
ΑΣΚΗΣΗ

6

Ηλεκτρομαγνητική δοσιμετρία για τερματικές συσκευές κινητών επικοινωνιών

1. Σκοπός της άσκησης

Στα πλαίσια της εργαστηριακής άσκησης θα μελετηθούν τα θερμικής φύσεως βιολογικά αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων (RF). Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων και βιολογικών ιστών, με ιδιαίτερη έμφαση στις κυτταρικές κινητές επικοινωνίες. Κατά τη διάρκεια της άσκησης θα μετρηθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται σε ομοίωμα ανθρώπινης κεφαλής από τερματική συσκευή κινητών επικοινωνιών.

2. Θεωρητική προσέγγιση

2.1 Βιολογικές επιδράσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνοτήτων

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε ραγδαία εξάπλωση της χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων (Radiofrequencies, RF) σε ποικίλες εφαρμογές στη βιομηχανία, την ιατρική, την έρευνα κ.α. Ραδιοσυχνότητες είναι το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αντιστοιχεί στην περιοχή από 10 kHz έως 300 GHz. Το τμήμα μεταξύ 300

MHz και 300 GHz συνήθως ονομάζεται μικροκύματα (Microwaves, MW), ενώ συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος χιλιοστομετρικά κύματα (millimeter waves, mmW) για την περιοχή 30-300 GHz. Στην περιοχή RF του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος περιλαμβάνονται οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται για ραδιοφωνική εκπομπή AM, FM και βραχέων κυμάτων, για τηλεοπτική εκπομπή VHF και UHF, για τις κινητές και δορυφορικές επικοινωνίες, τις μικροκυματικές ζεύξεις κ.λπ.. Στην περιοχή RF του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η κβαντική ενέργεια δεν είναι ικανή να προκαλέσει χημικές μεταβολές και ιοντισμό στα βιολογικά υλικά και χαρακτηρίζεται ως μη-ιοντίζουσα. Η μη-ιοντίζουσα περιοχή εκτείνεται μέχρι την υπέρυθρη (Infrared, IR), την ορατή (Visible, VI) και την υπεριώδη (Ultraviolet, UV) ακτινοβολία, περίπου ως τη συχνότητα 8×10^{14} Hz. Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με συχνότητα υψηλότερη από συχνότητα 8×10^{14} Hz, χαρακτηρίζεται ως ιοντίζουσα (ακτίνες X, ακτίνες γ, κ.λπ.), επειδή η κβαντική ενέργεια σε αυτή την περιοχή είναι αρκετή να προκαλέσει καταστροφή της ενδομοριακής δομής, διάσπαση διαμοριακών δεσμών και πρόκληση καρκινογενετικών φαινομένων στα βιολογικά συστήματα.

Είναι γνωστό ότι οι βιολογικοί ιστοί αποτελούνται από χημικές ενώσεις. Από ηλεκτρική άποψη τα μόρια τους εμφανίζονται ως ηλεκτρικά δίπολα. Κάτω από την επίδραση ισχυρού εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τα δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν κατά τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταλάντωση των μορίων. Στη συνέχεια, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Σύμφωνα με τη γενικά παραδεκτή άποψη για την αλληλεπίδραση των υψίσυχων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τους βιολογικούς οργανισμούς, η παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει την κινητική ενέργεια κυρίως των μορίων νερού, με αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στους ιστούς των βιολογικών οργανισμών [1]-[2]. Εξαιτίας αυτής της αλληλεπίδρασης, παρουσιάζεται αύξηση της θερμοκρασίας είτε τοπικά ή ακόμη και συνολικά σε όλο το ανθρώπινο σώμα. Τα φαινόμενα που σχετίζονται με αυτό το μηχανισμό αλληλεπίδρασης ονομάζονται «θερμικά».

Η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στους βιολογικούς οργανισμούς είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά είναι απαραίτητη η ισχυρή διείσδυση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα στο ανθρώπινο σώμα (τοπικά ή συνολικά) που έχει σαν αποτέλεσμα, στη συνέχεια, την αύξηση της θερμοκρασίας, εφόσον διατηρείται το επιβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και η απορροφούμενη ισχύς ανά μονάδα μάζας βιολογικού ιστού είναι αρκετή. Ο θερμικός χαρακτήρας της βιολογικής επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επιβεβαιώνεται στην πράξη από ιατρικές εφαρμογές που έχουν ήδη αναπτυχθεί, όπως η διαθερμία και η μικροκυματική υπερθερμία που εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση του καρκίνου [2]-[3].

Πιο συγκεκριμένα, οι νόμοι που καθορίζουν την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα σε βιολογικούς ιστούς εξαιτίας της έκθεσης σε RF κύματα αναλύονται στη συνέχεια.

1) Απορρόφηση ισχύος ανά μονάδα μάζας βιολογικού ιστού

Η απορρόφηση ισχύος ανά μονάδα μάζας ιστού είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στη θέση που μελετάται. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται «Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης» (Specific Absorption Rate, SAR), εκφράζεται σε μονάδες ισχύος ανά μονάδα μάζας ιστού (W/kg), και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$SAR = \sigma \frac{|\underline{E}|^2}{\rho} \quad (1)$$

όπου σ (Si/m) η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ιστού, ρ (kg/m³) η πυκνότητα μάζας του ιστού και $|\underline{E}|$ (V/m) η ενεργή τιμή του ηλεκτρικού πεδίου.

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης εξαρτάται από: (α) τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, ένταση), (β) τα χαρακτηριστικά του βιολογικού αντικειμένου, τη γεωμετρία του (μέγεθος και σχήμα) και την εσωτερική του δομή, (γ) την απόσταση της πηγής εκπομπής της ακτινοβολίας και του βιολογικού αντικειμένου (κοντινό ή μακρινό πεδίο) και (δ) τις ιδιότητες του περιβάλλοντα χώρου.

2) Θερμική αντίδραση βιολογικών ιστών

Η απορρόφηση ισχύος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στους ιστούς. Η μεταβολή της θερμοκρασιακής κατανομής του σώματος είναι συνάρτηση της αιματικής ροής και των δυνατοτήτων των θερμορρυθμιστικών μηχανισμών του σώματος. Έτσι το τελικό αποτέλεσμα, εκτός από τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εξαρτάται και από τον ίδιο τον οργανισμό.

2.2 Ερευνητικά αποτελέσματα

Από το Β' Παγκόσμιο πόλεμο έχει αρχίσει διεθνώς εκτενής έρευνα για τα βιολογικά αποτελέσματα των RF κυμάτων, η οποία χρηματοδοτήθηκε σχεδόν στο σύνολό της από κρατικούς φορείς. Το κύριο μέρος αυτής της έρευνας αφορούσε πεδία σε συχνότητες 915 MHz και 2450 MHz, κοντά στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες κινητές επικοινωνίες. Πολλές από τις έρευνες αυτές κατέληξαν σε αντιφατικά αποτελέσματα. Περιελάμβαναν αρκετές αναφορές για βιολογικά αποτελέσματα των RF πεδίων σε κύτταρα και πειραματόζωα, πολλές φορές σε χαμηλά επίπεδα έκθεσης, που δεν ήταν εύκολα κατανοητά και συχνά δεν ήταν δυνατή η αναπαραγωγή τους. Υπήρχε δε μια σημαντική διασπορά σε ό,τι αφορούσε επιδράσεις στον άνθρωπο από χαμηλά επίπεδα έκθεσης σε RF πεδία [4].

Ένας νέος κύκλος ερευνών ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '90, που χρηματοδοτείται σημαντικά από τους κατασκευαστές φορητών τηλεφωνικών συσκευών και κρατικές πηγές, εστιάζεται δε κυρίως στην καρκινογένεση και τα φορητά τηλέφωνα.

Εργαστηριακές μελέτες

Υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφικών αναφορών για τα βιολογικά αποτελέσματα της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όμως το μεγαλύτερο μέρος των πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί σε ζώα και είναι αμφισβητήσιμη από πολλούς η δυνατότητα επέκτασης των αποτελεσμάτων στον άνθρωπο.

