text{W/g}$, για να εξεταστούν οι αθερμικές επιδράσεις της RF

ακτινοβολίας. Οι εκθέσεις των κυττάρων στην ακτινοβολία είχαν διάρκεια 2, 3 και 21 h, και έγιναν μέσα σε ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό, TEM, κελί.

Η μέθοδος της αλκαλικής αποτίμησης κομήτη (alkaline comet assay, ACA) ή αλλιώς, της ηλεκτροφόρησης πήγματος ενός μόνο κυττάρου (single cell gel, SCG electrophoresis), εφαρμόστηκε για να εντοπιστούν τα μονά ή διπλά σπασίματα της αλυσίδας του DNA στις καλλιέργειες των κυττάρων που εκτέθηκαν στην RF ακτινοβολία, σε σύγκριση με τις καλλιέργειες που δεν εκτέθηκαν. Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον αποτελεσματική στην αποτίμηση της βλάβης στο DNA. Αρχικά τα κύτταρα εμβαπτίζονται σε ένα διάλυμα, διαχωρίζονται και στη συνέχεια υποβάλλονται σε ηλεκτροφόρηση σε αλκαλικό ή ουδέτερο περιβάλλον, για να ανιχνευθούν και να ποσοτικοποιηθούν αντίστοιχα, τα μονά και διπλά σπασίματα της αλυσίδας του DNA. Τα στοιχεία που θεωρήθηκαν ενδεικτικά της βλάβης του DNA είναι η στιγμιαία εμφάνιση ουράς στην αλυσίδα (tail moment, TM) και η επιμήκυνσή της με μορφή κομήτη (comet extend, CE).

Τα αποτελέσματα ήταν αντιφατικά. Τα κύτταρα που εκτέθηκαν για 2 και 21 h, είτε σε iDEN σήμα είτε σε TDMA σήμα με SARs 2.4 και 2.6 $\mu\text{W/g}$ αντίστοιχα, παρουσίασαν μια σημαντική μείωση των TMs. Ωστόσο, μετά από έκθεση 3 ωρών οι τιμές των TMs δείχνουν να αυξάνονται. Σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των CEs ακολουθούν αυτές των TMs. Τα υπόλοιπα κύτταρα που εκτέθηκαν για 2 και 21 h στο iDEN σήμα σε δέκα φορές μεγαλύτερο SAR, δηλαδή 24 $\mu\text{W/g}$, παρουσίασαν μια σημαντική αύξηση των TMs. Περίεργως η έκθεση για 3 ώρες μείωσε τις τιμές των TMs. Αντιθέτως το TDMA σήμα με SAR 26 $\mu\text{W/g}$ για χρόνο έκθεσης 2 h μείωσε τις τιμές των TMs. Το ίδιο προέκυψε και μετά από 3 h έκθεση των κυττάρων στο TDMA σήμα. Τα αποτελέσματα όμως που προέκυψαν από την έκθεση 3 h, δεν θεωρούνται αξιόπιστα, καθώς βασίστηκαν σε δυο μόνο επαναλήψεις του πειράματος ανά κατηγορία.

Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη να μελετηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση της RF ακτινοβολίας τόσο στην άμεση καταστροφή του DNA, όσο και στο ρυθμό με τον οποίο το DNA επισκευάζει τα κατεστραμμένα του τμήματα.

Στην κατεύθυνση αυτή κινήθηκε ο Tice και η ερευνητική του ομάδα [6], που ερεύνησαν τη γενοτοξικότητα των RF σημάτων που εκπέμπονται από κινητά τηλέφωνα, σε ανθρώπινα κύτταρα. Μελέτησαν την καταστροφή του DNA σε λευκά αιμοσφαίρια και τις βλάβες στα χρωμοσώματα των λεμφοκυττάρων. Τα RF σήματα που εξετάστηκαν είναι αυτά που χρησιμοποιούνται από τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών:

Σήμα στα 837MHz, (με διαμόρφωση φωνής) που εκπέμπεται από γεννήτρια αναλογικού σήματος ή από TDMA κινητό τηλέφωνο.

Σήμα στα 837MHz, (χωρίς διαμόρφωση φωνής) που εκπέμπεται από CDMA κινητό τηλέφωνο.

Σήμα στα 1909.8MHz, (με διαμόρφωση φωνής) όπως εκπέμπεται από κινητά τηλέφωνα στο PCS σύστημα.

Για να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία στις συνθήκες έκθεσης και για να γίνουν αξιόπιστες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων τα λευκά αιμοσφαίρια συλλέχθηκαν από δύο υγιείς ενήλικους άνδρες. Τα δείγματα καλλιεργήθηκαν σε δοκιμαστικούς σωλήνες με κατάλληλα διαλύματα και του πρώτου δότη εκτέθηκαν σε αναλογικά,

TDMA και CDMA σήματα, ενώ του δεύτερου στη συχνότητα του PCS. Το σύστημα έκθεσης χρησιμοποίησε δύο εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά (TEM) κελιά σε σειρά, για να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία της κατανομής του SAR στα δοκίμια, αλλά και για να διατηρηθεί η θερμοκρασία σταθερή. Οι μετρήσεις έγιναν στο πρώτο κελί ενώ το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε για ελέγχους της διαδικασίας των μετρήσεων. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες τοποθετήθηκαν σε θαλάμους μέσα στα κελιά, έτσι ώστε η κάτω βάση τους να εκτίθεται πρώτη και ο μεγάλος τους άξονας να είναι παράλληλος στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Για να γίνουν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας ένα probe τοποθετήθηκε περίπου στο κέντρο της βάσης του σωλήνα και ένα δεύτερο περίπου στο μέσο του ύψους του διαλύματος.

Τα δοκίμια εκτέθηκαν για 3 και 24 h στην ακτινοβολία των σημάτων, σε SARs που κυμαίνονταν από 1.0 έως 10 W/kg. Κατά τη διάρκεια της έκθεσης η θερμοκρασία ήταν σταθερή στους $37 \pm 1^\circ\text{C}$, τα δε λευκοκύτταρα εντοπίστηκαν κοντά στον πυθμένα του δοκιμαστικού σωλήνα. Μετά την έκθεση τα λευκοκύτταρα εξετάστηκαν για βλάβες στο DNA τους με τη μέθοδο της αλκαλικής (pH >13) ηλεκτροφόρησης πήγματος ενός μόνο κυττάρου, SCG. Η επίδραση στα χρωμοσώματα εξετάστηκε σε λεμφοκύτταρα εντοπίζοντας τους μικροπυρήνες που εκλύονται από κατεστραμμένα χρωμοσώματα και αποτυγχάνουν να ενσωματωθούν σε θυγατρικούς πυρήνες κατά την κυτταροκίνηση.

Η έκθεση των δοκιμίων σε όλους τους τύπους των σημάτων, τόσο για 3 όσο και για 24 ώρες δεν αύξησε τις βλάβες του DNA στα λευκά αιμοσφαίρια. Όπως και η έκθεση 3 ωρών δεν αύξησε τους μικροπυρήνες ανάμεσα στα λεμφοκύτταρα. Ωστόσο η έκθεση 24 ωρών και στους τέσσερις τύπους σημάτων, σε μέσο SAR 5 και 10 W/kg οδήγησε σε μια σημαντική αύξηση των μικροπυρήνων των λεμφοκυττάρων. Αυτό το αποτέλεσμα προέκυψε και στις επαναλήψεις του συγκεκριμένου πειράματος και είναι ανεξάρτητο από την τεχνολογία, την παρουσία ή απουσία διαμόρφωσης φωνής και την συχνότητα των σημάτων. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι κάτω από παρατεταμένες συνθήκες έκθεσης, τα RF σήματα κινητών τηλεφώνων με μέσο SAR τουλάχιστον 5 W/kg, είναι ικανά να προκαλέσουν καταστροφές στα χρωμοσώματα ανθρώπινων λεμφοκυττάρων. Παρόλα αυτά οι SARs που εντοπίστηκαν οι βλάβες στα χρωμοσώματα είναι, αντίστοιχα, κατά τρεις και πέντε περίπου φορές μεγαλύτεροι από τον μέγιστο επιτρεπόμενο SAR (1.6 W/kg σε 1g ιστού).

Ο Malyara και η ομάδα του [7], χρησιμοποίησε ανθρώπινα κύτταρα σε in vitro καλλιέργειες για να εξετάσει εάν η ακτινοβολία των κινητών τηλεφώνων είναι ικανή να καταστρέψει το DNA τους. Για να εξακριβωθούν οι βλάβες του DNA, από την αλληλεπίδρασή του με την ακτινοβολία, εφαρμόστηκε η μέθοδος της αλκαλικής αποτίμησης του κομήτη (alkaline comet assay, ACA). Τα κύτταρα ήταν τα γλιοβλαστικά U87MG που βρίσκονταν στη φάση του πολλαπλασιασμού τους και εκτέθηκαν σε δυο ειδών διαμορφώσεις συχνότητας. Σε διαμόρφωση συχνότητας συνεχούς κύματος (frequency modulated continuous wave, FMCW) με φέρουσα στα 835.62 MHz και σε CDMA διαμόρφωση στα 847.74 MHz. Οι διαμορφώσεις αυτές επιλέχθηκαν καθώς η FMCW αντιπροσωπεύει την κατάσταση όπου η ενέργεια εναποτίθεται συνεχώς στο στρώμα των κυττάρων, ενώ η CDMA την περίπτωση όπου η ενέργεια εναποτίθεται με παλμούς 40% duty cycle. Έτσι μπορεί να φανεί αν και ποιες επιδράσεις εξαρτώνται και από τη διαμόρφωση της συχνότητας.

Για σύστημα έκθεσης χρησιμοποίησαν ειδικά σχεδιασμένες, ακτινικές γραμμές μετάδοσης (radial transmission lines, RTLs), που εξασφαλίζουν σχετικά ομοιόμορφη έκθεση. Οι θερμοκρασίες μέσα στις RTLs παρακολουθούνταν διαρκώς και διατηρούνταν στους $37 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Οι καλλιέργειες εκτέθηκαν για 2, 4 και 24h

με SAR 0.6 W/kg. Σε κάθε πείραμα τρία δείγματα της καλλιέργειας των ανθρώπινων κυττάρων εκθέτονταν σε διαφορετικές πηγές, για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το πρώτο δείγμα δεχόταν την RF ακτινοβολία στις συχνότητες που αναφέρθηκαν, το δεύτερο πολύ μικρές ποσότητες ακτινοβολίας γ, ενώ το τρίτο δεν δεχόταν κάποια ακτινοβολία. Η έκθεση στην ακτινοβολία γ χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ACA στον εντοπισμό των βλαβών του DNA. Ενώ το δείγμα που δεν εκτέθηκε σε κάποια ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε για να συγκριθεί με αυτό που εκτέθηκε στην RF, ώστε να βρεθούν οι διαφορές στα δυο δείγματα.

Εφαρμόζοντας την ACA, δεν εντοπίστηκαν καταστροφές στο DNA στα U87MG κύτταρα που εκτέθηκαν σε 0.6 W/kg στα 835.62 MHz FMCW ή στα 847.74 MHz CDMA, για 2,4 ή 24 ώρες. Ωστόσο, με αυτή τη μέθοδο εντοπίστηκαν τα κατεστραμμένα τμήματα του DNA των κυττάρων που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία γ. Έτσι, οι ερευνητές κατέληξαν ότι η έκθεση σε συχνότητες κινητών τηλεφώνων με SAR 0.6 W/kg δεν είναι ικανή να προκαλέσει βλάβες στο DNA.

Η ίδια ερευνητική ομάδα [8], ερεύνησε αν η έκθεση, *in vitro*, σε 2450 MHz ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκαλεί καταστροφή του DNA. Χρησιμοποίησε και σε αυτή τη μελέτη ανθρώπινα κύτταρα U87MG, τα οποία ήταν σε φάση πολλαπλασιασμού. Εφάρμοσε πάλι τη μέθοδο ACA, ή αλλιώς SCG (single-cell gel electrophoresis), που είναι η πιο ευαίσθητη για την αποτίμηση της καταστροφής του DNA σε ένα μόνο κύτταρο. Τα κύτταρα εκτέθηκαν σε ακτινοβολία συνεχούς κύματος (continuous wave, CW), 2450 MHz, σε ειδικά σχεδιασμένες RTLs. Οι SARs ήταν 0.7 και 1.9 W/kg. Οι θερμοκρασίες στις RTLs μετρούνταν διαρκώς και διατηρούνταν στους $37 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Σε κάθε πείραμα στην RTL, υπήρχε και ένα δοκίμιο αναφοράς, που δε δεχόταν ακτινοβολία, για να εντοπιστούν οι διαφοροποιήσεις του εκτεθειμένου. Υπήρχε ακόμα ένα τρίτο δοκίμιο που δεχόταν ακτινοβολία γ. Τα κύτταρα ακτινοβολήθηκαν για 2, 4 και 24h. Την έκθεση 2 ωρών ακολούθησαν 4 ώρες εκκόλαψης των κυττάρων στους 37°C . Μετά τις εκθέσεις τα δείγματα εξετάστηκαν με την ACA.

Ενώ τα κύτταρα που δέχτηκαν γ ακτινοβολία εμφάνισαν βλάβες στο DNA τους, στα κύτταρα που εκτέθηκαν για 2, 4 ή 24h σε 2450 MHz CW με SAR 0.7 W/kg δεν ανιχνεύθηκε κάποια καταστροφή στο DNA. Για να εξακριβωθεί εάν μεγαλύτερος SAR είναι ικανός να προκαλέσει βλάβη στο DNA, το πείραμα επαναλήφθηκε με SAR πλέον 1.9 W/kg. Τα συμπεράσματα και πάλι ήταν ίδια. Δεν ανιχνεύθηκε κατεστραμμένο DNA. Όλα τα εκτεθειμένα δοκίμια συγκρίθηκαν με τα δοκίμια αναφοράς (αυτά που δεν είχαν δεχτεί ακτινοβολία). Δεν βρέθηκε κάποια διαφορά. Κατέληξαν λοιπόν, ότι η ακτινοβολία στα 2450 MHz CW στις συνθήκες του πειράματος, δεν προκαλεί ανιχνεύσιμα σπασίματα της αλυσίδας του DNA των ανθρώπινων κυττάρων στους 37°C .

➤ Μελέτες σε κύτταρα πειραματοζώων

➤ *in vitro*

Η προηγούμενη ερευνητική ομάδα στις ίδιες μελέτες της, εκτός από τα γλιοβλαστικά U87MG κύτταρα ανθρώπων, χρησιμοποίησε και ινοβλαστικά C3H 10T1/2 κύτταρα ποντικών, για να εξετάσει τις επιδράσεις της RF ακτινοβολίας. Ακριβώς η ίδια διαδικασία, ίδιες συχνότητες, ίδιες συνθήκες έκθεσης, με τα

πειράματα στα ανθρώπινα κύτταρα έγινε και για τα κύτταρα των ποντικών. Τα αποτελέσματα ήταν ανάλογα.

Τα C3H 10T1/2 κύτταρα, σε φάση πολλαπλασιασμού, εκτέθηκαν μέσα σε RTL για 2, 4 και 24 h σε σήμα FMCW στα 835.62 MHz και σε CDMA σήμα στα 847.74 MHz, με SAR 0.6 W/kg [7]. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων από την ACA δεν έδειξε κάποια διαφορά του DNA ανάμεσα στα κύτταρα που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία και σε αυτά που δεν εκτέθηκαν. Επίσης, η έκθεση σε CW 2450 MHz με SAR τόσο 0.7 W/kg, όσο και 1.9 W/kg δεν διαφοροποίησε τα κύτταρα των ποντικών, σε σχέση με αυτά που δεν εκτέθηκαν [8].

• **in vivo**

Σε μια άλλη μελέτη, εξετάστηκε η καρκινογενετική δράση ορισμένων συστατικών στοιχείων του οργανισμού ζωντανών ποντικών. Σκοπός της έρευνας του Lai και των συνεργατών του [9], είναι να εξακριβώσουν εάν η ενεργοποίηση, από την RF ακτινοβολία, συγκεκριμένων συστατικών του οργανισμού των ποντικών (των endogenous opioids), είναι ικανή να εμπλακεί στο σπάσιμο της αλυσίδας του DNA εγκεφαλικών κυττάρων. Χορηγήθηκε σε ζωντανά ποντίκια μια ουσία αντιόδο (naltrexone), ικανή να αναστείλει τη δράση των στοιχείων αυτών. Εάν μετά την έκθεση στην RF ακτινοβολία παρατηρηθεί μείωση των οπασμάτων της αλυσίδας του DNA τότε η υπόθεση θα ευσταθεί.

Χορήγησαν στα ζωντανά ποντίκια την ανασταλτική ουσία ακριβώς πριν την έκθεσή τους σε 2450 MHz παλμικό σήμα, και στη συνέχεια τα τοποθέτησαν σε ένα σύστημα κυλινδρικών κυματοδηγών για να εκτεθούν στην RF ακτινοβολία. Μολονότι κάποια τοποθετήθηκαν στους κυματοδηγούς, δεν εκτέθηκαν σε ακτινοβολία για να λειτουργήσουν ως ποντίκια αναφοράς. Το σύστημα των κυματοδηγών συνδέθηκε σε πηγή που παρήγαγε 500 παλμούς ανά δευτερόλεπτο, πλάτους 2 μ sec. Η έκθεση μέσα στους κυματοδηγούς είχε διάρκεια 2 h. Η μέση πυκνότητα ισχύος στον κυματοδηγό ήταν 2 mW/cm² που έδωσε μέσο SAR 1.2 W/kg σε όλο το σώμα. Καθώς η ουσία αντιόδο έχει χρόνο ημιζωής περίπου 1 ώρα, χορηγήθηκε και πάλι σε όλα τα ποντίκια, αμέσως μετά το τέλος της έκθεσης. Τα ζώα μετά την έκθεσή τους κρατήθηκαν στα κλουβιά τους για 4 ώρες και στη συνέχεια θανατώθηκαν. Οι εγκεφαλοί τους αφαιρέθηκαν άμεσα για να αποτιμηθούν τα οπασίματα στην αλυσίδα του DNA.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η RF ακτινοβολία αύξησε σημαντικά τα διπλά οπασίματα της αλυσίδας του DNA στα εγκεφαλικά κύτταρα των ποντικών. Το φαινόμενο αυτό αναστάλθηκε μερικώς με τη χορήγηση του αντιόδο. Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται πως τα συστατικά που μελετήθηκαν (endogenous opioids), παίζουν έναν ενδιάμεσο, σημαντικό ρόλο στο σπάσιμο της αλυσίδας του DNA των εγκεφαλικών κυττάρων των ποντικών, από την RF ακτινοβολία.

2.3 Απόπτωση

Η απόπτωση ή ο προγραμματισμένος θάνατος του κυττάρου, είναι ο κύριος μηχανισμός προστασίας από γενοτοξικούς παράγοντες, καθώς τα πιθανά καρκινικά κύτταρα απομακρύνονται με την απόπτωση. Ανωμαλίες στις διαδρομές της απόπτωσης εμπλέκονται σε διάφορες παθολογίες, όπως είναι ο καρκίνος και ασθένειες του ανοσοποιητικού συστήματος. Δυο εργαστήρια, που συμμετέχουν στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα REFLEX, (το οποίο σκοπό έχει την έρευνα των επιδράσεων

της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας), ερευνήσαν τον ρόλο RF πεδίων στην απόπτωση [10]. Εξέτασαν, *in vitro*, εάν τα πεδία GSM-900 και GSM-1800 είναι ικανά να επηρεάσουν την απόπτωση κυττάρων του νευρικού συστήματος (βασικοί νευρώνες και αστροκύτταρα ποντικών), και του ανοσοποιητικού συστήματος (U937 λεμφικά κύτταρα και μονοκύτταρα κύτταρα αίματος του περιφερικού συστήματος ανθρώπων).

Στο πρώτο πείραμα, το σήμα GSM-900 διαμορφωμένο κατά πλάτος από τετραγωνικούς παλμούς συχνότητας 217 Hz duty cycle 1:8 (πλάτος παλμού 0.576 msec) τροφοδοτήθηκε σε μια κεραία. Τα λεμφικά U937 κύτταρα ανθρώπων εκτέθηκαν για 48 h σε SAR 0.7 W/kg, ενώ τα βασικά νευρικά κύτταρα και τα αστροκύτταρα των ποντικών για 1 h εκτέθηκαν σε SAR 2 W/kg.

Στο δεύτερο πείραμα, διαφορετικά GSM-1800 σήματα (βασικό, DTX (ασυνεχής μετάδοση) και ομιλίας) δημιουργήθηκαν σε κυματοδηγούς με επίπεδα SAR που κυμαίνονταν από 0.1 έως 2 W/kg. Μονοκύτταρα κύτταρα αίματος του περιφερικού συστήματος (peripheral blood mononuclear cells, PBMCs) από νεαρούς και ηλικιωμένους δότες εκτέθηκαν για 44 h σε αυτό. Κάποια από τα κύτταρα που εκτέθηκαν στο RF σήμα, είχαν προηγούμενα καλλιεργηθεί με μια ουσία που προκαλεί απόπτωση (2-deoxy-D-ribose, dRib). Κάποια άλλα εκτέθηκαν χωρίς να τους χορηγηθεί αυτή η ουσία.

Η απόπτωση αποτιμήθηκε αμέσως μετά την έκθεση με κυτταρομετρία ροής. Στα U937 κύτταρα αμέσως μετά την έκθεση 48 h στο GSM-900 σήμα και στα PBMCs μετά την 44 h έκθεση στο GSM-1800 δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική ανάπτυξη της απόπτωσης (η σύγκριση έγινε με κύτταρα που δεν είχαν εκτεθεί σε κάποιο πεδίο). Τα PBMCs, τόσο των νεαρών όσο και των ηλικιωμένων δοτών, δεν ήταν ευαίσθητα στο RF σήμα, και το RF δεν επηρέασε την επίδραση της dRib. Τέλος, το GSM-900 σήμα δεν φαίνεται να επηρεάζει την απόπτωση των νευρικών κυττάρων των ποντικών. Ο μεγαλύτερος SAR, 2 W/kg, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ανταποκρίνεται τις οδηγίες για την μέγιστη επιτρεπόμενη έκθεση του πληθυσμού στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

2.4 Επιδράσεις στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων

Η έρευνα για την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην διαδικασία πολλαπλασιασμού των κυττάρων υπαγορεύθηκε από τα ευρήματα προηγούμενων μελετών, που έδειξαν ότι τα ELF πεδία επηρεάζουν τη διαδικασία. Για να μελετήσουν την επιρροή του RF πεδίου στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων, οι Kwee και Paskmark [11] χρησιμοποίησαν κύτταρα ανθρώπων. Το πεδίο δημιουργήθηκε από GSM σήμα στα 960 MHz διαμορφωμένο κατά πλάτος με τετραγωνικούς παλμούς 217 Hz, duty cycle 12%. Μετασχηματισμένα αμνιακά επιθηλιακά κύτταρα (AMA) εκτέθηκαν στο πεδίο μέσα σε έναν TEM θάλαμο. Οι καλλιέργειες των κυττάρων εκτέθηκαν στον TEM θάλαμο σε τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος που έδωσαν τιμές SAR 0.021, 0.21 και 2.1 mW/kg, σε διάρκεια έκθεσης 20, 30 και 40 min, αντίστοιχα. Σε όλα τα πειράματα η θερμοκρασία των κυττάρων διατηρήθηκε σταθερή στους $37 \pm 0.1^\circ \text{C}$.

Οι μεταβολές στο ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων που ακολουθούν την έκθεσή τους στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο της έκθεσης. Βρέθηκε ότι ο ρυθμός πολλαπλασιασμού των κυττάρων που εκτέθηκαν και στα τρία επίπεδα έκθεσης, διαφέρει από αυτόν των κυττάρων που δεν εκτέθηκαν. Ακόμα, παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού πολλαπλασιασμού των

κυττάρων και για τις τρεις τιμές του SAR. Η σχέση ανάμεσα στο χρόνο έκθεσης και στις αλλαγές στον ρυθμό είναι γραμμική, για τα μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα έκθεσης. Στο ενδιάμεσο επίπεδο, με SAR στα 0.21 mW/kg, η γραμμική σχέση δεν είναι ευδιάκριτη.

Στην επόμενη μελέτη τους [12], χρησιμοποίησαν το ίδιο πεδίο και τα ίδια κύτταρα, όπως στην τελευταία, αλλά σε δυο διαφορετικές θερμοκρασίες.

Οι καλλιέργειες των κυττάρων εκτέθηκαν για 30 min, στο RF πεδίο των 960 MHz μέσα σε έναν TEM θάλαμο, σε ισχύ που έδωσε SAR 2.1 μ W/g. Το πείραμα έγινε δυο φορές, μια στους 35°C και μια στους 39°C.

Και στις δυο θερμοκρασίες, οι αλλαγές που εντοπίστηκαν στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων που εκτέθηκαν στο πεδίο, ως προς αυτά που δεν εκτέθηκαν, ήταν σημαντικές και παρόμοιες. Παρατηρήθηκε ότι ήταν σχεδόν ίδιες με αυτές που έγιναν στους 37°C της προηγούμενης μελέτης. Έτσι, η κυτταρική διέγερση που προκαλείται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της μελέτης μπορεί να αλλάξει τον ρυθμό με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το κύτταρο, χωρίς να παίζει ιδιαίτερο ρόλο η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η έκθεση.

2.5 Επιδράσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα

Το ανοσοποιητικό σύστημα παίζει σημαντικό ρόλο στην ομοιόσταση αλλά και στην επιβίωση του οργανισμού. Η έρευνα που έγινε in vivo [13], έχει σκοπό να συγκρίνει τους υποπληθυσμούς λεμφοκυττάρων σπλήνας ποντικών και τη μιτογενετική τους δραστηριότητα που εκθέτονται σε GSM σήμα, με αυτούς που δεν ακτινοβολούνται.

80 ημερών θηλυκά ποντίκια βάρους 180-200 g εκτέθηκαν 2 h τη μέρα για 10 ημέρες σε GSM 900 MHz σήμα με μέση ισχύ 55 και 200 μ W/cm². Τα ποντίκια ήταν κλεισμένα σε θαλάμους που ο μεγάλος τους άξονας ήταν παράλληλος με το ηλεκτρικό πεδίο. Το σήμα εκπέμπονταν από μια χοανοκεραία που βρισκόταν 60 cm πάνω από τα ποντίκια (συνθήκες επίπεδου κύματος). Ο SAR ήταν 0.075 W/kg για τα 55 μ W/cm² και 0.270 W/kg για τα 200 μ W/cm². Σε ίδιους θαλάμους κρατήθηκαν ποντίκια χωρίς να εκτεθούν στο πεδίο, ποντίκια αναφοράς. Τα ποντίκια θανατώθηκαν 24 h μετά την τελευταία έκθεση. Τα λεμφοκύτταρα της σπλήνας τους απομονώθηκαν άμεσα και καλλιεργήθηκαν κατάλληλα για να εντοπιστούν οι αλλαγές.

Ανάμεσα στα 15 ποντίκια που εκτέθηκαν σε ισχύ 55 μ W/cm² και στα 15 που δεν εκτέθηκαν δε βρέθηκε κάποια σημαντική διαφορά. Καμία διαφορά δεν εντοπίστηκε και για τα 10 που εκτέθηκαν σε 200 μ W/cm². Υποδεικνύεται έτσι ότι η in vivo έκθεση σε GSM πεδίο δεν αλλάζει την κανονική συμπεριφορά των λεμφοκυττάρων. Κατά συνέπεια, στις συνθήκες του πειράματος, δεν απειλείται η ακεραιότητα του ανοσοποιητικού συστήματος.

2.6 Επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα

Η πιθανότητα της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων στην διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού, BBB, συγκεντρώνει το ενδιαφέρον των επιστημονικών ερευνών που ασχολούνται με το κεντρικό νευρικό σύστημα. Ο BBB είναι ένας ζωτικός μηχανισμός του οργανισμού

των θηλαστικών που εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του εγκεφάλου, κατά συνέπεια του κεντρικού νευρικού συστήματος. Μελέτες *in vivo* και *in vitro* έχουν γίνει για να διερευνηθεί πόσο μεγάλη είναι η πιθανότητα αυτή. Αρχικά οι μελέτες είχαν γίνει σε πειραματόζωα. Τα ευρήματα όμως ήταν μάλλον ανησυχητικά και οδήγησαν σε μελέτες με ανθρώπινα κύτταρα. Ενδεικτικές μελέτες, *in vivo* και *in vitro*, που έγιναν τόσο σε πειραματόζωα όσο και σε ανθρώπους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

➤ Μελέτες σε πειραματόζωα

➤ Μελέτες *in vivo*

Οι Persson και Salford [14] ερευνήσαν τις βιολογικές επιδράσεις των RF ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στον BBB 344 ποντικών. Οι ποντικοί, που ήταν και από τα δυο φύλα, δεν ήταν αναισθητοί κατά τη διάρκεια της έκθεσης στο πεδίο. Μετά το τέλος της έκθεσής τους αναισθητοποιήθηκαν, θανατώθηκαν και αφαιρέθηκαν οι εγκεφαλοί τους για να καλλιεργηθούν σε κατάλληλα διαλύματα ώστε να μελετηθούν τα αποτελέσματα στον BBB.

Τα ποντίκια εκτέθηκαν σε έναν θάλαμο εγκάρσιας ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης (Transverse Electromagnetic Transmission, TEM), σε 915 MHz συνεχούς κύματος, CW, και παλμικά διαμορφωμένων σημάτων με διαφορετικές ισχύς παλμών και διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η ισχύς των CW κυμάτων μεταβάλλεται από 0.001 W έως 10 W ενώ οι χρόνοι έκθεσης από 2 min έως 960 min. Τα παλμικά σήματα διαμορφώθηκαν στα 217 Hz με πλάτος παλμού 0.57 msec, και στα 50 Hz με πλάτος παλμού 6.6 msec. Σε κάθε πείραμα, στα 4 – 6 ποντίκια που τοποθετήθηκαν στους θαλάμους και εκτέθηκαν στην ακτινοβολία, αντιστοιχούσαν 2 – 4 ποντίκια αναφοράς (ή ελέγχου) τα οποία ενώ τοποθετήθηκαν στους θαλάμους δεν ακτινοβολήθηκαν. Συνολικά εξετάστηκαν 630 ποντίκια που εκτέθηκαν σε διαφορετικά πεδία, και 372 που αποτέλεσαν τα ποντίκια ελέγχου.

Οι ερευνητές για να βρουν πως επηρεάζεται η διαπερατότητα του BBB μετά από την έκθεση στο πεδίο, μελέτησαν τη συμπεριφορά ενδογενών ιόντων λευκωματίνης (albumin). Δεν χρησιμοποίησαν κάποια ραδιενεργή ουσία – ιχνηθέτη, για να παρατηρήσουν την κίνηση των ιόντων. Ανέπτυξαν μια ιστοπαθολογική τεχνική, που ανιχνεύει το πέρασμα (ακόμα και μικρών) ποσοτήτων λευκωματίνης από ανοιχτό BBB και την εναπόθεσή τους στον περιβάλλοντα εγκεφαλικό ιστό. Έτσι εντοπίζονται τα παθολογικά ποντίκια, στον εγκεφαλο των οποίων αυξάνεται η εισροή ιόντων λευκωματίνης.

Τα κρούσματα των παθολογικών ποντικών αυξήθηκαν σημαντικά στην ομάδα των ποντικών που εκτέθηκε στην ακτινοβολία, σε σχέση με την ομάδα αναφοράς. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα περισσότερα παθολογικά ποντίκια άνηκαν στην ομάδα που εκτέθηκε στο πεδίο συνεχούς κύματος. Ανάμεσα στα παθολογικά ποντίκια που άνηκαν στην ομάδα που εκτέθηκε στα διαφορετικά παλμικά πεδία, δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές που να σχετίζονται με το είδος του παλμού.

