



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Φορητή Κεραία Αποδοτικών Επιδόσεων και Περιορισμένου SAR
για 5G Εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Μακαρόνας

Επιβλέπουσα: Δήμητρα-Θεοδώρα Ι.Κακλαμάνη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Φορητή Κεραία Αποδοτικών Επιδόσεων και Περιορισμένου SAR
για 5G Εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Μακαρόνας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δήμητρα-Θεοδώρα Ι.Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1η Ιουλίου 2021

Κακλαμάνη Ι. Δήμητρα-Θεοδώρα	Βενιέρης Στ. Ιάκωβος	Παναγόπουλος Αθανάσιος
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π	Καθηγητής Ε.Μ.Π	Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2021

.....
Ιωάννης Μακαρόνας

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

Copyright © Ιωάννης Μακαρόνας, 2021

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

Τα τελευταία χρόνια οι ασύρματες φορητές συσκευές έχουν κάνει αισθητή την παρουσία τους σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας (ιατρική, αθλητισμός, ψυχαγωγία) καθώς μέσω της συλλογής και μεταφοράς βιολογικών δεδομένων (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, καρδιακοί παλμοί, κ.ά.) καθιστούν εφικτή την καταγραφή της υγείας και της φυσικής κατάστασης του φορέα τους (τελικός χρήστης) σε πραγματικό χρόνο. Χάρη στις 5G τεχνολογίες, τα δίκτυα ασύρματων φορητών συσκευών που αναπτύσσονται πάνω στο σώμα (WBAN) έχουν εξελιχθεί διασφαλίζοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μικρότερη καθυστέρηση, και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Καθίσταται, επομένως, σαφής η ανάγκη αφενός για αξιόπιστες υπηρεσίες, και αφετέρου για προστασία του τελικού χρήστη από την ισχύ των Η/Μ πεδίων που δημιουργούνται από τις φορητές συσκευές.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής είναι η μελέτη, σχεδίαση και αξιολόγηση κεραίας η οποία παρουσιάζει την επιθυμητή συμπεριφορά σε 5G συχνότητες, αλλά συγχρόνως εκθέτει τον τελικό χρήστη σε χαμηλά επίπεδα Η/Μ ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, στο *Κεφάλαιο 1* αναλύεται η 5η τεχνολογική γενιά (5G) και παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της, καθώς και οι προκλήσεις που έχει κληθεί να αντιμετωπίσει. Στο *Κεφάλαιο 2* μελετώνται και προσομοιώνονται βασικές τεχνολογίες κεραίων για WBAN εφαρμογές με σκοπό την επιλογή της τεχνολογίας, η οποία είναι κατάλληλη για το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Το *Κεφάλαιο 3* εστιάζει στον *Ειδικό Ρυθμό Απορρόφησης* (Specific Absorption Rate, SAR) και στις οδηγίες που έχουν προτυποποιηθεί από σχετικούς οργανισμούς για ασφαλή εκπομπή. Στο ίδιο κεφάλαιο, πραγματοποιείται, επίσης, μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνικών μείωσης του SAR με σκοπό να επιλεγεί και, στη συνέχεια, να υιοθετηθεί η πιο αποδοτική τεχνική. Στο *Κεφάλαιο 4*, μελετάται η επίδραση της παρουσίας του ανθρώπινου ομοιώματος του Κεφαλαίου 3 στην συμπεριφορά των φορητών κεραίων που επιλέχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων οδηγεί στην επιλογή της τελικής κεραίας, η οποία είναι κατάλληλη για την μελέτη επίδρασης της τεχνικής μείωσης του SAR του Κεφαλαίου 3. Στη συνέχεια (*Κεφάλαιο 5*), η τελική κεραία σχεδιάζεται παρεμβαίνοντας σταδιακά στην αρχιτεκτονική της και καταγράφεται η συμπεριφορά της. Από τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι η προτεινόμενη τεχνική μείωσης του SAR είναι μια αποτελεσματική μέθοδος καθώς όχι μόνο διατηρεί την επίδοση της κεραίας και σημαντικές σχεδιαστικές απαιτήσεις (π.χ. φορητότητα, κόστος κατασκευής, συνολικός βάρος, συντήρηση), αλλά προκαλεί και αισθητή μείωση του SAR. Τέλος, το *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζει εν συντομία τα συμπεράσματα που προέκυψαν στη διάρκεια της διπλωματικής, καθώς και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Λέξεις Κλειδιά: 5G, Φορητή Κεραία, SAR, Ανθρώπινο Ομοίωμα

Abstract

Wireless wearable devices have been a standard component of everyday life (medicine, sports, entertainment, etc.) because -through data collection and data transfer (e.g., temperature, pressure, heart rate)- the physical health of the end-user is possible to be mapped in real time. Thanks to 5G technologies, Wireless Body Area Networks (WBAN) have further enhanced their performance with higher transmission rates, shorter latency, enhanced reliability, etc. However, the fact that these devices operate at the proximity or on the body has raised the concerns of the general public regarding the human exposure to EM radiations emitted by these devices.

In this context, this thesis focuses on the wearable devices and their antennas. The goal is to study, design and evaluate a wearable antenna that demonstrates the appropriate performance at 5G frequencies, as well as low levels of human exposure to EM radiation (low SAR). In detail, in *Chapter 1* an extensive analysis on 5G technologies is conducted focusing on the main the challenges to be addressed. Moreover, a brief description of the existing wireless networks is given, focusing on the Wireless Body Area Networks (WBANs) and the basic features that the wearable antenna should satisfy. In *Chapter 2*, standard WBANs antenna technologies are studied and stimulated to select antenna technology which is suitable for this thesis. *Chapter 3* focuses on the *Specific Absorption Rate (SAR)* and the guidelines that have been released by the standardization bodies for safe emissions. In the same chapter, a brief literature review of SAR reduction techniques is performed in order to choose the technique that is most suitable for this investigation. Finally, human phantoms that simulate the electrical properties of the human body are presented and classified in order choose the most appropriate one. In *Chapter 4*, the effect of the selected human phantom on the performance of the wearable antenna technology, which was chosen in Chapter 2, is studied. Thanks to the simulations, the final antenna is chosen. This antenna provides a measurable impact on SAR levels. In *Chapter 5*, the design of the final antenna is gradually modified and its performance is accordingly recorded. According to the simulations, the adopted SAR reduction technique is considered to be as highly efficient because it does not only significantly reduce human exposure, but also maintains antenna performance and other requirements (e.g., wearability, total weight, manufacturing cost, maintainability). Finally, *Chapter 6* presents thesis conclusions and suggestions for future work.

Keywords: 5G, Wearable Antenna, SAR, Human Phantom

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-21 στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν με την ανεκτίμητη βοήθεια τους στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Καθηγήτρια κα Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη, η οποία μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου γύρω από αυτόν τον τομέα.

Επίσης, ειδικές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην Ερευνήτρια Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών, Δρ. Μαρία Σειμένη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αδιάλειπτη βοήθεια της, καθώς και για το χρόνο που διέθετε πρόθυμα όποτε και αν χρειαζόταν. Την ευχαριστώ θερμότατα, καθώς η συμβολή και η ουσιαστική υποστήριξη της ήταν αδιαμφισβήτητα καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή υλοποίηση και σύνταξη της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ένθερμα όλα τα κοντινά μου πρόσωπα που έχουν συμβάλει να ο καθένας με τον δικό του τρόπο στην εκπλήρωση των στόχων μου μέχρι τώρα, και συμβάλλουν καθημερινά με την συμπαράσταση και ενθάρρυνση τους.

Acknowledgements

This thesis was carried out during the academic year 2020-2021 at the School of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens. At this point, I would like to express my warm and sincere thanks to those who contributed with their invaluable assistance in order to complete this effort. First of all, I would like to thank in particular Professor Dimitra – Theodora Kaklamani, who gave me the opportunity to deal with this interesting topic and to broaden my knowledge around this field.

I would also like to express my gratitude to Dr. Maria Seimeni for her valuable guidance throughout my thesis, her non-stop assistance and for the time she dedicated any time needed. I warmly thank her, as her substantial support was crucial for the successful documentation of this work.

Last but not least, I would like to thank from the bottom of my heart my loved ones, family and friends, who always believe in me and with their daily support and encouragement contribute to the fulfillment of my goals.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	XIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XVIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	XIX
1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΣΩΜΑ - ΦΟΡΕΤΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	1
1.2 ΔΙΚΤΥΑ 5G.....	2
1.3 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΣΩΜΑ	4
1.4 ΦΟΡΕΤΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ	10
1.4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Κεραίων.....	10
1.4.2 Χαρακτηριστικά Φορετών Κεραίων.....	15
1.4.3 Υλικά για Φορετές κεραίες.....	18
1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	21
2 ΜΕΛΕΤΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	23
2.1 ΤΥΠΟΙ ΦΟΡΕΤΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ	23
2.1.1 Δίπολο.....	23
2.1.2 Μονόπολο.....	24
2.1.3 Μικροταινιακή Κεραία	25
2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΦΟΡΕΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	43
2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
3 ΜΕΤΡΗΣΗ SAR - ΑΝΘΡΩΠΙΝΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ	46
3.1 ΕΙΔΙΚΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (SAR)	46
3.1.1 Ορισμός SAR	46
3.1.2 Τρόποι μελέτης – υπολογισμού SAR	48
3.2 Όρια SAR – ΠΡΟΤΥΠΑ	49
3.2.1 Τεχνικές Μείωσης SAR.....	50
3.3 ΑΝΘΡΩΠΙΝΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ	51
3.3.1 Ομοιώματα για αριθμητικές προσομοιώσεις.....	51
3.3.2 Πειραματικά ανθρώπινα ομοιώματα	52
4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΜΟΙΩΜΑ	55

4.1	ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗ ΚΕΡΑΙΑ (ΜΡΑ)	55
4.2	ΥΨΗΛΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΚΗ ΚΕΡΑΙΑ (ΗΜΜΡΑ)	59
4.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
5	ΦΟΡΕΤΗ ΚΕΡΑΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ SAR	64
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	64
5.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	64
5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση ασύρματων δικτύων με βάση την απόσταση μετάδοσης [8]....	5
Εικόνα 1.2: Κατηγοριοποίηση Συχνοτήτων για WBANs [6]	6
Εικόνα 1.3: Δίκτυο Wi-Fi [13]	7
Εικόνα 1.4: Ταξινόμηση WBAN δικτύου [14].....	8
Εικόνα 1.5: Παράδειγμα WBAN [14]	9
Εικόνα 2.1: Δίπολο	24
Εικόνα 2.2: Μονόπολο.....	25
Εικόνα 2.3 Σχήματα μικροταινιακών κεραιών [16]	26
Εικόνα 2.4: Τρόποι τροφοδοσίας μικροταινιακής κεραίας α) μικροταινιακή γραμμή β) ομοαξονικό καλώδιο γ) σύζευξη ανοιχτής οπής δ) σύζευξη κλειστής οπής [16].....	27
Εικόνα 2.5: Μικροταινιακή Κεραία α) Κάτοψη β) Πλάγια όψη	29
Εικόνα 2.6: Υψηλού Ρυθμού Μικροταινιακή Κεραία α) Δομή β) Ρυθμός TM21 [30].....	30
Εικόνα 2.7 ΗΜΜΡΑ α) Κάτοψη β) Πλάγια Όψη [31].....	31
Εικόνα 2.8: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για Δίπολο στα $f=2.4$ GHz	32
Εικόνα 2.9: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κέρδους για Δίπολο στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	32
Εικόνα 2.10 : Συντελεστής Ανάκλασης Διπόλου S11 για Δίπολο στα $f=3.6$ GHz.....	33
Εικόνα 2.11: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κέρδους για Δίπολο στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	33
Εικόνα 2.12 : Συντελεστής Ανάκλασης S11 για Μονόπολο στα $f=2.4$ GHz.....	34
Εικόνα 2.13: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Μονόπολο στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$.	34
Εικόνα 2.14: 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για Μονόπολο για $f=2.4$ GHz.....	35
Εικόνα 2.15: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για Μονόπολο στα $f=3.6$ GHz.....	35
Εικόνα 2.16: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Μονόπολο στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$.	36
Εικόνα 2.17: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για ΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz	36
Εικόνα 2.18: 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για ΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz	37
Εικόνα 2.19: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για ΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	37
Εικόνα 2.20: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για ΜΡΑ στα $f=3.6$ GHz	38

Εικόνα 2.21: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για MPA στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	38
Εικόνα 2.22: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για HMMPA στα $f=2.4$ GHz.....	39
Εικόνα 2.23: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για HMMPA στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$...	39
Εικόνα 2.24: 3D Διαγράμματα ακτινοβολίας για HMMPA στα $f=2.4$ GHz.....	40
Εικόνα 2.25: Συντελεστής Ανάκλασης S11 για HMMPA στα $f=3.6$ GHz.....	40
Εικόνα 2.26: Διαγράμματα ακτινοβολίας για HMMPA στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	41
Εικόνα 2.27: Συγκριτικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	42
Εικόνα 2.28: Απόδοση Ακτινοβολίας με άκαμπτα και εύκαμπτα υλικά α) $f=2.4$ GHz β) $f=3.6$ GHz	44
Εικόνα 3.1: Καλώδιο -ανιχνευτής ηλεκτρικών πεδίων [39].....	48
Εικόνα 3.2: Απλά - θεωρητικά ομοιώματα [43].....	51
Εικόνα 3.3: Υψηλής Ανάλυσης Ομοιώματα [43].....	52
Εικόνα 3.4: Υγρής μορφής ομοίωμα με patch κεραία [38]	53
Εικόνα 3.5: Ημι-στερεό ομοίωμα [43].....	54
Εικόνα 3.6: Στερεό ομοίωμα [43].....	54
Εικόνα 4.1 Κάτοψη κεραίας MPA.....	55
Εικόνα 4.2 Συντελεστής Ανάκλασης S11 για την MPA στα $f=2.4$ GHz.....	56
Εικόνα 4.3 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για την MPA στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	57
Εικόνα 4.4 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για την MPA κοντά στο σώμα για $f=2.4$ GHz.....	57
Εικόνα 4.5 Κατανομή τιμών SAR για την MPA στα $f=2.4$ GHz	57
Εικόνα 4.6 Συντελεστής Ανάκλασης S11 για την MPA στα $f=3.6$ GHz.....	58
Εικόνα 4.7 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για την MPA στα $f=3.6$ GHz κοντά στο Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	58
Εικόνα 4.8 Κατανομή τιμών SAR για την MPA στα $f=3.6$ GHz	59
Εικόνα 4.9 Κάτοψη κεραίας HMMPA	59
Εικόνα 4.10 Συντελεστής Ανάκλασης S11 για την HMMPA στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα.....	60

Εικόνα 4.11 Διαγράμματα ακτινοβολίας για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	60
Εικόνα 4.12 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα	61
Εικόνα 4.13 Κατανομή SAR για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz	61
Εικόνα 5.1 Συντελεστής Ανάκλασης S11 για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 στον Ελεύθερο Χώρο στα $f=2.4$ GHz	65
Εικόνα 5.2 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 στον Ελεύθερο χώρο στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	65
Εικόνα 5.3 Καμπύλη μείωσης SAR-για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4$ GHz.....	67
Εικόνα 5.4 Μείωση SAR για την ΗΜΜΡΑ επάνω στο ομοίωμα στα $f=2.4$ GHz	67
Εικόνα 5.5 Απόδοση Ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=2.4$ GHz .	68
Εικόνα 5.6 Επίδραση Phantom στην Απόδοση Ακτινοβολίας στα $f=2.4$ GHz	68
Εικόνα 5.7 Ενίσχυση απόδοσης ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=2.4$ GHz	69
Εικόνα 5.8 Συντελεστής Ανάκλασης S11 για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 Free Space $f=3.6$ GHz	69
Εικόνα 5.9 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για AM1-AM10 στον Ελεύθερο Χώρο στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	70
Εικόνα 5.10 Συντελεστής Ανάκλασης Ισχύος για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 με Ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz.....	70
Εικόνα 5.11 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για AM1-AM10 με phantom $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$	71
Εικόνα 5.12 Μείωση SAR-ΗΜΜΡΑ $f=3.6$ GHz.....	71
Εικόνα 5.13 Μείωση SAR για την ΗΜΜΡΑ επάνω στο ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz	72
Εικόνα 5.14 Απόδοση Ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz	72
Εικόνα 5.15 Επίδραση του Ομοιώματος στην Απόδοση Ακτινοβολίας στα $f=3.6$ GHz.....	73
Εικόνα 5.16: Ενίσχυση απόδοσης ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές φορετών κεραιών [10].....	17
Πίνακας 1.2: Σύνοψη διηλεκτρικών υφασμάτων υλικών [18]	19
Πίνακας 1.3: Σύνοψη ιδιοτήτων αγώγιμων υλικών [19]	20
Πίνακας 2.1: Διαστάσεις Διπόλου	24
Πίνακας 2.2: Υλικά Διπόλου	24
Πίνακας 2.3: Διαστάσεις Μονοπόλου	25
Πίνακας 2.4: Υλικά Μονοπόλου.....	25
Πίνακας 2.5: Εξισώσεις Διαστάσεων ΜΡΑ.....	28
Πίνακας 2.6: Υλικά Μικροταινιακής Κεραίας Free Space.....	28
Πίνακας 2.7: Διαστάσεις Μικροταινιακής κεραίας	28
Πίνακας 2.8: Υλικά ΗΜΜΡΑ.....	31
Πίνακας 2.9: Διαστάσεις ΗΜΜΡΑ.....	31
Πίνακας 2.10 Άκαμπτα Υλικά	43
Πίνακας 2.11 Εύκαμπτα Υλικά.....	43
Πίνακας 3.1: Όρια του SAR της IEEE για τις συχνότητες 10KHz έως 3GHz [39]	49
Πίνακας 3.2: Τεχνικές Μείωσης SAR [41].....	50
Πίνακας 4.1: Ηλεκτρικές ιδιότητες 2/3 του μν ανθρώπινο ομοίωμα [44].....	55
Πίνακας 4.2: Διαστάσεις ΜΡΑ $f=2.4\text{GHz}$ κοντά σε Ομοίωμα.....	55
Πίνακας 4.3 Υλικά ΜΡΑ $f=2.4\text{GHz}$ κοντά σε Ομοίωμα.....	56
Πίνακας 4.4 Διαστάσεις για την ΗΜΜΡΑ κοντά σε Ομοίωμα.....	59
Πίνακας 4.5 Υλικά για την ΗΜΜΡΑ κοντά σε Ομοίωμα.....	59
Πίνακας 4.6 Συγκεντρωτικές Τιμές Παραμέτρων Ακτινοβολίας κοντά στο σώμα.....	63
Πίνακας 5.1 Μέγιστες τιμές επίδρασης αύξησης εδάφους.....	74
Πίνακας 5.2 Τιμές για μοντέλο κεραίας AM5	74

Κατάλογος Ακρωνυμίων

5G	Fifth Generation
eMBB	Enhanced Mobile BroadBand
FCC	Federal Communications Commission
HMPA	High order Micropatch Antenna
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ISM	Βιομηχανικές Επιστημονικές Ιατρικές
LAN	Local Area Network
LOS	Line of Sight
MICS	Ιατρικές υπηρεσίες εμφυτευμάτων
mMTC	Massive Machine Type Communications
MPA	Micropatch Antenna
NB	Στενού εύρους
NLOS	None Line of Sight
PEC	Perfect Electric Conductor
SAR	Specific Absorption Rate
uRLLC	Ultra reliable and Low-latency Communications
UWB	Εξαιρετικά ευρεία ζώνη
WBAN	Wireless Body Area Network
WHO	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
WMTS	Ασύρματες υπηρεσίες τηλεμετρίας
WPANS	Wireless Person-Area-Networks
H/M	Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία
IOT	Internet of Things

1 Ανασκόπηση Ασύρματων Δικτύων κοντά στο σώμα - Φορετές Κεραίες

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Την βάση για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών αποτέλεσε η ανακάλυψη του ηλεκτρικού ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητισμού. Ο Μ. Faraday ήταν ο πρώτος που όρισε τις βάσεις για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και υποστήριξε πως η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων γίνεται με πεπερασμένη ταχύτητα και αποτελεί κυματική διαδικασία. Λίγο αργότερα ο J.C. Maxwell ανέπτυξε τη θεωρία για την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που έχουν τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με το φως και διαφέρουν από αυτό αποκλειστικά και μόνο στο μήκος κύματος, η οποία επαληθεύτηκε πειραματικά από τον Hertz. Παράλληλα, είχε επινοηθεί η κεραία από τον Alexander Popov [1]. Κατά τη διάρκεια του Β' παγκοσμίου πολέμου εδράζεται η επόμενη σημαντική πρόοδος με τη στρατιωτική έρευνα να συγκεντρώνεται γύρω από το ραντάρ και την τηλεπισκόπηση.

Η είσοδος στην εποχή των ασύρματων δικτύων έγινε το 1971 από τον καθηγητή Norman Abramson, καθηγητής στο πανεπιστήμιο της Χαβάης, ο οποίος ανέπτυξε το πρώτο παγκόσμιο ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών, όπου 7 υπολογιστές επικοινωνούσαν με τον κεντρικό υπολογιστή μέσω τηλεφωνικών γραμμών [2]. Στην δεκαετία του 90', διάφορες ερευνητικές ομάδες άρχισαν να μελετούν προσωπικά δίκτυα που όμως θα λειτουργούν κοντά στο σώμα. Μέχρι τότε, αρκετός κόσμος χρησιμοποιούσε ψηφιακές συσκευές ακόμα και φορετές, αλλά δεν υπήρχε δυνατότητα να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, στα τέλη του 1990 δύο ερευνητικές ομάδες στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Thomas G.Zimmerman και Neil Gershenfeld, ανέλαβαν να μελετήσουν τον τρόπο επικοινωνίας ανάμεσα σε διαφορετικές συσκευές πάνω στο ανθρώπινο σώμα [3]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι χρησιμοποιώντας χαμηλές συχνότητες και χαμηλό ρεύμα το σήμα δεν θα μεταδιδόταν μακριά από το σώμα.

Η πρώτη σχεδίαση κεραίας για φορετές εφαρμογές δημοσιεύτηκε το 1999. Μία επίπεδη ανεστραμμένη κεραία F διπλής ζώνης εκτυπώθηκε πάνω σε εύκαμπτο υπόστρωμα [4]. Παρ'όλο που αποτέλεσε επιτυχία, η μελέτη των επόμενων χρόνων σχετικά με τα υφασμάτινα υλικά έλυσε ζητήματα σχετικά με την ευελιξία και ζητήματα επιδόσεων των φορετών κεραίων. Παρόλο που η πρώτη φορητή κεραία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η ιστορία των φορετών συσκευών, είναι αρκετά πιο μακροσκελής [5]. Συγκεκριμένα τον 13^ο αιώνα, καταγράφεται η πρώτη ανακάλυψη μη-ψηφιακής φορητής συσκευής, με την κατασκευή μεγεθυντικών διόπτρων. Έπειτα, σταθμοί αποτέλεσαν η ανακάλυψη του μηχανικού ρολογιού τσέπης στις αρχές του 16^{ου} αιώνα, όπως

και του πρώτου «έξυπνου» δαχτυλιδιού άβακα που χρησιμοποιούταν από εμπόρους τον 17^ο αιώνα. Θεωρείται ότι η ανακάλυψή του οδήγησε στις σημερινές φορετές υπολογιστικές μηχανές.

Στις μέρες μας, οι φορετές συσκευές έχουν γίνει πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής των ανθρώπων κυρίως για ιατρικές εφαρμογές (π.χ. ενδοноσοκομειακή παρακολούθηση ασθενών, εφαρμογές τηλε-ιατρικής, παρακολούθηση ατόμων με αναπηρίες και προβλήματα κινητικότητας, κ.ά.), αλλά και σε άλλους τομείς, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον αθλητισμό και τις στρατιωτικές εφαρμογές. Η χρήση τους παρέχει πληθώρα πλεονεκτημάτων, αφού παρέχει τη δυνατότητα για καταγραφή κρίσιμων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να περιορίζεται από τις κινήσεις του χρήστη. Η χρήση τους προσφέρει επομένως φορετότητα και κινητικότητα. Οι φορετές συσκευές έχουν ιδιαίτερη επίδραση και σε άλλους τομείς όπως π.χ. στην οικονομία και στις μεταφορές, και συντελούν συνολικά στην αύξηση της παραγωγικότητας στις επιχειρήσεις. Για παράδειγμα δίνουν την δυνατότητα επιτάχυνσης του ψηφιακού μετασχηματισμού των εταιρειών μεταδίδοντας πληροφορίες συνεχώς και επιτρέποντας στους εργαζόμενους να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους πιο γρήγορα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται, ότι το 2017 η αξία της αγοράς των φορετών συσκευών ανέρχεται σε 18 δις ευρώ παγκοσμίως με συνεχώς αυξανόμενη τάση.

Συμπερασματικά, οι φορετές συσκευές αποτελούν ήδη βασικά στοιχεία της καθημερινότητας του ανθρώπου και μελλοντικά θα ενισχυθεί η παρουσία τους στους υπάρχοντες τομείς και σε άλλους. Αντίστοιχα, οι φορετές κεραίες με την σειρά τους, με την εξέλιξη των υλικών και ιδιαίτερα των υφασμάτων, θα προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη δυνατότητα φορετότητας και επιδόσεων για επικοινωνία.

1.2 Δίκτυα 5G

Η συνεχής αύξηση του αριθμού και της ευρείας χρήσης των ψηφιακών συσκευών, αλλά και των φορετών συσκευών που συνδέονται στο Διαδίκτυο οδηγεί συνεχώς σε εξέλιξη των γενιών ασύρματης επικοινωνίας. Η ασύρματη πρόσβαση πέμπτης γενιάς (5G) είναι το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών με στόχους που περιλαμβάνουν, παροχή συνδεσιμότητας για οποιοδήποτε είδος συσκευής, αύξηση του ρυθμού δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση, και υψηλότερη ενεργειακή απόδοση καθώς και συμβατότητα με προηγούμενες τεχνολογίες (4G, GSM κλπ.) [6]. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τα συστήματα 5G λειτουργούν σε πολύ μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, από τη ζώνη UHF έως και τη mmWave (κάτω από 1 GHz έως και 100 GHz). Η ζώνη χαμηλών συχνοτήτων (κάτω από 2.5 GHz) παρέχει τη δυνατότητα πολύ καλής κάλυψης, η ζώνη μεσαίων συχνοτήτων (2.5-10 GHz) παρέχει έναν συνδυασμό καλής κάλυψης και πολύ υψηλών ρυθμών δεδομένων και η ζώνη πολύ υψηλών συχνοτήτων (10–100 GHz) παρέχει το απαιτούμενο

εύρος ζώνης για επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης και χαμηλότερων καθυστερήσεων που προβλέπονται για το 5G [7]. Η πρώτη τεχνολογία πέμπτης γενιάς που αναπτύχθηκε από τη 3GPP για να πληροί τις απαιτήσεις IMT-2020 που θέτει η ITU για τα δίκτυα 5G είναι το NR (New Radio), το οποίο υποστηρίζει τη λειτουργία σε δύο ζώνες συχνοτήτων:

- Την FR1-χαμηλή ομάδα συχνοτήτων [1MHz , 450MHz], [450MHz , 6GHz]
- Την FR2-υψηλή ομάδα συχνοτήτων [24.25GHz , 52.6GHz]

Στα δίκτυα 5G, η διαθεσιμότητα ραδιοφάσματος είναι μία από τις βασικές προκλήσεις για την υποστήριξη της προβλεπόμενης μελλοντικής ζήτησης για κινητά. Θα είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε σε υψηλότερη συχνότητα και να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερες μερίδες ζωνών ελεύθερου φάσματος. Επομένως, τα 5G δίκτυα θα έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων και να διαχειρίζονται τα ποικίλα χαρακτηριστικά του φάσματος πιο αποδοτικά. Παράδειγμα, αυτών είναι συστοιχίες κεραιών MIMO όπου με χρήση σημείων πρόσβασης σε συχνότητες mmWave, θα επιτυγχάνεται η αναγκαία κάλυψη και κινητικότητα μέσω διαγραμμάτων ακτινοβολίας κατευθυνόμενης δέσμης [6].

Επιπλέον, είναι αναγκαία η χρήση προηγμένων τεχνολογιών σε επίπεδο software. Τέτοιες είναι οι NVF (Network Function Virtualization), SDN (Software Defined Networking) και Network Slicing. Η πρώτη εξ αυτών, δίνει τη δυνατότητα αναπαράστασης λειτουργιών δικτύου σε πραγματικό χρόνο και σε οποιαδήποτε επιθυμητή τοποθεσία εντός της πλατφόρμας cloud του χειριστή. Η δεύτερη επιτρέπει τον έξυπνο και κεντρικό έλεγχο και προγραμματισμό του δικτύου με χρήση εφαρμογών λογισμικού, ενώ η τελευταία δίνει τη δυνατότητα κατάτμησης του δικτύου για παροχή υπηρεσιών προσαρμοσμένων στις συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS (Quality of Service) των χρηστών. Τέλος, η θεωρία παιγνίων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στα ασύρματα δίκτυα για μια σειρά από προβλήματα όπως ο έλεγχος ροής, έλεγχος ισχύος και διαμοιρασμός πόρων.

Οι υπηρεσίες που προσφέρονται από τα συστήματα 5G έχουν ταξινομηθεί από την ITU σε eMBB (Enhanced Mobile BroadBand), για παροχή πολύ υψηλών ταχυτήτων και μεγάλης χωρητικότητας (π.χ. βίντεο υψηλής ευκρίνειας, εικονική πραγματικότητα), uRLLC (Ultra-reliable and Low-latency Communications), για έλεγχο συσκευών σε πραγματικό χρόνο (π.χ. βιομηχανική ρομποτική, υποβοηθούμενη ή αυτόνομη οδήγηση) και mMTC (Massive Machine Type Communications) για σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση (Internet of Things) [7]. Με βάση τις λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G που αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα χρησιμοποιώντας τεχνολογίες 5G σε δίκτυα που λειτουργούν με βάση το σώμα [6].

Ρυθμός Δεδομένων

Η δυνατότητα επίτευξης υψηλότερου ρυθμού δεδομένων είναι ίσως το πιο υποσχόμενο πλεονέκτημα για ένα WBAN. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά μεμονωμένων φορητών συσκευών διαφέρουν και οι ρυθμοί δεδομένων, και αντίστοιχα η ανάγκη για υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις για κάθε συσκευή. Μέσω MIMO επικοινωνιών αυξάνεται ιδιαίτερα ο ρυθμός δεδομένων ενώ η ενεργειακή απόδοση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Σε ιατρικές εφαρμογές αυτό έχει ιδιαίτερο αντίκτυπο αφού απαιτείται συνεχής καταγραφή βιολογικών παραμέτρων, με χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση ειδικά σε εμφυτευμένες συσκευές.

Εξοικονόμηση ενέργειας

Με βάση ότι το 5G χρησιμοποιεί ανεπτυγμένες τεχνολογίες software υπάρχει η δυνατότητα πιο αποδοτικού ελέγχου στην ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών. Για παράδειγμα, δίνεται η δυνατότητα σε φορητές συσκευές να απενεργοποιούνται όταν δεν υπάρχει ανάγκη να συλλέξουν είτε να μεταδώσουν δεδομένα, είτε ανάλογα να χαμηλώνουν τις ενεργειακές τους καταναλώσεις. Αντίστοιχα, μέσω συγκεκριμένης δρομολόγησης επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση στην σύζευξη μεταξύ των συσκευών.

mmWaves

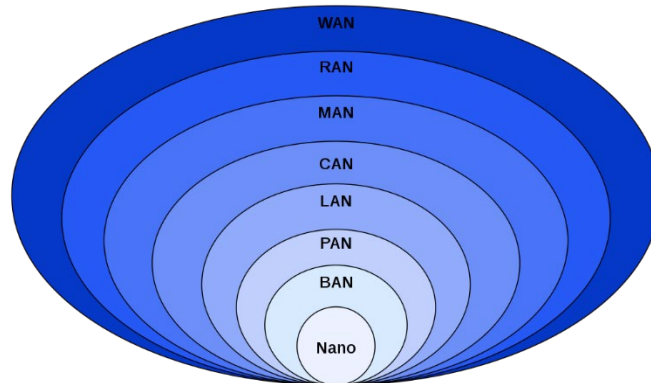
Γίνεται εντατική έρευνα ώστε να μελετηθούν οι επιπτώσεις των mmWaves σε δίκτυα WBAN. Η επικοινωνία σε mmWaves μειώνει δραστικά παρεμβολές που τυχόν υπάρχουν λόγω άλλων δικτύων, WBAN είτε άλλου τύπου, λόγω της μικρής του εμβέλειας, και προφανώς αυξάνει τις ταχύτητες δεδομένων αντίστοιχα σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον αυτό προσθέτει επιπλέον επίπεδα ασφαλείας. Παρ'όλα αυτά υπάρχουν και μειονεκτήματα καθώς η in-body επικοινωνία θα είναι αδύνατη, αφού η πλειονότητα της ακτινοβολίας θα απορροφάται από το σώμα. Τέλος, ζητήματα σχετικά με την υγεία των χρηστών, όπως ο δείκτης SAR, που θα μελετήσουμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν.

Σε κάθε περίπτωση οι τεχνολογίες και τα πλεονεκτήματα του 5G θα οδηγήσουν σε πολύ πιο αποτελεσματικά WBANs, με επιδραστικά αποτελέσματα σε πληθώρα εφαρμογών.

1.3 Επικοινωνία κοντά στο σώμα

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων έχει παίξει καθοριστική σημασία στην ζωή των ανθρώπων. Τα ασύρματα δίκτυα κατηγοριοποιούνται βάσει της περιοχής κάλυψης που εξυπηρετούν (Εικόνα 1.1). Κάθε κατηγορία δικτύου αποτελείται από συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με την

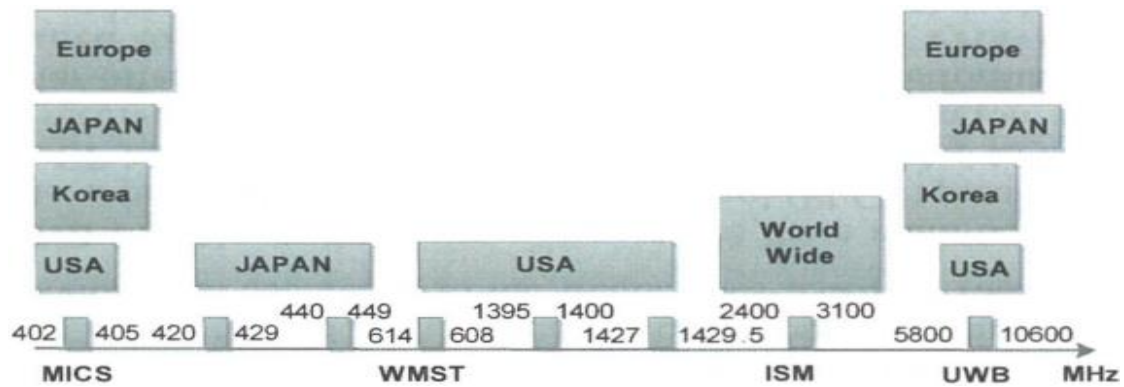
απόσταση της μετάδοσης του σήματος, όπως και των τεχνικών επικοινωνίας ανάμεσα στις ασύρματες συσκευές.



Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση ασύρματων δικτύων με βάση την απόσταση μετάδοσης [8]

Τα WBAN αποτελούν υποκατηγορία των δικτύων με βάση το σώμα (Based Area Network) και είναι τα δίκτυα που επικοινωνούν οι φορητές συσκευές ασύρματα πάνω ή κοντά στο σώμα. Με την συνεχώς αυξανόμενη τάση για φορητές συσκευές, η έρευνα γύρω από την μελέτη των WBAN εντείνεται [9]. Τα WBAN's δίκτυα είναι ικανά να μεταμορφώσουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αλληλοεπιδρούν και ωφελούνται από ασύρματες επικοινωνίες. Οι αισθητήρες WBAN είναι ικανοί για δειγματοληψία παρακολούθηση, επεξεργασία και επικοινωνία διαφόρων ζωτικής σημασίας σημάτων καθώς και παροχή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο στο χρήστη χωρίς να προκαλεί ενόχληση κατά τη διάρκεια χρήσης της συσκευής [10].

Σύμφωνα με το πρότυπο του IEEE 802.15.6 [11] ως ασύρματο δίκτυο περιοχής σώματος, ορίζεται: «ένα πρότυπο επικοινωνίας το οποίο είναι βελτιστοποιημένο για συσκευές χαμηλής ισχύος και υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων τοποθετημένες κοντά ή μέσα σε ένα ανθρώπινο σώμα για την εξυπηρέτηση ποικίλων εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων των ιατρικών, καταναλωτικών ηλεκτρονικών ή προσωπικών ψυχαγωγικών και άλλων». Η τελευταία τυποποίηση των WBAN, IEEE 802.15.6 στοχεύει να παρέχει ένα διεθνές πρότυπο για χαμηλή ισχύ, σύντομο εύρος (εντός του ανθρώπινου σώματος) και εξαιρετικά αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία εντός της γύρω περιοχής του ανθρώπινου σώματος υποστηρίζοντας ένα ευρύ φάσμα ρυθμών δεδομένων για διαφορετικά σύνολα εφαρμογών. Τα WBANs δίκτυα πρέπει να συμμορφώνονται με τις ιατρικές και κανονιστικές αρχές επικοινωνίας. Ιατρικές υπηρεσίες εμφυτευμάτων (MICS), Ασύρματες υπηρεσίες τηλεμετρίας (WMTS), Βιομηχανικές – Επιστημονικές και Ιατρικές (ISM) και η εξαιρετικά ευρεία ζώνη (UWB) είναι μερικές από τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για ιατρικούς σκοπούς (Εικόνα 1.2). Το IEEE 802.15.6 υποστηρίζει και διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων, όπως στενού εύρους (NB) και ανθρώπινου σώματος επικοινωνία (HBC). Επί του παρόντος, η πιο ευρέως



Εικόνα 1.2: Κατηγοριοποίηση Συχνοτήτων για WBANs [6]

χρησιμοποιούμενη τεχνολογία WBAN είναι η UWB. Τα WBANs λειτουργούν με βάση τις παραπάνω συχνότητες (Εικόνα 1.3). Βασίζονται όμως και σε διάφορες ασύρματες τεχνολογίες που εμπλέκονται και αναπτύσσονται σε επικοινωνία με τα WBANs. Τέτοιες είναι οι Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Zigbee, Wi-Fi και UWB και αναφέρονται παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά για την κάθε μία. [12].

Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth σχεδιάστηκε ως πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας με μικρή εμβέλεια και έχει την δυνατότητα να διαμορφώσει ένα δίκτυο με ασφάλεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Από φυσική άποψη το Bluetooth λειτουργεί περίπου στα 2.4 GHz, προδιαγράφει τρία επίπεδα ισχύος της εκπομπής από τα οποία εξαρτάται και η εμβέλεια επικοινωνίας. Γενικά η τεχνολογία Bluetooth εξυπηρετεί την επικοινωνία συσκευών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση οι οποίες μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα, αλλά δεν μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στην περίπτωση των WBANS διότι έχει σχεδιαστεί για δίκτυα με υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (μέχρι 3 Mbps) που έχουν την ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα στις μπαταρίες με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το μέγεθος αυτών, κάτι που δεν είναι επιθυμητό στις φορετές συσκευές.