Καταρρακτογένεση

Σε πειραματόζωα που ακτινοβολήθηκαν με σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος παρατηρήθηκε η πρόκληση καταρράκτη [5]. Το φαινόμενο αποδίδεται σε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας κατά την έκθεση σε RF ακτινοβολία, εξαιτίας της αδυναμίας του οφθαλμού να απάγει τη θερμότητα.

Μικροκυματικό - ακουστικό φαινόμενο

Στην περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας παλμικής φύσεως, όπως αυτή του ραντάρ, έχει παρατηρηθεί ότι άνθρωποι που βρίσκονται κοντά στην πηγή ακούνε ήχο που προέρχεται από συντονισμό του κρανίου [6]. Σύμφωνα με τη σημερινή γνώση, πρόκειται για θερμικό φαινόμενο και οφείλεται σε απότομη μικρή αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών.

Επιδράσεις στο νευρικό σύστημα

Οι περισσότερες πειραματικές μελέτες αφορούν στον εγκέφαλο. Τα κυριότερα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι μεταβολές στο Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα και στην εκροή ιόντων ασβεστίου [7]-[8]. Τα ιόντα ασβεστίου είναι εξαιρετικής σημασίας για τη μεταφορική σύζευξη ενός ευρέος φάσματος ανοσολογικών, ενδοκρινολογικών και νευροβιολογικών φαινομένων στην εξωτερική επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης. Παρατηρήθηκε ότι η παρουσία παλμικά διαμορφωμένων RF σημάτων επάγει την εκροή ιόντων ασβεστίου σε ιστούς πειραματοζώων, χωρίς να απαιτείται αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας στους ιστούς ($<0.1^{\circ}\text{C}$). Βρέθηκε ότι το φαινόμενο εξαρτάται ισχυρά από τη συχνότητα διαμόρφωσης και από την πυκνότητα ισχύος της εφαρμοζόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η μέγιστη αλληλεπίδραση αναφέρεται ότι παρουσιάζεται για συχνότητες διαμόρφωσης παραπλήσιες με αυτές της εγκεφαλικής δραστηριότητας (16 Hz). Το φαινόμενο της εκροής ιόντων ασβεστίου θεωρείται από τις σημαντικότερες βιολογικές επιδράσεις των ραδιοκυμάτων, επειδή παρατηρείται για χαμηλές τιμές πυκνότητας ισχύος (μη θερμικής φύσεως).

Επιδράσεις σε κυτταρικό επίπεδο

Επιδράσεις στο DNA και καρκινογενετικά φαινόμενα έχουν μελετηθεί εκτενώς από πολλούς ερευνητές σε διάφορες συνθήκες έκθεσης [9]-[11]. Ανάπτυξη καρκίνου του εγκεφάλου έχει αναφερθεί σε ποντίκια που εκτέθηκαν σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που χρησιμοποιούνται σε ασύρματες κυτταρικές επικοινωνίες [9]. Ωστόσο τα αποτελέσματα αυτά δεν έχουν επιβεβαιωθεί από άλλα ανεξάρτητα εργαστήρια [4].

Επιδημιολογικές μελέτες

Οι επιδημιολογικές μελέτες σε ανθρώπινο πληθυσμό που εκτίθεται επαγγελματικά σε RF πεδία είναι περιορισμένες σε αριθμό και σε ποιότητα, αναφέρονται δε κυρίως σε εργαζόμενους σε στρατιωτικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Έχει περιγραφεί ότι άτομα που εκτίθενται επαγγελματικά σε μικροκυματική ακτινοβολία παρουσιάζουν σύνολο υποκειμενικών εκδηλώσεων που χαρακτηρίζεται σαν «σύνδρομο μικροκυμάτων» και περιλαμβάνει πονοκέφαλο, ναυτία, ζάλη, κόπωση, διαταραχές ύπνου [11]. Μερικές μελέτες αναφέρουν υψηλότερο κίνδυνο καρκίνου για επαγγέλματα στα οποία συνυπάρχουν έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και χημικοί παράγοντες.

Πρόσφατα, έχουν γίνει ειδικές μελέτες σχετικά με τη χρήση φορητών τηλεφωνικών συσκευών. Επιδημιολογικές μελέτες στη Σουηδία και τις ΗΠΑ εστίασαν στη διερεύνηση πιθανής σχέσης μεταξύ χρήσης φορητών τηλεφωνικών συσκευών και ανάπτυξης καρκίνου του εγκεφάλου [11]. Παρότι καμιά μελέτη δεν απέδειξε την αύξηση της επίπτωσης καρκίνου του εγκεφάλου σε ανθρώπους που κάνουν χρήση φορητών τηλεφωνικών συσκευών, και στις δύο μελέτες αναφέρεται μια τάση για υψηλότερη πιθανότητα ανάπτυξης όγκου του εγκεφάλου στην πλευρά που συνηθίζει ο χρήστης να κρατά το τηλέφωνο.

Ο καρκίνος του εγκεφάλου χρειάζεται χρόνια ή ακόμα και δεκάδες χρόνια για να αναπτυχθεί. Η ανίχνευση μικρού ή μακροπρόθεσμου κινδύνου ανάπτυξης καρκίνου είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η ανίχνευση μικρής αύξησης του κινδύνου απαιτεί μεγάλης κλίμακας έρευνες που παρουσιάζουν δυσκολίες στον έλεγχο τους και συχνά είναι δύσκολη η ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους. Επιπλέον, μια έγκυρη μελέτη οφείλει να αξιολογεί τη χρήση φορητού τηλεφώνου από τα άτομα που συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη για μια δεκαετία ή περισσότερο, γεγονός που δυσχεραίνεται από τη ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη στη βιομηχανία κυτταρικών επικοινωνιών.

Σε πρόσφατη εργαστηριακή μελέτη αναφέρεται ότι η χρήση φορητών τηλεφωνικών συσκευών μπορεί να επηρεάσει θετικά τη γνωσιακή λειτουργία [12]. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, άτομα που εκτέθηκαν σε προσομοίωση εκπομπών φορητών τηλεφωνικών συσκευών σε συχνότητα 915 MHz, παρουσίασαν βελτίωση των αντανάκλαστικών τους (μείωση του χρόνου αντίδρασης σε εξωτερικά ερεθίσματα).

Όμως, από τις μέχρι σήμερα επιδημιολογικές μελέτες, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν οριστικά συμπεράσματα, εξαιτίας διαφόρων αδυναμιών στη σχεδίαση τους, καθώς και του περιορισμένου αριθμού των περιπτώσεων που εξετάζουν [13]-[14]. Επιπλέον, συχνά η έλλειψη ακριβών δοσιμετρικών πληροφοριών και η συνύπαρξη άλλων παραγόντων, εκτός της μελετούμενης ακτινοβολίας, περιορίζουν την αξία των μελετών αυτών.

Ομάδες αυξημένου κινδύνου

Αυξημένη ευαισθησία κατά την έκθεση σε μη ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε σχέση με το μέσο πληθυσμό μπορεί να οφείλεται σε ανεπαρκή θερμορυθμιστική λειτουργία και στην παρουσία εμφυτευμένων ιατρικών συσκευών. Εμφυτευμένες μεταλλικές συσκευές έχουν σαν αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της απορροφούμενης ισχύος, με συνέπεια τη θέρμανση των γύρω βιολογικών ιστών. Τέτοιες συσκευές είναι ορθοπεδικές μεταλλικές συσκευές, μεταλλικές καρδιακές βαλβίδες καθώς και εμφυτευμένα συστήματα χορήγησης φαρμάκων, όπως ινσουλίνης, που περιέχουν μεταλλικά μέρη. Για άλλες εμφυτευμένες συσκευές, όπως οι καρδιακοί βηματοδότες και τα κοχλιακά εμφυτεύματα, το κυριότερο πρόβλημα προκύπτει από φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής [15]. Σύμφωνα με μελέτη του ανεξάρτητου οργανισμού για την Έρευνα Ασύρματων Επικοινωνιών (Wireless Technology Research, WTR), μερικοί τύποι βηματοδοτών είναι ευαίσθητοι σε εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, και γι' αυτό άνθρωποι που φέρουν εμφυτευμένο βηματοδότη, πρέπει να κρατούν το φορητό τηλέφωνο, ακόμη και όταν βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, σε απόσταση τουλάχιστον 15 cm από το βηματοδότη.