Σύμφωνα λοιπόν με τα ευρήματα των ερευνητών η έκθεση των ποντικών στην RF ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκάλεσε μια σαφή αλλαγή της συμπεριφοράς του αιματοεγκεφαλικού φραγμού του εγκεφάλου τους. Στα πειράματά τους φάνηκε πως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει τη διαρροή λευκωματίνης στον εγκεφαλο, διαμέσου του BBB, γεγονός που είναι επικίνδυνο για τον οργανισμό.

➤ **Μελέτες in vitro**

Καλλιέργειες κυττάρων, αστροκύτταρα από ποντίκια και τριχοειδή ενδοθηλιακά κύτταρα από χοιρινά, εκτέθηκαν σε 1800 MHz GSM σήμα [15]. Η διαπερατότητα των κυττάρων αυτών συγκρίνονταν, και τις τέσσερις ημέρες που διήρκησε η έκθεση, με τη διαπερατότητα όσων κυττάρων είχαν κρατηθεί ως κύτταρα αναφοράς και δεν εκτέθηκαν. Για να εκτιμηθεί η μεταβολή παρατηρήθηκε η ουσία σακχαρόζη. Το πεδίο GSM 1800 αύξησε, και στην περίπτωση αυτή, τη διαπερατότητα των κυττάρων.

➤ **Μελέτες σε ανθρώπους**

Οι μελέτες που έγιναν στα πειραματόζωα υπέδειξαν τη συσχέτιση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με αλλαγές στη διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού. Έτσι, οι ερευνητές οδηγήθηκαν στην περαιτέρω μελέτη του φαινομένου, χρησιμοποιώντας ανθρώπινα κύτταρα.

Μια μελέτη [16] έγινε για να εξακριβωθεί αν η μη – θερμική έκθεση κυττάρων στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κινητού τηλεφώνου που εξέπεμπε στα 900 MHz GSM, ενεργοποιεί τη μετάδοση κυτταρικών σημάτων διαμέσου των διαδρομών μετάδοσης σήματος και παράγει κυτταρικές αντιδράσεις πίεσης στον ανθρώπινο οργανισμό. Χρησιμοποιήθηκαν ανθρώπινα ενδοθηλιακά κύτταρα (συγκεκριμένα τα EA.hy926), και εξετάστηκε η μεταβολή της φωσφορυλίωσης των πρωτεϊνών, η οποία είναι ενδεικτική της ενεργοποίησης των διαδρομών μετάδοσης των κυτταρικών σημάτων. Η επιρροή του πεδίου του κινητού στην κυτταρική αντίδραση πίεσης μελετήθηκε εξετάζοντας την συμπεριφορά και την φωσφορυλίωση των πρωτεϊνών, κυρίως δε της πρωτεΐνης heat shock protein-27, hsp27.

Τα κύτταρα εκτέθηκαν για μια ώρα σε σήμα κινητού 900 MHz GSM, με SAR 2 W/kg. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου ενεργοποιεί τις διαδρομές μετάδοσης κυτταρικών σημάτων αλλά και την αντίδραση πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν αλλαγές τόσο στο επίπεδο της φωσφορυλίωσης διαφόρων πρωτεϊνών, ιδιαίτερα δε παροδική αύξηση της φωσφορυλίωσης της πρωτεΐνης hsp27, όσο και στη διαδρομή μετάδοσης σήματος p38MAPK. Η ενεργοποίηση των μηχανισμών αυτών (που, υπό φυσιολογικές συνθήκες ρυθμίζονται από το κεντρικό νευρικό σύστημα) από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός κινητού μπορεί να αλλάξει τη φυσιολογία και την κανονική λειτουργία του κυττάρου, και κατ' επέκταση να είναι επιβλαβής για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Οι αλλαγές στη φωσφορυλίωση των πρωτεϊνών, υποδεικνύουν ότι η ακτινοβολία ενός κινητού τηλεφώνου ενεργοποιεί διαφορετικές διαδρομές μετάδοσης κυτταρικών σημάτων, μεταξύ άλλων και τη διαδρομή αντίδρασης πίεσης hsp27/ p38MAPK. Βασισμένοι στις γνωστές λειτουργίες της hsp27 οι ερευνητές [16] υπέθεσαν ότι η ενεργοποίηση της hsp27 με το πεδίο ενός κινητού τηλεφώνου μπορεί :

Να διευκολύνει την ανάπτυξη καρκίνου στον εγκέφαλο, μέσω της ενίσχυσης μιας συγκεκριμένης διαδρομής που οδηγεί το κύτταρο σε απόπτωση

Να αυξήσει την διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού, μέσω της σταθεροποίησης ινών πίεσης σε ενδοθηλιακά κύτταρα που περιβάλλουν τα τριχοειδή αγγεία του εγκεφάλου.

Συνέχισαν τη μελέτη τους [17] για να ερευνήσουν πλέον αν οι φυσιολογικές αντιδράσεις των ενδοθηλιακών κυττάρων, που σχετίζονται με τη συμπεριφορά της hsp27 και που μπορούν να επηρεάσουν τη διαπερατότητα του BBB, προκύπτουν σε καλλιέργειες ανθρώπινων ενδοθηλιακών (EA.hy926) κυττάρων που βρίσκονται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κινητού τηλεφώνου.

Τα κύτταρα εκτέθηκαν για μια ώρα σε 900 MHz GSM σήμα κινητού με μέσο SAR 2 W/kg. Η θερμοκρασία στις καλλιέργειες των κυττάρων διατηρήθηκε σταθερή στους $37 \pm 0.3^\circ C$.

Όπως αναμενόταν, η έκθεση για μια ώρα στο πεδίο του κινητού αύξησε την κινητικότητα της hsp27.

Τα φαινόμενα που περιγράφηκαν, όταν επαναλαμβάνονται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να γίνουν επικίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό καθώς σχετίζονται με πιθανή καταστροφή του εγκεφαλικού ιστού.

2.7 Επίδρασεις στη συμπεριφορά

Μελέτες έχουν γίνει σε εθελοντές αλλά και σε πειραματόζωα για να διερευνηθεί η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας των κινητών τηλεφώνων σε λειτουργίες του οργανισμού νευροφυσιικής προέλευσης. Οι διαταραχές στη μνήμη, στην ικανότητα συγκέντρωσης, στον προσανατολισμό αλλά και στον ύπνο ερευνήθηκαν υπό την επίδραση GSM σήματος.

2.7.1 Μελέτες σε ανθρώπους

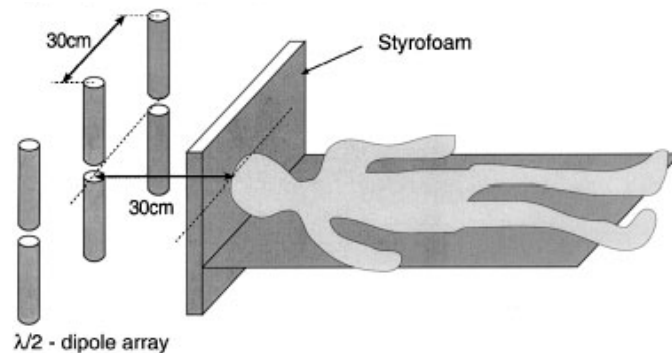
Μια μελέτη που έγινε από διάφορους φορείς στις Ελβετίας [18], επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των επιδράσεων των RF πεδίων, διαφορετικών SARs, κατά τη διάρκεια του ύπνου στο ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (electroencephalogram, EEG) και στον καρδιακό ρυθμό. Τα αργά κύματα (0.75 – 4.5 Hz) και οι άξονες του ύπνου (12 – 15 Hz), οι δυο αθόρυβες φιγούρες της μη απότομης κίνησης του ματιού (non-rapid eye movement, nonREM) στον ύπνο, μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες της κανονικής διαδικασίας του ύπνου. Πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι ταλαντώσεις στο EEG σχετίζονται στενά με κυτταρικές αλλαγές στο επίπεδο των νευρώνων του θαλάμου και του φλοιού του εγκεφάλου. Ο ύπνος είναι μια ενδογενής, αυτοδιατηρούμενη εγκεφαλική διαδικασία, και το EEG του έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν και οι πλέον μικρές φυσιολογικές ή φαρμακολογικές επιδράσεις.

Στην έρευνα που έγινε, αναλύθηκαν οι επιδράσεις της έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, δυο διαφορετικών κατανομών του SAR, στην τοπογραφία του EEG και στον καρδιακό ρυθμό αλλά και στην μεταβλητότητα του ρυθμού. Οι δυο μελέτες που έγιναν, δεν διέφεραν μόνο στην κατανομή του SAR στον εγκέφαλο, αλλά και στο χρόνο έκθεσης κατά τη διάρκεια του ύπνου. Για να μετρηθεί ο SAR στις διαφορετικές δομικές περιοχές του εγκεφάλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης SEMCAD, που εφαρμόζει FDTD ανάλυση σε ένα ανατομικό μοντέλο του κεφαλιού.

Στο πείραμα 1 καταγράφηκε ο ύπνος 24 υγιών, νεαρών, δεξιόχειρων ανδρών κατά τη διάρκεια της νύχτας που ήταν εκτεθειμένοι στην RF, αλλά και τη νύχτα

που δεν εκτέθηκαν. Το πείραμα περιελάμβανε δυο συνεδρίες σε δυο νύχτες, μιας εβδομάδας απόσταση η μια από την άλλη. Κατά τη διάρκεια της νύχτας έκθεσης το RF σήμα διακοπτόταν για 15 min και συνέχιζε μετά, ενώ την προηγούμενη νύχτα γίνονταν οι μετρήσεις απουσία σήματος. Ένα ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, ένα ηλεκτρομυογράφημα (electromyogram, EMG), ένα ηλεκτροοφθαλμογράφημα (electrooculogram, EOG) και ένα ηλεκτροκαρδιογράφημα (electrocardiogram, EKG) κατέγραφαν συνεχώς τις μετρήσεις, συνδεδεμένα με έναν ενισχυτή. Στο EKG αποθηκεύονταν τα RR διαστήματα (το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο συνεχόμενων R κυμάτων) και ο καρδιακός ρυθμός ανά 20 sec (χτύποι το λεπτό, όπως υπολογίστηκαν στο κύριο RR διάστημα). Για να αποφευχθεί η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση των συσκευών με το RF σήμα τοποθετήθηκαν (οι συσκευές) σε μεταλλικά κουτιά με φίλτρα σε όλες τις συνδέσεις. Οι άνδρες μαγνητοσκοπούνταν καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας.

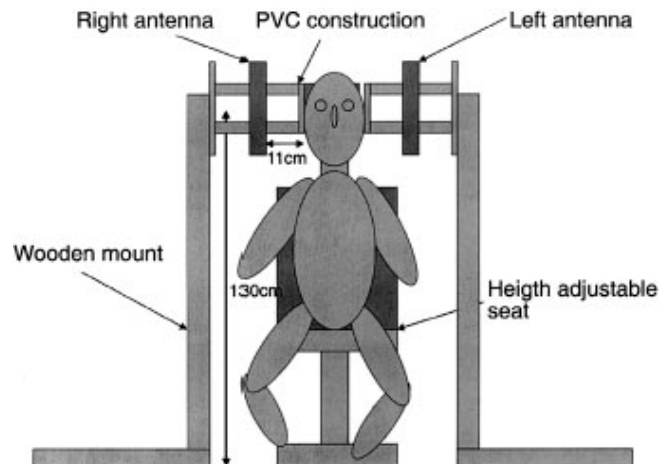
Σκοπός του πειράματος ήταν η έκθεση των κεφαλιών των ανδρών να γίνει με τον πλέον ομογενή τρόπο και ανεξάρτητα από τη θέση των σωμάτων κατά τη διάρκεια του ύπνου. Αυτό επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση σε σειρά τριών κεραιών, $\lambda/2$ δίπολα, 30 cm πίσω από το κεφάλι κάθε ξαπλωμένου άνδρα. Αυτό το σύστημα κοντινού πεδίου εξασφαλίζει καλά καθορισμένες, ομοιόμορφες συνθήκες έκθεσης στον χώρο όπου βρίσκεται το κεφάλι. Γύρω από το κρεβάτι και τις κεραίες τοποθετήθηκαν απορροφητικοί τοίχοι που εμποδίζουν την αλληλεπίδραση του πεδίου με το περιβάλλον. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται η εικονογράφιση του συστήματος έκθεσης ενός άνδρα.



εικόνα 2.1 Σχεδιάγραμμα της θέσης των εθελοντών ως προς το σύστημα εκπομπής της ακτινοβολίας στο πείραμα 1.

Στο πείραμα 2, 16 υγιείς, νεαροί, δεξιόχειρες άνδρες (ένας εκ των οποίων συμμετείχε και στο πείραμα 1) εκτέθηκαν σε RF ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για 30 min πριν από έναν 3h πρωινό ύπνο. Μεσολάβησαν 10 min από το τέλος της έκθεσης μέχρι να οθήσουν τα φώτα. Για να εξασφαλιστεί συνεχόμενος ύπνος κατά τη διάρκεια του πρωινού το προηγούμενο βράδυ ο ύπνος τους είχε περιοριστεί στις 4 h. Οι άνδρες παρέμεναν στο εργαστήριο και παρακολουθούνταν συνεχώς και στις δυο περιόδους του ύπνου τους. Τρεις συνεδρίες έγιναν με απόσταση μιας εβδομάδας μεταξύ τους, στην πρώτη εκτέθηκε το δεξιό ημισφαίριο, στη δεύτερη το αριστερό και στην τρίτη το κεφάλι δεν εκτέθηκε σε κάποιο σήμα. Οι μετρήσεις έγιναν όπως και στο πείραμα 1.

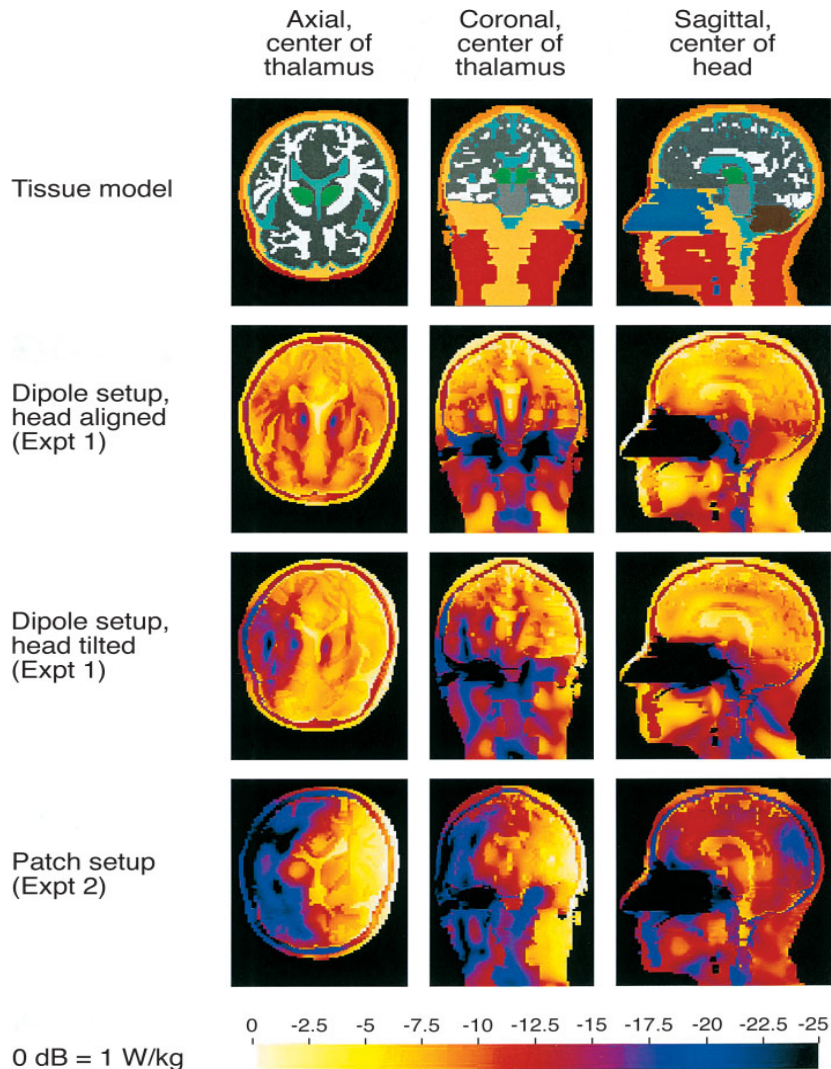
Το πείραμα 2 είχε στόχους τους εξής στόχους : πρώτον την μονομερή έκθεση για να εξετάσει την υπόθεση ότι η μη συμμετρική έκθεση προκαλεί μη συμμετρικές αντιδράσεις στο EEG, δεύτερον παρόμοια έκθεση με αυτή ενός κινητού τηλεφώνου και τρίτον την ελαχιστοποίηση των διαφορών της έκθεσης από άνδρα σε άνδρα. Οι στόχοι αυτοί επιτεύχθηκαν τοποθετώντας επίπεδες ορθογώνιες βροχοκεραίες εκατέρωθεν του κεφαλιού. Η θέση των κεραιών ήταν τέτοια που εξασφάλιζε ομοιόμορφο SAR στο εκτεθειμένο ημισφαίριο και σημαντική διαφορά στην τιμή του ανάμεσα στο εκτεθειμένο και μη εκτεθειμένο ημισφαίριο. Η απόσταση ανάμεσα στην κεραία και στο κεφάλι ήταν 115 ± 5 mm με το κέντρο της κεραίας 42 ± 10 mm κάθετα πάνω από το αυτί. Η μέση τιμή του SAR στο εκτεθειμένο ημισφαίριο ήταν οχτώ φορές μεγαλύτερος από αυτόν του μη εκτεθειμένου ημισφαιρίου. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η εικονογράφιση του συστήματος του πειράματος 2.



εικόνα 2.2 Σχεδιάγραμμα της τοποθέτησης των εθελοντών ως προς το σύστημα έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο πείραμα 2.

Και στα δυο πειράματα η ισχύς εισόδου ρυθμίστηκε έτσι ώστε να δίνει τον ίδιο SAR, 1 W/kg σε 10g, ενώ χρησιμοποιήθηκε και το ίδιο GSM σήμα. Η κατανομή του SAR μέσα στον εγκέφαλο, αλλά και σε κάθε ιστό ξεχωριστά, υπολογίστηκε προσομοιώνοντας το κεφάλι και τις κεραιές με το πρόγραμμα SEMCAD. Στο πείραμα 1 εξετάστηκε η κατανομή του SAR για δυο θέσεις του κεφαλιού ως προς την κεραία, η πρώτη όταν το κεφάλι ήταν ευθυγραμμισμένο με την κεραία και η δεύτερη όταν ήταν στραμμένο κατά 45° . Στο πείραμα 2 μια μόνο ήταν η δυνατή θέση του κεφαλιού ως προς την κεραία. Οι κατανομές του SAR σε όλες της περιπτώσεις παρουσιάζονται στην εικόνα 2.3 Στην πρώτη σειρά παρουσιάζονται τρεις τομές του ανατομικού μοντέλου του κεφαλιού όπου με τα διαφορετικά χρώματα φαίνονται οι μοντελοποιημένοι ιστοί. Στη δεύτερη σειρά είναι η κατανομή του SAR όταν το κεφάλι είναι ευθυγραμμισμένο με την κεραία στο πείραμα 1, ενώ στην τρίτη σειρά όταν είναι στραμμένο κατά 45° . Στην τελευταία σειρά είναι η κατανομή του SAR στο πείραμα 2. Η κλίμακα στο τέλος αντιστοιχεί τα χρώματα με την τιμή του SAR. Στα 0 db (Λευκό) αντιστοιχεί ο μέγιστος SAR, 1 W/kg. Παρατηρώντας τις εικόνες φαίνεται ότι ο μεγαλύτερος SAR βρίσκεται στο πείραμα 2, στην περιοχή γύρω και μέσα από το αυτί του εκτίθεται στην ακτινοβολία της κεραίας, ενώ μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή ακτινοβολίας. Φαίνεται έντονα και η διαφορά ανάμεσα στο ημισφαίριο που

εκτίθεται στην ακτινοβολία και σε αυτό που δεν εκτίθεται. Στο πείραμα 1 ο μέγιστος SAR εντοπίζεται στην κορυφή του κεφαλιού. Εδώ η κατανομή του διαφέρει ανάλογα με τη θέση του κεφαλιού. Και στα δυο πειράματα όμως, η μέγιστη τιμή του SAR βρίσκεται στην εγγύτερη προς την κεραία περιοχή.



εικόνα 2.3 Οι κατανομές του SAR όπως προέκυψαν από προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με το των εθελοντών, και για τα δυο συστήματα έκθεσης.

Τα κινητά τηλέφωνα μπορούν να εκθέσουν τον χρήστη σε μεγαλύτερα επίπεδα SAR, έως 2 W/kg. Οι συνθήκες έκθεσης στο πείραμα 2 μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις χειρότερες συνθήκες έκθεσης στο πεδίο ενός κινητού τηλεφώνου, παρόλο που το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό ενός συνηθισμένου τηλεφώνου, ακόμα και από την χειρότερη περίπτωση έκθεσης σε πεδίο κινητού.

Στο πείραμα 1 η nonREM ισχύς στο EEG του ύπνου αυξήθηκε ήδη από τα πρώτα 15 min έκθεσης, στις φασματικές περιοχές 11.5 – 12.25 Hz και 13.5 – 14 Hz. Στο πείραμα 2 παρατηρήθηκε η ίδια αντίδραση και στα δυο ημισφαίρια αλλά ήταν περισσότερο σαφής στο αριστερό ημισφαίριο όπου η nonREM ισχύς στο EEG του ύπνου αυξήθηκε στην περιοχή του φάσματος 9 – 13.5 Hz ανεξαρτήτως πιο

ημισφαίριο δεχόταν την ακτινοβολία. Και στα δυο πειράματα δεν παρατηρήθηκε κάποια επίδραση της ακτινοβολίας στο EEG κατά το ξύπνημα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν επηρέασε τον καρδιακό ρυθμό. Στο πείραμα 1 ο καρδιακός ρυθμός δεν επηρεάστηκε όταν οι εθελοντές εκτέθηκαν κατά τη διάρκεια του ύπνου, ωστόσο επηρεάστηκε η μεταβλητότητα του ρυθμού. Η φασματική ανάλυση των RR διαστημάτων έδειξε μείωση της ισχύος στη φασματική περιοχή 0.10 – 0.11 Hz, στο διάστημα μεταξύ της στιγμής που έκλεισαν τα φώτα και της στιγμής που άρχισε ο ύπνος. Στο πείραμα 2 δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφοροποίηση του καρδιακού ρυθμού μεταξύ των τριών συνθηκών έκθεσης. Η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού άλλαξε κατά τη διάρκεια των 3 h ύπνου αλλά όχι κατά την πρώτη μισή ώρα του nonREM ύπνου. Η ισχύς στην περιοχή 0.18 – 0.22 Hz του φάσματος αυξήθηκε κατά $47.4 \pm 17.8 \%$ στη διάρκεια των 3 h του ύπνου.

Τα στοιχεία αυτά έδειξαν ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα επιδρά στη φυσιολογία του εγκεφάλου. Οι αλλαγές στην ισχύ στο EEG φαίνονται καθαρά όταν οι εθελοντές είναι εκτεθειμένοι κατά τη διάρκεια του ύπνου τους στην ακτινοβολία. Οι προσομοιώσεις της κατανομής του SAR στον εγκέφαλο υποστηρίζουν την υπόθεση ότι δομές του εγκεφάλου είναι υπεύθυνες για τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν στα EEG του ύπνου.

Μια άλλη έρευνα έγινε σε εργαστήρια στην Αγγλία [19] για να εξεταστεί αν η εκπομπή ενός κινητού τηλεφώνου στα 915 MHz μπορεί να επηρεάσει τη γνωστική λειτουργία του ανθρώπου.

Τριάντα έξι υγιείς εθελοντές αποτέλεσαν τις δυο ομάδες μελέτης. Η πρώτη με 18 (εννέα άνδρες και εννέα γυναίκες) μέλη, εθελοντές από το προσωπικό του νοσοκομείου και ηλικίες από 21 – 60 χρόνια. Η δεύτερη ομάδα (εννέα άνδρες, εννέα γυναίκες) με ηλικίες 20 – 28 χρονών, ήταν εθελοντές φοιτητές και χρησιμοποιήθηκαν, αφού έγινε η έρευνα με την πρώτη ομάδα, για να ενισχυθεί η στατιστική δύναμη της μελέτης αλλά και για να εξεταστεί αν στοιχεία όπως η ποσότητα του ύπνου, η κατανάλωση καφέ και αλκοόλ ή η χρήση φαρμάκων μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Αφού απάντησαν σε ερωτηματολόγια με τις συνήθειές τους ξεκίνησε η πρώτη φάση της μελέτης (η έρευνα συνολικά είχε τρεις φάσεις), ενώ μετά το τέλος κάθε φάσης έγιναν τεστ για να εκτιμηθεί ή γνωστική τους λειτουργία.

Οι εθελοντές φορούσαν στα κεφάλια τους ένα σύστημα που κρατούσε το κινητό σε σταθερή θέση. Η συσκευή δεν ήταν μια εμπορική συσκευή κινητού αλλά ένα μοντέλο. Το μοντέλο του κινητού ήταν στο αριστερό αυτί προσανατολισμένο έτσι ώστε να αντιστοιχεί στη συνήθη θέση κατά τη χρήση του τηλεφώνου από τους ανθρώπους. Η κεραία του βρισκόταν κοντά στον κρόταφο (κοντά σε λεπιδοειδή επιθηλιακά κύτταρα).



εικόνα 2.4 Το σύστημα έκθεσης των εθελοντών στην ακτινοβολία. Φαίνεται πως ένα μοντέλο κινητού είναι προσαρμοσμένο στο κεφάλι ενός εθελοντή και πως λαμβάνονται οι μετρήσεις.

Στην πρώτη φάση το τηλέφωνο δεν ενεργοποιείται, γίνονται τεστ χωρίς να έχει προηγηθεί εκπομπή ακτινοβολίας. Στη δεύτερη φάση η κεραία τροφοδοτείται με ημιτονοειδές σήμα στα 915 MHz και η ισχύς που εκπέμπει είναι περίπου 1 W. Στην τρίτη φάση το σήμα είναι διαμορφωμένο με 217 Hz τετραγωνικό παλμό με duty cycle 12.5%, ενώ η ισχύς εξόδου της κεραίας είναι 0.125 W. Στη διάρκεια της εκπομπής των σημάτων οι εθελοντές απαντούσαν σε διάφορα τεστ γνωστικής ικανότητας που διήρκησαν περίπου 30 min. Τα τεστ ήταν σχεδιασμένα να εξετάζουν, εκτός των άλλων, τον χρόνο αντίδρασης όταν χρειαζόταν να γίνει κάποια επιλογή και τις ικανότητες της μνήμης.

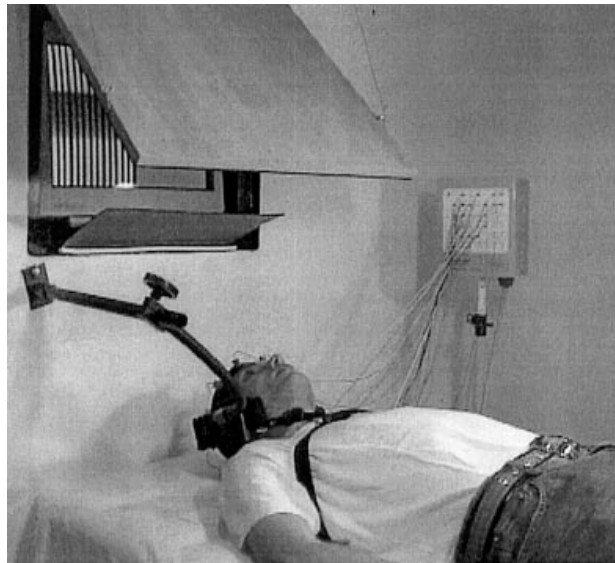
Και τα δυο σήματα εκπομπής μείωσαν το χρόνο αντίδρασης των 18 εθελοντών της πρώτης ομάδας, δηλαδή η ταχύτητα της αντίδρασης αυξήθηκε. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε έντονα και στη δεύτερη ομάδα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο χρόνος αντίδρασης αυξήθηκε περισσότερο κατά την έκθεση στο αναλογικό σήμα από ότι στο ψηφιακά διαμορφωμένο. Αυτό μπορεί να σχετίζεται με την επίδραση στο σημείο του εγκεφάλου μεταξύ του οπτικού και του κέντρου ομιλίας, που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κεραία. Η επίδραση μπορεί να σχετίζεται με τοπική θέρμανση της περιοχής, ή με μια μη θερμική αντίδραση. Δεν βρέθηκαν αλλαγές στην ικανότητα ανάκλησης λέξης, εικόνας ή αριθμού. Τα τεστ της δεύτερης ομάδας έδειξαν ότι η κατανάλωση διαφόρων ουσιών ή ο χρόνος του ύπνου δεν διαφοροποιεί τα αποτελέσματα από αυτά της πρώτης ομάδας.

Ωστόσο, αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την νευροφυσιολογική αντίδραση της περιοχής του εγκεφάλου που ακτινοβολείται. Οι αντιδράσεις μπορεί να μην είναι επικίνδυνες ή μόνιμες, καθώς οι πραγματικές τηλεφωνικές συνδιαλέξεις με κινητά τηλέφωνα δεν διαρκούν τόσο όσο στη μελέτη αυτή, αν και η θέση, το μέγεθος και η ισχύς του μοντέλου του κινητού που χρησιμοποιήθηκε προσεγγίζει με σχετική ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες.

Η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του κινητού τηλεφώνου εξετάστηκε στο EEG και στα Βιωματικά Δυναμικά (Event – Related Potentials, ERP) σε ασθενείς που έπασχαν από ναρκοληψία – καταληψία [20]. Οι ασθενείς με ναρκοληψία κοιμούνται ξαφνικά σε ήρεμες καταστάσεις, κυρίως όταν επαναλαμβάνονται μονότονα καταστάσεις. 22 ασθενείς (9 άνδρες, 13 γυναίκες μέσης ηλικίας 48 ετών) με ναρκοληψία εκτέθηκαν για 45 min στο πεδίο ενός κινητού που είχε τοποθετηθεί στο δεξι αυτί τους. Το κινητό δεν ήταν πραγματικό

τηλέφωνο αλλά μοντέλο τηλεφώνου, η κεραία του οποίου εξέπεμπε στα 900 MHz με SAR 0.06 W/kg.

Δέκα εφτά ασθενείς ήταν συνδεδεμένοι σε ηλεκτροεγκεφαλογράφο και καταγράφονταν οπτικά ERP. Πριν από τα πειράματα κάθε ασθενής κοιμήθηκε για 20 min. Το ERP άρχισε να καταγράφει τα δεδομένα 5 min αφότου το κινητό τέθηκε σε λειτουργία. Στο 45 min σταμάτησε η λειτουργία του κινητού ενώ από το 60 min άρχισε να καταγράφει το EEG, ενώ ο ασθενής κοιμόταν. Το προηγούμενο βράδυ είχε γίνει πάλι το πείραμα στις ίδιες συνθήκες, με τη διαφορά ότι το τηλέφωνο δεν εξέπεμπε κάποιο σήμα. Στις επόμενες εικόνες (εικόνα 2.5 και εικόνα 2.6) φαίνεται ένας ασθενής συνδεδεμένος με το σύστημα του κινητού αλλά και με το EEG κατά τη διάρκεια της εκπομπής του κινητού καθώς γίνονται τεστ για να εξαχθούν τα οπτικά ERP.