Bluetooth Low Energy

Η ασύρματη τεχνολογία Bluetooth Low Energy παρόλο που μοιάζει με τη παραπάνω τεχνολογία Bluetooth που αναφέρθηκε είναι πιο συμβατή για επικοινωνία με τα WBANS διότι έχει σχεδιαστεί για να υλοποιείται επικοινωνία με κινητές συσκευές (π.χ. κινητά τηλέφωνα) και παρέχει δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων μέχρι 1 Mbps με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

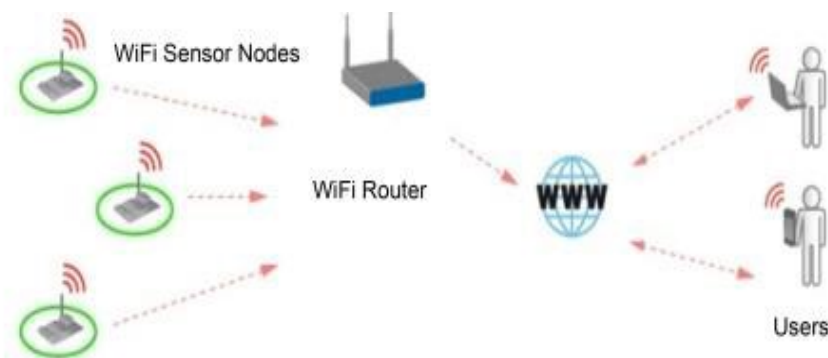
ZigBee

Η τεχνολογία ZigBee, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4 αποτελεί ακόμη μια τεχνολογία για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών με χαρακτηριστικά όπως, χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μεγάλη διάρκεια ζωής και ασφάλεια δικτύου χάρη στο 128-bit κλειδί κρυπτασφάλισης

που χρησιμοποιεί ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα, αυθεντικότητα και εμπιστευτικότητα του τρόπου ανταλλαγής των δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή είναι πιο απλή και πιο οικονομική σε σχέση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται όπως για παράδειγμα οι Bluetooth ή WiFi. Η τεχνολογία ZigBee εφαρμόζεται σε συχνότητες 868 MHz, 915 MHz, και 2.4 GHz και χρησιμοποιείται κυρίως σε WPANS (Wireless Person-Area-Networks) και όχι τόσο σε WBANS για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, διότι ενδέχεται να υπάρξουν παρεμβολές στη μετάδοση ασύρματου τοπικού δικτύου όταν λειτουργούν πολυάριθμα ασύρματα συστήματα και ειδικά στη συχνότητα 2.4 GHz και δεύτερον ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (περίπου 250 Kbps) δεν το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές WBANS.

Wi-Fi

Η τεχνολογία Wi-Fi είναι ένα είδος ασύρματης τεχνολογίας βασισμένη στο πρότυπο IEEE 802.11 με εφαρμογή στα τοπικά ασύρματα δίκτυα σε εύρος συχνοτήτων 2.4 GHz και 5.8 GHz. Δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μέσω διαδικτύου όταν οι χρήστες συνδέονται με κάποιο κοντινό σημείο πρόσβασης (access point). Έτσι για παράδειγμα, όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.4) οι αισθητήρες μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα σε ασύρματες συσκευές (υπολογιστές φορητούς, κινητά τηλέφωνα) χρησιμοποιώντας το ασύρματο διαδίκτυο και μια συσκευή - δρομολογητή που είναι συμβατή με τη τεχνολογία Wi-Fi.



Εικόνα 1.3: Δίκτυο Wi-Fi [13]

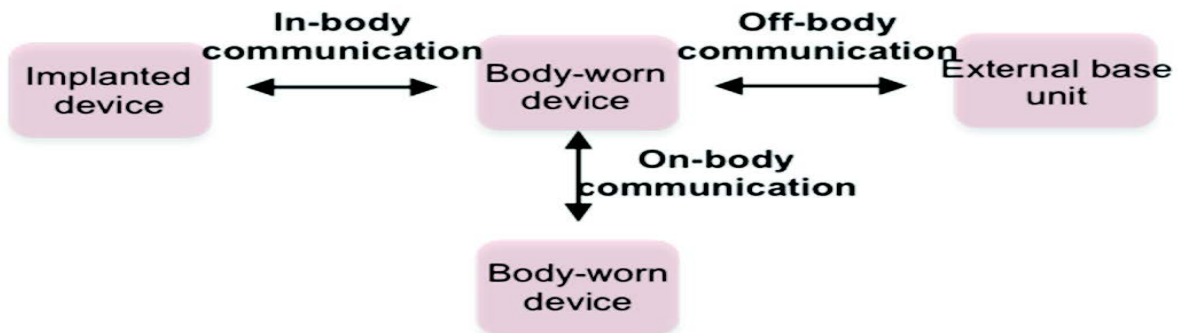
UWB

Η τεχνολογία Ultra-Wide Band παρέχει μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία μικρής εμβέλειας και επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας στη ζώνη συχνοτήτων από 3.1 GHz έως 10.6 GHz. Υποστηρίζει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερο από 100Mbps σε απόσταση 10 μέτρων για επικοινωνία WPANS. Ως πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η μετάδοση χαμηλής ισχύος και η μικρή κατανάλωση ενέργειας. Μάλιστα η χαμηλή ισχύς μετάδοσης της δίνει τη δυνατότητα να πετυχαίνει τη δια λειτουργικότητα και με άλλους τύπους δικτύων ασύρματης επικοινωνίας όπως το 802.11 LAN

(Local Area Network), το 802.16 MAN (Metropolitan Area Network) και το WAN (Wide Area Network). Τέλος αυτή η τεχνολογία προσφέρει προοπτικές αξιοποίησης και σε WBANS που χρησιμοποιούν φορετές συσκευές τοποθετημένες γύρω από το ανθρώπινο σώμα που σχεδιάζονται για να ικανοποιούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρή εμβέλεια εκπομπής.

Ανάλογα την χρησιμότητα της εκάστοτε εφαρμογής χωρίζονται οι τρόποι επικοινωνίας στα δίκτυα WBAN's σε τρεις βασικές κατηγορίες [14], όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.4

- Επικοινωνία από συσκευή εκτός σώματος, στο γύρω περιβάλλον, σε μία συσκευή που είναι τοποθετημένη πάνω στο σώμα (off-body)
- Επικοινωνία συσκευών που είναι πάνω στο σώμα τοποθετημένες μεταξύ τους (on-body)
- Επικοινωνία από εμφυτευμένες συσκευές (π.χ. ιατρικές συσκευές) εντός σώματος (in-body)

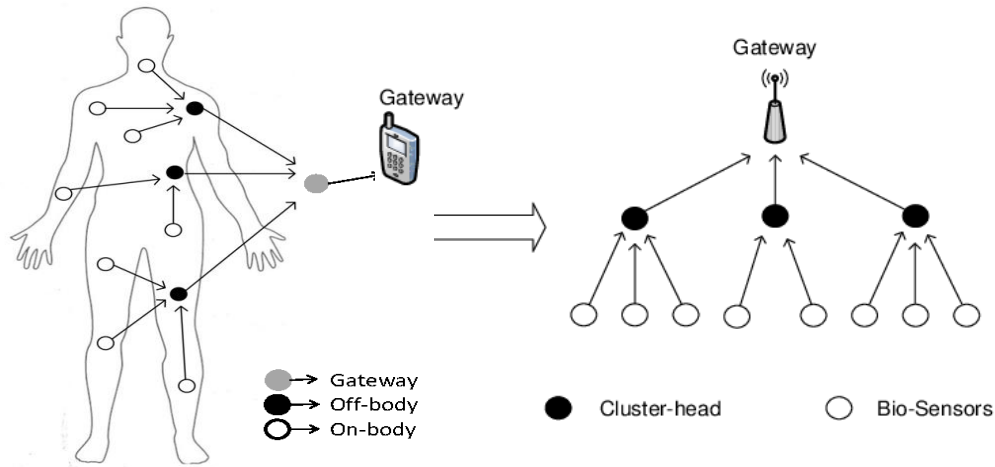


Εικόνα 1.4: Ταξινόμηση WBAN δικτύου [14]

Στην πρώτη, έχουμε την πλειονότητα της ακτινοβολίας της κεραίας εκτός σώματος, στον περιβάλλοντα χώρο. Η επικοινωνία γίνεται ανάμεσα στην κεραία που είναι επάνω – είτε κοντά στο σώμα, με μία εξωτερική κεραία – συσκευή. Στην δεύτερη, και οι δύο κεραίες είναι επάνω στο σώμα και επικοινωνούν μεταξύ τους. Επομένως και η περισσότερη ακτινοβολία είναι επάνω – γύρω από το σώμα. Στην τρίτη περίπτωση, η επικοινωνία γίνεται εντός σώματος, μέσω εμφυτευμένων αισθητήρων – κεραίων. Φυσικά σε ένα ολοκληρωμένο – πραγματικό σύστημα όλα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και τα όρια γίνονται θολά. Σε κάθε περίπτωση όμως, αποτελεί μία εύχρηστη κατηγοριοποίηση ώστε να γίνουν κατανοητές και διακριτές οι εκάστοτε προκλήσεις για την σχεδίαση των φορετών κεραίων.

Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα WBAN, όπου διαφορετικές φορετές συσκευές επικοινωνούν κοντά στο σώμα. Μέσω On-body επικοινωνίας επικοινωνούν διάφοροι αισθητήρες (Bio-Sensors), με κάποια κεφαλή της συστάδας (Cluster-head) των αισθητήρων η οποία με την σειρά

της μέσω off – body επικοινωνία επικοινωνεί με συσκευή, συνήθως μία προσωπική συσκευή π.χ. κινητή συσκευή (smartphone) ή PDA, η οποία είναι μακριά από το σώμα και συλλέγει τα δεδομένα.



Εικόνα 1.5: Παράδειγμα WBAN [14]

Προκλήσεις των WBAN

Όπως αναφέραμε κάθε ασύρματο δίκτυο πληροί τα δικά του χαρακτηριστικά ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική επικοινωνία ανάμεσα στις συσκευές που λειτουργούν εντός του. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ιδιαίτερες προϋποθέσεις – προκλήσεις για την υλοποίηση ενός δικτύου WBAN [15]:

- Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται έχουν περιορισμένους ενεργειακούς πόρους, αφού χώρος για μπαταρίες μεγάλου μεγέθους δεν είναι δυνατό να υπάρξει σε συσκευές επάνω στο σώμα. Επιπλέον είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί επαναφόρτιση ή να αλλαχθούν μπαταρίες, ιδιαίτερα σε εμφυτευμένες συσκευές. Επομένως, στον αντίποδα της αυτονομίας που παρουσιάζουν οι εν λόγω συσκευές βρίσκονται η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς και περιορισμένη μνήμη.
- Απαιτείται εξαιρετικά χαμηλή ισχύς μετάδοσης ανά κόμβο για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και για την αντιμετώπιση αυξημένων τιμών απορρόφησης ακτινοβολίας από τους βιολογικούς ιστούς. Από την άλλη η διάδοση των κυμάτων πραγματοποιείται μέσα ή πάνω σε ένα μέσο, όπως το ανθρώπινο σώμα, το οποίο έχει μεγάλες απώλειες λόγω των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει ιδιαίτερη εξασθένιση μέχρι να φτάσουν τα κύματα στον δέκτη.
- Οι συσκευές είναι τοποθετημένες στο ανθρώπινο σώμα, το οποίο βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση. Επομένως τα WBANs πρέπει να έχουν αντοχή απέναντι σε αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου.

- Οι πληροφορίες που μεταδίδονται είναι ζωτικής σημασίας συνήθως, όπως σε ιατρικές εφαρμογές. Αυτό σημαίνει πως είναι ύψιστης ανάγκης να υπάρχει υψηλή αξιοπιστία στην μεταφορά δεδομένων, όπως υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση.
- Είναι ανάγκη να υπάρχει ύψιστη ασφάλεια στην μεταφορά δεδομένων. Επομένως αποτελεσματικές τεχνικές ασφάλειας δικτύων και κρυπτογράφησης πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Συμπερασματικά, οι προκλήσεις για να καθίσταται ένα WBAN λειτουργικό είναι πολλαπλές. Οι χαμηλές ποσότητες διαθέσιμης ενέργειας για τροφοδοσία των συσκευών, οι δυσκολίες στην μετάδοση του σήματος λόγω παρουσίας του ανθρώπινου σώματος, οι πολλαπλές συσκευές που είναι παράλληλα συνδεδεμένες, και ο ρυθμός μεταφοράς των δεδομένων, όπως και η ασφάλεια στην επικοινωνία, είναι οι βασικότερες.

1.4 Φορετές κεραίες

Ανάλογα τον τύπο του δικτύου στον οποίο αναφερόμαστε οι κεραίες που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους, την αρχιτεκτονική τους και τις κατασκευαστικές τους ιδιαιτερότητες. Όπως προαναφέρθηκε, τα δίκτυα που λειτουργούν στο σώμα (WBANs) έχουν πολύ μεγάλη εφαρμογή σε διάφορους τομείς και συνεχώς διεισδύουν στην βιομηχανία και στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Παράλληλα, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών 5G οι δυνατότητες τους επεκτείνονται με μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση, αλλά και με μεγαλύτερη ασφάλεια και αξιοπιστία. Επίσης, ορίστηκαν οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για τις συσκευές που λειτουργούν κοντά στο σώμα, όπως οι χαμηλές ενεργειακές ανάγκες αφού δεν υπάρχει χώρος για αποθήκευση πάνω στο σώμα, αλλά και για να μειώνονται οι παρεμβολές, όπως και οι κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες ώστε να μην καθίστανται δύσχρηστες ως προς τον χρήστη.

Επομένως οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα WBAN πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ονομάζονται φορετές κεραίες, αφού έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν είτε εντός, είτε πάνω-κοντά στο σώμα, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω στην 1.4.2. Ο τρόπος ακτινοβολίας τους, η αρχιτεκτονική τους, όπως και τα κατασκευαστικά τους υλικά παίζουν καθοριστικό ρόλο για την επικοινωνία εντός ενός δικτύου κοντά στο σώμα. Αρχικά θα αναφερθούν βασικές θεωρητικές έννοιες και κρίσιμες παράμετροι για την μελέτη μιας κεραίας.

1.4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Κεραιών

Περιοχές Πεδίου

Μία κεραία ανάλογα τον χώρο που ακτινοβολεί παρατηρούνται σαφείς διαφορές στην μορφή του πεδίου. Ο περιβάλλον χώρος που περιβάλλει μια κεραία διακρίνεται ουσιαστικά σε 3 περιοχές [17].

1. *Περιοχή αντιδρώντος κοντινού πεδίου*

Αποτελεί τη περιοχή που περιλαμβάνει αμιγώς τη κεραία και το όριο της ορίζεται με κύκλο ακτίνας $R1$ και κέντρο το σημείο ακτινοβολίας της κεραίας με $R1 = 0.62 * \sqrt{D^3/\lambda}$, όπου D η max γραμμική διάσταση της κεραίας, και λ το μήκος κύματος. Στην κοντινή περιοχή, δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.

2. *Περιοχή κοντινού πεδίου ακτινοβολίας (περιοχή Fresnel)*

Στη περιοχή αυτή η διαμήκης συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου είναι σημαντική αλλά η ροή ισχύος δεν είναι ακτινική. Χαρακτηρίζεται από γωνιακή κατανομή του πεδίου εξαρτώμενη από την απόσταση από η κεραία. Η περιοχή αυτή συναντάται σε απόστασή r από τη κεραία όπου $R1 \leq r \leq R2$ με $R2 = 2 * \frac{D^2}{\lambda}$. Αυτό σημαίνει ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας θα επηρεάζεται, ακόμα, άμεσα από την ακτίνα απόστασης.

3. *Περιοχή μακρινού πεδίου (περιοχή Fraunhofer)*

Στη περιοχή αυτή οι συνιστώσες του πεδίου είναι παράλληλες στην ακτινική διεύθυνση και η ροή ισχύος κατευθύνεται ακτινικά προς τα έξω, δηλαδή το σχήμα του πεδίου είναι ανεξάρτητο της απόστασης από τη κεραία. Το μακρινό πεδίο ισχύει για απόσταση $r > R2$. Κάθε περιοχή χαρακτηρίζει το πεδίο από πλευράς δομής με διακριτές τις διαφορές μεταξύ των περιοχών. Όμως, τα όρια μεταξύ των περιοχών μπορεί να ποικίλουν ή να μην υπάρχουν σε ειδικές περιπτώσεις.

Διαγράμματα Ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κεραίας είναι η μαθηματική συνάρτηση, ή η γραφική αναπαράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων [16]. Αποτελεί μέγεθος που αφορά το μακράν πεδίο, αναπαρίσταται συναρτήσει των σφαιρικών συντεταγμένων θ και φ και διακρίνεται σε διάγραμμα ισχύος και πεδίων. Ουσιαστικά αποτελεί τον γεωμετρικό τόπο του πέρατος του διανύσματος Poynting όπου το μιγαδικό διάνυσμα Poynting είναι:

$$\vec{S}(r, \theta, \varphi) = \vec{E}(r, \theta, \varphi) \times \vec{H}(r, \theta, \varphi) \quad (\text{Εξ. 1-1})$$

όπου $\vec{E}(r, \theta, \varphi)$ το ηλεκτρικό πεδίο και $\vec{H}(r, \theta, \varphi)$ το μαγνητικό πεδίο.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας αποτελείται από λοβούς που χωρίζονται σε κύριους, μέγιστους, πλευρικούς και οπίσθιους [17]. Ο μέγιστος λοβός περιέχει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας

και λέγεται και κύρια δέσμη. Πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν το εύρος δέσμης μισής ισχύος (η γωνία που περιλαμβάνει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας και οριοθετείται από τις κατευθύνσεις τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας έχει τη μισή τιμή από τη μέγιστη) και το εύρος δέσμης πρώτου μηδενισμού (η γωνία που περιλαμβάνει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας και οριοθετείται από τις κατευθύνσεις τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας έχει μηδενική τιμή). Η ένταση ακτινοβολίας σχετίζεται με το μακρινό πεδίο και είναι η ισχύς που ακτινοβολείται από τη κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση και δίνεται από το τύπο:

$$U = r^2 * W_{rad} \quad (\text{Εξ. 1-2})$$

όπου r η απόσταση από τη κεραία, W_{rad} η πυκνότητα ακτινοβολίας σε W/m^2 , και U η ένταση της ακτινοβολίας σε $W/\mu\text{ονάδα στερεάς γωνίας}$.

Κατευθυντικότητα

Η κατευθυντικότητα D μιας κεραίας ισούται με το λόγο της μέγιστης πυκνότητας ισχύος $U(\theta, \varphi)_{max}$ προς τη μέση τιμή της $U(\theta, \varphi)_{average}$ επί μιας σφαίρας όπως παρατηρείται στο μακράν πεδίο μιας κεραίας ή αλλιώς ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας από μια κεραία σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει συνολικά σε όλες τις κατευθύνσεις. Δηλαδή,

$$D = \frac{U(\theta, \varphi)_{max}}{U(\theta, \varphi)_{average}} = \frac{4\pi U}{Prad} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (\text{Εξ 1-3})$$

όπου Ω_A η στερεά γωνία της δέσμης στην οποία ρέει όλη η ισχύς κεραίας για σταθερή ένταση ακτινοβολίας για όλες τις γωνίες μέσα στο Ω_A . Είναι αδιάστατος λόγος με τιμή ≥ 1 . Η ισότητα ισχύει για ιδανική ιστροπική κεραία. Ποιοτικά δείχνει πόσο συγκεντρώνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Κέρδος κεραίας

Θεωρητικά το κέρδος της κεραίας ορίζεται με τη βοήθεια της επόμενης εξίσωσης:

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi * \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{in}}, \quad (\text{Εξ 1-4})$$

όπου $U(\theta, \varphi)$ αποτελεί την ένταση ακτινοβολίας της κεραίας, η οποία αποτελεί συνάρτηση των γωνιών θ και φ , και W_{in} η ισχύς τροφοδότησης της κεραίας. Είναι δηλαδή, το κέρδος ή απολαβή μιας κεραίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι ο λόγος της έντασης στη δεδομένη κατεύθυνση προς την ένταση της ιστροπικά ακτινοβολουμένης ισχύος που δέχεται η κεραία.

Επειδή η ισχύς που λαμβάνει η κεραία συνδέεται με την ισχύ που ακτινοβολεί με τη σχέση

$$Prad = e_{cd} * W_{in}, \quad (\text{Εξ 1-5})$$

όπου e_{cd} η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας συνεπάγεται

$$G = 4\pi \frac{U(\theta,\varphi)}{P_{rad}} = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta,\varphi)}{P_{rad}} \right] = e_{cd} * D \quad (\text{Εξ 1-6})$$

Αφού $0 \leq e_{cd} \leq 1$ (λόγω ωμικών απωλειών στη κεραία, απωλειών ισχύος, κακή προσαρμογή τροφοδοσίας) το κέρδος μιας κεραίας είναι πάντα μικρότερο από τη κατευθυντικότητα.

Το βασικό είναι ότι αυτή η παράμετρος, που εν τέλει μας δείχνει πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μία κεραία, προσμετρά την κατευθυντικότητα της κεραίας, όπως και πόσο αποδοτικά τροφοδοτείται η κεραία. Πρακτικά, το κέρδος συναντάται συνήθως ως ένας απλός αριθμός, που αντιστοιχεί στο μέγιστο κέρδος προς όλες τις κατευθύνσεις. «3dB κέρδος» σημαίνει ότι σε μακρινό σημείο από την κεραία, ανιχνεύονται 3dB παραπάνω ισχύς σε σύγκριση, με έναν ισοτροπικό ακτινοβολητή.

Εύρος Ζώνης

Το εύρος ζώνης είναι το διάστημα των θετικών συχνοτήτων που η κεραία ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές (π.χ. πόλωση, κέρδος, απόδοση) οι οποίες καθορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή. Πρακτικά αποτελεί τη ζώνη συχνοτήτων όπου η κεραία είναι ικανοποιητικά προσαρμοσμένη ως προς την αντίσταση εισόδου. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται από τη διαφορά της ελάχιστης από τη μέγιστη συχνότητα όπου η τιμή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης S_{11} είναι μικρότερη από -10 dB.

$$BW = f_h - f_l \quad (\text{Εξ 1-7})$$

Επίσης, μπορεί να οριστεί ως ο λόγος προς μέγιστης προς την ελάχιστη συχνότητα:

$$BW = \frac{f_h}{f_l} \quad (\text{Εξ 1-8})$$

ή ως ο λόγος του εύρους ζώνης προς την κεντρική συχνότητα συντονισμού της κεραίας (κλασματικό εύρος ζώνης):

$$BW' = \frac{BW}{f_c} = \frac{f_h - f_l}{f_c} \quad (\text{Εξ. 1-9})$$

Απόδοση ακτινοβολίας

Ο συντελεστής απόδοσης εκφράζει τις απώλειες, τις οποίες εμφανίζει η κεραία κατά τη λειτουργία της. Οι παράγοντες που συμβάλουν στη μείωση της απόδοσης μιας κεραίας είναι:

- απώλειες εξαιτίας έλλειψης καλής προσαρμογής μεταξύ κεραίας και γραμμής μεταφοράς
- ωμικές απώλειες και
- απώλειες διηλεκτρικού.

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν και συνήθως μετρούνται πειραματικά. Γι' αυτό τον λόγο η επίδρασή τους λαμβάνεται μαζί μέσω του συντελεστή απόδοσης ακτινοβολίας (radiation efficiency) e_{rad} . Επομένως η εξίσωση γράφεται:

$$e_{total} = e_{rad} * e_{ref}, \quad (\text{Εξ 1-10})$$

όπου e_{ref} είναι ο συντελεστής απόδοσης λόγω ανακλάσεων (reflection efficiency), ο οποίος δίνεται από την εξίσωση :

$$e_{ref} = 1 - abs(\Gamma)^2 \quad (\text{Εξ 1-11})$$

όπου Γ ο συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας που υπολογίζεται ως:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}, \quad (\text{Εξ 1-12})$$

με Z_{in} την αντίσταση εισόδου της κεραίας και Z_0 τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Η απόδοση ακτινοβολίας εκφράζεται ισοδύναμα ως ο λόγος της ισχύος που παραδίδεται στην αντίσταση ακτινοβολίας R_r προς την ισχύ που παραδίδεται μαζί στις R_r και R_L (η αντίσταση R_L αναπαριστά τις απώλειες αγωγιμότητας – διηλεκτρικού) ή ισοδύναμα ο λόγος της ακτινοβολουμένης ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ στην είσοδο της κεραίας. Μετράται είτε σε dB είτε σε ποσοστό.

$$e_r = \frac{P_{radiated}}{P_{input}} \quad \text{Εξ (1-13)}$$

Λόγος τάσης στάσιμου κύματος (VSWR)

Εξαιτίας των ανακλάσεων και της απουσίας τέλει προσαρμογής της αντίστασης σε κάποιο σημείο της γραμμής μεταφοράς, δημιουργείται στη γραμμή μεταφοράς ένα στάσιμο κύμα. Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του κύματος στη γραμμή ονομάζεται λόγος στάσιμων κυμάτων VSWR και συνδέεται με τον συντελεστή ανάκλασης με την εξίσωση:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad \text{Εξ (1-14)}$$

Οι τιμές του κυμαίνονται από VSWR=1 (τέλεια προσαρμογή, $\Gamma=0$) έως VSWR= ∞ (ανοιχτοκύκλωμα, $\Gamma=1$ ή βραχυκύκλωμα, $\Gamma=-1$).

Σύνθετη Αντίσταση

Η σύνθετη αντίσταση είναι μιγαδικό μέγεθος εξαρτώμενο της συχνότητας. Μετριέται στους ακροδέκτες εισόδου της κεραίας και ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης προς το ρεύμα στους ακροδέκτες ή ως ο λόγος των κατάλληλων συνιστωσών του ηλεκτρικού προς το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο και θα πρέπει να μην διαφοροποιείται πολύ από την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής ώστε να

ελαχιστοποιούνται τα στασιμά κύματα κατά μήκος της γραμμής αλλά και οι απώλειες ανακλάσεων.

Υπολογίζεται ως

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (\text{Εξ 1-15})$$

- όπου Z_A η σύνθετη αντίσταση της κεραίας της ακροδέκτες της,
- R_A η ωμική αντίσταση της κεραίας της ακροδέκτες της που αποτελείται από δύο συνιστώσες την R_r (ωμική αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας) και την R_L (ωμική αντίσταση απωλειών της κεραίας) με

$$R_A = R_r + R_L \quad (\text{Εξ 1-16})$$

- X_A , η άεργη αντίσταση της κεραίας στους ακροδέκτες της

Επιπλέον η σύνθετη αντίσταση εισόδου εξαρτάται από τη γεωμετρία της κεραίας καθώς και το μέσο διέγερσης της. Αξιοσημείωτο να αναφερθεί είναι πως για μέγιστη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από μία γραμμή μεταφοράς σύνθετης αντίστασης Z_o στην είσοδο της κεραίας απαιτείται τέλεια προσαρμογή μεταξύ των τιμών Z_o και Z_A . Δηλαδή, προκειμένου να αποφευχθεί η εξασθένιση ισχύος του προσπίπτοντος κύματος λόγω ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας πρέπει $R_o = R_A$ και $X_o = -X_A$

1.4.2 Χαρακτηριστικά Φορετών Κεραίων

Στην ενότητα 1.2 είδαμε τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών 5G, όπως ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω λειτουργιών software και την δυνατότητα χρήσης mmWaves, για μείωση παρεμβολών και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Αυτές τις δυνατότητες σε ένα WBAN σύστημα μπορούν να τις αξιοποιήσουν ιδιαίτερα οι φορετές κεραίες. Φορετή κεραία είναι “μία κεραία οι οποία είναι σχεδιασμένη ειδικά ώστε να λειτουργεί ενώ είναι φορεμένη στο ανθρώπινο σώμα.” [9]. Επιπλέον, οι φορετές κεραίες έχουν άμεση επίδραση στο μέγεθος, στο σχήμα και στην απόδοση του συστήματος. Άρα, η σωστή σχεδίαση μιας φορετής κεραίας είναι πολύ κρίσιμη. Μία κεραία που προορίζεται για τέτοια χρήση οφείλει να πληροί κάποια κριτήρια σε επίπεδο ηλεκτρικών και σχεδιαστικών ιδιοτήτων.

- Χαμηλό προφίλ (low-profile).
- Εύκαμπτη (flexible), ώστε να συμμορφώνεται με το σώμα και τις κινήσεις του.
- Διακριτική (unobtrusive) στον χρήστη και τις κινήσεις του.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής
- Εύκολη συντήρηση ή αντικατάσταση.

Εφόσον επιτευχθούν οι παραπάνω προϋποθέσεις σχεδιαστικά, πρέπει οι κεραίες να λειτουργούν και αποδοτικά γεγονός που δυσχεραίνεται σε μεγάλο βαθμό, διότι λειτουργούν κοντά στο ανθρώπινο σώμα το οποίο παρουσιάζει υψηλή απορροφητικότητα Η/Μ ακτινοβολίας. Όντως, το ανθρώπινο σώμα υποβαθμίζει την απόδοση των φορετών κεραιών (αποσυντονίζει την αντίσταση εισόδου κεραίας και τη συχνότητα συντονισμού και υποβαθμίζει την απόδοση της ακτινοβολίας). Στη ζώνη UHF RFID, το ανθρώπινο σώμα αντιπροσωπεύει ένα διηλεκτρικό υλικό με μεγάλες απώλειες, με σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 50 - 60$ και εφαπτομένη απωλειών $\tan\delta = 1.2$ [18]. Είναι γνωστό, ότι στην περίπτωση κεραιών, που εκπέμπουν ομοιοκατευθυντικά, όπως οι κεραίες διπόλων, η παρουσία του ανθρώπινου σώματος προκαλεί αποσυντονισμό της αντίστασης εισόδου και απορρόφηση μέρους της εκπεμπόμενης ή της λαμβανόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η απόσταση επικοινωνίας. Για αυτό το λόγο μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για τις φορετές κεραίες είναι να απομονωθεί η φορετή κεραία από το ανθρώπινο σώμα. Στις UHF συχνότητες, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μπορούν να διαπεράσουν το ανθρώπινο σώμα και ως εκ τούτου ο ιστροπικός ακτινοβολητής, θα έχει απώλειες στην ακτινοβολούμενη ενέργεια. Έτσι, η απόδοση της ακτινοβολίας μειώνεται σημαντικά.

Κρίσιμα ζητήματα σχεδίασης φορετών κεραιών

Σε αντίθεση με τις κεραίες που είναι ενσωματωμένες σε φορητές συσκευές, οι φορετές κεραίες προορίζονται να λειτουργούν σε περιβάλλον σώματος. Τα ζητήματα σε αυτό το περιβάλλον μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη επίδραση στην απόδοση της κεραίας, και συνοψίζονται παρακάτω [9]:

- i. *Παρουσία του ανθρώπινου σώματος:* Οι φορετές κεραίες πρέπει να είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αποσυντονίσει την κεραία σε μεγάλο εύρος τιμών συχνοτήτων καθώς απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Άρα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον πρέπει να δοθεί στον «Ειδικό Ρυθμό Απορρόφησης» (SAR), ο οποίος μας βοηθά να ποσοτικοποιήσουμε την απορρόφηση ισχύος.
- ii. *Παραμόρφωση - Κάμψη:* Η πλαστικότητα των υφασμάτων επηρεάζει την απόδοση και τα χαρακτηριστικά της κεραίας. Ως αποτέλεσμα, δεν θα είναι εύκολο να παραχθεί μαζικά μια κεραία με τα ίδια χαρακτηριστικά ακτινοβολίας ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν τα ίδια υλικά.
- iii. *Απορρόφηση νερού:* Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν τις ιδιότητες των υλικών που αποτελούν την κεραία. Αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στις υφασμάτινες κεραίες των οποίων τα υλικά είναι πολύ απορροφητικά, απορροφούν μεγάλη ποσότητα υγρασίας λόγω κενών στο υλικό. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα να μετατοπίσει τις συχνότητες συντονισμού μιας κεραίας.

- iv. *Κίνηση του σώματος*: Η κίνηση του σώματος μπορεί να αλλοιώσει τη δομή της κεραίας λόγω παραμόρφωσης του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εκτός από τις γενικές ανάγκες σχεδίασης της κεραίας, υπάρχουν κάποιες επιπλέον ανάγκες που πρέπει να πληρούνται:

- i. Ελαφριά και ενιαία κατασκευή
- ii. Σημαντική σταθερότητα και ευελιξία. Η κεραία είναι επιθυμητό, να έχει κάποια αντίσταση στην κάμψη και στο τέντωμα.
- iii. Περιορισμός της ακτινοβολίας προς το σώμα.
- iv. Υλικά συνηθισμένα και χαμηλού κόστους.

Εφαρμογές Φορετών Κεραίων

Οι φορετές κεραίες έχουν μία ευρεία χρήση στην καθημερινή μας ζωή. Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, εφαρμόζονται για παρακολούθηση σοβαρής κατάστασης της υγείας ενός ασθενούς, όπως το σύστημα παρακολούθησης της γλυκόζης, ενδοσκόπηση κάψουλας και ελέγχου αρτηριακής πίεσης. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ψυχαγωγία, στρατιωτικές επιχειρήσεις και επιχειρήσεις διάσωσης καθώς και να ενσωματωθούν σε κράνη, αδιάβροχα παπούτσια, μπουφάν σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και συστήματα άμεσης διάσωσης [10]. Ο Πίνακας 1.1 περιέχει μία σύνοψη αυτών των εφαρμογών.

Εφαρμογή	Περιγραφή
Στρατός/Αεροδιαστημική/Διάσωση	Φροντίδα προσωπικού πεδίου μάχης και άντλησης πληροφοριών, έξυπνα γιλέκα, ανίχνευση φωτιάς, παρακολούθηση αστροναυτών
Ψυχαγωγία	Έξυπνα παπούτσια, LED φορέματα, μουσικά τζάκετ, smartwatches
Ιατρική φροντίδα	Σύστημα θεραπείας και μεταφοράς φαρμάκων, φορετό θερμόμετρο, φορετή Doppler μονάδα, έλεγχος ύπνου, ανιχνευτής καρκίνου του στήθους, GPS ανιχνευτής. Παρακολούθηση ασθενών, οξυμετρία, ενδοσκόπηση, έξυπνη διάγνωση, καταγραφή γλυκόζης.
Επιχειρήσεις	Πιστοποίηση μεμονωμένων περιφερειακών συσκευών, ασύρματες συναλλαγές
Διάσωση και ασφάλεια	Σωσίβια, αδιάβροχα, έξυπνα παπούτσια,κράνη

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές φορετών κεραίων [10]

1.4.3 Υλικά για Φορετές κεραίες

Η επιλογή υλικού είναι ένα κρίσιμο βήμα κατά τη σχεδίαση μιας κεραίας [20]. Γενικά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κεραιών χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, σε αγωγή και διηλεκτρικά. Ειδικά για τις φορετές κεραίες, κρίσιμο ρόλο παίζει η ελαστικότητα του υλικού, ώστε να έχει την δυνατότητα η κεραία να αντέχει σε μηχανικές παραμορφώσεις και να ακολουθεί την κίνηση και μορφή του ανθρώπινου σώματος. Τέτοια χαρακτηριστικά πληρούν αποτελεσματικά τα υφασμάτινα υλικά, τα ηλεκτρο-υφάσματα. Τα ηλεκτρο-υφάσματα είναι αγωγή υφάσματα που κατασκευάζονται παρεμβάλλοντας αγωγή νήματα μετάλλου ή πολυμερών υλικών σε κανονικά υφάσματα. Τα χαρακτηριστικά των υφασμάτων αυτών είναι ότι είναι φορετά, ανθεκτικά και εύκαμπτα. Έτσι, είναι κατάλληλα ώστε να ενσωματωθούν σε ενδύματα.

Μη αγωγή - Διηλεκτρικά

Η κυριότερη παράμετρος των διηλεκτρικών υλικών είναι η διηλεκτρική σταθερά ϵ , η οποία είναι μία πολύπλοκη παράμετρος, αφού υπολογίζεται πειραματικά και η τιμή της εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Εκφράζεται συχνά ως μία παραμετρική σχέση

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (\text{Εξ 1-17})$$

στην οποία το ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού. Γενικά, οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού εξαρτώνται από τη συχνότητα, τη θερμοκρασία, την επιφανειακή τραχύτητα, την περιεκτικότητα σε υγρασία καθώς και την ομοιογένεια και καθαρότητα του υλικού. Τα μη-αγωγή υλικά, τα διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται για το υπόστρωμα σε μία κεραία. Αυτό το υπόστρωμα προσφέρει μηχανική υποστήριξη στην κεραία αλλά και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της κεραίας όπως τον συντελεστή ανάκλασης, την αποδοτικότητα και το εύρος ζώνης. Εκτός αυτού είναι κρίσιμο όσον αφορά την κατασκευή, τη λειτουργία, και την φθορά. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή του υποστρώματος είναι η διαπερατότητα (ϵ_r), η ελαστικότητα το πάχος και η εφαπτομένη απωλειών (δ). Η διαπερατότητα και το πάχος επηρεάζουν το εύρος ζώνης, η ευελιξία επιτρέπει στην κεραία να συμμορφώνεται με τον χρήστη, ενώ η εφαπτομένη απωλειών επηρεάζει την απόδοση. Έτσι επιλέγοντας ένα ελαστικό υπόστρωμα το οποίο έχει χαμηλή διαπερατότητα και εφαπτομένη απωλειών θα συντελέσει σε αύξηση της απόδοσης, ιδιαίτερα με την παρουσία του ανθρώπινου σώματος. Επομένως, ένα κατάλληλο υπόστρωμα οφείλει να ικανοποιεί της ηλεκτρικές και μηχανικές απαιτήσεις για την αρχιτεκτονική της κεραίας. Οι ιδιότητές τους διαφέρουν ανάλογα με την συχνότητα. Επομένως, ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υφασμάτων υποστρωμάτων είναι κρίσιμος πριν σχεδιαστεί η κεραία. Στον Πίνακα 1.2 συνοψίζονται οι ιδιότητες

ορισμένων υλικών που αξιοποιούνται ως υπόστρωμα κατά τη σχεδίαση μιας κεραίας. Επιπλέον, οι φορετές κεραίες χρειάζονται ουσιαστικά ένα διηλεκτρικό υλικό χαμηλής απώλειας ως δικό τους υπόστρωμα, καθώς οι μεγάλες απώλειες επηρεάζουν την απόδοση και αποτελεσματικότητα της κεραίας.

Αγώγιμα

Τα αγώγιμα υλικά στις κεραίες χρησιμοποιούνται ως ακτινοβολητές και ειδικά για φορετές εφαρμογές χρειάζεται επίσης να είναι κατασκευασμένα από αγώγιμο ύφασμα. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα αγώγιμα υφάσματα που χρησιμοποιούνται ευρέως (Πίνακας 1.2).

Materials	Permittivity	Loss tangent
Fleece	1.17	0.0035
Silk	1.75	0.012
PTFE	2.05	2.57
Felt	1.38	0.023
Panama	2.12	0.018
Perspex	2.57	0.008
Moleskin	1.45	0.05
Tween	1.69	0.0084
Silk	1.2	0.054
Cotton	1.54	0.058
Felt	1.36	0.016
Neoprene rubber	5.2	0.025
Fleece	1.2	0.004
Polyester foam	1.02	0.00009
Leather different type	1.83-2.39	0.049-0.071
Cordura/Lycra®	1.5	0.0093
Denim	1.4-2	0.014-0.07
Cotton	1.6,1.54	0.04,0.058
Polyester	1.9	0.0045
Silk	1.75,1.2	0.012,0.054
Moleskin	1.45	0.05
Velcro	1.34	0.006
Felt	1.36,1.38	0.016,0.023
Tween	1.69	0.0084
Fleece	1.17,1.2	0.0035,0.004
Leather	1.8-2.95	0.049-0.16
Panama	2.12	0.018
Neoprene	5.2	0.03
Denim	1.7, 1.7, 1.8	0.07, 0.085, 0.07
PDMS	2.67-3	0.01-0.05
PDMS	2.8,2.8	0.02,0.0013

Πίνακας 1.2: Σύνοψη διηλεκτρικών υφασμάτων υλικών [18]

Τα αγώγιμα υλικά πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις:

- Σταθερή και χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση (1 ohm/τετράγωνο) για λιγότερες απώλειες.
- Ομοιογένεια υλικού στην περιοχή της κεραίας και χαμηλή διακύμανση αντίστασης στα υλικά.
- Εύκαμπτο – προσαρμόσιμο όταν φοριέται από τον χρήστη.
- Εύκολη συντήρηση.
- Υλικά συνηθισμένα και χαμηλού κόστους.