2.3 Δοσιμετρικά μεγέθη και όρια ασφαλούς έκθεσης

Σε όλο τον κόσμο, διεθνείς οργανισμοί και χώρες έχουν προχωρήσει στη σύσταση ορίων ασφαλείας για την έκθεση σε μη-ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το 1974 η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (International Radiation Protection Association, IRPA) συνέστησε ομάδα εργασίας για τη μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με τη μη-ιοντίζουσα ακτινοβολία, σε συνεργασία με την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (World Health Organization, WHO). Το 1992 δημιουργήθηκε ανεξάρτητη επιστημονική επιτροπή, η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από Μη-Ιοντίζουσα Ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), με σκοπό την παρακολούθηση όλων των επιστημονικών ερευνών και την αντικειμενική

εξέτασή τους για την καθιέρωση οδηγιών σχετικά με τα όρια ασφαλούς έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι πιο πρόσφατες οδηγίες της ICNIRP [16] δημοσιεύτηκαν το 1998 και έχουν υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης CENELEC (Commitee Europeen de Normalisation Electrotechnique) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή κατά τη σύνταξη του ισχύοντος προτύπου για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Στις ΗΠΑ, τα όρια ασφαλείας για την έκθεση σε RF ακτινοβολία βασίζονται στις οδηγίες του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) και έχουν υιοθετηθεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Τυποποίησης (American National Standards Institute, ANSI).

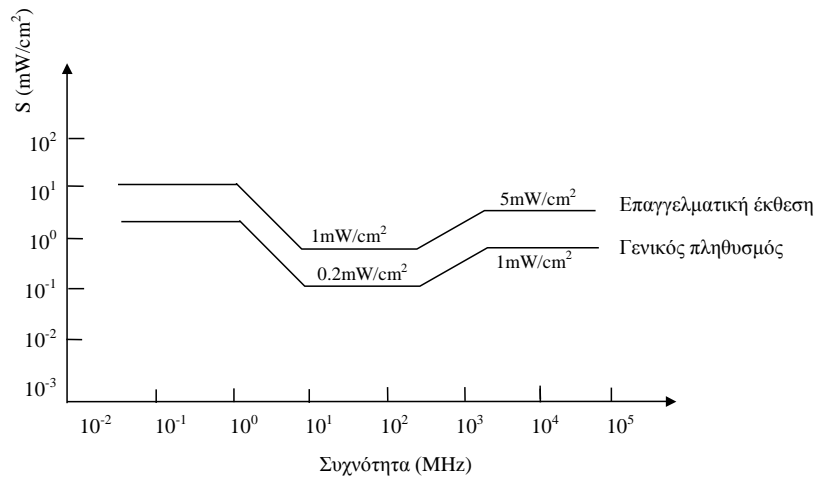
Σε συχνότητες υψηλότερες του 1 MHz, η θέρμανση ορίων ασφαλούς έκθεσης βασίζεται αποκλειστικά στα θερμικά αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [16]-[18]. Το βασικό μέγεθος για την ποσοτικοποίηση των θερμικών επιδράσεων είναι ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης. Η θέρμανση ορίων ασφαλείας από τη CENELEC και άλλες επιτροπές τυποποίησης για ολόσωμη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει βασιστεί στην πρόληψη διαταραχών στη συμπεριφορά που παρατηρούνται σε ζώα κατά την έκθεση τους σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Ο όρος «διαταραχές συμπεριφοράς» αναφέρεται στην τάση των ζώων να σταματούν την εκτέλεση μιας πολύπλοκης γνωσιακής λειτουργίας όταν εκτίθενται σε ορισμένη ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Πρόκειται για θερμική επίδραση που παρατηρείται για Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης ίσο με 4 W/kg σωματικού βάρους, υπολογισμένο ως μέση τιμή σε ολόκληρο το σώμα. Θέτοντας ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 10, καθορίστηκε η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης για τον άνθρωπο (επαγγελματική έκθεση) σε 0.4 W/kg και θέτοντας έναν επιπλέον συντελεστή ασφαλείας ίσο με 5 για το γενικό πληθυσμό καθορίστηκε αντίστοιχη μέγιστη τιμή του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης ίση με 0.08 W/kg, υπολογισμένη ως μέση τιμή για ολόκληρο το σώμα και για χρονικό διάστημα μέτρησης 6 min (Πίνακας 2) [17]. Με παρόμοιο σκεπτικό, προκύπτουν αντίστοιχα όρια για έκθεση μέρους του σώματος σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Πίνακας 2) [17].

Επειδή ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης δεν είναι άμεσα μετρήσιμο μέγεθος, συχνά χρησιμοποιείται, ως παράμετρος ηλεκτρομαγνητικής δοσιμετρίας, η πυκνότητα ισχύος (S), δηλ. η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στη μονάδα επιφάνειας, η οποία εκφράζεται σε W/m^2 ή mW/cm^2 . Τα όρια του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης ανάγονται σε μέγιστες επιτρεπτές τιμές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, με βάση την προσομοίωση της σύζευξης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με το ανθρώπινο σώμα, η οποία εξαρτάται από παράγοντες όπως η συχνότητα και η πόλωση του πεδίου, οι διηλεκτρικές ιδιότητες των βιολογικών ιστών κ.ά. Σε συνθήκες μακρινού πεδίου, η πυκνότητα ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{|E|^2}{Z_0} = Z_0 |H|^2 \quad (2)$$

όπου $|E|$ (V/m) η ενεργή τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, $|H|$ (A/m) η ενεργή τιμή του μαγνητικού πεδίου και $Z_0 = 377\Omega$ η κυματική αντίσταση του ελεύθερου χώρου. Επομένως, αρκεί η γνώση ενός από τα μεγέθη: ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο, πυκνότητα ισχύος του προσπίπτοντος κύματος, για τον υπολογισμό των υπολοίπων δύο. Αυτό ισχύει μόνο στο μακρινό πεδίο, όπου το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει τα χαρακτηριστικά επίπεδου κύματος -τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και προς τη διεύθυνση διάδοσης και το κύμα εξασθενεί εκθετικά με την απόσταση. Τα όρια της πυκνότητας ισχύος για την αποφυγή δυσμενών

επιπτώσεων στην υγεία εξαιτίας της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [17] παρουσιάζονται στο Σχ. 1.



Σχήμα 1: Πυκνότητα ισχύος (S) - Όρια ασφαλούς έκθεσης για τους εργαζόμενους και για το γενικό πληθυσμό

Αντίθετα στο κοντινό πεδίο, τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλονται πολύ γρήγορα και η μεταξύ τους σχέση είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Έτσι κατά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προερχόμενη από κοντινές πηγές, η πυκνότητα της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος δοσιμετρίας. Ένα σώμα απορρόφησης στο κοντινό πεδίο αλληλεπιδρά με την πηγή και επηρεάζει το δημιουργούμενο από την πηγή πεδίο και κατά συνέπεια και την απορροφούμενη από το σώμα ισχύ. Τα όρια ασφαλούς έκθεσης σ' αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερο να ορίζονται με βάση το Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης, παρά τον έμμεσο χαρακτήρα του και τις δυσκολίες εκτίμησής του.