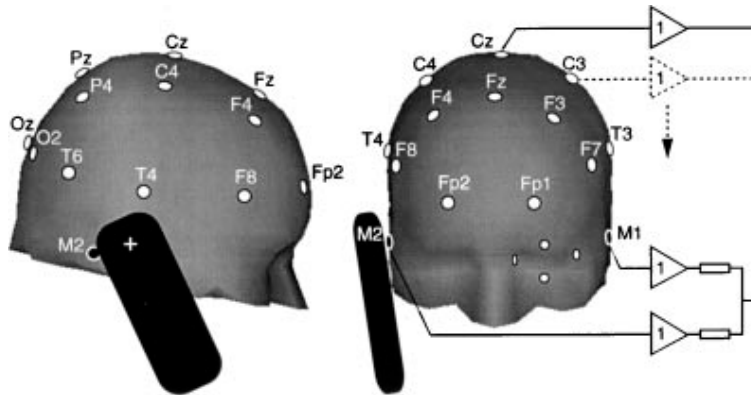


εικόνα 2.5 Παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης ενός ασθενή με τη συσκευή του κινητού και με το EEG.



εικόνα 2.6 Η λήψη αυτή εστιάζει στο κεφάλι του ασθενή και φαίνεται πιο καθαρά ο τρόπος που είναι συνδεδεμένος με το κινητό και τις απαγωγές του EEG.

Τα οπτικά ERP εκμαιεύτηκαν με τεστ που βασιζόνταν στη διάκριση κάποιων σχετικά σπάνιων στόχων (οριζόντιες ρίγες) που εμφανίζονταν ψευδοτυχαία ανάμεσα στα πιο συχνά, δεδομένα στοιχεία (κάθετες ρίγες). Όλες οι ρίγες ήταν άσπρες και μαύρες και προβάλλονταν σε μια οθόνη 21 ιντσών σε απόσταση 90 cm από τον ασθενή. Ζητήθηκε από τους ασθενείς να έχουν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος συγκεντρωμένο το βλέμμα τους στον κόκκινο σταυρό στο κέντρο της οθόνης. Τους ζητήθηκε αμέσως μόλις αναγνωρίσουν το στοιχείο στόχο να πατήσουν το πλήκτρο ενός υπολογιστή με τον δεξιό τους δείκτη. Σωστή αντίδραση θεωρήθηκε το πάτημα του πλήκτρου με την εμφάνιση κάποιας οριζόντιας ρίγας στο δεξιό μέρος, στο αριστερό ή σε ολόκληρη την οθόνη. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε σε 12.5 min. Το ERP καταγράφηκε με ένα EEG χρησιμοποιώντας τις τυποποιημένες απαγωγές στην επιφάνεια του κεφαλιού με το σύστημα 10 – 20. Οι θέσεις των απαγωγών φαίνονται στην εικόνα 2.7. Το σήμα από όλα τα κανάλια πέρασε από ψηφιακό φίλτρο όπου κόπηκαν οι συχνότητες κάτω από τα 0.05 Hz και πάνω από τα 30 Hz και έγινε δειγματοληψία με συχνότητα 1000 Hz.



εικόνα 2.7 Στα σχεδιαγράμματα των δυο όψεων του κεφαλιού φαίνονται οι θέσεις των απαγωγών του EEG που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν τα οπτικά ERP.

Για το EEG ζητήθηκε από τους ασθενείς να μείνουν ξαπλωμένοι, με τα μάτια κλειστά, χωρίς να αντισταθούν στον ύπνο. Το EEG κατέγραφε στοιχεία για 20 min ξεκινώντας την εγγραφή 15 min μετά το τέλος της εκπομπής της κεραίας του μοντέλου του κινητού. Όλες οι λανθάνουσες καταστάσεις σχετίστηκαν με την κίνηση κατά το κλείσιμο του ματιού, με την επαγωγή του άλφα ρυθμού. Το διάστημα από την έναρξη των άλφα κυμάτων μέχρι την εμφάνιση των θήτα κυμάτων ή της REM κατάστασης του ύπνου ήταν το μέτρο της λανθάνουσας κατάστασης του ύπνου. Η τελευταία παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η λανθάνουσα περίοδος της πρώτης εμφάνισης του K συμπλέγματος.

Όλες οι παράμετροι του EEG που μελετήθηκαν μετά από την εκπομπή ενός RF σήματος δεν διέφεραν από τις συνήθεις τιμές τους. Η ίδια παρατήρηση έγινε και στο ERP όπου δεν μειώθηκε το πλάτος του, ενώ φάνηκε ότι μειώθηκε ο χρόνος αντίδρασης στα τεστ. Αντίθετα με τις προσδοκίες, τα ERPs που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια 45 min έκθεσης στο πεδίο του κινητού δεν έδειξαν μειωμένη επαγρύπνηση ή μειωμένη διάθεση για ύπνο. Αυτό θα ήταν το επακόλουθο της μείωσης του πλάτους του ERP. Δεν υπήρξαν σημάδια αυξημένης υπνηλίας στο

EEG που ακολούθησε μετά την εκπομπή του κινητού. Καμία παράμετρος, άλφα λανθάνουσα περίοδος, θήτα λανθάνουσα κατάσταση ή Κ σύμπλεγμα, που θα αποδείκνυε ότι ο ύπνος ξεκίνησε νωρίτερα, δεν έδειξε ότι ο ύπνος επηρεάστηκε κατά κάποιον σημαντικό τρόπο.

Καθώς παρατηρήθηκε μεγαλύτερο πλάτος του ενδογενούς συμπλέγματος στο ERP και μικρότερος χρόνος αντίδρασης, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του κινητού τηλεφώνου μπορεί να αποτρέψει την υπνηλία. Αυτό ανταποκρίνεται στην αποδειχθείσα βελτιωμένη απόδοση των ασθενών ενώ απαντούσαν σε ένα μονότονο τεστ γνωστικών ικανοτήτων που απαιτούσε προσοχή και επαγρύπνηση. Οι άνθρωποι που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία του κινητού έπασχαν από ναρκοληψία, δεν ήταν υγιείς, έτσι τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής δεν μπορούν να αναχθούν σε καθολικά δεδομένα. Είναι δύσκολο να εκτιμηθεί αν η θετική επίδραση της έκθεσης στο πεδίο του κινητού στα οπτικά ERP οφείλεται στην ενισχυμένη ευαισθητοποίηση λόγω της ναρκοληψίας, ή είναι αποτέλεσμα των γενικότερων επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις γνωστικές λειτουργίες.

2.7.2 Μελέτες σε πειραματόζωα

Πέρα από τους εθελοντές οι ερευνητές χρησιμοποίησαν και ποντίκια για να εξετάσουν πως συμπεριφέρονται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ποντίκια εκπαιδεύτηκαν να βρίσκουν μια βυθισμένη πλατφόρμα σε ένα κυκλικό δοχείο με νερό [21]. Τα ποντίκια εκτέθηκαν σε παλμική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία 2450 MHz (2 μ sec πλάτος παλμού, 500 παλμοί/sec, μέση πυκνότητα ισχύος 2 mW/cm², και μέσο SAR σε όλο το σώμα 1.2 W/kg), για μια ώρα σε κυκλικούς κυματοδηγούς πριν ακριβώς από κάθε προπόνηση που έκαναν για να βρουν το στόχο. Οι ερευνητές προπονούσαν τα ποντίκια για να βρίσκουν το στόχο δύο φορές τη μέρα, για τρεις συνεχόμενες μέρες. Μια ώρα μετά την τελευταία προπόνηση τα ποντίκια δοκιμάστηκαν σε μια διερευνητική δοκιμή διάρκειας ενός λεπτού, κατά την οποία η πλατφόρμα είχε αποσυρθεί από τη θέση της στο δοχείο, όπου μετρήθηκε ο χρόνος που έμειναν τα ποντίκια στο τεταρτημόριο όπου θα έπρεπε να βρίσκεται η πλατφόρμα. Τρεις ομάδες ποντικών εξετάστηκαν, αυτά του μπήκαν στους κυματοδηγούς και εκτέθηκαν στην ακτινοβολία, αυτά που μπήκαν αλλά δεν εκτέθηκαν, και αυτά που δε βγήκαν από τα κλουβιά τους.

Βρέθηκε ότι τα ποντίκια που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία ήταν περίπου κατά ένα τρίτο πιο αργά, σε σχέση με τα υπόλοιπα, στο να βρουν την πλατφόρμα όταν αυτή τελικά αφέθηκε στο νερό. Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά στον τρόπο που κολυμπούν οι τρεις ομάδες ποντικών. Κατά τη διάρκεια της διερευνητικής δοκιμής τα ποντίκια που είχαν εκτεθεί στην ακτινοβολία έμειναν για 30% λιγότερο χρόνο στο τεταρτοκύκλιο του δοχείου όπου θα έπρεπε να βρίσκεται η πλατφόρμα, και ο τρόπος που κολυμπούσαν διέφερε από των υπολοίπων. Έδειξαν τη μικρότερη τάση στο ψάξιμο της πλατφόρμας.

Τα στοιχεία αυτά έκαναν τους ερευνητές να πιστεύουν ότι τα ποντίκια που εκτέθηκαν στο πεδίο χρησιμοποίησαν διαφορετικό τρόπο για να μάθουν τη θέση της πλατφόρμας. Πιστεύουν ακόμα, ότι η οξεία έκθεση στα παλμικά κύματα καθυστέρησε την αναφορά της πληροφορίας στη χωρική μνήμη των ποντικών.

Σε μια άλλη έρευνα [21], αρσενικά ποντίκια εκτέθηκαν σε έναν TEM θάλαμο σε 900 MHz GSM σήμα με μέσο SAR σε όλο το σώμα 0.05 W/kg, 45 min τη μέρα για 10 συνεχόμενες μέρες. Για να εκτιμηθούν οι λειτουργίες της χωρικής μνήμης η απόδοση των ποντικών σε ένα σύστημα με οκτώ ακτινικούς βραχίονες συγκρίθηκε με την απόδοση ποντικών που δεν είχαν εκτεθεί στο πεδίο. Τα ποντίκια εξετάζονταν στο σύστημα για 15 ή 30 min κάθε μέρα μετά την έκθεση.

Η έκθεση στο GSM σήμα, στις συνθήκες του πειράματος, δεν επηρέασε την απόδοση των ποντικών. Δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά στην ακρίβεια της επιλογής που έκαναν τα ποντίκια ή στο χρόνο που χρειάστηκαν για να ολοκληρώσουν μια αποστολή.

2.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν μελέτες και έρευνες των επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων σε βιολογικά συστήματα. Οι επιδράσεις αυτές συγκεντρώνονται σε δυο χαρακτηριστικές κατηγορίες, τις καρκινογένεσεις και τις επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Ιδιαίτερο κεφάλαιο αποτελούν οι επιδράσεις που σχετίζονται με διαταραχές στη συμπεριφορά των ανθρώπων.

Σε φαινόμενα καρκινογένεσης μπορούν να οδηγήσουν βλάβες στην αλυσίδα του DNA (μονά ή διπλά σπασίματα της αλυσίδας), αλλαγές σε χρωμοσώματα, μεταβολή της διαδικασίας απόπτωσης ενός κυττάρου και διαταραχές στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων. Οι επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα σχετίζονται κυρίως με μεταβολές στη διαδρομή που ακολουθεί ένα σήμα όταν μεταδίδεται και με αύξηση της διαπερατότητας του αιματοεγκεφαλικού φραγμού σε διάφορα ιόντα. Οι επιδράσεις αυτές αποτέλεσαν το αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητικών ομάδων. Κάποιες έρευνες, ενδεικτικές των επιδράσεων αλλά και του τρόπου μελέτης παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο. Στον ακόλουθο Πίνακα 2 συγκεντρώνονται περιληπτικά οι επιδράσεις και αναφέρεται το βιολογικό σύστημα στο οποίο μελετήθηκαν, το σύστημα έκθεσης στην ακτινοβολία και ο επικεφαλής της ερευνητικής ομάδας που έκανε την αντίστοιχη μελέτη.

Αν και τα αποτελέσματα των ερευνών που παρουσιάστηκαν είναι συχνά αντιφατικά, υποδεικνύουν την βλαβερή επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων στα βιολογικά συστήματα. Έχει αποδειχθεί η ζημιά της αλυσίδας του DNA (σε κύτταρα ανθρώπων και ποντικών) και η αλλαγή στον ρυθμό πολλαπλασιασμού ανθρώπινων κυττάρων έπειτα από έκθεση σε συχνότητες που ήδη χρησιμοποιούνται από συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Υπάρχουν ωστόσο και μελέτες που δεν διαπιστώνουν κάποια επίδραση της ακτινοβολίας των κινητών στα κύτταρα που εξετάζουν. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στα διαφορετικά επίπεδα SAR που εφαρμόζει η κάθε μελέτη και στους χρόνους που διαρκεί η κάθε έκθεση.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τις επιδράσεις στο νευροφυσιολογικό σύστημα συγκλίνουν. Οι μελέτες συμφωνούν στο ότι μεταβάλλεται η διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης και του αιματοεγκεφαλικού φραγμού σε ιόντα και επηρεάζονται οι διαδρομές μετάδοσης σήματος όταν το βιολογικό σύστημα βρίσκεται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΕΙΝΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΤΗΚΑΝ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΚΑΙ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.

Βιολογικό σύστημα	Διαμόρφωση σήματος και μέσος SAR	Βιολογική επίδραση		Ερευνητική ομάδα
Molt 4 T- λεμφοβλαστικά κύτταρα ανθρώπων	813.5625MHz iDEN με SARs 2.4 και 24 μW/g και 836.55MHz TDMA με SARs 2.6 και 26 μW/g	αντιφατική	παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των TMs όταν εκτέθηκαν για 2 και 21 h σε 2.4 και 2.6 μW/g iDEN και TDMA σήμα αντίστοιχα. Ωστόσο όταν εκτέθηκαν για 3 h στα ίδια σήματα παρατηρήθηκε αύξηση. όταν εκτέθηκαν για 2 και 21 h σε 24 μW/g iDEN σήμα αυξήθηκαν τα TMs, ενώ μειώθηκαν όταν η έκθεση είχε διάρκεια 3 h. η έκθεση σε 26 μW/g TDMA σήμα μείωσε τα TMs, για όλες τις εκθέσεις	Phillips et al
λευκά αιμοσφαίρια και χρωμοσώματα λεμφοκυττάρων ενήλικων ανδρών	837MHz TDMA 837MHz CDMA 1909.8MHz PCS οι SARs κυμαίνονταν από 1.0 έως 10 W/kg.	ναι (ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης)	η έκθεση σε όλους τους τύπους των σημάτων, τόσο για 3 όσο και για 24 ώρες δεν αύξησε την καταστροφή του DNA στα λευκά αιμοσφαίρια. όπως και η έκθεση 3 ωρών δεν αύξησε τους μικροπυρήνες ανάμεσα στα λεμφοκύτταρα. η έκθεση όμως 24 ωρών και στους τέσσερις τύπους σημάτων, σε μέσο SAR 5 και 10 W/kg οδήγησε σε μια σημαντική αύξηση των μικροπυρήνων των λεμφοκυττάρων.	Tice et al
ανθρώπινα γλιοβλαστικά κύτταρα U87MG και ινοβλαστικά κύτταρα ποντικών C3H 10T1/2	835.62MHz FMCW 847.74MHz CDMA με SAR 0.6 W/kg	όχι	Μετά από εκθέσεις διάρκειας 2, 4 και 24 h των δυο ειδών κυττάρων δεν εντοπίστηκαν καταστροφές στο DNA τους.	Malyapa et al
ανθρώπινα γλιοβλαστικά κύτταρα U87MG και ινοβλαστικά κύτταρα ποντικών C3H 10T1/2	2450 MHz CW με SARs 0.7 και 1.9 W/kg	όχι	δεν ανιχνεύθηκε κάποια καταστροφή στο DNA, τόσο των ανθρώπινων κυττάρων όσο και των κυττάρων των πειραματόζωων, που εκτέθηκαν για 2, 4 ή 24h και στους δυο SARs.	Malyapa et al
εγκεφαλικά κύτταρα ποντικών	2450 MHz παλμικό σήμα SAR 1.2 W/kg	ναι	η RF ακτινοβολία αύξησε σημαντικά τα διπλά σπασίματα της αλυσίδας του DNA στα εγκεφαλικά κύτταρα	Lai et al

Βιολογικό σύστημα	Διαμόρφωση σήματος και μέσος SAR	Βιολογική επίδραση		Ερευνητική ομάδα
κύτταρα του νευρικού συστήματος ποντικών και του ανοσοποιητικού συστήματος ανθρώπων	900 MHz GSM με SAR 0.7 W/kg και 1800 MHz GSM με SAR που κυμαίνονταν από 0.1 έως 2 W/kg	όχι	στα ανθρώπινα κύτταρα αμέσως μετά την έκθεση 48 h στο GSM-900 σήμα και την 44 h έκθεση στο GSM-1800, δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική αλλαγή στη διαδικασία της απόπτωσης. η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τα κύτταρα των ποντικών.	REFLEX
κύτταρα ανθρώπων	960 MHz GSM με SARs 0.021, 0.21 και 2.1 mW/kg	ναι	παρατηρήθηκαν μεταβολές στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων.	Kwee et al
λεμφοκύτταρα οπλήνας ποντικών	900 MHz GSM με SAR 0.075 W/kg και 0.270 W/kg	όχι	η έκθεση στο GSM πεδίο δεν άλλαξε την κανονική συμπεριφορά των λεμφοκυττάρων, και κατά συνέπεια, δεν απειλήθηκε η ακεραιότητα του ανοσοποιητικού συστήματος.	Chagnaud et al
εγκεφαλικά κύτταρα ποντικών	915 MHz CW και παλμικά σήματα	ναι	αυξήθηκε η διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού σε ιόντα λευκωματίνης	Persson et al
αστροκύτταρα ποντικών και τριχοειδή ενδοθηλιακά κύτταρα χοιρινών	1800 MHz GSM	ναι	το πεδίο αύξησε τη διαπερατότητα των κυττάρων στην ουσία σακχαρόζη.	Schirmacher et al
ανθρώπινα ενδοθηλιακά κύτταρα EA.hy926	900 MHz GSM με SAR 2 W/kg	ναι	παρατηρήθηκε παροδική αύξηση της φωσφορηλίωσης της πρωτεΐνης hsp27, και αλλαγή στη διαδρομή μετάδοσης σήματος p38MAPK	Leszczynski et al

Η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων έχει συσχετιστεί και με αλλαγές στη συμπεριφορά των ανθρώπων. Τα πεδία έχουν θεωρηθεί ύποπτα για διαταραχές στη μνήμη, στην ικανότητα συγκέντρωσης, στον προσανατολισμό αλλά και στον ύπνο. Διερευνήθηκαν οι υποψίες αυτές από κάποιες ερευνητικές ομάδες, οι οποίες υπέβαλαν εθελοντές σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και κατέγραψαν τις αντιδράσεις τους με μηχανήματα (EEG, EMG, EOG, EKG). Ένα γενικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι πως τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας διαφέρουν από αυτά που καταγράφηκαν όταν οι εθελοντές δεν ήταν εκτεθειμένοι σε πεδίο. Τα στοιχεία έδειξαν ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα επιδρά στη φυσιολογία του εγκεφάλου.

Το εντυπωσιακό στοιχείο των μελετών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό (και συμφωνεί με τα ευρήματα άλλων μελετών) είναι ότι οι αλλαγές που εντοπίστηκαν στις εξετάσεις σχετίζονται με θετικές επιδράσεις της ακτινοβολίας. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας αντίδρασης υγιών εθελοντών όταν βρίσκονταν υπό την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επίσης, σε ασθενείς που έπασχαν από ναρκοληψία και υποβλήθηκαν σε πεδίο ραδιοσυχνοτήτων, παρατηρήθηκε ελάττωση της διάθεσης για ύπνο.

Ανάλογες έρευνες έγιναν και με πειραματόζωα, για να μελετηθεί η επιρροή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στη συμπεριφορά των πειραματόζωων. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η ακτινοβολία επηρεάζει τη συμπεριφορά των ποντικών με αντίθετα σε σχέση με τους ανθρώπους. Στα ποντίκια που υποβλήθηκαν σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρατηρήθηκε μείωση της ικανότητάς τους να εντοπίζουν το στόχο που έβρισκαν άνετα πριν την έκθεσή τους.

Από τα παραπάνω στοιχεία είναι πλέον φανερό πως η έκθεση των ανθρώπων στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του κινητού τηλεφώνου εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία του.

Αναφορές – Βιβλιογραφία.

- [1] Panagopoulos D., Margaritis L., “Mechanism for biological effects of oscillating electromagnetic fields” Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Rhodes 2002, vol. 1, pp. 289 – 297.
- [2] Weisbrot D., Lin H., Lin Y., Blank M., Goodman R., “Effects of Mobile Phone Radiation on Reproduction and Development in *Drosophila melanogaster*”, Journal of Cellular Biochemistry, vol. 89, pp.48 – 55, (2003).
- [3] Phillips J. L., Ivaschuk O., Ishida-Jones T., Jones R. A., Campbell-Beachler M., Haggren W., “DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro”, Biochemistry and Bioenergetics, vol. 45, pp. 103 – 110, (1998).
- [4] Persson B. R. R., Salford L. G., Brun A., “Blood-drain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication”, Wireless Networks, vol. 3, pp. 455 – 461, (1997).
- [5] Phillips J. L., Ivaschuk O., Ishida-Jones T., Jones R. A., Campbell-Beachler M., Haggren W., “DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro”, Bioelectrochemistry and Bioenergetics, vol. 45, pp. 103–110, (1998).
- [6] Tice R. R., Hook G. G., Donner M., McRee D. I., Guy A. W., “Genotoxicity of Radiofrequency Signals. I. Investigation of DNA Damage and Micronuclei Induction in Cultured Human Blood Cells”, Bioelectromagnetics, vol. 23, pp. 113 – 126, (2002).
- [7] Malyapa R. S., Ahern E. W., Straube W. L., Moros E. G., Pickard W. F., Roti Roti J.L., “Measurement of DNA Damage after Exposure to Electromagnetic Radiation in the Cellular Phone Communication Frequency Band (835.62 and 847.74 MHz)”, Radiation Research, vol. 148, pp 618 – 627, (1997).
- [8] Malyapa R. S., Ahern E. W., Straube W. L., Moros E. G., Pickard W. F., Roti Roti J. L., “Measurement of DNA Damage after Exposure to 2450 MHz Electromagnetic Radiation”, Radiation Research, vol. 148, pp. 608 – 617, (1997).
- [9] Lai H., Carino M., and Singh N., “Naltrexone blocks RFR-induced DNA double strand breaks in rat brain cells”, Wireless Networks, vol. 3, pp. 471– 476, (1997).
- [10] Lagroye I., Bersani F., Agostini C., Bianchi E., Billaudel B., Capri M., Dulou P.E., Fumelli C., Haro E., Mesirca P., Poullétier de Gannes F., Scarcella E., Veyret B., “Do GSM-900 Signals Induce Apoptosis in Mammalian Immune and Nervous Cells?”, Proceedings, 2nd International

- Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Rhodes 2002, vol. 1, pp 404 – 408.
- [11] Kwee S., Paskmark P., “Changes in Cell Proliferation due to Environmental Non- Ionizing Radiation 2. Microwave Radiation”, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 44, pp. 251 – 255, (1998).
- [12] Velizarov S., Raskmark P., Kwee S., “The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal”, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 48, pp. 177–180, (1999).
- [13] Chagnaud J. L. and Veyret B., “In vivo exposure of rats to GSM-modulated microwaves: flow cytometry analysis of lymphocyte subpopulations and of mitogen stimulation”, *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 75, no. 1, pp. 111 – 113, (1999).
- [14] Persson B. R. R., Salford L. G., Brun A., “Blood – Brain Barrier Permeability in Rats Exposed to Electromagnetic Fields Used in Wireless Communication”, *Wireless Networks*, vol. 3, pp. 455 – 461, (1997).
- [15] Schirmacher A., Winters S., Fischer S., Goeke J., Galla H. J., Kullnick U., Ringelstein E. B., Stogbauer F., “Electromagnetic Fields (1.8 GHz) Increase the Permeability to Sucrose of the Blood – Brain Barrier In Vitro”, *Bioelectromagnetics*, vol. 21, pp. 338 – 345, (2000).
- [16] Leszczynski D., Joenväärä S., Reivinen J., Kuokka R., “Non-Thermal Activation of the hsp27/p38MAPK Stress Pathway by Mobile Phone Radiation in Human Endothelial Cells: Molecular Mechanism for Cancer- and Blood-Brain Barrier-Related Effects”, *Blackwell Verlag Differentiation*, vol. 70, pp. 120–129, (2002).
- [17] Leszczynski D., “Effect of GSM Mobile Phone Radiation on Blood-Brain Barrier”.
- [18] Huber R., Schuderer J., Graf T., Jütz K., Borbely A. A., Kuster N., and Achermann P., “Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure in Humans: Estimation of SAR Distribution in the Brain, Effects on Sleep and Heart Rate”, *Bioelectromagnetics*, vol. 24, pp. 262 – 276, (2003).
- [19] Preece A. W., Iwi G. , Davies-Smith A., Wesnes K., Butler S., Lim E., Varey A. “Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man”, *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 75, no. 4, pp. 447 – 456, (1999).
- [20] Jech R., Sonka K., Ruzicka E., Nebuzelsky A., Bohm J., Juklickova M. and Nevsimalova S., “Electromagnetic Field of Mobile Phones Affects Visual Event Related Potential in Patients with Narcalepsy”, *Bioelectromagnetics*, vol. 22, pp. 519 – 528, (2001).
- [21] Lin J. C., “Effects of Microwave and Mobile – Telephone Exposure on Memory Processes”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 3, pp. 118 – 120, June 2000.

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης για τη μελέτη βιολογικών επιδράσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

3.1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον στις αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα με τα διάφορα βιολογικά συστήματα στρέφεται στο μικροσκοπικό επίπεδο, σε όσες γίνονται σε κυτταρικές και μοριακές δομές. Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν οι αντιδράσεις των μορίων και των κυττάρων στην ακτινοβολία και με υπολογιστικές μεθόδους, εκτός από τις πειραματικές έρευνες. Η προσομοίωση των κυττάρων με μοντέλα σε υπολογιστές διευκολύνει τις μελέτες καθώς επιτρέπει την επανάληψη των δοκιμών και των μετρήσεων χωρίς περιορισμούς λόγω χώρου, χρόνου ή κόστους. Δεν χρειάζονται κύτταρα από ζωντανούς ή νεκρούς οργανισμούς, σήματα διαφόρων συχνοτήτων και διαμορφώσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν υπολογιστικά, έτσι μια πληθώρα προσομοιώσεων μπορεί να γίνει σε υπολογιστές.

Οι προσομοιώσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το βιολογικό υποσύστημα που μοντελοποιείται. Τα υποσυστήματα που συνήθως συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον είναι η κυτταρική μεμβράνη και το κύτταρο, ιστοί και πρωτεΐνες. Η κατασκευή των υπολογιστικών προγραμμάτων βασίστηκε στην κατανόηση του μηχανισμού αλληλεπίδρασης των RF σημάτων με το βιολογικό αντικείμενο. Το σημείο κλειδί για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των υπολογιστικών μοντέλων είναι η αναγνώριση των ενδεχόμενων επιδράσεων (είτε αυτές αφορούν αλλαγές στις μετακινήσεις των ιόντων, είτε μεταβολές στην κυτταρική συμπεριφορά) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κάθε βιολογικό σύστημα. Η χρήση καλώς καθορισμένων μοντέλων στις προσομοιώσεις για κάθε επίπεδο βιολογικού συστήματος επιτρέπει η εκτίμηση των επιδράσεων να γίνει αρχικά σε επίπεδα με μικρότερη πολυπλοκότητα και τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στα επίπεδα μεγαλύτερης πολυπλοκότητας.

Από την αρχή των ερευνών για τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις η κυτταρική μεμβράνη θεωρήθηκε το κυρίαρχο πεδίο των αλληλεπιδράσεων. Ωστόσο η κυτταρική μεμβράνη δεν είναι η βασική βιολογική μονάδα ενός βιοσυστήματος. Στην πραγματικότητα υπάρχουν άλλες στοιχειώδεις δομές με καθορισμένους ρόλους και λειτουργίες, οι οποίες λόγω της πολικής φύσης τους είναι ιδιαίτερες ευαίσθητες στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι δίοδοι των πρωτεϊνών στην κυτταρική μεμβράνη ανήκουν σε αυτή την κατηγορία δομών. Οι δίοδοι, που ρυθμίζουν τη ροή των ιόντων διαμέσου της μεμβράνης, παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των φυσιολογικών τιμών του δυναμικού της μεμβράνης, κατά συνέπεια και στην βιοχημική ισορροπία.

Εξαιτίας της διαφορετικής πολυπλοκότητας των βιολογικών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα μοντέλα αλληλεπίδρασης. Τα μοντέλα αυτά, από το επίπεδο με τη μικρότερη πολυπλοκότητα μέχρι το επίπεδο με την υψηλότερη, μπορούν να διακριθούν σε όσα αφορούν :

- Το βιοφυσικό επίπεδο, ιόντα και μόρια που κινούνται δια μέσου και γύρω από την κυτταρική μεμβράνη.
- Το επίπεδο των μακρομορίων και των πρωτεϊνών.
- Την κυτταρική μεμβράνη, που είναι υπεύθυνη για την ανταλλαγή των πληροφοριών ανάμεσα στον ενδοκυτταρικό και εξωκυτταρικό χώρο.
- Ολόκληρο το κύτταρο, συμπεριλαμβανομένης της βιοχημικής και μεταβολικής λειτουργίας του.

3.2 Μοντελοποίηση σε βιοφυσικό επίπεδο

Στο βιοφυσικό επίπεδο είναι δυνατό να μελετηθεί η επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην αλληλεπίδραση ενός ιόντος με έναν υποδοχέα της κυτταρικής μεμβράνης. Οι μελέτες βασίζονται στο μοντέλο Zeeman-Stark [1]. Στόχος της τεχνικής αυτής είναι να προσδιορίσει κατά πόσο θα διαφοροποιηθεί η πιθανότητα ένα ιόν να σχηματίσει δεσμό με έναν υποδοχέα της κυτταρικής μεμβράνης, υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου.

3.2.1 Μοντέλα μετακίνησης ιόντων

Το πρώτο πρόβλημα μοντελοποίησης που επιλύθηκε ήταν ο υπολογισμός των δυναμικών του μορίου 'αγγελιοφόρου' καθώς κινείται γύρω από την κυτταρική μεμβράνη, τόσο στην παρουσία όσο και στην απουσία ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Μοντελοποιήθηκαν οι μηχανισμοί τέτοιων κινήσεων και οι αλληλεπιδράσεις τους με κάθε είδους πεδίο, ακολουθώντας την εξέλιξη του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στο πεδίο του χρόνου. Οι μεταβλητές εξόδου που επιλέγονται για αυτό το επίπεδο είναι η πιθανότητα το μόριο 'αγγελιοφόρος' να σχηματίσει κάποιο δεσμό, οι χρόνοι απορρόφησης του ιόντος και η θέση του στο χώρο. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο τρία βασικά είδη μοντέλων έχουν αναπτυχθεί: μοντέλα ελεύθερων ιόντων, μοντέλα ιόντων υπό την επίδραση δύναμης και μοντέλα ιόντων που είναι δεσμευμένα σε ρεαλιστικό, πολύπλοκο περιβάλλον [2].