Η αγωγιμότητα (σ) ενός αγώγιμου υλικού υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$\sigma = \frac{1}{(\rho_s, t)} \quad (\text{Εξ 1-18})$$

όπου ρ_s η τιμή της επιφανειακής αντίστασης πάχους (t) του υλικού με βάση την εξίσωση. Γίνεται αντιληπτό ότι, η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της αγωγιμότητας, επομένως όσο η αντίσταση μειώνεται, αντίστοιχα αυξάνεται η αγωγιμότητα, η οποία με την σειρά της μειώνει της ηλεκτρικές απώλειες της κεραίας, και ενισχύεται η απόδοση της κεραίας [18]. Επομένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι φορετές κεραίες ουσιαστικά απαιτούν διηλεκτρικά υλικά χαμηλής απώλειας ως υπόστρωμα και εξαιρετικά αγώγιμα υλικά ως αγωγοί για αποτελεσματική ηλεκτρομαγνητική εκπομπή και λήψη. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται αγώγιμα υλικά και οι ιδιότητές τους.

Conducting Material	Surface Resistivity, ρ [Ωm]	Conductivity, σ [S/m]	Thickness [mm]
Shieldit Fabric	<0.05, <0.1	1.18×10^5 , 6.67×10^5	0.17, 0.17
Taffeta Fabric	0.05	2.5×10^5	0.08
Copper Tape	-	5.88×10^7 5.88×10^7	0.11, 0.03
Zelt	0.01, -	1×10^6 , 1.75×10^5	0.06, 0.0635
AgNW/PDMS	-	8.1×10^5	0.5
EgaIn liquid fillet	-	2.5×10^5	0.08
PANI/CCo composite	-	7.3×10^3	0.075
Polyleurethane-nanoparticle composite sheet	-	1.1×10^6	0.0065

Πίνακας 1.3: Σύνοψη ιδιοτήτων αγώγιμων υλικών [19]

Εκτός από την επιλογή του υλικού, μία άλλη σημαντική παράμετρος στην κατασκευή φορετών κεραιών είναι η τεχνική κατασκευής, κυρίως όσον αφορά τον προσδιορισμό του συνολικού κόστους. Η τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται εν μέρει από το ύφασμα που επιλέγεται. Στη βιβλιογραφία, έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνικές κατασκευής φορετών κεραιών [20]. Η

χρησιμοποίηση ταινίας χαλκού κατηγοριοποιήθηκε ως η απλούστερη τεχνική, γιατί μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στο υπόστρωμα και δεν χρειάζεται καμία επιπλέον τροποποίηση. Μία άλλη, πιο ευέλικτη τεχνική κατασκευής είναι η τεχνική ψεκασμού, που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε υφαντική ύλη. Το σπρέι ψεκασμού, είναι ένα μείγμα χαλκού υπό πίεση και χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει ένα αγωγίμο στρώμα στην υφασμάτινη επιφάνεια που εκτίθεται στον ψεκασμό.

Τέλος, τα άκαμπτα (rigid) υλικά αποτελούν μη ιδανικές λύσεις για φορετές κεραίες αφού παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τα εύκαμπτα υλικά και ιδιαίτερα τα υφασμάτινα, αφού τα πρώτα είναι λιγότερο ελαστικά, δεν έχουν την δυνατότητα να ακολουθούν τόσο εύκολα τις κινήσεις του σώματος, και δεν είναι ανεκτικά σε παραμορφώσεις όπως κάμψη, συμπίεση, τέντωμα.

Η παραγωγική διαδικασία των άκαμπτων φορετών κεραιών ακολουθεί την συμβατική τεχνολογία, των εκτυπωμένων είτε κατασκευόμενων κεραιών χρησιμοποιώντας χαλκογραφία. Μπορεί να είναι άκαμπτες κεραίες που φοριούνται κοντά στο σώμα, σε μικρές διαστάσεις ώστε να ελαχιστοποιείται η ενόχληση που προκαλούν στο σώμα. Επίσης, μερικές φορές είναι ανάγκη να φτιαχτούν σε καμπύλο περίγραμμα ώστε να ακολουθούν το σχήμα του σώματος.

1.5 Αντικείμενο Διπλωματικής

Οι εφαρμογές και το πεδίο χρήσης των φορετών κεραιών είναι ευρύ, και κρίσιμο για την βελτίωση της καθημερινότητας των ανθρώπων, ιδιαίτερα στον τομέα της υγείας. Όμως, ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Η σχεδίαση μιας κεραίας είναι απαραίτητο να διασφαλίζει όχι μόνο μια ικανοποιητική συμπεριφορά, αλλά και την προστασία του χρήστη απέναντι στις Η/Μ ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τις κεραίες. Ειδικά για το τελευταίο, αν και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) [21] και οι διεθνείς οργανισμοί προτυποποίησης (FCC [22], ICNIRP [23]) έχουν ήδη εκδώσει κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με την προστασία του τελικού χρήστη από τις ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τις κεραίες (κεραίες σταθμών βάσης, φορητές και φορετές κεραίες), αλλά και ορίσει όρια έκθεσης τελικού χρήστη στις εν λόγω ακτινοβολίες, τα τελευταία χρόνια, με την άνοδο της νέας τεχνολογικής γενιάς, παρουσιάζεται μια έντονη ανησυχία από την πλευρά των τελικών χρηστών αναφορικά με τα επίπεδα Η/Μ ακτινοβολιών στα οποία εκτίθενται. Το γεγονός οφείλεται στο ότι οι φορετές συσκευές λειτουργούν πολύ κοντά στο ανθρώπινο σώμα και ως εκ τούτου η έκθεσή του σε αυτές τις ακτινοβολίες είναι άμεση.

Προς αυτή την κατεύθυνση, λοιπόν, η παρούσα διπλωματική στοχεύει στη μελέτη και στη σχεδίαση φορετής κεραίας χαμηλού SAR, αλλά και βέλτιστης επίδοσης σε συχνότητες για εφαρμογές 5G. Αρχικά μελετώνται βασικές τεχνολογίες κεραιών (δίπολο, μονόπολο, μικροταινιακές κεραίες) στον ελεύθερο χώρο ώστε να επιλεγθεί η καταλληλότερη κεραία αφενός για φορετές εφαρμογές και

αφετέρου για τη μελέτη της ανθρώπινης έκθεσης σε Η/Μ ακτινοβολίες υφασμάτων κεραιών. Στη συνέχεια, οι φορετές κεραιές που σχεδιάστηκαν βάσει της προτιμώμενης τεχνολογίας (τεχνολογία μικροταινιακής κεραιάς) τοποθετούνται πολύ κοντά σε ανθρώπινο ομοίωμα, προκειμένου να μελετηθεί (α) η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στη συμπεριφορά της κεραιάς, αλλά και (β) η επίδραση της κεραιάς στους βιολογικούς ιστούς με τη βοήθεια του SAR. Για το λόγο αυτό, σχεδιάζεται και προσομοιώνεται ομοίωμα που προσομοιάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες συγκεκριμένων βιολογικών ιστών. Από το σύνολο της μελέτης επιλέγεται η τελική κεραιά, η οποία είναι μια μικροταινιακή κεραιά υψηλότερου ρυθμού (Higher-order Mode Microstrip Patch Antenna, HMMPA).

Τέλος, μέσω συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών αλλαγών στην σχεδίαση της τελικής κεραιάς (αύξηση διαστάσεων του επιπέδου γείωσης), μελετάται εκ νέου η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στην κεραιά, αλλά και του ομοιώματος στην συμπεριφορά της κεραιάς. Ο βασικός στόχος ανασχεδίασης της κεραιάς είναι η επίτευξη της βέλτιστης επίδοσής της, αλλά και της μέγιστης δυνατής προστασίας του ανθρώπου από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

2 Μελέτη Βασικών Κεραιών

Όπως αναλύσαμε στην ενότητα 1.4 για να χαρακτηριστεί μία κεραία ως «φορετή» πρέπει να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια. Παρακάτω, παραθέτουμε κάποιες βασικές κεραίες που έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί και κατασκευαστεί ώστε να μελετήσουμε στον ελεύθερο χώρο τα αρχιτεκτονικά τους χαρακτηριστικά και την λειτουργία τους:

- το κλασικό δίπολο,
- το μονόπολο,
- η κλασική μικροταινιακή κεραία (MPA)
- και η υψηλού ρυθμού μικροταινιακή κεραία (HMPA).

Αρχικά, χρησιμοποιούνται ιδανικά υλικά, ώστε να μην επηρεάζεται η απόδοση ακτινοβολίας, από απώλειες λόγω υλικών. Στην συνέχεια, εξάγονται συμπεράσματα ποιες μπορούν να λειτουργήσουν ως φορετές κεραίες. Τέλος, χρησιμοποιούνται για τις φορετές κεραίες, μη – ιδανικά υλικά. Κάθε προσομοίωση κεραίας γίνεται σε δύο συχνότητες. Συγκεκριμένα, το κύριο μέρος της δουλειάς αφορά τα 3.6GHz, που ανήκει στην χαμηλή ζώνη συχνοτήτων για εφαρμογές 5G, καθώς και στην συχνότητα 2.4GHz η οποία ήταν η συχνότητα ενδιαφέροντος της εργασίας [38]. Ο λόγος που παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοιώσεων και για την συχνότητα 2.4GHz είναι γιατί επιθυμούμε να μελετήσουμε εάν τα αποτελέσματα στα 3.6GHz παρουσιάζουν ποιοτική αναλογία με εκείνα που προκύπτουν στα 2.4GHz. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται το ψηφιακό περιβάλλον σχεδίασης HFSS [26].

2.1 Τύποι Φορετών Κεραιών προς μελέτη

2.1.1 Δίπολο

Ανήκει στην κατηγορία των γραμμικών κεραιών που βασίζονται στην ακτινοβολία αγωγών που διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα [16]. Η διπολική κεραία είναι συμμετρική όταν παρατηρείται γύρω από τον μακρύ άξονα του διπόλου. Ως εκ τούτου, η διπολική κεραία είναι ένα παράδειγμα μιας ομοιοκατευθυντικής κεραίας. Περαιτέρω, το πεδίο E έχει μόνο ένα στοιχείο φορέα και συνεπώς τα πεδία είναι γραμμικά πολωμένα. Όταν παρατηρείται στο επίπεδο x-y (για ένα δίπολο προσανατολισμένο κατά μήκος του άξονα z το πεδίο E βρίσκεται στην κατεύθυνση -y, και κατά συνέπεια η διπολική κεραία είναι κάθετα πολωμένη. Όπως και στην περίπτωση που θα μελετήσουμε.

Το δίπολο που θα μελετήσουμε έχει μήκος $L=\lambda/2$. Αρχιτεκτονικά είναι ιδιαίτερα απλό (Εικόνα 2.1). Αποτελείται από ένα αγωγίμο σύρμα μήκους $\lambda/2$ παράλληλο ως προς τον z – άξονα.

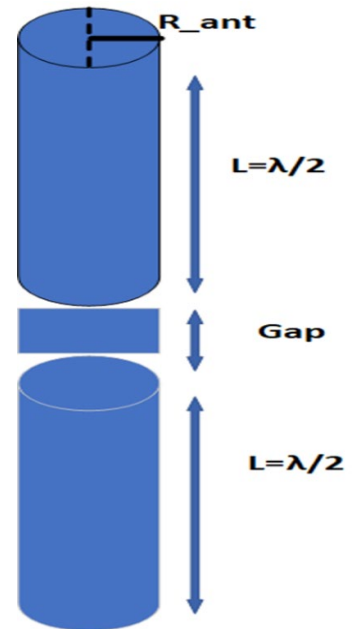
Συγκεκριμένα το τοποθετούμε στην αρχή των αξόνων, η οποία το τέμνει κατά το ήμισυ. Έτσι έχουμε 2 αγώγιμους πόλους οι οποίοι απέχουν συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, gap, όπου τοποθετούμε την πηγή τροφοδοσίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1. Το συνολικό μήκος παραμένει $\lambda/2$. Οι διαστάσεις ορίζονται στον Πίνακα 2.1 και τα υλικά του στον Πίνακα 2.2.

f_0	2.4GHz	3.6GHz
c	$3 * \frac{10^8 \text{m}}{\text{sec}}$	$3 * \frac{10^8 \text{m}}{\text{sec}}$
λ	125mm	83.33mm
R_{ant}	$\frac{\lambda}{2} = 1.04\text{mm}$	$\frac{\lambda}{2} = 0.69\text{mm}$
gap	$R_{ant} * 4 = 4.16\text{mm}$	$R_{ant} * 4 = 2.7\text{mm}$
L	$\frac{\lambda}{2} - gap = 31.25\text{mm}$	$\frac{\lambda}{4} - gap = 18\text{mm}$

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις Διπόλου

Perfect electric conductor (PEC)	Δίπολο	$\sigma = 1 \text{ S/m}$
Vacuum	Κύλινδρος ακτινοβολίας	$\sigma = 1 \text{ S/m}$

Πίνακας 2.2: Υλικά Διπόλου



Εικόνα 2.1: Δίπολο

2.1.2 Μονόπολο

Μια κεραία μονόπολο είναι το μισό της κεραίας δίπολο, σχεδόν πάντα τοποθετημένη πάνω από κάποιο επίπεδο γείωσης. [16]. Τα πεδία πάνω από το επίπεδο γείωσης είναι πανομοιότυπα με τα πεδία και χαρακτηριστικά διπολικής κεραίας. Τα πεδία μονοπολικής κεραίας κάτω από το επίπεδο γείωσης είναι μηδέν. Βασική διαφορά με την διπολική κεραία είναι ότι η αντίσταση κεραίας είναι η μισή στο μονόπολο και ότι το κέρδος είναι το διπλάσιο ή αλλιώς +3dB.

Το μονόπολο ουσιαστικά βασίζεται στην αρχιτεκτονική του διπόλου, μόνο που δεν έχει έναν συμμετρικό πόλο στον z άξονα (στα αρνητικά), αλλά στην αρχή των αξόνων υπάρχει ένα τέλειο αγώγιμο πεδίο σε κυκλική είτε τετραγωνική μορφή. Το μονόπολο έχει μήκος $(\lambda/2)/2 = \lambda/4$. Αντίστοιχα, ανάμεσα στον πόλο και το τέλειο επίπεδο γείωσης υπάρχει ένα κενό. “gap”, που ορίζεται ως η πηγή τροφοδοσίας. Το βασικό του πλεονέκτημα έναντι του διπόλου είναι ότι το μονόπολο έχει επίπεδο

γείωσης και επομένως έχει την δυνατότητα να μειώσει την ακτινοβολία προς τον χρήστη, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Οι διαστάσεις της κεραίας μονόπολο που σχεδιάσαμε ορίζονται παρακάτω (Πίνακας 2.3) και τα υλικά του αντίστοιχα (Πίνακας 2.4):

f	2.4GHz	3.6GHz
λ	$\frac{c0}{f0} = 0.125m = 125mm$	$\frac{c0}{f0} = 0.125m$ $= 83.33mm$
R_{ant}	$\frac{\lambda}{4} = 0.52mm$	$\frac{\lambda}{60} = 0.34mm$
gap	$R_{ant} * 2 = 1.04mm$	$R_{ant} * 2 = 0.69mm$
L	$\frac{\lambda}{4} - gap = 30.02mm$	$\frac{\lambda}{4} - gap = 18.85mm$
R_{ground}	31.77mm	21.11mm

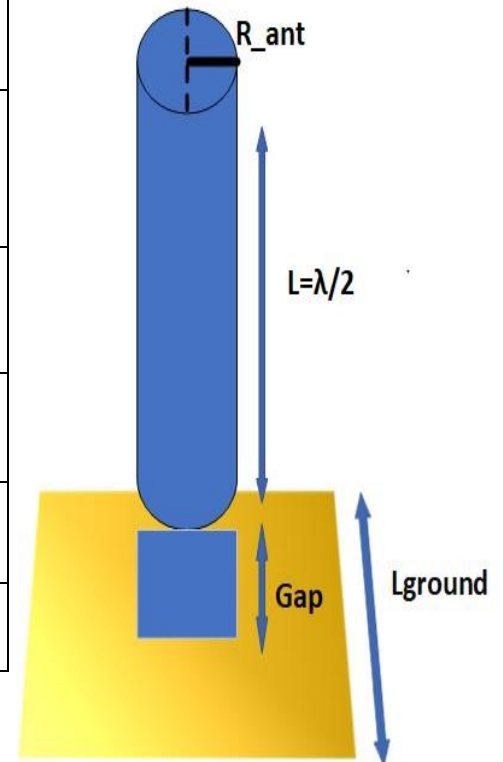
Πίνακας 2.3: Διαστάσεις Μονόπολου

PEC	Δίπολο	$\sigma = 1 \text{ S/m}$
Vacuum	Κύλινδρος ακτινοβολίας	$\sigma = 1 \text{ S/m}$

Πίνακας 2.4: Υλικά Μονόπολου

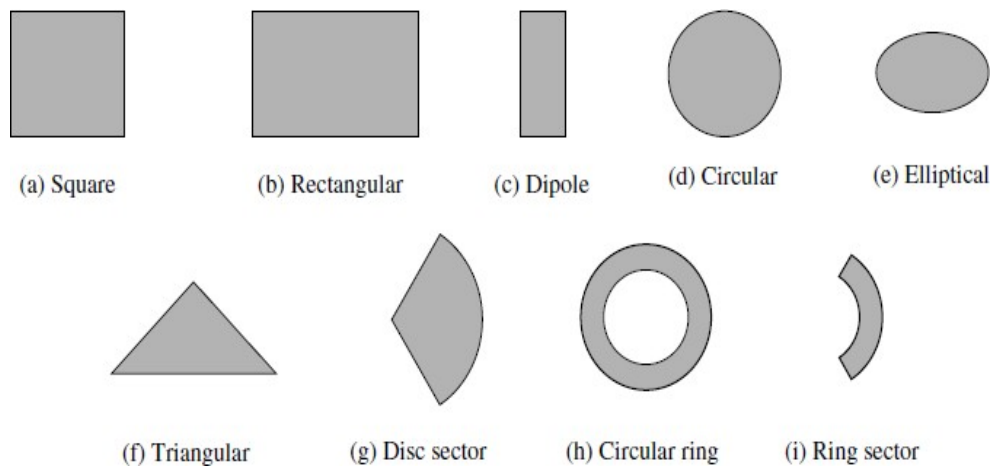
2.1.3 Μικροταινιακή Κεραία

Οι μικροταινιακές κεραίες έγιναν γνωστές τη δεκαετία του 70 κυρίως για διαστημικές εφαρμογές. Βέβαια, η ιδέα των μικροταινιακών κεραιών εμφανίστηκε πρώτη φορά το 1953. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών. Οι μικροταινιακής τεχνολογίας κεραίες γίνονται όλο και πιο χρήσιμες επειδή μπορούν να εκτυπωθούν απευθείας σε μια πλακέτα κυκλώματος. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στα κινητά τηλέφωνα. Οι κεραίες αυτές αποτελούνται από μία μεταλλική ταινία ακτινοβολίας πάνω σε ένα γειωμένο υπόστρωμα [16]. Η μεταλλική ταινία ακτινοβολίας μπορεί να έχει διάφορα σχήματα Εικόνα 2.3. Οι πιο συχνές είναι οι ορθογώνιες, οι ταινίες λεπτής λωρίδας (δίπολο), οι ελλειπτικές, οι τριγωνικές, οι τετράγωνες κ.α. Ωστόσο, τα πιο δημοφιλή σχήματα για τις ταινίες



Εικόνα 2.2: Μονόπολο

ακτινοβολίας είναι το ορθογώνιο και το κυκλικό, επειδή είναι εύκολο να αναλυθούν και να κατασκευαστούν και επιπλέον έχουν ελκυστικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.



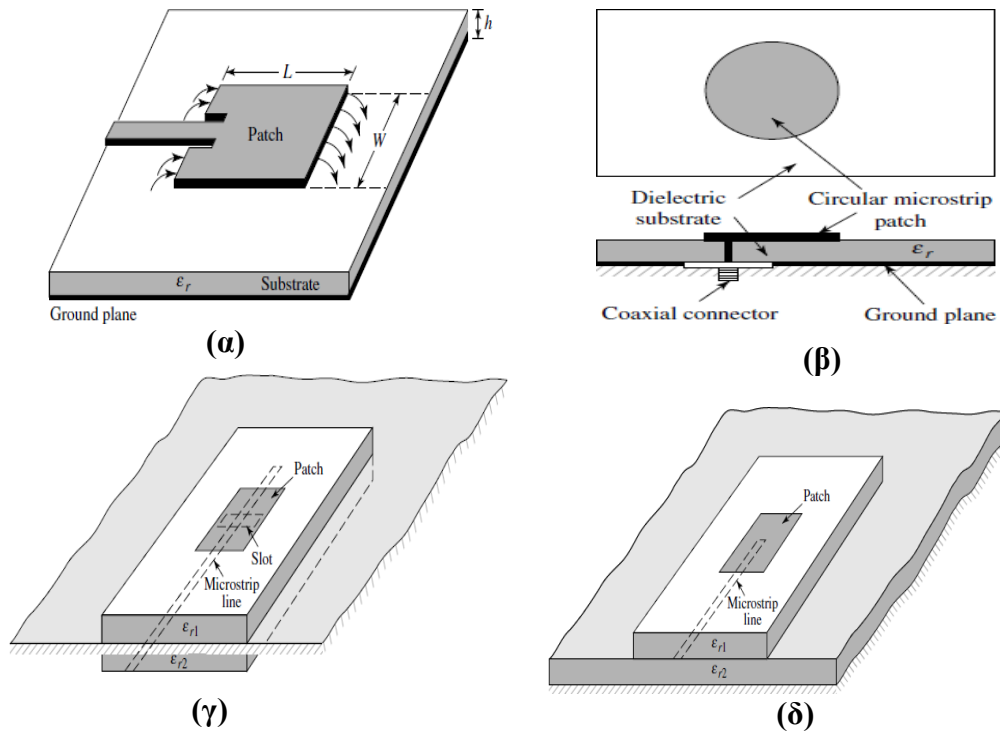
Εικόνα 2.3 Σχήματα μικροταινιακών κεραιών [16]

Οι μικροταινιακές κεραιές έχουν διάφορα πλεονεκτήματα. Τα κυριότερα είναι [16]:

- Έχουν μικρό μέγεθος.
- Έχουν απλή δομή.
- Τοποθετούνται εύκολα σε επίπεδες και μη επιφάνειες.
- Έχουν μικρό κόστος γιατί χρησιμοποιούν τυπωμένα κυκλώματα.
- Είναι μηχανικά εύρωστες όταν τοποθετούνται σε σκληρές επιφάνειες.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κατά την κατασκευή μικροταινιακών κεραιών, είναι η επιλογή του υποστρώματος. Υπάρχουν πολλοί τύποι υποστρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η διηλεκτρική σταθερά τους κυμαίνεται συνήθως από 22 έως 12. Τα καταλληλότερα υποστρώματα για τις εφαρμογές των μικροταινιακών κεραιών είναι τα πυκνά υποστρώματα με μικρή διηλεκτρική σταθερά γιατί προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Αυτά τα υποστρώματα αυξάνουν όμως το μέγεθος της κεραιάς, γεγονός που τα καθιστά σχεδόν απαγορευτικά για φορητές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο για τις μικροταινιακές κεραιές που χρησιμοποιούνται σε φορητές εφαρμογές προτιμώνται λεπτά υποστρώματα με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά [25]. Αυτά τα υποστρώματα επιτρέπουν στην κεραιά να έχει μικρό μέγεθος, καθώς και ισχυρή σύνδεση των πεδίων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ανεπιθύμητη ακτινοβολία

Μία άλλη κατασκευαστική παράμετρος μίας μικροταινιακής κεραιάς είναι ο τρόπος με τον οποίο θα τροφοδοτηθεί. Οι πιο σημαντικές μέθοδοι για την τροφοδοσία μιας κεραιάς είναι η μικροταινιακή γραμμή, το ομοαξονικό καλώδιο, η σύζευξη ανοιχτής οπής (aperture coupling) και η σύζευξη κλειστής οπής (proximity coupling) (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Τρόποι τροφοδοσίας μικροταινιακής κεραίας α) μικροταινιακή γραμμή β) ομοαξονικό καλώδιο γ) σύζευξη ανοιχτής οπής δ) σύζευξη κλειστής οπής [16]

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα για την ανάλυση των μικροταινιακών κεραίων. Τα πιο δημοφιλή είναι το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς και το μοντέλο της κοιλότητας πλήρους κύματος [27]. Το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς είναι το πιο απλό, δίνει καλή φυσική εικόνα, αλλά έχει μικρότερη ακρίβεια και έχει πρόβλημα στη μοντελοποίηση της σύζευξης [28]. Σε σύγκριση με το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς, το μοντέλο της κοιλότητας είναι πιο περίπλοκο αλλά έχει μεγαλύτερη ακρίβεια, δίνει καλή φυσική εικόνα και έχει πρόβλημα στη μοντελοποίηση της σύζευξης αν και έχει επιτυχημένα αποτελέσματα σε κάποιες περιπτώσεις. Τέλος, το μοντέλο πλήρους κύματος έχει μεγάλη ακρίβεια, είναι πολύ ευπροσάρμοστο, μπορεί να αναλύσει διάφορες συστοιχίες κεραίων αλλά έχει το μειονέκτημα να μην μπορεί να δώσει φυσική αίσθηση της διάταξης. Εξάγεται, λοιπόν το συμπέρασμα, ότι ανάλογα με τα αποτελέσματα που θέλουμε, χρησιμοποιούμε και το ανάλογο μοντέλο.

Για τον σκοπό της διπλωματικής θα προσομοιώσουμε μία μικροταινιακή patch κεραία τροφοδοτούμενης μέσω μικροταινιακής γραμμής (Εικόνα 2.5). Μια τέτοια κεραία αποτελείται από το αγώγιμο patch το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης (ground plane). Αυτά χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα (substrate). Το αγώγιμο patch έχει μήκος L , πλάτος W και κάθετα πάνω από ένα υπόστρωμα (κάποια πλακέτα διηλεκτρικού κυκλώματος) πάχους h με διαπερατότητα. Η κεντρική του συχνότητα εξαρτάται από το μήκος L και δίνεται από τον τύπο:

$$f_c = \frac{c}{2 * L_p * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Εξ 2-1})$$

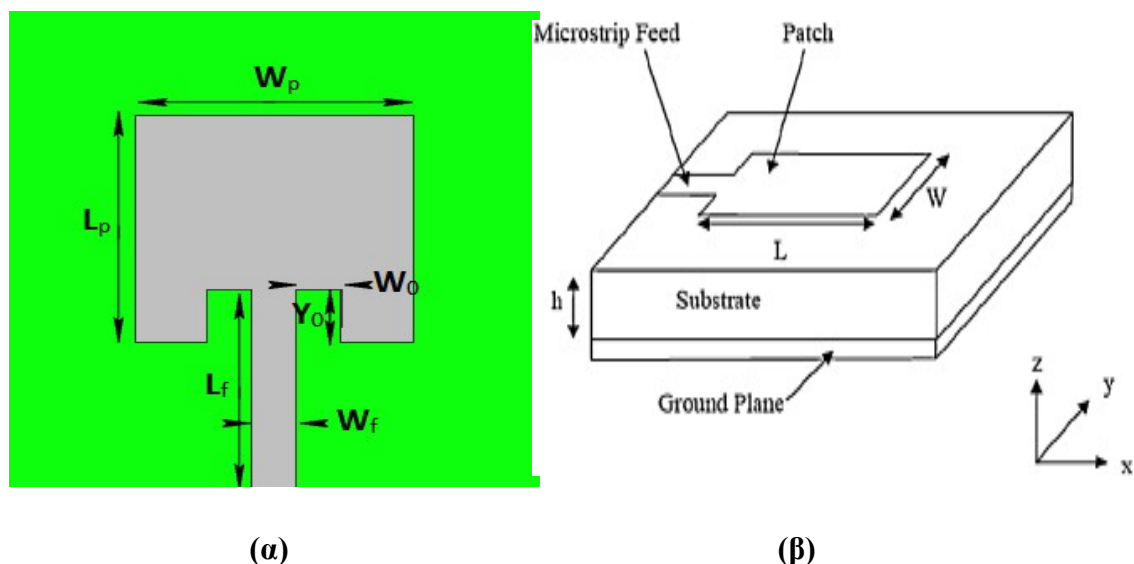
,όπου ϵ_r η σταθερά του διηλεκτρικού, L_p το μήκος του patch, και c η ταχύτητα του φωτός. Επιπλέον το μήκος του patch καθορίζει το εύρος ζώνης, ενώ το πλάτος W , την εσωτερική αντίσταση της κεραίας. Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις που ορίζουν τις διαστάσεις του όπως και ο πίνακας διαστάσεων και υλικών για την MPA.

$W_p = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}}$, πλάτος patch	$L_p = L_{eff} - 2\Delta L$, μήκος patch, όπου L_{eff} το ενεργό μήκος και ΔL το μήκος επέκτασης της κεραίας.	$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}}$, όπου ϵ_{reff} η ενεργή διηλεκτρική σταθερά
$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)(\frac{w}{h}+0.264)}{(\epsilon_{reff}-0.258)(\frac{w}{h}+0.8)}$, όπου h το ύψος του υποστρώματος και ϵ_{reff} η ενεργή διηλεκτρική σταθερά	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1}$, όπου ϵ_r είναι η σταθερά του διηλεκτρικού. Όσο έχουμε χαμηλές συχνότητες το ϵ_{reff} ταυτίζεται με το ϵ_r	
Για το υπόστρωμα (substrate):	$L_g = L+6h$, μήκος υποστρώματος $W_g = W+6h$, πλάτος υποστρώματος	
	$h = \frac{0.0606\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$, ύψος υποστρώματος	

Πίνακας 2.5: Εξισώσεις Διαστάσεων MPA

f_0	2.4GHz	3.6GHz	Fr4_epoxy	Υπόστρωμα	$\epsilon_r=4.4$ $\tan\delta=0.02$
λ	125mm	83.33mm			
Πλάτος patch W_p	37.4mm	25.35 mm	PEC	Patch/Feedline	$\sigma = 1 S/m$
Μήκος patch L_p	27.1mm	18.99 mm			
Ύψος substrate h	3.6 mm	2.4 mm	Πίνακας 2.6: Υλικά Μικροταινιακής Κεραίας Free Space		
Πλάτος substrate	70mm	80mm			
Μήκος substrate	70mm	80mm			
Inset_feed	10.27	7 mm			
Wo	0.25mm	5 mm			
Lf	21mm	21 mm			
Wf	2.8mm	3.5mm			

Πίνακας 2.7: Διαστάσεις Μικροταινιακής κεραίας

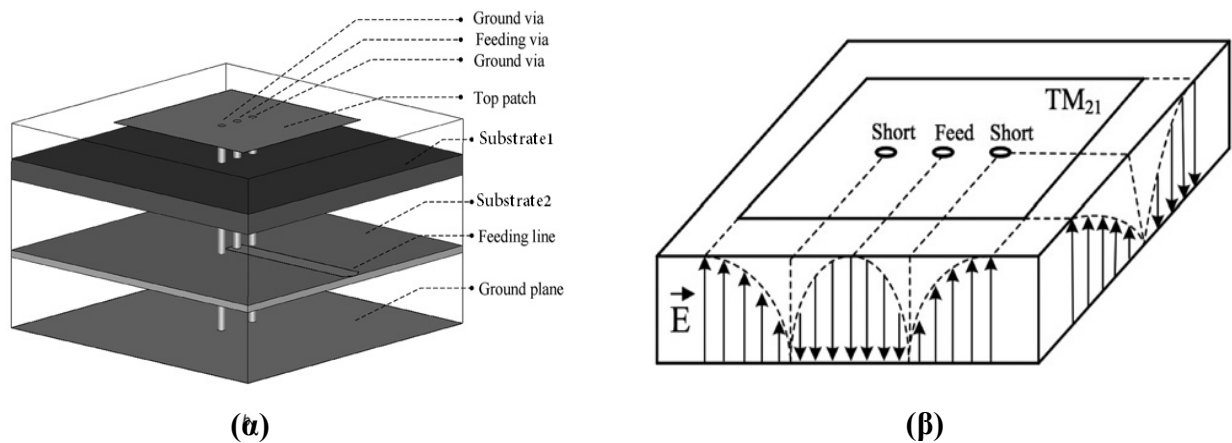


Εικόνα 2.5: Μικροταινιακή Κεραία α) Κάτοψη β) Πλάγια όψη

Υψηλού Ρυθμού Μικροταινιακή Κεραία

Η υψηλού ρυθμού μικροταινιακή κεραία βασίζεται στην λογική της μικροταινιακής κεραίας, αλλά διαφέρει στον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί. Έχει αποδειχθεί ότι κεραίες με κανονική πόλωση προς το ανθρώπινο σώμα, παράγουν έναν ισχυρό τρόπο διάδοσης επιφανειακών κυμάτων, ο οποίος χρησιμεύει για on – body επικοινωνία [29]. Για τέτοιου είδους επικοινωνία, είναι κατάλληλη η high - order microstrip patch antenna (HMMPA). Συγκεκριμένα εκπέμπει την μέγιστη ακτινοβολία προς το σώμα αυξάνοντας την σύζευξη ανάμεσα στο σώμα και την κεραία. Αντίστοιχα, μπορούμε να πετύχουμε τέτοιου είδους πόλωση και με ένα απλό μονόπολο, που αντίστοιχα θα είχε επίπεδο γείωσης ώστε να εξυπηρετεί την μείωση της ανθρώπινης έκθεσης από ακτινοβολία, όμως λόγω του ύψους του μονόπολου, δεν εξυπηρετεί για φορετές εφαρμογές. Επομένως, η HMMPA έχει την δυνατότητα, να είναι χαμηλού προφίλ, μικρών διαστάσεων, και να τηρεί αντίστοιχα θεμιτά επίπεδα απόδοσης ακτινοβολίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με εύκαμπτα υλικά, είτε με άκαμπτα όπως θα δούμε παρακάτω. Προφανώς η έκθεση προς το ανθρώπινο σώμα είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, κεραίες με παράλληλη πόλωση προς το σώμα κατευθύνουν την μέγιστη ακτινοβολία εκτός σώματος, ιδανικές για off-body επικοινωνία. Πιθανές εφαρμογές μίας HMMPA κεραίας μπορούν να βρεθούν, στον αθλητικό και ιατρικό χώρο, για συλλογή ζωτικών βιολογικών πληροφοριών μέσω αισθητήρων τοποθετημένων πάνω στο σώμα, για στρατιωτικές και διαστημικές αποστολές, όπου αρκετές συσκευές φορετές πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους, ακόμα και για προσωπική χρήση, για παράδειγμα ασύρματα ακουστικά, ή ένα έξυπνο – ρολόι, που πρέπει να επικοινωνήσει με μία κινητή συσκευή στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος.

Σχεδιαστικά, έχει ως εξής. Αποτελείται από διαφορετικά επίπεδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Το στοιχείο ακτινοβολίας βρίσκεται στην κορυφή, το οποίο ενώνεται με ένα αγωγίμο καλώδιο με την γραμμή τροφοδοσίας. Επίσης, ενώνεται με 2 καλώδια, με το αγωγίμο επίπεδο γείωσης. Ανάμεσα στο επίπεδο γείωσης και το στοιχείο ακτινοβολίας, μεσολαβούν δύο διηλεκτρικά διαφορετικού πάχους. Ανάμεσα τους βρίσκεται και η γραμμή τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η τροφοδοσία της κεραίας γίνεται μέσω σχήματος ηλεκτρομαγνητικής ζεύξης. Αυτό συμβάλλει στην αύξηση του εύρους ζώνης, γεγονός σημαντικό αφού γενικά οι μικροταινιακές κεραίες έχουν στενό εύρος ζώνης.



Εικόνα 2.6: Υψηλού Ρυθμού Μικροταινιακή Κεραία α) Δομή β) Ρυθμός TM_{21} [30]

Γενικά, οι μικροταινιακής τεχνολογίας κεραίες λειτουργούν σε θεμελιώδεις ρυθμούς TM_{01} ή TM_{10} . Η παραπάνω κεραία, λειτουργεί σε ρυθμό TM_{21} . Φαίνεται ότι στον άξονα X το ηλεκτρικό πεδίο διαφέρει κατά έναν ολόκληρο κύκλο ενώ στον άξονα Y κατά μισό, λόγω των κορυφών και μηδενικών που δημιουργούν τα καλώδια βραχυκυκλώματος, και το καλώδιο τροφοδοσίας αντίστοιχα. Ο ρυθμός TM_{21} δίνει την δυνατότητα στην κεραία, να ακτινοβολεί ομοιοκατευθυντικά, με κανονική πόλωση προς το σώμα [30]. Τα επιφανειακά κύματα στις άκρες του διηλεκτρικού είναι αρκετά δυνατά ώστε να οδηγήσουν σε καλή κάλυψη σε όλο το ανθρώπινο σώμα, μειώνοντας απώλειες που υπάρχουν λόγω της παρεμβολής του σώματος. Η μικροταινιακή κεραία υψηλού ρυθμού είναι κατάλληλη για on-body επικοινωνία ακριβώς γιατί ακολουθεί την συμπεριφορά ακτινοβολίας του διπόλου όπως θα δούμε στην συνέχεια. Επίσης έχει επίπεδο γείωσης, επομένως δίνεται η δυνατότητα περαιτέρω περιορισμού της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας προς τον χρήστη.