2.4 Εκτίμηση ρυθμού ειδικής απορρόφησης

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης αποτελεί το σημαντικότερο μέγεθος για την ποσοτικοποίηση των βιολογικών αποτελεσμάτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και μπορεί να προσδιοριστεί θεωρητικά ή να μετρηθεί σε ομοιώματα βιολογικών ιστών, κατά την έκθεσή τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Υπολογιστικές τεχνικές

Για τον υπολογισμό της κατανομής της απορροφούμενης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από βιολογικούς ιστούς, χρησιμοποιούνται αναλυτικές μέθοδοι και γενικές αριθμητικές τεχνικές προσομοίωσης. Οι αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση απλοποιημένων μοντέλων βιολογικών ιστών, όπως ομογενείς ή στρωματοποιημένες κανονικές (επίπεδες, κυλινδρικές, σφαιρικές) γεωμετρίες. Ακόμη η ανάλυση της έκθεσης στο μακρινό πεδίο πηγών, όπου η φύση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σχετικά απλή επιτρέπει την εφαρμογή αναλυτικών τεχνικών. Η εφαρμογή γενικών αριθμητικών τεχνικών (μέθοδος ροπών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων διαφορών) επιτρέπει την ανάλυση πολύπλοκων ρεαλιστικών μοντέλων βιολογικών ιστών με ανομοιογένειες, ενώ είναι δυνατή η προσομοίωση σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών πηγών. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να ληφθεί υπόψη η

πολύπλοκη φύση του κοντινού πεδίου και η αλληλεπίδραση μεταξύ του βιολογικού αντικειμένου και της πηγής.

Πειραματικές τεχνικές

Οι κυριότερες μέθοδοι πειραματικού προσδιορισμού του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης σε ομοιώματα βιολογικών ιστών που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, βασίζονται στη μέτρηση του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου ή του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας κατά την εφαρμογή υψηλής ηλεκτρομαγνητικής ισχύος για σύντομο χρονικό διάστημα.

Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου

Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης σε ομοίωμα βιολογικού ιστού που εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δίνεται από την Εξ. (1). Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μετρηθεί άμεσα, χρησιμοποιώντας γραμμική κεραία (δίπολο), μικρών διαστάσεων σε σχέση με το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο ομοίωμα και απλό φωρατή, αποτελούμενο από μικροκυματική δίοδο και πυκνωτή. Η διπολική κεραία τοποθετείται στη θέση στην οποία επιθυμείται η μέτρηση του πεδίου. Αν η RF τάση εισόδου στο κύκλωμα του φωρατή είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του μέτρου της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη στον άξονα της κεραίας, το σήμα εξόδου είναι μια συνεχής τάση (DC), η οποία θα είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλο στον άξονα της κεραίας. Όταν η πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου είναι άγνωστη, πρέπει να χρησιμοποιηθούν διάφοροι προσανατολισμοί διπόλων ή περισσότερα δίπολα για τη μέτρηση του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου.

Οι κύριες απαιτήσεις από έναν αισθητήρα μέτρησης πεδίου είναι:

- Γραμμική απόκριση σ' ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων
- Ισοτροπία σε διαφορετικά μέσα
- Μικρό μέγεθος
- Όσο το δυνατόν μικρότερη πρόκληση διαταραχής στο μετρούμενο ηλεκτρικό πεδίο
- Υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα
- Υψηλή ευαισθησία

Συνήθως για την εξασφάλιση ισοτροπικών χαρακτηριστικών, οι αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου αποτελούνται από τρία μικροσκοπικά δίπολα διατεταγμένα σε ορθογώνιες μεταξύ τους κατευθύνσεις. Καθένα από αυτά περιέχει ένα στοιχείο διόδου με αποτέλεσμα το σήμα που οδηγείται προς τη βαθμίδα ενίσχυσης και έπειτα στην ηλεκτρονική συσκευή ανάγνωσης (συνήθως παλμογράφο) να είναι ανορθωμένο.

Θερμιδομετρική τεχνική

Η θερμιδομετρική τεχνική αποτελεί εναλλακτική τεχνική μέτρησης του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης και βασίζεται στη μέτρηση του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας μέσα σε ομοίωμα βιολογικού ιστού κατά την επιβολή υψηλής ισχύος για σύντομο χρονικό διάστημα. Ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR) μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη σχέση,

$$SAR(W/kg) = c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

που αποτελεί προσεγγιστική έκφραση της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας,

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k}{\rho c} \nabla^2 T = \frac{SAR}{c} \quad (4)$$

όπου

ρ :	πυκνότητα μάζας ομοιώματος βιολογικού ιστού (kg/m^3)
c :	ειδική θερμότητα υλικού ($\text{J/kg/}^\circ\text{C}$)
k :	θερμική αγωγιμότητα υλικού ($\text{W/m/}^\circ\text{C}$)
ΔT :	αύξηση θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$)
Δt :	διάρκεια παλμού ισχύος (sec)

Αυτή η προσέγγιση ισχύει όταν ο δεύτερος όρος του αριστερού μέλους της εξίσωσης (4) που περιγράφει τη διάχυση θερμότητας, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Η παραβίαση της αρχικής γραμμικής σχέσης μεταξύ του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας και του SAR αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου εφαρμογής ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Ο μέγιστος αποδεκτός χρόνος Δt εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης του SAR, η θερμική αγωγιμότητα του ομοιώματος και η χωρική παράγωγος της κατανομής SAR, που με τη σειρά της εξαρτάται από τη συχνότητα, τα χαρακτηριστικά του ομοιώματος και την πηγή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ο χρόνος Δt πρέπει να είναι αρκετά σύντομος, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα θερμικής διάχυσης. Η θερμοκρασία μετριέται συνήθως με τη βοήθεια θερμοστοιχείων.

2.5 Ηλεκτρομαγνητική δοσιμετρία για κυτταρικές κινητές επικοινωνίες

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση της χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυματικών συχνοτήτων, ιδιαίτερα στις επικοινωνίες (κινητές επικοινωνίες, συστήματα παρακολούθησης, τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι κ.λπ.), με συνέπεια την αυξημένη ανησυχία του κοινού για τις πιθανές βιολογικές επιδράσεις αυτών των συχνοτήτων. Οι ευρωπαϊκές κυτταρικές επικοινωνίες βασίζονται στο σύστημα GSM (Global System for Mobile Communications) και λειτουργούν στις περιοχές συχνοτήτων 900 και 1800 MHz. Στις ΗΠΑ, οι κυτταρικές επικοινωνίες λειτουργούν σε δύο κύριες περιοχές συχνοτήτων: τα παλαιότερα συστήματα στην περιοχή 850 MHz και οι νεότερες υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών (Personal Communication Systems, PCS) στην περιοχή 1900 MHz.

Για την περίπτωση των σταθμών βάσης των κινητών επικοινωνιών, όπου αναφερόμαστε στο μακρινό πεδίο της κεραίας, η στάθμη 0.5 mW/cm^2 (Σχ. 1) εξασφαλίζει την προστασία του γενικού πληθυσμού.

Αντίθετα για την περίπτωση της έκθεσης στην ακτινοβολία φορητών τηλεφωνικών συσκευών (τοπική έκθεση), τα όρια ασφαλείας εκφράζονται με βάση το Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης [16]-[17]. Ως κατώφλι για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία θεωρείται η απορρόφηση 2 W/kg , που υπολογίζεται ως μέση τιμή σε μάζα βιολογικού ιστού 10 gr (Πίνακας 2). Η εκτίμηση της συμμόρφωσης με τα όρια ασφαλούς έκθεσης δεν είναι προφανής όταν πρόκειται για έκθεση στο κοντινό πεδίο ηλεκτρομαγνητικών πηγών, όπως είναι οι φορητές τηλεφωνικές συσκευές. Για το λόγο αυτό, τόσο η CENELEC στην Ευρώπη όσο και η FCC (Federal Communications Committee) στις ΗΠΑ έχουν προχωρήσει στη σύνταξη προκαταρκτικών κριτηρίων για τον έλεγχο συμμόρφωσης φορητών τηλεφωνικών συσκευών με τα όρια ασφαλείας [19]-[20].

Πίνακας 2: Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (SAR) - Όρια ασφαλούς έκθεσης.