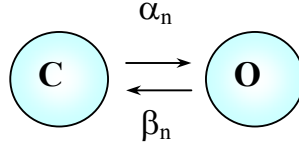
3.2.2 Μοντέλα διόδου πρωτεϊνών

Αρκετές προτάσεις έχουν γίνει για την μοντελοποίηση της αντίδρασης μιας διόδου ιόντων της μεμβράνης σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Κάποια μοντέλα θεωρούν τις διόδους μη γραμμικούς μεταγωγείς του εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Η επαγομένη μεταβολή του δυναμικού της μεμβράνης μπορεί να επηρεάσει τις ευαίσθητες στην τάση ομάδες των πρωτεϊνικών μακρομορίων, που σχηματίζουν τις (ευαίσθητες στο δυναμικό) διόδους ιόντων. Επηρεάζεται με τον τρόπο αυτό το άνοιγμα και το κλείσιμο της διόδου. Κάθε στάδιο της διαδικασίας μπορεί να ανακτηθεί από το μοντέλο.

Η πλέον αποδεκτή μοντελοποίηση είναι αυτή που συνδέει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της κυτταρικής μεμβράνης με ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί τη μηχανή Markov για να περιγράψει τους μηχανισμούς λειτουργίας μιας ιοντικής διόδου [3].

Το μοντέλο Markov θεωρεί τη δίοδο της μεμβράνης μια μηχανή μη-ντετερμινιστικών καταστάσεων. Η συμπεριφορά της διόδου καθορίζεται πλήρως από μια ομάδα N καταστάσεων, έναν πίνακα ρυθμών μεταβολής Q τα στοιχεία του οποίου q_{ij} είναι οι ρυθμοί που καθορίζουν την κινητικότητα της διαδικασίας, και ένα διάνυσμα $p(0)$ τα N στοιχεία του οποίου αντιστοιχούν σε κάθε κατάσταση αρχίζοντας τη χρονική στιγμή $t=0$. Κάθε κατάσταση στο μοντέλο αντιπροσωπεύει μια πιθανή διαμόρφωση της διόδου (ανοιχτή, κλειστή ή ανενεργή) και οι μεταβολές ανάμεσα στις καταστάσεις αντιπροσωπεύουν τις μεταβολές της ενέργειας. Εάν η δίοδος θεωρείται ωμική, η ροή του ρεύματος στη δίοδο σε κάθε στιγμή είναι ανάλογη με την πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην ανοιχτή κατάσταση. Έτσι η μηχανή Markov παρέχει μια εκτίμηση της συμπεριφοράς της διόδου στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθεί το ρεύμα που ρέει δια μέσου της διόδου ως συνάρτηση του χρόνου t , εκτιμώντας την πιθανότητα να βρεθεί το σύστημα στην ανοιχτή κατάσταση.

Το μοντέλο μιας ελεγχόμενης από το δυναμικό διόδου καλίου [3] σχηματίστηκε από τέσσερις όμοιες υπομονάδες με κινητικότητες α_n και β_n . Το μοντέλο για την κάθε υπομονάδα βασίστηκε σε μια διάταξη δύο καταστάσεων :



εικόνα 3.1 Η διάταξη δυο καταστάσεων κάθε μιας από τις τέσσερις όμοιες υπομονάδες που σχηματίζουν το μοντέλο της διόδου που ελέγχεται από το δυναμικό.

Η δίοδος ανοίγει όταν και οι τέσσερις υπομονάδες βρίσκονται στην “Ο” κατάσταση.

Οι κινητικότητες μεταξύ των καταστάσεων μοντελοποιήθηκαν με τις εξισώσεις Hodgkin και Huxley (HH) [3]:

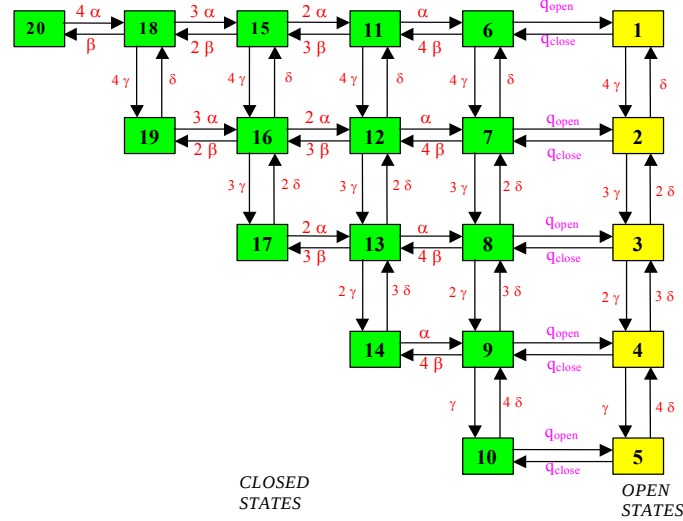
$$a_n = \frac{0.1(V+10)}{\exp\left[\frac{(V+10)}{10}\right] - 1} T_f \quad (1).$$

$$\beta_n = 0.125 \exp\left[\frac{V}{80}\right] T_f \quad (2).$$

$$T_f = 3^{(T-6)/10} \quad (3).$$

η τάση της μεμβράνης και η εξάρτηση από της θερμοκρασία είναι οι παράμετροι των εξισώσεων.

Η μεθοδολογία του μοντέλου Markov είναι ακριβής όταν χρησιμοποιείται για τις εξαρτώμενες από το δυναμικό διόδους που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της διόδου του καλίου προέκυψε από τον συγκερασμό διαδικασιών που έχουν αναφερθεί [1], [3], [4]. Είναι ένα μοντέλο είκοσι καταστάσεων, όπως φαίνονται στην εικόνα 3.2.



εικόνα 3.2 Μοντέλο μιας εξαρτώμενης από το δυναμικό διόδου καλίου με διαμόρφωση είκοσι καταστάσεων πέντε ανοιχτές καταστάσεις (από τον αριθμό 1 έως τον 5) δεκαπέντε κλειστές (από τον αριθμό 6 έως τον 20).

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η αντίδραση των διόδων που εξαρτώνται από το δυναμικό σε GSM σήμα 900 MHz. Η διόδος ανοίγει και κλείνει επιτρέποντας συγκεκριμένα ιόντα να περάσουν από τον εξωκυτταρικό χώρο δια μέσου της μεμβράνης στο κυτταρόπλασμα και αντίστροφα. Με αυτή τη μοντελοποίηση μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή των χρόνων που η διόδος είναι ανοιχτή ή κλειστή. Η σύγκριση, ανάμεσα στις φυσιολογικές συνθήκες και στις συνθήκες έκθεσης, των χρόνων που η διόδος παραμένει ανοιχτή ή κλειστή έδειξε ότι το GSM σήμα επηρεάζει τους χρόνους. Πιο συγκεκριμένα, μειώθηκε η χρονική διάρκεια κατά την οποία η διόδος παραμένει ανοιχτή, ενώ αντίθετα, αυξήθηκε η διάρκεια της κλειστής περιόδου της διόδου.

3.3 Μοντελοποίηση στο επίπεδο των πρωτεϊνών

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες των πρωτεϊνών χαρακτηρίζουν τη δομή και λειτουργία κάθε πρωτεΐνης. Η μοντελοποίηση των πρωτεϊνών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μοντελοποίησης των διηλεκτρικών ιδιοτήτων τους [5]. Μια πρωτεΐνη σε ένα διάλυμα προσεγγίζεται από μια ομάδα πολωμένων διπόλων σε ένα διηλεκτρικό διάλυμα. Κάθε τμήμα της πρωτεΐνης αντικαθίσταται από ένα πολωμένο δίπολο έτσι ώστε να προσεγγίζονται οι διηλεκτρικές ιδιότητες της πρωτεΐνης. Οι θέσεις των διπόλων ακολουθούν τη φυσική δομή της πρωτεΐνης. Οι παράμετροι του μοντέλου συμπληρώνονται από τις τιμές και την πολικότητα που αποδίδονται σε κάθε δίπολο ανάλογα με το τμήμα της πρωτεΐνης που

αντιπροσωπεύει. Μπορούν έτσι να γίνουν υπολογισμοί για τη διηλεκτρική συμπεριφορά της πρωτεΐνης.

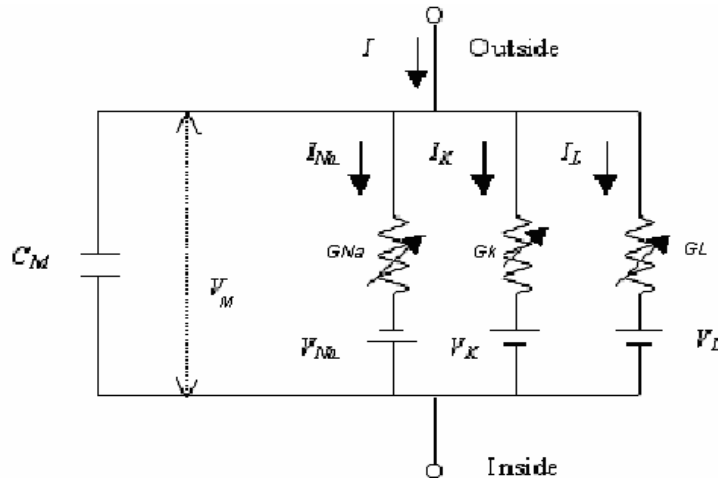
Το μοντέλο χρησιμοποίησε τις πραγματικές πολικότητες 20 αμινοξέων και υπέθεσε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες κάθε μεγάλης πρωτεΐνης. Η πραγματική πολικότητα κάθε διπόλου θα προσδιοριστεί από τις αλληλεπιδράσεις του με τα άλλα δίπολα και από την επίδραση της πολικότητας του διαλύτη, ανάλογα με το ποια πρωτεΐνη μελετάται. Στο μοντέλο αυτό οι ρεαλιστικές πολικότητες προσδιορίζονται με αναγωγή διηλεκτρικών δεδομένων προσομοιώσεων μοριακών δυναμικών μικρών πρωτεϊνών στις συνθήκες του μοντέλου. Το κριτήριο που εξασφαλίζει ότι οι πολικότητες είναι όντως ρεαλιστικές είναι η συνέπεια της πολικότητας ενός τύπου (ανάμεσα στα διάφορα άλλα) αμινοξέος μέσα στην ίδια πρωτεΐνη αλλά και σε διαφορετικές πρωτεΐνες. Όταν είναι γνωστές οι πολικότητες μπορούν να υπολογιστούν και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των πρωτεϊνών.

Με το μοντέλο αυτό προσομοιώθηκαν τρεις διαφορετικές πρωτεΐνες. Από τα δεδομένα προέκυψαν ρεαλιστικές πολικότητες για τα αμινοξέα. Οι πολικότητες ήταν σύμφωνες τόσο μέσα σε μια πρωτεΐνη όσο και ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές πρωτεΐνες.

3.4 Μοντελοποίηση της κυτταρικής μεμβράνης

Η κυτταρική μεμβράνη καθορίζει την ύπαρξη του κυττάρου και διατηρεί τις απαραίτητες διαφορές ανάμεσα στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του. Ωστόσο δεν είναι ένα απλό σύνορο, αλλά ένα επιλεκτικό φίλτρο το οποίο κρατά διαφορετικές τις συγκεντρώσεις των ιόντων στον ενδοκυτταρικό και εξωκυτταρικό χώρο. Οι διαστάσεις του κυττάρου είναι μερικά δέκατα των μικρομέτρων, ανάλογα με το είδος του ιστού, ενώ το πάχος της μεμβράνης είναι μερικά νανόμετρα. Το δυναμικό της μεμβράνης κυμαίνεται από 20 έως 200 mV, ανάλογα με το κύτταρο. Το ρεύμα της μεμβράνης εξαρτάται από τη μεταβολή της τάσης της μεμβράνης, ενώ όταν το κύτταρο είναι σε ηρεμία είναι κατά μέσο όρο μηδέν.

Το πρώτο μοντέλο που περιέγραφε τη ροή του ρεύματος στη μεμβράνη ως συνάρτηση της τάσης δημιουργήθηκε από τους Hodgkin και Huxley (HH) [6]. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της μεμβράνης φαίνεται στην εικόνα 3.3. Αποτελείται από μη γραμμικές αγωγιμότητες, πηγές τάσης και μια χωρητικότητα που λαμβάνει υπόψη την κατανομή των φορτίων και στις δύο πλευρές της μεμβράνης.



εικόνα 3.3 Το μοντέλο της κυτταρικής μεμβράνης όπως προτάθηκε από τους Hodgkin και Huxley.

Τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος έχουν την εξής σημασία

- ▶ C_M είναι η χωρητικότητα της μεμβράνης.
- ▶ G_K , G_{Na} είναι οι μη γραμμικές αγωγιμότητες των διόδων καλίου και νατρίου, που συναρτώνται με τη ροή των ιόντων καλίου και νατρίου δια μέσου της μεμβράνης.
- ▶ G_L είναι η αγωγιμότητα του φορτίου η οποία δεν αντιστοιχεί σε κάποια δίοδο, αλλά αντιπροσωπεύει τη ροή διαφόρων άλλων ιόντων δια μέσου της μεμβράνης.
- ▶ V_M είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης.
- ▶ V_K , V_{Na} και V_L είναι τα δυναμικά ηρεμίας των αντίστοιχων διόδων ιόντων.
- ▶ I είναι το ρεύμα που ρέει δια μέσου της μεμβράνης και που οφείλεται στη ροή των διαφόρων ιόντων. Το ρεύμα αυτό ισούται με το μηδέν όταν η τάση της μεμβράνης ισούται με το δυναμικό ηρεμίας της.

Η περιγραφή του μοντέλου ολοκληρώνεται με την εξίσωση που δίνει το ρεύμα I , που διαρρέει την κυτταρική μεμβράνη. Το ρεύμα προκύπτει αθροίζοντας τα επιμέρους ρεύματα των ιόντων της μεμβράνης.

Τα ρεύματα εξαρτώνται από τη διαφορά τάσης ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης V_M , και τα δυναμικά ηρεμίας των ιόντων V_K , V_{Na} , V_L . Δυο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τη ροή ενός ιόντος : η χημική και η ηλεκτρική του συμπεριφορά, όπως αυτή προκύπτει από τις διαφορετικές συγκεντρώσεις των φορτισμένων μορίων σε κάθε πλευρά της μεμβράνης. Το δυναμικό ηρεμίας προκύπτει εξομοιώνοντας τα ηλεκτρικά και χημικά δυναμικά. Η διαφορά ανάμεσα στο δυναμικό ηρεμίας και στο δυναμικό της μεμβράνης είναι αυτή που επιβάλλει τη ροή του ιόντος.

Τα ρεύματα αγωγιμότητας μπορούν έτσι να γραφούν :

$$I_{ion} = G_{ion}(V - V_{ion}) \quad (4).$$

Τα πειράματα υπέδειξαν ότι οι αγωγιμότητες του νατρίου και του καλίου εξαρτώνται από τον χρόνο. Οι αγωγιμότητες άλλων ιόντων μπορεί να είναι σταθερές. Η αγωγιμότητα για μια εξαρτώμενη από το χρόνο δίοδο ιόντος μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$G_{ion} = G_{ion,max} \cdot x \quad (5).$$

όπου το x ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_x \cdot (1 - x) - \beta_x \cdot x \quad (6).$$

τα α_x και β_x είναι συντελεστές αναλογίας, μη γραμμικές συναρτήσεις του δυναμικού και η μονάδα τους είναι 1/χρόνος.

Οι εξισώσεις που αφορούν την αγωγιμότητα του καλίου είναι :

$$G_{Na} = G_{Na,max} \cdot m^4 \cdot h \quad (7).$$

m είναι ο συντελεστής ενεργοποίησης, h ο συντελεστής απενεργοποίησης, και $G_{Na,max}$ η μέγιστη αγωγιμότητα του καλίου. Οι συντελεστές καθορίζονται βάση των διαφορικών εξισώσεων :

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m \cdot (1 - m) - \beta_m \cdot m \quad (8).$$

$$\frac{dh}{dt} = \alpha_h \cdot (1 - h) - \beta_h \cdot h \quad (9).$$

οι συντελεστές α και β είναι συναρτήσεις της τάσης αλλά όχι του χρόνου και δίνονται από τις σχέσεις :

$$\alpha_m = \frac{0.1 \cdot (V_M + 25.0)}{\exp(0.1 \cdot (V_M + 25.0)) - 1.0} \quad (10).$$

$$\beta_m = 4 \cdot \exp\left(\frac{V_M}{18.0}\right) \quad (11).$$

$$\alpha_h = 0.07 \cdot \exp\left(\frac{V_M}{20.0}\right) \quad (12).$$

$$\beta_h = \frac{1.0}{\exp(0.1(V_M + 30.0)) + 1.0} \quad (13).$$

το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των ιόντων καλίου δίνεται από την :

$$I_{Na} = G_{Na} \cdot (V_M - V_{Na}) \quad (14).$$

ή

$$I_{Na} = G_{Na, \max} \cdot m^4 \cdot h \cdot (V_M - V_{Na}) \quad (15).$$

Ανάλογα, για το νάτριο οι αντίστοιχες εξισώσεις γράφονται :

$$G_K = G_{K, \max} \cdot n^4 \quad (16).$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n \cdot (1 - n) - \beta_n \cdot n \quad (17).$$

$$\alpha_n = \frac{0.01 \cdot (V_M + 10.0)}{\exp(0.1 \cdot (V_M + 10.0)) - 1.0} \quad (18).$$

$$\beta_n = 0.125 \cdot \exp\left(\frac{V_M}{80.0}\right) \quad (19).$$

και τελικά το ρεύμα που οφείλεται στα ιόντα καλίου

$$I_K = G_K \cdot (V_M - V_K) \quad (20).$$

ή

$$I_K = G_{K, \max} \cdot n^4 (V_M - V_K) \quad (21).$$

Το μοντέλο HH περιλαμβάνει και την περιγραφή των ρευμάτων διαφόρων άλλων ιόντων με τη μορφή :

$$I_L = G_L \cdot (V_M - V_L) \quad (22).$$

Η πλήρης εξίσωση του ρεύματος, που ολοκληρώνει την περιγραφή της κυτταρικής μεμβράνης με το ισοδύναμο κύκλωμα, προκύπτει από την πρόσθεση των τριών επιμέρους ρευμάτων που αναλύθηκαν προηγούμενα, και είναι η :

$$I = C_M \frac{dV_M}{dt} + G_K \cdot n^4 \cdot (V_M - V_K) + G_{Na} \cdot m^4 \cdot h \cdot (V_M - V_{Na}) + G_L \cdot (V_M - V_L) \quad (23).$$

Η έρευνα των μηχανισμών που εξηγούν τις βιολογικές επιδράσεις από την έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συγκλίνει στη διαπίστωση ότι η κυτταρική μεμβράνη είναι το κυρίως πεδίο των αλληλεπιδράσεων. Το HH μοντέλο της κυτταρικής μεμβράνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά σε μεθόδους που υπολογίζουν την επίδραση ενός εξωτερικού πεδίου σε ένα κύτταρο ή σε πολυπλοκότερες δομές.

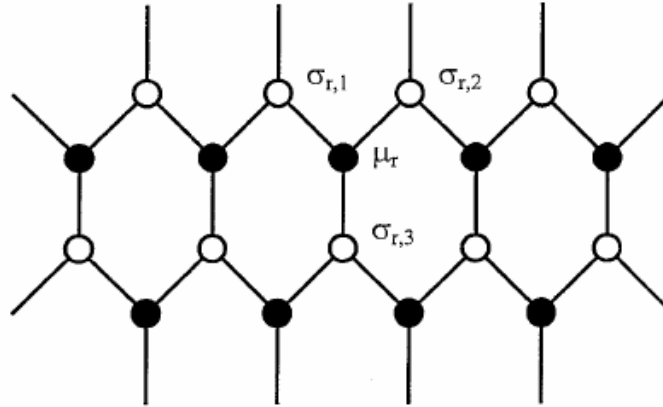
Με ένα εντελώς διαφορετικό σκεπτικό δημιουργήθηκε ένα άλλο μοντέλο μεμβράνης. Ένα απλοποιημένο μοντέλο της κυτταρικής μεμβράνης αναπτύχθηκε [7] για να ερμηνευθεί η εκροή ιόντων ασβεστίου από κυτταρικές μεμβράνες που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Στην κυτταρική μεμβράνη, συγκεκριμένες πρωτεΐνες της έχουν άκρα στον εξωκυτταρικό χώρο σχηματίζοντας έτσι θέσεις δεσμών (υποδοχείς) με ιόντα της επιφάνειας της μεμβράνης. Ανάμεσα στις θέσεις των ιόντων του ασβεστίου είναι διασπαρμένες οι θέσεις των υποδοχών, οι καταστάσεις των οποίων μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία ή το δεσμό των ιόντων του ασβεστίου με τα γειτονικά άκρα των πρωτεϊνών. Οι διαρθρωτικές αλλαγές στην κυτταρική μεμβράνη (ως αντίδραση σε εξωτερικά πεδία) γεννιούνται από μηχανισμούς όπως οι μη γραμμικές διακυμάνσεις της κυτταρικής διαδικασίας και ο πολλαπλασιασμός ξεχωριστών κυμάτων διαμέσου των αλυσίδων των αμινοξέων.

Η δημιουργία του μοντέλου της κυτταρικής μεμβράνης στηρίχθηκε στην υπόθεση ότι ενέργειες ανάλογες του kT , όπου k η σταθερά του Boltzman και T η απόλυτη θερμοκρασία, μπορούν να προκαλέσουν διαρθρωτικές αλλαγές στην κυτταρική μεμβράνη μεταβάλλοντας τις θέσεις των υποδοχών κατά την έκθεση σε διάφορες ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες. Ένα απλοποιημένο μοντέλο της μεμβράνης αποτελείται από ένα στρώμα δυο διαστάσεων όπου οι άκρες των πρωτεϊνών που εξέχουν σχηματίζουν έναν πίνακα με τις θέσεις των δεσμών των ιόντων του ασβεστίου. Ανάμεσα στις θέσεις των ιόντων του ασβεστίου βρίσκονται διασπαρμένες οι θέσεις των δισταθών υποδοχών, και οι θέσεις αυτές αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι αλληλεπιδράσεις γίνονται μέσω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και προκαλούν διαρθρωτικές αλλαγές στην μεμβράνη που μπορούν να επηρεάσουν τις καταστάσεις των γειτονικών θέσεων των ιόντων ασβεστίου. Οι υποθέσεις αυτές θεωρούνται χρήσιμες στη μοντελοποίηση των φαινομένων “παραθύρου”, όπου τα εξωκυτταρικά επίπεδα ιόντων ασβεστίου παρατηρούνται να περνούν από το υψηλότερο στο χαμηλότερο

σημείο τους, καθώς η συχνότητα και το πλάτος των εξωτερικών πεδίων μεταβάλλονται.

Το κυψελοειδές μοντέλο της μεμβράνης που ανταποκρίνεται τα κριτήρια που τέθηκαν, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4.



εικόνα 3.4 Το κυψελοειδές μοντέλο της μεμβράνης. Οι μαύροι κύκλοι αντιστοιχούν σε θέσεις υποδοχέων ενώ οι κενοί σε θέσεις ιόντων ασβεστίου.

Η μεταβλητή σ_i αντιστοιχεί στην i θέση ιόντος ασβεστίου και παίρνει μια από δύο τιμές, ανάλογα με το εάν η θέση είναι ή δεν είναι κατειλημμένη από ιόν ασβεστίου. Για ευκολία καθορίστηκε $\sigma_i=+1$ εάν η i θέση ιόντος ασβεστίου είναι κατειλημμένη και $\sigma_i=-1$ εάν δεν είναι κατειλημμένη. Ο παράγοντας μ_r καθορίζει την κατάσταση του υποδοχέα της r θέσης και με την παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου παίρνει δυο τιμές, $\mu_r=+1$ εάν η r θέση υποδοχέα είναι σε κατάσταση “πάνω” ενώ $\mu_r=-1$ εάν είναι σε κατάσταση “κάτω”.

Με τη χρήση των παραμέτρων αυτών σε διάφορες εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η εκροή των ιόντων ασβεστίου από την κυτταρική μεμβράνη. Αποδείχθηκε ότι η εκροή των ιόντων του ασβεστίου είναι συνάρτηση της συχνότητας του πεδίου που εφαρμόζεται στο μοντέλο της μεμβράνης. Με το μοντέλο μπορούν ακόμα να προβλεφθούν οι πυκνότητες ισχύος στις οποίες η εκροή των ιόντων ασβεστίου γίνεται μέγιστη. Όμως για να μπορέσει το μοντέλο να προβλέψει τη συμπεριφορά της μεμβράνης πρέπει οι ενέργειες που προκαλούν τις διαρθρωτικές αλλαγές να είναι της τάξης του kT .

3.5 Μοντελοποίηση βιολογικών ιστών

Η μοντελοποίηση των βιολογικών ιστών για τη δοσιμετρία συνήθως γίνεται θεωρώντας τον κάθε ιστό ως ένα διηλεκτρικό μέσο. Σε κάθε μέσο ξεχωριστά αποδίδονται συγκεκριμένες διηλεκτρικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον ιστό που αντιπροσωπεύει. Σχηματίζεται έτσι η βιολογική δομή στην οποία μετράται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος FDTD για τον υπολογισμό του πεδίου.

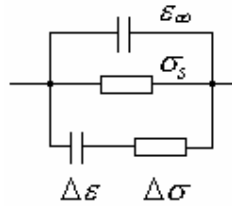
Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση και χρησιμοποιώντας την FDTD μέθοδο, στην εργασία [8], υπολογίζεται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός ιστού που συγκροτείται από ηλεκτρικά ευαίσθητα κύτταρα. Για λόγους απλοποίησης ο ιστός

μοντελοποιήθηκε με σφαιρικά κύτταρα, και η κυτταρική μεμβράνη κάθε κυττάρου μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο Hodgkin-Huxley (HH). Η μελέτη προχώρησε με τις παραπάνω παραδοχές, καθώς δεν υπάρχουν ιστοί με όλα τους τα κύτταρα ηλεκτρικά ευαίσθητα ούτε γεωμετρικά σφαιρικά κύτταρα.

Οι υπολογισμοί έγιναν στις συχνότητες GSM 900 MHz και GSM 1800 MHz και τα αποτελέσματα έδειξαν την κατανομή του πεδίου στο εσωτερικό του ιστού.

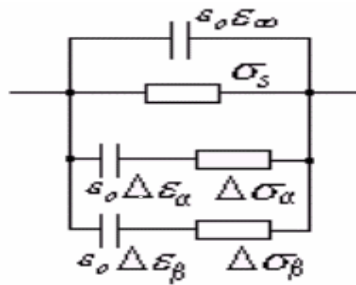
3.5.1 Μέθοδος ισοδύναμου κυκλώματος

Όταν το ενδιαφέρον της μελέτης επικεντρώνεται σε διαφόρους σχηματισμούς πολλών κυττάρων ή σε ιστούς, ένα μακροσκοπικό μοντέλο είναι πιο κατάλληλο [9]. Η διαδικασία της χαλάρωσης, που οφείλεται στην αντίθετης φοράς διάχυση στο διπλό στρώμα που περιβάλλει τις κυτταρικές μεμβράνες, προκαλεί διασπορά των ιδιοτήτων διαφόρων βιολογικών υλικών. Το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.5 διαμορφώθηκε έτσι ώστε να περικλείει κάθε ανεξάρτητη, πρώτης τάξης, συνεισφορά χαλάρωσης.



εικόνα 3.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα που κατασκευάστηκε για τη μοντελοποίηση των παραμέτρων διασποράς μιας ομάδας σκελετικών ινών. σ_s είναι η αγωγιμότητα χαμηλών συχνοτήτων, ε_∞ είναι η επιτρεπτότητα υψηλών συχνοτήτων, $\Delta\sigma$ και $\Delta\varepsilon$ είναι αντίστοιχα, τα πλάτη διασποράς της αγωγιμότητας και της επιτρεπτότητας.

Στο φάσμα συχνοτήτων από dc έως μερικές δεκάδες MHz, μια ικανοποιητική προσέγγιση για διάφορους τύπους βιολογικών ιστών (αίμα, μυς, σκελετός, κ.α.) αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.6.



εικόνα 3.6 Ισοδύναμο κύκλωμα διαφόρων βιολογικών ιστών για συχνότητες από dc έως μερικές δεκάδες MHz.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.6 λαμβάνοντας δυο όρους της χαλάρωσης πρώτης τάξης, μοντελοποιούνται οι παράμετροι διασποράς.

Οι εξισώσεις για τα σ και ε είναι

$$\sigma(\omega) = \sigma_s + \Delta\sigma_\alpha \frac{\omega^2 \tau_\alpha^2}{1 + \omega^2 \tau_\alpha^2} + \Delta\sigma_\beta \frac{\omega^2 \tau_\beta^2}{1 + \omega^2 \tau_\beta^2} \quad (24).$$

και

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_\alpha}{1 + \omega^2 \tau_\alpha^2} + \frac{\Delta\varepsilon_\beta}{1 + \omega^2 \tau_\beta^2} \quad (25).$$

όπου τα πλάτη της διασποράς συνδέονται με τις σχέσεις

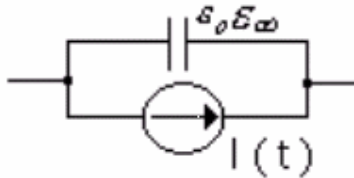
$$\Delta\varepsilon_\alpha = \frac{\tau_\alpha}{\varepsilon_0} \Delta\sigma_\alpha \quad (26).$$

και

$$\Delta\varepsilon_\beta = \frac{\tau_\beta}{\varepsilon_0} \Delta\sigma_\beta \quad (27).$$

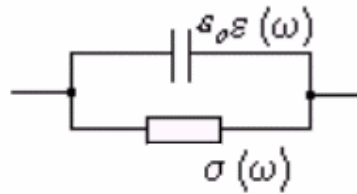
Κατόπιν, η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση του ιστού περιλαμβάνει τη χωρική διακριτοποίηση και σύνδεση κάθε στοιχείου με τα γειτονικά του μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος. Για να διατηρηθούν σωστές οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος, κάθε παράμετρος του μοντέλου πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον γεωμετρικό παράγοντα A/L , όπου A είναι η εγκάρσια τομή και L το μήκος για κάθε σύνδεση. Το κύκλωμα που προκύπτει από τις παρεμβάσεις αυτές μπορεί πλέον να αναλυθεί με οποιαδήποτε μέθοδο της θεωρίας των γραμμικών κυκλωμάτων.

Η συμπεριφορά του κυκλώματος μπορεί να αναλυθεί είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο της συχνότητας. Και στις δυο περιπτώσεις το κύκλωμα της εικόνας 3.6 απλοποιείται, και για την μεν ανάλυση στο πεδίο του χρόνου έχει τη μορφή (εικόνα 3.7)



εικόνα 3.7 Η απλοποιημένη μορφή του κυκλώματος της εικόνας 3.6 για ανάλυση στο πεδίο του χρόνου.

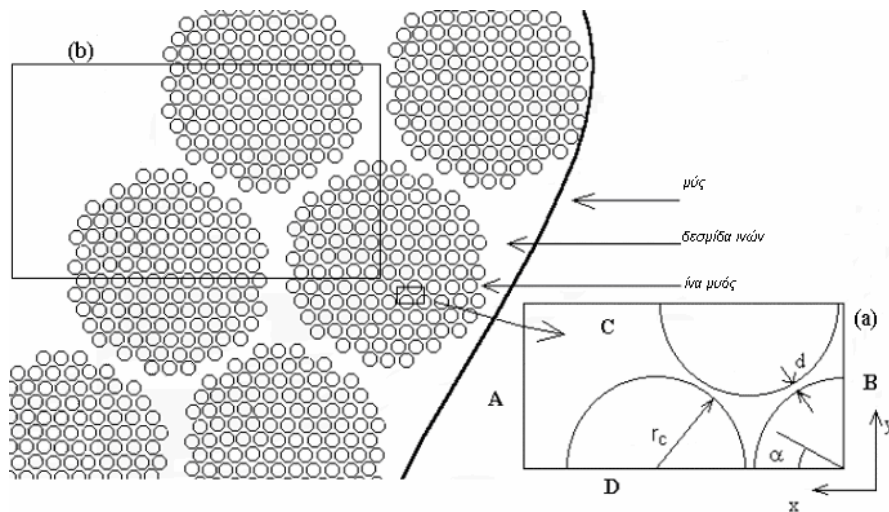
ενώ για την ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας μετασχηματίζεται στο



εικόνα 3.8 Η απλοποιημένη μορφή του κυκλώματος της εικόνας 3.6 για ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας.