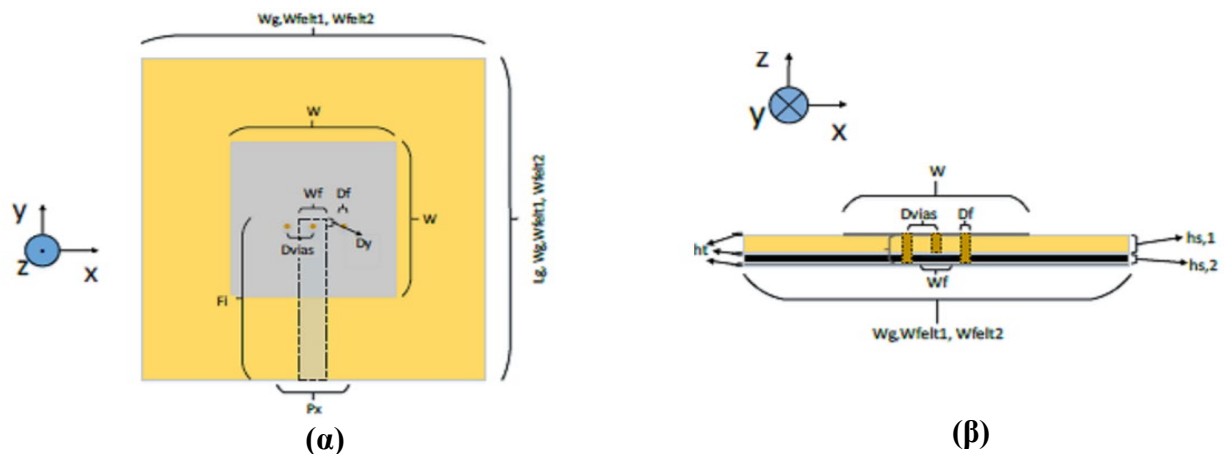
Οι διαστάσεις της μικροταινιακής κεραίας υψηλού ρυθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9 και τα υλικά της στον Πίνακα 2.8.

f	2.4GHz	3.6GHz
λ	125mm	83.33mm
Lp	18.9mm	14.225mm
Wf	4.2mm	4.2mm
L1	25mm	25mm
H_ground	0.13mm	0.13mm
h_substrate1	2.9mm	2.9mm
h_substrate2	1.1mm	1.1mm
Df	1.175mm	1.175mm
Dvias	3.4mm	3.4mm
Wg	60mm	60mm

Ground/wires/patch	PEC	$\sigma = 1 S/m$
Substrate1/substrate2	FR4	er = 4.4

Πίνακας 2.8: Υλικά ΗΜΜΡΑ

Πίνακας 2.9: Διαστάσεις ΗΜΜΡΑ



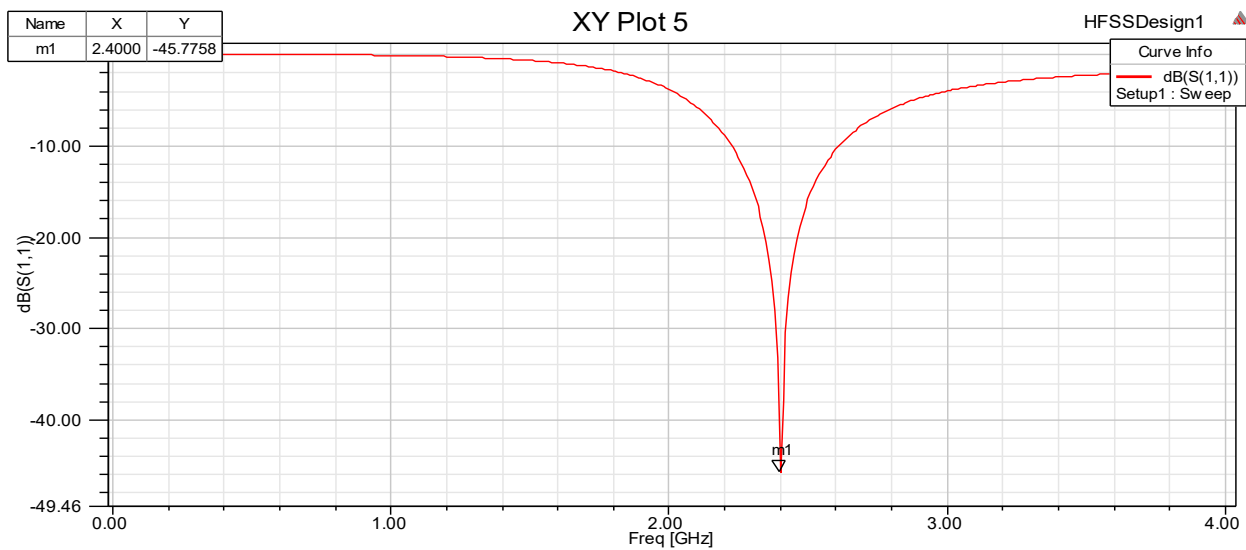
Εικόνα 2.7 ΗΜΜΡΑ α) Κάτοψη β) Πλάγια Όψη [31]

2.2 Αποτελέσματα

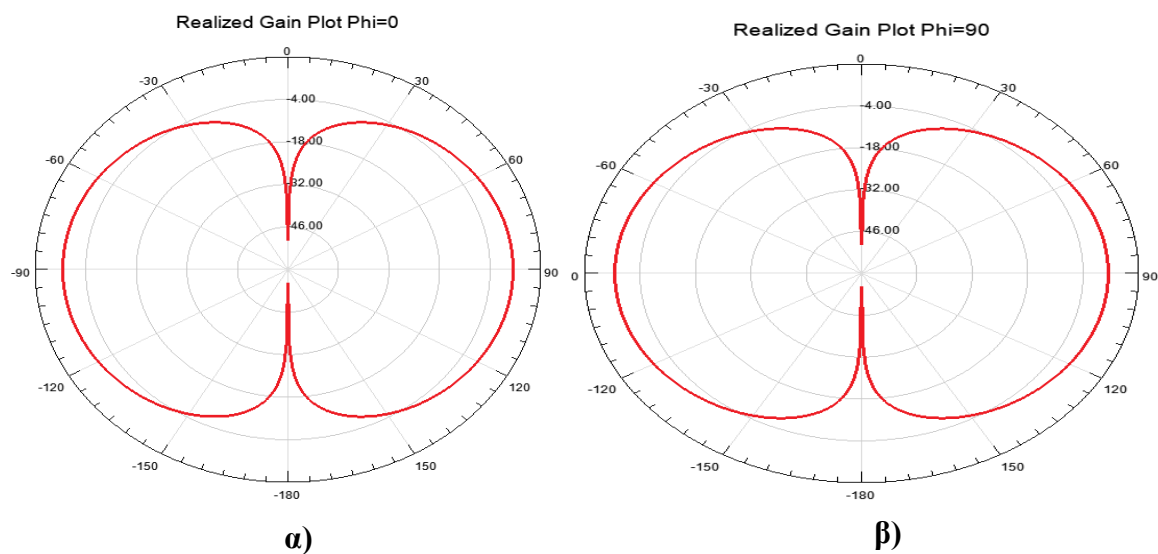
Σε αυτό το σημείο αφού μελετήθηκαν από θεωρητική σκοπιά αλλά και σχεδιάστηκαν οι υποψήφιοι τύποι κεραιών, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και στις δύο συχνότητες. Για κάθε συχνότητα $f = 2.4GHz$ και $f = 3.6GHz$ παρουσιάζονται για κάθε τύπο κεραιάς ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} , τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο επίπεδο, όπως και μετρούνται το εύρος ζώνης και η απόδοση ακτινοβολίας. Αρχικά, γίνεται σύγκριση στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας ανάμεσα στις διαφορετικές συχνότητες ανά ίδιο τύπο κεραιάς, και έπειτα γίνεται σύγκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους κεραιών (δίπολο, μονόπολο, patch) ώστε να αποφανθούμε ποια είναι καταλληλότερη για φορετή κεραιά.

Δίπολο $f = 2.4\text{GHz}$

Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ο συντελεστή ανάκλασης S_{11} του διπόλου για $f = 2.4\text{GHz}$. Να επισημάνουμε ότι με αύξηση του μήκους του διπόλου η συχνότητα μετατοπίζεται προς τα αριστερά, ενώ με μείωση του μήκους του διπόλου η συχνότητα συντονισμού μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Η τιμή του συντελεστή ανάκλασης υπολογίστηκε $S_{11} = -45.77\text{dB}$. Η τιμή του συντελεστή ανάκλασης υπερβαίνει τα (-10dB) , επομένως θα έχουμε αμελητέες απώλειες λόγω ανάκλασης. Το εύρος ζώνης του διπόλου υπολογίστηκε $BW = 400\text{MHz}$.

**Εικόνα 2.8: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για Δίπολο στα $f=2.4\text{ GHz}$**

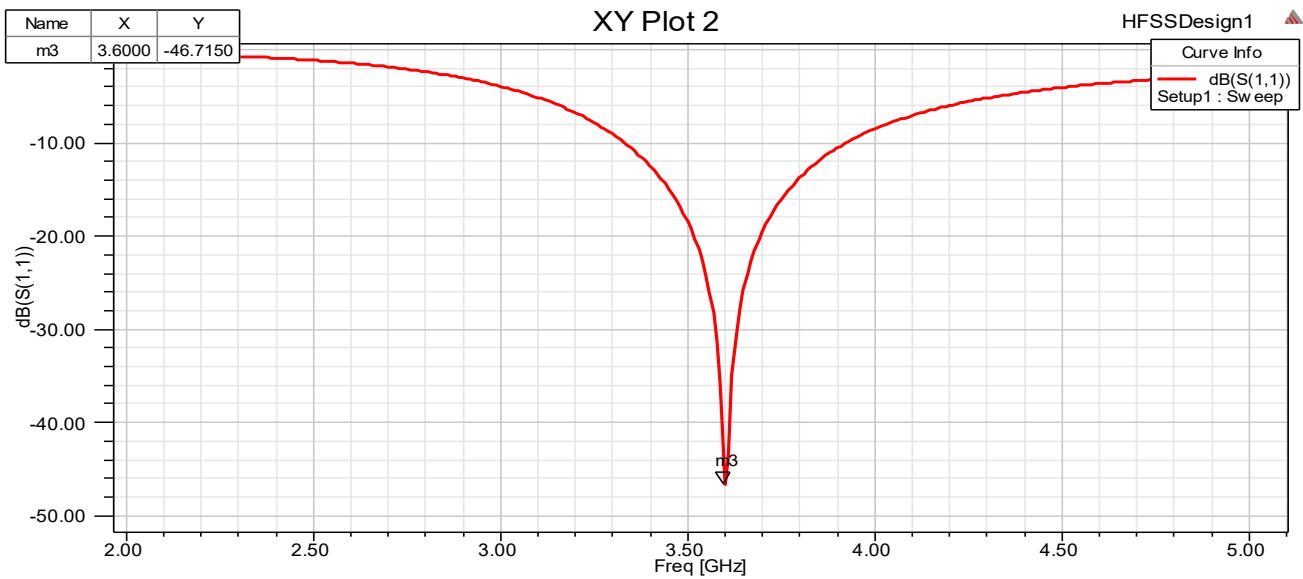
Στην Εικόνα 2.9 παρατίθεται τα διαγράμματα ακτινοβολίας για το δίπολο για $f = 2.4\text{GHz}$. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μας δείχνει ότι για $\theta=0$, έχουμε μηδενισμό του κέρδους αντίστοιχα, ενώ για τιμές $\theta = 90^\circ, \theta = -90^\circ$, έχουμε μέγιστη ακτινοβολία και κέρδος. Γεγονός που επιβεβαιώνεται με

**Εικόνα 2.9: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κέρδους για Δίπολο στα $f=2.4\text{GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$**

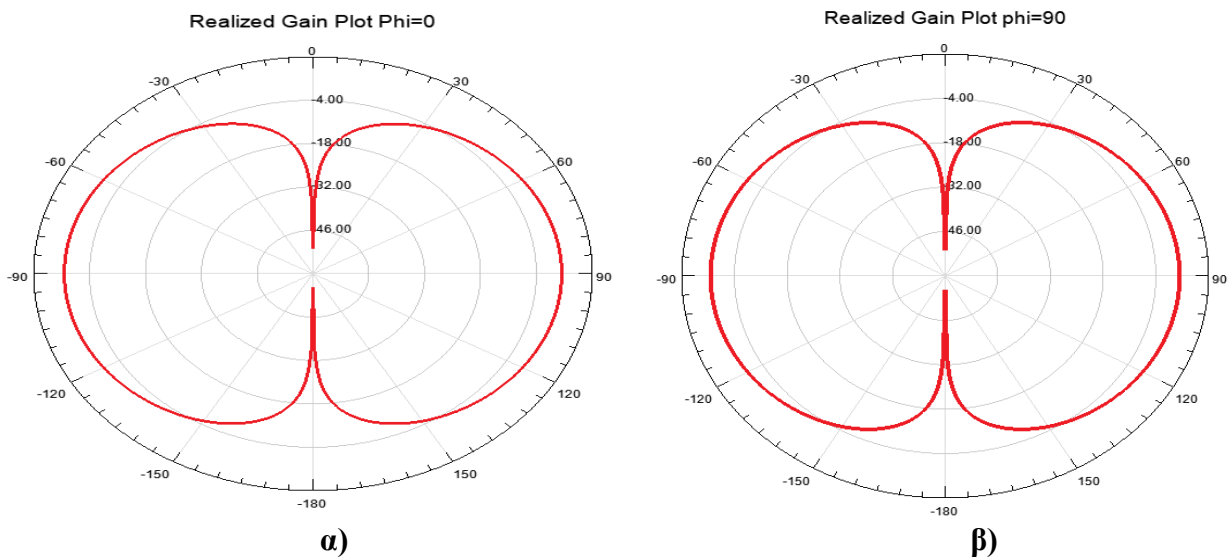
βάση την θεωρία για ένα δίπολο $L=\lambda/2$. Επιπλέον παρατηρείται ότι με βάση τα διαγράμματα ακτινοβολίας, το δίπολο είναι μια ομοιοκατευθυντική κεραία. Δηλαδή ακτινοβολεί προς όλες τις κατευθύνσεις Το κέρδος υπολογίστηκε 2.8 dB , και η απόδοση ακτινοβολίας (e_r) υπολογίστηκε 99% .

Δίπολο $f=3.6\text{GHz}$

Στην Εικόνα 2.10 παρατηρούμε τον συντελεστή ανάκλασης για $f = 3.6\text{GHz}$. Αντίστοιχα με το δίπολο για $f = 2.4\text{GHz}$, παρατηρείται αρκετά καλή προσαρμογή, $S_{11} = -46.75\text{dB}$ και το $BW = 600\text{MHz}$. Το εύρος ζώνης αυξήθηκε σε σχέση με το δίπολο στην συχνότητα $f = 2.4\text{GHz}$, αφού αυξήθηκε και η συχνότητα συντονισμού. Στην Εικόνα 2.11 παρατίθενται τα διαγράμματα



Εικόνα 2.10 : Συντελεστής Ανάκλασης Διπόλου S_{11} για Δίπολο στα $f=3.6\text{ GHz}$

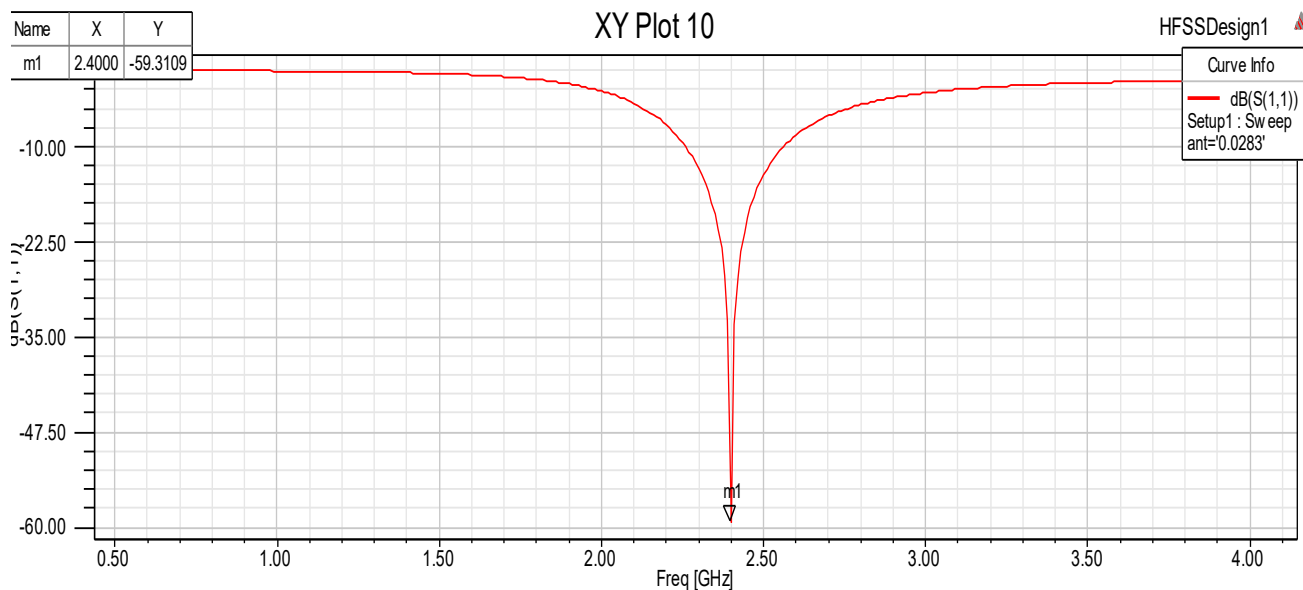


Εικόνα 2.11: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κέρδους για Δίπολο στα $f=3.6\text{ GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

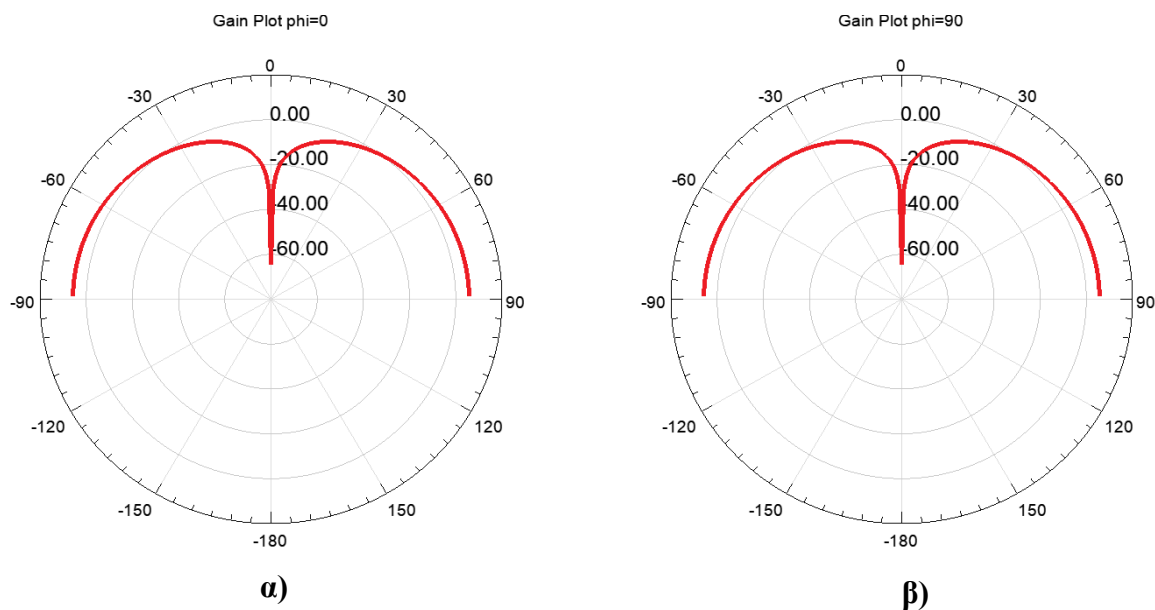
ακτινοβολίας για $f = 3.6\text{GHz}$. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει την ίδια συμπεριφορά με προηγουμένως. Επομένως για $\theta = 90^\circ$, $\theta = -90^\circ$ έχουμε μέγιστη ακτινοβολία, και μέγιστο κέρδος ενώ για $\theta = 0^\circ$, 180° , έχουμε μηδενική ένταση ακτινοβολίας. Το κέρδος υπολογίζεται στα 2.63dB και η απόδοση ακτινοβολίας: $e_r = 99\%$. Το κέρδος και η απόδοση ακτινοβολίας παρέμειναν ίδια.

Μονόπολο $f=2.4\text{GHz}$

Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης για το μονόπολο ($f = 2.4\text{GHz}$). Ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίστηκε $S_{11} = -59.31\text{dB}$ και το εύρος ζώνης $BW = 400\text{MHz}$.



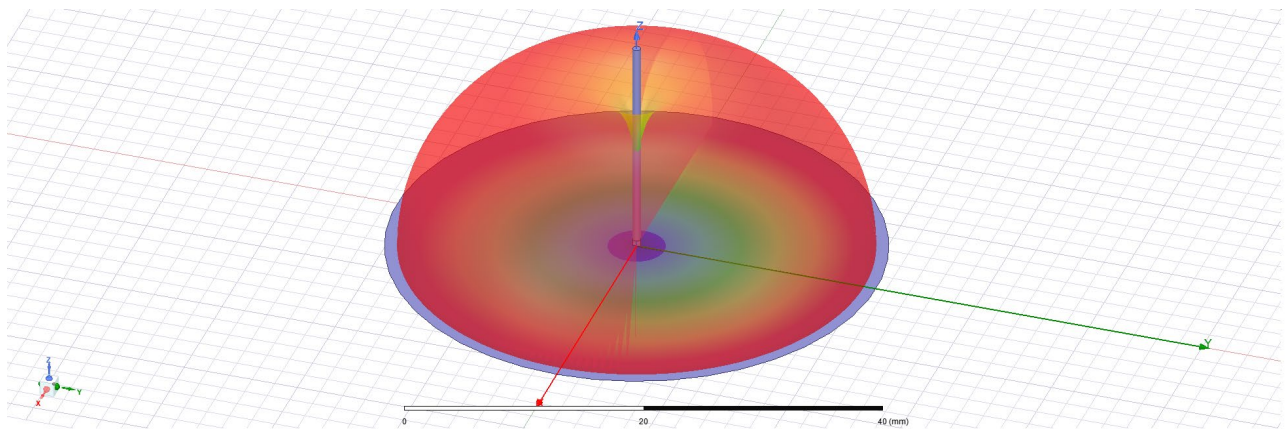
Εικόνα 2.12 : Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για Μονόπολο στα $f=2.4\text{ GHz}$



Εικόνα 2.13: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Μονόπολο στα $f=2.4\text{ GHz}$ α) $\phi=0^\circ$ β) $\phi=90^\circ$

Στην Εικόνα 2.13 έχουμε τα διαγράμματα ακτινοβολίας. Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, το μονόπολο έχει παρόμοια συμπεριφορά με το δίπολο, μόνο που λόγω του ground plane θα έχουμε αποκοπή ακτινοβολίας κάτω από το επίπεδο γείωσης. Αυτό αποδεικνύεται από τα διαγράμματα ακτινοβολίας, αφού αντιστοιχούν σε αυτά του διπόλου, μόνο που είναι κομμένα κατά το ήμισυ οριζοντίως. Αντίστοιχα με το δίπολο η μέγιστη ακτινοβολία παρατηρείται για γωνίες $\theta = -90^\circ$ και 90° , δηλαδή στα πλάγια του μονοπόλου. Στα 2.4 GHz η απόδοση ακτινοβολίας υπολογίστηκε 99.01% και το κέρδος της κεραίας υπολογίστηκε στα 5.8 dB. Αναμενόμενο αφού έχει ίδιο μήκος με το δίπολο, άρα +3 dB κέρδος.

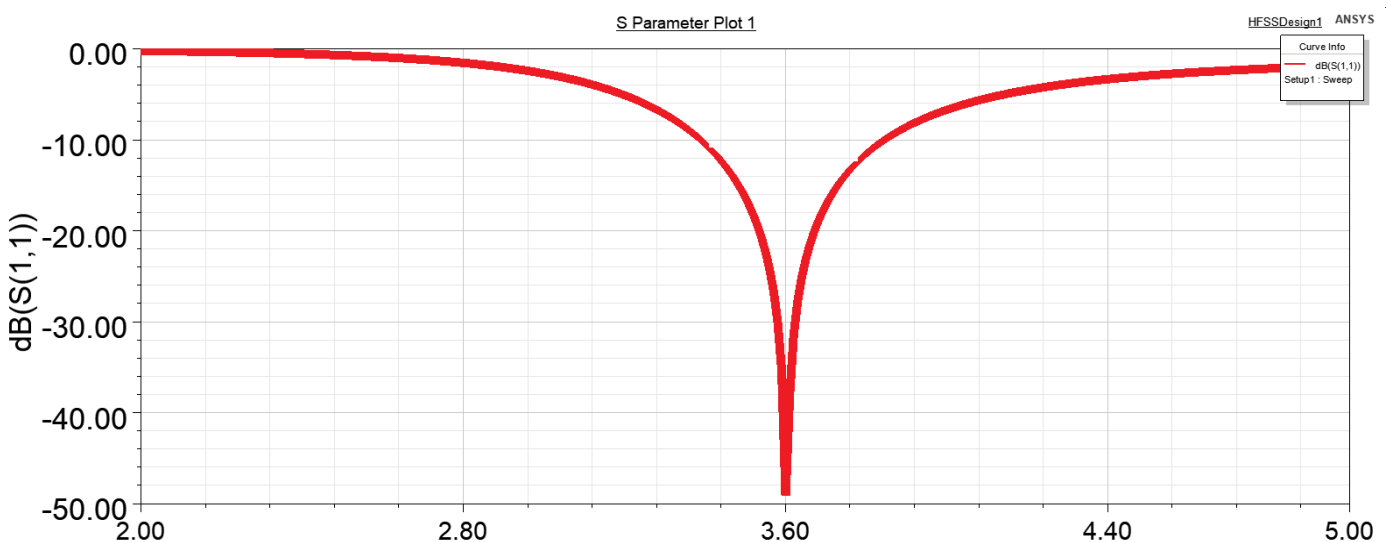
Τέλος, στην Εικόνα 2.14, στο τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας, παρατηρούμε ότι λόγω του επιπέδου γείωσης, η ακτινοβολία αποκόπτεται στο αρνητικό μέρος του άξονα z.



Εικόνα 2.14: 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για Μονόπολο για $f=2.4$ GHz

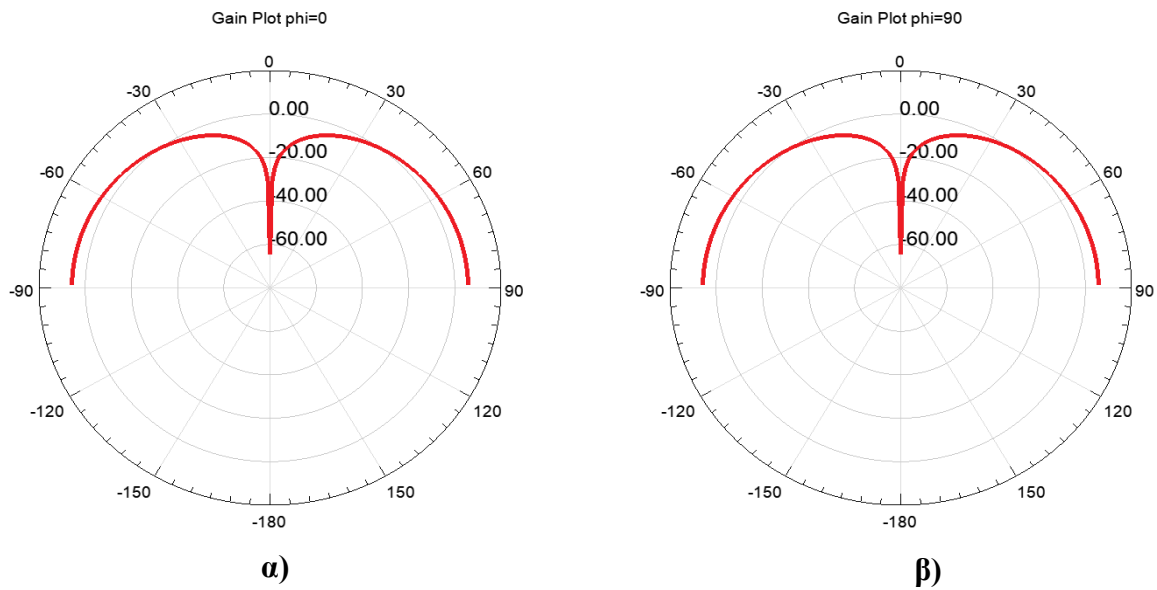
Μονόπολο $f=3.6$ GHz

Στην Εικόνα 2.15 έχουμε το συντελεστή ανάκλασης της κεραίας μονόπολο για $f = 3.6$ GHz.



Εικόνα 2.15: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για Μονόπολο στα $f=3.6$ GHz

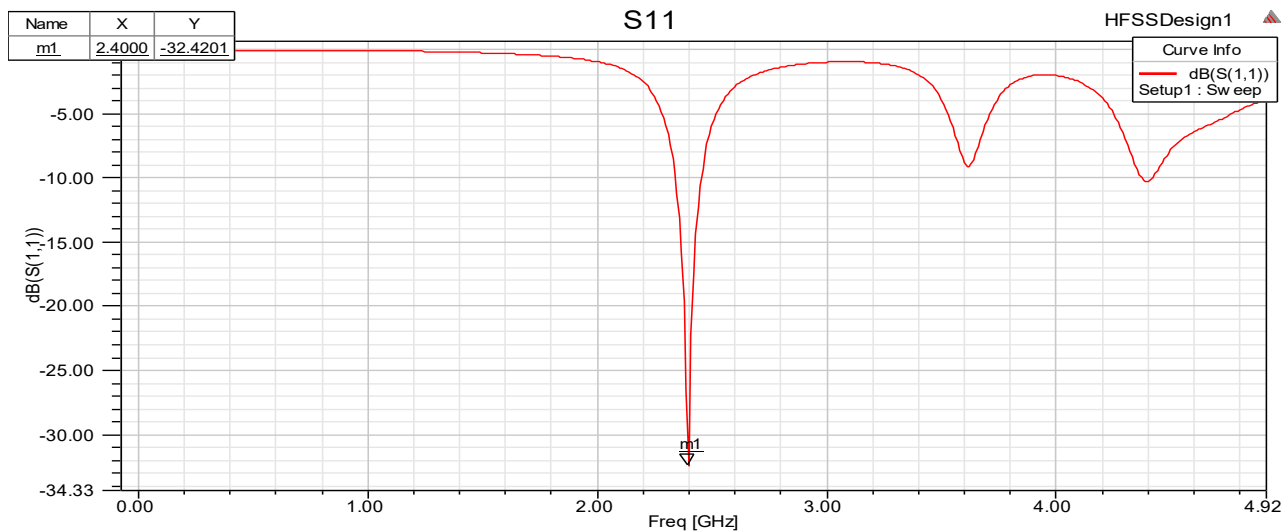
Το μονόπολο συντονίστηκε με μικρή αύξηση του L ακριβώς για $f = 3.6\text{GHz}$, όπως και στην συχνότητα $f = 2.4\text{GHz}$ με μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού προς τα αριστερά με τον συντελεστή ανάκλασης να ισούται $S_{11} = -49.03\text{dB}$ και το εύρος ζώνης $BW = 450\text{MHz}$. Παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στο εύρος ζώνης λόγω αύξησης της συχνότητας συντονισμού. Αντίστοιχα, έχουμε μέγιστη ακτινοβολία για γωνίες $\theta = -90^\circ$ και 90° , δηλαδή στα πλάγια του μονοπόλου όπως και στην συχνότητα $f = 2.4\text{GHz}$. Επομένως, τα διαγράμματα ακτινοβολίας σε τρισδιάστατο και δισδιάστατο επίπεδο παραμένουν τα ίδια και στις δύο συχνότητες Έχουμε κέρδος 5.7dB και απόδοση ακτινοβολίας μετρήθηκε αντίστοιχα 99% .



Εικόνα 2.16: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για Μονόπολο στα $f=3.6\text{ GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

Μικροταιναική κεραία (MPA) $f=2.4\text{GHz}$

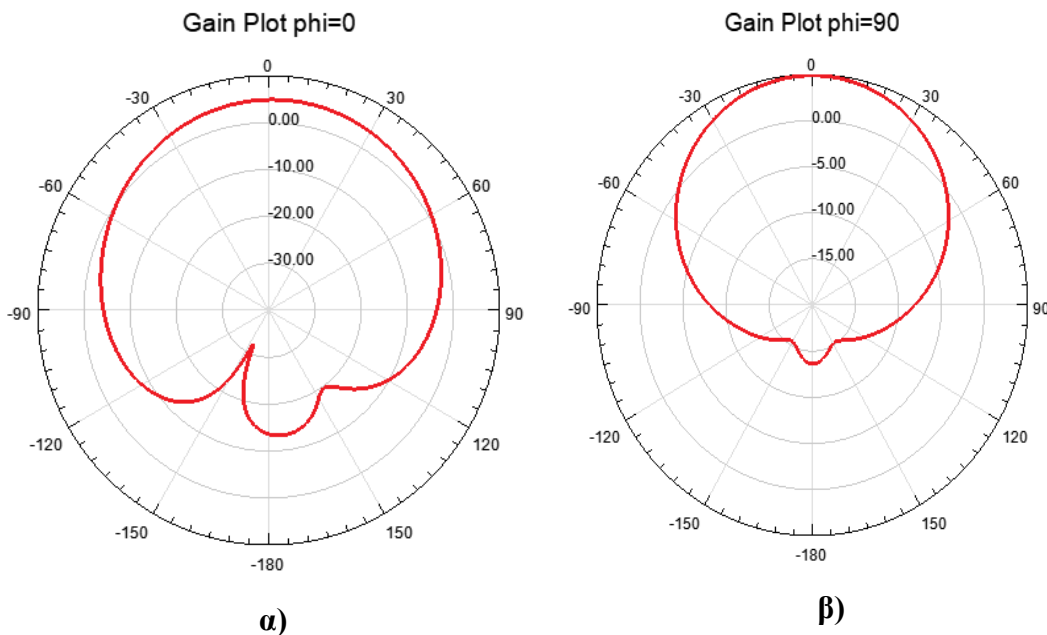
Στην Εικόνα 2.17 παρατίθεται ο συντελεστής ανάκλασης για την MPA $f = 2.4\text{GHz}$.



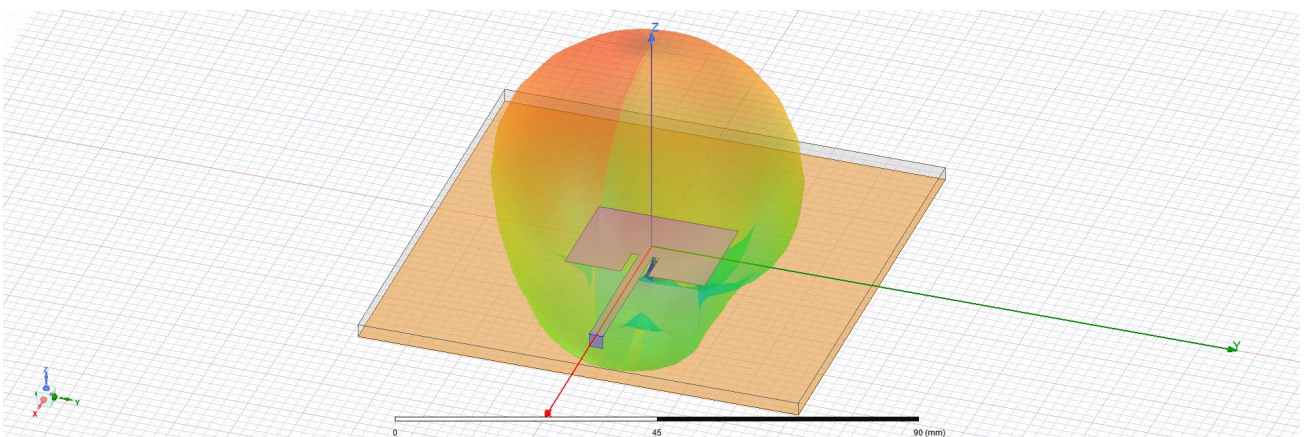
Εικόνα 2.17: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για MPA στα $f=2.4\text{ GHz}$

Η τιμή του συντελεστή S_{11} ισούται με -32.42 dB . Το εύρος ζώνης για την ΜΡΑ είναι μικρότερο από δίπολο – μονόπολο (200MHz), αφού οι μικροταινιακές κεραίες έχουν στενότερο εύρος ζώνης με βάση την θεωρία

Με βάση τα διαγράμματα ακτινοβολίας για την ΜΡΑ γίνεται αντιληπτό ότι είναι μία κεραία η οποία έχει μέγιστο κέρδος για $\theta = 0^\circ$. Όπως γνωρίζουμε η μικροταινιακή κεραία, είναι μία κατευθυντική κεραία. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι εκπέμπει προς τα μπροστά, δηλαδή είναι κατάλληλη για επικοινωνία εκτός σώματος (off-body). Λόγω της ύπαρξης ground plane η ΜΡΑ ακτινοβολεί ελάχιστα προς τα πίσω. Επιπλέον, η απόδοση ακτινοβολίας e_r υπολογίστηκε 75.15%



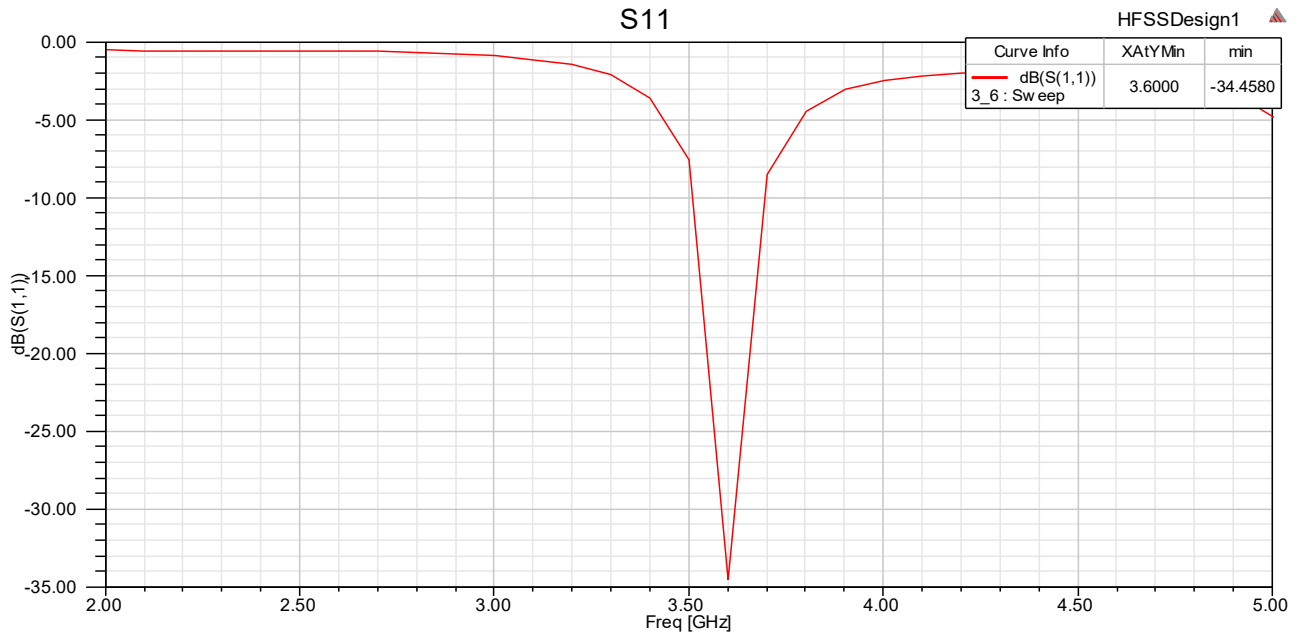
Εικόνα 2.19: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για ΜΡΑ στα $f=2.4 \text{ GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$



Εικόνα 2.18: 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για ΜΡΑ στα $f=2.4 \text{ GHz}$

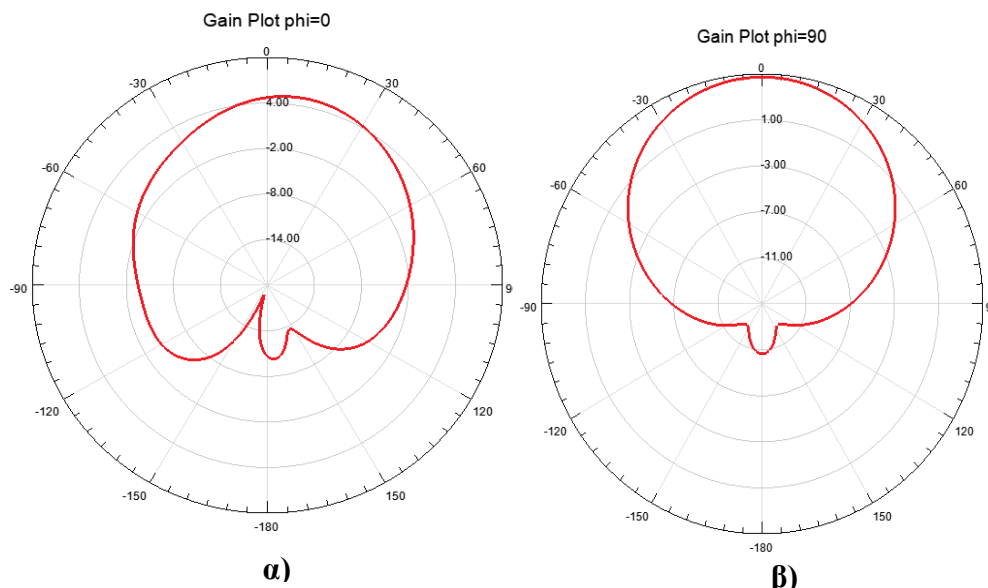
Μικροταιναική κεραία (MPA) $f=3.6\text{GHz}$

Στην Εικόνα 2.20 έχουμε τον συντελεστή ανάκλασης για MPA $f = 3.6\text{GHz}$. Ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίστηκε $S_{11} = -34.45\text{dB}$. Το εύρος ζώνης παρέμεινε το ίδιο ($BW = 200\text{MHz}$) παρότι την αύξηση της συχνότητας συντονισμού.



Εικόνα 2.20: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για MPA στα $f=3.6\text{GHz}$

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας (Εικόνα 2.21) είναι αντίστοιχα με τη συχνότητα $f = 2.4\text{GHz}$. Μέγιστη ακτινοβολία παρατηρείται για $\theta = 0^\circ$, και για $\theta = 180^\circ$ έχουμε πολύ χαμηλές τιμές ακτινοβολίας λόγω της παρουσίας του επιπέδου γείωσης. Στη συχνότητα $f = 3.6\text{GHz}$ υπολογίστηκε η απόδοση ακτινοβολίας $e_r = 82.01\%$, αυξημένη σε σχέση με την MPA για $f = 2.4\text{GHz}$.