	SAR (μέση τιμή για όλο το σώμα και για διάστημα μέτρησης 6 min)	SAR (μέση τιμή για 10 gr ιστού διαφορετικού από τα άκρα (χέρια, πόδια) και για διάστημα μέτρησης 6 min)	SAR (μέση τιμή για 10 gr ιστού στα άκρα και για διάστημα μέτρησης 6 min)
Γενικός πληθυσμός	0.08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg
Επαγγελματική έκθεση	0.4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg

Κατά τη χρήση φορητών τηλεφωνικών συσκευών οι ιστοί του κεφαλιού του χρήστη εκτίθενται στο κοντινό πεδίο της πηγής. Τα αναλογικά φορητά τηλέφωνα εκπέμπουν μέση ισχύ 600 mW και τα περισσότερα ψηφιακά τηλέφωνα 250 mW (900 MHz) ή 125 mW (1800 MHz). Ωστόσο η ισχύς των περισσότερων σύγχρονων τηλεφώνων ελέγχεται από το σταθμό βάσης: το φορητό τηλέφωνο προσαρμόζει την εκπεμπόμενη ισχύ του ώστε να παράγει το ελάχιστο σήμα που απαιτείται για την αξιόπιστη επικοινωνία του με το σταθμό βάσης. Αν και η εκπεμπόμενη ισχύς είναι σχετικά χαμηλή, η τοποθέτηση της συσκευής σε επαφή με το κεφάλι του χρήστη μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση των ορίων ασφαλείας. Ένας ακόμη παράγοντας που δυσκολεύει την εκτίμηση της έκθεσης είναι η καθοριστική εξάρτησή της από την ακριβή θέση του τηλεφώνου σε σχέση με το κεφάλι και από το ακριβές σχήμα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κεφαλιού, που ποικίλλουν ανάλογα με το χρήστη.

Απαιτείται επομένως προσεκτικός έλεγχος για την εκτίμηση της συμμόρφωσης των φορητών τηλεφωνικών συσκευών με τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας. Δυστυχώς είναι αδύνατη η μέτρηση του SAR μέσα στο κεφάλι. Γι' αυτό ο έλεγχος βασίζεται σε πολύπλοκες υπολογιστικές προσομοιώσεις και/ή σε μετρήσεις σε ομοιώματα του ανθρώπινου κεφαλιού.

Μετρήσεις σε ομοιώματα

Το κεφάλι αποτελείται από πολύπλοκους ιστούς (οστά, δέρμα, εγκεφαλική ουσία, οφθαλμούς κ.λπ.) με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, και διαφορετικό Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται πολύπλοκα ομοιώματα του ανθρώπινου κεφαλιού που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά με ηλεκτρικές ιδιότητες ανάλογες των βιολογικών ιστών του κεφαλιού. Μια ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος για τη δοσιμετρία είναι η σύσταση του ομοιώματος από πλευράς τύπων ιστών. Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) έχει προτείνει τη την οδηγία SCC34/SC2 στην οποία λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές αναλογίες δέρματος, λίπους, μυός, οστού, λευκής και φαιάς ουσίας [18]. Συχνά, χρησιμοποιούνται απλούστερα ομοιώματα του ανθρώπινου κεφαλιού που αποτελούνται από πλαστικό κέλυφος στο οποίο τοποθετείται υγρό υλικό με ιδιότητες ανάλογες με αυτές του εγκεφαλικού ιστού. Αυτά τα μοντέλα έχουν καθοριστεί από τη CENELEC για τον έλεγχο συμμόρφωσης φορητών τηλεφωνικών συσκευών με τα

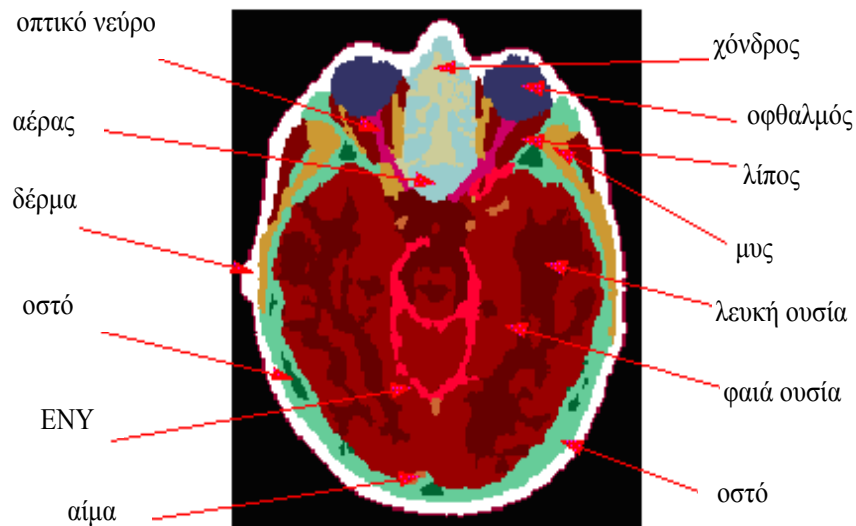
όρια ασφαλείας [19] και αντιστοιχούν στη λεγόμενη «χειρότερη περίπτωση έκθεσης», οδηγώντας συνήθως σε υπερεκτίμηση των πραγματικών επιπέδων έκθεσης. Η μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό των ομοιωμάτων πραγματοποιείται με μικροσκοπικό αισθητήρα που κινείται με τη βοήθεια ρομποτικού συστήματος υψηλής ακριβείας [21]. Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται ένα σύνθετο ομοίωμα του ανθρώπινου κεφαλιού που αποτελείται από πέντε τύπους ιστών [21].



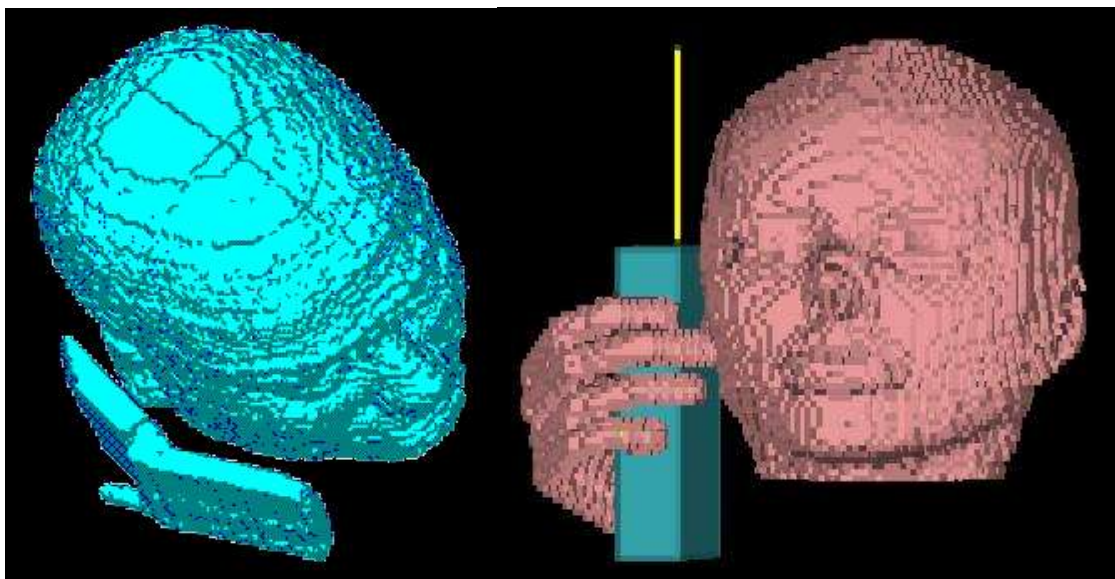
Σχήμα 2: Ομοίωμα ανθρώπινου κεφαλιού για πειραματικές μετρήσεις απορροφούμενης ισχύος