Βασισμένο στη μέθοδο του ισοδύναμου κυκλώματος αναπτύχθηκε ένα λογισμικό [9] που αναλύει αριθμητικά την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού και της πυκνότητας των ιοντικών ρευμάτων στο εσωτερικό βιολογικών ιστών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το είδος των κυττάρων που θέλει να εξετάσει. Τα αποτελέσματα δύνονται με τη μορφή γραφημάτων.

Για να επιδειχθεί η εφαρμογή της μεθόδου, αναλύθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο σκελετικού μυϊκού ιστού. Για τους σκοπούς της μελέτης, ο ιστός συνίσταται από μια ομάδα πολύ λεπτών, απομονωμένων μεμβρανών οι οποίες είναι εμβαπτισμένες σε ένα υδατικό διάλυμα ιόντων. Στην εικόνα 3.9 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση του σκελετικού μυός σε εγκάρσια τομή.



εικόνα 3.9 Σχηματική απεικόνιση σκελετικού μυός σε εγκάρσια τομή.

Οι παράμετροι της ανάλυσης φαίνονται στην μεγενθυμένη ορθογώνια περιοχή. Οι κυκλικές δομές αντιστοιχούν σε δεσμίδες μυϊκών ινών, που περιέχουν μερικές δεκάδες κύτταρα. Το διάκενο ανάμεσα στις κυκλικές δομές είναι γεμάτο με ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Οι ιδιότητες διασποράς στην κάθε περιοχή καθορίζονται από το είδος του μυός που προσομοιώνεται κάθε φορά. Οι πλευρές Α και Β αντιστοιχούν στις συνδέσεις με την πηγή. Οι πλευρές C και D, αντιπροσωπεύουν τις επιφάνειες όπου το εγκάρσιο πεδίο και το ρεύμα εξασθενούν.

3.6 Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση των βιολογικών συστημάτων διευκολύνει σημαντικά τις έρευνες για τις αλληλεπιδράσεις τους με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνότητων. Διάφορα βιολογικά αντικείμενα μπορούν να προσομοιωθούν υπολογιστικά και να μελετηθεί η συμπεριφορά τους υπό την επίδραση διαφορετικών σημάτων. Έτσι πολλά πειράματα μπορούν να γίνουν επαναληπτικά χωρίς ιδιαίτερο κόστος.

Τα μοντέλα διαφοροποιούνται ανάλογα με το βιολογικό σύστημα που προσομοιώνουν. Τα μοντέλα που περιγράφουν τη μετακίνηση των ιόντων προσομοιώνουν τις διαφορές τάσης που προκαλούν κατά την κίνησή τους δια μέσου της κυτταρικής μεμβράνης. Οι πρωτεΐνες θεωρούνται σειρές από ηλεκτρικά δίπολα και στα μοντέλα προσομοιώνονται οι διηλεκτρικές ιδιότητες των διπόλων. Ακόμα, υπάρχουν μοντέλα που προσομοιώνουν συμπεριφορά των διόδων της κυτταρικής μεμβράνης απέναντι στα ιόντα και στις πρωτεΐνες που επιχειρούν να τις διασχίσουν.

Το μοντέλο της κυτταρικής μεμβράνης είναι το πρώτο που κατασκευάστηκε και περιγράφει τη ροή του ρεύματος στη μεμβράνη ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλεί η μετακίνηση των ιόντων. Οι βιολογικοί ιστοί μοντελοποιούνται ως διηλεκτρικά μέσα.

Τα μικρομοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ιόντων, των πρωτεϊνών και της κυτταρικής μεμβράνης λειτουργούν ως είσοδοι στα μακρομοντέλα που περιγράφουν τους βιολογικούς ιστούς.

Αναφορές – Βιβλιογραφία.

- [1] Chiabrera A., Bianco B., Moggia E., Kaufman J. J., “Zeeman-Stark Modelling of the RF EMF Interaction With Ligand Binding”, *Bioelectromagnetics*, vol. 21, pp. 312 – 324, (2000).
- [2] Liberti M., Apollonio F., Paffi A., D’Inzeo G., “Overview of bioelectromagnetic interactions models: proposal for a unifying integrated methodology”.
- [3] Apollonio F., Liberti M., Giordano S., Moggia E., Bianco B., D’Inzeo G., “Interaction between electromagnetic fields from mobile communication systems and potassium channels: a modelling approach”, *Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Rhodes 2002*, vol. 2, pp 699 – 704.
- [4] Keen J. E., Khawaled R., Farrens D. L., Neelands T., Rivard A., Bond C. T., Janowsky S., Fakler B., Adelmann J.P., and Maylie J., “Domains Responsible for Constitutive and Ca^{2+} -Dependent Interactions between Calmodulin and Small Conductance Ca^{2+} Activated Potassium Channels”, *The Journal of Neuroscience*, vol. 19, no. 20, pp. 8830 – 8838, (1999).
- [5] Song X., “An inhomogeneous model of protein dielectric properties: Intrinsic polarizabilities of amino acids”, *Journal of Chemical Physics*, vol. 116, no. 21, pp. 9359 – 9363, (2002).
- [6] Hodgkin A. L., Huxley A. F., “A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve”, *J. Physiol.*, vol. 117, pp. 500 – 544, (1952).
- [7] Thompson C. J., Yang Y. S., Anderson V., Wood A. W., “A Cooperative Model for Ca^{++} Efflux Windowing From Cell Membranes Exposed to Electromagnetic Radiation”, *Bioelectromagnetics* vol. 21, pp. 455 – 464, (2000).
- [8] Emili G., Schiavoni A., Francavilla M., Roselli L., Sorrentino R., “Computation of Electromagnetic Field Inside a Tissue at Mobile Communications Frequencies”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 1, January 2003.
- [9] Suzuki D., Ramos A., Marques J., “Visual Program for Numerical Field Calculation Applied to Biological Tissue Studies”, *Proceedings, 2nd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Rhodes 2002*, vol. 1, pp. 117 – 126.

Κεφάλαιο 4

Η υπολογιστική μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

4.1 Εισαγωγή

Επειδή οι συσκευές των κινητών τηλεφώνων λειτουργούν πολύ κοντά στον ανθρώπινο εγκέφαλο και η σχετική έρευνα ενδιαφέρεται για την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα με τους βιολογικούς ιστούς. Ειδικότερα εστιάζεται στην επίδραση του χρήστη στο κέρδος και στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας και στην αντίσταση εισόδου ενός βιολογικού ιστού. Επιπλέον μελετάται η κατανομή της ενέργειας που απορροφάται στον ιστό όταν το κινητό τηλέφωνο χρησιμοποιείται.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) είναι μια αριθμητική μέθοδος που διευκολύνει την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και των διαφόρων βιολογικών αντικειμένων.

Ο Yee πρώτος πρότεινε το 1966 [1], [2] την FDTD ως μια απλή και κομψή μέθοδο για την άμεση επίλυση της διαφορικής μορφής των εξισώσεων του Maxwell. Ο Yee αρχικά εισήγαγε την FDTD για υλικά με μηδενική αγωγιμότητα που δεν περιείχαν φορτία. Η FDTD διακριτοποιεί τον χώρο σε ένα ορθογώνιο πλέγμα (grid) στοιχειωδών κυβικών στοιχείων – κελιών, που περιλαμβάνει τον σκελετοειδή και μέρος του περιβάλλοντος χώρου του. Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται διαδοχικά, με συγκεκριμένο βήμα, σε κάθε κυβικό στοιχείο του πλέγματος.

Το κεφάλαιο αυτό ξεκινά με την αναφορά στις εξισώσεις του Maxwell, και συνεχίζει με την περιγραφή της λύσης τους με την αριθμητική μέθοδο FDTD.

4.2 Βασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού – Εξισώσεις Maxwell.

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία είναι θεμελιωμένη σε τέσσερις εξισώσεις, γνωστές ως εξισώσεις του Maxwell. Σε διαφορική μορφή οι εξισώσεις του Maxwell είναι [1], [2]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

νόμος του Faraday (1).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

νόμος του Ampere (2).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

(3).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

νόμος του Gauss (4).

όπου

E, η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου, (V/m)

H, η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου, (A/m)

B, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, (Vsec/m²)

D, η πυκνότητα της ηλεκτρικής ροής, (Asec/m²)

J, η χωρική πυκνότητα του ρεύματος, (A/m²)

ρ, η χωρική πυκνότητα του φορτίου, (Asec/m³)

Το B-πεδίο και το D-πεδίο συνδέονται με το E- πεδίο και H-πεδίο αντίστοιχα με τις σχέσεις :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

(5).

και

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

(6).

όπου

ε₀ είναι η ηλεκτρική επιτρεπτότητα στον ελεύθερο χώρο, (Asec/Vm),

ε_r είναι η σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα του υλικού,

μ₀, είναι η μαγνητική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου, (Vsec/Am),

μ_r, είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος είναι :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

(7).

με σ, η αγωγιμότητα του υλικού, (A/Vm).

Ο χώρος γύρω από το αντικείμενο που ακτινοβολεί μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές [3]:

■ Περιοχή αλληλεπίδρασης κοντινού πεδίου $0 < r < 0.62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}$ (8).

■ Περιοχή κοντινού πεδίου $0.62\sqrt{\frac{d^3}{\lambda}} < r < \frac{2d^2}{\lambda}$ (9).

■ Περιοχή μακρινού πεδίου $\frac{2d^2}{\lambda} \leq r$ (10).

όπου

r είναι η απόσταση του αντικειμένου από την πηγή ακτινοβολίας,

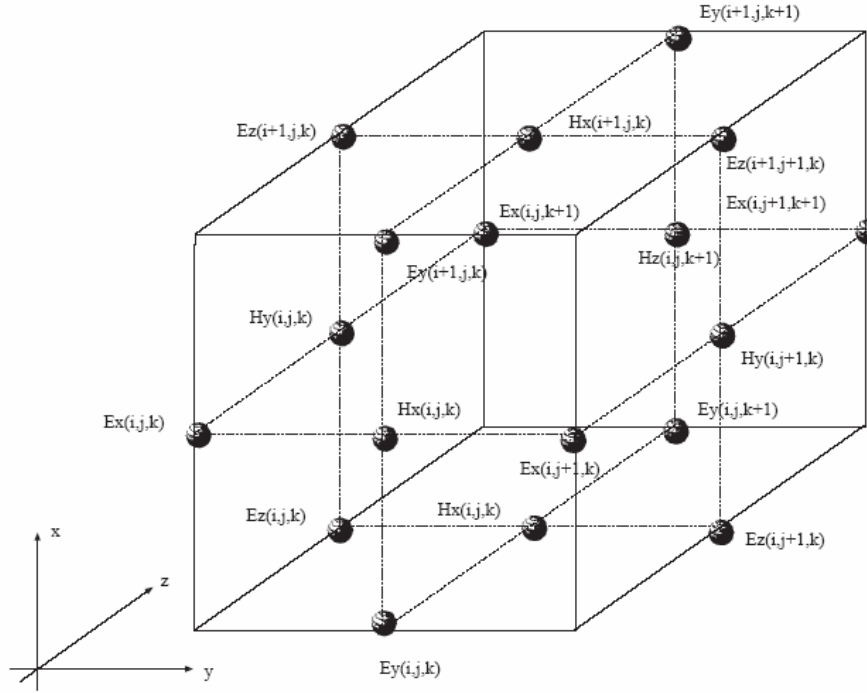
d είναι η διάμετρος του ακτινοβολούμενου αντικειμένου, και

λ είναι το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο.

4.3 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου, FDTD

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου (Finite Difference Time Domain, FDTD) είναι μια αριθμητική μέθοδος για την άμεση λύση των διαφορικών εξισώσεων του Maxwell τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο του χώρου. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τον Yee για ισοτροπικά υλικά. Σύντομα όμως η εφαρμογή της διευρύνθηκε σε αγώγιμα υλικά και σε γεωμετρίες που περιείχαν πηγές. Την ανάπτυξη της FDTD τα τελευταία χρόνια ενίσχυσε η εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών.

Σύμφωνα με την FDTD, οι χρονικά εξαρτώμενες εξισώσεις του Maxwell στη διαφορική τους μορφή εφαρμόζονται σε ένα ορθογωνικό πλέγμα (grid) στοιχειωδών κυβικών στοιχείων – κελιών. Το πλέγμα περιλαμβάνει τον σκεδαστή και ένα τμήμα του χώρου που τον περιβάλλει. Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται διαδοχικά με βήμα μισού χρόνου γύρω κάθε κυβικό στοιχείο του πλέγματος. Κάθε συνιστώσα ηλεκτρικού πεδίου περιβάλλεται από τέσσερις συνιστώσες μαγνητικού πεδίου και αντίστοιχα κάθε συνιστώσα μαγνητικού πεδίου περιβάλλεται από τέσσερις συνιστώσες ηλεκτρικού πεδίου, όπως μπορεί να φανεί στην εικόνα 4.1 [4].



εικόνα 4.1 Το στοιχειώδες κυβικό στοιχείο – κελί της FDTD, όπως προτάθηκε από τον Yee. Στο κυβικό στοιχείο είναι σημειωμένες οι θέσεις των συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

Η τοποθέτηση των συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου με τον τρόπο που περιγράφηκε διευκολύνει τους υπολογισμούς για τις εξισώσεις του Maxwell. Η βασική λειτουργία της μεθόδου είναι η προσομοίωση της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα στον υπολογιστικό χώρο προσεγγίζοντας διαρκώς τις διαφορικές εξισώσεις, σε κάθε στοιχείο του πλέγματος, με πεπερασμένες διαφορές. Η μέθοδος ακολουθεί το προσπίπτον κύμα στη διάδοσή του μέσα στον σκεδαστή και στην αλληλεπίδρασή τους, η οποία παράγει επιφανειακά ρεύματα. Η μέθοδος ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί σταθερή ημιτονοειδής συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε κάθε στοιχείο του πλέγματος.

4.3.1 Περιγραφή των εξισώσεων του Maxwell με την μέθοδο FDTD

Ο αλγόριθμος του Yee επιλύει στο πεδίο του χώρου και στο πεδίο του χρόνου τις συζευγμένες εξισώσεις στροβιλισμού του Maxwell ταυτόχρονα για το ηλεκτρικό και για το μαγνητικό πεδίο [5].

Οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E}$, και του μαγνητικού πεδίου, $\vec{H}$, υπολογίζονται διαδοχικά με βήμα μισού χρόνου γύρω από ένα κυβικό στοιχείο του πλέγματος. Κάθε συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E}$, περιστοιχίζεται από τέσσερις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, $\vec{H}$, και αντίστοιχα κάθε συνιστώσα

του μαγνητικού πεδίου, $\vec{H}$, περιβάλλεται από τέσσερις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E}$ (σχήμα 4.1).

Όλες οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E}$, στον τρισδιάστατο χώρο ενδιαφέροντος υπολογίζονται και αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή για ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, χρησιμοποιώντας δεδομένα για τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, $\vec{H}$, που έχουν προηγουμένως αποθηκευτεί στη μνήμη του υπολογιστή. Έπειτα όλες οι μαγνητικές συνιστώσες, $\vec{H}$, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις ήδη υπολογισμένες ηλεκτρικές συνιστώσες, $\vec{E}$, και αποθηκεύονται στον υπολογιστή για τον καινούργιο υπολογισμό των ηλεκτρικών συνιστωσών, $\vec{E}$. Η διαδικασία συνεχίζεται βασιζόμενη στους αμέσως προηγούμενους υπολογισμούς των μαγνητικών συνιστωσών, $\vec{H}$. Η διαδικασία σταματά στο τέλος του χρόνου ενδιαφέροντος.

Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων οι εξισώσεις (1) και (2) του Maxwell έχουν τη μορφή:

για το μαγνητικό πεδίο

$$-\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (11\alpha).$$

$$-\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (11\beta).$$

$$-\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (11\gamma).$$

για το ηλεκτρικό πεδίο

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x \quad (12\alpha).$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y \quad (12\beta).$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z \quad (12\gamma).$$

Στόχος του Yee ήταν η επίτευξη δεύτερης τάξης ακρίβειας κεντρικών διαφορών με χρήση δεδομένων από δεξιά και αριστερά του σημείου παρατήρησης. Έτσι πρότεινε το μετασχηματισμό των εξισώσεων (11) και (12) του Maxwell στη μορφή :

$$H_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = H_x|_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta z} \left[E_y|_{i,j,k+1/2}^n - E_y|_{i,j,k-1/2}^n \right] - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta y} \left[E_z|_{i,j+1/2,k}^n - E_z|_{i,j-1/2,k}^n \right] \quad (13\alpha).$$

$$H_y|_{i,j,k}^{n+1/2} = H_y|_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta x} \left[E_z|_{i+1/2,j,k}^n - E_z|_{i-1/2,j,k}^n \right] - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta z} \left[E_x|_{i,j,k+1/2}^n - E_x|_{i,j,k-1/2}^n \right] \quad (13\beta).$$

$$H_z|_{i,j,k}^{n+1/2} = H_z|_{i,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta y} \left[E_x|_{i,j+1/2,k}^n - E_x|_{i,j-1/2,k}^n \right] - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j,k}\Delta x} \left[E_y|_{i+1/2,j,k}^n - E_y|_{i-1/2,j,k}^n \right] \quad (13\gamma).$$

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = E_x|_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta y} \left[H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta z} \left[H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}} J_x|_{i,j,k}^{n+1/2} \quad (14\alpha).$$

$$E_y|_{i,j,k}^{n+1} = E_y|_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta z} \left[H_x|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta x} \left[H_z|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_z|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}} J_y|_{i,j,k}^{n+1/2} \quad (14\beta).$$

$$E_z|_{i,j,k}^{n+1} = E_z|_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta x} \left[H_y|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}\Delta y} \left[H_x|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_x|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}} J_z|_{i,j,k}^{n+1/2} \quad (14\gamma).$$

όπου $\Delta x, \Delta y$ και Δz η χωρική διαμέριση κατά μήκος των αξόνων x, y και z αντίστοιχα και i, j, k ακέραιοι, ενώ με

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (15).$$

συμβολίζεται ένα χωρικό σημείο στο πλέγμα.

Στις παραπάνω εξισώσεις (13) και (14) υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά υλικά, οπότε κάθε δομικό στοιχείο χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους μ_0, ϵ και σ .

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων συνθέτει τον βασικό αλγόριθμο της μεθόδου FDTD. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, η καινούργια τιμή της συνιστώσας του πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος εξαρτάται μόνο από τις προηγούμενες τιμές των συνιστωσών του πεδίου στα γειτονικά σημεία, ενώ για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ο υπολογισμός του διανύσματος του πεδίου προχωρεί ένα σημείο ανά χρονική στιγμή.

4.3.2 Αριθμητική ευστάθεια της FDTD

Για να είναι ευσταθής ο αλγόριθμος των πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται για την επίλυση της διαφορικής μορφής των εξισώσεων του Maxwell πρέπει η χρονική αύξηση Δt να περιορίζεται από ένα ανώτατο όριο. Το όριο, που είναι συνάρτηση των χωρικών διαμερίσεων $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση [1]- [5]

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (16).$$

όπου $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ η ταχύτητα του φωτός,
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ οι διαστάσεις του κυβικού στοιχείου

Το όριο αυτό εξασφαλίζει την ευστάθεια του αλγορίθμου.

Από την εξίσωση είναι φανερό ότι το χρονικό βήμα που θα επιλεγεί για την προσομοίωση έχει καταλυτική επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όταν, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται μικρότερα κελιά στο πλέγμα να απαιτείται περισσότερος υπολογιστικός χρόνος για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση.

Σε κάθε προσομοίωση των εξισώσεων του Maxwell στις τρεις διαστάσεις, η διάδοση του κύματος κινδυνεύει από την αριθμητική διασπορά. Η διασπορά εξαρτάται από τη συχνότητα και τη διάδοση του κύματος. Για να αποφευχθεί η αριθμητική διασπορά στην προσομοίωση με την FDTD πρέπει το μέγεθος του κελιού να είναι τουλάχιστον το $1/10$ του μήκους κύματος της εφαρμοζόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

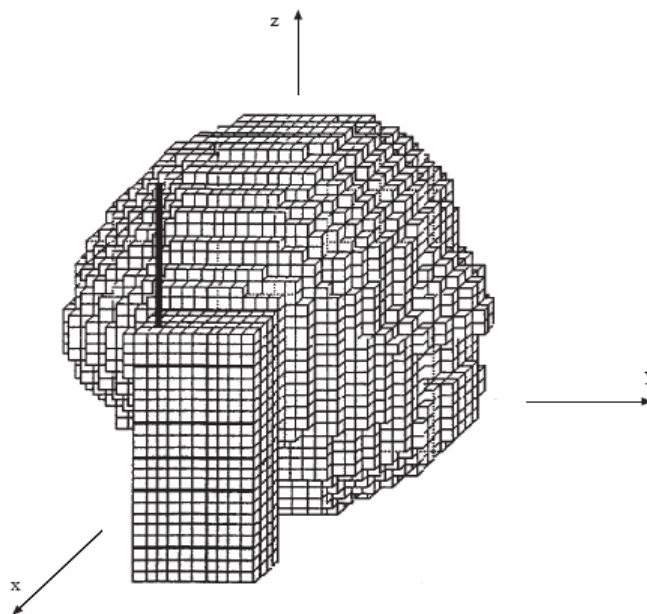
4.4 Οριακές συνθήκες απορρόφησης

Οι αλγόριθμοι για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων συχνά αντιμετωπίζουν το γεγονός ότι πολλές γεωμετρίες ορίζονται σε ανοιχτές περιοχές, δεν περιορίζονται δηλαδή μεταξύ ενός κατώτατου και ενός ανώτατου ορίου. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο ότι δεν μπορούν να υπολογιστούν οι εφαιτομενικές συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του εξωτερικού ορίου της γεωμετρίας. Έτσι συνήθως χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες απορρόφησης (Absorbing Boundary Condition, ABC) για να περιοριστεί ο υπολογιστικός χώρος, παραμένοντας ωστόσο αρκετά μεγάλος ώστε να περιλαμβάνει τις γεωμετρίες ενδιαφέροντος και τις κατάλληλες οριακές συνθήκες που προσομοιώνουν την έκταση του χώρου ως το άπειρο.

Όταν παραλείπονται οι οριακές συνθήκες απορρόφησης, η προσομοίωση μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητές ανακλάσεις στα όρια του πλέγματος, γεγονός εκ διαμέτρου αντίθετο με τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο. Συνήθως δυο είναι οι κατηγορίες των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται : οριακές συνθήκες που προκύπτουν άμεσα από τις διαφορικές εξισώσεις του Maxwell, ή οριακές συνθήκες με ένα υλικό απορρόφησης. Ευρέως χρησιμοποιείται η τεχνική του Απόλυτα Προσαρμοσμένου Στρώματος (Perfectly Matched Layer, PML) που αναπτύχθηκε από τον Berenger [2].

4.5 Διαμόρφωση με την FDTD

Η βασική διαμόρφωση ενός όγκου, ή αλλιώς μιας γεωμετρίας, η οποία χρησιμοποιείται για υπολογισμούς στην FDTD σε καρτεσιανές συντεταγμένες φαίνεται στην εικόνα 4.2. Ένα διακριτοποιημένο ανθρώπινο κεφάλι και ένα κινητό τηλέφωνο είναι ο όγκος που χρησιμοποιείται [4].



εικόνα 4.2 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και κινητού τηλεφώνου στην FDTD.

Η περιοχή του ενδιαφέροντος εκτείνεται από την αρχή του συστήματος των συντεταγμένων $(0,0,0)$ έως $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$. Ο όγκος όπου γίνονται οι υπολογισμοί με την FDTD είναι ένα ορθογώνιο κουτί που κατασκευάστηκε με κελιά διαστάσεων $Nx \times Ny \times Nz$, όπου $Nx = x_{\max} / \Delta x$, $Ny = y_{\max} / \Delta y$ και $Nz = z_{\max} / \Delta z$.

4.6 Συμπεράσματα

Στα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής δοσιμετρίας η FDTD έχει επικρατήσει έναντι των άλλων αριθμητικών μεθόδων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι επιτρέπει την άμεση εφαρμογή των εξισώσεων του Maxwell σε δομές με πολύπλοκη γεωμετρία, σε υλικά με απώλειες και σε μη γραμμικά υλικά και σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Ωστόσο η πολυπλοκότητα της δομής που προσομοιώνεται αυξάνει το υπολογιστικό κόστος (αυξάνεται ο αριθμός των κυβικών στοιχείων) ενώ μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν σφάλματα. Παρόλα αυτά όμως οι υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου είναι σημαντικά μικρότερες με σχέση με άλλες μεθόδους.

Αναφορές – Βιβλιογραφία.

- [1] Kunz K. S., Luebbers R.J., “The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics”, CRC Press, (1993).
- [2] Taflove A., “Advances in Computational Electrodynamics. The Finite – Difference Time – Domain Method”, Artech House, 1998.
- [3] Fransson M., “SAR simulations with SEMCAD, a new FDTD software package for computational electrodynamics”, Lund University, November 2001.
- [4] Paker S., Sevgi L., “FDTD Evaluation of the SAR Distribution in a Human Head Near a Mobile Cellular Phone”, Electric, vol. 6, no. 3, (1998).
- [5] Κουλουριδης Σ., “Μελέτη της Αλληλεπίδρασης Μεταξύ Βιολογικών Ιστών και Μικροκυματικών Πηγών Ακτινοβολίας σε Συνθήκες Κοντινού Πεδίου”, Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ, Δεκέμβριος 2003.

Κεφάλαιο 5

Υπολογισμός του SAR σε ένα ανατομικό, ρεαλιστικό μοντέλο κεφαλιού για dual band συσκευή κινητού τηλεφώνου

Στόχος της διπλωματικής εργασίας η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ενός αριθμητικού μοντέλου ανθρώπινου κεφαλιού και μιας τερματικής συσκευής κινητής τηλεφωνίας. Η προσομοίωση υπολογίζει τον SAR αλλά και την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του κεφαλιού χρησιμοποιώντας διαδοχικά δύο διαφορετικούς τύπους κεραιών κινητών τηλεφώνων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένα dual band ελικοειδές μονόπολο και προσομοιώθηκε η αλληλεπίδραση του πεδίου του με το μοντέλο του κεφαλιού. Στη συνέχεια το dual band ελικοειδές μονόπολο αντικαταστάθηκε με ένα dual band ελικοειδές δίπολο και έγινε προσομοίωση της επίδρασης της ακτινοβολίας του στο μοντέλο του κεφαλιού. Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικοί τύποι κεραιών για να διαπιστωθεί καταρχήν πως επιδρά η καθεμία στο κεφάλι αλλά κυρίως για να συγκριθούν οι επιδράσεις που προκαλούν. Τόσο το κεφάλι, όσο και το κινητό με την εκάστοτε κεραία προσομοιώθηκαν με το λογισμικό XFDTD [1].

5.1 Προσομοίωση με το πρόγραμμα XFDTD

Κατασκευάστηκε ένα ορθογωνικό υπολογιστικό πλέγμα (grid) με χωρική ανάλυση 2.5 mm, δηλαδή κάθε κυβικό στοιχείο του πλέγματος έχει διαστάσεις $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$. Εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες απορρόφησης PML με 8 στρώματα. Οι σκεδαστές απείχαν τουλάχιστον 30 κυβικά στοιχεία από τα όρια του πλέγματος. Οι διαστάσεις του πλέγματος ήταν $134 \times 130 \times 130$ κυβικά στοιχεία. Οι διαστάσεις αυτές ικανοποιούσαν τους περιορισμούς της σχεδίασης, που αφενός απαιτεί η γεωμετρία να βρίσκεται τουλάχιστον 15 στοιχεία μακριά από τα όρια του πλέγματος, για να υπάρχει ευστάθεια στους υπολογισμούς, και αφετέρου οι διαστάσεις του πλέγματος να είναι κατά το δυνατό ελάχιστες, για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Χρησιμοποιήθηκε dual band κεραία γιατί μπορεί να εκπέμπει σε δυο συχνότητες, ειδικότερα η έλικα χρησιμοποιείται για την εκπομπή στα 900 MHz και το μονόπολο για την εκπομπή στα 1800 MHz. Το σήμα που τροφοδοτείται στην κεραία, σε κάθε περίπτωση, είναι ημιτονοειδές. Ο SAR υπολογίστηκε σε μάζα 1g και 10g και στις δυο συχνότητες. Επίσης εκτιμήθηκε η κατανομή του πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού και η επίδραση του κεφαλιού στα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας.

Χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά ένα dual band ελικοειδές μονόπολο και ένα dual band ελικοειδές δίπολο. Οι πρώτες προσομοιώσεις έγιναν με το ελικοειδές μονόπολο, όπου η έλικα εκπέμπει στα 900 MHz μια το μονόπολο στα 1800 MHz. Εξετάστηκε το πώς η απόσταση της τερματικής συσκευής από το κεφάλι επηρεάζει την απορρόφηση του πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού. Έγιναν τρεις προσομοιώσεις με το κινητό να βρίσκεται αρχικά σε επαφή με το αυτί, στη συνέχεια να πιέζει το αυτί, και τέλος να είναι απομακρυσμένο από το αυτί. Όταν αναφέρεται ότι το κινητό εφάπτεται στο αυτί εννοείται ότι η συσκευή εφάπτεται στα ακραία

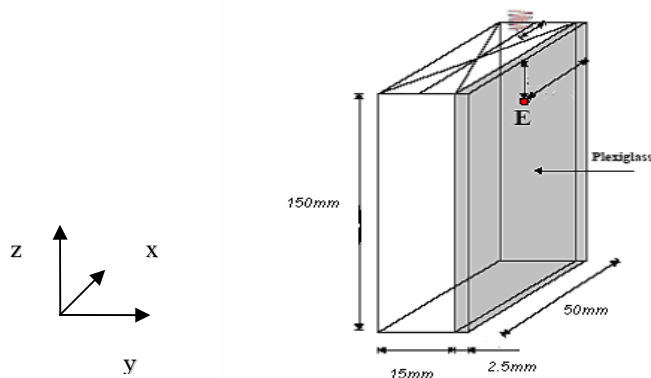
κυβικά στοιχεία που προσομοιώνουν το αυτί στο μοντέλο του κεφαλιού. Όταν το κινητό πιέζει το αυτί, θεωρείται πως ο χρήστης το πιέζει στο αυτί του, και στην προσομοίωση η συσκευή έχει μετακινηθεί, από τη θέση επαφής, δυο στοιχεία προς το εσωτερικό του αυτιού. Όταν τέλος υποτίθεται ότι ο χρήστης το κρατά σε απόσταση από το αυτί του, η συσκευή απομακρύνεται δυο στοιχεία, ως προς τη θέση επαφής, από το αυτί στο πλέγμα.

Ακολούθησαν οι προσομοιώσεις με το dual band ελικοειδές δίπολο, το οποίο αποτελείται από δυο κατοπτρικά ελικοειδή μονόπολα (και πάλι οι έλικες χρησιμοποιούνται για την εκπομπή στα 900 MHz ενώ τα μονόπολα για την εκπομπή στα 1800 MHz). Στις προσομοιώσεις με το ελικοειδές δίπολο, για λόγους απλοποίησης της διαδικασίας μοντελοποιήθηκε μόνο η κεραία και όχι το κουτί του κινητού. Αυτό δεν διαφοροποιεί τα αποτελέσματα, καθώς αυτό που παίζει ρόλο είναι η πηγή της ακτινοβολίας, δηλαδή το σημείο τροφοδοσίας της κεραίας, το οποίο προσομοιώνεται. Οι μετρήσεις με το ελικοειδές δίπολο έγιναν όταν η τερματική συσκευή βρίσκεται σε επαφή με το αυτί του χρήστη, όπως συμβαίνει όταν ο χρήστης χρησιμοποιεί το κινητό τηλέφωνο. Έγινε και μια προσομοίωση με το ελικοειδές δίπολο να είναι δίπλα στο αυτί για να φανεί το πώς επηρεάζει η απόσταση της κεραίας από το κεφάλι την κατανομή του πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού.