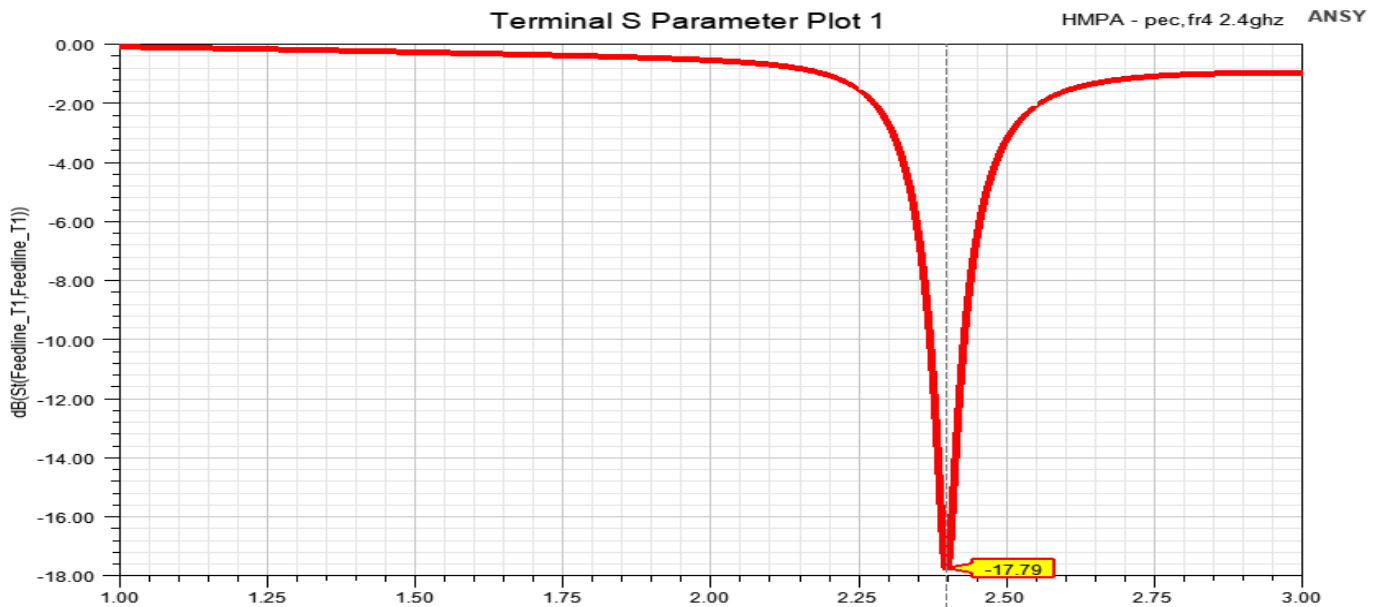


Εικόνα 2.21: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για MPA στα $f=3.6\text{GHz}$ α) $\phi=0^\circ$ β) $\phi=90^\circ$

Μικροταινιακή κεραία υψηλού ρυθμού (HMMPA) $f=2.4\text{GHz}$

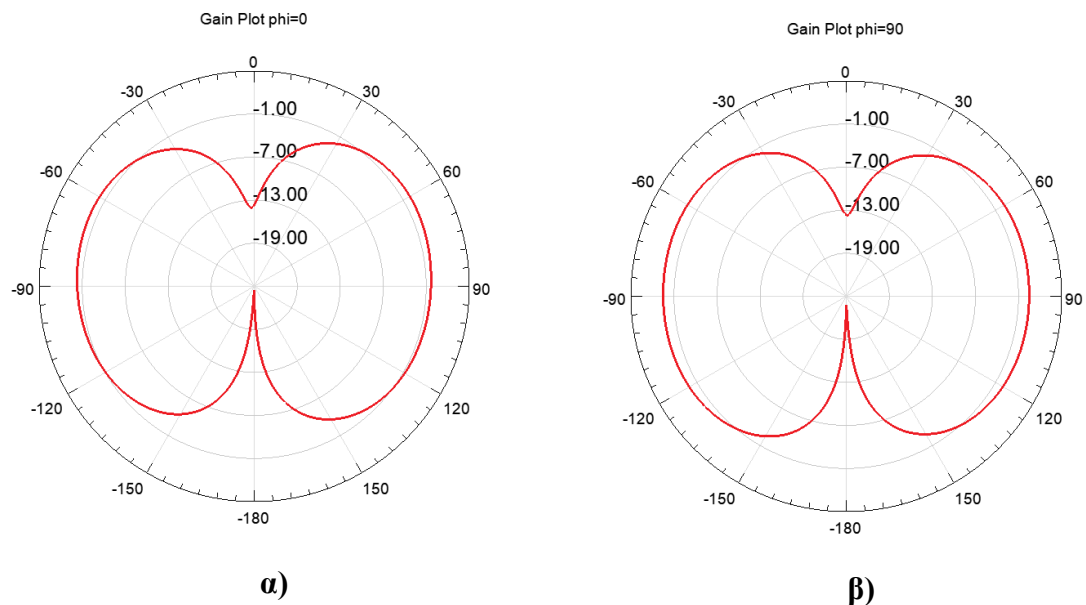
Στην Εικόνα 2.22 παρατίθεται ο συντελεστής ανάκλασης για την HMMPA $f = 2.4\text{GHz}$. Η τιμή του $S_{11} = -17.79\text{dB}$ είναι μειωμένη σε σχέση με την MPA και αντίστοιχα και το εύρος ζώνης $BW = 60\text{MHz}$.

Στην Εικόνα 2.23: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για HMMPA στα $f=2.4\text{ GHz}$ έχουμε τα δισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας για την HMMPA και στην Εικόνα 2.24 το τρισδιάστατο



Εικόνα 2.22: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για HMMPA στα $f=2.4\text{ GHz}$

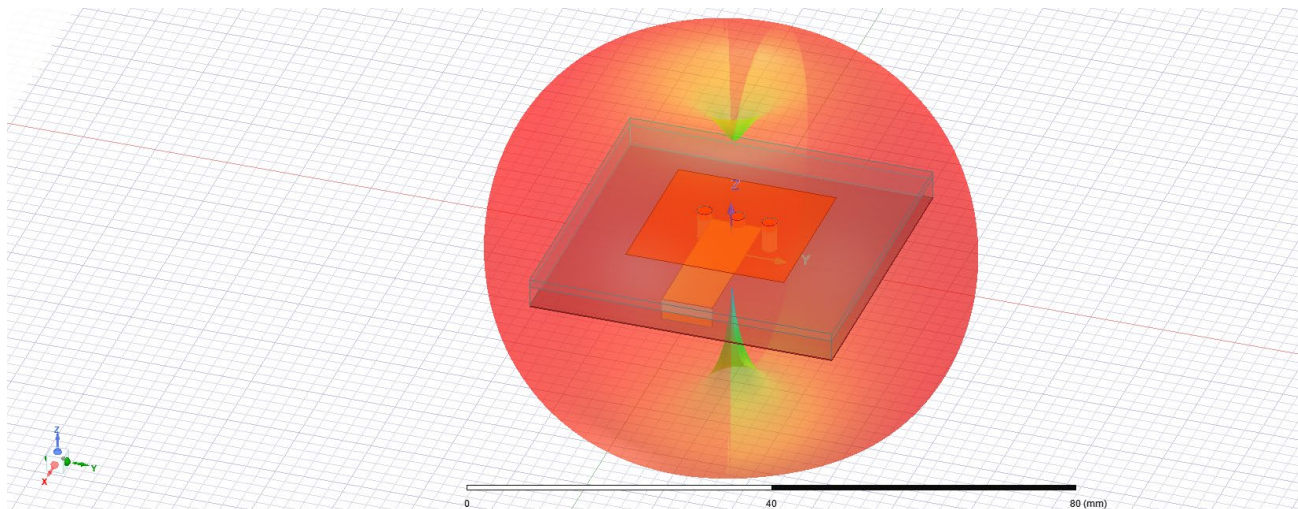
διάγραμμα ακτινοβολίας Παρατηρούμε ότι έχουμε μέγιστη ακτινοβολία για $\theta = 90^\circ$, $\theta = -90^\circ$, δηλαδή στα πλάγια της κεραίας. Αυτή η παρατήρηση συνάδει και με την θεωρία για την HMMPA,



Εικόνα 2.23: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για HMMPA στα $f=2.4\text{ GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

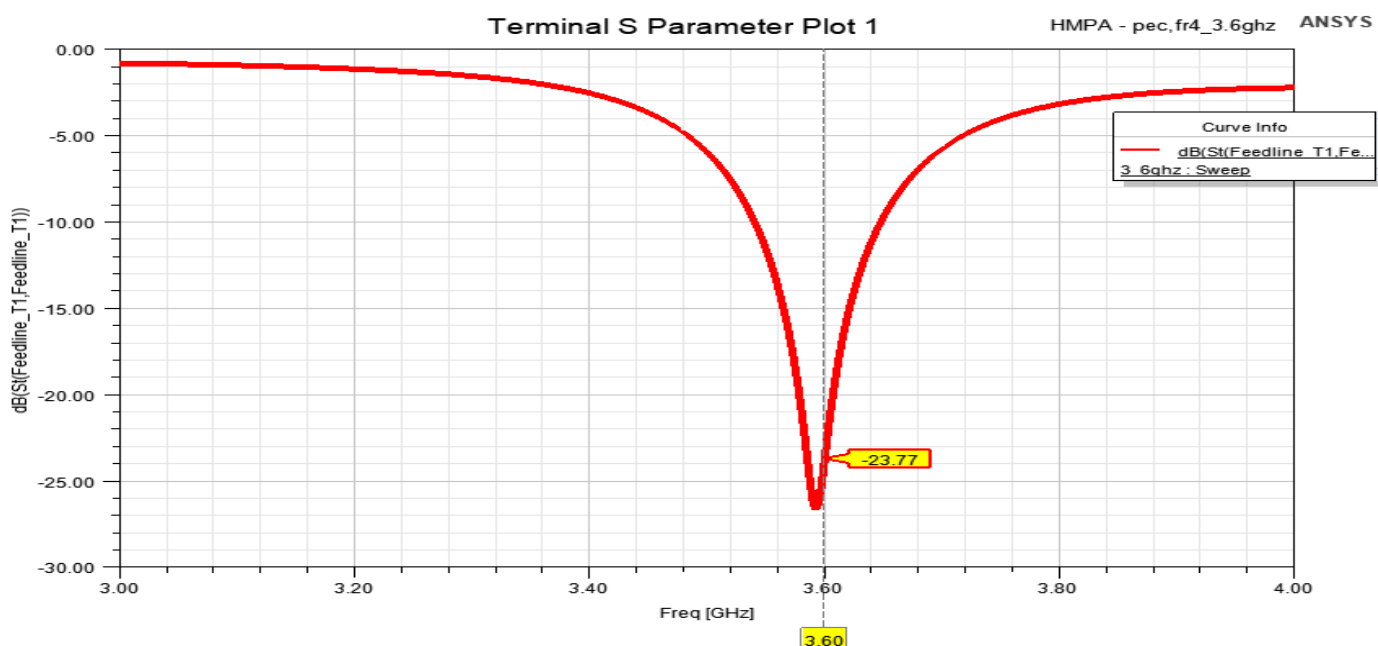
αφού ακολουθεί τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας του διπόλου. Επομένως η ΗΜΜΡΑ είναι μία κεραία που αντιστοιχεί για επικοινωνία πάνω στο σώμα (on-body). Το κέρδος υπολογίστηκε $1.2dB$ και η απόδοση ακτινοβολίας $e_r = 76.03\%$. Το κέρδος είναι μειωμένο σε σχέση με την ΜΡΑ διότι η ΗΜΜΡΑ δεν είναι μία κατευθυντική κεραία όπως η ΜΡΑ.

Μικροταινιακή κεραία υψηλού ρυθμού (ΗΜΜΡΑ) $f=3.6GHz$



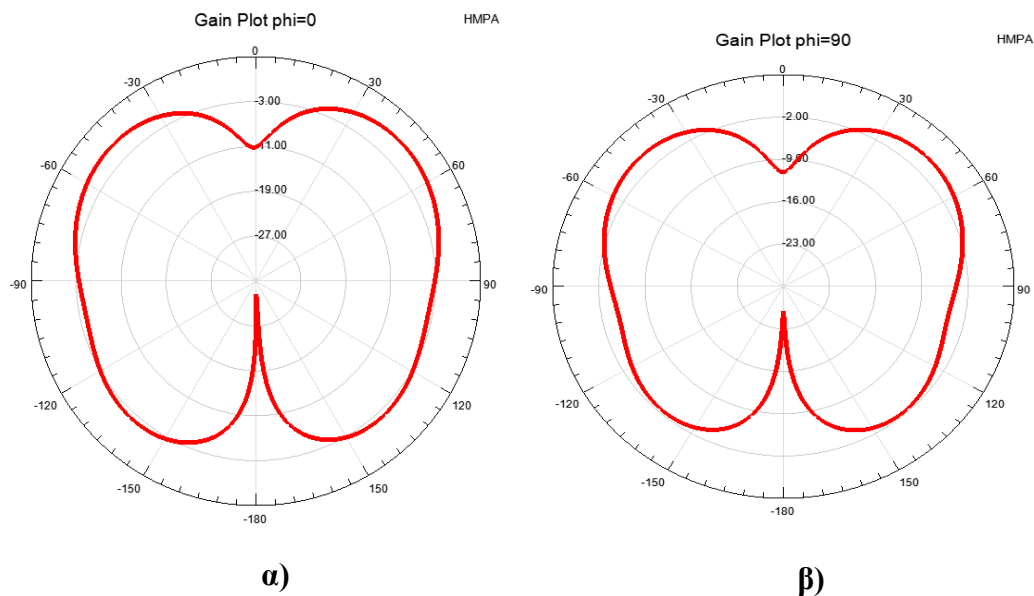
Εικόνα 2.24: 3D Διαγράμματα ακτινοβολίας για ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4 GHz$

Στην Εικόνα 2.25 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης για ΗΜΜΡΑ $f = 3.6GHz$. Ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίστηκε $S_{11} = -23.77dB$ και το εύρος ζώνης $BW = 140MHz$. Παρατηρήθηκε αύξηση του εύρος ζώνης αφού αυξήθηκε και η συχνότητα συντονισμού. Στην Εικόνα



Εικόνα 2.25: Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για ΗΜΜΡΑ στα $f=3.6 GHz$

2.26 έχουμε τα δισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας. Παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά ακτινοβολίας με την ΗΜΜΡΑ για $f = 2.4\text{GHz}$. Δηλαδή, παρουσιάζεται μέγιστη ακτινοβολία για $\theta = 90^\circ, -90^\circ$, αντίστοιχη συμπεριφορά με εκείνη του διπόλου. Το κέρδος υπολογίστηκε 1.3dB και η απόδοση ακτινοβολίας $e_r = 78.54\%$.

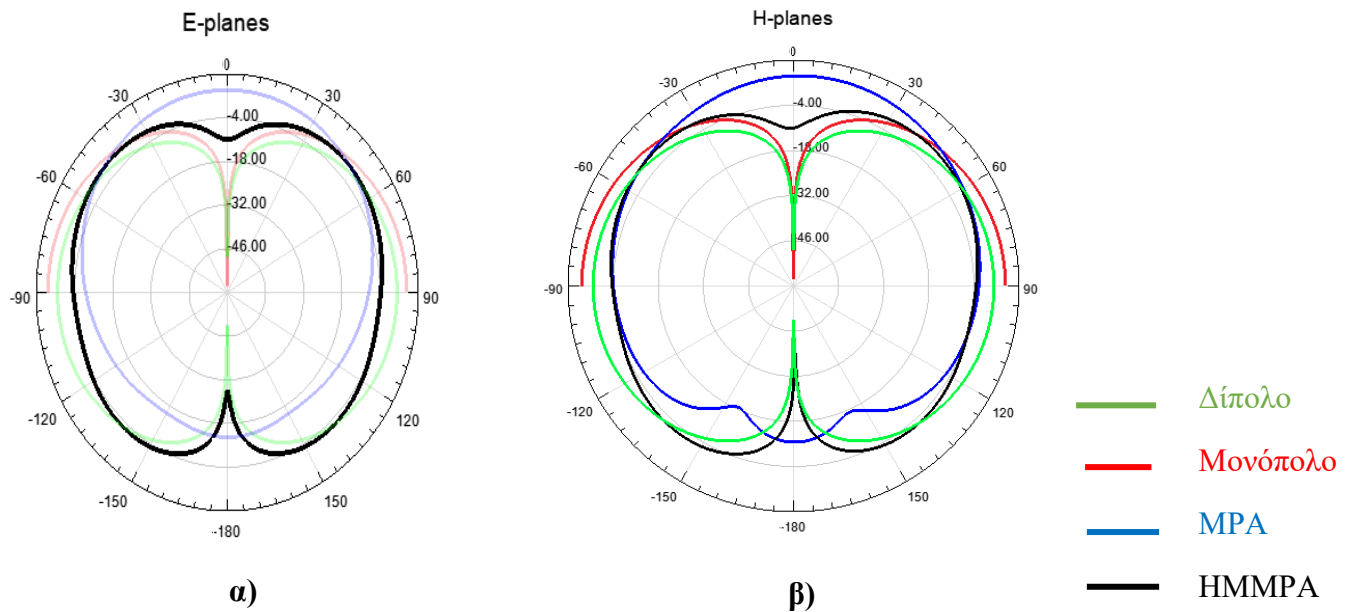


Εικόνα 2.26: Διαγράμματα ακτινοβολίας για ΗΜΜΡΑ στα $f=3.6\text{ GHz}$ α) $\phi=0^\circ$ β) $\phi=90^\circ$

Σύγκριση χαρακτηριστικών ακτινοβολίας

Αφού μελετήσαμε τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας για το δίπολο, το μονόπολο, την ΜΡΑ και την ΗΜΜΡΑ, πρέπει να αποφανθούμε ποια/ποιες είναι κατάλληλες για φορετές κεραίες. Μελετώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας (Εικόνα 2.27) και για τις τέσσερις διαφορετικού τύπου κεραίες καταλήγουμε στα παρακάτω:

Το δίπολο ακτινοβολεί ομοιοκατευθυντικά και ανάλογα με το πώς τοποθετείται πάνω στο σώμα του χρήστη (παράλληλα ή κάθετα) μπορεί να λειτουργήσει είτε για off-body είτε για on-body επικοινωνία αντίστοιχα. Αν τοποθετηθεί παράλληλα προς το σώμα τότε λειτουργεί για off-body επικοινωνία και εκθέτει το σώμα λιγότερο στις ακτινοβολίες, ενώ αν τοποθετηθεί κάθετα στο σώμα εκθέτει περισσότερο το σώμα σε ακτινοβολία. Όμως, το δίπολο δεν έχει επίπεδο γείωσης με αποτέλεσμα να ακτινοβολεί προς το σώμα χωρίς κάποια δυνατότητα να μειωθεί η ποσότητα ακτινοβολίας προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Επιπλέον, λόγω του ύψους του, το δίπολο δεν εξυπηρετεί τις φορετές εφαρμογές διότι δεν παρουσιάζει χαμηλό προφίλ ώστε να είναι βολικό ως προς τον χρήστη. Συμπερασματικά, δεν αποτελεί ιδανική λύση για φορετή κεραία.



Εικόνα 2.27: Συγκριτικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο α) $\phi=0^\circ$ β) $\phi=90^\circ$

Το μονόπολο ακολουθεί όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως παρόμοια συμπεριφορά με το δίπολο. Η κύρια κατασκευαστική διαφορά του από το δίπολο είναι η παρουσία επιπέδου γείωσης, το οποίο παρέχει προστασία στο ανθρώπινο σώμα έναντι της Η/Μ ακτινοβολίας. Το πρόβλημα, όμως και εδώ, είναι ότι τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του (μήκος πόλου, διαστάσεις επιπέδου γείωσης) δεν ευνοούν τις φορετές εφαρμογές. Το μονόπολο ενώ πληροί τις απαιτήσεις χαμηλότερων επιπέδων ακτινοβολίας (συγκριτικά με το δίπολο) προς το χρήστη λόγω του επιπέδου γείωσης, δεν αποτελεί ιδανική λύση για φορετή κεραία λόγω των αρχιτεκτονικών του διαστάσεων.

Από την άλλη οι μικροταινιακές κεραίες (ΜΡΑ, ΗΜΜΡΑ), θεωρούνται κατάλληλες για φορετές εφαρμογές λόγω των αρχιτεκτονικών τους χαρακτηριστικών, αφού έχουν χαμηλό προφίλ, είναι διακριτικές, εύκολα προσαρμόζονται στις κινήσεις του ανθρώπινου σώματος, ενώ παράλληλα διαθέτουν επίπεδο γείωσης το οποίο παρέχει Η/Μ θωράκιση στον χρήστη έναντι των σχετικών ακτινοβολιών. Σχετικά με την ΜΡΑ (off-body επικοινωνίες), αυτή εκπέμπει μακριά από τον χρήστη, άρα ο χρήστης εκτίθεται σε χαμηλότερα επίπεδα Η/Μ ενέργειας. Αντίθετα, η ΗΜΜΡΑ (on-body επικοινωνίες) εκπέμπει προς το σώμα του χρήστη και αναμένεται η έκθεσή του χρήστη να είναι υψηλότερη συγκριτικά με την έκθεσή του σε ακτινοβολίες που προέρχονται από την ΜΡΑ. Από τις δύο αυτές κεραίες, θα επιλεγθεί στο Κεφάλαιο 4 ως τελική κεραία προς μελέτη η ΗΜΜΡΑ καθώς αναμένεται να μας παρέχει μετρήσιμες μεταβολές στη συμπεριφορά της καθώς θα πραγματοποιούνται παρεμβάσεις στη σχεδιάσή της (Κεφάλαιο 5). Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι φορετές κεραίες παρουσιάζουν θεμελιωδώς χαμηλό SAR (χαμηλότερο των ορίων που θέτουν οι οργανισμοί προτυποποίησης) επειδή συμμορφώνονται με τους υφιστάμενους προτυποποιημένους κανονισμούς.

Στην παρούσα διπλωματική ωστόσο προσπαθούμε να προτείνουμε με αποδοτικές παρεμβάσεις στην αρχιτεκτονική της κεραίας την περαιτέρω μείωση του SAR.

Αφού τα συμπεράσματα μας καταλήγουν πώς η πιο ενδεδειγμένη τεχνολογία κεραιών είναι αυτή των μικροταινιακών κεραιών, εφεξής η διπλωματική εξελίσσεται με τη βοήθεια των κεραιών MPA και HMMPA προκειμένου να μελετηθεί στη συνέχεια η συμπεριφορά τους παρουσία βιολογικών ιστών.

2.3 Σχεδίαση φορετής κεραία με πραγματικά υλικά

Όπως αναλύσαμε στην ενότητα 1.7 η επιλογή κατάλληλων υλικών για την σχεδίαση μιας φορετής κεραίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αφού, λοιπόν μελετήσαμε – συγκρίναμε και καταλήξαμε σε δύο μοντέλα κεραιών, την MPA και HMMPA, πρέπει να επιλέξουμε τα κατάλληλα υλικά για την σχεδίαση τους (Πίνακας 2.10, Πίνακας 2.11) και στις δύο συχνότητες.

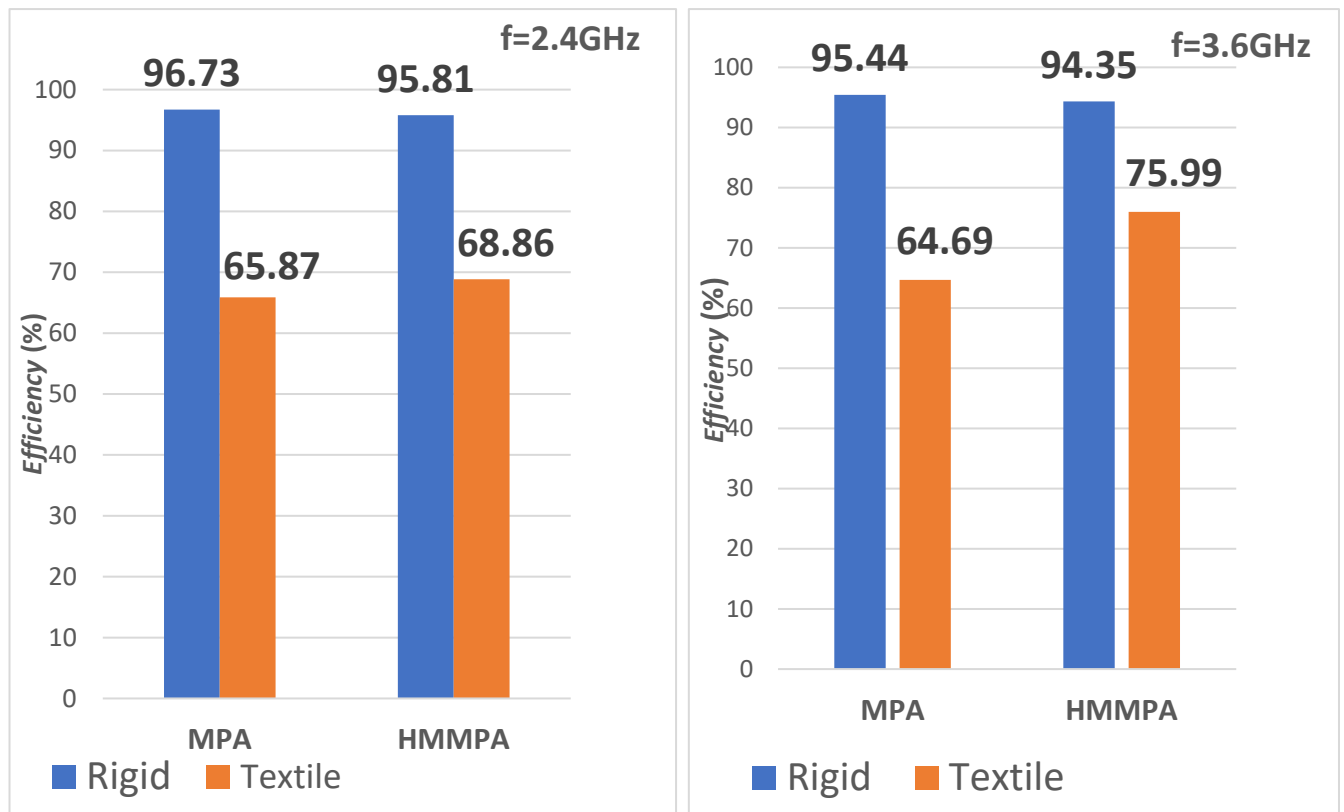
Άκαμπτα	Υλικό	Ηλεκτρικές Ιδιότητες
Υπόστρωμα	Rogers RT/duroid 5880™	$\epsilon_r = 2.2, \delta = 0.0009$
Patch/Feedline/Ground/Wires	Χαλκός (Copper)	$\sigma = 5,8 * 10^7 \text{ S/m}$

Πίνακας 2.10 Άκαμπτα Υλικά

Εύκαμπτα	Υλικό	Ηλεκτρικές Ιδιότητες
Υπόστρωμα	Τσόχα (Felt)	$\epsilon_r = 1.23, \delta = 0.022$
Patch/Feedline/Ground/Wires	Noradell	$\sigma = 154 * 10^4 \frac{\text{S}}{\text{m}}$

Πίνακας 2.11 Εύκαμπτα Υλικά

Προφανώς δεν υπάρχουν ποιοτικές αλλαγές στον τρόπο ακτινοβολίας για την κάθε κεραία σε σχέση με τις προσομοιώσεις στην ενότητα 2.2, όπου χρησιμοποιήθηκαν ιδανικά αγώγιμα υλικά, και για το υπόστρωμα FR4 ($\epsilon_r = 4.4, \tan\delta = 0.02$). Υπήρξαν μικρές αλλαγές στην συχνότητα συντονισμού, οι οποίες αντιμετωπίστηκαν στην περίπτωση της MPA με μικρές αυξομειώσεις του μήκους του patch, ενώ στην HMMPA με μικρές αυξομειώσεις στην απόσταση των καλωδίων του αγώγιμου εδάφους από το καλώδιο τροφοδοσίας. Σημαντικές αλλαγές υπήρξαν όμως σε ποσοτικά μεγέθη ανάμεσα στα διαφορετικά σετ υλικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απόδοση ακτινοβολίας, όπου υπήρξε ιδιαίτερη μείωση ανάμεσα σε άκαμπτα υλικά και εύκαμπτα. Συγκεκριμένα για $f=2.4\text{GHz}$, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.28 υπήρξε μείωση 30.86% στην απόδοση ακτινοβολίας για την MPA όταν χρησιμοποιήθηκαν εύκαμπτα - textile υλικά έναντι άκαμπτων - rigid υλικών. Ενώ στην HMMPA η μείωση είναι 26.95%. Η αιτία μείωσης σχετίζεται με τις απώλειες λόγω



α)

β)

Εικόνα 2.28: Απόδοση Ακτινοβολίας με άκαμπτα και εύκαμπτα υλικά α) $f=2.4\text{GHz}$ β) $f=3.6\text{GHz}$ υψηλότερου συντελεστή απωλειών που έχουν τα εύκαμπτα υλικά. Αντίστοιχα για την συχνότητα $f=3.6\text{GHz}$, η μείωση στην απόδοση ακτινοβολίας για την κεραία MPA είναι 30.75%, αντίστοιχα με την συχνότητα $f=2.4\text{GHz}$, ενώ για την HMMPA είναι λιγότερο, κοντά στο 18.6%.

Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται ότι με το σετ άκαμπτων υλικών και τα δύο μοντέλα κεραίων ακτινοβολούν αποδοτικότερα, και με μεγάλη διαφορά. Όμως, επειδή ακριβώς οι κεραίες που έχουμε σκοπό να μελετήσουμε πρέπει να λειτουργούν κοντά στο σώμα, αφού λειτουργούν ως φορετές, τίθενται σε προτεραιότητα ζητήματα ευελιξίας, προσαρμοστικότητας στις κινήσεις του σώματος, και ευκαμψίας σε μηχανικές πιέσεις.

Αυτές τις προϋποθέσεις τις καλύπτουν μόνο τα υφασμάτινα υλικά σαν σετ υλικών. Επομένως, παρότι την χαμηλότερη απόδοση ακτινοβολίας που παρατηρήθηκε στο σετ των υφασμάτων – εύκαμπτων υλικών έναντι των άκαμπτων, θα επιλέξουμε να προχωρήσουμε στις μετρήσεις του Κεφαλαίου 4 με παρουσία του ανθρώπινου σώματος, με τα υφασμάτινα – εύκαμπτα υλικά.

2.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, μελετήσαμε τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες κεραίων (δίπολο, μονόπολο, μικροταινιακές κεραίες: MPA και HMMPA). Λαμβάνοντας υπόψιν, διαφορετικούς

παράγοντες, όπως την αρχιτεκτονική της κάθε κεραίας και τον τρόπο που ακτινοβολεί επιλέξαμε την τεχνολογία η οποία ταιριάζει στις φορετές εφαρμογές. Καταλήξαμε ως πιο αποδεκτές λύσεις, τις κεραίες που ανήκουν στην κατηγορία της μικροταινιακής τεχνολογίας (MPA, ΗΜΜΡΑ) για off-body και on-body επικοινωνία αντίστοιχα. Το δίπολο και το μονόπολο δεν αποτελούν προφανώς απαγορευτικές επιλογές για φορετές κεραίες. Όμως, συγκριτικά με τις κεραίες μικροταινιακής τεχνολογίας, τόσο δίπολο όσο και το μονόπολο έχουν σαφή μειονεκτήματα σχετικά με την δομή και το μέγεθος τους. Επιπλέον, δεν έχουν επίπεδο γείωσης ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί περαιτέρω η εκπεμπόμενη ακτινοβολία προς το σώμα.

Τέλος, έγινε η μελέτη διαφορετικών υλικών με κριτήριο την ευκαμψία τους, για να επιτυγχάνεται η φορετότητα των κεραιών. Παρά την μείωση στην απόδοση ακτινοβολίας που καταγράφηκε, επιλέχθηκαν ως πιο κατάλληλα τα υφασμάτινα υλικά, που παρέχουν ευελιξία και αντοχή στις μηχανικές παραμορφώσεις.

3 Μέτρηση SAR - Ανθρώπινα Ομοιώματα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον Ειδικό Ρυθμό Απορρόφησης (Specific Absorption Rate, SAR), όπως και στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την μείωση του, σε επίπεδο αρχιτεκτονικής σε μία κεραία. Αντίστοιχα, θα γίνει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα ανθρώπινα ομοιώματα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του δείκτη SAR.

3.1 Ειδικός Ρυθμός Απορρόφησης (SAR)

Με την έλευση της εποχής 5G, πέραν των προηγμένων τεχνολογιών, έχει εμφανιστεί και μια ανησυχία από την πλευρά του τελικού χρήστη σχετικά με την έκθεσή του στα επίπεδα Η/Μ ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από τις φορητές συσκευές. Επομένως, είναι σημαντικό η επιστημονική κοινότητα να μελετήσει επιπλέον την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και τις συνέπειες της έκθεσης σε αυτή στους βιολογικούς ιστούς ώστε να καθυσυχάσει το ευρύ κοινό.

3.1.1 Ορισμός SAR

Όπως αναφέραμε παραπάνω, οι φορητές κεραίες λειτουργούν πολύ κοντά στο ανθρώπινο σώμα, το οποίο έχει υψηλή ηλεκτρική διαπερατότητα. Οι ακτινοβολίες πλευρικού και οπίσθιου λοβού είναι αυτές ουσιαστικά που διεισδύουν και απορροφούνται από τους ιστούς του σώματος. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας ανά μονάδα μάζας του ανθρώπινου σώματος υπολογίζεται μέσω του ειδικού ρυθμού απορρόφησης (Specific Absorption Rate, SAR) και βασίζεται στην εκτίμηση της αύξησης της θερμοκρασίας στους βιολογικούς ιστούς. Η μονάδα μέτρησης είναι $\frac{W}{kg}$. Το SAR μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ρυθμός απορρόφησης που σχετίζεται άμεσα με τα ηλεκτρικά πεδία σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

$$SAR = \frac{\sigma * |E|^2}{\rho} \quad (\text{Εξ 3-1})$$

όπου σ η αγωγιμότητα ιστού (S/m), ρ η πυκνότητα ιστού ($\frac{Kg}{m^3}$), E η μέση τετραγωνική ρίζα του ηλεκτρικού πεδίου (V/m). Το μέγεθος SAR μπορεί να γραφτεί και ως συναρτήσε του χρόνου ως:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho(dV)} \right) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dW}{dt} \right) \quad (\text{Εξ 3-2})$$

όπου dW είναι η ενέργεια που απορροφάται, dm η μάζα και dV ο όγκος του στοιχείου. Επιπλέον συναρτήσε της θερμοκρασίας το SAR ορίζεται και ως [34]:

$$SAR \cong \frac{c\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{Εξ 3-3})$$

όπου c είναι η ειδική θερμότητα σε $kcal/kg^{\circ}C$, ΔT η αύξηση όμως θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου σε χρόνο Δt . Οι τιμές του SAR παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις μέσα στο σώμα όταν εκτεθεί σε Η/Μ. Η συνολική επίδραση όμως σε ολόκληρο το βιολογικό σύστημα υπολογίζεται καλύτερα με τη συνολικά απορροφούμενη ακτινοβολία (absorption rate, AR) αν ολοκληρώσουμε το SAR για τη συνολική μάζα M του σώματος [33]:

$$AR = \int_M SAR dm \text{ (Watt)} \quad (\text{Εξ 3-4})$$

Επίσης χρησιμοποιείται και η μέση τιμή του SAR όταν πρόκειται για υπολογισμό ολόκληρου του ακτινοβολουμένου σώματος από την ολική απορροφούμενη ενέργεια, δηλαδή [35]:

$$SAR_{Average} = \frac{AR}{M} \text{ (Watts/kg)} \quad (\text{Εξ 3-5})$$

Εξ 'ορισμού η τιμή του SAR, εξαρτάται από παράγοντες όπως η συχνότητα λειτουργίας, ένταση του εκάστοτε πεδίου, η απόσταση ανάμεσα στην κεραία και το σώμα του χρήστη, αλλά και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εκτιθέμενου σώματος. Οποιαδήποτε αλλαγή στους παραπάνω παράγοντες, προκαλεί αντίστοιχη αλλαγή στην θερμοκρασία των βιολογικών ιστών, διότι η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προκαλεί αλλαγές στην θερμοκρασία. Παρ' όλο που υπό κανονικές συνθήκες – σωστή χρήση της ασύρματης συσκευής – το ανθρώπινο σώμα έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί και να διαχειριστεί την επιπλέον ενέργεια που απορροφά χωρίς ιδιαίτερη αλλαγή στην θερμοκρασία λόγω της λειτουργίας της ομοιόστασης, σε ακραίες συνθήκες, όπως για παράδειγμα επαναλαμβανόμενη χρήση της ασύρματης συσκευής, είτε μεγάλης χρονικής διάρκειας τηλεφωνικές κλήσεις, θερμικές αλλαγές στους ιστούς γίνονται αντιληπτές.

Υπάρχουν και άλλες μονάδες μέτρησης της RF ισχύος που απορροφάται από βιολογικούς ιστούς, όπως μέσω της πυκνότητας ισχύος (Power Density, PD). Η πυκνότητα ισχύος, για ένα επίπεδο κύμα στο ελεύθερο χώρο δίνεται από τη σχέση [33]:

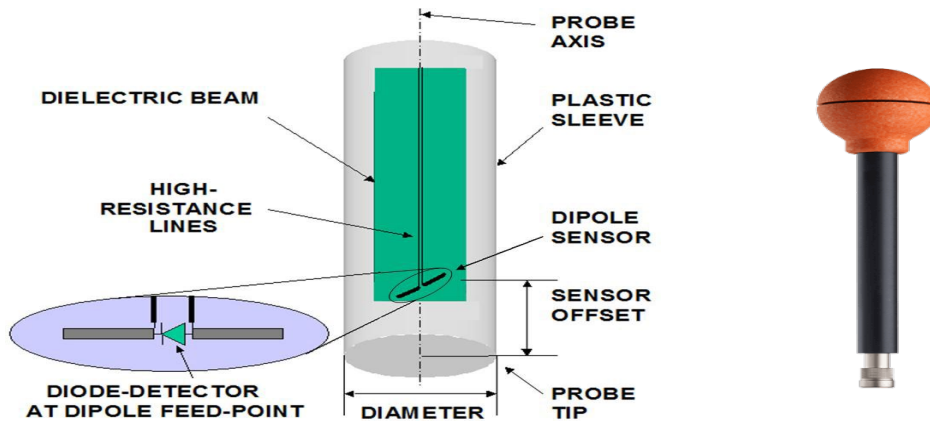
$$P \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{E_0^2}{2Z_0} \quad (\text{Εξ 3-7})$$

όπου Z_0 είναι η σύνθετη αντίσταση στον ελεύθερο χώρο (377 Ohms). Όμως η περίπτωση αυτή παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα αφού μπορεί να υπολογιστεί μόνο στο μακρινό πεδίο. Επομένως, δεν μας είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αφού, οι φορετές συσκευές, επικοινωνούν κοντά στο σώμα, αντίστοιχα και οι φορετές κεραίες, εντός δηλαδή κοντινού πεδίου, όπου μας ενδιαφέρει και η μελέτη μας.

3.1.2 Τρόποι μελέτης – υπολογισμού SAR

Διάφοροι τρόποι ανάλυσης της έκθεσης H/M στο ανθρώπινο σώμα έχουν μελετηθεί στο πέρασ των χρόνων. Αποτελούνται από αριθμητικές προσομοιώσεις αλλά και πραγματικές πειραματικές μεθόδους. Σχετικά με τις πειραματικές μεθόδους, για τον υπολογισμό του SAR, δύο βασικοί τρόποι υπάρχουν. Μέσω καλώδιο-ανιχνευτή ηλεκτρικών πεδίων ή/και μέσω θερμογραφικών καμερών [36], [37]. Ωστόσο, πρόσφατα έχουν μελετηθεί και απλές μέθοδοι εκτίμησης της έκθεσης του ανθρώπου, οι οποίες αξιοποιούν τυπικό εργαστηριακό εξοπλισμό και εκτελούνται στον ανηχοϊκό θάλαμο. Για παράδειγμα στην [38] γίνονται μετρήσεις προκειμένου να εκτιμηθεί η έκθεση ομοιώματος υγρής μορφής (νερό, ζάχαρη, αλάτι), σε ακτινοβολία φορετής κεραίας. Αποτελεί μία αξιόπιστη μέθοδο μέτρησης, αλλά και απλή αφού χρησιμοποιεί τυπικό εξοπλισμό εργαστηριακών μετρήσεων, και μπορεί εύκολα να ανακατασκευαστεί.