Υπολογιστικές προσομοιώσεις

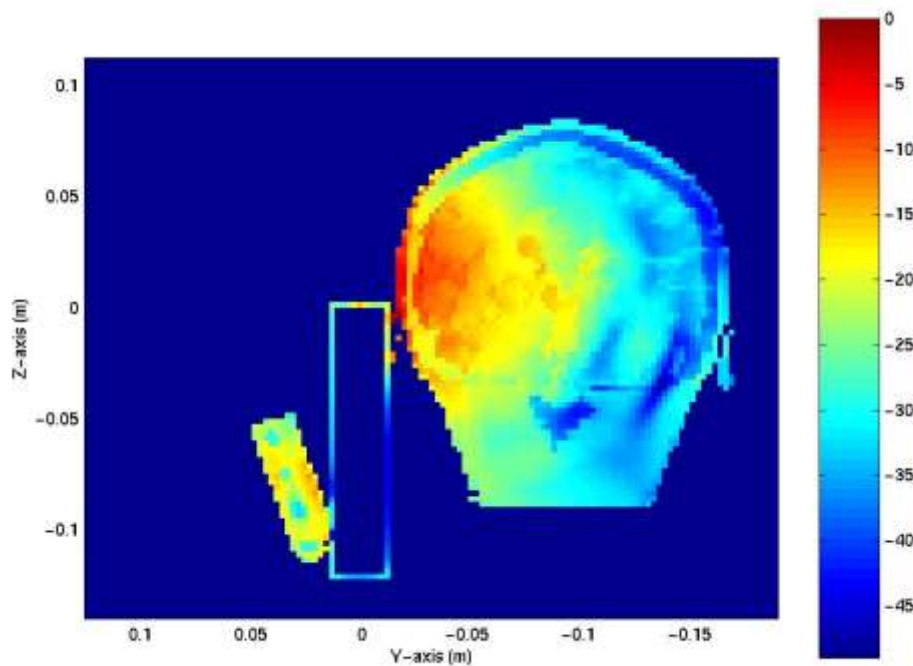
Για τους θεωρητικούς υπολογισμούς, χρησιμοποιούνται είτε απλά γεωμετρικά μοντέλα (π.χ. σφαιρικά) [22] ή λεπτομερή ανατομικά μοντέλα του ανθρώπινου κεφαλιού που βασίζονται σε δεδομένα Αξονικής ή Μαγνητικής Τομογραφίας (Σχ. 3) υψηλής ευκρίνειας [23]-[24]. Από τα δεδομένα Αξονικής ή Μαγνητικής Τομογραφίας κατασκευάζονται αριθμητικά μοντέλα του κεφαλιού που αποτελούνται από κυβικά συνήθως στοιχεία με μέγεθος ακμής που εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα της χρησιμοποιούμενης απεικονιστικής τεχνικής και μπορεί να φτάνει μέχρι 1 mm (Σχ. 4).



Σχήμα 3: Εγκάρσια τομή κεφαλιού από Μαγνητική Τομογραφία όπου σημειώνονται οι διάφοροι τύποι ιστών



Σχήμα 4: Αριθμητικά μοντέλα κεφαλιού (χεριού) χρήστη και φορητού τηλεφώνου για δοσιμετρικούς υπολογισμούς



Σχήμα 5: Ενδεικτική κατανομή SAR σε κατακόρυφη τομή ανατομικού μοντέλου κεφαλιού εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία φορητής τηλεφωνικής συσκευής σε συχνότητα 900 MHz. Η χρωματική κλίμακα αναφέρεται σε dB ως προς τη μέγιστη τιμή SAR

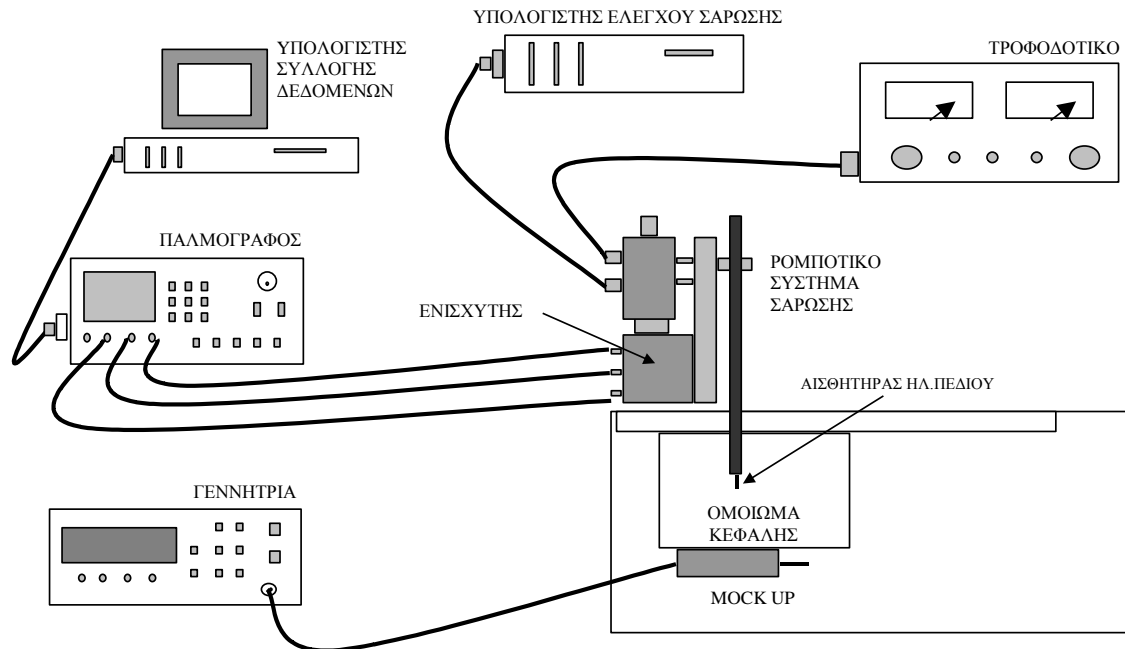
Επιπλέον, δημιουργούνται ακριβή αριθμητικά μοντέλα των φορητών τηλεφωνικών συσκευών, που βασίζονται συνήθως στα αρχεία CAD των κατασκευαστών (Σχ. 4). Για την επίλυση του εξαιρετικά σύνθετου αριθμητικού προβλήματος της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορητής τηλεφωνικής συσκευής και χρήστη χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές αριθμητικές μέθοδοι και κυρίως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite Difference Time Domain, FDTD), ενώ απαιτούνται ιδιαίτερα ισχυρά υπολογιστικά συστήματα [23]-[25]. Ενδεικτική κατανομή SAR σε ακριβές ανατομικό μοντέλο του κεφαλιού εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία φορητής τηλεφωνικής συσκευής σε συχνότητα 900 MHz παρουσιάζεται στο Σχ. 5 [26]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λαμβανόμενη κατανομή SAR εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο της συσκευής, από τη συχνότητα λειτουργίας της, από τις ανατομικές λεπτομέρειες του κεφαλιού του χρήστη, καθώς και από την απόσταση και την τοποθέτηση της συσκευής σε σχέση με το κεφάλι του χρήστη.

3. Πειραματική προσέγγιση

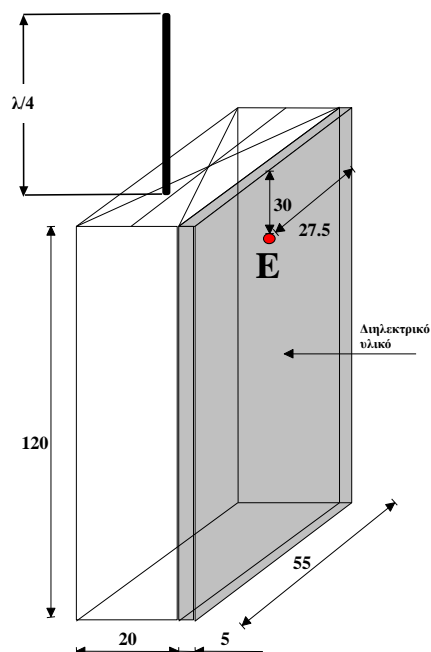
Για τη μελέτη της απορρόφησης της ακτινοβολίας τερματικής συσκευής κινητών επικοινωνιών από την κεφαλή του χρήστη, στα πλαίσια της παρούσας εργαστηριακής άσκησης, θα χρησιμοποιηθεί ομοίωμα της ανθρώπινης κεφαλής κυβικού σχήματος και τερματική συσκευή (mock-up) που λειτουργεί σε συχνότητα 1710 MHz. Ο προσδιορισμός του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης σε διάφορες θέσεις, μέσα στο ομοίωμα της κεφαλής, θα βασιστεί στη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, με τη βοήθεια ειδικού αισθητήρα.