Οι δυο διαφορετικές κεραίες, το dual band ελικοειδές μονόπολο και το dual band ελικοειδές δίπολο, χρησιμοποιήθηκαν για να εξεταστεί πώς διαφοροποιούνται οι επιδράσεις που προκαλούνται στο κεφάλι από διαφορετικές κεραίες.

5.1.1 Μοντελοποίηση κινητού τηλεφώνου

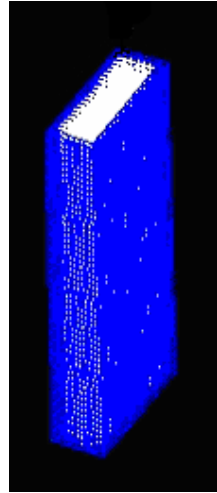
Η συσκευή του κινητού προσομοιώθηκε με ένα ορθογώνιο μεταλλικό κουτί, διαστάσεων $50\text{mm} \times 15\text{mm} \times 150\text{mm}$, ή $20 \times 6 \times 56$ κυβικά στοιχεία. Οι διαστάσεις αυτές είναι αντίστοιχες μιας πραγματικής συσκευής κινητού τηλεφώνου. Η παράπλευρη επιφάνεια του μεταλλικού κουτιού καλύφθηκε με ένα στρώμα διηλεκτρικού υλικού χωρίς απώλειες ($\epsilon_r=2.7$), πάχους 2.5mm (ένα κυβικό στοιχείο). Το μεταλλικό κουτί παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα της εικόνας 5.1, όπου φαίνονται οι διαστάσεις του και η θέση της dual band κεραίας. Το σημείο E αντιστοιχεί στην προβολή του καναλιού του αυτιού στην διηλεκτρική επιφάνεια του κουτιού.



Εικόνα 5.1 Το μεταλλικό κουτί που προσομοιώθηκε και οι διαστάσεις του. Το σημείο E αντιστοιχεί στην προβολή του αυτιού στο κουτί.

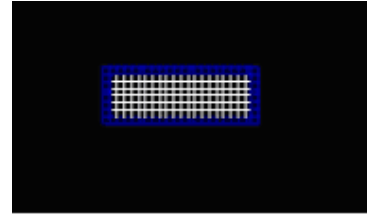
Η κεραία του κινητού τοποθετήθηκε σε μια γωνία της πάνω βάσης του μεταλλικού κουτιού.

Το μεταλλικό κουτί, όπως μοντελοποιήθηκε με το πρόγραμμα XFDTD, φαίνεται στην επόμενη εικόνα 5.2. (i). Ακόμα φαίνονται και οι τομές του στα τρία επίπεδα, εικόνες 5.2. (ii) – (iv).



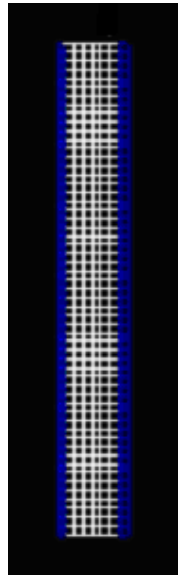
(i)

τριτοδιάστατο μοντέλο μεταλλικού
κουτιού



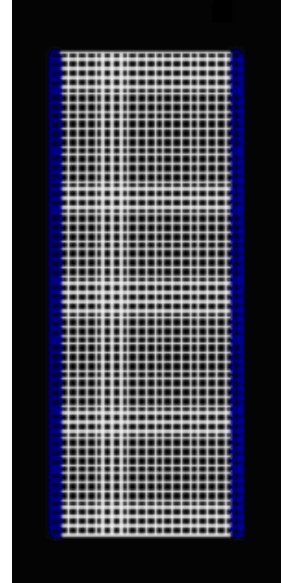
(ii)

xy τομή



(iii)

yz τομή



(iv)

xz τομή

εικόνα 5.2 Το μοντέλο του κινητού σε τρεις διαστάσεις (i) και τρεις τομές του μοντέλου (ii) – (iv).

5.1.2 Μοντελοποίηση dual band ελικοειδούς μονοπόλου

Η έλικα προσομοιώθηκε στο πλέγμα FDTD ως μια τετραγωνική έλικα από αγωγό χωρίς πάχος χρησιμοποιώντας ακμές στοιχείων του πλέγματος που αποτελούνταν από τέλεια αγωγίμο υλικό (Perfectly Electrical Conducting, PEC). Η γραμμική κεραία, δηλαδή το μονόπολο προσομοιώθηκε με ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο από τελείως αγωγίμο υλικό. Οι γεωμετρικές διαστάσεις της έλικας είναι:

$2a=5.5$ mm, η διάμετρος της έλικας

$B=4.4$ mm, η απόσταση δυο διαδοχικών βρόχων

$w=0.8$ mm, η ακτίνα του καλωδίου της έλικας

$L=6$, οι στροφές της έλικας

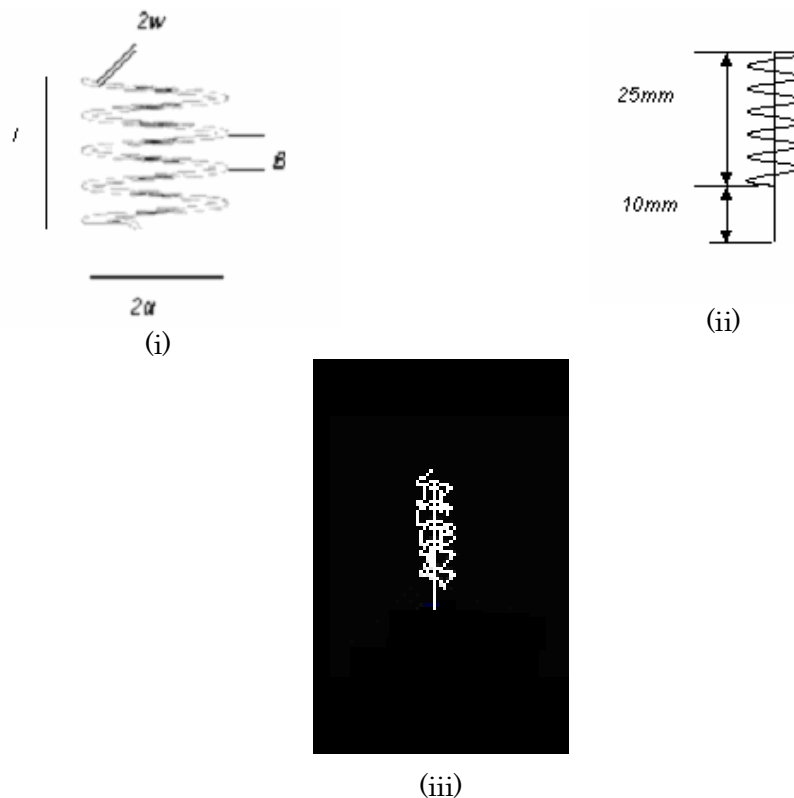
$l=27$ mm, το μήκος της έλικας

Η έλικα εκπέμπει στα 900 MHz και οι διαστάσεις της σημειώνονται αναλυτικά στο επόμενο σχήμα (i) της εικόνας 5.3.

Το μονόπολο εκπέμπει στα 1800 MHz και έχει μήκος $l=25$ mm, ενώ είναι συνδεδεμένο με ένα μεταλλικό τμήμα μήκους $l=10$ mm για να τροφοδοτείται. Με το μεταλλικό κομμάτι είναι συνδεδεμένη και η έλικα.

Στην εικόνα 5.3. (ii) φαίνεται dual band η ελικοειδής μονοπολική κεραία.

Στην εικόνα 5.3. (iii) φαίνεται η μοντελοποίηση της κεραίας στο XFDTD.



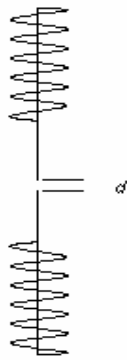
εικόνα 5.3 Οι διαστάσεις του dual band ελικοειδούς μονοπόλου (i) – (ii), και η μοντελοποίησή του με το XFDTD (iii).

Οι διαστάσεις του dual band ελικοειδούς μονοπόλου είναι ίδιες με τις διαστάσεις του dual band ελικοειδούς μονοπόλου που χρησιμοποίησε η ερευνητική ομάδα του Bernardi [2] για να μελετήσει την αλληλεπίδραση ενός κινητού τηλεφώνου και του κεφαλιού ενός χρήστη. Η επιλογή αυτή έγινε για να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δυο ερευνών με περισσότερη ασφάλεια και αξιοπιστία.

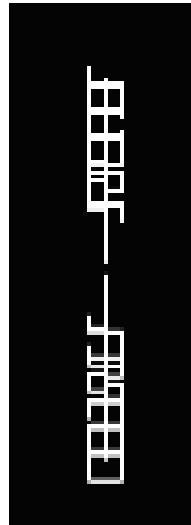
5.1.3 Μοντελοποίηση dual band ελικοειδούς διπόλου

Η dual band ελικοειδής διπολική κεραία αποτελείται από δυο τμήματα, ένα δεξιόστροφο ελικοειδές μονόπολο, και το κάτωτρώ του ως προς το επίπεδο $z=0$. Στο κατοπτρικό τμήμα το ελικοειδές μονόπολο είναι αριστερόστροφο. Όλες οι διαστάσεις και των δυο ελικοειδών μονοπόλων είναι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν προηγούμενα, διαφέρουν μόνο ως προς τη φορά περιστροφής. Μια επιπλέον παράμετρος στην περίπτωση του dual band ελικοειδούς διπόλου αποτελεί το διάκενο, $d=0.2\text{mm}$, μεταξύ των δυο μονοπόλων. Η διπολική κεραία απεικονίζεται στην εικόνα 5.4 (i), ενώ στην 5.4 (ii) είναι η μοντελοποίησή της με το XFDTD.

Και πάλι οι έλικες χρησιμοποιούνται για την εκπομπή στα 900 MHz ενώ τα μονόπολα για τα 1800 MHz.



(i)

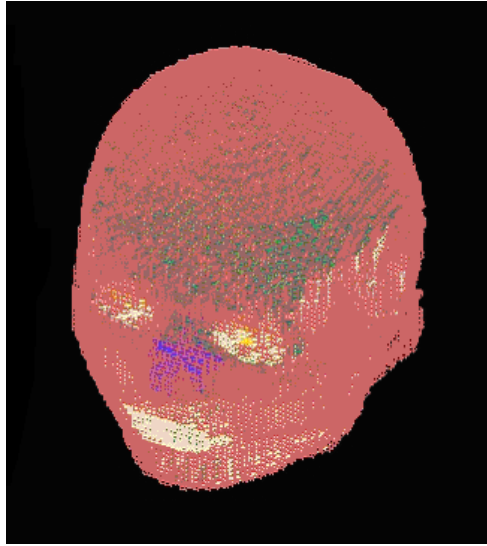


(ii)

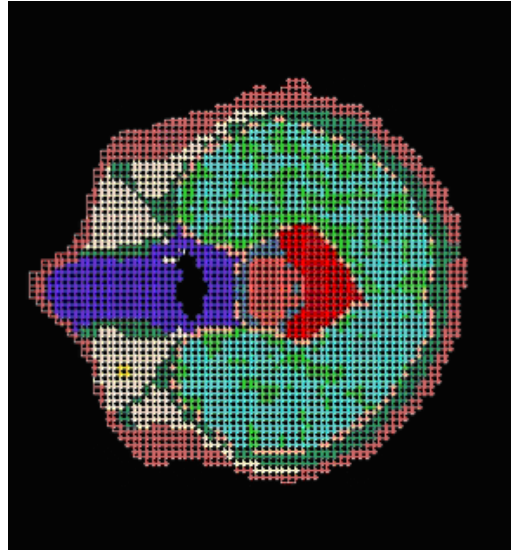
εικόνα 5.4 Το σχεδιάγραμμα του dual band ελικοειδούς διπόλου (i), και η μοντελοποίησή του με το XFDTD (ii).

5.1.4 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού

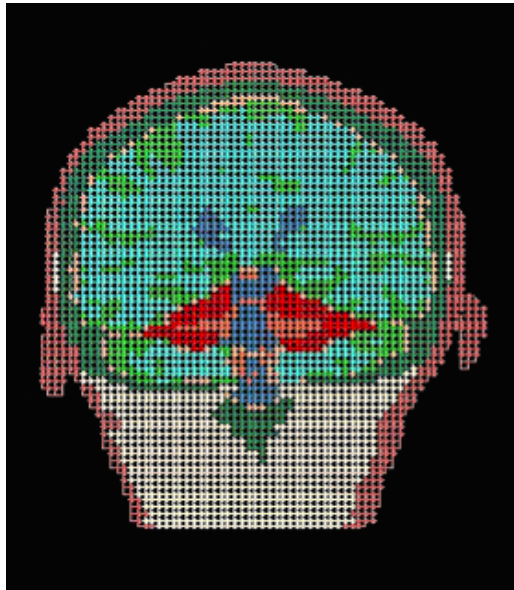
Το μοντέλο του κεφαλιού που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς με το λογισμικό XFDTD αναπτύχθηκε από τομές MRI του κεφαλιού ενός ενήλικα άνδρα στο πανεπιστήμιο Bradford [3]. Το μοντέλο, καθώς και τρεις τομές του παρουσιάζονται στις εικόνες 5.5 (i) – (iv).



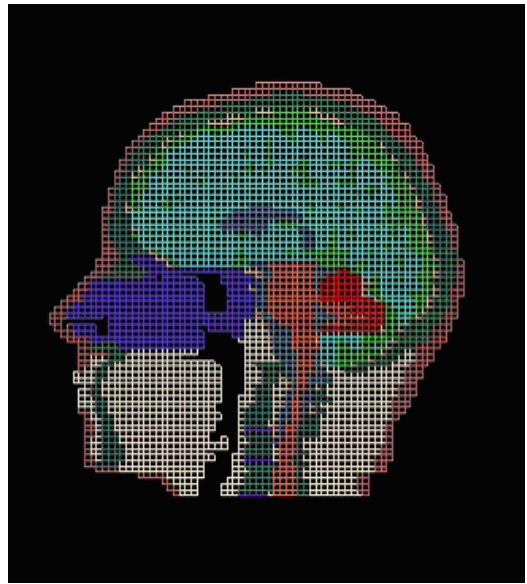
(i) τρισδιάστατο μοντέλο



(ii) xy τομή



(iii) yz τομή



(iv) xz τομή

εικόνα 5.5 Το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού βασισμένο σε δεδομένα MRI. Συγκεκριμένα στην εικόνα 5.5 (i) είναι το μοντέλο του κεφαλιού στις τρεις διαστάσεις. Στην εικόνα 5.5 (ii) φαίνεται το εσωτερικό του κεφαλιού σε μια τομή κατά το xy επίπεδο, στην 5.5 (iii) μια τομή στο yz και στην 5.5 (iv) μια τομή στο xz επίπεδο.

Το μοντέλο αυτό έχει χωρική ανάλυση 2.5 mm και αποτελείται από 13 διαφορετικούς ιστούς και όργανα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ιστών βασίστηκαν σε τιμές που δίνει η βιβλιογραφία [4], [5], [6]. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών και των οργάνων, που συνθέτουν το μοντέλο του κεφαλιού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 για τα 900 MHz και στον Πίνακα 4 για τα 1800 MHz.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 900 MHz

	σχετική επιτρεπτικότητα ϵ_r	αγωγιμότητα σ (Si/m)	πυκνότητα μάζας ρ (kg/m ³)
δερματικός ιστός	42.3	1.11	1100
οστό	16.5	0.43	2200
μήνιγξ	46.2	1.43	1100
εγκεφαλονωτιαίο υγρό	67.4	2.83	1020
φαϊά ουσία	51.5	1.57	1030
λευκή ουσία	33.1	0.84	1030
μυϊκός ιστός	49.6	1.58	1040
χόνδρος	38.3	1.23	1100
υγρό του ματιού	67.2	2.08	1000
φακοί του ματιού	42.1	1.10	1100
σκληρός χιτώνας	52.7	1.67	1100
νωτιαίος μυελός	33.1	0.84	1040
παρεγκεφαλίτιδα	40.1	1.15	1030

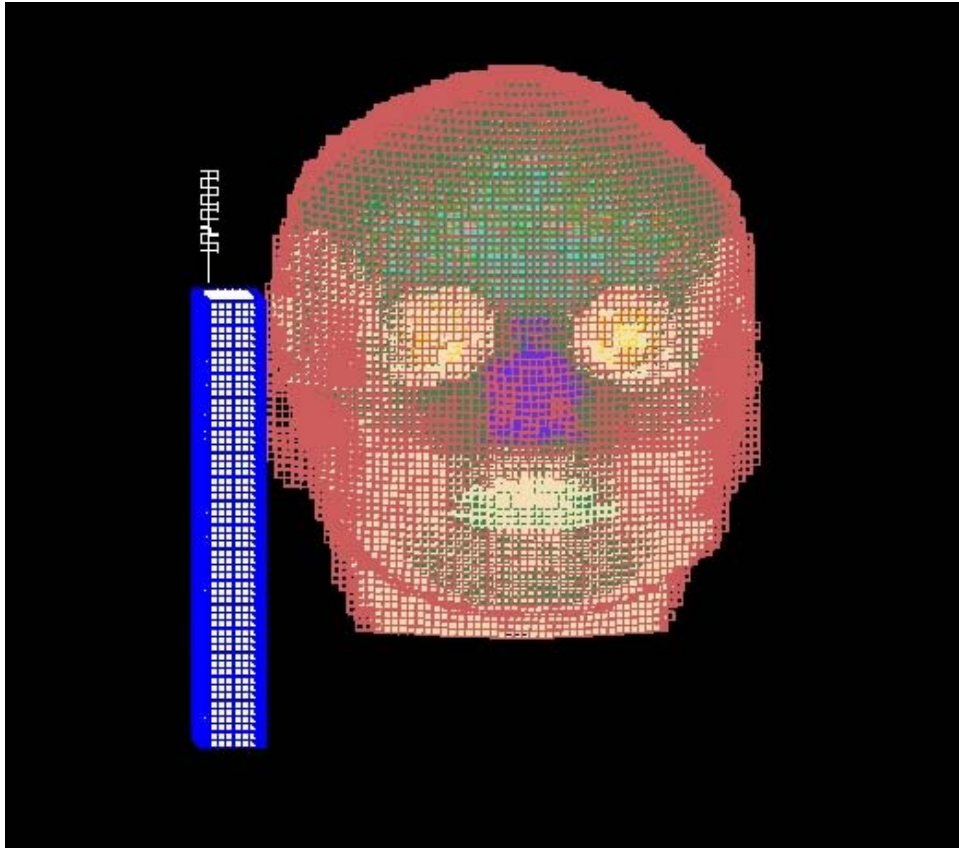
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 1800 MHz

	σχετική επιτρεπτικότητα ϵ_r	αγωγιμότητα σ (Si/m)	πυκνότητα μάζας ρ (kg/m ³)
δερματικός ιστός	44.5	0.77	1100
οστό	17.4	0.25	2200
μήνιγξ	44.5	0.77	1100
εγκεφαλονωτιαίο υγρό	68.3	2.42	1020
φαϊά ουσία	53.8	1.17	1030
λευκή ουσία	34.5	0.59	1030
μυϊκός ιστός	51.8	1.11	1040
χόνδρος	40.7	0.82	1100
υγρό του ματιού	67.9	1.68	1000
φακοί του ματιού	44.1	0.71	1100
σκληρός χιτώνας	54.9	1.17	1100
νωτιαίος μυελός	32.6	0.82	1040
παρεγκεφαλίτιδα	41.6	0.83	1030

5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Ι. Dual Band ελικοειδές μονόπολο

Η μοντελοποίηση κεφαλιού – κεραίας και στις δυο συχνότητες έχει τη μορφή που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Το κινητό έχει τοποθετηθεί κάθετα στο αυτί. Το κενό κυβικό στοιχείο μεταξύ κεραίας και μεταλλικού κουτιού αντιστοιχεί στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας.



εικόνα 5.6 Η μοντελοποίηση με το XFDTD του κινητού τηλεφώνου με το ελικοειδές μονόπολο και του ανθρώπινου κεφαλιού.

Για να ελεγχθεί η σύγκλιση και η ευστάθεια της FDTD έγιναν αρκετές δοκιμαστικές προσομοιώσεις με διαφορετικά χρονικά βήματα (time steps). Στον Πίνακα 5 καταγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με διαφορετικά time steps, έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση. Φαίνεται ότι η σύγκλιση επιτεύχθηκε στα 2500 time steps όταν συχνότητα εκπομπής της κεραίας ήταν τα 1800 MHz, ενώ χρειάστηκαν 5000 time steps για να συγκλίνει η προσομοίωση όταν η κεραία εξέπεμπε στα 900 MHz.

Στον Πίνακα 5 καταγράφονται οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR όπως υπολογίστηκαν σε όλο το κεφάλι, σε ένα γραμμάριο ιστού, σε 10 γραμμάρια ιστού και σε ένα γραμμάριο εγκεφαλικής ουσίας. Ακόμα καταγράφεται η αντίσταση εισόδου στο κεφάλι.

Οι υπολογισμοί στα 900 MHz έχουν γίνει με ακτινοβολούμενη ισχύ 250 mW, ενώ στο 1800 MHz με 125 mW.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟ ΚΕΦΑΛΙ, ΣΕ 1g ΙΣΤΟΥ, ΣΕ 10g ΙΣΤΟΥ ΚΑΙ ΣΕ 1g ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ 900 MHz ΚΑΙ 1800 MHz. ΕΠΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.

dual band ελικοειδές μονόπολο			Max SAR (W/kg)	Max SAR _{1g} (W/kg)	Max SAR _{10g} (W/kg)	Max SAR _{1gBRAIN} (W/kg)	Αντίσταση εισόδου Ohm
		Time steps					
1800 MHz	σε επαφή με το αυτί	2500	2.7848	1.2545	0.67072	0.76774	56.65
		3000	2.7869	1.2582	0.66941	0.77069	57.05
	με πίεση στο αυτί	2500	2.7488	1.6397	1.0359	1.1763	51.50
	απομα- κρυσμένο από το αυτί	2500	1.4322	0.97631	0.43273	0.45008	67.5
900 MHz	σε επαφή με το αυτί	4000	4.2556	2.2600	1.3687	1.2218	26.82
		4500	4.5538	2.4168	1.4647	1.3065	25.35
		5000	4.4977	2.3886	1.4482	1.2933	25
	με πίεση στο αυτί	5000	6.4245	2.9276	1.7649	1.5774	26.76
	απομα- κρυσμένο από το αυτί	5000	2.5137	1.4596	0.91369	0.84803	25.31

Μπορούμε καταρχήν να παρατηρήσουμε πως απαιτούνται λιγότερα time steps για να συγκλίνει η προσομοίωση στα 1800 MHz, από όσα απαιτούνται στα 900 MHz. Δηλαδή για τη σύγκλιση της προσομοίωσης στα 900 MHz χρειάζεται περισσότερος υπολογιστικός χρόνος. Ακόμα, από τον πίνακα φαίνεται πως οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR είναι μεγαλύτερες στα 900 MHz από αυτές στα 1800 MHz, σε όλες τις θέσεις του κινητού ως προς το κεφάλι. Ενώ, και στις δύο συχνότητες, οι τιμές του SAR που υπολογίζονται σε 1g ιστού (SAR_{1g}) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίζονται στα 10g (SAR_{10g}).

Ακόμα υπολογίστηκε η μέγιστη μέση τιμή του SAR σε 1g εγκεφαλικής ουσίας ($SAR_{1gBRAIN}$), η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την τιμή του SAR σε 10g ιστού. Ο $SAR_{1gBRAIN}$ είναι ελαφρώς μικρότερος από τον SAR_{1g} , καθώς ο εγκέφαλος βρίσκεται πιο βαθιά μέσα στο κεφάλι, οπότε βρίσκεται και σε μεγαλύτερη απόσταση από την κεραία του κινητού (πηγή ακτινοβολίας).

Όπως ήταν αναμενόμενο οι μεγαλύτερες μέγιστες μέσες τιμές του SAR βρέθηκαν όταν το κινητό βρίσκεται δυο κυβικά στοιχεία μέσα στο κεφάλι (η μικρότερη απόσταση κεραίας – κεφαλιού), ακολουθεί η περίπτωση όπου το κινητό είναι στη φυσική του απόσταση από το κεφάλι, ενώ οι χαμηλότερες τιμές εντοπίστηκαν όταν το κινητό είναι ένα κυβικό στοιχείο πιο μακριά από το κεφάλι. Τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν και για τις δυο συχνότητες, για όλους τους όγκους υπολογισμού. Οι τιμές όταν το κινητό είναι απομακρυσμένο είναι εντυπωσιακά χαμηλότερες από αυτές που βρέθηκαν όταν το κινητό είναι δυο κυβικά στοιχεία μέσα στο κεφάλι. Είναι αξιοσημείωτο το πόσο σημαντική είναι η διαφορά στους SARs όταν η απόσταση του κινητού από το κεφάλι μεταβάλλεται έστω και ένα κυβικό στοιχείο.

Συγκρίνοντας τις τιμές του Πίνακα 5 με τα αντίστοιχα όρια ασφαλούς έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, βρέθηκε πως το όριο των 2 W/kg όπως υπολογίζεται σε 10g ιστού ικανοποιείται από τα αποτελέσματα (τα οποία κυμαίνονται από 0.669 – 1.764 W/kg) σε όλες της θέσεις της κεραίας και στις δυο συχνότητες. Το όριο όμως των 1.6 W/kg, που υπολογίζεται σε 1g ιστού, δεν ικανοποιείται από όλα τα αποτελέσματα. Οι SARs που υπολογίστηκαν για όλες τις θέσεις της κεραίας στα 1800 MHz είναι χαμηλότεροι από το όριο ασφαλείας των 1.6 W/kg (μόνο όταν το κινητό ακουμπά με πίεση στο αυτί ο SAR υπερβαίνει ελαφρά το όριο). Στα 900 MHz, όλοι ανεξαιρέτως οι SARs υπερβαίνουν το όριο ασφαλείας.

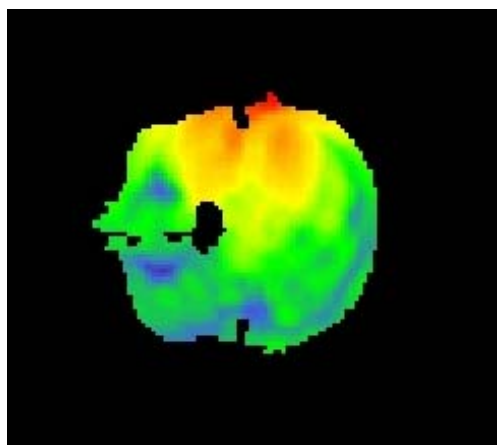
Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν οι απεικονίσεις της κατανομής του SAR στο εσωτερικό του κεφαλιού, σε τομές στο xy και στο yz επίπεδο, όπως υπολογίστηκαν και στις δυο συχνότητες λειτουργίας της κεραίας, τόσο σε 1g ιστού, όσο και σε 10g ιστού. Οι τομές έγιναν στα επίπεδα z και x, αντίστοιχα, όπου παρατηρείται η μέγιστη τιμή του SAR.