- Η διάμετρος του ανιχνευτή ηλεκτρικών πεδίων διαφέρει στο μέγεθος του ανάλογα την συχνότητα λειτουργίας, ενώ το μήκος του πρέπει να καλύπτει το ομοίωμα [39]. Ουσιαστικά αποτελείται από έναν αισθητήρα – μία διπολική κεραία, μία δίοδο που είναι τοποθετημένη στην μέση του διπόλου που αποτελεί και το σημείο τροφοδοσίας του. Όλο αυτό στηρίζεται μέσω ενός διηλεκτρικού περιβλήματος (Εικόνα 3.1). Ο ανιχνευτής σκανάρει τον όγκο γύρω του και υπολογίζει τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σε συγκεκριμένα σημεία.



Εικόνα 3.1: Καλώδιο -ανιχνευτής ηλεκτρικών πεδίων [39]

- Η εκτίμηση του SAR μέσω θερμογραφικής κάμερας έχει ως εξής [36]: Εκτίθεται το ανθρώπινο ομοίωμα εντός ενός ανηχοϊκού θαλάμου σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από την κεραία – πομπό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έπειτα τοποθετείται το ανθρώπινο ομοίωμα μπροστά από μία θερμογραφική κάμερα, και καταγράφεται άμεσα θερμική φωτογραφία, ώστε να καταγραφεί η αύξηση της θερμοκρασίας.

3.2 Όρια SAR – Πρότυπα

Η ευρεία χρήση φορετών συσκευών και εξοπλισμού για διάφορες εφαρμογές (ιατρικές, στρατιωτικές, διάσωσης, αθλητισμού κλπ), συνδέεται άμεσα με επιδράσεις λόγω της τοπικής θέρμανσης ιστών κατά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό, επιβάλλει ακριβείς και αυστηρούς κανονισμούς για την έκθεση του ανθρώπινου σώματος στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και οι διεθνείς επιτροπές έχουν ορίσει συγκεκριμένους κανόνες ασφαλείας [40]. Εκ μέρους των επιτροπών, γίνεται μία βασική διάκριση ανάμεσα στον πληθυσμό που εκτίθεται για γενική χρήση και επαγγελματική χρήση. Ο επαγγελματικά εκτιθέμενος πληθυσμός αποτελείται από ενήλικες που είναι γενικά εκτεθειμένοι υπό γνωστές συνθήκες και εκπαιδεύονται έτσι ώστε να είναι ενήμεροι για τους πιθανούς κινδύνους ώστε να λάβουν τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα. Αντίθετα, το ευρύ κοινό αποτελείται από άτομα όλων των ηλικιών και διαφορετικής κατάστασης υγείας, και μπορεί να περιλαμβάνει ακόμα και ιδιαίτερα ευαίσθητα ομάδες ή άτομα. Κυρίαρχα για τις εφαρμογές φορετών κεραιών μας ενδιαφέρει η έκθεση στον γενικό πληθυσμό. Επιπλέον, με βάση τα πρότυπα χρησιμοποιείται ένας παράγοντας ασφαλείας για τον υπολογισμό των μέγιστων τιμών επιτρεπόμενης ακτινοβολίας, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι ποτέ δεν θα παραβιάζονται τα συγκεκριμένα όρια. Γενικά, τα όρια που έχουν θεσπιστεί έχουν συντηρητικό χαρακτήρα, υπό την έννοια ότι είναι αρκετά αυστηρά ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια στην χρήση για τον γενικό πληθυσμό. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα όρια SAR ανά οργανισμό.

	Μέσος ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) ολόκληρου σώματος (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (SAR) στο κεφάλι και στον κορμό (W/kg)
FCC	1.6	1.6
ICNIRP	0.58	1.09
IEEE	0.08	2

Πίνακας 3.1: Όρια του SAR της IEEE για τις συχνότητες 10KHz έως 3GHz [39]

Ο τοπικός SAR υπολογίζεται ως μέσος όρος επί μάζας 10g παρακείμενων ιστών. Ο μεγαλύτερος SAR που προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο αποτελεί την τιμή που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της έκθεσης. Τα εν λόγω 10g ιστού υπονοούν μάζα ιστού με σχεδόν ομοιογενείς ηλεκτρικές ιδιότητες.

Σε κάθε περίπτωση γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές SAR που έχουν θεσπιστεί παρέχουν την προστασία που χρειάζεται απέναντι στην ηλεκτρομαγνητική εκπομπή. Όμως για τους σχεδιαστές

κεραιών, και ιδιαίτερα αυτών που προορίζονται να λειτουργούν κοντά στο σώμα, είναι βασικό τους καθήκον να μειώσουν όσο γίνεται τις τιμές του SAR. Αυτό γίνεται μέσα από τεχνικές που παρουσιάζονται στο επόμενη υπό-ενότητα.

3.2.1 Τεχνικές Μείωσης SAR

Όπως αναφέρθηκε είναι ανάγκη οι τιμές του δείκτη SAR να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Οι σχεδιαστές κεραιών έχουν αναπτύξει διάφορες τεχνικές ώστε να μειωθεί το SAR Σε δύο κατηγορίες μπορούμε να χωρίσουμε τις τεχνικές αυτές [41]:

- Μέσω ελέγχου της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας της φορετής/κινητής κεραιάς, μακριά από το ανθρώπινο σώμα,
- Μέσω προστασίας του ανθρώπινου σώματος από την Η/Μ

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τεχνικές το ποσοστό μείωσης του SAR που προκαλούν.

Μέθοδοι	Μηχανισμοί	Μείωση SAR(%)
Έλεγχος της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας, ώστε να αποδυναμωθεί η ακτινοβολία προς το σώμα.	Παρασιτικό στοιχείο	~30
	Slots(;	~30
	Έλεγχος του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραιάς μέσω διαιρούμενης τροφοδοσίας	~90
Δημιουργία προστασίας – ασπίδας της ακτινοβολίας απέναντι στο ανθρώπινο σώμα και το ανάποδο.	Ανακλώντα στοιχεία	~70 – 80
	Προσθέτοντας φερρίτη	~57
	Ηλεκτρικό αγωγός	~50
	Μεταλλικά	~75

Πίνακας 3.2: Τεχνικές Μείωσης SAR [41]

Προφανώς οι παραπάνω τρόποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοτελώς, είτε σε συνδυασμό αυτών. Σίγουρα, δεν είναι δυνατό όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί να ικανοποιούν όλες τις προϋποθέσεις ανάλογα και την εφαρμογή της κάθε κεραιάς, και ανάλογα τον μηχανισμό, θα υπάρξουν αλλαγές στην απόδοση ακτινοβολίας της κεραιάς, στο βάρος, στο κόστος κατασκευής, στην πολυπλοκότητα κατασκευής, στην ακρίβεια της και το συνολικό της μέγεθος. Οι σχεδιαστές κεραιών πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσουν ποια τεχνική θα χρησιμοποιήσουν ώστε να διασφαλιστούν οι προϋποθέσεις ανά εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι ανάγκη να τηρούνται οι κανονισμοί και όρια που έχουν τεθεί.

3.3 Ανθρώπινα ομοιώματα

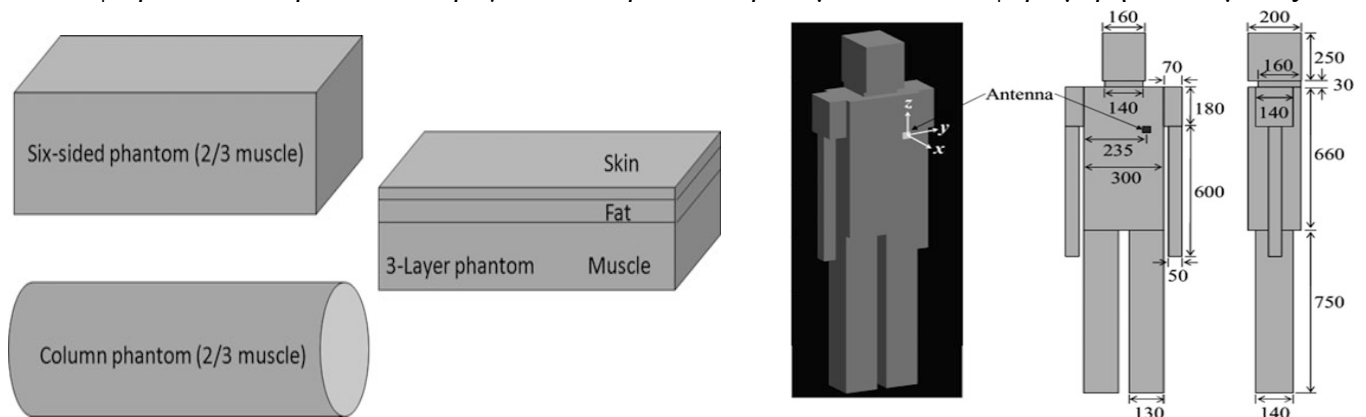
Για να υπάρξει έρευνα και ανάπτυξη φορετών και εμφυτευμένων αντίστοιχα κεραιών για επικοινωνία κοντά στο σώμα, είναι ιδιαίτερα απαραίτητο να αξιολογηθεί η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και στην κεραία. Στην «αλληλεπίδραση» συμπεριλαμβάνεται, και η μελέτη της Η/Μ προς το σώμα, μέσω του δείκτη SAR κλπ., όπως και η επίδραση του σώματος στα χαρακτηριστικά της κεραίας. Οι μετρήσεις για την λήψη συμπερασμάτων ανάμεσα στην αλληλεπίδραση κεραίας ανθρώπου, υπολογίζονται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, και/ή μέσω πειραματικών υπολογισμών. Σε αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται ομοιώματα που έχουν σχετικά αντίστοιχη επιτρεπτότητα και αγωγιμότητα με τους βιολογικούς ιστούς [42].

3.3.1 Ομοιώματα για αριθμητικές προσομοιώσεις

Οι ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες των βιολογικών ιστών διαφέρουν ανάλογα την συχνότητα, τον ιστό την σχετική τους θέση, την θερμοκρασία, την ποσότητα νερού κλπ. Ανακριβείς διηλεκτρικές ιδιότητες προκαλούν σφάλματα σε διάφορες παραμέτρους, όπως στα διαγράμματα ακτινοβολίας, στις Η/Μ κατανομές κλπ. Μέχρι τώρα πολλών ειδών αριθμητικά ομοιώματα έχουν αναπτυχθεί που χρησιμοποιούνται είτε για θεωρητικές αναλύσεις είτε για υπολογιστικές προσομοιώσεις. Σε θεωρητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται απλής μορφής ομοιώματα, που ονομάζονται και *θεωρητικά ομοιώματα*. Επιπλέον, για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των κεραιών κοντά στο ανθρώπινο σώμα σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιούνται πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις, όπως τα υψηλής ανάλυσης ανθρώπινα ομοιώματα [43].

Απλά ομοιώματα

Τα ομοιογενή, είτε επίπεδα πολλών επιπέδων ομοιώματα, είναι τα πιο βασικά θεωρητικά ομοιώματα για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών φορετών κεραιών. Το σχήμα τους μπορεί να είναι σφαιρικό, κυλινδρικό είτε τετράγωνο. Μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα μέρη του σώματος,

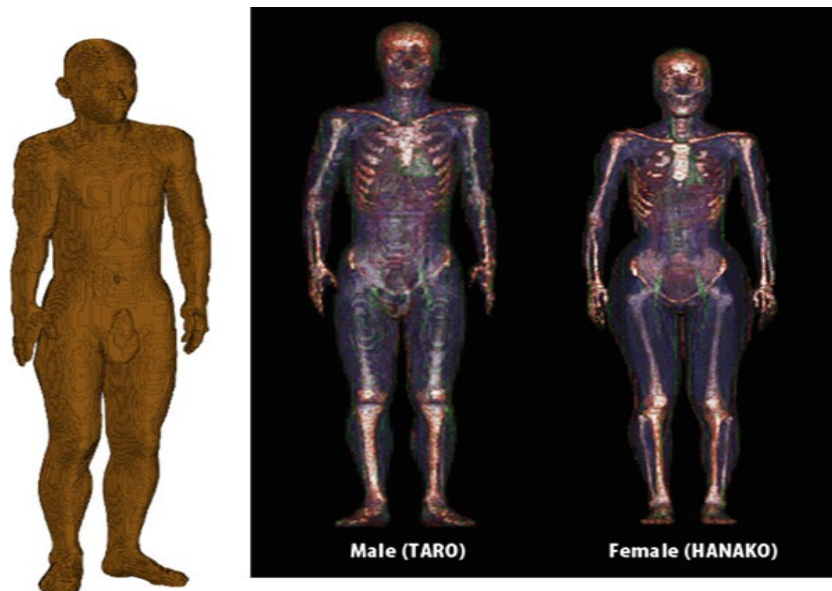


Εικόνα 3.2: Απλά - θεωρητικά ομοιώματα [43]

όπως το κεφάλι, τα άκρα είτε τα μάτια. Έχουν ακόμα φτιαχτεί και απλά ομοιώματα που έχουν πιο ανθρωπόμορφη μορφή.

Υψηλής Ανάλυσης Ομοιώματα

Με την εξέλιξη τεχνολογιών σχετικά με την ανάλυση ιατρικών εικόνων, όπως η μαγνητική τομογραφία και τομογραφία μέσω ακτίνων X, αλλά και την υψηλή υπολογιστική επίδοση που είναι πλέον διαθέσιμη, έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη ομοιωμάτων ανθρώπινου κεφαλιού είτε ολόκληρου σώματος με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Παρέχουν μεγάλης ακρίβειας ανατομία με περίπλοκα σχήματα ώστε να αναλογούν στα εκάστοτε μέρη του σώματος, αλλά και έχουν την ικανότητα να προσομοιώνουν αντίστοιχα σε πολύ μεγάλη ακρίβεια τις ηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος, αφού αποτελούνται από πληθώρα ιστών, με πολύ μεγάλη ανάλυση, όπου κάθε ογκίδιο (voxel) μπορεί να φτάνει μέχρι και 1mm^3 . Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ένα υψηλής ανάλυσης ομοίωμα που έχει αναπτυχθεί από πανεπιστήμιο της Ιαπωνίας [43].



Εικόνα 3.3: Υψηλής Ανάλυσης Ομοιώματα [43]

3.3.2 Πειραματικά ανθρώπινα ομοιώματα

Στα ανθρώπινα ομοιώματα που χρησιμοποιούνται για πειραματικές μετρήσεις, ιδιαίτερο ρόλο παίζουν τα υλικά του ομοιώματος, αφού καθορίζουν τις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες του. Επομένως, είναι πολύ βασικό να είναι γνωστές εκ των προτέρων οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών. Επίσης, το σχήμα είναι πολύ σημαντικό αφού τα χαρακτηριστικά της κεραίας επηρεάζονται ανάλογα με το σχήμα του ομοιώματος, ιδιαίτερα για φορετές κεραίες. Αντίστοιχα, μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος, (π.χ., κεφάλι, κοιλιά, κορμός σώματος), αλλά και ολόκληρο σώμα. Επομένως πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως [43]:

- 1) Γνωστές φυσικές ιδιότητες
- 2) Να μην έχουν τοξικότητα
- 3) Εύκολη προσβασιμότητα στα υλικά χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός για την παραγωγή τους
- 4) Διατήρηση των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων για μακρόχρονο διάστημα
- 5) Διατήρηση των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων για μεγάλο εύρος συχνοτήτων
- 6) Διατήρηση της ομοιογένειά τους
- 7) Να έχουν χαμηλό κόστος

Παρ' όλα αυτά είναι δύσκολο να επιτευχθούν τέτοια χαρακτηριστικά επειδή τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τα υλικά του ομοιώματος. Γενικά τα ανθρώπινα ομοιώματα που χρησιμοποιούνται για πειράματα, χωρίζονται σε 3 κατηγορίες τα υγρά, τα ημι-στερεά και τα στερεά [46].

Υγρά

Τα υγρά-gel ομοιώματα έχουν υλικά αντίστοιχα του δέρματος σχετικά με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ζάχαρη, αλκοόλη, αλατούχα διαλύματα και άλλα. Μπορούν ακόμα να έχουν μορφή gel, μέσω υλικών όπως σκόνη πολυαιθυλενίου, είτε γλυκερόλη. Τα υγρά-gel ομοιώματα χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις SAR. Με βάση το πρότυπο IEEE Std 1528–2003, η επιτρεπτότητα πρέπει να είναι κάτω από 5, η εφαπτομένη απωλειών μικρότερη 0.05, και το πάχος του κελύφους πρέπει να είναι $2.00 \pm 0.2 \text{ mm}$, για $0.3 < f(\text{GHz}) < 3$. Γενικά δεν πρέπει να ξεπερνάνε τα 6 GHz. Η Εικόνα 3.4 δείχνει

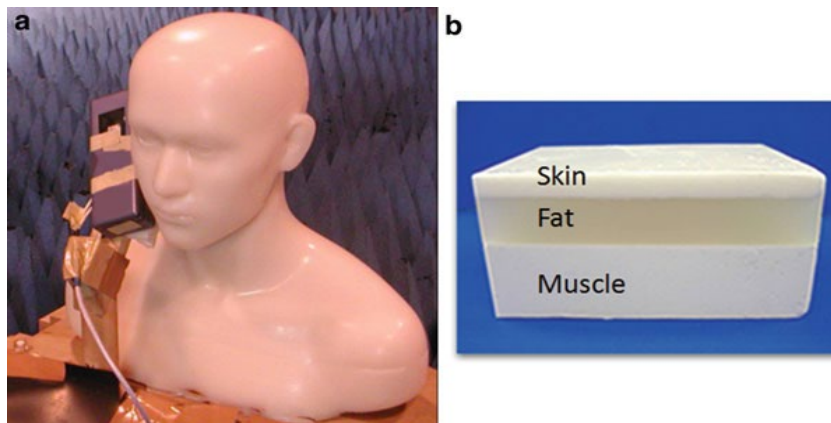


Εικόνα 3.4: Υγρής μορφής ομοίωμα με patch κεραία [38]

ένα υγρής μορφής ομοίωμα με patch κεραία σε εργαστήριο για μετρήσεις SAR εντός ανηχοϊκού θαλάμου[36].

Ημι-στερεά

Με τη χρήση πηκτικού παράγοντα, είναι εύκολο να αναπτυχθούν ημι-στερεά ομοιώματα ικανά να λάβουν το κατάλληλο σχήμα. Φτιάχνονται συνήθως από σιλικόνη. Είναι χαμηλού κόστους, και εύκολα στην κατασκευή σε αυθαίρετο σχήμα και πολλαπλά στρώματα. Διατίθενται σε συχνότητες έως 11GHz. Για εύρος συχνοτήτων 0-3 GHz ή 3.1-10.6 GHz έχουν ηλεκτρικές ιδιότητες αντίστοιχες με των βιολογικών ιστών.



Εικόνα 3.5: Ημι-στερεό ομοίωμα [43]

Στερεά

Για την μέτρηση του SAR στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος, ένα στερεό ομοίωμα είναι μία καλή επιλογή. Αποτελείται από υλικά όπως κεραμικά, ρητίνη κ.ά. Σε σύγκριση με το υγρό και το ημι-στερεό αντίστοιχα, το συγκεκριμένο έχει την δυνατότητα να διατηρεί το σχήμα του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, και είναι σχεδιασμένο να αντιστοιχεί σε διάφορες επιτρεπτότητες. Όμως, τα στερεά ομοιώματα είναι ακριβά, και απαιτούν ιδιαίτερο εξοπλισμό και περίπλοκες διαδικασίες κατασκευής



Εικόνα 3.6: Στερεό ομοίωμα [43]

4 Μετρήσεις πάνω στο Ανθρώπινο Ομοίωμα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε την επίδραση των φορετών κεραιών μικροταινιακής τεχνολογίας κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Για την επίτευξη αυτής της μελέτης θα χρησιμοποιήσουμε τις κεραιές στις οποίες καταλήξαμε στο Κεφάλαιο 2, και ένα ανθρώπινο ομοίωμα με ηλεκτρικές ιδιότητες αντίστοιχες με τα 2/3 του μυ για τις συχνότητες 2.4GHz και 3.6GHz. Το ομοίωμα μας έχει διαστάσεις 33x17x5 (cm) και οι κεραιές μας τοποθετούνται σε απόσταση 4mm από το ανθρώπινο ομοίωμα. Σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις μας έγιναν με ισχύ εισόδου 1Watt. Στον Πίνακα 4.1 καταγράφονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ομοιώματος για $f = 2.4GHz$ και $3.6GHz$, και υπολογίστηκαν με βάση την υπολογιστική μηχανή στην [44].

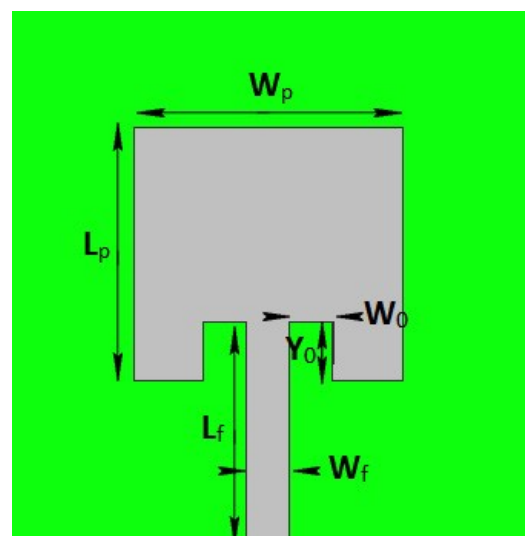
Συχνότητα (GHz)	Ιστός	Επιτρεπτικότητα (er)	Αγωγιμότητα σ (S/m)	Εφαπτομένη Απωλειών (tan δ)
2.4	2/3 Μυς	34.842	1.1253	0.1596
3.6	2/3 Μυς	33.871	1.7457	0.1698

Πίνακας 4.1: Ηλεκτρικές ιδιότητες 2/3 του μυ ανθρώπινο ομοίωμα [44]

4.1 Μικροταινιακή Κεραία (MPA)

Αρχικά θα τοποθετήσουμε την MPA πάνω στο σώμα και θα μελετήσουμε την αλληλεπίδραση της με το σώμα. Όπως έχουμε εξηγήσει και στο Κεφάλαιο 2, η MPA είναι μία κατευθυντική κεραία που αντιστοιχεί για off – body επικοινωνία. Στον Πίνακα 4.2 έχουμε τις διαστάσεις της MPA και στον Πίνακα 4.3 τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών της MPA.

Frequency	2.4GHz	3.6GHz
λ	125 mm	83.33 mm
Πλάτος patch W_p	59.18 mm	39.43 mm
Μήκος patch L_p	52.4 mm	34.2 mm
Ύψος substrate h	3.6 mm	2.4 mm
Πλάτος substrate	100 mm	80 mm
Μήκος substrate	100 mm	80 mm
Inset_feed	9.17 mm	7 mm
L_f	21 mm	21 mm
W_f	6.5 mm	3.5 mm



Εικόνα 4.1 Κάτοψη κεραίας MPA

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις MPA $f=2.4GHz$ κοντά σε Ομοίωμα

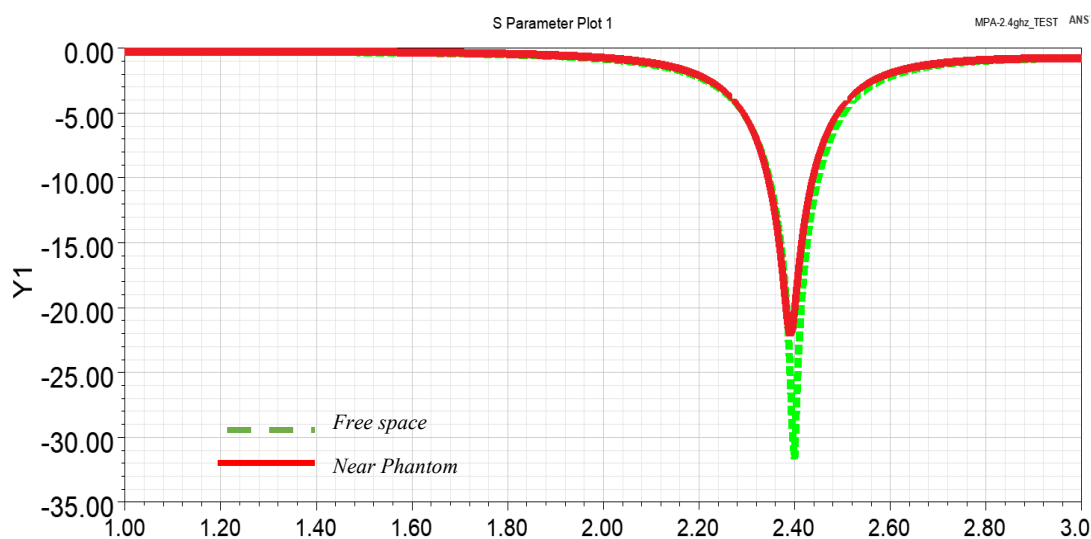
Υλικό	Κομμάτι κεραίας	Ηλεκτρικές ιδιότητες
Felt	Υπόστρωμα	$\epsilon_r = 1.23, \tan\delta = 0.022$
NoraDell	Patch/Feedline/Ground	$\sigma = 1.54e + 006 S/m$

Πίνακας 4.3 Υλικά MPA f=2.4GHz κοντά σε Ομοίωμα

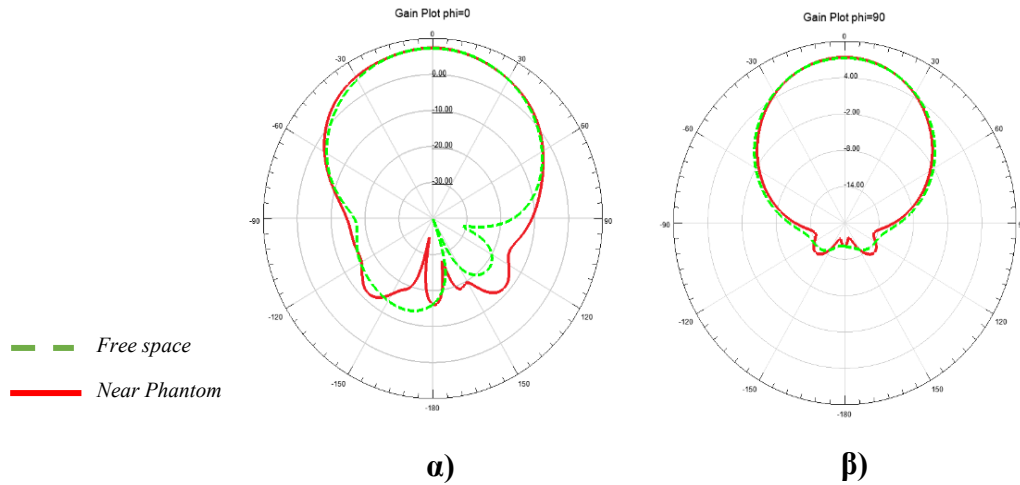
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με παρουσία του ανθρώπινου ομοιώματος. Για κάθε συχνότητα και τύπο κεραίας, MPA είτε ΗΜΜΡΑ παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης, τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας όπως και η κατανομή των τιμών SAR στο ανθρώπινο ομοίωμα. Επίσης, γίνεται σύγκριση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο και κοντά σε ομοίωμα.

Αποτελέσματα για f=2.4GHz

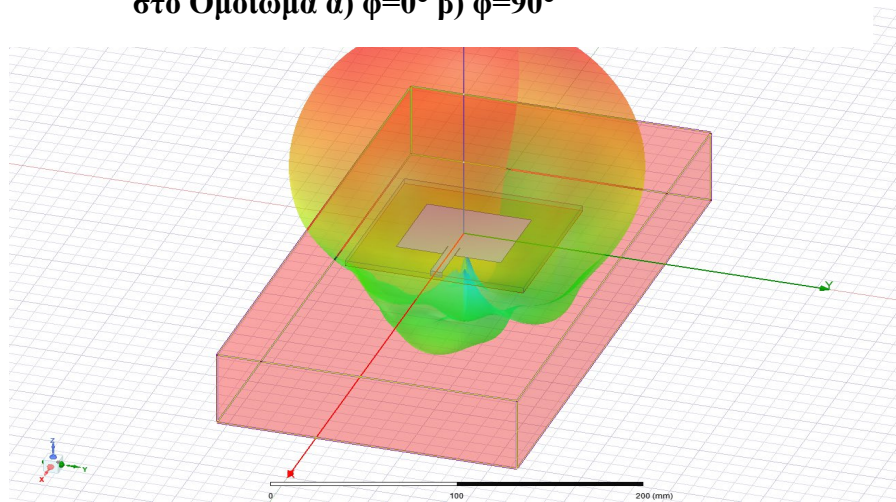
Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} για την MPA. Παρατηρούμε ότι ο συντονισμός της κεραίας MPA παρέμεινε στην συχνότητα ενδιαφέροντος ($f = 2.4GHz$). Επιπλέον παρατηρείται μία μείωση στο βάθος του S_{11} της τάξεως του 30%.

Εικόνα 4.2 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για την MPA στα f=2.4 GHz

Σχετικά με τα δισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή αλλοίωση σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο, προς την μεριά του σώματος, δηλαδή προς τα πίσω. Συμβαίνει λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το σώμα. Το κέρδος μετρήθηκε 5.37dB, μειώθηκε δηλαδή κατά 1.23%, πολύ μικρή μείωση, και η απόδοση ακτινοβολίας 60.73%, μειώθηκε δηλαδή κατά 5%. Στην Εικόνα 4.3 βλέπουμε το τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας, για την κεραία MPA. Παρατηρούμε ότι η πλειονότητα της ακτινοβολίας εκπέμπεται μακριά από το σώμα. εξ' ου και η MPA είναι κατάλληλη για off-body επικοινωνία και επιπλέον έχει χαμηλές τιμές SAR. Τέλος,

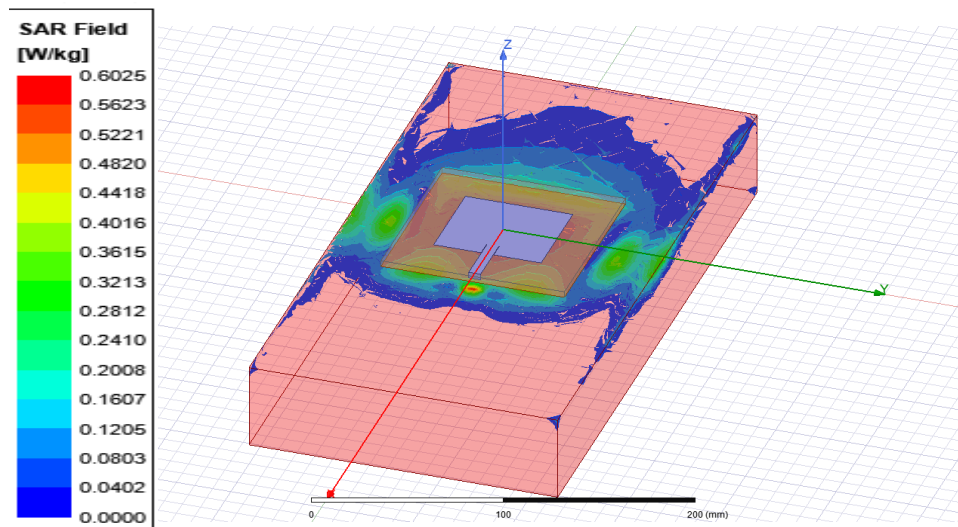


Εικόνα 4.3 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για την MPA στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$



Εικόνα 4.4 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας για την MPA κοντά στο σώμα για $f=2.4$ GHz

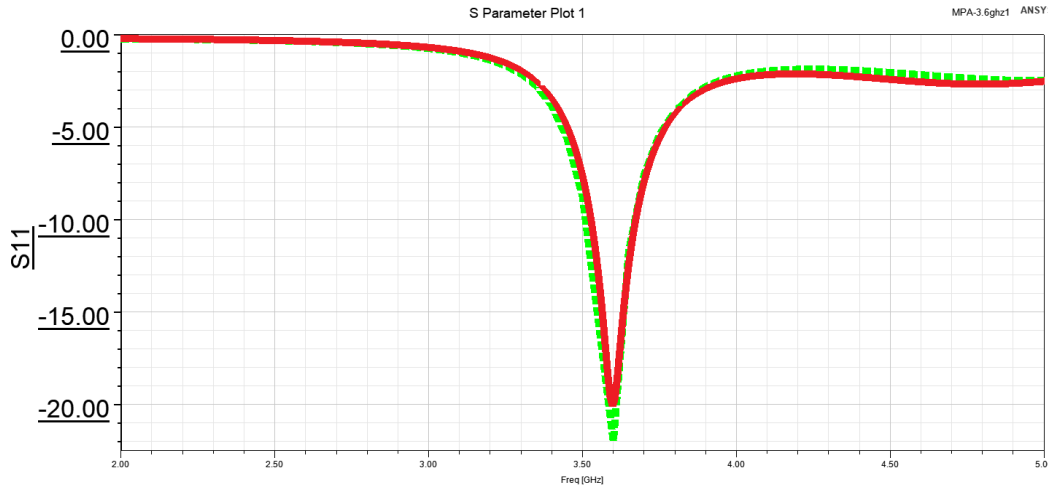
Στην Εικόνα 4.5 βλέπουμε τις τιμές του SAR_{Av10g} στο ομοίωμα. Η μέγιστη τιμή δεν ξεπερνά τα 0.49, η οποία παρατηρείται στην προβολή της πηγής τροφοδοσίας, πάνω στο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 4.5 Κατανομή τιμών SAR για την MPA στα $f=2.4$ GHz

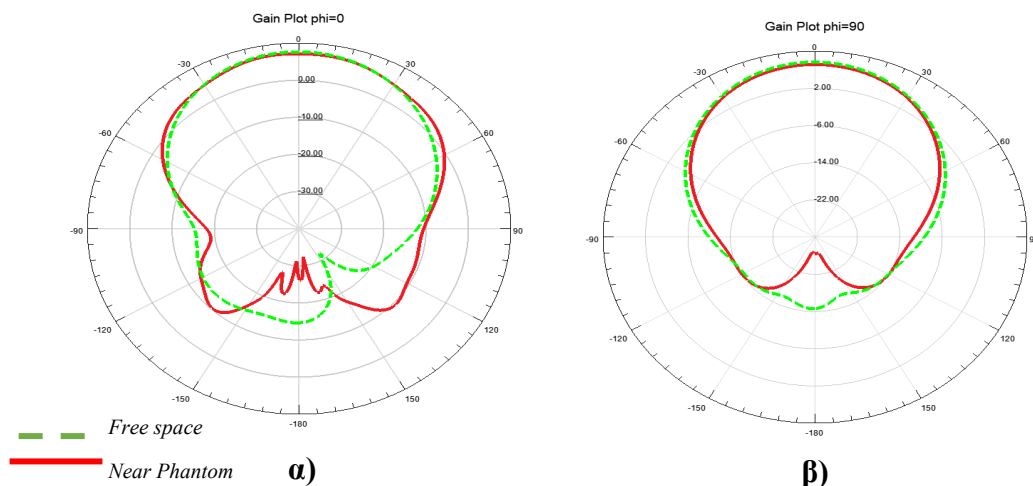
Αποτελέσματα για $f=3.6\text{GHz}$

Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} για την συχνότητα $f = 3.6\text{GHz}$. Η μείωση στο S_{11} είναι κατά 9.6%, μικρότερη από την μείωση στην περίπτωση για $f = 2.4\text{GHz}$. Φαίνεται ότι επηρεάζεται λιγότερο ο συντελεστής ανάκλασης της ίδια κεραίας για μεγαλύτερη συχνότητα.



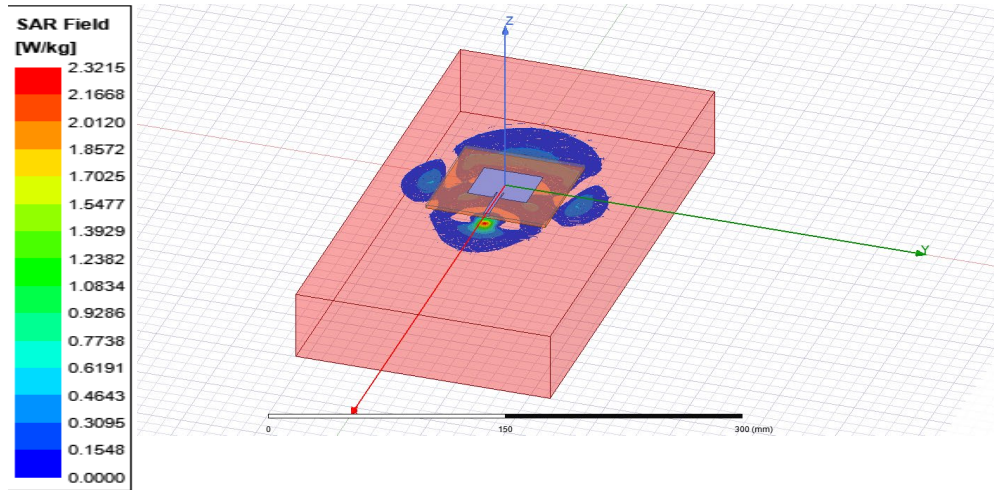
Εικόνα 4.6 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για την MPA στα $f=3.6\text{GHz}$

Αντίστοιχες αλλαγές παρατηρούμε και στα διαγράμματα ακτινοβολίας στα δισδιάστατο είτε στο τρισδιάστατο επίπεδο. Το ομοίωμα συνεχίζει να επηρεάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας ιδιαίτερα για $\varphi=0^\circ$. Το κέρδος μετρήθηκε 5.11dB, όπου σημειώθηκε μείωση κατά 11% σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο. Αντίστοιχα η απόδοση ακτινοβολίας μετρήθηκε 60.67% μείωση κατά 4%, δηλαδή στα ίδια επίπεδα με τις μετρήσεις για $f = 2.4\text{GHz}$.



**Εικόνα 4.7 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για την MPA στα $f=3.6\text{GHz}$ κοντά στο Ομοίωμα
α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$**

Οι τιμές του SAR στο ανθρώπινο σώμα φαίνονται στην Εικόνα 4.8. Η τιμή SAR_{Av10g} υπολογίστηκε στα 2.71, κάτω από την τροφοδοσία όπως και στην περίπτωση για $f = 2.4\text{GHz}$.

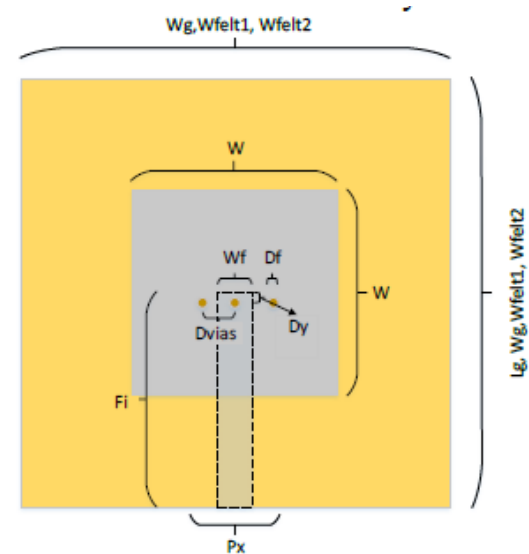


Εικόνα 4.8 Κατανομή τιμών SAR για την MPA στα $f=3.6$ GHz

4.2 Υψηλού Ρυθμού Μικροταινιακή Κεραία (HMMPA)

Στην συνέχεια τοποθετούμε την HMMPA κοντά στο ανθρώπινο ομοίωμα ώστε να μελετήσουμε την συμπεριφορά της. Οι διαστάσεις της φαίνονται στον Πίνακα 4.4 και τα υλικά της κεραίας στον Πίνακα 4.5.