3.1 Πειραματική διάταξη

Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης στο εσωτερικό του ομοιώματος του ανθρώπινου κεφαλιού φαίνεται στο Σχ. 6.



Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη

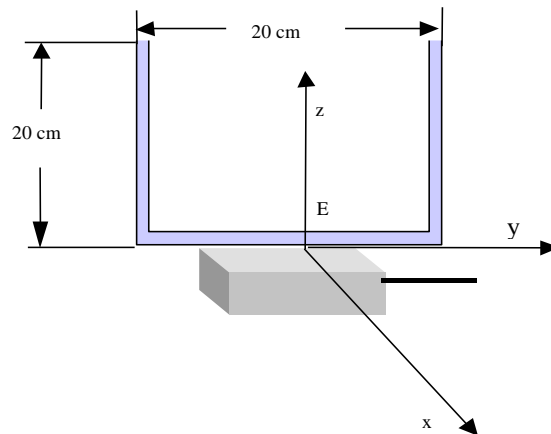


Σχήμα 7: Η γεωμετρία του mock-up στην οποία διακρίνεται το έκκεντρο μονόπολο μήκους $\lambda/4$ και το σημείο ωτός E (διαστάσεις σε mm)

Τα επιμέρους τμήματα της πειραματικής διάταξης περιγράφονται στη συνέχεια.

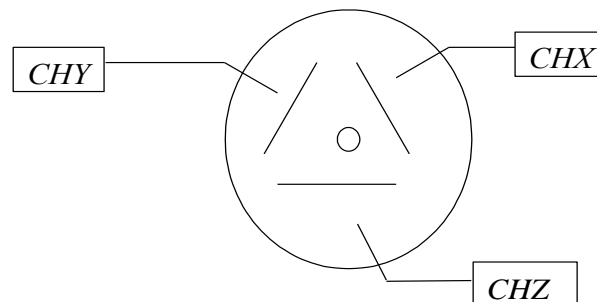
Τερματική συσκευή: Το mock-up της τερματικής συσκευής αποτελείται από μεταλλικό κουτί που στην πρόσθια επιφάνειά του φέρει επικάλυψη από διηλεκτρικό υλικό, όπως φαίνεται στο Σχ. 7. Στην άνω του επιφάνεια έχει τοποθετηθεί μονόπολο μήκους 4.39 cm, το οποίο διεγείρεται με συνεχές ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 1710 GHz από γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Στην πρόσθια επιφάνεια ορίζεται το λεγόμενο σημείο ωτός (ear point), σύμφωνα με τις αντίστοιχες συστάσεις της CENELEC [19], που αντιστοιχεί στην είσοδο του ακουστικού πόρου του χρήστη της συσκευής (Σχ. 7).

Ομοίωμα κεφαλής: Το κυβικό ομοίωμα της κεφαλής αποτελείται από κέλυφος plexiglass με μέγεθος ακμής 20 cm, που γεμίζεται με κατάλληλο υγρό το οποίο προσομοιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εγκεφαλικού ιστού στη συχνότητα των 1710 MHz. Η άνω επιφάνεια είναι ανοικτή ώστε να επιτρέπει την είσοδο του αισθητήρα μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου. Το σημείο ωτός ορίζεται ως το κέντρο της κάτω επιφάνειας του κυβικού ομοιώματος, σύμφωνα με τις συστάσεις της CENELEC [19]. Η τοποθέτηση της τερματικής συσκευής σε σχέση με το ομοίωμα φαίνεται στο Σχ. 8.



Σχήμα 8: Τοποθέτηση της τερματικής συσκευής σε σχέση με το κυβικό ομοίωμα του ανθρώπινου κεφαλιού. Το σημείο E αντιστοιχεί στο σημείο ωτός το οποίο πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο κατά τον κατακόρυφο άξονα z με το αντίστοιχο σημείο ωτός που σημειώνεται στη βάση του ομοιώματος

Αισθητήρας μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου: Πρόκειται για μικροσκοπικό αισθητήρα αποτελούμενο από τρία μικρά δίπολα διατεταγμένα σε τρία κανάλια CHX, CHY, CHZ τα οποία μετρούν τις τρεις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου (E_x , E_y , E_z).



Σχήμα 8: Κάτοψη του αισθητήρα μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου στην οποία διακρίνονται τα τρία δίπολα με τη βοήθεια των οποίων μετρώνται οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου

Τα μετρούμενα σήματα είναι σήματα τάσης (u_x, u_y, u_z) τα οποία μετατρέπονται σε τιμές ηλεκτρικού πεδίου με βάση τη σχέση,

$$E_i = \sqrt{\frac{u_i + (u_i^2 \cdot CF) / DCP}{Norm_i \cdot ConvF}} \quad (5)$$

όπου

$i=X, Y, Z$

E_i : η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

u_i : η τάση του καναλιού i (μV)

$Norm_i$: η ευαισθησία του καναλιού i (μV/(V/m)²)

$ConvF$: ο παράγοντας μετατροπής (enhancement factor) στο υγρό ($ConvF=1$ για τον αέρα)

DCP : το σημείο συμπίεσης της διόδου (diode compression point) (μV)

CF : ο λόγος της ισχύος κορυφής προς τη μέση ισχύ (crest factor)

Οι παράμετροι $Norm$ και DCP για τα κανάλια X, Y, Z παίρνουν τις τιμές:

$NormX = 2.15$

$DCPX = 100 \text{ mV}$

$NormY = 1.92$

$DCPY = 100 \text{ mV}$

$NormZ = 2.02$

$DCPZ = 100 \text{ mV}$

Επιπλέον σε συχνότητα 1800 MHz ισχύει:

$ConvFX = 4.1 \pm 10\%$

$ConvFY = 4.1 \pm 10\%$

$ConvFZ = 4.1 \pm 10\%$

Τρικαναλικός ενισχυτής: Τροφοδοτείται με σταθερή τάση 6 V και ενισχύει τα πολύ ασθενή σήματα (της τάξης των μV) που ανιχνεύονται από τον αισθητήρα. Η ενίσχυση γίνεται ξεχωριστά για κάθε κανάλι με χρήση ρυθμιστικής αντίστασης R_i (trimmer), η οποία για καθένα από τα κανάλια X, Y, Z παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

$RX=2.516K\Omega$

$RY=2.531K\Omega$

$RZ=2.506K\Omega$

Από τις τιμές αυτές μπορεί να υπολογιστεί το κέρδος ανά κανάλι με τη βοήθεια της σχέσης,

$$G_i = 20 \cdot \frac{400 + R_i(K\Omega)}{R_i(K\Omega)} \quad (6)$$

Με αυτό τον τρόπο τα μετρούμενα σήματα της τάξεως των μV μετατρέπονται σε σήματα της τάξεως των mV (ενίσχυση περίπου 3200 φορές), ώστε να είναι δυνατή η απεικόνισή τους με τη βοήθεια του παλμογράφου.

Παλμογράφος: Χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των σημάτων εξόδου του ενισχυτή.

Υπολογιστής συλλογής δεδομένων: Πρόκειται για προσωπικό υπολογιστή, ο οποίος, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, αναλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων.

Ρομποτικός βραχίονας: Στο άκρο του προσαρμόζεται ο αισθητήρας μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου και μπορεί να κινείται κατά μήκος τριών ορθογώνιων αξόνων με τη βοήθεια τριών βηματικών κινητήρων. Παρέχει τη δυνατότητα σάρωσης συγκεκριμένης περιοχής ή και ολόκληρου του ομοιώματος για τη λήψη μετρήσεων. Η κίνηση του βραχίονα μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα μέσω μοχλοδιακοπών, ή ακόμα με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού σάρωσης που είναι εγκατεστημένο στον αντίστοιχο υπολογιστή.

Υπολογιστής ελέγχου σάρωσης: Ο υπολογιστής αυτός περιλαμβάνει κατάλληλο λογισμικό για τον έλεγχο της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα (άξονες και βήμα κίνησης,

χρόνος παραμονής στη θέση μέτρησης κ.λπ.), παρέχοντας τη δυνατότητα αυτόματης σάρωσης κατά ευθείες, επίπεδα κ.λπ.