1800 MHz

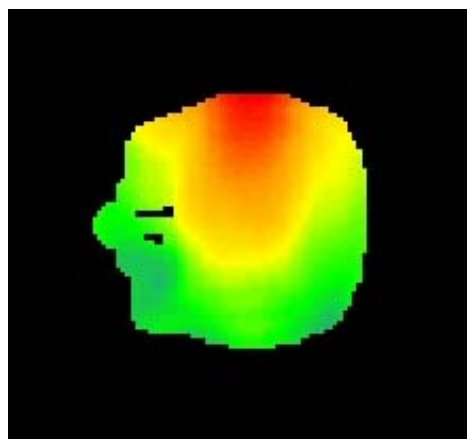
xy επίπεδο



η κλίμακα είναι σε db
στο κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή του SAR

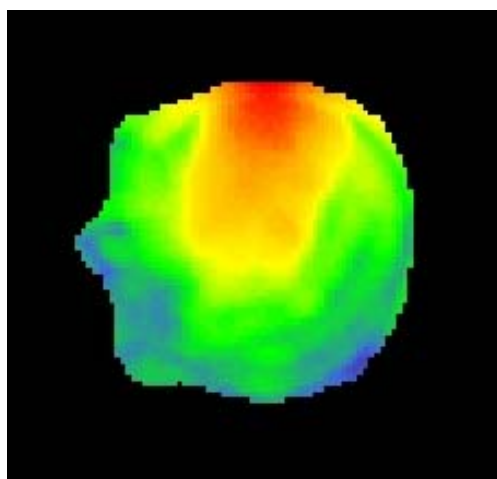


(a)

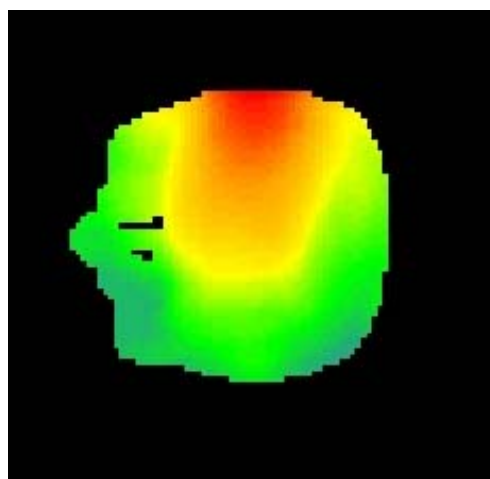


(b)

(i)

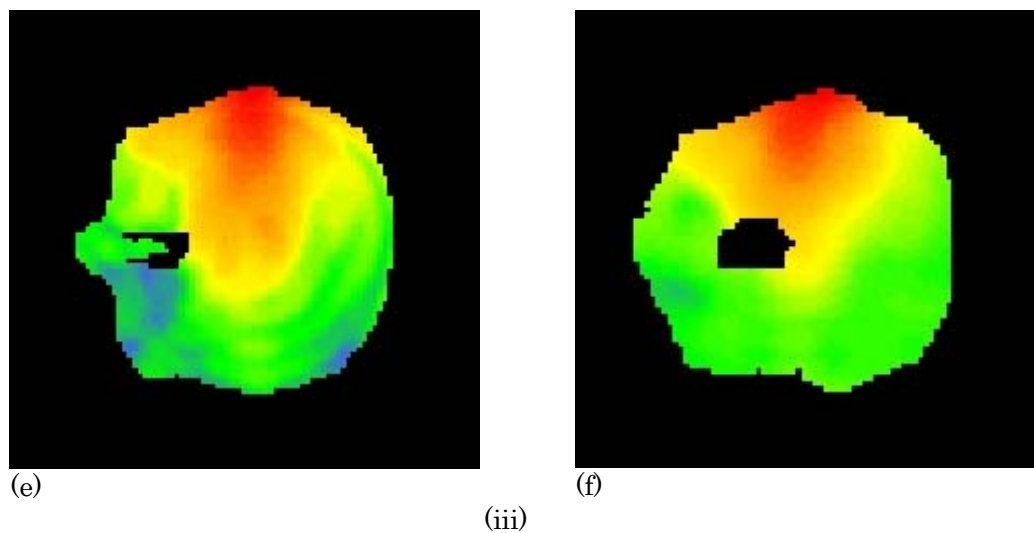


(c)



(d)

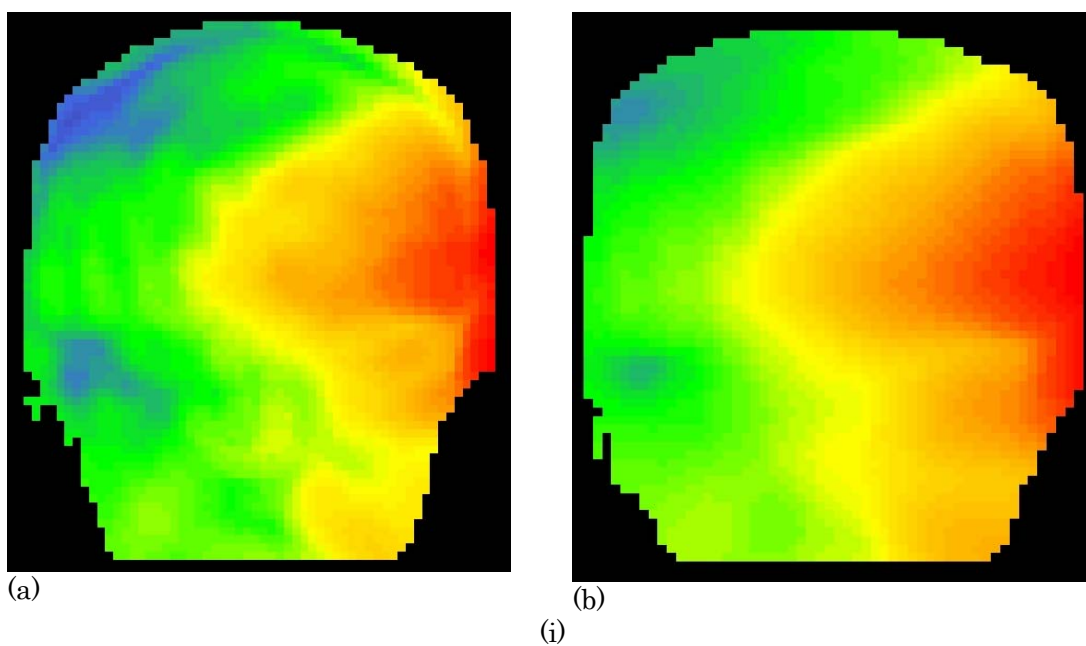
(ii)

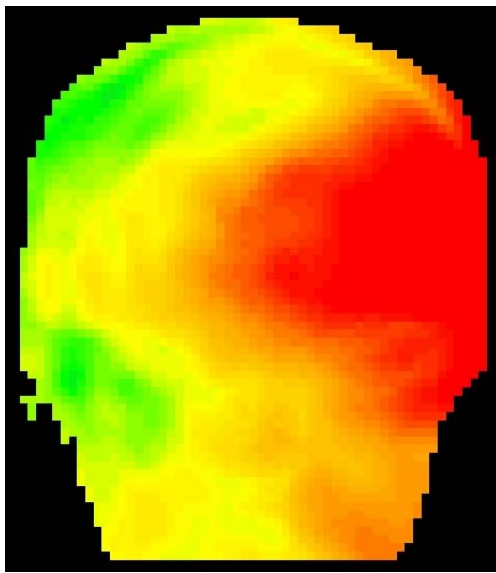


εικόνα 5.7 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν

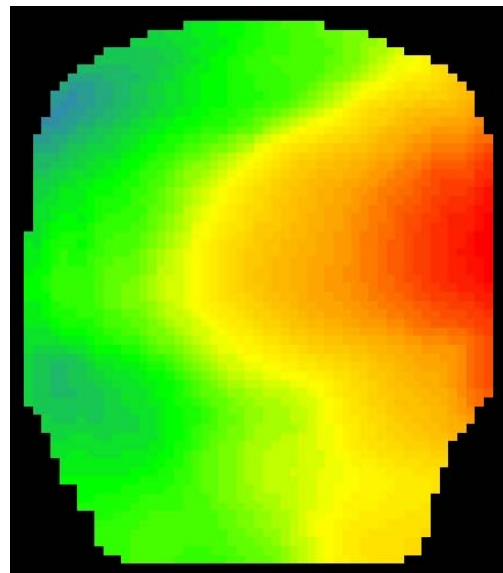
- (i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,
- (ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και
- (iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.

yz επίπεδο



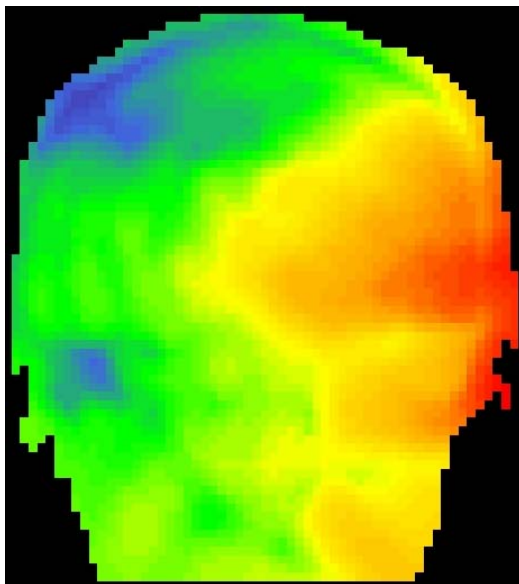


(c)

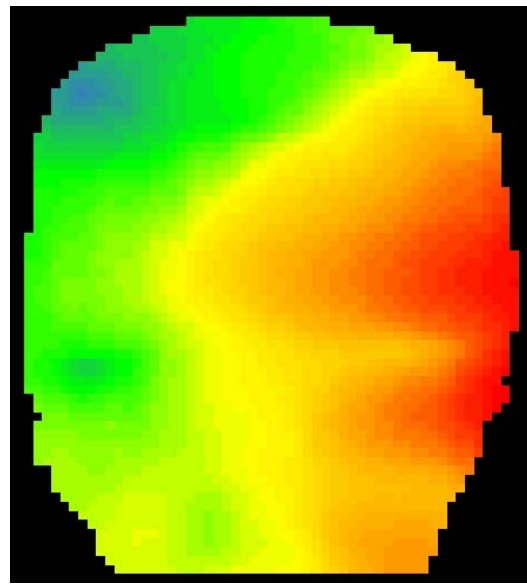


(d)

(ii)



(e)



(f)

(iii)

εικόνα 5.8 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν

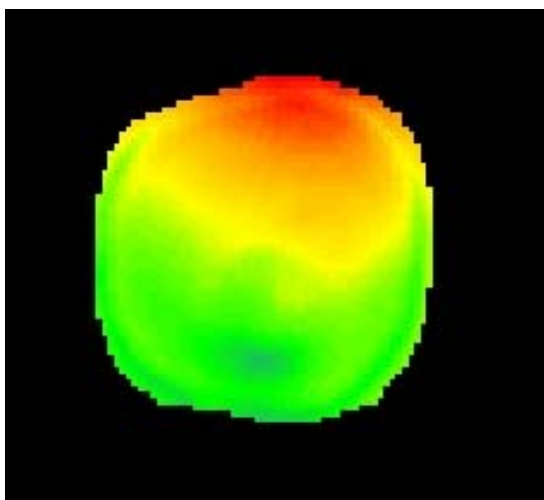
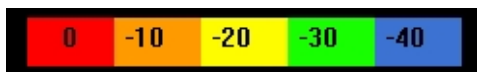
(i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,

(ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και

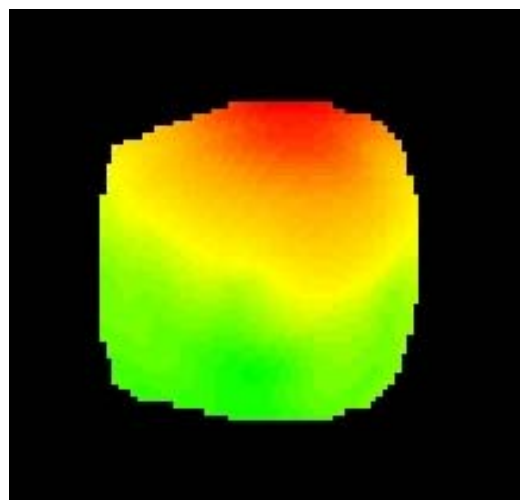
(iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.

900 MHz

xy επίπεδο

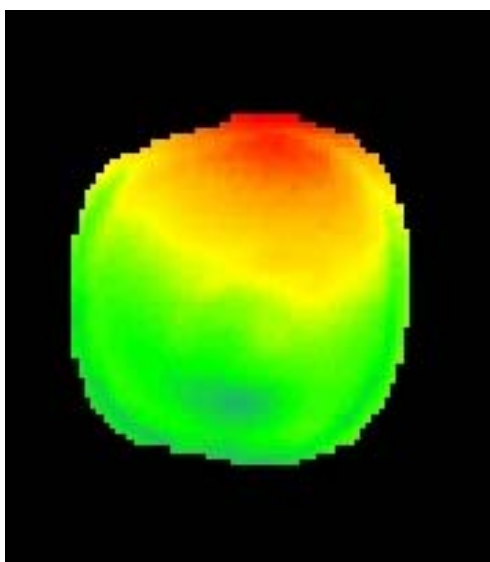


(a)

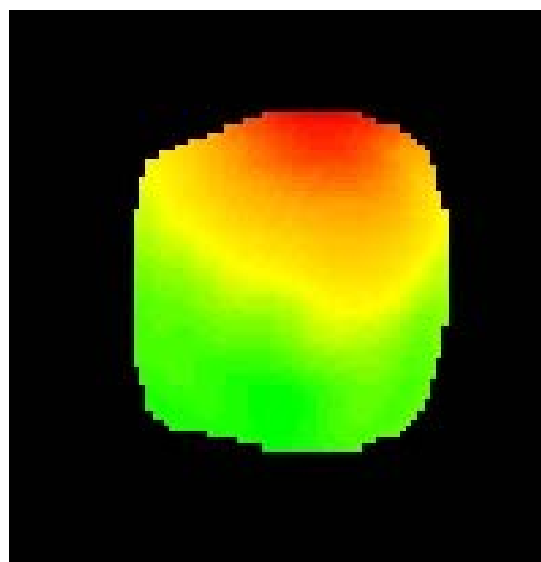


(b)

(i)

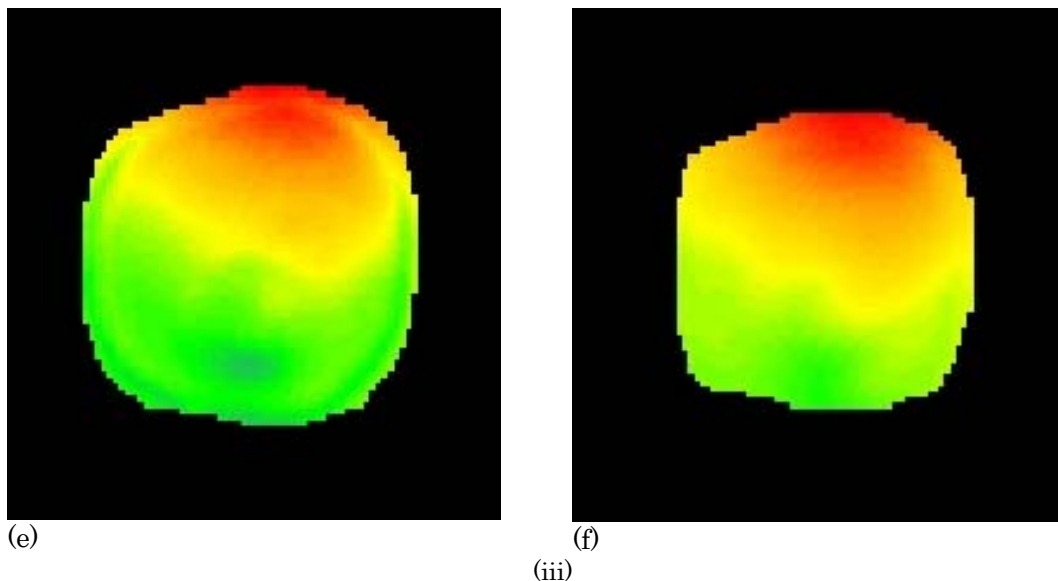


(c)



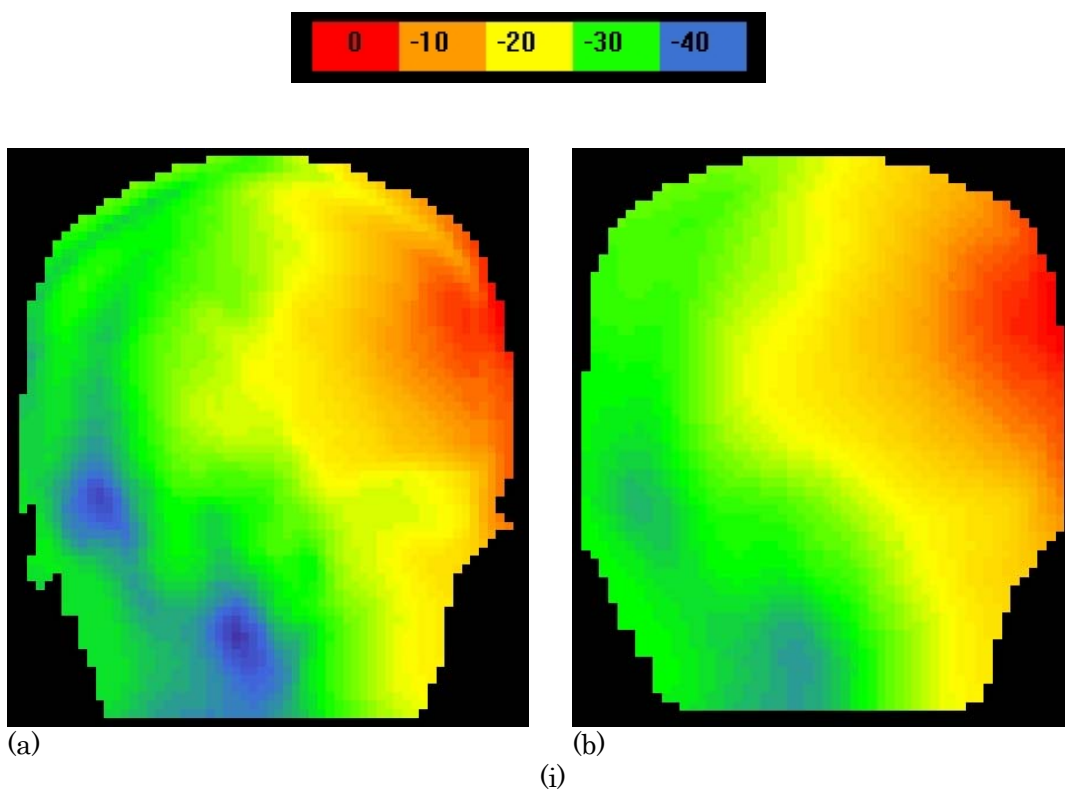
(d)

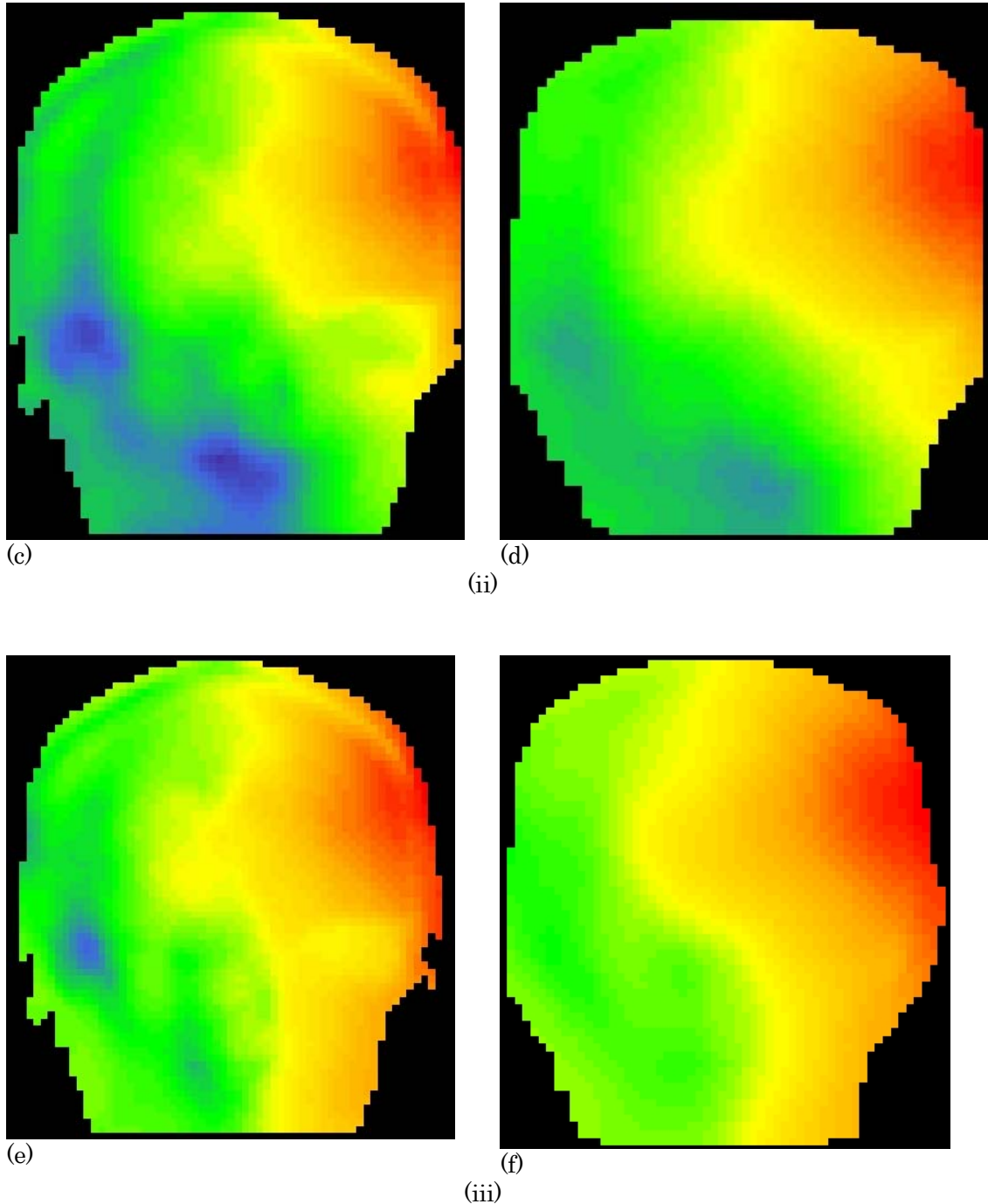
(ii)



εικόνα 5.9 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν
 (i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,
 (ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και
 (iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.

yz επίπεδο





εικόνα 5.10 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν

- (i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,
- (ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και
- (iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.

Μελετώντας την κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού τόσο στις xy τομές, όσο και στις yz , μπορούν να εξαχθούν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

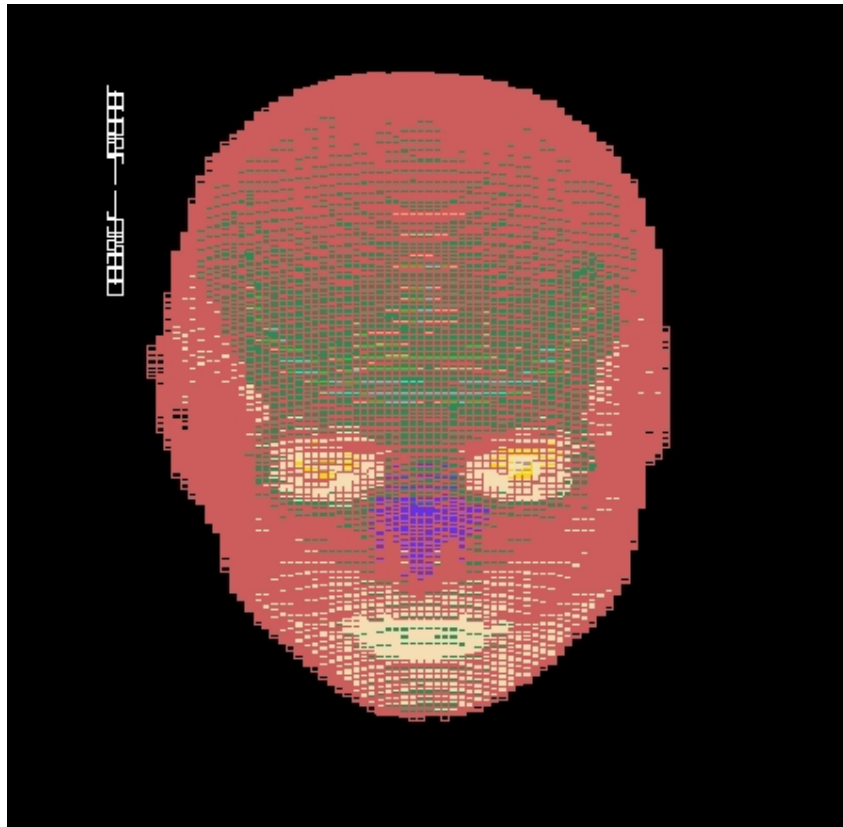
Παρατηρείται καταρχήν, πως το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας, και για τις δυο συχνότητες, είναι μεγαλύτερο όταν ο SAR υπολογίζεται σε 10g ιστού. Διαφοροποιείται μόνο η περίπτωση που το κινητό εκπέμπει στα 1800 MHz και ο SAR υπολογίζεται σε 1g ιστού.

Και στις δυο συχνότητες η μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολούμενης ισχύος παρατηρήθηκε στην περίπτωση που το κινητό είναι πολύ κοντά στο κεφάλι, δηλαδή στην περίπτωση που βρίσκεται δυο κυβικά στοιχεία μέσα στο πλέγμα του κεφαλιού. Ακολουθεί η περίπτωση που το κινητό βρίσκεται στη φυσική του θέση ως προς το κεφάλι. Ενώ τέλος, όταν το κινητό είναι απομακρυσμένο από το κεφάλι του χρήστη (βρίσκεται ένα κυβικό στοιχείο μακριά), το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας ελαττώνεται ακόμα περισσότερο.

Τέλος φαίνεται πως στα 1800 MHz η ενέργεια απορροφάται σε ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος από ότι στα 900 MHz.

III. Dual band ελικοειδές δίπολο.

Η μοντελοποίηση κεφαλιού – ελικοειδούς διπόλου φαίνεται στην επόμενη εικόνα 5.11. Στην περίπτωση αυτή δεν έχει μοντελοποιηθεί το μεταλλικό κουτί της συσκευής του τηλεφώνου, όπως ήδη έχει αναφερθεί. Υποτίθεται όμως ότι το κινητό τηλέφωνο βρίσκεται σε επαφή με το αυτί του χρήστη.



εικόνα 5.11 Η μοντελοποίηση με το XFDTD του κεφαλιού και του ελικοειδούς διπόλου σε φυσική θέση.

Το κενό κυβικό στοιχείο ανάμεσα στα ελικοειδή μονόπολα αντιστοιχεί στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας.

Προσομοιώσεις έγιναν στα 900 MHz και στα 1800 MHz, στον επόμενο Πίνακα 6 όμως καταγράφονται μόνο οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR, υπολογισμένες σε 1 και 10g, για τα time steps που υπήρξε σύγκλιση. Η προσομοίωση των 900 MHz συνέκλινε στα 4000 time steps, ενώ των 1800 MHz στα 3000 time steps. Το κινητό κρατήθηκε σε επαφή με το αυτί και δε μετακινήθηκε καθόλου, σε αντίθεση με τις προσομοιώσεις με το ελικοειδές μονόπολο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR, ΟΠΩΣ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ DUAL BAND ΕΛΙΚΟΙΔΕΣ ΔΙΠΟΛΟ ΜΕ ΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΟΥ ΝΑ ΕΦΑΠΤΕΤΑΙ ΣΤΟ ΑΥΤΙ.

Dual band Ελικοειδές Δίπολο (ρεαλιστική θέση)	Max SAR (W/kg)	Max SAR _{1g} (W/kg)	Max SAR _{10g} (W/kg)
1800 MHz	0.44915	0.26244	0.16240
900 MHz	1.4630	0.78552	0.48953

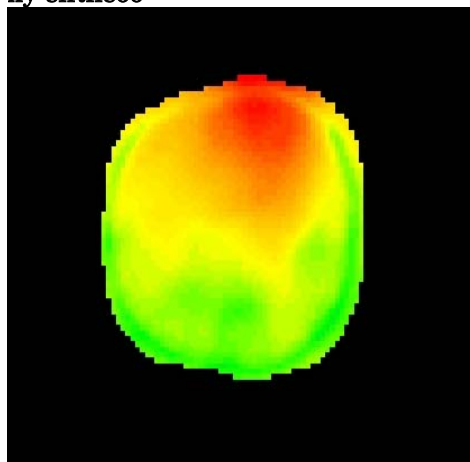
Παρατηρείται πως στα 900 MHz η μέγιστη μέση τιμή του SAR είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη μέση τιμή του SAR στα 1800 MHz, όπως προέκυψε και με το ελικοειδές μονόπολο. Οι μέγιστες τιμές όμως του SAR που υπολογίζονται με το ελικοειδές δίπολο είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν με το ελικοειδές μονόπολο, ενώ βρίσκονται μέσα στα όρια ασφαλούς έκθεσης.

Ακολουθούν οι κατανομές του SAR στα xy και yz επίπεδα, όπου υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές του σε 1g και σε 10g, τόσο στα 900 MHz, όσο και στα 1800 MHz.

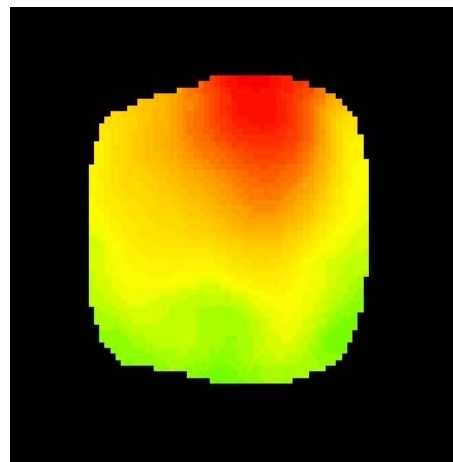
1800 MHz



xy επίπεδο



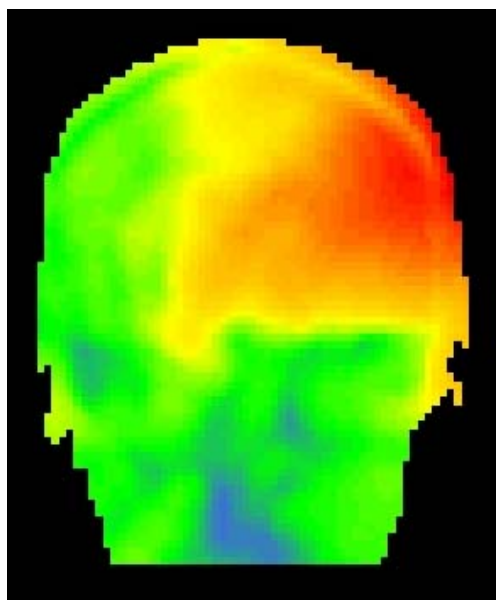
(a)



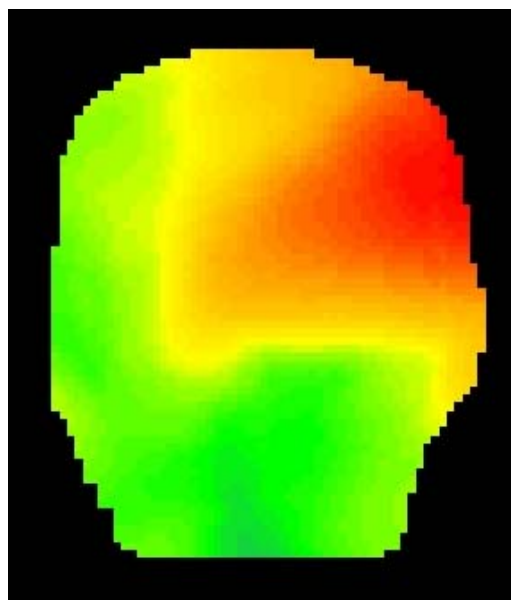
(b)

εικόνα 5.12 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές δίπολο σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

yz επίπεδο



(a)



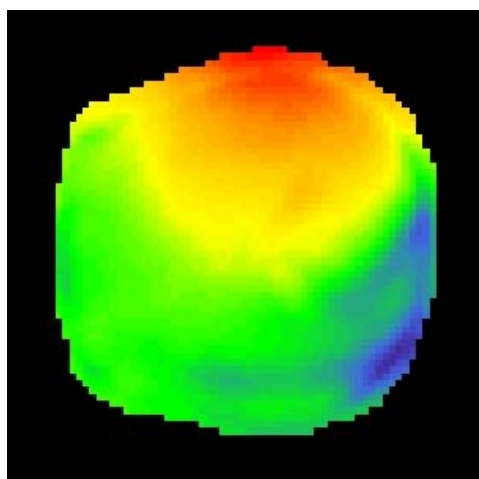
(b)

εικόνα 5.13 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές δίπολο σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

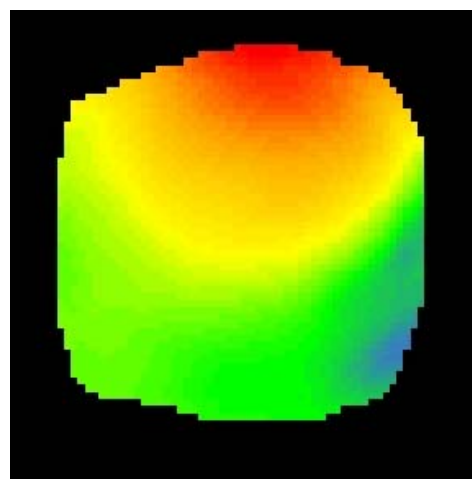
900 MHz



xy επίπεδο



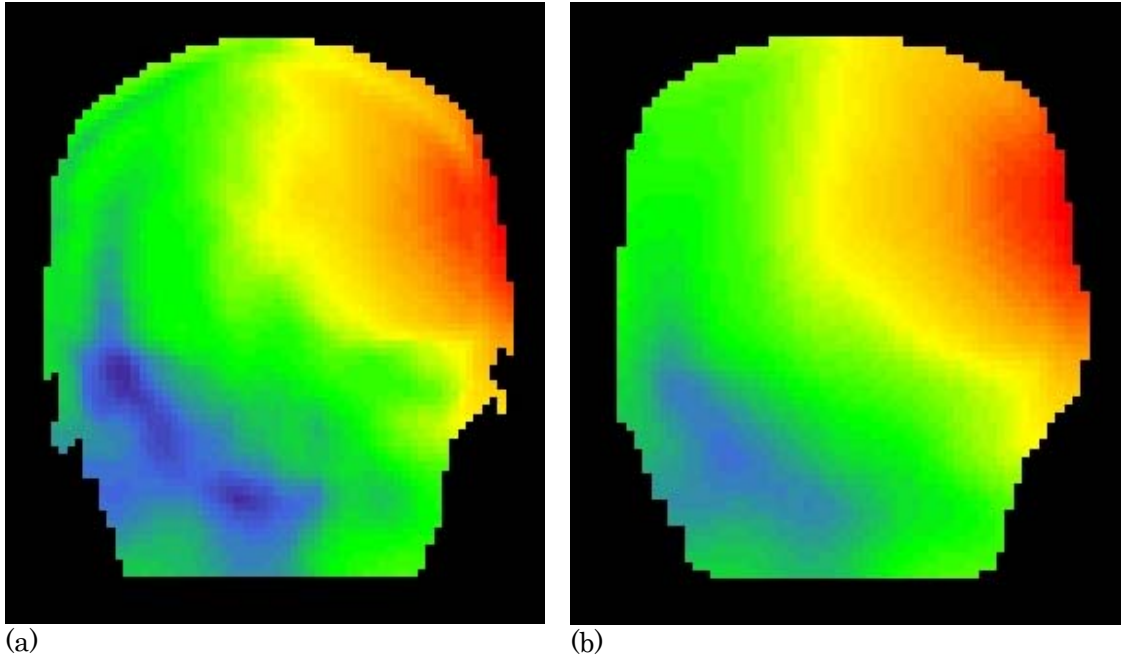
(a)



(b)

εικόνα 5.14 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές δίπολο σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

yz επίπεδο



εικόνα 5.15 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές δίπολο σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

Συγκρίνοντας τις κατανομές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κεφαλιού όταν πηγή του πεδίου είναι το dual band ελικοειδές δίπολο, με την προηγούμενη περίπτωση όπου πηγή ήταν το dual band ελικοειδές μονόπολο, εντοπίζουμε καταρχήν πως η περιοχή όπου βρίσκεται η μέγιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας έχει μετατοπιστεί προς τα πάνω (κατά z), δηλαδή πάνω από το αυτί. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το σημείο τροφοδοσίας του διπόλου, που είναι ψηλότερα στο πλέγμα από το σημείο τροφοδοσίας της έλικας.