Frequency	2.4 GHz	3.6 GHz
λ	125 mm	83.33 mm
L_p	31.12 mm ($\lambda/4$)	22 mm ($\lambda/3$)
W_f	6.5 mm	7 mm
L_1	31.25 mm	20.83 mm
H_{ground}	0.13 mm	0.13 mm
$h_{substrate1}$	2.9 mm	2.9 mm
$h_{substrate2}$	1.1 mm	1.1 mm
D_f	1 mm	1 mm
D_{vias}	4.5 mm	4.5 mm
W_g	63.5 mm	42 mm



Εικόνα 4.9 Κάτοψη κεραίας HMMPA

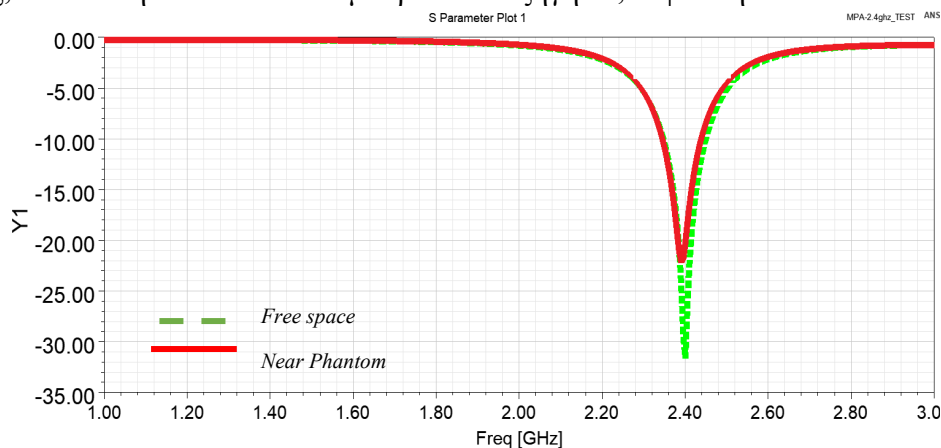
Πίνακας 4.4 Διαστάσεις για την HMMPA κοντά σε Ομοίωμα

Υλικό	Κομμάτι κεραίας	Ηλεκτρικές Ιδιότητες
Felt	Υπόστρωμα	$\epsilon_r = 1.23, \tan\delta = 0.022$
NoraDell	Patch/Feedline/Ground	$\sigma = 1.54e + 006 S/m$

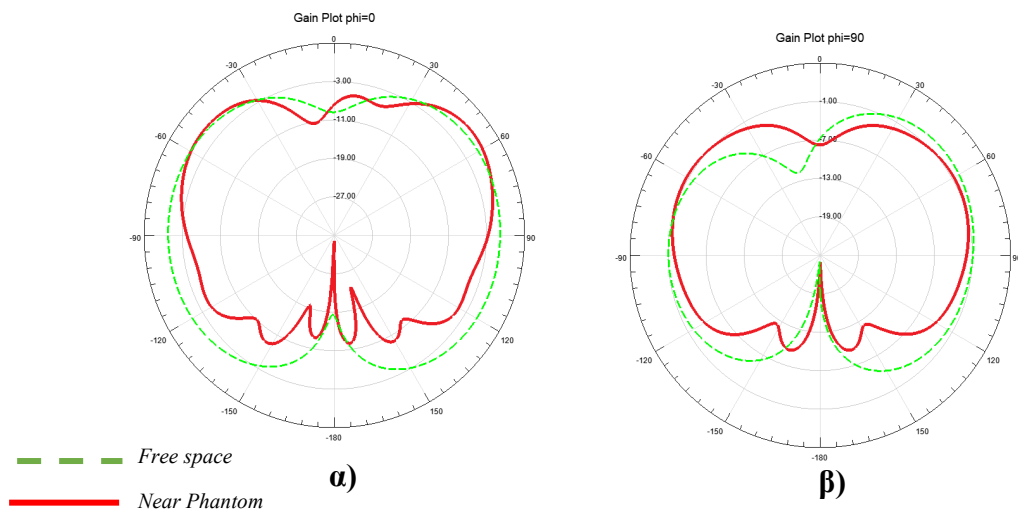
Πίνακας 4.5 Υλικά για την HMMPA κοντά σε Ομοίωμα

Αποτελέσματα για $f=2.4\text{GHz}$

Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} για την ΗΜΜΡΑ στα $f = 2.4\text{ GHz}$. Αντίστοιχα δεν επηρεάστηκε ο συντονισμός της κεραίας. Σχετικά με τα διαγράμματα ακτινοβολίας στην Εικόνα 4.11 παρατηρούμε σε περισσότερα σημεία, ιδιαίτερα στην περιοχή που βρίσκεται το σώμα, αλλοίωση στην καμπύλη του διαγράμματος, σε σχέση με την ΜΡΑ. Αυτό συμβαίνει διότι η ΗΜΜΡΑ ακτινοβολεί ομοιοκατευθυντικά, επομένως η επίδραση του σώματος είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ΜΡΑ που ακτινοβολεί προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ΗΜΜΡΑ επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την παρουσία του ανθρώπινου σώματος, απ'ότι η ΜΡΑ. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, αφού η ΗΜΜΡΑ εκπέμπει μεγαλύτερη



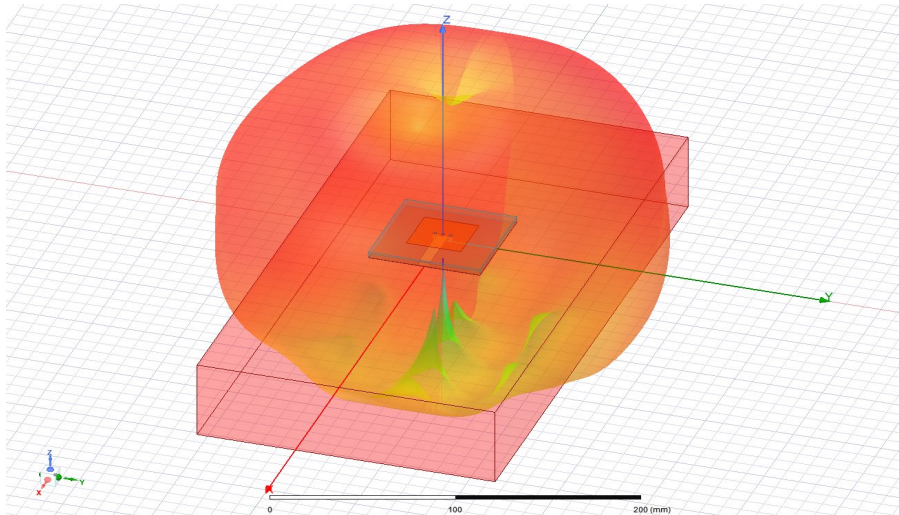
Εικόνα 4.10 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4\text{ GHz}$ κοντά στο Ομοίωμα



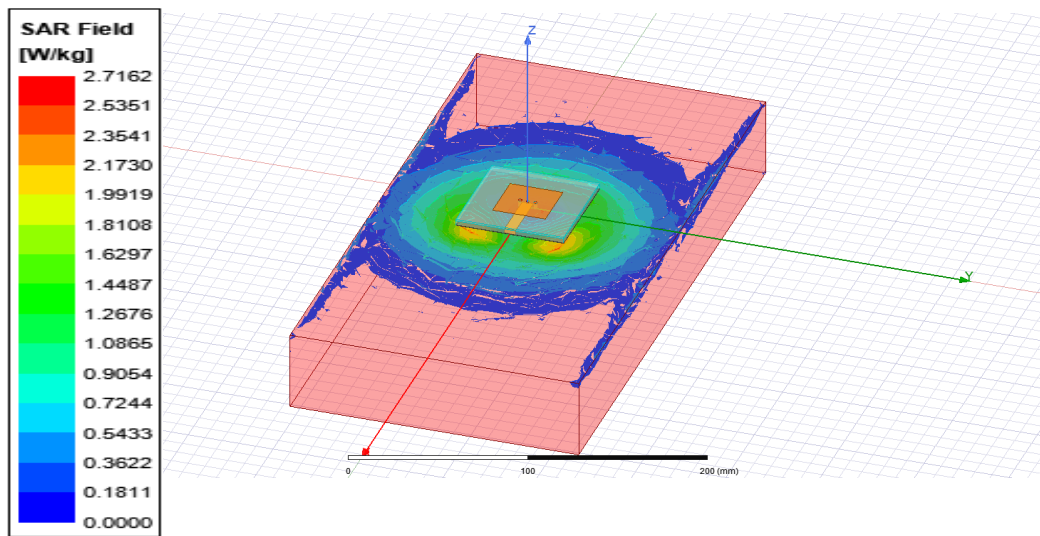
Εικόνα 4.11 Διαγράμματα ακτινοβολίας για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4\text{ GHz}$ κοντά στο Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

ακτινοβολία προς το σώμα έναντι της ΜΡΑ. Εξ'ού και η χρήση της για επικοινωνία ανάμεσα σε συσκευές πάνω στο σώμα. Το κέρδος μετρήθηκε 1.37dB , δηλαδή παρουσίασε αύξηση κατά 15.25% σε σχέση με τις προσομοιώσεις στον ελεύθερο χώρο. Αυτό ενδέχεται να συμβεί, διότι το ανθρώπινο σώμα αυξάνει την κατευθυντικότητα της κεραίας λόγω των ηλεκτρικών του χαρακτηριστικών. Η

απόδοση ακτινοβολίας μετρήθηκε 50.63%. Παρατηρείται μείωση 18.22%, αρκετά μεγαλύτερη από την MPA, για τον ίδιο λόγο που αυξήθηκε η μείωση στην τιμή του S_{11} , λόγω μεγαλύτερης επίδρασης του σώματος στην μικροταινιακή κεραία HMMPA. Οι τιμές του SAR στο ανθρώπινο ομοίωμα φαίνονται στην Εικόνα 4.13. Η μέγιστη τιμή SAR_{Av10g} είναι 1.86. Οι τιμές αυτές παρατηρούνται κάτω από τα καλώδια του επιπέδου γείωσης. Ο δείκτης SAR για την HMMPA είναι πιο υψηλός συγκριτικά με την HMPA, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την μεγαλύτερη επίδραση του σώματος στην συγκεκριμένου τύπου κεραία.



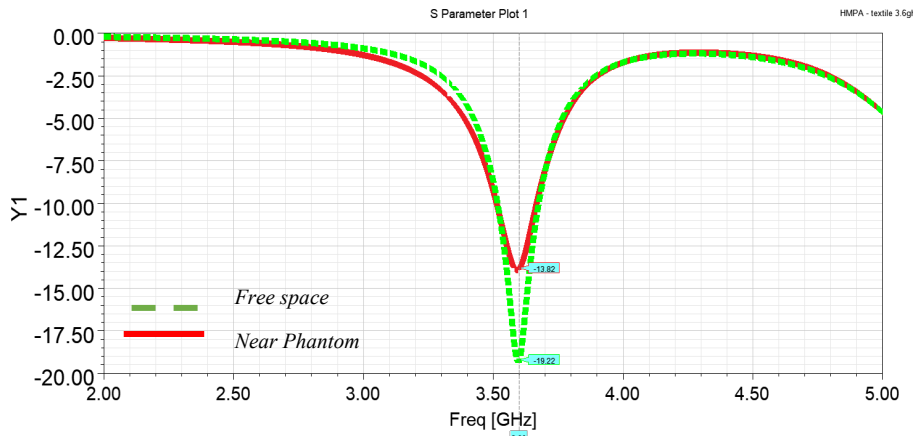
Εικόνα 4.12 3D Διάγραμμα ακτινοβολίας για την HMMPA στα $f=2.4$ GHz κοντά στο Ομοίωμα



Εικόνα 4.13 Κατανομή SAR για την HMMPA στα $f=2.4$ GHz

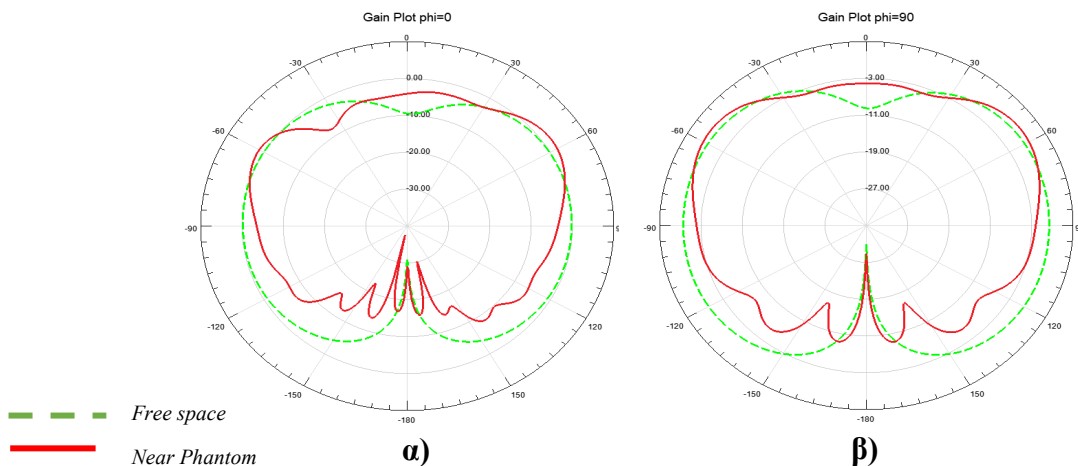
Αποτελέσματα $f=3.6GHz$

Στην περίπτωση της HMMPA για $f = 3.6 GHz$ αντίστοιχα η κεραία παρέμεινε συντονισμένη στην συχνότητα ενδιαφέροντος. Η τιμή του συντελεστή ανάκλασης S_{11} υπολογίστηκε 12.5 dB.

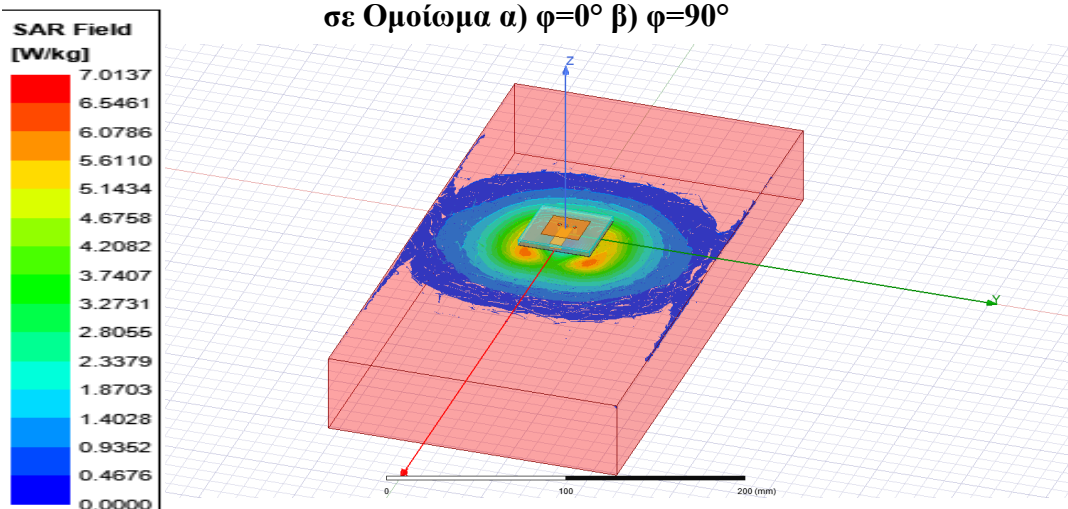


Εικόνα 4.14 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} HMPA $f=3.6$ GHz κοντά σε Phantom

Σχετικά με τα διαγράμματα ακτινοβολίας, παρατηρούμε τις ίδιες αλλαγές με την περίπτωση για $f = 2.4$ GHz, δηλαδή αλλοίωση του διαγράμματος ακτινοβολίας ιδιαίτερα προς την πλευρά του σώματος. Η απόδοση ακτινοβολίας υπολογίστηκε 52.42% δηλαδή μείωση κατά 23.56% μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση για $f = 2.4$ GHz.



Εικόνα 4.15 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για την HMPA στα $f=3.6$ GHz κοντά σε Ομοίωμα α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$



Εικόνα 4.16 Κατανομή SAR για την HMPA στα $f=3.6$ GHz

Η κατανομή SAR στο ανθρώπινο ομοίωμα φαίνονται στην Εικόνα 4.16. Η μέγιστη τιμή του SAR είναι 7.01 W/kg συγκριτικά με 1.81 W/kg που υπολογίστηκε για $f = 2.4\text{GHz}$ και παρατηρήθηκε αντίστοιχα κάτω από τα καλώδια του επιπέδου γείωσης.

4.3 Συμπεράσματα

Όπως περιγράψαμε και στην ενότητα 3.2.3 ενόψει της σχεδίασης μίας φορετής κεραίας που λειτουργεί κοντά στο σώμα, βασική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας της κεραίας. Η μεγάλη ηλεκτρική επιτρεπτότητα των βιολογικών ιστών τα καθιστούν ιδιαίτερα απορροφητικά στην ακτινοβολία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση ακτινοβολίας. Η μείωση αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι και το 23.5%, με ιδιαίτερα αισθητά αποτελέσματα σε επίπεδο απόδοσης της κεραίας. Αντίστοιχα, όπως έχουμε εξηγήσει, ο δείκτης SAR είναι κρίσιμος για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας προς τον χρήστη. Συγκεκριμένα στην περίπτωση της ΗΜΜΡΑ για $f = 3.6\text{GHz}$ είναι εκτός των προβλεπόμενων ορίων. Στον Πίνακα 4.6 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας για την κάθε κεραία.

	$\Delta\text{gain}(\%)$	Απόδοση Ακτινοβολίας(%) / $\Delta\eta(\%)$		SAR
MPA				
F=2.4GHz	-1.23	60.73	-5.14	0.49
F=3.6GHz	-11.30	60.67	-4.02	1.86
ΗΜΜΡΑ				
F=2.4GHz	+15.25	50.64	-18.23	2.71
F=3.6GHz	-21.11	52.43	-23.56	7.01

Πίνακας 4.6 Συγκεντρωτικές Τιμές Παραμέτρων Ακτινοβολίας κοντά στο σώμα

Παρατηρούμε ότι, μεγάλη απώλεια στην απόδοση ακτινοβολίας έχουμε στην ΗΜΜΡΑ όπως και αυξημένες τιμές του δείκτη SAR. Αυτό συμβαίνει διότι η ΗΜΜΡΑ είναι κατάλληλη για on-body επικοινωνία, δηλαδή ακτινοβολεί παράλληλα προς το σώμα, ενώ η ΜΡΑ είναι κατάλληλη για off-body επικοινωνία, επομένως και ακτινοβολεί κάθετα – μακριά προς το σώμα. Επομένως μεγαλύτερο κομμάτι της Η/Μ απορροφάται από το ανθρώπινο σώμα στην ΗΜΜΡΑ απ' ό,τι την ΜΡΑ. Έτσι δικαιολογείται και η μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση ακτινοβολίας, αλλά και οι υψηλές τιμές του SAR σε σχέση με την ΜΡΑ. Επομένως είναι ανάγκη, να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να μειωθούν οι τιμές SAR για την κεραία ΗΜΜΡΑ. Επιπλέον, είναι ανάγκη να αυξηθεί και η απόδοση ακτινοβολίας ώστε να είναι μια αποδοτική κεραία για πληθώρα εφαρμογών 5G. Αυτό θα μελετήσουμε στη συνέχεια.

5 Φορετή κεραία βέλτιστης επίδοσης και περιορισμένου SAR

5.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, η ΗΜΜΡΑ λόγω του τρόπου με τον οποίο ακτινοβολεί, επηρεάζεται ιδιαίτερα από το ανθρώπινο σώμα και οδηγεί σε αυξημένες τιμές SAR. Επομένως είναι ανάγκη, από την μία να διατηρηθεί η επίδοση της κεραίας, και από την άλλη να μειωθεί η ποσότητα της Η/Μ ενέργειας που απορροφά το ανθρώπινο σώμα.

Για τον σκοπό αυτό, στην παρούσα διπλωματική, θα χρησιμοποιήσουμε την τεχνική αύξησης των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης για να οδηγηθούμε στα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς έχει αποδειχθεί ότι είναι αρκετά αποδοτική [27], [34]. Όντως, η εν λόγω τεχνική μείωσης του SAR ενέχει σχετικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων προτεινόμενων τεχνικών, αφού διατηρεί την συμπεριφορά της κεραίας, δεν αυξάνει το βάρος της, δεν επιβαρύνει το κόστος κατασκευής και τέλος δεν μειώνει τη φορετότητα της κεραίας.

5.2 Περιγραφή Διαδικασίας

Το επίπεδο γείωσης στην κεραία ΗΜΜΡΑ το οποίο έχει μήκος και πλάτος W_g και L_g αντίστοιχα, αυξάνεται συμμετρικά κατά 10 φορές με βήμα $\lambda/10$. Επομένως προκύπτουν 10 νέα μοντέλα κεραίων (AM1 μέχρι AM10), όπου όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις της ΗΜΜΡΑ (γραμμή τροφοδοσίας, patch, υπόστρωμα, καλώδια), παραμένουν οι ίδιες. Ως κεραία αναφοράς επιλέξαμε την κεραία ΗΜΜΡΑ (Κεφάλαιο 4) σε δύο διαφορετικές συχνότητες $f = 2.4/3.6GHz$.

Οι παράμετροι που μελετάμε και εκτιμούμε αφορούν τη μεταβολή του SAR και της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας, οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\Delta SAR_i = \frac{SAR_o - SAR_i}{SAR_o} * 100[\%], \quad i = 0 \dots 10 \quad (\text{Εξ 5-1})$$

$$\Delta e_i = \frac{e_o - e_i}{e_o} * 100[\%], \quad i = 0 \dots 10 \quad (\text{Εξ 5-2})$$

$$\Delta e_i^{fs} = \frac{e_o^{fs} - e_i^{fs}}{e_o^{fs}} * 100[\%], \quad i = 0 \dots 10 \quad (\text{Εξ 5-3})$$

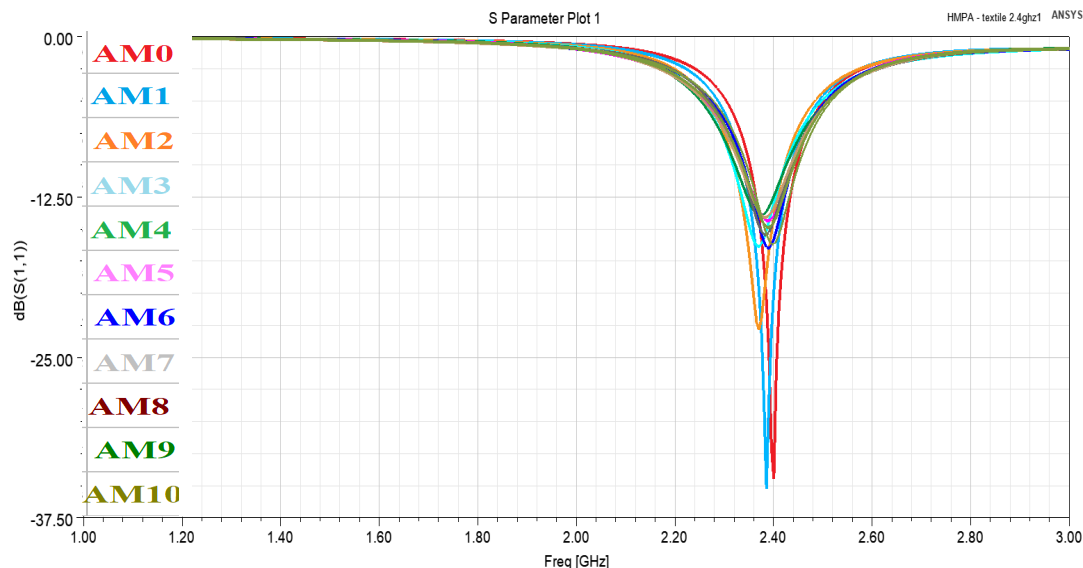
$$\Delta e_i^{ph} = \frac{e_o^{ph} - e_i^{ph}}{e_o^{ph}} * 100[\%], \quad i = 0 \dots 10 \quad (\text{Εξ 5-4})$$

$$\Delta e_i = \frac{e_i^{fs} - e_i^{ph}}{e_i^{fs}} * 100[\%], \quad i = 0 \dots 10 \quad (\text{Εξ 5-5})$$

όπου e_o^{fs} και e_o^{ph} είναι η απόδοση ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο και με παρουσία phantom αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για την κάθε συχνότητα.

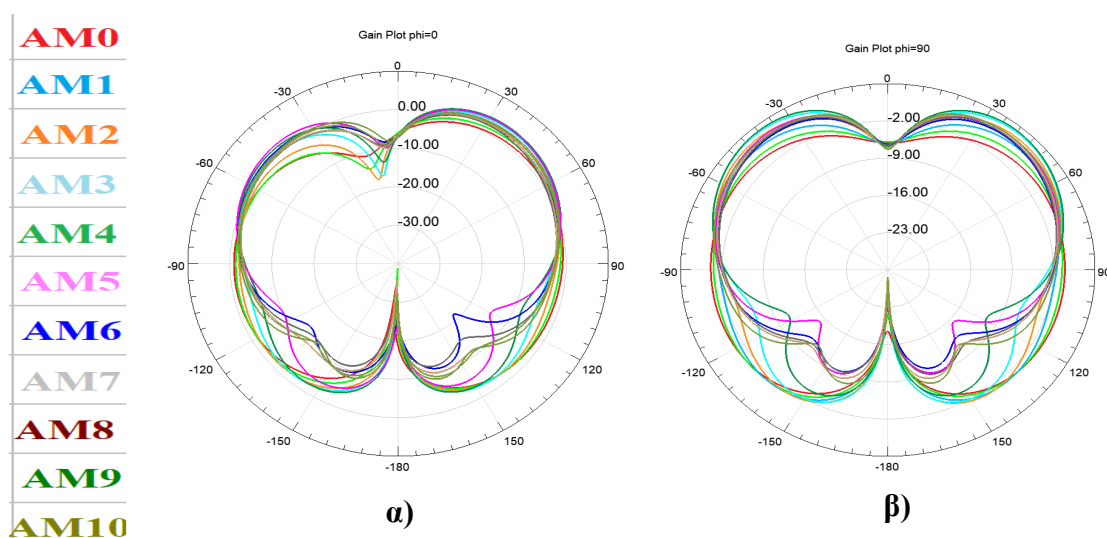
Αποτελέσματα για $f=2.4\text{GHz}$

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης S_{11} για κάθε μοντέλο κεραίας AM1-AM10 στον ελεύθερο χώρο. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του επιπέδου γείωσης οι τιμές του συντελεστή ανάκλασης επηρεάζονται και επιπλέον η συχνότητα συντονισμού παρουσιάζει



Εικόνα 5.1 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 στον Ελεύθερο Χώρο στα $f=2.4\text{ GHz}$

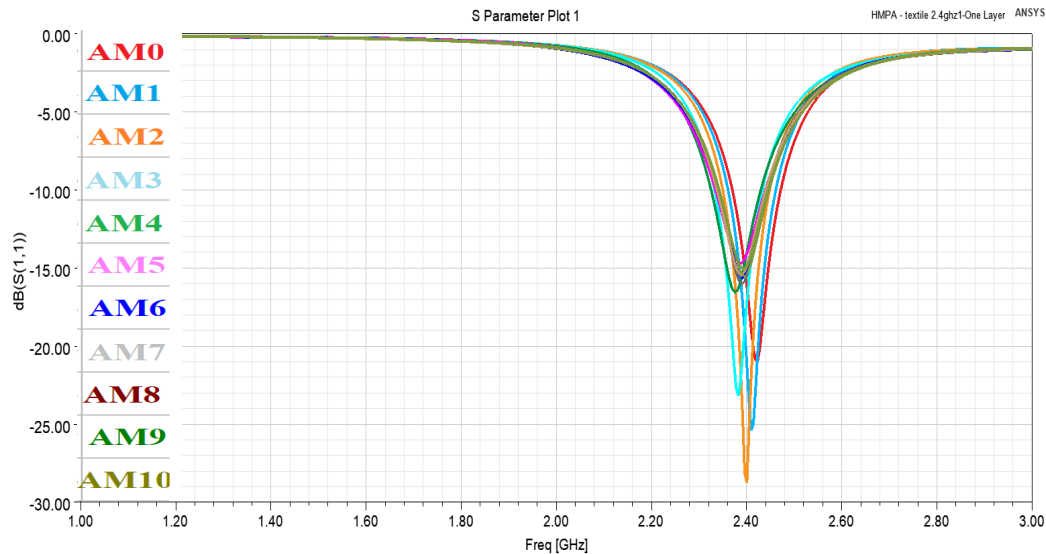
μικρές μετατοπίσεις σχετικά με την συχνότητα ενδιαφέροντος. Με βάση τα διαγράμματα ακτινοβολίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1 αντιλαμβανόμαστε ότι όσο αυξάνεται το επίπεδο γείωσης, η ακτινοβολία προς τη μεριά του χρήστη μειώνεται αισθητά. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα ακτινοβολίας αφού στην περιοχή $-120^\circ < \varphi < 120^\circ$ παρατηρείται στην καμπύλη του διαγράμματος συμπίεση προς τα μέσα. Ιδιαίτερα μειωμένη είναι για την AM5, που αντιστοιχεί σε



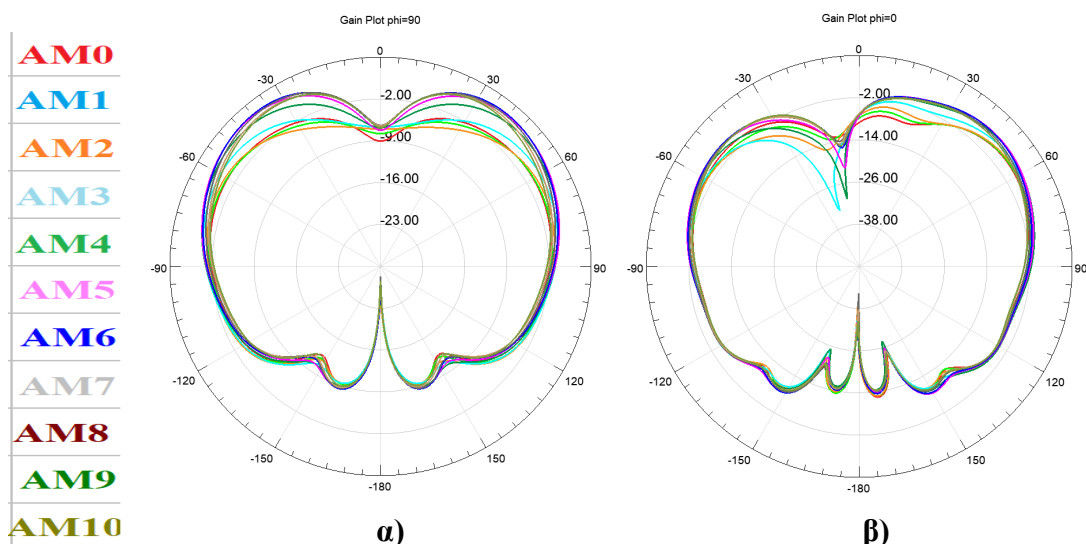
Εικόνα 5.2 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 στον Ελεύθερο χώρο στα $f=2.4\text{ GHz}$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

αύξηση του επιπέδου γείωσης κατά $\lambda/2$. Επιπλέον ενισχύεται η κατευθυντικότητα της κεραίας, αφού στην περιοχή $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ έχουμε διόγκωση του διαγράμματος ακτινοβολίας.

Όταν τοποθετηθεί η κεραία κοντά στο ανθρώπινο σώμα και γίνουν οι αντίστοιχες αλλαγές στο επίπεδο γείωσης έχουμε αντίστοιχα μεταβολές στις τιμές του S_{11} . Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι για AM1, AM2, και AM3, υπάρχει βελτίωση του συντελεστή ανάκλασης ενώ γενικά παρατηρούνται μικρές μετατοπίσεις του S_{11} . Αντίστοιχα με βάση τα διαγράμματα ακτινοβολίας στην Εικόνα 5.4 παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία προς τη μεριά του χρήστη μειώνεται όπως και στον



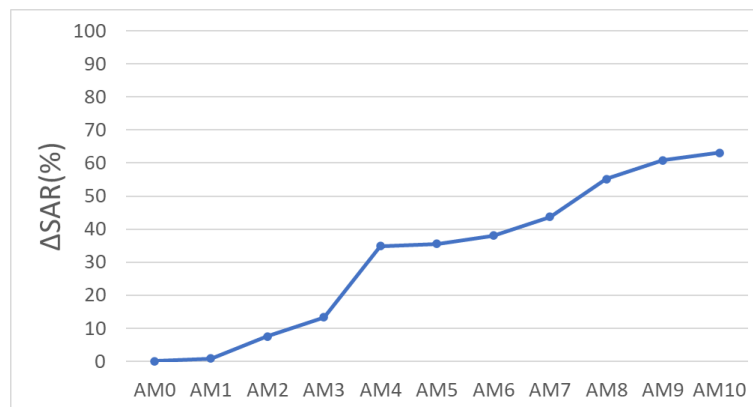
Εικόνα 5.3 Συντελεστής Ανάκλασης-για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 με Ομοίωμα στα $f=2.4$ GHz



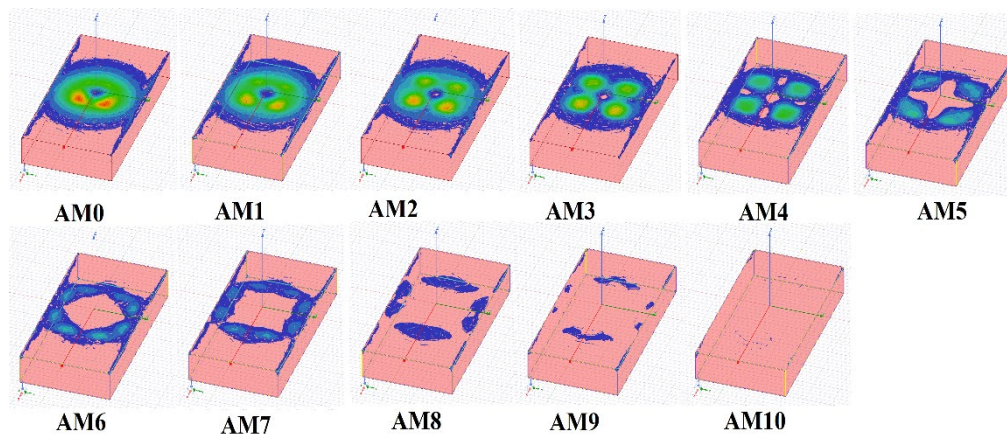
Εικόνα 5.4 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 με Ομοίωμα στα $f=2.4$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

ελεύθερο χώρο, λιγότερο βέβαια, ενώ η κατευθυντικότητα της κεραίας αυξάνεται, διότι στην περιοχή $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ του διαγράμματος ακτινοβολίας έχουμε διόγκωση της καμπύλης του διαγράμματος.

Η μείωση του SAR για την ΗΜΜΡΑ $f = 2.4\text{GHz}$ φαίνεται στην Εικόνα 5.5. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μείωση ίση με 63.07% στο μοντέλο κεραίας που έχει αυξηθεί το έδαφος κατά λ . Στην AM5 με αύξηση κατά $\lambda/2$ παρατηρούμε μείωση κοντά στο 40%. Αντίστοιχα στην Εικόνα 5.6 παρατηρούμε την μείωση των τιμών SAR πάνω στο ομοίωμα για κάθε βήμα αύξησης του επιπέδου γείωσης. Φαίνεται ότι στην περίπτωση της ΗΜΜΡΑ για $f = 2.4\text{GHz}$ σχεδόν μηδενίζεται η ακτινοβολία επάνω στο ομοίωμα.



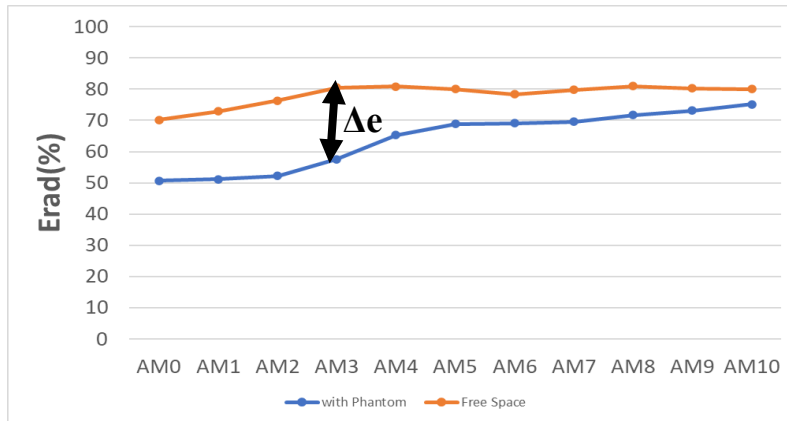
Εικόνα 5.3 Καμπύλη μείωσης SAR-για την ΗΜΜΡΑ στα $f=2.4\text{GHz}$



Εικόνα 5.4 Μείωση SAR για την ΗΜΜΡΑ επάνω στο ομοίωμα στα $f=2.4\text{GHz}$

Στην Εικόνα 5.7 καταγράφουμε την αύξηση της απόδοσης ακτινοβολίας για κάθε βήμα αύξησης του επιπέδου γείωσης στον ελεύθερο χώρο και με παρουσία του ανθρώπινου ομοιώματος. Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνεται το επίπεδο γείωσης, είτε στον ελεύθερο χώρο – είτε με παρουσία ανθρώπινου σώματος η απόδοση ακτινοβολίας αυξάνεται. Συγκεκριμένα, στον ελεύθερο χώρο παρουσιάστηκε μέγιστη αύξηση κατά απόλυτη τιμή ίση με 10.90% στο μοντέλο κεραίας AM10, ενώ με την παρουσία ομοιώματος κατά 24.56% στο μοντέλο AM4. Στο μοντέλο κεραίας AM5 που

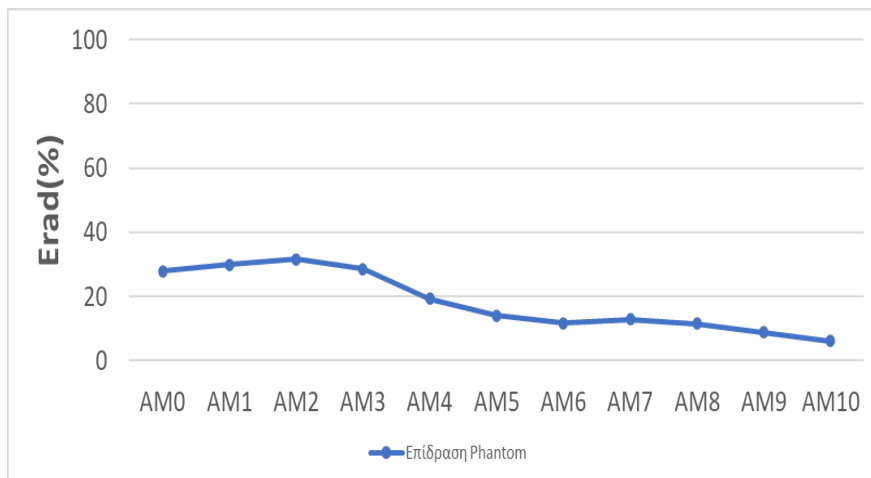
αντιστοιχεί σε αύξηση $\lambda/2$ έχουμε αύξηση κατά 9.94% στον ελεύθερο χώρο και 18.2% με παρουσία του σώματος αντίστοιχα.



Εικόνα 5.5 Απόδοση Ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=2.4\text{GHz}$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός πώς το Δe , δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στην απόδοση ακτινοβολίας για κάθε μοντέλο κεραίας σε ελεύθερο χώρο και με παρουσία ανθρώπινου ομοιώματος, όσο το επίπεδο γείωσης μεγαλώνει, αντίστοιχα μειώνεται. Συγκεκριμένα φτάνει μέγιστη τιμή 24% για το AM3 και έπειτα συνεχώς μειώνεται. Συνεπώς, δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη επίδραση στην διαφορά σε επίπεδο αύξησης της απόδοσης ακτινοβολίας ανάμεσα στις προσομοιώσεις στον ελεύθερο χώρο και στο ομοίωμα, όσο αυξάνεται το επίπεδο εδάφους.