3.2 Πειραματική διαδικασία

- Τροφοδοτείστε με τάση 6V τον τρικαναλικό ενισχυτή και καταγράψτε τις τιμές offset για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Οι τιμές αυτές θα πρέπει να αφαιρούνται από κάθε μέτρηση τάσης του αντίστοιχου καναλιού.
- Τοποθετείστε και σταθεροποιήστε τη συσκευή mock-up, στη βάση του ομοιώματος του ανθρώπινου κεφαλιού. Ευθυγραμμίστε το σημείο ωτός της τερματικής συσκευής με το αντίστοιχο σημείο ωτός που είναι χαραγμένο στη βάση του ομοιώματος.
- Ρυθμίστε την ισχύ εκπομπής της μικροκυματικής γεννήτριας σε 20 mW, τη συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος της γεννήτριας σε 1710 MHz και τροφοδοτείστε τη συσκευή mock-up μέσω του ομοαξονικού καλωδίου.
- Μετακινείτε τον αισθητήρα μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση που αντιστοιχεί στο σημείο ωτός και όσο το δυνατόν πιο κοντά στη βάση του ομοιώματος, αποφεύγοντας οποιαδήποτε επαφή του με τη βάση από plexiglass.
- Με τη βοήθεια του λογισμικού που είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή κίνησης, επιλέξτε βήμα σάρωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα z που διέρχεται από το σημείο ωτός ίσο με 2.5 mm και μετρείστε το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του άξονα z .

3.3 Άσκηση

- Να μετατραπούν οι τιμές τάσης που μετρήθηκαν σε τιμές ηλεκτρικού πεδίου για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Να υπολογιστεί σε κάθε θέση του κατακόρυφου άξονα z η τιμή του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης.
- Να κανονικοποιηθούν οι τιμές του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης, ώστε να αναφέρονται σε ισχύ τροφοδοσίας της τερματικής συσκευής ίση με 1 W.
- Να παρασταθεί γραφικά η εξασθένιση του Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης σε συνάρτηση με την κατακόρυφη απόσταση z από το σημείο ωτός του ομοιώματος. Να χρησιμοποιηθεί γραμμική και λογαριθμική κλίμακα. Να σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] M.A. Stuchly, "Fundamentals of the Interactions of Radiofrequency and Microwave Energies with Matter", *Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation*, M. Grandolfo, S.M. Michaelson, A. Rindi (eds), pp. 75-84, Plenum Press, New York, 1983.
- [2] O.P. Gandhi, "Biological Effects and Medical Applications of RF Electromagnetic Fields", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, pp. 1831-1847, 1982.
- [3] K.S. Nikita, N. Maratos and N.K. Uzunoglu, "Optimum Excitation of Phases and Amplitudes in a Phased Array Hyperthermia System", *International Journal of Hyperthermia*, vol. 8, pp. 515-528, 1992.
- [4] K.R. Foster, J.E. Moulder, "Are Mobile Phones Safe?", *IEEE Spectrum*, pp. 23-28, August 2000.
- [5] L. Birenbaum, I.T. Kaplan, W. Metlay, S.W. Rosenthal, H. Schmidt, M.M. Zaret, "Effect of Microwaves on the Rabbit Eye", *J. Microwave Power*, vol. 44, pp. 232-242, 1969.
- [6] J.C. Lin, R.J. Meltzer, F.K. Redding, "Comparison of Measured and Predicted Characteristics of Microwave-Induced Sound", *Radio Science*, vol. 17, pp. 1595-1635, 1982.
- [7] W.R. Adey and S.M. Bawin, "Binding and Release of Brain Calcium by Low-Level Electromagnetic Fields: A Review", *Radio Science*, vol. 17, pp. 1495-1575, 1982.
- [8] B.R.R. Persson, L.G. Salford, A. Brun, "Blood-Brain Barrier Permeability in Rats Exposed to Electromagnetic Fields Used in Wireless Communication", *Wireless Networks*, vol. 3, pp. 455-461, 1997.
- [9] L.G. Salford, A. Brun, B.R.R. Persson, "Brain Tumor Development in Rats Exposed to Electromagnetic Fields Used in Wireless Cellular Communication", *Wireless Networks*, vol. 3, pp. 463-469, 1997.
- [10] R.S. Malyapa, A.W. Ahern, W.L. Straube, E.G. Moros, W.F. Pickard, J.L. Roti-Rori, "Measurement of DNA Damage After Exposure to Electromagnetic Radiation in the Cellular Phone Communication Frequency Band", *Radiation Research*, vol. 148, pp. 618-627, 1997.
- [11] J.C. Lin, "Health Aspects of Wireless Communications", *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 3(1), pp. 14-20, 1999.
- [12] A.W. Preece, G. Iwi, A. Davis-Smith, K. Wesnes, S. Butler, E. Lim, A. Varey, "Effect of a 915-MHz Simulated Mobile Phone Signal on Cognitive Function in Man", *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 75(4), pp. 447-456, 1999.
- [13] T.S. Perry, "The Environment-Cell Phone Concerns", *IEEE Spectrum*, vol. 37, pp. 84-85, 2000.
- [14] The Independent Expert Group on Mobile Phones, "Report on Mobile Phones and Health", *National Radiological Protection Board*, UK, 2000.
- [15] K. Caputa, M.A. Stuchly, M. Skopec, H.I. Bassen, P. Ruggera, M. Kanda, "Evaluation of Electromagnetic Interference from a Cellular Telephone with a Hearing Aid", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48 (11), pp. 2148-2154, November 2000.

- [16] ICNIRP Guidelines, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”, *Health Physics*, vol. 74, n° 4, pp. 494-522, 1998.
- [17] CENELEC, ENV 50166-2, European Prestandard ENV 50166-2, *Human Exposure to Electromagnetic Fields High-Frequency: 10 kHz - 300 GHz*, Jan. 1995.
- [18] IEEE C95.1 - 1991, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, 1992.
- [19] CENELEC, prES 59005, *Considerations for Human Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in the Frequency Range 30MHz - 6 GHz*, Dec. 1997.
- [20] FCC OET BULLETIN 65 - Supplement C, *Additional Information for Evaluating Compliance of Mobile and Portable Devices with FCC Limits for Human Exposure to Radiofrequency Emissions*, Dec. 1997.
- [21] P. Bielli, A. Schiavoni, P. Bertotto, K.S. Nikita, C. Kechribaris, P.S. Excell, A.W. Preece, C. Grangeat, G. Lovisolo, B. Veyret, “Assessment of Measurement Procedures and Uncertainty Evaluation”, *CEPHOS Cellular Phone Standard*, EC SMT4-CT97-2173, Deliverable D03, 1999.
- [22] K.S. Nikita, G.S. Stamatakos, N.K. Uzunoglu, A. Karafotias, “Analysis of the Interaction Between a Layered Spherical Human Head Model and a Finite Length Dipole”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 2003-2013, November 2000.
- [23] M. Okoniewski, M.A. Stuchly, “A Study of the Handset Antenna and Human Body Interaction”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, pp. 1855 – 1864, 1996.
- [24] M.A. Jensen, Y. Rahmat-Samii, “EM Interaction of Handset Antennas and a Human in Personal Communications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 1, pp. 7 - 17, 1995.
- [25] K.S. Nikita, M. Cavagnaro, P. Bernardi, S. Pisa, E. Piuze, N.K. Uzunoglu, G.I. Krikelas, J.N. Sahalos, “A Study of Uncertainties in Modeling the Handset Antenna and Human Head Interaction Using the FDTD Method”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, December 2000.
- [26] P.S. Excell, R. Abd-Alhameed, J. Vaul, M. Mangoud, P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, E. Piuze, K.S. Nikita, G. Krikelas, J. Sahalos, R. De Leo, G. Cerri, F. Moglie, P. Russo, “Numerical and Experimental Exposure Assessment: Part I – Numerical Studies”, *CEPHOS Cellular Phone Standard*, EC SMT4-CT97-2173, Deliverable E05 (Part I), 1999.
- [27] O.P. Gandhi, G. Lazzi, C.M. Furse, “Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900MHz”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. (10, 2), pp. 1884 - 1897, 1996.