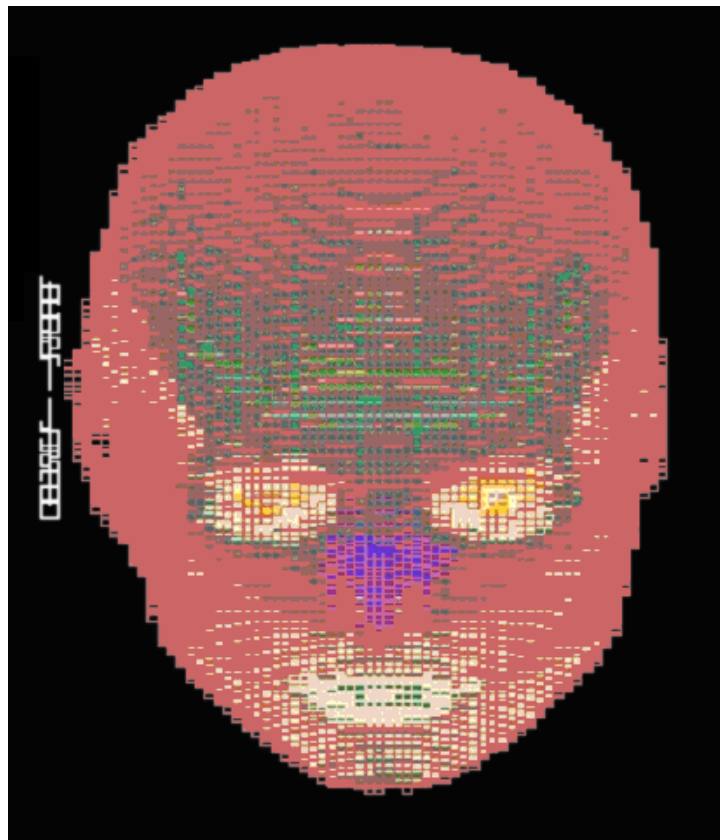
Οι υπόλοιπες παρατηρήσεις είναι ανάλογες με την προηγούμενη περίπτωση. Το πεδίο, δηλαδή, διεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος στα 1800 MHz.

III. Dual band ελικοειδές δίπολο που ακουμπά στο αυτί.

Για να φανεί χαρακτηριστικά και πιο έντονα η επίδραση της κεραίας στο κεφάλι, τοποθετήθηκε το dual band ελικοειδές δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη και έγιναν δυο προσομοιώσεις, μια στα 900 MHz και μια στα 1800 MHz.

Βρέθηκε ότι όταν η κεραία είναι τόσο κοντά στον χρήστη οι μέγιστες τιμές του SAR αυξάνονται δραματικά, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται και πάλι στα 900 MHz.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η τοποθέτηση της κεραίας δίπλα στο αυτί του χρήστη.



εικόνα 5.16 Η μοντελοποίηση του κεφαλιού με το δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη με το XFDTD.

Οι μέγιστοι SAR που υπολογίστηκαν στις προσομοιώσεις καταγράφονται στον Πίνακα 7.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7 ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR, ΟΠΩΣ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ DUAL BAND ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΣ ΔΙΠΟΛΟ ΔΙΠΛΑ ΣΤΟ ΑΥΤΙ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ, ΣΤΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ 900 MHz ΚΑΙ 1800 MHz.

Dual band Ελικοειδές Δίπολο (δίπλα στα αυτί)	Max SAR (W/kg)	Max SAR _{1g} (W/kg)	Max SAR _{10g} (W/kg)
1800 MHz	8.3562	4.5921	1.8992
900 MHz	19.507	7.3487	2.4375

Στον Πίνακα 7 φαίνεται καθαρά και πάλι πως στα 900 MHz ο μέγιστος SAR είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν στα 1800 MHz.

Οι τιμές του SAR, στην περίπτωση αυτή που η κεραία έχει τοποθετηθεί δίπλα στο αυτί του χρήστη, είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που έχουν υπολογιστεί όταν η κεραία βρίσκεται στη φυσική, ρεαλιστική θέση της.

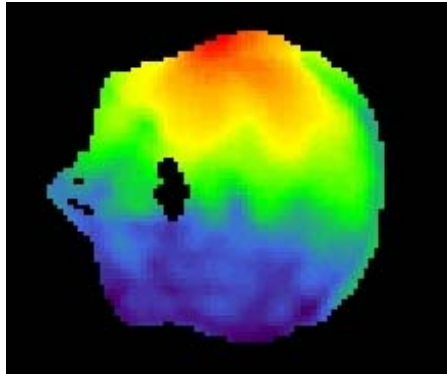
Οι τιμές του SAR που υπολογίζονται σε 1g ιστού είναι εξαιρετικά αυξημένες σε σχέση με τα 1.6 W/kg που είναι το όριο ασφαλούς έκθεσης. Οι τιμές όμως υπολογίζονται σε 10g ιστού, είναι σχετικά στο όριο ασφαλούς έκθεσης, 2 W/kg.

Ακολουθούν οι κατανομές του μέγιστου SAR στα επίπεδα xy και yz.

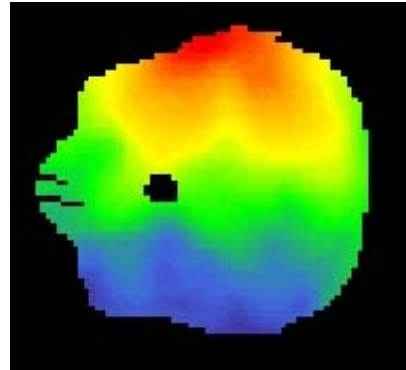
1800 MHz



xy επίπεδο



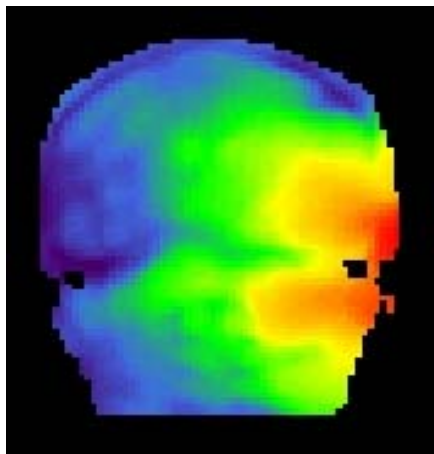
(a)



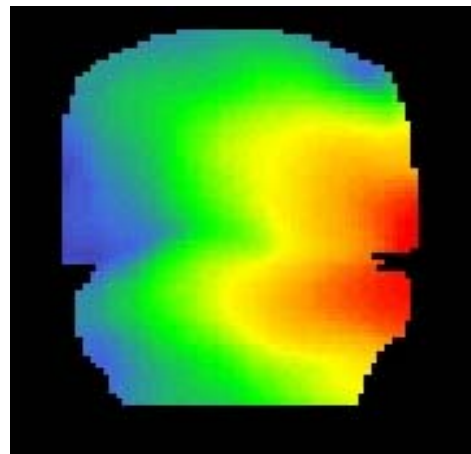
(b)

εικόνα 5.17 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

yz επίπεδο



(a)



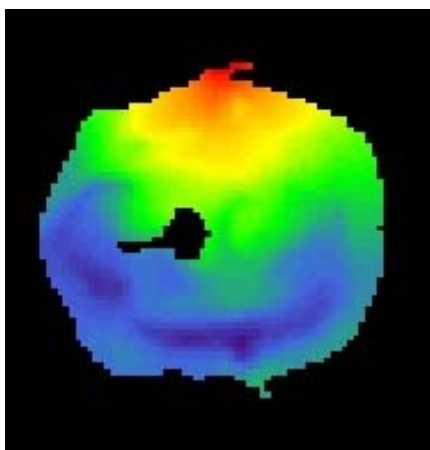
(b)

εικόνα 5.18 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

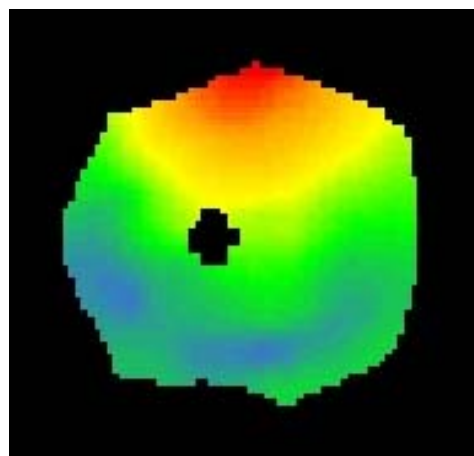
900 MHz



xy επίπεδο



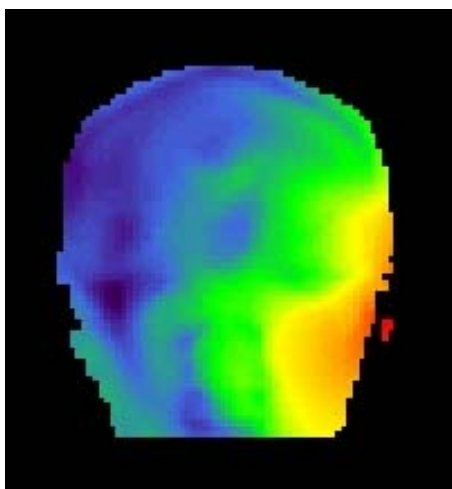
(a)



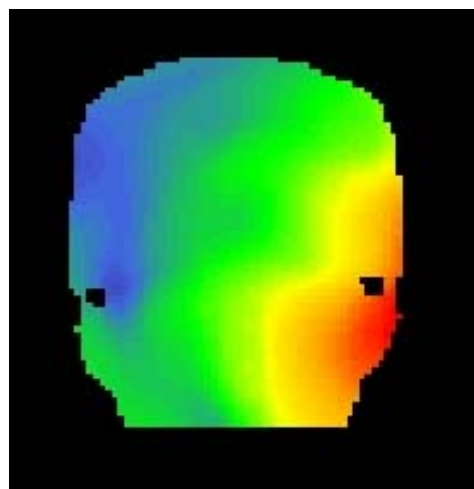
(b)

εικόνα 5.19 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

yz επίπεδο



(a)



(b)

εικόνα 5.20 κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές δίπολο δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.

IV. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Το dual band ελικοειδές μονόπολο που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής έχει τις ίδιες γεωμετρικές διαστάσεις με το dual band ελικοειδές μονόπολο που χρησιμοποίησε η ερευνητική ομάδα του Bernardi [2] για να υπολογίσει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται σε ένα μοντέλο κεφαλιού. Οι προσομοιώσεις διαφέρουν στο μέγεθος του κυβικού στοιχείου του ορθογωνικού πλέγματος, εδώ χρησιμοποιήθηκε κυβικό στοιχείο μεγέθους $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$, ενώ η ομάδα του Bernardi χρησιμοποίησε ένα κύριο πλέγμα με διαστάσεις $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 3\text{mm}$ και ένα υποπλέγμα με μεταβλητές διαστάσεις.

Η ερευνητική ομάδα μελέτησε την αλληλεπίδραση κεραίας – κεφαλιού χρήστη όταν η κεραία εξέπεμπε στα 900 MHz και στα 1800 MHz, με ακτινοβολούμενη ισχύ αναφοράς τα 250 mW και τα 125 mW αντίστοιχα, ώστε να ληφθούν οι τιμές του SAR για πραγματικά επίπεδα ισχύος. Το κινητό τηλέφωνο κρατήθηκε και πάλι κάθετα ως προς το κεφάλι, και με το λογισμικό XFDTD εκτιμήθηκε η κατανομή του SAR στο μοντέλο.

Στα 900 MHz ο μέγιστος SAR σε 1g ιστού, 10g ιστού και 1g εγκεφαλικού ιστού ήταν αντίστοιχα 2.06, 1.19 και 0.32 W/kg.

Στα 1800 MHz οι μέγιστοι SARs υπολογισμένοι σε 1g ιστού στο κεφάλι, σε 10g και σε 1g εγκεφαλικού ιστού είναι αντίστοιχα 1.81, 0.87 και 0.12 W/kg.

Οι ερευνητές παρατήρησαν πως στα 1800 MHz οι μέγιστες τιμές του SAR, όπως υπολογίζονται σε όλους τους όγκους και τύπους ιστών, είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τους στα 900 MHz. Η κατανομή του πεδίου στο κεφάλι μελετήθηκε σε εκείνες τις τομές του κεφαλιού που εντοπίστηκαν οι μέγιστες τιμές του SAR. Βρέθηκε πως το βάθος διείσδυσης του πεδίου ήταν μεγαλύτερο στα 900 MHz. Δηλαδή, στα 1800 MHz παρατηρείται η μικρότερη επίδραση του πεδίου της κεραίας ενός κινητού τηλεφώνου στο ανθρώπινο κεφάλι.

Στον Πίνακα 8 καταγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην προσομοίωση με ελικοειδές μονόπολο με τα αποτελέσματα της μελέτης της ερευνητικής ομάδας του Bernardi

ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΔΙΑ ΚΕΡΑΙΑ, DUAL BAND ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΣ ΜΟΝΟΠΟΛΟ, ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.

		Max SAR _{1g} (W/kg)	Max SAR _{10g} (W/kg)
1800 MHz	διπλωματική	1.25	0.67
	Bernardi [2]	1.81	0.87
900 MHz	διπλωματική	2.39	1.45
	Bernardi [2]	2.06	1.19

Οι τιμές των δυο προσομοιώσεων διαφέρουν ελαφρά, αν και έγιναν με κεραίες που είχαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αυτό οφείλεται τόσο στη διαφορετική χωρική ανάλυση του πλέγματος όσο και στο ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μοντέλα κεφαλιού. Ωστόσο παρατηρούνται ανάλογες τάσεις, δηλαδή, στα 900 MHz, οι SARs είναι μεγαλύτεροι από αυτούς στα 1800 MHz, και στις δυο προσεγγίσεις.

Και στις δυο προσομοιώσεις παρατηρείται πως οι SARs που υπολογίζονται σε 1g ιστού είναι μεγαλύτεροι από τους άλλους.

5.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η χρήση της FDTD για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης κινητού τηλεφώνου και κεφαλιού χρήστη. Η μελέτη έγινε σε δυο συχνότητες, 900 MHz και 1800 MHz, για δυο διαφορετικές κεραίες (dual band ελικοειδές μονόπολο και dual band ελικοειδές δίπολο) σε διάφορες θέσεις της κάθε κεραίας ως προς το κεφάλι. Υπολογίστηκαν οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR σε 1g και 10g ιστού και σε 1g εγκεφαλικού ιστού, οι κατανομές του SAR, καθώς και η αντίσταση εισόδου της ακτινοβολίας στο κεφάλι.

Παρατηρούμε καταρχήν, σε όλες τις θέσεις του κινητού ως προς το κεφάλι και για τους δυο τύπους κεραιών, πως οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR είναι μεγαλύτερες στα 900 MHz από αυτές στα 1800 MHz. Ακόμα, και στις δύο συχνότητες οι τιμές του SAR που υπολογίζονται σε 1g ιστού (SAR_{1g}) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίζονται στα 10g (SAR_{10g}).

Στις προσομοιώσεις που έγιναν με το dual band ελικοειδές μονόπολο οι μεγαλύτερες μέγιστες μέσες τιμές του SAR βρέθηκαν, όπως αναμενόταν, όταν η τερματική συσκευή πιέζει το αυτί (το κινητό βρίσκεται δυο κυβικά στοιχεία μέσα στο κεφάλι και αυτή είναι η μικρότερη απόσταση κεραίας – κεφαλιού), ακολουθεί η περίπτωση όπου η τερματική συσκευή εφάπτεται στο αυτί (ρεαλιστική θέση κινητού), ενώ οι χαμηλότερες τιμές εντοπίστηκαν όταν η τερματική συσκευή είναι απομακρυσμένη από το αυτί (το κινητό βρίσκεται ένα κυβικό στοιχείο πιο μακριά από το κεφάλι). Τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν και για τις δυο συχνότητες, για όλους τους όγκους υπολογισμού. Είναι εντυπωσιακή η διαφορά στους SARs όταν η απόσταση του κινητού από το κεφάλι μεταβάλλεται έστω και ένα κυβικό στοιχείο.

Φαίνεται πως στα 1800 MHz η ενέργεια απορροφάται σε ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος από ότι στα 900 MHz, ενώ και στις δυο συχνότητες η μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολούμενης ισχύος παρατηρήθηκε στην περίπτωση που το κινητό είναι πολύ κοντά στο κεφάλι, δηλαδή στην περίπτωση που βρίσκεται δυο κυβικά στοιχεία μέσα στο πλέγμα του κεφαλιού. Ακολουθεί η περίπτωση που το κινητό βρίσκεται στη φυσική του θέση ως προς το κεφάλι. Ενώ τέλος, όταν το κινητό είναι απομακρυσμένο από το κεφάλι του χρήστη (βρίσκεται ένα κυβικό στοιχείο μακριά), το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας ελαττώνεται ακόμα περισσότερο.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν με το dual band ελικοειδές δίπολο παρατηρήθηκε και πάλι στα 900 MHz η μέγιστη μέση τιμή του SAR να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη μέση τιμή του SAR στα 1800 MHz. Οι μέγιστες τιμές όμως του SAR που υπολογίζονται με το dual band ελικοειδές δίπολο είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν με το dual band ελικοειδές μονόπολο. Και πάλι, το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης παρατηρείται στα 1800 MHz.

Όταν το dual band ελικοειδές δίπολο είναι δίπλα στο αυτί του χρήστη οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR αυξάνονται δραματικά, ακολουθώντας ανάλογη συμπεριφορά με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται και πάλι στα 900 MHz.

Τέλος, οι τιμές των SARs που υπολογίστηκαν στις παραπάνω προσομοιώσεις φαίνεται πως δεν ικανοποιούν, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα όρια ασφαλούς έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως η κεραία είναι πολύ κοντά στο κεφάλι του χρήστη στις προσομοιώσεις. Όταν όμως τοποθετήθηκε σε ρεαλιστική θέση συνήθως τα όρια ικανοποιούνται.

Αναφορές – Βιβλιογραφία.

- [1] XFDTD® Remcon Inc. Electromagnetic solver based on the Finite Difference Time Domain method.
- [2] Bernardi P., Cavagnaro M., Pisa S., Piuizzi E., “Power Absorption and Temperature Elevations Induced in the Human Head by a Dual – Band Monopole – Helix Antenna Phone”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 12, pp. 2539 – 2546, December 2001.
- [3] Olley P., and Excell P. S., "Classification of a high-resolution voxel image of a human head," Proc. of an International Workshop at the National Radiological Protection Board, Dimbylow, P. J. (Ed.), Chilton, U.K., pp. 16 – 23, 1995.
- [4] Gabriel C., Gabriel S. and Corthout E., “The dielectric properties of biological tissues: I. Literature Survey”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2231 – 2249, (1996).
- [5] Gabriel S., Lau R. W. and Gabriel C., “The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2251 – 2269, (1996).
- [6] Gabriel S., Lau R. W. and Gabriel C., “The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues”, Phys. Med. Biol., vol. 41, pp. 2271 – 2293, (1996).

Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε στόχο τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων που εκπέμπεται από τερματική συσκευή κινητού τηλεφώνου και των βιολογικών ιστών που εκτίθενται στο πεδίο των συσκευών.

Στα τέσσερα πρώτα κεφάλαια αναλύθηκε ο τρόπος αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των βιολογικών ιστών, το είδος των επιδράσεων της ακτινοβολίας σε βιολογικά αντικείμενα, ο τρόπος μοντελοποίησης των βιολογικών ιστών και η μέθοδος FDTD για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων σε βιολογικούς ιστούς. Αναφέρθηκαν ακόμα τα όρια ασφαλούς έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ανακεφαλαιώνοντας τα συμπεράσματα των κεφαλαίων αυτών μπορούμε να πούμε πως η επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ραδιοσυχνοτήτων στα βιολογικά αντικείμενα είναι εμφανής. Αν και τα στοιχεία που υποδεικνύουν την εμφάνιση φαινομένων καρκινογένεσης είναι αντιφατικά, τα στοιχεία που υποδεικνύουν αλλαγές στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα, ιδιαίτερα στον αιματοεγκεφαλικό φραγμό είναι σύμφωνα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο έγινε προσομοίωση της αλληλεπίδρασης τερματικής συσκευής κινητής τηλεφωνίας και κεφαλιού χρήστη. Χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά δυο κεραίες, ένα dual band ελικοειδές μονόπολο και ένα dual band ελικοειδές δίπολο, και προσομοιώθηκε η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας τους με το αριθμητικό μοντέλο του κεφαλιού ενός άνδρα. Τα αποτελέσματα που παράγονται είναι η μέγιστη μέση τιμή του SAR και η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου του κεφαλιού και βρέθηκε πως οι μέγιστες μέσες τιμές του SAR είναι μεγαλύτερες στα 900 MHz από αυτές στα 1800 MHz ενώ φαίνεται πως στα 1800 MHz η ενέργεια απορροφάται σε ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος από ότι στα 900 MHz.

Μετά από όλα τα στοιχεία που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι πλέον εμφανής η βλαβερή επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων στα βιολογικά αντικείμενα, κατ' επέκταση δε και στον ανθρώπινο οργανισμό.

Υπότιτλοι εικόνων

- εικόνα 1.1** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα 11
- εικόνα 1.2** Διάταξη πειραματικής δοσιμετρίας σε ομοίωμα κεφαλιού με χρήση κινητού τηλεφώνου. Η κεραία του κινητού εκπέμπει στο κεφάλι, και η απορροφώμενη ενέργεια μετράται και καταγράφεται σε υπολογιστή. 20
- εικόνα 1.3** Διάταξη πειραματικής δοσιμετρίας σε ομοίωμα ανθρώπινου σώματος. Η δοσιμετρία γίνεται μόνο στο κεφάλι με ένα ρομποτικό σύστημα. Ο χώρος που αντιστοιχεί στο κεφάλι έχει γεμίσει με υλικά παρόμοιων διηλεκτρικών ιδιοτήτων με τους ιστούς του ανθρώπινου κεφαλιού. 21
- εικόνα 1.4** Στην εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο του κεφαλιού ενός άνδρα σε τρεις διαστάσεις (α), και σε δυο τομές, κάθετη (b) και οριζόντια (c), ενώ φαίνεται και η αντιστοίχιση των αποχρώσεων του γκρι σε ιστούς του κεφαλιού. Με βάση τα MRI δεδομένα οι ερευνητές κατασκεύασαν 17 διαφορετικούς ιστούς του εγκεφάλου, αποδίδοντας στον καθένα μια διαφορετική απόχρωση της κλίμακας του γκρι. Στις τομές διακρίνονται οι ιστοί με τις αποχρώσεις που τους έχουν αποδοθεί. 22
- εικόνα 1.5** TEM κελί. 23
- εικόνα 2.1** Σχεδιάγραμμα της θέσης των εθελοντών ως προς το σύστημα εκπομπής της ακτινοβολίας στο πείραμα 1. 42
- εικόνα 2.2** Σχεδιάγραμμα της τοποθέτησης των εθελοντών ως προς το σύστημα έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο πείραμα 2. 43
- εικόνα 2.3** Οι κατανομές του SAR όπως προέκυψαν από προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με το των εθελοντών, και για τα δυο συστήματα έκθεσης. 44
- εικόνα 2.4** Το σύστημα έκθεσης των εθελοντών στην ακτινοβολία. Φαίνεται πως ένα μοντέλο κινητού είναι προσαρμοσμένο στο κεφάλι ενός εθελοντή και πως λαμβάνονται οι μετρήσεις. 46
- εικόνα 2.5** Παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης ενός ασθενή με τη συσκευή του κινητού και με το EEG. 47
- εικόνα 2.6** Η λήψη αυτή εστιάζει στο κεφάλι του ασθενή και φαίνεται πιο καθαρά ο τρόπος που είναι συνδεδεμένος με το κινητό και τις απαγωγές του EEG. 47
- εικόνα 2.7** Στα σχεδιαγράμματα των δυο όψεων του κεφαλιού φαίνονται οι θέσεις των απαγωγών του EEG που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν τα οπτικά ERP. 48
- εικόνα 3.1** Η διάταξη δυο καταστάσεων κάθε μιας από τις τέσσερις όμοιες υπομονάδες που σχηματίζουν το μοντέλο της διόδου που ελέγχεται από το δυναμικό. 58
- εικόνα 3.2** Μοντέλο μιας εξαρτώμενης από το δυναμικό διόδου καλίου με διαμόρφωση είκοσι καταστάσεων πέντε ανοιχτές καταστάσεις (από τον αριθμό 1 έως τον 5) δεκαπέντε κλειστές (από τον αριθμό 6 έως τον 20). 59
- εικόνα 3.3** Το μοντέλο της κυτταρικής μεμβράνης όπως προτάθηκε από τους Hodgkin και Huxley. 61

εικόνα 3.4 Το κυψελοειδές μοντέλο της μεμβράνης. Οι μαύροι κύκλοι αντιστοιχούν σε θέσεις υποδοχέων ενώ οι κενοί σε θέσεις ιόντων ασβεστίου. 65

εικόνα 3.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα που κατασκευάστηκε για τη μοντελοποίηση των παραμέτρων διασποράς μιας ομάδας σκελετικών ινών. σ_s είναι η αγωγιμότητα χαμηλών συχνοτήτων, ϵ_∞ είναι η επιτρεπτότητα υψηλών συχνοτήτων, $\Delta\sigma$ και $\Delta\epsilon$ είναι αντίστοιχα, τα πλάτη διασποράς της αγωγιμότητας και της επιτρεπτότητας. 66

εικόνα 3.6 Ισοδύναμο κύκλωμα διαφόρων βιολογικών ιστών για συχνότητες από dc έως μερικές δεκάδες MHz. 66

εικόνα 3.7 Η απλοποιημένη μορφή του κυκλώματος της εικόνας 3.6 για ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. 67

εικόνα 3.8 Η απλοποιημένη μορφή του κυκλώματος της εικόνας 3.6 για ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας. 68

εικόνα 3.9 Σχηματική απεικόνιση σκελετικού μυός σε εγκάρσια τομή. 68

εικόνα 4.1 Το στοιχειώδες κυβικό στοιχείο – κελί της FDTD, όπως προτάθηκε από τον Yee. Στο κυβικό στοιχείο είναι σημειωμένες οι θέσεις των συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. 74

εικόνα 4.2 Μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού και κινητού τηλεφώνου στην FDTD. 78

εικόνα 5.1 Το μεταλλικό κουτί που προσομοιώθηκε και οι διαστάσεις του. Το σημείο E αντιστοιχεί στην προβολή του αυτιού στο κουτί. 82

εικόνα 5.2 Το μοντέλο του κινητού σε τρεις διαστάσεις (i) και τρεις τομές του μοντέλου (ii) – (iv). 83

εικόνα 5.3 Οι διαστάσεις του dual band ελικοειδούς μονοπόλου (i) – (ii), και η μοντελοποίησή του με το XFDTD (iii). 84

εικόνα 5.4 Το σχεδιάγραμμα του dual band ελικοειδούς διπόλου (i), και η μοντελοποίησή του με το XFDTD (ii). 85

εικόνα 5.5 Το μοντέλο ανθρώπινου κεφαλιού βασισμένο σε δεδομένα MRI. Συγκεκριμένα στην εικόνα 5.5 (i) είναι το μοντέλο του κεφαλιού στις τρεις διαστάσεις. Στην εικόνα 5.5 (ii) φαίνεται το εσωτερικό του κεφαλιού σε μια τομή κατά το xy επίπεδο, στην 5.5 (iii) μια τομή στο yz και στην 5.5 (iv) μια τομή στο xz επίπεδο. 86

εικόνα 5.6 Η μοντελοποίηση με το XFDTD του κινητού τηλεφώνου με το ελικοειδές μονόπολο και του ανθρώπινου κεφαλιού. 88

εικόνα 5.7 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν
(i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,
(ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και
(iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού. 92

εικόνα 5.8 κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν
(i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού,
(ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και
(iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού. 93

εικόνα 5.9	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν (i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού, (ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και (iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.	95
εικόνα 5.10	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται όταν (i) το κινητό εφάπτεται στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού, (ii) το κινητό πιέζει το αυτί του χρήστη σε 1g (c) και 10g (d) ιστού και (iii) το κινητό είναι απομακρυσμένο από το αυτί του χρήστη σε 1g (e) και 10g (f) ιστού.	96
εικόνα 5.11	Η μοντελοποίηση με το XFDTD του κεφαλιού και του ελικοειδούς διπόλου σε φυσική θέση.	98
εικόνα 5.12	κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές διπολό σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	99
εικόνα 5.13	κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές διπολό σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	100
εικόνα 5.14	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές διπολό σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	100
εικόνα 5.15	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το ελικοειδές διπολό σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	101
εικόνα 5.16	Η μοντελοποίηση του κεφαλιού με το διπολό δίπλα στο αυτί του χρήστη με το XFDTD.	102
εικόνα 5.17	κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές διπολό δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	104
εικόνα 5.18	κατανομή στα 1800 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές διπολό δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	104
εικόνα 5.19	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο xy της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές διπολό δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	105
εικόνα 5.20	κατανομή στα 900 MHz στο επίπεδο yz της μέγιστης μέσης τιμής του SAR που υπολογίζεται με το dual band ελικοειδές διπολό δίπλα στο αυτί του χρήστη σε 1g (a) και 10g (b) ιστού.	105

Υπέρτιτλοι Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1	ΟΡΙΑ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 2	ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΕΙΝΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΤΗΚΑΝ ΣΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΚΑΙ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 3	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 900 MHz	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 4	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΚΕΦΑΛΙΟΥ ΣΤΑ 1800 MHz	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 5	ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟ ΚΕΦΑΛΙ, ΣΕ 1g ΙΣΤΟΥ, ΣΕ 10g ΙΣΤΟΥ ΚΑΙ ΣΕ 1g ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ 900 MHz ΚΑΙ 1800 MHz. ΕΠΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 6	ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR, ΟΠΩΣ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ DUAL BAND ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΣ ΔΙΠΟΛΟ ΜΕ ΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΟΥ ΝΑ ΕΦΑΠΤΕΤΑΙ ΣΤΟ ΑΥΤΙ.	99
ΠΙΝΑΚΑΣ 7	ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR, ΟΠΩΣ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ DUAL BAND ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΣ ΔΙΠΟΛΟ ΔΙΠΛΑ ΣΤΟ ΑΥΤΙ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ, ΣΤΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ 900 MHz ΚΑΙ 1800 MHz.	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 8	ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ SAR ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΔΙΑ ΚΕΡΑΙΑ, DUAL BAND ΕΛΙΚΟΕΙΔΕΣ ΜΟΝΟΠΟΛΟ, ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.	107