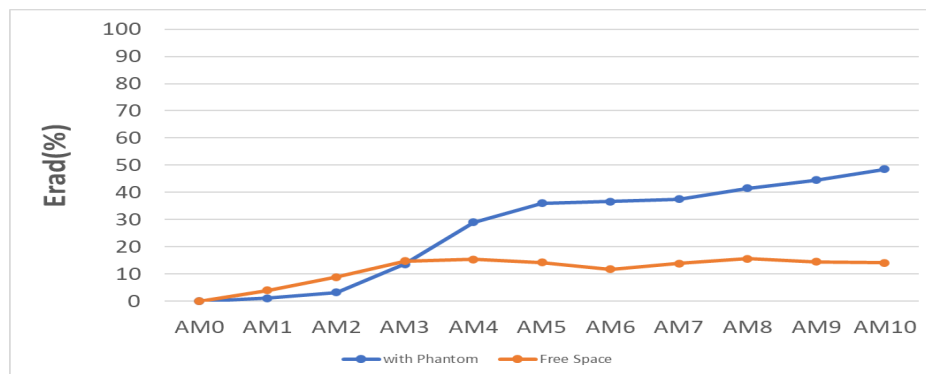
Επομένως, η αύξηση του αγώγιμου εδάφους κάνει την κεραία λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία του ανθρώπινου σώματος. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα στην Εικόνα 5.8, όπου φαίνεται η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση της κεραίας HMMPA για $f = 2.4\text{GHz}$. Όσο μεγαλώνει το επίπεδο γείωσης, τόσο μειώνεται η επίδραση του, δηλαδή η μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας της κεραίας. Συγκεκριμένα, η επίδραση του ανθρώπινου σώματος



Εικόνα 5.6 Επίδραση Phantom στην Απόδοση Ακτινοβολίας στα $f=2.4\text{GHz}$

στην ακτινοβολία της κεραίας από το 27.80% μειώνεται στο 6.05% για το μοντέλο κεραίας AM10. Για το μοντέλο κεραίας AM5 ίσο με $\lambda/2$ αύξηση, η επίδραση του ανθρώπινου σώματος είναι 14.04%.

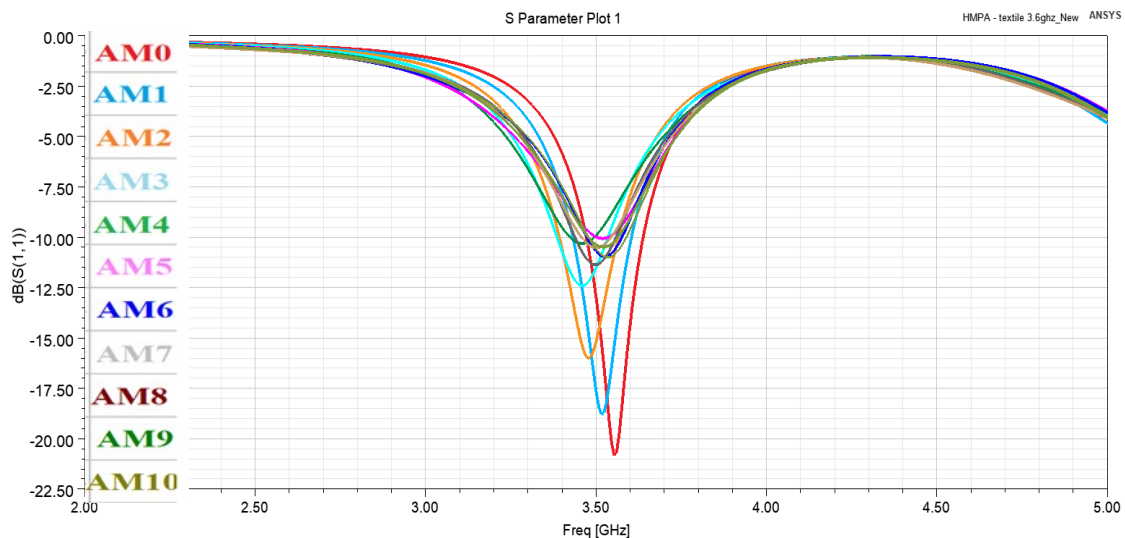
Στην Εικόνα 5.7 βλέπουμε την αύξηση της απόδοσης ακτινοβολίας ποσοστιαία σε κάθε μοντέλο κεραίας. Είναι ξεκάθαρο πώς με την παρουσία ανθρώπινου σώματος, η αύξηση στην απόδοση ακτινοβολίας αγγίζει το 48.51%, ποσοστό ιδιαίτερα μεγάλο, ενώ στον ελεύθερο χώρο το 15.54%. Επομένως αντιλαμβανόμαστε ότι ανά βήμα αύξησης του επιπέδου γείωσης υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση ακτινοβολίας με παρουσία του σώματος.



Εικόνα 5.7 Ενίσχυση απόδοσης ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=2.4\text{GHz}$

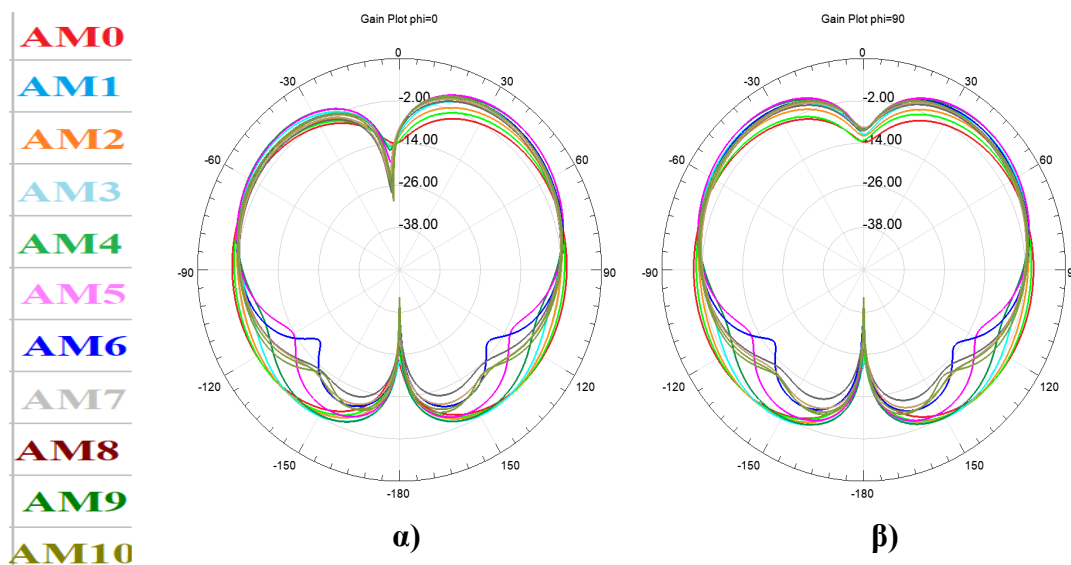
Αποτελέσματα για $f=3.6\text{GHz}$

Αρχικά παρουσιάζεται ο συντελεστής ανάκλασης για κάθε μοντέλο κεραίας στον ελεύθερο χρόνο για $f = 3.6\text{GHz}$. Αντίστοιχα με τα αποτελέσματα στην συχνότητα των 2.4GHz , υπάρχουν κάποιες μικρές μετατοπίσεις της συχνότητας συντονισμού γύρω από την συχνότητα ενδιαφέροντος.



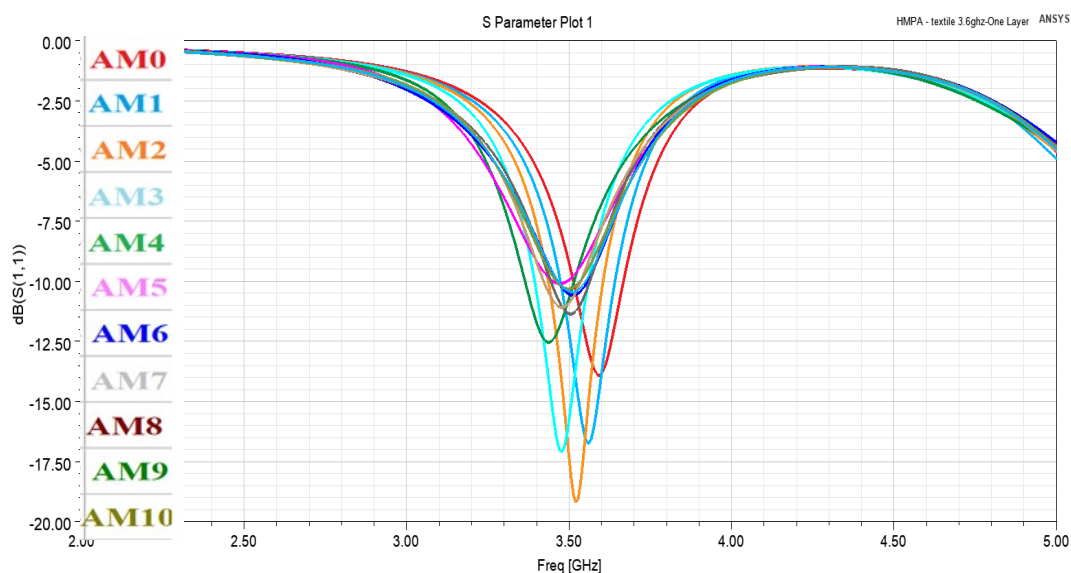
Εικόνα 5.8 Συντελεστής Ανάκλασης S_{11} για τα μοντέλα κεραίων AM1-AM10 Free Space $f=3.6\text{GHz}$

Με βάση τα διαγράμματα ακτινοβολίας στην Εικόνα 5.9 παρατηρείται μείωση στην ακτινοβολία προς τα πίσω όσο αυξάνεται το επίπεδο γείωσης, αφού στην περιοχή $-120^\circ < \varphi < 120^\circ$ παρατηρείται στην καμπύλη του διαγράμματος συμπίεση προς τα μέσα. Επιπλέον, στην περιοχή $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ έχουμε διόγκωση του διαγράμματος ακτινοβολίας, επομένως αυξάνεται η κατευθυντικότητα της κεραίας.



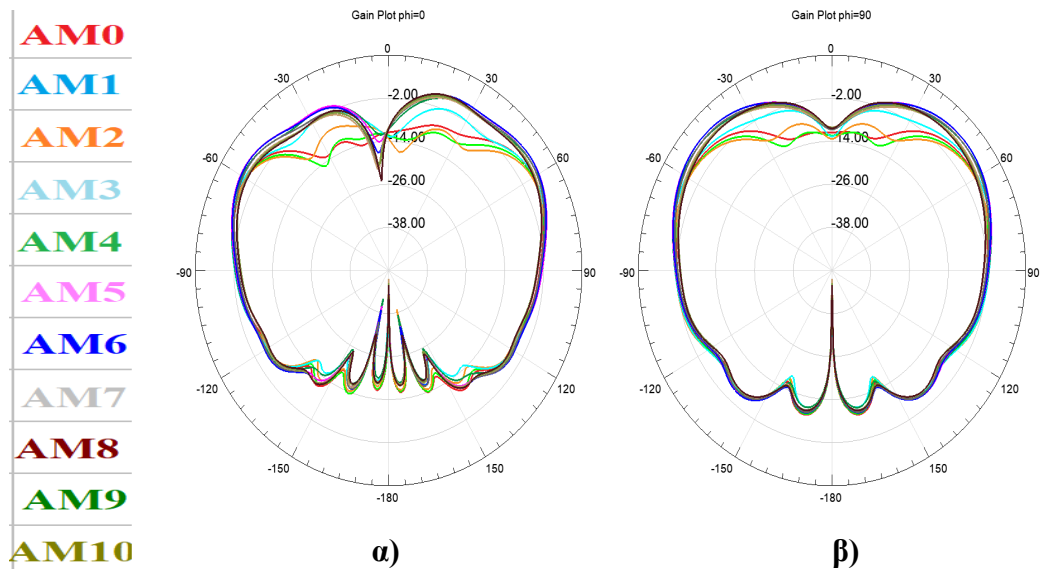
Εικόνα 5.9 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για AM1-AM10 στον Ελεύθερο Χώρο στα $f=3.6$ GHz α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

Τοποθετώντας την κεραία κοντά στο ανθρώπινο σώμα παρατηρούμε αντίστοιχα με την περίπτωση για $f=2.4$ GHz παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα παρατηρείται, βελτίωση για AM1-3, ενώ για AM4-10 ακολουθεί την συμπεριφορά στον ελεύθερο χώρο. Αντίστοιχα με βάση τα



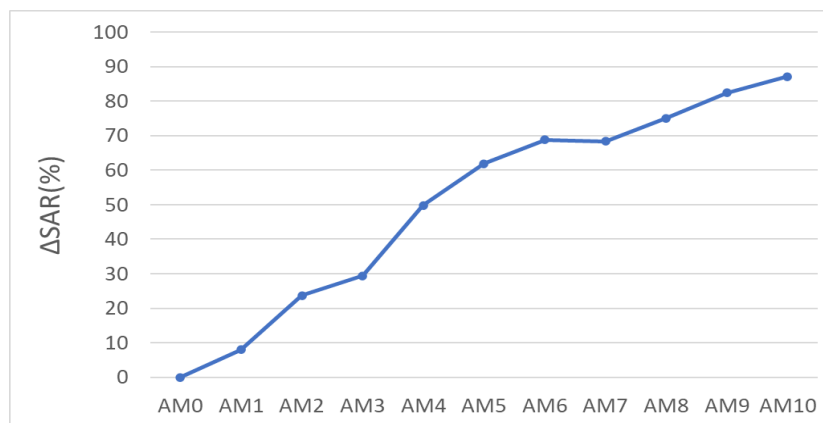
Εικόνα 5.10 Συντελεστής Ανάκλασης Ισχύος για τα μοντέλα κεραιών AM1-AM10 με Ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz

διαγράμματα ακτινοβολίας στην Εικόνα 5.11 παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία προς την πλευρά του ομοιώματος μειώνεται (συμπίεση του διαγράμματος στην περιοχή $-120^\circ < \varphi < 120^\circ$), λιγότερο βέβαια σε σχέση με την περίπτωση για $f = 2.4GHz$, αλλά υπάρχει μείωση και επιπλέον η κατευθυντικότητα της κεραίας επίσης αυξάνεται (διόγκωση του διαγράμματος στην περιοχή $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$).



Εικόνα 5.11 Διαγράμματα Ακτινοβολίας για AM1-AM10 με phantom $f=3.6GHz$ α) $\varphi=0^\circ$ β) $\varphi=90^\circ$

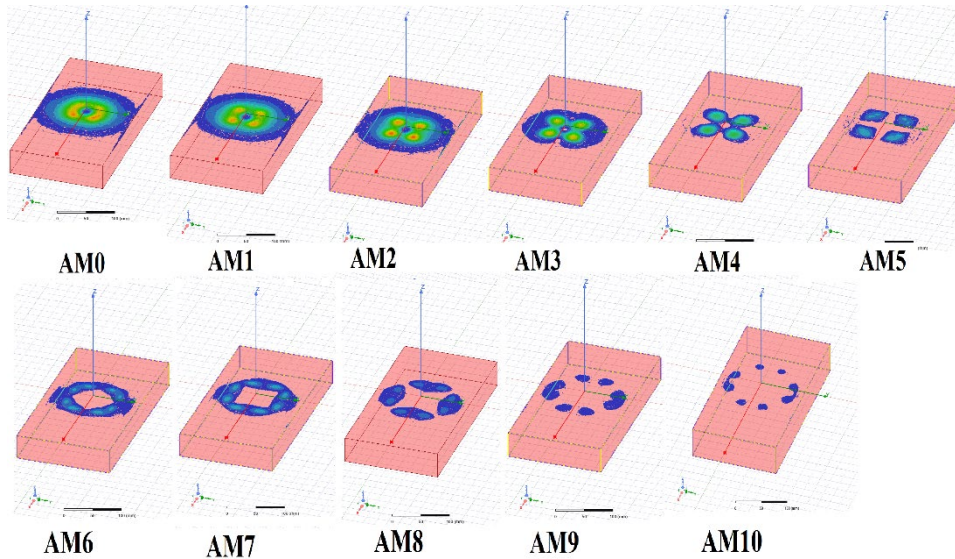
Η μείωση του SAR σε κάθε μοντέλο κεραίας φαίνεται στην Εικόνα 5.12. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μείωση έως και 87.11% στην τιμή του SAR για το μοντέλο AM10. Για το μοντέλο κεραίας AM5 έχουμε μείωση του δείκτη SAR κατά 61.87%. Σε σύγκριση με την περίπτωση για $f = 2.4GHz$



Εικόνα 5.12 Μείωση SAR-HMMPA $f=3.6GHz$

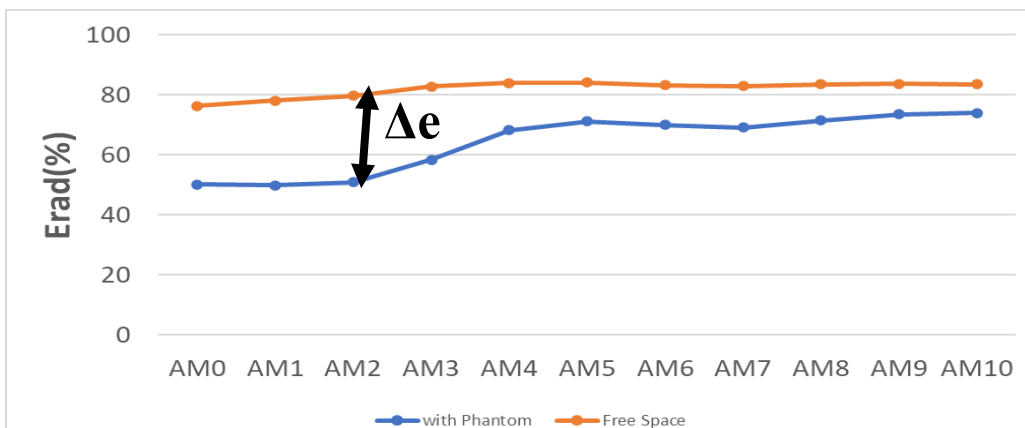
καταγράφεται μεγαλύτερη μείωση SAR. Επομένως, η αύξηση του επιπέδου γείωσης ως τεχνική μείωσης του SAR έχει πιο μεγάλη επίδραση στην προστασία του σώματος για $f=3.6GHz$, συγκριτικά με την περίπτωση για $f=2.4GHz$. Αντίστοιχα στην Εικόνα 5.13 παρατηρούμε την μείωση των τιμών

SAR πάνω στο ομοίωμα για κάθε βήμα αύξησης του επιπέδου γείωσης. Στο μοντέλο AM10 η ακτινοβολία επάνω στο σώμα είναι ανεπαίσθητη.



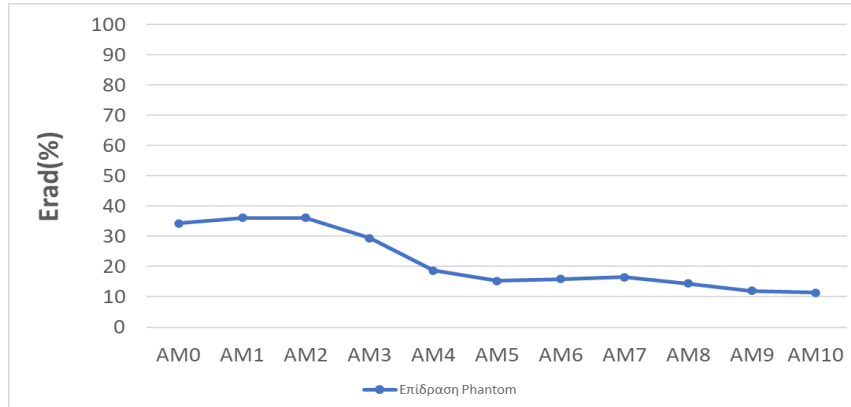
Εικόνα 5.13 Μείωση SAR για την ΗΜΜΡΑ επάνω στο ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz

Στην Εικόνα 5.14 καταγράφουμε αντίστοιχα την αύξηση της απόδοσης ακτινοβολίας για κάθε βήμα αύξησης του εδάφους. Παρατηρούμε ακριβώς τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε ποιοτικό επίπεδο με τις προσομοιώσεις για $f=2.4$ GHz. Η απόδοση ακτινοβολίας αυξήθηκε κατά 24.05% στο μοντέλο κεραίας AM10 με παρουσία ανθρώπινου σώματος ενώ 7.69% στον ελεύθερο χώρο στο μοντέλο AM5. Στο μοντέλο κεραίας AM5 έχουμε αύξηση κατά 20.94% με παρουσία ανθρώπινου ομοιώματος. Αντίστοιχα το Δe , δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στην απόδοση ακτινοβολίας για κάθε μοντέλο κεραίας σε ελεύθερο χώρο και με παρουσία ανθρώπινου ομοιώματος όσο αυξάνεται το επίπεδο γείωσης μειώνεται όπως και στην περίπτωση $f = 2.4$ GHz. Επομένως, όπως και στα 2.4GHz, έτσι και εδώ, η αύξηση του αγωγισμού εδάφους κάνει την κεραία λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία του ανθρώπινου σώματος.



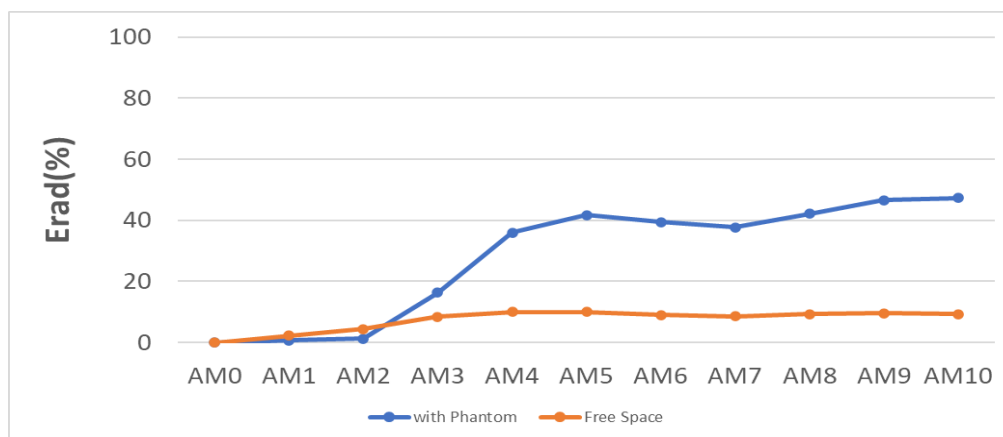
Εικόνα 5.14 Απόδοση Ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=3.6$ GHz

Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα στην Εικόνα 5.15, όπου φαίνεται η επίδραση του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση της κεραίας. Η καμπύλη βρίσκεται συνεχώς σε μία πτωτική τάση. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι, η αύξηση του επιπέδου γείωσης θωρακίζει την κεραία από την παρουσία του ομοιώματος. Συγκεκριμένα η επίδραση του ομοιώματος στην κεραία ΗΜΜΡΑ για $f = 3.6\text{GHz}$ φτάνει στο 11.42% για το μοντέλο AM10, ενώ για το μοντέλο κεραίας AM5 ισούται με 15.33%. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα συντονισμού αντίστοιχα, το ανθρώπινο σώμα επηρεάζει περισσότερο την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας.



Εικόνα 5.15 Επίδραση του Ομοιώματος στην Απόδοση Ακτινοβολίας στα $f=3.6\text{ GHz}$

Στην Εικόνα 5.16 βλέπουμε την αύξηση της απόδοσης ακτινοβολίας ποσοστιαία σε κάθε μοντέλο κεραίας. Είναι ξεκάθαρο πώς με την παρουσία ανθρώπινου σώματος, η αύξηση στην απόδοση ακτινοβολίας αγγίζει το 47.27% ενώ στον ελεύθερο χώρο το 10.08%. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά αντίστοιχες με τα αποτελέσματα για τα μοντέλα κεραίων στα 2.4GHz.



Εικόνα 5.16: Ενίσχυση απόδοσης ακτινοβολίας στον Ελεύθερο Χώρο και με Ομοίωμα στα $f=3.6\text{ GHz}$

5.3 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2 μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα. Η αύξηση του επιπέδου γείωσης ως τεχνική μείωσης του SAR αποτελεί μία αποτελεσματική μέθοδο μείωσης του δείκτη SAR και αύξησης της απόδοσης της κεραίας HMPA. Επιπλέον, αποτελεί μία μέθοδο παρέμβασης στην αρχιτεκτονική της κεραίας που δεν προσθέτει βάρος, δεν αυξάνει το μέγεθος, ούτε το κατασκευαστικό κόστος. Οι συγκεκριμένες παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για να διατηρείται η φορητότητα στην κεραία.

Πιο συγκεκριμένα, για $f = 2.4GHz$, έχουμε μέγιστη μείωση SAR κατά 63.07% και μέγιστη αύξηση στην απόδοση ακτινοβολίας κατά 48.51%, ενώ για $f = 3.6GHz$ έχουμε μέγιστη μείωση του SAR κατά 87.11% και αύξηση στην απόδοση ακτινοβολίας κατά 47.27% (Πίνακας 5.1). Επομένως σε υψηλότερη συχνότητα, το επίπεδο γείωσης προστατεύει πιο αποτελεσματικά το σώμα από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, ενώ η αύξηση σχετικά με την απόδοση ακτινοβολίας είναι περίπου όμοια. Επιπλέον, σε υψηλότερες συχνότητες η επίδραση του ανθρώπινου σώματος είναι πιο υψηλή στην χειροτέρευση της απόδοσης ακτινοβολίας.

Συχνότητα	Μείωση SAR(%)	Αύξηση e_r^{fs} (%)	Αύξηση e_r^{ph} (%)
$f = 2.4GHz$	63.07	15.37	48.51
$f = 3.6GHz$	87.11	10.08	47.27

Πίνακας 5.1 Μέγιστες τιμές επίδρασης αύξησης εδάφους

Επιπλέον, καταγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές για AM5, που αντιστοιχεί σε αύξηση κατά $\lambda/2$ του επιπέδου γείωσης. Γενικά παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται αντίστοιχου επιπέδου αποτελέσματα σε επίπεδο αύξησης της απόδοσης ακτινοβολίας, και σχετικά πιο χαμηλή μείωση του δείκτη SAR, κοντά στο 20% και στις δύο συχνότητες. Αποτελεί όμως μία ενδεδειγμένη λύση, να επιλεγθεί το μοντέλο κεραίας AM5 διότι επιτυγχάνει και ικανοποιητική μείωση του SAR αλλά και αύξηση στην απόδοση ακτινοβολίας, με την αύξηση του εδάφους κατά το ήμισυ.

Συχνότητα	Μείωση SAR(%)	Αύξηση e_r^{fs} (%)	Αύξηση e_r^{ph} (%)
$f = 2.4GHz$	40	14.18	35.95
$f = 3.6GHz$	61.87	10.08	41.78

Πίνακας 5.2 Τιμές για μοντέλο κεραίας AM5

6 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχεδίασε και προσομοίωσε μία φορετή κεραία σε λειτουργία κοντά στο ανθρώπινο σώμα για εφαρμογές 5G, με στόχο τη μελέτη και αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης της με το ανθρώπινο σώμα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε αφενός στις τιμές του SAR οι οποίες είναι απαραίτητο να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλές, και αφετέρου στην απόδοση της κεραίας η οποία πρέπει να είναι η βέλτιστη παρουσία του ανθρώπινου σώματος.

Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν βασικές κεραίες (δίπολο, μονόπολο, μικροταινιακές κεραίες) και σχεδιάστηκαν να λειτουργούν σε συχνότητες $f=2.4\text{GHz}$, και $f=3.6\text{GHz}$. Από αυτές επιλέχθηκαν οι κεραίες μικροταινιακής τεχνολογίας: MPA (on-body communications), HMPA (off-body communications), καθώς ικανοποιούν τις απαιτήσεις των φορετών εφαρμογών. Και οι δύο κεραίες είναι φτηνές και απλές από κατασκευαστικής άποψης, μικρών διαστάσεων και χαμηλού προφίλ, και με χρήση υφασμάτων υλικών, παρέχουν ευελιξία και προσαρμοστικότητα στον χρήστη. Επίσης, και οι δύο διαθέτουν επίπεδο γείωσης, το οποίο με τη σειρά του μπορεί θεμελιωδώς να περιορίσει την απορροφούμενη H/M ακτινοβολία από το σώμα του χρήστη. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η MPA εκπέμπει μακριά από το σώμα, ενώ η HMPA εκπέμπει προς το σώμα.

Στη συνέχεια, οι δυο κεραίες μελετήθηκαν κοντά σε ένα ομοιογενές ανθρώπινο ομοίωμα το οποίο προσομοιάζει τα 2/3 του ανθρώπινου μν. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψε πως η παρουσία του ανθρώπινου σώματος επηρεάζει ιδιαίτερα την ακτινοβολία των κεραίων. Συγκεκριμένα, για την HMPA ακριβώς επειδή ακτινοβολεί προς το ανθρώπινο σώμα για να δημιουργήσει on-body επικοινωνίες, τείνει το ανθρώπινο σώμα να απορροφά μεγαλύτερο ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας, αλλά και τις αυξημένες τιμές του SAR. Αντίθετα η MPA, επειδή ακριβώς ακτινοβολεί μακριά από το σώμα, είναι πιο ανθεκτική στην παρουσία του ανθρώπινου σώματος και παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές SAR.

Με δεδομένο ότι η HMPA είναι πιο ευάλωτη στην παρουσία του ανθρώπινου σώματος, αλλά και αντίστροφα (το ανθρώπινο σώμα επηρεάζεται περισσότερο από την ακτινοβολία της HMPA), η HMPA επιλέγεται ως η τελική κεραία για επιπλέον μελέτη. Σε αυτή την τελική κεραία εφαρμόζεται συγκεκριμένη τεχνική μείωσης του SAR ως αποδοτικότερη (σταδιακή αύξηση διαστάσεων του επιπέδου γείωσης). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως το επίπεδο γείωσης θωρακίζει επιπλέον το σώμα απέναντι στην H/M. Όσο μεγαλύτερη η αύξηση του επιπέδου γείωσης, τόσο μειώνονται οι τιμές SAR (μέγιστη μείωση των $SAR_{2.4\text{GHz}}$ και $SAR_{3.6\text{GHz}}$ ίση με 63% και 87% αντίστοιχα). Επίσης, με την αύξηση του επιπέδου γείωσης επιτυγχάνεται μέγιστη ενίσχυση της απόδοσης ακτινοβολίας της

κεραίας που αγγίζει το 48.51% στα 2.4 GHz, και το 47.27% στα 3.6 GHz. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αύξηση των διαστάσεων του επιπέδου γείωσης δεν επηρεάζει την απόδοση, το μέγεθος, το κόστος, ούτε και το βάρος της κεραίας η προτεινόμενη τεχνική επιβεβαιωμένα θεωρείται ως η αποδοτικότερη καθώς αποτελεί μία φθηνή κατασκευαστικά και απλή τεχνική για τη μείωση του SAR, αλλά και τη διατήρηση της συμπεριφοράς της κεραίας.

Μελλοντικά, η παρούσα διπλωματική και τα αποτελέσματα αυτής θα μπορούσαν να επεκταθούν εργαστηριακά με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού μέτρησης του SAR προκειμένου να μελετηθεί η ευθυγράμμιση των προσομοιώσεων και των μετρήσεων. Σε αυτή την κατεύθυνση, θεωρείται επίσης ενδιαφέρουσα η ανάπτυξη του ομοιώματος των 2/3 του ανθρώπινου μν με σκοπό την διερεύνηση κατάλληλης μεθοδολογίας χαρακτηρισμού των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Τέλος, η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με τη μελέτη της αλληλεπίδρασης κεραίας-ανθρώπινου σώματος σε υψηλότερες συχνότητες (mmWaves) ώστε και η επιστημονική κοινότητα να έχει επαρκή στοιχεία να κατευνάσει ενδεχόμενες ανησυχίες γύρω από την χρήση δικτύων 5G.

Βιβλιογραφία

- [1] Π.Αλεβιζάκη «Καταστολή Η/Μ παρεμβολών σε δίκτυα 5G με Τεχνολογίες Massive MIMO Κεραίων και Τεχνικές Πολυτονικής Πρόσβασης» Διπλωματική, ΕΜΠ Αθήνα 2020
- [2] K. Pavithradevi , K. Ramya, Nandhini. S, Punitha History Of The Body Area Networks.. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) Volume 5, Issue 2, November 2018.
- [3] D. Kumar Das “Study of Dual Band Wearable Antennas Using Commonly Worn Fabric Materials” North South Universtiy Bangladesh 2012
- [4] "History of Wireless". Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health. Retrieved 2007-02-17.
- [5] Aleksandr Ometov, Viktoriia Shubina, Lucie Klus, A Survey on Wearable Technology: History, State-of-the-Art and Current Challenges, Computer Networks, Volume 193,2021,
- [6] Jones, Richard & Katzis, Konstantinos. (2018). 5G and wireless body area networks. 373-378. 10.1109/WCNCW.2018.8369035.
- [7] Sassan Ahmadi, 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards, Academic Press, 2019
- [8] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN, accessed 20 May 2021
- [9] Y. I. Ashyap et al., "An Overview of Electromagnetic Band-Gap Integrated Wearable Antennas," in IEEE Access, vol. 8, pp. 7641-7658, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2963997.
- [10] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith and A. Jamalipour, "Wireless Body Area Networks: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 3, pp. 1658-1686, Third Quarter 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.121313.00064.
- [11] “IEEE standard for local and metropolitan area networks: Part 15.6: Wireless body area networks,” IEEE submission, Feb. 2012
- [12] Arefin, M. ,Ali, M. and Haque, A. (2017) Wireless Body Area Network: An Overview and Various Applications. *Journal of Computer and Communications*, **5**, 53-64.
- [13] URL: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jcc.2017.57006>, accessed 21 May 2021

- [14] S. Rao et al., "Miniature implantable and wearable on-body antennas: towards the new era of wireless body-centric systems [antenna applications corner]," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 271-291, Feb. 2014, doi: 10.1109/MAP.2014.6821799.
- [15] Latré, Benoît & Braem, Bart & Moerman, Ingrid & Blondia, Chris & Demeester, Piet. (2011). A Survey on Wireless Body Area Networks. *Wireless Networks*. 17. 1-18. 10.1007/s11276-010-0252-4.
- [16] C. A. Balanis, *Antenna theory*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., 2005
- [17] Κ.Ανθής «Σχεδίαση κεραίας ενσωματωμένης σε αισθητήρα περιβαλλοντικών μετρήσεων για εφαρμογές διαδικτύου των αντικειμένων ΙΟΤ» Πάτρα 2019
- [18] K. N. Paracha, S. K. Abdul Rahim, P. J. Soh and M. Khalily, "Wearable Antennas: A Review of Materials, Structures, and Innovative Features for Autonomous Communication and Sensing," in *IEEE Access*, vol. 7
- [19] R. Salvado, C. Loss, R. Gonçalves and P. Pinho «Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey», *Sensors*, Vol.12, pp. 15842-15857, 15 November 2012.
- [20] Tsolis, Aris & Whittow, Will & Alexandridis, Antonis & Vardaxoglou, J.. (2014). Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities. *Electronics*. 3. 314-338. 10.3390/electronics3020314.
- [21] URL: https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields#tab=tab_1, accessed 3 June 2021
- [22] URL: <https://www.fcc.gov/>, accessed 21 May 2021
- [23] URL: <https://www.icnirp.org/>, accessed 3 June 2021
- [24] https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields#tab=tab_1
- [25] Κ. Ψαθάς «Σχεδίαση Εμφυτεύσιμων Κεραίων Διπλής Ζώνης για Ιατρική Τηλεμετρία», Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 2012
- [26] HFSS Ver. 11.0, Ansoft Corp, 2007
- [27] K. Koski, E. Moradi, T. Björninen, L. Sydänheimo, Y. Rahmat-Samii, and L. Ukkonen «On-Body Antennas: Towards Wearable Intelligence», *General Assembly and Scientific Symposium*, 2014
- [28] K. R. Carver και J. W. Mink, K. R. Carver, James W. Mink, « Microstrip Antenna Technology», North Carolina: Defense Technical Information Center, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.29, pp 2-24.

- [29] Ali, Usman & Ullah, Sadiq & Khan, Jalal & Shafi, Muhammad & Kamal, Babar & Basir, Abdul & Flint, James & Seager, R.D.. (2016). Design and SAR Analysis of Wearable Antenna on Various Parts of Human Body, Using Conventional and Artificial Ground Planes. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 12. 317-328. 10.5370/JEET.2017.12.1.317.
- [30] Paraskevopoulos, Anastasios & Vardaxoglou, John & Alexandridis, Antonis & Whittow, Will & Fonseca, Duarte & Seager, R.D.. (2016). Higher-mode Textile Patch Antenna with Embroidered Vias for On-body Communication. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 10. 10.1049/iet-map.2015.0650.
- [31] M. A. Seimeni, A. Tsolis, A. A. Alexandridis and S. A. Pantelopoulos, "The Effects of Ground-Plane of a Textile Higher Mode Microstrip Patch Antenna on SAR," 2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/iWAT48004.2020.1570615365.
- [32] LeVine, Susan. (June 2009). The Active Denial System. A Revolutionary, Non-lethal Weapon for Today's Battlefield. 17.
- [33] T. Wu, T. S. Rappaport and C. M. Collins, "Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for Millimeter Waves in Wireless Communications," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 2, pp. 65-84, March 2015, doi: 10.1109/MMM.2014.2377587
- [34] Y. Okano, K. Ito, I. Ida and M. Takahashi, "The SAR evaluation method by a combination of thermographic experiments and biological tissue-equivalent phantoms," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 11, pp. 2094-2103, Nov. 2000, doi: 10.1109/22.884200.
- [35] Y. M. Gimm, "SAR value variation by ambient temperature of the SAR measurement system," 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008, pp. 124-127, doi: 10.1109/APEMC.2008.4559827.
- [36] T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada and S. Uebayashi, "Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 1, pp. 136-140, Jan. 1993, doi: 10.1109/22.210240.
- [37] Balzano, Q., O. Garay, and T. Manning, "Electromagnetic energy exposure of simulated users of portable cellular telephones," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 44, 390–403, Aug. 1995.

- [38] Maria A. Seimeni, Aris Tsolis, Antonis A. Alexandridis, and Stelios A. Pantelopoulos, "Human Exposure to EMFs from Wearable Textile Patch Antennas: Experimental Evaluation of the Ground-Plane Effect," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 92, 71-89, 2021.
- [39] "IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques," in *IEEE Std 1528-2013 (Revision of IEEE Std 1528-2003)*, vol., no., pp.1-246, 6 Sept. 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6589093.
- [40] Ολυμπία Καραδήμα «Προσομοιωτική εκτίμηση της ανθρώπινης έκθεσης σε πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.» Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Μάρτιος 2017
- [41] Seimeni, M. & Tsolis, Aris & Alexandridis, A.A. & Pantelopoulos, S.A.. (2018). Mitigation of End-User's Exposure to EMF of Wearable Antennas through Ground-Plane Interventions. 27 (6 pp.)-27 (6 pp.). 10.1049/cp.2018.1448.
- [42] K. Ito, "Human Body Phantoms for Evaluation of Wearable and Implantable Antennas," *The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007*, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1049/ic.2007.1117.
- [43] Ito K., Lin CH., Lin HY. (2015) Evaluation of Wearable and Implantable Antennas with Human Phantoms. In: Chen Z. (eds) *HandBook of Antenna Technologies*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-75-7_83-1
- [44] URL: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php#inizio>, accessed 18 April 2021
- [45] Tsolis, A., A. Paraskevopoulos, A. A. Alexandridis, W. G. Whittow, A. Chauraya, and J. C. Vardaxoglou, "Design, realisation and evaluation of a liquid hollow torso phantom appropriate for wearable antenna assessment," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 11, No. 9, 1308–1316, 2017.
- [46] Mobashsher, A. T. and A. M. Abbosh, "Artificial human phantoms: Human proxy in testing microwave apparatuses that have electromagnetic interaction with the human body," *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 16, No. 6, 42–62, Jul. 2015.